

# 345KV 반합성지 (PPLP) 절연 OF 케이블의 개발

김 종 원 · 최 창 수 · 강 성 호 · 이 갑 중  
(대한전선 주식회사)

본 Report는 345KV 반합성지 (PPLP) 절연 SELF CONTAINED OIL FILLED CABLE 개발에 대해 1992년 8월 30일~9월 5일에 프랑스 파리에서 개최된 제34차 CIGRE 대회에서 발표된 내용을 재 정리한 것임.

또한, 절연 재료의 높은 절연 내력에 따른 절연두께의 감소로 케이블의 compact화가 가능해져 자재 절감과 운송, 설치비용의 절감이 예상되고 접속개소의 감소로 인한 공사기간의 단축도 기대된다.

본 논문에서는 재래의 Kraft지 대신 프라스틱 필름과 Kraft지의 복합 구조로 된 절연재료를 이용한 345KV OF 케이블의 개발을 위한 검토와 진행과정, 그 결과 및 기대 효과에 대하여 기술하고자 한다.

## 1. 개 요

도시의 급격한 팽창에 따른 전력수요의 증가로 고전압(EHV) 지중 송전선이 절실하게 요구되고 있다.

따라서 이러한 요청에 부응코자 345KV OF 케이블을 개발하게 되었다.

지금까지 고전압 송전 계통에서 OF 케이블은 높은 신뢰성때문에 광범위하게 사용되어 왔다.

그러나 초 초고압 선로인 345KV급에서 재래의 유침절연 OF 케이블을 사용하면 유전체 손실이 급격하게 증가하여 그 손실은 총손실의 50%이상을 차지하므로 한국 실정과 같이 장거리 송전 선로에 적용하기 위해서는 저손실형 OF케이블 개발의 필요성을 절감하게 되었다. 따라서 유전 특성이 향상된 Laminated형 유침지를 사용한 OF 케이블 개발로 선로손실의 저감과 대폭적인 송전용량의 증대를 꾀할 수 있게 되었다.

## 2. 일반 조건 및 개발 목표

표 1. 설계 일반 조건

항 목	조 건
공칭전압	345KV
계통 최고전압	362KV
주파수	60Hz
접지 방식	중성점 직접접지 방식
B.I.L	1,300KV
상시 및 과도시 최저유압	0.2kg/cm <sup>2</sup>
상시 최고유압	8.0kg/cm <sup>2</sup>
과도시 최고유압	14.0kg/cm <sup>2</sup>

2.1 설계 일반 조건

송전선로에 사용될 345KV OF 케이블은 대부분이 전력구내에 설치, 운전되고 계통의 일반적인 조건은 표 1과 같다.

2.2 개발 목표

종래의 Kraft지 절연 케이블과 동등 이상의 성능을 갖도록 Laminated 절연재료의 특성, 적용선로 조건과 경제적인 측면을 고려하여 결정하였으며 그 개발목표성능은 표 2에 표시하였다.

3. 절연재료의 선정

장기간에 걸쳐 각국에서 다양한 종류의 프라스틱 필름을 이용한 신종 유침 절연 재료의 연구를 하여 왔으나 대부분 높은 자재비 및 합침시 필름의 팽윤 현상, 필름과 절연유와의 부조화를 비롯한 여러 이유로 실용화하는데 많은 문제점이 있었다.

이러한 점들을 고려, 새로운 절연 재료에 대한 연구결과로 개발된 수종의 Laminated 절연지중 현재

표 2. PPLP 절연 케이블의 개발 목표

항 목		개발목표
최소 허용전류		1,100[Amp.]
최대 정전용량		0.33[ $\mu$ F/km]
유 전 율( $\epsilon$ )		2.8
유전체 역률각 (tan $\delta$ )	UO	0.12[%]이하
	1.67UO	0.14[%]이하
상용주파 내전압	드림	350KV/10분
	시료	530KV/6시간
뇌충격 내전압		-1,560KV/3회
굴곡 특성	conditioning전	이상이 없을것.
	85°C × 24시간 conditioning후	이상이 없을것.

주) 굴곡특성은 알루미늄 시스 평균 외경의 20배

그 사용이 확대되고 있는 Polypropylene type을 선정하였다. 이 재료를 345KV OF 케이블에 적용하기 위해 Laminated 절연지의 물리적, 전기적 특성, 고온에서의 현상과 Oil과의 조화-용해, 팽윤-등의 충분한 검토를 시행하였다.

3.1 프라스틱 필름의 물리적 특성 및 전기적 특성

표 3은 일반 Kraft지와 비교하여 Poly-Propylene Laminated Paper(이하 PPLP라 함.)의 프라스틱 재료특성과 일반적 물리적, 전기적 특성을 표시하였다.

물리적 특성은 재래 Kraft지와 비슷하고 유전율( $\epsilon$ )과 유전체 역률각(tan  $\delta$ ) 및 전기적 파괴 강도는 우수하였다.

3.2 팽윤 현상 및 절연유와의 조화

PPLP는 초고압 OF 케이블용 절연유로 일반적인

표 3. PPLP와 Kraft지의 물리적, 전기적 특성

항 목	단위	PPLP		Kraft지 (참고치)
		125 $\mu$ m	155 $\mu$ m	
두께	$\mu$ m	123	160	153 (평균 : 150)
PP 비율(K)	%	42		---
밀도	g/cm <sup>2</sup>	0.89		0.75
인장 강도	kg/15mm	5.9	8.1	6.6
신율	%	9.9	10.4	8.2
유전체 역률각 20KV/mm	상온	0.098	0.093	0.175
	100°C	0.099	0.096	0.210
유전율( $\epsilon$ )	—	2.8		3.3
AC 파괴강도	KV/mm	130	128	88
충격 파괴강도	KV/mm	217	218	156

주) 파괴 강도 항목은 합침된 1매의 Sheet로 시험한 값임.

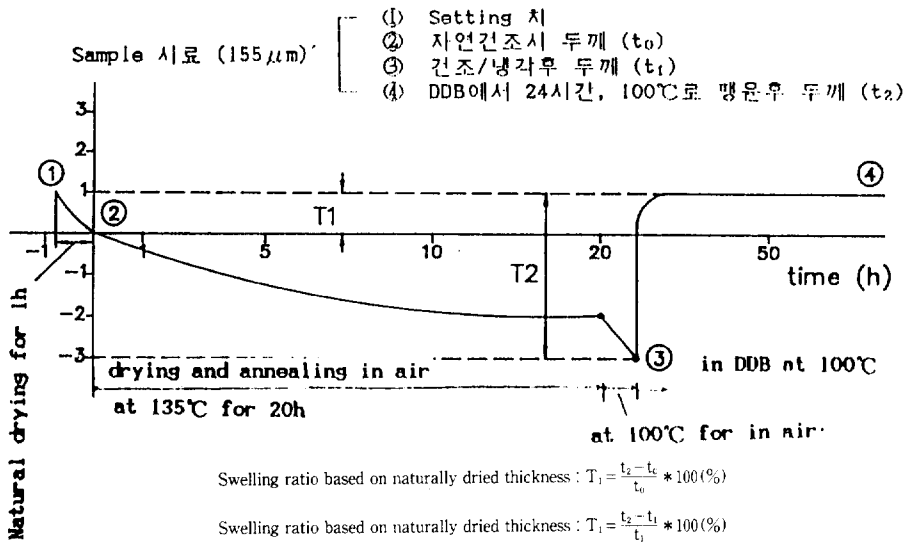


그림 1. PPLP의 두께변화

로 사용되는 합성 절연유인 DDB(Dodecylbenzene)와의 유사성 때문에 DDB에서의 용해성 및 팽윤성에 대한 상세한 검토가 필요하였다.

DDB에서 PPLP의 PP용해성 장기시험(2주간동안 DDB 교체와 매일 상온과 100°C의 heat cycle) 결과 4%이하의 값을 나타냈다. 또한, 100°C의 DDB에서 수시간동안 프라스틱 필름 팽윤에 의한 PPLP 두께 변화는 그림 1과 같으며 이 현상은 입력-온도 조건에 따른다고 생각된다.

### 3.3 유전특성의 예측

실제 절연특성을 예측해 보기 위해 외경 20mm 도체에 각각 2mm 두께의 PPLP 및 Kraft지로 절연된 모델 케이블을 제조하여 유전특성을 조사하였다. PPLP로 절연된 모델 케이블은 “ $\epsilon \times \tan \delta$ ”가 개발 목표치보다 월등하게 우수할 뿐 아니라 고온에서의 파괴강도도 그림 2에서 보는 바와 같이 Kraft지 절연 케이블보다 20% 정도 높음을 알 수 있다. 또한 PPLP 모델 케이블은 100°C 부근에서의 파괴 강도가 가장 높았다. 이 현상은 연구 결과 conditioning 효과로 확인되었다.

PPLP로 절연된 모델 케이블이 “ $\epsilon \times \tan \delta$ ” 및 파괴 강도가 목표치를 충분히 만족시키므로 실제 크기의 케이블로 적용하여도 문제가 되지 않는다고 확신

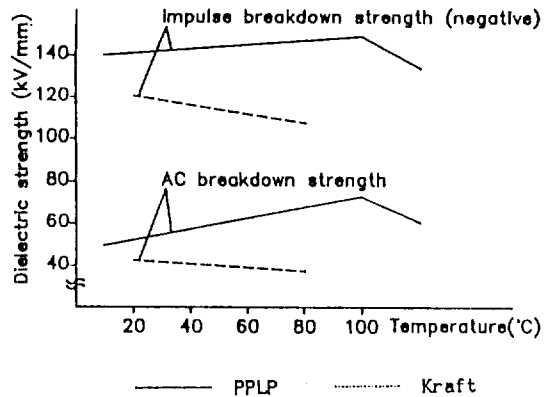


그림 2. 모델 케이블의 온도에 대한 유전특성하였다.

## 4. 케이블 설계와 생산

### 4.1 케이블 설계

기 개발된 Kraft지 절연케이블 2,000mm<sup>2</sup>에 상응하는 PPLP 절연케이블로써 표 2의 개발목표성능을 만족하기 위해 다음과 같이 케이블을 설계하였다.

#### 4.1.1 도체

도체단면적은 허용전류 관련규격을 적용, 계산결

과에 따라 목표 송전 용량을 확보하는데 무리가 없는 1,600mm<sup>2</sup>를 채용하고 표피 효과를 고려하여 6분할 도체로 하였다. 또한 장거리 송전선로에 사용되므로 급유 구간을 길게 하기 위하여 유류 저항이 작도록 유통로의 내경을 18.0mm로 하였다.

4.1.2 절연체

이미 일본 및 여러나라에서 개발된 PPLP 절연 OF 케이블의 절연과피 성능면에서 재래 Kraft지 절연 OF 케이블보다 높은 절연 성능과 우수한 유전 특성을 가지고 있다는 것은 확인되었다. 이 결과를 반영하고 충격 파괴강도, 상용주파 파괴강도 및 정전용량 등을 고려하여 두께를 19.5mm로 정하여 Kraft지 절연케이블의 절연두께인 23.4mm에 비하여 약 20%가 감소 되었다.

또한, 케이블 접속 작업시 연공 열에 의한 절연체의 손상방지대책으로 절연체 외측에 4mm두께의 내열성이 우수한 Kraft지를 채용하고 그 내측에 15.0mm의 주절연층에 PPLP를 사용한 복합 절연구조로 하였다.

4.1.3 금속 시스

금속시스는 초전압 전력 케이블에 폭넓게 사용되고 있는 Sine파형 방식으로 Corrugate한 알루미늄으로 하였다. 두께는 상시 및 과도시의 Proof stress 설계 및 외부 충격에 대하여 충분히 견딜수 있도록

하였다.

4.1.4 방식 총

방식총은 케이블이 주로 전력구내에 설치되어 화재의 확산을 방지 할 수 있는 PVC를 채용하고 그 두께는 금속시스-대지간에서 발생될 수 있는 각종 이상진압(1선 지락시 전압상승, 뇌 Surge와 개폐 Surge 분과전압, 접지조작시 전압)등을 고려하여 결정하였다.

이상과 같이 설계된 케이블의 구조는 재래 Kraft지 절연 케이블과 함께 표 4에 표시하였으며 비교의 의미로 케이블 단면도도 함께 그림 3에 나타내었다.

4.2 제조 기술

PPLP 절연 OF 케이블 제조과정중 주요 요소는 지권시 지권조건과 습도조절이다.

PPLP의 플라스틱 필름은 지권 후 건조 과정에서 수축하는 현상과 함침상태에서 팽창하는 현상이 있으므로 종래 Kraft지 지권조건으로는 시간에 따른 절연층의 Hardness의 증기로 포설 작업시의 굴곡과 운전중의 열신축에 의해 절연층에 좌굴 현상이 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 새로운 지권 기술이 가습, 저장력방식을 채택하였다. 또한 급격한 팽윤속도를 방지하기 위하여 함침유의 온도 관리도 병행하였다. 그림 4에는 공정에 따른 절연지의

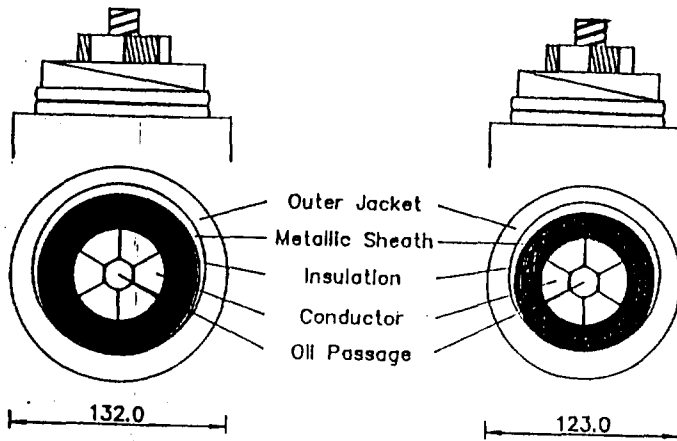


그림 3. 345KV PPLP 및 Kraft지 절연 OF 케이블 단면도

표 4. PPLP 절연 345KV OF 케이블의 구조

항 목	단위	구 조		
		PPLP 절연	Kraft지 절연	
유통로 내경	mm	18.0		
도 체	도체 단면적	mm <sup>2</sup>	1,600	2,000
	형 상	--	6분할 압축	
	외 경	mm	53.3	58.8
절연체	Carbon지 두께	mm	0.13×2	
	PPLP 두께	mm	15.0	--
	Kraft지 두께		4.0	22.9
	Carbon지 두께	mm	0.13×2	
금속 시스	재질 및 형상	--	파부 알루미늄	
	두께	mm	2.5	2.7
	외경	mm	111	125
방식층 두께	mm	6.0		
케이블 외경	mm	123	132	
케이블 중량	kg/m	29	37	

- (1) 원자재 PPLP    (2) 흡습 PPLP    (3) 건조 PPLP    (4) 함침 PPLP

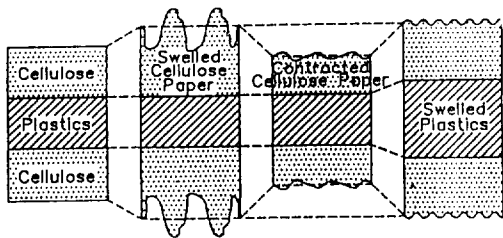


그림 4. 가습에 의한 지권가공의 개요

두께변화와 안정된 절연층의 기계적 강도를 이루기 위한 원리를 보여주고 있다.

### 5. 시제품 케이블 시험

PPLP 절연 345KV OF 케이블의 시제품을 생산하

여 여러가지의 시험을 수행하였고 그 결과는 표 5에 표시하였으며 전기적, 기계적특성을 요약하면 다음과 같다.

#### 5.1 전기 특성

##### 5.1.1 파괴 강도

시험 결과 충격 파괴강도 및 A.C 파괴강도는 규격치보다 각각 15%와 30%정도 높았다. 특히 도체 최고사용 온도인 85°C에서의 충격 파괴 전압은 상온의 경우와 거의 같은 값을 나타내었다.

##### 5.1.2 유전 특성

시제품의 유전율( $\epsilon$ )과 유전체 역률각( $\tan \delta$ )은 재래 Kraft지 절연 OF 케이블보다 20%와 55% 정도 낮았다. 이 유전율( $\epsilon$ ) 및 유전체 역률각( $\tan \delta$ )의

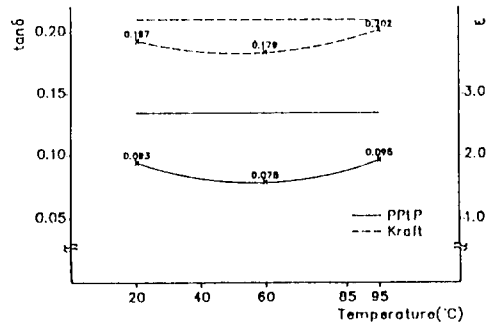


그림 5. 200KV에서 온도에 대한 팽윤 전  $\epsilon$ 과  $\tan \delta$  특성

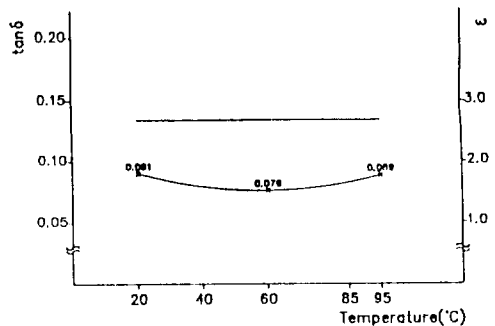


그림 6. 200KV에서 온도에 대한 팽윤 후  $\epsilon$ 과  $\tan \delta$  특성

표 5. PPLP 절연 1c×1,600mm상이 OF 케이블 시험결과

항 목	단위	PPLP절연 케이블		Kraft지 절연 케이블 2,000mm <sup>2</sup> (참고치)	
		목표치	결 과		
20°C에서의 직류도체저항	Ω/km	0.0112	0.0109	0.00853	
정전용량	μF/km	0.330	0.288	0.343	
20°C에서의 절연저항	MΩ-km	---	115,000	62,500	
20°C에서의 유전체 역률각	200KV 334KV	%	0.12 0.14	0.072 0.082	
상용주파 내전압 시험	드럼 시료	--	350KV/10분 530KV/6시간	이상 없음 이상 없음	
뇌충격 내전압 시험		--	-1,560KV/3회	이상 없음	
200KV에서 유전체역률각	상온	%	0.12	0.093	0.163
	40°C			0.087	0.152
	60°C			0.078	0.152
	85°C			0.093	0.163
	95°C			0.095	0.170
굴곡 시험	20×D	-	이상이 없을것	이상 없음	이상 없음
	15×D	-	이상이 없을것	이상 없음	이상 없음
Conditioning 후 굴곡특성	20×D	-	이상이 없을것	이상 없음	---
AC 파괴전압(참고시험)		KV	---	710	680
뇌충격 파괴전압 (참고시험)	상온	KV	---	-1,810 +1,730	-1,710 +1,680
	85°C			-1,780 +1,720	-1,680 +1,600

온도에 대한 변화는 그림 5에 표시하였다. 또한 도체온도를 95°C로 유지하면서 팽윤 후의 유전율 및 유전체 역률각은 상온에서의 측정치 보다 향상됨을 확인하였으며 그 결과는 그림 6과 같다.

### 5.2 기계적 특성

실제 현장에서 케이블을 설치하는 방식으로 케이

블이 받는 기계적 stress를 예측해 보기 위해 굴곡 조작을 시행하였다. 시험은 가열팽윤 전 및 가열팽윤 후에 알루미늄시스 외경의 20배에 해당하는 2,250mm의 곡률로 각각 2왕복 굴곡조작을 하였으나 아무런 변화없이 우수한 전기성능을 유지하였다. 또한 알루미늄시스 외경의 15배에 해당하는 1,900mm 곡률로 극도굴곡 시험도 하였다. 해체 후 손상이나 찢어짐, 구겨짐이 PPLP 절연층에서 발견되지 않았다.

## 6. 장기 과전압 시험

PPLP 절연 345KV OF 케이블의 장기안정성을 확인하기 위해 약 35m의 시험 선로를 구성, 120일(약 4개월)동안 시행하였으며 그 내용을 간략하게 기술하면 다음과 같다.

### 6.1 시험선로

장기 과전압 특성을 확인하기 위한 선로 구성은 그림 7과 같이 하였다.

### 6.2 시험조건 및 진행과정

시험에 대한 조건 및 진행 과정은 그림 8과 같이 두단계로 실시하였다.

먼저 케이블 굴곡 조작을 행한 후 전기적 안정성을 검증하기 위해 200KV 전압으로 30회 loading을

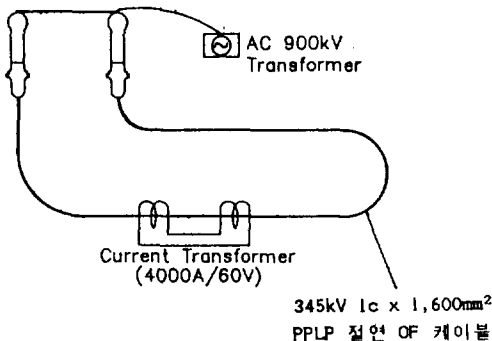


그림 7. 장기 과전압 선로 구성도

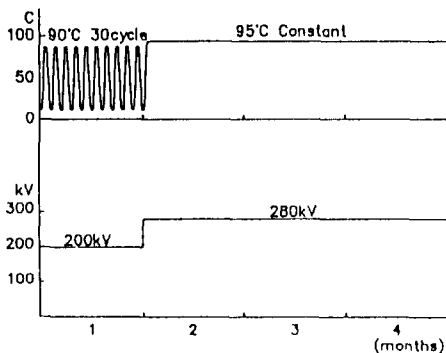


그림 8. 시험 진행과정 및 시험조건

시행하였다. 각 loading은 8시간 전류 loading, 16시간 자연 냉각으로 하며 전류 loading의 마지막 3시간은 도체온도가 90°C가 유지되도록 하였다. 매 cycle마다 상온과 90°C에서의 유전체 역률각을 측정하여 그 변화를 조사하였다. 이어서 EHV 케이블의 수명예측에 사용되고 있는 " $V^n \times t = \text{일정}$ "의 관계식을 이용하여 40년 수명에 해당하는 전압 및 시간을 산출한 결과연속 인가전압 280KV, 3개월로 결정하였다. 이때  $n=16$ 으로 적용하였다.

이 과정을 마친후 케이블 잔존 성능을 확인하기 위해 AC 파괴 및 뇌충격 파괴시험을 실시하였다. (단, " $V^n \times t = \text{일정}$ "의 관계식은 수명 예측에 관해 입증된 이론이 아니다.)

### 6.3 시험 결과

매 Loading시 측정된 유전체 역률각은 0.1% 전후의 값을 나타냈고 상승추세의 경향도 거의 없는 만족할 만한 결과를 얻었다. 또한 정전용량의 측정으로 계산되는 유전율도 거의 변화가 없었다.

이는 플라스틱 필름의 유전율이 절연유의 값과 비슷하여 PPLP 절연시의 플라스틱 필름과 Kraft지와 의 비율은 정전용량과 관계가 없음을 확인하였다.

한편, 장기 과전압 후 잔존 성능 시험 결과는 표 6에 표시하였다. 표 6에서 보는 바와 같이 그 특성은 초기치와 커다란 차이점이 없으며 재래의 Kraft 지 절연 케이블보다 우수한 성능을 보여주고 있다.

## 7. PPLP 절연 케이블의 이점

### 7.1 도체단면적의 축소

한국에서 계획되고 있는 345KV 지중 송전선로의 송전용량을 만족하기 위해서는 재래의 Kraft 지 절연

표 6. 잔존시험 결과

항 목	결 과
상용주파 내전압	530KV/6시간
뇌충격 내전압	-1,710KV 1회에 검사단말에서 Flash over

케이블은 2,000mm<sup>2</sup>가 필요하다.

그러나, PPLP 절연 케이블로는 1,600mm<sup>2</sup>가 적용 가능하여 도체 단면적에서 대폭적인 축소가 이루어 질 수 있다.

### 7.2 송전선로 손실의 감소

7.1과 같이 도체 단면적이 축소됨으로 인하여 도체 손실은 증가한다.

그러나, PPLP 절연 케이블은 재래의 Kraft지 절연 케이블에 비하여 유전 특성이 현저하게 개선되었기 때문에 이 효과로 인하여 선로 전체의 송전 손실은 오히려 감소하게 된다.

예를 들면 345KV 송전선로의 용량이 500[MVA/회선]인 경우에 송전 손실은 약 20%정도 저감된다.

(34.9 W/m/상 x 회선 → 28.6W/m/상 x 회선)

이를 그림 9에 표시하였다.

### 7.3 부속재의 절약

PPLP 절연 OF 케이블을 채용할 경우 케이블 외경과 중량의 감소로 인하여 케이블의 출하 길이가 증가된다. 따라서 소요되는 접속자재의 수량을 약 20%정도 줄일 수 있으며 급유 계통면에서는 급유장치 수량감소도 예상된다.

### 7.4 전력구 크기의 축소

PPLP 절연 OF 케이블의 채용은 재래 Kraft지 절

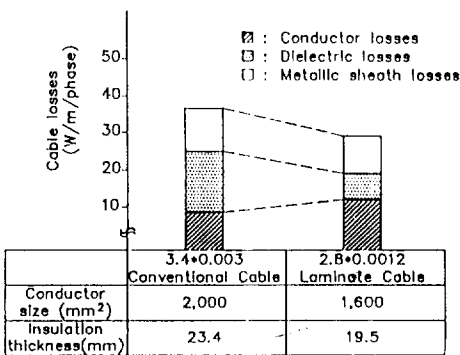
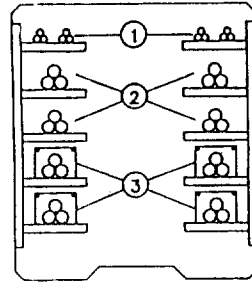


그림 9. 송전용량과 유전체 손실의 효과



- ① : Secondary cable
- ② : 154kV cable
- ③ : 345kV cable

그림 10. 전력구 단면도

연 케이블에 비하여 외경 감소에 따른 접속 자재의 compact화로 인하여 전력구 크기의 축소도 예상된다. 그림 10은 345KV용 전력구 및 그 안에 수용될 케이블 배열을 나타내었다.

## 8. 결 론

PPLP를 이용한 새로운 저손실형 345KV OF 케이블은 절연 재료의 특성 확인, 설계, 신 제조 기술로 시제품을 제조하였고 각종 기계적, 전기적 특성시험 및 장기 과동전 시험을 시행한 결과 만족할만한 성능을 확인할 수 있었다. 따라서 345KV 지중송전 선로에 PPLP 절연 OF 케이블을 적용할 경우 도체의 축소, 부속재의 절감 및 송전 손실의 감소로 에너지와 자원 절약이 기대된다.

이 결과를 토대로 하여 향후 접속재를 포함한 장기 신뢰성 및 안정성 시험을 계획하고 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] 한국전력 송변전처 345KV 유입 케이블 및 부속재 구매규격
- [2] H. Tsuda, R. Hata, H. Fukagawa and K. Kanemaru "DEVELOPMENT AND ACTUAL USE OF 275 KV LOW-LOSS SELF-CONTAINED OIL-FILLED CABLES WITH LAMINATED PAPER INSULATION" IEEE Vol. PAS-103, No. 4 APR.1984.
- [3] Y. Watanabe, H. Fukagawa, Z. Iwata, R. Hata, S.



- Yoshida, H. Saitoh and Y. Fujiwara "DEVELOPMENT OF NEW 500KV LAMINATED PAPER INSULATED SELF-CONTAINED OIL-FILLED CABLE AND ACCESSORIES" IEEE 1986.
- [ 4 ] Z. Iwada "DEVELOPMENT OF VHV OPPL INSULATED OF CABLE" FURUKAWA REVIEW 6, 1987.
- [ 5 ] 内田 啓二, 風間 洋治, 今城 尙久, 藤井 治, 三浦 功, 松本 信行, 久喜 弘, 鳴田 光正 "半合成紙絶縁 500KV OF ケーブルの 開発" EC-86-1 日本電氣學會 研究會 資料 JAN. 1986
- [ 6 ] N. Ichyanagi, R. Hata "NEW COMPOSITE INSULATION" IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-21 No. 6 Dec.1986
- [ 7 ] H. Kubo, N. Noda, I. Nishino, R. Hata, T. Miyazaki "DEVELOPMENT OF 275KV OIL-FILLED CABLE INSULATED WITH POLY-PROPYLENE LAMINATED PAPER(PPLP)" IEEE Vol. PAS-101, No. 12 DEC, 1982
- [ 8 ] J. C. Chan, K. Hajra and Z. S. Paniri "POLY-PROPYLENE/PAPER LAMINATES AS HIGH VOLTAGE POWER CABLE INSULATION" IEEE 1984



**김종원(金鍾遠)**

1951년 3월 1일생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 대한전선 입사. 1986년 대한전선 전력케이블 생산부장. 현재 대한전선 전력케이블 기술부장.



**강성호(姜聲浩)**

1957년 9월 4일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 대한전선 입사. 현재 대한전선 전력케이블 기술과장.



**최창수(崔昌洙)**

1950년 8월 21일생. 1978년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 대한전선 입사. 현재 대한전선 영업기술부장.



**이갑중(李甲中)**

1957년 10월 5일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 대한전선 입사. 현재 대한전선 영업기술과장.