한국지진공학회 논문집 | 제14권 제5호 (통권 제75호) |2010년 10월, pp. 65~76
ISSN 1226-525X DOI 10.5000/EESK.2010.14.5.065

매설가스배관의 지진 취약도 해석

Earthquake Fragility Analysis of a Buried Gas Pipeline

이도형[1] · 전정문[2] · 오장균[3] · 이두호[4]
Lee, Do Hyung · Jeon, Jeong Moon · Oh, Jang Kyun · Lee, Du Ho

국문 요약 >> 본 연구에서는 국내에서 널리 사용되고 있는 매설가스배관인 API X65에 대해 지진 취약도 해석을 수행하였다. 이를 위해, 15가지 경우의 배관 해석모델에 대해 12본 세트의 다양한 지진파를 0.1g 등간격으로 스케일링하여 비선형 시간이력해석을 수행한 후, 비선형 시간이력해석으로 얻어진 매설가스배관의 최대 변형률을 이용하여 지진취약도 해석을 수행하였다. 지진 취약도 해석을 위해 본 연구에서는 또한, 지반조건, 단부지점조건, 매립깊이 및 배관형태 등을 변수로 고려하여 지진 취약도 해석을 수행하였다. 지진 취약도 해석결과, 지반조건, 단부지점조건 및 매립깊이는 매설가스배관의 취약도 곡선에 영향을 끼치는 것으로 판단되었고, 특히 지반조건이 미치는 영향은 다른 두 변수에 비해 다소 큰 것을 확인할 수 있었다. 반면에, 배관형태가 취약도 곡선에 미치는 영향은 미미한 것을 알 수 있었다. 종합적으로, 매설가스배관의 지진 취약도 해석과 관련된 연구가 많지 않은 현실을 감안할 때, 본 연구결과는 매설가스배관의 지진 취약성 평가해석에 초석으로 고려되어질 수 있고, 추후 관련분야 연구에 좋은 참고자료가 될 것으로 사료된다.

주요어 매설가스배관, 축 변형률, 비선형 시간이력해석, 취약도 해석, 취약도 곡선

ABSTRACT >> In this paper, earthquake fragility analysis has been comparatively performed with regard to a buried gas pipeline of API X65 which has been widely used in Korea. For this purpose, a nonlinear time-history analyses has been carried out for 15 different analytical models of a buried gas pipeline in terms of the selected 12 sets of earthquake ground motions with 0.1g of scaling interval. Following that, earthquake fragility analyses have been conducted using the maximum axial strain of the pipeline obtained from the nonlinear time-history analyses. Parameters under consideration for subsequent earthquake fragility analyses are soil conditions, end-restraint conditions, burial depth and the type of pipeline. Comparative analyses reveal that whereas the first three parameters influence the fragility curves, particularly soil conditions amongst the three parameters, the last parameter has a little effect on the curves. In all, the present study can be considered as a benchmark fragility analysis of a buried gas pipeline in the absence of an earthquake fragility analysis of the pipeline and thus is expected to be a useful source regarding earthquake fragility analyses of a buried gas pipelines.

Key words Buried gas pipeline, Axial strain, Nonlinear time-history analysis, Fragility analysis, Fragility curve

1. 서 론

가스시설, 전기시설등과 같은 사회기반시설물인 라이프라인(Lifeline)은 일련의 지진하중에 대하여 취약성을 나타내었다.(1) 특히, 지중 라이프라인인 상·하수도배관이나 천연가스배관 등과 같은 지중 매설배관은 지진하중에 대해 심각한 취약성을 나타내는 것으로 보고되고 왔다.(2) 과거 세계 여러 지역에서 발생한 지진에 대한 매설가스배관의 피해사례를 고려 해보면, 1989년 미국 샌프란시스코의 베이 지역에 규모 7.0의 Loma Prieta 지진으로 인해 15,000곳에 가스공급이 중단되었으며, Marina District 주거지역은 가스 복구비만 약 $20,000,000 이 소요되었다.(3) 1995년 일본의 Kobe지진에서는, 가스배관의 손상으로 인한 가스누출과 전기 스파크로 인한 화재가 531 군데에서 발생하였다.(4) 또한 가스, 물, 전기시설을 합하여 피해액이 대략적으로 4,740 억 엔으로 조사 되었다.(5) 1999년 대만의 Chi-Chi 지진 역시 많은 매설가스배관에 손상을 가져왔고 대략적으로 조사된 매설가스배관의 피해액은 약 $24,687,500 에 이르렀다.(6) 지진에 의해서 유발되는 매설가스배관의 손상은 가스 누출

[1] 정회원·배재대학교 공과대학 건설환경·철도공학과 부교수
[2] 정회원·배재대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정
[3] 배재대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정
[4] 정회원·배재대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정
(교신저자: ldh0067083@pcu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2010. 9. 1 / 수정일 : 2010. 9. 6, / 게재확정일 : 2010. 9. 6)

로 인한 화재 및 폭발로 인해 많은 재산 및 인명피해를 유발할 뿐만 아니라, 교통 및 통신 등의 사회 주요시설물에 심각한 영향을 끼침과 동시에, 사회적 및 경제적 파급효과가 매우 크기 때문에 다른 어떤 인프라 구조물보다 중요시 된다. 그러므로 매설가스배관이 지진의 크기에 따라 어느 정도의 손상이 발생할지에 대한 성능평가 및 예측이 필요로 된다.

우리나라의 경우, 2007년 1월 설계지반가속도에 근접하는 오대산 지진이 발생하면서 지진에 대한 철저한 대비의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 현실로 인해 구조물의 내진성능평가에 대한 관심이 고조되고 있으며, 지진의 주요특성인 불확실성을 반영한 확률론적 내진성능평가 방법인 지진위험도 해석이나 지진취약도 해석에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이중 지진취약도 해석은 지반운동의 크기지수(최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV), 스펙트럼가속도(Sa)등)에 따른 손상 발생의 확률을 표현한 것으로, 1980년대 초 원자력발전소의 확률론적 지진 안전성 분석을 위하여 개발되었다.[7],[8] 최근에는 미국, 일본 등을 중심으로 일반 토목구조물에도 적용한 연구가 활발히 수행되고 있으며[9-15], 국내에서도 교량구조물 및 빌딩구조물 등에 대한 지진취약도 해석이 활발히 수행되어 왔고, 그 연구 사례가 점차 증가하는 추세에 있다.[16-22] 하지만 국내·외적으로 매설가스배관에 대한 지진취약도 해석은 최근까지 수행된 연구가 아주 미비한 실정이다. 매설가스배관의 지진취약성에 대한 국외의 연구로는, Shinozuka et al.[22]이 1979년 매설배관 관망에 대한 지진위험도 해석을 수행하였으며, 매설배관의 손상단계를 minor, moderate 및 major로 나누어 배관의 변형률로 정의 하였다. Mashaly and Datta[2]는 매설배관에 대한 지진위험도 해석을 수행하였으며, 두 가지 변수를 Modified Mercalli Intensity(MMI)와 Power Spectral Density Function (PSDF)으로 나타내어 연구를 수행하였다. 또한 지점조건, 배관교차형태, 지반조건 등에 대한 손상지수의 영향을 고려하였다. 국내의 연구로는, 김문겸 등[23]이 지중매설관로에 대해 액상화와 영구지반변형 효과를 고려한 국내지진피해평가 절차를 제안하였고, 김태욱 등[24]은 제안한 손상곡선에 기초하여 연속된 구조형식을 갖는 지중매설관로의 손상을 유발하는 액상화 및 영구지반변형의 폭과 크기를 추정하였고, 이에 대한 회귀식을 제안하였다. 또한 이억섭 등[25],[26]은 여러 지반조건에서 지반침하로 인한 매설배관의 건전성에 미치는 영향을 연구하였으며, 매설배관의 파손 확률 모델에 대한 연구를 수행 하였다. 하지만 매설가스배관에 대한 비선형 비탄성해석을 통한 취약도 해석의 연구는 미흡한 실정이다. 특히 최근 들어 가스의 사용량이 증가하는 현실에서, 매설가스배관에 대한 내진성능평가 필요성이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 매설가스배관의 경우를 선택하여, 지반의 조건, 지점의 조건, 배관의 형태 및 매설깊이 등의 변수를 달리 하여 비선형 시간이력 지진응답해석을 수행하였고, 이 결과를 토대로 하여 지진취약도 해석을 수행하였으며, 각각의 변수에 따른 취약도 곡선에 대한 비교분석을 통해 내진성능평가를 수행하였다.

2. 지진취약도 해석

2.1 취약도곡선의 정의

취약도 곡선은 일반적으로 구조물에 일정 강도의 지진하중이 작용하였을 때, 구조물에 일정 손상단계 이상의 손상이 발생할 확률을 나타내는 것이다. 따라서 특정한 손상 단계에 대한 취약도 곡선은 여러 수준의 지반운동에 대해 손상 단계에 도달하거나 초과하는 조건부 확률을 계산하여 구할 수 있다. 이렇게 계산된 조건부 확률과 특정 지반운동의 특성과의 관계를 도식화한 곡선이 그 손상단계에 대한 취약도 곡선이고, 지진취약도 함수의 조건부 확률은 식 (1)과 같이 정의 할 수 있다.

$$P_F = P_r[D > C_i | EQ_j] \tag{1}$$

여기서, P_F는 구조물이 j의 강도를 갖는 지진하중 EQ_j에 대하여 i손상단계 이상의 손상이 발생할 확률을 나타내고, D는 지진하중에 대한 구조물의 반응응답이며, C_i는 i손상단계에 따른 구조물의 강도를 나타낸다. 위의 확률적 정의는 식 (2)와 같은 적분식으로 표현할 수 있다.[27]

$$P_F = \int_0^\infty [1 - F_s(r)] f_R(r) dr \tag{2}$$

$F_s(\cdot)$는 구조물의 반응응답의 누적확률분포이며, $f_R(\cdot)$는 구조물 강도의 확률밀도함수이다.

지진취약도의 작성을 위해서는 지진 강도를 나타내는 지진강도 지수를 결정해야 하며, 본 연구에서는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration)를 선택하여 지진취약도 해석을 수행하였다.

2.2 최우도법을 이용한 지진취약도 해석

지진취약도 해석의 방법은 여러 가지가 제안되어 있지만 그 중 국내·외에서 널리 사용되고 있는 Shinozuka et al.[14],[15]이 제안한 취약도 해석 방법을 선택하였다. Shinozuka et al.[14],[15]은 최대지반가속도에 대한 지진취약도 곡선을 대수정규분포 함수를 이용하여 정의하였고, 또한 실제 지진에 의해 손상된 구조물의 자료를 통하여 경험적 지진취약도 평가를 수행하였으며, 이러한 연구를 통하여 대수정규분포함수로 정의된 취약도 곡선의 타당성을 입증하였다. 이때 대수정규분포함수의 두 가지 변수인 중앙값(median)과 로그표준편차(log-standard deviation)는 최우도법(maximum likelihood method)[28]을 사용하여 계산하였으며, 우도함수(likelihood function)는 식 (3)과 같이 정의 하였다.

$$L=\prod_{i=1}^{N}\left[F(a_i)\right]^{x_i}\left[1-F(a_i)\right]^{(1-x_i)} \tag{3}$$

여기서, $F(\bullet)$은 특정 상태의 손상에 대한 취약도 함수를 나타내며, a_i는 구조물에 대한 지진의 강도를 나타낸다. a_i의 지진하중이 가해졌을 경우 손상단계 이상의 손상이 발생할 경우 x_i는 1의 값을 가지고, 그렇지 않은 경우에는 0을 갖는다. N은 해석에 사용된 구조물의 수를 나타낸다. 식 (3)의 최우도함수에 대한 도식화된 개념적 설명은 그림 1에 나타내었다. 이때, 지진 취약도 곡선의 함수 $F(a_i)$는 식 (4)와 같이 이변수 대수정규분포 함수로 나타내어 정의 할 수 있다.

$$F(a)=\Phi\left[\frac{\ln a/c_m}{\zeta}\right] \tag{4}$$

여기서, $\Phi[\bullet]$는 표준정규분포 함수의 누적확률 분포이고, c_m은 중앙값(median), ζ는 로그표준편차(log-standard deviation)이다. 대수함수는 단조함수(monotonic function)이므로, 다음과 같이 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c_k}=\frac{\partial \ln L}{\partial \zeta_k}=0, \qquad k=1,2,\cdots,N_{state} \tag{5}$$

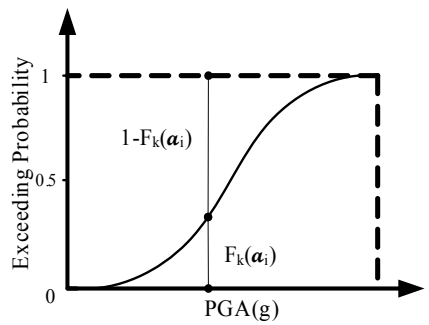
여기서 N_{state}는 총 손상단계를 의미하며, 본 연구의 경우에는 Minor, Moderate, Major 3가지 경우로 손상단계를 나누었으며 따라서 $N_{state}=3$이 된다.

3. 지진취약도 해석을 위한 비선형 비탄성 해석

3.1 매설가스배관의 해석모델링

비선형 시간이력 지진응답해석에 사용된 매설가스배관은 국내에 가장 널리 사용되고 있는 배관인 API X65를 선택하였다(2009년부터 API X70으로 변경됨). 이 배관의 재료 물성치는 표 1에 나타내었으며, 단면형상은 그림 2의 (a)에 나타나 있는 바와 같고, 단면해석모델은 바깥지름과 일정두께를 갖는 속이 빈 원형강 단면을 사용하였다. 매설가스배관의 해석모델을 구성하는데 있어 세 가지 기본 가정을 사용하였는데, i) 매설배관 지표면 위의 하중은 무시, ii) 매설가스배관은 지하수위 위쪽에 위치(즉, 부양효과 배제 및 지반의 건조단위중량 사용), 그리고 iii) 지반의 조건은 조밀한 사질토(DS, ø=35°), 느슨한 사질토 (LS, ø=25°) 및 연약점토(SC, c=0.0168MPa)의 세 가지 경우로 구분하여 모델링을 하였다.

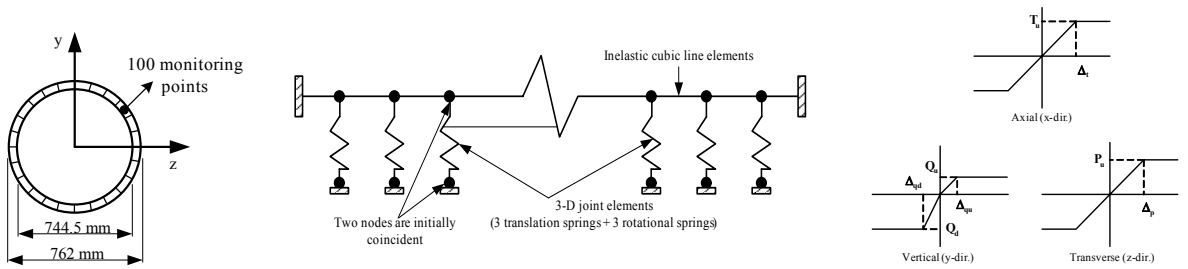
매설배관 해석모델은 두 개의 가우스단면에서 수치적분을 사용하여 부재의 길이 및 단면의 깊이에 따른 비탄성의 정도를 검토할 수 있는 비탄성 요소로 모델링 하였고, 배관과 지반의 상호작용은 비선형 Winkler Foundation 모델을 사용하였다. 비선형 Winkler Foundation 모델은 비탄성 보-기둥 요소로 모델링된 매설가스배관과 지반과의 상호작용을 나타내기 위해서 이산화된 비선형 조인트 스프링요소를 사용하였다. 그림 2의 (b)는 비선형 Winkler Foundation 모델을 이용한 매설가스배관의 해석모델을 나타내고 있다. 움



〈그림 1〉 최우도함수의 개념도

〈표 1〉 매설가스배관의 물성치

배관종류	항복강도(MPa)	바깥지름(mm)	두께(mm)	단위중량(N/mm^3)	배관 코팅 마찰계수 f
API X65	445	762	17.5	7.701E-5	0.8



(a) 매설배관의 단면 (b) 해석모델링 (c) 각 방향별 지반 스프링 해석모델

〈그림 2〉 매설가스배관의 해석모델

〈표 2〉 지진응답해석에 사용된 매설가스배관의 해석모델

배관분류	배관형태	모델명	모델설명
직선배관	straight	S1	배관의길이: 1.2km, 매설깊이: 1.881m, 지반조건: 단단한 사질토(ds), 지점조건: ff
		S2	배관의길이: 1.2km, 매설깊이: 1.881m, 지반조건: 느슨한 사질토(ls), 지점조건: ff
		S3	배관의길이: 1.2km, 매설깊이: 1.881m, 지반조건: 복합지반(d+s+d), 지점조건: ff
		S4	배관의길이: 1.2km, 매설깊이: 1.881m, 지반조건: 복합지반(s+d+s), 지점조건: ff
		S5	배관의길이: 1.2km, 매설깊이: 1.881m, 지반조건: 단단한 사질토(ds), 지점조건: fp
		S6	배관의길이: 1.2km, 매설깊이: 1.881m, 지반조건: 단단한 사질토(ds), 지점조건: pp
		S7	배관의길이: 1.2km, 매설깊이: 3.381m, 지반조건: 느슨한 사질토(ls), 지점조건: ff
		S8	배관의길이: 1.2km, 매설깊이: 5.381m, 지반조건: 느슨한 사질토(ls), 지점조건: ff
경사배관	highering(600mm)	H1	highering 구간길이: 120m, highering 경사각: 2.86°
	lowering(600mm)	L1	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 2.86°, 토층깊이 일정한 경우
		L2	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 2.86°, 토층깊이 일정하지 않는 경우
		L3	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 22.5°
		L4	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 45°
직각배관	highering(600mm)	H5	highering 구간길이: 120m, highering 경사각: 90°
	lowering(600mm)	L5	lowering 구간길이: 120m, lowering 경사각: 90°

직임(translation movement)에 대한 하중-변위 곡선을 구성하는 초기 탄성계수 및 각 방향별 지반 조인트 스프링 힘, 그에 대응되는 상대변위는 American Lifeline Alliance, ASCE(Guidelines for the design of buried steel pipeline, 2001)[29]에서 제안된 식들을 사용하였다. 해석모델과 관련된 보다 상세한 내용은 참고문헌[30]에 나타나 있다.

3.2 해석프로그램 ZeusNL

매설가스배관의 해석모델 및 지진응답해석을 위해서 ZeusNL[31]구조해석 프로그램이 사용되었다. ZeusNL은 재료의 비탄성 및 기하학적인 비선형 효과를 고려한 2차원 및 3차원 구조물의 파이버 비선형 해석프로그램으로, 여러 재료모델과 다양한 형태의 단면 및 요소(Element)가 이용 가능하고, 고유치해석, 정적해석, Adaptive 정적해석, 정적시간이력해석 및 동적시간이력해석 등을 수행할 수 있다. 보다 상세한 내용은 ZeusNL 매뉴얼[31]에서 찾아볼 수 있다.

3.3 해석모델의 종류

매설가스배관에 대한 지진취약도 해석을 위한 동적지진응답을 검토하기 위해, 표 2에 제시된 매설깊이 즉, 지표면에서 배관의 단면중심까지의 거리가 1.881m, 길이가 1.2km인 배관을 기준으로 고려하여 해석을 수행하였다. 매설가스배관을 시공할 때, 배관시공규정이나 환경적으로 많은 변수들이 발생 할 수 있다. 따라서 이와 같은 변수들을 고려하기 위한 해석모델을 구성하였고, 본 연구에서 고려한 해석모델들의 종류 및 설명은 표 2에 정리하였다. 매설가스배관이 매설되는 지역은 논, 밭, 해안가, 도로, 매립지 등 다양하기 때문에 배관이 매설된 지반의 상태가 동일하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지반조건을 다섯 경우, 단단한 사질토(ds), 느슨한 사질토(ls), 연약점토(sc), 복합지반(d+s+d, s+d+s)등으로 분류하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 직선배관의 경우에는 세 단계의 매설깊이(1.881m, 3.381m, 5.381m)에 따른 영향을 검토하였다. 도로법에 의하면 매설

가스배관의 매설깊이는 1.2m이상 이어야 한다고 명시되어 있으며[32),(33)], 이러한 규정을 고려함과 동시에 또 다른 지중 시설물과 같은 장애물에 대한 고려를 위해 매설깊이를 분류하였다. 매설배관의 양단부 지점조건을 양단고정(ff), 일단고정·일단힌지(fp), 양단힌지(pp)지점으로 하여 시간이력해석을 수행하였다. 또한 매설배관 시공시 하천, 철로 및 지중시설물등과 같은 장애물이 있을 경우 장애물의 우회를 위하여 직선배관이 아닌 다른 형태의 배관으로 시공이 되어 진다. 이러한 경우를 고려하기 위해, 경사배관 두 종류(Highering과 Lowering) 및 직각배관 두 종류 (Highering과 Lowering)를 고려하였다. 특히 lowering 경사배관의 경우에는, 경사진 배관의 토층높이를 경사지지 않은 구간과 일정한 경우 및 경사지지 않은 구간과 다른 경우에 대해서도 검토하였다. 구부러진 배관의 각도는, 세 가지(2.86°, 22.5°, 45°) 경우로 구분하였다.

3.4 고유치 해석 및 입력지진파 선정

3.4.1 매설배관의 고유치 해석

직선배관 모델에 대해, 지반의 조건에 따른 고유치해석을 수행하였고, 가스배관의 횡 방향 및 수직방향 고유주기를 3차 모드까지 검토하여 표 3에 나타내었고, 대표적인 모드형상은 그림 3에 나타나 있다. 표 3에 나타낸 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. 또한, 각 모드간의 주기차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있었는데 이는 매설가스배관의 비선형 시간이력해석에서 기본 1차 모드 뿐만 아니라 고차모드의 영향을 받을 것으로 사료된다.

3.4.2 입력지진파의 종류 및 응답스펙트럼

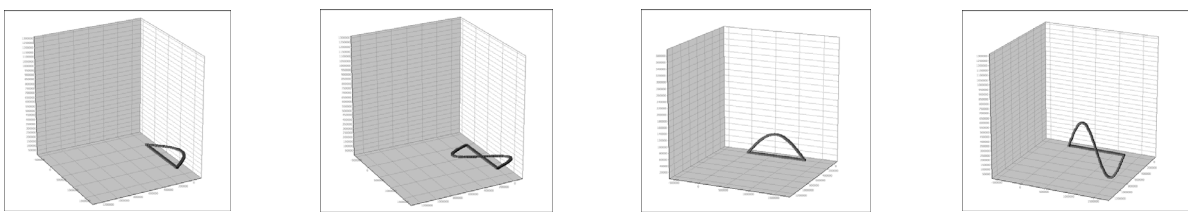
비선형 시간이력해석은 특정 입력지진에 대한 구조물의 응답을 구하는 것으로서, 지진의 크기, 지속시간, 주파수 특성 등에 있어 많은 불확실성을 포함하고 있다. 따라서, 구조물의 지진취약도 해석을 위해서는 충분한 수의 입력지진을 이용할 필요가 있다. 미국의 경우에는 FEMA SAC 프로젝트[34]를 통하여 제안된 지진자료가 있으나, 우리나라의 경우 이러한 목적의 지진자료가 없는 실정이고, 지진파 계측자료 또한 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국외에서 기록된 다양한 지진파들 중에서, 12본 세트의 지진파를 선택하여 0.1g~1.5g까지 0.1g의 등간격으로 스케일링 하여 비선형 시간이력해석을 수행 하였다. 단, 배관형태를 고려한 해석에서는 0.03g 및 0.06g의 스케일링으로 세분하여 더 상세한 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 감쇠비 5%에 대응하는 각 세트 지진파의 방향별 응답스펙트럼은 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이, 본 연구에서 선택한 12본 세트의 방향별 지진파들은, 최대 증폭에서의 최대 스펙트럴 가속도 및 대응 주기가 비교적 고르게 분포되어 있어 본 연구의 비교해석에 합리적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3.5 매설가스배관의 동적응답

표 2에 정리된 해석모델에 대해, 선택된 12세트의 지진파를 0.1g~1.5g까지 0.1g 등간격으로 스케일링한 지진파에 대해 지반조건, 배관형태, 지점조건 및 매설깊이 등을 변수를 고려하여 비선형 시간이력 지진응답해석을 수행하였다. 지

〈표 3〉 지반조건에 대한 매설가스배관의 횡방향 및 수직방향 고유주기

지반조건	횡방향			수직방향		
	1차모드	2차모드	3차모드	1차모드	2차모드	3차모드
조밀한 사질토(ds)	0.6963	0.6837	0.6642	1.6047	1.4666	1.2991
느슨한 사질토(ls)	1.0326	0.9929	0.9358	1.8748	1.6641	1.4306
연약 점토(sc)	1.3556	1.2693	1.1560	1.5059	1.3906	1.2451

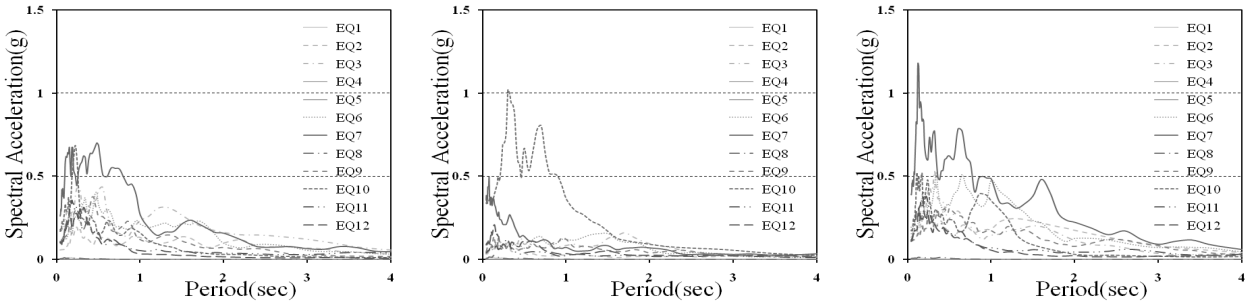


(a) 횡방향 1차모드 (b) 횡방향 2차모드 (c) 수직방향 1차모드 (d) 수직방향 2차모드

〈그림 3〉 직선배관의 대표적인 모드형상(조밀한 사질토 지반조건)

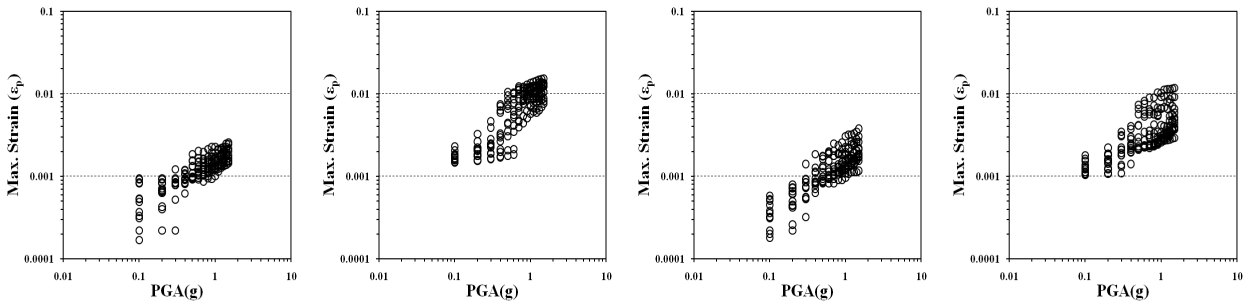
〈표 4〉 지진파의 종류

Eathquake	Remark	Station	HP(hz)	LP(hz)	PGA(g)
Aqaba 1995	EQ1	Eilat	0.1	40	0.109
Borrego Mth 1968	EQ2	117 E1 centro array #9	0.2	12.5	0.13
Cape Mendocino 1992	EQ3	Eureka-Mytrle & West	0.16	23	0.178
Chi-Chi, Taiwan 1999	EQ4	CHY014	0.03	50	0.263
Chi-Chi, Taiwan 1999	EQ5	ILA067	0.03	50	0.198
Coalinga 1983	EQ6	Parkfield-Fault Zone	0.2	20	0.194
Imperial Valley 1979	EQ7	6605 Delta	0.05	null	0.351
Kocaeli, Turkey 1999	EQ8	Fatih	0.02	50	0.187
Landers 1992	EQ9	Indio-Coachella Canal	0.1	23	0.109
Loma Prieta 1989	EQ10	Hayward-BART Sta	0.2	31	0.159
San Fernando 1971	EQ11	Hayward Narrows Dam	0.1	20	0.107
Tabas, Iran 1978	EQ12	Ferdows	0.04	20	0.108



(a) Longitudinal (b) Transverse (c) Vertical

〈그림 4〉 입력지진파의 방향별 응답스펙트럼

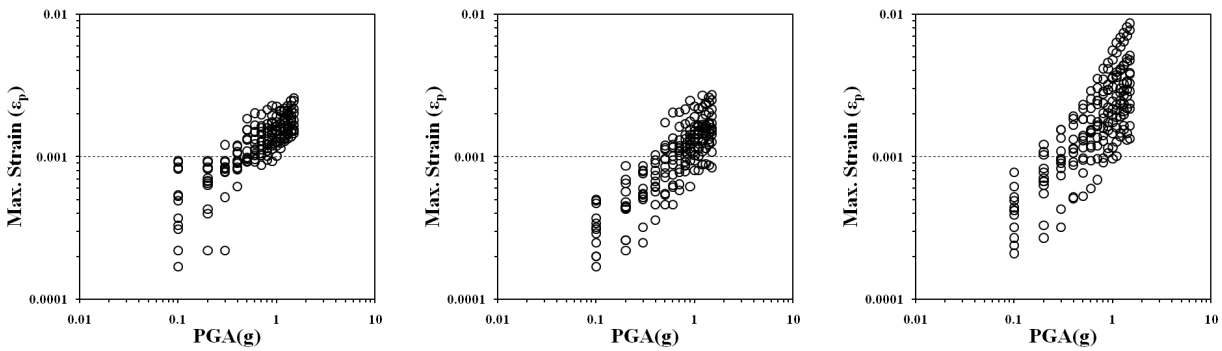


(a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) S4

〈그림 5〉 지반 조건에 대한 매설가스배관의 손상분포

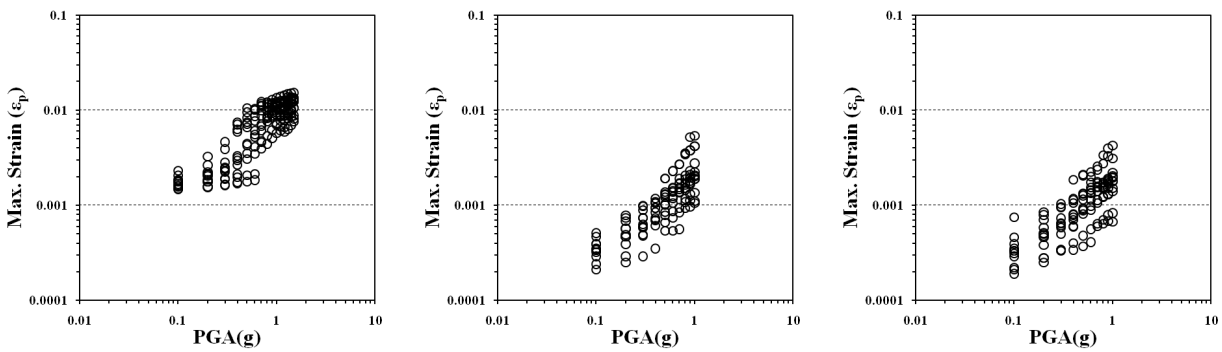
진파를 적용한 매설가스배관의 해석결과는 대칭적인 거동 특성으로 인하여 배관 전체길이의 절반(0.6km)에 대한 거동을 검토하였다. 또한 지진하중에 가장 취약한 부분인 매설가스배관 단부지점, 경사배관 및 직각배관인 경우에는 배관의 구부러짐이 시작되는 지점에서의 최대 변형률 응답을 통하여 거동을 검토 하였다. 매설가스배관의 손상지수를 매설가스배관 단부의 최대 변형률로 정의하여 입력지진강도인 PGA와 함께 매설가스배관의 동적응답으로 인한 손상분포를 나타내었다. 그림 5는 네 가지 지반조건(S1, S2, S3, and S4)에 대한 매설가스배관의 동적응답으로 인한 손상분포를 나타낸다. 그림 5에 나타난 것과 같이, 느슨한 사질토나 연약점토 지반의 함유량이 높은 복합지반일수록 매설가스배관의 단부지점에서 발생하는 배관 단면의 최대 변형률이 증가함을 확인 할 수 있다. 이는 곧, 확률적으로 더 심각한 손상이 발생할 경우가 증가된다는 것을 의미한다. 그림 6은 세 가지의 지점조건(S1, S5, 및 S6)에 대한 매설가스배관 동적응답에 의한 손상분포를 나타낸다. 그림 6의 (b) 및 (c)와 같이, 일단고정·일단힌지와 양단 힌지 지점에서 매설

가스배관의 손상분포가 넓게 분포하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 곧, PGA가 낮은 지진파일 경우 단부조건이 일단고정·일단힌지와 양단 힌지지점에서는 최대 변형률이 감소하여 손상확률이 낮아짐을 확인 할 수 있다. 하지만, PGA가 높은 지진파의 경우에는 양단힌지지점의 경우에 최대 변형률이 큰 폭으로 증가하는 것을 확인 할 수 있어, 양단힌지지점의 경우 높은 PGA의 지진파에 심각한 취약성을 갖는 것으로 판단된다. 즉, 매설가스배관의 단부지점 중 힌지 지점은 다른 지점조건과 비교해볼 때, 최대지반가속도가 증가함에 따라 다소 큰 비선형 변형률이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 그림 7은 매설가스배관의 매설 깊이에 대한 동적응답으로 인한 손상분포를 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이, 매설 깊이가 깊어질수록 매설가스배관의 최대 변형률이 감소함을 확인 할 수 있다. 이는 즉, 심각한 손상이 발생할 확률이 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 매설가스배관의 매설 깊이가 깊어질수록, 비선형 조인트 해석모델에서 지반 스프링의 강성이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 배관의 형태, 배관 위 토층높이의 영향에 따른 확률적 손상분포는 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 (a), (b) 및 (c)에서 확인 할 수 있는 바와 같이, 배관의 형태에 따른 매설가스배관 최대변형률의 변화는 아주 미미한 것을 알 수 있었으며, 이와 같은 결과는 지진취약도 해석 시, 배관형태



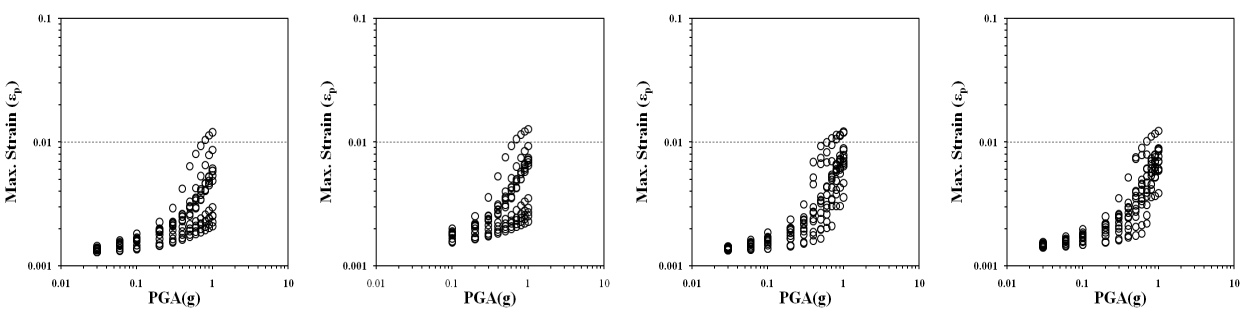
(a) S1 (b) S5 (c) S6

〈그림 6〉 지점 조건에 대한 매설가스배관의 손상분포



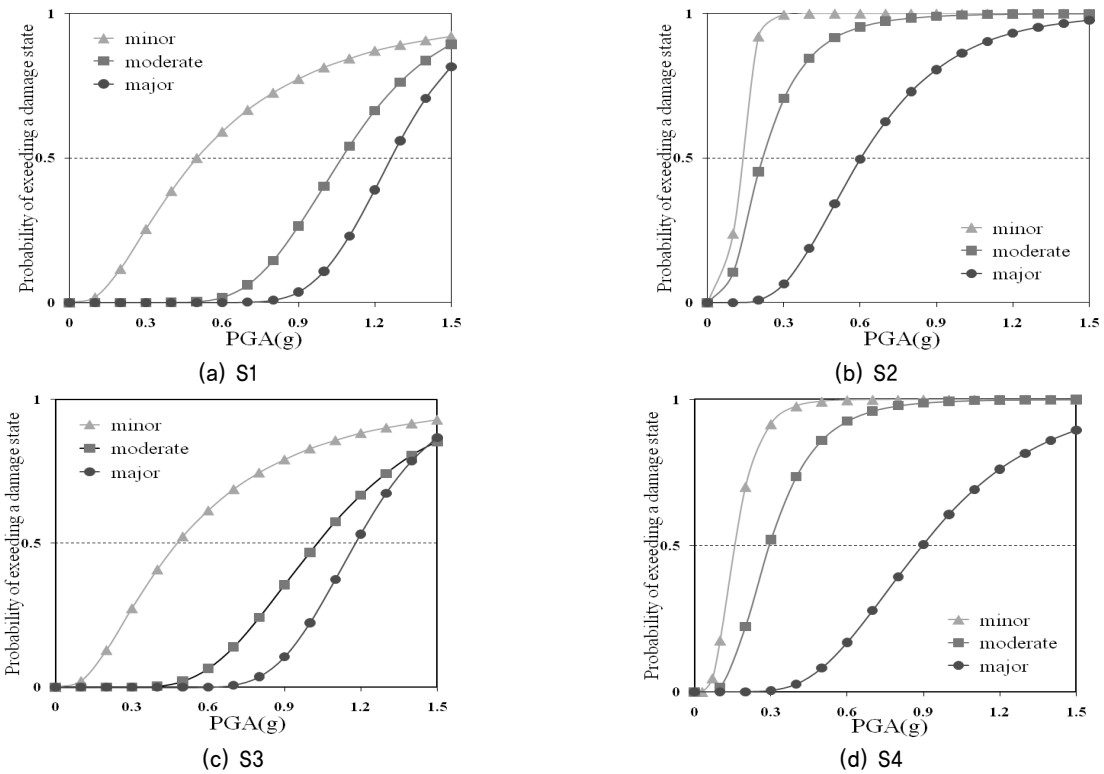
(a) S2 (b) S7 (c) S8

〈그림 7〉 매설 깊이에 대한 매설가스배관의 손상분포



(a) L5 (b) H5 (c) L1 (d) L2

〈그림 8〉 배관의 형태 및 배관 위 토층깊이에 대한 매설가스배관의 손상분포



〈그림 9〉 지반조건을 고려한 취약도 곡선

는 거의 영향을 미치지 않음을 예상할 수 있다. 배관 위 토층 높이 또한 매설가스배관의 동적응답에 거의 영향이 없음을 그림 8에서 확인 할 수 있다.

4. 취약도 곡선 작성

매설가스배관에 대해, 스케일링된 지진파에 의한 비선형 시간이력 지진응답해석을 수행한 후, 각 지진파에 대한 매설가스배관 단부의 최대변형률을 이용하여 지진취약도 해석을 수행하였다.

4.1 손상단계 정의

손상단계(Damage State)란 구조물의 손상정도를 예측하는 가장 합리적인 방법이며, 과거 지진에 대한 구조물의 손과 관련한 통계적 해석이라고 할 수 있다. Shinozuka et al.[22]은 매설배관 관망의 지진 위험도 해석을 수행하여 축방향 변형률로서 모든 손상단계를 정의하였으며, 손상단계는 Minor, Moderate Major 3단계로 정의 하였다. 표 5에 Shinozuka et al[22]이 제안한 손상단계를 나타내었다.

여기서 ε_p는 지진하중이 가해 졌을 때, 매설배관의 최대변형률을 나타내며, ε_y는 매설배관의 항복변형률을 나타낸다. 매설배관의 경우, 지진취약성에 대해 정성적인 인식이 있어 왔음에도 불구하고, 정량적인 손상단계 정의가 아주 미비한 실정이다. 표 5와 같이 Shinozuka et al.[22]이 제안한 손상단계 정의는 극소수 중의 하나임과 동시에, 간편하면서도 단면 내 동특성 변화를 비교적 잘 반영할 수 있는 손상단계로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 표 5에 나타낸 손상단계를 취약도곡선 작성에 사용하였다.

〈표 5〉 매설배관의 손상단계(Shinozuka et al.[22])

손상단계	내용
Minor	$\varepsilon_p \leq 0.7\varepsilon_y$
Moderate	$0.7\varepsilon_y < \varepsilon_p \leq \varepsilon_y$
Major	$\varepsilon_p > \varepsilon_y$

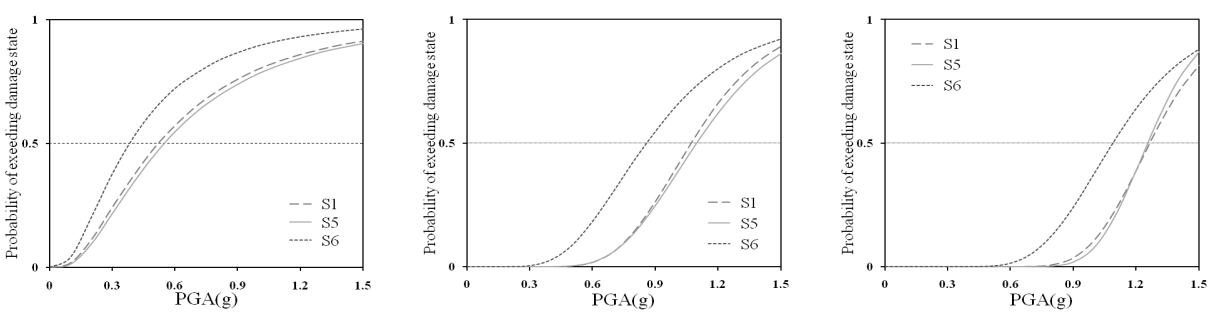
4.2 매설배관에 대한 지진취약도 분석

비선형 시간이력 지진응답해석을 통해 매설가스배관의 단부 최대변형률을 구하였으며, 해석결과를 이용하여 지반조건, 지점조건, 배관형태 및 매설깊이 등을 고려하여, 매설가스배관의 지진취약도 해석을 위한 지진취약도 곡선을 작성하였다. 지반조건을 5가지 조건으로 달리하여 취약도 해석을 수행하였지만, 연약점토 지반으로만 구성된 모델은 배관 자중에 의한 침하가 발생하여 취약도 해석이 불가하였다. 이 침하는 매설배관의 자중에 의한 초기침하로 판단된다.

따라서 연약지반에 매설가스배관을 시공시 지반개량을 통한 충분한 지반 지지력을 확보한 후에 시공되어야하며, 자중에 의한 침하 방지용 고정장치를 사용하는 것도 침하를 방지하는 적절한 방법으로 판단된다. 이와 같이 순수 연약점토지반을 제외한 4가지 지반조건(S1, S2, S3, and S4)에 대한 취약도 해석을 수행하였으며, 지반조건을 고려한 취약도 곡선을 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 확인 할 수 있듯이 느슨한 사질토나 연약점토지반의 함유량이 높은 복합지반일 수록 중앙값이 작아지며, 이는 곧, 연약지반일수록 내진성능이 낮은 것을 알 수 있다. 또한, 낮은 PGA의 지진파에도 손상단계 이상의 손상이 발생할 경우가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 본 연구에서 고려된 조건에 대한 지진취약도 함수의 이변수인 중앙값과 표준편차는 표 6에 나타내었다. 지반조건에 대한 중앙값의 차이 또한 표 6에서 확인할 수 있다. 매설가스배관 단부의 지점조건을 양단고정단지점, 일단고정·일단힌지지점, 양단힌지지점의 3가지 경우에 대한 취약도곡선은 그림 10에 나타나 있다. 지반조건과는 달리 취약도 곡선의 형태는, 양단고정단지점과 일단고정·일단힌지지점의 경우 그 차이가 매우 미미한 반면, 양단 힌지지점의 경우 내진성능이 다른 지지점 조건에 비해 다소 낮은 것을 알 수 있다. 비선형 해석 결과에서 설명하였던 것처럼, 양단힌지지점(S6)일 경우, PGA가 큰 지진파에 대한 매설가스배관 단부의 최대변형률이 증가하였고, 이에 따라 취약도 해석 결과 또한 다른 지지점 조건에 비해 심각한 손상이 일어날 확률이 증가되는 것을 그림 10에서 확인 할 수 있다. 그림 11은 매설깊이를 고려한 취약도 곡선을 나타낸 것이며, 지반조건은 느슨한 사질토에 대해서 해석을 수행하였다. 매설깊이가 1.181m인 S2 취약도 곡선에 비해 매설깊이가 각각 3.381m와 5.381m인 S7과 S8 취약도 곡선이 더 안정적인 것을 확인 할 수 있다. 즉, 매설깊이가 깊어질수록 배관의 내진성능이 높아짐을 알 수 있고, S7과 S8의 취약도 곡선 사이에 차이가 많지 않음으로 인해, 매설깊이가 일정

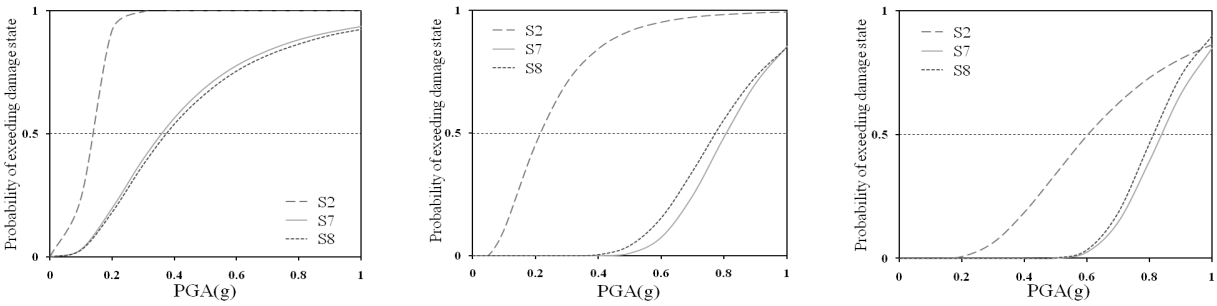
〈표 6〉 해석모델별 취약도 곡선의 중앙값 및 표준편차

배관분류	배관형태	모델명	Minor		Moderate		Major	
			중앙값(c_m) (g)	표준편차(ζ)	중앙값(c_m) (g)	표준편차(ζ)	중앙값(c_m) (g)	표준편차(ζ)
직선배관	straight	S1	0.5016	0.7749	0.9180	0.5222	1.2642	0.1892
		S2	0.1260	0.3268	0.2157	0.6112	0.6041	0.4610
		S3	0.4785	0.7755	1.0291	0.3578	1.1793	0.2168
		S4	0.1556	0.4753	0.2921	0.4990	0.8945	0.4147
		S5	0.5488	0.7709	1.0960	0.2887	1.2546	0.1600
		S6	0.3813	0.7741	0.8571	0.3942	1.0884	0.2724
		S7	0.3579	0.6819	0.8063	0.2059	0.8381	0.1716
		S8	0.3679	0.6997	0.7733	0.2500	0.8114	0.1646
경사배관	highering(600mm)	H1	0.0404	0.3430	0.1485	0.9856	0.6431	0.3846
	lowering(600mm)	L1	0.0587	0.7041	0.208	0.6674	0.6478	0.3706
		L2	0.0435	0.5517	0.1714	0.7529	0.6382	0.3843
		L3	0.0487	0.6375	0.1789	0.7630	0.6479	0.3760
		L4	0.0420	0.4660	0.2248	0.8600	0.6360	0.3966
직각배관	highering(600mm)	H5	0.0432	0.4337	0.1555	0.9905	0.6373	0.3941
	lowering(600mm)	L5	0.0579	0.6651	0.3120	0.7330	0.6630	0.3704



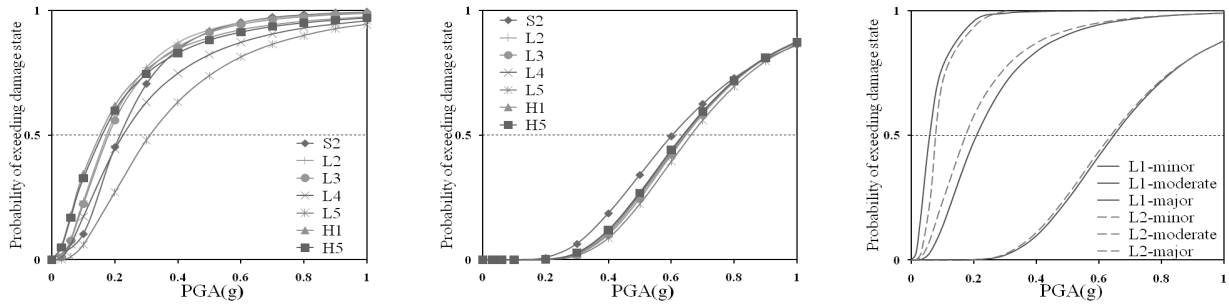
(a) Minor (b) Moderate (c) Major

〈그림 10〉 단부 지점조건을 고려한 취약도 곡선



(a) Minor (b) Moderate (c) Major

〈그림 11〉 배관 매설깊이를 고려한 취약도 곡선



(a) 배관의 형태(Moderate) (b) 배관의 형태(Major) (c) 토층 높이를 고려한 취약도 곡선

〈그림 12〉 배관의 형태 및 토층 높이를 고려한 취약도 곡선

깊이 이상인 경우, 매설깊이는 취약도 곡선에 크게 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.

매설가스배관을 시공시 하천, 철로 및 지중시설물 등 장애물의 영향으로 인해 직선배관의 시공이 불가능할 경우는 직선배관이 아닌 다른 형태의 배관을 시공하게 된다. 이러한 경우를 반영하기 위해, 구부러진 형태의 매설가스배관에 대한 내진성능평가를 수행하였으며, 그림 12의 (a)와 (b)에 나타내었고, 각각 매설가스배관의 Moderate와 Major 손상단계를 나타낸다. 매설가스배관은 구부러진 형태 및 정도에 따라 경사배관과 직각배관으로 구분되었고, 경사배관은 highering(H1)과 lowering(L1, L2, L3, 및 L4)의 5가지로 나누었으며, 직각배관은 highering(H5)과 lowering(L5)으로 구분하여 취약도 해석을 수행하였다. 그림 12의 (a)와 (b)에 나타난 것과 같이, 취약도 곡선은 Moderate 손상단계에서 배관의 구부러진 형태 및 정도에 따른 차이가 있지만 그 차이가 크지 않음을 알 수 있고, Major 손상단계에서는 그 차이가 매우 미미함을 알 수 있다. 즉, 매설가스배관의 구부러진 형태 및 정도는 배관의 내진성능에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

매설가스배관의 경사배관 부분이 지중 시설물을 지나는 경우와 하천을 지나는 경우, 배관의 경사진 부분 위쪽의 매설 토층높이가 경사지지 않은 부분 위쪽의 토층높이와 각각 일정하지 않은 경우(L2)와 일정한 경우(L1)로 나누어지게 되고, 이를 반영한 취약도 해석결과를 그림 12(c)에 나타내었다. 그림 12(c)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 다른 토층 높이가 취약도 곡선에 미치는 영향은 미미한 것을 알 수 있어 내진성능에 미치는 영향이 거의 없을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 매설가스배관으로 가장 널리 사용되고 있는 API X65의 지진하중에 대한 비선형 시간이력해석을 통하여 지진취약도 해석을 수행 하였으며, 본 연구에서 고려된 매설가스배관의 다양한 조건에 대한 비교분석을 수행하였다. 이로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 배관이 매설된 지반의 조건이 느슨한 사질토(S2)나 연약점토 지반의 함유량이 높은 복합지반(S4)일 경우에 배관 단부에서의 최대변형률이 증가함을 알 수 있었다. 또한, 지반조건을 고려한 취약도 곡선을 비교분석결과 느슨한 사질토나 연약점토 지반의 함유량이 높은 복합지반일 경우에 중앙값이 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 연약지반일수록 지진하중에 대한 손상확률이 증가하며, 심각한 손상이 일어날 확률도 증가하는 것을 알

수 있었다.

2. 매설가스배관의 단부지점 조건을 다르게 고려하여 해석을 수행하였다. 지점조건을 양단고정(S1), 일단고정·일단힌지(S5) 및 양단힌지(S6)로 비선형 시간이력해석을 수행한 후 지진 취약도 곡선을 작성하였다. 시간이력해석 시에 일단고정·일단힌지와 양단힌지지점은 낮은 PGA에서는 최대 변형률 응답이 감소하고, 높은 PGA에서는 최대변형률 응답이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 단부지점의 조건을 고려한 취약도 곡선은 지반조건 을 고려한 취약도 곡선만큼의 확연한 차이는 나타나지 않았지만, 지점조건에 따라 미미한 차이를 확인 할 수 있었다.
3. 일반적으로 매설가스배관은 도로법에 의거하여 매설깊이를 1.2m이상으로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 매설깊이 즉, 1.881m(S2), 3.381m(S7) 및 5.381 m(S8) 세 단계를 고려하였으며, 비선형 시간이력해석을 통해 지진 취약도 곡선을 작성하였다. 매설깊이가 깊어질수록 취약도 곡선이 더 안정적인 것을 확인 할 수 있다. 즉, 매설깊이가 일정깊이까지 깊어질수록 배관의 내진성능이 높아질 것으로 사료된다.
4. 본 연구에서는 또한 직선배관과 함께, 다양하게 구부러진 형태 및 정도의 매설배관(H1, L1, L2, L3, L4, H5, L5)을 고려하여 지진취약도 해석을 수행하였다. 경사배관이나 직각배관의 경우에, 배관의 경사정도는 지진하중에 대한 응답에 크게 영향을 받지 않는 것을 확인 할 수 있었고, 지진 취약도 곡선 또한 구부러진 형태 및 정도에 따른 차이가 크지 않음을 알 수 있어, 매설배관의 구부러진 형태 및 정도는 매설배관의 내진성능에 크게 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.
5. 경사배관의 경사진 부분 위쪽의 토층높이를 경사지지 않은 부분 위쪽의 토층높이와 일정하게 유지한 경우(L1)와 일정하지 유지하지 않은 경우(L2)에 대한 지진 취약도 해석을 수행하였다. 비교분석 결과, 두 가지 경우에 대한 지진 취약도 곡선의 차이는 아주 미미한 것을 알 수 있었다.

종합적으로, 본 연구결과가 향후에 국내 매설가스배관 내진성능평가 및 내진설계에 참고자료로 활용되기 위해서는, 우리나라 현실에 부합되는 지반조건 및 입력지진파 등을 이용한 지진취약도해석이 수행되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 매설가스배관의 합리적인 지진취약도 해석을 수행하기 위해 추후 다양한 손상단계에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

"이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0087163)" 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. APEC, Seismic codes and Standards of energy supply system, *Report for Asia-Pacific Economic Cooperation Energy Working Group*, Energy Commission Ministry of Econimic Aff airs, Chinese Taipei, 54-60, 2003.
2. Mashaly, A., and Datta, T.K., "Seismic risk analysis of buried Pipelines," *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol. 115, No. 3, 232-252, 1989.
3. Dames, and Moore, "The Loma Prieta earthquake: Impact of lifeline systems," *Journal of Disaster Recovery*, Vol. 3, No. 2, 8, 1999.
4. An EQE Summary Report, The January 17, 1995 Kobe Earthquake, EQE International, 1995.
5. Otani, S., "Disaster mitigation engineering-The Kobe earthqu ake disaster-," JSPS, 1999.
6. Chen, W.W., Shih, B.J., Wu, C.W., and Chen, Y.C., "Natur al gas pipeline system damages in the Ji-Ji earthquake(The City of Nantou)," *Proceedings of the sixth international conference on seismic zonation*, Palm Spring, Riviera Resort, CA, 2000
7. Kennedy, R.P., Cornell, C.A., Campbell, R.D., Kaplan, S. and Perla, H.F., "Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 59, 315-338, 1980.
8. Ellingwood, B., and Hwang, H., "Probabilistic descriptions of safety-related structures in nuclear plants," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 88, 169-178, 1985.
9 Cornell, C.A., Jalayer, F., Hamburger, R.O., and Foutch, D. A., "Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 4, 526-533, 2002.
10. Hwang, H.M., and Jaw, J.W., "Probabilitist damage analysis of structures," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 11 6, No. 7, 1992-2007, 1990.
11. Ellingwood, B.R., Kobayashi, H., Kanda, J., and Iwasaki, R., "Probability-based seismic safety evaluation of existing buildings," *Engineering structures*, Vol. 19, No. 9, 708-717, 1997.
12. Ellingwood, B.R., "Earthquake risk assessment of building structures," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 74, 251-262, 2001.
13. Hwang, H.M., and Huo, J.R., "Generation of hazard-consis tent fragility curves," *Soil Dynamics and Earthquake*

Engineering, Vol. 13, 345-354, 1994.
14. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K., and Kim, S.H., "Nonlinear static procedure for fragility curve development," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No.12, 1287-1295, 2000.
15. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., and Naganuma, T., "Statistical analysis of fragility curve," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol.126, No. 12, 1224-1231, 2000.
16. 김상훈, 이진학, 김호경, "교량의 지진취약도 해석시 사용되는 성능스펙트럼 기법의 평가," 한국지진공학회논문집, 제8권, 제 1호 67-76, 2004.
16. 박주남, 최은수, 김성일, 조성철, "무도상 강판형 철도교의 지진위험도 해석" 한국강구조학회논문집, 제21권, 제1호, 45-53, 2009.
17. 박주남, 최은수, "확률적 지진요구모델을 이용한 구조물의 최적 내진보강," 한국지진공학회논문집, 제12권, 제3호, 1-10, 2008.
18. 송종걸, 김학수, 이태형, "확률론적 내진성능평가를 위한 PSC Box 거더교의 지진취약도 해석," 대한토목학회논문집, 제29권, 제2A호, 119-130, 2009.
19. 신지욱, 이기학, 정성훈, "다양한 이력 접합부가 적용된 철골모멘트저항골조의 내진성능평가에 대한 연구," 대한건축학회논문집, 제25권 제11호, 19-27, 2009.
20. 이진학, 김상훈, 윤정방, Shigeru Kushiyama, "지진취약도 분석을 위한 확률밀도함수 보간 기법," 대한토목학회논문집, 제24권, 제2A호, 391-399, 2004.
21. 이진학, 윤진영, 윤정방, "지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도평가," 한국지진공학회논문집, 제8권, 제6호, 31-43, 2004.
22. Shinozuka, M., Takada, S., and Ishikawa, H., "Some aspects of seismic risk analysis of underground lifeline systems," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 101, 31-43, 1979.
23. 김문겸, 임윤묵, 김태욱, "액상화, 횡방향 영구지반 변형을 받는 지중매설관로의 동적해석에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제23권, 제4A호, 571-583, 2003.
24. 김태욱, 김문겸, 임윤묵, "액상화, 횡방향 영구지반 변형을 받는 연속된 지중매설관로의 손상도 곡선에 관한 연구," 대한토목학회 정기학술대회, 2005.
25. 이억섭, 김동혁, "지반침하가 매설배관의 건전성에 미치는 영향," 한국정밀공학회논문집, 제21권, 제1호, 173-180, 2004
26. 이억섭, 편장식, "매설배관의 파손 확률 모델," 한국정밀공학회논문집, 제18권, 제11호, 116-123, 2001.
27. Ang, A.H.S., and Tang, W.H., *Probability concepts in engi eering planning and design II*, John Wiley and Sons, New York, 333-346, 1984.
28. Ang, A.H.S., and Tang, W.H., *Probability concepts in engi eering planning and design I*, John Wiley and Sons, New York, 219-242, 1984.
29. American Lifelines Alliance, Guideline for the design of bu ried steel pipe, ASCE, 2001.
30. 이도형, 조규상, 정태영, 공정식, "매설가스배관의 지진응답해석," 한국지진공학회논문집, 제11권, 제6호, 41-52, 2007.
31. Elnashai, A.S., Papanikolaou, V., and Lee, D.H., "ZeusNLA program for inelastic dynamic analysis of structure," MAE Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 2001.
32. 건설교통부 제정, 도로법 시행령, 별표 1, 2007.
33. 윤영기, 도시가스배관의 매설깊이 개선에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교, 2007.
34. http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/sacsteel/ground motions.html