

L G 電 線 (주)
전력연구실장 김 동 욱

CV 전력 케이블의 실선로 부분방전 측정 기술 동향

1. 서론

CV 전력 케이블은 가교 폴리에틸렌(Cross linked polyethylene : XLPE)을 주 절연재료로 사용하고 있는 케이블로서, 선로의 시공성, 유지보수의 용이성 및 환경 친화성 등으로 인해 기존 Oil이 함침된 절연지로 사용하는 OF 전력 케이블 시스템을 대체하여 국내외 지중 송전 시스템의 주종을 이루고 있으며, 국내의 포설 거리도 약 500km에 이르고 있다. 그러나 이 같은 CV 전력 케이블의 사용량의 증가와 아울러 선로 사고 또한 발생되었는데, 표 1에서와 같이 CV 전력 케이블 시스템의 사고 유형을 보면 사고의 원인은 절연체 내부의 초기 결함이나 시공 불량에 의한 초기 고장이 대부분이지만, 사용기간의 증가에 따른 자연열화로 인한 사고 가능성 역시 배제할 수가 없는 실정이다. 특히 국내에서도 사용 년수가 20년 가까이 이르는 선로가 많기 때문에 이러한 자연 열화로 인한 사고 예방을 위해 열화 진단은 필수적이라 할 수 있다.

또한 급증하는 전력수요에 대처하기 위한 대응

량 송전을 목적으로 한 기존 송전 전압의 격상에 따라, 해외에서는 500kV급 CV 전력 케이블 시스템까지 개발되고 상용화 되는 추세에 있다. 이와 더불어 선로에 대한 안전성 확보를 위한 열화 진단 시스템의 관심 또한 크게 높아지고 있다.

현재 개발되어 적용단계에 있거나 연구중인 CV 전력케이블에 대한 열화 진단 기술은 사선 진단 방법인 직류 누설전류 측정, 직류 절연저항 측정, 전위 감쇄법, 방전 흡수 전류법, 초저주파 Tan δ 측정, 잔류 전압법, 부분방전 측정법등이 있고, 활선 상태에서는 tan δ 측정, 직류 성분법, 직류 중첩법, 맥동 검출법, 교류손실 전류법등이 있지만, 대부분이 배전 케이블을 대상으로 한 수트리에 의한 열화의 진단을 목적으로 하고 있다. 그러나 154kV 이상 CV 전력 케이블은 구조상 수트리에 의한 열화보다는 절연층 중의 이물이나 내, 외부 반도체층의 돌기 등에 의한 전기트리에 의한 열화가 지배적이기 때문에 진단방법 역시 배전용 케이블의 경우와 달라져야 한다.

이러한 송전 케이블에 대한 열화 진단 방법으로 써 가장 신뢰할 수 있는 것은 전기 트리의 개시 또

〈표 1〉

국내 CV 전력 케이블 시스템 최근 사고 내역

사고년	설치년	운전기간(개월)	사고 부위	사고 원인
'92	87	59	중간 접속함	시공불량
'94	87	89	중간접속함	시공불량
'95	95	2	케이블	제작불량
'96	95	10	가스중 종단 접속함	시공불량
'97	95	16	가스중 종단 접속함	Surge 침입
'97	95	20	가스중 종단 접속함	시공불량

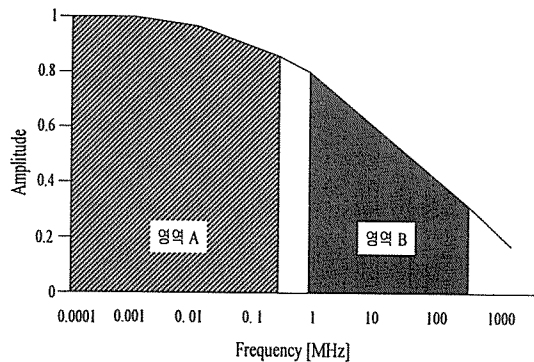
(「전기설비」 '99년 8월호)

또는 진전될 때 발생하는 부분방전의 측정이지만, 실선로에서는 기존의 부분방전 측정 시스템 구성의 어려움과 특히 현장에서 외부 노이즈등의 문제로 인해 그동안 적용이 되어 오지 못했다. 그러나 최근에 들어서는 고속 디지털 신호 처리 기술 및 장비등의 발달로 인해 외부 노이즈의 영향을 억제시켜 부분방전의 측정 감도를 높이는 방법으로 수 MHz이상의 고주파 대역에서 부분방전을 측정하는 기술이 개발되고 있으며, 이에 따라 고주파 부분방전 신호를 검출하기 위한 다양한 방법이 연구되고 있다.

2. 고주파 부분방전(High Frequency Partial Discharge : HFPD) 측정의 특징

HFPD 측정이란 부분방전의 측정 주파수 대역을 수 내지 수백 MHz의 고주파 영역에서 측정하는 것을 말한다. 케이블 절연층을 비롯하여 각종 전력기기에서 발생하는 부분방전 전류 펄스는 수백 psec의 펄스 상승시간 및 수 nsec정도의 펄스 지속시간을 갖는다. 이러한 부분방전 신호의 주파

수 스펙트럼을 보면 그림 1과 같이 수백 MHz까지의 주파수 대역을 가지지만 외부 노이즈 신호는 고주파 대역으로 갈 수록 일부 특정 주파수 대역을 제외하고는 크게 감소하게 된다. 그래서 1MHz 미만의 주파수 대역에서 부분방전을 측정하는 종래의 측정 방법은 외부 노이즈로 인해 측정 감도가 낮다. 그러나 부분방전 신호의 주파수 특성을 이용하여 노이즈 신호가 큰 특정 고주파 대역을 피해 최적의 S/N비(외부 노이즈 신호 크기에 대비한 부분방전 신호 크기)을 가지는 고주파 대역을 선정하여 부분방전을 측정할 경우 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 명목전하(Apparent Charge)의 형태로 나타나고 종래의 저주파 부분방전 측정법은 이러한 명목전하를 측정하는 것이다. 그러나 절연체 중의 부분방전에 의한 전류 펄스는 케이블을 따라 진행하는 Traveling wave의 형태로도 나타나며 HFPD 측정은 이러한 Traveling wave를 고주파 대역에서 신호를 검출하는 측정법

이다. 또한 케이블을 따라 진행하는 Traveling wave는 진행거리에 따라 신호의 감쇄가 일어나며, 이러한 특성을 이용할 경우 HFPD 측정으로서 실선로에서의 부분방전의 발생 위치 검출이 가능해진다.

고주파 신호를 검출하기 위해서는 각종 센서들이 필요하며 이러한 센서들은 설치 조건 및 신호 검출 감도등의 향상을 위해 다양한 방법들이 연구되어 지고 있다. 표 2는 저주파 부분방전 측정법과 HFPD 측정법을 비교한 것이다.

〈표 2〉 기존의 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 실 선로
측정 환경	옥내 Shield Room	옥외
케이블 진단상태	사선 진단	활선 진단
측정에		

3. 측정 방식에 따른 HFPD 기술 동향

HFPD 측정을 위한 센서 기술은 신호의 검출 원리에 따라 크게 유도성, 용량성(또는 저항성) 방식으로 나눌 수 있고, 유도성 방식이란 고주파 철심 또는 금속 전극 등을 이용하여 케이블 금속 표면이나 접지선을 따라 흐르는 고주파 부분방전 전류 Pulse를 정전 유도작용으로 검출하는 방식이다. 이에 비해 용량성 방식은 전력케이블의 반도체 표면에 금속 전극을 설치하고 케이블 절연층 및 반도체층을 따라 진행되는 Travelling wave를 전극이 갖는 정전 용량을 이용하여 신호를 검출하는 방식이다.

또한 설치되는 센서의 위치에 따라 내장형과 외장형으로 나눌 수가 있다. 내장형은 케이블 또는 접속함의 내부에 센서가 위치하는 것으로서 케이블 시스템의 포설시 센서를 설치하며, 주로 새로 포설되는 선로의 부분방전 감시시스템용으로 사용된다. 또한 외장형은 케이블 및 접속함의 외부에 설치되는 것으로서 센서의 설치에 따른 선로상의 아무런 영향을 주지 않기 때문에 기 포설 선로의 부분방전 측정에 적합한 방식이다.

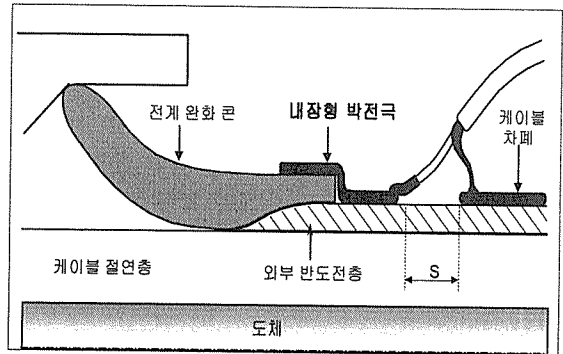
HFPD 측정을 위한 이러한 여러 가지의 검출 기술은 세계 여러 연구기관 및 부분방전 측정 시스템 장비 Maker에서 개발 및 실용화 단계에 있으며 대표적인 HFPD 측정 기술은 다음과 같은 방식을 들 수 있다.

3.1 내장형 금속 박전극

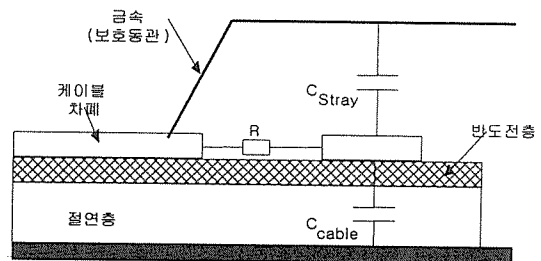
이 방법은 부분방전 측정기 제작 Maker인 Power Diagnostix사에서 제안한 방식으로써 주로 케이블 접속함의 부분방전 측정에 이용된다. 그림 2에

서와 같이 일정 크기의 금속 포일 전극을 반도체층 표면에 설치함으로써 신호를 검출한다. 접속재를 설치하는 과정에서 센서를 설치해야 하기 때문에 기 포설 선로에서는 적용하기가 불가능하며, 신 선로의 부분방전 감시시스템용으로 적용 가능하다. 검출 원리는 설치된 전극이 반도체층 표면저항 R 과 금속 보호동관의 표유 정전용량 C_{stray} 에 의해 RC 임피던스 및 High pass filter로 작용하게 되는 것을 이용하고 있다.

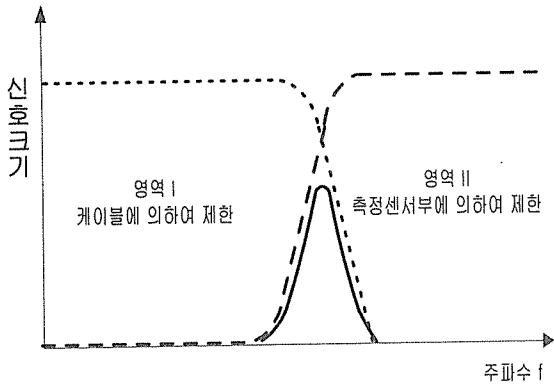
PD 측정 주파수 대역은 PD가 발생한 발생원으로부터의 전파거리와 PD 펄스 자체의 파두장 및 파미장에 의하여 결정되는 주파수 영역(영역 I)과 센서부의 정전용량 및 표유 정전 용량과 반도체 표면저항에 의하여 결정되는 주파수영역(영역 II)



(a) 센서 설치 예



(b) 등가 회로



(c) 주파수 특성

(그림 2) 내장형 박전극 개념도

에 의하여 결정된다. 센서에 연결되는 증폭기의 주파수 대역은 보통 중심 주파수가 약 2~20MHz인 것이 사용된다.

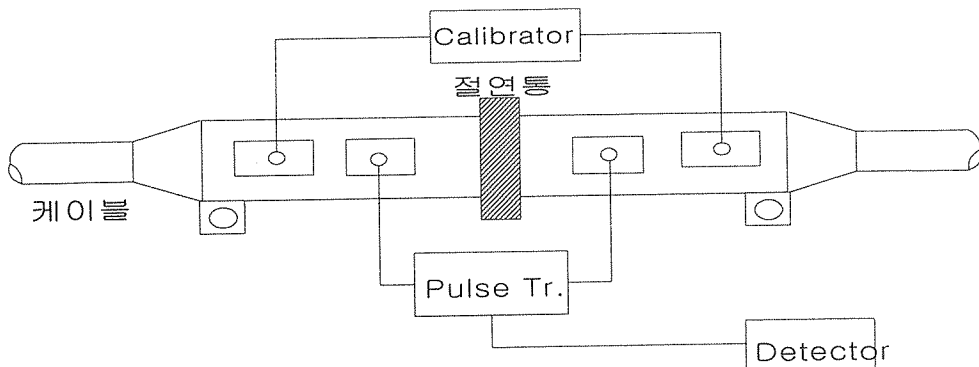
3.2 외장형 박전극

이 방식은 Hitachi에서 개발한 것으로써, 그림

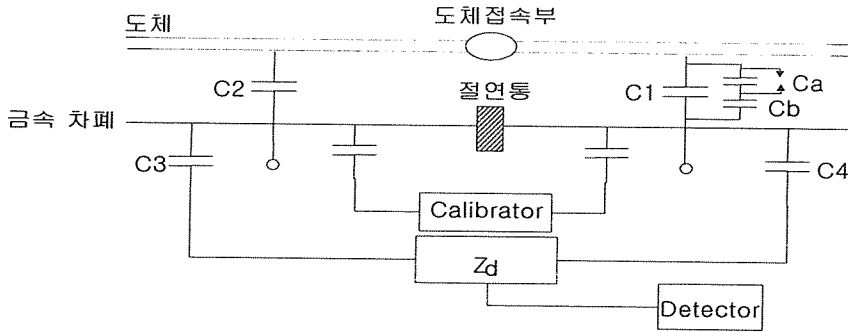
3과 같이 절연 접속함(Insulation Joint Box : IJB)의 절연통을 사이에 두고 접속함 표면에 설치된 금속 박전극을 통해 신호를 검출하는 방식이다. 이 기술은 주로 IJB의 경우에만 적용되며, 기포 설된 선로에 대한 부분방전 측정도 가능하다.

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

측정 감도는 측정기 및 환경에 따라 다르지만 최적의 S/N비를 가질 수 있도록 측정 주파수 대역을 Tuning하여 최소 1~10pC까지 검출 가능하다. 최근에는 보통접속함(Normal Joint Box : NJB)의 외함의 구조를 변경하여 상용전압에 대해서는 NJB의 기능을 하지만 고주파 신호에 대해서는 IJB로서 작용하도록 하여 이 방식의 검출 기술을 사용하기도 한다.



(a) 센서 설치도



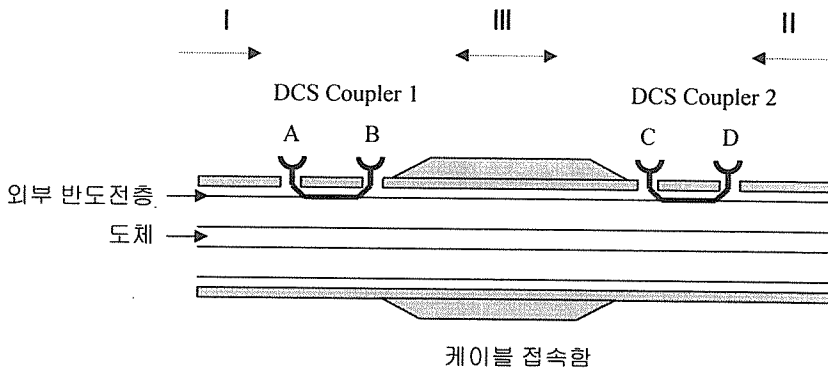
(b) 등가 회로

(그림 3) 외장형 박전극 원리

3.3 방향성 센서 (Directional Coupler Sensor : DCS)

방향성 센서는 독일 베를린 공대의 Kalkner 교수가 제안한 방법으로써 그림 4와 같은 동근 판형의 동판을 외부 반도체층 위에 설치하여 신호를 검출하는 방식이며, 주로 접속재를 대상으로 한 것이다. 이 기술은 설치된 부분방전 신호와 센서의 유도성 및 용량성 결합 작용에 의해 신호를 검출하는 것으로써 부분방전 발생위치가 접속재 내부인지 아닌지를 판별할 수 있다. 즉, 부분방전이 발

생될 경우 각 동판에는 설치된 단자 A,B 또는 C, D는 유도성 결합으로 인해 서로 다른 극성의 신호가 유도되고, 또한 센서의 용량성 결합으로 인해 단자 A,B 또는 C,D는 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. 각 단자에서 검출되는 신호의 여부와 발생위치에 따라 그림 4의 (b)와 같은 관계를 가진다. 측정 주파수 대역은 2~500MHz 이며 센서의 결합 정도에 따라 검출 감도가 달라진다.



(a) DCS 센서 설치 개념도

신호 단자	왼쪽에서 유입되는 신호(I)	왼쪽에서 유입되는 신호(II)	접속함 내 부 신호(III)
A	○		
B		○	○
C	○		○
D		○	

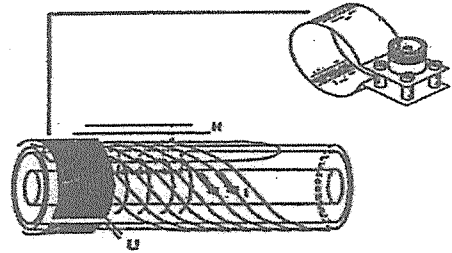
(b) 신호 유입 방향과 각 단자의 신호 검출 관계

(그림 4) DCS 의 측정 원리

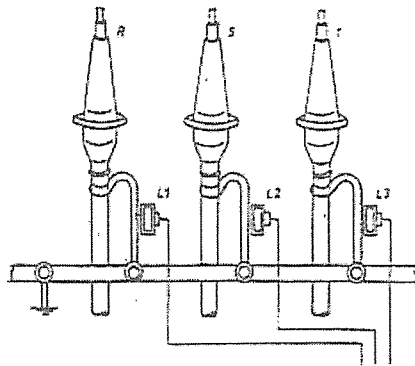
3.4 유도성 센서 (코일 센서)

이 방식은 케이블 표면을 따라 흐르는 고주파 부분방전 전류 Pulse를 측정하는 방식으로써 주로 Wire Shield 케이블의 경우에 적용되는 방식이다. 케이블 주위로 그림 5(a)에서와 같은 모양의 원형 코일을 설치하게 되면 케이블의 Wire Shield를 따라 흐르는 부분방전 전류에 의한 자장이 원형 코일에 유도되는 원리를 이용한 것이다. 코일을 이동하면서 측정할 경우 측정감도에 따라 발생 위치 추정까지 가능하지만 선로 포설 조건을 볼 때 현실적으로 불가능하다. 한편 AI 및 연피 케이블의 경우에는 케이블의 차폐를 절단하여 Wire Shield 처리를 하여 센서를 설치하기도 하지만 케이블 방수 문제등으로 실선로에 적용은 어려움이 있다.

유도성 센서의 또 다른 Type으로서 그림 5(b)에서 처럼 접지선을 따라 흐르는 부분방전 전류를 정전유도 검출하는 방식도 있다. 이 방식은 접지선의 Sheath 순환 전류에 따라 측정감도의 영향을 받는다.



(a) 케이블의 적용 예



(b) 종단 접속함의 적용 예

(그림 5) 유도성 센서

이상과 같은 4가지의 대표적인 HFPD 검출 방식 이외에도 유사한 원리로서 다양한 방식의 센서들이 있다. 그 밖에도 이와 같은 HFPD 검출 방식은 아니지만 접속함 내부에 음향 방출센서를 삽입하는 방식도 있으며, 측정 감도의 향상을 목적으로 연구되어 지고 있다.

이들 HFPD 측정용 센서들의 적용은 기본적으로 케이블 Sheath 구조(Wire shield Type, AI 또는 연피), 접속재 종류, 설치 위치, 선로 계통, 현장 설치 여건등의 여러 가지 조건에 따라 선택되어 진다.

4. HFPD 측정 시스템

부분방전의 검출 기술과 아울러 실선로 부분방전 측정에 있어서 중요한 기술은 측정된 신호의 처리 및 분석 기술이다. 최근의 고속 대용량 신호 처리 기술의 발달로 인해 측정 시스템 또한 HFPD 측정에 적합한 디지털 방식의 시스템이 개발되고 있으며 측정 감도를 향상시키기 위하여 각종 노이즈 게이트 기능을 갖추고 있다. 또한 PC와 연결하여 부분방전 신호의 ϕ -q-n 분석등의 통계적 처리 및 DATA의 저장이 가능하도록 시스템을 구성하고 있다.

HFPD 측정 시스템의 측정 목적에 따라서, 기존 선로의 주기적인 진단을 목적으로 한 휴대용 측정 시스템과 새로 포설되는 설로의 상시 진단을 목적으로 한 감시시스템으로 나눌 수 있다. 휴대용 측정 시스템은 부분방전 패턴의 분석뿐 아니라 사용자의 편의를 고려하여 현장에서 선로의 이상 유무까지 판정 할 수 있도록 구성되어 있다.

감시시스템의 경우에는 크게 각 지점에서 신호를 검출하기 위한 Local unit와 중앙 통제소에서 상시 감시할 수 있는 Main Station으로 나눌 수 있다. Local unit은 다 채널 Multiplexer와 고주파 증폭기, 그리고 신호의 전송을 위한 A/D Converter로 구성된다. 또한 신호의 전송은 광선로를 이용하며 이를 위해 광 변환기가 설치된다. Main station은 신호의 지속적인 감시와 함께 뉴럴 네트워크에 의해 자동 판별된 결과를 나타낼 수 있도록 구성하고 있다.

HFPD 측정에 적합한 이러한 시스템은 현재 일본 및 독일등의 여러 업체에서 개발되고 있으며 실제 선로에 상용화 되고 있는 단계이다. HFPD 측정 시스템은 앞서 언급한 여러 가지 HFPD 측

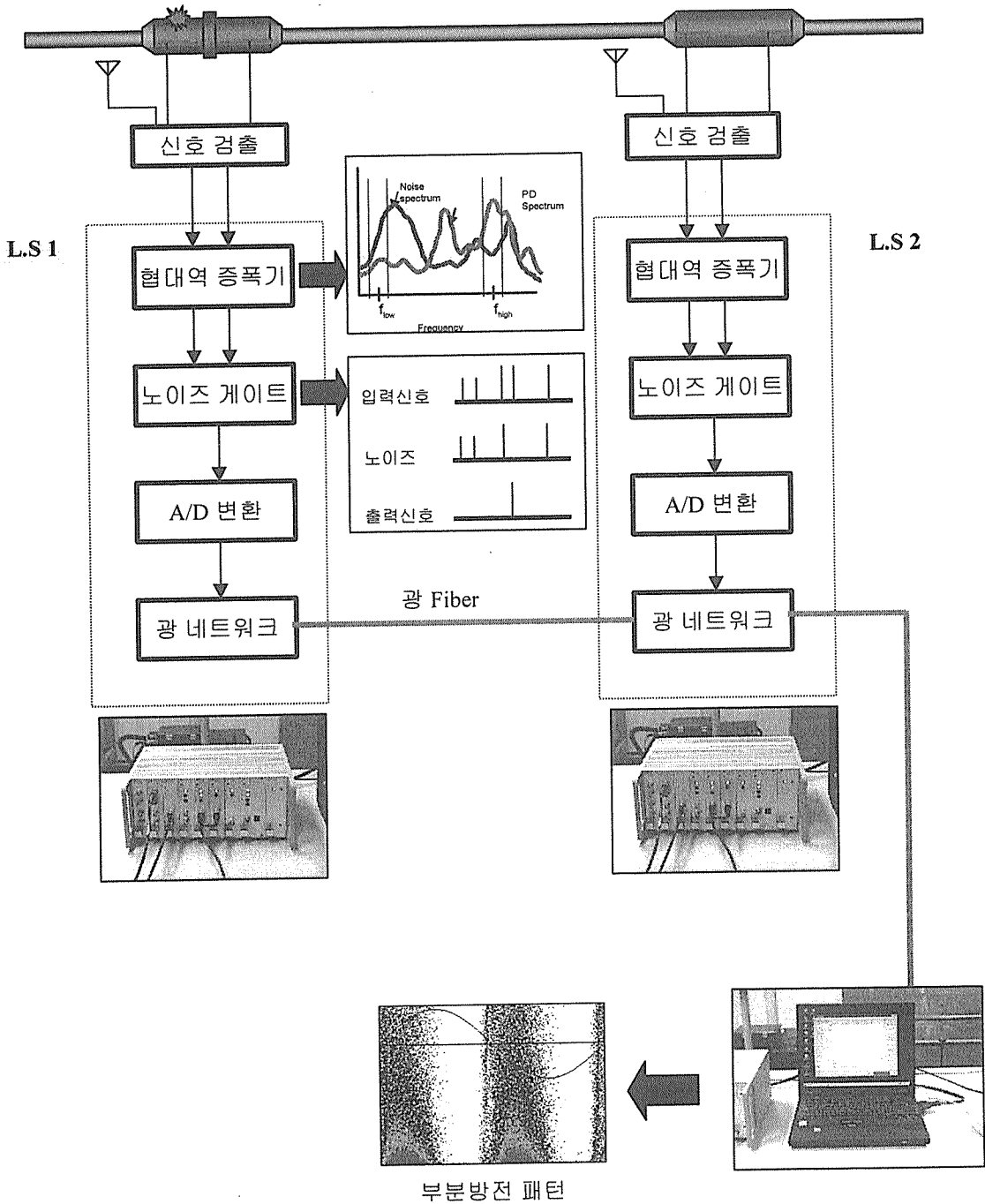
정 방식에 범용으로 사용할 수 있지만, Maker 마다 시스템에 적합한 검출 방식을 추천하고 있다. 또한 일부 측정 시스템은 특정 HFPD 검출 방식에만 적용되는 것도 있다. 그림 6은 부분방전 감시시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

5. 해외 적용 현황

이미 해외에서는 HFPD 측정 기술을 시험 적용하는 수준을 넘어 실 선로에 적용 단계에 까지 이르고 있다. 네델란드의 KEMA의 경우에는 1994년부터 유도성 센서인 코일 전극을 이용한 HFPD 측정을 연구해 왔으며, 최근에는 400kV CV 케이블 시스템에 대한 PQ(Pre-qualification) 시험에서 이 방식을 사용하기도 하였다.

또한 이탈리아의 CESI에서는 독일의 전력회사인 BEWAG의 요청으로 총 6개 케이블 업체의 400kV XLPE 케이블 시스템에 대한 PQ 시험을 실시하였는데, 선로에 대한 부분방전 측정 시스템 Maker인 독일의 LDIC사 및 Power Diagnostix사의 측정 시스템으로서 각각 방향성 센서(DCS) 및 내장형 박전극을 사용하여 부분방전을 측정 하였다.

특히 HFPD 측정에 의한 열화진단은 XLPE 절연 송전 케이블의 사용 기간 및 사용량이 우리나라보다 훨씬 많은 일본에서는 오래전부터 실적용을 해왔다. 1989년부터 1996년까지 일본의 3개 전력회사에서 33kV~ 275kV급 CV 케이블 시스템에 대해 준공시험과 진단 시험에서 여러 가지 센서를 이용하여 부분방전 측정을 한 결과, 275kV급 선로에서 3건의 결함을 검출하였다. 또한 현재 도쿄에 건설중인 500kV CV 전력 케이블 시스템의 전 접속함에 외장형 박전극을 설치하여 선로에 대한 부분방전 감시 시스템을 구축하고 있다.



(그림 6) 부분방전 감시 시스템 구성도

6. 결 론

전술한 바와 같이 해외의 여러 사례로 비추어 볼 때 HFPD 측정기술은 CV 전력 케이블의 실선로 열화 진단 기술로서 자리잡아 가고 있다. 해외에서의 오랜기간의 검증과 적용사례를 토대로 최근 국내에서도 HFPD에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 국내에서도 각종 HFPD 측정 기술에 대해 연구 및 시험 적용 중에 있으며, 향후 부분방

전 감시 시스템을 목적으로 HFPD 측정용 센서가 내장된 접속함을 검토중이다. 또한 실 포설 선로에 대해서도 HFPD 측정을 실시중에 있다.

국내 최대의 기관망이라 할 수 있는 송전 시스템의 안정성은 시스템의 꾸준한 진단과 감시를 통해 확보될 수 있다. XLPE 절연 송전 시스템의 사용이 증대되고 또한 초고압화 될 수록 실 선로 부분방전 진단의 중요성은 더욱 증대될 것이다.

