

동일한 지진구역에 위치한 건축 구조물의 내진거동을 기초로한
기존 내진설계 평가

Evaluation of the Current Seismic Design Procedures Based on the
Seismic Performance of the Building Located in the Same Seismic Area

한 상 환*, 이 리 형**

Abstract

Current Seismic Design Procedure has been developed and improved mostly based on the experiences of the past earthquakes. Many engineers and researchers believe that the seismic codes and provisions are adequate for the basic objective of the code which is "life-safe". However they doubt the performance of the structure during the earthquake. The seismic code seems the black box for the designers which means it is not transparent since the designer can not predict the level of the damage of the structure under future earthquakes. This purpose of this study is to check the validity of the current seismic design procedures. Two structures with different heights are designed and their seismic performances are evaluated for this purpose. Both structures are assumed to be located at the same strong seismic zone.

1. 서 론

최근에 미국과 일본을 비롯한 세계 각지에서 큰 지진이 발생하였다. 이런 지진으로 인한 인명 및 구조물의 피해는 매우 큰 것이었다. 국내에서도 작고 큰 지진들이 발생하였고 최근에는 1996년 12월 13일 진도 4.5규모의 지진이 강원도 영월에서 20km 떨어진 지점에서 발생하였다. 그 후 국내에서도 지진과 내진설계에 관련된 분야에 관심이 높아지고 있다.

미국에서는 1957년 캘리포니아 구조공학회 (SEAOC-Structural Engineers Association of California)가 내진규정과 그 해설을 개발하기 시작하여 1959에 출간 (Blue Book)하게 되었는데 이는 기본적인 개념상 현행 내진설계 기준의 모체라고 할 수 있다. 현재 사용하는 각 기준의 설계개념이 이와 동일하거나 유사하다고 할 수 있다. 또한 1961년에는 건물관련자들의 국제회의 (ICBO-International Conference of Building Officials)에서 Blue Book을 기초로 UBC (Uniform Building Code)를 만들어 냈다. 또한 1978년에는 미국 응용기술협회 (ATC-Applied Technology Council)에서 내진기준을 만들어 냈는데 이 기준은 현재 사용하는 기준과 동일한 것으로 볼 수 있고 축적된 경험을 토대로 여러 설계계수들이 첨가되어졌다. 미국에서는 현재 사용되는 기준이 기본 목표인 건물의 수명동안 발생할 가능성이 있는 최대지진 (Maximum Credible Earthquakes-475년 반복주기를 가진 지진)에 대하여 인명에 피해를 주지 않도록 설계되어야 한다는 것에는 상당히 만족스러운 것이라 평가하고 있다.

* 한양대학교 건축공학부 전임강사

** 한양대학교 건축공학부 교수

하지만 현행내진설계법에 따라 설계된 구조물의 그 구조적 거동은 어떤 지진에 대하여 어떻게 반응할지는 매우 의문스러워하고 있다. 이는 현재 사용하는 내진설계법이 구조설계자에게 그 투명성을 주지 못하고 있는 것이라 할 수 있다.

본 연구에서는 현행 기준의 문제점을 파악하기 위하여 동일한 지역의 구조물을 선택하여 최소 기준에 맞도록 설계를 하고 지진에 대한 내진 성능을 비교 검토하였다. 성능 평가를 위하여 층간 변위와 손상도 평가를 하였고 신뢰성 분석을 하였다. 층간 손상도 평가와 변위에 대한 평가를 위해서는 1979년에 발생한 미국의 Imperial Valley 지진을 선택하였고, 신뢰성 평가를 위해서는 지역특성과 지진특성을 고려하여 50개의 지진파를 발생하였다.

2. 대상 건물 선정

본 연구에서는 전형적인 2층 12층 건물을 UBC(1988) 와 ASD(1989)로 설계한다. 두 건물은 모두 남북 방향으로 3개의 경간, 동서방향으로는 6개의 경간을 가지고, 각 경간은 7.5미터이다. 층고는 1층이 4.5미터이고 다른 층들은 4미터이다. 횡력저항은 철골 연성 모멘트 골조 (Steel Special Moment Resisting Frame)가 부담한다. 건물에 작용하는 지진하중은 남북방향 (일방향)으로 작용하는 것으로 가정한다.

3. 인공지진파 발생

인공지진파의 발생은 지진위험도 평가시 매우 중요한 부분이다. 지진위험도는 신뢰성으로 결정될 수 있는데 신뢰성 해석을 하기 위해서는 많은 지진 기록이 필요한데 계획된 기록의 수가 한정되어 있어 인공지진파가 요구된다. 여러 연구자들에 의해 지진파를 발생하는 방법이 제안되어 있는데 그중 본 연구에서는 부정형 법 (Nonstationary Random Process)을 사용한다. 지진운동은 Yeh와 Wen의 방법(1988)에 따라 그 크기(amplitude)와 주기가 변조되고 여과된 Gaussian 백색파로 만들어진다. 이 방법에서는 과거 지진기록과 지역특성을 토대로 인공지진파를 만드는 세계의 함수들에 각 계수들을 시스템 추정기법(System Identification Technique)을 통하여 결정 할 수 있다. 시스템 추정기법은 Yeh(1989)와 Bard(1974)에 제안된 방법에 따른다. 인공지진파를 발생시키기 위하여 찾아내야 할 세 개의 함수는 힘 스펙트럼 밀도 함수 (Power Spectral Density Function), $S(w)$, 주기 변조함수 (Frequency Modulation Function), $\Phi(t)$ 와 강도함수 (Intensity Function), $I(t)$ 로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$a(t) = I(t)\bar{\zeta}(\Phi(t)) = I(t)\zeta(t) \quad (1)$$

이 방정식에서 $\bar{\zeta}(\Phi)$ 는 평균이 0인 단위변화로 Φ 에 대한 고정된 여과 백색파이다.

$I(t)$ 와 $\Phi(t)$ 가 시간의 함수이므로, $a(t)$ 는 시간에 대한 힘 스펙트럼 밀도 함수를 가지는 부정형 모델이다. 강도의 함수 $I(t)$ 는 $a(t)$ 의 크기를 조정하며, 다음과 같은 형태로 쓰인다.

$$I^2(t) = A \frac{t^B e^{-Ct}}{D + t^E} \quad (2)$$

여기서 A,B,C,D는 다음과 같은 에너지 함수에 의해 추정된다.

$$E(t) = \int_0^t I^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

여기서 $I^2(t)$ 는 식(2)에서 주어진다. 그리고 Gauss algorithm이 이 정의를 위해서 사용되어진다. 주기변조함수, $\Phi(t)$ 는 시간이 지남에 따른 $a(t)$ 의 주기의 변동을 조정하고 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi(t) = \frac{\mu_0(t)}{\mu'_0(t_0)} \quad (4)$$

여기서 $\mu_0(t)$ 는 원점을 통과하는 평균값 (mean zero crossing)이다. 그리고 $\mu_0(t)$ 는 연속적이고, 미분가능하며, 단조증가하는 함수로 n차 다항식으로 설정되었다.

$$\mu_0(t) = r_1 t + r_2 t^2 + \dots + r_n t^n \quad (5)$$

여기서 r_1, r_2, \dots, r_n 은 Zero Crossing의 자료에 근거해 추정할 수 있는 계수들이며, 대개의 경우 3차 다항식이 많이 쓰인다.

힘 스펙트럼 밀도 함수(Power spectral density function)는 정형(stationary) $\bar{\zeta}$ 에 대해 지진의 주기 특성을 조절한다. $\zeta(t)$ 가 변할 때에는 순간적인 힘 스펙트럼(Mark, 1985)이 시간으로 주기 특성의 변화를 나타내기 위해 사용될 수 있다. 시간 t 에서 $\zeta(t)$ 의 순간 힘 스펙트럼은 다음과 같이 주어진다. (Yeh and Wen, 1989)

$$S_{aa}(t, \omega) = \frac{1}{\Phi'(t)} S_{\phi\phi}\left(\frac{\omega}{\Phi'(t)}\right) \quad (6)$$

$$S_{\phi\phi}(\omega) = S_0 \left[\frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right] \left[\frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \right] \quad (7)$$

는 변화하지 않는 $\bar{\zeta}(\Phi)$ 의 Clough and Penzien 스펙트럼이다. 주기변수 $S_0, W_g, \zeta_g, W_f, \zeta_f$ 는 Gauss Method에 근거 비선형적 최적화 과정을 사용한 $FS^2(\omega)$ 로부터 정의되어질 수 있다. 이에 관한 자세한 내용은 Wen 등(1988)의 연구에 자세히 기술되어 있다.

4. 구조물의 지진에 대한 거동 평가

본 연구에서 구조물의 층간변위와 손상도는 실제 기록된 Imperial Valley 지진을 이용할 것이고 신뢰성 평가를 위해서는 Imperial Valley 지역에 발생할 50개의 인공지진파를 이용할 것이다. 그림 1에는 실제 Imperial Valley 지진과 인공지진 50개중 2개가 보인다. 구조물의 거동 파악을 위한 지진에 대한 비선형 동적해석은 상용 해석 프로그램인 DRAIN-2DX를 이용한다. 구조물은 지면에 고정된 것으로 가정한다. 즉 지반-구조물 상호작용(Soil-structure Interaction)은 고려되지 않는다. 이 프로그램 상에서는 부재의 항복이 부재의 끝부분에서만 발생한다고 가정하므로 변형이 클 때 소성힌지는 부재의 단부에서 발생하게된다. 또한 반강접합 요소를 접합부에 사용하여 실제와 유사하게 변형할 수 있도록 하였다.

4.1. 층간변위와 전단력

Imperial Valley 지진에 대한 층간변위는 표 1과 2에 나타나 있고 층간변위와 층전단력은 그림 2와 3에 나타나 있다. 2층 건물의 최대변위는 1층에서 층고의 1.69% 발생하였고, 12층 건물에서는 9층에서 1.33% 발생하였다. 그림 2과 3에서 보여지고 있는 것처럼 2층 건물은 비선형 거동이 심해 많은 에너지를 발산(Energy dissipation)한 대 반하여 12층 건물은 크게 발산하지 않았고 선형적으로 거동하고 있음을 알 수 있다.

4.2. 누적 손상도 평가

지진시 구조물에 축적된 손상정도를 평가하기 위하여 많은 연구자들이 손상지표(Seismic Index)를 제안하고 있다. 본 연구에서는 Krawinkler(1983)에 사용했던 손상지표를 사용한다. 손상지표는 아래 식들에 의하여 평가될 수 있다. 지진하중하에서 철골구조물의 손상정도를 파악하기 위해, 누적 손상도 모델이 사용된다. Solomon은 크랙길이와 아래식에서 사이클 횟수사이의 관계를 유도했다.

$$\frac{da}{dN} = a a (\Delta\theta_p)^\beta \quad (8)$$

여기서 a 크랙길이, $\Delta\theta_p$ 는 소성 회전 범위, α, β 는 계수이다. 식 8을 이용해 파괴 사이클수의 관계식을 간단히 유도할 수 있다.

$$N_f = \frac{\log\left(\frac{a_c}{a_o}\right)}{11.75} (\Delta\theta_p)^{-\beta} \quad (9)$$

여기서 a_0 는 초기 크랙길이 ($\mu = 0.0016$ $\sigma = 0.0012$), a_c 는 최종 크랙길이 ($\frac{t_f}{2}$), β 는 이 식에서는 -1.61이고, N_f 는 파괴 사이클수이다. 손상지표는 선형적인 손상 누적에 대한 Miner 의 법칙에 기초하여 정의될 수 있다. 식 10은 손상 지표 D를 설명한다.

$$D = C \sum_{i=1}^n (\Delta\theta_x)^{1.61} \quad C = \frac{11.75}{2 \log(\frac{a_c}{a_0})} \quad (10)$$

여기서 D 는 손상 지표이고, n 는 반전횟수이고, $\Delta\theta_x$ 는 각 반전에서 소성회전 범위이다. 위 식에 의하여 평가된 건물의 층별 손상정도는 표 3과 4에 나타나 있다. 표에서 보이는 것처럼 2층 건물의 손상지표가 12층 건물의 손상지표에 비해 크다는 것을 알 수 있다.

4.3 극치확률이론 (Statistics of Extremes)을 이용한 평가

두 건물의 최대 층간변위를 50 개의 인위적으로 발생한 지진파들에 대하여 구하고 극치의 분포 (Distribution of Extremes)를 찾아내었다. 극치는 Type 1 임을 그림 4와 5에서 알 수 있다. Type 1 극치 분포의 계수 ($a_n, U_n, \mu_{x_n}, \sigma_{x_n}$) 들은 표 5 와 6에 나타나 있다. 그림 6과 7에서는 층간변위에 대한 누적확률 (Cumulative Probability)를 나타낸 것이다. 누적확률을 구하는 식은 아래에 나타나 있다. 이 그림에서도 극치확률은 지진 지역에서 건물이 다양하게 발생할 지진하중에 대하여 통계적인 피해 정도를 평가할 수 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{x_n} &= \exp[-\exp^{-a_n(x-u_n)}] \\ f_{x_n} &= a_n \exp^{-a_n(x-u_n)} \exp[-\exp^{-a_n(x-u_n)}] \\ \mu_{x_n} &= u_n + \frac{r}{a_n} \quad r = 0.57721 \\ \sigma_{x_n}^2 &= \frac{\pi^2}{6a_n^2} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $F_{x_n}(x)$ 는 극한값 X_n 에 대한 누적 분포 함수, $f_{x_n}(x)$ 는 극한값 X_n 에 대한 확률 밀도 함수이고, μ_{x_n}, σ_{x_n} 는 극한값 X_n 에 대한 평균값과 기준 분산이다.

5. 결론 및 추후 연구내용

같은 지진에 대하여 2층 건물의 최대 층간 변위의 크기는 12층 건물의 최대층간 변위 보다 최소한 40% 큰 것으로 나타났는데 이는 같은 지역에 설계된 건물이라도 그 높이에 따라 그 피해정도가 다름을 나타내는 것으로 내진설계의 기본 목적인 동일 위험 수위 개념에서 벗어난다 할 수 있다. 층간변위와 층전단력에 대한 그림 2, 3으로 부터 에너지 소산양도 2층 건물이 매우 큰 것이고 비선형 거동이 심화되어 있음을 알 수 있는데 반해 12층 건물은 대부분이 탄성적임을 알 수 있다. 손상도 지표를 비교해 보면 2층 구조물의 손상도 지표가 12 층의 지표에 비하여 매우 큰 것임을 알 수 있다. 2층과 12층 건물의 경우에서 1층과 10층에서 손상도 지표가 각각 가장 큰 것으로 나타났는데 이는 층간변위가 가장 큰 곳으로 층간 변위가 큰 부분이 그 손상정도가 크다고 결론 내릴 수 있다. 또한 12층 건물에서 층별 손상 정도와 층간변위를 각 층별로 비교해 보면 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 현행 규준에서 밀면전단력의 수직 분포 (Vertical Distribution of Base Shear)가 적절하지 않은 것이라 할 수 있다. 그 이유는 손상도의 정도는 전 층이 서로 유사해야하고 소성한지부는 전 건물로 분포되어야한다는 기본 개념에 위배되는 것이라 할 수 있다. 인공지진의 최대 층간 변위를 이용한 축적된 확률(Cumulative Probability)에서도 유사한 결과를 보인다. 따라서 추후 연구로는 현행 내진 설계 규준이 투명성을 보장하도록 개선하는 것으로 본 연구에서 찾아낸 문제점을 해결할 수 있도록 해야할 것이다.

참고문헌

1. International conference of building officials (ICBO), Uniform Building Code, Whitter, California, 1988.
2. American Institute of Steel Construction (AISC), Manual of Steel Construction (ASD), 9th, Illinois, 1989.
3. Yeh, C.H., Y.K Wen, Modeling of nonstationary ground motion and biaxial and torsional response of inelastic structures, SRS No.546, Dept.of Civil engr. University of Illinois, Urbana, 1989.
4. Yonathan Bard "Nonlinear parameter estimation" Academic press 1974
5. Eliopoulos T., Y.K. Wen "Methods of seismic reliability evaluation for moment resisting steel frames " SRS No. 562, Dept. of civil Engr. University of Illinois, 1991
6. Krawinkler H. and Zohreir M. "Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions" Computer and structures, Vol 16, No.1-4,1983, pp531-541

표 1. 2층 건물의 최대 층간변위

층	최대층간변위(cm)	최대층간변위/층고 (%)
1	7.62	1.69
2	6.35	1.58

표 2. 2층 건물의 최대 층간변위

층	최대층간변위 (cm)	최대층간변위/층고 (%)	층	최대층간변위 (cm)	최대층간변위/층고 (%)
1	2.29	0.5	7	3.81	0.95
2	2.57	0.64	8	4.82	1.21
3	2.79	0.69	9	5.00	1.25
4	3.04	0.76	10	4.57	1.14
5	3.55	0.89	11	4.50	1.13
6	3.10	0.78	12	2.38	0.60

표 3. 손상도 지표 (2층 건물)

층	Σ 외부 접합부	Σ 내부 접합부	합계
1	0.00508	0.00676	0.01186
2	0.00194	0.00206	0.00400
지붕층	0.00034	0.00238	0.00272

표 4. 손상도 지표 (12층 건물)

층	Σ 외부 접합부	Σ 내부 접합부	합계	층	Σ 외부 접합부	Σ 내부 접합부	합계
1	0	6.05e-8	6.05e-8	8	4.68e-5	1.25e-4	1.72e-4
2	0	0	0	9	1.35e-4	2.04e-4	3.39e-4
3	0	0	0	10	3.07e-4	4.66e-4	7.74e-4
4	0	5.67e-8	5.67e-8	11	8.05e-5	3.15e-4	3.96e-4
5	0	2.82e-5	2.82e-5	12	1.01e-6	3.16e-5	3.26e-5
6	4.32e-7	3.60e-5	3.65e-5	지붕층	0	9.13e-6	9.13e-6
7	1.71e-6	3.12e-5	3.29e-5				

표 5. 2층 건물의 Type 1 분포의 계수

층 \ 계수	α_n	U_n	μ_{xn}	σ_{xn}
1	0.9183	3.2667	3.8951	1.3966
2	1.7738	2.2550	2.5804	0.7231

표 6. 12층 건물의 Type 1 분포의 계수

층 \ 계수	α_n	U_n	μ_{xn}	σ_{xn}	층 \ 계수	α_n	U_n	μ_{xn}	σ_{xn}
1	2.5500	1.2966	1.5901	0.6523	7	2.8125	1.3867	1.5919	0.4560
2	2.3400	1.3722	1.6181	0.5465	8	2.8750	1.3913	1.5921	0.4611
3	2.3333	1.3714	1.6188	0.5465	9	2.4063	1.6000	1.8399	0.5330
4	2.9375	1.2936	1.4901	0.4366	10	2.3125	1.6000	1.8496	0.5546
5	2.8250	1.3097	1.5141	0.4540	11	3.1536	1.6000	1.7829	0.4063
6	3.3750	1.3037	1.4747	0.3800	12	5.2188	1.1976	1.3082	0.2458

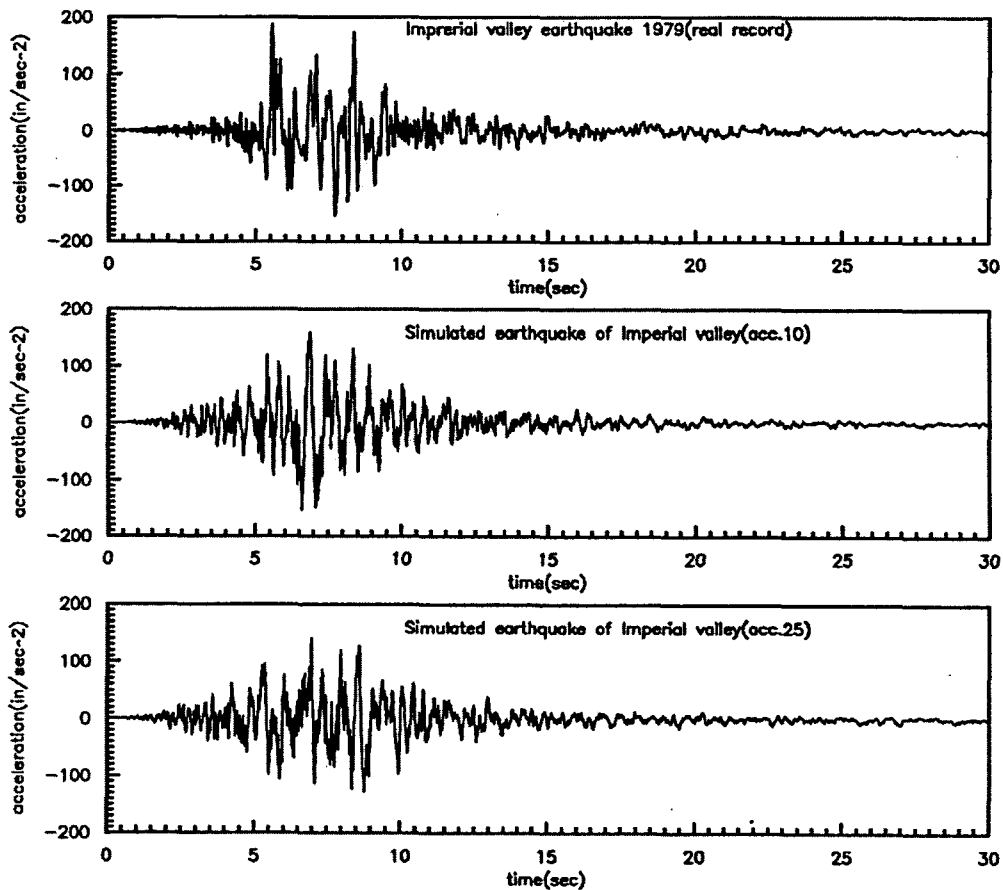


그림 1 Imperial valley(1979) 실제지진과 인공지진

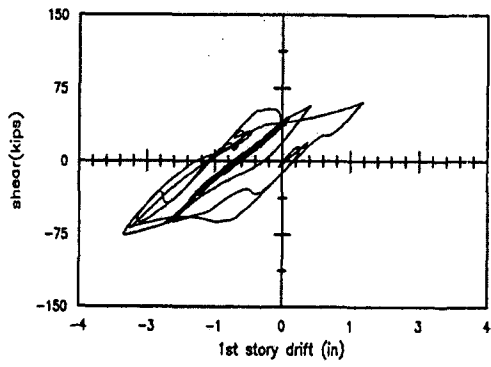


그림 2 층간변위 vs. 층전단력(2층)

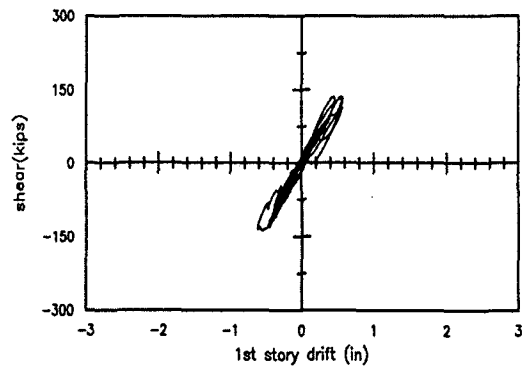


그림 3 층간변위 vs. 층전단력(12층)

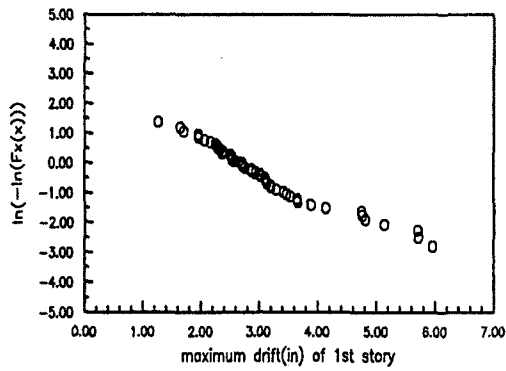


그림 4 극치분포(2층건물)

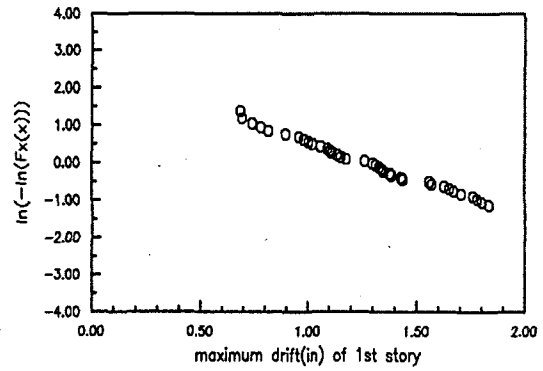


그림 5 극치분포(12층건물)

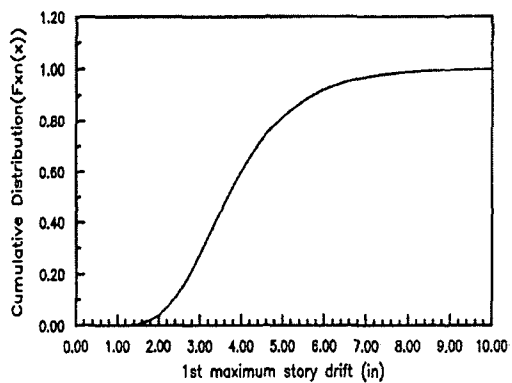


그림 6 누적 확률 분포(2층건물)

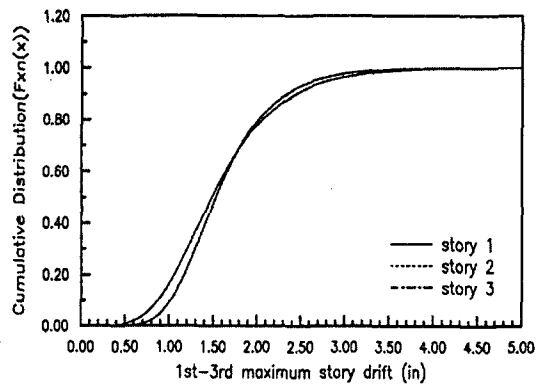


그림 7 누적 확률 분포(12층건물)