

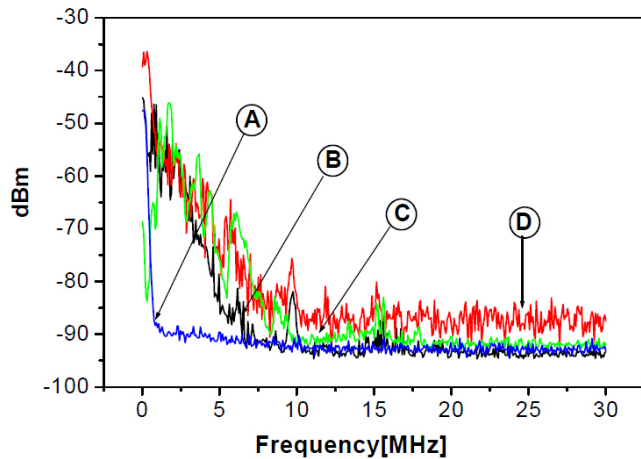
전력케이블의 부분방전(PD)진단에 있어 Noise, Pick치 크기감쇠, Pulse파형 변형관련 검토결과 정리

2014년 12월 30일
2014년 12월 31일 1차 보완

검토자: 김보경

▶ 본 자료는 전력케이블의 부분방전 진단에 있어 향후 검토예정인 PD신호의 반사, 전파속도, 센서선 길이, 센서종류 및 PD센서 적용방법 등 현재까지 구체적으로 검토되지 않은 사항을 제외한 상태에서, 현재까지 검토된 Noise, 크기감쇠, Pulse파형의 변형과 관련된 자료를 정리한 것임.

1. 국내의 현장 노이즈



(A: 전자 차폐실, B: 154kV 현장선로, C: 실험실 시험선로, D: 변전소 그림) 현장에서의 노이즈 주파수 스펙트럼

- ▶ 전력구나 실험실의 경우, 노이즈 펄스의 첨두치는 20mV 정도.
- ▶ 공장 내부에 있는 변전소 내, 케이블 단말부에서는 50mV 정도
- ▶ 이 Noise는 실험실에서 실규모 케이블에 보정펄스를 50~100pC 정도 크기
→ 노이즈를 제거하지 않으면 현장에서 100pC 이하의 부분방전 신호를 검출하기 어려움

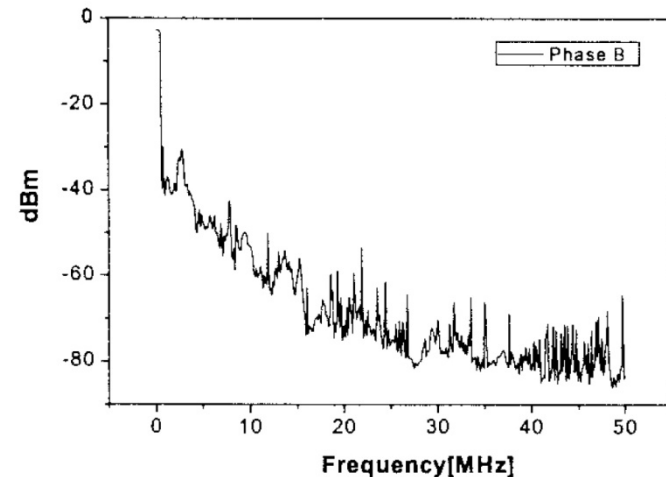
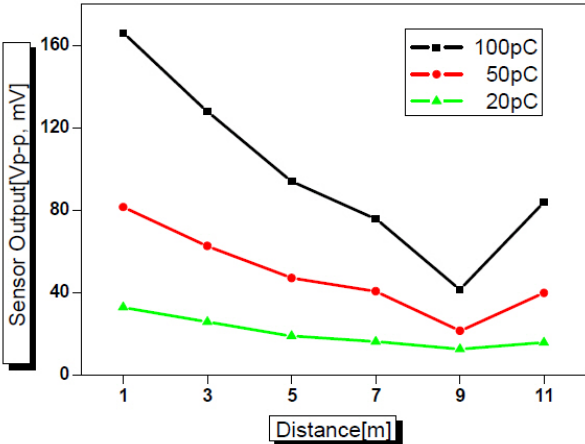
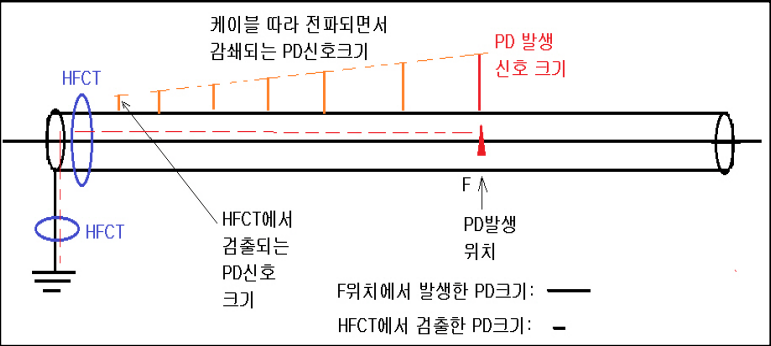
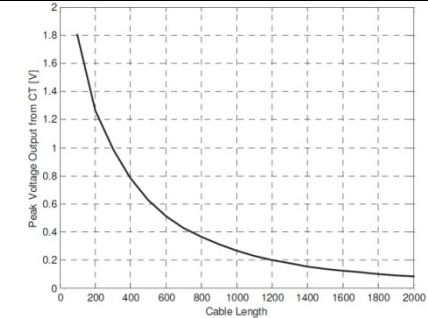
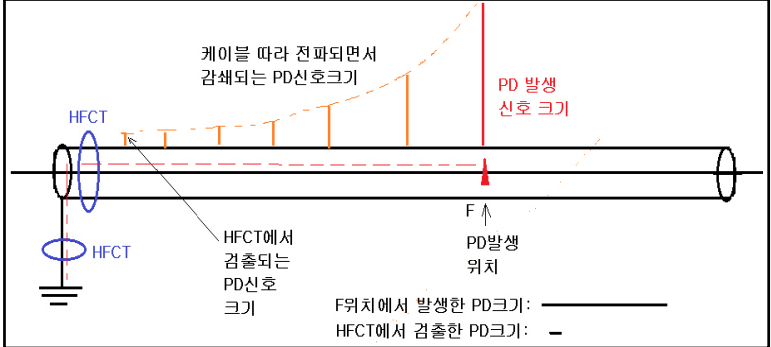


그림) 배전케이블 종단접속부의 노이즈 스펙트럼(HFCT센서 이용)
그림은 모회사의 변전소에서 22.9Kv 종단접속부의 접지선에 HFCT센서를 설치, 측정된 노이즈 스펙트럼으로 저주파대역에서 고주파대역까지 전대역에 걸쳐 큰 노이즈 신호 존재, 부분방전 신호와 유사한 펄스성 노이즈가 존재.
→ 현재 일반적으로 20~30MHz대역에서 PD진단시,
20~30MHz대역의 검출된PD신호에서 20~30MHz 대역의 Noise신호를 분리하는 데 어려움 예상.

2. PD 신호의 케이블을 따라 전파시의 피크치 크기 감쇠관련 연구동향 및 검토정리

년 도	국 내	외 국
2000 년 이전	-	<div data-bbox="1205 151 1713 566" data-label="Figure"> </div> <p data-bbox="824 574 2101 646">1980년 중반기에 일본 미쯔비시전선에서는 PD발생위치가 측정단으로부터 멀리 떨어진 경우에, <u>부분방전 펄스가 케이블을 따라 전파해가면서 감쇠하기 때문에 PD검출에 문제가 있다고</u> 기술하고 있다.</p> <div data-bbox="1108 654 1814 1093" data-label="Figure"> </div> <p data-bbox="824 1101 2101 1212">1996년도 1월에 IEEE협회지에 발표된 자료이고, 공동저자로 Hipotronics, Robins Instruments사. <u>케이블 거리 100m에 있어 주파수에 따른 크기 감쇠율을 나타낸 것이며, 거리에 따른 크기 감쇠가 어떤 형태로 이루어지는 지는 기술하지 않고 있지만, 주파수가 높을수록 감쇠가 크다는 것을 보여줌</u></p> <p data-bbox="824 1236 2101 1372"><u>2000년 이전에 일본 및 외국에서는</u> 케이블 선로에 있어 PD 발생시 고주파 펄스의 PD 신호가 케이블을 따라 전파하면서 발생하는 현상에 있어 <u>지금부터 약 20년 전인 1990년 중반부터 구체적으로 전력케이블에 있어 고주파 PD 펄스의 신호크기는 빠르게 감쇠하며, 다음 그림과 같은 형태로 PD Pulse 신호의 크기가 감쇠경향을 가지는 것으로 파악하고 있었음</u></p>

년 도	국 내	외 국
2000~2011 년	 <p>그림) 거리에 따른 센서 출력전압의 감소</p> <p>국내의 연구 및 공개된 자료를 보면 2011년까지는 다음그림과 같이 고주파 펄스의 신호크기는 빠르게 감소하지만, 길이에 따라 1차 함수(직선함수)형태의 감소 경향을 가지고 있는 것으로 파악하고 있었던 것으로 추정.</p>  <p>그림] 국내에서 2010년 이전 일반적으로 생각하였던 케이블에 있어 PD 신호크기 감소 특성 예</p>	 <p>2000년대 중반기인 2005년에 CIRE(국제 배전기술협의회) 회지에 발표한 자료에서</p> <p>왼쪽 그림과 같이 PD검출센서로부터 멀리 떨어진 위치에서 PD발생시에 케이블을 따라 전파하면서 PD검출센서에 검출되는 PD신호 크기가 지수함수 형태로 감소 한다고 구체적으로 기술</p> <p>외국에서는 2000년 이전부터 전력케이블에 있어 고주파 PD 펄스의 신호크기는 빠르게 감소하며, 다음 그림과 같은 형태로 PD Pulse 신호의 크기가 감소경향을 가지는 것으로 파악하고 있었던 것으로 추정</p>  <p>그림] 외국에서 2000년 이후 발표된 연구자료의 케이블에 있어 PD 신호크기 감소 특성 예</p> <p>오래 사용한 케이블에 발생하는 차폐동Tape산화 열화에 따른 크기 감소</p> <p>2011년 일본 전력중앙연구소의 시험결과, 오래 사용한 케이블에서 차폐층 동Tape가 산화열화 한 케이블은 PD Pulse의 피크치가 10배정도 감소, PD Pulse의 전파속도는 약 10~20%정도 저하되었다고 기술</p>

년도

국내

외국

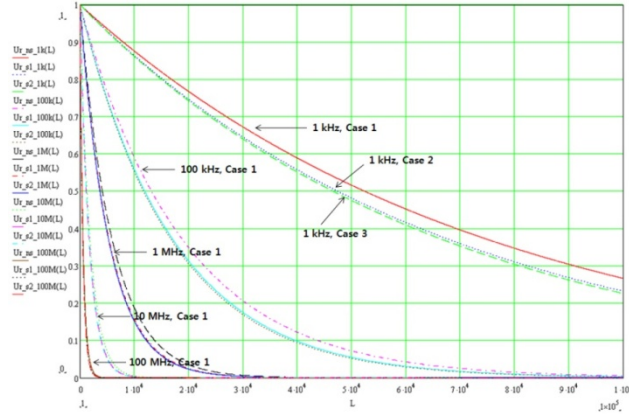
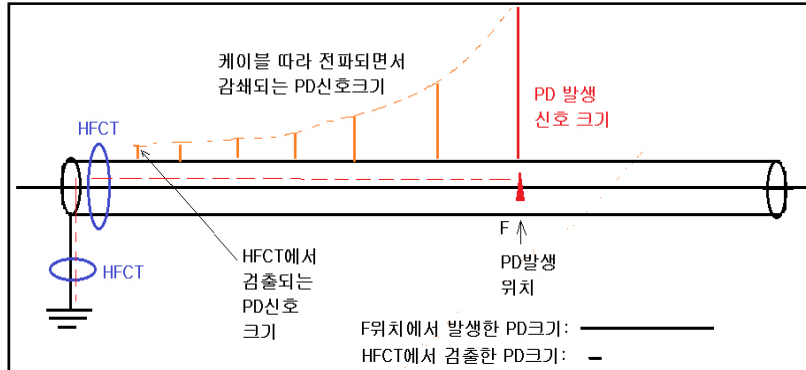


그림 8 CNCV 60mm² 케이블 길이별 주파수에 따른 감쇠전압
 그림 8은 케이블 길이별 주파수에 따라 감쇠되는 전압의 크기를 나타내었다. 주파수가 높을수록 감쇠는 급격하게 나타남.

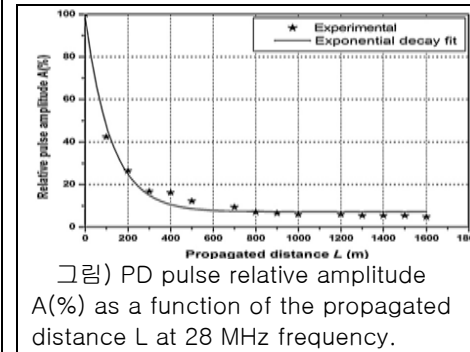
국내에서 고주파 대역에서 케이블의 길이에 따른 PD 신호의 감쇄특성이 1차 함수가 아닌 지수함수 형태로 감쇄하고 있다는 특성의 연구결과는 2012년에 발표되어 있다.

2012년~



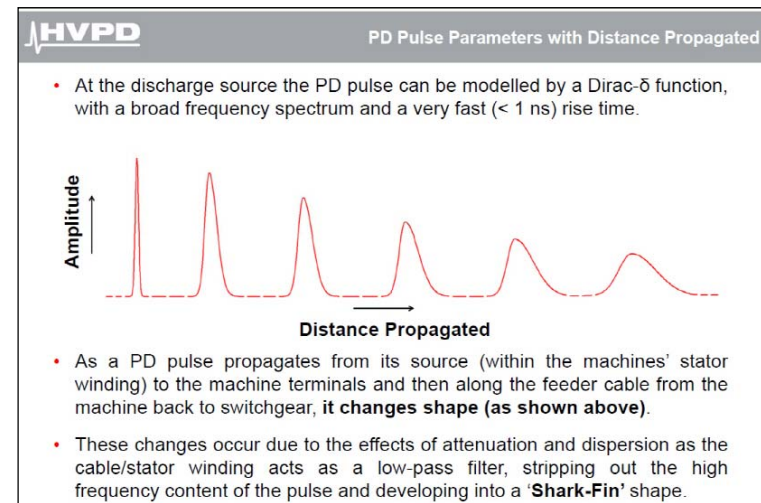
그림]국내에서 2012년에 발표된 연구자료의 케이블에 있어 PD 신호크기 감쇄특성 예

2012년 전기학회의 발표자료를 보면 케이블 길이가 길수록, 고주파 대역이 증가할수록 감쇄 특성이 증가하고 있다고 발표하고 있고, 고주파 대역이 1MHz 이상이면 PD 신호 크기 특성이 그림과 같이 지수함수 형태로 감쇄하는 특성을 가지고 있다.



그림] PD pulse relative amplitude A(%) as a function of the propagated distance L at 28 MHz frequency.

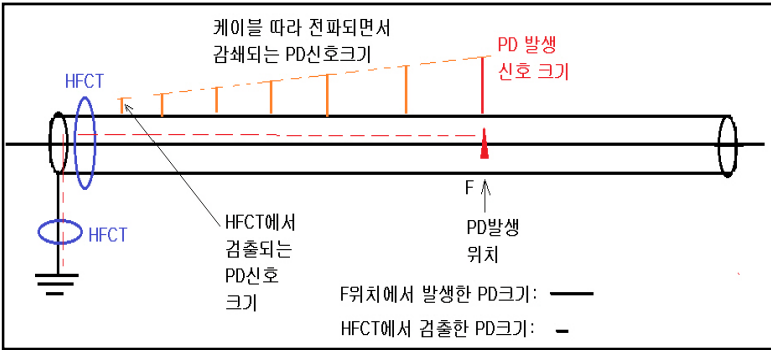
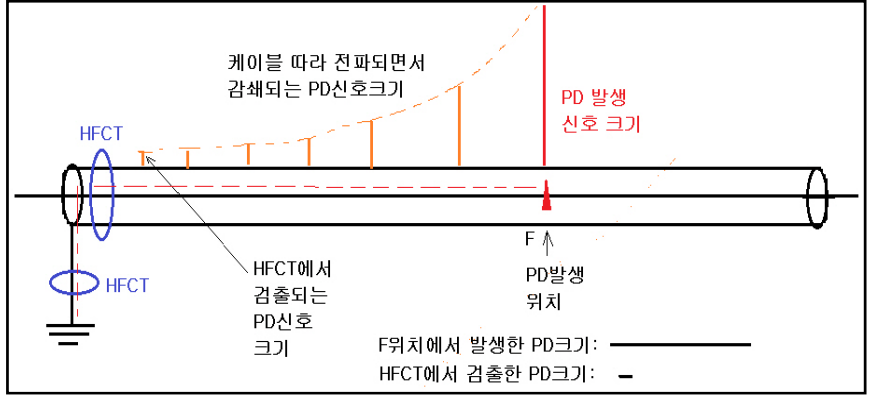
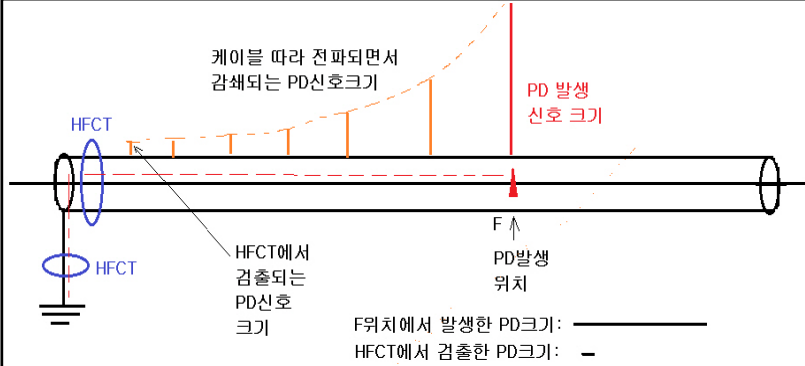
최근 2013년도에 Electric Power Systems Research 학술지에 발표한 자료를 보면 왼쪽 그림과 같이 거리에 따라 PD신호가 케이블 따라 전파하면서 검출되는 PD신호크기가 지수함수 형태로 감쇠하는 것을 시험과 Simulation으로 확인한 자료



최근 2014년에 PD장비 제조사인 영국 HVPD사의 기술자료에 공개된 자료와 같이, 케이블의 거리에 따라 전파하면서 PD신호 크기가 감쇠하고, 또한 펄스가 변형되고 있다는 것을 간략하게나마 보여주고 있다

2012년 일본 전력중앙연구소에서 케이블 구조에 따른 PD신호 전파특성

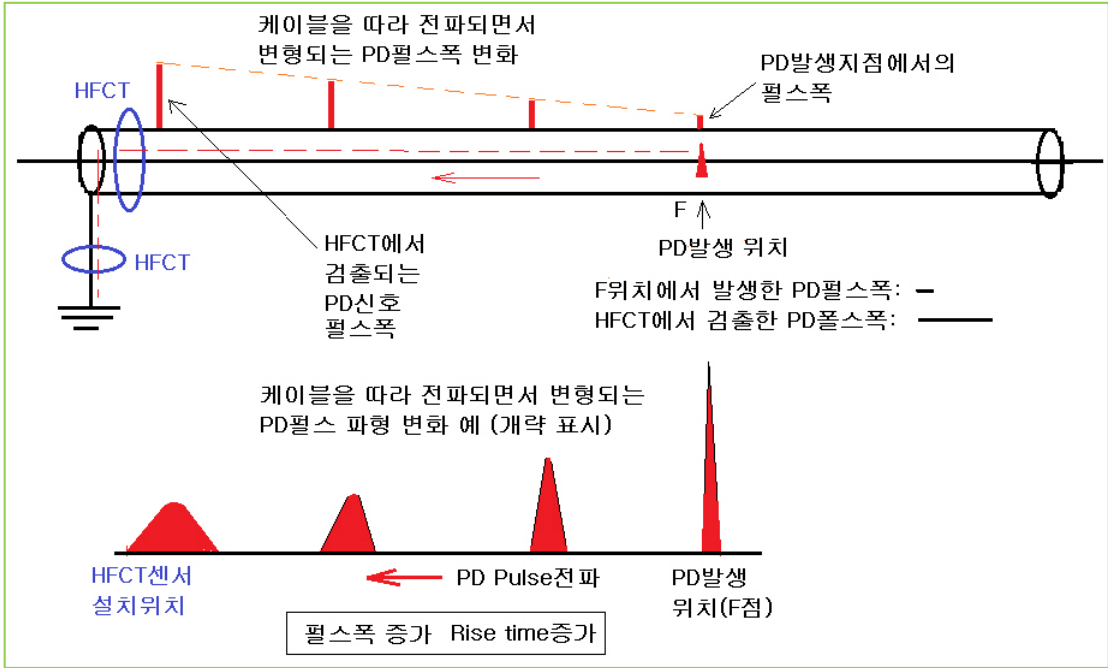
- 차폐층이 와이어샐드 케이블이 동TAPÉ케이블보다 감쇠가 크다.
- 100m거리, 와이어샐드-85%크기감쇠, 동TAPÉ-66%크기감쇠
- 20MHz주파수특성, 와이어샐드-100dB/km이상의 감쇠율, 동Tape-15dB/km이상의 감쇠율 발생

	국 내	외 국
PD Pulse 의 전파시 크기 감쇠 정리	<p>① 2010년 이전 PD Pulse가 케이블을 따라 전파시의 감쇠특성</p>  <p>그림]국내에서 2010년 이전 일반적으로 생각하였던 케이블에 있어 PD 신호 크기 감쇄 특성 예</p> <p>국내의 연구 및 공개된 자료를 보면 2011년까지는 고주파 펄스의 신호크기는 빠르게 감쇄하지만, 길이에 따라 1차 함수(직선함수)형태의 감쇄 경향을 가지고 있는 것으로 파악하고 있었던 것으로 추정</p>	<p>① 2000년 이전부터 PD Pulse가 케이블을 따라 전파시의 감쇠특성</p>  <p>그림] 외국에서 2000년 이후 발표된 연구자료의 케이블에 있어 PD신호 크기 감쇄 특성 예</p> <p>외국에서는 2000년 이전부터 전력 케이블에 있어 고주파 PD 펄스의 신호크기는 빠르게 감쇄하며, 위 그림과 같은 형태로 PD Pulse 신호의 크기가 감쇄경향을 가지는 것으로 파악하고 있었던 것으로 추정</p>
	<p>② 2012년 PD Pulse가 케이블을 따라 전파시의 감쇠특성</p>  <p>그림]국내에서 2012년에 발표된 연구자료의 케이블에 있어 PD 신호 크기 감쇄 특성 예</p> <p>2012년 전기학회의 발표자료를 보면 케이블 길이가 길수록, 고주파 대역이 증가할수록 감쇄 특성이 증가하고 있다고 발표하고 있고, 고주파 대역이 1MHz 이상이면 PD 신호 크기 특성이 그림과 같이 지수함수 형태로 감쇄하는 특성을 가지고 있다.</p>	<p>② 케이블 구조 및 차폐동 Tape 산화에 따른 감쇄특성 (일본 전력중앙연구소)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 장기간 사용한 케이블에 발생하는 차폐동Tape산화 열화에 따른 크기 감쇄 차폐층 동Tape가 산화열화 한 케이블은 PD Pulse의 피크치가 10배정도 감소, PD Pulse의 전파속도는 약10~20%정도 저하하였다고 기술 ▶ 케이블 차폐층 구조에 따른 PD신호 전파특성 <ul style="list-style-type: none"> - 차폐층이 와이어실드 케이블이 동Tape케이블보다 감쇄가 크다. - 100m거리, 와이어실드-85%크기감쇄, 동Tape-66%크기감쇄 - 20MHz주파수특성, 와이어실드-100dB/km이상의 감쇄율, 동Tape-15dB/km이상의 감쇄율 발생 <p>2010년 이후에 발표된 일본자료를 포함한 외국자료의 종합분석한 결과,</p> <p>동차폐구조를 가진 CV 케이블과 동 TAP E가 산화되지 않은 상태의 CV 케이블에 있어 PD 검출센서로부터 100m 떨어진 위치에서 PD가 발생하면 케이블 따라 전파되면서 발생한 PD 크기의 50%이상 감쇄되어, PD 신호 검출센서에서는 Original PD 신호크기의 50%이하를 검출할 수 있는 것으로 판단. (200m 위치에서는 약 70%이상 감쇄, WIRE SHIELD 구조에서는 감쇄정도 증가)</p> <p>그리고, 장기간 사용으로 인한 차폐동 TAP E의 산화가 발생한 케이블에서는 더더욱 감쇄정도가 증가됨</p>

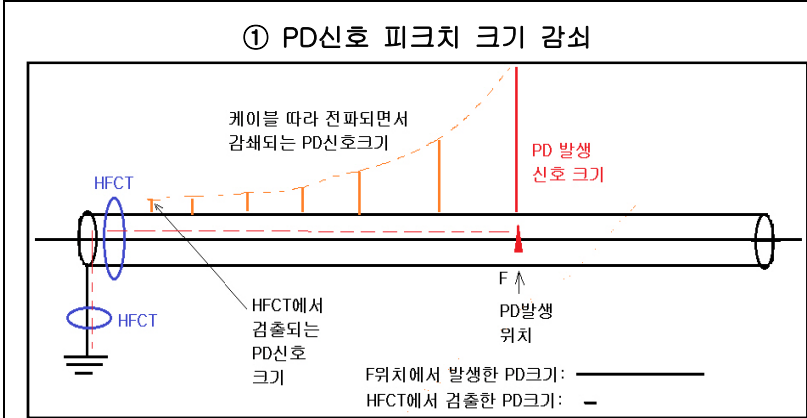
3. PD 신호의 케이블을 따라 전파시의 PD Pulse waveform 변형관련 연구동향 및 검토정리

년 도	국 내	외 국
2000 년 이전	-	<div data-bbox="1151 201 1767 624" data-label="Figure"> </div> <p data-bbox="824 635 2040 703">1996년도 1월에 IEEE협회지에 발표된 자료이고, 공동저자로 Hipotronics, Robins Instruments사가 있으며, PD발생지점으로 거리가 떨어질 수록, PD Pulse Width이 증가, PD Pulse크기는 감소</p>
2000~2011 년	-	<div data-bbox="1151 735 1778 1222" data-label="Figure"> </div> <p data-bbox="824 1235 2040 1385">2007년도 10월에 IEEE협회지에 발표된 자료를 보면 그림에서 보면 PD발생지점에서 발생한 PD Pulse는 케이블을 따라 전파하면서 전파거리에 따라 펄스폭(Pulse Width)가 비례적으로 증가. 그리고, 한편 PD발생지점으로부터 수m이하에서는 Pulse폭의 증가폭이 적다는 것을 보여주는데, 이 사항은 PD발생지점에서 발생한 PD Pulse Waveform은 크게 변형되지 않고 있음을 추정할 수 있다.</p>

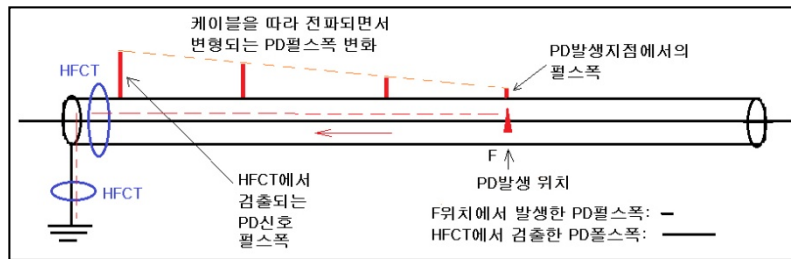
년 도	국 내	외 국																								
2012 년 ~	-	<div data-bbox="1077 172 1825 624" data-label="Figure"> <table border="1"> <caption>Estimated data from the graph</caption> <thead> <tr> <th>Distance propagated (m)</th> <th>Pulse width (ns)</th> <th>Rise time (ns)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>5</td><td>5</td></tr> <tr><td>200</td><td>15</td><td>10</td></tr> <tr><td>400</td><td>25</td><td>15</td></tr> <tr><td>600</td><td>35</td><td>20</td></tr> <tr><td>800</td><td>45</td><td>25</td></tr> <tr><td>1000</td><td>55</td><td>30</td></tr> <tr><td>1200</td><td>65</td><td>35</td></tr> </tbody> </table> </div> <p data-bbox="801 635 1989 703">2013년 영국 PD장비 제조사인 HVPD사의 자료를 보면 PD발생지점에서 발생한 부분방전(PD)는 케이블을 따라 전파하면서 펄스폭(Pulse Width)과 펄스상승시간(Rising Time)이 증가한다.</p> <div data-bbox="1093 715 1805 1189" data-label="Figure"> <p data-bbox="1131 778 1774 821"> <ul style="list-style-type: none"> At the discharge source the PD pulse can be modelled by a Dirac-δ function, with a broad frequency spectrum and a very fast (< 1 ns) rise time. </p> <p data-bbox="1131 869 1774 1029"> </p> <p data-bbox="1131 1045 1774 1189"> <ul style="list-style-type: none"> 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. </p> </div> <p data-bbox="801 1197 2101 1265">최근 2014년에 PD장비 제조사인 영국 HVPD사의 기술자료에 공개된 자료와 같이, 케이블의 거리에 따라 전파하면서 PD신호 크기가 감소하고, 또한 펄스가 변형되고 있다.</p> <p data-bbox="801 1276 2072 1388"><u>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</u></p>	Distance propagated (m)	Pulse width (ns)	Rise time (ns)	0	5	5	200	15	10	400	25	15	600	35	20	800	45	25	1000	55	30	1200	65	35
Distance propagated (m)	Pulse width (ns)	Rise time (ns)																								
0	5	5																								
200	15	10																								
400	25	15																								
600	35	20																								
800	45	25																								
1000	55	30																								
1200	65	35																								

년 도	국 내	외 국
<p>PD Pulse 의 전파시</p> <p>Width 와 Rise Time 변형 관련 정리</p>	<p>국내에서는 PD 신호가 케이블을 따라 전파하면서 파형의 변형은 있는 것으로 알고 있었으나</p> <p>구체적으로 펄스폭과 펄스 Rise time 에 대한 이론적 & 실험적으로 고찰된 공개자료를 찾을 수 없었음.</p>	<p>① 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 검출방식 적용. 그리고, 거리에 따른 펄스폭과 펄스상승시간에 대한 고찰 필요성 때문에 구체적 공개자료를 찾을 수 없었음.</p> <p>② 일본을 제외한 외국에서는 상기에서 검토한 자료와 같이, 현장 Noise 에서 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, 2000년 이전부터 전력케이블에 있어 고주파 PD 펄서의 신호는 케이블을 따라 전파하면서 다음 그림과 같은 형태로 PD Pulse 의 펄스폭과 Rise Time 이 직선적으로 케이블의 거리에 따라 증가.</p> <p>한편, PD 펄스의 케이블 따라 전파시에 수 m 이하에서는 펄스폭과 Rise time 의 변화가 거의 없음</p>  <p>그림] 외국에서 2000년 이후 발표된 연구자료의 케이블에 있어 PD Pulse 폭과 Rise time 전파특성 예</p>

4. PD 신호의 케이블을 따라 전파시의 PD Pulse의 크기 감쇠 및 Waveform 변형관련 종합검토 요약

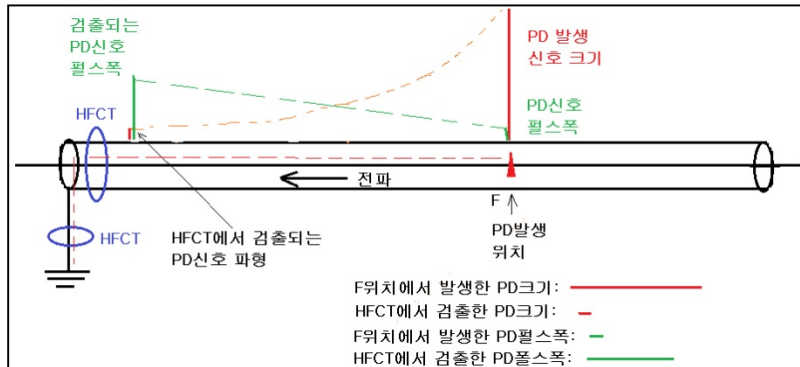


+ ② PD신호 펄스폭 증가

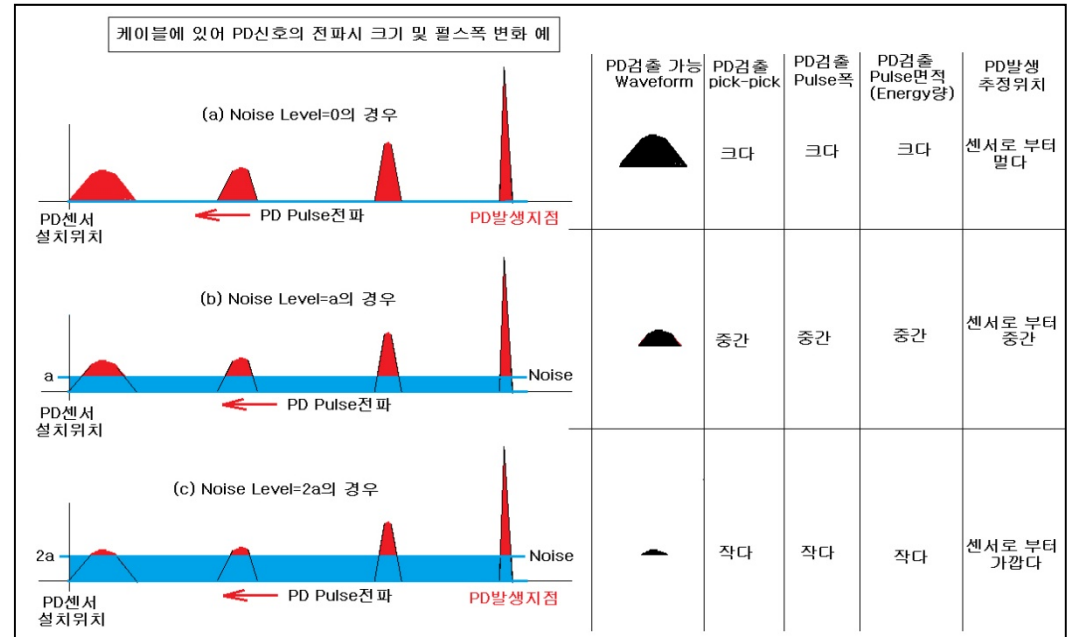


||

PD검출센서로 전파되는 PD신호 = ①피크치 크기 + ②펄스폭



전력케이블에 있어 PD신호가 케이블을 따라 전파시 Pick치 크기 및 펄스폭 변화 정리



2010년 이후에 발표된 국내외 자료의 종합검토 결과요약

동차폐구조를 가진 CV 케이블과 장기간 사용하지 않아 동 TAPE가 산화되지 않은 상태의 CV 케이블에 있어, PD 검출센서로부터 100m 떨어진 위치에서 PD가 발생하면, 케이블 따라 PD 신호가 전파되면서 발생한 PD Peak 치 크기의 50%이상 감쇠되어, PD 신호검출센서에서는 Original PD 신호의 Peak 크기의 50%이하를 검출할 수 있는 것으로 판단.

(200m 위치에서는 약 70%이상 감쇠, WIRE SHIELD 차폐층 구조에서는 감쇠정도 증가) 그리고, 장기간 사용으로 인한 차폐동 TAPE의 산화가 발생한 케이블에서는 더욱 감쇠정도 증가됨

또한, Pulse 신호의 Width와 Rising time이 증가하면서 PD 검출파형이 왜곡되고 PD 신호외의 다른 신호들과 합쳐진 신호들이 PD 센서에서 검출되므로, 어느 파형이 PD 파형인지 알 수 없는 경우가 발생. 그리고 추후 검토예정인 PD Pulse들의 양쪽 말단에서의 전반사영향으로 발생한 신호들까지 합쳐지면 검출하려는 PD신호를 분리하는 것이 더욱 어렵게 됨.

실제 Field에서 케이블의 PD측정시, 상기와 같은 여러 특성 문제 때문에 PD검출센서를 설치한 장소로부터 수십m정도 떨어진 위치에서 PD발생하여도 PD검출은 거의 곤란할 것으로 추정

따라서 전력케이블에서 PD감시하기 위해서는 예를 들어 수십m간격으로 PD센서를 여러 개 설치하거나, 또는 검출하고자 하는 부분과 가까운 위치에 각각 PD센서를 설치하는 방안 검토필요.

2014/12/30, by b.k.kim