

# 서울시 모델 구역에서의 지진피해시나리오 연구

## A Study on the Seismic Damage Scenario in the Model District of Seoul City

김 재 관 \*  
Kim, Jae Kwan

박 창 업 \*\*  
Baag, Chang Eob

윤 의 택 \*\*\*  
Yoon, Eui Taek

강 태 섭 \*\*\*\*  
Kang, Tae Seob

---

### ABSTRACT

The seismic damage assessment to the postulated earthquake is attempted for the buildings in the model district of Seoul City. The capacity spectrum method is employed in which the vulnerability functions are expressed as functions of the spectral displacement. The database of the building stock is constructed and managed using Geographic Information System software.

The model district is selected to represent the typical structural and residential characteristics of Seoul City. The structural properties were collected from the design documents. The field inspections were carried out to find out the current status of the buildings. They are classified into 11 structural types. The fragility curves in HazUS are employed. The ground motions from the postulated earthquakes are simulated using the Boore's method. The surface soil in the district is classified into 3 profiles using the depth as the parameter. The one-dimensional wave propagation method is used to calculate the filtered ground motion through surface soil layer. The average spectrum of the sample time histories is used as the demand curves. The calculated results are expressed in maps using GIS software ArcView 3.0a.

---

### 1. 서 론

지진 피해 시나리오의 기반이 되는 지진 피해 평가 기법을 서울시 주거 환경을 대표할 수 있는 소규모 지역에 적용하여 2 개의 가상 지진에 대한 구조물의 예상 피해를 추정하는 모의 실험을 실시하였다. 지진 피해 예측은 구조적 피해에 한정하여 실시하였다. 지진 피해의 추정은 역량 스펙트럼 방법 (Capacity Spectrum Method)에 따라 실시하였다.

---

\* 서울대학교 부교수  
\*\* 서울대학교 교수  
\*\*\* ㈜현대건설 사원  
\*\*\*\* 서울대학교 박사과정

## 2. 지진 피해 평가 기법

역량 스펙트럼 방법은 현재 미국 FEMA 와 NIBS 에 의해 개발되어 사용되고 있는 지진 피해 평가 도구인 HazUS 에서 채택하고 있는 방법이다. HazUS 는 GIS (Geographic Information System)를 기반으로 개발된 프로그램으로 미국 내의 광범위한 데이터베이스를 내장하고 있어 구조적 지진 피해 뿐만 아니라, 라이프라인 시스템의 피해, 비구조적 피해, 2 차적 피해 등을 계산하여 주어진 지진에 의해 발생하는 피해를 예측하도록 제작되었다. 이 논문에서는 이와 동일한 방법을 적용하여 구조적 피해를 예측하였다.

### 2.1 대상 구역 선정 및 구조물 목록 조사

모델 구역은 서울시의 다양한 주거 및 구조 특성을 대표할 수 있고, 지반 효과가 뚜렷하게 나타나도록 연약층의 두께 변화가 심한 지역을 선정하여 다양한 피해 결과를 도출할 수 있도록 하였다. 모델 구역 내 구조물 목록 조사는 관련 기관 (서울시, 구청 등)의 문헌 조사와 도면 조사, 서울시 GIS 기본도를 바탕으로 아크뷰 (ArcView) 3.0a 를 이용하여 데이터베이스화 하였다.

일반적인 지진 피해 시나리오에서는 구조물 조사 후 구조물을 형태별, 용도별로 100 호에서 200 호 정도 또는 1km×1km 규모로 격자화 하여 속성을 부여하고 있다. 그러나, 이 논문에서는 모델 구역의 규모가 격자 1 개에 해당할 만큼 작기 때문에 개별적 건물에 대한 속성을 부여하여 데이터베이스를 구성하였다. 이러한 점은 구조물의 피해를 확률적으로 예측하는 부분에 있어서 그룹화, 격자화해서 산출한 결과보다 부정확한 결과를 초래할 수 있으나 대상 구역의 규모가 다른 점을 감안해 개별적 건물에 대한 피해 확률을 산출하였다.

### 2.2 지진 역량 스펙트럼 방법

역량 스펙트럼 방법은 역량 곡선 (Capacity Curve)과 취약도 곡선 (Fragility Curve)을 사용하여 지진 피해 예측을 위하여 구조물 형태와 내진 설계 수준에 따른 취약도 함수, 그리고 지반의 응답 스펙트럼을 필요로 한다.

구조물 형태는 각 건물을 나타낼 수 있는 구조 형태 속성을 부여하여 그룹화하여 사용하는 것이 일반적이다. 따라서, 대상 지역에 대한 구조물 목록을 조사하여 일반적으로 사용되는 특징적인 구조 형태를 파악하여 구조 형태를 선정하여야 한다. 건물 분류는 구조 형태, 층수, 내진 설계 적용 등에 따라 분류되어야 하므로 광범위한 조사 자료를 필요로 한다. HazUS 의 경우 인구조사 자료를 토대로 구조물을 36 가지 형태로 분류하여 사용하였다. 이 논문에서는 이 구조물 형태 중에서 모델 구역 내에서 사용되지 않거나 국내 실정에 맞지 않는 구조물 형태를 제외하고 단순화하여 11 가지 형태로 분류하여 사용하였다.

응답 스펙트럼 (Response Spectrum)은 지반의 증폭 특성을 고려하여 시간 이력을 구한 후 역량

곡선 (Capacity Curve)와 비교하기 위하여 x 축을 스펙트럴 변위 (Spectral Displacement), y 축을 스펙트럴 가속도 (Spectral Acceleration)으로 하여 도시하였다.

출력 결과는 역량 곡선 (Capacity Curve)과 응답 스펙트럼 (Response Spectrum)의 교점, 즉 주어진 지반 운동 하에서의 구조물의 응답에 해당하는 스펙트럴 변위를 구하여 취약도 함수 (Fragility Curve)에서 계산한 확률이 된다. 이 확률은 주어진 피해 상태를 초과할 확률이다.

### 2.3 역량 곡선 (Capacity Curve)의 형태

구조물의 최대 응답 (Peak Response)을 구하기 위하여 사용되는 역량 곡선 (Capacity Curve)은 항복 역량 (Yield Capacity)와 극한 역량 (Ultimate Capacity)의 2점으로 주어진다. 원점에서 항복 역량까지는 직선으로 정의되고 항복 역량에서 극한 역량까지는 곡선으로 정의된다.

### 2.4 피해 함수 (Damage Function)의 형태

건물의 피해 함수는 정규로그함수인 취약도 곡선 (Fragility Curve)의 형태이다. 각 취약도 함수는 스펙트럴 변위 혹은 스펙트럴 가속도 등의 인자의 중앙값 (median)으로 정의되며, 이는 각 피해 상태의 최소값에 해당한다. 예를 들어, 스펙트럴 변위  $S_d$ 는 주어진 피해 상태 (damage state:  $ds$ )에서 식 (1)과 같이 분포된다고 여겨진다.

$$S_d = \bar{S}_{d,ds} \cdot \varepsilon_{ds} \quad (1)$$

여기서,  $\bar{S}_{d,ds}$  : 피해 상태의 스펙트럴 변위의 중앙값

$\varepsilon_{ds}$  : 정규로그 랜덤 함수

보다 일반적인 취약도 곡선의 경우 정규로그 표준편차  $\beta$ 는  $\beta_R$  (Randomness component)과  $\beta_U$  (Uncertainty components)로 표현된다. 이러한 무작위성과 불확실성을 분리하는 것이 용이하지 않으므로 표준편차가 취약도 곡선을 정의하는데 사용된다. 이러한 접근 방법은 미국 미시시피 계곡 지역의 6개 도시의 강진 피해를 조사하기 위해 개발되어 사용되었던 취약도 함수와 유사하다. 주어진 스펙트럴 변위  $S_d$ 에서 구조물이 피해 상태  $ds$ 에 도달하거나 혹은 초과하게 될 확률을 식 (2)와 같은 모델로 정의하였다.

$$P[ds|S_d] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}}\right)\right] \quad (2)$$

여기서,  $\bar{S}_{d,ds}$  : 피해 상태에 도달하게 될 스펙트럴 변위의 중간 값

$\beta_{ds}$  : 피해 상태의 스펙트럴 변위의 자연 로그의 표준 편차

$\Phi$  : 표준 정규 누적 분포 함수

### 3. 모델 구역에서의 지진 피해 시나리오

#### 3.1 모델 구역 및 구조물 분류

모델 구역에 대한 현장 조사와 관련 기관의 문헌 조사를 통해 모델 구역 내 전체 구조물에 대한 목록 조사를 실시하였다. 모델 구역은 약 1 km×1km의 규모로 다양한 구조 형태, 용도의 구조물이 혼재하는 곳으로 780호의 구조물로 이루어져 있으며 구조물은 각 구조별 형태를 대표할 수 있도록 11 종류로 분류하였다. 구조물 분류는 표 1과 같다. 모델구역의 구조물 분포는 GIS (Geographic Information System) 도구인 ArcView 3.0a를 이용하여 데이터베이스화 하였다. 전산 입력 수치 지도 기본도로는 서울시 GIS 기본도를 사용하였으며, 폴리라인으로 구성된 개체를 폴리곤으로 변환하여 활용하였다. 그리고, 구조물 자료는 조사 결과를 토대로 정리된 데이터베이스 파일을 건물별로 일련 번호를 사용하여 연계하여 최종 데이터베이스를 구축하였다. 데이터베이스에는 구조물 일련 번호, X좌표, Y좌표, 번지수, 분류, 지상 및 지하 층고, 높이, 면적, 전체 면적, 건축 연도 등의 입력 자료가 필드 별로 입력되어 있다. 조사된 모델 구역 내 건축물 자료를 입력하여 도시한 결과는 그림 1과 같다. 모델 구역은 가로×세로 약 1km×1km의 규모로 중앙을 십자로 가로지르는 도로변을 중심으로 상업용 고층 건물이 분포하고 있으며, 우측 중앙부에는 주거용 조적조, 철근 콘크리트 건물이 분포하고 있다.

#### 3.2 잠재 지진원 가정 및 지진 지반 운동의 결정

잠재 지진원은 추계학적 지반운동 생성 방법을 통해 2개의 지진 지반 운동을 생성하였다. 각각의 지반 지반 운동은 서울시의 단층과 지질구조를 고려하여 가정한 가상 지진원으로 서울시 중심으로부터의 거리가 각각 27.3 km, 9.2 km 떨어진 곳에 위치한 곳이며, 각각의 규모는 6.3, 5.0으로 선정하여 각각 10개의 지진을 생성하였다. 지반 운동은 Boore(1983)가 제시한 추계학적 방법에 의하여 생성하였으며, 생성된 기저 암반의 가속도 시간 이력파 모델 구역 내의 가속도 분포는 그림 2~그림 3과 같다.

#### 3.3 분지 지반 응답 해석 및 응답 스펙트럼

모델 구역 내에서의 지반 조사 결과는 모델 구역 내에서 실시된 현장 조사 자료를 수집하여 모델 구역 내 토양층 두께 분포도를 계산하였다. 토양층 두께 분포도는 서울시 전역에 대해 조사된 기존 자료와 모델 구역 내에서 조사된 자료를 보간법을 이용하여 보정하였다. 위의 토양층 두께 분포도로 모델 구역에 해당하는 지역의 토양층 두께 분포를 TM 좌표계를 기준으로 추출하여 각 건물 중심에서 토양층 두께를 보간법에 의해 계산한 후 GIS 데이터베이스에 입력하여 두께에 따라 3개의 지역으로 구분하여 그림에 도시하였다. 모델 구역 내에서의 토양층 두께값은 최소 0.26m, 최대 14.20m 사이에 분포하므로, 최대 응답치를 보기 위하여 각각 5m, 10m, 15m의 대표값을 설정하여 분지 지반에서의 응답을 계산하였다. (그림 6)

또한, 모델 구역 내에서의 응답 스펙트럼을 구하고, 응답 스펙트럼(Response Spectrum)과

구조물별 역량 곡선 (Capacity Curve)과의 교점을 구하기 위하여 x축은 스펙트럴 변위 (Spectral Displacement), y축은 스펙트럴 가속도 (Spectral Acceleration)로 환산하여 도시하였다. (그림 7)

### 3.4 구조물의 역량 곡선 및 취약도 함수

11 개 구조물에 대한 역량 곡선 (Capacity Curve)은 항복점 (Yield Capacity)와 극한점 (Ultimate Capacity)의 2 점으로 정의되며, 항복점에서 극한점까지를 직선으로 가정하여 응답 스펙트럼 (Response Spectrum)과의 교점을 계산하였다. 취약도 곡선 (Fragility Curve)의 경우 모델 구역 내 건물에 대하여 내진 설계 미적용 구조로 가정하였고 4 단계의 피해 상태, 즉 피해가 경미 (Slight), 반파 (Moderate), 광범위 (Extensive), 전파 (Complete)에 대하여 중앙값 (Median)과 베타 (Beta)값이 주어지는 정규로그 누적함수로 정의된다.

## 4. 구조물 피해 예측 결과

각 가상 지진원에 의한 모델 구역에서의 피해 정도는 그림 8 ~ 그림 11 에 도시하였다. 규모 6.3 의 비교적 큰 지진의 경우에 모델 구역 내에서는 전체 구조물에 대하여 중간 정도 이상의 피해를 확률이 약 30~40%로 비교적 균일하게 나타났으며, 규모 5.0 의 비교적 작은 지진의 경우, 경량철골조, 비보강 조적조, 조적 채움벽이 있는 철근콘크리트 구조 등의 건물이 상대적으로 피해를 입을 확률이 높게 나타났다.

## 5. 결 론

역량 스펙트럼 방법 (Capacity Spectrum Method)를 이용하여 서울시의 특정 모델 구역에서의 구조물 목록 조사, 구조 형태 분류 및 GIS 데이터베이스 화, 역량 곡선 및 취약도 곡선 부여 등을 실시하였고, Boore 가 제시한 추계학적 지진 생성 방법을 이용하여 지진파를 생성하여 모델 구역에서의 지반 효과를 고려한 지표에서의 지반 운동을 계산하였다. 각 지진, 지반 별 평균 응답 스펙트럼을 구하여 스펙트럴 변위를 계산하고 피해 확률을 계산하여 GIS 기본도에 도시하였다.

## 참고문헌

- [1] 김재관, “부지 특성을 고려한 추계학적 지진지반운동 생성과 이를 이용한 옛 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석”, 연구보고서, 연구기관 기초전력공학공동연구소, KAERI/CM-174-96, 한국원자력연구소, 1997.
- [2] NIBS, *HAZUS - Technical Manual Volume 1*, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C., 1997
- [3] ATC, *ATC 40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1*, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- [4] ATC, *ATC 13 - Earthquake Damage Evaluation Data for California*, Applied Technology Council, Redwood City, California., 1996
- [5] ESRI, *Using ArcView GIS*, Environment System Research Institute, Inc., New York Street, Redlands, California, 1996
- [6] Chopra, A.K., *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995
- [7] Freeman, S.A., “Development and Use of Capacity Spectrum Method”, 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering.
- [8] Benjamin, J.R. and Cornell, C.A., *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill, New York, 1970
- [9] Erdik, M., “Seismic Risk Analysis for Urban Systems”, 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996
- [10] Holmes, W.T., “Seismic Evaluation of Existing Building State of The Practice”, 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996

분류	기호	호수
RC모멘트프레임 (1-3층)	C1L	61
RC모멘트프레임 (4-7층)	C1M	241
RC모멘트프레임 (8층이상)	C1H	158
RC전단벽 (4-7층)	C2M	20
RC전단벽 (8층이상)	C2H	11
조적채움벽이있는RC (1-3층)	C3L	1
조적채움벽이있는RC (4-7층)	C3M	230
철골프레임	S1L	1
경량철골	S3	17
비보강조적조 (1-2층)	URML	4
비보강조적조 (3층이상)	URMM	36

표 1. 모델 구역 내 구조물 분류

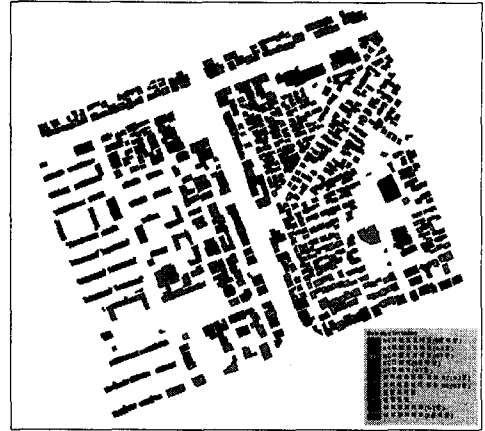


그림 1. 모델 구역 내 구조물 분포

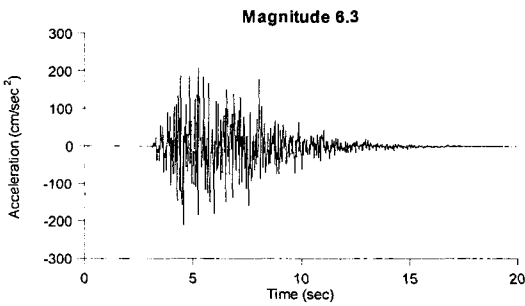


그림 2. 가속도 시간 이력 (M=6.3 / R=27.3 km)

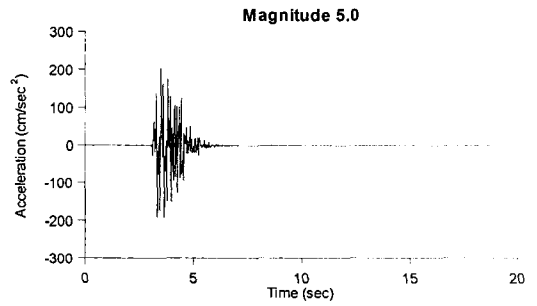


그림 3. 가속도 시간 이력 (M=5.0 / R=9.2 km)

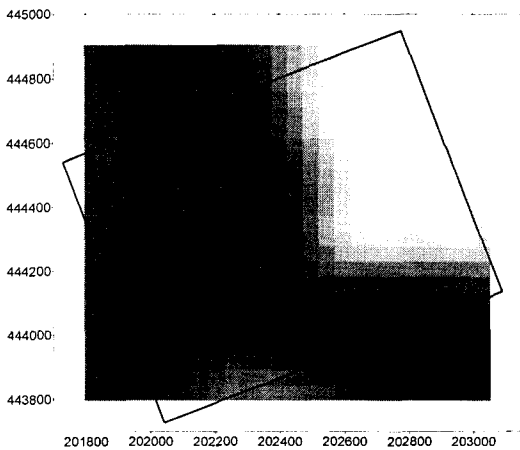


그림 4. 모델 구역 내 가속도 분포 (M=6.3 / R=27.3 km)

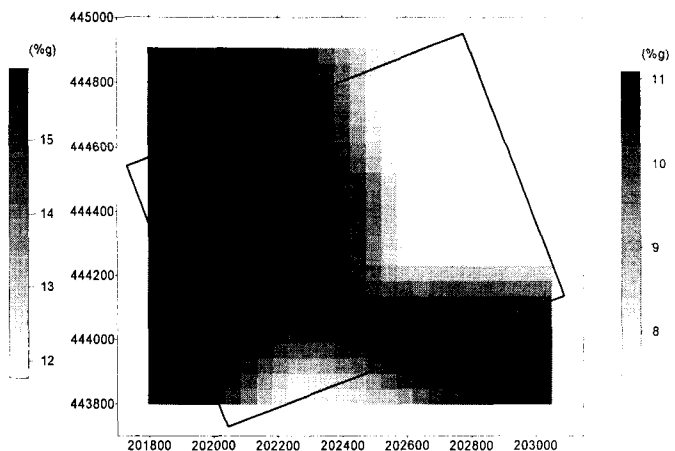


그림 5. 모델 구역 내 가속도 분포 (M=5.0 / R=9.2 km)

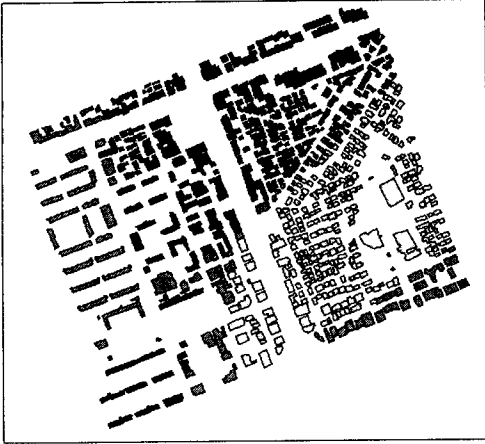


그림 6. 건물 중심에서의 토양층 두께 분포

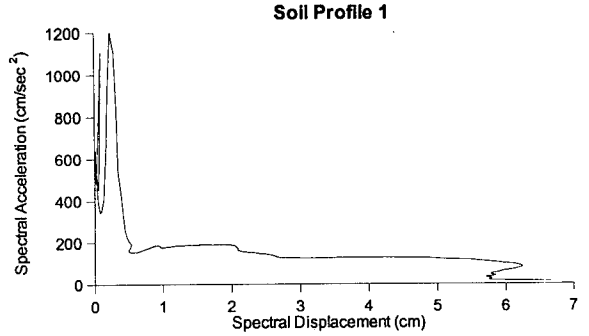


그림 7. ADRS 스펙트럼  
(M=6.3 / R=27.3km / Soil Profile 1)

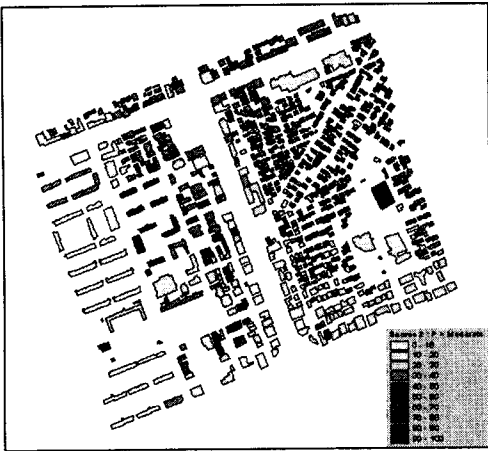


그림 8. 경미한 피해 (slight) 이상의 피해를 입을 확률  
(M=6.3 / R=27.3km)

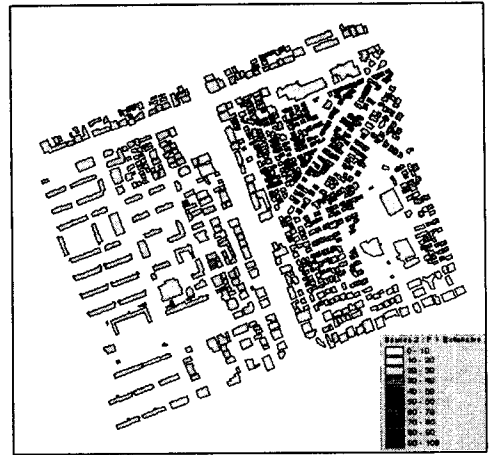


그림 9. 반파 (moderate) 이상의 피해를 입을 확률  
(M=6.3 / R=27.3km)

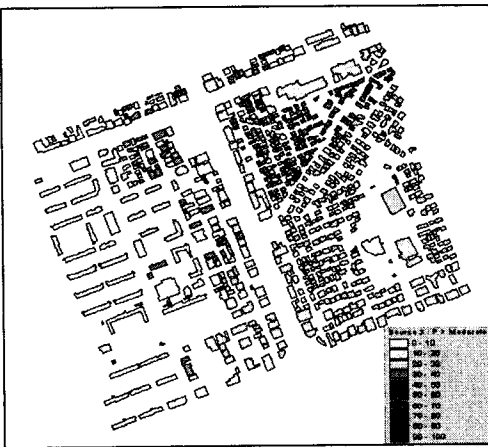


그림 10. 경미한 피해 (slight) 이상의 피해를 입을 확률  
(M=5.0 / R=9.2km)

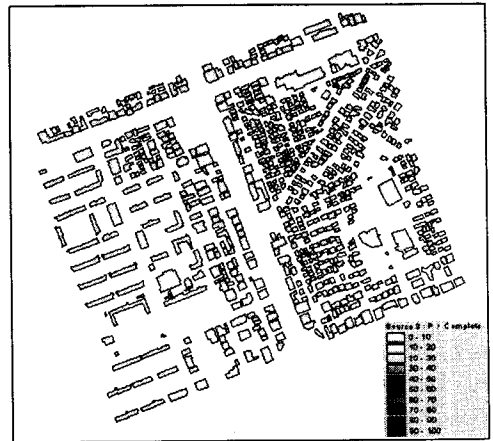


그림 11. 반파 (moderate) 이상의 피해를 입을 확률  
(M=5.0 / R=9.2km)