

디지털 방송에서의 동축 케이블 구축

+ 권태석 벨리온 대표

본 귀고에서는 HD 영상 송출을 위한 영상 품질과 비디오 케이블의 상관성에 대해 안내하고자 합니다. 신호가 생성되는 스튜디오에서는 신호 변질을 최소화 시키거나 신호가 소실되지 않도록 하는 것이 중요합니다.

어떤 물리적 및 전기적 특성이 영상 품질에 영향을 미치고, 전송 품질을 결정하는 지에 대해, 이와 관련된 변수, 생산과 환경적 영향요소를 하기와 같은 기준으로 살펴보았습니다.

- 특징적인 임피던스
- 반사
- 감쇠
- 스크리닝 감쇠

스튜디오용 케이블의 제조 공정에서, 기계적 공차는 가능한 한 엄격하게 유지될 필요가 있습니다. 내부 도체, 절연체, 그리고 외부 도체의 기구적인 편차는 신호 반사, 또한 국지적인 것이나 최악의 경우, 일정하게 발생하는 주파수에 종속된 반사 피크(구조적인 반송 소실)들을 야기시킵니다. 기구적인 편차는 특성 임피던스의 편차를 야기하며, 이 때문에 전송 라인이 일치하지 않게 됩니다. 일치하는 상황에는, 전송 중간지점을 통한 손실이 가장 낮게 나옵니다. 여러 경험치로 인해 얻어진 주목할 사실은 적절한 커넥터의 선택이었습니다.

특성 임피던스

특성 임피던스를 정의할 때, 특성 임피던스 Z는 한 방향에서 같은 방향으로 흐르는 현재의 주파수로 진행되는 전압류의 비율을 의미합니다. 케이블의 아무 지점을 X라고 하면 특성 임피던스는 케이블 길이와는 상관없이 동일한 값을 가집니다.

$$U(x) = Z \cdot I(x)$$

특성 임피던스 Z에 케이블의 종단은 최고의 전송 특성을 가질 수 있게 됩니다.

- 최대 전력 전송
- 가장 낮은 손실
- 케이블 종단에서의 에너지 반사 제로

동축 케이블의 특성 임피던스는 하기에 따라 좌우됩니다.

1. 물리적 치수, 즉, 내부 및 외부 도체의 직경
2. 절연체
3. 주파수

약 5 MHz 이상의 특성 임피던스는 일정한 실수값을 가집니다.

$$Z \xrightarrow{f \rightarrow \infty} \text{Re}(Z)$$

앞서 언급 한 바와 같이, 케이블의 특성 임피던스는 절연체와 기포보호의 선택만큼 적절하게 절연체 위에서 측정된 내부 도체 직경인 d와 외측 도체의 내부 직경인 D에 의해 결정됩니다.

$$Z \approx 60\Omega \ln \frac{D/d}{\sqrt{e^{(1-s)\ln(\epsilon_{r,PE})}}}$$

이것은 케이블의 제조 과정에서 모든 파라미터는 케이블에서의 특성 임피던스의 편차에 따라 가장 낮은 오차 한도를 꾸준히 일관되게 관리하여야만 하는 것을 의미합니다. 이를 보장하기 위해, 와이어 예열, 질소 및 재료 공급 장치, 온도 제어, 압출기의 속도 제어와 와인더 조절의 정확한 조합이 필요합니다. 또한, 생산라인 속도의 일관성 및 제대로 정비된 냉각 프로세스에 관해 엄격하게 요구됩니다. 또한 압출기로 배치되는 내부 도체의 진동 방지가 무엇보다도 중요합니다. 이들 파라미터가 충족되면, $75\Omega \pm 1\%$ 의 특성 임피던스의 정밀도를 달성할 수 있습니다.

반사 손실, 국지 반사, 반사 계수는 어떻게 정의하나?

반사된 전자기파는 케이블의 균질성을 위한 요소입니다. 일반적으로, 전압 비율 a 를 앞에서 뒤로 파형을 이동시켜 전압 비율을 보면 dB로 반사 손실이 표시됩니다($20 \log |a|$)

최대의 1GHz의 주파수 범위에 대해 이 추정치는 다음과 같이 추론됩니다.

- 17 dB 약한 수치
- 30 dB 양호 수치

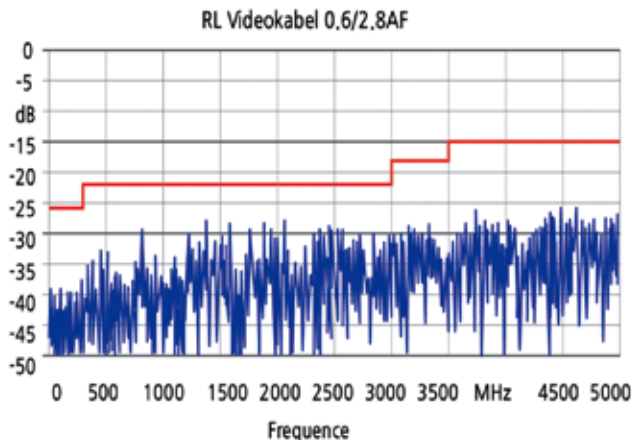


그림 1. 반사 손실의 측정

반사된 전자기파는 모든 반사파에 대해 헤테로다인(주파수 변조의 일종) 효과가 나타나게 됩니다. 이는 전송로가 단선되는 지점, 특성 임피던스에서 나타나는 편차에서 나타납니다.

2번째 반사는 아래와 같이 이해되어야 합니다. 반사된 전자기파가 다시 단선으로 인해 반사된다면, 이는 주 신호 방향으로 약간의 Delay를 수반하여 이동하도록 하나의 작은 부분 파동을 만들어냅니다.

국지반사는 규칙적인 간격(특성 임피던스의 변성)에서 생겨나지 않는 단선에서의 반사입니다. 반사 계수는 후방에서 전방으로 이동하는 파동의 진폭 비율입니다. 이로서, 반사 계수 r 은 $-1 \leq r \leq 1$ 사이에 있게 됩니다. 다음의 예외 사항은 Z_x 의 케이블 종단에 적용됩니다.

- $R = 0$ 은 $Z_x = Z_0$ 일치
- $R = 1$ 은 $Z_x = \infty$ 회로 개방
- $R = -1$ 은 $Z_x = 0$ 회로 차단

RF 케이블에 있어 제조과정에서의 크기 변화들은 특성 임피던스로부터 편

차와 같은 모순을 의미합니다. 일정한 주기에서의 단절처럼 특성 임피던스에서의 작은 주기의 불규칙은 추가적인 반사들을 일으킵니다.

그 결과들은 다음과 같습니다.

- 특정 주파수에서 공진
- 감쇄값의 변화

무작위로 발생하지만 특성 임피던스의 작은 변화는 반사가 특정 위상에서 더해지지 않고 이로 인해 반사 손실에서 어떠한 가상적인 영향이 생기지 않도록 합니다. 특정한 변화를 Time Domain Reflectometer(TDR), 즉 시간 영역 반사계로 측정하며 이를 TDR 측정이라고 부릅니다. 주기적이고도 통계적으로 발생하는 단절은 모두 반사 계수로서 표현될 수 있습니다. TDR 측정에서 반사 계수는 보통 %로 표시됩니다.

감쇠 “ α ”

효과적인 감쇠와 감쇄의 차이점은 무엇일까요?

감쇠는 특성 임피던스와 함께 케이블의 종단에서 입력 전압에서부터 출력 전압까지의 비율입니다. 효과적인 감쇠는 특성 임피던스가 동종의 케이블일 지라도 케이블의 모든 지점에서 동일하지 않다는 점을 나타냅니다. 또한, 케이블(반사)에서 소위 불리는 불연속에 의해 생겨나는 반사 손실을 포함합니다. 또한, 케이블과 송/수신기의 특성 임피던스 간의 추가적인 편차는 중요하게 여겨집니다. 동축 케이블의 [그림 2]와 같은 감쇠는 발생 손실에 대한 매개 변수이며 다음과 같이 구성되어 있습니다.

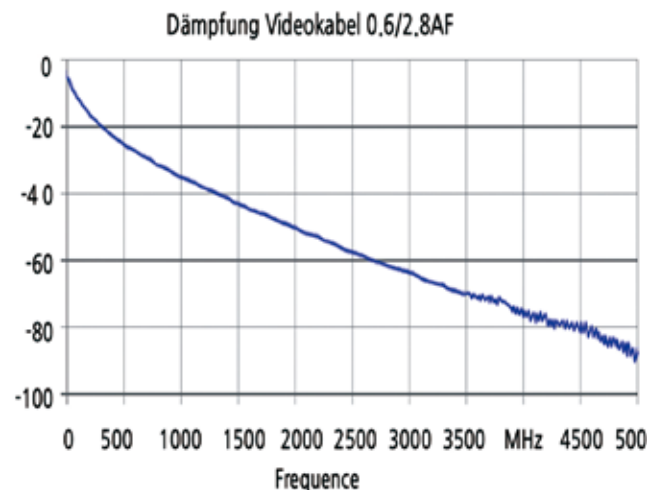


그림 2. 동축 케이블 감쇠 진행

1. 주파수 의존 저항 손실 B : 도체의 저항 손실로부터 파생.

표면적 효과로 인해 도체로부터 도출되는 감쇠의 일부는 도체의 직경에 반비례하게 됩니다. 약 800kHz부터, 주파수의 루트가 증가합니다.

2. 누설 감쇠 A : 양과 각도 $\tan \delta$ 에서 절연체 손실이 원인(교류 필드에서 극성 요소의 재 방향성에 의한 마찰 손실). 누설 감쇠는 주파수에 비례합니다.

3. 주파수 독립적인 저항 손실 C : 단지 저항 손실이 원인. [그림 3]은 다음에 서의 비율을 보여줍니다.

A = 누설 감쇠

B = 주파수 의존 저항 손실

C = 주파수 독립적인 저항 손실

케이블과 전송 길이의 감쇠

케이블의 최대 전송 길이는 주로 고려되어야 하는 주파수에서의 감쇠값에 의해 결정됩니다. 비디오 케이블과 함께, 감쇠값은 다음에 의해서 결정됩니다.

- 내부 도체 직경과 도체 구조
- 편조(절연체의 직경에 비례하는 편조각과 직경)
- 포일 구조, AI 층의 두께 그리고
- 높은 주파수에서 절연적 손실(손실 계수 $\tan \delta$)

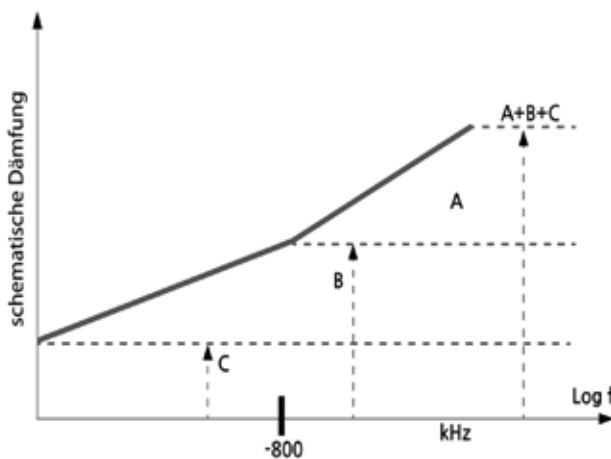


그림 3. 누설 감쇠 (A), 저항 감쇠 (B) 및 주파수 독립 저항 손실 간의 비율 (C)

최대 전송 길이

지난 2006년 월드컵 이후, HDTV 신호 1080i 필요성을 계기로, 케이블, 장치, 방송용 밴 등의 제조업체에서 수많은 시험이 전송 거리에 관하여 행해지고 있습니다. 최대 전송 거리의 계산을 위한 측정 장치로 텍트론릭스 TG

2000(TG700 대체 가능), 텍트론릭스 WFM700(WFM8300 대체 가능)을 이용하여 다음의 일정한 조건에 적용시켰습니다.

- 실험실 조건(지속적으로 낮은 습도, 일정한 주위 온도 등)
- 신규 최적화된 조립 케이블
- 조화를 이루는 케이블과 커넥터

다음 측정 [표 1]은 송신 길이가 적용되었습니다. 여기에선, 조립 케이블이 실험실 조건에서 측정되고 평가되고 있습니다.

Cable type	HD1080i로 측정된 최대 길이	HD1080p로 측정된 최대 길이
0.6/2.8AF	90m	80m
0.8/3.7AF	120m	110m
1.0/4.8AF	140m	130m
1.4/6.6AF	200m	170m
1.6/7.3AF	240m	210m

표 1. 측정된 최대 전송 길이

SMPTE vs 최대 전송 길이 적용

SMPTE는 다른 접근방법으로 설명해 보도록 하겠습니다.

SMPTE 292M

SDI(SMPTE 259M)에 반하여, 절반의 클럭 주파수에서는 30dB가 최대 감쇠치였습니다. SMPTE 292M 기준으로 1080i 및 720P(1.5Gbit/s) 신호의 HDTV(SMPTE 292M)으로는 [표 2]처럼 최대 감쇠가 20dB입니다. 표준의 사양은 반 클럭 주파수에서 최대 감쇠치는 20dB로 두었습니다.(1.5Gbit/s → 0.750GHz)

$$\alpha = Af + B\sqrt{f} + C$$

$$L_{\max} = \frac{20\text{dB}/100\text{m}}{\alpha_{750\text{MHz}} [\text{dB}/100\text{m}]} \cdot 100$$

Cable type	전송 길이 계산으로 산출한 Draka 제품 길이
0.6/2.8AF	66m
0.8/3.7AF	91m
1.0/4.8AF	112m
1.4/6.6AF	144m
1.6/7.3AF	161m

표 2. SMPTE 292M에 해당하는 계산된 최대 전송 길이

SMPTE 424M

1.5Gbit/s 신호(SMPTE 292M)에 관한 사양은 3Gbit/s 신호(SMPTE 424M)의 것과 동일합니다. 전송 길이 공식으로 계산된, SMPTE 424M에 따른 3Gbit/s를 위한 최대 전송 길이는 [표 3]을 참조하시면 됩니다. (기준 SMPTE 424M, 3Gbit/s HD용 1080P/50과 1080p/60 신호) 표준의 사양은 반 클럭 주파수에서 20dB가 최대 감쇠치입니다.(3Gbit/s → 1.5GHz)

$$L_{\max} = \frac{20\text{dB}/100\text{m}}{\alpha_{750\text{MHz}}[\text{dB}/100\text{m}]} \cdot 100$$

이제 남은 문제는 어떤 최대 전송 길이가 맞느냐는 것입니다. SMPTE에 따라서 최대 전송 길이를 계산하여야 하는 것인지 혹은 시험에 의해서 얻어진 최대 전송 길이여야 하는 것인지 말입니다.

Type	1.5GHz에서 데이터 수치에 의한 감쇠치 dB	SMPTE 424M에 따른 최대 전송 길이 m
0.6/2.8AF	43,2	47
0.8/3.7AF	31,3	64
1.0/4.8AF	24,9	80
1.4/6.6AF	19,6	102
1.6/7.3AF	16,9	119

표 3. SMPTE 424M에 따라 계산된 최대 전송 길이

감쇠에 대한 온도 영향

실제로, 온도 및 습도의 기후 변화는 노후화와 다른 영향만큼이나 영향을 미칩니다.

감쇠는 온도에 영향을 받으며, 케이블 제조사는 20 °C에서의 케이블 감쇠를 정의합니다. 온도가 올라가면 감쇠는 약 0.2%/°C 정도 증가합니다(화학적으로 발포된 PE로는 최대 0.27 %/°C 감쇠).

스크리닝 감쇠

외부에서 송신 시스템을 교란시키는 전자기장 간섭은 주로 공간적으로 가장 광범위한 송신 요소인 케이블에 영향을 미칩니다. 만일, 간섭 신호가 대상 신호를 헤테로다인(주파수변조의 일종) 시키면, 신호의 잘못된 간섭을 야기시키거나 신호 흐름을 방해할 수 있게 됩니다.

아날로그 신호를 가진다고 해도 외부로부터 간섭이 있다면 신호가 중간에서

사라져버리거나 너무 긴 전송 라인으로 인해 그림과 같은 신호 레벨의 변화가 간주되면, 디지털 전송에서 단 2가지 상황만이 놓이게 됩니다. 화상이 나 오거나 전혀 화상이 없거나 스크리닝 감쇠[그림4]보다 증가되고 더 좋아지고 더 높은 간섭 내성이 있습니다. SDI 클럭 주파수인 약 135MHz 주파수 범위 내에서는, 이중으로 알루미늄 호일을 꼬아서 만든 스크리닝은 이중으로 꼬아서 만든 케이블보다 최대 30dB까지 더 스크리닝 감쇠를 갖습니다. 1개로 꼬아 만든 케이블에서는 40dB로 더 높은 수치가 나타나게 됩니다.

결론

일반적으로, 1080i 및 1080P 신호들의 성장세는 스튜디오용 케이블의 수요를 증가시켰습니다. 이러한 맥락에서, 60m 이상의 전송거리에서는 자연적으로 고주파의 신호 손실이 발생하고 신호 품질에 영향을 미치는 것은 무시할 수 없습니다. 그러나 원활하고 손실이 없는 스튜디오 운용을 보장하려면 커넥터들도 에러의 요소로서 고려되어야만 합니다.

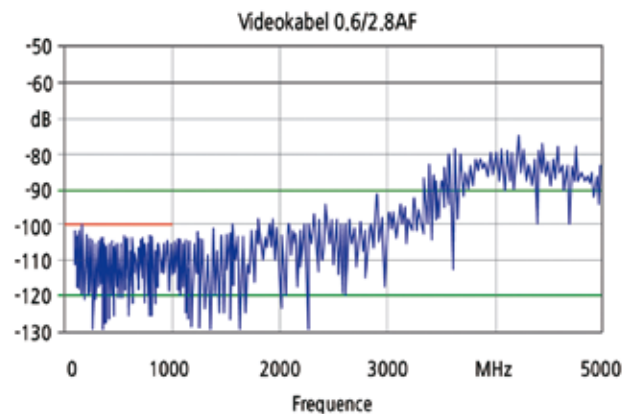


그림 4. 스크리닝 감쇠

