

## GIS 및 지진취약도 분석기법을 이용한 교통 네트워크의 방재 시스템

### Disaster-Prevention System of Transportation Network used by GIS and Seismic Fragility Analysis

이 형 진\* / 박 병 희\*\* / 장 일 영\*\*\*

Lee, Hyung Jin / Park, Byung Hee / Jang, Il Young

#### Abstract

Recently seismic fragility analysis method has been widely used for the seismic probabilistic risk assessment of infrastructures such as nuclear power plants, buildings and bridges because of its probabilistic characteristics. Furthermore, this technique has been applied to large-scale social systems consisted of each infrastructures by combing GIS. In this paper, the applicability of this technique to domestic infrastructural systems was studied. The transportation network was selected as one of these domestic infrastructural systems. Example studies were performed about Changwon city. Nonlinear time history analysis, with a maximal likelihood approach were conducted to establish the fragility curves of each infrastructures (bridges). GIS analysis was also applied to the analysis of whole infrastructural systems. The results show that it is very useful to predict seismic probabilistic risk assessment of this domestic transportation network. However, it also shows that further studies such as more suitable damage criterion to domestic structure and precise nonlinear analysis techniques should be developed to predict more precise results.

**key words** : Disaster-Prevention System, Transportation Network, GIS, Seismic Fragility Analysis

#### 요 지

본 연구에서는 GIS 및 지진취약도 분석기법이 결합된 방법에 의한 교통망 시스템의 방재 시스템 구축방안의 국내 적용 성을 검토하였다. 연구대상으로는 경상남도 창원시의 교통망을 선택하였고, 지진취약도 분석을 위해 먼저 창원시에 위치한 교량 8개를 선택하고 기본 외관 조사를 수행하였으며, 이를 바탕으로 교량의 FE 모델을 만들었고, 국내 표준 설계 시방서에 의한 응답스펙트럼에 기준하여 인공지진을 생성하고 비선형 해석을 수행하였다. 또한, 각 결과를 500년, 1000년 및 2400년 재현주기를 가지는 지진위험도 곡선 (Seismic Hazard Curve)과 중첩하여 각 교량의 확률적 위험도 및 교통망의 확률적 위험도를 분석하였다. 본 논문에서는 지진 취약도 분석 기법을 활용하여 교량 구조물의 지진 안전도를 분석하였고 그 결과와 GIS를 이용한 네트워크의 지진에 의한 피해를 예측하였다.

**핵심용어** : GIS 및 지진취약도 분석, 지진위험도 곡선, 교량 구조물의 지진 안전도 분석, 교통망 시스템의 방재시스템 구축

\* 창원대학교 토목공학과 부교수 (e-mail : leehjn@changwon.ac.kr)

\*\* 육군공병학교 학교장

\*\*\* 정회원 · 금오공과대학교 토목 환경공학부 교수

## 1. 서론

최근 기상청 지진관측자료에 따르면 한반도에 유감 지진발생빈도가 증가하는 추세를 보이고 있으며, 지진은 지난 20여 년간 연평균 19회 정도 발생하였으나 '94년 25회', '95년 29회', '96년 39회', '98년 32회' 등 1990년대 이후 크게 증가하고 있는 추세이며, 이런 점에서 최근 지진학자들은 한반도가 지진의 안전지대가 아니며 지진피해를 일으킬 수 있는 규모 5.5급 지진의 발생가능성이 있다고 판단하고 있다.

이와 같은 지진에 의한 재해는 도시 주변지역보다 특히 대규모 건축물이 밀집되어 있는 도시지역에 피해가 중할 것으로 예상하고 있으며, 현대사회의 다양한 기능은 통신, 수도, 전기, 가스, 철도, 지하철 등의 Lifeline으로 유지되고 있으며, 이들 Lifeline의 경우는 그 일부가 파괴되어도 전체기능이 마비되는 특징을 갖고 있어 지진재해에 대한 철저한 대비가 필요하다. 따라서, 각각의 개별적인 대상물의 지진피해 분석 및 예측과 더불어 보다 넓은 지역의 포괄적인 지진피해 분석과 예측이 필요할 것으로 보인다.

통상 지진에 대한 교량의 거동은 비선형, 확률적 거동 특성을 보인다. 지진 취약성을 파악하는 것은 아주 중요한 사항이다. 따라서, 지진에 의한 구조물의 내진 성능을 제대로 판단하기 위해서는 불확실성을 고려할 수 있는 확률론적 처리 및 비선형성을 고려할 수 있는 방법이 필요하다. 지진 취약도 분석(Seismic Fragility Analysis)은 이러한 점에서 매우 유용한 방법의 하나로 평가받고 있다(Shinozuka and Sheng, 2000). 또한 이 방법은 GIS (Geological Information System)과 결합하여 광범위한 영역에서의 계획기간 시설망 분석에도 적용되고 있어 최근 국내에서 시도되고 있는 방재시스템 구축에 관한 좋은 모델이 될 수 있으리라 사료된다.

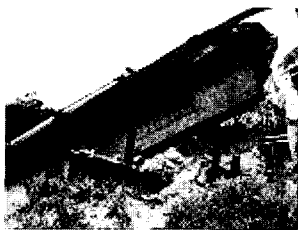
본 연구에서는 이러한 관점에서 GIS 및 지진취약도 분석기법이 결합된 방법에 의한 교통망 시스템의 방재 시스템 구축방안의 국내 적용 성을 검토하였다.

연구대상으로는 경상남도 창원시의 교통망을 선택하였고, 지진취약도 분석을 위해 먼저 창원시에 위치한 교량 8개를 선택하고 기본 외관 조사를 수행하였으며, 이를 바탕으로 교량의 FE모델을 만들었고, 국내 표준 설계 시방서[3]에 의한 응답스펙트럼에 기준하여 인공지진을 생성하고 비선형 해석을 수행하였다. 또한, 각 결과를 500년, 1000년 및 2400년 재현주기를 가지는 지진위험도 곡선 (Seismic Hazard Curve)과 중첩하여 각 교량의 확률적 위험도 및 교통망의 확률적 위험도를 분석하였다.

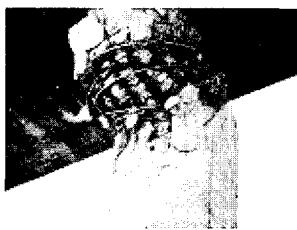
## 2. 지진 취약도 분석

교통망 전체의 지진취약도 분석을 위해서는 교통망을 구성하는 각 구성요소인 구조물들의 지진취약도 분석이 요구된다. 일반적으로 지진 피해는 교량의 낙교, 교대의 붕괴, 지반의 액상화(Liquefaction), 교각의 붕괴 등이 주요하다. 특히, 교량은 교통망 구성 구조물 중 지진에 취약한 구조물로서 교통망의 지진 취약도 분석에서 중요 구조물이 된다. 통상 지진에 대한 교량의 거동은 비선형, 확률적 거동 특성을 보인다. 그 중에서 가장 일반적인 교량의 파괴는 교각이며(그림 1 참조), 본 논문에서는 교각에 대한 파괴를 기준으로 해석을 수행하였다. 즉, 교각 상하부에 비선형 요소를 삽입하고 주어진 다양한 지진하중에 대한 비선형 해석을 수행하고, 각 손상조건에 부합되는 결과를 분류함으로써 교각 붕괴에 대한 지진손상 분석 데이터를 구하였다. 손상 기준은 손상된 구조물을 조사한 경험적 지진 취약도를 활용하였다.

구해진 지진손상 분석 데이터로부터 확률적 특성 곡선(지진취약도 곡선(그림 2 참조))을 구하기 위해, Shinozuka 등에 의해 사용된 대수정규분포 함수를 이용하여 나타내었다. 이 연구에서도 이 기법을 이용하여 국내 교량에 대하여 손상기준과 적용성에 대해 검토하였다. 먼저 Shinozuka 등이 제안한 방법을 간략히 정리하였다.



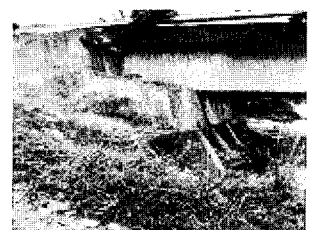
(a) 상부구조의 충돌



(b) 교각의 붕괴



(c) 교대의 침하



(d) 낙교

그림 1. 교량의 파괴 유형

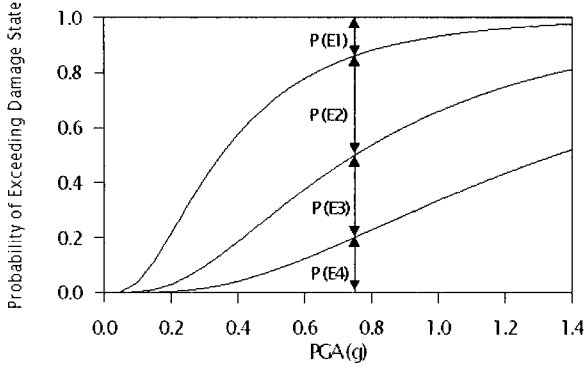


그림 2. 지진취약도 곡선의 개요

먼저 주어진 손상기준으로 E1, E2, E3, E4는 'no', 'at least minor', 'at least moderate', 'major damage' 등으로 정의하자. 이 때,  $P_a = P(a_i, E_k)$ 를 손상기준  $E_k$ 에 대한  $PGA = a_i$ 일 때의 손상확률이라 하면,  $P_{ik}$ 는 대수정규 분포 함수로 나타나는 지진취약도 곡선  $F_j(a_j, c_j, \zeta)$ 과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$P_{i1} = P(a_i, E_1) = 1 - F_1(a_i, c_1, \zeta) \quad (1)$$

$$P_{i2} = P(a_i, E_2) = F_2(a_i, c_2, \zeta) - F_2(a_i, c_3, \zeta) \quad (2)$$

$$P_{i3} = P(a_i, E_3) = F_2(a_i, c_2, \zeta) - F_2(a_i, c_3, \zeta) \quad (3)$$

$$P_{i4} = P(a_i, E_4) = F_3(a_i, c_3, \zeta) \quad (4)$$

$$F_j(a_i, c_j, \zeta_j) = \Phi[\ln(a_i/c_j)/\zeta_j] \quad (5)$$

여기서,  $c_j$ 와  $\zeta_j$ 는  $j = 1, 2, 3$ 으로 다음과 같이 표현되어진 "at least minor", "at least moderate", "major"로써 대수정규 분포 곡선의 평균값이다.  $P_{ik}$ 와  $F_j(a_j, c_j, \zeta_j)$ 의 관계는 아래와 같다. 또한, 우도함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$L(c_1, c_2, c_3, \zeta) = \prod_{i=1}^n \prod_{k=1}^a P_k(a_i, E_k)^x \quad (6)$$

$$x_{ik} = 1$$

만약 손상정도  $E_k$ 가  $i$ 번째 교량의  $a = a_i$ 를 가진다면,

$$x_{ik} = 0 \quad (7)$$

우도함수는 식 (8)과 같은 조건을 가짐으로,  $c_j$ 와  $\zeta$ 의 최대우도 추정값 (or 최우측정치)  $c_{j0}$ 와  $\zeta_{j0}$ 는 지진손상 분석 데이터들이 식 (8)의 조건을 만족하도록 통계처리 함으로써 구해 질 수 있다.

$$\partial \ln L(c_1, c_2, c_3, \zeta) / \partial c_j \quad (8)$$

$$= \partial \ln L(c, c, c, \zeta) / \partial \zeta = 0 \quad (i = 1, 2, 3)$$

구해진 추정 값  $c_{j0}$ 와  $\zeta_{j0}$ 을 대입하고 연속곡선을 도시함으로써 완성된다. 이 과정을 흐름도로 나타내면 그림 3과 같다.

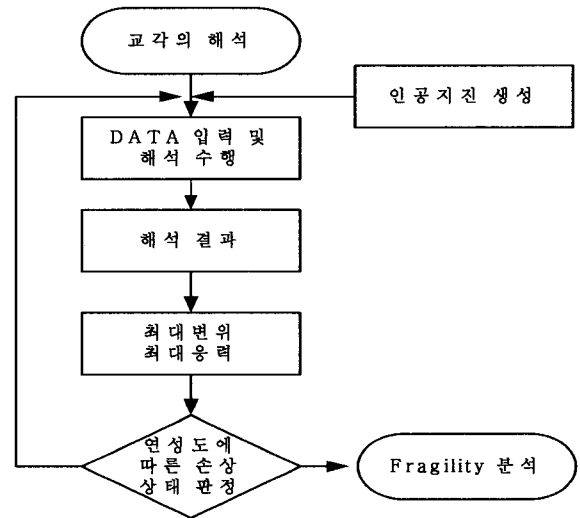


그림 3. 해석 수행 절차

구해진 각 구조물의 지진취약도 곡선은 GIS 데이터로 지도상의 각각의 위치에 입력되고, 여기에 더해지는 지진위험도 곡선과 중첩되면서 지진위험도 곡선상에 부합하고 PGA에 대응되는 지진취약도 확률을 보이게 하여, 이를 여러 측면의 확률분석에 적용하게 된다. GIS와 연계된 사항은 예제에서 직접 설명하였다.

### 3. 예제 해석

예제 대상은 창원시의 교통망 (그림 4, 5 참조)을 사용하였고, 이 중 지선을 생략하고 단순화하였으며 교통망의 주요 구조물로는 12개의 교량 (그림 6)이 선택되었다.



그림 4. 경상남도 창원시 1/5000 수치 지도



그림 5. 추출된 도로망과 교량 Coverage

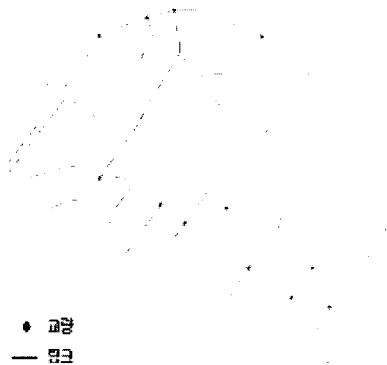


그림 6. 네트워크모델

### 3.1 모델링 및 구조해석

교량의 모형화를 위해, 상판은 Shell 요소를 사용하였으며 하부 교각은 프레임으로, 교각의 상부와 하부에 비선형 요소를 넣음으로써 비선형 시간 이력 해석이 용이하게 하였다. 상판의 지반과의 연결은 X축에 대한 변위만을 고려하였고 하부는 고정단을 적용하였다.

교각의 비선형 요소의 물성치 결정을 위해서는 Colx를 사용하여 M-k 곡선을 생성한 후 이를 단순화하여 사용하였다. 연성을 구하였다.

교각의 비선형 해석 결과는 상용프로그램(SAP 2000)에서 Nllink Property에 적용되어졌으며, 국내 도로교 시방서에 나와 있는 기준에 의한 응답스펙트럼으로부터 인공지진 이력 프로그램인 QuakeGem를

이용하여 인공 지진을 생성하였다. 이를 다시 최대 지반 가속도(Peak Ground Acceleration) PGA=0 ~ PGA=2.4까지 20개의 인공 지진 가속도를 크기 변화를 해서 작성하였다.

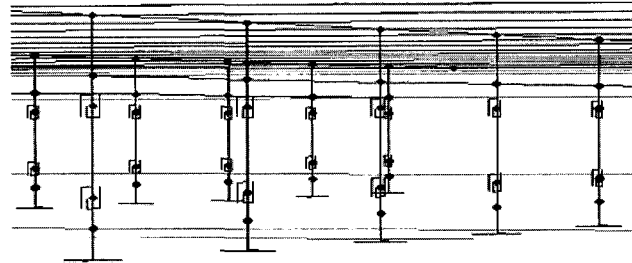
### 3.2 구조해석 결과

국내 적용을 위하여 연구가 필요하지만 앞서 손상 기준으로는 Dutta&Mander에 의하여 정의 되어진 손상상태 및 변위 한계를 사용하였고, 본 경우에 적용하면 표 1과 같이 No Damage일 때 손상은 0.005, Slight Damage일 때 0.007, Moderate Damage 일 때 0.015, Extensive Damage일 때 0.025, 완전 파괴에 이르는 Complete Damage 는 0.05이 된다. 는 극한회전각이며 는 항복회전각이다.



(a) 목동교

(b) 기음정교



(c) 교각의 비선형 요소 모델링

그림 7. 교량 모델링

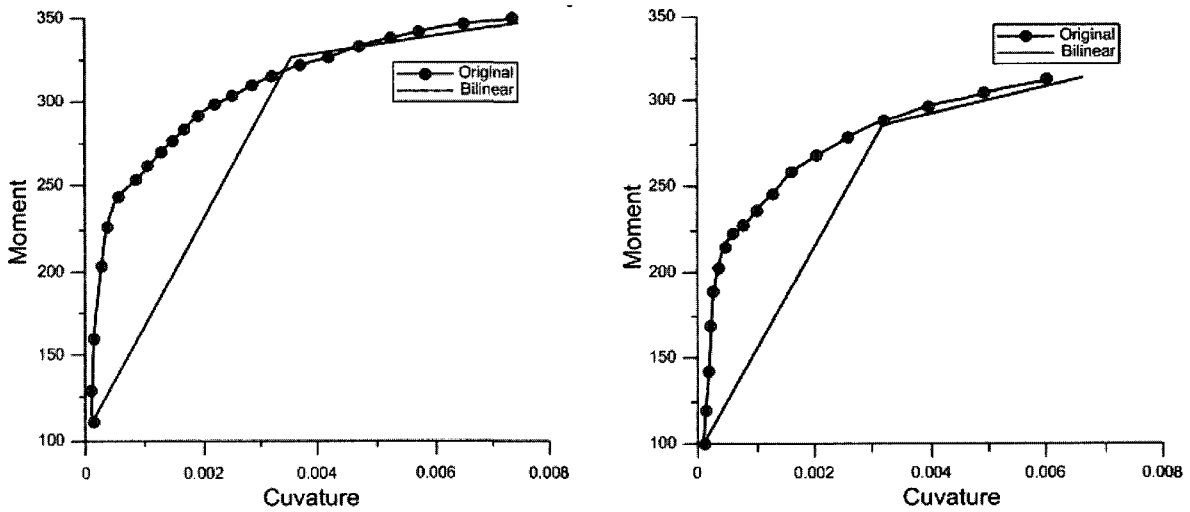
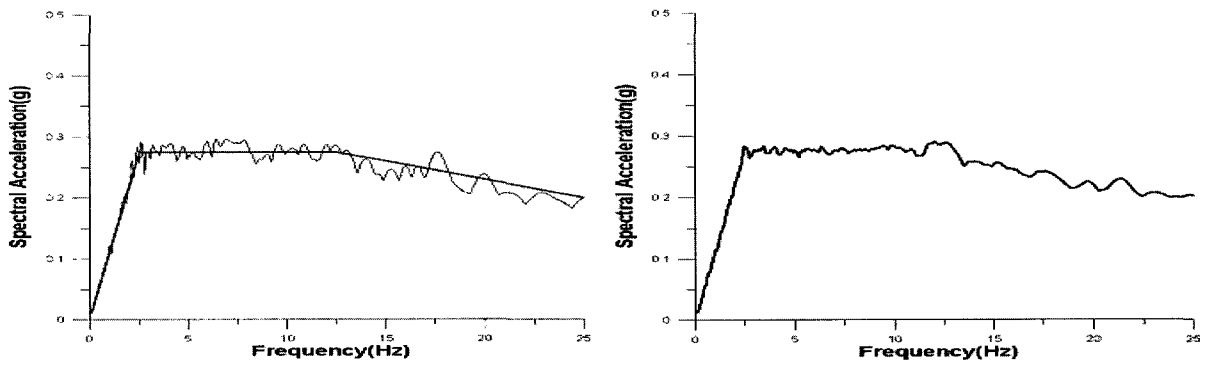


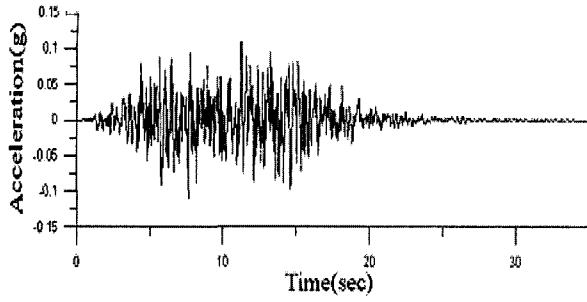
그림 8. 각 교량의 M-k 곡선



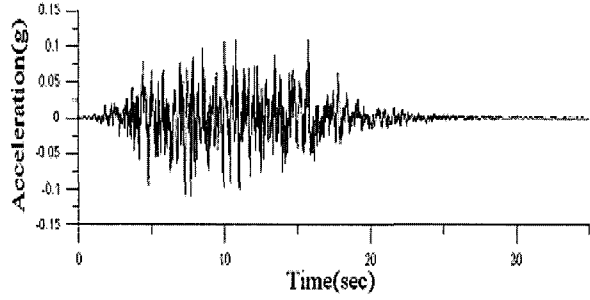
(A) 1개 지진

(B) 5개 지진

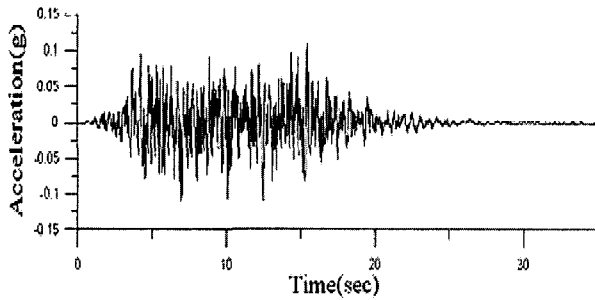
그림 9. 설계응답스펙트럼



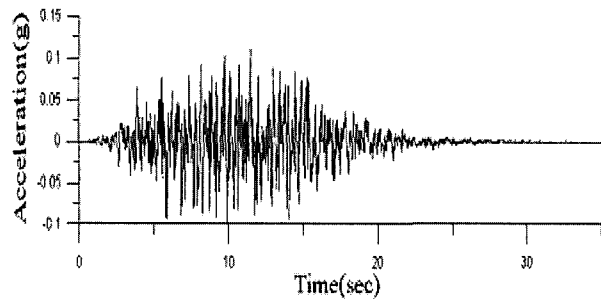
(A) 생성지진1



(B) 생성지진2



(C) 생성지진3



(D) 생성지진4

그림 10. 생성된 가속도(scale 이전)

표 1. 손상 상태 계산식

손상 상태	계산식
No Damage	= 1.0
Slight Damage	= (0.007-0.005)/(0.05-0.005) × (Ru/Ry-1)+1
Moderate Damage	= (0.015-0.005)/(0.005-0.005) × (Ru/Ry-1)+1
Extensive Damage	= (0.025-0.005)/(0.005-0.005) × (Ru/Ry-1)+1
Complete Collapse	= Ru/Ry

표 2에서는 각 지진에 의한 해석 결과 값으로서 손상 상태에 따른 분류를 하였다. PGA=4가 될 때까지 손상은 거의 없는 것으로 나타났고, 이 결과는 모델 되어진 교량이 외관 관측 자료 위주로 모형화 되어 정확한 안전진단 등의 정보가 들어가 있지는 않다는 것을 감안하면, 충분히 안전하다고 함부로 단정지을 수는 없으리라 사료된다.

더불어, 손상 상태의 기준에 있어서 지금까지는 국내 기준이 없기 때문에 경험적 기준인 Dutta& Mander의 기준을 사용하였다. 보다 정확한 결과를 얻기 위해선 많은 연구를 통한 국내 손상 규정이 반드시 필요할 것으로 사료된다. 그림 11은 Damage State별 지진 취약도를 나타낸 것이며 PGA=0.1~PGA=1.0

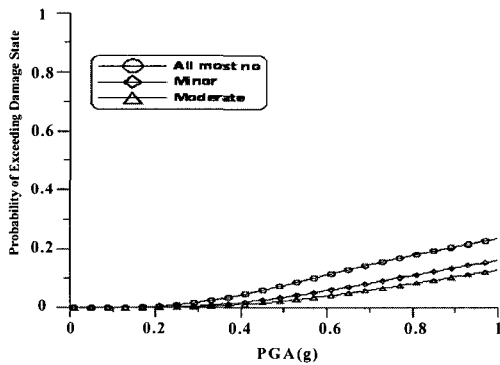
까지를 나타내었다.

구해진 지진취약도 곡선과 500년, 1,000년 및 2,400년 재현주기를 가지는 지진위험도 곡선(그림 12)을 중첩하여 실제 손상별 위험확률(그림 13-15)을 구하였다.

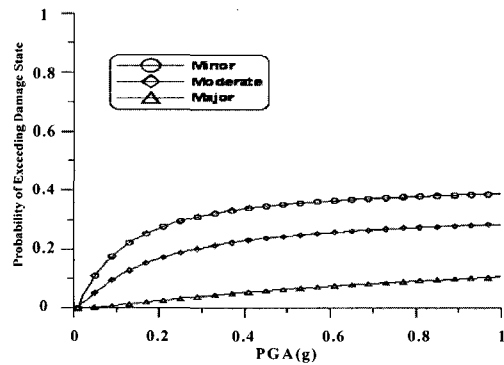
해석결과로부터 재현주기 500년, 1,000년, 2,400년의 경우에 네트워크 모델 상에서 대부분의 교량이 Minor 데미지 상태에서 각각 25%, 45%, 50%이하의 파괴확률을 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 교량이 받는 최소한의 피해를 나타내는 것으로 그 이상의 데미지를 받을 확률도 배제할 순 없다. 그리고 목동교 등의 같은 구조를 가진 5개 교량은 모든 모의 실험에서 파괴확률을 나타내지 않았다. 차량의 통행

표 2. 손상정도

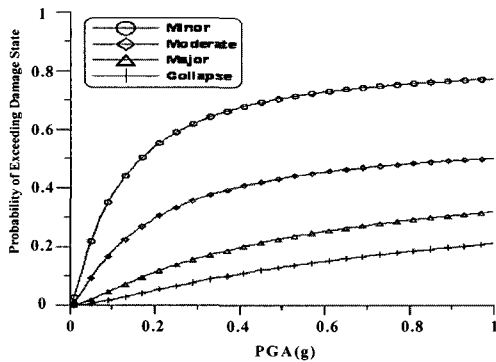
지진	변위	연성도	손상정도	PGA
ko01	0.001117	0.360323	1	0.11
ko02	0.000474	0.152903	1	0.23
ko03	0.000341	0.11	1	0.37
ko04	0.000484	0.156129	1	0.67
ko05	0.000796	0.256774	1	0.78
ko06	0.000469	0.15129	1	0.89
ko07	0.000525	0.169355	1	0.97
ko08	0.000623	0.200968	1	1.4
ko09	0.000713	0.23	1	1.9
ko10	0.000607	0.195806	1	2.4
ko11	0.000713	0.23	1	0.13
ko12	0.000607	0.195806	1	0.29
ko13	0.000620	0.2	1	0.33
ko14	0.001300	0.419355	1	0.42
ko15	0.001577	0.50871	1	0.51
ko16	0.001998	0.644516	1	0.69
ko17	0.002413	0.778387	1	1.5
ko18	0.003271	1.055161	1	3.4
ko19	0.007279	2.348065	2	4.1
ko20	0.015333	4.946129	2	5.5



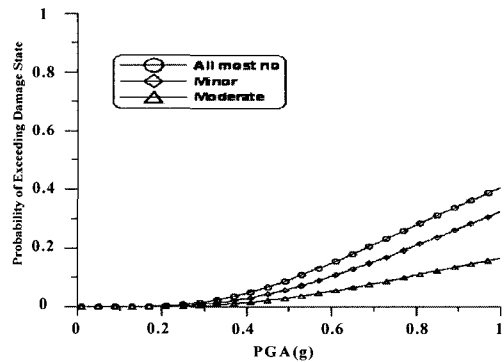
(a) 목동교



(b) 창원천1호교

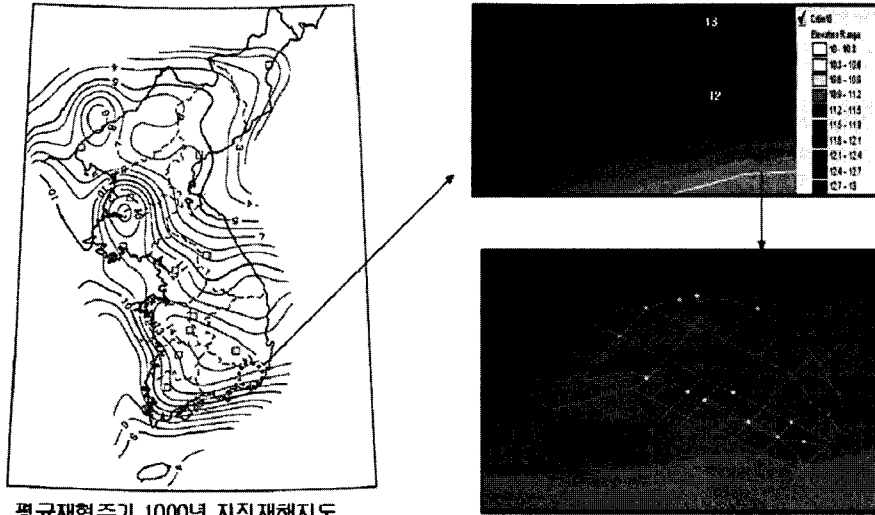


(c) 토월천교



(d) 가음정교

그림 11. 교량의 지진취약도 곡선

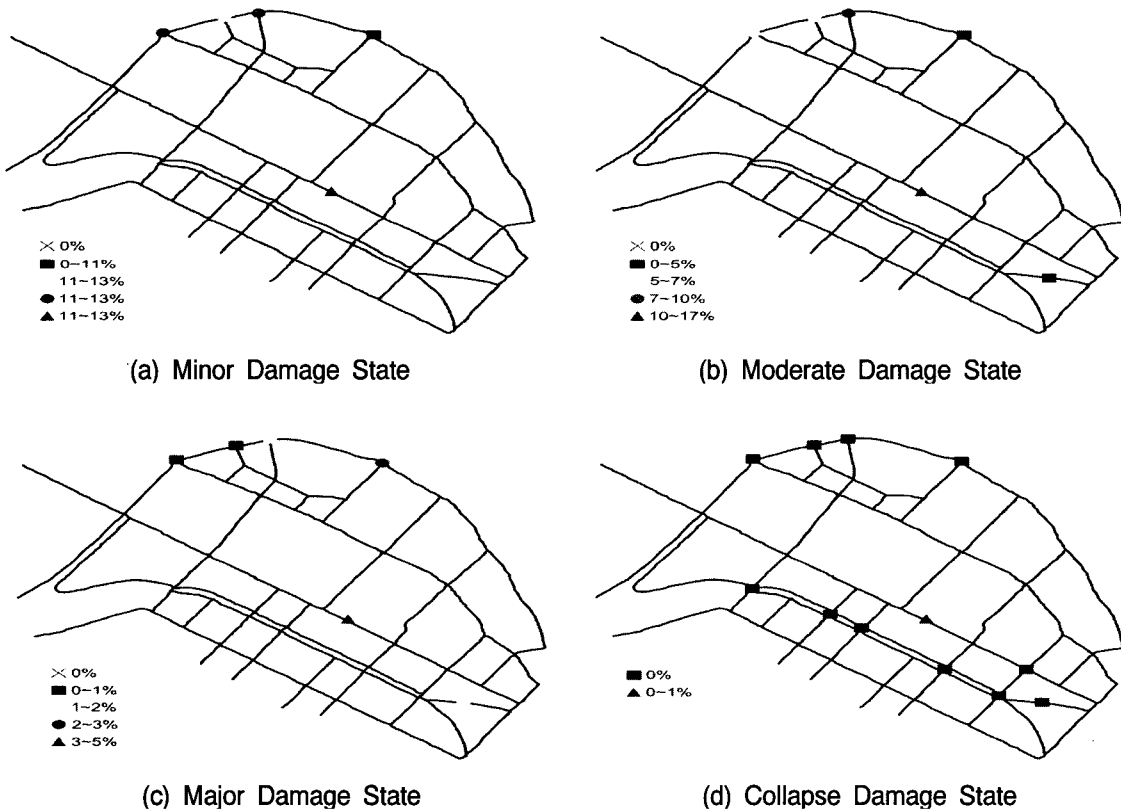


평균재현주기 1000년 지진재해지도

그림 12. 확률론적 지진 재해지도와 네트워크모델의 중첩

량이 많고 마산, 부산, 김해, 진해 등으로 통하는 요로인 창원대로 상에 위치한 토월천교는 모든 모의실험에서 가장 큰 파괴확률을 보이고 있으며, 전파(Collapse)등급에서도 1~5%의 파괴확률을 보이고 있어 실제 지진피해 발생 시 가장 큰 피해를 받을 것으로 보이며, 교통네트워크에 가장 큰 영향을 미칠 것

으로 보인다. 정리하자면 대체적으로 상당히 안전한 편으로 심지어 2,400년 주기 지진에 대해서도 동일한 특성을 보이고 있다. 그러나, 이는 정확한 안전진단을 하고, 손상기준의 국내 표준화가 이루어진다면, 좀 더 낮은 안정성을 나타낼 것이다.



(a) Minor Damage State

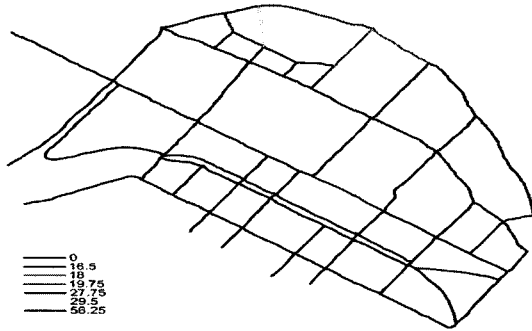
(b) Moderate Damage State

(c) Major Damage State

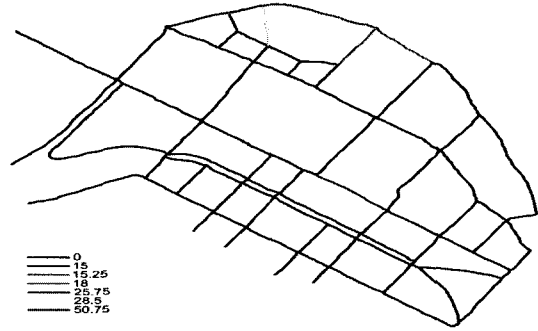
(d) Collapse Damage State

그림 13. 재현주기 500년의 경우(계속)



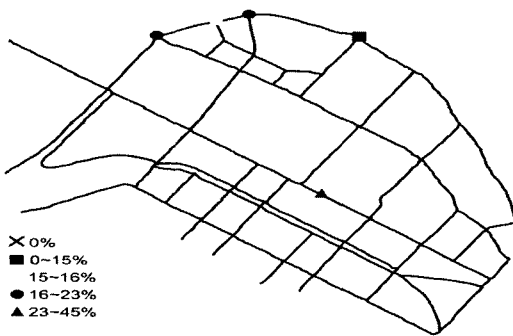


(e) 차량 통행량 변화에 대한 기대값

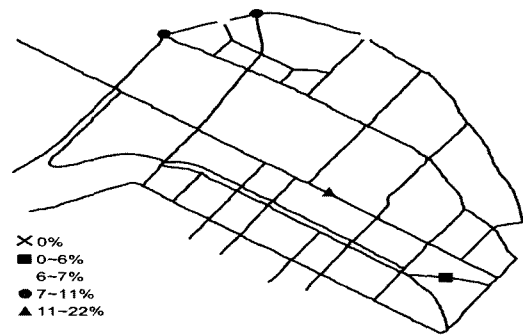


(f) 차량통행속도 변화에 대한 기대값

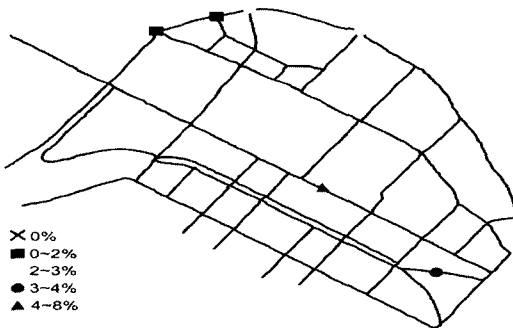
그림 13. 재현주기 500년의 경우



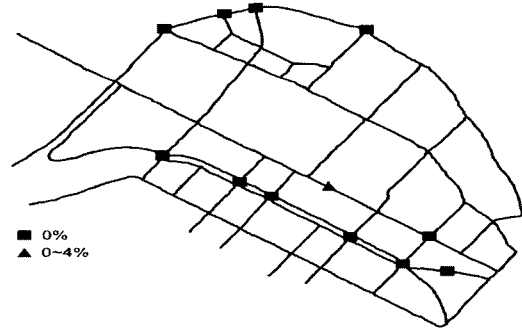
(a) Minor Damage State



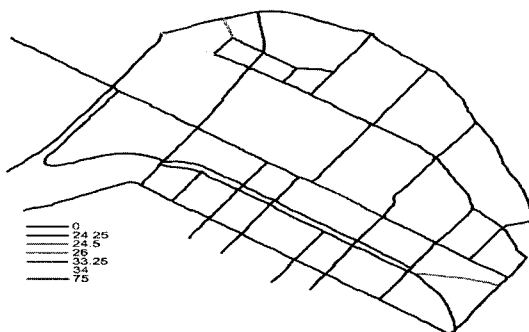
(b) Moderate Damage State



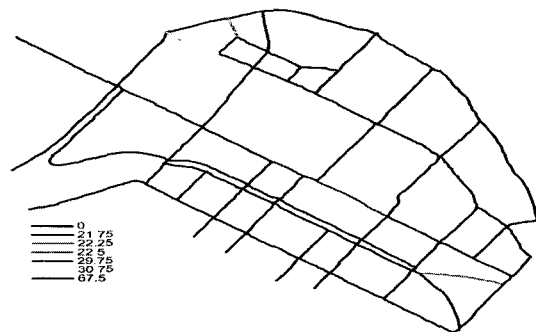
(c) Major Damage State



(d) Collapse Damage State



(e) 차량 통행량 변화에 대한 기대값



(f) 차량통행속도 변화에 대한 기대값

그림 14. 재현주기 1000년의 경우

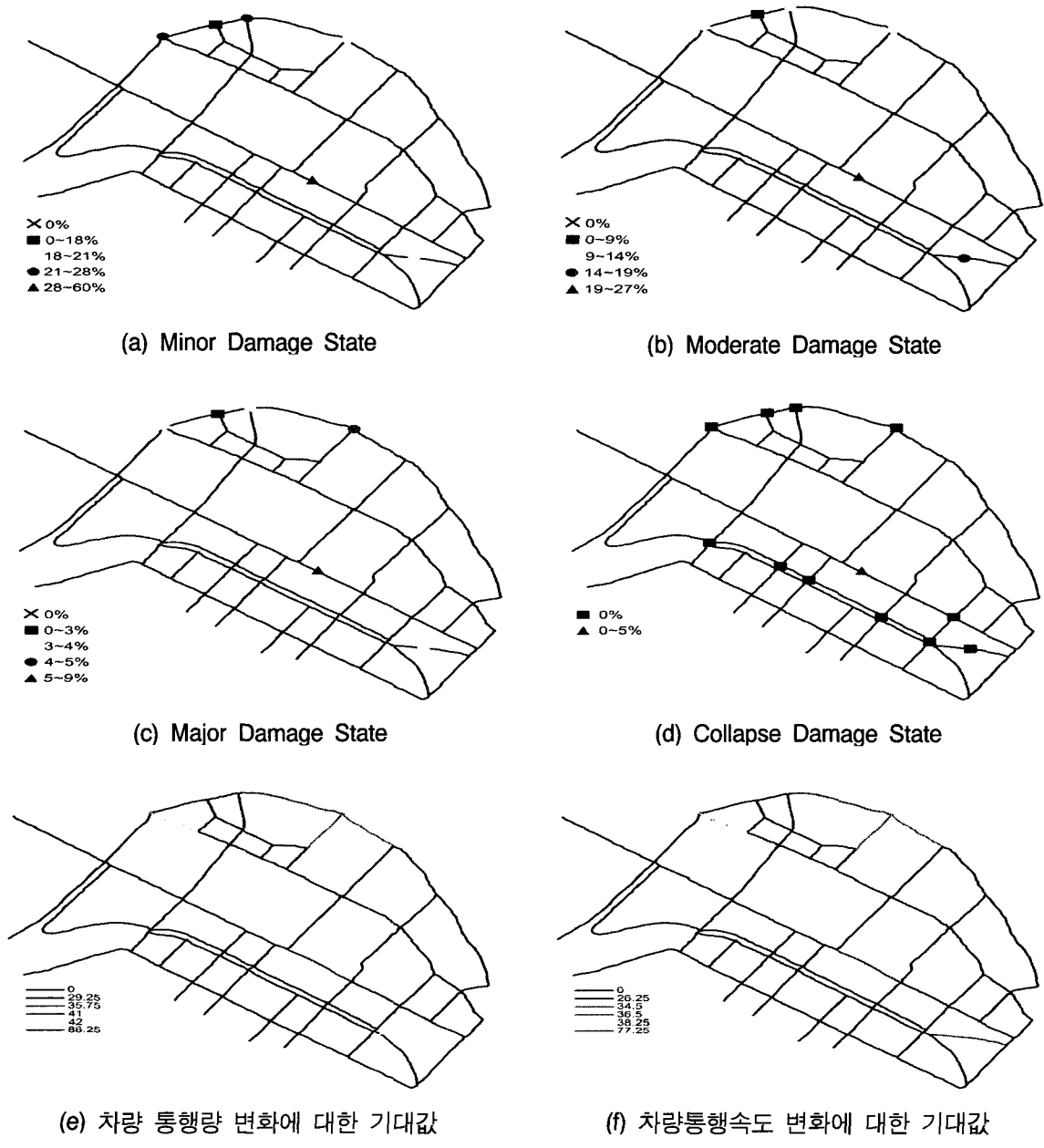


그림 15. 재현주기 2400년의 경우

#### 4. 결론

본 논문에서는 지진 취약도 분석 기법을 활용하여 교량 구조물의 지진 안전도를 분석하였고 그 결과와 GIS를 이용한 네트워크의 지진에 의한 피해를 예측해보았으며, 다음과 같이 정리 하였다.

- 1) 지진하중하의 교량의 비선형, 확률론적 특성을 고려한 안전성 기법으로 지진 취약도 분석이 수행되었다.
- 2) 재현주기 500, 1,000, 2,400년의 확률론적 지

진재해도 대해 네트워크상의 대부분의 교량이 지진피해에 대해 안전한 것으로 사료된다.

- 3) 전 모의 실험에서 파괴확률을 나타내지 않은 5개의 교량은 현장조사만으로 수집된 자료를 바탕으로 지진취약도 해석을 수행하여 내진성능이 과대평가된 것으로 사료된다.
- 4) 대부분의 교량이 비교적 낮은 파괴확률을 보이고 있지만 소규모의 지진피해에도 많은 인적, 물적 피해가 예상되는 교량의 경우에는 안전진단 등의 결과를 활용한 내진성능의 재평가와 보수, 보강의 필요성을 충분히 검토해야 할 것

으로 사료된다.

5) 또한 보다 정확한 분석을 위해서는 국내실정에 적합한 손상기준이나 비선형 해석기법 등이 개발되어야 함을 보여주고 있다.

지금까지 연구되어진 재해위험도는 전체 구조물 중 교량과 재해원인중 하나인 지진에 국한되었다. 그러나 이 방법은 교량 및 도로 항만 등 다양한 구조물과 파랑, 홍수, 바람 등의 보다 다양한 재해에 대한 적용 및 지반의 액상화, 지반-구조물의 상호 작용 등 보다 다양한 재해 현상 등이 고려되어 질 수 있는 충분한 가능성을 가진 방법으로 사료된다. 따라서, 다양한 재해에 대한 방재기법으로의 가능성을 가지고 있는 만큼 충분한 개발이 필요하리라 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술 연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

### 참 고 문 헌

국립지리원(1998), "수치지도 활용상 문제점 종합분석"

국토연구원(1996), "지리정보시스템 구축을 위한 데이터 베이스 시스템 비교연구".

김재민(2002), "QuakeGem-Computer Program for generating multiple earthquake motions", 한국전산구조공학회

시설안전기술공단(1997), "기존교량의 내진성 평가 및 보강방안"

이진학, 김상훈, 윤정방(2004), Kushiyama, Shigeru "PDF Interpolation Technique for Seismic Fragility Analysis" 대한토목학회논문집A, Vol.24, No.2, Startpage 391, Totalpage 9

한국도로교통협회(2000), "도로교 설계기준"

한국지진공학회(1999), "내진설계기준연구(II) "

California Department of Transportation(1993), COLx Users Manual, Sacramento, CA

Computer and Structures(1998), Inc, SAP2000/Nonlinear Users Manual, Berkeley, CA

Deodatis, G(1996), "Simulation of stochastic processes and fields to model loading and material uncertainties: Probabilistic methods for structural design", Kluwer Academic Publishers

Dutta, A(1999)., "On Energy Based Seismic Analysis and Design of Highway Bridges, "Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil, Structural & Environmental Engineering, State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y

Federal Emergency Management Agency(1997), "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," FEMA-273, Washington, D.C

Malhotra, P. K., Huang, M. J. and Shaksl, A. F(1995), "Seismic interaction at separation joints of instrumented concrete bridge," J. Earthquake Engrg, and Struct. Dyn., 24(8), 1055-1067.

Papadrakakis, M, Apostolopoulou, Zacharopoulos, A. and Bitzarakis, S(1996)., "Three-dimensional simulation of structural pounding during earthquakes," J. Engrg. Mech, ASCE, 122(5), 423-431.

Priestley(1988), M.B, "Non-Linear and Non-Stationary Time Series Analysis," Academic Press

Shinozuka, M, Uzawa, T. and Sheng, L.-H (2000)., "Estimation and testing of fragility parameters," International Conference on Monte Carlo Simulation

◎ 논문접수일 : 2006년 04월 28일  
 ◎ 심사의뢰일 : 2006년 05월 12일  
 ◎ 심사완료일 : 2006년 05월 30일

