

# 트위스트 차폐선의 차동 전달 임피던스

Differential transfer impedance of shielded twisted pairs

차폐 전달 임피던스 ( $Z_t$ )의 개념은 1934년 S. Schelkunoff에 의해 소개되었는데, 이것은 차폐 케이블에 결합되는 EMI 양을 예측하고 관리하는데 매우 편리한 파라미터이다. 비록 EMI 내성 향상을 위해 동축케이블이 광범위하게 사용되기는 하지만,  $Z_t$ 의 파라미터는 동축 케이블의 EMI 방사문제에서 차폐케이블(STP: Shielded Twisted Pairs)까지 쉽게 확장할 수 있다. 여기에서는 후자를 좀 더 특징적으로 논하여 차동 전달 임피던스 ( $Z_{td}$ )의 개념까지 다루고자 한다.

## I. 전달 임피던스 ( $Z_t$ )에 대한 이해

수 십년 전까지, 케이블의 차폐도(SE)란 패러데이 케이지 또는 차폐 함체에 대해 E(또는 H) 전기장 외부와 내부의 비율에 대해 로그를 취하는 것으로 정의하여 사용되었다. 더 정확하게는 차폐하지 않은 임의 지점에서 존재하는 전계에 대해 차폐를 시켰을 때 내부의 잔류 전계비를 말한다.

실제로 차폐 케이블에 있어 입사전계의 영향은 같은 전계에 비차폐 케이블의 유도량 (전압 혹은 전류)를 측정하여 같은 조건의 차폐 케이블의 차폐도를 측정한다.

케이블 차폐도 측정에 있어 비록 원리는 단순하게 보이지만, dB 단위의 SE 를 표현하는 것은 측정 자체가 쉽지 않고, 강 전자계를 만들어야 하므로 RF 앰프와 안테나 세트가 필요하며, 무반사 차폐실이 필요하다.

특히 케이블 차폐도 측정에 있어 방사 EMC 측정처럼 안테나에서 1 m 떨어진 거리와 같은 근방계 측정의 경우 50 MHz 이하 측정 시 비교적 높은 불확도(약 6 dB)가 존재한다. 이 경우, 측정된 SE 값은 사용된 안테나의 형태에 좌우되는데, E-필드 방사에서는 큰 값이 나타나는 반면, H-필드(루프 안테나)에서는 전체적으로 심각한 결과 같이 측정될 수 있다. 특히 케이블 높이나 종단 저항과 같은 변수들에 의해 측정 불확도가 높아진다.

케이블 차폐도 측정결과를 요약하면, 하나의 방사 방법으로 측정한 SE 측정 결과는 여러 가지 시험 구성방법이 있기 때문에, 시험자, 시험기관, 환경, 측정구성에 따라 서로 다른 결과가 측정될 수 있다는 것이다.

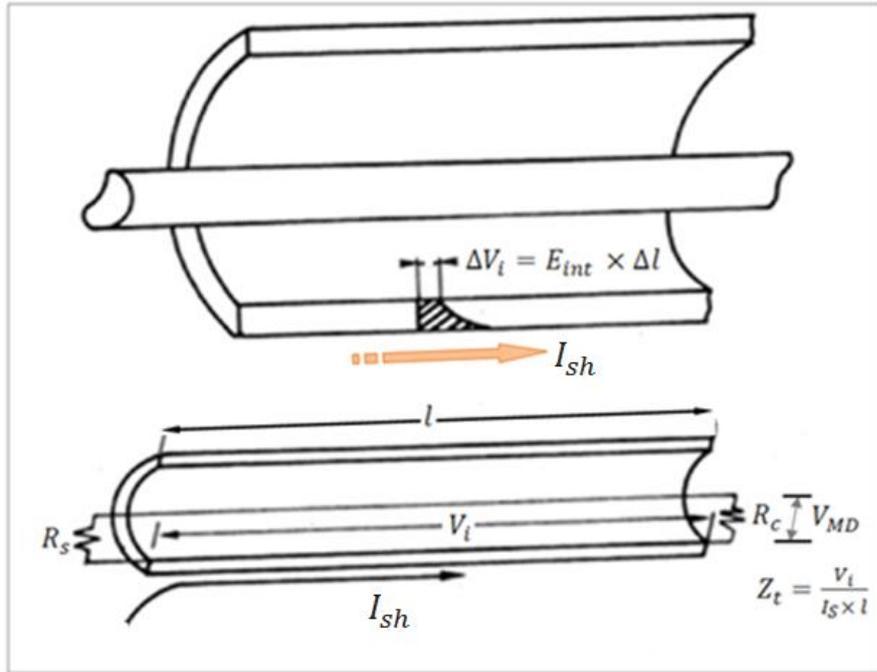


그림 1 a) 임피던스의 개념

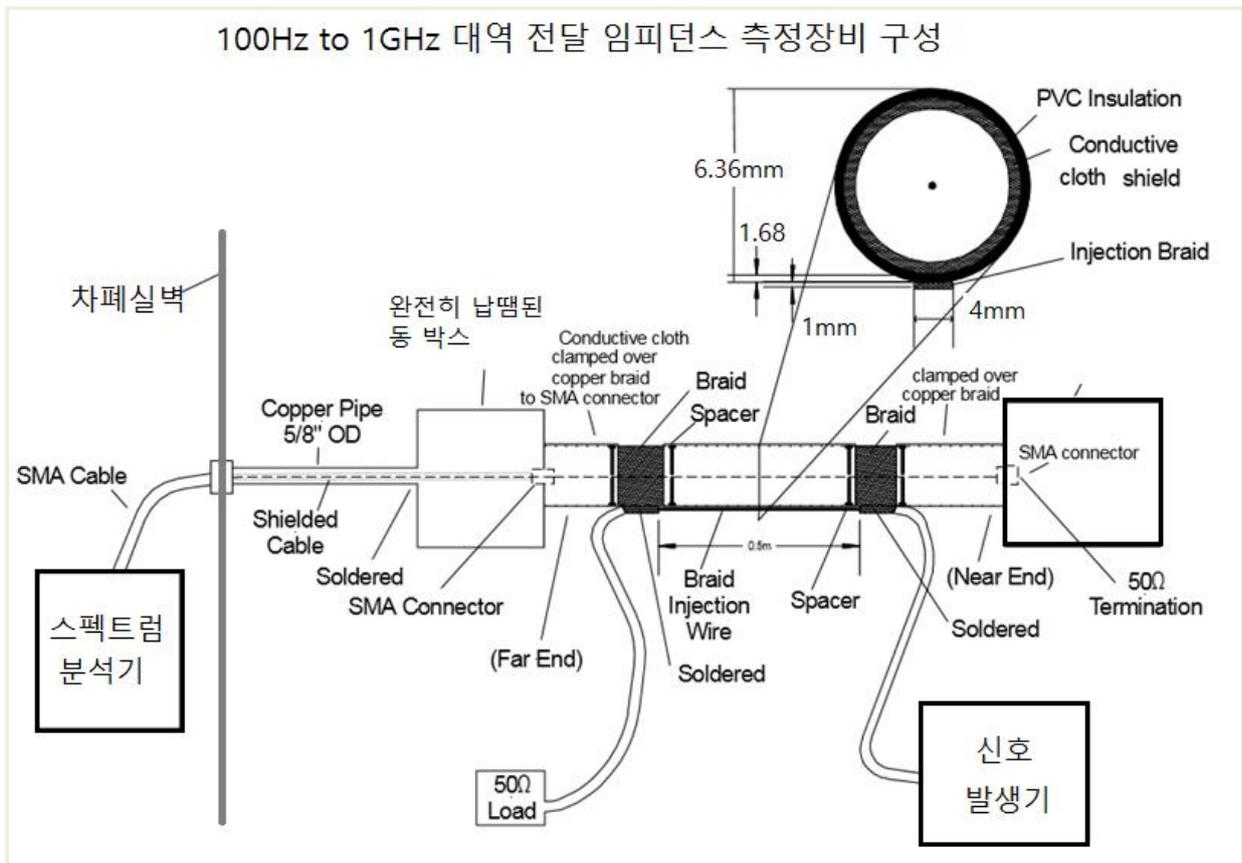


그림 1 b) 전달 임피던스 측정장비 구성

그림 1. 전달 임피던스  $Z_t$  정의 및 측정장비 구성

따라서 이런 문제를 해결하기 위해 EMC 전문가 그룹에서 오래 동안 사용해온 차폐 케이블 측정 방법대신, 케이블 차폐체나 비 차폐체 고유의 파라미터까지 고려하여 전달 임피던스 ( $Z_t$ )를 도입하게 되었는데, 이 방법은 1934-38 년경 Schelkunoff 가 제시한 탁월한 개념이다.

전달 임피던스는 차폐면과 반대 표면에 발생하는 전압에 대해서 차폐면에 흐르는 전류와 관련이 있다. 이 전압은 차폐체 두께 (가령 차폐가 딱딱한 터널(관)일 경우, 주파수가 증가하면 표피효과로 인해 급속히 확산하여 측정이 어렵게 됨)를 관통하는 전류 결합에 의하거나, 편조의 홀을 통과하는 누설 인덕턴스에 의해 발생한다. 편조의 품질이 좋으면 길이 방향의 차폐전압은 낮아진다.

전도 주입 장치를 사용하여  $Z_t$  를 쉽게 측정할 수 있으며, 방사 측정방법 보다 훨씬 측정 불확도를 낮출 수 있다. 전류(그림 1)는 케이블 - 접지 루프 사이에 접촉한 (펄스)발생기나 전류 클램프로 차폐체에 주입한다. 차폐에 결함(차폐 저항, 편조 틈새) 이 있으면 중간 도체와 차폐간의 내부 공극에 작은 전압이 발생한다. 이 전압 또는 종속 신호는 케이블의 종단에 스펙트럼 분석기나 오실로스코프 입력단자를 접속하여 관측할 수 있다.

결과값을 1 m 길이의 샘플에 대해 정규화하면 다음과 같다.

$$Z_t (\Omega/m) = V_i (\text{Volt}) / (I_{sh} \times l_m) \quad (1)$$

여기서,

$V_i$  = 케이블 길이  $l$  전체에 대해 차폐 내부면의 길이방향으로 유도되는 전압으로

차폐체 내 중심도체에 원형으로 잡음 전류를 유도

$I_{sh}$  = EMI 발생원에 의해 차폐 체 내부로 주입된 외부 전류

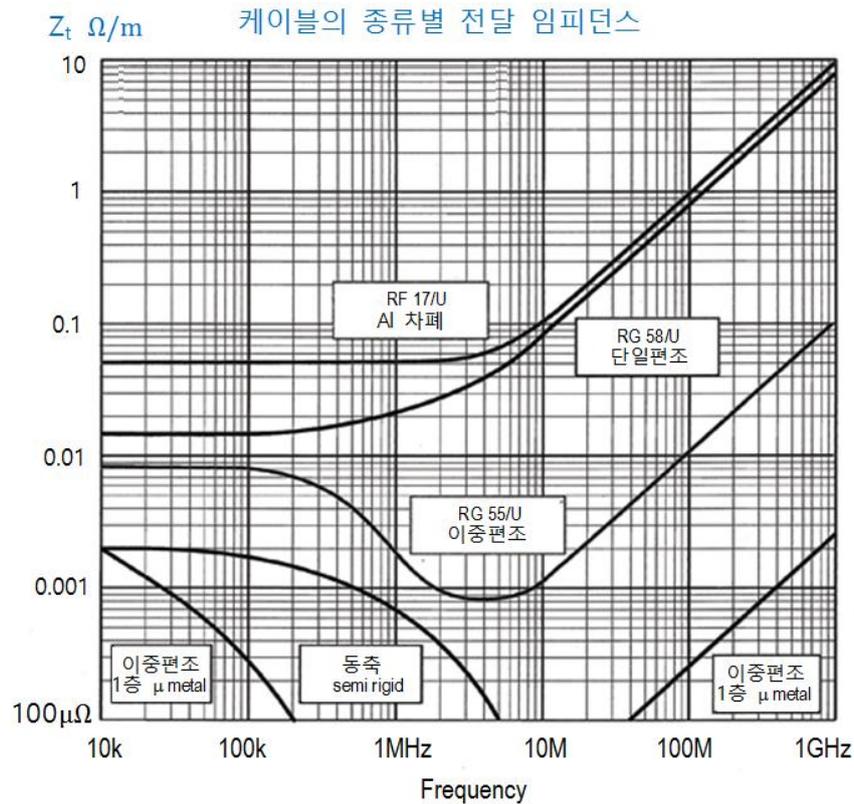


그림 2. 동축 케이블의 종류별 전달 임피던스  $Z_t$  의 대표 값

케이블의 양단에 특성 임피던스로 정합된 부하  $R_L$  을 부착하면, 양 종단의 전압은 총 유도 전압  $V_i$  의 절반이다. 따라서 전달 임피던스는  $Z_t$  는 다음 식으로 표현된다.

$$Z_t (\Omega/m) = 2 \times V_L / (I_{sh} \times l_m)$$

여러 종류 동축케이블에 대한 전달 임피던스  $Z_t$  의 대표 값은 그림 2 에 나타냈다. 가령 차폐체의 커넥터 연결 시 외부도체를 함께 모아 연결하는 경우, Pigtail 임피던스를  $Z_t$  에 더해서 루프 임피던스를 계산해야 한다. 약 100 kHz 이하에서  $Z_t$  는 단순히 차폐체(외부도체)의 저항처럼 일정하게 취급한다. 1 MHz 이상에서 단층 편조 시  $Z_t$  는 주파수에 따라 증가하는데 이는 전체 편조선과 내부 도체간의 누설 인덕턴스  $L_t$  때문에 발생된다. 편조 밀도가 높은 우수한 단층 편조의  $L_t$  는 대략 1 nH/m 정도 된다. 따라서  $Z_t$  를 주파수축상에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_t (\Omega/m) = R_{sh} (\Omega/m) + j \omega L_t (\text{Henry/m})$$

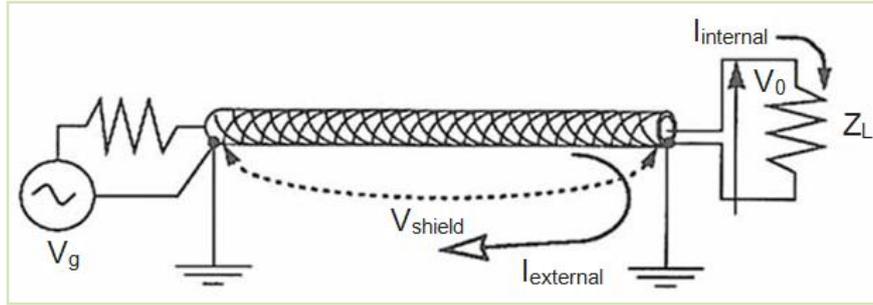


그림 3. 동축 케이블의 외부 전자파 유도원리

## II. 동축케이블의 내성 예측에 $Z_t$ 활용

$Z_t$  를 알고 있는 경우 EMI 위협에 대한 민감도를 예측하는데 응용할 수 있다. 일 예로 케이블의 접지 루프에 공간전파 인가 시 유도되는 전자파 크기를 예측하는데 적용해 보기로 하자. 5~15 mm 의 외경을 가진 단일 편조선을 가진 동축케이블의 경우, 이 외부 루프의 임피던스는 대지에서 50~ 500 mm 높이에 있을 때 단위길이 1m 당 전달 임피던스는 다음 간략 식으로 표현될 수 있다.

$$Z_{ext} = ( 10 \text{ m}\Omega + j 5 \Omega \times f_{\text{MHz}}) [\Omega/\text{m}] \quad (2)$$

만약 어떤 전계에서 루프에 유도되는 전압을 알고 있다면, 접지 루프 임피던스는 차폐체내 순환되는 루프전류  $I_{sh}$  를 계산하는데 사용될 수 있다. 또한  $I_{sh}$  를 계산해 낼 수 있다면 차폐재 내부 나타나는 전압을 계산해 낼 수 있다.

전기장에서 루프간에 유도된 전압이 알려져 있다면, 차폐체에 순환되는 루프전류  $I_{sh}$  를 계산하기 위해 이 대지-루프간 임피던스를 사용할 수 있다.  $I_{sh}$  를 알면 차폐체 내부에 나타나는 전압을 개략 계산하기 위해  $Z_t$  를 바로 사용할 수 있다.

$$V_i = (Z_t \times l_m) \times I_{sh} \quad (3)$$

위 식에서  $l_m$  는 케이블의 길이이다. 만일 EMI 주파수가 충분히 낮아 케이블 길이가  $\lambda/2$  보다 긴 경우, 물리적인 길이 "  $l_m$  "은 식 (3) 의 괄호 항을  $\lambda/2$  로 대체할 수 있을 것이다.

### 예제 1:

길이 4 m 인 표준 단일 편조된 동축 케이블이 15 MHz 주파수에서 10 [V/m] 전계에 접지면으로 부터 높이 0.75 m 설치되어 있을 때 9 V 의 개방 루프 전압이 유도되고 있다. 전달 임피던스 특성표를 이용하여 이때 수신 측 케이블 종단 전압과 차폐도를 계산해 보자

#### 풀이;

식(2)에 의해 외부 루프 임피던스를 계산하면

$$Z_{\text{ext}} = (0.01 + j 5 \times 15 \text{ MHz}) \times 4\text{m} = 300\Omega$$

루프 전류를 계산하면 :  $I_{\text{sh}} = 9\text{V} / 300\Omega = 0.03\text{A}$

그림 2 에서 RG 58 과 같이 단일 편조 동축인 경우  $Z_t @ 15\text{MHz} = 0.15\Omega/\text{m}$ .

내부 도체에 유도되는 전압을 계산하면;

$$V_i = Z_t \times l \times I = 0.15 \times 4 \times 0.03 = 18\text{mV}$$

케이블 양단이 50  $\Omega$ 으로 종단 처리되었다고 가정하면 :

$$V_L = 18\text{mV} \times 50 / (50 + 50) = 9\text{mV}$$

소스 측 임피던스는 50 $\Omega$  이고 수신 측 종단이 5 k $\Omega$  같은 높은 임피던스로 종단처리 되었다면 :

$$V_L = 18\text{mV} \times 5,000 / (5,000 + 50) \approx 18\text{mV}$$

부가적으로, 단층 차폐에 따른 감쇠 정수를 계산해 낼 수 있는데, 이는 개방 루프 전압 대 내부 유기 전압 비로서 표현된다.

$$K_r = 9\text{V} / 18 \cdot 10^{-3} \text{V} = 500. \text{ 이를 dB 로 환산하면 } 54 \text{ dB.}$$

### III. 동축케이블로 부터 RF 방사량 예측에 $Z_t$ 활용

전달 임피던스  $Z_t$  의 개념을 완전히 정반대인 가역적 관계의 방사량 계산에도 응용할 수 있다. RF 신호, 기본 대역 비디오, 일부 LAN 링크 및 기타 고주파 신호들은 동축케이블과 연관되어 있다. 아주 작은 내부 전류신호(수 MHz 이상 대역의 0.1 ~0.3 %)가 그림 3 과 같이 차폐체 외부로 방사되는 것을 생각해 보자. 이것은 차폐도체가 최소 양단에서 기준 대지에 올바르게 접속되어 있고, 동축 케이블 커넥터가

샤시에 완벽하게 접속되어 있다고 가정한 것이다. 신호전류  $I_0$  가 차폐체 내부 도체로 귀환되는 것은 EMI 전압이 케이블 차폐도체를 따라 나타나기 때문인데 이 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{\text{ext}} = Z_t (\Omega/\text{m}) \times l (\text{m}) \times I_0 \quad (4)$$

$$= Z_t (\Omega/\text{m}) \times l (\text{m}) \times V_0 / Z_L$$

다음에 이 전압  $V_{\text{ext}}$  은 케이블 차폐체와 접지간 루프에 의해 만들어진 방사원 전압으로 방사 잡음원이 된다. 이 잡음 방사원은 결국 동축 케이블의 귀환 전류와 동축 편조선의 품질 즉, 차폐 편조선의 도체저항과 인덕턴스 값에 따라 크기가 달라지는 것을 알 수 있다.

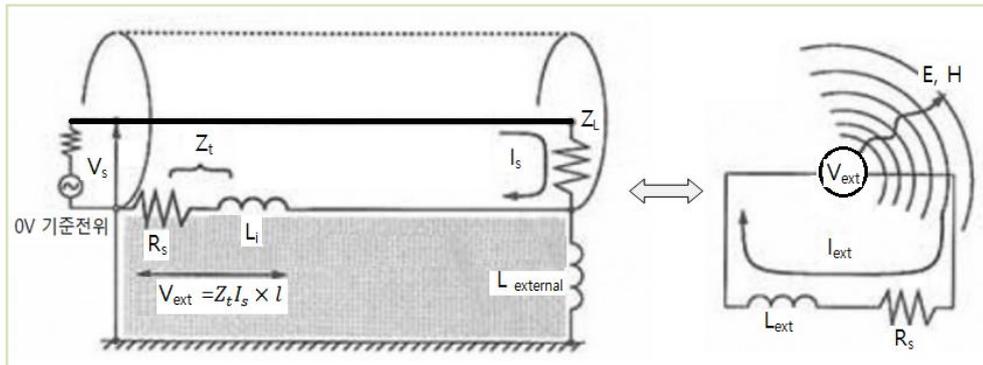


그림 4. 동축 케이블에 의한 잡음 방사량 증가회로

낮은 임피던스 루프 (그림 4 참조)에서 E 및 H 장을 간략하게 계산하기 위해, 외부 차폐체 흐르는 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{\text{ext}} = V_{\text{ext}} / Z_{\text{ext}}$$

여기서,  $Z_{\text{ext}}$  는 앞서 계산된 차폐도 계산 값과 동일하다. 결국, 피그테일이나 커넥터 임피던스가  $Z_{\text{ext}}$  와 관련되어 있음을 알 수 있다. 비록 이것들이  $Z_{\text{ext}}$  에 기여하는 바는 미미하지만 차폐 전달 임피던스를 심각하게 저하시킬 수 있기 때문에 차폐가 우수할 경우,  $Z_t$  는  $Z_{\text{ext}}$  보다 수백 내지 수천배 작아야 한다. 차폐체가 샤시와 분리되어 있다면 차폐체는 전기적으로 송신 안테나 역할을 한다. 방사계는 입력원  $V_{\text{ext}}$  로 된 모노폴(단극 안테나)나 다이폴(쌍극 안테나) 관계식을 이용하여 계산할 수 있다.

이때 유의해야 할 것은 케이블이 전기적으로 길게 되면,  $Z_t$  ( $\Omega/m$ )을 더 이상 길이에 따라 곱해서 구할 수 없다. 그 이유는 전류가 정재파 형태로 존재하므로 케이블 차폐체에 길이에 따라 일정하지 않기 때문이다. 이 때에는 대략 기본 값으로 다음과 같은 차폐체에 분포된 최대 차폐 전압을 고려한다.

$$V_{\text{ext (max)}} = I_{\text{ext}} \cdot Z_t (\Omega/m) \times \lambda/2 \quad (5)$$

따라서,  $Z_t$  가 주파수에 따라 증가함에 따라  $Z_t$  에 곱해 줄 유효 길이는 주파수가 따라 증가한다. 동시에 케이블-접지간 외부 임피던스는  $Z_C$  로 대치할 필요가 있으며, 이의 특성임피던스는 다음 공식을 이용하여 구한다.

$$Z_C = 60 \log_n (4h/d) \quad (6)$$

## 예제 2 ;

2 m 짜리 RG-58 동축케이블이 두 개의 캐비닛에 BNC 커넥터로 접속되어 있으며 이의 전기적인 파라미터는 다음과 같다.

-전송 주파수: 15 MHz video

-부하저항:  $75\Omega$

- $V_0$  스펙트럼 진폭:

-기본파 (15MHz) = 10 Vpk

3 차 하모닉 ( 45MHz) = 3.3 Vpk

5 차 하모닉 ( 75MHz) = 2 Vpk

-물리적 구조

케이블 직경= 0.5 cm, 접지면으로 부터 포설 높이= 30 cm

위와 같은 구조를 갖는 시스템이 있을 때 이 장치로부터 3m 떨어진 거리에서 제 3 고조파의 전계강도를 구하시오.

**풀이;**

먼저 루프 면적을 계산하면;

$$A = 2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} = 0.6 \text{ m}^2 = 6,000 \text{ cm}^2$$

3 고조파의 파장은 45MHz,  $\lambda = 6.70\text{m}$  이므로 케이블길이 2m 는 안테나 방사패턴(효율)이 가장 높은  $\lambda/2$  과  $\lambda/4$  보다 길다.  $\lambda/2$  에 접근 시키기 위해 차폐선-접지루프를 최대 접근법으로 안테나 방사효율을 높일 수 있는 방법을 생각한다. 외부 루프 임피던스가 최대치에 근접한다고 할 때 특성 임피던스는 식(6)에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$Z_C = 60 \log_n (4 \times 30 / 5) = 330 \Omega$$

차폐체를 통한 내부 귀환 전류는

$$I_0 (45\text{MHz}) = V_0 / 75 \Omega = 3.3 / 75 = 44\text{mA}$$

전달 임피던스  $Z_t$  일 때 외부 차폐체 전압은  $V_{\text{ext}} (45\text{MHz}) = I_0 \cdot Z_t(\Omega/\text{m}) \times 2\text{m}$ ,

여기서,  $Z_t (45\text{MHz})$  는 그림 2 로 부터  $0.4 \Omega/\text{m}$  이 주어지므로

$$V_{\text{ext}} = 44 \cdot 10^{-3} \cdot 0.4 \cdot 2\text{m} = 35 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

이 전압이 귀환되면서 루프를 통해 외부 전류로 구동하므로

$$I_{\text{ext}} = V_{\text{ext}} / Z_C = 35 \cdot 10^{-3} \text{ V} / 330\Omega = 107 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

이 전류로 부터 3m 떨어진 거리에서 전계강도를 구할 수 있다.

$$E (\mu\text{V}/\text{m}) = [ 1.3 \cdot A \text{cm}^2 \cdot I_{\text{amp}} \cdot f(\text{MHz})^2 ]^{1/2}$$

$$E (\mu\text{V}/\text{m}) = 560 \mu\text{V}/\text{m} , \text{ or } 55\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$$

(주: 전체 계산은 피크 값으로 했기 때문에 3 dB 를 피크 - rms 변환용으로 빼 주어야 하지만 CISPR/FCC 시험조건에서 대지 반사파를 합친 값이 되기 때문에 간단하게 상쇄시켰다.)

계산 결과는 비록 차폐하지 않은 나 동선을 이용하여 대지면으로 귀환시켜, 동일 전류를 흐르게 하는 경우보다 방사 레벨이 약 500 배나 낮을지라도, 75, 105 MHz 등의 주파수에서 FCC Class B 제한값 보다 45 MHz 에서는 15 dB 을 초과한다.

이 경우 방사 전자파를 줄이기 위한 여러 가능한 방법을 생각해 보자.

- 두껍고, 편조밀도 높으며 도전성이 우수한 재료로 차폐, 1 층 편조선을 투자율이 높은 재료를 사용하는 이중 편조 케이블을 사용하여 낮은  $Z_t$  를 가진 동축 케이블 을 사용한다
- 케이블 차폐체 위에 큰 페라이트 비드를 삽입하여 요구 감쇠량을 달성 할 수 있도록 해당 주파수에서 약 1,200  $\Omega$ 의 직렬 추가 임피던스를 얻을 수 있도록 한다. 이때 페라이트 코어에 케이블을 2-3 번 감아 임피던스를 높일 수 있는 방법을 병행한다.
- 케이블 설치 높이를 대지와 가깝게 배선하여 루프면적을 최소화 시킨다.

#### IV. 차폐 도체 접속의 중요성

앞서 설명한 바와 같이 케이블 차폐도를 향상시키기 위해서는 케이블 구조 자체 즉, 낮은  $Z_t$  를 갖는 것도 중요하지만 차폐선과 커넥터 처리, 접속 저항이 차폐도를 결정하는데 중요한 인자가 된다. 일반적으로 차폐도체의 접속에 있어 임피던스는 차폐체와 커넥터 금속부 연결, 신호도체와 핀 연결의 접촉저항, 편조선 360 도 덮는 구조, 리셉터클의 접지면과 연결 대상기기의 접촉면적간  $\mu\Omega$ 적인 접촉저항 최소화가 케이블 차폐의 핵심요소이다.

이러한 접속 임피던스  $Z_{ct}$  는  $Z_t$  와 직렬로 신호 전류 귀환 경로에 직접 가해진다. 그러므로  $Z_{ct}$  는 케이블-대지간 방사 루프를 발생시키는  $V_{ext}$  전압을 상당히 증가시킬 수 있다.  $Z_t$  는 분포회로 정수에 의해 결정되어  $[\Omega/m]$ 의 단위를 갖는 반면,  $Z_{ct}$  는 현실적인 성분이다.

만약 종단 연결 시 차폐 편조선을 360 도 내부선을 덮는 구조가 아닌 선으로 연결하거나, 꼬아서 연결하는 경우 접속 임피던스  $Z_{ct}$  는 선의 끝부분 꼬아 연결하는 부분에서의 자체 인덕턴스이다.

표 1. 커넥터 종류별 특정 주파수에서 일반적인 저항 값

	dc to 10MHz	100MHz	1GHz
BNC 커넥터	1-3mΩ	10mΩ	100mΩ
N 또는 SMA 편조선 연결	< 0.1mΩ	1mΩ	10mΩ
일반 다중 pin 커넥터 금속재질 덮개 구조	10-50mΩ	10-50mΩ	300mΩ
Pigtail, 2.5cm	$Z=1.5m\Omega + j.0.15\Omega \times f \text{ MHz}$		

## V. 차폐 트위스트 1 쌍 또는 다중 도체 케이블에서 차동 전달 임피던스 ( $Z_{td}$ )

방사 내성이나, 동축 케이블의 방사 모델링에 사용되는 전달 임피던스의 개념을 차폐 트위스트 페어 (STP) 케이블에도 적용 할 수 있다. 그러나 케이블 구조상 큰 차이가 있어 차폐체가 신호 궤환선으로 사용되지 않는다.

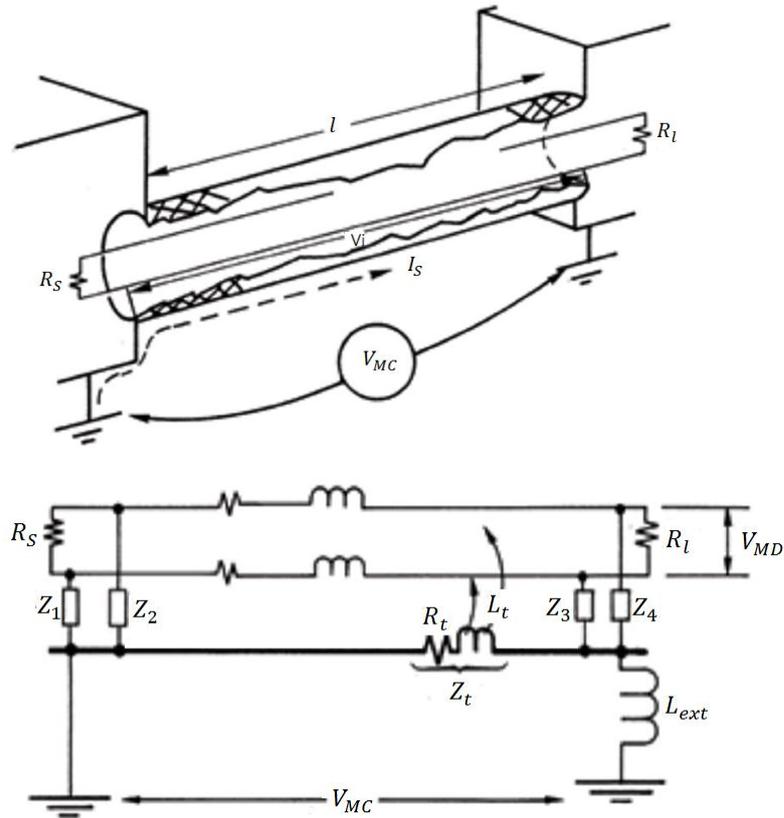


그림 5. 차폐 트위스트 1 쌍인 케이블의 외부 전계에 대한 전자파 민감성 증가 회로 및 모드변환

### 5.1 차폐 트위스트 1 쌍인 케이블에 $Z_{td}$ 를 이용한 전자파 내성 예측

차폐선을 궤환선으로 사용하지 않고 자체로 신호 궤환선을 가지고 있는 1 쌍의 케이블은 그림 5 에서 루프 전류로 인해 차폐도체에 유기된 된 전압  $V_i$  는 1 쌍의 케이블 양단에 차동전압으로 나타나지 않고 다음 2 가지의 경우 수가 있다.

#### a) 일반적인 경우

차동 드라이버나 리시버 및 1 쌍의 도체를 사용하여 링크가 완전 평형을 유지한 경우, 루프 유도 전류  $I_{sh}$  (식 3 참조) 에 기인한 차폐체 내부에서 발생하는 전압  $V_i$  부터 볼 수 있다.

각 선로 1 및 2 가 동일 전압  $V_i$  에 노출되었을 때 케이블이 완벽하게 대칭을 이루면, 전압차  $V_i(1) - V_i(2)$  는 제로가 된다. 그러나 선로저항, 차폐체에 걸리는 커패시턴스 및 누설 인덕턴스와 차폐체간에 일부분이 비대칭 발생되기 때문에 다음과 같은 차동전압이 발생한다.

$$V_{dm} = V_i \cdot X\% \cdot R_L / (R_s + R_L)$$

여기서  $X\%$  는 페어의 비대칭율이다. 일반적으로 대칭 링크의 품질 여부에 따라  $X$  는 1 ~ 10 %가 되고, 고속 데이터 링크에서는 대표적으로 약 5 % 정도이다.

따라서 동축케이블로 구성되었을 때 표현식  $V_i$  로 대치하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V_{dm} = [Z_t (\Omega/m) \cdot l (m) \cdot I_{sh}] \cdot X\% (R_L / (R_s + R_L)) \quad (7)$$

그러므로 차동 전달 임피던스  $Z_{td}$  는 최종 비대칭의 차폐 커넥터 임피던스  $Z_{tc}$  와 커넥터의 고유 비대칭 값(접점평형 대 금속 커넥터 금구는 완벽하지 않으므로 전체 링크 대칭성을 떨어뜨릴 수 있음) 을 더한 값, 차폐체 임피던스  $Z_t$  에 포함되는 것으로 정의할 수 있다. 이 새로운 파라미터  $Z_{td}$  는 주어진 차폐체에 흐르는 전류로부터  $V_{dm}$  의 단일 경로 계산을 가능하게 한다.

b) STP 사용시 비대칭/불평형 링크가 되는 원인.

대칭-비대칭 변환 소자(Balun)를 사용하지 않은 송 수신 회로가 한쪽만 종단하여 비대칭이 되는 경우, 1 쌍의 도체중 한 개만 양쪽 종단에서 0V 기준단자에 접속하면 전체 STP 케이블은 유사 동축 링크로 동작된다. 단지 귀환선의 DC 저항이 케이블 차폐체와 병렬인 것은 작은 장점이지만, 전기적 기준전위(0V)가 결국 샷시로 부터 플로팅되어 차폐체가 샷시에 접지되지 않게 된다.

### 예제 3;

여기 STP 케이블을 사용하는 고속 차동 링크가 다음과 같은 특성을 갖는 회로가 있다

-LVDS 방식 차동 신호 검출 임계전압 : 100mV

-STP 케이블의 길이와 불평형도: 0.80m 길이, 고품질의 편조 STP, 쌍의 불평도: 5%

-EMC 시험항목으로는 Bulk Cable Injection (BCI) test: 200mA<sub>rms</sub>, 30MHz – 200MHz

수신 종단에서 얼마의 차동전압이 발생되는가 ?

### 풀이;

케이블 길이 0.8m 에서 BCI 신호 주입시 가장 잘 결합되는 주파수 100MHz 에서 계산한다.

1) 그림 2 로 부터 단층 편조 케이블 사용시  $Z_t @ 100\text{MHz} = 1\Omega / \text{m}$

- 비 평형도 5%에서  $Z_{td} = 5 \cdot 10^{-2} \Omega / \text{m}$

- 식(7)로 부터 0.8m 케이블의  $V_{dm} = 0.80 \cdot 1 \Omega / \text{m} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \times 200\text{mA} = 8 \text{ mV}_{\text{rms}}$

- 디지털 신호전송에 있어 리시버나 비교기를 사용하는 회로 방식은 변조신호가 피크 값 즉,

최대값으로 취급되므로 실제 차동 EMI 잡음 전압은  $V_{dm} = 8 \cdot \sqrt{2} = 11 \text{ mV}$

결국 차폐 결합량만 고려한다면, 수신 잡음전압은 LVDS 검파 임계값 보다 20dB 낮다.

2) 만약 STP 케이블을 차폐선 양단에서 12.5mm 로 꼬아서(pigtails) 플라스틱 RJ 45 플러그에 연결시키면 차동 잡음전압  $V_{dm}$  은 어떻게 변할까?

- 양쪽 2 개의 피그테일에 의한 총 자기 인덕턴스는 일반적으로 1nH/mm 이므로

$$L_p = 2 \times 12.5 \times 1\text{nH} = 25\text{nH}$$

-100MHz 에서  $Z_t$  에 직렬로 적절한 플라스틱 임피던스를 더해 주면

$$Z_p = L\omega = 16\Omega$$

- STP 케이블 양단에 2 개의 피그테일 연결 시 1 쌍의 케이블에 5%의 불평형이 있다고 할 때 차동 잡음전압  $V_{dm}$  은 다음과 같이 구해진다.

$$V_{dm} = [(0.80 \cdot 1 \Omega / m \cdot 5 \cdot 10^{-2}) + 16 \cdot 5 \cdot 10^{-2}] \times 200mA = 170 mV_{rms}, \text{ or } 235 mV_{pk}$$

결국 같은 케이블을 사용했으나 케이블 종단 연결시 꼬아서 연결하는 방법으로 시공하면 LVDS 검파 임계값의 2 배(6dB)나 높은 값이 잡음전압으로 나타날 수 있다.

차폐선 종단 처리시 360 도 덮는 구조로 연결하지 않고 작업상 편리함 때문에 양단을 꼬아서 차폐선을 연결하는 피크데일 연결은 전달 임피던스를 악화시켜 최적의 차폐케이블 처리구조에 비해 20 배 이상(26dB) 좋지 않은 결과를 낼 수 있다. 따라서 군용기기의 경우 동근 금속 케이블 커넥터를 사용하여 차폐도체를 전문가에 의해 최적으로 연결해 주어야 한다.

## 5.2 $Z_{td}$ 의 EMI 방사 잡음량 예측 적용

차동 드라이버/리시버 전송방식에서 차동 링크를 이용하면, 차폐체를 통한 전류 귀환은 전선 연결구조의 대칭율에 비례한다. 전송링크가 X 페센트 오차를 가지고 대칭을 이룬다면 차폐체에 의해 귀환되는 불필요한 전류는, 최악의 예상 오차 조합에 대해 총 전류의 X %이다.

이 경우 식 4 는 다음과 같이 된다.

$$V_{ext} = X\% \cdot Z_t (\Omega/m) \times l (m) \times V_0 / Z_L \quad (8)$$

따라서 방사전계의 크기는 동축 케이블과 비교하여 X % 값과 같은 요소만큼 감소한다.

반대로 신호 귀환선 양단을 접지시키지 않아서 비평형회로가 되어 상당량의 신호 귀환전류가 차폐선으로 귀환 되는 경우 그 귀환량을 예측하기 어렵다. 그러나 최악의 경우라 할지라도 동축 케이블을 이용한 전송방식 보다 방사량은 크기 않다.

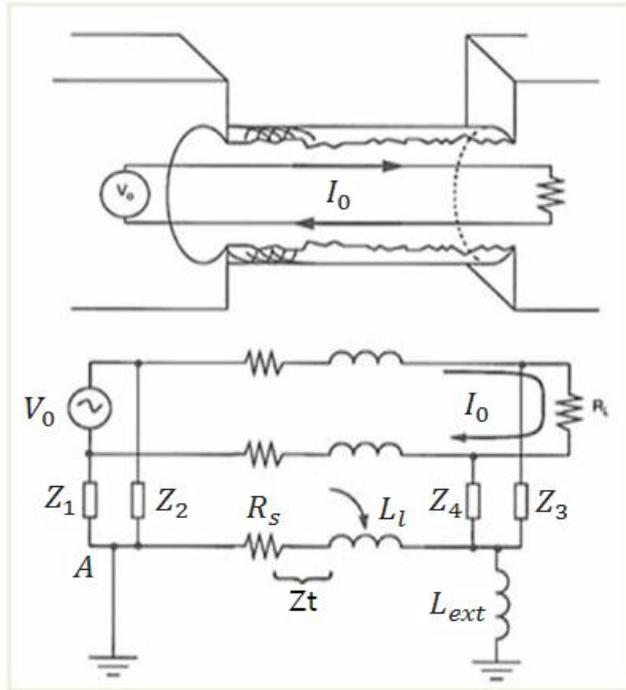


그림 6. EMI 방사 STP 등가회로, 그림 5 와 가역적 관계

#### 예제 4;

예제 3 과 같이 같은 고속 차동 신호 전송링크를 사용하는 회로에서 다음과 같은 조건이 주어 질 때 100MHz 데이터 스트림의 기본파에 대해 3m 떨어진 거리에서 전계강도를 구해보자.

-LVDS 구동방식 , 최대 차동 출력: 1000mV

-100 Ω STP , 케이블 길이=0.80m , 불평형도: 5%를 갖는 고품질 케이블

-케이블 직경= 0.5 cm

-케이블의 지표면으로부터 설치 높이= 75 cm

#### 풀이

1) 50% duty cycle 을 갖는 펄스 열에 대해 푸리에 급수를 사용하여 100MHz 기본파 전압을 구하면

$$1,000 \text{ mV} \times 2 / \pi = 640\text{mV}$$

2) 부하 정합된 수신단에서 차동 전류를 구하면

$$640\text{mV} / 100\Omega = 6.4\text{mA}$$

예제 3 에서 100MHz 에서 구한  $Z_{td}$  를 이용하여 차폐체 외부전압을 구하면

$$V_{\text{ext}} = I_d \cdot Z_{td} \times l/m = 6.4 \cdot 10^{-3} (1 \Omega / \text{m} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \times 0.8\text{m}) = 260 \cdot 10^{-6} \text{ V}$$

75cm 높이에 설치된 케이블의 특성임피던스  $Z_c$  를 구하면

$$Z_c = 60 \text{ Log}_n (4.h/d) = 60 \text{ Log}_n (4 \times 75 / 0.5) = 380\Omega$$

$V_{\text{ext}}$  에 의한 케이블 루프에 흐르는 외부 전류  $I_{\text{ext}}$  를 구하면

$$I_{\text{ext}} = V_{\text{ext}} / Z_c = 0.7 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$\text{루프면적 } A = 80 \times 75 = 6,000 \text{ cm}^2$$

예제 2 에서 3m 거리에서 방사전계를 구하면

$$E (\mu\text{V}/\text{m}) = [ 1.3 \cdot A\text{cm}^2 \cdot I_{\text{amp}} \cdot f(\text{MHz})^2 ]^{1/2}$$

$$E (\mu\text{V}/\text{m}) = 18 \mu\text{V}/\text{m}, \text{ or } 25 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$$

이 값은 FCC Class B 제한값 보다 22dB 만큼 낮다

만일 차폐체 접지처리가 예제 3 에서와 같이 꼬아서 연결하는 피그테일인 경우  $Z_{td}$  가 크게 나빠져  $380 \mu\text{V}/\text{m}$  (  $51.5 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  ) 로 FCC 제한값 보다 5 dB 넘는 값이 된다.

## VI. 특성이 우수한 이더넷 STP 에 대한 실제 측정 결과

그림 5 는 이더넷 타입의 STP 케이블 연결 시 비평형 회로에서 회로 구성 예를 보여준다. 이와 같은 비평형 회로에서 측정하는 경우에는 회로 내 기생효과가 발생하는 것을 방지하는 등 정밀한 계측기 구성조건에서 시험되어야 한다.

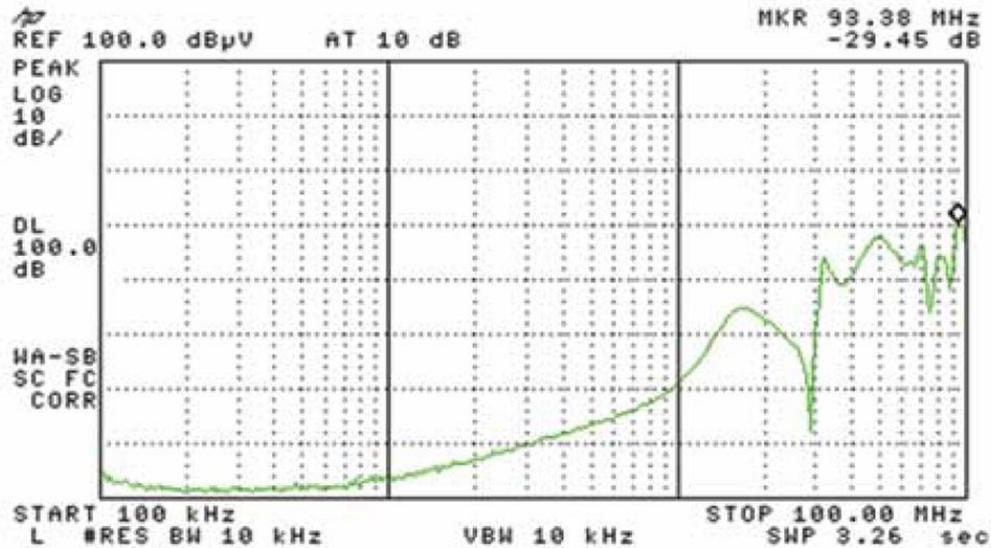


그림 7. 성능이 우수한 STP 를 사용시 측정 결과.

예를 들어, 스펙트럼 분석기 입력단자에 평형 100 Ω 출력을 비대칭 50 Ω 으로 변환하는 발룬(Balun)를 사용하여 최상의 조합에서 최소 14 dB 이상의 대칭성을 확보해야 한다. 이렇게 하여 얻어진 결과값의 불확도는 < 2 dB 이 되도록 노력해야 한다.

\* 대칭성이 30 MHz 까지 -40 dB 이상 좋아짐. 최악의 비대칭성은 100 MHz 에서 -30 dB(3%)임.

## VII. 전달 임피던스를 이용한 차폐 케이블 차폐도 연산

### 1) 차폐 케이블의 차폐도 정의

차폐 케이블에서 차폐도는 차폐하지 않은 동선에서 유도전압과 차폐한 케이블의 유도전압의 비로서 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$K_r(\text{dB}) = 20 \text{ Log}(V_d/V_{cm}) \quad (9)$$

위 식의 의미는 차폐 케이블내 신호의 모드 변환 비로 나타내 진다는 것이다.

식(1)을 약간 다르게 표현하면 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$K_r(\text{dB}) = 20 \text{ Log}(V_{d2}/V_{d1})$$

여기서  $V_{d1}$  = 차폐되지 않았을 때 수신단의 차동전압

$V_{d2}$  = 차폐시키고 양단을 접지한 상태에서 수신단의 차동전압

### 2) 케이블의 길이 $l < \lambda/2$ 일 때

여기서  $V_d$  를 전달 임피던스를 도입하여 차폐 내부도체와 차폐체간을 단락 시키고 급전단에서 측정한 전압이라 하면

$$V_d = Z_t \times l \times I_{shield} \quad \text{여기서 } l \text{ 은 차폐 케이블의 길이이다.}$$

차폐체에 흐르는 전류  $I_{shield}$  는 다음 식으로 표현된다.

$$I_{shield} = V_{cm}/Z_{loop}$$

차폐도  $K_r$  을 위에서 구한  $V_d$  값으로 치환하면 다음 식으로 표현된다.

$$K_r = \frac{Z_t \cdot l \cdot (V_{cm}/Z_{loop})}{V_{cm}} = Z_t \cdot l \cdot /Z_{loop}$$

여기서  $Z_{loop}$  는 길이의 종속함수로 차폐체의 저항과 자기 인덕턴스의 직렬 연결 값에 길이를 곱한 다음 식으로 표현된다.

$$Z_{loop}(\Omega) = (R_{sh} + j\omega L_{ext}) \cdot l$$

$R_{sh}$  = 차폐체 저항,  $L_{ext}$  = 차폐체와 접지간 자기 인덕턴스

$Z_{loop}$  을 치환하여 다시 정리하면 차폐도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_r = \frac{Z_t \cdot l}{R_{sh} + j\omega L_{ext}}$$

결국 차폐체 저항과 전달 임피던스 그리고 차폐체 연결 시 발생하는 차폐체 누설 인덕턴스  $L_t$ 로 구성되는 것이다.

따라서 차폐도는 다음과 같이 케이블 길이 함수 또는 차원식이 없는 2 가지 식으로 표현된다.

$$K_r = \frac{(R_{sh} + j\omega L_t) \cdot l}{(R_{sh} + j\omega L_{ext}) \cdot l} = \frac{R_{sh} + j\omega L_t}{R_{sh} + j\omega L_{ext}} \quad (10)$$

위 식(10)은 다시 주파수의 크기 별로 다음과 같이 표현될 수 있다.

a) 낮은 주파수(수 kHz)에서  $\omega L_t$ 항은 무시 될 수 있는 크기 이므로 주로  $R_{sh}$ 에 의해 결정된다.

$$K_r = R_{sh} / (R_{sh} + j\omega L_{ext})$$

b) 5-10kHz 대역의 중간 주파수에서 일반 편조 케이블의 경우

$$K_r = (R_{sh} + j\omega L_t) / (j\omega L_{ext})$$

차폐도는 주파수가 증가하면 개선된다.

c) 1MHz 이상 높은 주파수 대역에서  $< \lambda/2$  공진 주파수 까지

$$K_r = L_t / L_{ext}$$

케이블 길이와 주파수에 대해 독립적이다.

10kHz 에서 첫 번째  $< \lambda/2$  공진대역 대역까지 차폐도를 간단한 계산식으로 표현하면 다음 식(11)과 같다.

$$K_r \text{ (dB)} = - 20 \text{ Log } [ 1 + (6 \cdot f \text{ MHz} / Z_t \text{ (}\Omega\text{/m)}) ] \quad (11)$$

여기서  $Z_t$ 값은 계산 표를 보고 찾아 해당 주파수에서 값을 적용한다.

d) 케이블 길이가 반파장  $\lambda/2$  에 가깝거나 초과할 때 차폐도 계산;

$$K_r(\text{min}) = V_{d\text{max}} / V_{cm} = (0.7 L_t \cdot \frac{V_{cm}}{210}) / V_{cm}$$

$$K_r(\text{min}) \text{ (dB)} = - 20 \text{ Log } [ 210 / 0.7 L_t(\text{nH/m}) ] \text{ 또는 } K_r(\text{min}) \text{ (dB)} = - 20 \text{ Log } [ 300 / L_t(\text{nH/m}) ]$$