

154kV 지중 POF 케이블의 腐蝕防止에 관한 研究

○ * * * * *
이동일, 김정부, 정동원, 김대경, 이종범, 정성환

* 한전기술연구원, **한국전기연구소

A Study on the Corrosion Control and Protection of
154kV Underground Pipe-type Oil Filled (POF) Cable

○ * * * * *
D.I.-LEE, J.B.-KIM, D.W.-JEONG, D.K.-KIM, J.B.-LEE, S.H.-JEONG

* KEPCO, ** KERI

Abstract - KEPCO has experienced eight oil leakage failures due to POF cable corrosion in the 154KV underground POF cable transmission line since the line was operated in 1976.

Experimentally, We have verified that the cause of the failure is electrolytic corrosion of the cable owing to subway leakage current. For the countermeasure, We adopted the total Cathodic Protection System by the use of Victim Anode, Forced Drainage Method and Impressed Current Method with polarization cell.

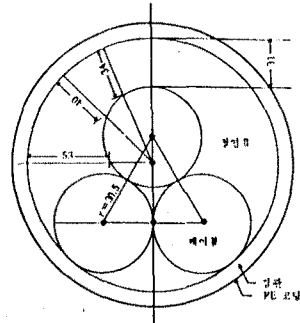


그림 1. POF 케이블 단면도 (단위 : (mm))

표 1. POF 케이블 주요 제원

케이블 규격	POF 633mm ²
강관 내경	155.6 mm
강관 외경	168.3 mm
케이블 외경	61 mm
코팅 재질	PE
코팅 두께	1.6 mm
매설 길이	1.5 m - 3.5 m
강관단화깊이	13 m
윤전압력	200 psi

1. 서론

一般的으로 土壤에 묻혀 있거나 물에 잠겨 있는 금속체는 부식하기 쉬우므로 적절한 防蝕對策이 要求된다. 그러나 한전 POF 케이블의 경우 設計 당시에 腐蝕 및 防蝕에 대한 인식 부족등으로 적절한 방식대책을 세우지 못함으로 인해 건설후 약 11년이 경과한 1987년부터 당인리-순화 지중 송전선에서만 현재까지 8 회의 부식에 의한 누유사고를 기록하고 있다.

따라서 本研究의 目的은 現在의 腐蝕速度를 현저히 감소시키거나 혹은 腐蝕을 防止하여 케이블의 수명을 연장함으로써 경제적인 계통운용을 기하고, 아울러 사고예방을 통해 공급 신뢰도를 向上시키기 위해 당 공사 POF 케이블의 부식원인을 규명하고, 이에 적절한 방식대책을 수립하는 데 있다.

이의 달성을 위한 理論的인 배경을 뒷받침하기 위하여 금속체의 腐蝕 및 防蝕에 관한 기본적인 概念을 把握하고, POF 케이블 腐蝕 메카니즘 및 電氣防蝕法의 理論과 國內外 POF 케이블 電氣防蝕 適用實態를 調査한 후 現행 한전 POF 케이블의 부식원인을 밝히고 이에 적절한 防蝕對策을 導出하였다.

아울러 현재까지의 누유사고 실적으로 판단할 때 방식 적용 후 약 1년간은 현재 임계 狀況에 도달한 腐蝕部分은 방식설비의 적용에 관계없이 누유사고를 일으킬 것으로 豫想된다.

2. POF 系統 現況

2-1 POF 케이블

한전 POF 케이블은 그림 1과 같이 강관 내부에 삼상의 케이블로 구성되어 있으며 주요 제원은 표 1 과 같다. 강관은 용접으로 접속되어 있으며 급유 파이프와는 절연프렌지를 사용하여 전기적으로 절연되어 있다.

2-2 선로현황

POF 케이블 선로 현황은 표 2와 같다.

표 2. POF 케이블 선로 현황

선로명	구간	선로구장 (km)	건설년도
154kV 당순 지중 송전선	당인리 S/S - 순화 S/S	8.09	1976.8.
154kV 당현 지중 송전선	당인리 S/S - 순화 S/S	8.09	1981.5.
	순화 S/S - 현저 S/S	2.5	1977.3.
154kV 순중 지중 송전선	순화 S/S - 중앙 S/S	1.66	1977.4.
154kV 현인 지중 송전선	현저 S/S - 흥인 S/S	7.16	1982.2.
154kV 중동 지중 송전선	중앙 S/S - 성동 S/S	6.5	1982.2.
154kV 인동 지중 송전선	흥인 S/S - 성동 S/S	3.5	1976.8.

2-3 管路圖

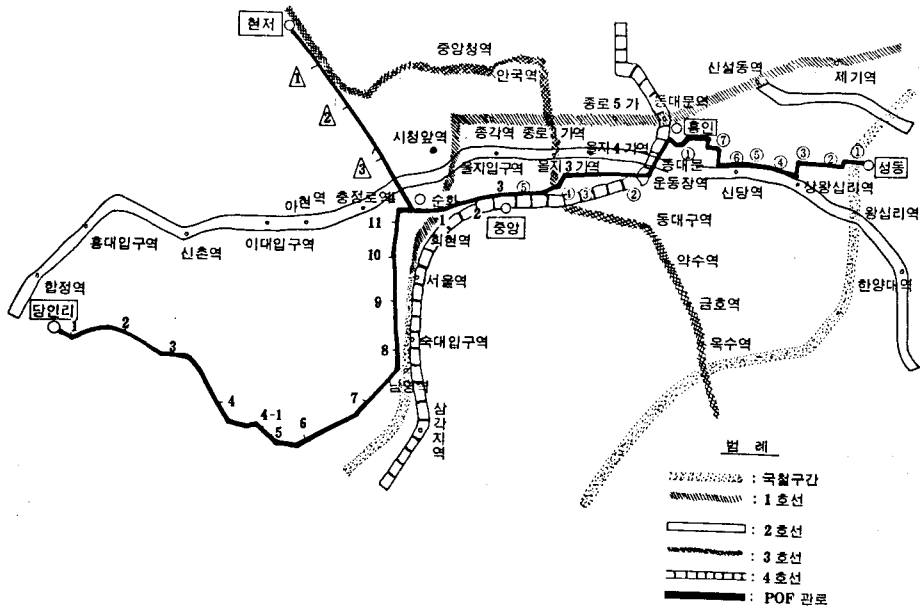


그림 2. POF 케이블 관로도

3. 부식원인 조사

3-1 시험방법

일반적으로 강관은 자연상태에서 토양에 대해 -400 mV에서 -650mV/CSE의 자연전위를 가지므로 이 전위 이상에서는 부식이 진행되고 있으며, -850mV/CSE 이하에서는 방식상태에 있다고 판정할 수 있다. 따라서 파이프와 토양사이의 주간(지하철 운영 시간대) 및 야간(지하철을 운행하지 시간대) 전위를 측정함으로써 예상 부식지점을 판단할 수 있으며 아울러 부식의 원인을 예비판단할 수 있다. 또 지하철 레일과 토양사이의 전위를 측정하여 전철과의 상관관계를 밝힐 수 있다. 그림 3은 파이프와 토양사이의 전위 측정 회로도를 나타낸 것이며 그림 4는 레일과 토양사이의 전위 측정 회로도를 나타낸 것이다.

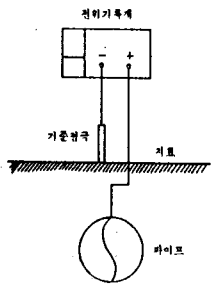


그림 3. 파이프와 토양사이의 전위측정회로도

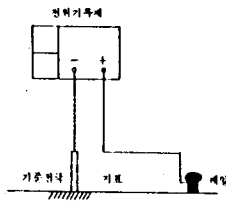


그림 4. 지하철 레일과 토양사이의 전위측정회로도

3-2 시험항목

- 부식원인을 조사하기 위한 시험항목은 다음과 같다
- 1) POF 케이블 파이프와 대지사이의 야간 (01:30 ~ 03:00) 전위 측정: 지하철 운영정지 시간대의 상태파악
 - 2) POF 케이블 파이프와 대지 사이의 주간 (07:00 ~ 22:00) 전위 측정: 지하철 정상운전 시간대의 상태파악
 - 3) POF 케이블 주위의 토양 비저항 측정: 자연부식의 예상지점 및 누설전류 유출지점 판단
 - 4) 지하철 레일과 대지 사이의 전위 및 파이프와 대지 사이의 전위 측정: 전철에 의한 영향 판단
 - 5) 기존 강제 배류기 투입/개방시험: 타방식 시설물에 의한 간섭 판단

3-3 시험결과
가. 야간전위

표 3. 파이프와 대지사이의 야간전위

연월번호	당인라-순화 S/S		당인라-현저 송전선		단위 : (mV)
	야간전위	상 태	야간전위	상 태	
1	+165	부식심함	-420	자연전위	
2	+63	부식심함	-363	부 식	
3	-22	부식심함	-75	부식심함	
4	+132	부식심함	-92	부식심함	
4-1	+115	부식심함	-39	부식심함	
5	+222	부식심함	+82	부식심함	
6	-	-	-353	부 식	
7	-213	부 식	-247	부 식	
8	-321	부 식	-325	부 식	
9	-240	부 식	-246	부 식	
10	-343	부 식	-350	부 식	
11	-70	부식심함	-75	부식심함	
중앙-용인 S/S	현저-용인 송전선		중앙-성동 송전선		
5	-530	자연전위	-465	자연전위	
4	-928	방 식	-1124	방 식	
3	-580	자연전위	-488	자연전위	
2	-392	부 식	-297	부 식	
1-1	-405	자연전위	-364	부 식	
1	-522	자연전위	-463	자연전위	

표 3에서 보는 바와 같이 한전 POF 케이블은 야간에 부식이 상당히 진행중이며 특히 부식이 심한 곳은 당인리-순화 구간의 맨홀 1, 2, 3, 4, 1-6, 11번 및 순화-현저 구간의 맨홀 3 번으로 조사되었으며 의부로 부터 전류가 유입되는 곳은 중앙-흥인구간 맨홀 4 번 인근으로 조사되었다. 즉 중앙-흥인 구간의 맨홀 4 번 인근이 음극, 당인리-순화 구간의 맨홀 5 번 주위가 양극이 되는 거시적 부식전지들 구성하고 있다.

나. 주간전위
표 4는 파이프와 대지사이의 주간전위 측정 결과를 나타낸 것이다.

표 4. 파이프와 대지사이의 주간전위

단위: [mV]

당인리-순화 S/S	당인리-순화 송전선				당인리-현저 송전선			
	최대치	최소치	평균치	상 대	최대치	최소치	평균치	상 대
1	+1350	-1200	+500	부식심함	-60	-700	-250	부 식
2	+700	-610	+80	부식심함	-140	-550	-440	자연전위
3	+620	-540	+60	부식심함	+160	-100	-45	부식심함
4	+640	-620	-20	부식심함	+330	-620	-100	부식심함
4-1	+750	-650	+100	부식심함	+550	-740	-50	부식심함
5	+1100	-550	+250	부식심함	+1140	-550	+200	부식심함
6	-	-	-	-	+495	-780	-100	부식심함
7	+700	-900	-50	부식심함	+940	-1000	+100	부식심함
8	-100	-740	-360	부 식	+40	-800	+330	부식심함
9	+300	-670	-200	부 식	+350	-700	-200	부 식
10	-150	-950	-500	자연전위	-250	-1150	-500	자연전위
11	-240	-1000	-550	자연전위	+240	-1000	-550	자연전위
중앙-흥인 S/S	현저-흥인 송전선				중앙-성동 송전선			
5	+200	-4000	-1750	방 식	-350	-1550	-850	방 식
4	+600	-5500	-2700	방 식	+100	-3500	-1900	방 식
3	+300	-2650	-1100	방 식	-10	-1350	-1900	자연전위
2	-110	-800	-400	자연전위	+750	-850	-100	부식심함
1-1	+950	-850	-100	부식심함	+1300	-980	-50	부식심함
1	+160	-800	-750	자연전위	+850	-980	-150	부 식

주간전위는 최대치와 최소치 사이에서 맥동이 심하며 이 것으로서 전철에 의한 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다. 주간의 부식장소도 야간의 부식장소와 동일하며 특히 중앙-흥인 구간의 맨홀 4 번에서의 전류 유입이 심한 것으로 나타났다.

다. POF 케이블 주위의 토양 비저항
POF 케이블 경과지 인근의 토양 비저항은 표 5와 같다. 측정방법은 시험용 양극을 설치하여 정류기의 출력 측정값을 DWIGHT 공식에 적용하여 역산하는 방법 채택하였다.

표5. 토양비저항

맨 홀 번호	양극설치장소	양 극 개 수	양 극 치 수 (cm)	정류기출력		토 양 비저항 (Ωcm)
				전압 (V)	전류 (A)	
당순 5	대한유화공업 (주)하저장	8	2.2φ X160	65	8	12,100
순현 1	현저동 구치소	10		65	6.5	18,700
중동 3	인현어린이공원	10		65	17.5	6,900
인동 6	성동기계공고	9		65	16	6,800

토양의 비저항과 부식성과의 관계는 학자에 따라 여러가지 학설이 있으나 대부분 비저항 1000 Ωcm 이하인 토양에서 부식성이 큰 것으로 판단하며 5000 Ωcm 이상에서는 부식정도가 적은 것으로 판단하고 있다. 따라서 표 5에서 측정된 비저항 값이 POF 케이블 경과지의 대표값으로 보기는 어렵지만 모두 5000 Ωcm 이상이므로 미시적 부식전지에 의한 자연부식은 무시해도 좋을 것으로 사료된다.

라. 지하철 레일과 대지사이의 전위 및 파이프와 대지사이의 전위측정
파이프와 대지사이의 주간전위를 측정한 결과 중앙-흥인 구간의 맨홀 4 번 인근에서 누설전류의 유입이 많으므로 이 맨홀과 근접 교차하는 지하철 2 호선, 지하철 3 호선 및 지하철 4 호선의 레일과 대지사이의 전위를 측정 비교하였다. 그 결과 그림 5와 같이 지하철 4 호선에서 유입되는 것으로 조사되었다.

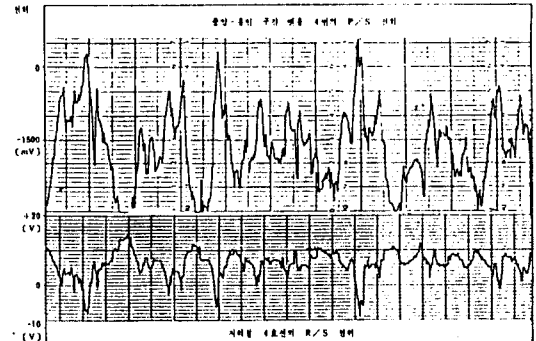


그림 5. 레일과 대지 및 파이프와 대지사이의 전위

마. 기존 강제배류기 투입/개방시험
파이프와 대지사이의 야간전위를 측정한 결과 야간에도 의부로 부터의 전류의 유입이 있고 이 유입전류가 당인리-순화 구간의 강판에서 유출되어 부식이 진행되고 있는 것으로 조사되었다. 야간의 누설전류원으로는 타 시설물의 방식설비가 주원인의 대부분이므로 이 유입전류의 원인을 밝히기 위하여 야간에 운전중인 강제 배류기를 투입/개방 시험을 한결과 그림 6에서 보는 바와같이 타기판에서 시설물의 방식을 위해 설치한 배류기가 간섭을 미치고 있는 것으로 조사되었다.

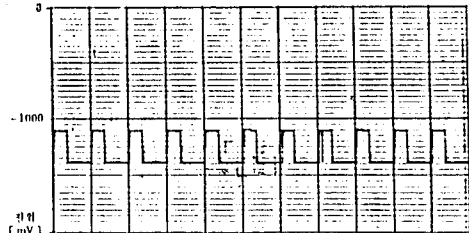


그림 6. 동국대 입구역 강제배류기의 간섭현상 (중앙-흥인 구간의 맨홀 4번)

4. 원인조사 결과

부식원인인물 밝혀기 위한 원인조사 시험의 결과는 다음과 같다.

1) POF 케이블의 경우 중앙-용인 구간의 맨홀 4번 인근이 음극, 당인리-순화 구간의 맨홀 1, 2, 3, 4, 4-1, 5번 인근이 양극으로 구성되는 거시적 부식전지를 형성하고 있다.

2) 구간부식의 원인은 지하철의 누설전류에 의한 전식으로 판명되었으며 주 누설전류원은 지하철 4호선으로 조사되었다.

3) 야간부식의 원인은 타기간에서 설치한 방식설비의 간섭에 의한 전식으로 판명되었으며 누설전류원은 아현역 배류기, 신용산역 배류기 및 동대입구역 배류기로 조사되었다.

4) 당인리-순화 구간 부식 집중원인

(가) POF 케이블 경과지의 전 구간이 지하철과 근접하여 평행하고 있는 가운데 당인리-순화 구간의 맨홀 1번에서 7번사이 및 순화-현저 구간 맨홀 3번 주위가 비교적 지하철과 떨어져 있기 때문에 유입전류가 이 부근까지 밀려서 유출하는 압출전현상으로 판단되며 (나) 당인리-순화 구간의 맨홀 1번에서 5번 사이의 경과지가 한강변에 위치하는 관계로 토양 비저항이 순화-현저 구간에 비해 상대적으로 낮아 부식이 집중되는 것으로 판단된다.

5) 당인리-순화 송전선이 당인리-현저 송전선보다 당인리-현저 송전선보다 부식이 심한 원인

(가) 특히 같은 구간의 당인리-현저 송전선보다 당인리-순화 송전선이 상대적으로 부식이 심한 원인은 당인리-순화 송전선의 負荷분담이 당인리-현저 송전선의 부하분담 보다 높아 강판의 상시 溫度가 높고,

(나) 방식의 관점에서 당인리-순화 송전선이 당인리-현저 송전선보다 施工面에서 미비하였으며,

(다) 상기원인의 누적으로 당인리-순화 송전선의 강판과 서물화력 스위치아드의 접지망 사이의 접지됨에 따라 유입된 누설전류 대부분이 접지망을 통하여 유출되지 못하고 강판의 코팅 손상부분을 통하여 유출하는데 원인이 있다고 판단된다.

5. 防蝕對策 導出

가. 누설전류 대책

누설전류에 의한 대책으로 배류법 및 외부전원법이 있으며 누설 전류원이 명확한 경우 배류법이 가장 효율적이다. 그러나 배류법만을 적용하는 경우 지하철의 운행정지 시간대에는 무방식 상태가 되거나 (선택배류의 경우), 누설전류 원인 제공사 (서물특비시, 지하철 공사)의 입장에서 지하철의 운행정지 시간대에는 강제 배류를 허용하지 않는 등의 제약으로 인해 배류법 만으로는 완전한 방식이 어려우므로 배류법과 외부전원법을 병행 적용하고자 한다.

1) 強制 排流法

배류법에는 선택배류법과 강제배류법이 있으나 선택배류법의 경우

가) 지하철 운행정지 시간대에는 피방식 구조물이 무방식 상태가 되며

나) 지하철과 피방식 구조물의 위치관계에 따라 방식효과 범위가 제한되며

다) 현행 POF 케이블의 경우와 같이 입출전시일 경우 적용이 곤란한 점등의 결점이 있으므로 강제 배류법을 적용하고자 한다.

강제배류법의 장점으로는

가) 방식의 효과범위가 넓고

나) 전압전류의 조절이 쉬우며

다) 지하철 레일의 전압이 피방식 구조물에 비해 높은 경우에도 적용가능한 점 등이 있다.

그러나 강제배류법을 적용하기 위해서는 가) 강제배류법이 다른 전기방식법에 비해 타 구조물에 미치는 간섭의 영향이 적으므로 간섭문제에 대해 충분히 검토하여야 하며

나) 지하철에 대한 신호장애에 대해서도 주의가 요구되며

다) 특히 POF 케이블에 강제배류법을 적용하기 위해서는 POF 케이블에서의 이상전압 및 고장전류가 지하철에 영향을 미치지 않도록 각별한 주의가 요구된다, 이에 대한 대책으로는

가) 간섭의 문제는 설계단계에서 고려하기가 곤란하므로 시공후 간섭현상의 유무에 따라 타기관과 협의하여 대책을 세우도록 하고

나) 지하철에 대한 신호장애 문제는 배류기의 리플전압을 신호에 영향을 미치지 않는 범위로 설계하도록 하며

다) 이상전압 및 고장전류 문제는 배류기에 적절한 차단장치를 부착하여 설계하도록 한다.

Boston Edison Company의 경우 고장전류에 대한 보호대책으로 퓨즈를 사용하고 있다.

2) 分極電池를 사용한 外部電源法

POF 케이블에 대한 외부전원법으로는 여러가지가 있으나 분극전지를 이용한 외부전원법을 적용하는 것이 가장 적절한 것으로 판단된다.

이러한 판단의 근거로

가) 다른 방법에 비해 접지가 확실하며

나) 유지보수가 거의 필요하지 않고

다) 작은 전류로 방식전류의 조정이 가능하며

라) 특히 타 시설물의 방식설비에 의한 간섭의 영향을 최소화 할 수 있다는 점 등이 있다.

나. 간섭대책

간섭은 크게 배류에 의한 간섭과 외부전원에 의한 간섭이 있다. 한편 POF 케이블의 경우 배류에 의한 간섭을 받고 있으며 간섭원은 아현역 배류기, 신용산역 배류기 및 동국대 입구역 배류기로 밝혀졌다. 이러한 배류에 의한 간섭에 효율적인 대책으로는

1) 본드에 저항을 삽입하여 배류전류를 억제하거나

2) 공동 배류법을 적용하거나

3) 상호본드 및

4) 비방식판 및 측에 희생양극을 설치하는 기법 등이 있으나 1)의 경우 타 시설물에 이미 적용되고 있는 설계시방을 현단계에서 수정한다는 것은 여러가지 제약이 따르고 2), 3)의 경우 배류기가 설치된 피방식 구조물이 도시가스 배관인 관계로 POF 케이블 측에서의 이상전압 및 지락사고에 의해 대형사고로 전이할 우려가 있어 적용이 어려우며, 4)의 경우만이 적용 가능하다.

따라서 현재 간섭에 의한 전압이 가장 심한 당인리-순화 구간의 맨홀 5번 및 향후 당인리 변전소에 외부전원을 설치할 경우 외부전원에서 비교적 거리가 멀고 현재 간섭에 의한 부식이 진행중인 맨홀 8번 및 11번에 간섭의 대책 아울러 시공후 부식환경 변화에 대처하기 위한 방식 조치로 희생양극을 설치하고자 한다.

한편 기존에 설치되어 있는 타 기관의 배류기의 경우 전철 운행정지 시간대에는 동작하지 않도록 설계되어 있음에도 불구하고 동작하는 예가 많으므로 배류기 소유기관과 협의하여 간섭의 영향을 최소화 할 수 있는 대책을 세우도록 한다.

6. 結論

한편 POF 케이블의 부식원인은 전식으로 밝혀졌으며 그 원인으로 구간에는 지하철의 누설전류에 의해 부식이 진행되고 있으며, 야간에는 타 시설물의 방식시설에 의한 간섭의 영향을 받고 있는 것으로 조사되었다.

따라서 누설전류원 및 간섭원인 각각 조사한 결과 누설전류원은 지하철 4호선으로, 간섭원은 타기관에서 설치한 아현역 배류기, 신용산역 배류기 및 동국대 입구역 배류기로 판명되었다.

이러한 누설전류 및 간섭에 의한 전식에 대한 대책으로 강제배류법 및 분극전지를 이용한 전기방식법을 아래와 같이 적용하였다.

- 1) 강제배류지점은 전철과의 지리적인 조건 및 POF 케이블 판로의 배치를 고려하여 순화-중앙 구간 맨홀 2번 혹은 당인리-순화구간 맨홀 8번으로 선정하였다.
 - 2) 분극전지를 이용한 전기방식 적용지점은 강제배류에 의한 방식영향 범위를 고려하여 당인리 변전소, 현저 변전소 및 성동 변전소로 선정하였다.
 - 3) 전기방식의 기준은 대지의 전압강화(IR-Drop) 및 케이블의 운전온도를 고려하여 유산동 기준전극 기준으로 -1.5V를 채택하였다.
 - 4) 전기방식법의 전극설계는 인근의 타 시설물에 미치는 간섭을 최소화 하기 위하여는 심매전극법을 채택하였으며 전극수명은 케이블의 수명을 고려하여 30년으로 설계하였다.
 - 5) 정류기는 외부의 환경변화에 관계없이 POF 파이프의 대지에 대한 전위를 항상 방식전위 (-1.5V CSE)로 유지할 수 있도록 정전위 정류기로 설계하였다.
 - 6) 분극전지는 외부의 간섭을 최소화 하기 위하여 POF 케이블의 단말부와 접지사이에 설치하도록 설계하였으며 시방은 당 공사 POF 계통을 고려하여 고장전류는 40KA, 2Sec, 충격내전압은 표준 개폐체로서 선정하였다.
- 일반적으로 당 공사 POF 케이블과 같이 상당히 부식이 진행되는 판로에 대하여 방식설계를 적용할 경우 적용 후 약 1년간은 방식적용 전보다 부식사고가 빈발할 수 있다. 이는 기존 부식지점의 점착성 부식부산물이 점착성을 잃어버리고 탈락함으로써 발생하는 일시적인 현상이다.
- 본 방식설계는 향후 시공단계에서 주변환경의 변화등으로 부식환경이 변화될 수 있으므로 방식효과에 대한 재측정이 요구되며 시공후에도 관리를 생략하거나 점검방법이나 점검결과를 잘못 판단하면 방식설비류의 고장이나 전철 누설전류등의 부식환경 변화를 지나쳐 버리고 경우에 따라서 부식사고를 일으키는 일도 있으므로 효과적인 방식관리 대책이 수반되어야 한다.

참고문헌

1. "Corrosion Basics-An Introduction", NACE, 1984.
2. "Computers in Corrosion Control", NACE, 1986.
3. P.J. Gellings, "Introduction to Corrosion Prevention and Control", Delft university Press, 1985.
4. H. H. uhling, "Corrosion handbook", John Wiley & Sons, 1948.
5. John Morgan, "Cathodic Protection", 2ed., NACE, 1987.
6. A.W. Peabody, "Control of Pipeline Corrosion", NACE, 1967.
7. "Development of a Leak Location System for Use on Underground Electric power Transmission Cable", EPRI EL-2679, 1982.
8. W. D. Lawson, "Corrosion Control for pipe-Type Cable Systems", IEEE Trans PAS, Vol. PAS-97, No 4, pp. 1202-1207, July/Aug 1978.
9. "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems", NACE Standard RPO 169-83 items No 53002, 1983.
10. "Design, Installation, Operation, and Maintenance of Impressed Current Deep Ground beds", NACE Standard RPO 572-85. items No 53012.
11. "Corrosion Control of Electric Underground Residential Distribution Systems", NACE Standard RP-01-74 1974.
12. "부식, 방식", 일본전기학회잡지 102 권 7 호.
13. "당순 T/L 누유사고원인 검토서", 한국전력공사 기술연구원, 1988.
14. "地中 POF 케이블 腐蝕防止에 관한 연구" 한국전력공사 기술연구원, 1988.