

## 지진하중의 특성과 이력모델에 따른 저층 표준학교건물의 비탄성 지진거동

김진상<sup>1</sup>, 윤태호<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>인제대학교 건축학과, <sup>2</sup>창원대학교 건축학부

### Inelastic Seismic Behavior of Low-story Standard School Buildings according to Characteristics of Earthquake Loads and Hysteresis Models

Jin-Sang Kim<sup>1</sup> and Tae-Ho Yoon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Architecture, Inje University

<sup>2</sup>School of Architecture, Changwon National University

**요약** 본 연구는 내진설계 되지 않은 학교시설물 중 다수를 차지하는 1980년도 표준설계 도면(건설부 공고 제130호, 1980년 10월 28일)에 의하여 건설된 국내에 현존하는 4층 모멘트 연성골조의 학교건물을 대상으로 이력모델의 특성과 지진파의 특성에 따라 표준학교건물의 비탄성지진거동을 분석하고자 한다.

El-centro지진은 주파수 성분과 강진지속시간의 특성에 의하여 표준학교건물의 단변방향 층전단력, 층간변위비, 층변위 응답에 매우 큰 영향을 미치며 특히 수정다케다모델 선택시 응답의 차이가 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 층전단력의 경우 최대 46%, 층간변위비의 경우 최대 70%, 층변위의 경우 최대 59%의 편차를 보인다. Santa Monica지진은 장변방향의 응답에서 이력모델별 편차가 더 크게 나타났으며, 층전단력은 최대 59%, 층간변위비는 최대 65%, 층변위는 최대 50%의 편차를 보였다. 이는 장변방향의 고유주기가 단변방향에 비하여 크기 때문에 1초이상의 주기성분이 많은 Santa Monica지진의 특성에 의한 것으로 판단된다. Taft지진은 이력모델에 따른 층간변위비와 층변위 응답의 편차가 가장 적은 것으로 나타났으며, 층간변위비는 최대 15%, 층변위는 최대 5%의 편차를 보여 변위응답에 있어서 이력모델에 가장 의존도가 적은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단 된다.

**Abstract** The inelastic response characteristics of the standard school buildings depending on selection of hysteresis models and variable earthquakes are studied. Three earthquake records of El-centro, Santa-Monica, Taft in accordance with KBC2009 standard and four inelastic hysteresis models such as Degrading tri-linear model, Clough model, Takeda model, and Modified Takeda model are used. The inelastic response characteristics such as story shear force, story drift ratio, story displacement are reviewed. As results, El-centro earthquake shows large response in transverse direction and Santa Monica earthquake shows larger response in longitudinal direction on the contrary. Taft earthquake shows less variation of story drift ratio and story displacement for all hysteresis models and stable response.

**Key Words** : Earthquake characteristics, Hysteresis Model, Inelastic Behavior, Time History Analysis, Standard School Building

본 논문은 2011학년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것임.

\*Corresponding Author : Tae-Ho Yoon

Tel: +82-0-8786-3802 email: [thyoona@changwon.ac.kr](mailto:thyoona@changwon.ac.kr)

접수일 12년 07월 05일

수정일 (1차 12년 08월 06일, 2차 12년 08월 30일)

게재확정일 12년 09월 06일

### 1. 서론

학교시설물의 내진설계는 2008년 제정된 지진재해대책법 제14조 및 지진재해대책법시행령 제10조의 규정에 따라 2009년 학교시설 내진설계기준이 제정·고시됨으로써 신축학교건물 뿐만 아니라 기존 학교건물에 대해서도 내진성능을 확보하도록 하는 법적근거를 마련하게 되었다. 그러나 2008년 전국의 초중고 학교시설의 내진설계 현황조사[1,2]에 따르면 전체 11,293개 학교, 65,049동의 학교시설물 중 내진설계대상건물은 18,329동이며, 이 중 내진설계 된 시설물은 2,417동으로 13.2%에 불과하며, 86.8%가 내진설계 되지 않은 것으로 조사되었다. 이에 교육과학기술부는 내진설계 되지 않은 학교시설에 대하여 연차적으로 내진보강계획을 수립하여 2010년부터 내진보강을 시행중에 있다.

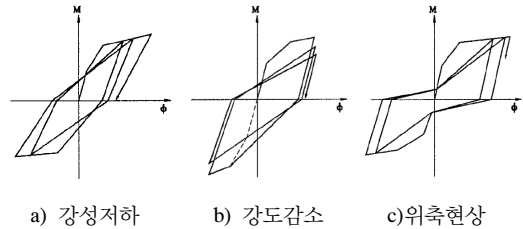
기존 학교시설물의 내진보강을 위해서는 현재의 보유 내진성능을 적절히 평가[3]하고 내진보강방법의 선정 및 내진보강설계, 보강 후 내진성능평가, 그리고 보강공사의 단계를 거치는 것이 일반적이다. 이 중 기존 학교시설물이 보유한 내진성능을 정확히 평가하는 것은 경제적인 보강비용과 적절한 보강방법의 선택에 필수적인 요소라 할 수 있으며, 이를 위해서는 지진에 대한 대상건물의 시간이력동적해석이 필요하다. 건물의 지진에 대한 동적거동해석은 구조부재의 비탄성거동을 표현하는 이력모델과 지진파의 탁월주기, 강진지속시간 등 파동특성에 큰 영향을 받으므로 이에 대한 정확한 이해와 특성의 차이를 연구할 필요성이 있다[4].

본 연구에서는 내진설계 되지 않은 학교시설물 중 다수를 차지하는 1980년도 표준설계 도면(건설부 공고 제 130호, 1980년 10월 28일)에 의하여 건설된 국내에 현존하는 4층 모멘트 연성골조의 학교건물을 대상으로 이력모델의 특성과 지진파의 특성에 따라 표준학교건물의 비탄성지진거동을 분석하여 내진보강설계를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

### 2. 이력모델

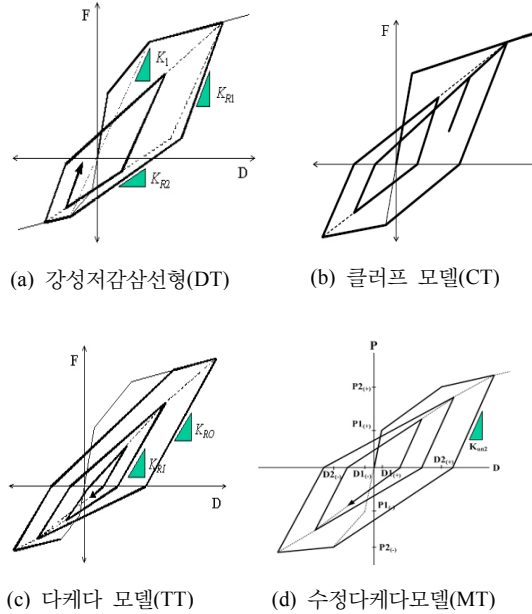
비선형 이력모델은 단면 혹은 재료의 특성에서 파악할 수 있는 항복강도, 강성 및 강도의 저감정도를 지진하중과 같은 반복하중을 받는 경우에 어떠한 방식으로 변화하는가를 평가함으로써 정의할 수 있다. 하중과 변형에 대한 이동경로를 지정하기 위하여 일반적으로 하중의 재하(loading), 제하(unloading), 재재하(reloading)의 상태를 고려한다.

이들은 통상적으로 특정한 실험 데이터에 근거하고 있다. 따라서 이들을 실험과 다른 구조물에 적용할 때는 그림 1과 같은 이력거동의 특성과 제한사항을 충분히 인식하여야 한다[4].



[그림 1] 이력응답의 주요 특징  
[Fig. 1] Characteristic of Hysteresis Model

본 연구에서는 철근 콘크리트 구조물에 사용되는 대표적인 이력모델[5,6] 4가지 경우를 비교 검토해 보았다.



[그림 2] 대표적인 일축힌지 이력모델  
[Fig. 2] Typical Hysteresis Models

### 3. 지진하중

#### 3.1 지진하중의 선정

지진하중은 부지에서 측정한 시간이력을 사용하는 것

이 원칙이지만 우리나라의 경우 설계지진과 같은 규모의 계속된 지진기록이 없으므로 건물의 지진거동분석의 많은 연구에서 널리 사용되어온 El-centro지진, Santa Monica지진, Taft지진을 사용하기로 한다[표 1, 2참조].

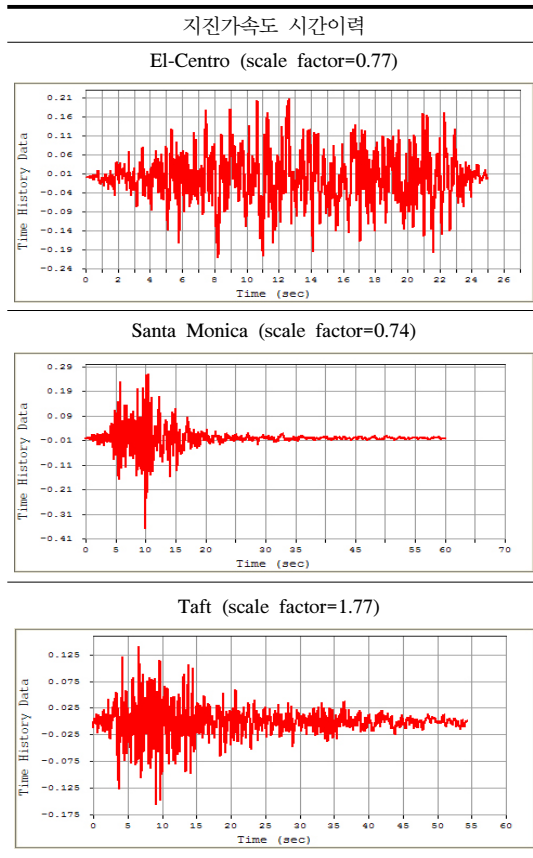
[표 1] 지진가속도의 특성

[Table 1] Earthquake properties

	방향 (Deg)	Peak(g)	지속시간 (Sec)
1940, El Centro Site	270	0.3569	53.72
1994, Northridge, Santa Monica	0	-0.3703	59.98
1952, Taft Lincoln School	69	-0.1557	54.38

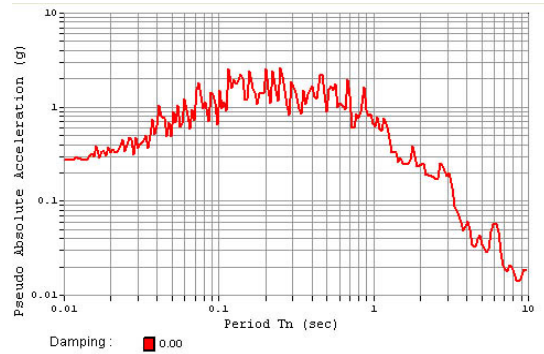
[표 2] 지진가속도 기록

[Table 2] Earthquake records

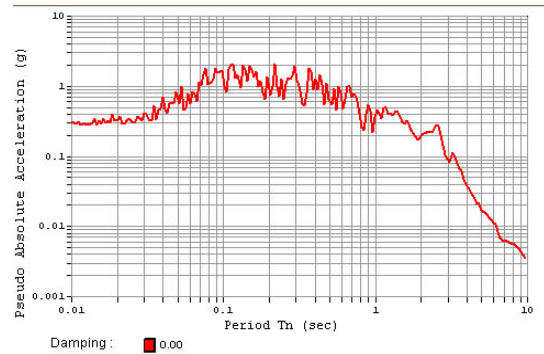


지진 가속도 사용 시, 지진파의 특성을 유사하게 만들기 위해서 지진가속도의 최대(Peak)값을 모두 0.275g로 맞추는 스케일(Scale) 조정을 하였다.

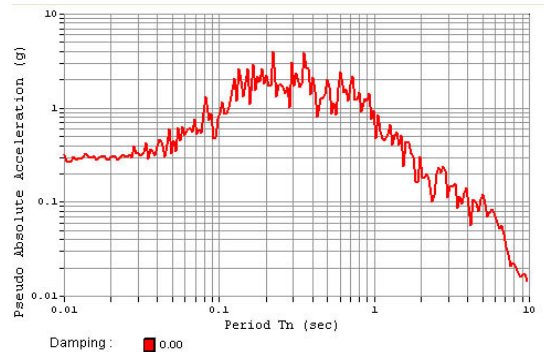
장진지속시간은 Santa Monica지진이 가장 짧고 Taft, El-centro의 순서로 길어진다. 주파수성분을 비교해보면 Santa Monica지진은 단주기영역과 0.1초에서 1초사이의 가속도가 비교적 일정하고 1초 이상의 장주기부분이 크게 나타나며, El-centro지진은 주기에 따라 가속도 크기가 변동성이 크게 나타나고, Taft지진은 0.1에서 1초사이의 가속도가 지배적이다[그림 3참조].



(a) El-centro 지진



(b) Santa-monica 지진



(c) Taft 지진

[그림 3] 대표적인 외국 지진

[Fig. 3] Pseudo Acceleration of Earthquakes

### 4. 지진거동해석

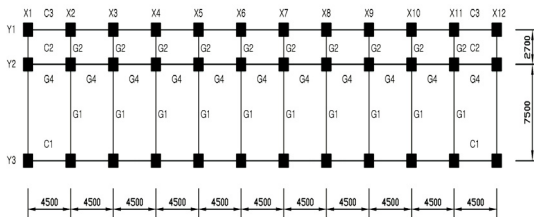
#### 4.1 해석모델 개요

본 연구의 대상은 1980년도 건설부공고에 의한 표준 설계학교건물로서 기본 특성은 다음과 같다.

콘크리트 설계기준강도는 18MPa, 철근강도는 240MPa이며, 조적벽과 콘크리트의 노후화는 무시하였다. 건물은 4층이고, 층고는 3.3m이다. 해석에 사용된 수직하중은 표 3과 같으며, 학교건물의 구조평면도는 그림 4와 같다.

[표 3] 수직하중(kN/m<sup>2</sup>)  
[Table 3] Gravity Loads(kN/m<sup>2</sup>)

구분	교실 SLAB	지붕 SLAB
고정하중 (DL)	마루=0.20	보호몰탈=0.80
	몰탈 = 0.60	경량콘크리트=1.0
	R.C.SLAB(t=130mm) = 3.12	몰탈 및 방수층 = 0.40
		R.C.SLAB(t=130mm) = 3.12
	합계= 3.92	합계= 5.32
활하중(LL)	3.0	3.0



[그림 4] 학교 건물의 기준층 구조평면도(단위:mm)  
[Fig. 4] Structural plan(Unit:mm)

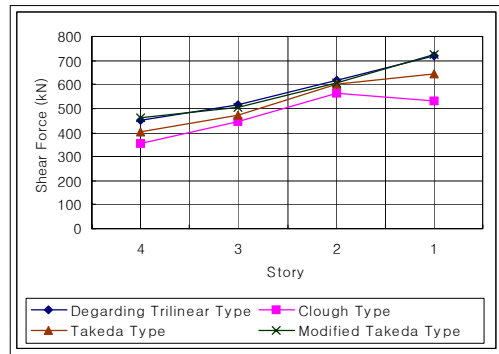
대상건물의 비탄성지진거동해석은 MIDAS-GEN[6]을 사용 하였고 비탄성해석을 위하여 직접적분법을 사용하여 시간이력해석을 수행하였다.

#### 4.2 층전단력 해석결과

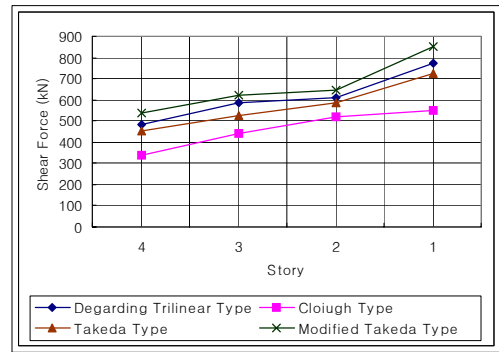
El-centro지진의 경우, 장변방향에서는 2층과 3층에서 강성저감삼선모델이, 1층과 4층에서 수정다케다모델이 가장 큰 전단력을 나타냈고, 전 층에서 클러프모델이 가장 낮은 전단력이 나타냈다. 그 비율이 최고 36% 차이가 났다. El-centro지진에 대한 층전단력결과는 강선저감삼선형과 수정다케다모델은 1층부터 4층까지의 값이 비례

적으로 나타나 1차진동모드의 영향이 지배적인 것으로 보인다. 다케다모델과 클러프모델은 1층에서 층전단력이 감소하는 경향을 보이는데, 이는 소성힌지발생에 의하여 지진에너지가 소산되어 나타난 결과로 판단된다.

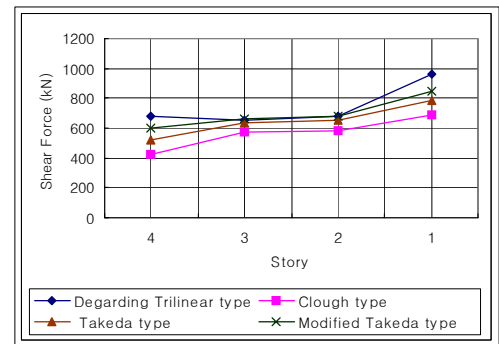
El-centro지진과 Taft지진에서 2층과 3층의 층전단력은 이력모델간 차이가 비교적 적어 비슷한 값을 보이나 Santa Monica지진에서는 이력모델간의 차이가 넓게 나타나 강진지속시간이 짧을수록 이력모델간의 층전단력 차이가 큰 것을 알 수 있다.



(a) El-centro지진



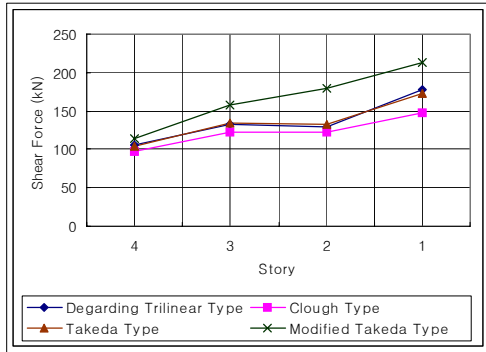
(b) Santa Monica지진



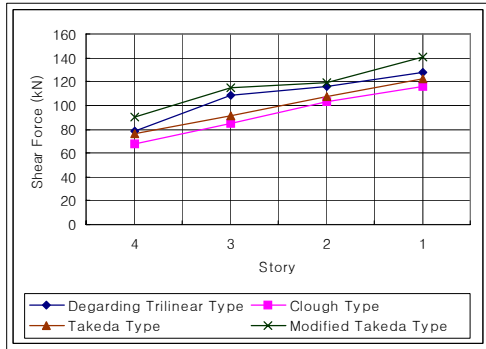
(c) Taft지진

[그림 5] 층전단력 해석결과(장변방향)  
[Fig. 5] Story Shear(X-direction)

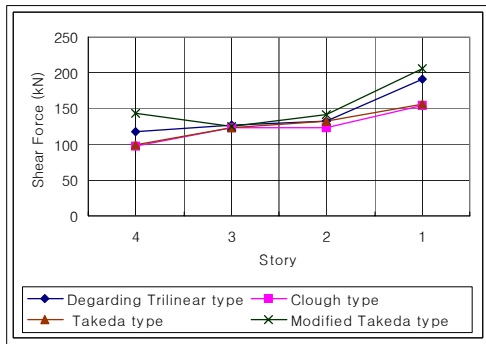
단변방향에서는 모든 지진에 대하여 전 층에서 수정다케다모델이 가장 큰 전단력을 나타냈고, 클러프 모델선택 시 가장 낮은 전단력이 나타났다. 그 비율이 최고 46% 차이가 났다. El-centro지진의 경우 수정다케다모델을 제외한 다른 모델은 중간층부에서 서로 비슷한 값을 보였으며, 수정다케다모델은 직선에 가까운 분포를 보인다. Taft지진의 경우 2층과 3층에서 모든 이력모델이 거의 유사한 값을 보이는 것이 특징적이다.



(a) El-centro지진



(b) Santa Monica지진



(c) Taft지진

[그림 6] 층전단력 해석결과(단변방향)

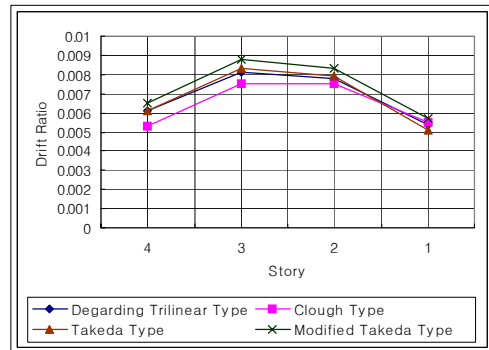
[Fig. 6] Story Shear(Y-direction)

### 4.3 층간변위비 해석결과

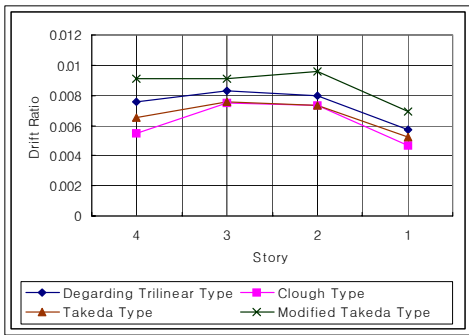
건축물의 내진설계시 지진하중에 대한 건물의 피해를 가늠하는 데 통상적인 척도는 층간변위비(Story Drift Ratio)이다. 각 층의 층간변위비는 위층 바닥판의 층변위와 해당층 바닥판의 층변위의 차를 해당층의 층고로 나누어서 구해진다.

장변방향의 경우 층간변위비는 모든 경우에서 2층과 3층이 크게 나타났으며, 1층이 가장 작게 나타났고, Taft, Santa Monica, El-centro지진의 순으로 층간변위비가 작게 나타났으며, 2~4F에서 수정다케다모델이 가장 큰 층간변위비를 나타냈고, 클러프모델이 가장 작은 층간변위비를 보였다. 최대치는 El-centro지진의 경우 23%, Santa Monica지진의 경우 65%, Taft지진의 경우 15%로 Santa Monica지진이 이력모델의 특성에 따라 거동의 차이가 큰 것으로 나타났다. El-centro지진에서는 모든 이력모델이 유사한 분포를 보이므로 지진과 특성의 영향을 별로 받지 않는 것으로 판단된다. 반면 Taft지진에서는 클러프모델이 1층에서 가장 큰 값을 보이는 역전현상이 발생하였고 다른 3개의 모델은 거의 유사한 응답을 보였다.

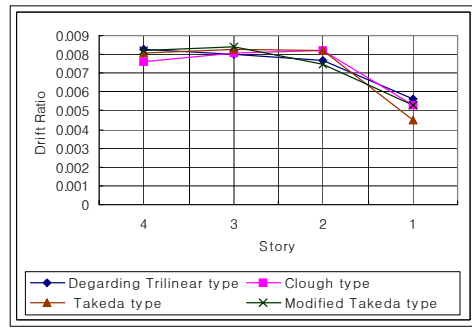
단변방향에서 Taft지진의 경우 4개 모델 모두 거의 유사한 응답을 보인 반면 El-centro지진에서는 수정다케다모델의 응답이 3층에서 클러프 모델에 비해 70%나 크게 나타났으며 Santa Monica지진의 경우는 최대 31%로 나타나 El-centro지진의 특성이 이력모델에 따라 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며 Taft지진의 경우 이력모델에 상관없이 근접한 결과를 보였으나, 강성저감삼선모델, 클러프모델, 다케다모델에서 층간변위비가 다른 지진보다 46%정도 과대평가되었다.



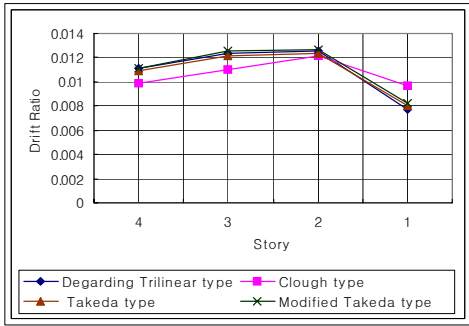
(a) El-centro지진



(b) Santa Monica 지진

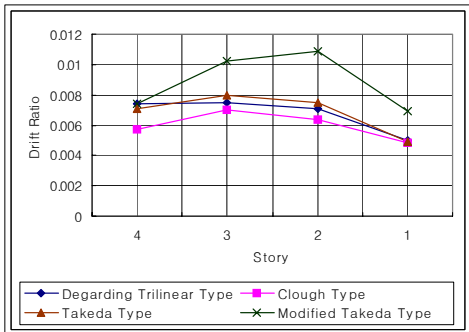


(c) Taft 지진

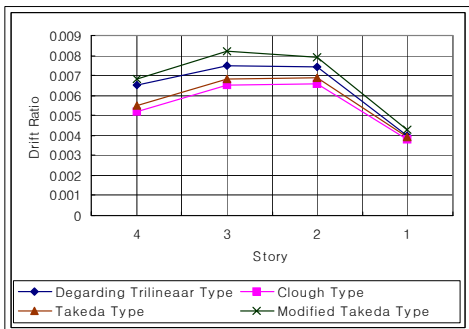


(c) Taft 지진

[그림 7] 층간변위비 해석결과(장변방향)  
[Fig. 7] Story drift ratio(X-direction)



(a) El-centro 지진



(b) Santa Monica 지진

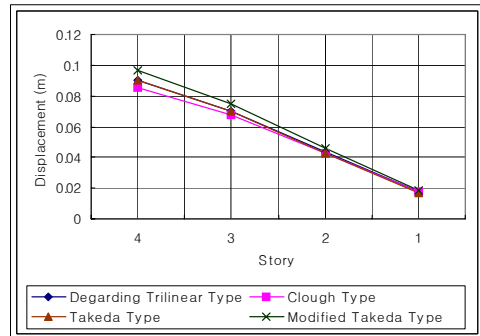
[그림 8] 층간변위비 해석결과(단변방향)  
[Fig. 8] Story drift ratio(Y-direction)

#### 4.4 층변위 해석결과

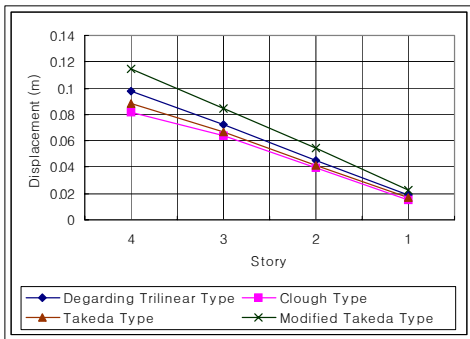
층변위는 전반적으로 층높이에 비례하는 결과가 나타났으며 수정다케다모델이 큰 값을 보이고 있다.

장변방향의 경우 El-centro 지진에서 최대 13%의 차를 보여 근접한 결과를 보여주나 Santa Monica 지진에서는 최대 50%로 이력모델에 따라 그 차이가 매우 크게 증폭됨을 알 수 있다. Taft 지진의 경우 이력모델간 차이가 최대 5%로 이력모델간 응답의 변동성이 작게 나타났다.

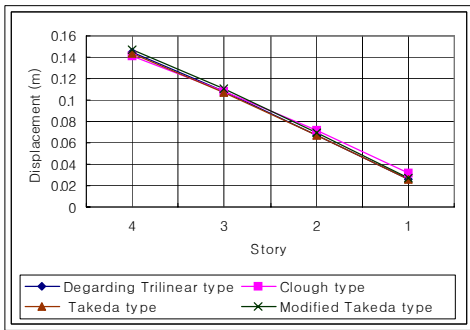
단변방향에서는 El-centro 지진의 경우 수정다케다모델이 다른 3개의 모델에 비하여 탁월하게 큰 층변위를 보여 최대 59% 과대평가하는 경향이 있으며 다른 3개의 모델은 15% 이내로 근접하였다. Santa Monica 지진의 경우 수정다케다모델, 강성저감삼선모델, 다케다모델, 클러프모델 순으로 층변위값이 작아지는 결과를 얻었으며 그 차이는 평균 10%로 유사한 결과를 보였다. Taft 지진의 경우 그림 10 (c)에서 보듯이 최대 5%의 차로 이력모델별 응답의 차이가 매우 적었다.



(a) El-centro 지진

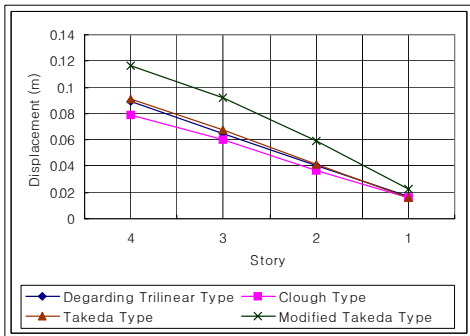


(b) Santa Monica지진

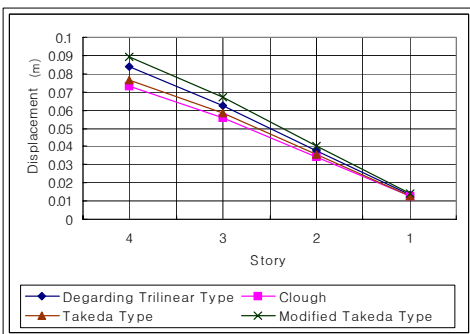


(c) Taft지진

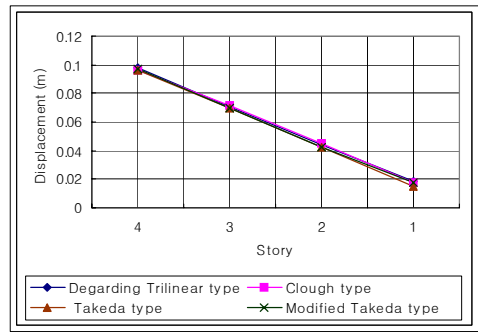
[그림 9] 층변위 해석결과(장변방향)  
[Fig. 9] Story displacement(X-direction)



(a) El-centro지진



(b) Santa Monica지진



(c) Taft지진

[그림 10] 층변위 해석결과(단변방향)  
[Fig. 10] Story displacement(Y-direction)

## 5. 결론

본 연구에서는 내진설계 되지 않은 학교시설물 중 다수를 차지하는 1980년도 표준설계 도면(건설부 공고 제 130호, 1980년 10월 28일)에 의하여 건설된 국내에 현존하는 4층 모멘트 연성골조의 학교건물을 대상으로 이력 모델의 특성과 지진파의 특성에 따라 표준학교건물의 비탄성지진거동을 분석하였다. 결론은 다음과 같다.

- 1) El-centro지진은 주파수 성분과 강진지속시간의 특성에 의하여 표준학교건물의 단변방향 층전단력, 층간변위비, 층변위 응답에 매우 큰 영향을 미치며 특히 수정다케다모델 선택시 응답의 차이가 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 단변방향에서는 층전단력의 경우 최대 46%, 층간변위비의 경우 최대 70%, 층변위의 경우 최대 59%의 편차를 보이고 장변방향에서는 각각 36%, 23%, 13%로 나타나므로 El-centro지진을 사용하여 표준학교건물의 지진거동해석이나 내진성능을 평가할 때 수정다케다모델은 단변방향에 대하여 지나치게 안전측의 결과를 나타내므로 비경제적인 과다설계의 위험이 있다. 상대적으로 장변방향에서는 과다설계의 위험이 적은 것으로 판단되므로 이를 고려할 필요가 있다.
- 2) Santa Monica지진은 장변방향의 응답에서 이력모델별 편차가 더 크게 나타났으며, 층전단력은 최대 59%, 층간변위비는 최대 65%, 층변위는 최대 50%의 편차를 보인 반면 단변방향의 경우는 층전단력은 최대 35%, 층간변위비는 최대 31%, 층변위는 최대 23%의 편차를 보였다. 이는 장변방향의 고유주기가 단변방향에 비하여 크기 때문에 1층 이상의 주기성분이 많은 Santa Monica지진의 특성에 의한

것으로 판단된다.

- 3) Taft지진은 이력모델에 따른 층간변위비와 층변위 응답의 편차가 가장 적은 것으로 나타났으며, 장변 방향의 경우 층전단력은 최대 60%, 층간변위비는 최대 15%, 층변위는 최대 5%의 편차를 보인 반면 단변방향의 경우는 층전단력은 최대 47%, 층간변위비는 최대 9%, 층변위는 최대 5%의 편차를 보였다. 따라서 Taft지진은 표준학교건물의 변위응답에 있어서 이력모델에 가장 의존도가 적은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### References

- [1] Sung-Guk Kang, et al., " Report on 2005 Educational Statical Research and Database Publication Project", KEDI, 2005.12
- [2] " The Present State and Direction of Seismic Retrofit of Educational Facilities, Ministry of Education, Science and Technology, 2010.2.22
- [3] Han-Seok Park," Seismic Evaluation of the Aged Educational Facilities of Elementary School, A master's thesis , Kyonggi University, 1999
- [4] Jeong-Hyun Je , Jin-Sang Kim, Tae-Ho Yoon," Inelastic Behavior of Standard School Buildings according to Hysteresis Models", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.10, No.4, pp.838-845, 2009.4
- [5] Geug-Kwan Jang, " Nonlinear Hysteresis Model of Reinforced Concrete Structures" Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.5, pp.13-23, 1992,
- [6] MIDAS-GEN User's Manual, MIDAS Information Technology CO., LTD

**김진상(Jin-Sang Kim)**

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학사)
- 1989년 8월 : 서울대학교 건축학과(공학석사)
- 1997년 8월 : 서울대학교 건축학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 건축학과 교수

<관심분야>

건축구조 시스템, 내진설계

**윤태호(Tae-Ho Yoon)**

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 건축학부 교수

<관심분야>

내진설계