

액상화 · 영구지반변형을 고려한 지중매설관로의 지진피해 평가 Earthquake Loss Estimation of Buried Pipeline Considering Permanent Ground Deformation due to Liquefaction

김태욱*
Kim, Tae Wook

임윤목**
Lim, Yun Mook

김문겸***
Kim, Moon Kyum

ABSTRACT

In this study, a prototype model of earthquake loss estimation method will be proposed for the quantitative and qualitative damage evaluation of buried pipeline subjected to Permanent Ground Deformation(PGD) due to liquefaction. With this objective, domestic and foreign status of the arts related with earthquake loss estimation method is summarized at first. Domestic development of computer aided earthquake loss estimation method seems to be difficult for the time being. Thus, referring to HAZUS : Earthquake Loss Estimation Methodology which is developed by FEMA (Federal Emergency Management Agency) and NIBS (National Institute of Building Sciences), earthquake loss estimation procedure of buried pipeline subjected to PGD due to liquefaction are proposed, and then exemplary loss estimation are executed. Considering that there have been no practical earthquake loss estimation method and procedure in Korea, the research accomplishments such as above are considered to be helpful for the substantial development of earthquake loss estimation method of buried pipeline subjected to PGD due to liquefaction.

1. 서론

송수, 송전, 송유, 통신 시설은 대부분의 경우 지중매설관로의 형태로 존재하게 되며 인구의 증가 및 생활수준의 향상으로 인하여 그 건설수요가 증가하고 있는 실정이다. 이러한 지중매설관로는 사회 전체 체계의 기본을 구성한다는 측면에서 라이프라인(Lifeline)이라는 용어로 정의되며 지진과 같은 대규모 자연재해 발생시 국부적인 구성요소의 파괴가 2차적인 경제·사회적 손실을 발생시키는 특성을 갖고 있다. 특히 다양한 사회기반 시설간의 기능적 연계성의 복잡화로 인해 부가적으로 발생하는 2차적인 사회·경제적 손실은 그 규모나 파급효과가 현대사회의 발전과 더불어 기하급수적으로 증가되는 양상을 보이고 있음에 주목할 필요가 있다.

* 한국철도기술연구원 궤도구조 연구팀, 주임연구원, 회원

** 연세대학교 공과대학 토목공학전공, 부교수, 회원

*** 연세대학교 공과대학 토목공학전공, 교수, 회원

따라서 미국 및 일본과 같이 지진발생이 빈번한 선진국에서는 사회기반시설에 대한 적정 지진해석기법 개발 및 내진설계기준과의 연계작업과 더불어 1970년대 이래로 지진발생시 사회기반시설에 발생가능한 2차적인 사회·경제적 손실을 추정하고 이에 의거하여 합리적인 지진대응체계 및 전략을 수립하기 위하여 소위 지진피해 평가기법(Earthquake Loss Estimation Methodology)을 개발하고자 노력해왔다. 반면 국내의 경우에는 1997년 지진공학연구센터가 창립된 이후 비교적 단시일 내 사회기반시설에 대한 적정지진해석기법 개발 및 내진설계 기준과의 연계가 이뤄졌으나, 지진피해평가기법과 관련된 제반 연구는 아직 미비한 상태이다. 그러나 사회기반 시설과 관련된 국내현황 - 지중매설관로를 포함한 라이프라인 시설의 수요 증가 및 지속적인 건설, 지진발생시 예측되는 2차손실의 규모 및 파급효과 - 을 고려했을 때 시설물 중심의 지진해석기법 개발이 거의 완료된 지금, 국내에 적용가능한 지진피해평가기법의 개발이 시급히 요구되는 것으로 판단된다.(그림 1 참조)

현 단계에서 정부/학계/유관기관으로 구성된 적극적 협조체제의 선결이 요구되는 지진피해평가기법을 자체 적으로 개발한다는 것은 다소 어려운 일이므로 본 연구에서는 대표적인 라이프라인 시설인 지중매설관로를 대상으로 매설관로의 주요 지진피해 메커니즘인 액상화·영구지반변형에 대한 지진피해평가기법의 Prototype 모델을 우선적으로 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 국내·외 지진피해평가기법에 대한 포괄적인 기술현황을 조사한 후, 미국 FEMA(Federal Emergency Management Agency)에서 개발하여 현재 적용하고 있는 지진피해평가기법인 HAZUS를 중심으로 국내 제반조건을 적용한 지중매설관로의 지진피해평가절차를 제안하였으며, 최종적으로는 제안된 평가절차에 의거하여 국내 임의지역에 대한 지진피해평가를 수행함으로써 제안된 평가절차의 적용적 타당성과 의의를 검토하였다.

2. 지진피해평가기법

2.1 지진피해평가기법의 정의

지진피해평가기법은 지진발생시 유발되는 사회기반시설의 1차적인 손상(직접적 의미의 구조적 손상, 파괴 등)과 기반시설의 기능적 연계성으로 인해 유발되는 2차적인 손실(사회적, 경제적 의미의 유·무형적 손실)을 추정하는 데 사용되는 공학적인 기법으로서 지진공학, 구조공학, 지반공학, 경제학 및 통계학적인 측면에서 최신기술의 복합체라고 이야기할 수 있다. 기본적으로 GUI 모듈의 채용을 통한 해석결과의 시각화가 필수적으로 요구되는 지진피해평가기법의 주요 목적은 다음과 같다.

- (a) 지진재해도 작성, 기반시설의 1차적 손상 위치 추적 및 손상의 정성적·정량적 시각화
- (b) 2차적인 사회·경제적 손실의 주요 진원지 추적 및 손실의 정성적·정량적 시각화
- (c) 지진피해 Simulation 결과에 의거한 응급복구체계 및 대응전략의 수립

2.2 국내외 연구현황

1990년대 초반 이후, 미국에서는 FEMA(Federal Emergency Management Agency)와 NIBS(National Institute of Building Sciences)의 주관하에 HAZUS라고 명명된 실시간 지진피해평가기법을 개발해왔다. 1997년 HAZUS의 초기버전이 개발되고 이후 1999년 수정판이 공개된 이래, 현재 미국에서는 정부, 학계 및 연구기관을 중심으로 다양한 목적으로 HAZUS가 적용되고 있으며, HAZUS 이외에도 네트워크 손상추정 이론에 근거한 다양한 형태의 지진피해평가기법이 개발 및 적용되고 있는 상황이다. 또한 일본에서도 이와 유사하게 GIS기술의 발전에 기초하여 다양한 형태의 지진피해평가기법이 사회기반시설의 운영기관을 중심으로 독자적으로 개발되고 있는 상황이다.

실제적으로 지진피해평가기법을 개발하기 위해서는 3가지 주요 요소 - (a)사회기반시설의 지진해석기법, (b) 사회기반시설의 현황 및 부지조건에 대한 수치 DB, (c)정부 및 유관기관의 공감대 형성 - 의 선결이 요구되는데, 국내의 경우 지진공학연구센터의 창립 이래 (a)에 대한 부분은 구체적인 성과를 이뤄냈음에도 불구하고 (b)와 (c)에 대한 부분은 아직 많은 노력이 필요한 부분으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 그림 2에서 볼 수 있는 것과 같이 국내에서도 지진피해평가기법에 관한 연구가 일부 진행되어 왔음을 알 수 있는데 기존의 연구는 국내지역 및 시설의 제반특성을 고려하지 못한 상태에서 특정 지역을 대상으로 한 HAZUS의 직접적인 적용에 국한되어 있음을 확인할 수 있다.

3. 액상화·영구지반변형을 고려한 지중매설관로의 지진피해 평가절차

국내의 경우 정부/학계/유관기관으로 구성된 적극적 협조체제의 선결이 요구되는 지진피해평가기법을 자체적으로 개발한다는 것은 다소 어려운 일이므로, 현 단계에서는 HAZUS를 국내 제반조건에 맞춰 수정하여 적용하는 것을 전제로 하고 다음과 같은 방식으로 액상화·영구지반변형에 대한 국내 지중매설관로의 지진피해평가절차를 제안하였다. 본 연구를 통해 제안된 평가절차의 주요특징 및 세부절차는 다음과 같고 이를 정리하면 그림 3과 같다

- 액상화-영구지반변형을 지중매설관로의 주요 지진피해메커니즘으로 설정
- 건교부 내진설계기준 II(2002) 및 한국토지공사 내진설계기준(2000)의 적용
- 지진공학연구센터 1단계 및 2단계 연구과제의 진행을 통해 도출된 해석적 관계식의 적용

(a) 지진피해평가지역의 선택

- DB와 GIS 수치지도 작성의 편의성을 고려, 지진에 의한 손상예측이 요구되는 지역을 선택
- 가능하다면, 행정구역상의 구분과 동일하게 평가지역의 범위를 선택

(b) 사회기반시설 관련 DB 및 GIS 수치지도 구축

- 매설지반 상세: 기반암깊이, 표준관입시험치, 단위중량, 상대밀도, 액상층의 깊이 및 경사, 정지토압계수 등
- 매설관로 상세: 매설심도, 관경, 관두께, 탄성계수, 항복변형률, 내적인장변형률, 길이 및 시/종점의 위치 등

(c) 최대지반가속도(PGA), 액상화 가능성 및 영구지반변형(PGD)의 크기 추정

- 제한된 국토조건으로 인한 매립식 연약지반의 증가를 고려, 액상화·영구지반변형을 지중매설관로의 주요 지진피해메커니즘으로 설정
- 건교부 내진설계기준 II(2002)에 의거하여 제반 지반조건을 고려한 PGA 추정
- 한국토지공사 내진설계기준(2000)에 의거한 지반의 액상화 판정
- 해당지반의 액상화 가능성이 우려되어 PGD의 추정이 요구되는 경우, 간편해석을 위해서는 Hamada 등이 제안한 경험식을 적용하고 상세해석을 위해서는 Youd 등이 제안한 다중회귀식을 적용

(d) 지중매설관로의 1차적 손상 및 2차적 손실의 추정

- 지진공학연구센터 1단계 및 2단계 연구과제의 진행을 통해 도출된 해석적 관계식을 적용, 매설관로의 1차적 손상 추정

- 1차적 손상과 2차적 손실의 상호연계는 국내 계기지진피해사례의 절대적 부족으로 인해 HAZUS에서와 동일한 관계식 적용

4. 액상화·영구지반변형을 고려한 지중매설관로의 지진피해평가 사례

지진피해평가를 수행하기 위하여 먼저 임의의 지역을 선정하고 전체 평가지역을 크게 6개 지역으로 구분한 후, HAZUS를 이용하여 이를 GUI 환경 내에서 그림 4와 같이 표현하였다. 평가지역 자체가 임의로 선정되었기에, 각 지역의 전단파 속도 및 세립질 함량을 표 1과 같이 가정한 후, 각 지역의 지반종류를 설정하였다. 또한 대상지역에 대해 기본적인 지진피해평가를 수행한다는 차원에서 건설교통부 내진설계기준(건설교통부, 2002)에서 제시된 지진재해도에 근거하여 50년내 지진발생 초과확률 10%를 갖는 평균재현주기 500년의 지진(내진설계 2등급)을 가상 입력지진의 설계지반운동 수준으로 설정하였다. 이 경우, 적용 위험도계수는 1.0이 되며 해당 위험도계수에 대해 평가지역의 각 지반특성을 고려하면 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 평가지역 내 각 6개 지역에 대한 최대지진가속도를 산정할 수 있다.

다음 단계로서는 한국토지공사 내진설계기준(한국토지공사, 2000)에서 제시된 액상화 평가기법을 적용하여 평가대상지역에 대한 액상화 평가를 수행하였다. 액상화 평가 결과, 표 2에서 볼 수 있는 바와 같이 지역 1부터 지역 6까지 모든 평가지역에 걸쳐 지반의 액상화가 발생하는 것으로 판정되었다. 또한, 각 지역에 발생가능한 영구지반변형의 크기는 간편해석임을 고려하여 다음과 같은 회귀식을 적용하여 산정하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

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

여기서, δ 는 영구지반변형의 크기이고, $h(m)$ 는 액상화 층의 두께, 그리고 $\theta_g(\%)$ 는 액상화 층 바닥면의 경사와 지표면의 경사 중 큰 값이다.

평가지역에 대해 발생가능한 것으로 추정된 액상화·영구지반변형이 지중매설관로에 유발시킬 수 있는 1차적인 손상정도를 평가하기 위해 송유관에 해당하는 강관(API 5LX-42, 미국 석유협회 규격)이 그림 5에서 보는 바와 같이 평가대상지역 1에서 3에 걸쳐 연속된 형태로 매설되어 있는 것으로 가정하였다. API 5LX-42의 제원 및 물성은 표 3과 같고, 액상화·영구지반변형은 매설관로의 주축에 대해 75도의 각도를 이루면서 남북방향으로 발생하는 것으로 가정하였다. 매설관로 자체가 종방향 및 횡방향의 지반변형을 동시에 받고 있기에, 각 방향의 지반변형에 의한 복합된 하중효과를 고려할 수 있는 해석적 관계식을 적용하여 매설관로의 최대변형률을 산정하였으며, 이를 표 4와 같이 정리하였다.

매설관에 발생하는 1차적인 손상정도를 영구지반변형에 의해 발생하는 최대변형률과 허용변형률과의 비율로서 표현한다면, 각 지역에서의 지중매설관로의 손상정도를 간략하게 나타낼 수 있게 된다. 원칙적으로 관의 허용변형률은 기준값 1%와 식 (2)에 의해 산출되는 값 중 작은 값을 적용하게 되어 있는데 API 5LX-42의 경우 0.795%로 결정된다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 매설관로 API 5LX-42의 허용변형률 0.795%를 초기 파괴변형률과 동일한 것으로 고려하면 표 4에서 볼 수 있는 바와 같이 발생가능한 영구지반변형에 대해 해당지역의 매설관은 전체적으로 5% 미만의 파괴확률을 가짐을 확인할 수 있었다.

$$30 \times \frac{t}{D} = 30 \times \frac{1.75}{66.4} = 0.795\% \quad (2)$$

위와 같은 과정을 통해 국내 제반조건을 고려한 상태에서 액상화·영구지반변형에 대한 지중매설관로의 지진피해평가를 비교적 수월하게 수행할 수 있음을 확인하였다. 다만, 국내의 경우 실제로 적용가능한 계기지진피해자료의 절대적인 부족으로 인해 1차적인 손상과 2차적인 사회·경제적 손실을 연관지을 수 있는 관계식이 확립되어 있지 못하기에, 현재로서는 표 4와 같이 직접적인 형태의 1차적 손상정도만을 추정할 수 있음에 유의해야 한다. 그러나, 이러한 기술적 한계성에도 불구하고, 현재 국내에 적용가능한 지진피해평가법 자체가 전무하다는 것을 고려할 때 본 논문을 통해 제안된 평가절차와 평가사례는 상당한 의의를 가진다고 말할 수 있으며, 특히 추후 국가적인 차원에서 완성된 형태의 지진피해평가법을 개발하는 데 있어서 본 연구에서 도출된 다양한 성과들이 핵심적인 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 대표적인 라이프라인 시설인 지중매설관로를 대상으로 매설관로의 주요 지진피해 메커니즘인 액상화·영구지반변형에 대한 지진피해평가법의 Prototype 모델을 우선적으로 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 국내·외 지진피해평가법에 대한 포괄적인 기술현황을 조사한 후, 미국 FEMA(Federal Emergency Management Agency)에서 개발하여 현재 적용하고 있는 지진피해평가법인 HAZUS를 중심으로 국내 제반조건을 적용한 지중매설관로의 지진피해평가절차를 제안하였으며, 최종적으로는 제안된 평가절차에 의거하여 국내 임의지역에 대한 지진피해평가를 수행함으로써 제안된 평가절차의 적용적 타당성을 검증하였다. 따라서 본 연구를 통해 제안된 평가절차의 반복적용을 통해 국내 지중매설관로에 발생가능한 지진피해의 추정이 반복적으로 수행되고, 이와 동시에 정부/학계/연구기관 사이의 공감대 형성 및 긴밀한 협조체제의 구성이 완료된다면 국내에도 HAZUS와 유사한 수준의 지진피해평가법의 개발이 가능할 것으로 사료되며 이러한 측면에서 본 연구는 관련기술의 핵심기반을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(Korea Earthquake Engineering Research Center) 3단계 사업의 일환인 「사회기반시설망의 지진피해평가모델 개발」의 일부로서 본 연구를 가능하게 한 지진공학연구센터의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bardet, J.P., Mace, N. and Tobita, T. (1999), *Liquefaction induced Ground Deformation and Failure*, Report to PEER/PG & E, Task 4A-Phase 1.
2. EERI, (1997), *Earthquake Spectra (Special Theme Issue : Loss Estimation)*, Vol. 13, No. 4, Earthquake Engineering Research Institute.
3. O'Rourke, M.J. and Liu, X. (1999), *Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects*, MCEER Monograph Series No. 3, MCEER.
4. Shinozuka, M., Rose, A. and Eguchi, R.T. (1999), *Engineering and Socio-Economic Impacts of Earthquakes*, MCEER Monograph Series No. 2, MCEER.

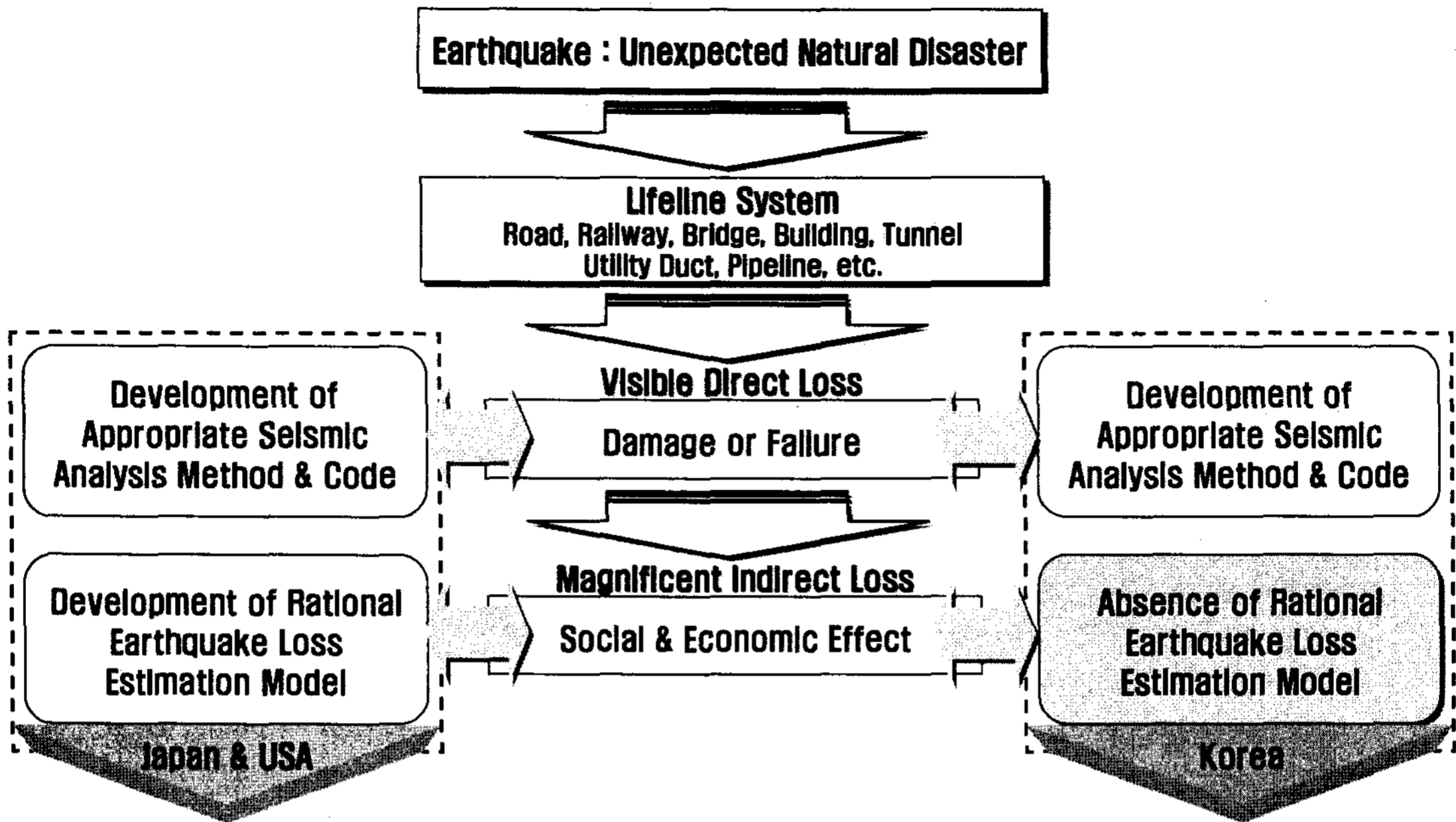


그림 1. 국내외 지진피해평가기법 관련 연구 현황

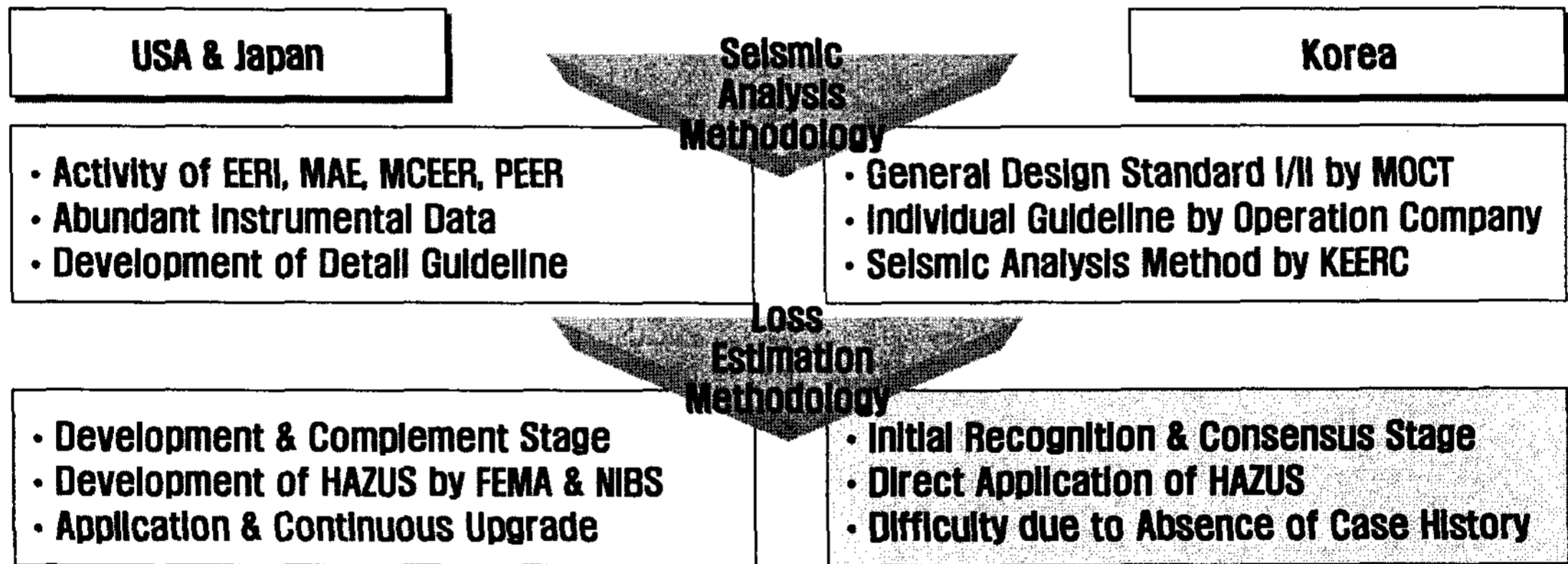


그림 2. 국내외 지진피해평가기법 관련 연구 현황

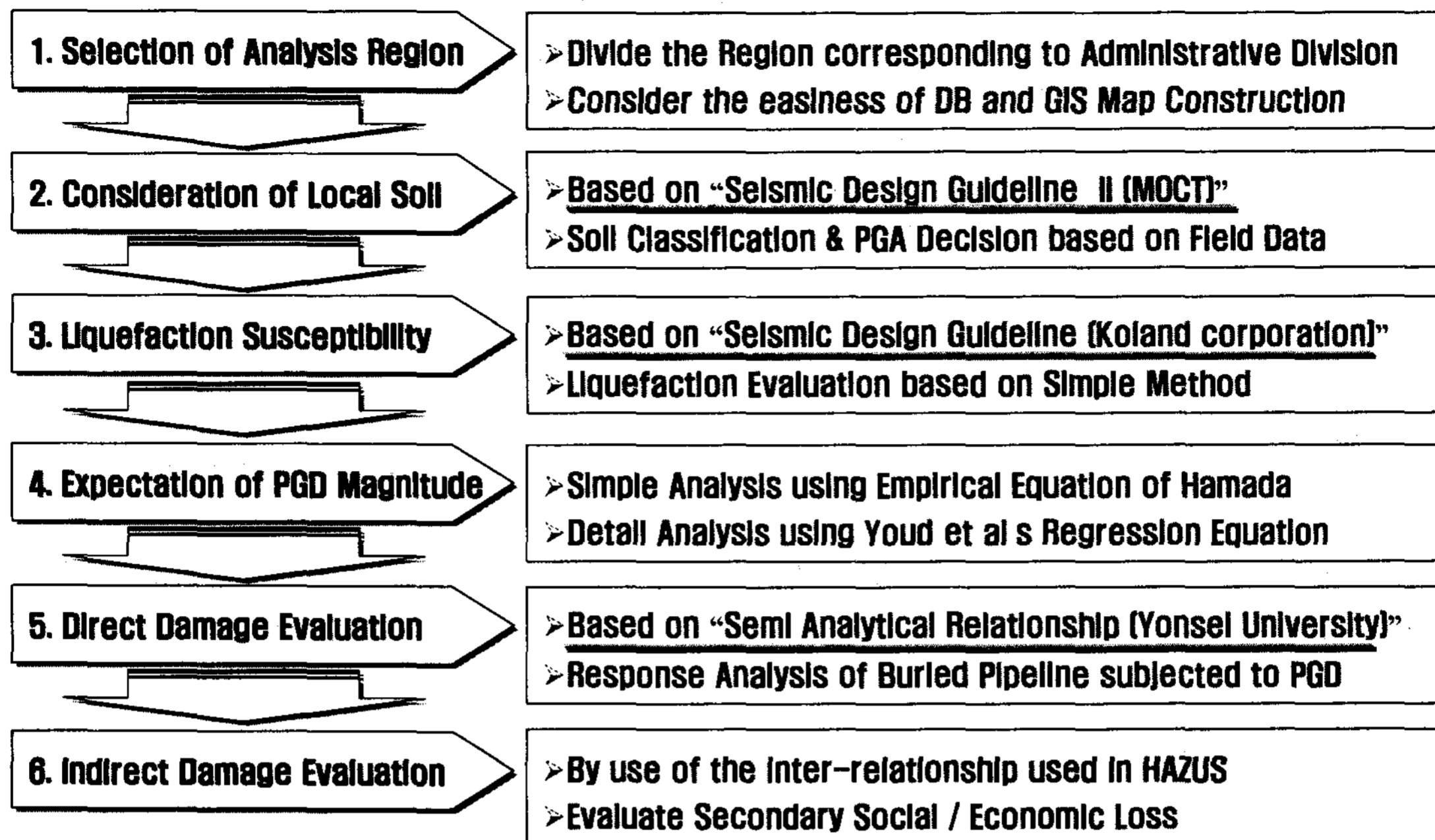


그림 3. 액상화·영구지반변형을 받는 국내 지중매설관로의 지진피해평가절차

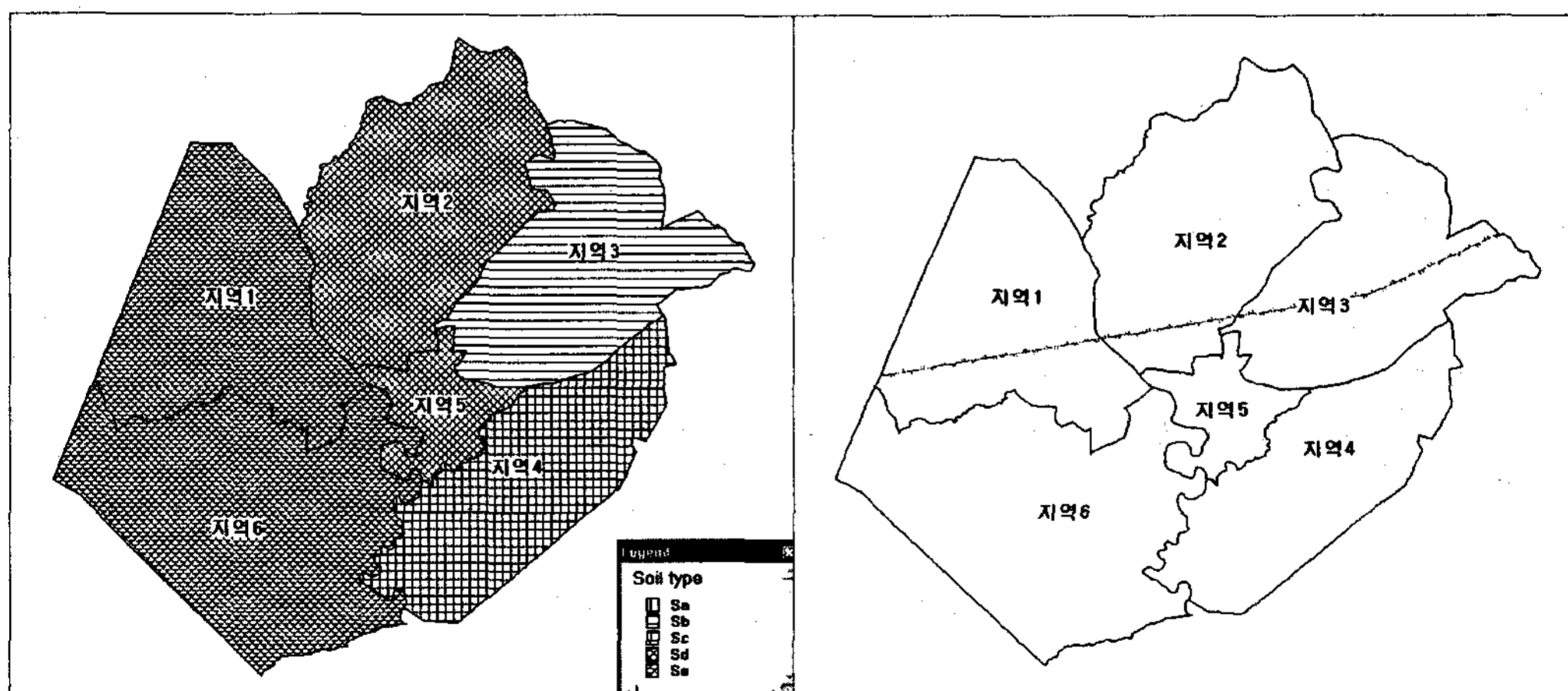


그림 4. 피해평가지역의 구분

그림 5. 피해평가지역내 지중매설관로의 위치

표 1. 평가지역내 지반특성 및 최대지진가속도

	지역 1	지역 2	지역 3	지역 4	지역 5	지역 6
전단파 속도(m/s)	150	300	800	500	180	150
지진구역	I	I	I	I	I	I
지반종류	S _E	S _D	S _B	S _C	S _D	S _E
세립질 함량(%)	20.7	18.5	20.2	16.5	17.3	19.4
지진구역계수	0.22	0.16	0.11	0.13	0.16	0.22
최대지진가속도(g)	0.22g	0.16g	0.11g	0.13g	0.16g	0.22g

표 2. 액상화 평가결과 및 발생가능 영구지반변형의 크기

site	심도	N치	보정계수	환산N치	액상화전단 저항용력비	지반의최대 전단용력비	안전율	액상층 두께	액상층 경사	PGD 크기
1	4m	4	1.81	7	0.15	0.331	0.453	5m	10%	3.613m
2	4m	5	1.81	9	0.16	0.241	0.664	4m	7%	2.669m
3	4m	6	1.79	11	0.17	0.181	0.939	3m	4%	2.062m
4	4m	6	1.80	11	0.16	0.194	0.825	4m	8%	3.000m
5	4m	5	1.81	9	0.16	0.241	0.664	4m	6%	2.726m
6	4m	4	1.81	7	0.15	0.331	0.453	6m	9%	3.621m

표 3. 평가대상 매설관의 제원 및 물성

	관의 직경 (cm)	관의 두께 (cm)	관의 단면적 (cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	허용변형률 (%)
API 5LX-42	66.04	1.75	353.45	2.1×10 ⁶	0.795

표 4. 지중매설관로의 최대변형률 및 추정 파괴확률

연구지역	영구지반변형의 크기(m)	지중 매설관로의 최대변형률	파괴확률(%)
1	3.613	0.04240	5.33333
2	3.232	0.03792	4.76981
3	2.800	0.03286	4.13333