

지중송전케이블 종단접속함내 공극발생과 절연파괴

강지원*, 문경희, 조흥상**
한국전력공사

Insulation breakdown case in Underground transmission cable joint(EBG)

Ji-Won Kang*, Kyoung-Hee Moon, Heung-Sang Cho**
KEPCO

Abstract - 본 논문은 154kV 지중송전선로의 가스중종단접속함(EBG)에서 발생한 절연파괴 고장을 분석하여 정확한 원인을 규명하고자 한다. 초고압케이블의 고장패턴을 분석한 결과 XLPE 케이블의 경우 10년 이내의 선로에서 시공불량 및 제작불량 고장이 집중되고 있는 경향을 보이고 있는 점을 감안시 이에 대한 대책마련이 시급한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 국내 초고압 지중선로에서 발생한 고장사례 분석을 통해 향후 재발방지대책 마련에 활용하고자 한다.

<표 1>과 같이 절연체 파괴공 현상을 확인하기 위해 시료 C, 절연체 결합, 열이력 분석 및 절연재료 특성 확인에 대해 시료 A, C 등을 채취하여 분석을 시행하였다.

<표 1> 각 시료에 대한 시험항목

시험항목		시험목적	구분
구조	치수 검사	케이블 단면 구조 확인	-
절연체	계면 관찰, 이물검사	절연체 이물, 보이드, 돌기 관찰	A, C
	상온상 인장시험	절연재료 특성 확인	A, C
	Hot Oil Test	절연체 B/D 형상 확인	C
	Hot Set Test	절연체의 가교도/열화정도 확인	A, C
	DSC 분석	절연체의 열 이력 확인	A, C
	FT-IR 분석	산화에 의한 열화정도 확인	A, C

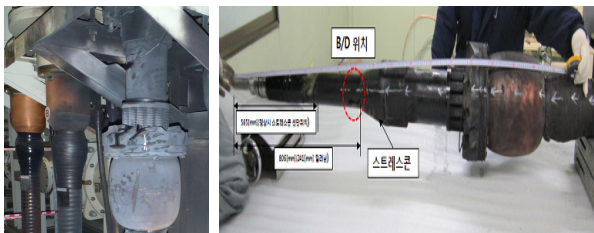
1. 서 론

지중송전케이블의 접속함이란 전력전송을 위하여 지중케이블과 가공선로간, 지중케이블과 차단기간 또는 변압기간, 지중케이블 상호간을 서로 연결하여 주는 접속장치를 말하며 그중 가스중종단접속함은 GIS 차단기내의 부스바와 지중송전케이블을 연결할 때 사용하는 접속함으로 전계완화를 위한 일반적인 내부 절연구조는 기중종단접속함과 유사하며 접속함의 외부 보호용 절연물은 에폭시 계열의 에관을 주로 사용한다. 이번 고장분석한 XLPE 케이블의 가스중종단접속함은 공장에서 생산된 케이블과 부품의 품질 조사를 위해 절연파괴된 부위의 시료를 채취하여 시료 분석을 수행하였으며, 접속작업의 정상적인 작업 수행을 확인하기 위해 케이블 부품 조립시 EBG 접속도면 치수에 따른 작업 사항을 점검하였다. 또한 EBG 접속작업시 작업자의 시공결함에 의한 고장 발생 가능성도 검토함으로써 고장원인 분석의 정확도 높이고자 하였으며 향후 재발방지대책 마련에 활용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 고장개요

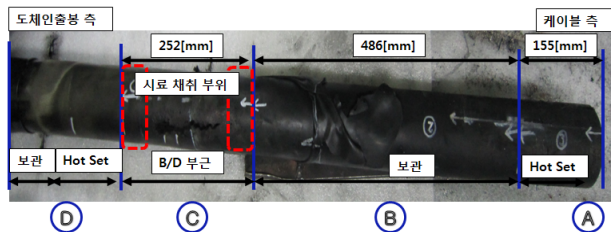
변전소 구내 케이블 종단점인 가스중종단접속함(EBG)에서 2011년 초에 절연파괴 고장이 발생하였다. 지중송전케이블 제원은 154kV XLPE 2000mm²로 약 0.7[km] 지중선로이며, 준공 후 약 8년 만에 절연파괴되었다.



<그림 1> 케이블 고장사진

2.2 절연파괴 부위 시료 채취

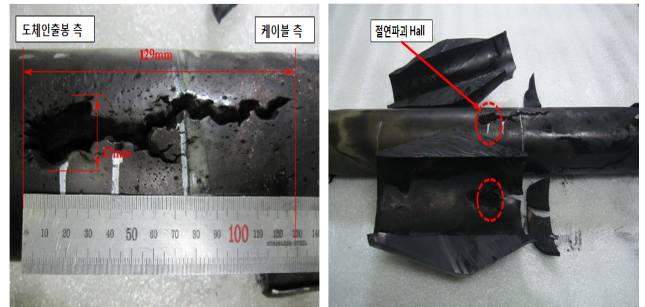
해당선로의 고장원인을 규명하기 위해 절연파괴된 시료를 채취하여 분석을 실시하였다. 시료분석은 크게 절연 파괴공 주위의 외관검사와 파괴부위의 시료를 <그림 2>와 같이 4개소로 구분하여 각 부위 시료를 중심으로 분석을 실시하였다.



<그림 2> 케이블 시료 구분

2.2.1 외관검사

절연파괴공은 가스중종단접속함내 도체 인출봉으로부터 약 730[mm] 지점(스트레스콘 절연체 부위)에서 발생하였으며, 파괴공 크기(외경)는 가로×세로×길이=23[mm]×17[mm]×129[mm]이다. 외관상 특징은 스트레스콘 선단 위치가 정상기준 대비 약 241[mm] 케이블축으로 밀려났으나 형상은 유지되어 있었다.



<그림 3> 파괴공 발생부위 도체상태 및 외형

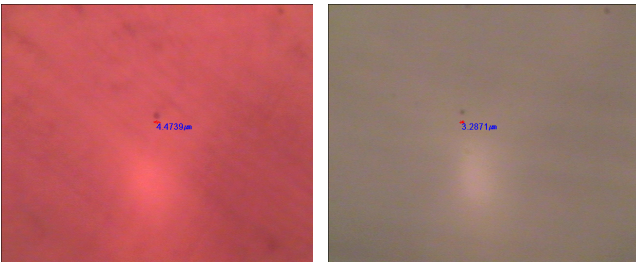
2.2.2 케이블 시료분석 결과

해당선로에 대한 시료분석 결과를 <표 2>에 나타내었다. 케이블 구조검사는 고장부위가 한전 구매규격에 적합하지 여부를 확인하기 위하여 측정장비를 이용하여 케이블 구조를 측정하는 것이며, 절연체 인장특성 시험은 XLPE 절연체의 기계적 강도인 상온 인장강도와 신장율 상태를 확인하기 위해 시행하는 시험이다. Hot-Set Test는 전력케이블의 절연체로 사용되는 XLPE의 가교도와 노화현상을 파악하기 위하여 가교도를 측정하는 시험이며, DSC Test는 시차 주사열량측정에 의한 케이블 절연층의 용해열을 측정하여 절연체내의 열이력을 파악하고 그 열 열화현상을 확인하는 시험이다.

한편, FT-IR 분석은 적외선을 이용하여 시료의 고분자사슬운동, 화학결합 등을 측정하여 절연재료의 화학성분, 화학결합정보 및 산화정도를 확인하는 실험방법이며, Oil Bath시험은 XLPE 케이블 내부 반도체층 돌기를 검사하고, 염색Test는 케이블 절연체의 결합유무 즉 보이드, 이물 등과 반도체층의 불균일한 압출에 의한 돌기, 함몰을 측정하기 위해 돌보기와 현미경으로 관찰하는 시험방법이다. 각 시료에 대한 외관검사 및 채취 분석 결과 절연층내 일부 보이드(10[μm] 이하)가 발견되었으나 정상기준(50[μm] 이하)을 만족하며, 금속이물 및 돌기 등은 발견되지 않았다.

<표 2> 시료분석 결과 종합

시료분석구분	정상치	분석치	비고	
외관검사	참고시험	파괴공 1개	23×17	
케이블 구조	한전 규격	-	정상	
절연체 인장 특성(A,C)	인장 : 12.5N/mm ² 이상 신장율 : 200% 이상	22.4N/mm ² 이상 535% 이상	정상	
Hot Set Test(A,C)	Hot : 175[%] 이하 SET : 15[%] 이하	Hot: 85[%] 이하 Set: 0.0[%] 이하	정상	
DSC(A, C)	참고시험	특이사항 없음	정상	
FT-IR(A, C)	참고시험	특이사항 없음	정상	
Oil Bath(C)	돌기 250[μm] 이하	없음	정상	
염색Test (A, C)	보이드	50[μm] 이하	6[μm] 이하	정상
	Amber	250[μm]이하	없음	정상
	B.,Metal	100[μm]이하	11[μm] 이하	정상
	돌기	250[μm]이하	없음	정상



<그림 4> 돋보기 및 현미경 관찰(보이드 측정)

2.3 EBG 접속도면에 따른 정상시공 점검

접속작업의 정상적인 작업수행을 확인하기 위해 건전상인 A, B상과 사고상인 C상을 조립의 역순으로 해제하여 케이블 부품 조립시 EBG 접속도면 치수에 따른 작업 수행을 확인하였다. 도체인출봉 상단을 기준으로 에폭시 부싱 상단과 반도체포인트 상단까지 각각의 치수는 표준치수와 동일하여 전기적 성능에 영향을 줄 수 있는 요소는 없는 것으로 판단되며, 도체인출봉 상단에서 스트레스콘 상단까지의 거리는 건전상 A, B상의 경우 에폭시 부싱 해체시 각각 5[mm], 7[mm]가 밀려 올라갔으며, 사고상 C상의 경우 케이블 측으로 241[mm]가 밀려 내려간 것은 사고시 열압력이 아래쪽으로 분출되면서 절연통 파괴와 동시에 내려간 것으로 추정된다.

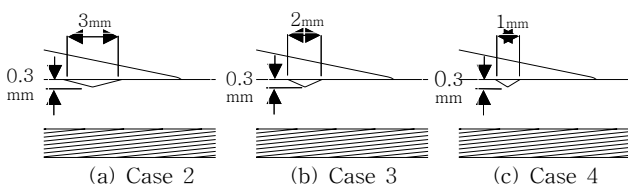
2.4 시공결합 발생 가능성 검토 및 전계해석

접속작업 시공결합에 의한 고장발생 가능성을 검토하기 위해 케이블 절연체 표면에 스크래치가 발생하여 Stress Cone과 케이블 절연체 사이 공극이 존재시 계면공극 크기에 따른 전계해석을 [표 3]과 같이 실시하였다. 전계해석시 인가전압은 정격전압인 87[kV]로 하였다.

<표 3> 시뮬레이션 Case

Case	계면 공극 크기[H mm× L mm]
1	공극이 없을 경우 (정상상태)
2	0.3mm × 3.0mm (완만한 각도의 공극)
3	0.3mm × 2.0mm (중간각도의 공극)
4	0.3mm × 1.0mm (날카로운 공극)

계면공극 형상은 <그림 5>와 같다. 공극은 스트레스콘의 절연부 아래에 존재하며 공극 위로 보이는 좌상향 대각선은 스트레스콘의 절연부와 반도체부의 접합면을 나타낸다.



<그림 5> 계면공극 현상

전계해석 결과를 아래 <표>에 나타내었으며, Stress Cone과 케이블 절연체간에 스크래치가 발생하여 공극이 존재할 경우 연면전계값이 기준치인 0.8[kV/mm]를 상회하며, 또한, 같은 깊이의 스크래치라 하더라도 날카롭게 패인 스크래치가 완만하고 길게 패인 스크래치보다 높은 전계값을 보이는 것으로 검토되었다. 따라서 케이블 절연체와 Stress Cone 계면간에 어떠한 형태의 공극이 존재할 경우 공극에서 기준전계값을 상회하는 연면전계값이 발생되며 이로 인하여 절연파괴가 발생했을 것으로 추정된다.

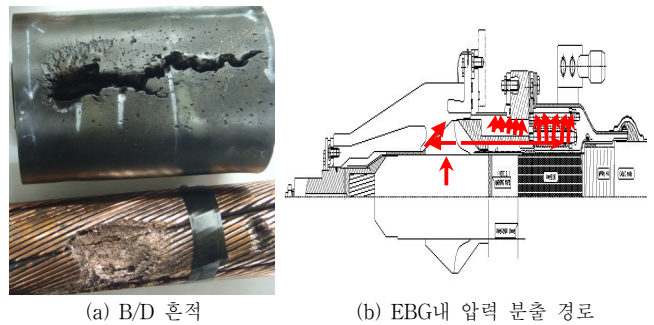
<표 4> Case별 시뮬레이션 결과

Case	계면공극 크기 [H mm× L mm]	결과[kV/mm]	설계기준 [kV/mm]
1	공극이 없을 경우	0.70	0.8
2	0.3mm × 3.0mm	1.67	
3	0.3mm × 2.0mm	1.92	
4	0.3mm × 1.0mm	3.14	

2.5 사고 메커니즘 검토

사고 메커니즘은 사고상(C상)의 스트레스콘과 케이블 절연체 계면사이에 작업자의 절연체 다듬질 공정중 작업자가 인지하지 못할 정도의 작은 상처에 의한 미세 공극이 발생하였고, 절연체와 스트레스콘 내부 계면의 미세 공극 지점에서 전계가 집중되어 점진적으로 절연체의 절연성능이 저하됨으로써 외도에서 도체쪽으로의 절연파괴에 따른 1선지락이 발생되어 절연파괴된 것으로 추정된다.

한편, 도체가 상당량 용융되어 있을 뿐만 아니라 케이블 절연체도 길이 방향으로 약 129[mm] 박리된 점을 고려시, B/D 발생 시에 매우 큰 압력과 열적인 에너지가 발생했을 것으로 추정되며(<그림 6, (a)> 참조), 압력 및 열에너지가 분출했을 경우에 그 분출된 압력은 <그림 6, (b)>에서 표시한 경로로 작용했으며, 이로 인해 하부 동관에 변형 및 절연통이 파손되었을 것으로 추정됨.



<그림 6> 도체와 케이블 절연체의 B/D 흔적

3. 결 론

가스중중단접속함(EBG)내에서 절연파괴가 발생한 케이블에 대해 사고원인분석을 실시하였으며 검토결과는 다음과 같다.

- (1) 절연파괴부위 중심으로 각 시료에 대한 외관검사 및 재료분석 결과 절연층내 6[μm] 이하의 보이드 및 11[μm] 이하의 Metal이 일부 발견되었으나 정상치 기준(50[μm] 및 100[μm] 이하)을 만족하므로 제조결합을 의심할 만한 특이사항은 발견되지 않았다.
- (2) 한편, EBG 접속도면에 따른 정상시공 점검시 발견된 도체인출봉 상단에서 스트레스콘 상단까지의 거리 측정시 사고상 C상의 경우 케이블 측으로 241[mm]가 밀려 내려간 것은 사고시 열압력이 아래쪽으로 분출되면서 절연통 파괴와 동시에 내려간 것으로 추정된다.
- (3) 또한, 급변 가스중중단접속함(EBG)의 고장은 절연파괴공 위치를 고려시 스트레스콘과 케이블 절연체 계면사이에 작업자의 절연체 다듬질 공정중 작업자가 인지하지 못할 정도의 작은 상처에 의한 미세 공극이 발생하여 그 지점에서 케이블이 절연파괴된 것으로 추정되며, 케이블 EBG 절연파괴 형상으로 보아 파괴공은 많은 압력과 열에너지를 분출시켜 밀대를 통해 접지측으로 고장이 발생한 것으로 추정된다.

[참 고 문 헌]

- [1] EB-G 접속작업 표준서(2004년 ?)
- [2] 지중송전케이블 시스템(2002년, 한국전력공사)