

# 활선상태에서 CV(XLPE)케이블의 부분방전 진단에 있어, 부분방전 검출 신호의 감쇠에 대한 ChatGPT의 답변 정리(1)

2024.10.11.

작성자: 김보경(olcm@olcm.co.kr)

## - ChatGPT를 접해본 개인적인 소견

그동안 CV케이블의 부분방전에 있어 신호감쇠에 대해 여러 자료를 읽고 분석/정리하여 공개 해드렸지만, 단편적인 자료들로 되어 있어 종합적으로 정리할 필요성이 있어 왔다.

또한 최근의 AI열풍도 있고 하여 ChatGPT의 성능을 알아볼겸 ChatGPT에게 CV케이블의 활선 부분방전에 대해 알아보았다.

ChatGPT에게 문의한 결과, 문의하는 내용에 따라 ChatGPT의 답변은 달랐지만,

전세계적으로 공개된 자료를 체계적으로 정리하는 면에서는 놀라웠다.

그리고 일부 기능을 수행하는 Program를 만들어 달라고 해보았는데, Software분야에서

비전문가인 내가 사용하는 데는 실행속도를 제외하고는 무리없이 잘 동작하였다.

앞으로 AI가 더욱 발전하여 AI를 활용하게 되면, 여러 분야에서 어떻게 전개될지 기대보다는 두려움이 앞선다.

## A. XLPE케이블에 있어 부분방전 크기의 감쇠 계수에 영향을 끼치는 것들 정리

XLPE (CV) 케이블의 감쇠 계수는 고주파 신호가 케이블을 통해 전파될 때 발생하는

신호 감쇠를 나타내는 중요한 지표이다.

감쇠 계수는 여러 물리적, 전기적 요소에 의해 결정되며, 다양한 요소들이 감쇠에 기여한다.

이를 이해하기 위해, 감쇠 계수에 영향을 미치는 주요 요소들을 정리하여 설명한다.

### 1. 주파수(Frequency)

- 고주파일수록 감쇠가 더 커진다.  
주파수가 높아지면 표피 효과(Skin Effect)에 의해 전류가 도체 표면에서만 흐르게 되어 도체의 유효 전도 면적이 줄어든다. 이로 인해 저항성 손실이 증가하고, 감쇠가 커지게 된다.
- 저주파(예: 1MHz 이하)에서는 신호가 도체 전체를 통해 전파되므로 감쇠가 상대적으로 적지만, 고주파(10MHz 이상)에서는 감쇠가 더 두드러지게 나타난다.

### 2. 도체 크기(Conductor Size)

- 도체 직경이 클수록 감쇠 계수는 작아진다.  
도체가 클수록 전류가 흐를 수 있는 면적이 증가하고, 저항이 감소하여 신호 손실이 줄어든다.
- 작은 도체는 저항이 높아지며, 특히 표피 효과가 더 크게 작용하여 고주파 신호에서 감쇠가 더 심해질 수 있다.
- 또한 도체의 재질(구리, 알루미늄 등)에 따른 전기전도도(Conductivity)도 도체 저항에 영향을 미치며, 구리 도체가 알루미늄 도체보다 전기적 성능이 우수하여 감쇠가 적다.

### 3. 절연 두께(Insulation Thickness)

- 절연 두께가 두꺼울수록 감쇠가 줄어든다.  
절연체의 두께가 두꺼워지면 도체와 차폐층 사이의 거리가 증가해 특성 임피던스가 변하고, 전기장의 분포가 넓어져 유전체 손실이 감소한다.
- 얇은 절연체는 전기장 강도가 커져 더 많은 에너지를 흡수하며, 그로 인해 감쇠가 커질 수 있다.
- 절연 두께가 증가하면 고주파에서의 전기적 손실이 줄어들어 감쇠 계수가 감소한다.

### 4. 차폐층 상태(Shield Condition)

- 차폐층의 상태는 감쇠에 큰 영향을 미친다.  
차폐층은 도체와 외부 간섭을 차단하는 역할을 하며, 수분, 가스, 부식 등에 의해 차폐층이 손상되면 고주파 신호의 감쇠가 크게 증가할 수 있다.
- 차폐층이 부식되거나 손상되면 전기적 보호 기능이 약해지고, 신호가 외부로 방사되거나 반사되는 현상이 발생하여 감쇠 계수가 커진다.

### 5. 도체에 흐르는 전류 크기(Current Magnitude)

- 전류 크기 자체가 감쇠 계수에 직접적인 영향을 미치지는 않지만, 전류에 의한 발열로 인해 도체 저항이 증가할 수 있다. 전류가 증가하면 발열이 발생하고, 도체의 저항이 증가하면서 감쇠가 커질 수 있다.
- 도체의 온도 상승에 따라 저항이 증가하면, 저항성 손실이 더 커져 고주파 신호에서의 감쇠가 더욱 두드러진다.

### 6. 절연체의 유전체 특성(Dielectric Properties)

- XLPE(가교 폴리에틸렌) 절연체의 전기적 특성은 감쇠에 중요한 역할을 한다.  
절연체의 유전율( $\epsilon_r$ )과 손실 탄젠트( $\tan \delta$ )는 주파수에 따라 변하며, 유전체 손실이 감쇠에 큰 영향을 미친다.
- 손실 탄젠트( $\tan \delta$ )가 커지면 유전체 내에서 전기적 손실이 증가하여, 감쇠가 커진다. 온도나 습도 변화에 따라 절연체의 유전율과 손실 탄젠트가 변할 수 있다.

### 7. 케이블의 길이(Cable Length)

- 케이블이 길어질수록 감쇠는 증가한다.  
케이블의 길이가 길어지면 신호가 전파되는 동안 손실되는 에너지가 많아지므로, 전체 감쇠 계수가 커지게 된다.
- 긴 케이블에서는 신호 감쇠가 누적되어 신호 세기가 크게 줄어들 수 있다.

### 8. 수분이나 오염 물질의 침투(Water or Contaminants Intrusion)

- 수분이나 가스, 오염 물질이 절연체에 침투하면 유전체 손실이 급격히 증가하여 감쇠 계수가 커진다.
- 특히 수분은 절연체의 유전율과 전기적 성능을 악화시키며, 전기장 흡수로 인해 에너지 손실이 커진다. 이는 고주파 신호에서 감쇠를 심화시키는 주요 원인이다.

### 9. 고주파 전파 특성(High-Frequency Signal Propagation)

- 고주파 신호는 케이블 내부에서 전파될 때 반사와 흡수 등의 손실을 겪습니다.  
케이블 내의 비균일성(예: 접속부, 절연층 내의 기포 등)은 신호 반사를 유도하여 감쇠를 증가시킬 수 있다.

- 케이블의 내부 구조가 고주파 전파에 적합하지 않으면, 신호의 산란과 반사로 인해 감쇠 계수가 커질 수 있다.

**정리: XLPE 케이블의 감쇠 계수에 영향을 주는 주요 요소 요약**

요 소	감쇠에 미치는 영향
주파수 (Frequency)	고주파일수록 감쇠가 커짐 (표피 효과로 인해 도체 저항이 증가)
도체 크기 (Conductor Size)	도체 직경이 클수록 감쇠 계수가 감소 (저항이 낮아지고 손실이 적어짐)
절연 두께 (Insulation Thickness)	절연 두께가 두꺼울수록 감쇠 계수가 감소 (전기장 분포가 넓어져 유전체 손실이 줄어듦)
차폐층 상태 (Shield Condition)	차폐층이 손상되거나 부식되면 감쇠가 증가 (외부 간섭 및 신호 방사 증가)
전류 크기 (Current Magnitude)	전류가 증가하면 발열로 인해 도체 저항이 증가, 그로 인해 감쇠 계수도 증가
유전체 특성 (Dielectric Properties)	유전율( $\epsilon_r$ ) 및 손실 탄젠트( $\tan \delta$ )가 커지면 유전체 손실이 증가하여 감쇠 계수가 커짐
케이블 길이 (Cable Length)	케이블이 길어질수록 감쇠가 커짐 (전파 거리가 길어지며 손실이 누적됨)
수분 및 오염 물질 (Water/Contaminants)	절연체 내로 수분이나 오염 물질이 침투하면 유전체 손실이 급격히 증가하여 감쇠가 커짐
고주파 전파 특성 (HF Signal Propagation)	케이블 내 비균일성(접속부, 절연체 기포 등)에 의해 반사나 흡수가 발생하여 감쇠 계수가 증가할 수 있음

**결론**

XLPE 케이블에서 감쇠 계수는 다양한 요소들에 의해 영향을 받는다.

주파수, 도체 크기, 절연 두께와 같은 물리적 요소들이 주요하게 작용하며,

차폐층의 상태, 도체에 흐르는 전류, 유전체 특성 등도 감쇠에 중요한 역할을 한다.

이들 요소들이 상호작용하여 케이블 내에서 고주파 신호가 전파될 때의 에너지 손실을 결정하게 된다.

## B. XLPE 케이블의 감쇠 계수에 영향을 주는 주요 요소들의 영향 정도.

XLPE 케이블의 감쇠 계수에 영향을 주는 주요 요소들은 각기 다른 방식으로 감쇠에 영향을 미친다. 일부 요소들은 **비례** 관계를 가지며, 다른 요소들은 **반비례**하거나 **지수** 또는 **로그 함수**로 영향을 미칠 수 있다.

이를 정확히 이해하기 위해 각 요소가 감쇠 계수에 어떻게 영향을 주는지 설명한다.

### 1. 주파수(Frequency)

- **지수 함수적 비례 관계:** 감쇠 계수는 주파수와 **지수 함수적으로 비례**한다.

특히, 고주파 신호일수록 **표피 효과**가 심해져, 전류가 도체 표면에서만 흐르게 된다. 이는 주파수에 따라 전류가 흐르는 경로가 점차 좁아지며, 저항이 증가하여 감쇠 계수도 크게 증가하게 된다.

감쇠 계수  $\alpha$ 와 주파수  $f$ 의 관계는 일반적으로 다음과 같은 **근사적인 지수 함수**로 표현된다:

$$\alpha(f) \propto f^{0.5}$$

이 관계는 표피 깊이  $\delta$ 가 주파수의 제곱근에 반비례하기 때문에 나타난다.

### 2. 도체 크기(Conductor Size)

- **반비례 관계:** 도체 직경이 클수록 감쇠 계수는 **반비례**한다.

도체가 클수록 전류가 흐를 수 있는 면적이 넓어져 **저항이 줄어들고**, 그 결과 신호 감쇠도 감소한다.

도체 직경  $d$ 와 감쇠 계수  $\alpha$ 는 **반비례** 관계를 가지며, 다음과 같은 관계로 표현됨.

$$\alpha(d) \propto \frac{1}{d}$$

### 3. 절연 두께(Insulation Thickness)

- **반비례 관계:** 절연 두께가 두꺼울수록 감쇠 계수는 **줄어듭니다**.

이는 절연체가 전기장을 더 넓게 분포시켜 **유전체 손실**을 줄이기 때문이다.

두꺼운 절연체는 도체와 차폐층 사이의 거리를 증가시키며,

이는 케이블의 **특성 임피던스**에 영향을 주어 고주파 신호의 손실을 줄인다.

절연 두께  $t$ 와 감쇠 계수  $\alpha$ 는 다음과 같이 **반비례** 관계로 나타난다:

$$\alpha(t) \propto \frac{1}{t}$$

#### 4. 차폐층 상태(Shield Condition)

- **반비례 관계:** 차폐층이 부식되거나 손상되면, 감쇠 계수는 증가한다.  
차폐층이 손상되지 않을수록(차폐 상태가 좋을수록) 신호 감쇠는 적게 발생하므로, 차폐 상태와 감쇠 계수는 반비례 관계를 가진다.  
손상되지 않은 차폐층에서의 신호 보호 성능을  $C_s$ 라고 할 때,  
감쇠 계수  $\alpha$ 는 다음과 같은 반비례 관계를 가진다:

$$\alpha(C_s) \propto \frac{1}{C_s}$$

#### 5. 도체에 흐르는 전류 크기(Current Magnitude)

- **전류에 의한 도체 온도 상승은 지수 함수적 증가:** 도체에 흐르는 전류가 커지면, 도체의 저항이 발열로 인해 지수 함수적으로 증가한다.  
저항이 증가하면, 저항성 손실이 커지고, 이로 인해 감쇠 계수도 증가한다.  
즉, 전류에 따른 발열로 인한 도체 저항은 지수 함수적으로 증가하며,  
이로 인해 감쇠 계수도 지수 함수적으로 증가할 수 있다.  
도체 저항은 온도에 따라 지수 함수적으로 증가하며,  
감쇠 계수는 발열에 의한 저항 변화에 비례하여 증가할 수 있다:

$$\alpha(T) \propto e^{\beta T}$$

여기서  $T$ 는 도체 온도,  $\beta$ 는 온도에 따른 저항 증가율이다.

#### 6. 유전체 손실(Dielectric Losses)

- **비례 관계:** 유전체 손실(Dielectric loss)은 감쇠 계수와 비례한다.  
유전체 손실 탄젠트( $\tan \delta$ )는 절연체의 손실을 나타내며, 손실 탄젠트가 커질수록 유전체에 의한 감쇠가 커진다.  
즉, 절연체의 유전율이나 손실 탄젠트가 커지면 감쇠 계수도 비례하여 증가한다.  
유전체 손실 탄젠트  $\tan \delta$ 와 감쇠 계수  $\alpha$ 의 관계는 다음과 같이 비례 관계로 표현된다.

$$\alpha \propto \tan \delta$$

## 7. 케이블 길이(Cable Length)

- **선형 비례 관계:** 케이블의 길이가 길어지면 **선형적으로** 감쇠 계수가 증가한다.  
신호가 케이블을 전파하는 동안 거리가 길어질수록 에너지가 소모되며, 손실이 누적된다. 따라서 길이가 두 배가 되면 감쇠 계수도 두 배로 증가한다.  
케이블 길이  $L$ 과 감쇠 계수  $\alpha$ 의 관계는 다음과 같이 **선형 비례** 관계로 나타난다:

$$\alpha(L) \propto L$$

## 8. 수분 및 오염 물질(Water or Contaminants Intrusion)

- **비례 관계:** 수분이나 오염 물질이 절연체에 침투하면 감쇠 계수는 **비례하여** 증가.  
수분은 절연체의 전기적 특성을 변화시키고, 유전체 손실을 증가시킨다. 특히 수분은 전기장을 흡수하고 전도성을 증가시켜 에너지 손실을 크게 만든다.  
수분 침투 정도  $W$ 와 감쇠 계수  $\alpha$ 는 다음과 같은 **비례 관계**로 나타낼 수 있다:

$$\alpha(W) \propto W$$

---

### 요소별 감쇠 계수와의 관계 요약

요 소	감쇠 계수와의 관계
주파수(Frequency)	지수 함수적 비례 ( $\alpha \propto f^{0.5}$ )
도체 크기(Conductor Size)	반비례 ( $\alpha \propto \frac{1}{d}$ )
절연 두께(Insulation Thickness)	반비례 ( $\alpha \propto \frac{1}{t}$ )
차폐층 상태(Shield Condition)	반비례 ( $\alpha \propto \frac{1}{C_s}$ )
도체에 흐르는 전류 크기(Current)	지수 함수적 비례 ( $\alpha \propto e^{\beta T}$ )
유전체 손실(Dielectric Loss)	비례 ( $\alpha \propto \tan \delta$ )
케이블 길이(Cable Length)	선형 비례 ( $\alpha \propto L$ )
수분 및 오염 물질(Water Contaminants)	비례 ( $\alpha \propto W$ )

---

### 결론

XLPE 케이블의 감쇠 계수는 다양한 요소에 의해 영향을 받으며, 각 요소는 **비례**하거나 **반비례**, **지수 함수적**, **로그 함수적** 관계를 가질 수 있다. 주파수, 도체 크기, 절연 두께, 차폐 상태, 전류 크기 등은 각각 서로 다른 방식으로 감쇠 계수에 영향을 미치며, 이러한 관계를 이해함으로써 XLPE 케이블의 신호 전파 특성과 손실을 효과적으로 분석할 수 있다.

### C. HFCT센서에 검출되는 신호크기에 대한 정리

XLPE 케이블에서 HFCT(Hybrid Frequency Current Transformer) 센서는 부분방전(PD) 신호와 같은 고주파 신호를 검출하는 데 사용된다. 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT 센서에서 검출되는 신호의 크기는 감쇠 계수에 의해 영향을 받는다.

감쇠 계수는 신호 전파 과정에서의 손실을 나타내며, 주파수, 도체 크기, 절연 두께,

차폐층 상태, 전류 크기, 케이블 길이와 같은 다양한 요소들에 따라 달라진다.

아래는 주어진 요소들이 HFCT 센서에 검출되는 신호 크기에 어떻게 영향을 미치는지를

감쇠 계수와와의 관계를 바탕으로 설명한 표이다.

HFCT 센서에 검출되는 신호 크기에 영향을 미치는 요소별 표

요소	HFCT 센서 신호 크기에 미치는 영향	감쇠계수와의 관계	설명
주파수 (Frequency)	고주파수일수록 신호 크기가 더 작아짐	지수 함수적 비례 ( $\alpha \propto f^{0.5}$ )	주파수가 높아질수록 감쇠가 커져 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 감소함. 고주파(10MHz 이상)에서는 표피 효과로 인해 신호가 급격히 감쇠됨.
도체 크기 (Conductor Size)	도체가 클수록 HFCT에 도달하는 신호 크기가 큼	반비례 ( $\alpha \propto \frac{1}{d}$ )	도체가 클수록 전류 흐름 면적이 넓어 저항이 줄어듦. 따라서 신호 감쇠가 감소하여 HFCT에 더 큰 신호가 도달함. 작은 도체는 저항이 높아 신호 감쇠가 큼.
절연 두께 (Insulation Thickness)	절연 두께가 두꺼울수록 HFCT에 도달하는 신호 크기가 큼	반비례' ( $\alpha \propto \frac{1}{t}$ )	절연 두께가 두꺼워질수록 전기장이 더 균일하게 분포하고 유전체 손실이 줄어들어 감쇠가 감소함. 그 결과 HFCT에 도달하는 신호 크기가 커짐.
차폐층 상태 (Shield Condition)	차폐층 손상 시 신호 크기 감소, 노이즈 증가	반비례 ( $\alpha \propto \frac{1}{\sigma_s}$ )	차폐층이 부식되거나 손상되면 고주파 신호가 더 많이 감쇠됨. HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 감소하고 외부 간섭에 의한 노이즈가 증가할 수 있음.
도체에 흐르는 전류 크기 (Current)	전류가 클수록 발열에 의해 HFCT에 도달하는 신호 크기 감소	지수 함수적 비례 ( $\alpha \propto e^{\beta T}$ )	전류가 커지면 발열로 인해 도체의 저항이 증가함. 이로 인해 신호 감쇠가 커져 HFCT에 도달하는 신호 크기가 감소함.
유전체 손실 (Dielectric Losses)	유전체 손실이 클수록 신호 크기 감소	비례 ( $\alpha \propto \tan \delta$ )	유전체 손실 탄젠트( $\tan \delta$ )가 클수록 절연체 내부에서 전기적 손실이 커지고, 신호 감쇠가 더 커져 HFCT에 도달하는 신호 크기가 감소함.
케이블 길이 (Cable Length)	길이가 길수록 HFCT에 도달하는 신호 크기가 작아짐	선형 비례 ( $\alpha \propto L$ )	케이블 길이가 길어질수록 신호가 전파되면서 감쇠가 누적됨. 따라서 HFCT에 도달하는 신호 크기는 거리에 비례하여 작아짐.
수분 및 오염 물질 (Water/Contaminants)	수분/오염이 많을수록 HFCT에 도달하는 신호 크기 감소	비례 ( $\alpha \propto W$ )	수분이나 오염 물질이 케이블 절연체에 침투하면 유전체 손실이 증가하고, 감쇠가 커져 HFCT에 도달하는 신호 크기가 감소함. 특히 고습 환경에서 감쇠가 증가함.

## HFCT 센서에 검출되는 신호 크기에 대한 주요 설명 요약

### 1. 주파수의 영향

고주파수(10MHz 이상)에서는 신호가 도체 표면에서만 흐르는 **표피 효과**로 인해 신호 감쇠가 급격히 증가한다. 주파수가 높아질수록 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 **지수적으로 감소**하며, 검출 신호는 작아짐.

### 2. 도체 크기의 영향

도체 직경이 **클수록** 전류가 흐르는 면적이 넓어져 **저항성 손실**이 줄어든다. 도체가 크면 신호의 감쇠가 줄어들어 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 커진다. 반대로 작은 도체는 감쇠가 크기 때문에 HFCT에 검출되는 신호 크기도 작아짐.

### 3. 절연 두께의 영향

절연체가 두꺼울수록 **전기장 분포가 균일**해지고, 유전체 손실이 줄어들어 감쇠가 적어진다. 두꺼운 절연체를 가진 케이블일 수록 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT에 도달하는 신호 크기가 커지며, 더 정확한 신호 검출이 가능하다.

### 4. 차폐층 상태의 영향

차폐층이 손상되면 외부에서 유입되는 전자기 간섭(EMI)이 커지고, 신호가 감쇠되어 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT 센서에서 검출되는 신호 크기가 줄어든다. 또한 차폐층이 손상된 경우 **노이즈**가 증가하여 검출 신호의 **신뢰성**이 떨어질 수 있다.

### 5. 전류 크기의 영향

전류가 증가할수록 **발열**로 인해 도체의 저항이 증가한다. 발열은 감쇠 계수를 증가시키며, 결과적으로 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기를 감소시킨다. 전류가 클수록 감쇠는 **지수적으로 증가**할 수 있다.

### 6. 유전체 손실의 영향

절연체의 손실 **탄젠트( $\tan \delta$ )** 값이 커질수록 감쇠가 커지고, 신호가 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT에 도달하기 전에 손실된다. 유전체 손실이 큰 절연체에서는 HFCT에서 검출되는 신호 크기가 줄어든다.

### 7. 케이블 길이의 영향

케이블이 길어질수록 신호가 전파되는 동안 감쇠가 **누적**되어, HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 **선형적으로 감소**한다. 긴 케이블일수록 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT에 도달하는 신호는 작아지며, 검출 민감도가 떨어진다.

### 8. 수분 및 오염 물질의 영향

**수분**이나 **오염 물질**이 절연체에 침투하면, 유전체 손실이 급격히 증가하여 감쇠 계수도 증가하게 된다. 수분이 많은 환경에서는 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 더 작아지고, 신호 품질이 저하될 수 있다.

---

## 정리 및 결론

HFCT 센서에서 검출되는 신호 크기는 **감쇠 계수**에 의해 크게 좌우된다.

**주파수, 도체 크기, 절연 두께, 차폐 상태, 전류 크기, 케이블 길이** 등의 다양한 요소들이 감쇠 계수에 영향을 미치며, 이들 요소에 따라 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 달라진다. 주요한 요소들을 적절히 고려하여 감쇠를 최소화하고 HFCT 센서에서 정확하고 신뢰성 있는 신호 검출을 할 수 있다.

## D. HFCT센서에서 검출되는 감쇠된 신호 크기(P1)를 부분방전 발생위치에서의 초기 신호 크기(P0)에 대한 함수식 정리.

송출측 시스접지선에 설치한 HFCT 센서에 검출되는 신호 크기는 초기 신호 크기에 다양한 요소가 미치는 영향을 반영한 감쇠 계수와 관련이 있다.

아래는 각 요소가 HFCT 센서에서 검출되는 신호 크기에 미치는 영향을 함수식으로 정리한 내용이다.

이 함수식들은 포설되어 운용중인 XLPE케이블의 임의 부분에서 부분방전이 발생하고, 부분방전 발생위치에서 발생한 초기 신호 크기(P<sub>0</sub>)와 송출측 시스접지선에 설치한 HFCT에서 감쇠되어 검출되는 신호 크기(P<sub>1</sub>)의 관계를 나타낸다.

HFCT 센서에서 검출되는 감쇠된 신호 크기 P1

$$P_1 = P_0 \times e^{-\alpha \times L}$$

여기서:

- P<sub>0</sub>: 초기 신호 크기 (부분방전 신호 등)
- P<sub>1</sub>: 감쇠된 후 HFCT 센서에서 검출된 신호 크기
- α: 각 요소에 따른 감쇠 계수
- L: 케이블 길이 (케이블 내에서 신호가 전파된 거리, 즉 HFCT와 PD발생위치간 거리)

### 1. 주파수(Frequency)의 영향

HFCT 센서에서 검출되는 신호 크기는 검출 주파수 f에 따라 지수 함수적으로 감쇠된다.

주파수가 높아질수록 신호는 빠르게 감쇠된다.

$$P_1(f) = P_0 \times e^{-\alpha(f) \times L}, \quad \alpha(f) \propto f^{0.5}$$

- α(f): 검출 주파수에 따른 감쇠 계수는 주파수 f의 제곱근에 비례.
- 결론: 검출 주파수가 높아질수록 신호는 더 빠르게 감쇠되어 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기는 작아진다.

### 2. 도체 크기(Conductor Size)의 영향

도체 직경이 클수록 신호 감쇠가 적다. 따라서 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기는 도체 직경에 반비례한다.

$$P_1(d) = P_0 \times e^{-\alpha(d) \times L}, \quad \alpha(d) \propto \frac{1}{d}$$

- α(d): 도체 직경 d 반비례하는 감쇠 계수.
- 결론: 도체가 클수록 감쇠가 적어 HFCT에서 더 큰 신호가 검출된다.

### 3. 절연 두께(Insulation Thickness)의 영향

절연 두께가 두꺼울수록 유전체 손실이 줄어들어 신호 감쇠가 적다. 이는 절연 두께에 반비례한다.

$$P_1(t) = P_0 \times e^{-\alpha(t) \times L}, \quad \alpha(t) \propto \frac{1}{t}$$

- $\alpha(t)$ : 절연 두께  $t$ 에 반비례하는 감쇠 계수.
- **결론**: 절연 두께가 두꺼울수록 신호 감쇠가 줄어들고 HFCT에 더 큰 신호가 검출.

### 4. 차폐층 상태(Shield Condition)의 영향

차폐층이 손상되면 감쇠가 커진다. 차폐 상태가 좋을수록 감쇠가 적고, 이는 차폐 상태에 반비례한다.

$$P_1(C_s) = P_0 \times e^{-\alpha(C_s) \times L}, \quad \alpha(C_s) \propto \frac{1}{C_s}$$

- $\alpha(C_s)$ : 차폐 상태  $C_s$ 에 반비례하는 감쇠 계수.
- **결론**: 차폐층이 손상되지 않았을 때 더 큰 신호가 HFCT에 도달한다.

### 5. 전류 크기(Current)의 영향

케이블에 흐르는 전류가 커질수록 발열로 인해 도체 저항이 증가하고, 신호 감쇠가 지수적으로 증가한다.

$$P_1(I) = P_0 \times e^{-\alpha(T) \times L}, \quad \alpha(T) \propto e^{\beta T}$$

- $\alpha(T)$ : 발열에 따른 도체 저항의 증가에 따라 지수 함수적으로 감쇠 계수가 커진다.
- **결론**: 케이블에 흐르는 전류가 커질수록 감쇠가 지수적으로 증가하여 HFCT에서 검출되는 신호 크기는 감소한다.

### 6. 유전체 손실(Dielectric Losses)의 영향

유전체 손실이 클수록 감쇠가 커지며, 감쇠 계수는 유전체 손실 탄젠트  $\tan\delta$ 에 비례한다.

$$P_1(\tan \delta) = P_0 \times e^{-\alpha(\tan \delta) \times L}, \quad \alpha(\tan \delta) \propto \tan \delta$$

- $\alpha(\tan\delta)$ : 유전체 손실 탄젠트  $\tan\delta$ 에 비례하는 감쇠 계수.
- **결론**: 유전체 손실이 클수록 감쇠가 커지며, HFCT에서 검출되는 신호 크기는 작아짐

## 7. 케이블 길이(Cable Length)의 영향

케이블이 길어질수록 신호가 전파되는 동안 감쇠가 누적되며, 이는 선형 비례한다.

$$P_1(L) = P_0 \times e^{-\alpha(L) \times L}, \quad \alpha(L) \propto L$$

- $\alpha(L)$ : 케이블 길이 L에 선형 비례하는 감쇠 계수.
- 결론: 케이블 길이가 길수록 HFCT에 도달하는 신호 크기가 선형적으로 감소한다.

## 8. 수분 및 오염 물질(Water/Contaminants)의 영향

수분이나 오염 물질이 많을수록 유전체 손실이 커지고, 감쇠 계수도 커진다.

이는 비례 관계이다.

$$P_1(W) = P_0 \times e^{-\alpha(W) \times L}, \quad \alpha(W) \propto W$$

- $\alpha(W)$ : 수분이나 오염 물질 W의 양에 비례하는 감쇠 계수.
- 결론: 수분이 많을수록 감쇠가 커져 HFCT에 도달하는 신호 크기가 작아진다.

### 신호 감쇠 함수식 종합정리

여러 요소들이 동시에 작용할 때, HFCT 센서에 도달하는 신호 크기는 각 감쇠 요소들의 합을 통해 결정된다. 아래 식은 위에서 설명한 각 요소들의 감쇠 계수가 종합적으로 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기에 미치는 영향을 설명한다.

$$P_1 = P_0 \times e^{-(\alpha f + \alpha d + \alpha t + \alpha C_s + \alpha I + \alpha \tan \delta + \alpha W) \times L}$$

여기서:

- $P_1$  : HFCT센서에서 검출되는 PD신호크기
- $P_0$  : 부분방전이 발생한 PD신호크기
- $\alpha f$ : 주파수에 따른 감쇠 계수
- $\alpha d$ : 도체 크기에 따른 감쇠 계수
- $\alpha t$ : 절연 두께에 따른 감쇠 계수
- $\alpha C_s$ : 차폐층 상태에 따른 감쇠 계수
- $\alpha I$ : 전류에 따른 발열 감쇠 계수
- $\alpha \tan \delta$ : 유전체 손실에 따른 감쇠 계수
- $\alpha W$ : 수분 및 오염 물질에 따른 감쇠 계수
- L: 신호 전파 거리 (케이블 길이, 즉 HFCT센서와 PD발생위치간 거리)

## E. HFCT센서에 도달하는 신호 크기가 가장 많이 감소하는 순서로 정리

HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 감소하는 요소들을 고려할 때, 각 요소가 미치는 영향의 정도는 신호 전파 과정에서 어떻게 감쇠가 발생하는지에 따라 달라진다.

신호 크기를 가장 많이 감소시키는 요소들은 주파수, 케이블 길이, 유전체 손실 등 고주파 신호에 민감한 요소들이다. 이러한 요소들을 가장 영향을 많이 미치는 순서대로 정리하면 다음과 같다.

### HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 가장 많이 감소하는 요소 순서

(가장 큰 영향 → 작은 영향 순서)

#### 1. 주파수(Frequency)

- **가장 큰 영향:** 주파수가 높아질수록 감쇠 계수는 지수 함수적으로 증가한다. 표피 효과(Skin Effect)로 인해 고주파수에서 신호가 급격히 감쇠되므로, 주파수는 신호 감소에 가장 큰 영향을 미친다.
- 주파수에 따른 신호 감소는 지수 함수적 비례이므로, 고주파수에서 HFCT에 도달하는 신호 크기가 매우 작아진다.
- 예를 들어, 50MHz에서 신호는 10MHz보다 훨씬 더 빠르게 감쇠한다.

$$P_1(f) = P_0 \times e^{-\alpha(f) \times L}, \quad \alpha(f) \propto f^{0.5}$$

#### 2. 케이블 길이(Cable Length)

- **두 번째로 큰 영향:** 케이블이 길어질수록 신호가 전파되는 동안 감쇠가 선형적으로 누적된다. 케이블 길이가 길수록 신호가 도달하는 시간이 길어지고, 신호 손실이 커지기 때문에 감쇠는 누적된다.
- 케이블이 길어지면 HFCT에 도달하는 신호는 선형적으로 감소한다.

$$P_1(L) = P_0 \times e^{-\alpha(L) \times L}, \quad \alpha(L) \propto L$$

#### 3. 유전체 손실(Dielectric Losses)

- **세 번째로 큰 영향:** 유전체 손실 탄젠트( $\tan \delta$ )는 절연체의 손실을 나타내며, 유전체 손실이 클수록 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기는 줄어든다. 유전체 손실은 주로 절연체의 전기적 특성에 의존하며, 특히 수분이나 오염이 있는 경우 유전체 손실이 증가한다.
- 유전체 손실은 신호 감소에 비례 관계로 작용한다.

$$P_1(\tan \delta) = P_0 \times e^{-\alpha(\tan \delta) \times L}, \quad \alpha(\tan \delta) \propto \tan \delta$$

#### 4. 차폐층 상태(Shield Condition)

- 네 번째로 큰 영향: 차폐층이 손상되거나 부식되면 신호 감쇠가 크게 증가한다. 차폐층이 손상되면 외부 간섭에 의해 신호가 흡수되거나 반사되므로, 신호 감쇠가 더 심해진다.
- 차폐 상태가 좋을수록 감쇠가 줄어들며, 손상된 경우 노이즈가 증가해 신호 크기가 더 작아진다.

$$P_1(C_s) = P_0 \times e^{-\alpha(C_s) \times L}, \quad \alpha(C_s) \propto \frac{1}{C_s}$$

#### 5. 전류 크기(Current Magnitude)

- 다섯 번째로 큰 영향: 도체에 흐르는 전류가 클수록 도체에서 발생하는 발열로 인해 도체 저항이 증가하고, 이로 인해 신호 감쇠가 증가한다. 전류가 클수록 감쇠 계수는 지수 함수적으로 증가할 수 있다.
- 도체에 흐르는 전류가 많이 흐르면 발열이 심해져 도체 저항이 커지고, 그로 인해 HFCT에서 검출되는 신호가 감소한다.

$$P_1(I) = P_0 \times e^{-\alpha(I) \times L}, \quad \alpha(I) \propto e^{\beta I}$$

#### 6. 도체 크기(Conductor Size)

- 여섯 번째로 큰 영향: 도체 직경이 클수록 신호 감쇠는 적다. 도체가 클수록 저항이 줄어들고 신호 손실이 적어 HFCT 센서에 도달하는 신호 크기가 커진다.
- 작은 도체는 신호 감쇠가 더 크기 때문에 HFCT에 도달하는 신호 크기도 작아진다.

$$P_1(d) = P_0 \times e^{-\alpha(d) \times L}, \quad \alpha(d) \propto \frac{1}{d}$$

#### 7. 절연 두께(Insulation Thickness)

- 일곱 번째로 큰 영향: 절연 두께가 두꺼울수록 유전체 손실이 줄어들어 신호 감쇠가 적다. 절연 두께는 HFCT에 도달하는 신호 크기에 영향을 미치지만, 다른 요소에 비해 상대적으로 적은 영향을 준다.
- 두꺼운 절연체를 가진 케이블은 전기장이 균일하게 분포되어 감쇠가 줄어든다.

$$P_1(t) = P_0 \times e^{-\alpha(t) \times L}, \quad \alpha(t) \propto \frac{1}{t}$$

## 8. 수분 및 오염 물질(Water or Contaminants)

- **가장 작은 영향:** 수분이나 오염 물질이 절연체에 침투하면 감쇠가 증가하지만, 이는 주로 **유전체 손실**을 통해 신호 감소에 영향을 준다. 수분이 침투된 절연체는 감쇠 계수를 증가시키며 HFCT에 도달하는 신호 크기를 감소시키지만, 다른 요소들에 비해 상대적으로 작게 영향을 미친다.

$$P_1(W) = P_0 \times e^{-\alpha(W) \times L}, \quad \alpha(W) \propto W$$

---

### HFCT 센서 신호 크기 감소에 영향을 주는 요소 정리 (가장 큰 영향 → 가장 작은 영향)

1. 주파수(Frequency): 고주파수일수록 신호가 가장 많이 감소.
2. 케이블 길이(Cable Length): 케이블이 길수록 감쇠가 선형적으로 증가.
3. 유전체 손실(Dielectric Losses): 유전체 손실이 클수록 감쇠가 증가.
4. 차폐층 상태(Shield Condition): 차폐층이 손상되면 신호 감소.
5. 전류 크기(Current Magnitude): 전류가 클수록 발열로 인해 감쇠가 증가.
6. 도체 크기(Conductor Size): 작은 도체에서 신호 감쇠가 더 크게 발생.
7. 절연 두께(Insulation Thickness): 두꺼운 절연체일수록 신호 감쇠가 적음.
8. 수분 및 오염 물질(Water or Contaminants): 수분이나 오염이 있을 때 신호가 감소하지만 영향은 상대적으로 적음.

### 결론

HFCT 센서에서 신호 크기 감소에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 **주파수**와 **케이블 길이**이다.

이 두 가지 요소는 신호 감쇠를 크게 증가시켜, HFCT 센서에 도달하는 신호 크기를 급격히 줄여준다.

**유전체 손실**과 **차폐층 상태**도 중요한 영향을 미치며, **전류 크기**와 **도체 크기**, **절연 두께**는 상대적으로 덜하지만 여전히 신호 감소에 영향을 준다.

**수분 및 오염 물질**은 가장 적은 영향을 미치는 요소 중 하나이다.