

## OF 케이블 절연유의 특성 변화에 따른 경년열화진단

### The Aging Diagnosis of OF Cable Insulation Oil by Characteristic Change

윤 구 섭\*, 정 우 성, 김 철 윤, 김 태 성  
전남대학교 공대 전기공학과

Ku - Seop Yun\*, Woo - Sung Jung, Cheol - Woon Kim, Tae - Sung Kim  
Dept. of Electrical Eng., Chonnam University

#### Abstract

As demand of electric power are growing and transmission line limited owing to enlargement of the downtown area. The confidence of underground transmission cable which shows gradual growth are high. It is found whether insulating ability is good or not. In this paper, The experiment result is shown that the fall of insulating ability and take preventive measure through the analysis of  $\tan \delta$ , water content, dielectric breakdown voltage, total acid number, volume resistivity, and gas in the oil in an accordance with the characteristic change of oil used very much for insulating oil of cable.

**Keywords :** Water content (수분 함량), Dielectric breakdown voltage (절연파괴전압), total acid number (전산가).

#### 1. 서 론

유침지 절연체를 사용한 초창기의 케이블은 절연체내에 갭(Void)이 생겨 그에 따른 부분방전이 발생되며 절연지를 탄화시켜 Carbon Tree에 이르고 결국에는 전기 절연파괴를 일으키게 되어 66kV 및 그 이상의 전압에서 신뢰성을 확보하지 못하였다. 이러한 이유로 전력을 공급하는 중요한 선로인 케이블이 예상하지 못한 사고를 일으키게 되면 전력 사용량이 많은 도심지에서부터 중요 기기가 있는 대단위 공장에 이르기까지 정전구역이 광범위 해짐은 물론 사고를 복구하는 데에도 많은 시간이 걸리기 때문에 절연성능 향상 및 예방 진단에 대한 연구가 오래 전부터 연구되어져 왔다.

그 결과 유침지 절연지의 결점이 OF(Oil - Fi

lled) 케이블의 개발로 해결되었는데 이 OF케이블은 sheath 내부에 유통로를 설치한 구조로 알킬벤젠 등의 저점도의 절연유를 탈기 탈습 상태의 케이블에 충전하고 상시 대기압 이상의 압력을 외부에 설치한 유조에 의해 가해 갭(Void)을 발생하지 않게하여 전기 절연의 안정과 유전손실 저감 및 설계전계강도를 향상시키는 장점이 있다.

OF케이블은 절연유를 단독으로 사용하지 않고 절연성능을 향상시키기 위해 가교시킨 폴리엠틸렌을 도체에 라미네이트 시킨 고체 절연체에 액체 절연유를 가미하여 사용된다. 이러한 이유 때문에 인체를 보호하고 기기 및 케이블을 보호하는데 가장 큰 역할을 하는 절연재료인 절연유의 중요성 및 신뢰성이 증가하게 되었다.

일반적인 절연유는 경년 열화 되면 gas 발생

및 분해물이 유중에 축적되어 절연유의 색상이 변화하고 이로 인한 성분의 변화로 절연성능이 떨어지므로 이 점에 착안하여 현장에서 실제 다년간 사용된 절연유를 채취하여 경년에 따른 열화가 절연유의 전기적 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 측정하여 절연유의 열화정도 및 이상유무를 측정할 수 있으며 이에 따른 효율적인 판정 기준을 얻어 예방 진단 및 잔존 수명을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 OF케이블의 절연유가 경년열화 될 수록 어떠한 성분변화와 전기적 특성을 가지는지를 알아보기 위해 gas 성분분석을 하고 tanδ값 및 전산가와 수분의 양, 절연파괴전압, 체적저항을 측정하였으며 여기에서 얻어진 판정기준을 기존의 전기적 특성치에 의한 열화 판정 기준치와 비교, 검토하였다.

## 2. 절연유의 특성 및 채취

### 2.1 절연유의 특성

현재 사용되고 있는 절연유는 어느 것이나 충분히 우수한 전기적 특성을 가지고 있지만 금속과 접촉되면 열화가 촉진되는 광유보다 탄화수소계 알킬벤젠이 전기적 특성(유전특성, 절연파괴특성 및 과전시의 장기 안정성 등) 면에서 우수하여 OF케이블 절연유로서 많이 사용되고 있다.

알킬벤젠유는 유동점이 낮고 코로나 방지의 한 요인이 되는 수소가스 흡수성이 좋으며 열 및 전계 안정성이 뛰어난과 동시에 불평등 전계하에서 뇌임 펄스 충격파괴전압이 높은 특징을 지니고 있다. 이러한 알킬 벤젠유는 다시 Hard형(분기쇄형)과 Soft형(직쇄형)으로 나누어 지는데 이중 Propylene 축매에 의해 중합시켜 얻어진 Propylene Polymer 와 Benzene을 Alkyl화 반응시켜 얻은 무색 투명하고 전체적 열적으로 유해한 점이 없으며 부식성이 적어 장기적으로 안정된 특징을 지닌 저점도 분기형 Alkyl Benzene oil(그림 1참조)이 154kV 이상 특고압 케이블에서 가장 많이 사용된다.

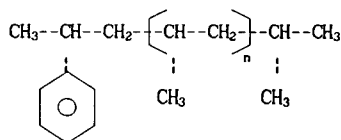


그림 1. 저점도 분기형 Alkyl Benzene 분자구조  
Fig. 1. THE Alkyl Benzene structure of branched chain type with low viscosity.

### 2.2 절연유의 열화 및 판정 기준

OF케이블 절연유는 일정기간 진전된 열화에 의해 수분, 전산가, tanδ의 증가로 분해가스 발생 및 부분방전 등이 일어나 절연성능이 저하되는데 절연유를 열화시키는 주요원인은 크게 산화열화와 열열화 그리고 과전열화의 세가지로 나눌 수 있다.

여기서 산화열화는 Alkyl Benzene유⇒과산화물⇒케톤⇒유기산⇒CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O의 과정을 거쳐 열화되는 것을 말하고 온도 상승에 의한 부분방전으로 CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 가스가 발생하는 것을 열열화라 말하며 전기적스트레스에 의해 C<sub>2</sub> 및 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 가스가 발생하는 것을 과전열화라 한다.

표 1. 열화판정기준

Table 1. The criterion of aging.

Items	Criterion	
tan δ (80° C)	2% 이하	
volume resistivity	1×10 <sup>15</sup> Ω.cm이상	
Breakdown Voltage	40kV이상/2.5mm갭	
Total Acid Number	0.02 mg KOH/g이하	
Water Content	75 ppm이하	
Inspection Gas	Total Gas	1500ppm 이하
	H <sub>2</sub>	500ppm 이하
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Trace
	CO	100ppm 이하
	CO <sub>2</sub>	1000ppm 이하
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	각각 200ppm 이하

### 2.3 절연유 시료의 채취

절연유 특성시험을 위하여 운전중인 케이블에서 절연유를 채취하려면 OF케이블 내부의 정압을 이용하여 맨홀에 설치된 중간 접속함과 중단접속부에서 진공밸브를 취부후 주사기 또는 2mm 이하의 채취관을 사용하여 채취한다.

케이블에서 채취한 절연유는 급속한 특성변화를 일으키기 쉬우므로 청결한 밀폐성 채취용기를 사용하고 채취시 대기와 접촉하면 분석결과에 치명적인 영향을 줄 수 있으므로 가급적 기포를 발생시키지 않으면서 채취용기에 넘치도록 채유하여 분석 데이터에 영향을 주지 않는 가장 좋은 조건으로 빠른 시일안에 측정하여야 한다.

## 3. 실험방법

### 3.1 절연유 특성시험

OF케이블은 열화에 의해 사고를 일으킨 사례가 거의 없었기 때문에 지금까지는 절연열화진단이 거의 시행되고 있지 않았다. 그러나, 포설한지 오래된

케이블이 증가함에 따라 열화에 대한 진단이 필요하게 되었고 또한 고장예방에 대한 인식이 날로 높아져 열화진단 및 잔존수명 예측을 위해 절연유 특성시험을 시행하는 사례가 늘고 있다. 따라서 절연유 특성이 경년에 따라 어떻게 변화하는지를 알아 보기 위해 실제 케이블에서 경년 열화된 하드 알킬벤젠유(2년~20년 : 14종)를 채유하여 분석하였다.

### 3.1.1 전산가 시험

절연유 1g 속에 함유되어 있는 전 산성 성분을 중화시키는데 필요한 수산화 칼륨 mg 수를 말하며 절연유를 톨루엔과 에틸알코올의 혼합 용제에 녹인 후 지시약으로 알카리부류 6B를 사용하여 수산화칼륨 표준 수용액으로 적정한다.

$$\text{전산가(mg KOH /g)} = \frac{N \times (A-B) \times 56.1}{W}$$

여기에서 W는 시료의 질량(g)이며 N는 0.05N 수산화 칼륨 표준 용액의 규정도 이고 A와 B는 각각 적정 및 공시험에 필요한 0.05N 수산화 칼륨 표준 용액의 양(ml)이다.

### 3.1.2 수분함유량

피리딘과 에틸렌 글리콜을 혼합한 용제에 적정량의 시료를 용해시킨후 칼핏서 시약으로 적정하여 시료내 수분의 함유량을 구한다.

$$\text{시료 속의 수분 (ppm)} = \frac{f \times v}{S} \times 1000$$

여기에서 f는 칼핏서 시약의 역가 mg H<sub>2</sub>O/ml이고 v는 시료적정에 필요한 칼핏서 시약의 양(ml)이며 S는 절연유의 질량이다.

### 3.1.3 절연파괴전압 (B.D.V)

절연파괴 전압의 저하 정도에 따라 절연유 내에 불순물 (수분, 먼지, 도전성 입자)의 유무를 판단할 수 있는 척도중의 하나로 K.S 시험법에 의해 거품을 소멸한 후 전극간 갭을 2.5mm로 조정 한 직경 12.5mm의 니켈, 황동 또는 스테인리스강 구전극을 사용하여 3kV/sec의 비율로 전압을 상승시켜 전계 하에서 사용가능한지를 파악한다. 이 측정은 5회 절연파괴시험을 한후 처음의 값을 제외한 4회의 평균값을 대표값으로 하였다.

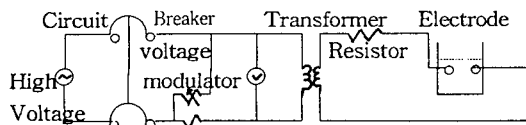


그림 2. 절연파괴전압 시험회로

Fig 2. The measure circuit of dielectric breakdown voltage.

### 3.1.4 체적저항률 측정

불순물 함유도 및 전기 절연성의 척도인 체적저항률(Ω.cm)은 절연유에 가한 직류 전계 (V/cm)와 그때 절연유 속을 흐르는 단위 면적당의 전류 (A/cm<sup>2</sup>)와의 비로 이 값은 절연유의 1번 1cm의 정육면체에 상대하는 면사이의 저항과 같으며 약 250V/mm의 직류 전계를 인가하고 1분 후의 전류치에서 체적저항률을 구한다.

$$\rho = 3.6 \times \pi \times C \times R_x$$

여기에서 C는 시료를 넣지 않은 상태의 전극간의 정전용량(PF)이고 R<sub>x</sub>는 절연유의 저항치(Ω)이다.

### 3.1.5 유증가스분석

절연유 분석은 채취한 절연유의 열화 정도에 따른 분해 생성물을 조사하는 것으로 내부 방전이나 아크, 코로나 발생등에 따라 여러 가스 발생량이 증가한다.

유증 용존 gas를 절연유로부터 분리, 포획하는 방법은 Torrecelli의 진공에 의한 방법과 Carrier Gas(He)의 Bubbling에 의한 Stripping 방법 그리고 평형 Gas화에 의한 방법이 있는데 본 연구에서는 He gas의 Bubbling에 의한 Stripping 방법을 사용하여 절연유의 gas를 분석하였다.

표 2. 유증가스 분석의 물리적 특성 기준치  
Table 2. The characteristic analysis criterion of gas in the oil.

Inspection Items	Criterion	비 고
Total Gas	1500 PPM	Total Gas Measure
H <sub>2</sub>	500 PPM	Corona
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Trace	Ark
CO	100 PPM	Heating
CO <sub>2</sub>	1,000 PPM	
(CH <sub>4</sub> ) (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ) (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	200 PPM	Low Temperature  High Temperature
SF <sub>6</sub> Gas	30,000 PPM	EBG

유증 가스 분석을 기초로 한 추정방법은 첫째로

절연지가 산화를 일으킬 때 많이 발생하는 Co, Co<sub>2</sub> 측정과 둘째로, 부분방전 발생시 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>의 발생량을 측정하는 방법 그리고 셋째로 가스 중단 함에 침투하는 SF<sub>6</sub>가스를 검출 분석하는 것이다.

표 2는 각각의 가스가 단독으로 검출되었을 때 절연유의 열화에 의한 이상유무를 판별할 수 있는 기준치이다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 수분함유량

측정된 절연유 내의 수분량에는 절연유 자체의 분해 성분과 유침지의 수분 및 채취시 대기와의 접촉으로 인한 수분 증가량도 포함된다. 이에 대한 기준치 75ppm을 모두 밑돌아 안정적이었다.

##### 4.2 절연파괴전압(B.D.V)

그림 4는 채취한 절연유의 절연파괴전압을 나타낸 것으로 그림 4에서 보듯이 사용년수가 늘어갈수록 내부생성물 또는 불순물 증가로 절연파괴전압이 저하됨을 알 수 있다.

##### 4.3 전산가 측정

사용기간에 따른 절연유의 산화가 거의 없어 안정되어 보인다. 하지만 17년 정도 사용한 절연유부터의 전산가 증가는 주의깊게 관찰하여야 한다.

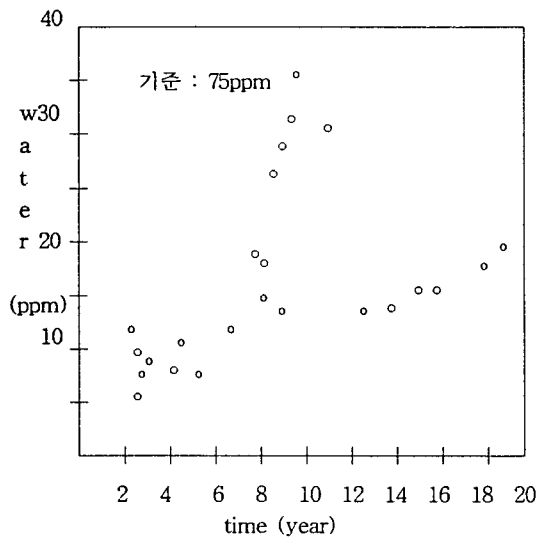


그림 3. 케이블 절연유의 경년 수분 함유 변화량

Fig 3. Variation of water content in cable insulation oil

##### 4.4 유전체 역률(tan δ)

케이블에서 실제 채취한 절연유의 tan δ 값을 그림 7에서 나타내었는데 그림에서 보듯이 경년에 따

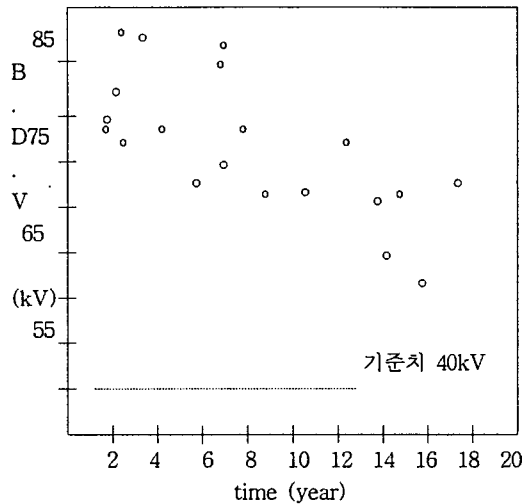


그림 4. 절연유의 경년에 따른 절연파괴전압 변화  
Fig 4. Change pattern of dielectric breakdown voltage with aging in insulation oil.

라 기준치를 왔다갔다 하는 점으로 보아 열화된 절연유에서는 tan δ 값이 내려가고 흡수된 절연유에서는 tan δ 값이 올라감을 알 수 있다.

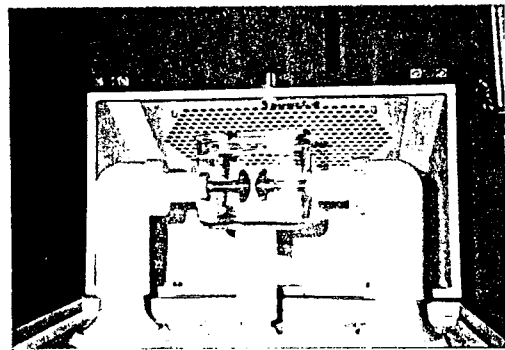


그림 5. 절연파괴시험 사진  
Fig 5. Photograph of dielectric breakdown voltage test.

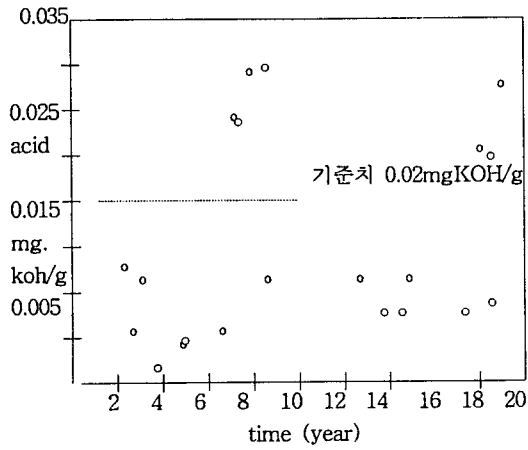


그림 6. 산성 성분을 중화 시키는데 필요한 수산화칼륨량의 변화

Fig 6. Variation of total acid number for neutralize acid constituent.

#### 4.5 체적저항률

절연유에 가한 직류 전계와 그때 절연유를 흐르는 단위 면적당의 전류 (A/m) 비를 나타내는 체적

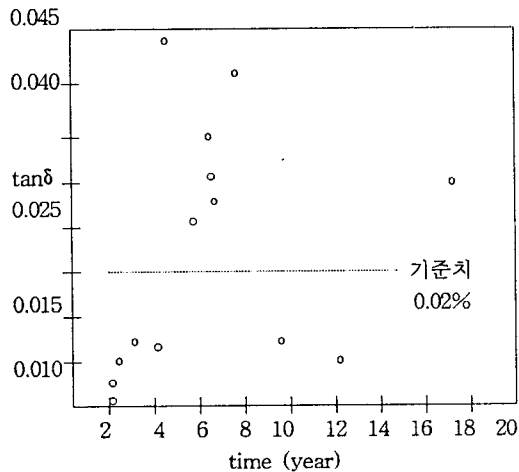


그림 7. 절연유의 열화에 따른 tan delta 변화

Fig 7. Variation of tan delta in insulation oil.

저항률은 그림 8 에서 보듯이 경년에 따른 기름속 불순물등의 증가로 점점 저하되어 20년 정도 사용한 케이블 절연유는 기준치에는 합당하지만 요주의

상태에 들어간다고 볼 수 있으므로 주위 온도, 습도의 변화에 주의해 측정결과에 영향을 미치는 요인을 충분히 제거한 후 다른 시험결과와의 상관관계 등을 지속적으로 관찰하여야 하겠다.

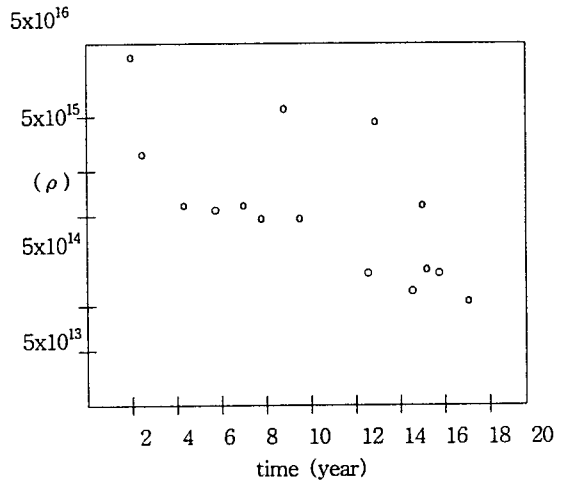


그림 8. 사용년수에 따른 체적저항률의 변화

Fig 8. Variation of volume resistivity by aging.

#### 4.6 유증가스분석

오랫동안 사용되고 있던 케이블 절연유 중에서 실제 사고가 난 선로의 케이블 절연유를 성분분석한 결과 부분방전시 생성되는 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)이 다량 검출되었다. 이러한 결과로 보아 OF 케이블 절연유의 이상 탐지는 유증 가스분석이 유효하며 그 중에서도 방전감도가 뛰어나다고 할 수 있다.

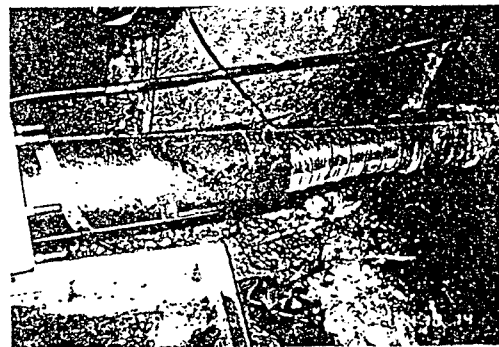


그림 9. 부분방전에 의한 절연파괴현상 사진

Fig 9. Photograph of dissipation breakdown by partial discharge.

표 3. 절연유 성분 분석 결과

Table 3. Analysis result of insulation oil's constituent

성분 (ppm)	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
여포지중A	56	9978	2	ND	9	32
여포지중B	44	8984	1	ND	2	TRACE

### 5. 결 론

절연의 신뢰성 및 중요성 때문에 154kV 이상의 선로에서 가장 많이 사용되고 있는 OF케이블의 절연재료인 절연유에 대한 특성변화를 여러 가지 시험으로 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 각종실험을 통하여 측정 한 결과 절연유의 사용기간에 비례한 전기적 특성치가 변화하여 절연능이 저하하였다.

2) 절연유내 수분의 함유량에 대한 절연파괴전압과는 상호 밀접한 관계를 이루고 있었고 수분에 대해서는 사용기간에 따른(1~10년, 10년이상~) 새로운 기준치 제정이 필요하였다.

3) BDV, 유전정접, ρ를 종합적으로 분석한 결과 사용기간이 10년이 넘어서는 절연유에 대해서는 절연성능 저하에 대비한 세밀하고 지속적인 관리가 요구되었다.

4) 실제 사용기간에 대하여 측정 한 Data와 같은 열화값을 짧은 시간에 얻을 수 있는 인위적인 온도 특성 등의 가속 열화장치를 연구하여 절연유의 열화를 예측할 수 있는 예방 진단법의 개발이 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. “전기절연유의 시험방법”, KSC 2101
2. 신규식의, “재생절연유 경년열화 연구”, 「한국전력공사 기술연구원」, 4호, (1988),pp205-213.
3. 「電氣絶縁油」, ハンドブック, 日本石油學會, 1987
4. 「유류분야시험」, 한국전력공사 기술연구원, 년보, (1988), pp505-545.
5. 남영우 외, “가스 분석에 의한 주상 변압기의 예방진단에 관한 연구”, 「조명, 전기설비 학회지」, Vol 10, 1996, pp94-100.
6. 飯塚喜八郎, 「電力 ケーブル 技術 ハンドブック」, 電氣學會, 1974.
7. 전기학회, 석유학회, 「전기절연유 보수관리 지침」, 1983.
8. 「月刊電氣技術」, 株式會社 尖端, 10, 1989.
9. 「전기설비의 진단기술」, 대한전기협회, 1997.
10. 「지중 송전선로 운영 절차서」, 한국전력공사 송변전처, 1996.
11. 神庭, 西松, 山口, 向井, 電氣學會 絶縁材料 研究會, EIM82, 1982.
12. 「“OF케이블시스템 抽出油の試験」, フジクラ 技報, 1980.
13. 「지중송전실무」, 한국전력공사 송변전처, 1996.
14. Japanese Standard Association, 「Japanese Text」, Hohbunsha, Tokyo, 1988.