

매설가스배관의 지진응답해석

Earthquake Response Analysis of a Buried Gas Pipeline

이도형¹⁾ · 조규상²⁾ · 정태영³⁾ · 공정식⁴⁾

Lee, Do-Hyung · Cho, Kyu-Sang · Chung, Tae-Young · Kong, Jung-Sik

국문 요약 >> 본 연구에서는 국내에서 많이 사용되고 있는 매설가스배관인 X65를 선택하여 매설가스배관의 형태, 매설된 지반의 특성, 단일 및 복합입력지진과 그리고 매설깊이 등을 변수로 하여 시간이력 지진응답해석을 수행하였다. 해석적으로 예측된 변형률 및 상대변위는 국내도시가스 배관의 내진설계 세부기술기준에서 제시하고 있는 허용변형률 및 허용변위역량과 비교하였다. 비교해석결과, 배관의 변형률은 매설깊이와 지반조건에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 상대변위의 경우, 축 방향 상대변위는 매설깊이에 따른 영향을 받지 않는 반면에, 횡 방향 상대변위는 매설깊이와 지반조건에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 결론적으로 본 연구결과는 향후 매설가스배관의 지진건전도 평가에 좋은 자료를 제공할 것으로 사료된다.

주요어 매설가스배관, 배관의 형태, 배관의 변형률, 배관의 변형

ABSTRACT >> Earthquake time-history analyses have been carried out for a buried gas pipeline of X65 which is of popular use in Korea. Parameters included are shape of a buried gas pipeline, soil characteristics, single and multiple earthquake input ground motions and burial depths. Predicted response of strain and relative displacement are then compared with allowable strain and displacement capacity calculated by Guidelines for the Seismic Design of Buried Gas Pipelines, KOGAS. Comparative studies show that strains are in general affected by the burial depths together with change of soil conditions. Regarding the relative displacement, while axial relative displacement is not influenced by the burial depths, transverse relative displacement is affected by both burial depths as well as soil conditions. In all, the current study is encouraged to give a useful information for healthy earthquake evaluation of a buried pipeline.

Key words Buried gas pipeline, type of pipeline, strain of pipeline, deformation of pipeline

1. 서론

1995년 일본에서 발생했던 고베지진은 라이프라인 구조물에 많은 손상을 가져왔고 매설가스배관도 예외는 아니었다. 지진발생 후, 가스배관으로부터의 가스누출과 전기스파크로 인한 화재가 531 군데에서 발생하였고 화재면적은 1 km²에 달했다(EQE summary report, 1995). 더욱 최근에 발생했던 1999년 대만의 지진(Chi-Chi) 지진 역시 많은 가스배관에 손상을 가져왔고 대략적으로 조사된 가스배관의 피해액

은 약 \$ 24,687,500 미국달러에 달했다(Chen et al., 2000). 이렇듯 지진에 의해서 유발되는 매설가스배관의 손상은 가스누출로 인한 화재로 인해 많은 재산 및 인명피해를 유발할 뿐만 아니라 교통 및 통신 등의 사회중요시설물에 심각한 영향을 끼칠 수 있기 때문에 다른 어떤 인프라 구조물보다도 중요시 된다. 그 결과 국외의 경우에는 매설가스배관에 대한 연구가 비교적 상당수 수행되어온 반면에 국내 매설가스배관에 대한 지진응답연구는 상대적으로 매우 미비한 실정이다. 특히, 최근 2007년 1월 20일에 발생했던 국내의 오대산 지진의 경우, 기상청에서 운영중인 대관령 관측소(진앙지거리 약 8km)에서 0.15g(N-S)의 최대지반가속도(국내 도로교설계 기준의 설계최대지반가속도는 0.154g)가 관측될 만큼 우리나라도 이제는 지진에 대해 더 이상 안전지대는 아닌 것으로 판단된다. 국내 내진설계의 경우, 1988년 건축물에 대한 내진설계, 1992년 도로교설계기준 내진설계편 등 지상구조물에 대한 내진연구가 활발하게 진행되어

¹⁾ 정회원·배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과 부교수
(대표저자: dohlee@pcu.ac.kr)

²⁾ 배재대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정

³⁾ 청석엔지니어링 민자철도부 사원

⁴⁾ 정회원·고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 부교수
(교신저자: jskong@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 7. 30 / 심사종료일 : 2007. 11. 13)

은 반면에 가스배관의 경우, 내진 1등급 시설물임에도 불구하고 체계적인 연구가 상대적으로 많지 않았다. 김문겸 외 2인(2003)은 액상화 및 영구지반변형을 받는 지중매설관로의 거동특성을 해석하기 위해서 동적수치해석 알고리즘을 개발하였다. 뿐만 아니라, 김문겸 외 3인(2004)은 지중매설관로에 대해 액상화와 영구지반변형 효과를 고려한 국내지진피해평가 절차를 제안하였다. 또한, 김태욱 외 2인(2005)은 제안한 손상곡선에 기초하여 연속된 구조형식을 갖는 지중매설관로의 손상을 유발하는 액상화 및 영구지반변형의 폭과 크기를 추정하였고, 이에 대한 회귀식을 제안하였다. 하지만 국내의 에너지 소비 중 가스의존도가 매우 높은 현실에 미루어 볼 때 다양한 변수조건을 고려한 매설가스배관에 대한 내진 연구는 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 가스배관의 경우를 선택하여, 매설가스배관의 형태, 매설된 지반의 특성, 그에 따른 비동시성 입력지진파 및 매설깊이 등을 변수로 정하여 매설가스배관에 대한 시간이력 지진응답해석을 수행하였다. 매설가스배관의 경우, 매우 긴 거리에 걸쳐 분포되어 있기 때문에, 일반 지상구조물의 경우와는 달리 단일 입력지진파에 의한 스펙트럼 응답해석은 유효하지 않기 때문에 보다 유용한 시간이력해석을 선택하였다.

2. 해석모델

2.1 해석모델에 대한 고찰

매설가스배관의 지진응답해석을 수행하기 위해서 많은 다양한 형태의 해석모델이 제안되고 이용되었다. 매설가스배관의 해석에 있어서 가장 단순화된 모델은 지반과 배관간의 상호작용을 고려하지 않은 모델로써, 이 경우 배관의 변형은 지반의 변형과 일치한다고 가정한다. Newmark and Rosenblueth(1971), Shah and Chu(1974) 등이 배관의 변형을 검토하기 위해서 이 모델을 사용하였다. 한편 지반과 배관간의 상호작용을 고려한 경우에는 크게 네 가지 해석모델로 나누어질 수 있다. 첫째로는, 지반의 강성을 증가의 탄성스프링으로 모델링한 탄성스프링위의 보 해석모델을 들 수 있다. 이 모델은 주로 매설가스배관의 축 변형을 검토하는데 있어 유용한 모델이다(Wang et al., 1979; Nelson and Weidlinger, 1979). 둘째로, 원통형 쉘 모델을 들 수 있다. 쉘 모델은 매설가스배관의 길이방향에 따른 좌굴파괴를 예

측하는데 적합한 모델로써, 배관의 길이방향 응력을 산정할 수 있는 장점이 있다(Wong et al., 1986; Luco and Barnes, 1994). 셋째로, 평면응력모델을 들 수 있다. 평면응력 모델의 경우, 단면내의 좌굴을 검토하는데 있어 유용하며, 배관내의 응력을 검토하는데 또한 유용하게 이용된다(Datta et al., 1984; Takada and Tanabe, 1987). 마지막으로 가스배관에 유한요소법을 적용시킨 후, 배관의 바깥지역을 연속체 역학의 개념을 적용하여 혼합한 하이브리드 모델을 들 수 있다. 이 모델의 경우, 평면변형률 모델이 적용되고 배관과 지반의 경계면에서 변위와 변형률의 연속성이 유지되는 장점이 있다(Masso and Attalla, 1984). 이상의 간략한 해석 모델에 대한 고찰결과, 각각의 모델들은 나름대로의 장점을 가지고 있기 때문에, 본 연구에서는 지반과 배관과의 상호작용을 고려한 모델 중 하이브리드 모델을 제외한 나머지 3개 모델들을 적절하게 혼합한 해석모델을 사용하였고, 해석모델에 대한 자세한 사항은 2.3절에서 설명하였다.

2.2 해석프로그램 ZeusNL

매설가스배관의 해석모델 및 지진응답해석을 위해서 ZeusNL(Elnashai et al., 2001) 구조해석 프로그램이 사용되었다. ZeusNL은 재료의 비탄성 및 기하학적인 비선형 효과를 고려한 2차원 및 3차원 구조물의 비선형 해석을 수행할 수 있다. ZeusNL 프로그램에는 여러 재료모델과 다양한 형태의 단면 및 요소(element)가 이용 가능하여 실제구조물의 단면해석을 수행할 수 있는 장점이 있고, 고유치해석, 정적해석, Adaptive 정적해석, 정적시간이력해석 및 동적시간이력해석 등을 수행할 수 있다.

2.3 매설가스배관의 해석모델

시간이력 지진응답해석에 사용된 매설가스배관은 국내에서 많이 사용하고 있는 배관인 X65를 선택하였고, 이 배관의 재료 물성치는 표 1에 나타내었다. 매설가스배관의 해석모델을 구성하는데 있어 사용된 기본적인 가정은 1) 매설가스배관 지표면 위의 하중은 무시, 2) 매설가스배관은 지하수위 위쪽에 위치, 즉, 부양효과 배제 및 지반의 건조단위중량 사용, 3) 지반의 조건은 조밀한 사질토(DS, $\phi=35^\circ$), 느슨한 사질토(LS, $\phi=25^\circ$), 그리고 연약점토(SC, $\phi=0^\circ$, $c=0.0168\text{MPa}$)의 세 가지로 구분하여 모델링을 수행하였다.

〈표 1〉 지진응답에 사용된 매설가스배관의 물성치

매설가스배관	항복강도(MPa)	바깥지름(mm)	두께(mm)	단위중량(N/mm ³)	마찰계수 f
X65	445	762	17.5	7.701E-5	0.8

매설가스배관 해석모델의 경우, 매설가스배관은 두 개의 Gauss 단면에서 수치적분을 사용하여 부재의 길이 및 단면의 깊이에 따른 비탄성의 정도를 검토할 수 있는 Cubic 정식화를 이용한 비탄성 요소로 모델링 하였고, 배관의 단면은 표 1에 나타나 있는 바깥지름과 두께를 갖는 속이 빈 원형강 단면을 사용하였다. 배관과 지반의 상호작용은 비선형 Winkler Foundation 모델을 사용하였다. 비선형 Winkler Foundation 모델은 비탄성 보 요소로 모델링된 매설가스배관과 지반하중과의 상호작용을 나타내기 위해서 이산화된 비선형 스프링을 사용하였다. 본 연구에서는 이산화된 비선형 스프링을 3차원 조인트요소로 모델링 하였고, 배관의 축방향(X) 및 횡 방향(Z)은 대칭적인 움직임을 가정할 수 있으므로 3차원 2선형 대칭 탄-소성 하중-변위 곡선을 적용한 반면에, 수직방향의 경우에는 uplift와 bearing 방향의 경우 비대칭적인 움직임을 가정할 수 있으므로 3차원 2선형 비대칭 탄-소성 하중-변위 곡선을 사용하여 모델링하였다. 한편 회전에 대해서는 모두 구속으로 가정하였으며, 따라서 각 방향별 모멘트 하중에 대응되는 모멘트-회전 관계식은 선형 탄성곡선으로 모델링을 수행하였다. 그림 1은 ZeusNL을 이용한 매설가스배관의 해석모델과 비선형 Winkler Foundation 모델 및 비선형 스프링에 대응되는 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. 움직임에 대한 하중-변위 곡선을 구성하는 초기

탄성계수 및 각 방향별 지반의 스프링 힘, 그에 대응되는 상대변위는 American Lifeline Alliance, ASCE(Guidelines for the design of buried steel pipeline, 2001)에서 제안되는 표현식들을 사용하여 구하였다. 매설배관의 단위길이당 축 방향 최대 지반스프링 힘, 횡 방향 최대 지반스프링 힘 그리고 연직방향 상향(uplift) 지반스프링 힘 그리고 연직방향 하향(bearing) 스프링 힘은 식 (1), (2), (3) 그리고 (4)와 같다.

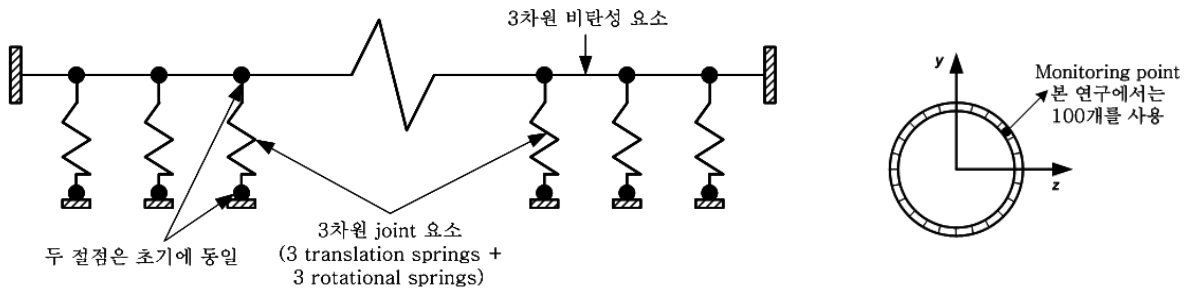
$$T_u = \pi D \alpha c + \pi D H \bar{\gamma} \frac{1 + K_0}{2} \tan \delta \quad (1)$$

$$P_u = N_{ch} c D + N_{qh} \bar{\gamma} H D \quad (2)$$

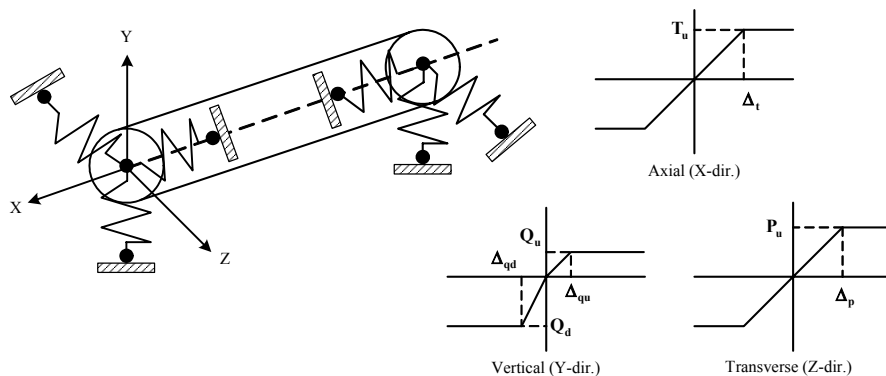
$$Q_u = N_{cv} c D + N_{qv} \bar{\gamma} H D \quad (3)$$

$$Q_d = N_c D + N_q \bar{\gamma} H D + N_\gamma \frac{D^2}{2} \quad (4)$$

위의 식 (1) ~ (4)에서, D 는 배관의 외경, α 는 지반의 부착계수, c 는 지반의 점착력, H 는 지표면으로부터 매설배관 중심까지의 거리, $\bar{\gamma}$ 는 지반의 유효단위중량, K_0 는 토압계수, δ 는 배관과 지반사이의 마찰각, N_{ch} 는 점토의 수평지지력 계수, N_{qh} 는 사질토의 수평지지력 계수, N_{cv} 는 점토의 연직상향계수, N_{qv} 는 사질토의 연직상향계수, N_c , N_q 그



(a) 매설가스배관의 ZeusNL 해석모델과 사용된 단면 및 모니터링 요소



(b) 비선형 Winkler Foundation 모델 및 비선형 스프링에 대응되는 하중-변위 곡선

〈그림 1〉 매설가스배관의 해석모델

리고 N_γ 는 지지력계수들이고, γ 는 지반의 총 단위중량을 나타낸다.

2.4 해석모델의 종류

매설가스배관에 대한 지진응답을 검토하기 위하여 표 1에서 제시된 배관의 매설깊이 즉, 지표면에서 배관의 상부 표면까지의 거리가 1.5m, 길이가 1.2km인 배관을 고려하였다. Datta and Mashaly(1988)는 매설배관의 지진응답에 관한 연구에서, 배관의 단부지역을 제외한 대부분의 구간에서 응력 등의 응답변수들이 단부구속조건에 독립적임을 지적하였다. 따라서 본 연구에서는 배관 단부의 응력검토를 위해서, 배관 양 단부의 구속조건을 고정단으로 하여 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석에 사용된 해석모델의 경우, 직선배관의 경우에는 3단계의 매설깊이(1.5m, 3m, 5m)에 따른 영향을 검토하였고, 하천 및 철도횡단, 그리고 매설 상하수도관의 횡단 등의 영향을 고려하여 경사배관 2종류(highering과 lowering) 및 직각배관 2종류(highering과 lowering)를 고려하였다. 특히 lowering 경사배관의 경우에는, lowering된 구간의 배관 위 토층높이가 lowering되지 않은 구간의 배관 위 토층높이와 일정한 경우와 일정하지 않은 경우를 구분하였을 뿐만 아니라 lowering 각도 또한 3종류(2.86°, 22.5°, 45°)로 구분하였다. 한편 경사배관 및 직각배관의 경우에는 직선배관과는 달리 매설깊이 1.5m만을 고려하여 해석모델을 구성하였다. 본 연구에서 고려된 매설가스배관 해석모델들을 표 2에 나타내었다.

표 3은 위의 식 (1)~(4)를 사용하여 계산한 각 방향별 스프링 힘 및 대응되는 상대변위를 나타낸다. 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이, 3가지의 지반조건을 고려하였고, 매설배관 중심깊이는 지표면에서 배관의 중심까지의 거리로써, 직선배관의 3종류 매설깊이 이외에, 각각 600mm 높이로 highering (1.281m)된 구간과 lowering(2.481m)된 구간을 고려하여 스프링 힘 및 대응되는 상대변위를 계산하였다.

3. 입력지진파, 매설가스배관의 고유치 해석 및 변형 성능

3.1 입력지진파

매설가스배관의 지진응답해석에 사용된 입력지진파는 실제지진에서 기록된 지진파 2개와 인공지진파 1개를 선택하여 매설가스배관의 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 지진파의 선택은 매설가스배관이 묻혀있는 지역에서 발생했던 가장 큰 지진파를 선택하는 것이 바람직 하지만, 현재까지 국내에서 발생했던 비교적 큰 지진파에 대한 기록이 많지 않기 때문에 근래에 발생한 지진 중에서 가장 큰 규모의 지진파를 선택하였다. 즉, 1994년 미국 Northridge의 City Hall에서 기록된 지진파, 1995년 일본 고베의 JMA station에서 기록된 지진파, 그리고 Eurocode 8의 475년 재현주기를 갖는 인공지진파를 선택하였다. 본 연구에서 고려된 배관의 매설깊이는, 표 2에 나타나 있는 것처럼 지표면으로부터 깊지 않기 때문에 각 station에서 기록된 지표면 지진파를 그대로 사용하였다. 각 지진파의 3방향 요소를 모두 고려하여

〈표 2〉 지진응답해석에 사용된 매설가스배관의 해석모델

배관종류	배관형태	모델명	모델설명	입력지진파
직선배관	straight	ST_1	직선배관길이: 1.2km, 배관중심까지의 매설깊이: 1.881m	단일지진파(설계지반가속도)
		ST_2	직선배관길이: 1.2km, 배관중심까지의 매설깊이: 3.381m	
		ST_3	직선배관길이: 1.2km, 배관중심까지의 매설깊이: 5.381m	
		ST_4	직선배관길이: 1.2km, 배관중심까지의 매설깊이: 1.881m	단일지진파(실제지반가속도)
		ST_5	직선배관길이: 1.2km, 배관중심까지의 매설깊이: 1.881m	복합지진파(2 구간)
		ST_6	직선배관길이: 1.2km, 배관중심까지의 매설깊이: 1.881m	복합지진파(3 구간)
경사배관	highering(600mm)	IH_1	highering 구간길이: 120m, highering 경사각: 2.86°	단일지진파(설계지반가속도)
	lowering(600mm)	IL_1	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 2.86° lowering된 구간의 배관 위 토층높이가 lowering되지 않은 구간의 배관 위 토층높이와 일정한 경우	
		IL_2	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 2.86° lowering된 구간의 배관 위 토층높이가 lowering되지 않은 구간의 배관 위 토층높이와 일정하지 않은 경우	
		IL_3	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 22.5°	
		IL_4	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 45°	
직각배관	highering(600mm)	VH_1	highering 구간길이: 120m, highering 경사각: 90°	단일지진파(설계지반가속도)
	lowering(600mm)	VL_1	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 90°	

〈표 3〉 배관의 매설깊이 및 지반조건에 따른 각 방향별 단위길이당 스프링 힘 및 대응되는 변위

매설배관 중심깊이	토질조건	스프링 힘 및 상대변위	배관축 방향	횡 방향	수직방향	
					uplift	bearing
1.881m 깊이의 매설배관	조밀한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	35.2	309.9	55.2	1189.93
		Δ(mm)	3	90.48	18.81	76.2
	느슨한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	24.1	138.8	39.4	341.65
		Δ(mm)	5	90.48	37.62	76.2
	연약점토	스프링 힘(N/mm ²)	40.7	78.9	63.2	94.39
		Δ(mm)	10	90.48	152.4	152.4
3.381m 깊이의 매설배관	조밀한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	63.3	682.5	235.07	2184.4
		Δ(mm)	3	114.3	38.81	76.2
	느슨한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	43.3	289.2	167.91	660.27
		Δ(mm)	5	114.3	76.2	76.2
	연약점토	스프링 힘(N/mm ²)	40.7	85.9	130.4	124.3
		Δ(mm)	10	114.3	152.4	152.4
5.381m 깊이의 매설배관	조밀한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	100.74	1292.72	451.9	2930.25
		Δ(mm)	3	114.3	53.81	76.2
	느슨한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	68.96	516.06	322.78	899.2
		Δ(mm)	5	114.3	76.2	76.2
	연약점토	스프링 힘(N/mm ²)	40.7	90.1	197.6	146.72
		Δ(mm)	10	114.3	152.4	152.4
1.281m 깊이의 매설배관	조밀한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	24.0	188.3	25.6	891.58
		Δ(mm)	3	66.48	12.81	76.2
	느슨한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	16.4	86.4	18.3	246.09
		Δ(mm)	5	66.48	25.62	76.2
	연약점토	스프링 힘(N/mm ²)	40.7	72.9	43.0	85.42
		Δ(mm)	10	66.48	152.4	152.4
2.481m 깊이의 매설배관	조밀한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	46.4	448.3	96.1	1488.27
		Δ(mm)	3	114.48	24.81	76.2
	느슨한 사질토	스프링 힘(N/mm ²)	31.8	196.2	68.6	437.20
		Δ(mm)	5	114.48	49.62	76.2
	연약점토	스프링 힘(N/mm ²)	40.7	82.5	83.4	103.36
		Δ(mm)	10	114.48	152.4	152.4

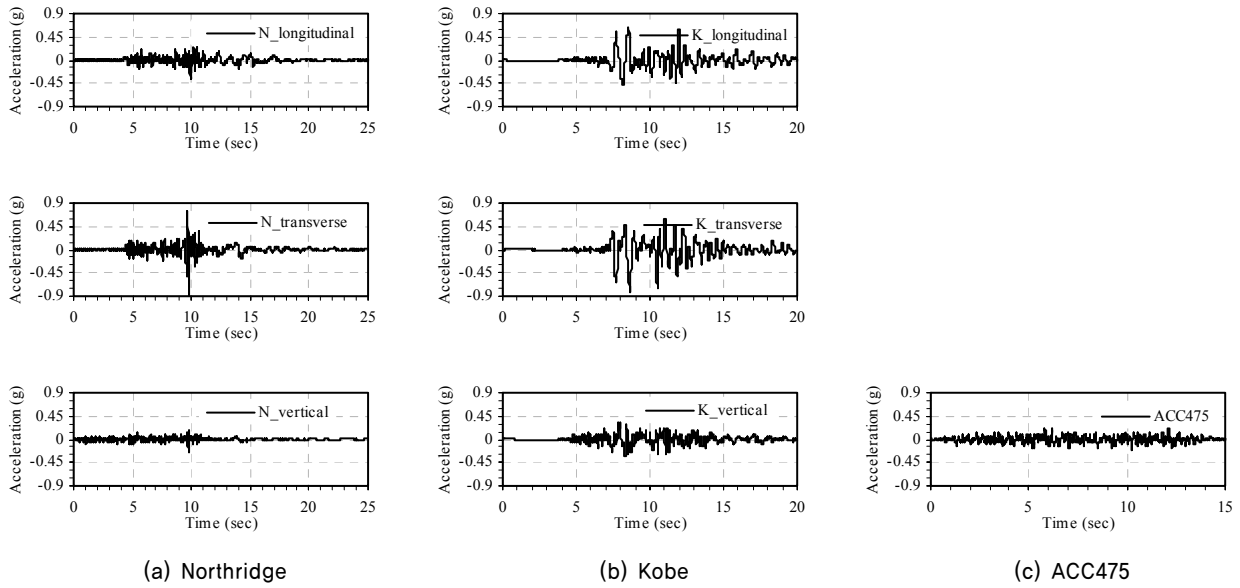
시간이력해석을 수행하였고, 각 방향별 입력지진파는 그림 2, 대응되는 가속도 응답스펙트럼은 그림 3 그리고 최대지반가속도는 표 4에 나타내었다.

표 4의 각 지진파에 대해서, 국내 생산기지탱크 내진설계 기준에 따라서 수평최대가속도를 0.2g로 스케일링 하였고, 수직방향최대지반가속도는 수평방향최대지반가속도의 2/3 (0.133g)로 스케일링한 후 매설가스배관의 비선형 시간이력 해석을 수행하였다. 뿐만 아니라, 표 4의 실제지진파 같은 규모의 지진이 발생했을 때, 국내 매설배관의 지진성능을 검토하기 위해서, 표 4의 최대지반가속도를 그대로 사용한 시간이력해석 또한 수행하였다. 또한, 비교적 긴 1.2km의 매설가스배관에 대한 입력지진파의 영향을 고려하고자, 1.2km 전 구간에 일정한 단일지진파에 의한 해석 뿐만 아니라, 길이에 걸쳐 구간별 다른 지진파를 적용시킨 해석을 수행하여 그 결과값을 비교분석 하였다. 즉, 본 연구에서는 배관길이

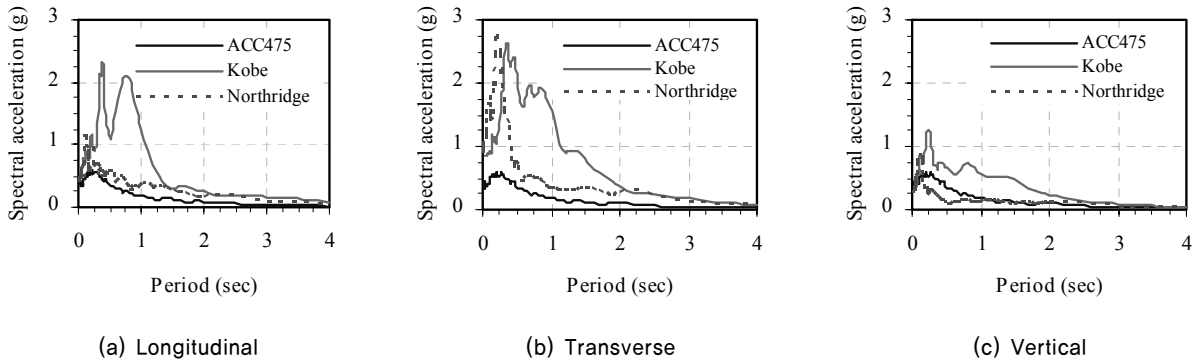
를 2구간으로 일정하게 나눈 후, 각 구간에 각각 Northridge 지진파 Kobe 지진을 적용시킨 경우와, 배관길이를 3구간으로 일정하게 나눈 후, 각 구간에 각각 Northridge 지진파 Kobe 지진 그리고 ACC475 지진을 적용시켜 시간이력해석을 수행하였다.

3.2 매설가스배관의 고유치해석

직선배관 모델에 대해, 지반의 조건에 따른 고유치해석을 수행하였고, 가스배관의 횡 방향 및 수직방향 고유주기를 3차 모드까지 검토하여 표 5에 나타내었다. 표 5에 나타난 바와 같이, 횡방향의 경우 느슨한 사질토 및 연약점토 일수록 고유주기가 일반적으로 증가되는 반면에, 수직방향의 경우에는 연약점토의 주기가 짧고 조밀한 사질토 및 느슨한 사질토 일수록 고유주기가 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이



〈그림 2〉 선택된 입력지진파의 각 방향별 가속도 시간이력곡선



〈그림 3〉 선택된 입력지진파의 가속도 응답스펙트럼

〈표 4〉 선택된 입력지진파의 최대지반가속도

Station(Earthquake)	Remark	최대지반가속도(g)		
		배관축 방향	횡방향	수직방향
City Hall(Northridge 지진)	N	0.370	0.883	0.232
JMA(Kobe 지진)	K	0.632	0.829	0.341
ACC475(Eurocode 8)	A		0.222	

〈표 5〉 매설가스배관의 횡 방향 및 수직방향 고유주기

지반조건	고유주기(sec)					
	횡 방향			수직방향		
	1차모드	2차모드	3차모드	1차모드	2차모드	3차모드
조밀한 사질토	0.6963	0.6867	0.6642	1.6047	1.4666	1.2991
느슨한 사질토	1.0326	0.9929	0.9358	1.8748	1.6641	1.4306
연약점토	1.3556	1.2693	1.1560	1.5059	1.3906	1.2451

는 표 3에서 계산된 스프링 강성에서 볼 수 있는 것처럼, 연약점토의 uplift 방향 초기강성이 크기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 각 모드간의 주기차이가 크지 않은 것을 확인할

수 있는데 이는 매설가스배관의 비선형 시간이력해석에서, 기본 1차 모드 뿐만 아니라 고차모드의 영향도 받을 것으로 사료된다.

3.3 매설가스배관의 변형성능

본 연구에서 수행한 매설가스배관 지진응답해석결과와 변형성능에 대한 비교검토를 위하여 국내 도시가스 배관의 내진설계 세부 기술기준(2003)의 ‘부록 A 내진설계 세부 기술기준’ 에서 제시하고 있는 관계식을 사용하여 매설가스 배관의 변형성능을 계산하였고 표 6에 나타내었다. 배관의 허용변형률의 경우, 1% 와 30t/D(%) (t는 배관의 두께, D 는 배관의 지름)중 작은 값을 선택하였고, 배관 축 방향 변형성능 및 횡 방향 변형성능은 다음 식 (5)와 (6)에 각각 나타내었다.

$$\mu = \frac{AE[\epsilon_y^2 + \lambda(\epsilon_0^2 - \epsilon_y^2)]}{\pi D \tau} \quad (5)$$

$$\nu = \frac{2\sqrt{2} e^{\pi/4}}{D} \sqrt{\frac{4EI}{KD}} \epsilon_0 \quad (6)$$

여기서, A는 관의 단면적, E는 관의 탄성계수, ϵ_y 는 관의 항복변형률, ϵ_0 는 관의 기준변형률, λ 는 변형률 경화계수, τ 는 단위표면적당 지반구속력, \bar{E} 는 등가탄성계수, I는 관 단

〈표 6〉 매설가스배관의 허용변형률과 배관 축 방향 및 횡 방향 변형성능

변형성능	허용변형률	변위역량(mm)	
		배관 축 방향	횡 방향
변형성능값	0.00689(6.89e-3)	3874.4(1936.7)	2106.3(351.05)

면의 2차모멘트, K는 지반반력계수를 나타낸다.

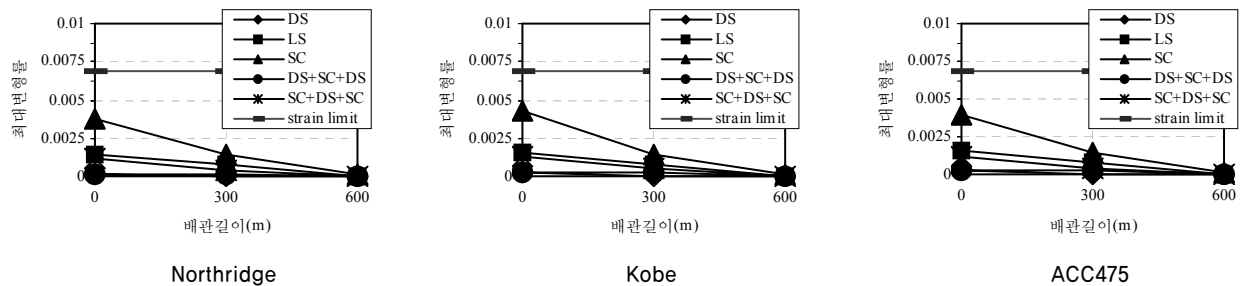
표 6의 계산된 값을 기준으로 하여 본 연구에서 고려된 매설가스배관의 시간이력 지진응답거동을 평가하였다. 표 6에서 괄호안의 값은 배관의 한쪽 끝이 견고한 구조물 등에 의해 고정된 경우의 변위역량을 나타낸다.

4. 매설가스배관의 시간이력해석

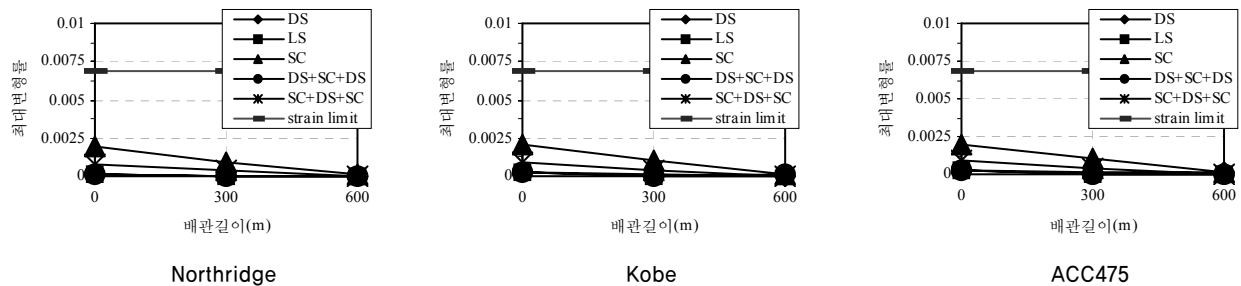
표 2에 나타난 해석모델에 대해 비선형 시간이력 지진응답해석을 수행하였다. 복합지진파를 적용한 직선배관(ST_5와 ST_6)의 해석결과는 배관의 전체길이(1.2km)에 걸쳐 양단부, 1/4 및 3/4지점 그리고 중앙지점에서의 거동을 검토한 반면, 그 외의 모든 해석모델에 대한 결과는 대칭적인 거동 특성으로 인하여 배관 전체길이의 처음 절반(0.6km)에 걸쳐 단부, 1/4지점 및 중앙지점에 대한 거동을 검토하였다. 경사배관 및 직각배관의 경우에는 배관의 구부러짐이 시작되는 지점에 대한 거동 또한 검토하였다.

4.1 매설가스배관의 변형률 응답

그림 4(a)와 (b)는 각각 직선배관 중심까지의 매설깊이가 1.881m(ST_1)와 5.381m(ST_3)인 경우의 단면내 변형률 분포를 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이, 단부에서 중앙지점으로 갈수록 변형률이 작아지는 것을 볼



(a) 직선배관 중심까지의 깊이가 1.881m(ST_1)인 경우



(b) 직선배관 중심까지의 깊이가 5.381m(ST_3)인 경우

〈그림 4〉 직선배관의 매설깊이에 따른 단부, 1/4지점 및 중앙지점의 변형률 분포

수 있고, 배관의 매설깊이가 깊어질수록 변형률의 크기가 작아지는 것을 알 수 있다. 모든 경우에 있어서 지반이 연약 점토(SC)일 경우에 변형률이 커짐을 확인할 수 있고, 배관 길이방향에 따른 지반조건 변화는 변형률에 크게 영향을 끼치지 않는 것을 확인할 수 있었다. 단부의 최대변형률은 설계지반가속도로 스케일링한 경우, 작용지진하중에 따른 상호거동의 차이는 그리 크지 않았으며, 허용변형률의 최대 약 55% 미만으로 작은 반면에, 실제지반가속도를 적용한 경우, 특히 Kobe 지진하중 하에서 지반조건이 연약점토일 경우, 단부의 최대변형률은 허용변형률에 근접(약 87%)하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 얻은 각 해석경우별 배관 단부지점의 최대변형률을 표 7에 나타내었다.

표 7에 나타난 바와 같이 복합지진하중이 작용할 경우, 배관길이에 따른 단부의 최대변형률은 단일지진하중 하에서 단부의 최대변형률과는 크게 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 배관 단부의 최대변형률은 얇은 매설깊이와 연약점토 지반조건에 영향을 가장 많이 받는 것을 알 수 있고, 배관 길이에 따른 지반조건 변화 및 복합지진하중은 그 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. 하지만 K(DS), A(DS, DS+SC+DS)의 경우, 해석모델 ST_3의 단부 최대 변형률이 해석모델 ST_2의 경우보다 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 사용된 입력지진파의 주파수 특성과 매설 깊이 및 지반조건에 따른 스프링 힘과의 상관관계에서 비롯된 것으로 사료된다. 허용변형률과 비교해 볼 때, 대략 허용 변형률의 4% 미만의 변형률로써 증가량 차이가 우려할 만한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 경사배관 및 직각배관의

경우에도 직선배관과 거의 동일한 경향의 응답을 보여주었고, 최대변형률의 크기에 있어서도 큰 차이가 나지 않음을 확인할 수 있었다. 또한, 경사배관의 경사부분과 직각배관의 직각부분의 최대변형률도 단부보다 작음을 확인할 수 있었고, 단부에서부터 중앙지점에 이르기까지 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

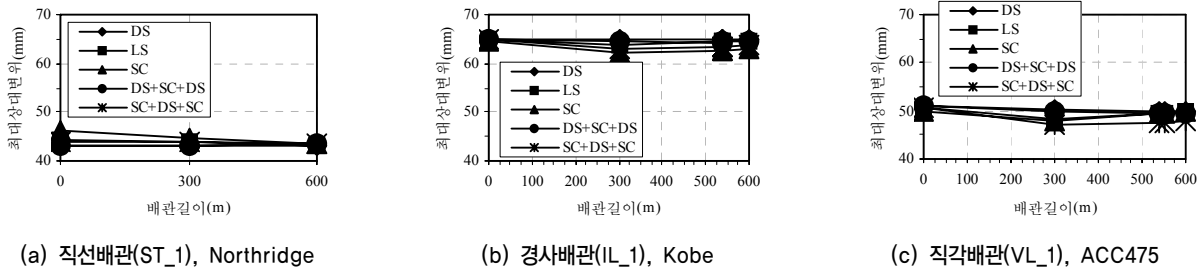
4.2 매설가스배관의 축 방향 변위응답

매설가스배관의 축 방향 변위응답의 경우, 직선배관의 매설깊이에 따른 변위응답의 차이는 없었으며 지반조건 변화에 따른 변위응답의 차이 또한 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라, 복합지진하중을 적용한 경우에도, 각 지진하중을 적용한 구간별 변위응답은 단일지진하중을 적용한 경우의 변위응답과도 거의 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 직선배관, 경사배관 및 직각배관 사이의 변위응답 차이 또한 거의 없음을 확인할 수 있었고, 설계지반가속도로 스케일링 한 경우, 축 방향 변위역량과 비교하여 변위역량의 최대 약 3.5% 미만이었으면, 실제지반가속도를 적용한 경우에도 약 10% 미만으로 축 방향 변위응답의 모든 경우에 있어서 충분히 안전한 것을 알 수 있었다. 그림 5는 배관중심까지의 깊이가 1.881m인 경우 직선배관, 경사배관 그리고 직각배관의 대표적인 경우를 나타내고 있다.

표 8은 매설배관의 중앙지점에서 축 방향 최대 변위응답을 나타낸다. 표 8에서 확인할 수 있는 바와 같이, 작용된 지진 하중에 따른 응답의 변화 이외에, 다른 조건별에 따른 응답의 차이는 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

<표 7> 매설가스배관의 해석경우별 단부지점의 최대변형률

모델	N					K					A				
	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC
ST_1	1.7e-4	1.5e-3	3.8e-3	1.7e-4	1.1e-3	2.2e-4	1.6e-3	4.3e-3	2.4e-4	1.3e-3	2.5e-4	1.6e-3	4.0e-3	2.8e-4	1.2e-3
ST_2	1.4e-4	2.1e-4	2.3e-3	1.4e-4	8.8e-4	1.9e-4	2.6e-4	2.5e-3	2.0e-4	1.0e-3	2.4e-4	2.7e-4	2.4e-3	2.3e-4	9.7e-4
ST_3	1.3e-4	1.9e-4	1.9e-3	1.3e-4	7.3e-4	2.0e-4	2.5e-4	2.1e-3	2.0e-4	8.7e-4	2.9e-4	2.7e-4	2.0e-3	2.8e-4	8.6e-4
ST_4	2.0e-4	1.6e-3	4.4e-3	2.2e-4	1.2e-3	3.6e-4	2.0e-3	5.9e-3	4.2e-4	1.6e-3	-				
IH_1	1.8e-4	1.6e-3	3.9e-3	1.6e-4	2.1e-3	2.2e-4	1.7e-3	4.5e-3	2.2e-4	2.3e-3	2.6e-4	1.7e-3	4.1e-3	2.5e-4	2.2e-3
IL_1	1.7e-4	1.5e-3	3.8e-3	1.7e-4	1.8e-3	2.2e-4	1.6e-3	4.3e-3	2.3e-4	2.0e-3	2.5e-4	1.6e-3	4.0e-3	2.5e-4	1.9e-3
IL_2	1.7e-4	1.4e-3	3.7e-3	1.7e-4	1.5e-3	2.4e-4	1.5e-3	4.2e-3	2.3e-4	1.7e-3	2.4e-4	1.5e-3	3.9e-3	2.5e-4	1.6e-3
IL_3	1.7e-4	1.5e-3	3.8e-3	1.7e-4	1.8e-3	2.2e-4	1.6e-3	4.3e-3	2.3e-4	2.0e-3	2.5e-4	1.6e-3	3.9e-3	2.5e-4	1.9e-3
IL_4	1.7e-4	1.5e-3	3.8e-3	1.7e-4	1.8e-3	2.2e-4	1.6e-3	4.3e-3	2.3e-4	2.0e-3	2.6e-4	1.6e-3	4.0e-4	2.6e-4	1.9e-3
VH_1	1.7e-4	1.6e-3	3.9e-3	1.7e-4	2.1e-3	2.2e-4	1.7e-3	4.5e-3	2.2e-4	2.3e-3	2.6e-4	1.7e-3	4.2e-3	2.6e-4	2.2e-3
VL_1	1.7e-4	1.4e-3	3.7e-3	1.7e-4	1.5e-3	2.4e-4	1.5e-3	4.2e-3	2.2e-4	1.7e-3	2.5e-4	1.5e-3	3.9e-3	2.5e-4	1.6e-3
-	N+K(ST_5)					N+K+A(ST_6)									
	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC					
	1.66e-4	1.54e-3	3.89e-3	1.73e-4	1.08e-3	1.74e-4	1.57e-3	3.97e-3	1.75e-4	1.11e-3					



〈그림 5〉 매설배관의 배관형태별 대표적인 축 방향 변위응답

〈표 8〉 매설가스배관의 해석경우별 중앙지점의 축 방향 최대 변위응답(단위: mm)

모델	N					K					A				
	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC
ST_1	43.08	43.29	43.40	43.52	43.53	64.88	64.71	62.97	64.11	64.20	49.75	49.91	49.50	49.96	49.28
ST_2	42.79	43.24	43.08	43.47	43.45	64.8	64.50	63.40	64.09	64.18	50.51	49.87	51.21	50.40	50.21
ST_3	42.28	42.87	42.86	43.03	42.96	64.74	64.21	63.38	64.02	64.12	50.44	50.91	51.58	50.49	50.73
ST_4	79.78	79.98	80.36	80.66	81.17	205.33	205.19	204.09	204.92	204.93	-				
IH_1	43.15	43.18	43.40	43.41	43.08	64.89	64.71	62.93	64.51	63.68	50.24	49.09	49.46	49.88	50.55
IL_1	43.08	43.29	43.42	43.41	43.10	64.88	64.71	62.97	64.52	63.68	49.74	49.89	49.51	49.93	50.01
IL_2	43.10	43.30	43.38	43.42	43.08	64.87	64.69	63.01	64.53	63.67	49.83	49.95	49.62	49.96	50.04
IL_3	43.08	43.30	43.50	43.21	43.07	64.88	64.70	62.97	64.51	63.67	49.80	49.75	49.86	49.85	51.13
IL_4	43.08	43.30	43.49	43.20	43.06	64.88	64.70	62.97	64.50	63.67	49.80	49.91	49.88	49.85	51.15
VH_1	43.16	43.18	43.56	43.40	43.21	64.85	64.68	62.79	64.52	63.60	50.13	49.81	49.63	49.60	49.24
VL_1	43.10	43.37	43.45	43.39	43.23	64.79	64.66	62.87	64.53	63.60	49.73	50.01	49.87	49.63	47.89
-	N+K(ST_5)					N+K+A(ST_6)									
	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC					
	32.23	32.27	32.20	31.89	33.06	65.38	65.25	64.30	64.76	65.50					

4.3 매설가스배관의 횡 방향 변위응답

4.3.1 직선배관의 횡 방향 변위응답

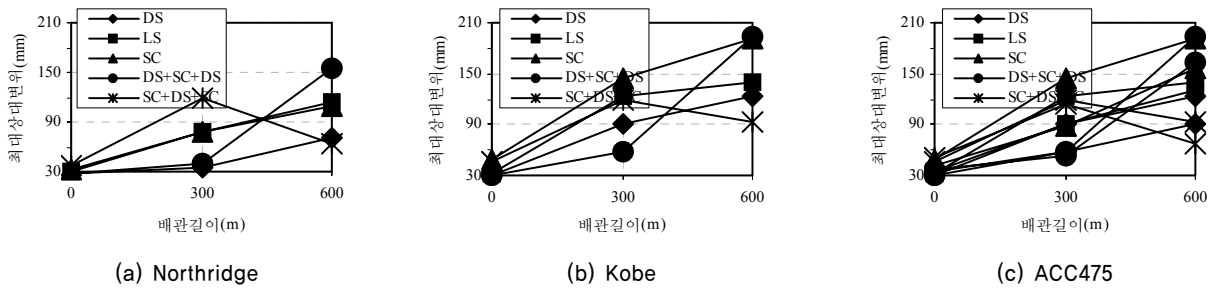
직선배관의 횡 방향 변위응답은 일반적으로 모든 해석경우에 있어서 비슷한 경향을 나타내었다. 대부분의 경우, 중앙지점에서 최대 변위응답을 보여주었지만, 지반조건이 구간별로 변화하는 경우에는 약간 차이를 알 수 있었다. 대부분의 경우, 연약점토의 단일지반이나, 조밀한 사질토+연약점토+조밀한 사질토의 지반조건일 경우에 중앙지점에서 가장 큰 변위응답을 보여준 반면에, 지반조건이 연약점토+조밀한 사질토+연약점토인 경우에는 중앙지점의 변위응답이 1/4지점의 변위응답보다 작음을 알 수 있었다. 이는 배관과 지반의 상호작용을 나타내는 비선형 Winkler Foundation 모델의 영향을 받은 것으로 사료된다. 즉, 비탄성 보 요소로 모델링된 매설가스배관과 지반에 의한 하중과의 상호작용을 모델링한 이산화된 비선형 스프링의 강성에 의한 것으로 사료된다. 조밀한 사질토나 느슨한 사질토와 비교해 볼 때, 연약점토의 강성이 작은 관계로 큰 변위 응답이 발생한 것으로 사료된다. 이는 곧 횡 방향 변위응답은 지반의 조건에

영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그림 6은 배관중심까지의 길이가 3.381m(ST_2)인 경우의 횡 방향 변위응답을 나타내고 있고, 그림 7은 실제지반가속도에 의한 횡 방향 변위응답을 나타내고 있다.

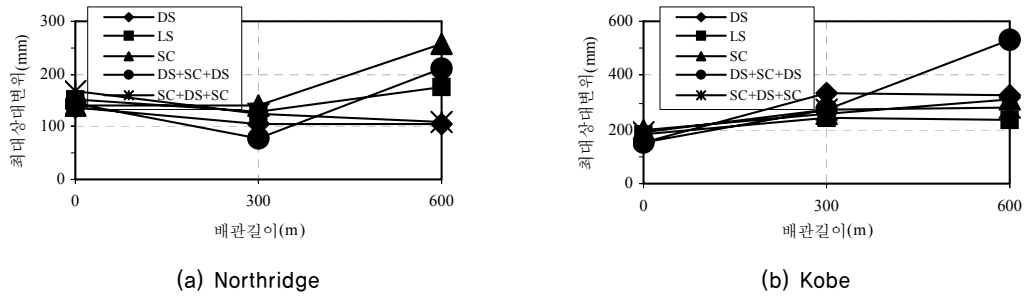
그림 6과 7에서 알 수 있는 바와 같이, 횡 방향 변위역량과 비교해 볼 때, 설계지반가속도 하에서 가장 큰 횡 방향 변위응답은 변위역량의 최대 약 57% 정도임을 알 수 있었고, 실제지반가속도 하에서 Northridge 지진파의 경우 변위역량의 약 75%에 다다른 반면에, Kobe 지진파의 경우에는 변위역량을 초과하였다. 물론, 국내의 지진발생 현황을 분석해 볼 때 가정이긴 하지만, 위와 같은 큰 지진하중이 발생할 경우 국내의 매설가스배관도 안전하지 않을 수 있다는 것을 나타낸다.

4.3.2 경사배관 및 직각배관의 횡 방향 변위응답

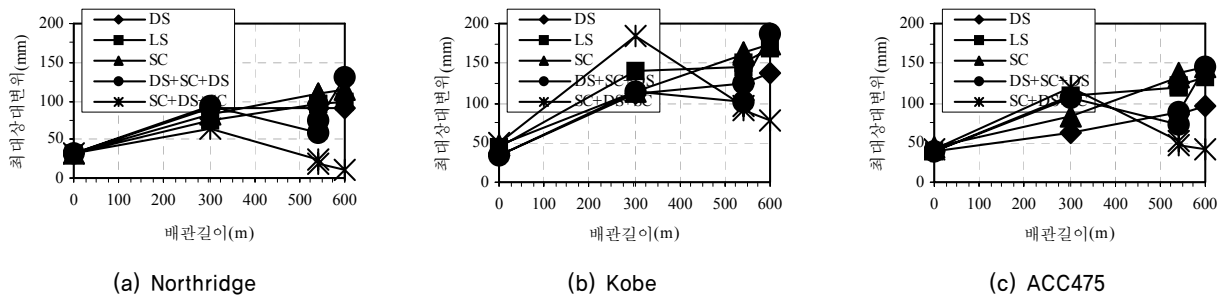
경사배관 및 직각배관의 횡 방향 변위응답은 직선배관의 경우와 동일한 경향을 나타내었다. 즉, 연약점토의 단일지반이나 조밀한 사질토+연약점토+조밀한 사질토의 지반조건일



〈그림 6〉 직선배관 중심까지의 깊이가 3.381m(ST_2)인 경우의 횡 방향 변위응답



〈그림 7〉 실제지반가속도를 적용한 경우(ST_4)의 횡 방향 변위응답



〈그림 8〉 경사각 2.86°로 Lowering 된 경사배관(IL_1)의 횡 방향 변위응답

경우에 중앙지점에서 가장 큰 변위응답을 보여준 반면에, 지반조건이 연약점토+조밀한 사질토+연약점토인 경우에는 중앙지점의 변위응답이 1/4지점의 변위응답보다 작음을 알 수 있었다. Highering이나 Lowering의 경우 경사각도에 따른 횡 방향 변위응답은 차이가 크지 않았으며, 경사부위에서의 변위응답 또한 중앙지점에서의 변위응답보다 크지 않음을 알 수 있었다. 경사배관의 경우, Lowering된 배관부위 위쪽의 토층 높이 변화에 따른(IL_1과 IL_2) 변위응답의 차이 또한 미미하였다. 직각배관의 경우, 직각으로 구부러진 부분의 시작지점보다 끝 지점의 변위응답이 미소하게 증가 하였지만 차이는 크지 않았다. 따라서 배관의 경사정도는 지진하중에 의한 영향을 크게 받지 않는 것으로 사료된다. 중앙지점에서의 최대변위는 변위역량의 최대 약 57% 정도로 직선배관의 경우와 거의 동일하였다. 경사배관의 대표적인 경우(IL_1)의 횡 방향 변위응답을 그림 8에 나타내었고, 직선배관, 경사배관 및 직각배관의 해석경우별 중앙지점에서

서의 최대 변위응답을 표 9에 나타내었다. 표 9로부터 알 수 있는 특이할 만 한 점은 연약점토+조밀한 사질토+연약점토로 이루어진 지반조건하에서, 직선배관의 경우 매설깊이가 깊어질수록 최대 횡 방향 변위가 다소 크게 감소하고, 경사 및 직각배관의 경우 중앙지점에서의 최대 횡 방향 변위가 직선배관에 비해 크게 감소한다는 것이다. 이는 횡 방향 변위응답에 있어서, 경사배관이나 직각 배관의 경우가 직선배관 보다는 지반조건의 변화에 좀 더 많은 영향을 받는 것으로 사료된다. 또한 Lowering 경사배관의 변위가 Highering 경사배관의 변위보다 다소 작은 것을 알 수 있었다. 한편, N(LS), K(SC, DS+SC+DS), 그리고 A(SC, DS+SC+DS)의 ST_2와 ST_3을 비교해 볼 때, 매설깊이가 깊어짐에 따라 증가했다가 감소하는 경향을 나타낸다. 이를 검토하고자, 최대응답이 얻어지는 시간을 확인 하였다. 예를 들어, K(DS+SC+DS)의 경우, ST_2모델의 최대 변위응답은 14.0초에서 얻어진 반면에, ST_3 모델의

〈표 9〉 매설가스배관의 해석경우별 중앙지점의 횡 방향 최대 변위응답(단위: mm)

모델	N					K					A				
	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC
ST_1	91.45	97.53	113.67	156.47	102.03	137.47	167.70	173.90	174.70	107.51	96.03	133.20	144.20	140.40	76.95
ST_2	70.05	113.36	108.25	155.26	64.44	122.75	140.94	192.22	194.18	93.46	90.70	131.60	156.26	162.53	66.79
ST_3	70.20	107.10	104.32	122.14	50.58	88.08	119.87	189.41	167.95	68.47	54.29	117.86	143.21	149.53	55.92
ST_4	103.60	177.15	256.83	209.34	108.70	325.77	235.34	310.23	532.07	281.73	-				
IH_1	85.97	27.82	110.72	95.78	26.47	132.23	152.82	205.60	177.43	88.76	74.22	129.73	151.17	111.83	61.53
IL_1	91.31	97.53	113.68	129.50	11.62	137.45	167.73	173.97	185.96	79.10	96.05	133.21	144.17	144.66	42.78
IL_2	43.80	59.17	107.21	142.45	6.58	50.07	105.47	159.11	190.86	56.57	65.75	66.41	137.64	155.11	50.93
IL_3	93.05	99.55	116.01	99.73	11.53	126.30	173.74	167.51	171.54	99.09	99.52	139.34	151.97	69.98	38.67
IL_4	93.86	99.93	115.70	98.15	11.21	125.84	178.01	166.02	170.31	98.56	99.00	138.14	152.79	76.73	38.62
VH_1	91.53	25.24	113.15	114.43	25.10	119.15	143.43	192.65	184.52	88.07	94.53	126.67	152.42	134.41	60.35
VL_1	35.04	53.16	99.76	142.02	6.70	47.12	105.51	158.67	181.31	58.21	67.16	63.67	136.89	131.24	47.90
-	N+K(ST_5)					N+K+A(ST_6)									
	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC	DS	LS	SC	DS+SC+DS	SC+DS+SC					
	85.53	114.96	106.10	70.17	46.38	111.63	104.53	118.48	160.67	82.42					

최대 변위응답은 9.1초에 얻어졌다. 이는 각 해석모델의 스프링 강성 크기에 따른 매설배관이, 시간이력 해석동안 겪을 수 있는 주기변화와, 사용된 지진파의 주파수 특성과의 상관관계 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서 매설가스배관의 지진하중에 대한 거동을 비선형 시간이력해석을 통하여 해석적으로 분석하였다. 본 연구해석에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 배관의 매설깊이가 깊어질수록 단부 변형률의 크기는 작아지는 것을 알 수 있었다. 축 방향 변위응답의 경우, 배관의 매설깊이는 크게 영향을 미치지 않는 반면에, 횡 방향 변위응답의 경우, 배관의 매설깊이에 다른 영향을 확인할 수 있었고, 특히 복합지반조건(SC+DS+SC)의 경우에 뚜렷함을 확인할 수 있었다.
2. 배관의 길이방향에 따른 지반조건의 변화는 변형률 및 축 방향 변위응답에는 영향을 끼치지 않는 반면에, 횡 방향 변위응답에는 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.
3. 지반조건의 변화는 변형률, 축 방향 및 횡 방향 변위응답 전체에 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다. 특히 연약점토 지반이나, 조밀한 사질토+연약점토+조밀한 사질토의 혼합지반일 경우에는 응답이 커지는 것을 확인할 수 있었다.
4. 구간별 다른 지진하중을 적용한 경우, 즉 복합지진하중은 매설배관의 응답에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

5. 경사배관이나 직각배관의 경우에, 배관의 경사정도는 지진하중에 대한 응답에 거의 영향을 끼치지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이상으로 종합해 볼 때, 본 연구에서 고려된 국내의 대표적인 매설배관의 경우, 국내원전 및 KOGAS의 붕괴방지수준의 지진하중에 대한 매설배관의 거동은 비교적 안전한 것으로 사료되지만, 향후, 매설 가스배관의 중요성을 고려해 볼 때, 좀 더 다양한 형태의 배관 및 연결시스템에 대한 지진건전도 평가가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통기술평가원의 “성능중심의 건설기술 표준화 연구단”에 의해 수행되는 2006 건설교통 R&D 정책 및 인프라 사업(06-기반구축-A-01) 및 2005년 한국가스공사의 연구비 지원으로 수행되어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 공정식, 이도형, “매설가스배관 내진 건전도 평가의 확률적 연구과제 최종보고서”, 한국가스공사 연구개발원, 2006.
2. 김문겸, 김태욱, 신인나, 정재광, “액상화, 영구지반변형을 고려한 지중매설관로의 지진피해평가”, 2004 대한토목학회 정기학술대회.
3. 김문겸, 임윤묵, 김태욱, “액상화, 횡방향 영구지반 변형을 받는 지중매설관로의 동적해석에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제23권 제 4A호, 2003, pp. 571-583.
4. 김태욱, 김문겸, 임윤묵, “액상화, 횡방향 영구지반 변형을 받

- 는 연속된 지중매설관로의 손상도 곡선에 관한 연구”, 2005 대한토목학회 정기학술대회.
5. 한국가스안전공사, “도시가스배관의 내진설계 세부 기술기준”, 한국가스안전공사, 2003.
 6. An EQE Summary Report, “The January 17, 1995 Kobe Earthquake”, EQE International, 1995.
 7. American Lifelines Alliance, “Guideline for the design of buried steel pipe”, ASCE, 2001.
 8. Chen, W.W., Shih, B.J., Wu, C.W. and Chen, Y.C., “Natural gas pipeline system damages in the Ji-Ji earthquake(The City of Nantou)”, Proceedings of the sixth international conference on seismic zonation. Palm Springs, Riviera Resort, CA, 2000.
 9. Datta, S.K. and Mashaly, E.A., “Seismic response of buried submarine pipelines”, Transactions of ASME, J. Energy Resource Tech., 1988, pp. 208-218.
 10. Datta, S.K., Shah, A.H. and Wong, K.C., “Dynamic stresses and displacements in buried pipe”, J. of Engrg. Mech., ASCE, Vol. 110, 1984, pp. 1451-1465.
 11. Elnashai, A.S., Papanikolaou, V. and Lee, D.H., “ZeusNL-A program for inelastic dynamic analysis of structures”, MAE Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 2001.
 12. Luco, J.E. and Barnes, F.C.P., “Seismic response of cylindrical shell embedded in layered visco elastic half space”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23, 1994, pp. 553-580.
 13. Masso, A.G. and Attalla, I., “Finite element verses simplified method in the seismic analysis of underground structure”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 12, 1984, pp. 347-367.
 14. Nelson, I. and Weidlinger, P., “Dynamic seismic analysis of long segmented lifelines”, J of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol. 101, 1979, pp. 10-20.
 15. Newmark, N.M. and Rosenblueth, E., Fundamentals of earthquake engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1971.
 16. Shah, H.H. and Chu, S.C., “Seismic analysis of underground structural elements”, J. of Power Division, ASCE, Vol. 100, 1974, pp. 53-62.
 17. Takada, S. and Tanabe, K., “Three dimensional seismic response analysis of buried continuous or jointed pipelines”, J. of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol. 109, 1987, pp. 80-87.
 18. Wang, L.R.L., O'Rourke, M.J. and Pikul, R.R., “Seismic response behavior of buried pipelines”, J. of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol. 101, 1979, pp. 21-30.
 19. Wong, K.C., Shah, A.H. and Datta, S.K., “Three dimensional motion of buried pipeline”, J. of Engrg. Mech., ASME, Vol. 112, 1986, pp. 1319-1348.