

해석방법에 따른 빌딩구조물의 비탄성 응답 평가

Estimation of Inelastic Response for Building Structure by Analysis Method

장 동 휘* 송 종 겐** 정 영 화***
Chang, Dong-Hui Song, Jong-Keol Chung, Yeong-Hwa

Abstract

Recent earthquakes have shown that near-field earthquakes can produce spectral demands significantly larger than those considered in current design code. International Atomic Energy Agency (IAEA) has recently initiated a coordinated research program on safety significance of near-field earthquakes. The purpose of this program is to focus on the assessment of vulnerability of nuclear facility structures by using and adapting the best available engineering practices appropriate to evaluate the effects of near-field earthquakes. The objective of this paper is to evaluate of seismic responses of a shear building test specimen subjected to near-field earthquakes. To achieve the objective, the seismic responses of the test specimen, evaluated by the Displacement Coefficient Method (DCM) and Nonlinear Dynamic Analysis (NDA), are compared with those by the experimental tests.

키워드 : 근거리지진, 변위계수법, 비선형동적해석,
Keywords : *near-field earthquakes, Displacement Coefficient Method, Nonlinear Dynamic Analysis*

1. 서론

최근 발생한 대규모 지진으로 인해 많은 인명 및 재산상의 피해가 보고된 바 있다. 특히 Northridge(1994)지진을 비롯하여 Kobe 지진(1995년), Chi-chi 지진(1999년), Kocaeli 지진(1999년) 및 Duzce 지진(1999년) 등에 의해 많은 인적, 경제적 피해를 입었다. 이들 지진의 특징은 피해지역이 지진을 발생시킨 활성단층과 매우 인접되어 있어 그 피해가 매우 컸으며, 과거의 내진설계기준에 따라 설계된 구조물의 피해도 매우 큰 것으로

보고되고 있다. 이는 근거리 지진(Near-Field Earthquake 또는 Near-Fault Earthquake)이 가지는 지진파의 특성이 과거 설계기준에서 제시하고 있는 입력지반운동이나 원거리 지진과 다른 특성을 가지고 있기 때문이다. 근거리 지진은 단층의 활동으로 인해 지진발생 초기에 펄스(Pulse)형태의 매우 큰 속도성분을 가지고 있으며 그에 따른 변위량도 매우 크게 나타났다. 이는 일반적인 원거리 지진에 비해 동일한 가속도를 갖는 경우 속도 및 변위성분이 매우 큰 값을 보여주는 것으로 지진파가 가지는 에너지가 매우 크다고 할 수 있다. 근거리지진에 대한연구는 세계적으로 아직 초기단계에 있는 실정이다. 최근 국내 연구 발표에서도 근거리지진은 REG GUIDE1.60 에 비교해서 가속도 및 속도 변위응답스펙트럼은 저진동수 구간에서

* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

** 강원대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

*** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

큰 값을 가지므로 저 진동수 구조물이 근거리 지진을 받을 경우 피해가 발생할 수 있다고 했다.

근거리 지진의 특성에 영향을 미치는 활성단층의 특성, 단층활동의 방향성, Fling의 영향등에 대한 연구가 현재 미국, 일본 및 터키 등을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 구조물에 대한 영향을 평가하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 따라서 IAEA에서는 근거리 지진에 대한 구조물의 비탄성 응답 특성을 분석하기 위하여 전단 빌딩 시험체에 대하여 진동대 실험을 수행하였다. 본 연구는 전단 빌딩 시험체에 대한 실험결과와 비교하기 위하여 해석모델 작성과 작성된 해석모델을 이용하여 근거리지진의 특성을 반영할 수 있는 해석 기법을 제시하고자 하였으며, 변위-기반방법에서 사용되는 방법중하나인 변위계수법을 포함한 시간이력 해석 방법에 의한 지진응답의 비교를 통하여 해석 방법들의 정확성을 분석하였다. 일련의 해석 자료를 통하여 향후 근거리지진에 대비한 구조물 및 기기의 내진안전성 평가에 기초 자료로서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 빌딩 시험체의 특성 및 입력지진

2.1 빌딩 시험체의 형상 및 제원

진동대 실험에 사용된 전단빌딩 시험체의 제원 및 형상을 그림 1에 나타내었다. 각층별 단면에서의 주철근 배치에 대한 자료는 그림 1과 표 1에 나타내었다. 콘크리트의 재료적 특성은 압축강도가 25MPa이고 탄성계수가 28,000MPa인 콘크리트가 선택되었으며, CEBTP(프랑스 토목공학 실험실)에 의해 직경160mm 원형상에서 일반적인 압축 및 스플리팅(Splitting)시험으로 얻어졌다. 그리고 그 시험결과를 표.1 에 나타냈다. 시험구조물은 전단안전계수를 증가 시키기 위해서 약간의 수정으로 프랑스 PS92 내진설계기준에 따른 철근보강재를 사용하고 있으며, 추가 수직철근은 미끄러지는 전단 파괴에 대한 위험을 줄이기 위해서 벽체의 중심부분에 설치하였다. 철근보강재의 직경은 4.5, 5.0, 6.0mm가 사용되었으며, 각 위치별 사용된 세로방향의 철근보강재는 표 1 과 같다. 그리고 철근보강재의 인장시험결과를 또한 표2에 표시하였다.

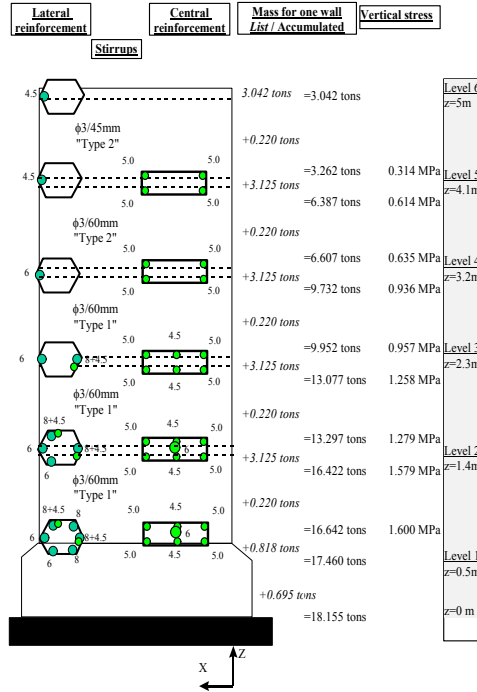


그림 1 예제교각의 형상 및 제원

표 1 철근상세 (단위 : mm²)

Level	Each side of the wall	Center of the wall
6	Φ4.5=15.9	Nothing
5	Φ4.5=15.9	4 Φ5=78.4
4	Φ6=28.3	4 Φ 5=78.4
3	6+Φ8+Φ4.5=94.4	4 Φ5+2Φ4.5=110.2
2	2Φ6+2Φ8+2Φ4.5=188.9	4Φ5+2Φ4.5+Φ6=138
1	4Φ8+2Φ6+2Φ4.5=289.4	4Φ5+2Φ4.5+Φ6=138

표 2 철근의 재료특성

Diameter Φ	Yield stress f_y	Maximum stress f_r	Strain corresponding to f_r (ϵ_{gt})
4.5mm	465MPa	520 MPa	2.5%
5mm	570 MPa	605 MPa	2.5%
6mm	515 MPa	565 MPa	5.5%
8mm	430 MPa	450 MPa	5.0%

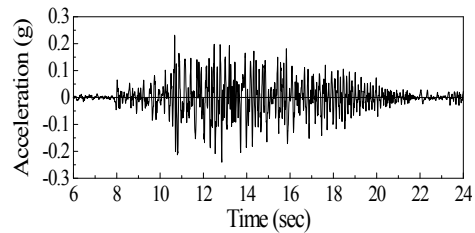
표 3 콘크리트의 재료특성

Age (days)	Compression		Splitting test
	Strength (fc)	Young modulus E	Conventional Ft
63	35.0Mpa	30700Mpa	3.8Mpa
61	38.2Mpa	31400Mpa	3.9Mpa
55	37.4Mpa	32500Mpa	4Mpa
50	29.4Mpa	28000Mpa	3.6Mpa

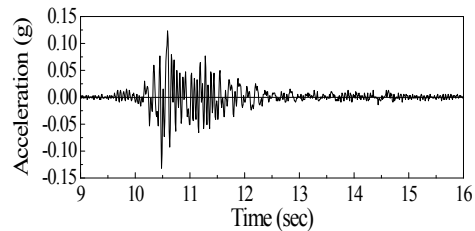
2.2 탄성응답스펙트럼과 입력지진

근거리 지진의 일반적인 특성은 그림2에 보여있는 것처럼 지진파의 최기에 나타나는 펄스형태의 매우 큰 속도와 큰 장주기 성분으로 대변할 수 있다. 이러한 펄스형태의 운동은 큰 에너지를 가지고 있어 구조물에 큰피해를 발생시킬 수 있으며, 특히 펄스의 주기와 근접한 고유주기를 갖는 구조물의 경우 구조물의 응답이 급격히 증가하게 된다. 실증시험에 적용한 입력지진파는 크게 2가지의형태로 나누어진다. 첫번째, 원거리운동을 나타내는 인공지반운동 즉, Nice지진(RUN1)과 두번째로 근거리운동을 나타내는 San Francisco 지진 (RUN2)이고,

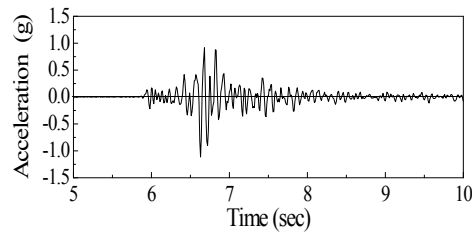
이들 지진파와 대응되는 응답스펙트럼을 그림 2에서 비교해 놓았다. 그리고 2종류의 기본지반운동을 포함하여 추가적으로기하학적 축척을 고려한 2종류의 (RUN3,RUN4)의 입력운동을 새롭게 생성하여 4종류의 지반운동을 표 4 과 그림2 에 나타내었다.



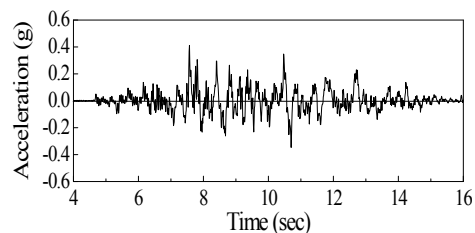
(a) RUN1 지진기록



(b) RUN2 지진기록



(c) RUN3 지진기록



(d) RUN4 지진기록

그림 2 인공지진가속기록

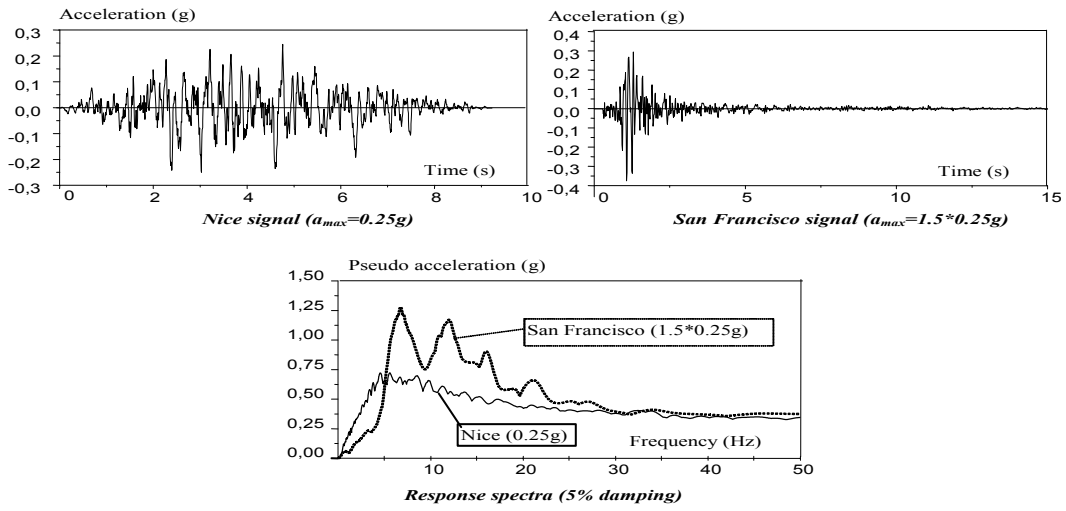


그림 3 원거리(인공) Nice 지진과 근거리San Francisco 기록지진

표 4 실증실험의 가진

시험	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
최대수평 가속도	Nice 지진 0.25g	San Francisco 지진 0.13g	San Francisco 지진 1.11g	Nice 지진 0.72g

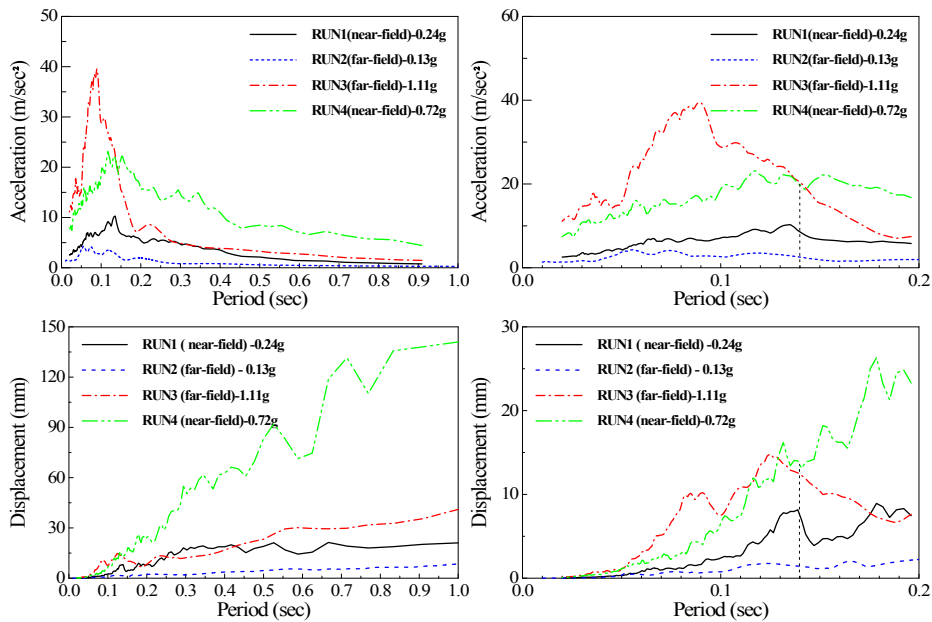


그림 4 탄성 응답스펙트럼

3. 비탄성 정적해석

해석에 대한 모델링은 실험에서 사용되어진 시험체의 한쪽 벽체에 대하여 그림 5 와 같이 column 요소를 사용하여 모델링 하였다. 실험결과와 비교하기 위하여 횡방향 거동에 대해서만 고려하였다. 빌딩구조물의 비탄성 정적해석(pushover analysis)과 비탄성 시간이력해석은 IDARC2D Version 4.0프로그램(Valles, Reinhorn, Kunnath, Li and Madan, 1996)을 사용하여 수행하였다. 해석에 앞서 층별 단면에 대한 Moment curvature 관계를 구하였으며, 해석결과는 그림 7 에 나타내었다.

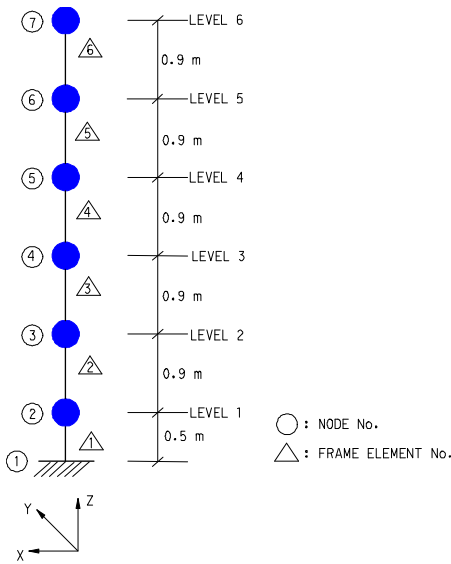
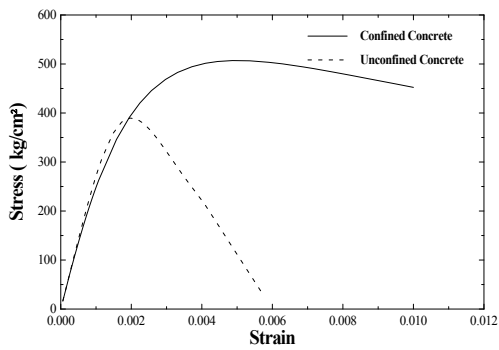
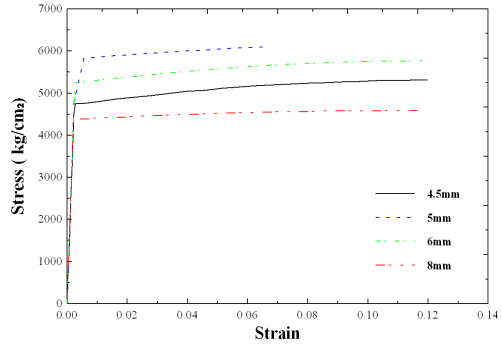


그림 5 기둥요소를 이용한 모델링



(a) 콘크리트



(b) 철근

그림 6 재료의 응력특성

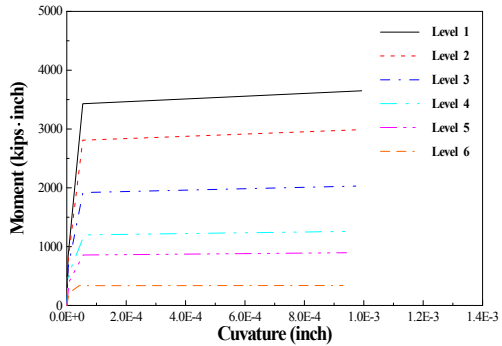


그림 7 층별단면의 모멘트-곡률관계

고유치해석을 통하여 시험체의 고유진동수를 구한 결과를 실험에 의한 결과와 비교하여 표 5 에 나타내었다. 모드별 형상은 그림 9 에 나타내었다. 해석모델의 기본고유진동수는 실증시험결과(RUN 1)에서는 7.24Hz이고 해석결과는 7.27Hz로 시험결과와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 구조물의 모델링은 타당하다고 판단되어 해석을 진행하였다. 비탄성 정적해석에 대한 결과는 힘과 변위에 관계 형태인 역량곡선을 그림 8 에 나타내었다.

표 5 구조물의 고유치 해석

고유치해석				
진동 모드	1	2	3	
고유진동수 (Hz)	7.27	35.27	96.27	
모드감쇠비	0.05	0.05	0.05	
실험 응답치				
시험	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4
고유진동수 (Hz)	7.24	7.24	7.03	6.6

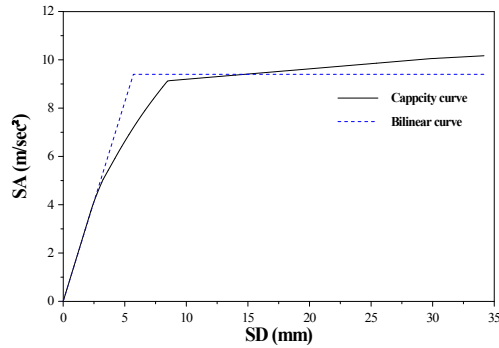
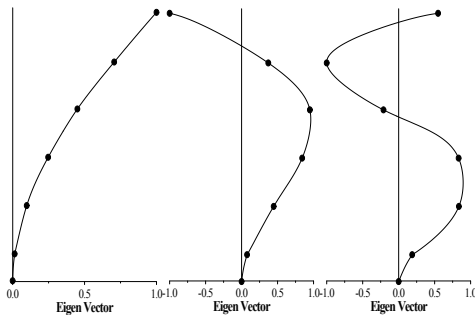
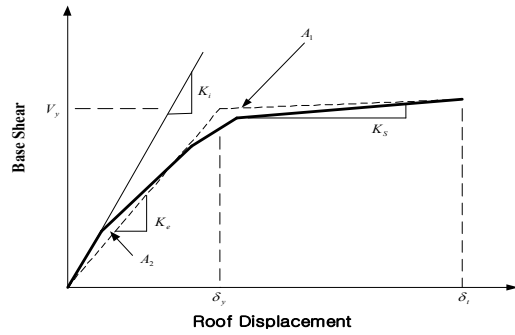


그림 8 구조물의 역량곡선



a) 1차모드 b) 2차모드 c) 3차모드

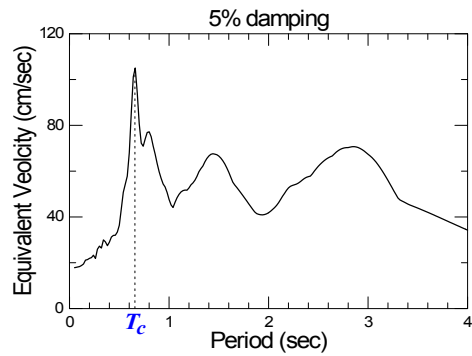


그림 9 구조물의 모드별형상

4. 변위 계수법에 의한 최대변위 응답의 평가

구조물의 내진성능을 평가하는 방법으로 적용되고 있는 비선형 정적해석법은 여러 가지가 있다. 그 중 FEMA-273 보고서에 구조물의 탄성응답에 변위계수들을 곱하여 비탄성 응답을 구하는 방법이 있다.

변위 계수법을 이용하여 목표변위(최대비탄성 변위)를 산정하는 절차는 다음과 같다. 먼저 비선형 정적해석(pushover analysis)에 의하여 산정된 하중-변위 관계를 이선형(bilinear) 곡선으로 이상화 시킨다. 이 선형 곡선을 형성하는 간단한 방법은 그림 10에서 항복 이후의 강성을 나타낼 수 있는 직선을 작성한 후에 면적 A1과 A2가 같게 되는 직선을 작성하면 된다. 항복 이후의 강성(K_s), 유효강성(K_e), 초기강성 (K_i)을 산정한 후 이상화된 이 선형 곡선에서 구조물의 항복변위를 산정한다. 초기강성과 유효강성을 이용하여 구조물의 유효주기(effective fundamental period,)를 다음과 같이 산정할 수 있다.

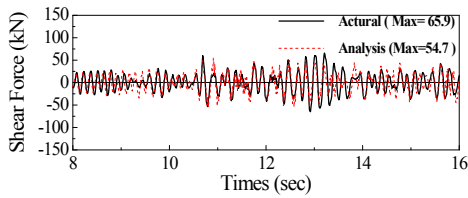
지진가속도 기록의 입력에너지 스펙트럼을 5% 감쇠비에 대하여 작성한 후에 이 스펙트럼의 최대값에 대응하는 주기를 구하여 특성주기로 정의하기도 한다.

표 6 각지진에 따른 상층부 최대비탄성변위

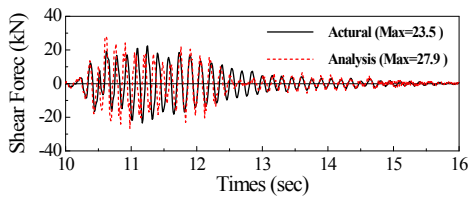
RUN	Sa. m/s^2	T_e	T_0	C_0	C_1	C_2	C_3	δ_t
1	8.49	0.14	0.285	1.4	1.2	1.2	1	7.55
2	2.53	0.14	0.12	1.4	1	1	1	1.76
3	19.77	0.14	0.12	1.4	1	1.2	1	16.5
4	21	0.14	0.285	1.4	1.8	1.5	1	39.5

5. 시간이력해석에 의한 최대변위 응답의 평가

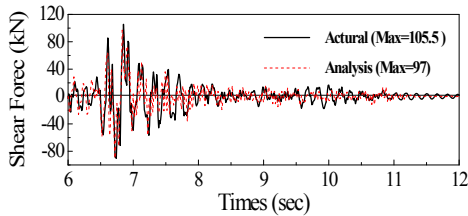
시간이력해석에 의한 상층부 변위이력을 실증시험에 의한 변위 이력과 비교하여 그림 13에 나타내었다. 변위계수법과 시간이력해석의 변위응답을 실험치와 비교하기 위하여 최대변위 값으로 정리하여 표 6에 나타내었다. 표 7에 나타낸 바와 같이 시간이력해석방법이 실증시험 보다 과소 평가하는 경향을 보이고 있다.



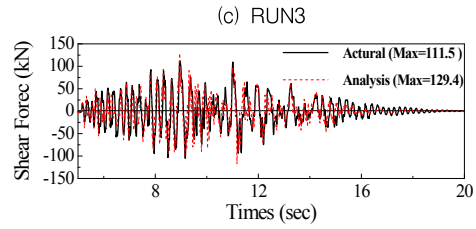
(a) RUN1



(b) RUN2

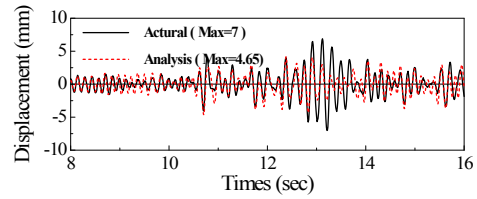


(c) RUN3

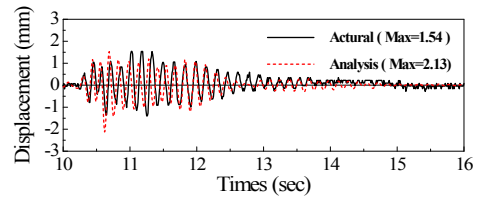


(d) RUN4

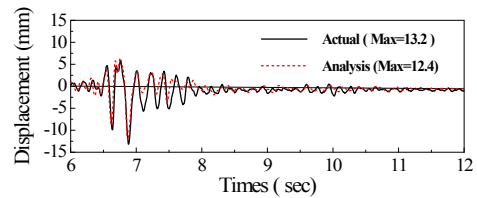
그림 12 전단이력비교



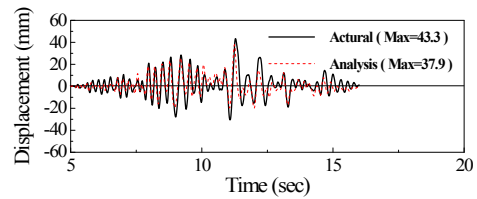
(a) RUN1



(b) RUN2



(c) RUN3



(d) RUN4

그림 13 상층부의 변위이력비교

표 7 전단빌딩 시험체의 상층부 최대변위응답에 대한 실험결과와 해석별 결과비교

변위(mm)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
실증시험	7.0	1.54	13.2	43.3
변위기반법	7.55 (7%)	1.76 (14%)	16.5 (25%)	39.5 (-9%)
시간이력해석	4.16 (-40%)	2.13 (38%)	11.6 (-12%)	37.3 (-14%)

참고: ()안의 값을 실증시험에 대한 해석치의 불일치 정도

참고) 불일치(%): $\frac{D_c - D_t}{D_t} \times 100$

D_t = 인공지진에 대한 실증시험의 최대변위

D_a = 해석방법에 따른 추정변위

이는 실증시험의 경우 하나의 시험체에 대하여 네 가지 입력지진에 대하여 연속적으로 실험을 수행하였기 때문에 손상이 누적되지만 해석의 경우 누적손상부분과 강도저하의 영향을 고려하지 못하였기 때문에 이 같은 원인이 과소평가하는 데에 다소 영향을 주었을 것으로 판단된다. 특히 원거리 인공지진인 RUN1과 RUN4에 대하여 과소평가하는 정도가 근거리 실제지진기록인 RUN2와 RUN3에 비하여 큼을 알 수 있다. 이와 달리 변위기반법의 경우는 전반적으로 과대평가하는 경향을 보이고 있다. 변위계수법의 과대평가의 정도가 25%미만으로 비교적 실증시험과 잘 일치하므로 내진설계 및 내진성능평가의 목적으로 사용하는 데에는 안전측으로 유도를 하므로 적절하다고 판단된다. 하지만 RUN4의 경우 실증시험보다 과소 평가하는 경향을 보이고 있는데 이는 앞에서 설명했듯이 실험이 연속적으로 수행되었고, 실험이 진행되는 동안 많은 손상을 입은 상태에서 붕괴수준까지의 가진을 적용시켰기 때문으로 판단된다. 변위계수법은 내진설계의 목적으로 만들어진 방법으로 각각의 보정계수가 보수적으로 작성되었기 때문에 과대평가하는 경향을 나타낸다고 판단된다. 전반적으로는 변위계수법이 시간이력해석에 비하여 비탄성 변위 응답을 정확하게 나타냄을 알 수 있다. 하지만 이는 하나의 시험체에 대한 결과이므로 정확한 경향을 도출하기에는 부족하며 많은 수의 시험체에 대한 분석이 필요하다고 판단된다.

6. 결론

빌딩 시험체에 대하여 진동대 실험에 의한 실험치와 변위계수법 및 시간이력해석과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 변위-계수법은 내진설계에 적용이 편하게 만들어진 간편한 방법이므로 각각의 보정계수가 보수적으로 작성되어 다소 과대평가하는 경향이 있다.

2) 시간이력해석은 RUN2의 입력지진에 의한 응답을 제외하고는 전반적으로 과소평가하는 경향이 있다. 이는 시간이력해석시 강도저하와 누적손상에 대한 부분을 고려하지 못한 영향이 하나의 원인으로 작용했다고 사료된다.

3) 향후연구과제로 비탄성응답특성을 평가하는 방법 중 최근에 많이 연구되고 있는 역량곡선에 의한 방법을 추가적으로 해석하고자 한다

참 고 문 헌

- [1] 이동근, 송종결, 윤정방 “지진에 대한 고층구조물의 시스템 연성요구도 평가방법” *대한토목학회*, 제17권, 제 I -2호, 1997, pp.245-257
- [2] Report DM2S, IAEA CRP-NFE Camus Benchmark, Experimental results and specifications to the participants
- [3] Fajfar, P. and Fischinger.M. 'Non-linear seismic analysis of RC buildings : implications of a case study, "Eur. Earthquake Engng 1987, Vol.1,pp. 31-43
- [4] Valles R.E., Reinhorn A.M., Kunnath S.K, Madan A.- IDARC2D Version 4.0 :A Computer Program for the Inelastic Damage Analysis of Building, *Technical Report NCEER-96-0010, NCEER, State University of New York at Buffalo, 1996*
- [5] FEMA 356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. American Society of Civil Engineers. November 2002. Washington
- [6] UCFyber - Cross section analysis software for structural engineers (2000) Zevent™