

영구지반변형을 고려한 가스관의 지진해석

박성우, 홍성호*, 고재필*, 임윤묵

연세대학교 토목공학과, 한국가스공사 연구개발원*

Seismic Analysis of Gas Pipelines Subjected to Permanent Ground Deformation

Park, Sung Woo, Hong, Seong-Ho*, Koh, Jae Pyl*, Lim, Yun Mook

Department of Civil Engineering, Yonsei University, KOGAS R&D Center*

1. 서론

빠르게 도시화되어가는 현대사회에서 생활에 필요한 가스, 전기, 통신, 수도 등은 지하에 매설된 형태로 수요자에게 공급되고 있다. 이들 지중구조물들은 건축물과 교량과 같은 기타 구조물과 함께 유기적인 사회환경을 제공하는데 큰 역할을 담당하고 있다. 근래에 우리나라에서는 지진에 대한 위험성을 인식하여 건축물 및 교량에 대해서는 내진설계연구가 활발하게 진행중이지만 지중에 매설된 관에 대해서는 아직 내진설계에 대해서 고려하지 않고 있는 실정이다. 특히 지중매설관은 서로 상호 의존적인 역할을 수행하고 있으므로 이들 구조물 중 일부가 기능수행을 하지 못한다면 이로 인하여 다른 피해를 야기하기도 한다. 예를들면 가스관이 파손되었을 경우 화재를 불러 일으키고, 이 화재를 진화하기 위한 수도의 공급이 원활하게 이루어지지 않는다면 화재의 진화에 어려움을 겪게 된다. 또한 이들 지중매설관은 전력설비 없이는 가동이 불가하므로 전력공급에 차질이 발생하면 직접, 간접적인 피해가 늘어나게 된다. 특히 가스관의 파손은 주변의 환경과 인명에 심각한 영향을 줄 수도 있으므로 인명보호와 타시설의 보호를 위해서는 가스관의 내진설계에 대한 검토가 요구된다.

본 연구에서는 가스관의 내진성을 검토하기 위해서 가스관의 파손을 일으키는 원인 중에 하나인 영구지반변형에 대하여 매설관의 거동을 분석하고자 한다. 이를 위하여 외국의 사례를 분석하고 우리나라 가스관에 대한 해석을 수행하여 지진에 대한 안정성을 검토하고자 한다.

2. 우리나라의 영구지반변형 예측 검토

지진이 발생하였을 때 가스관을 비롯한 지하구조물은 지상구조물과 다른 지진응답을 갖는다. 즉 지상구조물은 관성력에 의해 거동이 지배되고 지중구조물은 지반의 운동에 따라 거동한다. 이러한 지반의 운동은 지진파의 전달과 영구지반변형으로 나눌 수 있다. 단층과 액상화와 같은 영구지반변형으로 인한 지중매설관의 피해는 Northridge 지진과 Hyogo-Ken Nanbu 지진 등에서 찾아볼 수 있으나 미국이나 일본 등 지진발생이 빈번한 외국의 지진과 우리나라에서 발생 가능한 지진과는 강도가 차이가 있다. 따라서 우리나라와 같은 저진도 지역에 대한 영구지반변형을 예측하는 것이 필요하다.

2.1 액상화

1964년 Alaske 지진이 발생한 이후로 액상화에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다. 일반적으로 액상화는 포화사질토가 비배수상태에서 급속한 재하를 받는 경우, 발생되는 과잉공극수압으로 인한 유효응력의 감소와 전단저항의 감소로 인해 지반이 액체처럼 유동하는 현상을 말한다. 이로 인하여 지반이 침하하기도 하고 지반이 수평방향으로 이동하는 현상이 발생하기도 한다.

2.2 액상화에 의한 영구지반변형

액상화로 인한 영구지반변형의 크기는 액상화 발생층의 두께, 사면의 경사, 지진의 크기 등과 밀접한 관계가 있다. Hamada⁽¹⁾ 등은 크기를 예측하는 방법은 다음 식을 제안하였다.

$$\delta = 0.75 \sqrt{h} \cdot \sqrt[3]{\theta_g} \quad (1)$$

여기서 h 는 액상화 층의 두께이며 θ_g 는 경사각이다. 또한 Towhata⁽²⁾ 등은 지반의 단면을 비액상화 층, 액상화 층, 부분 액상화 층으로 나누고 그 위에 상재하중에 가해졌을 때 액상화로 인한 변형을 계산하는 방법을 제안하였다. 그러나 액상화 층의 두께와 경사각으로 변형을 예측하는 방법들은 지역적인 특성에 따라 바뀔 수 있고 지진의 크기를 고려하고 있지 않으므로 저진도의 특성을 가진 우리나라에 적용하기에는 무리가 따른다. 따라서 지진의 크기를 고려한 예측방법이 필요하다.

Youd 와 Perkins⁽³⁾ 는 지진의 크기와 진앙지로부터 떨어진 거리로부터 다음과 같은 변형식을 제안하였다.

$$\log LSI = -3.49 - 1.86 \log R + 0.98M_w \quad (2)$$

여기서 R 은 진앙지로부터 거리, M_w 은 지진의 강도이고, LSI 는 지반의 변형을 inch 단위로 표현한 계수이다. 우리나라의 경우 “내진설계기준 연구”⁽⁴⁾에 따르면 비교적 상세하게 지진을 기록하기 시작한 1978년 이후로 발생한 지진의 최대 강도는 $M_w = 5.3$ 이다. 비록 중국과 접경 지역에서 발생한 지진이라 하더라도 이러한 강도의 지진은 지하구조물에 피해를 입히기에 충분한 강도이다. 우리나라에서 20년 동안 발생한 가장 큰 강도인 $M_w = 5.3$ 의 지진은 식 (2)에서 약 1m의 지반변형을 가져온다.

액상화의 특징을 표현할 수 있는 또 다른 요소는 액상화 길이와 액상화 폭이다. Suzuki⁽⁵⁾ 등은 Nihonkai Chubu 지진에 의해 액상화 길이 또는 폭에 대한 지반변형의 관계를 분석하였다. 그림 1과 그림 2은 각각 액상화 길이와 액상화 폭에 대한 지반변형을 나타낸 것이다. 그림에서 1m의 지반변형에 대한 액상화 길이와 폭은 평균적으로 각각 150m와 300m임을 알 수 있다.

3. 파이프라인의 거동특성

횡방향과 종방향 영구지반변형에 대한 관의 기하학적인 거동 특성은 그림 3과 같이 단순화할 수 있다. 따라서 이에 대한 거동 특성을 분석하고자 한다.

3.1 횡방향 영구지반변형에 대한 파이프라인의 거동특성

횡방향 영구지반변형에 대한 최초의 접근으로서 그림 4에 나타난 횡지반변위를 사인(sine)형태의 함수로서 모형화 할 수 있다⁽⁶⁾. 비액상화 지반의 완만한 경사부에 위치한 느슨한 모래층에서 균일한 액상화가 발생할 때 이러한 형태의 변위가 나타나는데 그림 5와 같은 지반에 놓인 파이프라인 구조물의 경우 가정된 변위형태에 따라 기본적인 지배방정식을 식 (1)와 같이 표현할 수 있다.

$$EI \frac{d^4 v_1}{dx^4} + K_1 v_1 = K_1 \delta (1 - \sin \frac{\pi x}{2l}) \quad 0 \leq x \leq l \quad (3a)$$

$$EI \frac{d^4 v_2}{dx^4} + K_2 v_2 = 0 \quad l \leq x \quad (3b)$$

여기서 E 는 Young 탄성계수, I 는 관의 관성 2 차 모멘트, v_1, v_2 는 각 영역에서의 관의 변위, K_1, K_2 는 지반의 액상화 정도에 좌우되는 변형지반 및 비액상화지역의 등가지반스프링상수, δ 는 최대영구지반변형의 크기, l 은 관망방향의 영구지반변형의 1/2 ($2l = W$) 이다.

3.2 종방향 영구지반변형에 대한 파이프라인의 거동특성

그림 3.(a) 와 같은 종방향 영구지반변위를 받는 연속된 파이프라인 구조물에 대해서 구조물의 운동 및 응력은 지반과 구조물의 경계면에서 발생하는 힘들로 인해 야기되며 이런 경계면은 활동부(slider) 의 형태로 모형화할 수 있다. 트렌치(trench) 가 비점성토로 채워져있는 경우에 대해서 지반과 파이프라인 구조물의 경계면내 단위길이당 마찰력 f_m 은 마찰계수, 관의 원주, 관망에 가해지는 수직 및 수평토압의 단순한 곱으로 표현된다.

$$f_m = \mu \gamma H \frac{(1 + K_0)}{2} \pi \phi \quad (4)$$

여기서 μ 는 지반과 구조물의 경계면에서 고려할 수 있는 마찰계수이며 γ 는 흙의 단위중량, H 는 관의 중심선까지의 깊이, K_0 는 수평토압계수이며 ϕ 는 관의 직경을 나타낸다. 이와 같은 마찰력은 종방향 영구지반 변형에 큰 영향을 미친다.

길이방향을 따라서 일정하게 증가되는 영구지반변형의 크기를 Nordberg^[7] 는 4가지 형태로 분류하였다. 이들 4가지 형태는 관의 최대변형률을 기준으로 다시 분류하면 지반의 변형률이 일정하다고 가정하여 발생한 변위형태와 액상화 길이를 따라 변위가 일정한 변위형태의 두가지로 분류할 수 있다.

4. 해석결과 및 분석

액상화에 의한 종방향 변형과 횡방향 변형을 검토하기 위하여 표1과 같은 고압가스관 저압가스관의 물성을 사용하였고, 저압가스관과 고압가스관에 대하여 변형과 응력을 검토하였다. 그림 6, 그림 7, 그림 8, 그림 9는 횡방향 변형에 대한 가스관의 거동을 나타낸 것이다. 그림 6은 영구지반변형 1m에 대한 액상화 폭에 따른 최대응력을 도시한 것이다. 고압가스관의 경우 액상화가 100m 일어났을 때 최대응력이 발생함을 알 수 있다. 그림 7은 액상화가 발생된 지역의 중심으로부터 비액상화 지역까지의 변위를 도시한 것이다. 액상화 폭은 2장에서 예측한 300m로 하였고 저압가스관은 중앙에서 지반의 변위와 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 8은 300m 액상화 폭에 대한 관의 응력을 나타낸 것이다. 그림 6, 그림 7, 그림 8은 액상화 지역의 지반반력계수가 비액상화지역의 지반반력계수의 1/1000 일 때($K_1/K_2 = 0.001$)의 거동을 분석한 반면에, 그림 9는 비액상화 지역과 액상화 지역의 지반반력계수의 비가 각각 0.1, 0.01, 0.001 일 때의 액상화 폭에 대한 응력을 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 변형에 대하여 액상화 지역의 지반반력계수가 클수록 관에 높은 압력이 발생하였다. 그림 10과 그림 11은 종방향 변형에

대한 관의 응력변화를 도시한 것이다. 그림 10은 액상화 길이방향으로 동일한 변형이 일어났을 때의 응력변화이고 그림11은 지반의 변형률이 일정할 때의 응력변화이다. 이상과 같이 변형에 대해 해석한 결과 저압가스관이 변형에 취약한 것으로 분석되었고 고압가스관도 300 ~2000 kg/cm^2 의 응력증가가 가능함을 알 수 있었다. 이에 대한 영향을 다음 표 2에 나타내었다.

5. 결 론

이상과 같이 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가스관의 내진설계에 영향을 미치는 영구지반변형을 산정하는 방법을 제안하여 내진설계에 대한 정량적인 분석을 수행할 수 있음을 밝혔다.
- (2) 본 연구의 해석방법에 의하면 고압가스관의 변형에 의한 응력증가는 압력에 의한 응력의 20%~120%에 해당하는 응력증가가 가능하므로 영구지반변형에 대하여 고려하여 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술정책관리연구소(STEPI)의 지진재해 대응기술 개발사업 과제로 연세대학교와 한국가스공사가 공동으로 수행한 연구의 일부이며 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K., "Study on Liquefaction-Induced Permanent Ground Displacements and Earthquake Damage," *Proceedings of JSCE*, No.376, 1986, pp.221-229.
2. Towhata, I., Tokida, K., Tamari, Y., Matsumoto, h. and Yamada, K., "Prediction of Permanent Lateral Displacement of Liquefied Ground by Means of Variational Principle," *Proceedings from the Third Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, Technical Report NCEER-91-0001, 1991, pp.237-251
3. Youd, T., Perkins, D., "Mapping of Liquefaction Severity Index," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 11, Nov. 1987, pp. 1374-1394
4. 내진설계 기준연구, 건설교통부, 1997
5. Suzuki, M., Masuda, N., "Idealization of Permanent Ground Movement and Strain Estimation of Buried Pipes," *Proceedings from the Third Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, Technical Report NCEER-91-0001, 1991, pp.455-469
6. Kitaura, M. and Miyajima, M., "Study on Behavior of Buried Pipelines due to Lateral Spreading Induced by Soil Liquefaction," *Journal of Structural Engineering*, JSCE, Vol. 33A, 1987, pp.679-686.
7. O'Rourke, M., and Nordberg, C., "Behavior of Buried Pipelines Subject to Permanent Ground Deformation," *10th World Conference on Earthquake Engineering*, 1996, pp.5411-5416.

표 1 지반의 물성치

물 성	기 호	단 위	물 성 치	
			고압가스관	저압가스관
외 경	d	cm	75.00	15.00
두께	t	cm	1.75	0.71
탄성계수	E	kg/cm ²	2.10×10^6	2.10×10^6
관성모멘트	I	cm ⁴	2.9×10^5	9.4×10^2
항복응력	σ_y	kg/cm ²	4570.00	2952.00
영구지반변형	δ	m	1	1

표 2 압력과 변형에 의한 응력증가

	단위	응 력	설계계수
관내압력	kg/cm ²	80	-
항복응력		4570	-
압력		1700	0.4
변형		300~2000	0.07~0.44
변형+압력		2000~3700	0.47~0.84

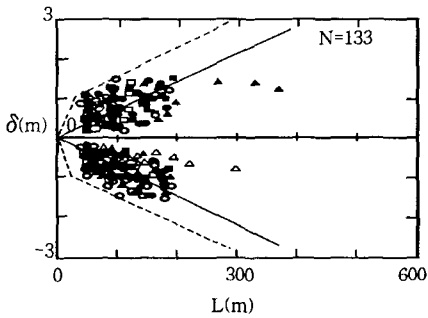


그림 1. 종방향 지반변형과 길이와 상관관계

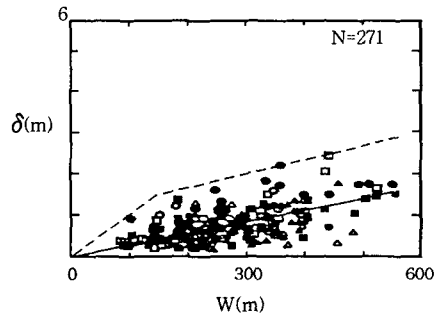
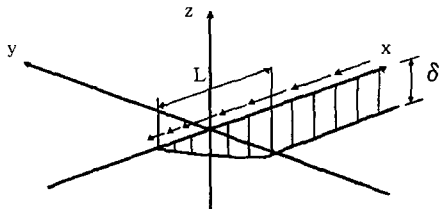
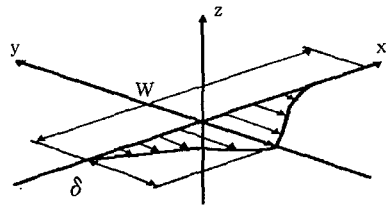


그림 2. 횡방향 지반변형의 액상화폭과 상관관계



(a) 종방향 영구지반변위의 기하형상



(b) 횡방향 영구지반변위의 기하형상

그림 3. 영구지반변위의 기하적 형상

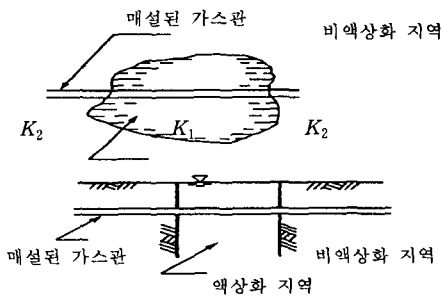


그림 4. 횡방향 영구지반변형을 받는 가스관

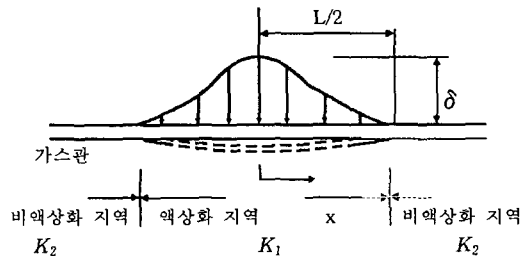


그림 5. 횡방향 영구지반변형을 받는 가스관

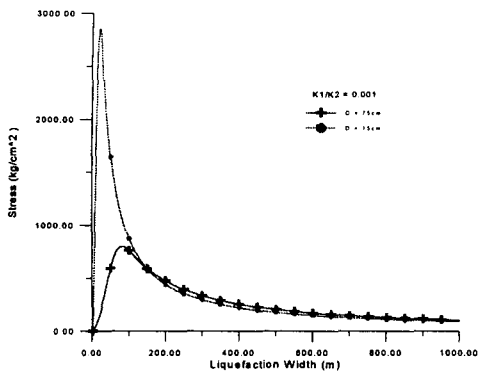


그림 6 액상화 길이에 따른 최대응력

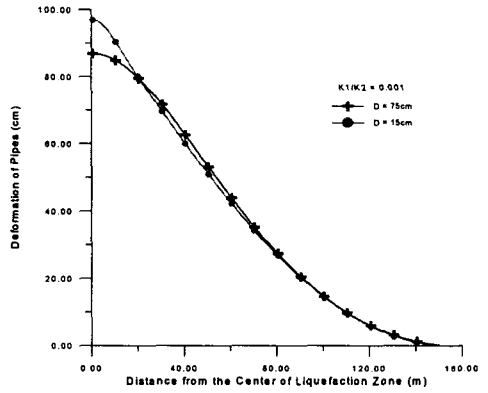


그림 7 300m 액상화에 대한 관의 변형

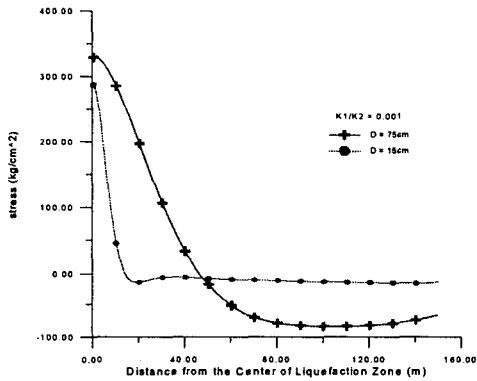


그림 8 300m 액상화에 대한 응력분포

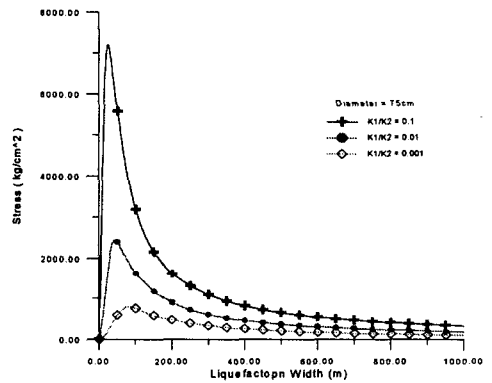


그림 9 K1 값의 변화에 따른 최대응력

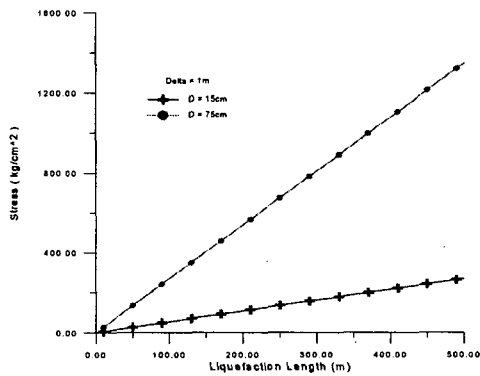


그림 10 1m 중방향 변형에 대한 응력

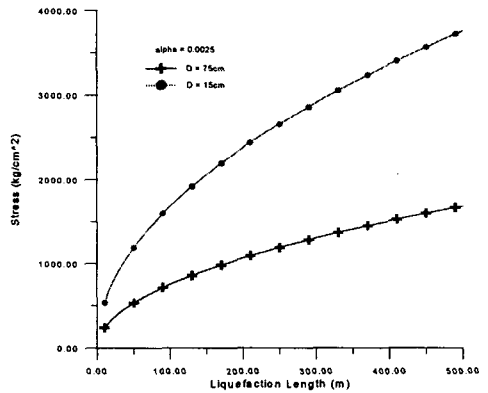


그림 11 0.0025 지반변형률에 대한 응력