

# 전력케이블에 있어 부분방전PD신호 전파특성(3) PD Pulse 신호변형관련 국내외 자료 검토

2014년 12월 29일  
2015년 8월 3일 1차 보완

검토자: 김보경

① <출전: Partial Discharge XXII: High Frequency Attenuation in Shielded Solid Dielectric Power Cable and Implications Thereof for PD location, STEVEN BOGGS, IEEE Electrical Insulation Magazine, 1996년1월 Vol. 12, No. 1>

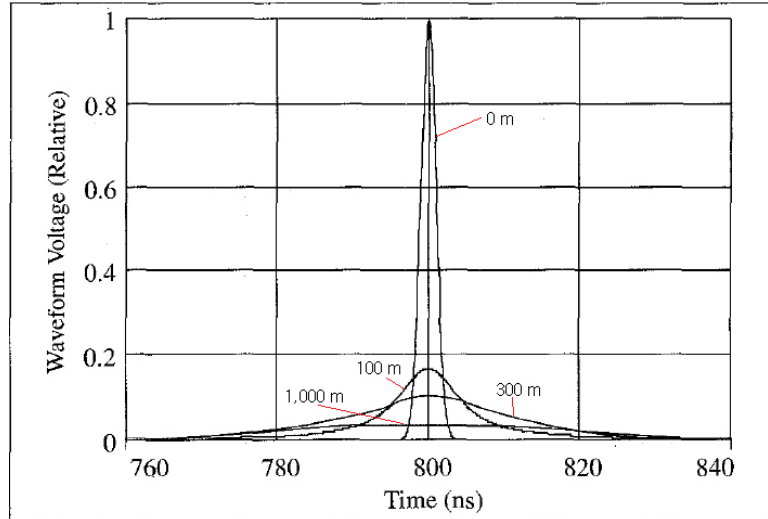


Fig. 4 PD waveforms as a function of distance propagated through a cable with frequency dependent attenuation corresponding to Fig 3. The distances propagated are 0, 100, 300, and 1000 m

- 검토의견:** 1) 1996년도 1월에 IEEE협회지에 발표된 자료이고, 공동저자로 Hipotronics, Robins Instruments사가 있음.
- 2) 그림에서 보면 PD발생지점(0m)에서 펄스폭이 약5ns이고 PD크기가 1.0이라는 부분방전(PD)발생시에, PD발생지점으로부터 PD신호가 전파되어 100m지점에서는 펄스폭이 약 15ns, PD크기는 약0.15정도로 검출될 수 있고, PD발생지점으로 부터 300m지점에서는 펄스폭이 약30ns, PD크기는 약 0.1정도 검출될 수 있을 것으로 추정될 수 있는 것으로 보여주고 있다.  
**PD발생지점으로 거리가 떨어질 수록, PD Pulse펄스폭이 증가, PD Pulse크기는 감소**
- 3) 한편, 상기 그림에서 100m이상의 경우를 보면 PD Pulse의 p-p치가 원래 PD신호보다 매우 감소되어져 PD검출센서로 입력되고, 또한 주변의 다른 Noise신호와 다른 설비에 의해 나타나는 고주파신호와 향후 검토할 PD신호의 반사파형까지 함께 PD검출센서에 입력되어질 것인데, 100m이상 떨어진 곳에서 발생한 진짜의 케이블 PD신호를 ????? 그리고, 진짜의 PD 파형을 알아야 최근 PD신호의 감쇠문제점을 보완하기 적용하고 있는 방법중 하나인 검출된 PD파형의 면적을 계산하여 PD발생크기를 추정하는 방법을 사용할 수 있을 것이다.  
(감쇠량이 작아 검출되어지는 PD신호의 Level이 다른 고주파신호의 파형들에 비해 Level이 크면 주파수분석하고, 면적계산하고 등등의 방법을 사용하면 가능하겠지만...)
- 4) 외국에서는 **약20여년전에** 케이블의 PD측정시의 PD Pulse의 감쇠 때문에, PD발생 지점으로부터 멀리 떨어진 장소에 PD검출센서를 설치시의 문제점을 어느 정도 파악.

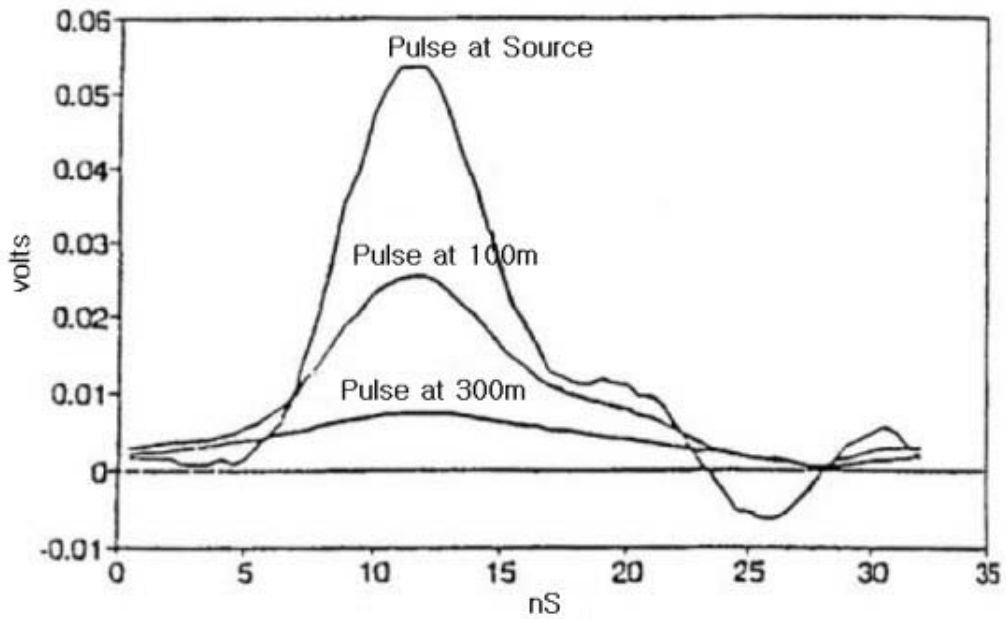


Fig1. Attenuation and dispersion of a pulse as it travels along a cross-linked polyethylene power cable of different lengths.

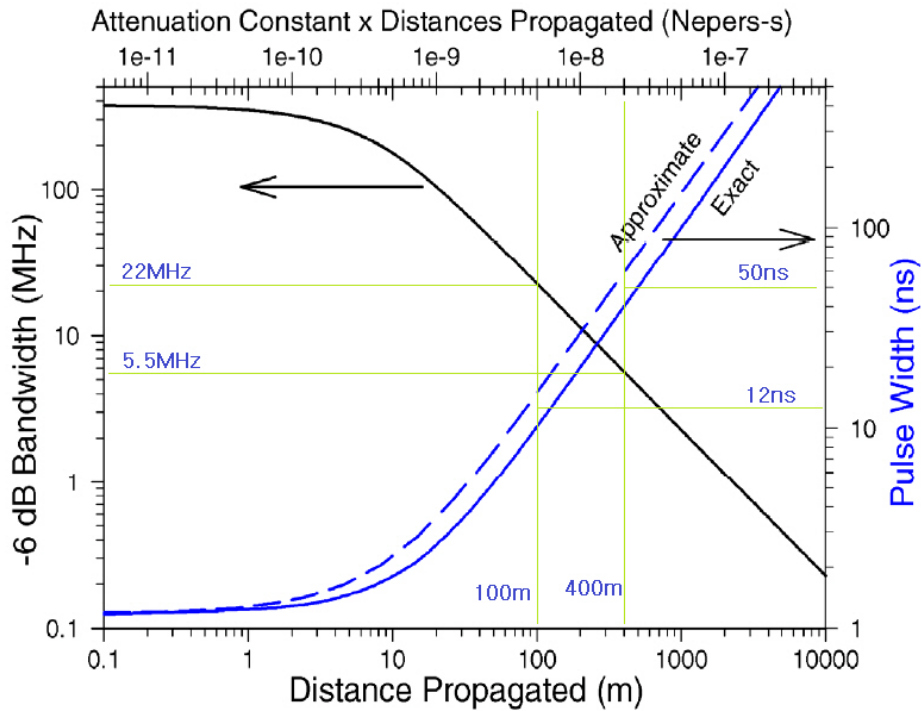
**검토의견:** 1) 2006년도 2월에 IEEE 협회지에 발표된 자료를 보면

- 2) 그림에서 보면 PD 발생지점(0m)에서 PD 발생크기(Max)가 약 0.055의 크기가 케이블 길이 100m에서는 PD 크기(Max)가 약 0.025, 케이블 길이 300m에서는 PD 크기(Max)가 약 0.005 정도이다는 것을 보여주소 있다.
- 3) 그림에서 PD 발생지점(0m 지점)에서 검출되는 PD 크기를 100%라고 하면 PD 발생지점으로부터 100m 떨어진 지점에서 검출되는 PD 크기는 50%이하, PD 발생점으로부터 300m 떨어진 지점에서 검출되는 PD 크기는 10%정도라고 해석할 수 있을 것이다.
- 4) 그리고 펄스의 형태는 300m 떨어진 위치에서는 케이블의 정전용량때문에 거의 펄스형태가 rising time 과 falling time 이 크게 변화하여 펄스형태를 거의 검출할 수 없을 정도로 펄스가 변화되어 있다는 것을 나타낸 자료로서, 상기①항의 1996년에 발표한 자료와 유사하다.

**PD 발생지점으로 거리가 떨어질 수록, PD Pulse 펄스폭이 증가, PD Pulse 크기는 감소**

- 5) 따라서, 이 자료는 케이블에서의 부분방전(PD)검출은 PD 발생지점으로부터 수 m 이하에서는 크기가 감소되지 않고 파형의 변형도 작기 때문에 케이블의 PD 측정은 PD 검출하고자 하는 부분에서 수 m 이내에 PD 측정 센서를 설치해야 한다는 1980년 이전부터 알고 있던 사항을 다시 확인시켜주는 것은 아닐까?

② <출전: Analytic Solutions for Pulse Propagation in Shielded Power Cable for Symmetric and Asymmetric PD Pulses, Naima Oussalah, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 5: October 2007>



**Figure 2.** Pulse -6 dB bandwidth as a function of distance propagated. At 0 distance, the bandwidth is about 370 MHz for an attenuation constant of  $5 \times 10^{-11}$  s/m. However at 1000 m, the bandwidth is in the range of 1 MHz, well below the typical detection bandwidth of field PD measurement systems of about 10 MHz. The exact pulse width, as determined numerically, is shown along with an analytic approximation for the pulse width.

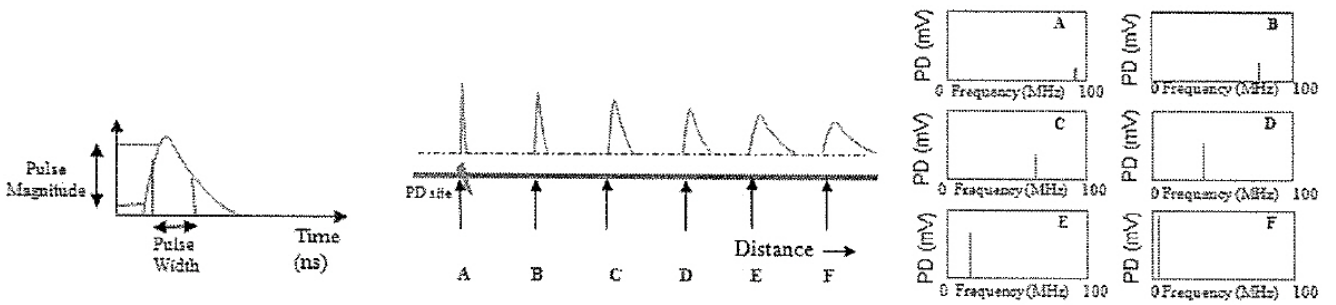
검토의견: 1) 2007년도 10월에 IEEE협회지에 발표된 자료를 보면

2) 그림에서 보면 PD발생지점에서 발생한 PD Pulse는 케이블을 따라 전파하면서 전파거리에 따라 펄스폭(Pulse Width)가 비례적으로 증가함을 보여주고 있다.

그리고, 한편 PD발생지점으로부터 수m이하에서는 Pulse폭의 증가폭이 적다는 것을 보여주는데, 이 사항은 PD발생지점에서 발생한 PD Pulse Waveform은 크게 변형되지 않고 있음을 추정할 수 있다.

3) 따라서, 이 자료는 케이블에서의 부분방전(PD)검출은 PD발생지점으로부터 수m이하에서는 크기가 감소되지 않고 파형의 변형도 작기 때문에

케이블의 PD측정은 PD검출하고자 하는 부분에서 수m이내에 PD측정 센서를 설치해야 한다는 1980년 이전부터 알고 있던 사항을 다시 재확인시켜주는 것은 아닐까?



<그림. 신호전달 특성>

그림과 같은 부분방전 펄스신호가 발생하면 케이블을 따라 이동하면서 펄스의 크기는 작아지고 펄스의 폭은 넓어진다. 따라서 각 지점에서 측정되는 신호의 주파수대역이 점차 낮아지게 된다. 측정점에서는 여러 개의 신호가 무리지어 나타나고 이것이 모여 포락선을 형성하면서 PD파형을 구분하는 것으로 추정된다.

- 검토의견 :**
- 1) 상기 자료의 그림을 보면 A점에서 PD발생하여 케이블을 따라 B~F측으로 전파되면서 PD발생지점인 A에서 멀리 떨어질 수록 펄스폭은 넓어지고(즉 펄스폭은 커짐), Pick-pick크기는 감소하는 형태로 변화되는 것을 보여주고 있음.
  - 2) 상기 그림상으로는 펄스폭의 크기가 거리에 따라 어느 정도 변화되는 지는 알 수 없지만, 현재 외국자료로 보면 거리에 따라 1차 직선 형태로 감소됨.
  - 3) 상기 자료에서는 PD펄스의 pick-pick크기의 감소 및 Pulse Width가 커져서 PD발생위치로부터 PD검출센서가 설치된 장소가 멀리 떨어질수록 매우 작은 Level의 PD펄스 크기와 매우 큰 PD펄스폭의 변화와, 향후 검토할 양쪽 단말부에서에서 PD신호의 전반사되고 크기의 감소 및 펄스폭의 변형되어진 펄스들과 주변 환경Noise들이 함께 PD검출센서로 유입되어 PD신호로 검출되어 질 것인데.....
  - 4) PD검출센서가 설치된 위치로부터 수m이내에 PD가 발생하였는지, 수십m이내에 PD가 발생하였는지, 수백m이내에서 PD가 발생하였는지 등의 PD발생위치를 모르는 상태에서 PD검출신호의 크기, 펄스폭을 측정하면 PD발생위치에서의 Original PD발생크기를 알 수 있을 까???????

④ <출전: Partial Discharge Pulse Propagation, Localisation and Measurements in Medium Voltage Power Cables, Power Engineering Conference(UPEC), 2013 48th International Universities, HVPD사>

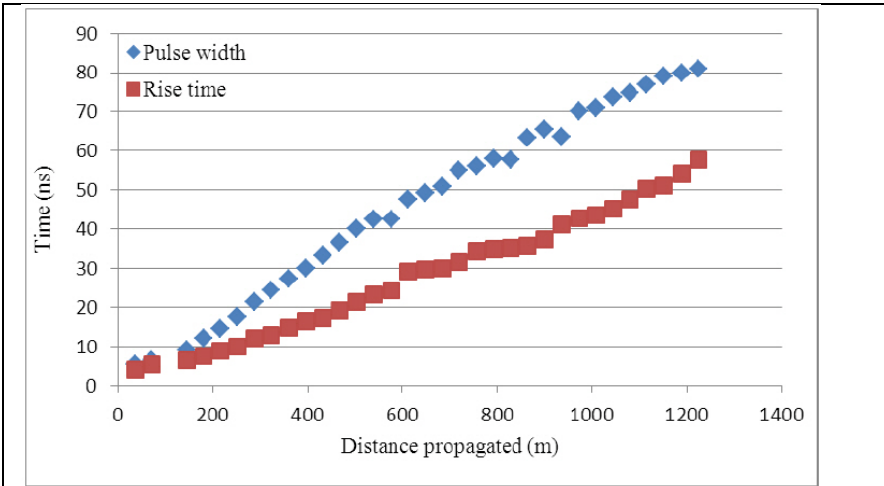


Fig. 1 Pulse width as a function of distance propagated for a 10 V Pulse with a 5 ns initial width

PD발생지점으로부터 케이블을 따라 전파하면서 펄스폭과 펄스상승 시간이 케이블 거리에 비례하여 증가.

**거리증가- PW & Rise time 증가**

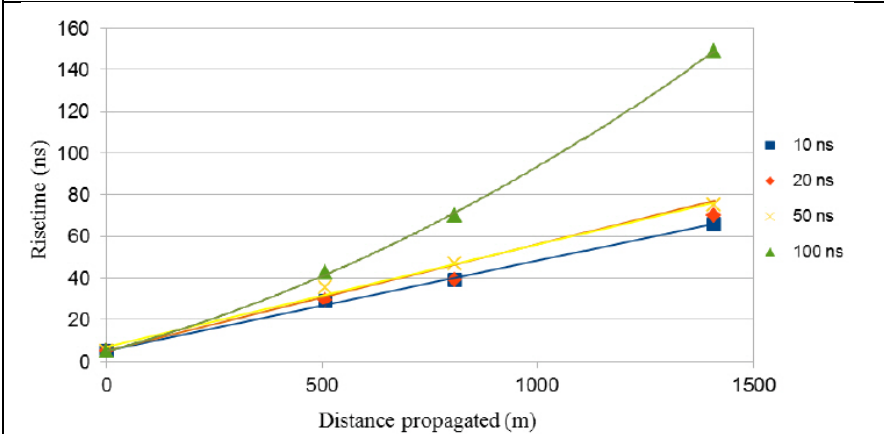


Fig. 2 Pulse rise time as a function of distance propagated for an 10 V Pulse with initial widths from 10 - 100 ns

PD발생지점에 발생한 PD신호의 펄스폭이 클수록 케이블을 따라 전파하면서 펄스상승 시간이 케이블 거리에 비례하여 증가 (PD신호의 R직렬C병렬의 특성 때문이 아닐까)

**L&PW증가 - Rise time 증가**

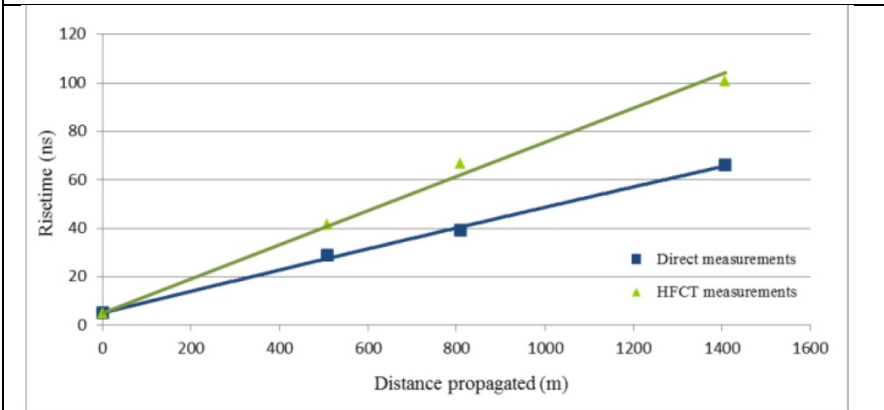
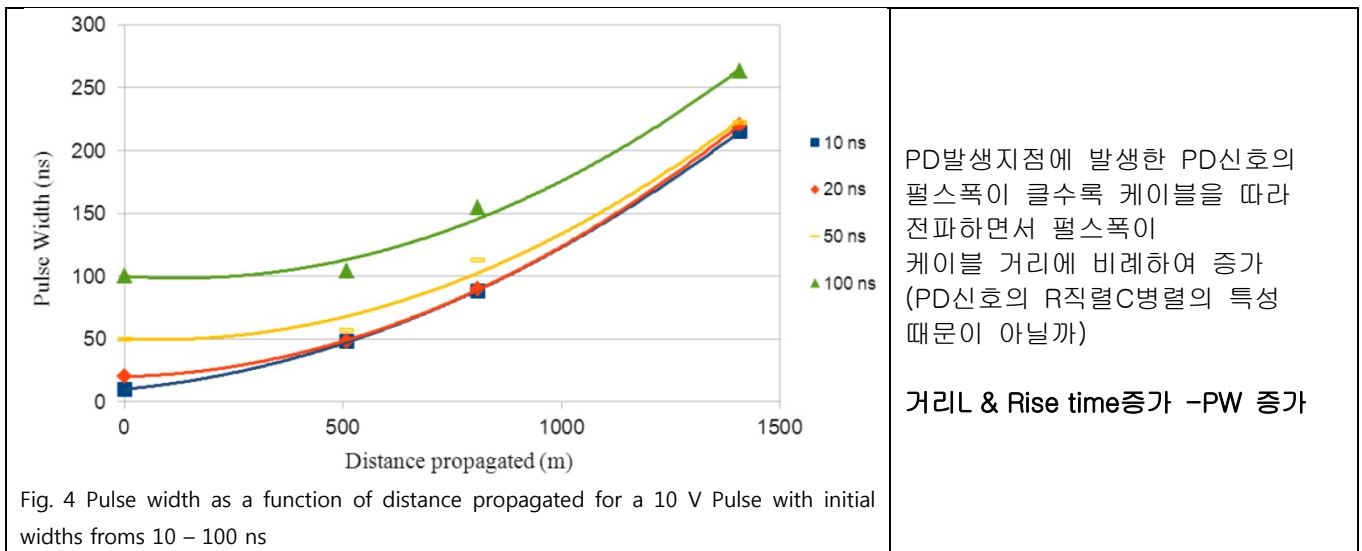


Fig. 3 Pulse rise time as a function of distance propagated for a 10 V Pulse with a 10 ns initial width when measured with the HFCT sensor and the voltage probe

PD발생지점에 발생한 PD신호를 케이블을 따라 전파하면서 발생하는 PD신호를 HTCT센서와 직접 검출하는 방법으로 검출하는 경우에 있어 HFCT센서를 통해 검출하는 PD신호의 상승시간이 길다. (HFCT는 2차측에 유도될 때의 특성과, Direct는 전압Probe에 사용한 HV Connector특성 차이로 발생된 것은 아닐까?)

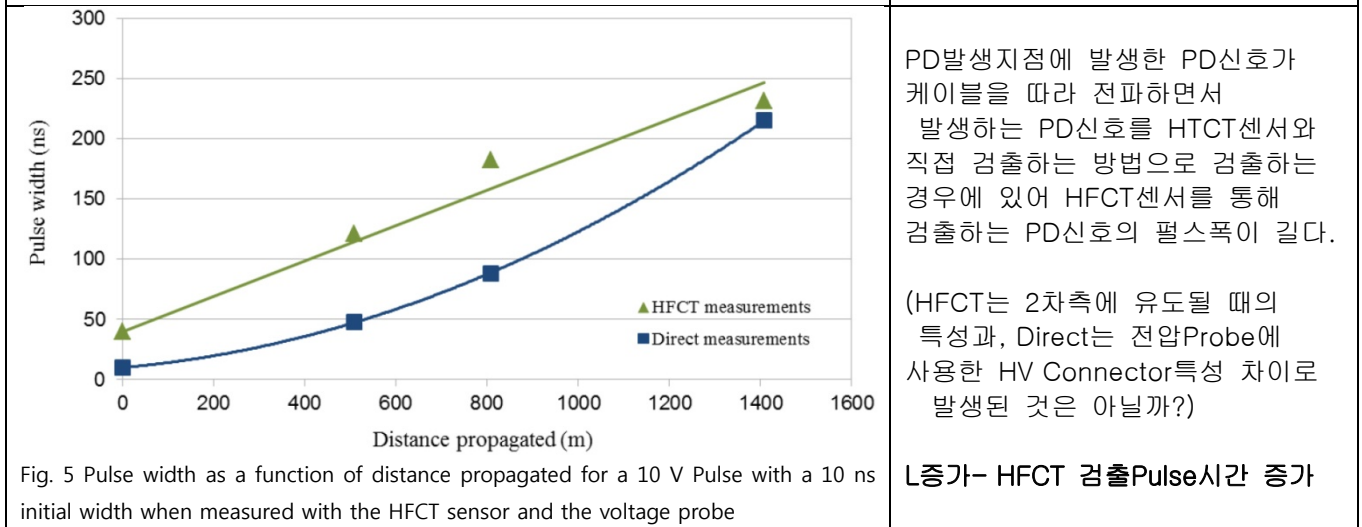
**L증가- HFCT 검출Pulse시간 증가**



PD발생지점에 발생한 PD신호의 펄스폭이 클수록 케이블을 따라 전파하면서 펄스폭이 케이블 거리에 비례하여 증가 (PD신호의 R직렬C병렬의 특성 때문이 아닐까)

거리L & Rise time증가 -PW 증가

Fig. 4 Pulse width as a function of distance propagated for a 10 V Pulse with initial widths from 10 – 100 ns



PD발생지점에 발생한 PD신호가 케이블을 따라 전파하면서 발생하는 PD신호를 HTCT센서와 직접 검출하는 방법으로 검출하는 경우에 있어 HFCT센서를 통해 검출하는 PD신호의 펄스폭이 길다.

(HFCT는 2차측에 유도될 때의 특성과, Direct는 전압Probe에 사용한 HV Connector특성 차이로 발생된 것은 아닐까?)

L증가- HFCT 검출Pulse시간 증가

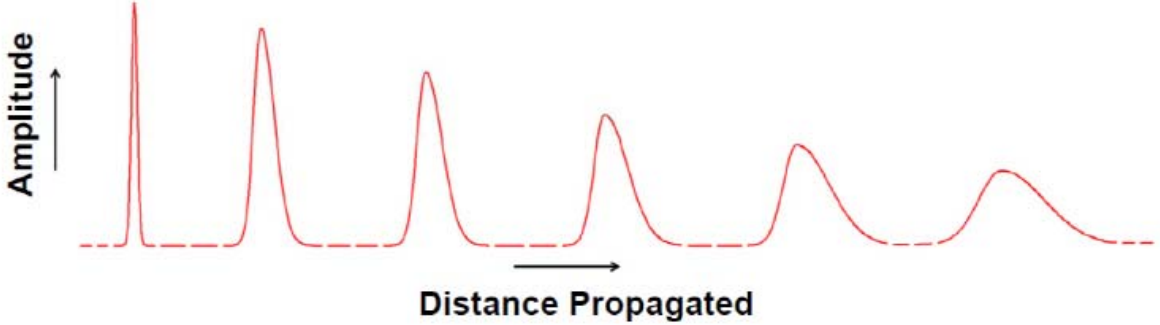
Fig. 5 Pulse width as a function of distance propagated for a 10 V Pulse with a 10 ns initial width when measured with the HFCT sensor and the voltage probe

**검토의견 :**

- 1) 2013년 영국 PD장비 제조사인 HVPD사의 자료를 보면
  - PD발생지점에서 발생한 부분방전(PD)는 케이블을 따라 전파하면서 펄스폭(Pulse Width)와 펄스상승시간(Rising Time)이 증가한다.
  - 펄스폭은 HFCT Sensor를 사용하는 것이 직접 HV Connector를 사용하여 검출하는 쪽이 직선성이 양호하다고 기술하고 있다.
- 2) 좀더 구체적으로 검토해보면
  - PD발생폭이 매우 짧은 10ns인 경우, 펄스폭과 Rise Time의 변화를 보면
    - ① 500m케이블을 전파하면 펄스폭은 HFCT에서 검출하는 경우 약120ns (PD발생지점에서 펄스폭은 HFCT로 검출하는 경우 약40ns)
    - ② 500m케이블을 전파하면 펄스Rise time은 HFCT에서 검출하는 경우 약25ns (PD발생지점에서 펄스 Rise Time은 약 5ns)
    - ③ 따라서, 감쇠되고 Noise Level까지 종합 고려하면 수십m이하에서 PD발생한 것으로 추정하여 오측정DATA결과 가능성.
- 3) 결론적으로는 PD Pulse는 케이블을 따라 전파하여, PD발생지점에서 발생한 부분방전(PD)는 케이블을 따라 전파하면서 펄스폭(Pulse Width)와 펄스상승시간(Rising Time)이 거리에 비례하여 증가한다.

**HVPD** PD Pulse Parameters with Distance Propagated

- At the discharge source the PD pulse can be modelled by a Dirac- $\delta$  function, with a broad frequency spectrum and a very fast ( $< 1$  ns) rise time.



- As a PD pulse propagates from its source (within the machines' stator winding) to the machine terminals and then along the feeder cable from the machine back to switchgear, **it changes shape (as shown above)**.
- These changes occur due to the effects of attenuation and dispersion as the cable/stator winding acts as a low-pass filter, stripping out the high frequency content of the pulse and developing into a **'Shark-Fin'** shape.

**검토의견:** 1) 최근 2014년에 PD장비 제조사인 영국 HVPD사의 기술자료에 공개된 자료와 같이, 그림에서 보면 케이블의 거리에 따라 전파하면서 PD신호 크기가 감소하고, 또한 펄스가 변형되고 있다는 것을 간략하게나마 보여주고 있다.

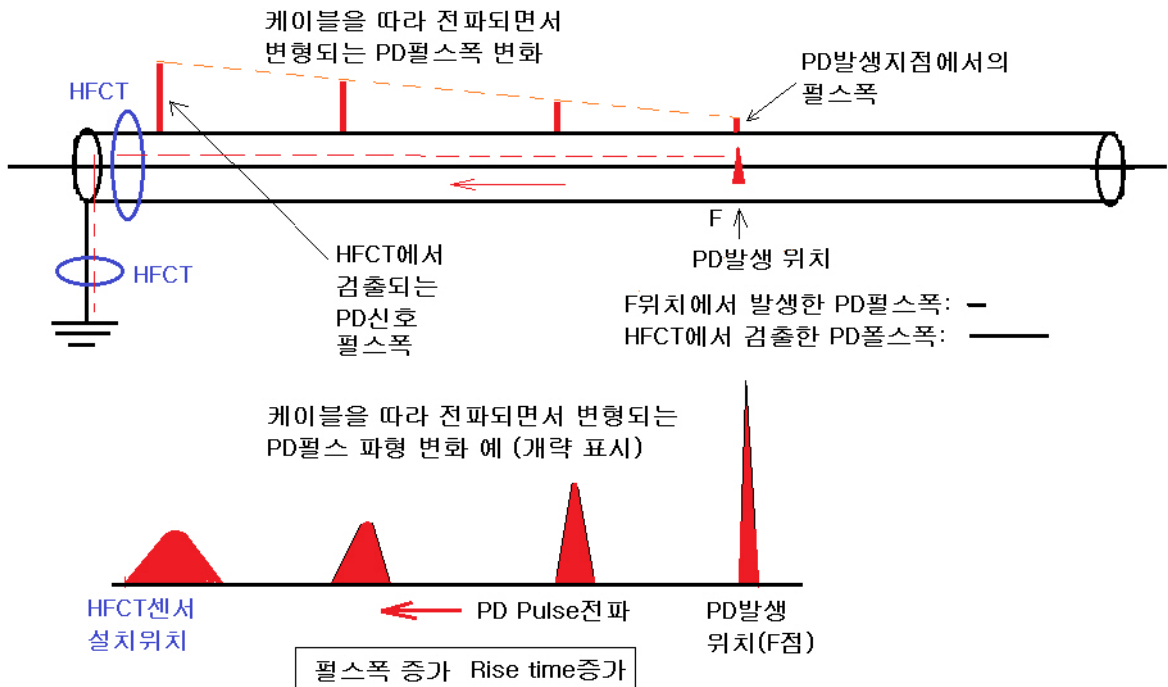
그림에서 보면 케이블을 따라 전파되면서 PD신호의 Pulse pick크기는 감소되고, 펄스 파형의 뾰족한 모양이 Smooth한 모양으로, 급격하게 상승하는 모양이 점차 시간을 갖고 상승하는 모양으로, 좁은 펄스모양이 넓게 퍼지는 모양으로 즉, 펄스 폭과 Rise time이 증가되고 있음이 표현되어 있다.

2) 그리고, 상기에서 검토한 2013년 자료와 본 2014년 자료는 PD장비 제조사에서 케이블의 거리에 따라 전파되면서 PD Pulse의 감소 및 파형의 변형의 형태를 공개한 자료이다.

전에 기술한 PD 신호의 케이블을 따라 전파하면서 발생하는 신호크기의 감쇠특성에서 기술한 한국과 일본의 공개된 자료에서 언급한 펄스의 변형현상과, 상기에서 기술한 PD 신호의 케이블을 따라 전파하면서 발생하는 Pulse Waveform의 펄스폭&상승시간의 증가하는 특성을 자료를 종합해보면

- 1) 국내에서는 PD 신호가 케이블을 따라 전파하면서 파형의 변형은 있는 것으로 알고 있었으나 구체적으로 펄스폭과 펄스상승시간에 대한 이론적 & 실험적으로 고찰된 공개자료를 찾을 수 없었음.
- 2) 일본에서도 PD 신호가 케이블을 따라 전파하면서 파형의 변형은 있는 것으로 알고 있었으며, 이러한 감쇠와 파형의 변형문제로 케이블 거리에 따른 문제를 없애기 위해 케이블의 단말 & 접속재 부분에 용량성센서를 설치하여 수십~수백 KHz 대역의 주파수대역에서의 PD 검출방식을 적용. 그리고, 거리에 따른 펄스폭과 펄스상승시간에 대한 고찰 필요성 때문에 구체적 공개자료를 찾을 수 없었음.
- 3) 일본을 제외한 외국에서는 상기에서 검토한 자료와 같이, 현장 Noise에서 보다 좋은 특성이 좋은 수 MHz~수백 MHz 고주파대역에서 PD 검출하기 위해 1990년 중반기부터 케이블을 따라 전파하면서 발생하는 PD 신호의 펄스폭과 상승시간에 대해 연구를 많이 있었으며 결론적으로는 전력케이블에 있어 고주파 PD 펄스의 신호는 케이블을 따라 전파하면서 다음 그림과 같은 형태로 PD Pulse의 펄스폭과 Rise Time이 직선적으로 케이블의 거리에 따라 증가.

한편, PD 펄스의 케이블 따라 전파시에 수 m 이하에서는 펄스폭과 Rise time의 변화가 거의 없음



- 4) 따라서 실제 현장에서 현장 Noise가 발생하고 있고, 장기간 사용하고 있는 CV 케이블의 부분방전(Partial Discharge, PD)검출시에 수십 m 이상 떨어진 위치에서 PD 발생한 것을 PD 신호의 케이블따라 전파시의 펄스폭과 Rise time 증가로 인하여 PD 검출센서에서 검출되는 고주파대역의 주파수성분이 PD 발생위치의 고주파대역의 주파수성분보다 작게되어 현장 Noise 성분과 인접한 고주파성분으로 검출될 수 있을 것 같은데...

그리고, 현장 Noise 성분과 검출하려는 PD 성분을 서로 분리할 수 있을까???

그리고, 먼저 검토한 PD 신호의 케이블 전파시의 크기 감쇠특성을 추가 고려하면 고주파 PD 검출센서에 의해 수십 m 이상 떨어진 위치의 PD 검출은 더 더욱 ?????

본 자료는 허락없이 인쇄물/site에 공개해서는 안되지만, 출처를 명확하게 기재하는 경우에는 공개 가능합니다. 2014년 12월 29일