

절점망 해석프로그램을 이용한 해저터널 내 고전압 전력케이블에 의한 가스배관의 안전성 평가 연구

† 배 정 효 · 하 태 현 · 이 현 구 · 김 대 경
한국전기연구원
(2001년 8월 30일 접수, 2001년 9월 24일 채택)

A Study on the System Integrity of Gas Pipeline by High Voltage Power Line in Submarine Tunnel

Jeong-Hyo, Bae · Tae-Hyun, Ha · Hyun-Goo, Lee · Dae-Kyeong, Kim
KERI, 28-1, Seongju-Dong, Changwon 641-120, Republic of Korea
(Received 30 August 2001 ; Accepted 24 September 2001)

요 약

최근 국내에서는 효율적인 공간활용을 위해 해저터널을 이용하여 전력을 공급하는 것이 시도되고 있으며, 해저터널 내에 에너지 공급 기간시설물(전력케이블, 가스배관, 송유관, 지역난방배관 등)들이 같이 포설될 수 있으면 공사비 절감의 효과는 엄청날 것이므로 관심이 높아지고 있다.

최근, 국내에서도 해저터널 내에 가스배관과 전력선이 병행 시공되는 경우가 발생하여 가스배관에 대한 안전성에 대한 평가가 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 해저터널 내 고전압 전력케이블에 의한 가스배관의 교류부식, 가스배관의 코팅과 용융, 절연 플랜지, 전기방식용 정류기 등의 전기방식설비의 안정성에 대하여 검토함으로써, 최종적으로 가스배관의 안전성을 평가·연구하였다.

Abstract - Because of the continuous growth of energy consumption, and also the tendency to site power lines and pipelines along the same routes, the close proximity of high voltage structures and metallic pipelines has become more and more frequent.

Recently, the results of assessment about a system integrity are needed in Korea also when a gas pipeline is running parallel with high voltage power line in same submarine tunnel.

Therefore, we analyze the system integrity(AC corrosion of pipe, melting of pipeline coating, safety of insulation flange, especially cathodic protection system which are rectifier and CI(cathodic Isolator)) resulting from the influence of high voltage power system.

Key words : AC Interference, Induction, Conduction, AC Corrosion

1. 서 론

도심지역에 필요한 에너지의 대부분은 주로 전기, 가스 및 온수 등의 형태로 공급되고 있

다. 이러한 에너지를 제한된 공간 내에서 공급할 때 필수적으로 수반되는 문제가 각 시설물 사이의 간섭 문제이다.

지중에 매설되는 금속배관의 간섭은 크게

직류간섭과 교류간섭으로 분류할 수 있다. 직류간섭은 지중에 매설되는 가스 배관, 열 배관 또는 기타 배관 사이의 전기방식(電氣防蝕) 전류에 의한 간섭이며, 교류간섭은 가공 전력선 그리고 지중 전력선과 같은 송·배전선로에 의해 지중 배관에 유도되는 전압에 의한 간섭이다. 이때 교류간섭은 배관 및 배관 작업자의 안전성 측면뿐만 아니라 최근에 문제가 되고 있는 교류부식의 관점에서 큰 문제로 부각되고 있다.¹⁾

시설물 사이에 어느 정도의 상호 이격거리가 확보 가능했던 과거에는 이격거리를 충분히 정하여 엄격히 준수하는 것이 일반적이었으나, 최근에는 활용 가능한 공간이 점점 줄어들어 따라 어쩔 수 없이 최소한의 이격거리를 규정하고 있다. 이마저도 양 당사자간의 합의에 따라 적절한 보호 조치와 함께 이격거리를 점점 더 줄여가고 있는 실정이지만, 국내에서는 이에 대한 연구와 대책마련이 미비한 실정이다. 외국의 경우 1970년대 말부터 이와 관련된 연구가 활발히 수행되고 있으며, 현재 각각의 시설물에 대하여 상호 간섭을 고려한 설계와 시공이 이루어지고 있다.^{2)~4)}

최근, 국내에서도 해저터널 내에 가스배관과 전력선이 병행 시공되는 경우가 발생하여 가스배관에 대한 안전성에 대한 평가가 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 해저터널 내 고전압 전력케이블에 의한 가스배관의 교류부식, 가스배관의 코팅과 용융, 절연 플랜지, 전기방식용 정류기 등의 전기방식설비의 안정성에 대하여 검토함으로써, 최종적으로 가스배관의 안전성을 평가·연구하였다.

2. 유도전압 제한치

본 논문에서는 가스배관의 안정성을 검토하기 위해 고전압 전력케이블로부터 가스배관에 유도되는 전압 크기의 제한치를 국·내외 규격 및 기술자료의 조사·분석을 통하여 <표 1>과 같이 선정하였다.⁵⁾ 이 제한치는 향후의 안전과 여유를 고려하여 가장 가혹한 값으로 선정할 것이다. 특히, 보통 가스배관의 코팅두께가 3[mm]정도 인 점을 감안할 때 코팅이 견딜 수 있는 내전압은 90[kV] 이상일 것이므로 3[kV]의 제한치는 상당히 안전을 고려한 값이라 할 수 있다. 결국, 가스배관이 안전하기 위

해서는 유도된 전압이 이 제한치를 넘지 않아야 한다.

Table 1. 유도전압 제한치

구분	대 상	유도 지속 시간	규 정 치	비 고
간섭	인축의 안전	정상 상태	15[V]	NACE RP0177-83 ^{주1)}
		과도 상태	587[V]	IEEE Std 80, ^{주2)} Step Voltage
			422[V]	IEEE Std 80, Touch Voltage
	시스템 보안	정상 상태	7.85~ 39.25[V]	토양비저항:100[Ω·m] 전 류: 20[A/m ²] 코팅손상크기: 1[cm ²]
	과도 상태	3~5[kV]	EPRI ^{주3)}	

주1) : National Association Corrosion Engineers Recommended Practices

주2) : Institute of Electrical & Electronics Engineers Standard

3. 해석 프로그램

일반적으로 전력케이블을 통해 흐르는 전류에 의해 지하에 매설된 배관에 유도되는 전압을 해석하는 방법에는 유한요소법(Finite Element Method)과 경계요소법(Boundary Element Method) 등과 같은 수치해석법을 이용하는 방법과 절점망 해석법(Nodal Network Analysis)이 있다.⁶⁾

본 논문에서는 수치해석법의 경우 전력케이블과 배관 사이의 병행거리가 길어질 경우 컴퓨터 성능, 시간에 많은 제약이 따르며 정확한 해석이 어려운 점을 감안하여 절점망 해석법을 사용하였다. 절점망 해석법은 π형 집중 등가회로 임피던스 행렬을 이용하는 방법으로써, 적은 시간으로 보다 정확한 결과를 얻을 수 있기 때문에 송·배전 선로에 의해 배관에 유도되는 전압을 계산하는데 많이 활용되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 절점망 해석법을 이용하여 전력계통에 의한 교류간섭을 해석하는 프로그램인 TAOLINK®, CONINDTM라는 상

용 프로그램을 이용하여 유도전압을 해석하였다.⁷⁾

4. 해석 상정 조건

본 논문에서는 아래와 같은 조건으로 유도전압을 해석하였다.

- 해저터널 구간을 병행하는 154[kV] 송전선로 2회선의 상배열을 달리하여 가스배관에 유도되는 전압이 가장 작은 상배치를 결정하였으며, 유도전압이 최소인 상배치에 대하여 해저터널 병행구간의 송·배전선로 접지 유무에 따른 정상상태 및 고장상태를 해석하였다.

- 고장상태는 해저터널 양말단과 중앙에서 1선지락을 모의하여 고장전류가 흐를 때를 해석하였다.

- 또한 해저터널 구간 양단에서 가스배관을 절연했을 경우와 절연하지 않았을 경우를 비교하였다.

- 가스배관 등가회로 계산에 사용된 파라미터를 <표 2>에 요약하였다. 여기서, 토양비저항 값은 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 100[Ω·m]를 입력하였으며, 가스배관 강의 상대투자율과 비저항은 각각 300과 0.17[μΩ·m]로 하였다. 그리고 코팅저항은 배관의 사용기간에 따라 1부터 1,000까지의 값을 가지며, 본 논문에서는 100[kΩ·ft²]로 하였다. 기타 GMR(Geometric Mean Radius)과 Rac 등의 전력케이블 도체 파라미터들은 EPRI에서 발간한 "Transmission Line Reference Book"의 데이터를 사용하였다.⁸⁾

본 논문에서 유도전압을 해석하기 위한 해저터널 구간의 모델링에 대한 개념도는 (그림 1)과 같다. 그림에서 병행하는 154kV 지중 T/L 2회선(6개 도체, 6개 Sheath), 22.9kV 지중 D/L 4회선(12개 도체, 12개 Sheath)과 가스배관 등 총 37개 도체에 대하여 각각의 절점에서 임피던스를 계산하였다. 154[kV] 지중 T/L의 케이블 임피던스는 200[MW] 용량에 역률 0.9일 경우에, 22.9[kV] 지중 D/L의 케이블 임피던스는 10[MW] 용량에 역률 0.9일 경우에 계산한 값을 사용하였다. 고장전류는 50[kA]로 상정하여 해석하였다. 여기서 T/L은 송전선로, D/L은 배전선로를 의미한다.

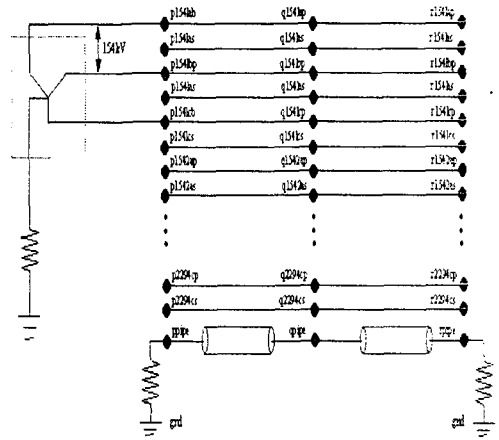


Fig. 1. 해저터널 구간에 대한 모델링의 개념도

가스배관의 크기와 재료 특성은 <표 2>와 같으며, 토양비저항 값은 국내에서 대표치로 사용되고 있는 100 [Ω·m]를 사용하였다.

Table 2. 가스배관 등가회로 계산에 사용된 파라미터

파라미터	기 호	입력값	비고
토양비저항		100 [Ω·m]	
가스배관 금속 투자율	mu	300	
가스배관 비저항		0.17 [μΩ·m]	
코팅 저항	R _{coat}	100 [kΩ·ft ²]	
코팅 투자율	coat_perm	2.4	

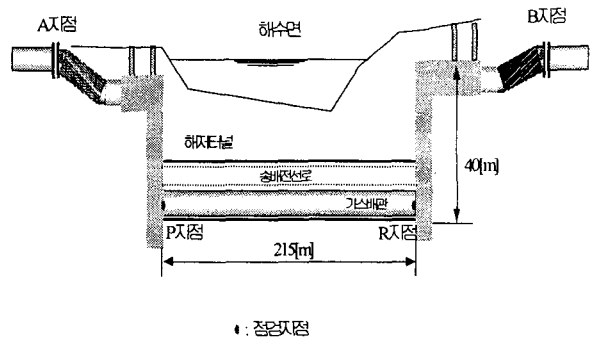


Fig. 2. 해저터널의 단면도

5. 해석결과

5.1. 정상상태 해석결과

TACLINK[®]를 이용하여 고전압 전력케이블에 흐르는 전류에 의해 가스배관에 유도되는 전압을 해석한 결과, 정상상태에서의 유도전압 최대치는 해저터널 내 가스배관 말단지점인 P 지점에서 0.997[V]로 나타났다.⁹⁾

5.2. 고장상태 해석결과

해저터널 구간에서 1선지락이 발생하여 고장전류가 흐를 때 가스배관에 유도되는 전압의 해석 결과, 유도전압 최대치는 약 386[V]로 계산되었다.⁹⁾ 해저터널 말단의 1선지락은 p1541bp와 p1541bs 그리고 r1541bp와 r1541bs 각각에 대하여 양단에 0.001[Ω]의 저항을 연결하여 해석하였으며, 해저터널 중앙의 1선지락은 q1541bp와 q1541bs 양단에 0.001[Ω]의 저항을 연결하였다. 송·배전선로에 접지를 하지 않은 것을 해석하기 위해 Sheath와 접지간에 T/L은 100,000[Ω], D/L은 250,000[Ω]의 저항값을 입력하였으며, 이 경우 가스배관에 유도된 전류는 대부분 변전소 접지로 흘러 나가기 때문에 실제로 가스배관에 유도되는 전압은 낮게 된다.

6. 가스배관의 안전성 평가

6.1. 가스배관 교류부식

정상상태시 유도전압 해석결과, 유도전압 최대치가 0.973[V]로 해석되었다. 따라서, 이 값은 가스배관의 교류부식측면에서의 제한치인 7.85[V]보다 충분히 낮으므로 가스배관은 안전하다.

6.2. 가스배관 코팅

정상상태 혹은 과도상태에서 순간적으로 유도되는 교류전압은 코팅을 파괴시킬 수 있으므로 이에 대한 규정을 살펴보면, 가스배관의 PE 코팅이 절연파괴되는 전압은 KS D3589 와 KS C2105에 의하면 30[kV]/1±0.1[mm] 로 규정되어 있으며, NACE에서 인용한 EPRI(Electric Power Research Institute) 보고서와 Southey에 의하면 3~5[kV]로 규정하고 있으며 용융 결합 에폭시(Fusion Bonded Epoxy)인 경우에는 이 값보다 상당히 높다고 보고되고 있다.

그러나 본 논문에서는 안전을 위해 보전적인

값인 3[kV]를 제한치로 설정하였으므로 유도된 전압이 3[kV] 이하가 되어야 한다.

가혹한 조건인 고장상태 시 유도전압 해석결과, 유도전압 최대치가 386[V]로 해석되었다. 따라서 이 값은 가스배관의 코팅 내전압인 3[kV]보다 충분히 낮으므로 가스배관은 안전하다.

6.3. 가스배관 용융

일반적으로 드문 경우이지만 고장전류에 의해 파이프의 용융(melting)이 발생할 수도 있다. 만일 지중에서 전력선의 지락이 생겨 고장전류가 발생하면 토양을 통해 전도성통로가 형성되고 이 경로를 따라 토양에서 이온화현상이 일어난다. 이때 토양을 이온화하기 위해서는 최소 파괴 전압이 필요하며, 이 파괴 전압의 크기는 전력선의 전압과 토양의 비저항에 좌우된다.

파괴 전압이상이 되면 아크가 발생하며 이 현상으로 생기는 섬광의 거리는 아래의 Sunde 방정식에 의해서, 비저항에 따라 다음의 100 [Ω·m] 보다 작은 경우와, 1000[Ω·m] 보다 큰 경우로 나누어 계산된다.¹⁰⁾

$\rho < 100 \Omega \cdot m$ 인 경우

$$r = 0.08\sqrt{I_{ac} \times \rho} \quad (\text{식 1})$$

$\rho > 1000 \Omega \cdot m$ 인 경우

$$r = 0.047\sqrt{I_{ac} \times \rho} \quad (\text{식 2})$$

여기서

γ = 아크가 발생하는 거리 [m]

ρ = 토양 비저항 [Ω·m]

I_{ac} = AC 고장전류 [kA]

본 논문의 해저터널에서 가장 근접한 전력케이블과 가스배관 사이의 최단거리가 64[cm]일 때, 전력케이블의 아크가 가스배관에 도달할 수 있는 전류의 크기를 (식 1)을 이용하여 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{ac} &= \frac{\left(\frac{r}{0.08}\right)^2}{\rho} \\ &= \frac{\left(\frac{0.64}{0.08}\right)^2}{100} \\ &= 0.64[\text{kA}] \end{aligned}$$

즉, 케이블 지락사고 발생 시 640[A]가 전력 케이블의 Sheath 밖으로 유출되어 토양으로 유입될 때 가스배관까지 아크가 도달할 수 있다.

본 논문에서, 154kV 송전선로의 고장전류가 최대 50kA를 넘지 않으므로, 최악조건을 고려하여 50kA 지락전류가 발생하였을 경우에 해석을 해보면 대부분의 고장전류는 Sheath를 통해 변전소로 흐르며, 고장지점의 주변 토양으로 흐르는 전류는 30A가 흐른다. 따라서 154kV T/L의 1선 지락이 발생하여 토양으로 유입되는 전류의 크기는 가혹한 조건을 감안하더라도 640[A]를 넘지 않을 것이다.

더욱이 전력케이블의 각상 외부에 PVC로 감싸고 있으며, 케이블과 PVC 사이에 공기가 채워져 있어 절연이 더 높아지므로 아크에 의한 용융 현상은 없을 것이므로 가스배관은 안전하다.¹¹⁾

전기방식용 정류기 출력단의 써어지 보호회로의 콘덴서 정격은 여유를 고려하여 630[Vdc]로 선정하여야 한다. 그리고 써어지 보호소자(Varistor)의 사양은 정류기의 출력이 60[V]일 때 안전을 고려하여 114[Vpk]이상의 것을 선정하여야 한다.

6.6. CI(Cathodic Isolator)

CI는 DC 전류는 차단하고 AC 전류는 흘려주는 기능을 갖고 있으면서, 가스배관의 낙뢰 등에 의한 플랜지 보호나 시스템의 안전 때문에 설치되어 있어야 하며, 현재 대부분의 가스배관에는 설치되었거나, 설치 계획에 있다. CI는 기능상 써어지 전류를 통과시켜야 하므로 CI 양단에는 피뢰기(100[kA])가 부착되어 있어 써어지 전압을 800[Vpk] 이하로 제한한다. CI의

Table 3. CI의 Lightning Gas Gap의 특성

Model Number	Rated Discharge Current [kA](8/20[μs])	Power Frequency Sparkover V(50[Hz])	100%Standard Lightning Impulse Sparkover [V]	Discharge Capacity [A/Sec]	Electrode Construction [V]
GG-1816	100	400±25%	≈800	55	Copper Tungsten

6.4. 절연 플랜지

가스배관에 사용된 절연 플랜지는 절연저항계(1,000[Vdc])로 측정하였을 때 절연 플랜지 양단의 저항이 25[MΩ]이상이어야 하고, 5,000[Vac], 60[Hz]의 전압을 1분 동안 흘렸을 때 절연 플랜지 양단에 심락(Flash Over) 혹은 파괴가 일어나지 않아야 한다.

유도전압 해석결과, 고장전류가 386[V]가 유기되므로 절연 플랜지의 내전압인 5,000[Vac]보다 충분히 낮으므로 절연 플랜지는 안전하다.

6.5. 전기방식용 정류기

전기방식용 정류기의 절연저항은 500[V]급 절연저항계(Megger)를 사용하여 측정하면, 전기회로와 외함 사이는 100[MΩ]이상이어야 하고, 내전압은 전기회로와 외함 사이에 AC 2,000[V]를 1분간 가하였을 때 견디어야 한다.

Lightning Gas Gap의 특성은 <표 3>과 같다.

유도전압 해석결과, 고장전류가 386[V]가 유기되므로 CI의 써어지 정격전압인 800[Vpk]보다 충분히 낮으므로 CI는 안전하다. 만약 유도된 전압이 800[kVpk] 이상이 되면 CI는 파괴가 된다.

7. 결 론

본 논문의 해저터널 내 고압전력케이블에 의한 가스배관의 안전성 검토 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 정상상태 시 유도전압 해석결과, 유도전압 최대치가 0.973[V]로 해석되었다. 따라서, 이 값은 가스배관의 교류부식측면에서의 제한치인 7.85[V]보다 충분히 낮으므로 가

- 스배관은 안전하다.
- (2) 고장상태 시 유도전압 해석결과, 유도전압 최대치가 386[V]로 해석되었다. 따라서 이 값은 가스배관의 코팅 내전압인 3[kV]보다 충분히 낮으므로 가스배관은 안전하다.
 - (3) 가스배관 용융 측면에서 살펴보면, 유도전압 해석결과가 배관말단에 접지를 연결한 경우에 약 30[A]정도의 전류가 흐른다. 따라서 154kV T/L의 1선 지락이 발생하여 토양으로 유입되는 전류의 크기는 가혹한 조건을 감안하더라도 640[A]를 넘지 않을 것이므로 가스배관은 안전하다.
 - (4) 절연 플랜지 측면에서 살펴보면, 유도전압 해석결과에서 고장전류가 386[V]가 유기되므로 절연 플랜지의 내전압인 5,000[Vac]보다 충분히 낮으므로 가스배관은 안전하다.
 - (5) 전기방식용 정류기 출력단의 써어지 보호 회로의 콘덴서 정격은 여유를 고려하여 630[Vdc]로 선정하여야 한다. 그리고 써어지 보호소자(Varistor)의 사양은 정류기의 출력이 60[V] 일 때 안전을 고려하여 114[Vpk]이상의 것을 선정하여야 한다.
 - (6) 뇌 써어지로부터 가스배관을 보호하기 위해 설치된 CI(Cathodic Isolator)의 써어지 정격 전압은 800[Vpk]로 선정하는 것이 좋다.

본 연구결과는 송·배전선로에 의해 가스배관에 유도되는 전압계산에 활용될 것이며, 지하에 매설되는 금속배관과 송·배전선로 상호간의 간섭에 의해 유도되는 전압을 고려한 설계와 시공뿐 만 아니라, 해저터널 내부의 가스배관과 지중 송·배전선로의 병행시공을 가능하게 함으로써 막대한 터널공사비 절감과 부지한 해소에 이바지 할 것으로 사료된다. 또한 향후 유사한 현장 시공에 중요한 기초자료로 활용될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전기연구소 “음극방식시스템의 전압, 전류분포 연구” 한국가스공사 연구개발원, 1995
- [2] DIN 30676: Planung und Anwendung des Kathodischen Korrosionsschutzes für den AUBenschutz, Ausg. Okt. 1985.
- [3] Stalder, F., "Pipeline Failures, Materials Science Forum", Vol. 247 (1997) pp. 139-146.
- [4] Ragault, I., "AC Corrosion Induced by VHV Electrical Lines on Polyethylene Coated Steel Gas Pipelines", NACE International, Corrosion '98, Paper No. 557, 1998.
- [5] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 80-1986
- [6] "Principles and Practices of Electrical Coordination Between Pipelines and Electric Supply Lines", CAN/CSA-C22.3 No. 6-M91
- [7] "TACLINK[®], CONIND[™] Reference Manual", Ground-it.com Consulting Ltd., 2000
- [8] EPRI, "Transmission Line Reference Book", Second Edition, Revised, 1987
- [9] 배정효외 2인 "지중전력 케이블에서 고장 발생시 인근 가스배관에 유도되는 전압 해석", 한국가스학회지 Vol. 4, No. 3, pp. 26-32. Sept., 2000.
- [10] "Cathodic Protection considerations for Pipelines with AC Mitigation Facilities" PRC International Corrosion Supervisory Committee. Jan. 1999.
- [11] 한국전기연구원 "154kV 월립-수출 지중 T/L 전식 및 간섭대책 검토 용역" 한국전력공사, 2000