

CT-30

Transmission Line Trainer  
Laboratory Manual

전송선로실습



부천대학교

**부천대학교 정보통신공학과**



## 이 메뉴얼에 대하여...

### 소 개

통신 시스템의 입력 신호는 정보 신호이다. 정보 신호는 도체선로나 공기, 물, 진공이나 광섬유 같은 매개체를 통해서 이동된다. 전송 선로의 원리는 도체선로에 적용되는데, 신호가 방사되는 무선 전송 시스템과는 달리 케이블을 따라 전송된다.

### CT-30 실험 메뉴얼

실질적인 전송 선로에 대하여 알아보기 위해서는 CT-30 전송선로 실습용 기구 메뉴얼을 주의해서 볼 필요가 있다. 이 책은 다음 주제 영역에 따라서 단계적으로 학습할 수 있도록 구성되어 있다.

- 전송 선로 실습 장치 소개
- 감쇄 (Attenuation)
- 펄스 입력을 이용한 선로의 지연
- 펄스 입력을 이용한 선로의 매칭
- 리액턴스 단락
- 통신에서의 잡음
- 펄스의 AC 커플링
- 매칭과 주파수 응답
- 정재파 (Standing Wave)
- Transformer 를 이용한 매칭
- 저역 통과 필터 효과
- 발진기로서의 50Ω 선로
- Time Domain Reflectometry (TDR)

실험 메뉴얼의 실용적인 면은 전송 선로 실습 장치를 사용한다는 것이다. 이것은 LJ Technical System 에서 제공되는 광범위한 아날로그와 디지털 통신 실습장비들 중의 하나이다.

실험 메뉴얼의 각 장을 학습 목표에 따라 공부하게 될 것이고, 학습 진행 상황은 각 장별로 이론, 실습 그리고 학습자 평가에 의해 이루어진다.

### CT-30 실습 메뉴얼을 공부하기 위해 필요한 것은 ?

1. CT-30 실습 메뉴얼
2. CT-30 학습장
3. 전송 선로 실습 장치
4. 2 채널 오실로스코프
5. +5V, ±12V 의 전압과 1A 의 전류를 출력하는 전원  
(LJ Technical Systems PS2 IC Power 60, PS4 System Power 90 이나 동급의 전원)
6. 출력 저항이 50Ω 인 함수 발생기 (LJ Technical Systems FG2 나 동급의 것)
7. 4mm의 패칭 선 세트 (LJ Technical Systems 주문 코드 CS1)
8. 디지털 멀티미터 (LJ Technical Systems DMI 나 동급의 것)
9. CT-8 오디오 출력 모듈 (임의)

### 학습장 및 Notes

주어진 학습장은 당신의 학습에 필수적인 부분이다.

- 관련이론을 기록한다.
- CT-30 실습 메뉴얼의 실습부분에 대한 결과를 그릴 수 있는 공간과 눈금.
- 각 장마다 CT-30 실험 메뉴얼 (CT-30 Laboratory Manual) 이라고 쓰인 페이지.

이것은 당신의 이해를 도와줄 개인적인 필기를 할 수 있는 공간을 제공한다.

## 컴퓨터에 의한 학습 평가

만약 실험이 DIGIAC-3000 컴퓨터가 기본이 된 실습 시스템으로 이루어 졌다면, 그 시스템은 당신이 실험 메뉴얼의 각 장을 공부할 때 실험의 진척도를 자동적으로 보여주는데 이용될 것이다. 당신에게 이런 기능을 사용할 것을 요청했을 때 결과를 질문에 맞게 D-3000 데이터 단말기나 학생에게 주어진 D-3000 기본 단위의 제어장치를 사용해서 대답할 수 있어야 한다.

이것을 상기시켜주기 위해서  표시가 질문과 함께 인쇄되어 있을 것이고 질문에 대해 적절한 답이 필요하다.

## 시작하면서

● 이 학습 코스를 시작하기 전에 실습 메뉴얼과 학습장을 잠깐 살펴봐야 한다. 이것은 CT-30 학습 프로그램과 친해지는데 도움을 줄 것이다.

● CT-30 실험 메뉴얼을 시작할 준비가 되었다고 생각할 때 이 책의 1 페이지로 돌아가 보라. 즐겁고 가치 있는 학습 경험이 되길 바란다.



- 목 차 -

단 원	내 용	페이지
Chapter 1	전송 선로 실습 장치의 소개 -----	1
Chapter 2	감쇄 (Attenuation) -----	14
Chapter 3	펄스입력을 이용한 선로의 지연 -----	26
Chapter 4	펄스입력을 이용한 선로의 매칭 -----	36
Chapter 5	리액턴스 단락 -----	49
Chapter 6	통신에서의 잡음 -----	57
Chapter 7	펄스의 AC 커플링 -----	67
Chapter 8	매칭과 주파수 응답 -----	76
Chapter 9	정재파 (Standing Wave) -----	86
Chapter 10	Transformer 를 이용한 매칭 -----	99
Chapter 11	저역 통과 필터 효과 -----	110
Chapter 12	발전기로써의 50Ω 선로 -----	117
Chapter 13	Time Domain Reflectometry (TDR) -----	125



## 단원 1. 전송 선로 실습 장치 소개

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 전송 선로의 각 블록의 기능을 이해한다.
- 전송 선로 실습기의 다양한 블록에서의 스위치의 작동과 조작을 설명한다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기



1.1 전송 선로 실습기의 블록도

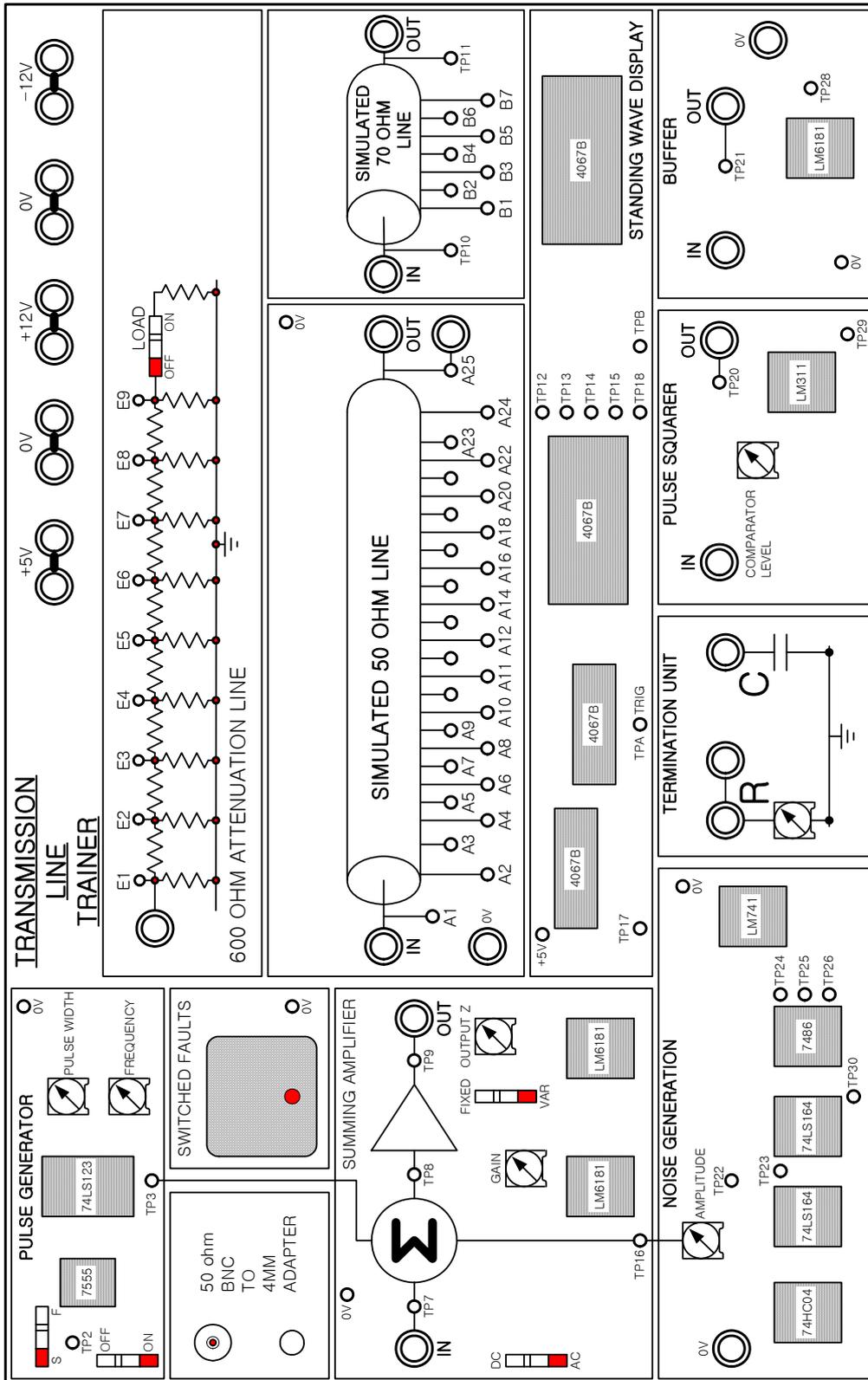


그림 2. 전송 선로 실습기의 구조도



1.2 전송 선로 실습기의 블록들

전송 선로 실습기는 13 개의 블록으로 나뉘어져 있다.

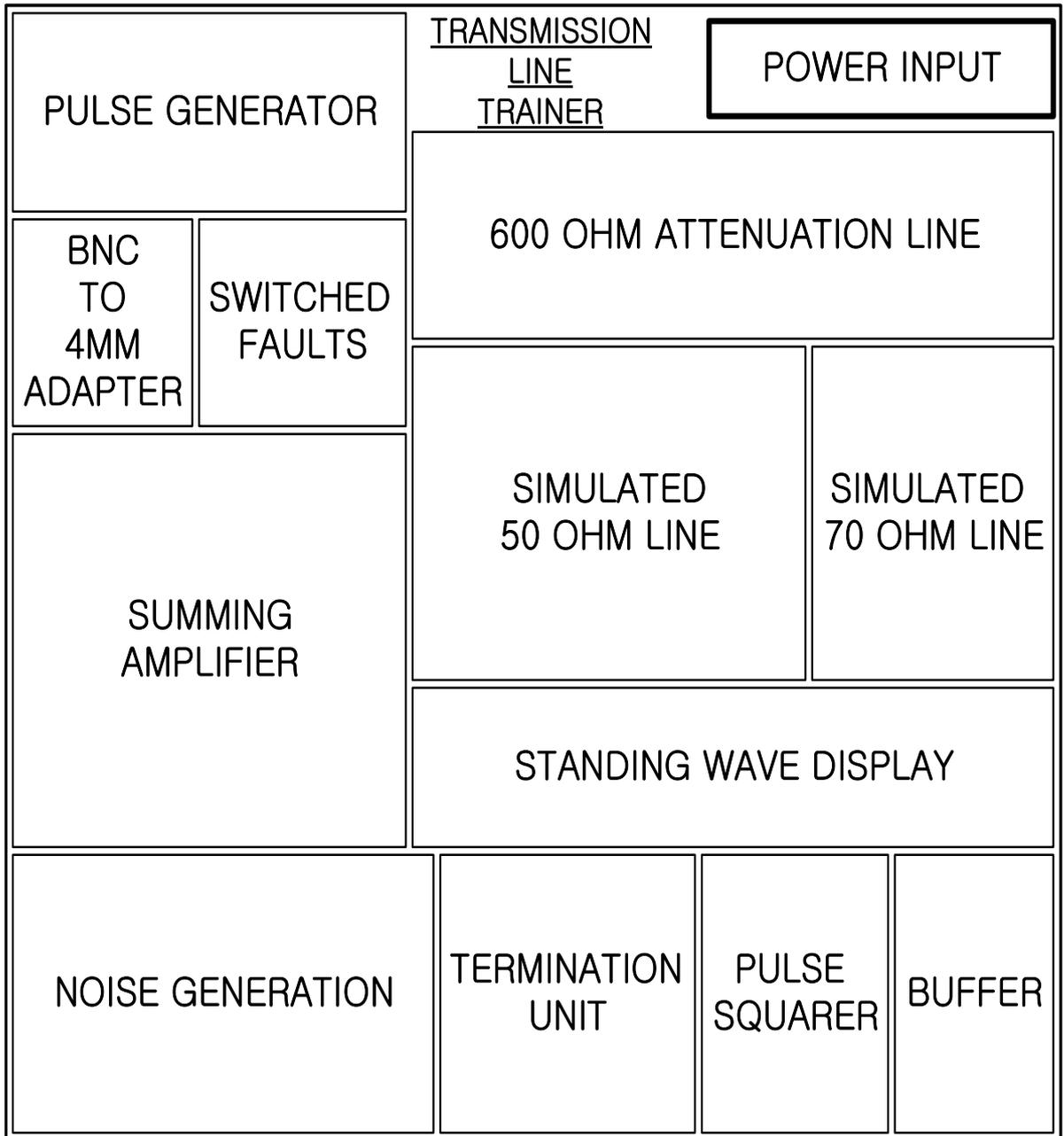


그림 3. 전송 선로 실습기의 블록도

각 블록의 기능은 앞으로 설명될 것이다.



전원 입력

이 블록은 전송 선로 실습기에 전원을 공급하는데 필요한 전기적인 입력 단자이다. LJ Technical Systems의 "IC Power 60"이나 "System Power 90" 모델이 권장할만한 전원 공급기이다.

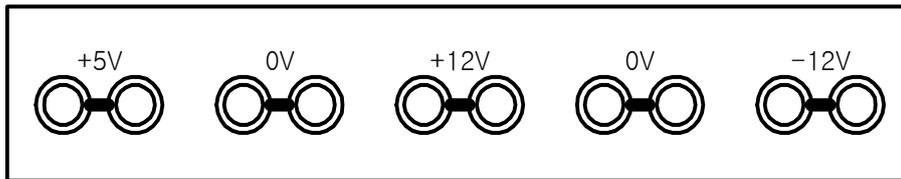


그림 4. 전송 선로 실습기의 전원 공급기

1.2a 전송 선로 실습기에는 0V의 연결 이외에 어떤 것이 필요한가?

- A -5V 전원 공급기
- B +5V 와 +12V 의 전원 공급기
- C +5V, -5V, +12V 그리고 -12V 의 전원 공급기
- D +5V, +12V 그리고 -12V 전원 공급기

600Ω 감쇄 선로

이 간단한 회로는 전송선로가 길이에 따라 동일한 감쇄 특성을 가지는 것을 설명하기 위해 만들어졌다. 이 선로는 신호를 전달하는 도체와 접지 또는 되돌아오는 선로의 병렬저항을 모의실험할 수 있다. 이 병렬 저항은 일반적으로 계산을 쉽게 하기 위해서 컨덕턴스의 단위로 나타낸다. 부하단의 스위치는 매칭된 600Ω의 부하를 감쇄 선로의 끝부분에 연결되게 해 준다.

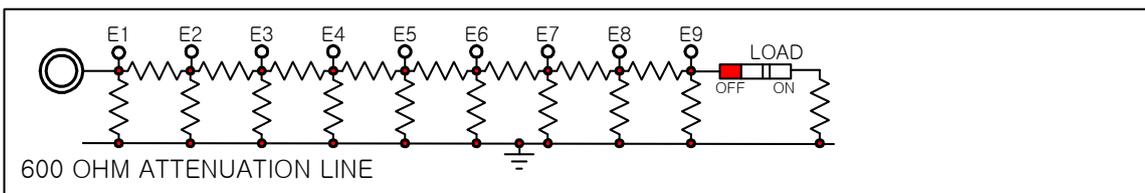


그림 5. 전송 선로 실습기의 600Ω 감쇄 선로



50Ω 선로

이 블록은 50Ω의 특성 임피던스를 인덕터와 커패시터의 연결을 이용해서 모의실험 한다. 이 모의실험 선로는 길이에 따라 각 지점에서의 신호를 모니터해 주기 위해서 24개의 부분으로 나누어져 있다. 이 실험 메뉴얼에서 대부분은 이 표준 전송 선로를 이용해서 진행될 것이다.

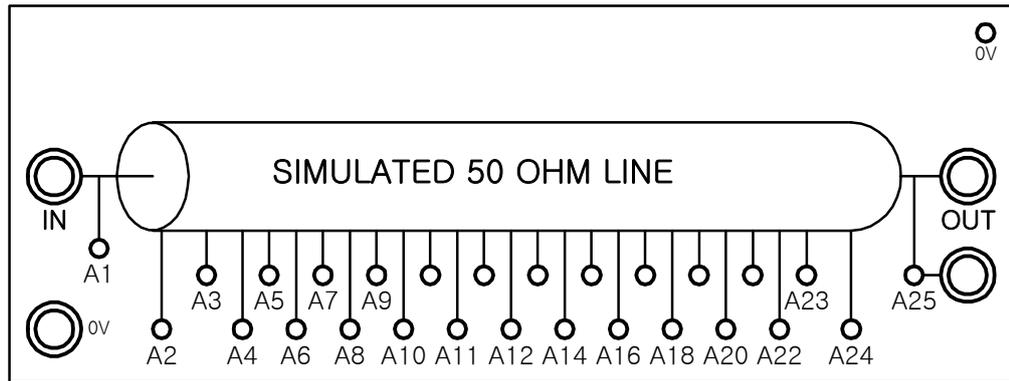


그림 6. 전송 선로 실습기의 50Ω 선로

70Ω 선로

이 블록은 70Ω의 특성 임피던스를 가지는 전송 선로이며, 인덕터와 커패시터 (각각 10μH와 2nF)로 연결되어 있다. 이 선로는 8개의 부분으로 나누어져 있으며, 임피던스의 매칭을 설명하기 위한 전송 선로로 설계되어 있다.

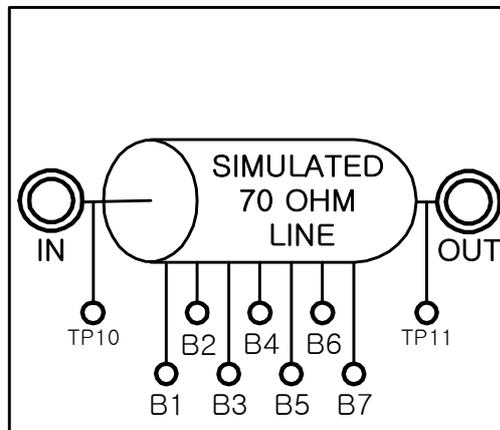


그림 7. 전송 선로 실습기의 70Ω 선로



정재파 표시회로

정재파 표시회로는 오실로스코프를 이용해서 50Ω 과 70Ω 선로에 있는 정재파를 측정하게 해주는 회로이다.

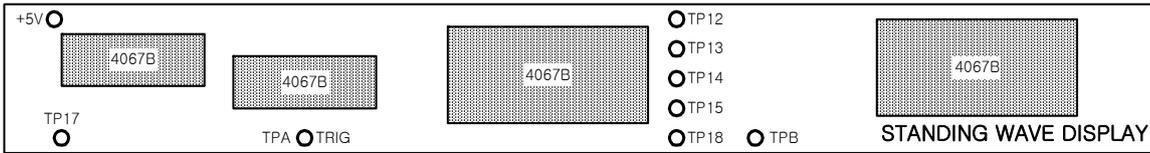


그림 8. 전송 선로 실습기의 정재파 표시회로

단락 블록

이 블록은 100Ω 의 가변 저항과 커패시터로 구성되어 있으며, 전송 선로의 끝 부분에서의 각기 다른 단락 조건을 실험하는데 이용된다.

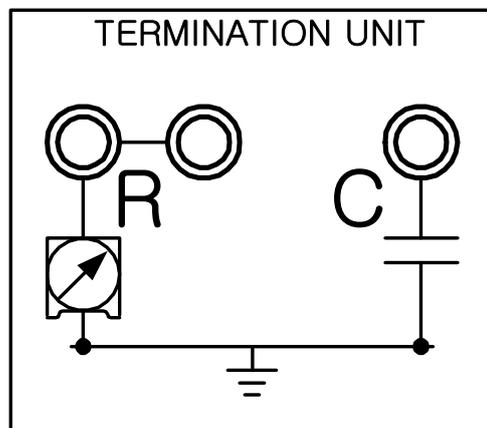


그림 9. 전송 선로 실습기의 단락블록

펄스 발생기

이 펄스 발생기 회로는 전송을 위해 전송 선로를 따라서 연속 디지털 펄스파를 발생시킨다. 펄스의 주파수와 진폭은 FREQUENCY 와 PULSE WIDTH 로 조절이 가능하게 구성되어 있다.



Slow/Fast(S/F) 스위치는 두 개의 주파수 중 하나를 선택하게 해 준다. 펄스 발생기의 출력은 서밍 증폭기의 입력단에 직접적으로 연결된다. ON/OFF 스위치는 펄스 발생기가 필요하지 않을 때 회로의 출력이 서밍 증폭기와 끊어지도록 해 준다.

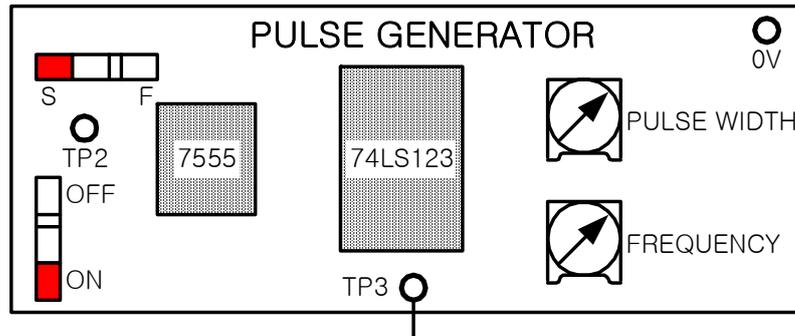


그림 10. 전송 선로 실습기의 펄스 발생기

### 잡음 발생기

이 블록은 잡음이 전송 선로를 통해서 수신 신호에 어떤 영향을 미치는가에 대해 보여주기 위한 것이다. 회로는 광대역의 전기적 잡음을 발생시키며, AMPLITUDE 조절에 의해서 크기가 조정된다. 잡음 발생 회로의 출력은 서밍 증폭기의 입력단으로 연결된다. AMPLITUDE 조절 장치가 반시계 방향으로 최대한 돌아가 있을 때 잡음이 서밍 증폭기로 들어가지 않는다.

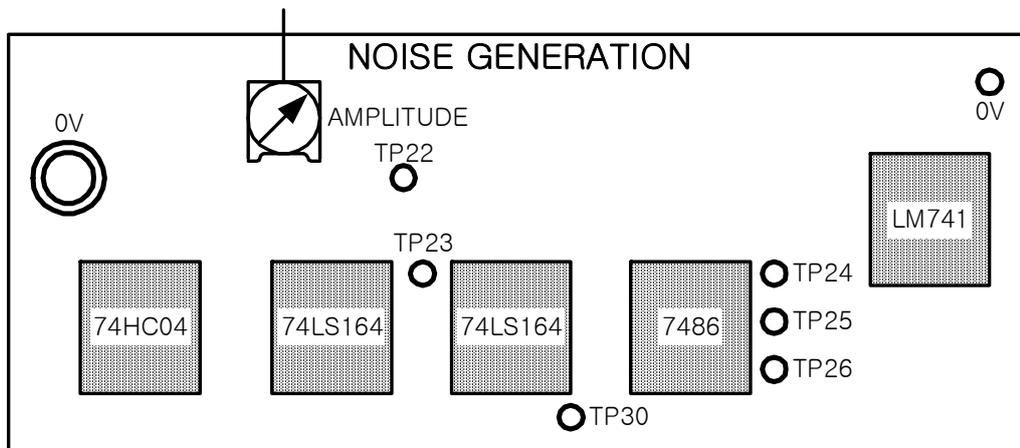


그림 11. 전송 선로 실습기의 잡음 발생기



서밍 증폭기 (Summing Amplifier)

서밍 증폭기는 IN 소켓에 입력된 전압을 펄스 발생기와 잡음 발생 회로로부터 나온 신호에 추가시킨다. 그 결과 전압은 서밍 증폭기에 의해서 증폭되고, 전압 이득은 GAIN 조절기에 따라서 약 +1V 부터 +9V 까지 이르게 된다. 최종 출력 전압은 OUT 소켓에서 나타나는데 이것은 전송 선로를 구동하는데 쓰인다.

서밍 증폭기의 출력 임피던스는 50Ω 에 맞춰져 있거나 FIXED/VARIED 스위치에 의해서 0Ω에서 100Ω 사이에서 조절 가능하다. 스위치가 VARIED 위치에 있을 때, 서밍 증폭기의 임피던스는 OUTPUT Z 조절에 의해서 조절이 가능하다.

DC/AC 스위치가 DC 위치에 있을 때, 서밍 증폭기의 입력단에서 나타나는 DC 성분은 증폭되고 OUT 소켓에 나타난다. 만약 이 스위치가 AC 위치에 있을 때는 DC 성분은 서밍 증폭기의 출력단에서 제거된다.

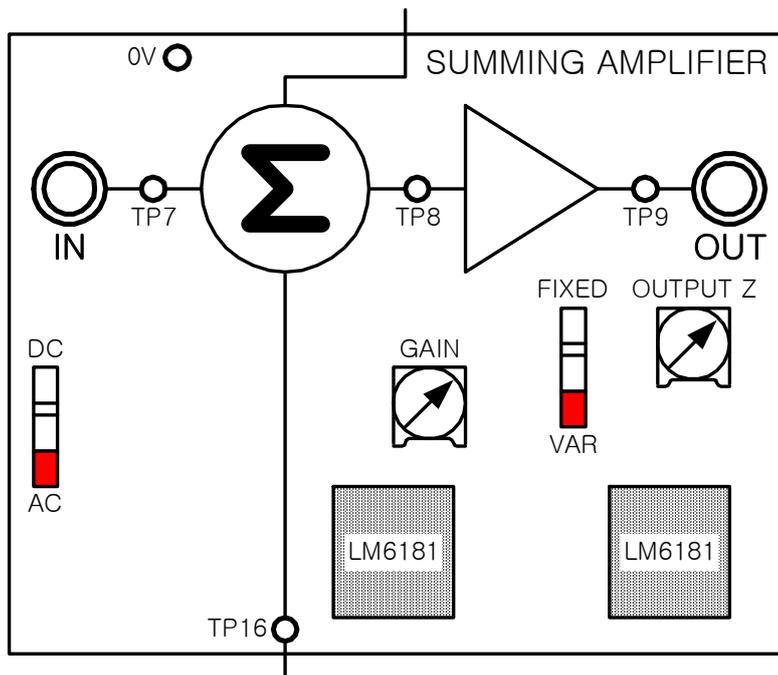


그림 12. 전송 선로 실습기의 서밍 증폭기

사각펄스 회로 (Pulse Squarer)

이 블록은 전송 선로를 통과하면서 왜곡된 디지털 펄스의 가장자리를 사각화하는 것이다.

이 블록은 IN 소켓에서 나타난 전압과 COMPARATOR LEVEL 조절기에 의해 설정된 조정 전압



을 비교한다. '1' 이라는 논리 전압 (+5V) 은 만약 IN소켓의 전압이 분압계에 의해 조절된 전압 수위보다 높게 나타날 때 OUT 소켓에서 발생되며, 반대로 '0' 이라는 논리 전압 (0V) 은 IN 소켓의 전압이 분압계에 의해 조절된 전압 수위보다 낮게 나타날 때 OUT 소켓에서 나타난다.

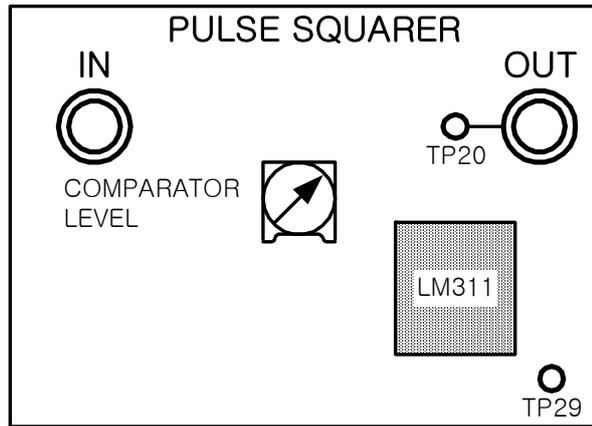
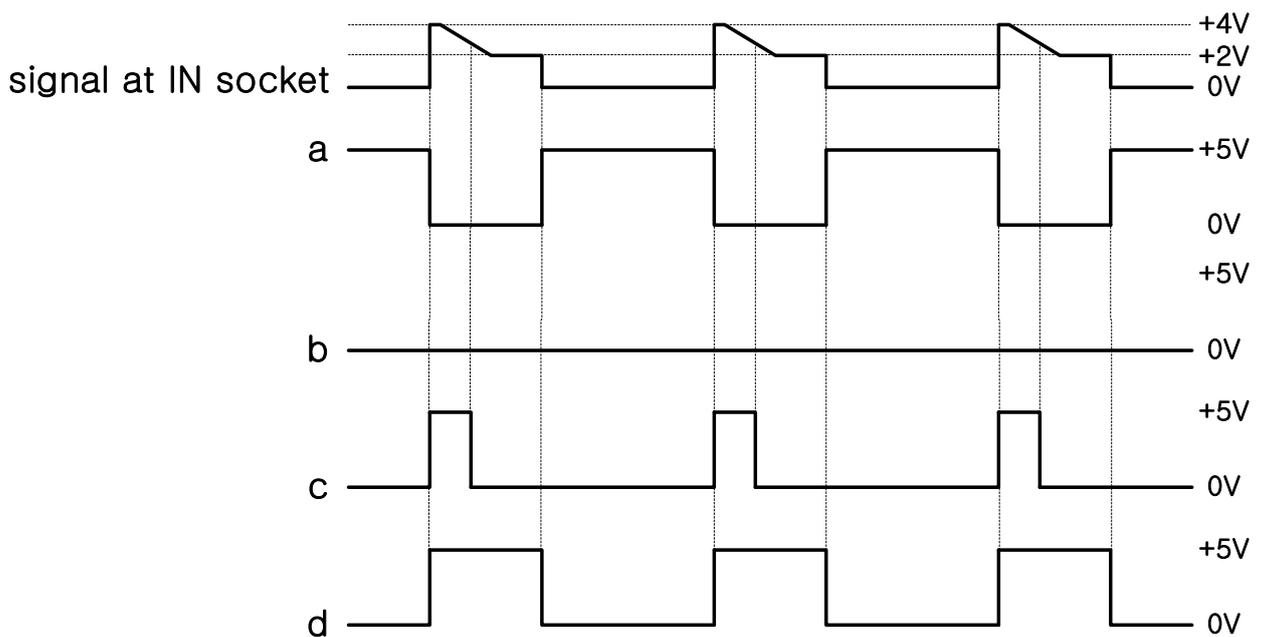


그림 13. 전송 선로 실습기의 사각펄스 회로

1.2b 아래 신호는 펄스 squarer 회로의 IN 소켓에서 나타난 신호이다. 만약 COMPARATOR LEVEL 에 의해 조정된 DC 전압이 +1.5V 일 때, OUT 소켓에서 나타나는 신호를 가장 잘 그린 것은?

- A a       B b       C c       D d



1.2c 질문 1.2b에서 COMPARATOR LEVEL 조절에 의해서 조정된 전압이 +3V 일 때, 위의 네 보기 중 OUT 소켓에서의 새로운 신호를 가장 잘 그린 것은?

- A a       B b       C c       D d

### 버퍼

버퍼는 높은 입력 임피던스와 낮은 출력 임피던스 (50Ω) 을 가진 단위 이득 증폭기이다. 이것은 전송 선로의 끝에 도달하는 아날로그 신호를 완충시켜 주는데 사용된다.

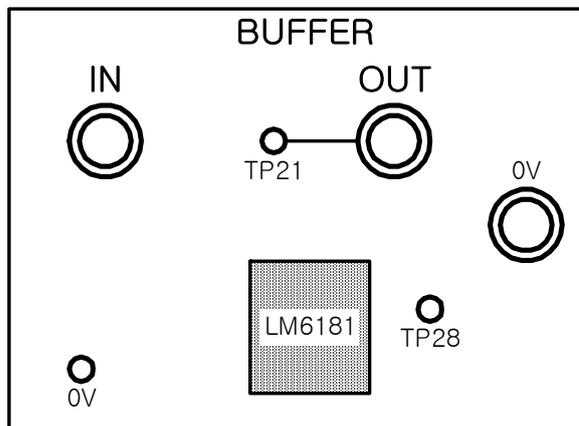


그림 13. 전송 선로 실습기의 버퍼

### 50Ω-4mm BNC 어댑터

이 블록은 신호 발생기가 BNC-BNC 케이블에 의해서 전송 선로 실습기에 연결되도록 해 주는 부분이다. 일단 연결이 되면 4mm 출력 소켓은 신호 발생기 출력이 다른 전송선로 실습기의 회로를 통해서 연결이 되도록 해 주고, 4mm 리드선에 의해서 연결이 이루어지도록 한다.

물론 신호 발생기의 리드가 이미 4mm 소켓에서 단락 되었다면 4mm 어댑터에 BNC 를 이용할 필요가 없다. 왜냐하면 신호 발생기를 전송 선로 실습기의 개별 회로에 직접 연결할 수 있기 때문이다.



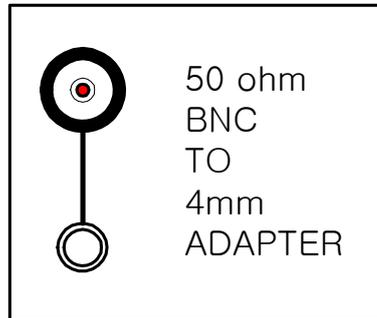


그림 14. 전송 선로 실습기의  
50Ω-4mm BNC 어댑터

### 폴트 스위치 (Switched Faults)

폴트 스위치는 잠금 덮개의 아래에 숨겨진 여덟 개의 스위치에 의해서 전송 선로의 회로에 입력된다. 제공된 열쇠를 이용하여 덮개를 열어 폴트를 입력할 수 있다.

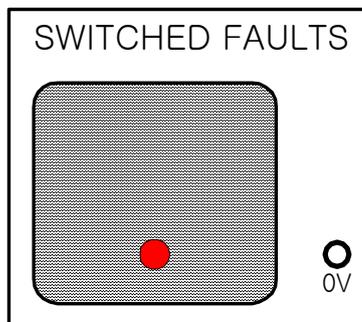


그림 15. 전송 선로 실습기의  
폴트 스위치

Notes :

---

---

---

---







## 단원 2. 감쇄 (Attenuation)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 600Ω 감쇄 선로를 이용해서 전송 거리와 감쇄 사이의 관계를 알아볼 수 있다.
- 전송 선로를 따라서 생기는 감쇄를 데시벨 (dB) 과 Neper 의 로그 기호 단위로 나타낸다.
- 전송 선로의 특성 임피던스의 의미를 이해한다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선 셋
- 오실로스코프
- 함수 발생기
- 디지털 멀티미터



## 2.1 소개

이 단원에서는 600Ω 선로의 일정한 감쇄를 알아본다. 이 선로는 50Ω 과 70Ω 선로의 경우와는 다른 두 성분 (인덕터와 커패시터) 을 가지고 있다.

DC 와 AC 신호의 경우에 대하여 살펴 볼 것이며, 600Ω 선로를 따라 전송 선로의 고유한 감쇄를 측정할 것이다.

이 실험 매뉴얼의 실습을 수행하기 전에 사용되는 모든 전기 장비가 꺼진 상태여야 한다.

- 사각형의 검은 블록은 작업을 수행했다는 것을 나타낸다.

## 2.2 실습

첫 번째 실습은 어떻게 DC 전압이 600Ω 선로를 따라서 어떻게 감쇄되는가를 관찰하는 것이다.

- 전원 공급기를 그림 16. 에서와 같이 전송 선로 실습기에 연결하라.

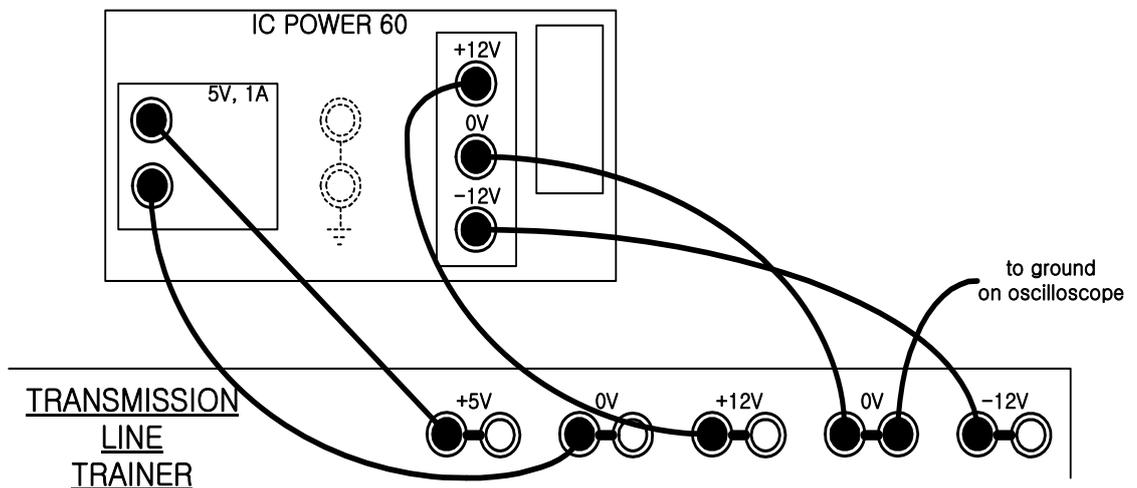


그림 16. 전원연결

- 오실로스코프의 접지를 전송 선로 실습기의 0V 에 연결하라.

- 전원 공급기를 켜라.



- 600Ω 선로의 출력을 +5V 에 연결하라.

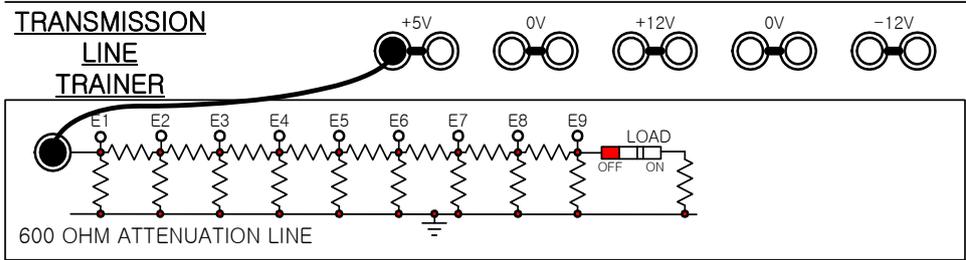


그림 17. 실험장치의 구성

- LOAD 스위치가 ON 상태인지 확인하라.
- E1 에서 E9 까지 전압계를 사용하여 전압을 측정하고 결과를 표 2.1. 에 기록하라.

표 2.1. 각 지점에서 측정된 DC 전압

Test Point	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Voltage									

- 그림 18. 의 도표에 측정된 결과를 그래프로 작성하라.
- 그래프의 모양을 설명하라. 이 모양은 선로를 따라서 나타난 감쇄와 동일한 결과이다.

---



---



---



---



---



---



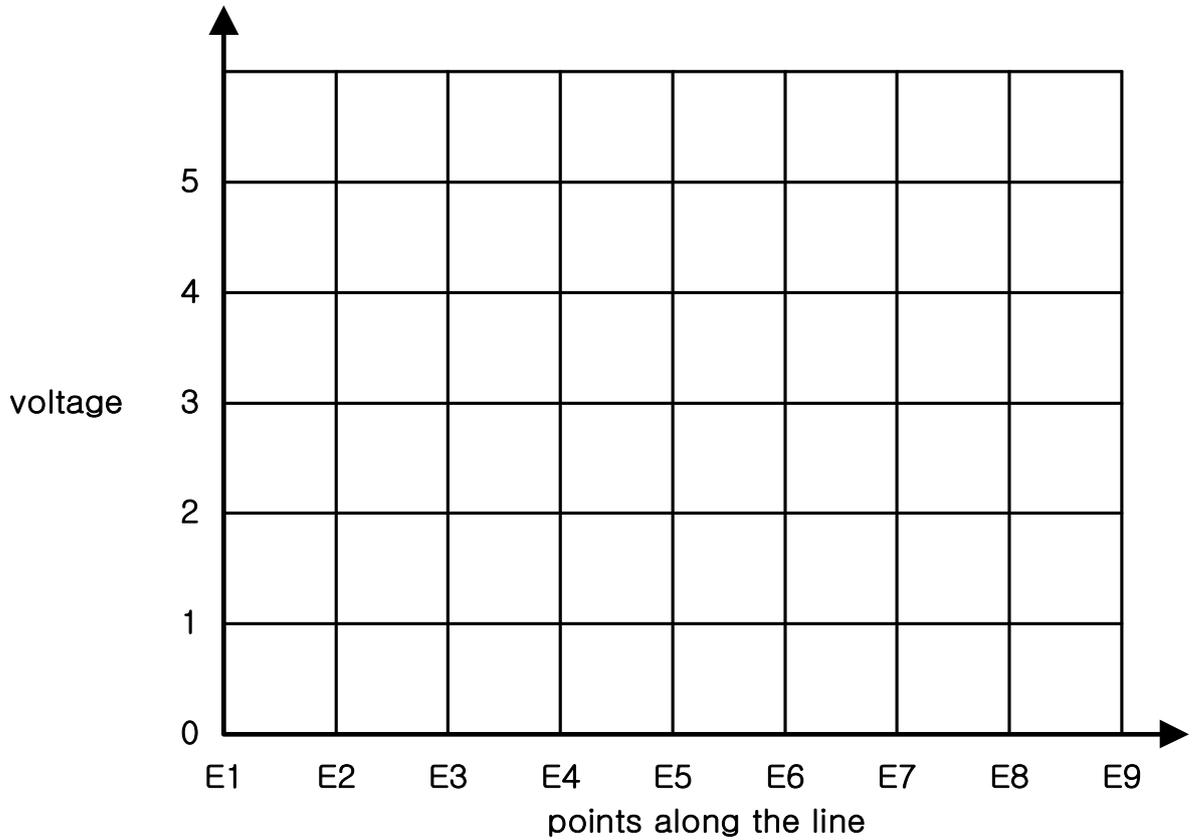


그림 18. DC 입력전압의 감쇄특성

☞ 2.2a 어떤 것이 그래프의 모양과 가장 유사한가?

- A 증가 직선
- B 감소 직선
- C 지수 증가
- D 지수 감소

■ 전원 공급기를 꺼라.



2.3 감쇄

감쇄는 종종 Nepers 로 나타낸다. 전압비  $\frac{V_{in}}{V_{out}}$  을 Neper ( $\alpha$ ) 로 나타내기 위해서, 다음 공식을 따른다.

$$\alpha = \ln\left(\frac{V_{in}}{V_{out}}\right)$$

여기서,  $\ln$  은 자연 로그이다.

감쇄는 데시벨로도 나타내어진다. (dB)

$$dB = 20 \log_{10}\left(\frac{V_{in}}{V_{out}}\right)$$

여기서,  $V_{out}$  이 출력 전압이고,  $V_{in}$  이 입력 전압이다.

Neper 를 데시벨로 나타내기 위해서는 8.68 을 곱한다. Neper 나 데시벨은 로그 단위이다. 로그 단위를 이용하는 것은 감쇄를 표현하기에 좋다. 왜냐하면 전송 선로의 감쇄를 선형의 산술적 계산보다 로그 단위를 사용하면 더 쉽게 계산할 수 있기 때문이다. 그래서 100m 당 0.1 Neper 의 감쇄율을 가진 케이블은 200m 일 때 0.2 Neper 의 감쇄율을 가지고, 300m 일 때는 0.3 Neper 의 감쇄율을 가지게 되는 것이다.

☞ 2.3a 2.2 에서 테스트 포인트 E3 과 E4 사이에서의 감쇄를 Neper 로 계산하고 기입하라.

---

---

---

---

---



☞ 2.3b 2.2 의 실습에서 E7 과 E8 사이에서의 감쇄를 Neper 로 계산하고 기입하라.

---

---

---

☞ 2.3c 만약 케이블이 10m 당 0.02 Neper 의 감쇄율을 가지고 있다면 1km 의 케이블에서의 감쇄는 얼마인가?

- A) 0.2 Nepers
- B) 2 Nepers
- C) 200 Nepers
- D) 20 Nepers

☞ 2.3d 0.7 Neper 를 데시벨로 계산하고 값을 기입하라.

---

---

---

## 2.4 실습

실습 2.2 에서 DC 전압이 선로를 따라서 어떻게 감쇄하는 것을 알아보았다. 감쇄 선로가 저항으로 이루어져 있다면 선로에는 리액턴스 성분이 없다. 다음은 +5V 전원 공급기 대신에 오실로스코프로 신호를 관찰하면서 신호 발생기를 사용해서 실험을 계속할 수 있다.

■ 실습 2.2 에서와 같이 전원 공급기를 연결하라.

■ 전원 공급기를 켜라.



- 신호 발생기의 출력을 600Ω 선로의 입력에 연결하라.
- 오실로스코프를 이용하여 첨두 전압이 5V 이고, 주파수가 1kHz 인 사인파가 나오도록 입력을 설정하라. (E1 에서)
- 오실로스코프를 이용하여 E1 에서 E9 까지의 측정된 신호의 전압을 표 2.2 에 기록하라.

표 2.2. 각 지점에서 측정된 AC 전압

Test Point	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Voltage									

- 그림 19. 에 결과를 그래프로 나타내어라.

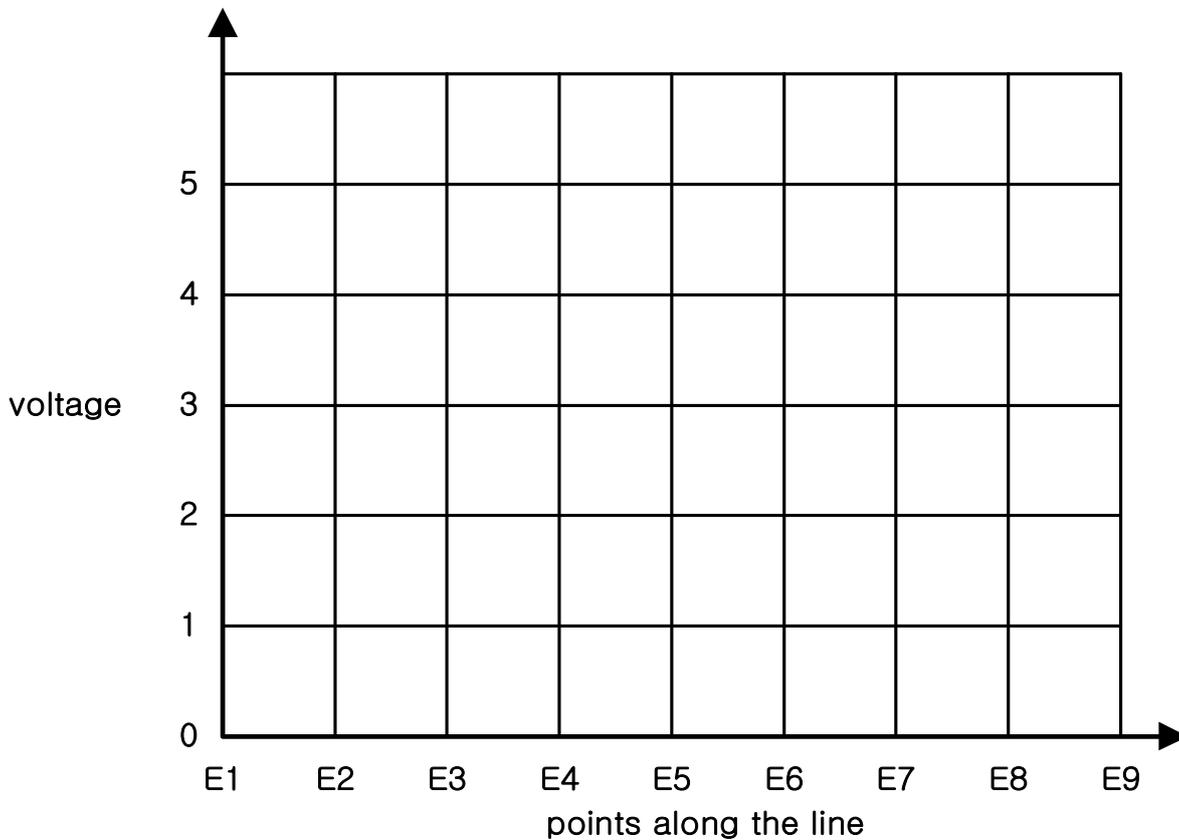


그림 19. AC 입력전압의 감쇄특성



그림 18. 과 19. 의 그래프가 유사하다는 것을 알 수 있다. 다른 주파수를 사용하여도 그래프의 모양은 변화가 없을 것이다.

■ 전원 공급기를 꺼라.

## 2.5 특성 임피던스 소개

지금까지 이 선로가 왜 600Ω 선로인지에 대하여 언급하지 않았다. 그 이유는 600Ω 선로가 이 선로의 특성을 나타내는 임피던스를 가지고 있기 때문이다. 이 임피던스를 특성 임피던스 (Characteristic Impedance) 라고 한다. 모든 전송 선로는 특성 임피던스를 가지고 있다. 이 선로가 저항으로 이루어져 있다면 특성 저항이라고 불리어 질 수도 있다. 그러나 일관된 표현을 하기 위해서 특성 임피던스라는 용어가 사용될 것이다.

특성 임피던스의 개념 중 하나는 무한히 긴 선의 임피던스라는 것이다. 이 개념은 다음 실험에서 알아보겠다.

## 2.6 실습

■ 600Ω 선로에서 모든 입력을 제거하라.

■ 저항 측정을 위해서 600Ω 선로와 0V 사이에 디지털 멀티미터를 연결하라. LOAD 스위치를 ON 한 상태에서 선로의 입력 저항을 측정하고 값을 기록하라.

☞ 2.6a 부하가 연결된 상태에서의 입력 저항을 기입하라.

---

---

---

만약 이 선로가 무한대로 긴 선로라면 부하가 연결된 입력 저항이나 연결되지 않은 저항이나



차이가 없을 것이다. 이 선로가 무한히 길지 않더라도 많은 단계가 있을 것이고, 그래서 부하가 끊어졌을 때 입력 저항에는 작은 변화가 일어날 것이다.

☞ 2.6b 부하가 끊어진 상태에서 입력 저항의 측정값을 기입하라.

---

---

---

두 측정치에서 약간의 차이가 있을 것이다. 특성 임피던스는 단원 4. 에서 보다 자세히 다룰 것이다.

## 2.7 실습 요약

이 실습은 전송 선로를 따라서 신호가 어떻게 감쇄되는가 하는 것을 보여 준다.

i) 신호의 크기는 선로 길이에 따라서 지수적으로 감소한다.

ii) 선로의 각 부분에서의 감쇄는 거의 동일하다.

iii) 이런 저항 선로의 경우 파형은 중요하지 않다. 예를 들어 그것은 DC 가 될 수도 있고, 사인파나 구형파가 될 수도 있다.

실제 전송 선로에서 선로에 따른 감쇄는 선로가 가지는 저항의 직렬연결과 신호 전달 컨덕터와 접지, 혹은 되돌아오는 도체선로 사이의 컨덕턴스의 병렬연결 때문이다. 직렬 저항과 병렬 컨덕턴스가 높은 선로는 높은 감쇄를 일으킨다. 그런 선로는 고손실 선로이라고 알려져 있다. 반대로 낮은 직렬 저항/병렬 컨덕턴스는 감쇄율을 낮게 한다. 그런 선로는 저손실 선로이라고 불려진다.

실제 전송 선로는 선로에 분포하는 저항 성분뿐만 아니라 리액턴스 성분 (커패시턴스와 인덕턴스) 도 존재한다. 다음 단원에서는 이런 리액턴스 성분에 대해 알아볼 것이다.

이상으로 특성 임피던스의 개념을 소개했다.









### 단원 3. 펄스입력을 이용한 선로의 지연 (Delay using a Pulse Input)

#### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 전송 선로 실습기에서 50Ω 선로를 사용할 때 나타나는 펄스의 지연 측정
- 선로의 기본상수를 알고 있을 때의 지연 예상

#### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선 셋
- 오실로스코프



### 3.1 선로의 집중정수 파라미터 (Lumped Parameter)

이상적인 케이블에는 직렬 저항이나 직렬 인덕턴스, 병렬 커패시턴스나 병렬 컨덕턴스가 없다. 실제 케이블에는 위의 모든 요소들이 케이블을 따라서 존재한다.

그림 20. 은 케이블의 미소길이에 대한 등가회로이다. 길이가  $x$  인 케이블이 있고,  $dx$  는 이 케이블의 미소길이를 나타낸다. 이런 작은 선로 구역을 인덕턴스, 커패시턴스 그리고 저항으로 등가화시킬 수 있으며, 이 등가회로를 집중정수소자를 이용한 전송선로의 등가모델이라 한다. 이 회로의 모든 요소들은 단위 길이에 대한 값을 사용하고 있다.

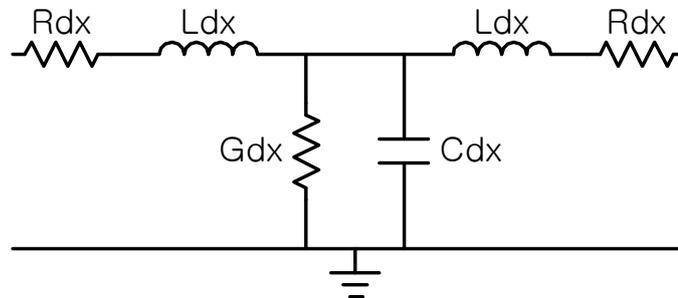


그림 20. 케이블의 미소길이에 대한 등가회로

$dx \rightarrow 0$  으로 갈 때, 미소길이의 수는 증가하고 길이는 각 구역의 길이가 감소하면서 나타내어진다. 이 모델은 실제 연속 전송 선로에 거의 가까운 것이다. 그림 20 의 정량화된 R, L, G 그리고 C 는 기본 선로 상수 (primary line constants) 라고 불려진다.

### 3.2 전송 속도

전송 선로를 따라 보내진 전기적인 신호는 선로의 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝으로 전송되는데 있어 유한한 시간을 가지고 있다. 동축 케이블에서의 전송 속도는  $2 \times 10^8 m/s$  에서  $3 \times 10^8 m/s$  (공기 중에서의 빛의 속도는 대략  $3 \times 10^8 m/s$ ) 이다. 그래서 지연 범위는  $5 ns/m$  에서  $3.33 ns/m$  이다. 실제 전송 속도는 선로의 물리적인 특성에 의존한다. 이런 크기나 두께 같은 물리적인 특성이 기본 선로 상수를 결정한다.

그림 20. 의 집중정수 회로모델을 이용하여 전송 속도를 계산할 수 있다.



$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

여기서, C 와 L 은 단위 길이당 커패시턴스와 인덕턴스이다.

단위 길이당 시간 지연은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \sqrt{CL}$$

여기서, D 는 단위 길이 당 초단위로 주어진다.

☞ 3.2a 선로를 따라서 분포하는 인덕턴스, 커패시턴스, 그리고 저항 같은 요소들의 이름은 무엇인가?

- |                                     |                                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> A 방해값      | <input type="checkbox"/> B 기본 선로 상수 |
| <input type="checkbox"/> C 방해 선로 상수 | <input type="checkbox"/> D 기본 선로 요소 |

☞ 3.2b 만약 선로의 인덕턴스가 미터 당 10μH 이고, 커패시턴스가 3.3nF 일 때 지연시간을 미터당 nano seconds 단위로 나타내어라.

---

---

---

### 3.3 실습

이 실습에서 50Ω 선로에서 구형파의 전송지연을 관찰 할 것이다.

■ 전원 공급기를 그림 16. 과 같이 전송 선로 실습기에 연결하라.



- 모든 플트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 펄스 발생기를 켜고 속도를 Fast (F) 에 맞추어라.

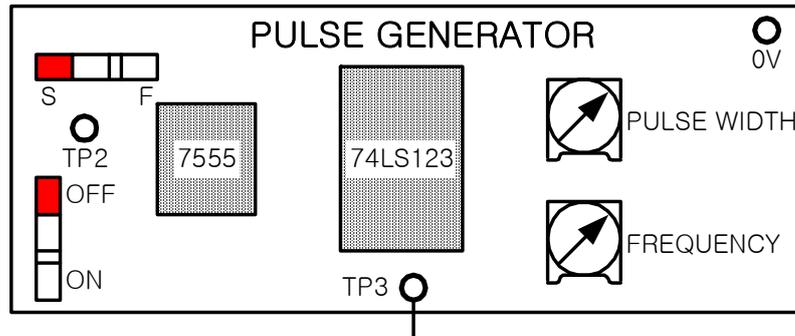


그림 21. 실험장치의 구성 (펄스 발생기)

- 4mm 리드선을 가지고 서밍 증폭기의 출력을 50Ω 선로의 입력단에 연결하라.

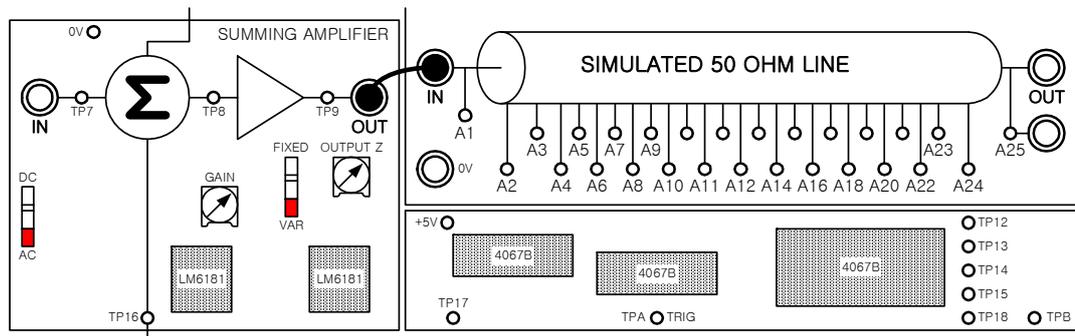


그림 22. 실험장치의 구성

- 서밍 증폭기 커플링을 DC 로 조정하라.
- 서밍 증폭기의 출력 임피던스를 FIXED 로 조정하라.
- 서밍 증폭기의 이득을 최소치에 맞추어라. (GAIN 조절을 반시계 방향으로 최대한)
- 잡음 발생기의 AMPLITUDE 조절을 최소한에 맞추어라. (반시계 방향으로 최대한)



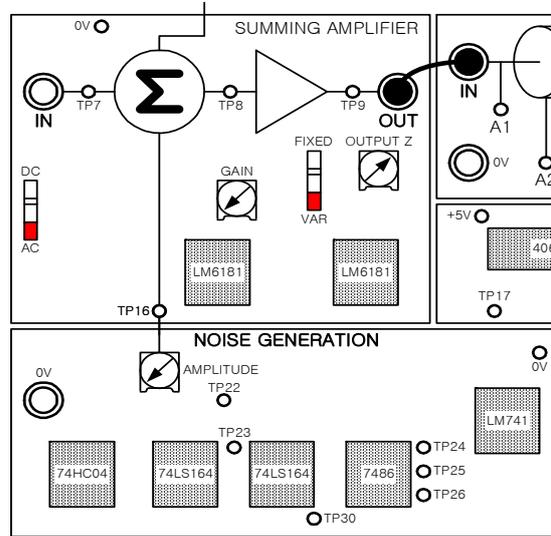


그림 23. 실험장치의 구성

■ 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로의 출력을 (A25) 단락블록의 가변 저항 R 에 연결하라. 가변 저항 R 을 중간위치로 조정하라. (화살표가 가리키는 윗 방향)

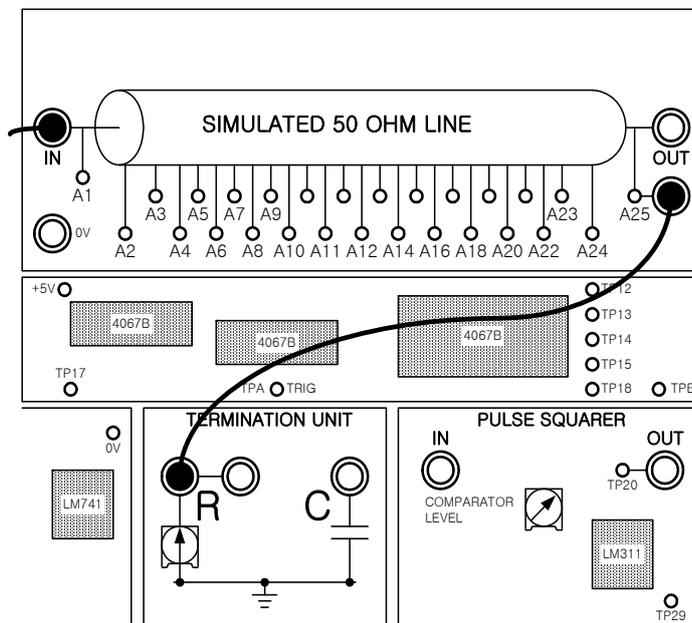


그림 24. 실험장치의 구성

50Ω 선로의 입력단은 Transmitter End 라 하고, 50Ω 선로의 출력단은 Receiver End 라 하고, Transmitter End 에서의 구형파는 전달파라고 한다.



- 전원 공급기를 켜라.
  
- 50Ω 선로의 입력단을 검사하기 위해 A1 에 오실로스코프의 채널 1 을 연결하라.
  
- 50Ω 선로의 출력단을 검사하기 위해 A25 에 오실로스코프의 채널 2 를 연결하라.
  
- 오실로스코프의 외부 트리거를 TP2 (펄스 발생기 블록) 에 연결하고 오실로스코프의 스위치를 외부 트리거로 맞추어라.
  
- PULSE WIDTH 와 FREQUENCY 조절장치를 변화시키면서 펄스가 어떻게 지연되는지를 관찰하라. 전송된 펄스와 받은 펄스의 시간 지연을 살펴보기 위해서 PULSE WIDTH 조절기를 A1 에서 3μs 의 폭을 가지는 펄스가 나오게 조정하고, 오실로스코프를 조정해라.
  
- 서밍 증폭기의 GAIN 을 조절하여, 50Ω 선로의 출력에서 진폭이 2V 가 나오도록 조정하라.
  
- 그림 3.1 에 두 파형을 그려 넣어라. (CH 1 과 CH 2)
  
- 펄스가 증가하는 시점 사이의 지연을 기록하라.
  
- ☞ 3.3a 50Ω 선로에서 전송된 펄스와 받은 펄스 사이의 지연을 μs 단위로 기록하라.

---

---

---

---

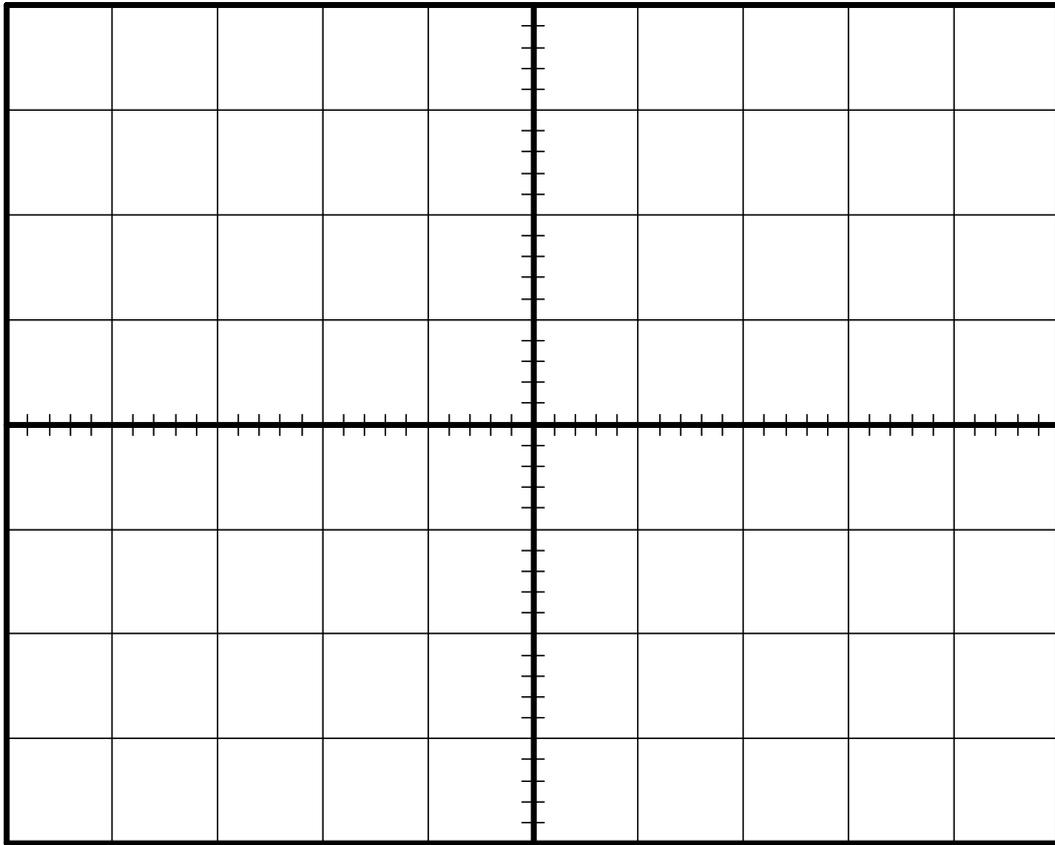
---

---

---

---





Waveform Sketch 3.1 (CH 1, CH 2)

☞ 3.3b 50Ω 선로에 연결했을 때 받은 펄스의 첨두 전압을 V 로 나타내라.

---

---

---

---

---

■ 전원 공급기를 꺼라.



### 3.4 펄스 약화

수신된 펄스는 전송된 펄스보다 약하다는 것을 알 수 있을 것이다. 그 이유는 커패시터와 인덕터의 연결이 저역 통과 필터 (단원 11 에서 공부할 것이다.) 의 역할을 하기 때문이다. 이 문제를 해결하기 위해서 펄스 Squarer 회로를 이용한다.

### 3.5 실습

- 50Ω 선로를 실습 3.3 과 같이 연결하라.
- 4mm 리드선을 이용하여 단락 블록의 저항을 펄스 Squarer 회로의 입력에 연결하라.
- 전원 공급기를 켜라.
- 오실로스코프를 이용하여 50Ω 선로를 A1 에서 관찰하고, TP20 에서 펄스 Squarer 의 출력을 검사하라.
- 서밍 증폭기의 GAIN 을 조절하여, 50Ω 선로의 입력단에서 진폭이 2V 가 되게 조절하라.
- COMPARATOR LEVEL 조절을 해서 펄스 Squarer에서 나오는 출력이 전송된 펄스의 폭과 같게 하라.

펄스 Squarer 회로에서 나온 출력은 지금 환원되었다. 출력 펄스의 진폭이 5V 라는 것을 주목하라. 왜냐하면, 펄스 Square 의 출력 레벨이 +5V 에서 0V 이기 때문이다.

- 전원을 꺼라.





👉 학습평가 3

- 실제 케이블에서 길이에 따른 방해는 무엇 때문에 일어나는가?
  - 직렬 인덕턴스와 병렬 컨덕턴스
  - 직렬 커패시턴스와 병렬 인덕턴스
  - 직렬 저항과 병렬 인덕턴스
  - 위 사항들 모두에 의해
  
- 일반 동축케이블의 전송 속도는 얼마인가?
  - $1 \times 10^8 m/s$  에서  $2 \times 10^8 m/s$
  - $1.5 \times 10^8 m/s$  에서  $2.5 \times 10^8 m/s$
  - $2 \times 10^8 m/s$  에서  $3 \times 10^8 m/s$
  - $3 \times 10^8 m/s$  에서  $4 \times 10^8 m/s$
  
- 케이블을 따라 이동하는 신호의 시간은 어디에 의해 결정되는가?
  - 직렬 인덕턴스와 병렬 컨덕턴스
  - 물리적인 구조
  - 길이
  - 위 사항들 모두에 의해서
  
- 커패시터와 인덕터를 이용한 효과는 진짜 케이블을 이용하는 것 보다 선로를 이용하는 것에서 더 나타나는데 그 이유는?
  - 시간 지연이 증가해서 측정하기 쉽다.
  - 시간 지연이 증가해서 측정하기 어렵다.
  - 신호를 지역 통과 필터로 거르기 때문
  - 신호를 감쇄시키기 때문
  
- 전송 선로 실습기에 있는 펄스 발생기는 어떠한 조정 기능을 가지고 있는가?
  - 출력 진폭
  - 출력 임피던스
  - 출력 주파수
  - 이득



## 단원 4. 펄스 입력을 이용한 선로의 매칭 (Matching using a Pulse Input)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 전송 선로가 반사를 없애기 위해서는 선로의 특성 임피던스 값과 동일한 임피던스 값을 가지는 부하와 연결되어야 한다는 것을 알게 된다.
- 50Ω 선로를 이용하여 반사를 측정한다.
- 반사 펄스로부터 전송 선로 종단의 연결 상태를 예상한다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선
- 오실로스코프



#### 4.1 특성 임피던스

단원 2 에서 600Ω 감쇄 선로의 특성 임피던스를 측정해 보았다. 그러나 실제로는 케이블의 특성임피던스는 저항 측정기로는 측정되지 않는다.

전체 길이에 따라 동일한 조건과 상태에서 만들어진 케이블은 동일한 선로 상수값을 가진다. (단원 3.1)

어떤 주파수에서도 케이블은 임피던스를 가진다. 임의의 주파수에서 특성 임피던스를 공식화하기 위해서 단원 3 의 그림 20. 에서 사용된 수학적 해석이 적용된다.

이 공식은

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

이다.

여기서, R, L, G 와 C 는 기본 선로 상수이고,  $\omega$  는  $2\pi f$  와 같은 각주파수 (angular frequency) 이며,  $Z_0$  는 특성 임피던스라는 용어이다.

위의 공식에서  $\omega = 0$  일 때 (DC 에서) 특성 임피던스는

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R}{G}}$$

이며, 만약  $j\omega L \gg R$ ,  $j\omega C \gg G$  의 높은 주파수에서는

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

이다.

이것은 일반적으로 케이블의 특성 임피던스로 일컬어지는 수식이다.  $Z_0$  가 복소수가 아니기 때문에 선로의 특성 임피던스는 고주파에서 저항력을 가지게 된다.

만약 R 과 G 요소가 사용할 주파수에서 무시된다면, 특성 임피던스는 저항성이라고 생각할 수 있다. 이것이 일반적인 경우이다.



4.2 반사와 매칭

부하의 저항이  $Z_0$  로 단락된 선로는 마치 무한 선로에서와 같이 행동한다. 무한 선로에서 모든 전력은 단락지점 (저손실 선로로 가정하면) 에서 소비되고 반사는 일어나지 않는다. 이 조건을 매칭된 상태라고 한다. 이때 단락지점을 부하라고 한다.

단락저항이  $Z_0$  의 값으로 단락이 되지 않았을 때, 신호는 반사되어 신호의 입력단으로 돌아온다. 이 조건을 부정합 (mismatched) 상태라고 한다. 부정합 상태의 극단적인 경우가 아래의 그림 25. 와 26. 에 나와 있다.

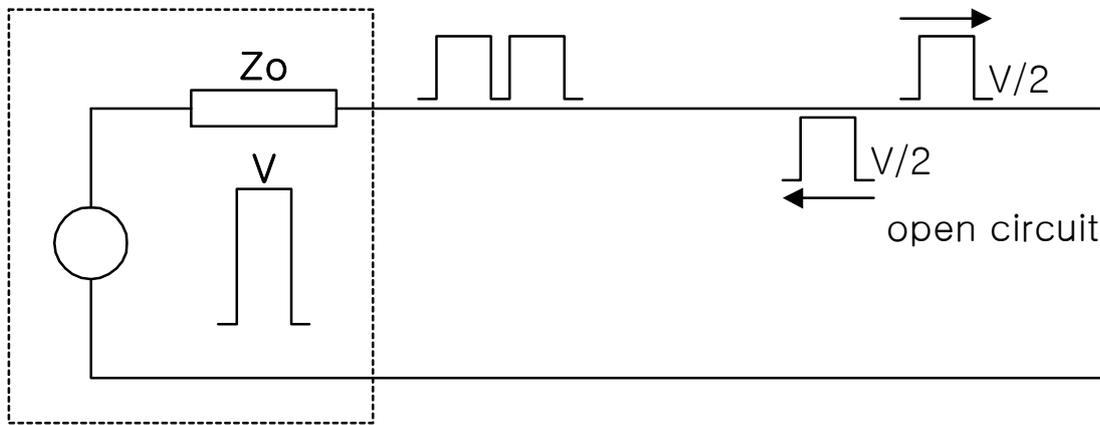


그림 25. 부정합 상태의 파형 (개방종단)

그림 25 는 펄스 발생기가 개방된 선로에 펄스를 주고 있는 것을 보여 준다. 어떠한 전력도 부하에 의해 소모되지 않는다. 그래서 모든 전압은 선로를 따라서 되돌아온다. 그림 25. 에서 선로에서의 지연은 구형파의 펄스 폭 보다 길다. 그래서 수 개의 펄스 파장이 펄스 발생기에서 관찰된다. 그림 26. 은 선로가 단락된 회로를 가지고 있다는 점을 빼고는 그림 25. 와 비슷해 보인다. 이번에는 반전된 펄스가 선로를 따라 반사한다. 그림 25. 와 그림 26. 에서 펄스 발생기에서 선로와 매칭되어 반사된 파장이 펄스 발생기에 흡수되었다는 것을 주목하라. 전송파 대 반사파의 전압 비율은 전압 반사 계수라 한다. (voltage reflection coefficient) (그리스 문자로 감마 :  $\Gamma$  )

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

여기서,  $Z_L$  이 부하의 임피던스이다.



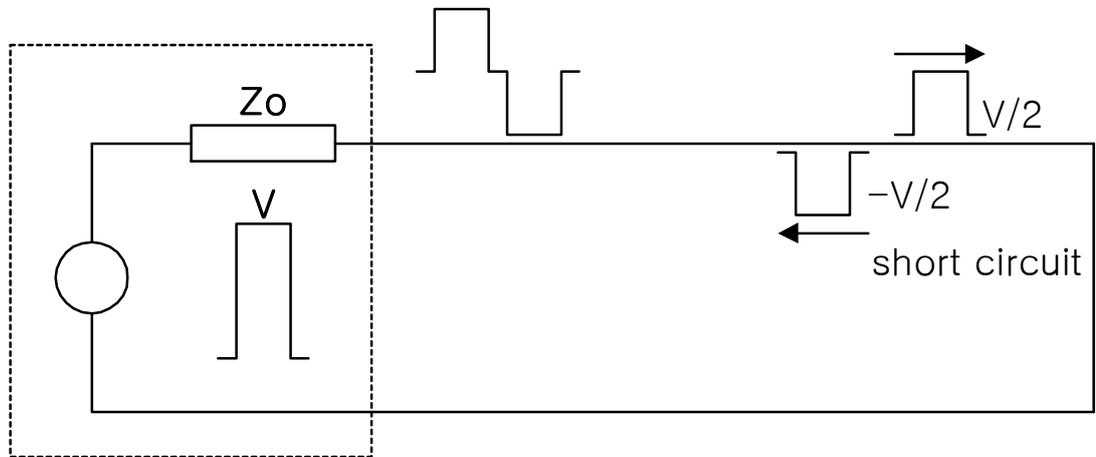


그림 26. 부정합 상태의 파형 (단락종단)

선로가 개방된 회로일 때,  $Z_L$  은 무한대이다. 그래서  $\Gamma = 1$  이고, 펄스는 뒤집어지지 않고 되돌아온다.

선로가 단락된 회로일 때,  $Z_L = 0$  이다. 그래서 펄스는 뒤집어져서 되돌아온다.

선로가 매칭되었을 때,  $Z_L = Z_0$  이다. 그래서  $\Gamma = 0$  이고 펄스는 반사되지 않는다.

특성 임피던스는 다음 방법 중의 하나로 계산할 수 있다.

- i) 반사를 없애기 위해서 부하가 가져야 하는 값
- ii) 무한히 긴 선로의 전송단에서 보여지는 임피던스
- iii) 매칭된 선로의 어떤 지점에서 보여지는 임피던스

☞ 4.2a 뒤집어진 반사파를 만들어 내는 조건은 무엇인가?

- |                                   |                                       |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> A 매칭된 단락 | <input type="checkbox"/> B 개방된 회로     |
| <input type="checkbox"/> C 단락된 회로 | <input type="checkbox"/> D 개방된 회로 발생기 |



☞ 4.2b  $100\Omega$  의 특성 임피던스를 가진 선로를 정확히 단락시키기 위해 필요한 저항의 값을  $\Omega$  단위로 나타내고, 그 이유를 설명하시오.

---

---

---

### 4.3 실습

이 실습에서  $50\Omega$  선로를 이용한 펄스 반사를 관찰할 수 있다.

- 전원 공급기를 그림 16. 과 같이 전송 선로 실습기에 연결하라.
- 모든 플트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 펄스 발생기를 켜고 속도를 Fast (F) 로 조절하라.
- 4mm 리드선을 이용하여 서밍 증폭기의 출력을  $50\Omega$  선로의 입력단에 연결하라.
- 서밍 증폭기의 커플링을 DC로 조절하라.
- 서밍 증폭기의 출력 임피던스를 FIXED 로 조절하라.
- 잡음 발생기의 AMPLITUDE 조절을 최소한으로 조절하라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 4mm 리드선을 이용하여  $50\Omega$  선로의 출력을 단락 블록의 가변저항 R 과 연결하라. 가변저항 R 의 값을 중간지점에 두어라.
- 전원 공급기를 켜라.



- A1 에서 50Ω 선로의 입력단을 측정하기 위해 오실로스코프의 채널 1 을 연결하라.
- A25 에서 50Ω 선로의 출력단을 측정하기 위해 오실로스코프의 채널 2 를 연결하라.
- 오실로스코프의 외부 트리거를 TP2 에 연결하고 오실로스코프를 외부 트리거로 맞추어라.
- PULSE WIDTH 조절을 3μs의 지속파가 나오도록 조절하고, 오실로스코프를 전송파와 수신파를 관찰하기 위해 조절하여 화면에 나타내어라.
- 50Ω 선로의 입력단에서 2V 의 진폭이 나오도록 (전달펄스) 서밍 증폭기의 GAIN 을 조절하라.
- 오실로스코프에서 펄스 파형의 ‘공간’ 부분을 0V 기준선과 일직선이 되도록 조절하라.
- 단락 저항 R 을 최소값으로 조절하라. (반시계 방향으로 끝까지) 그래서 50Ω 선로가 단락회로가 되도록 하라.

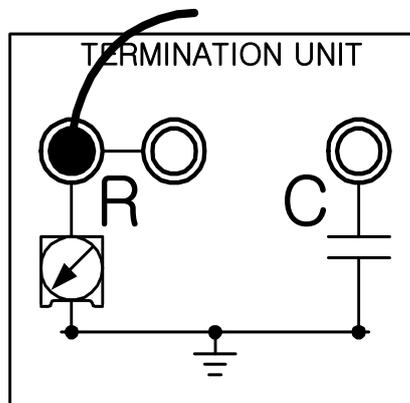


그림 27. 실험장치의 구성

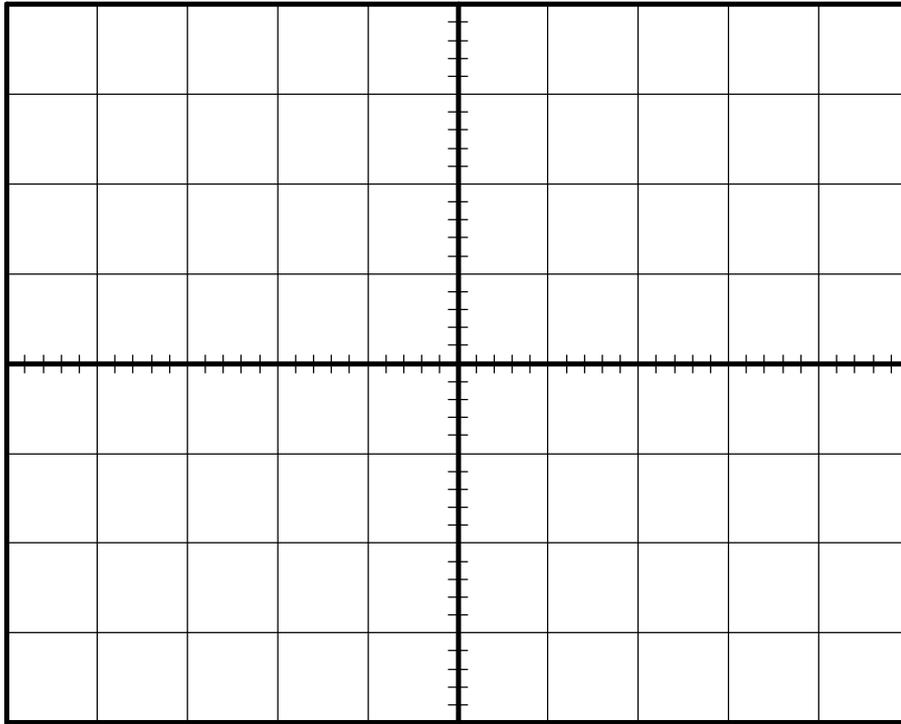
- 반사파를 보라. 파형 스케치 4.1a, b 에 입력과 출력 파형을 그려라. 펄스 발생기의 PULSE WIDTH 조절기를 조절하여 펄스의 폭이 변함에 따라 어떤 변화가 일어나는지 관찰하라.

---

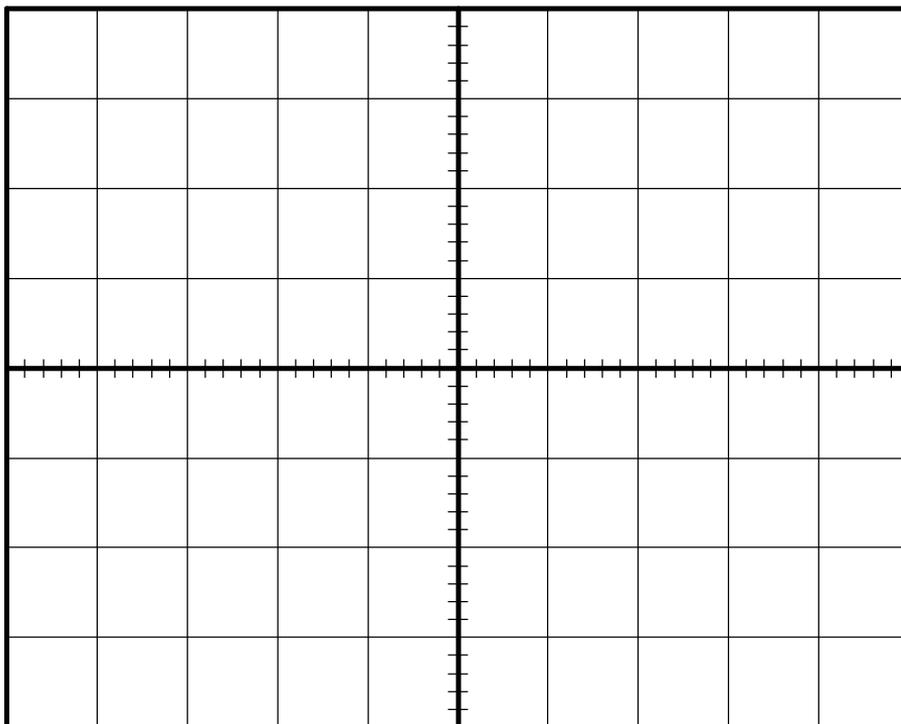
---

---





Waveform Sketch 4.1a (입력파형)



Waveform Sketch 4.1b (출력파형)



☞ 4.3 선로가 단락 회로일 때 A1 에서 반사파의 진폭을 V 로 나타내라.

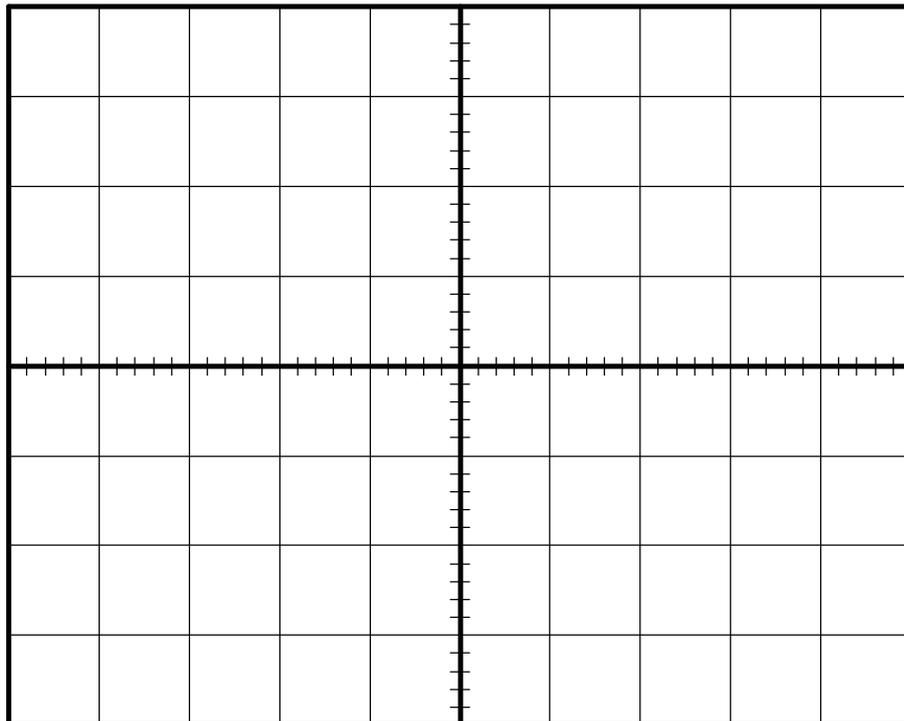
---

---

---

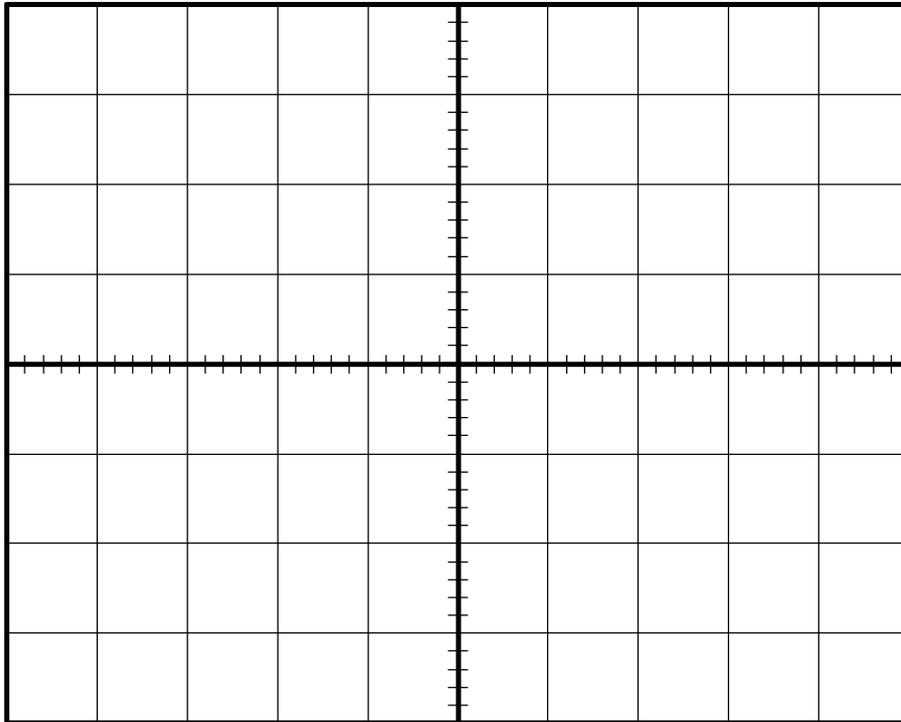
■ 입력 신호 펄스의 폭이  $3\mu s$  가 되도록 재조정하라.

■  $50\Omega$  선로를 가변저항 R 로 부터 끊고, 선로가 개방회로가 되도록 하여라. 파형 스케치 4.2a, b 에 입력 파형과 출력 파형을 그려라.



Waveform Sketch 4.2a (입력파형)





Waveform Sketch 4.2b (출력파형)

☞ 4.3b 선로가 개방 회로 단락일 때, A1 에서 반사파의 진폭을 V 로 나타내라.

---

---

---

■ 50Ω 선로를 가변저항 R 에 다시 연결시키고, 다음 실습을 준비하라.

■ 전원 공급기를 꺼라.



#### 4.4 반사의 이용

당신이 본 이 현상이 이용 가능한 것이라고 보는가? 당신이 긴 케이블의 끝에 있고 다른 한쪽 끝이 연결된 지를 확인하고 싶다고 가정해 보라.

너무 긴 거리이기 때문에 다른 사람에게 이야기를 해서 케이블이 연결되었다는 것을 확인하고 싶지는 않을 것이다. 그래서 우리가 한번 실험했던 것처럼 펄스 발생기와 오실로스코프 (모든 필요한 리드선) 를 이용하는 방법을 사용한다. 반사가 있는지를 확인함으로써 연결 상태를 확인한다. 이것은 단원 13 에서 Time Domain Reflectometry (TDR) 에 대해서 이야기하면서 더 자세히 다룰 것이다.

#### 4.5 반사를 피하는 것

컴퓨터들은 네트워크를 형성하기 위해서 동축케이블을 이용하여 서로 개방된 연결을 한다. 정보들은 단일 케이블을 따라서 각각의 컴퓨터에 전달되고 이 케이블은 특별한 저항에 의해 단락된다. 케이블이 어떤 지점에서 끊어지더라도 컴퓨터는 동작을 계속할 뿐만 아니라 모든 네트워크를 정지시켜 버린다. 케이블이 더 이상 매칭된 상태가 아니고 반사파가 진짜 데이터를 방해하기 때문이다.

그래서 일반적으로 'T' 조작을 이용한 네트워크로 컴퓨터를 연결한다. 이것은 각각의 컴퓨터가 다른 컴퓨터가 매칭된 네트워크 케이블에 연결되어 있다는 것이 확인될 때까지 네트워크로부터의 연결을 끊어 놓는다.

#### 4.6 실습

이전 실습에서 보내는 끝부분은 항상 매칭되어 있고, 단락 끝은 반사 효과를 보기 위해서 조절된다. 이것은 펄스가 단락 끝에서 반사되고 수신 끝에서 흡수된다는 것을 의미한다.

이것은 보내는 끝부분의 임피던스를 조절함으로써 가능하다. 만약에 Sending End 와 Terminating End 부분들이 전송선로에 매칭되지 않았을 때 펄스는 Terminating 등에서 sending 에 의해서 반사될 뿐이다. 이 실험에서 이것을 조사한다.

■ 전송 선로를 실습 4.3 의 15 번째 단계와 같이 조절하라.



■ 서밍 증폭기의 출력 임피던스를 VAR 로 조절하라.

■ 서밍 증폭기의 OUTPUT Z 와 단락 블록의 R 을 조절하여 부매칭 효과를 관찰하라. 각각의 조절이 0Ω 에서 (반시계 방향으로 끝까지) 100Ω (시계방향으로 끝까지) 까지 다양하게 조절할 수 있다는 것을 주목하라.

■ 관찰 결과를 기록하라.

---

---

---

---

---

---

---

---

■ 전원 공급기를 꺼라.

#### 4.7 실습 요약

이 실험에서 전송선로가 부정합되었을 때의 효과를 관찰해 보았다.

i) 전송선로는 특성 임피던스를 가진다.

ii) 전송선은 각 끝부분에서 특성 임피던스와 같은 임피던스를 가지고 단락될 때 매칭된다.

이것은 일반적으로 저항성을 가진다.





👉 학습평가 4

1. 특성 임피던스를 나타내는 용어는?

- A  $C_i$                        B  $Z_i$   
 C  $Z_0$                          D  $Z_c$

2. 고주파에서 케이블의 임피던스는

- A 저항적이다.  
 B 리액턴스적이다.  
 C C 와 G 에 따라 다르다.  
 D R 과 L 에 따라 다르다.

3. 정확하게 단락된 저손실 선로는

- A 무한길이의 선로와 같이 동작한다.  
 B 부하에서 모든 전력을 분산시킨다.  
 C 반사가 일어나지 않는다.  
 D 위의 사항 모두 해당된다.

4. 반사파와 전송파의 전압 비율은 어떻게 정의되는가?

- A 전압 굴절 계수                       B 전압 반사 계수  
 C 전압 매칭 계수                       D 전압 단락 계수

5. 뒤집히지 않은 반사파가 나오는 조건은?

- A 매칭된 부하                               B 개방회로  
 C 개방회로                                 D 개방회로 발생기

6. 전송 선로 실습기에서 50Ω 선로를 매칭시키기 위해 단락 블록에서 가변 저항은 어떻게 해야 하는가?

- A 반시계 방향  
 B 반시계 방향 끝부분에서 4분의 1지점  
 C 중간지점  
 D 시계방향 끝



## 단원 5. 리액턴스 단락 (Reactive Termination)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 리액턴스 단락이 선로를 매칭시킬 수 없다는 것을 확인한다.
- 리액턴스 단락이 50Ω 선로에 미치는 영향을 관찰한다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선
- 오실로스코프



### 5.1 리액턴스 단락

선로가 저항에 의해 단락되지 않고 리액턴스 성분 (혹은 실제로 저항과 리액턴스) 에 의해 단락 되었다면 선로는 매칭 될 수 없다.

단원 4.2 에서 전압 반사 계수 공식을 설명하는 공식을 이용했다.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

단원 4 에서  $Z_L$  이 저항으로 가정한 경우를 실험하였다.

만약  $Z_L$  이 리액턴스를 만든다면, 예를 들어 저항 대신에  $Z_L$  을 커패시턴스로 만든다면,

$$Z_L = \frac{1}{j2\pi f C}$$

그러면,

$$\Gamma = \frac{1 - j2\pi f C Z_0}{1 + j2\pi f C Z_0}$$

$j2\pi f C Z_0 \ll 1$  인 저주파에서  $\Gamma = 1$  이고 동위상의 신호가 반사된다.

$j2\pi f C Z_0 \gg 1$  인 고주파에서  $\Gamma = -1$  이고  $180^\circ$  위상차를 가지는 신호가 반사된다.

그러나 반사를 방지하기 위해서 전압 반사 계수인  $\Gamma = 0$  이 되어야 한다. 운이 없게도 리액턴스의 부하를 가지고는 신호가 반사되지 않는 조건을 만들 수 없다.

이것을 보여주기 위해 위의 공식을  $f$  에 대하여 다시 정리해 보자.

$$f = \frac{1 - \Gamma}{j2\pi C Z_0 (\Gamma + 1)}$$

만약 어떤 주파수가 반사를 일으키지 않는다는 것을 알아보기 위해,  $\Gamma = 0$  으로 두고, 주파수  $f$  에 대하여 풀면,



$$f = \frac{1}{j2\pi CZ_0}$$

이다.

다시 말해  $f$  는 반사를 만들지 않기 위해서 복소수이어야 한다. 항상 실제 신호를 만들 때 선로는 커패시터를 이용해서 매칭되지 않는다.

이 상황은 쉽게 일어난다. 예를 들어 동축케이블이 단락되기 전에 길게 꼬인 선로와 연결된다. 꼬인 선로는 컨덕터 사이에서 비교적 높은 커패시턴스를 가진다. 이것은 마치 커패시터가 단락저항을 가로질러 연결되었고, 그래서 단락된 리액턴스를 만들어 내는 것처럼 동작한다.

☞ 5.1a 전송 선로가 리액턴스 부하를 가지고 매칭될 수 있는가?

답 :  YES    나     NO

☞ 5.1b 커패시터 부하를 가지고 뒤집어진 반사파를 만들어 내는 조건은 무엇인가?

- A  $j2\pi f CZ_0 \ll 1$                        B  $j2\pi f CZ_0 = 1$   
 C  $j2\pi f CZ_0 = 0$                          D  $j2\pi f CZ_0 \gg 1$

펄스에서의 리액턴스 부하의 효과는 다음 실험에서 조사해 보자.

## 5.2 실습

이 실습에서 50Ω 선로를 이용한 펄스에서의 리액턴스 부하의 효과를 살펴 볼 것이다.

- 전원 공급기를 그림 16. 과 같이 전송 선로 실습기에 연결하라.
- 모든 플트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 펄스 발생기를 켜고 속도를 Fast (F) 로 조절하라.



- 4mm 리드선을 이용하여 서밍 증폭기의 출력을 50Ω 선로의 입력단에 연결하라.
- 서밍 증폭기의 커플링을 DC 로 조절하라.
- 서밍 증폭기의 출력 임피던스를 FIXED 로 조절하라.
- 잡음 발생기의 AMPLITUDE 조절을 최소한으로 조절하라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로의 출력을 단락 블록의 가변저항 R 과 연결하라.
- 전원 공급기를 켜라.
- A1 에서 50Ω 선로의 입력단을 조사하기 위해 오실로스코프의 채널 1 을 연결하라.
- A25 에서 50Ω 선로의 출력단을 조사하기 위해 오실로스코프의 채널 2 를 연결하라.
- 오실로스코프의 외부 트리거를 TP2 에 연결하고 오실로스코프를 외부 트리거로 맞추어라.
- 50Ω 선로의 출력단에서 2V 의 진폭이 나오도록 서밍 증폭기의 GAIN 을 조절하라.
- PULSE WIDTH 조절을 3μs 의 지속파가 나오도록 조절하고 오실로스코프를 전송파와 수신파를 관찰하기 위해 조절하여 화면에 나타내어라.
- 단락 저항 R 을 50Ω 선로와 매칭시키기 위해 중간 지점으로 조절하라.
- 펄스를 관찰하라.
- 단락블록의 저항 R 을 단락 커패시터 C 에 연결하라. 이것은 50Ω 선로에 리액턴스 단락을 주는 것이다.



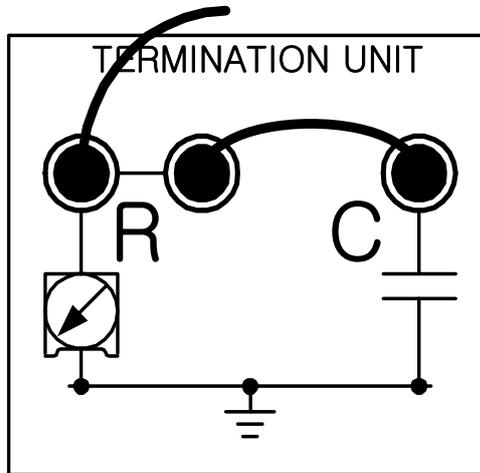


그림 28. 실험장치의 구성

- 수신 펄스를 관찰하라. 펄스 끝 부분의 등근 부분과 Sending End 에서의 반사를 주목하라. 펄스 발생기의 PULSE WIDTH 를 조절하여 펄스폭이 다를 때 어떤 변화가 일어나는지를 관찰하라. 관찰한 결과를 기록하라.

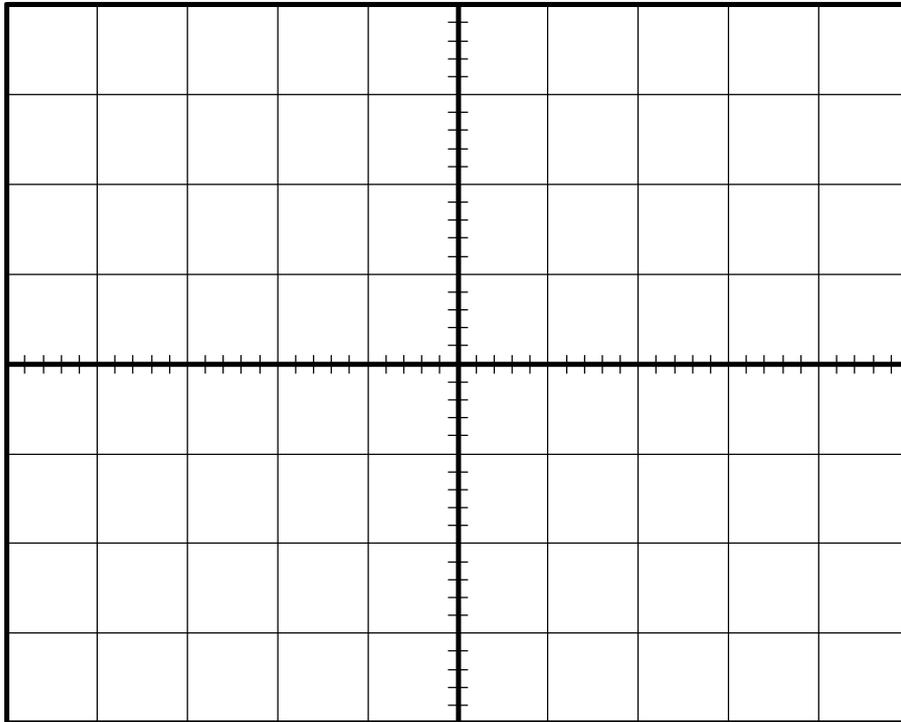
---

---

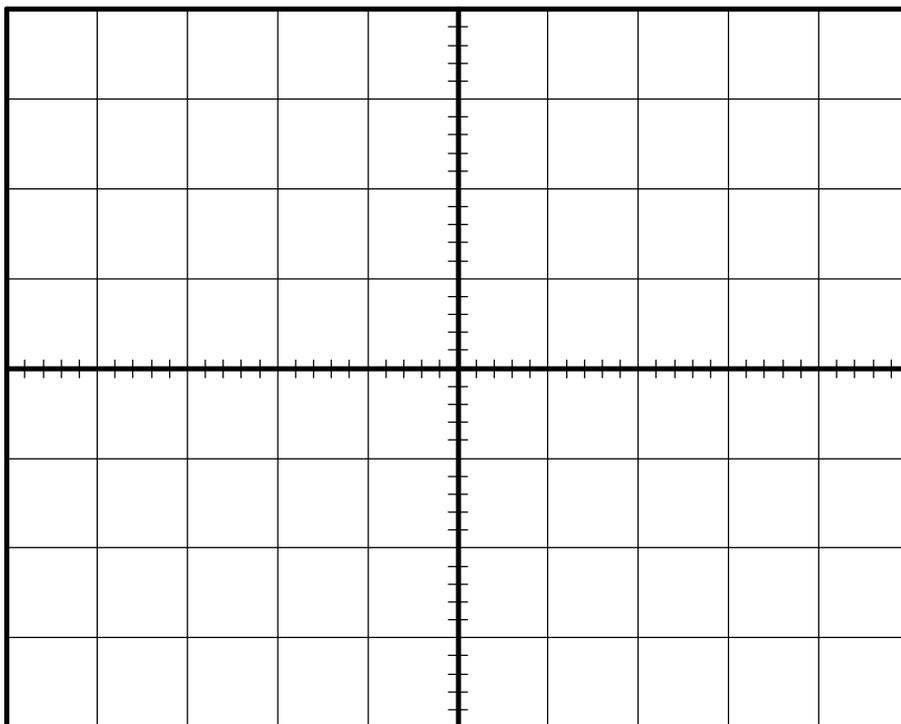
---

- 펄스폭을  $3\mu s$  로 재조정하라.
- 커패시터와 연결하기 전과 후의 파형을 그려라. (파형 스케치 5.1, 5.2)
- 전원 공급기를 꺼라.





Waveform Sketch 5.1 (커패시터를 연결하기 전)



Waveform Sketch 5.2 (커패시터를 연결한 후)





👉 학습평가 5

1. 전송선로가 매칭되지 않는 경우는?  
 A 리액턴스 부하를 사용할 때  
 B 개방 회로 부하를 사용할 때  
 C 커패시터를 부하처럼 사용할 때  
 D 인덕터를 부하처럼 사용할 때
2. 커패시턴스 부하를 사용해서 뒤집어지지 않는 반사를 만드는 조건은?  
 A  $j2\pi f C Z_0 = 0$                        B  $j2\pi f C Z_0 = 1$   
 C  $j2\pi f C Z_0 \ll 1$                        D  $j2\pi f C Z_0 \gg 0$
3. 전송 선로 실험기에서 커패시턴스를 확실하게 단락된 전송에 추가하는 효과는?  
 A 단락 회로 선로이다.  
 B 반사 펄스의 가장자리를 둥글게 만든다.  
 C 개방 회로 선로이다.  
 D 반사파의 진폭을 증가시킨다.
4. Sending End 에서 커패시터와 단락 저항을 병렬로 연결한 결과는?  
 A 아무런 효과가 발생하지 않는다.  
 B 뒤집어지지 않는 반사 펄스  
 C 뒤집어진 반사 펄스  
 D 펄스가 꺾여서 반사된다.

Notes :

---

---

---

---

---



## 단원 6. 통신에서의 잡음 (Noise in Communications)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 잡음이 신호를 약화시킨다는 것을 안다.
- 50Ω 전송선로를 이용하여 펄스 신호에 더해지는 잡음을 관찰한다.
- 시스템의 신호 대 잡음의 비율을 계산한다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선 세트
- 오실로스코프
- 함수 발생기
- CT-8 오디오 출력 모듈(선택)



## 6.1 통신에서의 잡음

잡음은 저항, 반도체, 그리고 자유공간에서 발생하는 무작위의 방해 현상이다. 본질적으로는 올바른 신호를 방해하는 모든 것을 잡음으로 간주된다.

모든 실제적인 통신 시스템에서 잡음의 문제가 발생한다. 통신 시스템이 작동하기 위해서 신호 대 잡음의 비율 (Signal to Noise Ratio : SNR) 이 좋은 결과를 낼만큼 높아야 한다. 잡음에 대한 신호의 비율을 SNR 이라고 한다.

원격 통신의 어떤 지점에서의 SNR 은 잡음 전력에 대한 신호 전력의 비율이고, 주로 데시벨로 나타낸다.

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{S_P}{N_P} \right)$$

SNR 은 또한 잡음 전압에 대한 신호 전압의 비율로 나타낼 수 있다.

$$SNR = 20 \log_{10} \left( \frac{S_V}{N_V} \right)$$

확실한 통신을 위한 최소한의 SNR 은 10dB 가량이다.

백색 잡음은 전력이 모든 주파수에 걸쳐 퍼져 나가는 잡음이다. 걸러진 백색 잡음은 유색 잡음이 된다. 한 가지 유색 잡음의 예로 핑크 잡음이 있다. 이것은 화이트 잡음이 저역 통과 필터를 거침으로써 만들어지는 것이다.

잡음은 일반적으로 신호에 덧붙여지는 것이라고 생각하고, 전송 선로 실습기에서 잡음은 서밍 증폭기를 이용해서 만들어진다. 서밍 증폭기는 50Ω 출력 (FIXED/VAR 스위치가 FIXED 의 위치에 있을 때) 을 하기 전에 신호를 더하고 이런 더해진 신호를 증폭한다. FIXED/VAR 스위치가 VAR 의 위치에 있을 때 서밍 증폭기의 출력 임피던스는 OUTPUT Z 조절에 의해서 0Ω 에서 100Ω 까지 다양하게 나타난다.

전송 선로 실습기에서의 잡음 발생기는 무작위의 잡음을 나타내는 디지털 파형을 만들어 내기 위해서 임의의 무작위 숫자 발생기를 사용한다. 이 디지털 파형이 저역 통과 필터를 지날 때 이것은 아날로그 잡음이 된다.

일반적으로 잡음 신호로부터 오실로스코프를 트리거 하는 것은 불가능하다. 그러나 잡음이 주기적인 방법으로 발생하기 때문에, 즉 파형이 규칙적으로 반복된다는 것이다. 그래서 오실로스코



프를 트리거 해서 잡음 파형을 관찰할 수 있다.

👁 6.1a 통신 시스템에서의 잡음의 의미는 무엇인가?

- A) 높은 가청 신호
- B) 올바른 신호를 방해하는 무작위 신호
- C) 주기적인 신호
- D) 고주파 디지털 신호

👁 6.1b 신호 전력이 35W 인 시스템과 잡음 전력이 5W 인 시스템이 있다. SNR 을 데시벨로 계산해서 기입하라.

---

---

---

## 6.2 실습

이 실습에서 잡음을 관찰할 것이다.

- 전원 공급기를 그림 16. 과 같이 전송 선로 실습기에 연결한다.
- 모든 플트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 펄스 발생기를 OFF 위치에 놓아라.
- 서밍 증폭기의 커플링을 DC 에다 두어라.
- 서밍 증폭기 출력 임피던스가 FIXED 가 되도록 하라.



- 서밍 증폭기의 이득이 최소가 되도록 하라. (반시계 방향으로 끝까지)
  
  - 전원 공급기를 켜라.
  
  - 잡음 발생기 AMPLITUDE 조절을 최대한으로 하라. (시계 방향으로 끝까지) 진폭이 서밍 증폭기의 GAIN 조절을 통해서 조절될 수 있다는 것을 주목하라.
  
  - 오실로스코프의 채널 1 을 서밍 증폭기의 출력을 조사할 수 있도록 TP9 에서 연결하라. 비록 쉽지 않더라도 오실로스코프를 트리거 하는 것이 가능해야 한다. 오실로스코프를 트리거 하지 못하더라도 걱정할 필요는 없다.
  
  - 잡음의 첨두간 진폭을 기록하라.
- ☞ 6.2a TP9 에서 잡음의 첨두간 전압의 진폭을 Volt 로 나타내라. 잡음 발생기 진폭 조절을 최대로 두고, 서밍 증폭기의 이득 조절을 최소로 하라.

- 
- 
- 
- 
- 함수 발생기 (BNC-BNC 리드선을 경유하여) 를 50Ω BNC-4mm 어댑터에 연결하라. 그리고 어댑터를 4mm 리드선을 통하여 서밍 증폭기의 입력단에 연결하라.
  
  - 잡음 AMPLITUDE 조절을 최소한으로 하라. (반시계 방향으로 끝까지)
  
  - 함수 발생기의 출력을 1kHz 의 사인파가 나오도록 조절하고, 잡음 발생기 AMPLITUDE 조절이 최대로 조절되어 있을 때의 잡음과 같도록 조절하라. TP7 에서 이것을 측정하라.
  
  - 서밍 증폭기의 출력을 50Ω 선로의 입력에 연결하라.



- 50Ω 선로의 출력을 단락 블록 저항 R 에 연결하라.
  
- 저항 R 을 중간지점으로 조절하라.
  
- A25 에서의 파형이 TP9 에서의 파형과 같은지 확인하라. 진폭과 짧은 기간의 지연은 제외한다.
  
- 잡음 AMPLITUDE 조절을 서서히 증가시켜라. 잡음이 1kHz 의 사인파를 어떻게 왜곡시키는지 관찰하라.
  
- 잡음의 진폭, 사인파의 진폭과 서밍 증폭기의 이득을 변화시켜가면서 실험을 하라.
  
- 잡음이 첨가되기 전의 1kHz 사인파형을 TP9 에서 스케치하고, 잡음이 첨가된 후의 파형을 스케치하라. (파형 스케치 6.1, 6.2)
  
- 잡음에 대한 신호의 효과, 잡음 진폭 조절, 입력 사인파 진폭과 서밍 증폭기의 이득 조절을 하면서 기록하라.

---

---

---

- 전원 공급기를 꺼라.

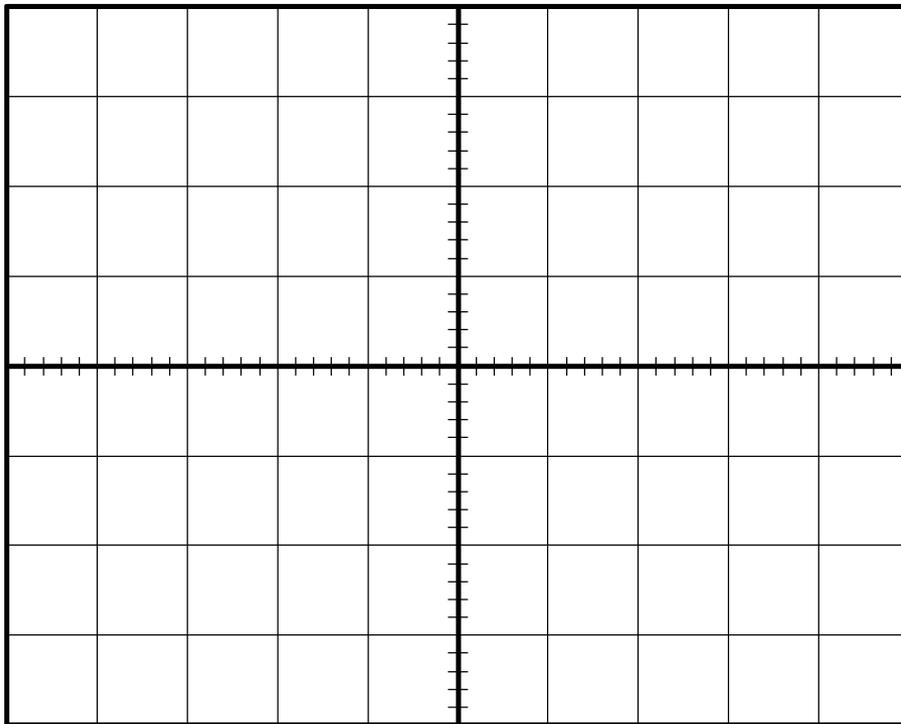
☞ 6.2b 신호와 잡음 크기가 같은 진폭으로 입력될 때 SNR 은 얼마인가? 값을 데시벨로 나타내라.

---

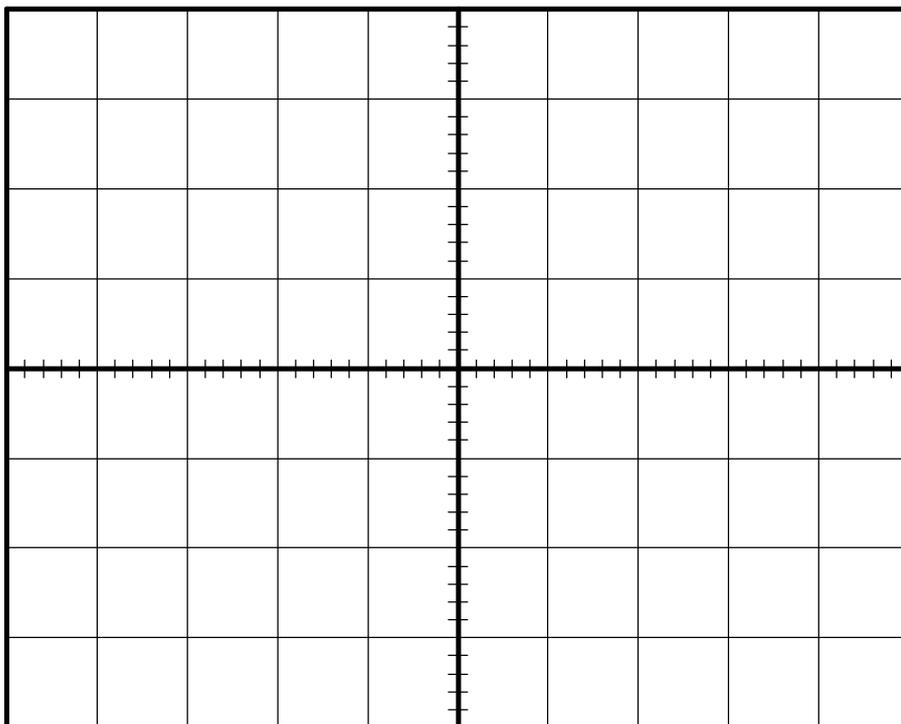
---

---





Waveform Sketch 6.1 (잡음이 첨가되기 전)



Waveform Sketch 6.2 (잡음이 첨가된 후)



### 6.3 실습

이 실습에서 펄스 신호에 추가된 잡음을 관찰할 것이다.

- 그림 16. 과 같이 전원 공급기를 전송 선로 실습기에 연결하라.
- 모든 플트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 펄스 발생기의 스위치를 ON 에 두고 속도를 Fast (F) 에 두어라.
- 4mm 리드선을 이용하여 서밍 증폭기의 출력을 50Ω 선로의 입력단에 연결하라.
- 서밍 증폭기의 커플링을 DC 로 두어라.
- 서밍 증폭기의 출력 임피던스를 FIXED 로 두어라.
- 서밍 증폭기의 이득을 최소로 조절하라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 전원 공급기를 켜라.
- 잡음 발생기 블록에서 AMPLITUDE 조절을 최소 레벨로 두어라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로의 출력을 단락 블록의 가변 저항 R 에 연결하라. 가변 저항 R 을 중간 지점에 두어라.
- 오실로스코프의 채널 1 을 A1 에 연결하여 50Ω 선로의 입력단을 검사하라.
- 오실로스코프의 채널 2 를 A25 에 연결하여 50Ω 선로의 출력단을 검사하라.
- 오실로스코프의 외부 트리거를 TP2 에 연결하고 오실로스코프를 외부 트리거로 조절하라.
- PULSE WIDTH 가 약 3 $\mu$ s 의 폭이 나오도록 조절하고, 오실로스코프를 전송 및 수신 펄스를



관찰할 수 있도록 조절하라.

■ 서밍 증폭기의 이득이 A1 에서 2V 가 나오도록 조절하라.

■ 오실로스코프를 관찰하면서 잡음 발생기의 AMPLITUDE 조절을 서서히 시계 방향으로 돌려라. 이 잡음이 데이터를 방해한다는 것을 주목하라.

■ AMPLITUDE 조절을 최소 레벨로 다시 조정하라.

■ 4mm 리드선을 이용하여 단락 블록의 저항을 펄스 Squarer 회로의 입력단에 연결하라.

■ 오실로스코프를 이용하여 A1 에서 50Ω 선로의 입력단을 관찰하고, TP20 에서 펄스 Squarer 회로의 출력을 관찰하라.

■ 펄스 Squarer에서의 출력 펄스가 전송 펄스의 폭과 같아질 때까지 COMPARATOR LEVEL 을 변화시켜라.

■ 다시 오실로스코프를 관찰하면서 잡음 발생기의 AMPLITUDE 조절을 시계 방향으로 천천히 돌려라. 적은 양의 잡음은 펄스 Squarer의 출력을 방해하지 않는다. 그러나 많은 양의 잡음은 가짜 펄스를 만들어 낸다는 것에 주목하라.

## 6.4 실습 요약

이 실습에서 펄스 신호에 더해진 잡음의 효과를 살펴보았다.

- i) 실제 잡음은 무작위적이다. (비록 신호가 전송 선로에서 발생하는 잡음이 주기적이더라도)
- ii) 잡음에 대한 신호의 비율이 작다면 신호는 방해받는다.
- iii) 잡음은 일반적으로 신호를 해석하기 위한 목적으로 신호에 더해진다.





👉 학습평가 6

1. SNR 은 무엇의 약자인가?  
 A Signal Noise Resistance  
 B Serial Noise Ratio  
 C Signal to Noise Ratio  
 D Signal Number Requirement
  
2. SNR 은 일반적으로 무슨 단위로 나타내는가?  
 A 데시벨  
 B 간단한 전압 비율  
 C 간단한 전류 비율  
 D 간단한 전력 비율
  
3. 잡음을 발생시키기 위해서 전송 선로 실습기에서 잡음 발생기는 무엇을 사용하는가?  
 A 임의의 저항 숫자 발생기  
 B 잡음 다이오드  
 C 잡음 트랜지스터  
 D 임의의 무작위 숫자 발생기
  
4. 모든 주파수에 걸쳐 퍼져나가는 잡음 전력을 가진 잡음을 무엇이라고 하는가?  
 A 핑크 잡음  
 B 백색 잡음  
 C 레드 잡음  
 D 오렌지 잡음
  
5. 4V 의 신호와 0.2V 의 잡음으로 이루어진 시스템의 SNR 은 얼마인가?  
 A 13dB  
 B 21dB  
 C 26dB  
 D 52dB
  
6. 통신을 가능하게 하기 위한 최소한의 SNR 은 약 얼마인가?  
 A 23dB  
 B 3dB  
 C 15dB  
 D 10dB



## 단원 7. 펄스 입력의 AC 커플링 (AC Coupling of Pulse Inputs)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 디지털 신호에서의 AC 커플링 효과를 알 수 있다.
- 펄스 신호에서의 AC 커플링의 효과를 알 수 있다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선
- 오실로스코프



### 7.1 AC 커플링 효과

전송 선로를 따라서 데이터가 이동할 때 일어날 수 있는 한 가지 문제점은 선로가 AC 로 연결이 되어 있다는 것이다. AC 로 연결된 선로는 전송기와 수신기 사이에 DC 의 통로를 제공하지 않는다.

AC 로 연결된 선로의 예로 표준 전화선이 있는데, 이것은 선로의 각 부분이 전송자의 의미로써 연결되어 있다.

문제는 평균 레벨 정도 (혹은 DC 성분) 의 간단한 디지털 신호가 그것의 진폭과 공간에 대한 Mark 비율로 나타난다는 것이다. 그러나 공간 비율의 표시는 전송되는 데이터가 변하는 것에 따라서 다양하게 나타난다.

예를 들어 아래 그림 29. 에서 두 디지털 신호를 생각해 보자. 이 신호들은 같은 진폭을 가지고 있다. 그러나 Mark 대 공간의 비율이 다르다. 위 신호의 평균 수치는 +1V 인 반면에 아래 신호의 평균 수치는 +4 V이다.

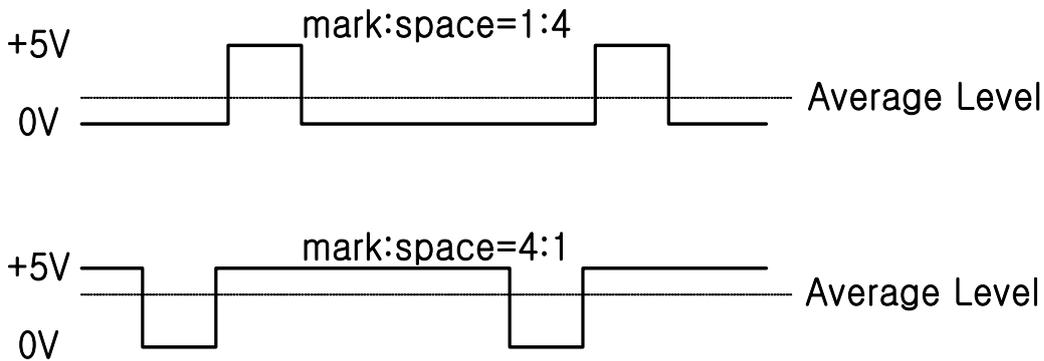


그림 29. Transmitted Waveforms

그러나 어떤 신호든지 AC 로 연결된 전송 선로를 따라 가면 DC 성분이 없어지고, 그래서 평균 신호 수신은 0V 이다. 그림 29. 에서 본 두 디지털 신호가 가지는 효과는 각각 수신된 신호의 높고 낮은 전압은 0V 와 +5V 를 넘지 못한다는 것이다. 그러나 그것은 신호의 Mark 대 공간의 비율에 의존한다. (그림 30. 에 나타난 것과 같이)

간단한 디지털 데이터로 디지털 신호의 Mark 대 공간의 비율은 데이터가 변화된 것을 보내는 것에 따라서 변한다. 그래서 수신 신호의 높고 낮은 전압 레벨은 지속적으로 올라갔다 내려갔다 한다.

이것은 펄스 Squarer 회로가 수신되는 디지털 신호를 "Squarer Up" 하기 위해 수신기에 사용되었을 때 문제를 일으킨다. 왜냐하면 이 회로는 수신 파형과 고정된 시작 전압을 비교하기 때문이





■ 펄스 발생기를 ON 의 위치에 두고 속도를 Fast (F) 에 두어라.

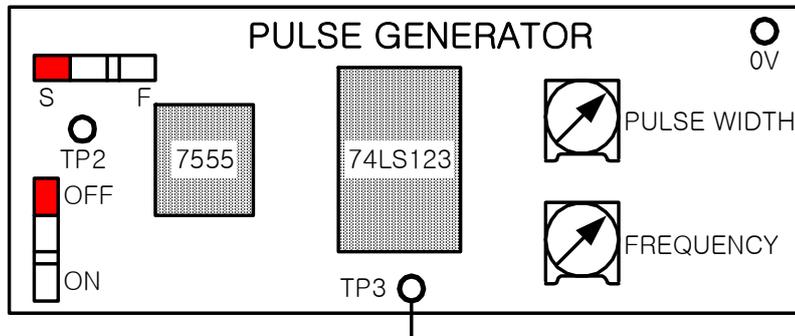


그림 31. 실험장치의 구성

■ 4mm 리드선을 이용하여 서밍 증폭기의 출력을 50Ω 선로의 입력단에 연결하라. 서밍 증폭기의 FIXED/VAR 스위치를 FIXED 에 두어라.

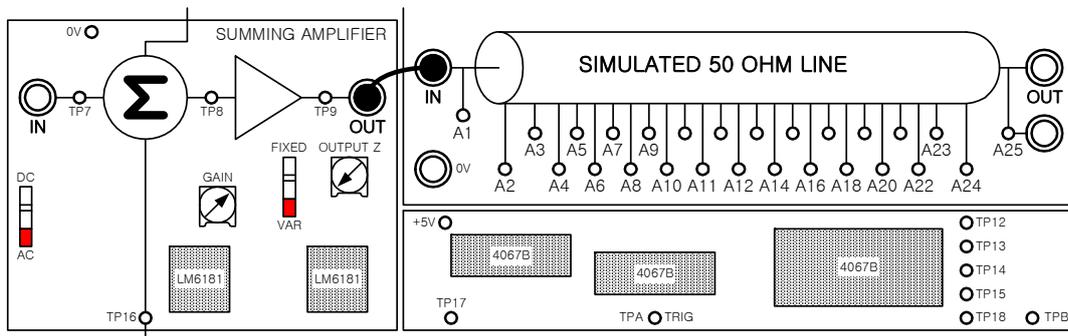


그림 32. 실험장치의 구성

■ 서밍 증폭기의 커플링을 AC 로 두어라.

■ 서밍 증폭기의 이득을 최소한으로 조절하라. (반시계 방향으로 끝까지)

■ 잡음 발생기의 AMPLITUDE 조절을 최소한으로 하라. (반시계 방향으로 끝까지)



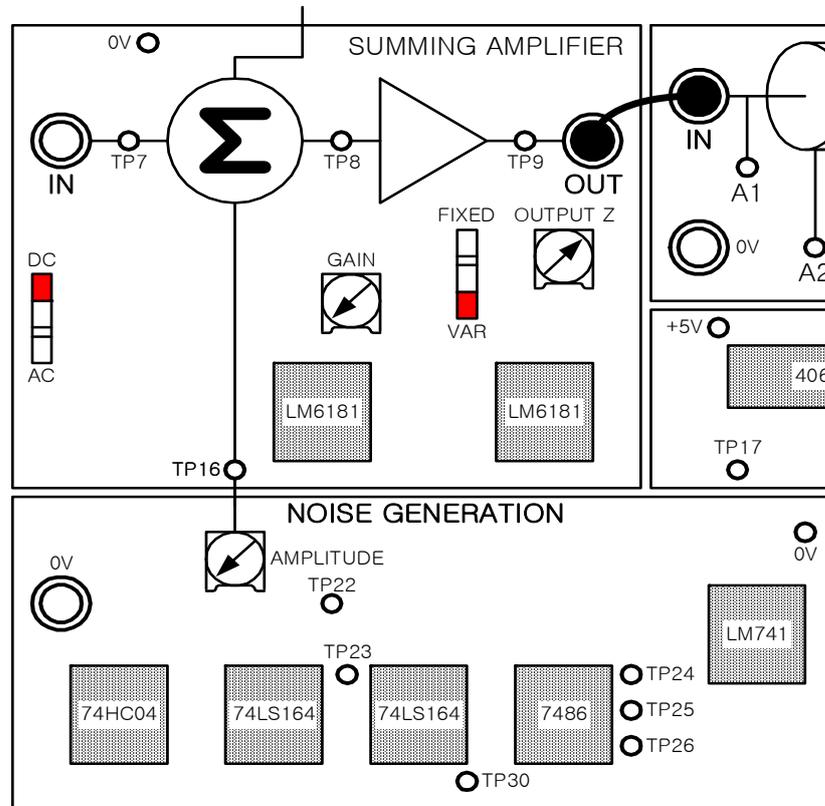


그림 33. 실험장치의 구성

- 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로의 출력을 단락 블록의 가변저항 R 과 연결하라. 가변저항 R 을 중간 지점에 두어라.
- 4mm 리드선을 이용하여 단락저항 R 을 펄스 Squarer 의 입력과 연결하라.
- 전원 공급기를 켜라.
- 오실로스코프의 채널 1 을 A1 에 연결하여 50Ω 선로의 입력단을 관찰하라.
- 오실로스코프의 채널 2 를 TP20 에 연결하여 펄스 squarer 의 출력단을 관찰하라. 오실로스코프의 두 채널이 DC 커플링으로 맞춰져 있어야 한다.
- 오실로스코프의 외부 트리거를 TP2 에 연결하고 오실로스코프를 외부 트리거로 조정하라.



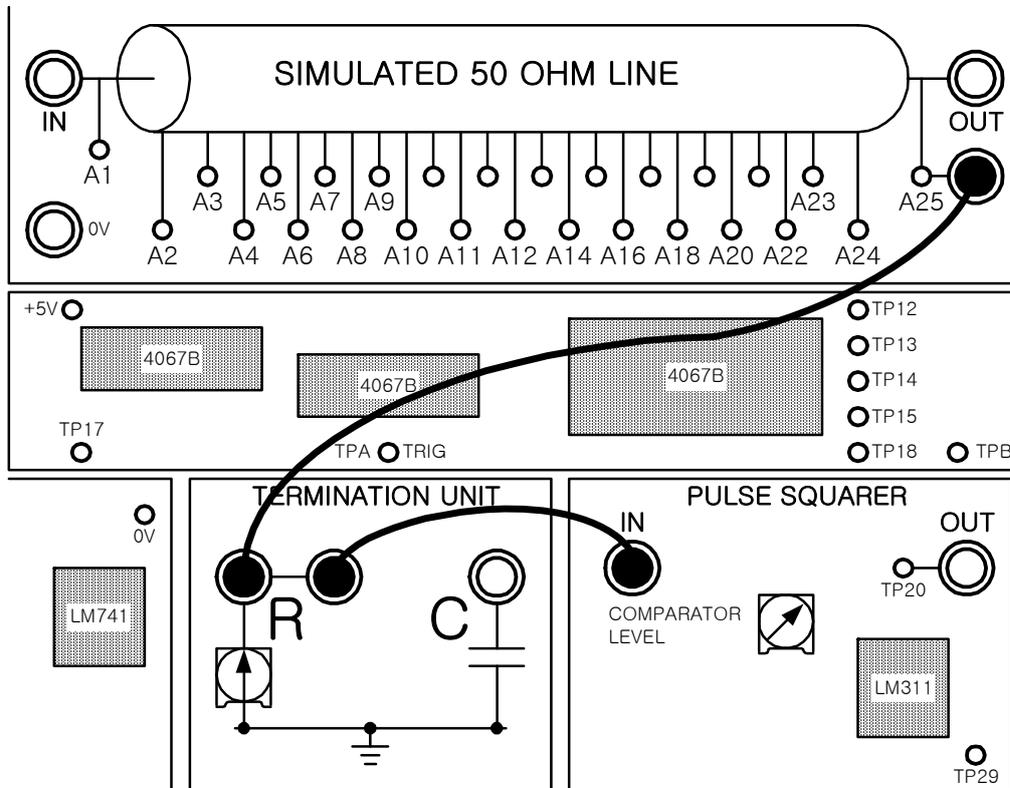


그림 34. 실험장치의 구성

- $3\mu s$ 의 폭을 가지는 펄스가 나오도록 PULSE WIDTH를 조정하고, FREQUENCY 조절을 최대한으로 하라. (반시계 방향으로 끝까지)
- A1에서 최대 진폭이 2V가 나오도록 서밍 증폭기의 이득을 조절하라.
- 펄스 Squarer 회로에서 COMPARATOR LEVEL을 조절하여, 양 채널에서의 펄스 폭이 같아지도록 조절하라.
- PULSE WIDTH 조절을 시계 방향으로 돌려라. 입력 신호가 Mark 대 공간 비율이 증가하면서 아래로 내려간다는 것을 주목하라. 50Ω 선로에서 나타나는 펄스의 첨두치의 평균 전압이 펄스 Squarer의 초기 전압 수준 아래로 내려갈 때 펄스 Squarer에서는 아무런 출력 펄스가 나오지 않는다.



■ Mark 대 공간의 비율이 다양할 때 일어나는 현상을 설명하라.

---

---

---

■ 전원 공급기를 꺼라.

☞ 7.2a 간단한 디지털 데이터가 AC 로 연결된 전송 선로를 따라 전송될 때 다음 중 Mark 대 공간의 비율에 영향을 받지 않는 것은 무엇인가?

- A) 펄스 Squarer 입력의 양수 첨두치의 전압 레벨
- B) 펄스 Squarer 입력의 음수 첨두치의 전압 레벨
- C) 펄스 Squarer 회로의 초기 레벨
- D) 펄스 Squarer 회로의 현재 레벨

### 7.3 실습 요약

이 실습에서 AC 커플링의 효과를 살펴보았다.

다음은 주의하라.

- i) 간단한 펄스 신호의 평균 레벨은 Mark 대 공간 비율에 의존한다.
- ii) 펄스 Squarer 는 간단한 신호가 사용되었을 때 펄스 진폭의 전 범위를 출력하지는 않는다.

간단한 펄스 데이터가 사용되었을 때 펄스 Squarer 회로는 에러를 낸다. (특정한 Mark 대 공간 비율에서 출력을 하지 않는다.) 간단한 펄스 데이터 이용의 가장 흔한 경우는 NRZ (L) 코드인데 논리 "1" 이 고전압에서 데이터가 전송되었다는 것을 의미하고, "0" 이 저전압에서 데이터가 전송되었다는 것을 의미한다.

그러나 데이터의 조건이 평균 레벨이 데이터가 보내짐에 따라서 변하지 않는 곳에서 데이터를





👉 학습평가 7

1. AC 로 연결된 선로는  
 A 전송기와 수신기 사이에 AC 신호만을 위한 통로를 제공한다.  
 B 전송기와 수신기 사이에 DC 신호만을 위한 통로를 제공한다.  
 C 전송기와 수신기 사이에 AC 와 DC 신호 모두를 위한 통로를 제공한다.  
 D 전송기와 수신기 사이에 사인파만 통과하도록 한다.
2. 진폭이 1V 이고, Mark 대 공간 비율이 1:7 인 펄스 신호의 평균 레벨은?  
 A 1/7 V                       B 1/8 V                       C 1/9 V                       D 2/7 V
3. 평균 레벨이 전송되는 데이터에 의해 결정되는 데이터 조절 형태는?  
 A NRZ (L)                       B Biphas (Mark)  
 C AMI                               D Biphas (Manchester)
4. 펄스 Squarer 회로는 이 실험에서 에러를 발생시키는데 그 이유는 ?  
 A 서밍 증폭의 이득이 낮기 때문이다.  
 B 50Ω 선로가 매칭되어 있기 때문이다.  
 C mark 대 공간 비율과 함께 평균 레벨이 다양하기 때문이다.  
 D 비교 레벨이 바로 설정되어 있지 않기 때문이다.

Notes :

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



## 단원 8. 매칭과 주파수 응답 (Matching and Frequency Response)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 전파의 속도, 주파수 파장간의 관계를 알 수 있다.
- 매칭되지 않은 전송선로가 주파수를 변화시키는 임피던스를 갖고 있다는 것을 설명한다.
- 매칭되지 않은 50Ω 선로의 주파수 응답을 살펴본다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선
- 오실로스코프
- 함수 발생기



## 8.1 반사와 사인파 입력

지금까지는 펄스 파형에서만 반사를 생각해 보았다.

만약, 사인파가 매칭된 전송 선로를 따라 전파된다면 단락지점에서 모든 전력은 부하에 의해 흡수되고 반사는 일어나지 않는다.

그러나, 사인파가 매칭되지 않은 전송 선로를 따라 전파된다면 단락에서 반사가 일어난다.

즉, 만일 선로가 개방된 회로라면 사인파는 뒤집어지지 않고 반사된다.

만일 선로가 단락된 회로라면 사인파는 뒤집어져서 반사된다.

비록 이것이 펄스 입력의 조건과 비슷하다고 하더라도 반사된 사인파는 흥미로운 효과를 내고, 그것은 다음 부분에서 살펴볼 것이다.

## 8.2 파장 (Wavelengths)

반사파가 선로를 따라 되돌아오면, 전송선로에서 전송파와 더해 질 것이다. 만일 입력에서 매칭되지 않고 지연된 결과로 반사된 파가 위상이 180도 다르게 나올 때, 이것은 빼기한 효과의 결과로 파는 처음에 전송된 파보다 작은 사인파가 된다.

전송 선로에서의 지연과 단락 조건이 영원히 지속될 때 결과로 입력에서의 파는 반사파의 위상에 의존한다. 시간 지연이 같으므로 위상은 사인파의 주파수에 의존한다.

이 효과를 고려할 때 파장에서 전송 선로의 길이를 측정하는 것이 유용하다. 파장은 진동이 한 사이클을 만드는데 필요한 시간동안 이동한 파의 거리를 말한다.

수학적인 용어로 파장은

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

이다. 여기서,  $v$  가  $m/s$  로 속도이고,  $f$  가 Hertz 로 주파수이고,  $\lambda$  는 Meter 로 나타낸다.

단원 3 에서 전송 속도는 선로의 물리적인 특성에 의존하다는 것을 기억할 것이다. 주어진 전



송 선로에서 이 속도는 어떤 입력 신호에도 일정하다.

만약 특정한 주파수에서 전송 선로가 한 파장 길이라면 출력에서 사인파는 입력을 360 도 지연시킨다. 다시 말해 두 파장이 같은 위상이 된다는 말이다. 만약 선로가 개방된 회로를 가지고 있을 때, 이것은 출력에서 같은 위상의 반사파가 나온다. 이 반사파는 전송 선로를 따라 이동하고, 360 도 위상이 바뀌어져 도착한다. 다시 말해 전송되고 반사된 파는 입력에서 같은 위상으로 도착한다. 이 두 파장이 더해지고 최대 진폭을 나타내게 될 것이라는 것을 의미한다.

다른 주파수에서 위상의 차이는 다르고, 그래서 입력에서의 진폭은 역시 다르다. 다시 말해 주파수 반응은 선로의 단락에 의존한다는 것이다.

☞ 8.2a 파장은 어떻게 정의되는가?

- A) 한번 진동하는데 걸리는 시간
- B) 한번 진동하는 시간동안 간 거리
- C) 라디오 신호
- D) 전송선로를 따라서 파가 이동하는데 걸린 시간

☞ 8.2b 속도가  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  이고 주파수가 200 kHz 일 때 파장을 계산하고 기입하라. (m 로 기입하라.)

---

---

---

---

---

8.3 입력 임피던스

만약 부정합된 결과로 입력 진폭이 매칭된 상태와 비교했을 때 줄어들었다면 입력 임피던스는 감소했다고 말할 수 있다. 거꾸로, 만약 입력 진폭이 매칭된 상태에서 보다 증가했을 때 선로의 입력 임피던스는 증가했다고 볼 수 있다.

그래서 부정합된 선로에서 선로의 입력 임피던스를 주파수를 이용해서 변화시킬 수 있다.



## 8.4 실습

이 실습에서 다른 단락을 가진 50Ω 선로의 주파수 반응을 살펴볼 것이다.

- 그림 16. 과 같이 전원 공급기를 전송 선로 실습기에 연결하라.
- 모든 플트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 펄스 발생기를 꺼라.
- 전송 선로 실습기에서 함수 발생기의 출력을 50Ω BNC-4mm 어댑터에 연결하라. 그리고 4mm 리드선을 이용하여 서밍 증폭기의 입력단에 연결하라.
- 서밍 증폭기의 출력을 50Ω 선로의 입력에 연결하라.
- 서밍 증폭기의 출력 커플링을 DC 로 두어라.
- 서밍 증폭기의 FIXED/VAR 스위치를 FIXED 로 두어라.
- 서밍 증폭기의 이득을 최소한으로 하라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 잡음 발생기 AMPLITUDE 조절을 최소한으로 하라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로의 출력단을 단락 블록의 가변저항 R 과 연결하라. 가변 저항 R 은 중간위치에 두어라.
- 전원 공급기를 켜라.
- 오실로스코프의 채널 1 을 A1 에 연결하여 50Ω 선로의 입력단을 검사하라.
- 오실로스코프의 채널 2 를 A25 에 연결하여 50Ω 선로의 출력단을 검사하라.





표 8.1 측정된 전압

Frequency (kHz)	Match Termination (Vp-p)	Short Circuit Termination (Vp-p)	Open Circuit Termination (Vp-p)
1			
2			
5			
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
150			
200			
250			
300			
350			
400			
450			
500			



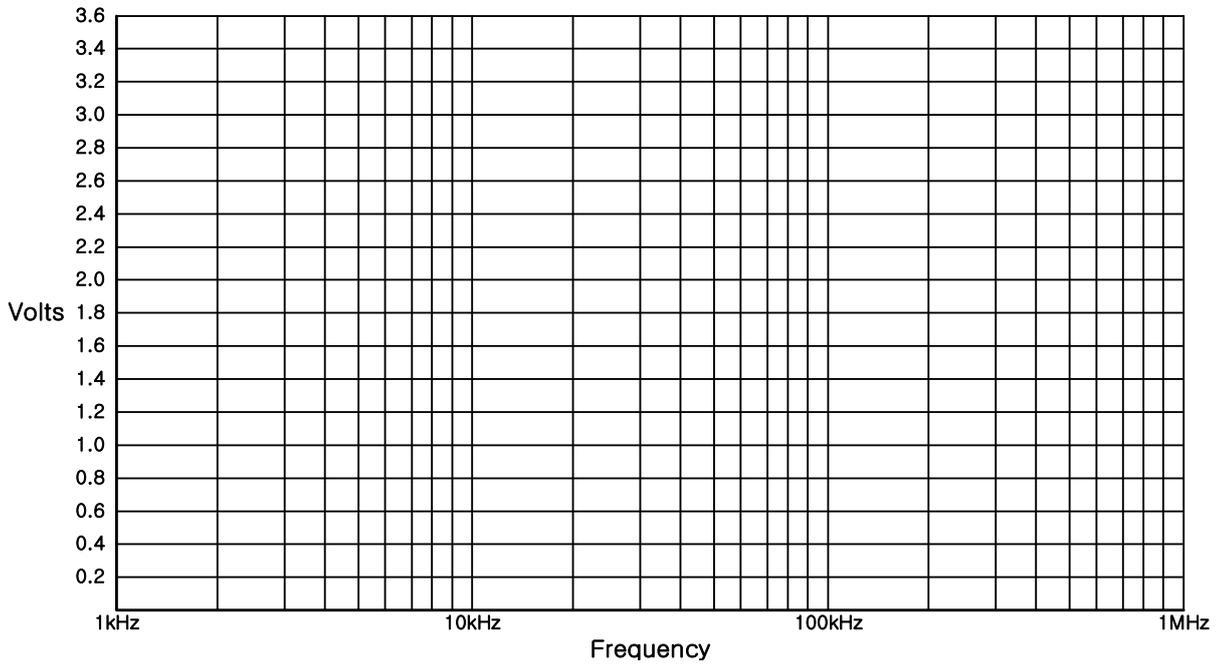


그림 35.a Match Termination

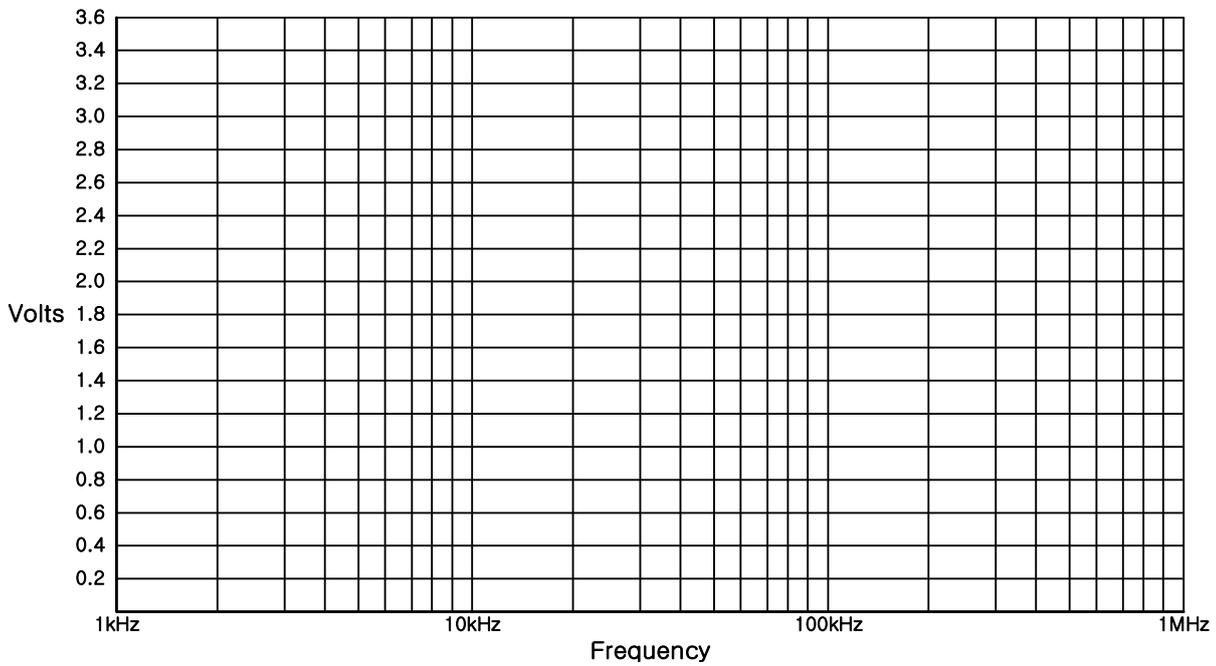


그림 35.b Short Circuit Termination



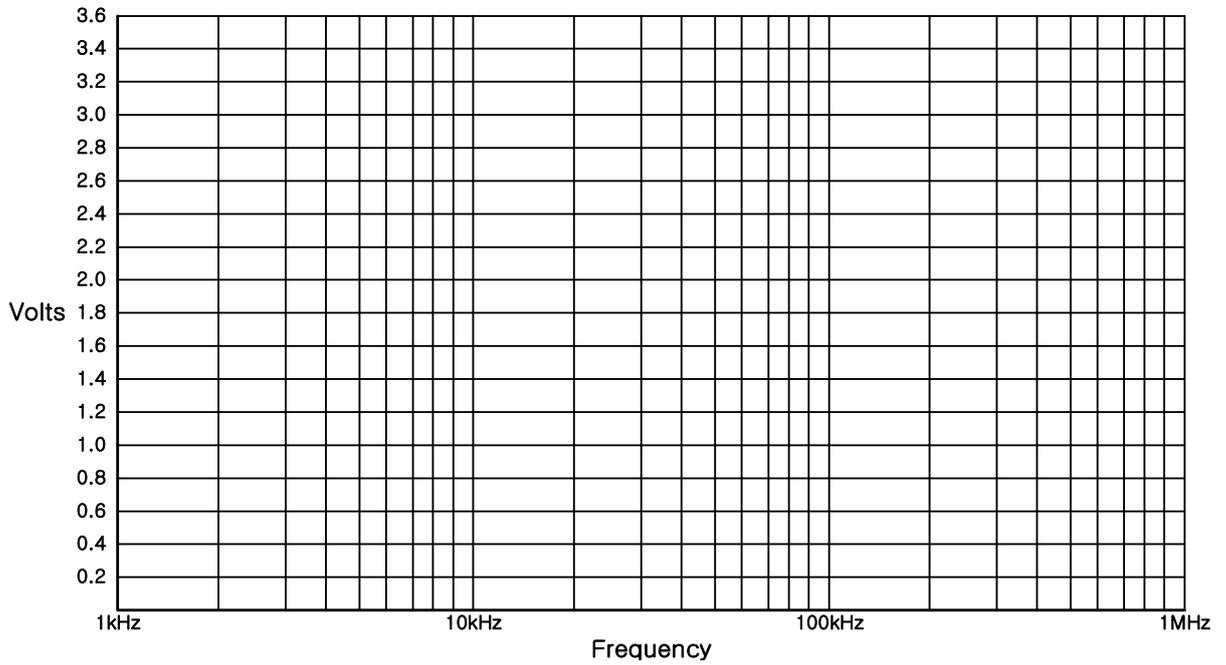


그림 35.c Open Circuit Termination

☞ 8.4a 50Ω 선로의 단락된 회로에서 일어나는 것으로, 처음으로 내려간 부분에서의 주파수를 측정하라.

---

---

---

☞ 8.4b 50Ω 선로의 개방된 회로에서 일어나는 것으로, 처음으로 내려간 부분에서의 주파수를 측정하라.

---

---

---



### 8.5 실습 요약

실습 8.4 에서 주파수 반응에서 단락 저항의 효과를 살펴보았다.

i) 선로를 매칭시키는 것이 최상의 주파수 반응을 가져온다.

ii) 선로를 매칭시키지 않으면 특정 주파수 이후에는 주파수가 증가함에 따라 주파수가 오르락 내리락 한다.

이 실험에서 좋은 주파수 반응을 위해 매칭을 잘 시켜야 하는 중요성을 알아보았다.

이 반응의 첫 번째 부분은 동조 회로에서의 반응과 같아 보인다. 이것이 어떤 곳에 사용될 수 있다고 보는가? 이론적으로는 가능하다. 그러나 실제로 이 효과는 부정합된 선로가 한 주파수 이상에서 "공진" 일 때 자주 사용되지 않는다.

다음 장에서는 정재파를 살펴볼 것이다.

#### Notes:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



👉 학습평가 8

- 매칭된 선로를 따라 이동하는 사인파는 무엇을 만드는가?  
 A 뒤바뀐 반사파                       B 뒤바뀌지 않은 반사파  
 C 반사가 없다.                       D 출력이 없다.
- 속도가  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$  이고 주파수가 20MHz 인 파의 파장의 길이는?  
 A 1m       B 10m       C 100m       D 1Km
- 선로의 길이가 파장의 길이의 반일 때 전송 선로에서 사인파 입력은 입력과 출력 사이에 얼마의 위상 변화가 생기는가?  
 A  $90^\circ$        B  $180^\circ$        C  $270^\circ$        D  $360^\circ$
- 전송 선로의 입력단에서 전송파와 반사파의 위상관계가  $360^\circ$  일 때 두 파는 어떻게 되는가?  
 A 합쳐진다.                       B 뺀다.  
 C 곱해진다.                       D 나누어진다.
- 부매칭된 선로에서 다음 중 어떤 것이 입력 신호의 주파수에 의존하지 않는가?  
 A 파장  
 B 입력 임피던스  
 C 선로의 입력단에서 전송파와 반사파의 위상 변화  
 D 속도
- 개방된 회로 선로의 주파수 반응 (입력단에서 관찰된) 을 가장 잘 설명한 것은?  
 A 직선  
 B 특정 주파수 이후에 떨어지는 레벨  
 C 주파수가 증가함에 따라 처음에는 떨어졌다가 지속적으로 증가  
 D 처음에는 올라갔다가 주파수가 증가함에 따라 지속적으로 감소



## 단원 9. 정재파 (Standing Waves)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 전송 선로에서의 정재파의 원리를 이해한다.
- 전송 선로의 Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) 을 예상한다.
- 정재파 표시 회로를 이용하여 정재파를 관찰한다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선
- 오실로스코프
- 함수 발생기



9.1 정재파

이전 단원에서 매칭된 전송 선로에서 개방 회로와 단락 회로일 때의 주파수 응답 효과에 대해 알아보았다.

사인파가 선로를 따라 되돌아오고, 결과로 입력단에서 파가 전송된 파와 반사된 파를 합한 형태로 phasor 가 되는 것을 보았다.

이 효과는 전송 선로의 입력단에서만 일어나는 것이 아니라 모든 전송선로를 따라서 일어난다. 그래서 어떤 특정한 주파수에서 입력에서의 진폭은 최소일 수 있다. 그러나 다른 지점에서 진폭은 최대일 수 있다. 만약 진폭이 선로를 따라 일정한 간격으로 측정되고, 그래프가 거리에 대한 진폭의 것으로 나타났다면, 결과는 최소와 최대, "파"의 형태를 나타낼 것이다. 이 "파"의 자취를 Standing Wave (정재파)라고 한다. 왜냐하면 선로를 따라 있는 특정한 지점에서 주파수는 변하지 않는다. 다시 말해 파는 불변하거나 "정해진" 것이다.

정재파의 파장에서 선로의 길이를 측정해 볼 수 있다. 파장은 아래 그림 36. 과 같이 이웃한 최대값이나 최소값 사이의 거리의 두 배이다.

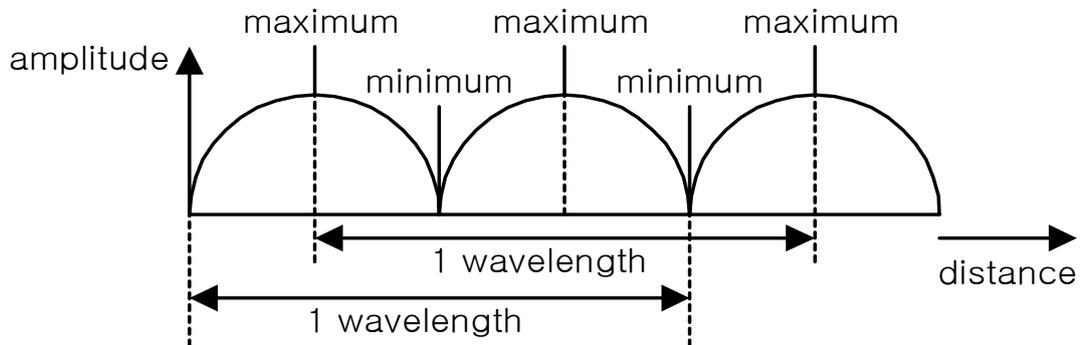


그림 36. 정재파의 파형

정재파의 파장은 입력 신호의 파장과 같다. 그래서 그것은 입력 신호의 속도와 주파수에 의존한다. 선로가 한 입력 주파수에서 2 파장 길이라고 할 때 그것은 언제나 단락 임피던스를 무시하고 그 주파수에서 2 파장 길이이다. 그러나 단락 임피던스로 조절하는 것은 최소값이나 최대값이 발생하는 선로를 따라 있는 바로 그 지점이다.

예를 들어 한 선로가 단락 회로를 가지고 있을 때 그 전압은 단락된 회로의 끝에서 최소일 것이다. 반면에 선로가 개방 회로를 가지고 있을 때 그 전압은 개방된 회로의 끝에서 최대일 것이다.

그림 37. 에서 전송 선로를 따라 주어진 주파수에서 세 가지 다른 종류의 정재파 유형을 볼 수

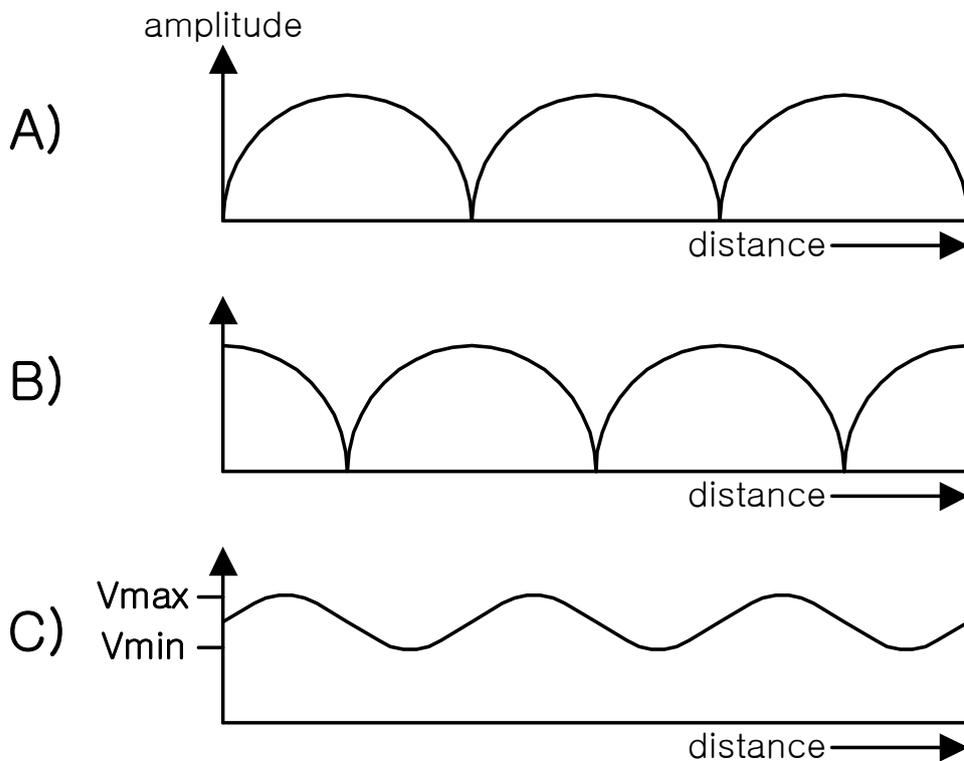


있다.

유형 A) 는 1.5 파장의 길이를 가지는 단락 회로의 경우를 보여준다.

유형 B) 는 1.5 파장의 길이를 가지는 개방 회로의 경우를 보여준다.

유형 C) 는 1.5 파장의 길이를 가지며, 선로가 약간 부정합된 회로의 경우를 보여준다.



(a) 단락회로 (b) 개방회로 (c) 부정합회로

그림 37. 정재파 파형

선로를 따라서 일정한 간격으로 읽고, 최대와 최소 진폭을 적어 본다면 전압 정재파 비율이나 VSWR 을 계산할 수 있을 것이다. 그것은 다음 공식으로 계산한다.

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

개방된 회로나 단락된 회로 선로에서  $V_{min} = 0$  임을 주목하면 VSWR 은 무한대나 무한대에 가



같은 값을 가진다.

단원 4 에서 전압 반사율 ( $\Gamma$ ) 을 사용하여 다음 공식을 유도한 것을 기억할 것이다.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

VSWR 또한 그 공식을 이용하여 구할 수 있다.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

$|\Gamma|$  는 항상 양수이다.  $\Gamma$  가 음수라 하더라도 절대치를 취하기 때문이다.

단원 4 에서 개방된 회로는  $\Gamma = 1$  이고, 단락된 회로는  $\Gamma = -1$  이라는 것을 기억할 것이다. 모든 경우  $|\Gamma| = 1$  이고, VSWR 은 무한대이거나 무한대에 가깝다.

☞ 9.1a 단락 회로에서 단락된 반파장 길이의 선로가 최소 전압을 갖는 지점은?

- A 아무데도 없다.                       B 끝부분에서만  
 C 중간부분과 끝부분에서             D 시작지점과 끝부분에서

☞ 9.1b 전송 선로의 입력단에 입력된 신호의 진폭을 선로를 따라 일정간격으로 측정하였다. 이 때 기록된 값의 최대치가 8V 이고, 최소치가 2V 이다. VSWR 을 계산하고 기입하라.

---

---

---

## 9.2 실습

선로에 따라 거리에 대한 신호의 진폭을 그래프에 나타냄으로써 정재파를 검사해 보았지만, 전



송선로 실습기에서는 더 쉬운 방법으로 확인할 수 있다.

전송 선로를 따라 있는 각기 다른 점에서의 첨두간 진폭을 오실로스코프에 나타냄으로써 확인 가능하다. 이 방법으로 오실로스코프는 실제 정재파를 보여준다. 그러나 이 정재파가 선로를 따라 첨두간 진폭을 보여주기 때문에 표시된 자취는 앞의 그림 37. 과 약간의 차이점을 보인다. 예를 들어 유형 A (1.5 파장의 길이를 가지는 단락 회로의 경우) 는 아래 그림 38. 에서 보는 것처럼 전송 선로 실습기의 정재 파장 표시 회로에 의해 표시된다.

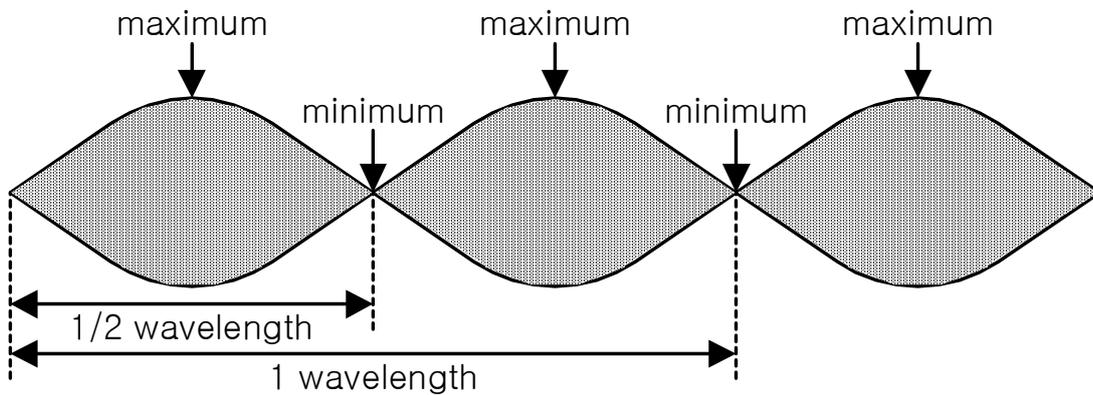


그림 38. 전송 선로 실습기의 정재파 표시 회로에 나타나는 정재파

이 실습에서 오실로스코프에 정재파를 표시한다.

- 그림 16. 처럼 전원 공급기를 전송 선로 실습기에 연결한다.
- 모든 플트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 펄스 발생기 스위치를 OFF 시켜라.
- 실습 8.4 에서와 같이 함수 발생기를 서밍 증폭기를 거쳐서 50Ω 선로의 입력단에 연결하라.
- 전원을 켜라.
- 오실로스코프의 채널 2 를 A1 에 연결하라. 50Ω 선로의 입력단에서 함수발생기의 출력이 첨두간 전압 4V, 주파수 100kHz 의 사인파를 출력하도록 조정한다.



■ 오실로스코프의 채널 1 을 TPA 의 정재파 표시 회로에 연결하라. 오실로스코프는 사각파를 표시할 것이다. 이 신호의 음수 가장자리에서 오실로스코프를 트리거하라.

■ 오실로스코프의 시간 축을 조정하여 이 사각파의 음수부분이 왼쪽 격자부분에 가장 많이 가도록 하고, 다음 양수부분 가장자리가 오른쪽 격자부분으로 오도록 하라. 다시 말해 사각파의 반주기는 오실로스코프 표시기에 표시되어야 한다.

■ 사각파만 오실로스코프를 설정하는데 이용되었기 때문에 시야에서 없어질 수도 있다.

■ 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로를 단락 블록의 가변저항 R 에 연결하라. 가변저항 R 을 중간 지점에 두어라.

■ 오실로스코프의 채널 2 를 TPB 에 연결하여 정재파 표시의 출력단을 검사하라.

■ 4mm 리드선을 이용하여 70Ω 선로의 입력단을 0V 에 연결하라. (그림 39.)

일반적으로 오실로스코프는 시간에 대한 전압을 나타낸다. 그러나 정재파 표시 회로는 이것을 선로를 따른 길이에 대한 전압의 자취로 나타낸다. 자취의 왼쪽 부분은 50Ω 선로의 입력단을 나타낸다. 다음으로 이 선로의 24 부분이 나온다. 그 다음으로 70Ω 선로의 부분이 나타난다. 70Ω 선로가 이 실습에서 사용되지 않았으므로 오실로스코프의 이 마지막 부분은 무시된다.

아래의 그림 40. 은 오실로스코프에서 얻을 수 있는 표시 중의 하나이다. 이 표시는 단락회로를 가진 전송 선로를 보여 주는데, 그것은 정재파의 반파장 길이이다. 각 "단계" 는 한 부분을 나타낸다.

■ 100kHz 와 1MHz 사이에서 50Ω 선로가 매칭되었을 때 선로를 따라서 진폭이 일정하게 되어 있다는 것을 발견해야 한다. 고주파 (500kHz 나 그 이상) 에서 선로가 불완전하기 때문에 생기는 작은 진폭이 있을 수 있다.



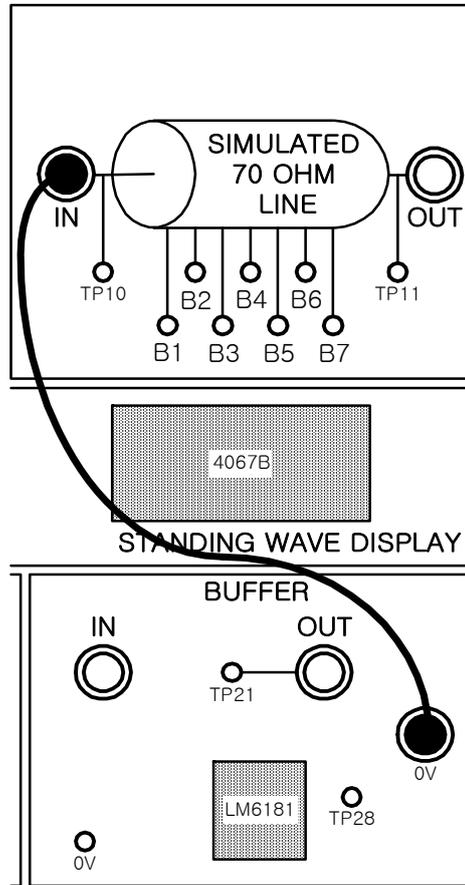


그림 39. 실험장치의 구성

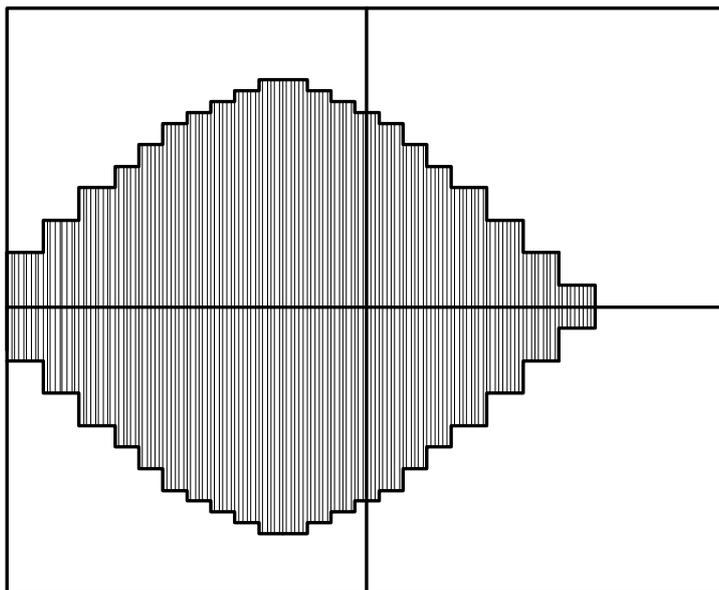


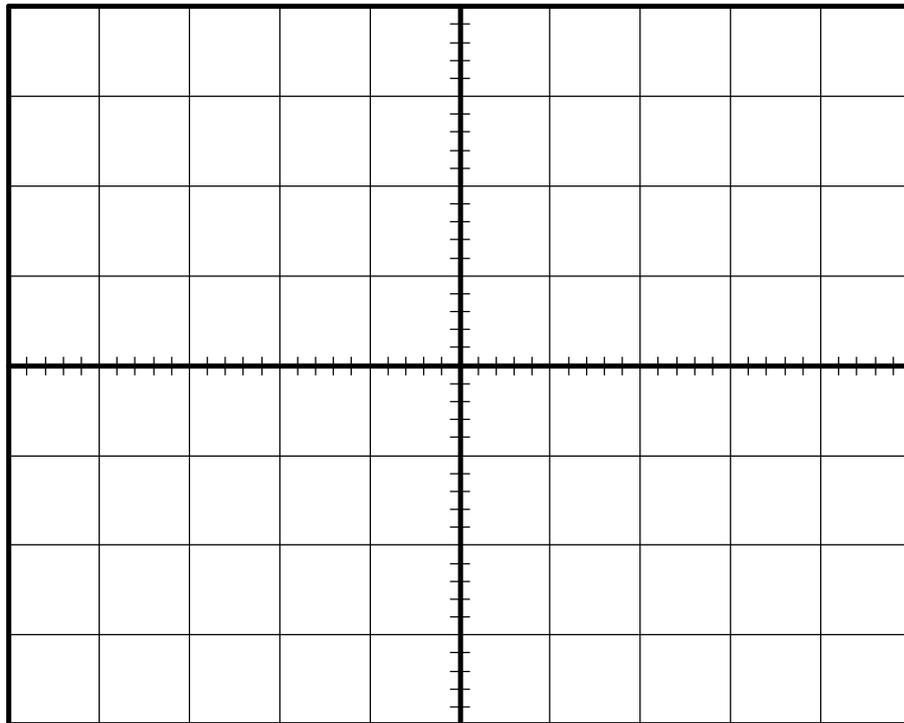
그림 40. 측정된 정재파 파형



■ 50Ω 선로를 단락시켜라. 입력 사인파의 주파수를 변화시켜서 얻을 수 있는 파장은?

- i) 정재파의 1/4파
- ii) 정재파의 반파
- iii) 정재파

■ 파형 스케치 9.1, 9.2 에 파형 i) 과 ii) 를 스케치하고, 이 표시된 것이 어떤 주파수에서 생기는지 기록하라.



Waveform Sketch 9.1 (정재파의 1/4파)

Notes:

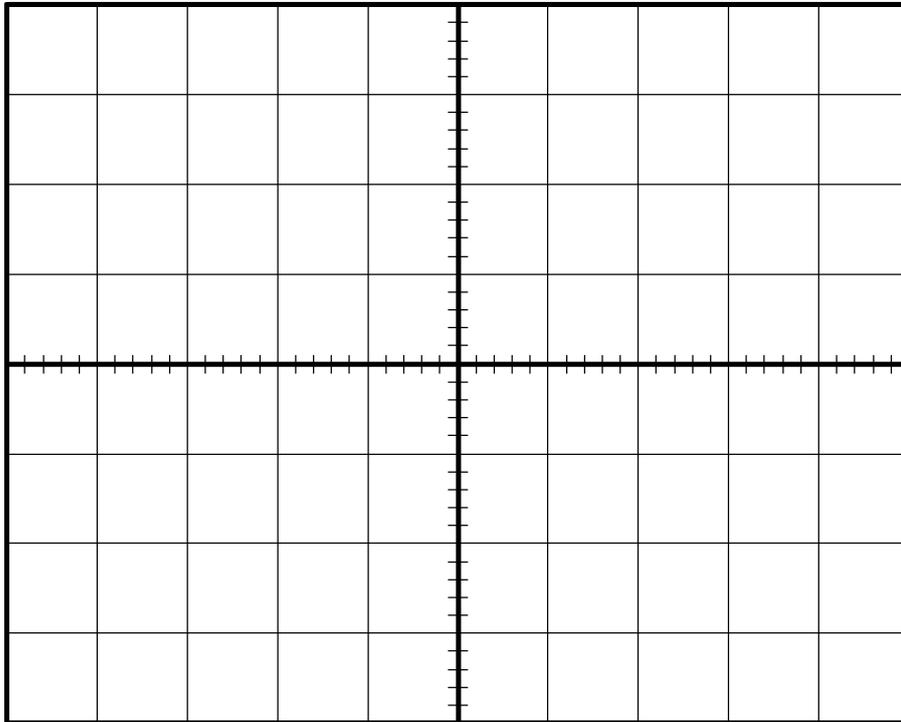
---

---

---

---





Waveform Sketch 9.2 (정재파의 반파)

■ 50Ω 선로를 개방시켜라. 입력 사인파의 주파수를 변화시켜서 얻을 수 있는 파장은?

- iv) 정재파의 1/4파
- v) 정재파의 반파
- vi) 정재파

■ 파형 스케치 9.3, 9.4 에 파형 v) 과 vi) 를 스케치하고, 이 표시된 것이 어떤 주파수에서 생기는지 기록하라.

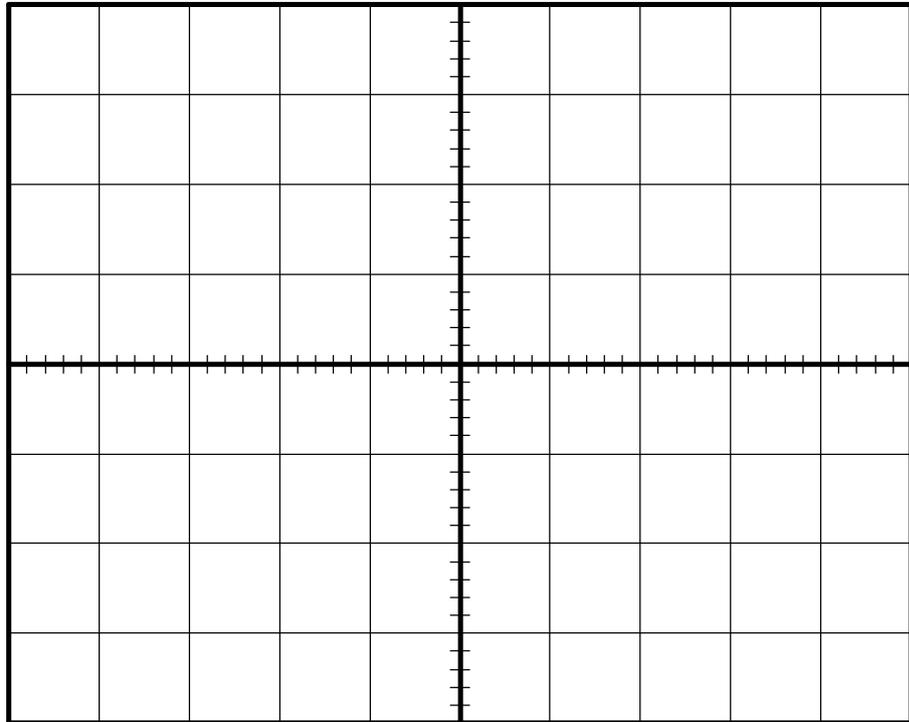
Notes:

---

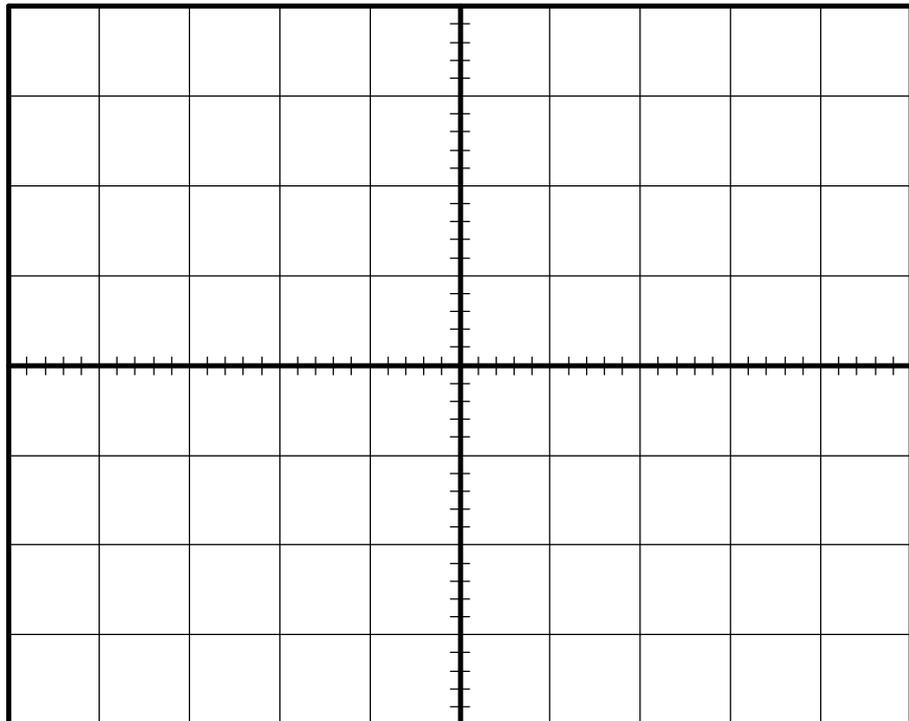
---

---





Waveform Sketch 9.3 (정재파의 1/4파)



Waveform Sketch 9.4 (정재파의 반파)



■ 전원 공급기를 꺼라.

☞ 9.2a 50Ω 선로에서 단락회로를 가진 1/4 정재파가 표시되는 주파수를 kHz 단위로 나타내어라.

---

---

---

☞ 9.2b 50Ω 선로가 개방회로이고, 반파장을 표시할 때 VSWR 을 계산하라.

---

---

---

### 9.3 실습 요약

실습 9.2 에서 정재파에 대해 알아보았다.

i) 선로를 매칭시키면 정재파를 얻을 수 있고, VSWR 을 가장 작게 만든다.

ii) 선로를 매칭시키지 못하면 부정합된 정도에 따라서 VSWR 이 커진다.

선로를 따른 신호의 전송에서 VSWR 을 최소화하는 것이 일반적이다.

그러나 전송기의 안테나는 높은 VSWR 을 가진 전송 선로로 간주된다. 개방회로의 끝부분에서 1/4 파장은 출력에서 최대 전압을 가지고, 입력에서 최소 전압을 가진다. 실제로  $\lambda/4$  길이는 안





👉 학습 평가 9

- 정재파라고 불리는 이유는?  
 A 수직선이기 때문이다.  
 B 움직이지 않기 때문이다.  
 C 파장에서 측정되기 때문이다.  
 D 반사에 의해 일어나기 때문이다.
- 단락 임피던스를 변화시키는 것은 무슨 변화를 가져오는가?  
 A 선로를 따른 전압의 진폭 변화  
 B 특성 임피던스의 변화  
 C 전송 속도 변화  
 D 파장 변화
- 전송 선로 실습기에서 정재파 표시 회로는 오실로스코프를 사용하여 무엇을 표시하는가?  
 A 시간에 따른 전압  
 B 선로를 따른 거리에 대한 전압  
 C 주파수에 대한 전압  
 D 구형파
- 최대 전압이 20V 이고 최소 전압이 4V 인 선로가 있다. VSWR 은 얼마인가?  
 A 0.2       B 5       C 10       D 20
- 선로에 단락 회로가 있고 정재파 표시기가 완전파를 표시할 때 최소 전압은 어디서 떨어지는가?  
 A 끝부분       B 시작부분  
 C 시작과 끝부분       D 시작, 중간, 끝부분



## 단원 10. Transformer 를 이용한 매칭 (Transformer Matching)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 1/4파장 길이의 선로가 어떻게 임피던스를 매칭시키는데 이용되는가 하는 것을 안다.
- 반파장 길이의 선로가 어떻게 부정합된 선로를 어떻게 매칭시키는지 하는 것을 안다.
- 전송 선로 실습기를 이용하여 Transformer 로 매칭시키는 것을 살펴본다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30 전송 선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선 셋
- 오실로스코프
- 함수 발생기



10.1 1/4 파장 길이의 선로를 이용한 Transformer 매칭

앞의 장에서 정재파의 효과를 살펴보았다.

1/4 파장 길이의 선로가 있다고 가정하라. 선로가 단락 회로를 가질 때 입력이 최대가 되고, 선로가 개방 회로를 가질 때 입력이 최소가 된다는 것을 이미 보았다.

실습 8.3 에서 선로의 입력 임피던스는 매칭된 선로보다 입력에서의 전압이 높으나 낮으나에 더 의존한다.

이것은 1/4 파장 길이 선로의 임피던스가 길이에 따라 다른 지점에서 측정될 수 있다면, 한 지점에서 다른 지점까지 다양한 지점에서 발견된다. 이것은 실제의 경우이고, 1/4 파장 길이의 선로가 두 가지의 다른 임피던스를 매칭시켜 주는 Transformer 로서의 역할을 하는 경우이다.

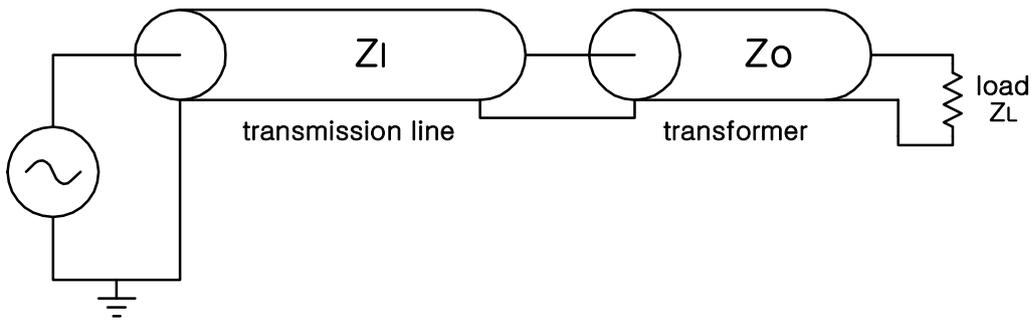


그림 41. 1/4 파장 길이의 선로를 이용한 Transformer 매칭

1/4 파장 선로가 Transformer 로서의 역할을 어떻게 하는지 설명하는 공식은

$$Z_I = \frac{Z_0^2}{Z_L}$$

이다. 여기서,  $Z_0$  는 Transformer 로 사용된 선로의 특성 임피던스이고,  $Z_L$  은 부하 임피던스 이고,  $Z_I$  는 입력 선로의 임피던스이다. 즉 발생기에 연결된 선로의 임피던스를 말한다.

이 장의 실습에서 70Ω 선로가 Transformer 로 사용될 것이고, 50Ω 선로는 입력 선로로 사용될 것이다.

이 공식은 가끔 다음 형태로 나타내어지기도 한다.

$$Z_0 = \sqrt{Z_L Z_I}$$



위의 공식은 선로 (그림 41. 의 전송선로) 이 선로의 특성 임피던스의 값과 다른 값을 가지는 저항과 매칭되어야 할 때 사용된다. "Transformer" 선로의 특성 임피던스가 1/4 파장을 매칭시키는 부분에서 필요하다는 것을 공식에서 알 수 있을 것이다.

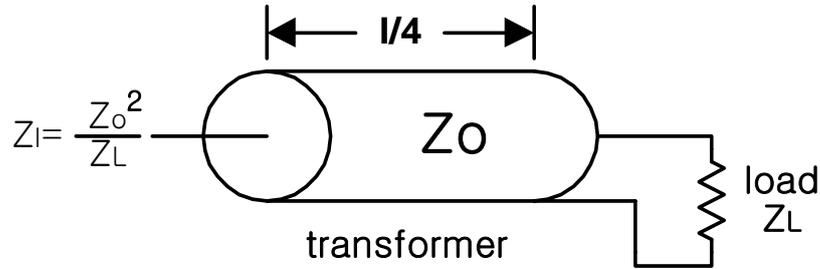


그림 42. 1/4 파장 길이의 선로를 이용한 Transformer 매칭

1/4 파장 매칭부분 이용 시 단점은 그것이 한 주파수에서만 동작한다는 것이다. 그러나 실제로 이 주파수 근처의 좁은 대역폭에서는 사용할 수 있다. 이 주파수는 "Transformer" 선로가 1/4 파장 매칭 부분으로 사용되었을 때 사용되었던 주파수와 반응하는 주파수는 1/4 파장 길이의 주파수이다.

선로가 1/4 파장 길이일 때의 주파수는

$$f = \frac{1}{4} \frac{1}{m\sqrt{LC}} = \frac{0.25}{m\sqrt{LC}}$$

이다. 여기서, m 은 길이를 미터로 나타낸 것이고, L 은 미터당 임피던스, C 는 미터당 커패시턴스를 나타낸다.

☞ 10.1a 전송 선로 이론에서 Transformer 매칭이란 무엇인가?

- Ⓐ 호환성의 두 Transformer 를 찾는 것
- Ⓑ 전송 선로를 이용하여 두개의 다른 임피던스를 매칭시키기 위한 방법
- Ⓒ 부정합상태를 매칭상태로 변형시키는 것
- Ⓓ 전송 선로를 1/4 파장 길이의 것으로 대체하는 것



☞ 10.1b Transformer 매칭을 이용하여 600Ω 짜리 부하를 50Ω 짜리 선로에 매칭시키려고 한다. 1/4 파장 매칭부분을 이용하는데 필요한 "Transformer" 선로의 특성 임피던스를 계산하고 기입하라.

## 10.2 실습

이 실습에서 오실로스코프에서 Transformer 매칭의 효과를 살펴 볼 것이다.

- 전원 공급기를 그림 16. 과 같이 전송 선로 실습기에 연결하라.
- 모든 플트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 펄스 발생기 스위치를 off 에 두어라.
- 함수 발생기를 서밍 증폭기를 거쳐 50Ω 선로의 입력단에 연결하라. 실습 8.4 에서 사용된 방법을 이용하라.
- 전원 공급기를 켜라.
- 오실로스코프의 채널 2 를 이용하여 함수 발생기가 입력단에서 첨두간 전압이 4V 인 사인파가 나오게 하고, 전송 선로의 주파수가 100kHz 가 되도록 하라.
- 오실로스코프의 채널 1 을 TPA 에 연결하라. 오실로스코프는 구형파를 표시할 것이다. 이 신호의 하강 지점에서 오실로스코프를 트리거하라.



■ 시간축을 설정하여 이 사각파의 하강 지점이 왼쪽 격자 부분에 가장 많이 가도록 하고, 다음 상승 지점 가장자리가 오른쪽 격자 부분으로 오도록 하라. 다시 말해 구형파의 반주기는 오실로스코프에 표시되어야 한다.

■ 사각파는 오실로스코프를 설정하는데 이용되었기 때문에 시야에서 없어질 수도 있다.

■ 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로의 출력을 단락 블록의 가변저항 R 에 연결하라. 가변저항 R 을 중간 지점에 두어라.

■ 오실로스코프의 채널 2 를 TPB 에서 연결하여 정재파 표시의 출력단을 검사하라.

단원 9 에서 오실로스코프의  $x$  축은 지금은 시간 대신에 선로를 따르는 길이를 표시한다. 처음 24 개 부분은 50Ω 선로이고, 다음 8 개 부분은 70Ω 선로이다.

■ 만약 이 선로가 단락 저항과 70Ω 선로를 매칭시키는데 이용되었다면 70Ω 선로의 끝에서 필요한 단락 저항값을 계산하라. 아래 공식을 이용하여 하라.

$$R = \frac{Z_0^2}{Z_I}$$

여기서,  $Z_0$  는 Transformer 로 사용된 선로의 특성 임피던스이고,  $Z_I$  는 입력 선로의 임피던스, 즉 발생기에 연결된 선로의 임피던스이다. 이 값을 기록하라.

🔍 10.2a 저항을 50Ω 선로와 매칭시키는데 사용된 저항의 값을 측정하고 기입하라.

---

---

---

■ 가변저항 R을 계산한 저항값으로 맞추어라. 이 저항을 측정하는데 전원 스위치는 꺼진 상태



여야 한다.

■ 70Ω 선로가 1/4 파장일 때의 주파수를 아래 공식을 이용하여 계산하라.

$$f = \frac{1}{4} \frac{1}{n\sqrt{LC}} = \frac{0.25}{n\sqrt{LC}}$$

여기서, n 은 부분의 수이고, L 은 각 부분의 인덕턴스이고, C 는 각 부분의 커패시턴스이다. 이 값을 기록하라.

---

---

---

■ 함수 발생기를 계산한 주파수로 맞추어라.

50Ω 선로는 이 구성에서 매칭되지 않는다.

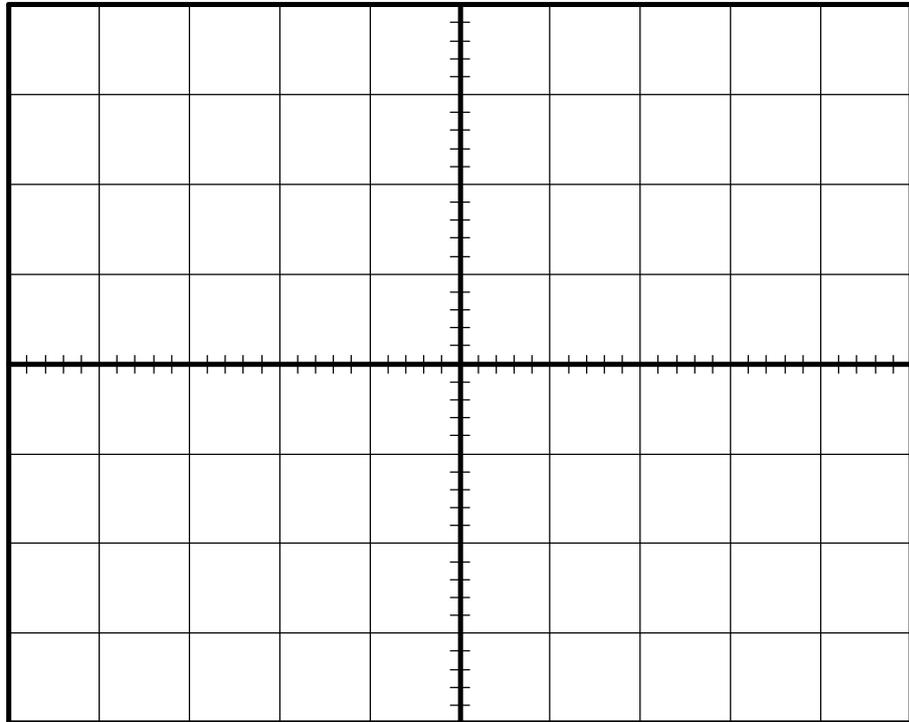
■ 4mm 리드선을 가변저항 R 로 부터 70Ω 선로의 입력단으로 이동시켜라. 그래서 50Ω 선로의 출력단이 70Ω 선로의 입력단과 연결되도록 하라.

■ 4mm 리드선을 이용하여 70Ω 선로의 출력을 단락 블록의 가변저항 R 에 연결하라.

50Ω 선로는 지금 매칭되어야 하고 70Ω 선로에 1/4 파장이 있다는 것을 알아야 한다. 함수 발생기의 주파수를 조금 변화시키면 이 효과를 관찰할 수 있다. 이 표시를 파형 스케치 10.1 에 그려 넣어라.

■ 전원 공급기를 꺼라.





Waveform Sketch 10.1

### 10.3 반파 선로를 이용한 Transformer 매칭

"Transformer" 선로가 반파장 길이라면 입력으로 반사되어 돌아오는 임피던스는 부하 임피던스와 같다.

즉,

$$Z_I = Z_L$$

이다. 여기서,  $Z_I$  는 입력 선로의 임피던스이고,  $Z_L$  은 부하 임피던스이다.

Transformer 로 이용된 선로가 입력 선로의 특성 임피던스와 같은 값을 가지는 저항을 이용했을 때 단락된다면, 이 입력 선로는 매칭 될 수 있다. 다시 말해 Transformer 로 이용된 선로의 임피던스는 중요하지 않고, 필요한 것은 그 주파수에서의 반파장의 길이이다.

이 방법은 다른 특성 임피던스를 가진 케이블이 연장 케이블로 사용될 때 사용할 수 있으며, 좁은 주파수대역에서만 작동되어진다.



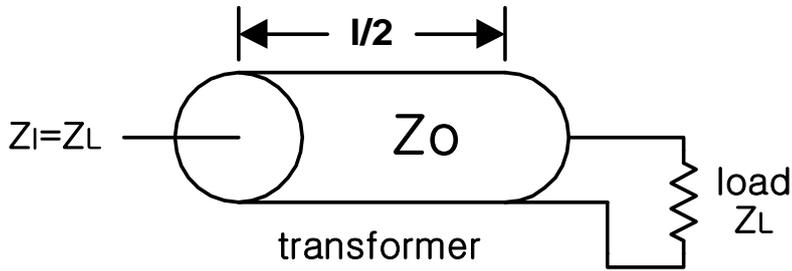


그림 43. 반파 선로를 이용한 Transformer 매칭

#### 10.4 실습

이 실습에서 반파장 길이의 선로를 이용한 매칭의 효과를 살펴볼 것이다.

- 실습 10.2 와 같이 전송 선로 실습기를 장치하라.
- 단락 블록의 가변저항  $R$  을  $50\Omega$  선로의 특성 임피던스 값으로 조절하라. 전원 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 전원 공급기를 켜라.
- $70\Omega$  선로가 반파장 길이일 때의 주파수를 아래 공식을 이용하여 계산하라.

$$f = \frac{1}{2} \frac{1}{n\sqrt{LC}} = \frac{0.5}{n\sqrt{LC}}$$

여기서,  $n$  은 부분의 수이고,  $L$  은 각 부분의 인덕턴스이고,  $C$  는 각 부분의 커패시턴스이다. 이 값을 기록하라.



👉 10.4a 70Ω 선로가 반파장 길이일 때의 주파수를 기록하라.

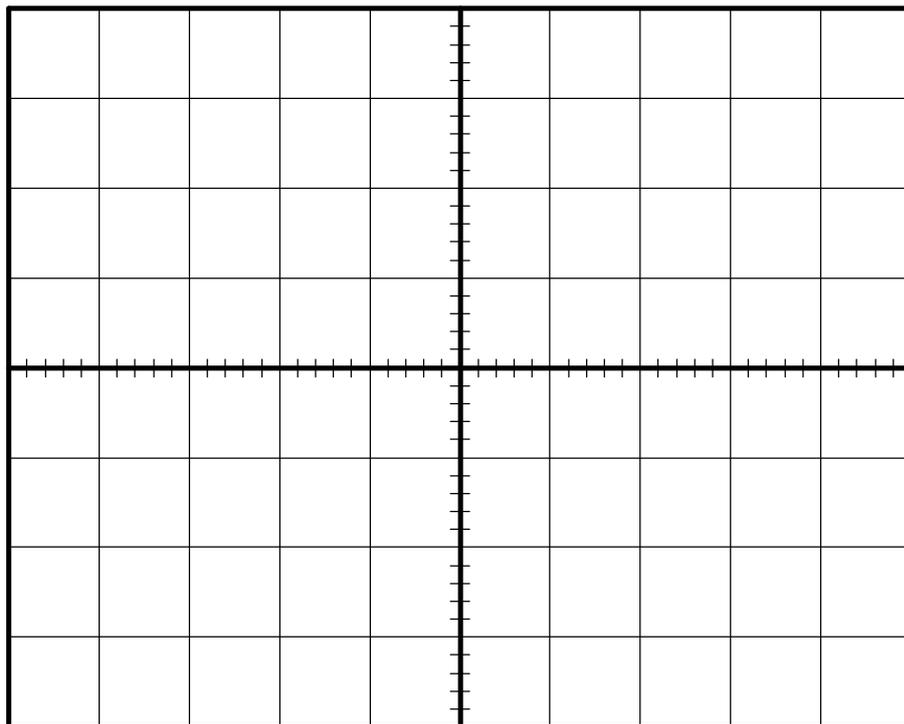
---

---

---

■ 함수 발생기를 계산한 주파수로 맞추어라.

■ 오실로스코프에서 정재파를 보아라. 50Ω 선로가 매칭되었고, 70Ω 선로에 반파장이 관찰된다는 것을 알아야 한다. 함수 발생기의 주파수를 조금 변화시키면 이 효과를 관찰할 수 있다. 이 표시를 파형 스케치 10.2 에 그려 넣어라.



Waveform Sketch 10.2

■ 전원 공급기를 꺼라.



10.5 실습 요약

이 단원에서 1/4 파장과 반파장을 이용한 Transformer 의 매칭 효과를 살펴보았다.

i) 선로는 특정한 주파수에서 다른 선로를 사용하여 특성 임피던스가 다른 부하와 매칭될 수 있다. 이 주파수는 선로가 Transformer 로 사용되었을 때의 주파수로 1/4 파장 길이이다.

ii) 선로는 부정확한 특성 임피던스를 사용하여 특성 임피던스가 다른 부하와 매칭될 수 있고, 특성 임피던스가 부정확한 선로는 반파장 길이이다.

진폭이 작은 주파수에서의 동작은 문제가 있다고 생각할 것이다. 그러나 어떤 경우 이것은 받아들일 수 있다. 예를 들면 진폭이 캐리어 주파수와 비교해서 적을 때 사용되는 Amplitude Modulation (AM, 진폭변조) 을 들 수 있다.

매칭이 특정한 상태에서 일어나야 할 때 주파수를 변화시킬 수는 없을 것이다. 그러나 Transformer 로 이용된 케이블의 길이를 변화시킴으로써 필요한 주파수에서 매칭을 시키는 것이 가능해진다.

다음 장에서는 저역 통과 필터 효과를 살펴볼 것이다.

Notes :

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---





## 단원 11. 저역 통과 필터 효과 (Low Pass Filter Effect)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 저역 통과 필터 효과를 설명한다.
- 저역 통과 필터의 차단 (cut-off) 주파수를 예상한다.
- 저역 통과 필터 효과를 실험하기 위해 전송 선로 실습기를 사용한다.

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30전송선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선
- 오실로스코프
- 함수 발생기



11.1 저역 통과 필터 효과

단원 3 에서 선로가 저역 통과 필터의 역할을 하기 때문에 전송이 일어난다고 할 때 언급된 바 있다. 펄스의 끝부분을 뾰족하게 만드는 고주파수가 감쇄되고, 그래서 펄스가 50Ω 선로 밖으로 나올 때는 끝부분이 둥글다.

단원 8 에서 주파수가 거의 500kHz 로 나오지만, 50Ω 선로는 500kHz 보다 더 높은 고주파를 전송할 수 있다는 것을 측정해 보았다.

선로가 저역 통과 필터의 역할을 한다는 사실은 50Ω 선로를 사용한 회로를 생각해 보았을 때 쉽게 생각할 수 있다.

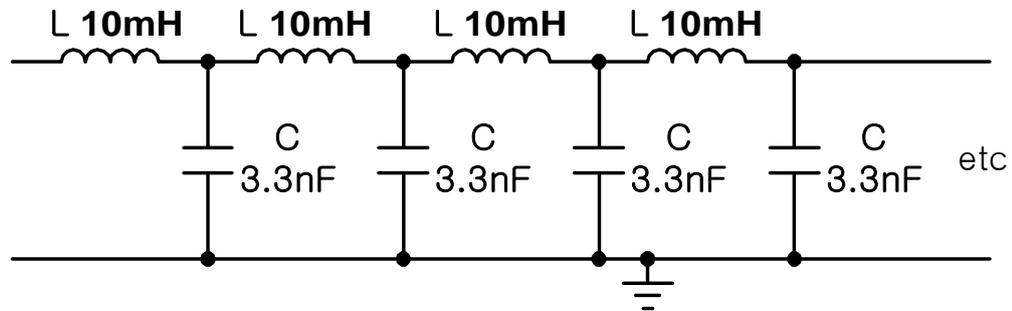


그림 44. 전송선로의 등가회로 ( $R = G = 0$  인 경우)

낮은 주파수에서 인덕터의 임피던스는 낮은 반면에 커패시터의 임피던스는 높다. 그래서 적은 감쇄가 일어난다. 그러나 높은 주파수에서는 인덕터의 임피던스는 높고 커패시터의 임피던스는 낮다. 그래서 감쇄율이 높다. ( $X_L = j\omega L = j2\pi fL$ ,  $X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC}$ )

차단 주파수는 특성 임피던스와 같은 값을 가진 저항과 연결된 단일 T 부분을 생각해 계산할 수 있다. 차단 주파수는

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$$

여기서, L 은 미터당 인덕턴스이고, C 는 미터당 커패시턴스이다.

각 부분마다 감쇄는 동일할 것이다. 그래서 거리에 대한 전압의 그래프는 지수적으로 감쇄하는 곡선을 그린다. (단원 2 의 그래프와 유사하다.)

이 효과는 일반적으로 한 무더기의 성분들이 사용될 때만 의미를 가진다. 이전의 대서양을 가



로질러 놓인 케이블은 작은 코일이 길이를 따라 감싸고 있어서 인덕턴스를 증가시켰고 그래서 케이블의 높은 커패시턴스를 보상했다. 이 케이블에서 저역 통과 필터 효과는 큰 의미를 가진다. 현재의 케이블에서 다른 고주파 현상은 케이블의 최대 동작 주파수를 결정한다. 최대 동작 주파수는 케이블을 구분지어 준다. 무엇이 최대 동작 주파수를 결정하든 간에 이 값보다 낮은 가장 높은 주파수를 가진 신호를 사용해야 한다는 것을 기억해야 한다.

☞ 11.1a 펄스가 전송 선로 안으로 보내졌을 때 펄스의 가장자리가 둥근 이유는?

- A 선로가 매칭되지 않았으므로
- B 선로가 고역 통과 필터의 역할을 하므로
- C 선로가 저역 통과 필터의 역할을 하므로
- D 선로가 매칭되었으므로

☞ 11.1b 50Ω 케이블의 각 미터당 2.5μH 의 인덕턴스가 직렬로 연결되어 있고, 1nF 의 커패시턴스가 병렬로 연결되어 있다. 이때 차단 주파수를 MHz 단위로 계산하여 기입하라.

---

---

---

## 11.2 실습

이 실습에서 50Ω 선로에서의 감쇄에 대해 알아보겠다.

이 실습을 하기 위해서 함수 발생기가 2MHz 이상의 사인파를 낼 수 있어야 한다.

■ 전원 공급기를 그림 16. 과 같이 전송 선로 실습기에 연결하라.

■ 모든 스위치 폴트는 꺼진 상태여야 한다.



- 함수 발생기 스위치를 off 에 두어라.
- 함수 발생기를 서밍 증폭기를 거쳐 50Ω 선로의 입력단에 연결하라. 실습 8.4 에서 사용된 방법을 이용하라.
- 전원 공급기를 켜라.
- 오실로스코프의 채널 2 를 이용하여 전송 선로의 입력단에서 함수 발생기가 첨두간 전압이 4V 인 사인파가 나오게 하라.
- 오실로스코프의 채널 1 을 TPA 에 연결하라. 오실로스코프는 사각파를 표시할 것이다. 이 신호의 하강 지점 가장자리에서 오실로스코프를 트리거하라.
- 시간 축을 설정하여 이 사각파의 하강 지점이 왼쪽 격자 부분에 가장 많이 가도록 하고, 다음 상승 지점 가장자리가 오른쪽 격자 부분으로 오도록 하라. 다시 말해 사각파의 반주기가 오실로스코프 표시기에 표시되어야 한다.
- 사각파는 오실로스코프를 설정하는데 이용되었기 때문에 파형이 없어질 수도 있다.
- 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로의 출력단을 단락 블록의 가변저항 R 에 연결하라. 가변저항 R 을 중간 지점에 두어라.
- 오실로스코프의 채널 2 를 TPB 에서 연결하여 정재파 표시기의 출력단을 검사하라.
- 4mm 리드선을 이용하여 70Ω 선로의 입력단을 0V 에 연결하라.
- 차단 주파수를 다음 공식을 이용하여 계산하라.

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$$

여기서, L 은 50Ω 선로의 각 부분의 인덕턴스이고, C 는 50Ω 선로의 각 부분의 커패시턴스이다.



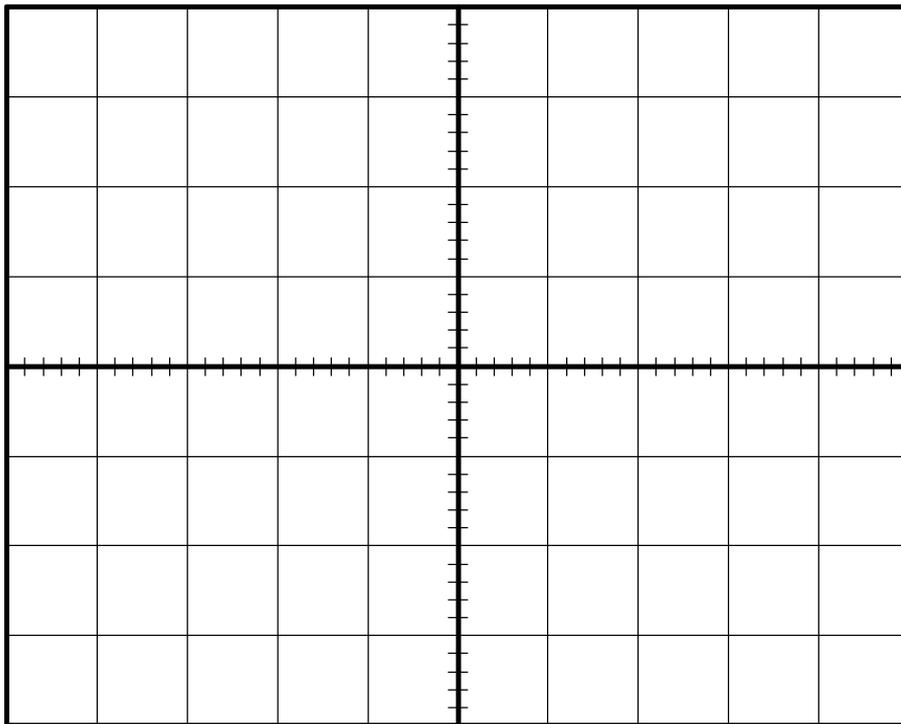
☞ 11.2a 50Ω 선로의 차단 주파수를 계산하고 기입하라.

---

---

---

■ 차단 주파수의 아래에서 시작하여 함수 발생기의 출력이 급격히 감소하는 부분을 찾아내기 위해 천천히 증가시켜라. 선로를 따라 지수적으로 감소하는 지점의 주파수를 찾아낼 수 있을 것이다. 이것을 파형 스케치 11.1 에 그려 넣어라.



Waveform Sketch 11.1

■ 정재파 표시가 선로를 따라서 지수적으로 감소하는 부분에서의 주파수를 측정하라. 이 주파수를 기록하라.



👉 11.2b 측정한 차단 주파수를 MHz 단위로 기록하라.

---

---

---

■ 전원 공급기를 꺼라.

### 11.3 실습 요약

실습 11.2 에서 저역 통과 필터 효과를 살펴보았다.

i) 차단 주파수는 선로를 따라 있는 커패시턴스와 인덕턴스에 의해 결정된다.

ii) 감쇄는 선형적으로 이루어진다. 그래서 선로를 따른 거리에 대한 전압의 그래프는 지수 곡선을 그린다.

알려진 최대 동작 주파수 안에서 선로를 작동시키는 것은 좋은 실습이다. 가끔 아날로그 중계기인 차단 주파수 (혹은 근처의 주파수) 에서 동작하기 위해 주파수 (그리고 가능한 위상) 보정을 사용한다.

다음 장에서는 50Ω 선로의 발진기로서의 사용을 살펴볼 것이다.

Notes:

---

---

---

---



👉 학습평가 11

1. 저역 통과 필터는?  
 A 고주파를 감쇄시킨다.  
 B 고주파를 증폭시킨다.  
 C 고주파를 더한다.  
 D 저항으로만 이루어져 있다.
  
2. 고주파에서 선로는?  
 A 커패시터의 임피던스가 높다.  
 B 인덕터의 임피던스가 높다.  
 C 인덕터의 임피던스가 낮다.  
 D 선로의 임피던스가 0 이다.
  
3. 선로가 저역 통과 필터의 역할을 할 때 차단 주파수를 결정짓는 것은?  
 A 선로의 총 커패시턴스  
 B 각 미터당 저항  
 C 선로의 총 인덕턴스  
 D 각 미터당 인덕턴스와 커패시턴스
  
4. 미터당 500pF 의 커패시턴스와 미터당 1 $\mu$ H 의 인덕턴스를 가진 선로의 차단 주파수는 대략 얼마인가?  
 A 1.4MHz       B 5MHz       C 14MHz       D 44MHz
  
5. 이 단원에서 전송 선로 실습기는 무엇을 통해서 저역 통과 필터 효과를 나타내는가?  
 A 펄스 입력을 이용하여 가장자리가 동글다는 것을 보여준다.  
 B 삼각파를 이용하여 가장자리가 동글다는 것을 보여준다.  
 C 사인파를 이용하여 출력이 특정 주파수 이후에 감쇄한다는 것을 보여준다.  
 D 단락 저항을 이용하여 차단 주파수를 조절한다.



## 단원 12. 발진기로써의 50Ω 선로

### (The 50 ohm Line as an Oscillator)

#### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- 발진기가 만들어지는 원리를 설명한다.
- 전송 선로 실습기를 이용하여 발진기를 만드는 방법을 실험한다.

#### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30전송선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선
- 오실로스코프



12.1 발진기

발진기는 증폭기와 피드백 통로를 이용하여 만든다. 발진기를 만들기 위해 양극 방향의 피드백이 필요하다. 그림 45. 는 피드백을 가진 증폭기의 일반적인 모습을 나타낸 것이다.

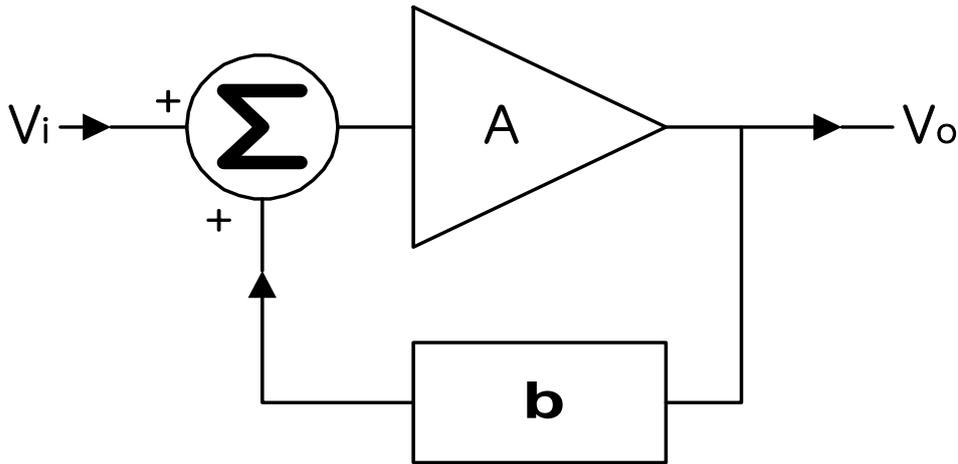


그림 45. 피드백을 가진 증폭기

증폭기는  $A$  라는 이득을 가지고,  $\beta$  비율의 피드백을 가진다. 피드백을  $\beta$  는 출력 전압  $V_o$  의 비율이고, 그것을 입력단으로 되돌려 보내어 지고, 다시 입력 전압  $V_i$  에 더해진다.

양극 방향의 피드백은 증폭기  $A$  에 가해진 전압이 입력 전압  $V_i$  보다 클 때, 피드백을 하지 않았을 때 보다 피드백을 했을 때 더 큰 이득을 얻을 수 있다.

피드백을 통해 얻은 새로운 이득  $G$  는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 - A\beta}$$

여기서, 이득  $A$  는 양의 실수이고, 피드백을  $\beta$  도 양수라는 것을 알 수 있다.  $A\beta$  를 루프이득 (loop gain) 이라고 한다.

만약  $A\beta < 1$  이면  $G > A$  이다.  $A\beta = 1$  이면  $G$  는 무한대이다. 즉, 증폭기가 불안정하게 되어 발진하게 된다.  $A\beta = 1 \angle 0^\circ$  상태를 발진의 Barkhausen Criterion 이라고 불린다. 크기는 1 이어야 하고 위상은  $0^\circ$  라는 것을 주목하라.

그림 45. 는 완벽한 증폭기와 피드백 회로를 설명한 것이다. 양극의 피드백을 가진 실제 시스



템에서 이득이 무한대일 수는 없다. 그러나 이득이 아주 높을수록 가장 작은 입력은 출력이 공급 부분으로 향하도록 만든다. 실제 증폭기에서만 특정 전압 범위 이상에서 직선형의 이득을 얻는다. 그리고, 그 증폭 이득은 (다이아그램에서) 감소하고, 그래서 피드백율이 감소한다. 증폭기의 입력이 줄면, 출력이 감소하고 다른 공급 궤도로 방향을 바꾼다. 이것은 발진을 계속하게 만든다.

피드백 회로의 지연 (혹은 위상) 이 발진 주파수를 결정한다는 것을 알 수 있을 것이다. 그래서 증폭기의 이득이 필요한 것은 무엇인가? 증폭기의 이득이 아주 높다면 사인파가 이득이 아주 높은 증폭기로 들어갔을 때 출력에서 사각파가 나오는 것처럼 출력은 사각파를 닮을 것이다.

이득이 발진을 할 만큼의 정도라면 출력은 사인파가 나온다. 즉 이득이 파형을 결정한다. 이득이 피드백에서의 손실을 감당할 만큼 충분하지 않다면 회로는 발진되지 않는다.

다음 실습에서 증폭기로 서밍 증폭기를 쓸 것이고, 전송 선로는 피드백 부분으로 사용될 것이다. 서밍 증폭기는 파형이 뒤집어지지 않는다.

전송 선로가 피드백 부분으로 사용될 때 약간의 감쇄와 지연이 생길 것이다. 위상의 변화가  $360^\circ$  인 지점의 주파수가 있을 것이고 그래서 출력 위상은 입력 위상과 같을 것이다. 이것은 발진 주파수를 결정한다.

그러나 발진에서 제일 먼저 해야 할 것은 무엇인가? 실제 증폭기에서 전원을 높이거나 잡음이 증폭된 후에 증폭기가 발진할 때까지 만드는 것이다. 실제 발진기에서  $A\beta$  는 빨리 발진시키기 위해 일반적으로 1 보다 약간 크다.

이 이론에서 완전한 증폭기를 생각해 보았다. 그러나 실제로 증폭기는 특성의 지연값을 가진다. 이것은 발진 주파수에 영향을 미친다.

☞ 12.1a 이론적으로 발진 주파수를 결정하는 것은 무엇인가?

- A 증폭 이득                       B 피드백 율의 크기  
 C 피드백 율의 지연               D 잡음

☞ 12.1b 이득 ( $A$ ) 가 피드백 없이 10 이고, 피드백율 ( $\beta$ ) 가 0.05 인 증폭기에서 시스템의 새로운 이득을 계산하고 기입하라.

---

---

---



12.2 실습

- 그림 16. 과 같이 전원 공급기를 전송 선로 실습기에 연결하라.
- 모든 폴트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 함수 발생기를 off 상태로 두어라.
- 서밍 증폭기의 커플링을 AC 로 두어라.
- 서밍 증폭기의 출력 임피던스를 FIXED 로 두어라.
- 서밍 증폭기의 이득을 최소한으로 조절하라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 잡음 발생기 블록에서 AMPLITUDE 조절을 최소 레벨로 두어라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 4mm 리드선을 이용하여 서밍 증폭기의 출력을 50Ω 선로의 입력단에 연결하라.

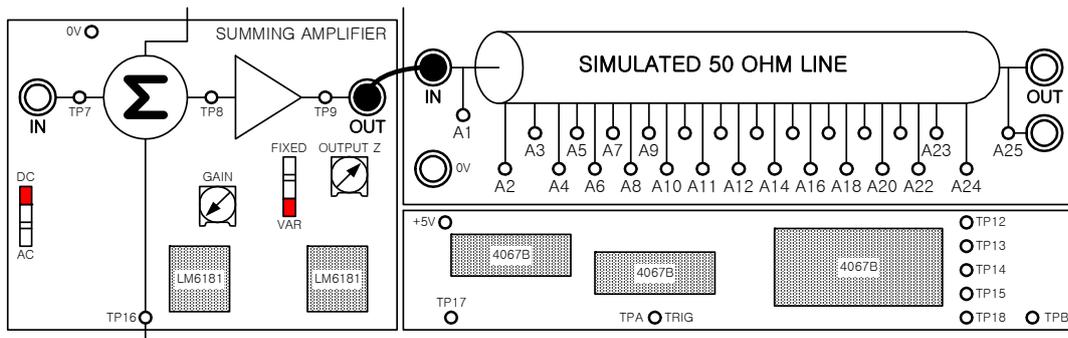


그림 46. 실험장치의 구성

- 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로의 출력을 단락 블록의 가변 저항 R 에 연결하라. 가변저항 R 을 중간 지점에 두어라.
- 4mm 리드선을 이용하여 단락 블록의 가변 저항 R 을 서밍 증폭기의 입력에 연결하라.



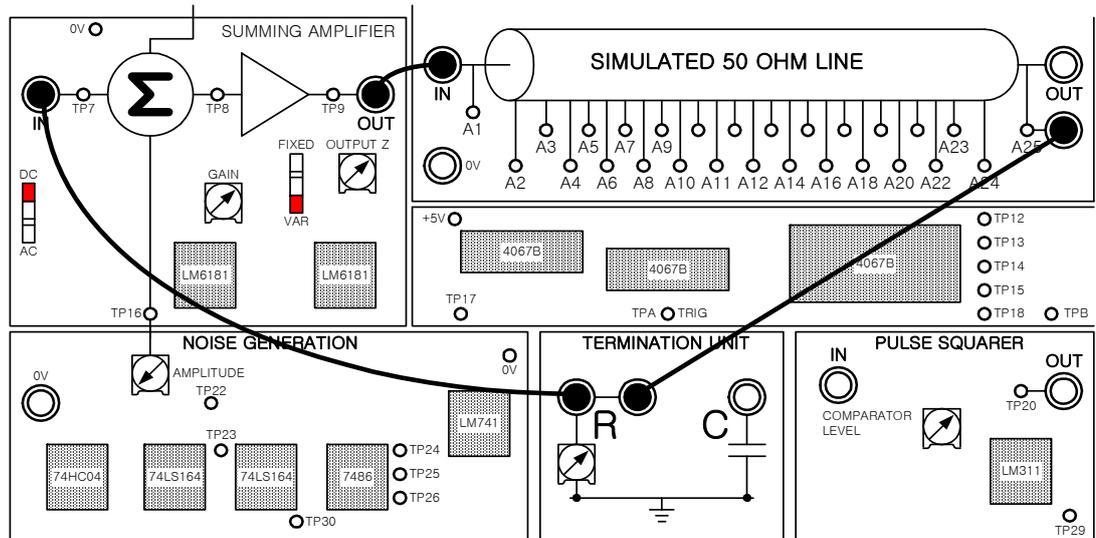


그림 47. 실험장치의 구성

■ 전원 공급기를 켜라.

■ 오실로스코프의 채널 1 을 연결하여 A1 에서 50Ω 선로의 입력단을 검사하라.

■ GAIN 조절을 변화시키면서 회로를 발진시킬 수 있을 것이다. 회로가 발진하기 시작한 바로 그 지점을 찾아내고 사인파 출력을 찾아낼 수 있을 것이다. 이 파형을 파형 스케치 12.1 에 그려 넣어라.

(Note : 두 지점에서 회로를 발진시킬 수 있을 것이다. (중간정도의 주파수 - 약 10kHz 와 고 주파) 저주파 발진은 서밍 증폭기의 AC 커플링의  $C \times R$  시간 상수 때문에 일어난다. 고주파 동작 지점을 찾아내라.)

■ 발진 주파수를 찾아내고 기록하라.

👉 12.2a 측정된 발진 주파수를 kHz 단위로 기입하라.

---



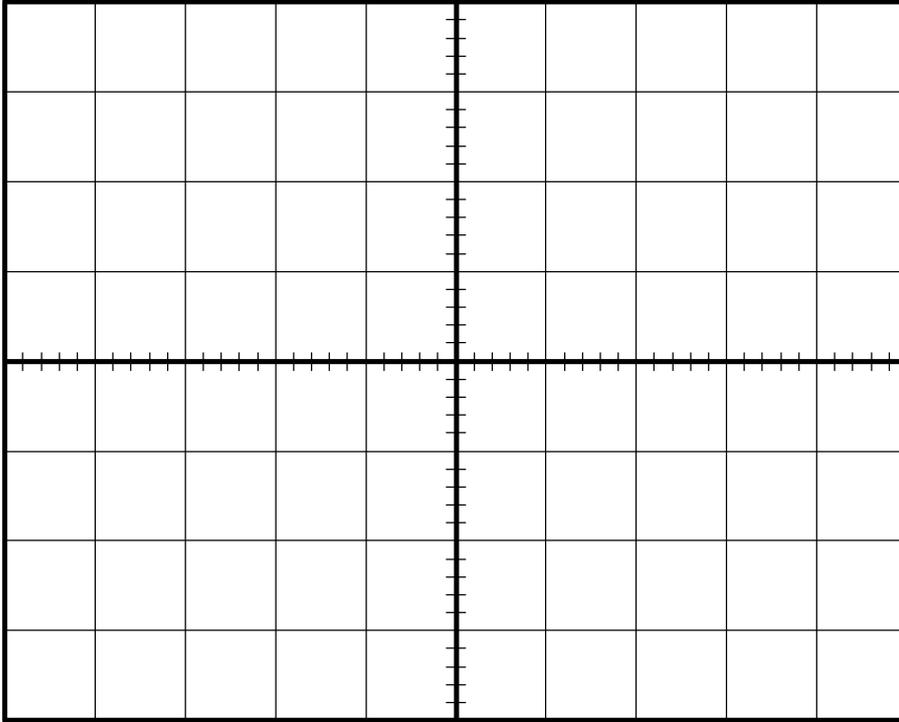
---



---



- 전원 공급기를 꺼라.



Waveform Sketch 12.1

### 12.3 실습

- 모든 연결은 실습 12.2 와 같이 하라.
- 서밍 증폭기의 커플링을 DC 로 두어라.
- 서밍 증폭기의 출력 임피던스를 FIXED 로 두어라.
- 서밍 증폭기의 이득을 최소한으로 조절하라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 잡음 발생기 AMPLITUDE 조절을 최소 레벨로 두어라. (반시계 방향으로 끝까지)
- 단락 블록의 가변 저항 R 을 중간 값으로 두어라.





📖 학습평가 12

- 발진기를 만들기 위해서 필요한 것은?  
 A 양의 피드백                       B 음의 피드백  
 C 피드백이 없는 경우                       D 입력신호
- 증폭기에 양의 피드백이 걸릴 경우 발생하는 것은?  
 A 이득이 없다.                       B 이득이 감소한다.  
 C 이득의 변화가 없다.                       D 이득이 증가한다.
- 이득이 5 인 증폭기에  $\beta = 0.1$  인 양의 피드백이 걸려있다. 이때 이득을 구하면 얼마인가?  
 A 5                       B 10                       C 15                       D 20
- Barkhausen Criterion 이 일어나는 경우는?  
 A  $A\beta = 1$                        B  $A\beta = 1 \angle 0^\circ$   
 C  $A\beta > 1$                        D  $A\beta < 1$
- 피드백율의 위상이 결정하는 것은?  
 A 출력 진폭                       B 출력 파형  
 C 출력 주파수                       D 출력 Mark 대 공간 비
- 증폭기 이득이 결정하는 것은?  
 A 피드백율의 크기                       B 출력 파형  
 C 출력 주파수                       D 출력 Mark 대 공간 비
- 이 단원에서 50Ω 선로는 무슨 역할을 하는가?  
 A 저역 통과 필터                       B Transformer 매칭  
 C 증폭                       D 피드백



## 단원 13. Time Domain Reflectometry (TDR)

### 이 단원의 목적

이 단원을 끝내면

- TDR 의 원리를 설명한다.
- TDR 을 이용하여 전송 선로 실습기에 사용된 스위치의 폴트를 찾아내는 방법

### 이 단원에서 필요한 장비

- CT-30전송선로 실습기
- 전원 공급기
- 4mm 리드선
- 오실로스코프



### 13.1 Time Domain Reflectometry (TDR)

이 단원에서는 단원 3 과 4 에서 끝난 학습을 계속할 것이다.

단원 3 에서 입력과 출력 사이에서 펄스 입력시 특정한 시간이 걸린다는 것을 보았다. 단원 4 에서 전송 선로가 특성 임피던스와 같은 임피던스로 단락되지 않았다면 선로를 따라 되돌아가는 반사파가 있을 것이다. TDR 에서 이 특성치들은 케이블에서의 측정을 위해 사용될 것이다. TDR 이 폴트 스위치가 어디에 있는지 확실하게 확인해 주므로 전송 속도는 전송 선로를 따라 일정하다. 이런 경우가 대부분이다.

예를 들어 전송 선로가 고의로 끊어졌고 (개방 회로) 짧은 파가 주기적으로 선로로 전송되었다면, 전송 시간과 반사 시간을 측정할 수 있다. 이것은 파가 선로를 따라 이동하는 시간을 알려 주며, 한쪽 끝에서 선로를 따라 돌아오는 시간을 알 수 있게 해 준다. 선로의 전송 속도가 알려져 있다면 선로의 길이를 계산할 수 있다.

$$\text{길이} = \text{속도} \times \text{시간}$$

폴트가 선로를 따라 있다고 가정하자. 폴트가 단락 회로나 개방 회로에 있는지 간에 펄스 (개방 회로에서는 뒤집어지지 않고, 단락 회로에서는 뒤집어진다.) 의 속도를 가지고 그것이 어디에 있는지 계산할 수 있다.

전송 선로의 시작점에서 전송파와 반사파의 시간 지연을  $t$  초라고 가정해 보자.

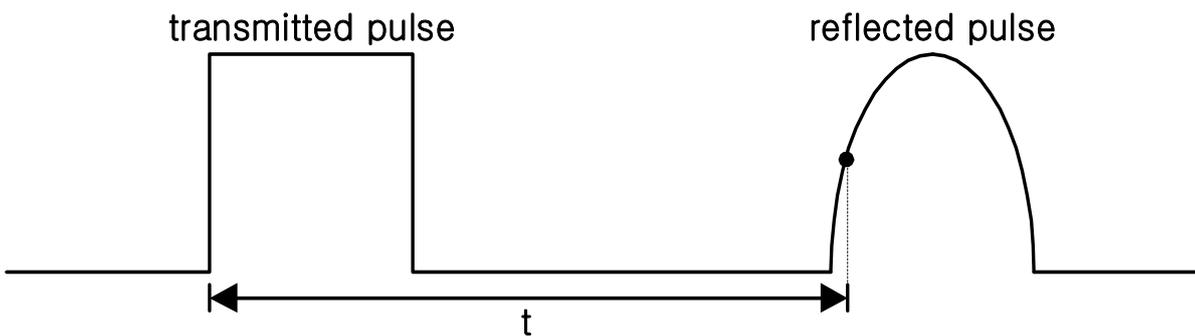


그림 48. 전송 선로의 시작점에서 전송파와 반사파의 시간지연

펄스가 반사되어 폴트 스위치에서 다시 돌아올 때 전송파가 폴트 스위치에 도달한 시간 :

$$\text{시간} = \frac{t}{2}$$



전송 선로의 시작점에서 폴트 스위치까지의 거리 :

$$\text{거리} = \text{속도} \times \text{시간} = \frac{v \times t}{2}$$

여기서,  $t$  는 전송파와 반사파 사이의 시간 지연으로 측정되고,  $v$  는 선로의 전송 속도이다.

폴트가 바로 설치된 케이블에서 발견된다면 케이블의 전파 속도는 특성이나 길이, 시간 지연이 알려진 케이블과 같은 케이블의 한 부분을 잘라 봄으로써 결정할 수 있다.

폴트를 찾는 다른 방법은 선로가 폴트가 없고, 개방 회로에서의 반사파의 지연을 측정해 보면 된다. (폴트가 발생하기 전에 실험해야 한다.) 그리고, 이것을 폴트가 있었을 때의 시간 지연과 비교해 보면 된다. 만약 완벽한 선로의 길이가 알려져 있다면 폴트가 선로의 시작점에서 얼마나 멀리 떨어져 있는가 하는 것을 계산할 수 있다.

$$\text{거리} = \frac{t}{T} \times L$$

여기서,  $t$  는 폴트가 존재할 때 반사파의 지연이고,  $T$  는 폴트가 없을 때 개방 회로에서의 반사파의 지연이고,  $L$  은 완벽한 선로의 길이이다.

이런 방법으로 폴트를 찾아내는 것은 에러를 최소한으로 줄이고 케이블과 구성요소의 내성에 의해 생기는 에러를 줄인다. 다음 실습에서 이것을 사용할 것이다.

### ☞ 13.1a TDR 이 전송 선로에서 폴트의 위치를 정확하게 찾아낸다면

- A 선로는 매칭된 단락을 가지고 있을 것이다.
- B 전송 선로의 끝부분은 분명히 끊어져 있을 것이다.
- C 폴트는 단락회로일 것이다.
- D 전송 속도는 선로의 길이를 따라서 일정해야 한다.

## 13.2 실습

이 실습에서 폴트가 있는 상태와 없는 상태에서 50Ω 선로의 입력단에서 펄스의 전송파와 반사



파의 지연을 측정할 것이다.

- 전원 공급기를 그림 16. 과 같이 전송 선로 실습기에 연결하라.
- 모든 플트 스위치는 꺼진 상태여야 한다.
- 펄스 발생기를 켜고 속도를 Fast (F) 로 조절하라.

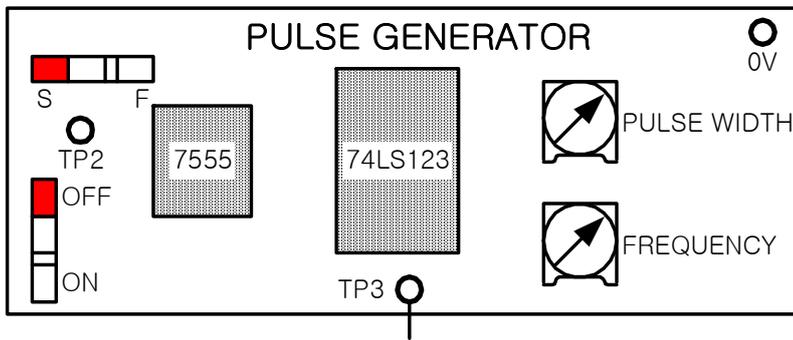


그림 49. 측정장치의 구성

- 4mm 리드선을 이용하여 서밍 증폭기의 출력을 50Ω 선로의 입력단에 연결하라.

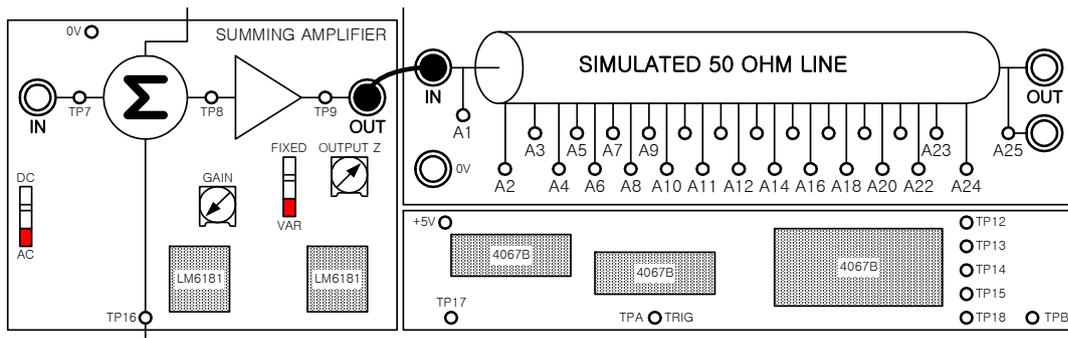


그림 50. 측정장치의 구성

- 서밍 증폭기의 커플링을 DC 로 조절하라.
- 서밍 증폭기의 출력 임피던스를 FIXED 로 조절하라.
- 서밍 증폭기의 GAIN 조절을 최소한으로 조절하라. (반시계 방향으로 끝까지)



- 잡음 발생기의 AMPLITUDE 를 최소로 조절하라. (반시계 방향으로 끝까지)

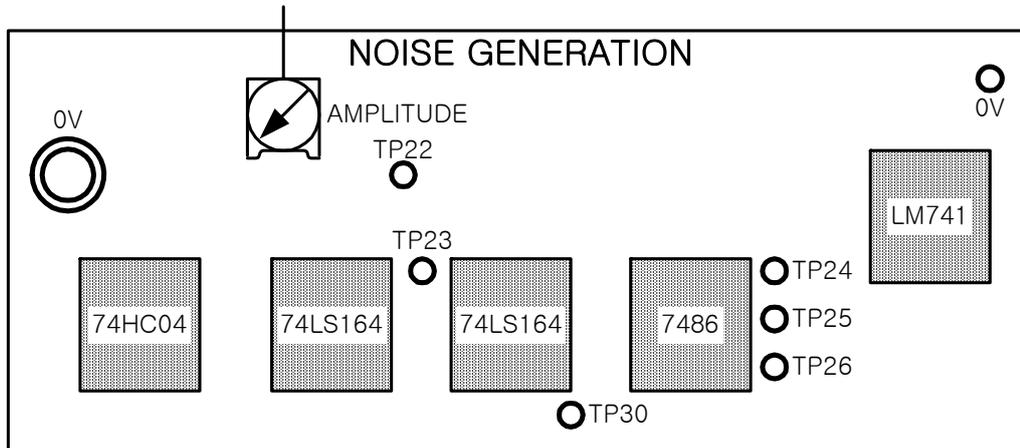


그림 51. 측정장치의 구성

- 전원 공급기를 켜라.
- A1 에서 50Ω 선로의 입력단을 조사하기 위해 오실로스코프의 채널 1을 연결하라.
- 오실로스코프의 외부 트리거를 TP2 에 연결하고, 오실로스코프를 외부 트리거로 맞추어라.
- PULSE WIDTH 조절을 이용하여 1μs 의 폭을 가지도록 조절하고, 오실로스코프를 전송파와 수신파를 관찰하기 위해 조절하여 파가 화면에 나타나도록 하라. (50Ω 선로의 출력을 개방회로로 그대로 두어라.)
- 50Ω 선로의 입력단 (전송파) 에서 2V 의 진폭이 나오도록 서밍 증폭기의 GAIN 조절을 조절하라.
- 전송파의 앞선 가장자리 부분과 반사파의 앞선 가장자리 부분의 지연을 측정하라. 가장 쉬운 방법은 전압이 진폭의 반이 되는 각 앞선 가장자리 부분을 결정하는 것이다. 그리고 이 두 지점 사이의 거리를 측정하라. 이것은 폴트가 없는 선로에서의 반사파 지연이고, 이것을  $T$  라고 부른다.



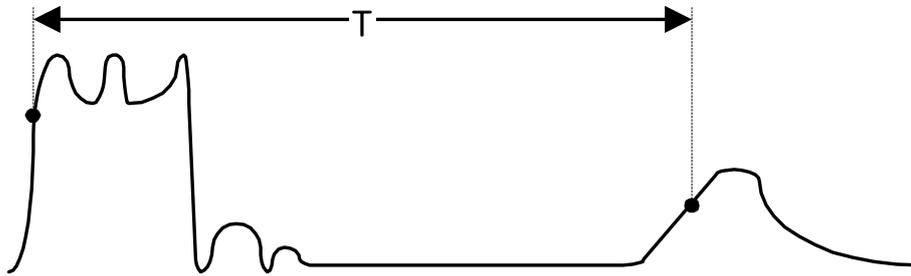


그림 52. 전송파와 반사파

■ 측정한 지연을 기록하라.

☞ 13.2 폴트가 없는 50Ω 선로의 전송파와 반사파 사이의 지연을 기입하라.

---

---

---

■ 4mm 리드선을 이용하여 50Ω 선로의 출력단을 단락 블록의 가변저항 R 에 연결하고 가변저항 R 을 중간값으로 조절하라.

이 선로는 지금 매칭되어 있으므로 선로의 입력단에서 반사가 없다는 것을 알 수 있다. 지금 전송 선로의 폴트 찾기를 해 보겠다.

■ 폴트 스위치 블록을 이용하여 전송 선로에 **FAULT 1** 을 삽입하라.

■ 방금 전에 한 방법과 같이 전송파와 반사파의 지연을 측정하라. 이 시간을  $t_1$  이라고 부를 것이다.

■ 50Ω 선로에서 아래 공식을 이용하여 폴트가 어디에 있는지 확인하라. 측정된 지연값을 측정하고 폴트가 개방 회로에 있는지 단락회로에 있는지 확인하며 어느 부분에 폴트가 있는지 확인하라.



$$\text{부분} = \frac{t_1}{T} \times 24$$

☞ 13.2b FAULT 1 이 발견되었다고 생각하는 부분의 번호를 기입하라.

---

---

---

■ FAULT 1 을 빼고 FAULT 2 를 삽입하라.

■ 앞에서 한 방법과 같이 전송파와 수신파의 지연을 측정하라. 이 시간을  $t_2$  라고 부를 것이다.

■ 50Ω 선로에서 아래 공식을 이용하여 폴트가 어디에 있는지 확인하라. 측정된 지연값을 측정하고 폴트가 개방 회로에 있는지 단락 회로에 있는지 확인하며 어느 부분에 폴트가 있는지 확인하라.

$$\text{부분} = \frac{t_2}{T} \times 24$$

☞ 13.2c FAULT 2 가 발견되었다고 생각하는 부분의 번호를 기입하라.

---

---

---

■ 마지막으로 FAULT 2 를 빼고 FAULT 5 를 삽입하라.



■ 앞에서 한 방법과 같이 전송파와 수신파의 지연을 측정하라. 이 시간을  $t_3$  라고 부를 것이다.

■ 50Ω 선로에서 아래 공식을 이용하여 폴트가 어디에 있는지 확인하라. 측정된 지연값을 측정하고 폴트가 개방 회로에 있는지 단락 회로에 있는지 확인하며 어느 부분에 폴트가 있는지 확인하라.

$$\text{부분} = \frac{t_3}{T} \times 24$$

☞ 13.2d FAULT 5 가 발견되었다고 생각하는 부분의 번호를 기입하라.

---

---

---

■ 전원 공급기를 꺼라.

### 13.3 실습 요약

실습 13.2 에서 TDR 을 이용하는 원리를 알아보았다.

- i) 주어진 선로의 전송 속도를 안다면 폴트의 위치를 찾을 수 있다.
- ii) 반사파의 극성은 폴트의 유형을 결정한다.
- iii) 반사파의 시간 지연은 폴트의 위치를 결정한다.

이 단원에서 TDR 의 기본 원리를 살펴보았다. 복잡한 TDR 기구는 폴트의 유형에 관한 더 많은 정보를 주기 위해 반사파에 역푸리에 급수 같은 수학적 방법을 사용한다. 그런 기구는 사용





👉 학습평가 13

1. 전송 속도가 일정하지 않은 케이블이 있다. 이것이 의미하는 바는?  
 A 바로 연결되지 않았다.  
 B TDR 을 이용하여 폴트의 위치를 찾는데 아주 이상적이다.  
 C TDR 을 이용하여 폴트의 위치를 찾는데 사용될 수 없다.  
 D 표준이 아닌 특성 임피던스를 가지고 있다.
2. 50Ω 선로에서 폴트가 주어지지 않았을 때 전송파와 수신파 사이의 지연은 대략 얼마인가?  
 A 1.3μs       B 4.2μs       C 8.4μs       D 14.8μs
3. TDR 을 사용하여 선로의 전체 지연중 반을 차지하는 뒤집어지지 않은 반사파를 볼 수 있다면 이것이 의미하는 바는?  
 A 선로를 따라서 중간쯤에 단락회로 폴트가 있다.  
 B 선로를 따라서 중간쯤에 개방회로 폴트가 있다.  
 C 선로가 매칭되었다.  
 D 선로의 1/4 지점에 개방회로 폴트가 있다.
4. TDR 을 사용하여 선로의 전체 지연중 반을 차지하는 뒤집어진 반사파를 볼 수 있다면 이것이 의미하는 바는?  
 A 선로의 끝부분에 단락회로 폴트가 있다.  
 B 선로의 끝부분에 개방회로 폴트가 있다.  
 C 선로에 폴트가 없다.  
 D 끝부분에서 선로가 연결되지 않았다.

Notes:

---

---

---

---

