

초고압 XLPE 케이블에 대한 실선로 부분방전 진단기술 동향

정진삼* · 이수길 · 이창영 · 전승익 · 박완기**

(*한국전기연구원, **LG 전선(주) 전력연구소)

1. 머리말

XLPE 전력 케이블은 가교 폴리에틸렌(Cross linked polyethylene : XLPE)을 주 절연체로 사용하는 케이블로서, 선로의 시공성, 유지보수의 용이성 및 환경 친화성 등으로 인해 절연유가 함유된 절연지로 제작하는 OF 전력 케이블 시스템을 대체하여 국내외 지중 송전 시스템의 주종을 이루고 있다.

XLPE 케이블 제조 기술과 접속 공법의 발전에 따라서 XLPE 케이블 시스템의 신뢰성이 꾸준히 향상되어, 현재 500kV급의 지중 케이블 시스템에도 XLPE 케이블을 사용하기에 이르렀다. 이와 더불어 1960년대 이후에 초고압 케이블용으로 전통적으로 사용했던 OF 케이블 시스템의 준공 후 품질검사 방식(DC 전압 시험)을 고분자 케이블에 적합한 방식으로 개선해야 한다는 기술적인 요구에 의해서, DC 전압 시험의 유해성에 대한 분석 자료와 AC 전압 시험으로의 대체 사례들이 보고되고 있다 [1]~[8].

초고압 선로의 경우, 대부분 국가 기간망인 선로의 중요성과 통전 중에 사고가 발생할 경우에는 자체 시스템 손상에 의한 전력송전의 제한은 물론, 연계된 시스템의 고장과 수명 단축 등의 부작용을 초래할 수 있기 때문에 철저한 준공 후 품질 검사 방법에 대한 연구가 진행되어 현재 일본등 선진국에서는 220kV급 이상의 XLPE 케이블 시스템에 대한 준공시험 방법으로 AC 전압을 사용하는 내전압 시험과 부분방전 시험을 병행하여 실시하는 추세에 있다[9].

본 보고에서는 현재까지 개발되어 온 실선로에 대한 부분방전 측정기술을 서술하고, 선진국에서의 적용 사례를 분석하였으며 국내 기술 현황에 대해서 전망하였다.

2. 본 론

2.1 송전 케이블 시스템에 대한 실선로 부분방전 측정기술 개요

송전 케이블에 대한 실선로 부분방전 측정은 정전용량이 매우 큰 선로 조건 때문에 전력 케이블 생산 공장 등에서 사용하는 자재 출하 시험용 부분방전 시험법을 실시하기가 기술적으로 곤란하다. 이 때문에 실선로에 대한 부분방전 측정법은 케이블 접속 부위에 대해서 고주파 대역의 방전 신호를 측정하는 HFDP(High Frequency Partial Discharge) 측정법과 부분방전 발생시에 수반되는 진동파를 측정하는 초음파 측정법이 개발되고 있다.

접속부위에 대한 부분방전 측정법 중에 하나인 초음파 측정법은 매질의 특성에 따른 초음파 신호의 감쇄가 매질의 두께에 따라서 매우 커서 측정 감도를 수백 pC 이하로 낮추기가 기술적으로 불가능하며 감쇄의 정도도 매질의 형상 및 종류에 따라서 일정하지 않기 때문에 복잡한 절연 구조와 두꺼운 절연층을 가지는 XLPE 케이블 시스템(특히 접속함)에의 적용에는 한계점이 있다. 이 반면에 HFDP 측정법은 케이블 절연체 및 접속함을 구성하는 부품을 통과할 때 감쇄가 적고 부품간의 계면을 통과할 때 반사 특성이 좋으며 고주파의 특성을 이용하여 케이블 외부에서도 쉽게 측정할 수 있는 원리를 이용한 HFDP 측정법이 초고압 케이블 시스템 실선로에 대한 부분방전 측정에 적합하다. 이 때문에 부피(길이)가 비교적 작은 전력기기(GIS 및 변압기) 등에는 초음파를 이용한 부분방전 측정기를 사용하는 사례가 많고, 케이블 시스템은 그 부피(길이)가 비교적 크고 길기 때문에 감쇄특성이 좋은 HFDP 측정법을 주로 사용하고 있다.

표 1. 케이블 시스템에서의 신호 감쇄 특성

	초음파 측정	HFPD 측정
기본 감쇄도 (dB/km)	수천 dB/km 이상	5 ~ 10 dB/km
매질별 감쇄 차이	수십 ~ 수백배	수배
전파속도 (km/s)	2 ~ 7 km/sec	1.7 ~ 2.0 x 10 ⁹ km/sec
반사 및 계면 투과성	반사율 높음, 계면투과성 나쁨	반사율 및 계면 투과성 좋음

케이블 절연층을 비롯하여 각종 전력기기에서 발생하는 부분방전 전류 펄스는 수백 psec의 펄스 상승시간 및 수 nsec 정도의 펄스 지속시간을 갖는다. 이러한 부분방전 신호의 주파수 스펙트럼을 보면 그림 1과 같이 수백 MHz까지의 주파수 대역에 걸쳐서 분포된다. 이 특성을 이용하여 1MHz 이상의 높은 주파수에 존재하는 PD 신호를 케이블 외부에서 측정할 수 있게 된다. 또한 외부 노이즈 신호는 기존의 저주파 측정법에서 사용하는 주파수 대역 (800kHz)에서는 쉴드룸 등의 특별한 환경에서만 측정할 수 있을 정도로 크게 유입되지만 고주파 대역으로 갈수록 일부 특정 주파수 대역을 제외하고는 크게 감소된다. 이러한 부분방전 신호의 주파수 특성을 이용하여 노이즈 신호가 큰 특정 고주파 대역을 피해 최적의 S/N비(외부 노이즈 신호 크기에 대비한 부분방전 신호 크기)를 가지는 고주파 대역을 선정하여 부분방전을 측정할 경우 부분방전의 측정 감도를 크게 높일 수가 있다.

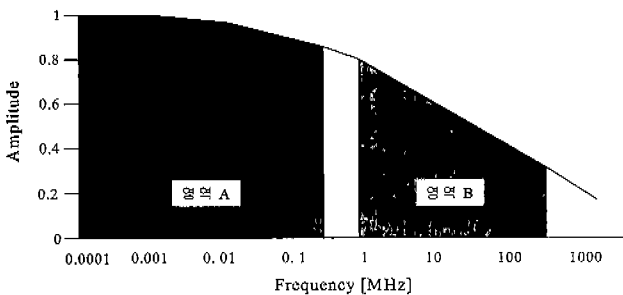


그림 1. 부분방전 스펙트럼

HFPD 측정법은 부분방전 신호의 검출 원리에서부터 종래의 저주파 부분방전 측정과는 개념이 다르다. 절연체내에서 발생된 부분방전은 절연체 양단에 형성시킨 전극에서의 겉보기 전하(Apparent Charge)의 형태로 나타나고 종래의 저주파 부분방전 측정법은 이러한 겉보기 전하를 측정하는 것이다. 그러나 절연체 중의 부분방전에 의한 전류 펄스는 케이블을 따라 진행하는 Traveling wave의 형태로 나타나며, HFPD 측정은 이러한 Traveling wave를 다양한 방식의 센서로써 커플링하여 고주파 대역에서 신호를 검출하는 측정법이다. 또한 케이블을 따라 진행하는 Traveling wave는

진행거리에 따라 신호의 감쇄가 비교적 적고 일정하게 일어나며, 이러한 특성을 이용할 경우 HFPD를 측정함으로써 실선로에서의 부분방전의 발생 위치 검출이 가능해진다.

표 2. 저주파 부분방전 측정법과 HFPD 측정법 비교

	저주파 측정법	HFPD 측정
측정 방법	Coupling Capacitor 및 측정 임피던스에 의한 명목 전하 측정	케이블에 센서를 직접 부착하여 Travelling wave 측정
측정 주파수 대역	수십 kHz ~ 수백 kHz	수 ~ 수백 MHz
측정 대상	단조장 케이블 및 접속함	장조장 실선로 및 단조장
측정 환경	육내 Shield Room	육외, 육내
케이블 진단상태	사선 진단	사선, 활선 진단

고주파 신호의 검출하기 위해서는 각종 센서들이 필요하며, 이러한 센서들의 검출 감도 향상을 위해 다양한 방법들이 연구되고 있다. 표 2는 기존의 저주파 부분방전 측정법과 HFPD 측정법을 비교한 것이다.

2.2 HFPD 측정용 Sensor의 종류(10)

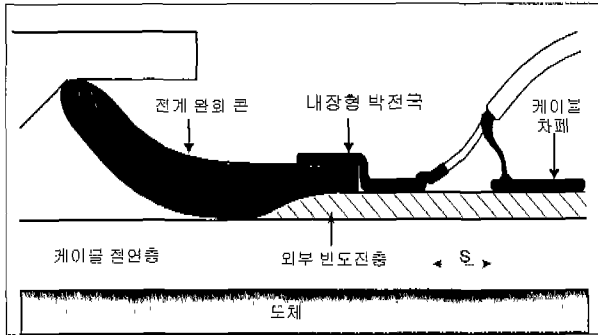
HFPD 측정을 위한 센서 기술은 신호의 검출 원리에 따라 크게 유도성, 용량성(또는 저항성) 방식으로 나눌 수 있다. 유도성 방식이란 케이블 금속 표면이나 접지선을 흐르는 고주파 전류 펄스의 유도 성분을 검출하는 방식이다. 이에 비해 용량성 방식은 전력케이블의 반도체 표면에 금속 전극을 설치하고 케이블 절연층 및 반도체층을 따라 진행하는 고주파 신호를 적정 크기의 용량을 가지며 High Pass Filter의 구조를 가지는 센서로 그 신호를 검출하는 방식이다.

또한 용량성 방식은 센서의 부착위치에 따라 내장형과 외장형으로 나눌 수가 있다. 내장형은 케이블 또는 접속함의 내부에 센서가 위치하는 것으로, 케이블 시스템의 포설시 센서를 설치하여 신규로 포설되는 선로의 부분방전 감시 시스템으로 사용 가능하다. 외장형은 케이블 및 접속함의 외부에 설치되는 것으로 센서의 설치시에 케이블 시스템의 수정이 필요 없기 때문에 감시 시스템용과 기존에 포설된 선로의 건전성을 진단하는 수단으로도 사용할 수 있다. 대표적인 HFPD 측정 센서 기술은 다음과 같은 방식이 있다.

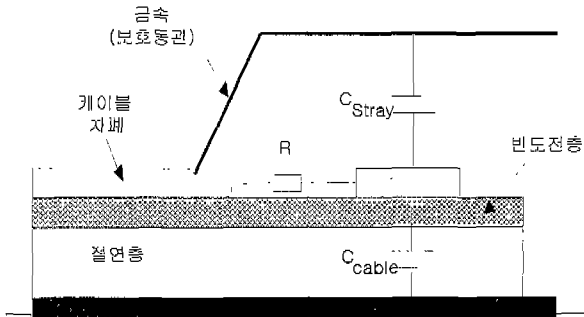
1) 내장형 금속 박전극

이 방법은 그림 2에서와 같이 일정 크기의 금속 포일 전극을 반도체층 표면에 설치함으로써 신호를 검출한다. 접속재를 설치하는 과정에서 센서를 설치해야 하기 때문에 기존에 포설된 선로에서는 적용 불가능하며, 새로이 포설되는 선로에 대한 부분방전 측정용으로 적용이 가능하다. 검출원리는 설치된 전극이 반도체층 표면저항 R과 금속 보호동관의 표유 정전용량 C_{stray} 및 전극과 도체사이의 정전용량 C_{cable} 의해 RC 임피던스 및 High pass filter로 작용하게 되는 원리를 이용하고 있다. 내장형 금속 박전극을 사용하는

측정법은 설치 및 작동 원리가 간단하고 매 접속함마다 설치되어 있을 경우 부분방전 신호의 감쇄 정도 및 진행파 도달 지연시간을 측정하여 방전 위치를 수 m 이내로 찾아낼 수 있는 장점이 있다.



(a) 센서 설치 예



(b) 등가 회로

그림 2. 내장형 박전극 개념도

2) 외장형 박전극

이 방식은 그림 3과 같이 절연 접속함(Insulation Joint Box : IJB)의 절연통을 사이에 두고 접속함의 방식층 표면에 설치된 금속 박전극 통해 신호를 검출하는 방식이다. 이 기술은 주로 IJB의 경우에만 적용되며, 기 포설된 선로에 대한 부분방전의 측정도 가능하다.

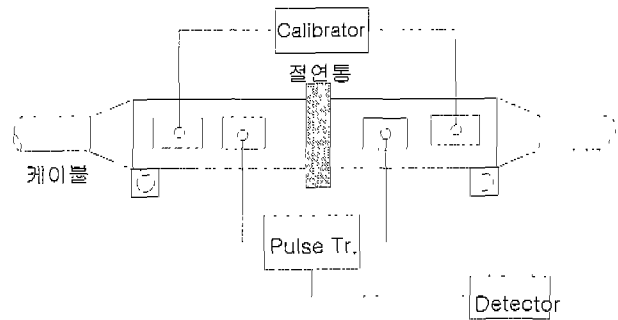
접속함 표면에 설치된 전극은 그림 3의 (b)와 같이 등가화 할 수 있다. 접속함 내부의 한 쪽에서 부분방전이 발생할 경우 다른쪽 케이블이 갖는 Capacitance C2는 Coupling Capacitor의 역할을 하게 된다. 따라서 부분방전 신호는 금속전극에 의한 C3, C4를 경로로하여 두 전극 사이에 연결된 Pulse Transformer를 통해 검출된다.

측정 감도는 고주파 대역에서(수~수백MHz) 최적의 S/N 비를 가지는 주파수를 주변 환경에 따라서 설정한 후 측정할 경우 최소 1~10pC까지 검출 가능하다. 최근에는 보통 접속함(Normal Joint Box : NJB)의 외함의 구조를 변경하여 상용주파전압에 대해서는 NJB의 기능을 하지만 고주파 신호에 대해서는 IJB로서 작용하도록 하여 이 방식의 검출 기술을 사용하기도 한다.

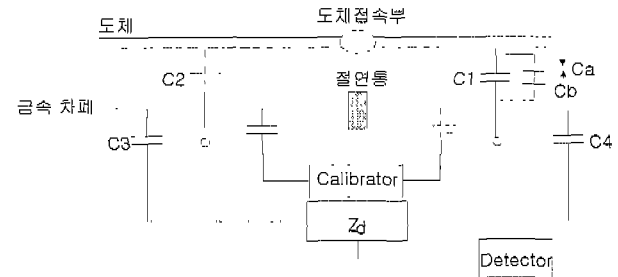
3) 유도성 센서 (코일 센서)

이 방식은 케이블 표면을 따라 흐르는 고주파 부분방전

전류 Pulse를 측정하는 방식으로써 주로 Wire Shield 케이블의 경우에 적용되는 방식이다. 케이블 주위로 원형 코일을 설치하게 되면 케이블의 Wire Shield를 따라 흐르는 부분방전 전류에 의한 자장이 원형 코일에 유도되는 원리를 이용한 것이다. 한편 AI 및 연피 케이블의 경우에는 케이블의 차폐를 절단하여 Wire Shield 처리를 하여 센서를 설치하기도 하지만, 케이블 방수 문제등으로 실선로의 적용에는 어려움이 있다. 유도성 센서의 또 다른 Type으로서 접지선을 따라 흐르는 부분방전 전류를 정전유도 검출하는 방식도 있다.



(a) 센서 설치도



(b) 등가 회로

그림 3. 외장형 박전극 원리

4) 방향성 센서 (Directional Coupler Sensor : DCS)

방향성 센서는 동근 판형의 동판을 외부 반도전층에 설치하여 신호를 검출하는 방식이며 설치된 유도성 및 용량성 센서로 부터의 복합적인 신호 분석을 통하여 신호를 검출하는 방식이다. 이 방식을 사용하면 부분방전 신호의 전달 방향을 논리적으로 판별이 가능하다. 즉, 부분방전이 발생할 경우, 각 동판에 설치된 단자 A,B 또는 C,D에는 유도성 결합으로 인해 서로 다른 극성의 신호가 유도되고, 또한 센서의 용량성 결합으로 인해 단자 A,B 또는 C,D에는 동일 극성의 신호가 유도된다. 이러한 두가지 결합 작용의 중첩에 의해 각 단자에서 측정되는 신호의 상쇄 또는 증가가 일어나고 이를 통해서 부분방전 발생 신호의 유입 방향을 확인할 수 있다. 측정 주파수 대역은 2 ~ 500MHz 이며 센서의 결합 정도에 따라 검출 감도가 달라진다.

이상과 같은 4가지의 대표적인 HFPD 검출 방식 이외에도 유사한 원리로서 부분방전을 검출하는 다양한 방식의 센서들이 있다. 이들 HFPD 측정용 센서들의 적용은 기본적으로 케이블 Sheath 구조(Wire shield Type, AI 또는 연피),

접속재 종류, 설치 위치, 선로 계통, 현장 설치 여건 등의 여러 가지 조건에 따라 선택되어진다.

2.3 선진국의 HFPD 측정 기술 적용 사례

1) 일본의 사례[12][13]

초고압 XLPE 케이블 시스템의 초고압화가 가장 앞서 있는 일본의 경우, 초고압 선로에 대한 AC 내전압 준공 시험 및 HFPD 측정 시스템에 대한 필요성을 인지하고 동경전력, 중부전력, 관서전력 등 전력회사들과 전력케이블 제조사(히타치社, 후루카와社, 후지쿠라社, 스미토모 社)를 중심으로 HFPD 측정 기술을 발전시켜왔다. 특히, 275kV 이상의 모

든 XLPE 케이블 선로에 대한 준공시험으로는 1.3U₀의 전압을 인가하는 AC 시험을 실시함과 동시에 HFPD 시험을 필수적으로 실시하고 있다. 'H'사의 예를 보면 '89년 275kV XLPE 케이블에 대한 활선 진단을 시작으로 154kV, 275kV, 500kV 선로에 대한 HFPD 측정을 지속적으로 실시해 왔으며 특히, '94년과 '97년에 실시한 275kV XLPE 케이블 시스템에 대한 준공 시험시에는 결함이 있는 접속항을 검출하여 교체한 사례가 있다. 또한 신경회로망 및 전문가 시스템을 이용한 자동 판별 시스템의 개발을 완료하여 활용하는 수준으로 알려져 있다. 표 3에 'H'사에서 실시한 HFPD 측정 사례(~'97년)를 나타내었다.

표 3. 일본 'H' 사의 HFPD 측정 사례(11)

전력 회사	년도	대상선로	공장(km)	측정목적	과전전압 (AC)	측정감도 (pC)	PD발생여부
동경전력	'89.5	275kV CAZV 1400SQ	9.6	활선진단	운전전압	IJ:2,NJ:13~20,EBG:3	No PD
	'89.10	66kV CV 800SQ	60m	검출법검증	40kV	EBG:15,EBA:100	No PD
	'90.5	66kV CV 1200SQ	3.1	운전중 검출가능성 검토	운전전압	IJ:500	No PD
	'90.6	275kV CAZV 800SQ	0.6	활선진단	운전전압	2~20	No PD
	'90.10	275kV CAZV 800SQ	0.6	활선진단	운전전압	EBA:20,EBO:1	No PD
	'91.4	275kV CAZV 800SQ	0.6	활선진단	운전전압	EBA:20,EBO:1	No PD
	'91.6	275kV CAZV 800SQ	0.6	활선진단	운전전압	1~20	No PD
	'91.12	275kV CAZV 1400SQ	9.6	활선진단	운전전압		No PD
	'91.12	275kV CAZV 1400SQ	9.6	활선진단	운전전압		No PD
	'94.5	275kV CAZV 1400SQ	6.8	준공시험	207kV	7	PD
	'94.7~11	275kV CAZV 1400SQ	6.8	자동판별법검증	운전전압	9	No PD
	'95.3~4	275kV CAZV 1400SQ, POF	23.3	준공시험	184kV	10~20	No PD
	'95.4	275kV CAZV 1200SQ등	32.5	준공시험	184kV	IJ:7.6,NJ:95	No PD
	'95.5	500kV CAZV 1400SQ	0.6	활선진단	운전전압	EBG:1	No PD
	'95.8	275kV CAZV 2500SQ	20	준공시험	207kV	20	No PD
'96.3	275kV CAZV 2500SQ	20	준공시험	207kV	20	No PD	
'96.7	275kV CAZV 2500SQ	20	준공시험	207kV	10	PD	
관서전력	'93.6	275kV CAZV 2500SQ	26.9	준공시험	207kV	IJ:10	No PD
	'93.12	154kV CV T 400SQ	2.6	준공시험	운전전압	CH:1,YJ:78	No PD
	'94.10	77kV CV 600SQ	0.6	준공시험	88.55kV	CH:5,YJ:20	No PD
	'94.11	77kV CV 1000SQ	0.5	준공시험	88.55kV	CH:215	No PD
	'95.1	154kV OF 800SQ	8.3	검출법검증	운전전압	IJ:6	No PD
	'96.8	154kV CSZV 1200SQ등	4.8	감도측정	운전전압	IJ:3	No PD
	'96.9	77kV CV 1500SQ	5.9	감도측정	운전전압	IJ:10	No PD
	'96.9	154kV CSZV 1200SQ	2.8	감도측정	운전전압	IJ:20	No PD
	'96.11	33kV CV 250SQ등	2.1	활선진단	운전전압	IJ:2	No PD
	'97.3	77kV CV 1500SQ	5.9	감도측정	운전전압		
	'97.3	275kV CSZV 2500SQ	6.4	준공시험	207kV	IJ:2	No PD
	'97.3	275kV CSZV 2500SQ	18	준공시험	207kV		
	관서전력	'92.9	77kV 10개 선로(CV,OF)		활선진단	운전전압	YJ:2
'93.6~9		77kV CV 6개 선로		활선진단	운전전압	IJ:18,NJ:22	No PD
'94.2		154kV CV 1500SQ	2.8	감도측정	운전전압	IJ:3	No PD
'95.4		275kV CSZV 1500SQ	13.8	준공시험	184kV	IJ:4	No PD
'95.6		77kV CV T 250SQ, OF 250SQ	1.4	활선진단	운전전압	DJ:49	No PD
'95.7		275kV CAZV 600SQ	1.1	준공시험	207kV	IJ:2	No PD
'92~'96	감도확인용 (8개선로)			운전전압			

최근에 완공된 Shinkeiyo-Toyosu 500kV T/L에 대해서는 AC 내전압 준공 시험을 실시함과 동시에 Neural Network 및 Expert System을 응용한 자동 판별 기능까지 갖춘 PD 감시 시스템을 적용, 부분방전 발생 여부를 확인하였다. 이 장비는 PD 발생시 20초 후에 패턴 인식이 완료되어 1분 후면 Alarm 신호를 출력 가능하도록 설계되어 있다. 그림 4에 Shinkeiyo-Toyosu 500kV Line에 장치된 HFPD 감시 장치의 구성도를 나타내었다.

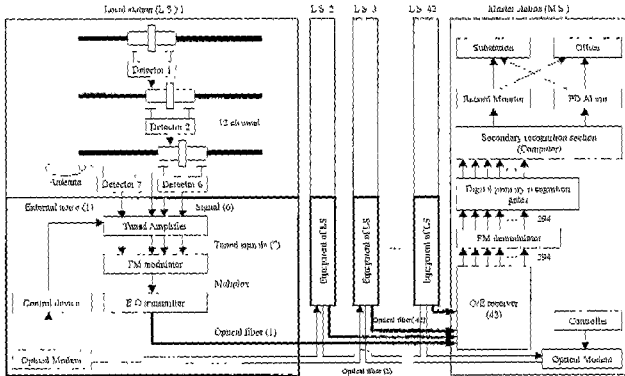


그림 4. Shinkeiyo-Toyosu 500kV Line HFPD Monitoring장비 구성도

2) 유럽의 사례

(1) 독일의 400kV 선로 준공시험[9]

유럽의 우수 업체들에게 1 년간의 Pre-Qualification 시험을 실시하도록 하여 그 사용 가능성을 검증 받은 400kV XLPE 케이블 시스템(6.3km 구간)을 베를린에 포설하였다. 준공시험으로서는 대용량 이동형 내전압 시험기(Max. 32 MVA, at 25Hz)를 설계, 제작하여 AC 준공시험을 실시하였고 이와 동시에 직선, 종단 절속함 전체에(60개) 대한 HFPD 시험도 병행 실시하였다. PD 시험 결과, Joint 한곳에서 유해한 PD가 검출되었으며, 이를 해체하여 선로 사고를 일으킬 수 있는 결함을 발견하게 되었고, 수리 및 재시험 결과, PD가 제거된 것을 확인할 수 있었다.

AC 준공 시험은 GIS 종단에서 실시하였으며 순차적으로,

- ① 각상별, 254kV/15분 이후에 230kV/45분 가압 후 (PD 시험 병행)
- ② 1685~1900A/20일의 동전 시험을 실시하여 실 통전에 대한 케이블 포설 품질 및 냉각 시스템에 대한 품질을 검증하였다.
- ③ 시험의 마지막 단계로써 1.73U₀에 해당하는 400kV/15분 및 350kV/45분의 시험전압을 각 상 마다 인가 (PD시험 병행)하여 이상 없음을 확인하는 것으로 준공시험을 마무리하였다.

또한, 각 Step별 PD 측정 센서로는 Directional Coupler 와 Capacitive Sensor를 사용하였고 주파수 튜닝을 할 수 있는 장비를 도입, 측정강도를 7 [pC]까지 유지하였다.

표 4에 준공시험에 사용된 내전압 시험기의 구성에 따른 시험 용량을, 그림 5에 시험기 배치와 GIS에 연결된 시험 단말을 나타내었다.

표 4. 시험기 구성에 따른 시험 용량

	Rated Volt. [kV]	Test Volt. [kV]	Capacitance [μ F]	Cable Length [km]	Test Current [A]	Test Power [MVA]
a)	110	160(2.5U ₀)	2.5	12.5	64	10.3
	132	190	2.5	12.5	75	14.3
	150	220	2.1	10.5	80	17.6
	220	254(2.0U ₀)	1.6	8.0	80	20.3
b)	110	160(2.5U ₀)	5.0	25	128	20.5
	132	190	5.0	25	150	28.5
	150	220	4.2	21	160	32.2
	220	254(2.0U ₀)	3.2	16	160	40.6
c)	400	400(1.73U ₀)	1.25	6.5	78.5	31.4
		504(0.8U _p)	0.8	11.5 (70nF/km)	80	40.3

※ Test system 2 x 80A / 254kV

- a) single test system
- b) two test systems in parallel
- c) two tests systems in series



그림 5. 시험기 배치와 GIS에 연결된 시험 단말

(2) 주요 해외 업체별 HFPD 측정 시스템 기술 현황[10]

현재까지 유럽의 HFPD 측정기술을 개발하고 응용 가능한 수준의 업체는 약 4개 업체로 대별되며, 각각 노이즈 저감과 부분방전 신호의 측정을 위하여 여러 가지 측정 방식을 시도하고 있다. 이와 더불어 개발되는 시스템의 현장 적용성을 확보하기 위하여 실선로 측정 실적을 축적하여 측정 시스템의 신뢰성을 제고하는데 주력하고 있다. 표 5에 각 업체별 검출방법, 측정조건, 현장적용성, 측정장치의 기본 사양, 데이터 해석 방법 등에 대해서 나타내었다.

2.4 국내 기술 현황

현재, 국내 154kV급 지중선로의 대부분을 XLPE Cable을 사용하고 있고 실 적용 실적 또한 15년 이상 경과하는 등 노후화된 선로에 대한 비파괴 진단 기술이 요구되고 있는 상황이다. 또한, 345kV 이상의 초초고압 선로의 적용계획에 대비한 AC 및 PD 준공시험 방안과 준공 후 지속적 품질 감시에 대한 필요성이 대두되고 있다.

표 5. 업체별 HFPD 측정 기술 현황

항목	업체	Lemke Diagnostics	Power Diagnostix	BICC	일본 'H'사 등 (규격 동일)
1. 검출 방법	대상	접속함	접속함	접속함	접속함
	원리	용량성, 유도성	용량성, 안테나	용량성, 접지선	용량성
2. 측정 조건	주파수 대역	2 ~ 500MHz	2 ~ 20 MHz	1 ~ 40MHz	1 ~ 50MHz
	활선진단 가능성	활선/사선	활선/사선	활선/사선	활선/사선
3. 적용성	특수센서 필요성	DCS(Directional Coupling Sensor)	케이블 반도전 저항 이용	용량성 센서	용량성 센서
	기 포설 접속함 응용성	신규선로만 가능	신규선로만 가능	가능(주파수 제한)	신규, 기존선로 가능
4. 측정 장치	센서 설치위치	접속함별 2개소	접속함별 1개소	접속함별 1개소	접속함별 1개소
	데이터 취득	컴퓨터	컴퓨터	전문가 수작업	컴퓨터
	모니터링	가능	가능	불가	가능
	데이터 보정	펄스크기	펄스크기	펄스크기	10 ~ 20 pC
	측정감도	1 pC (최저)	1 pC(최저)	10 ~ 20 pC	1 pC(최저)
	주파수 튜닝	가능	X	X	가능
	위치판별	가능	X	X	가능
5. Data 해석	시험결과 해석	전문가 판단	전문가 판단	전문가 판단	인공지능 판별 후 전문가 판단
6. 적용성	적용실적	2년 이상	6년	3년	10년 이상
	특이실적	Bewag 사고 예방	수개 선로 사고 예방	결함 검출 실적없음	여러 선로 교체 실적

이 때문에 산업계와 학계, 그리고 연구기관을 주축으로 90년대 중반 이후에 실선로에 대한 PD 측정 및 감시 시스템 구현 기술이 연구되어, 현재 PD 진단 시스템의 기술 기반을 갖추고 실선로에 대한 적용성 검증과 신뢰성 향상에 주력하고 있다. XLPE Cable 포설 실적이 많은 국내 지중 선로의 환경에 대해, PD 진단의 국내 적용을 위해서는 기 포설되어 있는 154kV 노후 선로에 대한 비파괴 진단 기술과 신규 포설 예정인 345kV급 초초고압 선로의 포설 후 준공 시험 및 감시 시스템화라는 2가지 맥락으로 지속적인 연구가 필요하다.

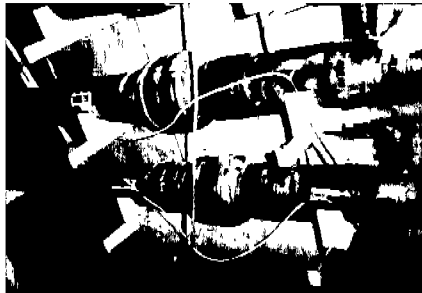
1) 기 포설 선로에 대한 비파괴 진단 기술 현황

기 포설 선로에 대한 비파괴 진단 기술은 사용연한이 30년 이상인 XLPE Cable 선로에 대한 진단이라는 점에서는 최대 사용 연한이 20년 미만인 국내 전력계통에 적용하기 시기 상조일 수 있으나, 각 계통별 사용 조건의 차이와 열적/기계적 스트레스가 기준치에 비해서 높은 선로의 열적, 화학적 가속열화를 고려하면 국내 포설된 선로에 대한 비파괴 진단을 지속적으로 실시할 필요성이 있다고 판단된다. 현재까지 개발된 기 포설 접속함에 대한 HFPD 진단 방법 중, 그 유용성이 검증된 방식은 외장형 박전극을 사용하는 방법(그림 3 참조)이 있다.

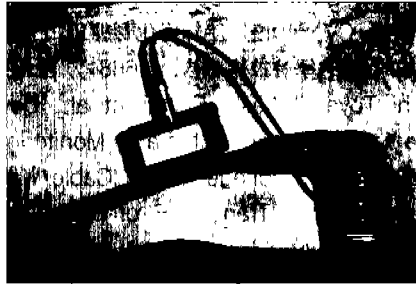
일본의 사례로 보아, 외장형 박전극을 사용하는 PD 측정 방법은 선로의 특성을 파악하고 적절한 안테나를 설치하여 노이즈를 제거해야 하며, 접속함에 대한 센서 설치 후 각 센서에서 검출되는 신호를 실시간으로 분석하여 PD의 발생 여부를 판단해야 한다. 하지만 실험실내의 PD 측정 방식과 달리 3상이 Crossbond 되어 있어 한 상에서 발생하는 신호가 각 상으로 전파되고, 기중중단 접속함과 가스중 중단 접속함으로부터 유입되는 노이즈가 진성 PD의 판단을 어렵게 하는 등의 기술적 어려움이 있기 때문에, 실 선로에 대한 많은 측정 경험 및 측정 방법 개선으로 표준화된 측정 방법이 개발되어야 하는 실정에 있다.

이 때문에 국내에서는 LG전선(주)에서 현장에서의 적용성 및 신뢰성 향상을 위한 현장 측정 활동을 지속적으로 실시하고 있으며, 이에 따른 표준화의 시기도 앞당겨질 것으로 판단된다. 또한 선로의 노후화에 따른 열화 특성을 검출하기 위한 PD 측정은, PD 발생여부 및 발생량 자체에 의미를 부여하기보다는 지속적인 감시 활동을 통한 PD 발생 패턴의 변화를 추적하는 것이 중요하기 때문에, 선로에 대한 PD 측정 결과를 주기적으로 기록 관리하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

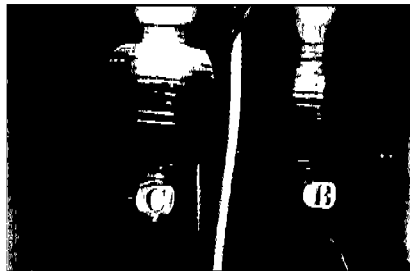
그림 6은 현장에서의 선로 측정 활동의 예를 나타내었고, 그림 7에 측정된 코로나 신호의 예를 각각 나타내었다.



(a) 직선 접속함(외장형 박전극)

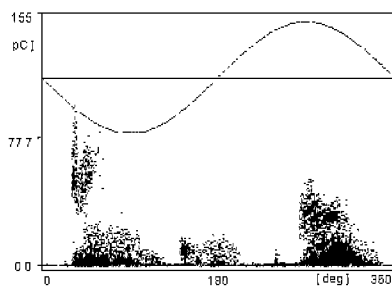


(b) 크로스 본드선 (L Sensor)

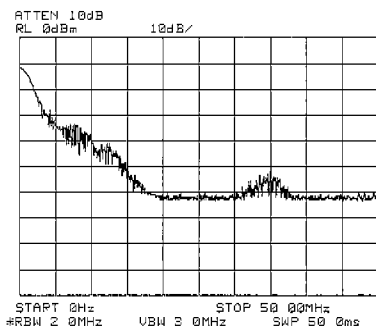


(c) 종단 접속함 (L Sensor)

그림 6. 현장 측정 예 (센서 부착 장면)



(a) ϕ -Q-N 패턴



(b) 주파수 스펙트럼

그림 7. 측정된 코로나 신호의 예 (LG전선(주))

2) 신규 포설 선로에 대한 준공시험으로서의 HFPD 기술
 앞 절에서 언급한 바와 같이 이미 일본 및 유럽 등 선진
 국에서는 275 및 400kV 급의 포설 후 준공시험으로 AC 내
 전압 시험 및 PD 시험을 병행하여 실시하는 추세에 있으며
 특히, 일본의 경우 275kV 이상의 XLPE 선로에 대해서는 전
 선로에 대해서 AC 내전압 시험 및 PD측정을 준공시험으로
 실시하고 있다. 이러한 준공시험의 추세는 초고압 선로
 의 기간망으로서의 중요성과 초고압 XLPE 케이블의 적용을
 위하여 세계적으로 검토되었던 고분자 케이블에 대한 DC
 시험의 유해성/변별력 부족 등에 대한 개선 필요성 등이 강
 력히 작용한 것으로 보인다. 이에 따라서 현재, 계획되어
 있는 국내 345kV XLPE Cable 시스템에 대한 포설 후 준공
 시험의 기술적인 검토와 더불어 준공 시험으로서의 HFPD
 시험 기술이 확보되어야 할 것으로 판단된다.

3. 맺음말

지속적으로 늘어나는 전력 수요와 고품질 전력공급에 대
 한 고객의 요구증대, 이와 더불어 초초고압화에 따르는 단
 일 선로의 부하 부담을 증가 등으로 세계적으로 지중 송전
 선로에 대한 진단/감시 기술개발 중요성이 더해지고 있다.
 또한 고주파 처리기술의 발전과 초고압 케이블 시스템에 대
 한 고주파 기술의 접목으로 인해, 실선로에 대해서 부분방
 전을 측정할 수 있는 HFPD 측정기술이 개발되어 실용화
 단계에 있으며, 이미 그 효용성을 선진국의 사례에서 입증
 받고 있다.

이미 선진국에서는 275kV 이상의 XLPE 케이블 시스템의
 준공시험으로서 AC 내전압시험 및 HFPD시험을 실시하고
 있으며, 그 유용성이 여러 차례의 준공시험시 결함 검출 및
 이에 따른 운영중 사고 예방 실적으로 나타나고 있다.

또한, 국내의 HFPD 측정 기술도 선로 환경에 따른 측정
 기술을 확보하려는 노력 진행되고 있어서 국내에도 XLPE
 케이블 시스템의 준공시험 및 운전중의 신뢰성 향상, 사고
 예지 기능의 확보를 위한 부분방전 측정 시스템의 적용 가
 능 시기가 앞당겨 질 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] H. Auclair, W. Boonem M.S. Papadopoulos, "Development of a new After Laying Test Method for High Voltage Power Cable systems", International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1988.
- [2] Naohiro Hzum, Tatsuki Okamoto, Yasuyuki Ikeda, Takahisa Imajo, "Space Charge Measurement in Water Tree Degraded XLPE Cables", CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry).

- [3] Kenji Kaminaga, Naoki Takeda, "Study of DC Withstand Test as After-Laying Test for 500kV XLPE Cable", T. IEE of Japan, Vol 117-B, No.1, 1997.
- [4] C. Aucourt, W. Boone, W. Kalkner, R.D. Naybour, F. Omnello, "Recommendations for New After Laying Test Method for High Voltage Extruded Cable", CIGRE, 1990.
- [5] H. Schadlich, J. Klass, R. Brilka, "Field Testing of XLPE Insulated Cables in 220kV and 380kV Systems", CIGRE, 1990.
- [6] W. Schufft, W. Hauschild, P. Coors, "Powerful Frequency-tuned Resonant Test Systems for After Laying Tests of 110kV XLPE Cables", Ninth International Symposium on High Voltage Engineering.
- [7] G.C. Paap, A.N. Veryveen, "A 50Hz After Laying Test High Voltage Extruded Insulation Cables", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No.1, January, 1992.
- [8] Katsuki Uchida, Shin-ichi Kobayashi, T. Kawashima, Ken-ichi Hirotsu, Hitoshi Inoue, Hideo Tanaka, Susumu Sakuma, "Study on new After Laying Test Methods for XLPE Cable Lines", T. IEE of Japan, Vol 115-B, No.10, 1995.
- [9] R. Plath; U. Herrmann, K. Polster, J. Spiegelberg; P.Coors, "After Laying Tests of 400kV XLPE Cable Systems for Bewag Berlin", Eleventh International Symposium on High-Voltage Engineering, Vol 5.276.P5~5.279.P5, 1999.
- [10] 한국 전력공사 전력연구원, "송전 케이블의 절연 열화 진단기법의 정립 및 수명 예측에 관한 연구", 1999.
- [11] "特別高壓 CV 케이블 絶縁劣化形態와 絶縁診断技術의 動向", 電氣學會技術報告, 제668号, pp122~123.
- [12] Atsushi Toya, Takeshi Endoh et al, "Development of Partial Discharge Automatic Monitoring System for Extra-High Voltage XLPE Cable Lines using Neural Network", Trans. IEE of Japan, Vol.119-B, No.2, Feb.,1999.
- [13] Endoh T., Suzuki H., et al, "Development of a Partial Discharge Automatic-Monitoring System for EHV XLPE Insulated Cable Lines", JICABLE, pp65 5~659, 1995.