국내 및 미국 시방서에 따라 시공된 지중매설관의 동적거동

Dynamic Behavior of Buried Pipelines Constructed by Domestic and USA Specifications

전상수* · 김재민**
Jeon, Sang-Soo · Kim, Jae-Min

Abstract

Lifeline Damages induced by earthquake loading brings not only a structure damage but the communication problems by the interruption of various energy utilities such as electric power, gas, and water resources. Earthquake loss estimation systems in USA and Japan, called as HAZUS (Hazard in US) and HERAS (Hazards Estimation and Restoration Aid System), respectively, have been established for the purpose of efficient responding to the earthquake hazard. Sufficient damage records are required to establish these systems. However, there are insufficient data set of damage records obtained from previous earthquakes in Korea. In this study, according to the construction specifications of the pipelines in both Korea and USA, the behavior of both ductile and brittle pipelines embedded in dense sand overlying various soils, such as clay, sand, and gravel were examined with respect to the pipeline characteristics under various earthquake loadings. The applicability of pipeline damage prediction used in HAZUS program to Korea has been investigated.

Key words : Natural disaster, Buried pipelines, Earthquake loading, Dynamic behavior, Numerical analysis

요 지

지진재해로 인한 라이프라인의 피해는 구조물의 손상뿐만 아니라, 통신장애, 전력·가스·수자원 등 다양한 생활에너지의 공급에 장애를 발생시킨다. 이러한 지진재해에 효율적으로 대응하기 위해 미국과 일본에서는 HAZUS 및 HERAS와 같은 지진재해평가 시스템을 구축하여 활용하고 있다. 국내에서도 이러한 시스템 구축을 위해 노력하고 있으나, 근본적으로 구조물의 지진해석을 통한 평가자료가 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 다양한 구조물 중 국내에 시공된 수많은 매설관을 조사하여 관재질 특성에 따라 연성관과 취성관으로 분류하고 이에 대한 동적 거동을 분석하였다. 다양한 지진하중 하에서 국내 및 미국의 시공기준에 따라 매설관의 동적 거동을 비교·평가하였다. 본 연구를 통하여 미국 HAZUS 프로그램의 알고리즘에 따른 국내의 매설관 손상평가의 적정성을 조사하였다.

핵심용어 : 자연재해, 매설관, 지진하중, 동적 거동, 수치해석

1. 서 론

라이프라인(Lifeline)이란 인간 활동에 가장 근간이 되는 전력, 통신, 에너지, 상하수, 운송 및 교통망 등 선 형태의 구성을 갖는 사회기반시설을 통칭한다. 라이프라인의 피해특성은 지진발생시 1차적으로 구조적인 손상을 받을 수 있으며, 이로 인한 기능성의 상실과 함께 사회적·경제적으로 대규모의 2차적인 피해를 일으키게 되는 특성을 가지고 있다.

아직까지 국내에서는 이러한 라이프라인 중 매설관의 지진 피해사례가 전무한 실정이지만, 최근 발생한 일본 후쿠오카지진(2005)은 부산 및 마산을 포함한 경남해안지역의 주민들이 지반의 흔들림을 감지할 정도로 국내에 큰 영향을 미쳤으며, 한반도 및 주변 지역에서의 지진발생 빈도 및 지진규모가 점

점 증가하는 경향을 고려하여 매설관의 동적 거동특성에 대한 합리적인 연구가 필요하다.

현재까지 발생한 대표적인 지진사례를 바탕으로 매설관의 피해사례를 검토한 결과, 미국 Loma Prieta 지진(1989)으로 인한 관로의 피해는 매립지에서 집중되어 있었으며, 이음부의 뿔힘, 분기부의 절단, 관체의 균열 등 전체적으로 모든 피해 패턴이 발견되었다. 또한, 일본 효고현 남부지진(1995)으로 인한 피해의 특징으로는 관거 본체, 관거 이음부, 인공관의 접속부 등에서 피해가 다수 발생한 것과 변위성이 큰 플라스틱관에서도 피해를 입었다는 것이다. 그리고 과거 지진 피해에서는 없었던 깊은 간선 관거의 피해, 콘크리트관의 축방향 균열의 대량 발생 피해 등이 있었다(행정자치부, 1998).

또한, 매설관을 대상으로 현재까지 수행된 지진피해 분석사

*정회원 · 인제대학교 토목공학과 조교수 건설기술연구소 (E-mail : ssj@inje.ac.kr)

**천일기술단 구조 지반부 사원

레 자료들을 검토한 결과, 매설관의 지진피해원인을 크게 지진파와 전파와 영구지반변형(permanent ground deformation, PGD)으로 구분할 수 있다(김태욱 등, 2003). 우리나라는 과거 역사지진자료 및 1905년 이후 시작된 계기지진자료를 통해 지역특성상 중약진 지진대에 속하지만, 상대적으로 지진발생빈도가 높고 강진지역인 미국 및 일본에서는 영구지반변형과 함께 영구지반변형을 받는 매설관의 거동 특성에 대한 일반적인 연구가 진행되어 왔다. 국내에서도 김문겸 외 2인(2003)은 액상화와 영구지반변형을 받는 지중매설관로의 거동 특성을 해석하기 위한 동적수치해석 알고리즘을 개발하였고, 김문겸 외 3인(2005)은 지중매설관로에 대해 영구지반변형 효과를 고려한 국내 지진피해평가 절차를 제안하였다.

본 연구에서는 관재질의 특성에 따라 매설관을 분류하고, 국내 및 미국의 관 매설기준에 근거하여 최대 지반 속도(peak ground acceleration, PGA)에 따른 매설관(상하수도관, 가스관, 통신관)의 거동 특성을 수치해석적으로 분석하였다. 본 연구를 통하여 매설관의 종류, 원지반층의 지반조건 그리고, 지진하중의 PGA를 이용한 수치해석을 수행하여 매설관의 거동을 분석하였다. 또한, 국내 매설관의 분류(안)를 제시하였으며 미국의 지진피해평가모델인 HAZUS에서 사용하는 매설관의 손상률(Repair Rate) 평가의 국내 적용성을 판단할 수 있다.

2. HAZUS의 손상률(Repair Rate) 알고리즘

미국 HAZUS에서 분류하고 있는 상하수도시설의 지진 피해 평가는 미국에서 발생한 지진피해이력을 바탕으로 각 시설별 주요 구성요소의 피해에 따른 중요 시설의 취약성을 판단하고 있다. 미국과 국내의 각 상하수도시설별 주요 구성요소가 매우 유사하므로 본 연구를 통하여 국내의 상하수도시설물의 하나인 매설관 손상평가를 미국의 HAZUS 손상 알고리즘의 국내 적용성에 대한 검토를 하고자 한다.

HAZUS의 매설관 손상평가는 매설관 1 km에 해당되는 길이에 몇 곳의 손상(손상률, Repair Rate)에 의해 평가된다. 매설관에 대한 HAZUS의 손상 알고리즘은 O'Rourke and Ayala(1993)의 경험적인 자료에 근거한 최대지반속도(peak

그림 1. 매설관 취약도 곡선

ground velocity, PGV)로 나타낼 수 있다. (모두 취성관에 적용함을 원칙으로 하고 연성관에 적용하기 위해서는 0.3을 곱하여 산정한다(FEMA, 1999). 그림 1은 PGV 알고리즘을 이용한 매설관의 취약도 곡선이다.

3. 매설관의 분류

본 연구에서는 미국 HAZUS 모델과 유사하게 매설관을 구분하였다. 이는 매설관의 직경, 두께, 재질, 특성 등 다양한 변수를 고려하여 분류하기에는 그 종류가 매우 방대하므로, 지진해석상에 미치는 영향을 고려하여 다양한 변수 중 재질 특성에 따라 분류한 것이다. 또한, HAZUS에서 사용하는 손상 알고리즘(Repair Rate)의 국내 적용가능성을 검토하기 위해 국내 매설관(상하수도관, 가스관, 통신관)을 취성관 및 연성관으로 분류하였다.

환경부(2005)의 하수도시설기준에 의하면 연성관(flexible pipe)은 설계시 외력에 의한 처짐 등의 변형을 고려하고 하중이 없어지면 형상이 복원되는 관으로 정의하고, 강성관(rigid pipe)은 도관, 원심력철근콘크리트관 등으로 설계시 외력에 의한 처짐 등의 변형을 고려하지 않는 관으로 정의하고 있다. 여기서, 취성(brittleness)은 약간의 변형에도 파괴되기 쉬운 재료의 성질로, 주철, 유리와 같은 재료가 있으며, 연성(ductility)은 금속이 인장에 따라 파단될 때까지의 늘어나기 쉬운 정도로 인장시험에서의 늘어남의 백분율로 나타낸다. 그리고 강성은 하중을 받는 구조물이나 부재의 변형에 저항하는 성질을 의미한다. 또한, 국내 환경부(2005)의 상하수도시설기준의 경우, 용어 정의에 의해서는 설계시 외력에 의한 처짐 등의 변형 고려 여부만으로 구분하고 있으나, 내용에서는 기초공에 따른 고려도 구분기준으로 하고 있다.

국내에서 사용되고 있는 상하수관의 재질에 따른 구분은 다음 표 1 및 표 2와 같다. 하지만, 국내의 상하수도시설기

표 1. 상수관거의 분류(상수도시설기준, 2005)

관 종	규 격	구 분
덕타일 주철관	KS D 4311	연성관
덕타일주철 이형관	KS D 4308	연성관
상수도용 도복장 강관	KS D 3565	연성관
상수도용 도복장 강관 이형관	KS D 3578	연성관
일반 배관용 스테인리스강관	KS D 3595	연성관
수도용 에폭시수지 분체내외면 코팅강관	KS D 3608	연성관
수도용 폴리에틸렌 분체라이닝 강관	KS D 3619	연성관
프리스트레스트 콘크리트 실린더관	KS D 4406	강성관
이음매없는 동 및 동합금관	KS D 5301	연성관
원심력 철근콘크리트관	KS F 4406	강성관
수도용 경질 염화비닐관	KS M 3401	연성관
수도용 경질 염화비닐 이음관	KS M 3402	연성관
수도용 폴리에틸렌관	KS M 3408	연성관
수도용 폴리에틸렌관의 이음관	KS M 3411	연성관

표 2. 하수관거의 분류(하수도시설기준, 2005)

관 종		규 격	구 분
철근 콘크리트관	원심력철근콘크리트관	KS F 4403	강성관
	코아식프리스트레스트 콘크리트관 (PC관)	KS F 4405	
	진동 및 전압철근 콘크리트관 (VR관)	KS F 4402	
	철근콘크리트관	KS F 4401	
제품화된 철근콘크리트 직사각형관		-	강성관
도관		KS L 3208	강성관
경질염화 비닐관	하수도용 고강성 결질염화비닐이중벽 주름관	KS M 3600 KPPS M 307	연성관
	내충격용 하수도용 경질염화비닐관	KPPS M 306	
현장타설철근콘크리트관		-	강성관
강화플라스틱복합관		KS M 3333	강성관
유리섬유복합관		KS M 3370	강성관
폴리에틸렌관(PE관)		KS M 2009	연성관
덕타일 주철관		KS D 4311	연성관
파형강관		KS D 3590	연성관
폴리에스테르수지콘크리트관		KS M 3375	강성관

표 3. 도시가스관의 재료

재료명		인장강도 (kgf/mm ²)
강관	배관용 탄소강 강관	30 이상
	압력배관용 탄소강 강관	38
	배관용 이크용접 탄소강 강관	41
	고온배관용 탄소강 강관	38
	하이테스트라인파이프	42.2
주철관	취색 주철품	25
	구상흑연 주철품	40
폴리에틸렌관	가스용 폴리에틸렌관	180

준과 Moser(2007)의 기준에 따르면, 덕타일 주철관은 모두 일단 연성관으로 취급하고 있으나, FRP(Fiber Reinforced Plastic)는 국내에서는 강성관으로, Moser(2007)은 연성관으로 구분하였다.

가스관은 관에 흐르는 사용가스의 압력에 따라 고압관, 중압관, 저압관으로 분류되며, 고압이란 1 MPa 이상의 압력(게이지압력)을, 중압은 0.1 MPa 이상 1 MPa 미만의 압력을, 저압은 0.1 MPa 미만의 압력을 의미한다.

천연가스관은 안전한 가스공급을 위해 뛰어난 기계적 특성과 용접성을 가진 고장력 탄소 강관(미국 석유학회 코드 API5L)을 세계적으로 널리 사용하고 있다. 한국가스공사에서 수집한 천연가스관 DB를 분석한 결과, 국내에서 시공되는 천연가스관은 대부분이 강관으로 시공되고 있는 실정이다. 그리고 도시가스관으로 사용하는 재료는 가스사업법에 정해진 것 및 그것들과 동등 이상의 기계적 강도를 갖는 것으로 하고, 이들 중에서 널리 사용되고 있는 재료를 다음 표 3에 나타내었다. 표 3과 같이 도시가스관으로 사용되는 관은 천연가스관과 유사한 관종으로 강관, 주철관, 폴리에틸렌관이 사용되고 있다.

국내 및 미국 지방서에 따라 시공된 지중매설관의 동적거동

그림 2. PVC관 모식도

그림 3. PVC관 모식도

표 4. 재질에 따른 매설관 분류

구 분	관 종
취성관	철근콘크리트관, 주철관, 도관, 토관, 원심력철근콘크리트관, 회주철관, 철근콘크리트박스, 흙관, 석축
연성관	덕타일주철관, 강관, 아연도강관, 경화염화비닐관, 폴리에틸렌관, 스테인레스관, 동관, 연관, 도복장강관, 폴리에틸렌분체라이닝강관, 후렉스불전선합, 폴리에틸렌파복강관, FRP, 강재

또한, 미국표준협회(American National Standards Institute, ANSI)의 ANSI 코드에서 'ANSI B 31.8 Gas Transmission and Distribution Piping'에서는, 가스관 역시 강관, 폴리에틸렌관 등이 사용되고 있다.

국내의 통신선로를 관리하고 있는 (주)KT를 대상으로 통신선로 시공시 사용되는 관종을 조사한 결과, 재료 및 제조 방법, 형태에 따라 다양한 종류가 있으며, 주로 FC관(50mm, 100mm) 및 PVC관(50mm)을 사용하는 것으로 나타났다. 다음 그림 2 및 그림 3은 FC관과 PVC관의 모식도를 나타낸 것이다.

국내 매설관의 조사를 통하여 상하수도관, 가스관 및 통신관의 재질특성에 따라 취성관 및 연성관으로 구분하고, 다음 표 4에 국내 매설관의 분류(안)를 제시하였다.

4. 국내 및 미국의 매설기준

지진하중 재하시 발생하는 매설관의 동적 거동 특성을 분

석하기 위한 수치해석에서 사용될 주요 시공기준은 매설 깊이, 되메움층의 다짐도, 관의 직경 및 두께 등이다. 또한, 매설관의 동적 거동 특성뿐만 아니라, HAZUS에서 사용하는 Repair Rate의 국내 적용가능성을 검토하기 위해 국내와 미국의 매설기준을 조사 및 분석하였다.

4.1 국내

국내에서는 관을 매설하는 경우, '도로법' 및 관계법령에 따라야 하며 도로관리자와 협의하여야 한다. 도로관리자와의 협정이 없을 경우와 공공도로 이외에 관을 매설해야 할 경우에는 표 5에 나타난 바와 같이 매설깊이를 관경 900 mm 이하는 120 cm 이상, 관경 1000 mm 이상은 150 cm 이상으로 해야 하지만, 노면하중을 고려할 필요가 없을 경우에는 그렇게 하지 않아도 된다. 또 노면하중을 고려할 위치에 대규모의 관을 부설할 경우에는 매설깊이를 관경보다 크게 해야 한다. '도로법시행령'에서는 토피의 표준은 120 cm(부득이한 경우 60 cm)로 규정하고 있지만, 수관교 부착부의 제방횡단개소나 다른 매설물과의 교차관계 등으로 토피를 표준 또는 규정치까지 확보하지 못하는 경우에는 도로관리자 또는 하천관리자와 협의한 다음에 토피를 60 cm까지 축소할 수 있다.

4.2 미국

미국의 경우 관을 매설하는 경우에는 특별한 사항이 없는 한, 모든 관은 표 6에 따라 매설되어야 하며, 관의 매설깊이는 동결심도보다 깊어야 한다. 되메우기는 계획지반고 이하의 터파기 지역에 대하여 구조물공사가 완료된 후 계획지반고까지의 흙채움을 말하며, 이 때 양질의 토사를 사용된다.

관 되메우기는 한 층을 30 cm 이하로 펴서 깔고 고른 뒤 90% 이상의 다짐율을 얻을 수 있도록 다져야 한다. 되메우기는 한 층을 30 cm 이하로 하며, 이때마다 현장다짐 시험(Soil Compaction Test)을 실시하며 중요한 곳에서의 되메우기는 최적함수비에 가까운 함수비가 되도록 하고 한 층의 두

표 5. 국내의 노면하중 고려시 매설관 최소토피기준

구 분	최소토피고
관경 900 mm 이하	120 cm
관경 1,000 mm 이상	관경 이상 (단, 최소 150 cm 이상)

표 6. 매설관 최소토피기준 (미국 배관안전국; OPS)

위 치	토피고 in (mm)
	For normal excavation
공업, 산업, 주거 지역	36 (914)
고수위 표시에서 고수위 표시까지 적어도 100피트 (30 미터)의 폭을 가진 내륙을 흐르는 물줄기	48 (1,219)
공공 도로 및 철도 배수로	36 (914)
수심이 깊은 항구지역	48 (1,219)
멕시코 만과 간조일 때 수심이 15피트 이하의 작은 내협	36 (914)
간조일 때 수심이 12피트 이하인 앞바다	36 (914)
이외 다른 지역	30 (762)

께가 20 cm 이내가 되도록 하여 충분히 다져야 한다. 되메우기에 사용하는 재료가 모래인 경우에는 충분한 물다짐을 시행하고 필요하면 더돈기를 시행하여야 한다. 또한, 되메움시 관 아래 국내의 경우 최소 관경의 1/5~1/2 (최저 0.15 m) 깊이만큼, 미국의 경우 최소 관경의 1/8 또는 4in 깊이만큼 모래 또는 양질토로 치환하도록 규정하고 있다.

5. 수치해석을 이용한 동적 거동 평가

본 연구는 국내 및 미국의 기준을 고려하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS(2006)를 이용해 동적해석을 수행하였다. 지진하중 재하에 따른 매설관의 거동 해석을 통하여 국내 및 미국 기준 차이에 따른 매설관의 변형률 및 응력 차이를 분석하였다. 하중 재하는 PGA가 0.2 g, 0.4 g, 0.6 g, 0.8 g, 1.0 g, 1.2 g인 여섯 가지 경우에 대하여 0.5초의 주기로 10초 동안 재하하는 방법과 실지진이력에서 생성된 지진파를 재하하는 방법을 사용하였다. 실지진이력으로는 1994년 미국 Northridge 지진(station: 24436 Tarzana, Cedar Hill)과 1999년 대만 Chi-Chi 지진(station: CHY080)에서 기록된 지진파를 이용하였다. 다음 그림 4 및 그림 5는 Northridge

그림 4. Northridge 지진의 시간-가속도별 이력

그림 5. Chi-Chi 지진의 시간-가속도 이력

지진의 시간-가속도 이력과 Chi-Chi 지진의 시간-가속도 이력을 나타낸 것이다.

5.1 수치해석 모델링

국내 및 미국의 매설기준 규정을 바탕으로, 매설깊이의 차이가 큰 경우에 대해서 고려하기 위해 관경이 1000 mm 이상의 연성관 및 취성관에 대하여 수치해석을 수행하였다. 연성관의 경우 해석 대상 관의 직경 및 두께는 국내의 경우 1144 mm 및 16 mm, 미국의 경우 1130 mm 및 16 mm이며, 취성관의 경우 해석 대상 관의 직경 및 두께는 국내의 경우 1058 mm 및 75 mm, 미국의 경우 1050 mm 및 75 mm이다.

관 되메우기의 경우 국내와 미국 모두 양질의 토사를 사용하며 90% 이상의 다짐도를 얻을 수 있도록 규정하고 있으므로 되메움층은 조밀한 모래로 모사하였으며, 되메움층 아래 원지반은 점토, 느슨한 모래, 중간 조밀한 모래, 조밀한 모래, 모래와 자갈 이상의 다섯 가지 경우에 대하여 고려하였다.

다음 그림 6은 수치해석 모델 모식도이며, 그림 7은 수치해석에 사용된 격자망이다. 매설관 상부 되메움층(h_{B1})은 국내의 경우 1.5 m, 미국의 경우 0.9 m이며, 또한, 매설관 하부 되메움층(h_{B2})은 국내의 경우 관경의 약 1/5인 0.25 m, 미국의 경우 관경의 약 1/8인 0.15 m로써 조밀한 모래로 모사하였다.

매설관의 직경(D)과 두께는 앞서 기술한 바와 같이 연성관은 국내의 경우 1144 mm 및 16 mm, 미국의 경우 1130 mm 및 16 mm이며, 취성관은 국내의 경우 1058 mm 및 75 mm, 미국의 경우 1050 mm 및 75 mm이다. 원지반의 크기는 깊이 30.5 m로 고려하였으며, 모델의 전체 폭은 120 m를 적용하였다. 경계조건의 경우 양쪽 수직면은 수평방향을 구속하였으며, 바닥면은 수평방향과 수직방향을 구속하였다. 표 7과

표 7. 지반 물성

지반종류	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)
점토	15	5	0.35	10	20
느슨한 모래	19	15	0.3	0	25
중간조밀모래	19	25	0.3	0	28
조밀한 모래	19	45	0.3	0	30
모래와 자갈	20	120	0.25	0	35

표 8. 매설관 물성

매설관종류	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν
연성관	69.1	160000	0.28
취성관	22.5	19600	0.17

표 8은 각각 해석에 사용된 지반 및 매설관의 물성을 나타낸다.

5.2 동적 거동 분석

지반조건이 점토, 느슨한 모래, 중간 조밀한 모래, 조밀한 모래, 모래와 자갈인 경우에 대하여 PGA가 0.2 g, 0.4 g, 0.6 g, 0.8 g, 1.0 g, 1.2 g일 때 국내 및 미국 매설기준에 근거한 연성관 및 취성관의 변형율과 응력을 검토하였다.

5.2.1 연성관

그림 8은 지반 종류별 PGA에 따른 연성관의 변형율을 나타낸 것이며, 그림에서 보듯 PGA가 증가함에 따라 매설관의 변형율은 선형에 가까운 형태로 증가하고 지반 강성이 클수록 변형율이 감소하며, 국내 기준일 때의 변형율이 미국 기준일 때의 변형율보다 약간 적음을 알 수 있다.

국내와 미국 기준을 고려한 매설관의 변형률 및 응력의 차이는 %로 표현하였으며 이는 국내매설관과 미국매설관의 변형률 또는 응력값 차이를 국내매설관의 변형률 또는 응력값으로 나누어 계산함으로써 상대적으로 얼마나 차이가 있는지를 알 수 있다. 국내 및 미국기준을 고려한 연성관의 변형률 차이는 점토의 경우 6.4~8.9% (평균: 8.3%, 표준편차: 0.94), 느슨한 모래의 경우 7.4~9.8% (평균: 8.6%, 표준편차: 1.02), 중간 정도의 조밀한 모래의 경우 4.8~9.7% (평균: 7.9%, 표준편차: 1.65), 조밀한 모래의 경우 3.5~9.1% (평균: 6.1%, 표준편차: 1.85), 모래와 자갈인 경우 4.5~8.8% (평균: 5.4%, 표준편차: 1.69)로 나타났다.

또한, 지반조건이 조밀한 모래의 경우에 대하여 미국 Northridge 지진과 Chi-Chi 지진에서 기록된 지진파를 이용한 매설관의 동적 거동 분석결과 연성관의 변형율은 미국 Northridge 지진하중 하에서는 1.9%, Chi-Chi 지진하중 하에서는 4.5%로 나타났다.

그림 9는 지반 종류별 PGA에 따른 연성관의 응력을 나타낸 것이며, 그림에서 보듯 PGA가 증가함에 따라 매설관의 응력은 선형에 가까운 형태로 증가하고 지반 강성이 클수록 응력이 감소하며, 국내 기준일 때의 응력이 미국 기준일 때의 응력보다 작은 것을 알 수 있다. 국내기준과 미국기준을 고려한 연성관의 응력 차이는 점토의 경우 4.7~11.3% (평균:

그림 6. 수치해석 모델 모식도

그림 7. 수치해석에 사용된 격자망

(a) 국내

(b) 미국

그림 8. 지반종류별 PGA에 따른 연성관의 변형률

(a) 국내

(b) 미국

그림 9. 지반종류별 PGA에 따른 연성관의 응력

(a) 국내

(b) 미국

그림 10. 지반종류별 PGA에 따른 취성관의 변형률

7.2%, 표준편차: 2.53) 느슨한 모래의 경우 4.7~11.8% (평균 : 7.3%, 표준편차: 2.84), 중간 정도의 조밀한 모래의 경우 4.7~10.1% (평균: 7.4%, 표준편차: 2.10), 조밀한 모래의 경우 2.6~11.7% (평균: 6.1%, 표준편차: 3.69), 모래와 자갈인 경우 3.9~10.7% (평균: 6.1%, 표준편차: 2.39)로 나타났다.

5.2.2 취성관

그림 10은 지반 종류별 PGA에 따른 취성관의 변형율을

나타낸 것이며, 그림에서 보듯 PGA가 증가함에 따라 매설관의 변형율은 선형에 가까운 형태로 증가하고 지반 강성이 클수록 변형율이 감소하며, 국내 기준일 때의 변형율이 미국 기준일 때의 변형율보다 작은 것을 알 수 있다. 국내기준과 미국기준을 고려한 취성관의 변형율 차이는 점토의 경우 3.8~8.5% (평균: 6.0%, 표준편차: 2.09) 느슨한 모래의 경우 3.0~9.9% (평균: 5.8%, 표준편차: 2.97), 중간 정도의 조밀한 모래의 경우 2.8~8.9% (평균: 5.1%, 표준편차: 2.62), 조밀

한 모래의 경우 2.2~9.9% (평균: 6.2%, 표준편차: 3.28), 모래와 자갈인 경우 4.2~9.8% (평균: 6.5%, 표준편차: 2.06)로 나타났다. 또한, 지반조건이 조밀한 모래의 경우에 대하여 미국 Northridge 지진과 Chi-Chi 지진에서 기록된 지진파를 이용한 매설관의 동적 거동 분석결과 취성관의 변형율은 미국 Northridge 지진하중 하에서는 6.5%, Chi-Chi 지진하중 하에서는 3.8%로 나타났다. 표 9는 지반 종류별 PGA에 따른 연성관과 취성관의 변형율을 나타낸다.

그림 11은 지반 종류별 PGA에 따른 취성관의 응력을 나

타낸 것이며, 그림에서 나타나듯이 PGA가 증가함에 따라 매설관의 응력은 선형에 가까운 형태로 증가하고 지반 강성이 클수록 응력이 감소하며, 국내 기준일 때의 응력이 미국 기준일 때의 응력보다 작은 것을 알 수 있다. 국내기준과 미국 기준을 고려한 취성관의 응력 차이는 점토의 경우 4.2~9.3% (평균: 7.0%, 표준편차: 1.82), 느슨한 모래의 경우 4.4~9.3% (평균: 6.5%, 표준편차: 1.73), 중간 정도의 조밀한 모래의 경우 4.7~7.8% (평균: 6.0%, 표준편차: 1.15), 조밀한 모래의 경우 4.7~9.1% (평균: 7.0%, 표준편차: 1.49), 모래와 자

표 9. 국내와 미국의 기준을 고려한 매설관의 변형율 차이 (%)

매설관	지반 \ PGA(g)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	평균	표준편차
연성관	점토	8.8	8.6	8.7	8.9	8.3	6.4	8.3	0.94
	느슨한 모래	9.8	9.8	8.3	8.5	7.8	7.4	8.6	1.02
	중간조밀한 모래	9.7	8.7	8.6	7.9	4.8	7.7	7.9	1.65
	조밀한 모래	9.1	6.1	5.0	6.3	6.2	3.5	6.1	1.85
	모래와 자갈	8.8	4.8	5.0	4.6	4.6	4.5	5.4	1.69
취성관	점토	8.5	8.5	4.9	4.4	3.8	6.0	6.0	2.09
	느슨한 모래	8.8	9.9	6.0	3.0	3.1	4.1	5.8	2.97
	중간조밀한 모래	8.9	7.5	5.2	3.1	3.0	2.8	5.1	2.62
	조밀한 모래	9.9	9.3	8.0	4.4	2.2	3.3	6.2	3.28
	모래와 자갈	9.8	6.7	8.0	4.2	5.3	5.4	6.5	2.06

(a) 국내

(b) 미국

그림 11. 지반종류별 PGA에 따른 취성관의 응력

표 10. 국내와 미국의 기준을 고려한 매설관의 응력 차이 (%)

매설관	지반 \ PGA(g)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	평균	표준편차
연성관	점토	11.3	8.8	5.2	7.2	5.7	4.7	7.2	2.53
	느슨한 모래	11.8	9.7	7.1	5.9	4.9	4.7	7.3	2.84
	중간조밀한 모래	10.1	7.9	9.3	5.9	6.3	4.7	7.4	2.10
	조밀한 모래	11.7	9.2	4.1	5.9	2.9	2.6	6.1	3.69
	모래와 자갈	10.7	4.6	5.9	5.4	6.1	3.9	6.1	2.39
취성관	점토	8.0	9.3	7.2	7.5	5.6	4.2	7.0	1.82
	느슨한 모래	7.2	9.3	6.4	6.6	5.1	4.4	6.5	1.73
	중간조밀한 모래	7.8	6.1	6.3	6.4	4.8	4.7	6.0	1.15
	조밀한 모래	7.0	9.1	8.0	6.5	6.8	4.7	7.0	1.49
	모래와 자갈	6.9	7.5	8.2	4.9	6.7	7.1	6.9	1.08

같은 경우 4.9~8.2% (평균: 6.9%, 표준편차: 1.08)로 나타났다. 표 10은 지반 종류별 PGA에 따른 연성관과 취성관의 응력을 정리하여 나타낸다.

6. 결 론

본 연구의 궁극적인 목적은 HAZUS의 매설관 손상알고리즘의 국내 적용가능성을 수치해석적 분석을 통해 검토함으로써 국내 매설관에 대한 신뢰성 높은 지진재해평가 수행에 도움을 주고 국내 곳곳에 산재해 있는 매설관에 대한 사전 피해평가를 통하여 지진재해 발생시 대응방안에 일조하고자 하는 것이 목적으로 본 연구를 수행하였다. 본 연구에서 고려한 다양한 조건 하에서, 매설관의 동적 거동을 평가한 결과 지진하중하에서 국내 매설관과 미국 매설관은 변형률과 응력의 차이가 10%이내이므로 허용응력 및 허용변형률의 관점에서 HAZUS의 매설관 손상알고리즘의 국내 적용에 큰 무리가 없는 것으로 판단된다. 그러나 상하수도시설에 대한 HAZUS의 취약도 함수는 국내보다 강진지역인 곳에서 도출한 값으로, 해석시에 피해가 비교적 과다하게 발생할 것으로 예측된다. 그러므로 추후에 연구를 통하여 다양한 수치해석과 국내 지진피해자료를 바탕으로 국내실정에 적합한 취약도 함수를 도출하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 지원과 각 지자체단체 및 한국가스공사, 한국수자원공사, 한국통신의 협조로 수행된 바, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김태욱, 임윤묵, 김문겸 (2003) 지중매설관로의 거동특성 해석을 위한 관지반 상호작용력의 산정, **한국지진공학회 논문집**, 한국지진공학회, 제7권, 제3호, pp. 57-67.
- 행정자치부 (1998) 내진설계 제도 및 기준에 관한 연구(II) - 현행 20개 법정 내진설계 대상 시설물의 타당성 여부 검토, 국립방재연구소.
- 환경부 (2005) 상수도시설기준, 한국상하수도협회.
- 환경부 (2005) 하수도시설기준, 한국상하수도협회.
- ABAQUS Inc. (2006) Analysis user's manual, version 6.6
- ANSI (2007) *Guide for Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. American National Standards Institute, American Society of Mechanical Engineers.
- FEMA (1999) *HAZUS99 Technical Manual*. National Institute of Building Science, Washington, D.C.
- Moser, A.P. (2007) *Buried Pipe Design*, McGraw Hill, New York, N.Y.
- O'Rourke, M.J. and Ayala, G. (1993) Pipeline Damage due to Wave Propagation, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 119, No. 9
- Office of Pipeline Safety Community (OPS), <http://ops.dot.gov>

- ◎ 논문접수일 : 10년 08월 19일
- ◎ 심사의뢰일 : 10년 08월 30일
- ◎ 심사완료일 : 10년 12월 30일