

기존 학교건축물의 내진보강기법에 따른 내진성능평가 Seismic Performance Evaluation According to Seismic Retrofit Techniques of Existing School Buildings

강종¹
Kang, Jong¹

<Abstract>

Reinforced concrete shear walls and X-type steel braces were applied in seismic retrofit techniques for seismic performance evaluation of school buildings constructed in accordance with standard design announced by the ordinance of the ministry of construction in 1980s. Seismic performance evaluation was based on FEMA 356 using response spectrum as elastic analysis and conducted to pushover analysis with nonlinear static analysis. The maximum displacement ratio between floors in 4th and 3rd floors of the existing school buildings was less than 1.0%, which was functioning level in FEMA 356. However, because plastic hinge occurs somewhat in structural members according to the results of pushover analysis, partial reinforcement will be required. X-direction of the maximum lateral displacement of reinforced concrete shear walls than X-type steel braces was 45% and 32% in 4th and 3rd floors of school buildings, and Y-direction was 18% and 17%, respectively.

Keywords : *Seismic Performance Evaluation, Seismic Retrofit Techniques, Steel Brace, Pushover*

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

지진발생은 현대 첨단과학으로도 예측이 매우 어려우며 최근에는 지진으로 인한 피해 규모가 대형화 되어가는 추세이다. 우리나라에서는 1988년 건설부에서 건축물의 내진설계 기준을 제정하였다. 제정 당시에는 6층 이상의 건축물이나 연면적 10,000m²이상이거나 특수 용도의 건축물이 적용 대상이었다.

그 후, 2005년 3층 이상의 건축물이나 연면적 1,000m² 이상인 건축물에 까지 적용하도록 내진

설계기준이 강화되었으며 2009년에 재개정을 하여 오늘에 이르고 있다. 2008년 중국의 쓰촨성(四川省)지진으로 학교건물 13,000여동이 붕괴되어 많은 교사와 학생이 희생됨으로써 학교 건축물에 대한 지진피해의 우려가 대두되고 있는 실정이다.

그러나 1980년도 건설부령으로 공고된 학교교사 표준설계도¹⁾에 준하여 건립된 학교건축물이 많은 것으로 알려져 있다. 2009년 발표 자료²⁾에 따르면 국내의 학교관련 시설물중 건축법 시행령 제 32조 규정에 의한 내진설계 대상건축물은 18,329동이며 이 중 내진설계 된 건축물

¹ 정희원, 동명대학교, 건축공학과, 교수, 工博
E-mail : kang108@tu.ac.kr

¹Dept.of Architectural Engineering Tong Myong University,
Prof., Ph.D.

은 2,417동으로 약 87% 정도가 내진보강이 필요한 것으로 되어 있다.

따라서 이 연구에서는 1980년도 건설부령으로 공고한 학교교사 표준설계도에 준하여 건립된 학교건축물의 지진수준에 따른 성능수준평가와 동시에 내진보강방법에 따른 성능평가를 하여 내진성능향상을 위한 보강방안에 대한 기초자료를 제시하는 데에 그 목적이 있다.

1.2 연구 범위 및 방법

내진설계기준이 제정된 상황으로 보아 기존 학교건축물중 대체로 2005년 이후에 건립된 학교건축물은 내진설계기준에 적합하도록 설계된 것으로 판단할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 대상 건축물을 1980년도 공고된 학교교사 표준설계도에 준하여 건립된 비내진 학교건축물로 하였다.

건축물의 층수는 4층과 3층 2가지로 각각의 1개 층 바닥면적은 약 $1,012.8m^2$ 와 $897.8m^2$ 이다. 구조물의 수치해석에는 범용 프로그램인 MIDAS-GENw(ver.785)가 사용되었으며 지진하중은 현행 구조설계기준인 KBC 2009³⁾를 적용하였다. 구조물의 성능목표에 따른 성능수준평가는 FEMA 356에 기초를 두고 있으며 탄성 해석으로서 응답스펙트럼(Response Spectrum) 해석법을 수행하였다. 또한 비선형 해석으로는 pushover 해석법을 적용하여 응답스펙트럼의 해석결과와 비교·분석하였다.

먼저, 기존 학교건축물을 대상으로 구조해석 및 성능평가를 수행하여 지진발생에 따른 구조물의 안전성 여부를 검토하였다. 그리고 기존 학교건축물에 내진보강기법을 적용한 후 이에 대한 내진성능 평가를 수행하였다. 내진 보강기법으로는 기존의 조적벽체를 철거하고 철근콘크리트 전단벽과 X자형 철골가새 두 가지 방식으로 보강하는 것으로 하였다. 또한 내진보강 전후의 성능을 비교하여 내진성능향상을 위한 방안을 모색하였다.

2. 성능평가원리

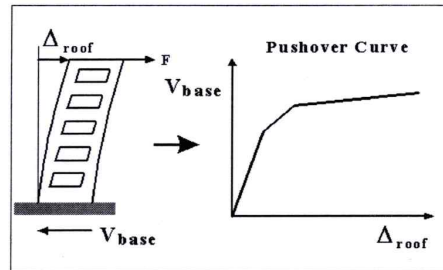
2.1 능력 스펙트럼

구조물의 성능에 기초를 한 내진설계(PBSD,

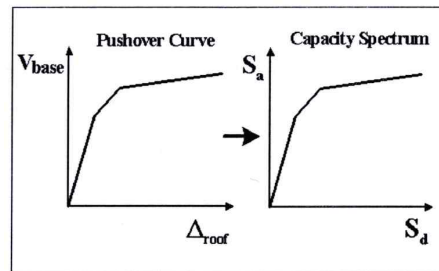
Performance Based Seismic Design)는 예상되는 지진하중에 대한 적합한 피해정도 및 에너지 흡수정도를 설정하고 구조물이 내진성능을 확보하여 성능목표를 달성할 수 있도록 하는 것이다⁴⁾. 에너지 흡수정도에 따라 구조물의 거동이 달라지기 때문에 파괴에 이를 때 까지 비선형 해석을 통한 구조물의 변형성능을 예측할 수 있어야 한다.

성능에 기반을 둔 내진설계는 성능평가의 대상을 구조물의 변위로 평가하기 때문에 변위기반설계(Displacement based Design)라 한다. 구조물의 변형성능은 pushover해석으로 가능하며 이는 구조물의 하중과 변형에 대한 능력곡선과 지진하중에 대한 요구곡선을 비교함으로써 평가될 수 있다.

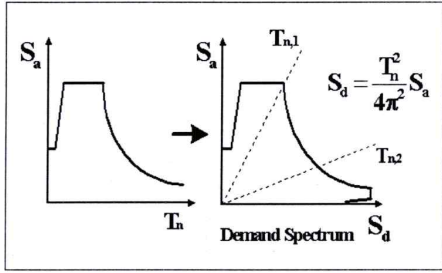
능력스펙트럼법(CSM, Capacity Spectrum Method)은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 구조물의 비선형 변형능력과 내진성능을 평가할 수 있는 방법으로 구조물이 보유하고 있는 저항능력과 지진하중에 의한 요구수준을 스펙트럼 형식으로 서로 비교함으로써 비선형 최대변형과 요구내력을 평가한다⁴⁾.



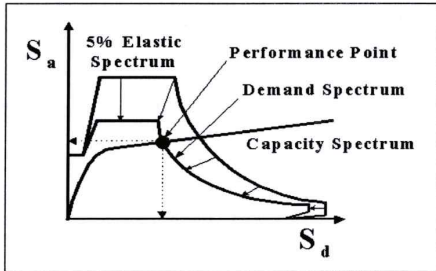
(a) Capacity curve by load-displacement relationship



(b) Capacity spectrum conversion



(c) ADRS conversion of demand response spectrum



(d) Performance point estimation and performance level evaluation

Fig. 1. Evaluating seismic capacity process of structures for CMS.

2.2 비선형 정적해석을 이용한 성능평가

Pushover해석은 구조물의 재료 비선형을 고려한 구조물 내진거동 평가방법으로 성능기반 해석법(PBSD)을 접목하여 사용된다. 즉 구조물이 발휘할 수 있는 보유내력을 정확하게 평가한 후에 고려하는 지진하중에 대한 요구수준과의 비교를 통하여 요구내력을 산정하는 해석법이다.

이러한 과정은 응답스펙트럼의 원리에 의해 이루어지며 비선형 응답스펙트럼에 대한 고려는 유효감쇠비를 이용하였다. 두 개의 스펙트럼이 만나는 교차점을 성능점(Performance Point)라 한다. 이 연구에서는 변위제어 방법으로 수행하였으며 각 부재에 따라 비선형 특성을 정의하기 위해 FEMA에서 제공하고 있는 부재의 모멘트(M)-회전각(θ) 관계를 이용하여 비선형 특성을 정의하였다.

3. 내진성능 평가방법

3.1 성능평가 모델링

이 연구의 적용대상은 1980년도 건설부령으로 공고된 학교교사 표준설계도에 준하여 건립

된 건축물로 하였다. 총 네 가지의 설계도면이 공고되었으나 일층 및 유사 건축물을 제외한 국교-80-92-가(이하, 4층 학교이라고 함) 및 중교-80-92-나(이하, 3층 학교이라고 함) 두 가지 건축물을 대상으로 하였다. 기준층 평면형상은 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

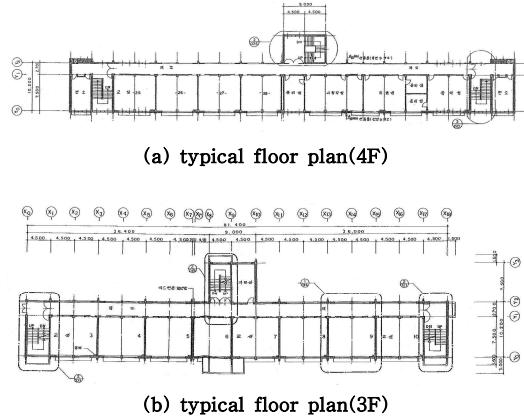


Fig. 2. Typical floor plan of school buildings.

층고는 전 층에 걸쳐 3.3m로 동일하며 4층 학교는 1개 스패인이 4.5m로 횡(X) 방향 총길이는 94m이다. 3층 학교는 1개 스패인이 4.5m로 횡(X)방향 총길이는 81.4m이다.

내진보강방법으로는 Fig. 3에서 보는 것처럼 철근콘크리트 전단벽과 X자형 철골가새 두 가지로 하였으며 보강 구조물은 기존 보와 기둥에 지지되어 설치하는 것으로 하였다.

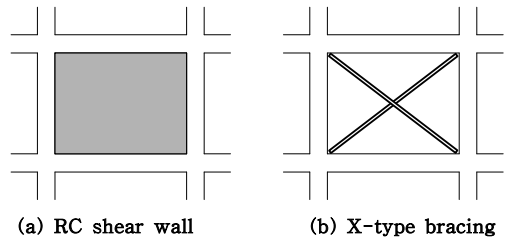
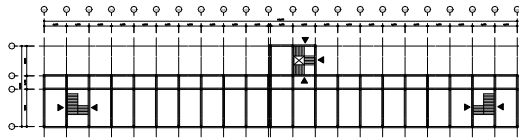


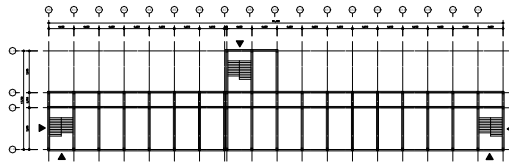
Fig. 3. Type of seismic retrofit technique.

내진보강 구조물의 배치는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 ▲표 한 곳이며 4층 학교는 7개소(X방향 2개소, Y방향 5개소), 3층 학교는 5개소(X방향 3소, Y방향 2개소)로 하였다. 또한 내진보강의 위치는 실의 사용성 및 시공의 용이성을

고려하여 계단실측에만 배치를 하였으며 조적 벽체를 철거하고 고정하중이 증가되지 않도록 전단벽의 두께를 정하였다.



(a) 4F school building



(b) 3F school building

Fig. 4. Location of seismic retrofit.

3.2 성능평가계획

구조설계기준은 KBC 2009를 적용하였으며 슬래브의 강막(rigid diaphragm)효과에 의한 구속조건을 고려하였다. 건축물의 위치에 따른 지진구역은 1로 하며, 지반은 단단한 토사지반으로 가정하였다.

기존 학교건축물은 보와 기둥만으로 골조를 형성하고 있으며 내진 보강을 하지 아니하였으므로 이하에서는 보강 전이라 하였다. 철근콘크리트 전단벽으로 내진보강한 학교건축물(이하, 전단벽이라 함)의 전단벽 배치는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 평면상 대칭적 형태가 되도록 하였다. 또한 기존의 조적 벽체를 철거하고 설치하는 것이므로 수직하중이 증가되지 않도록 전단벽의 두께를 외부는 25cm로 내부는 18cm로 하였다.

X자형 철골가새로 보강된 학교건축물(이하, X형 가새라 함)의 내진보강 위치는 내진보강 기법에 따른 성능비교를 위하여 전단벽구조와 동일한 위치에 철골가새를 설치하는 것으로 계획하였다.

4. 내진성능 평가

4.1 성능설계기준

구조물의 성능설계를 위해 내진설계 기준연 구⁵⁾를 근거로 하였으며 Table 1에서 보는 바와

같이 설계지진을 재현주기 500년, 1000년 및 2400년으로 설정하여 성능점을 검토하였다. 재현주기 500년의 최대 예상 지반가속도는 2400년의 50%이며 재현주기 1000년의 최대 예상 지반가속도는 500년의 140%로 하였다. 또한 재현주기별 위험도 계수는 Table 2와 같다.

Table 1. Average recurrence period

설계 지진		성능수준
재현주기	초과확률	붕괴방지수준
500년	50년내 초과확률10%	내진 2등급
1000년	100년내 초과확률10%	내진 1등급
2400년	250년내 초과확률10%	내진 특등급

Table 2. Risk factors by recurrence period

재현주기 (년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도계수 (I)	0.40	0.57	0.73	1.00	1.40	2.00

Table 3에서 보는 바와 같이 FEMA 356⁶⁾에서 성능수준에 따른 부재 및 시스템의 설계 거동한계를 정하기 위한 지표로서 층간변위비를 채택하고 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 기능수행수준에서는 층간변위비 1.0%미만이 요구되며 인명안전수준에서는 2.0%미만, 붕괴방지수준에서는 4.0%미만이 요구된다.

Table 3. Structural performance level and damage

구분	성능수준		
	기능수행	인명안전	붕괴방지
전체건물 피해상태	경미	보통	심함
허용단기 층간변위	1%	2%	4%
허용영구 층간변위	무시할 정도	1%	4%

4.2 변위성능

해석대상 건축물의 재현주기별 최대변위는 4층 학교 및 3층 학교가 각각 Table 4, Table 5와 같이 나타났다. Table 4에서 보는 것처럼 4층 학교에서는 재현주기에 상관없이 X형 가새의 경우 보강전에 비하여 x방향은 20%정도, y방향은 55%정도 최대 횡변위가 감소하는 것은

로 나타났다. 전단벽 구조의 경우에는 보강전에 비하여 x방향은 67%정도, y방향은 92%정도 최대 횡변위가 감소하는 것으로 분석되었다.

Table 4. Maximum lateral displacement(4F Type)

지진수준 (재현주기)	보강방식	X 방향 (cm)	Y 방향 (cm)
500년	보강전	1.92	1.87
	X형 가새	1.53	0.85
	전단벽	0.69	0.15
1000년	보강전	2.68	2.61
	X형 가새	2.14	1.19
	전단벽구조	0.96	0.21
2400년	보강전	3.82	3.72
	X형 가새	3.05	1.70
	전단벽	1.37	0.30

Table 5에서 보는 바와 같이 3층 학교에서도 4층 학교의 경우와 마찬가지로 재현주기에 상관없이 X형 가새의 경우 보강전에 비하여 x방향은 52%정도, y방향은 55%정도 최대 횡변위가 감소하는 것으로 나타났다. 전단벽 구조의 경우에는 보강전에 비하여 x방향은 85%정도, y방향은 92%정도 최대 횡변위가 감소하는 것으로 나타났다.

Table 5. Maximum lateral displacement(3F Type)

지진수준 (재현주기)	보강방식	X 방향 (cm)	Y 방향 (cm)
500년	보강전	1.44	1.43
	X형 가새	0.69	0.64
	전단벽	0.22	0.11
1000년	보강전	2.02	2.00
	X형 가새	0.96	0.89
	전단벽	0.31	0.15
2400년	보강전	2.88	2.85
	X형 가새	1.37	1.27
	전단벽	0.45	0.22

4층 학교의 층간변위비는 x방향은 Table 6에서 보는 것처럼 보강전의 층간변위비에 비하여 X형 가새의 경우에는 28%정도 감소되며, 전단벽 구조의 경우에는 68%정도 감소되는 것으로 나타났다. 한편, y방향은 보강전의 층간변위비에 비하여 X형 가새의 경우에는 53%정도 감소되며, 전단벽 구조의 경우에는 84%정도 감소되

는 것으로 나타났다.

Table 6. Maximum lateral displacement & Ratio (4F Type)

지진수준 (재현주기)	보강방식	X 방향		Y 방향	
		층간변위 (cm)	층간변위 비(%)	층간변위 (cm)	층간변위 비(%)
500년	보강전	1.34	0.0041	1.28	0.0039
	X형 가새	0.97	0.0029	0.60	0.0022
	전단벽	0.43	0.0013	0.20	0.0007
1000년	보강전	1.88	0.0057	1.79	0.0054
	X형 가새	1.35	0.0041	0.84	0.0031
	전단벽	0.60	0.0018	0.28	0.0010
2400년	보강전	2.67	0.0081	2.56	0.0077
	X형 가새	1.93	0.0058	1.20	0.0044
	전단벽	0.86	0.0026	0.40	0.0015

또한, 3층 학교의 층간변위비는 Table 7에서 보는 바와 같이 x방향은 보강전의 층간변위비에 비하여 X형 가새의 경우에는 54%정도 감소되며 전단벽 구조의 경우에는 65%정도 감소되는 것으로 나타났다. 한편, y방향은 보강전의 층간변위비에 비하여 X형 가새의 경우에는 57%정도 감소되며 전단벽 구조의 경우에는 67%정도 감소되는 것으로 나타났다. 최대 층간변위비는 0.81%로 나타났으며 4층 학교의 보강전에서 재현주기 2400년일 때, x방향에서 가장 큰 것으로 나타났다.

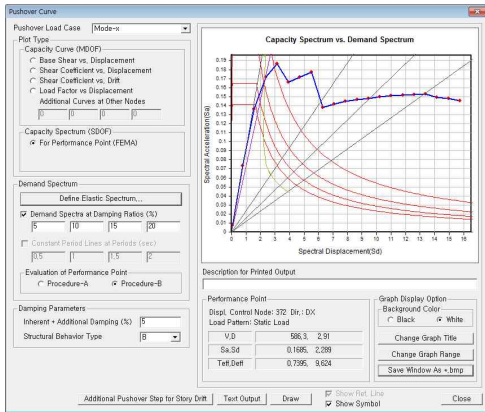
Table 7. Maximum lateral displacement & Ratio (3F Type)

지진수준 (재현주기)	보강방식	X 방향		Y 방향	
		층간변위 (cm)	층간변위 비(%)	층간변위 (cm)	층간변위 비(%)
500년	보강전	1.24	0.0038	1.22	0.0037
	X형 가새	0.57	0.0017	0.52	0.0016
	전단벽	0.60	0.0018	0.37	0.0012
1000년	보강전	1.74	0.0053	1.70	0.0052
	X형 가새	0.79	0.0024	0.73	0.0022
	전단벽	0.83	0.0025	0.51	0.0017
2400년	보강전	2.48	0.0075	2.43	0.0074
	X형 가새	1.13	0.0034	1.04	0.0032
	전단벽	1.19	0.0036	0.73	0.0024

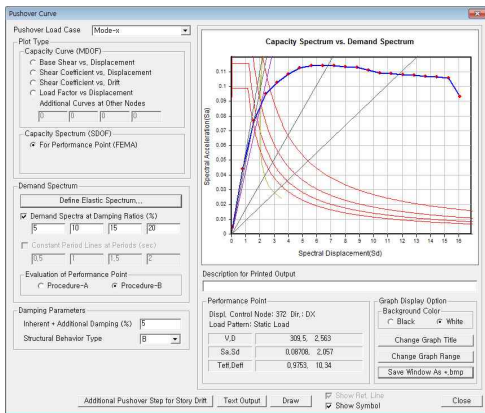
4.3 Pushover 해석

이 연구에서는 비선형 지진해석을 수행하기 위하여 MIDAS-GENw(ver.785)을 이용하였으

며 pushover 해석에는 변위제어법을 적용하였다. pushover 해석결과 지진하중에 대한 성능점은 Fig. 5와 같이 나타났다. 여기서 (a)는 4층 학교의 X자형 철골가새로 보강된 구조물의 재현주기 2400년 일 때의 x방향의 성능점을 보여준다. 또한 (b)는 4층 학교의 보강 전 기존 구조물의 재현주기 1000년 일 때의 x방향의 성능점을 보여준다.



(a) 4F, X-type bracing, recurrence period 2400, X-dir.



(b) 4F, X-type bracing, existing structures, recurrence period 1000, X-dir.

Fig. 5. Performance point on seismic force.

앞 절에서 설명한 바와 같이 건축물의 최대층간 변위비는 0.81%로서 FEMA 356에서 제시하는 기능수행단계인 1.0%를 초과하지 아니하나 일부 부재는 소성힌지가 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 개별 부재의 성능을 분석해 보면 pushover 해석에서

변위증분 초기단계에서부터 항복강도 상태를 나타내는 B단계의 부재가 발생하는 것을 알 수 있다. 그림의 가로축은 하중증분 스텝 수를 나타내고 세로축은 소성힌지가 발생되어지는 현황을 백분율로 표현하였다.

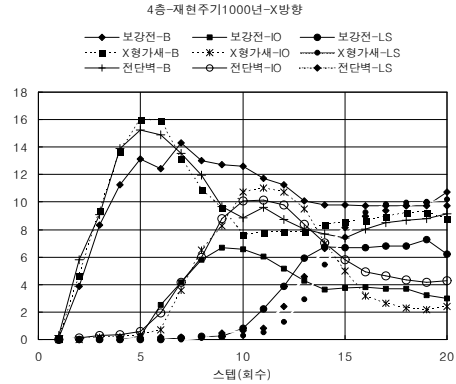


Fig. 6. Plastic hinge amount of performance point step.

Fig. 6은 4층 학교에서 재현주기 100년일 때 x방향에 대한 보강 전과 보강방식에 따른 소성힌지의 발생현황을 나타내며 범례에서 B는 공칭 항복강도 상태, IO(immediate occupancy)는 즉시 거주상태, LS(life safety)는 인명 안전 상태를 의미한다. 5스텝부터 항복상태를 지나 즉시 거주상태의 소성힌지 수가 증가하였고 10스텝부터는 인명안전상태의 힌지수가 증가되어지는 것을 알 수 있었다.

Table 8과 Table 9는 구조물을 보강방식별로 나누어 응답스펙트럼해석(RSA, response spectrum analysis) 및 pushover 해석에 따른 지진응답을 정리한 것이며 각각 4층 학교와 3층 학교의 x 방향에 대해 나타내고 있다.

Table 8에서 보는 바와 같이 4층 학교 pushover 해석결과 최대내력 측면에서는 보강 전에 비하여 X형 가새로 보강한 경우는 약 1.54배 증가되었으며 전단벽으로 보강한 경우는 약 2.22배 증가된 것으로 나타났다. 최대변위 측면에서는 보강 전에 비하여 X형 가새로 보강한 경우는 약 0.8배 감소되었으며 전단벽으로 보강한 경우는 약 0.4배 감소된 것으로 나타났다.

Table 8. Seismic response according to analysis method by strengthening method(4F, X-dir.)

지진수준 (재현주기)	보강방식	해석방법	최대내력 (kN)	최대변위 (cm)
500년	보강전	pushover	2,545.81	1.88
		RSA	3,120.18	1.92
	X형 가새	pushover	3,549.03	1.49
		RSA	3,953.06	1.53
	전단벽	pushover	elastic	elastic
		RSA	4,344.84	0.69
1000년	보강전	pushover	3,035.16	2.56
		RSA	4,368.37	2.68
	X형 가새	pushover	4,751.32	2.08
		RSA	5,534.48	2.14
	전단벽	pushover	elastic	elastic
		RSA	6,088.36	0.96
2400년	보강전	pushover	3,475.48	3.63
		RSA	6,223.69	3.82
	X형 가새	pushover	5,749.64	2.91
		RSA	7,885.13	3.05
	전단벽	pushover	7,727.64	1.47
		RSA	8,676.34	1.37

또한 응답스펙트럼 해석결과 최대내력 측면에서는 보강 전에 비하여 X형 가새로 보강한 경우는 약 1.27배 증가되었으며 전단벽으로 보강한 경우는 약 1.4배 증가된 것으로 나타났다. 최대변위 측면에서는 보강 전에 비하여 X형 가새로 보강한 경우는 약 0.8배 감소되었으며 전단벽으로 보강한 경우는 약 0.36배 감소된 것으로 나타났다.

Table 9에서 보는 바와 같이 3층 학교 pushover 해석결과 최대내력 측면에서는 보강 전에 비하여 X형 가새로 보강한 경우는 약 1.24배 증가되었으며 전단벽으로 보강한 경우는 약 1.27배 증가된 것으로 나타났다.

최대변위 측면에서는 보강 전에 비하여 X형 가새로 보강한 경우는 약 0.77배 감소되었으며 전단벽으로 보강한 경우는 약 0.68배 감소된 것으로 나타났다. 또한 응답스펙트럼 해석결과 최대내력 측면에서는 보강 전에 비하여 X형 가새로 보강한 경우는 약 1.06배 증가되었으며 전단벽으로 보강한 경우는 약 1.14배 증가된 것으로 나타났다. 최대변위 측면에서는 보강 전에 비하여 X형 가새로 보강한 경우는 약 0.48배 감소되었으며 전단벽으로 보강한 경우는 약 0.15배 감소된 것으로 나타났다.

Table 9. Seismic response according to analysis method by strengthening method(3F, X-dir.)

지진수준 (재현주기)	보강방식	해석방법	최대내력 (kN)	최대변위 (cm)
500년	보강전	pushover	2,399.69	1.41
		RSA	2,808.13	1.44
	X형 가새	pushover	elastic	elastic
		RSA	2,973.18	0.69
	전단벽	pushover	elastic	elastic
		RSA	2,749.98	0.22
1000년	보강전	pushover	3,047.91	1.92
		RSA	3,931.49	2.02
	X형 가새	pushover	3,512.49	1.65
		RSA	4,166.16	0.96
	전단벽	pushover	3,644.15	1.28
		RSA	3,853.52	0.31
2400년	보강전	pushover	3,475.48	2.70
		RSA	5,601.26	2.88
	X형 가새	pushover	4,631.68	1.85
		RSA	5,937.04	1.37
	전단벽	pushover	4,707.19	1.82
		RSA	5,491.43	0.45

5. 결 론

1980년도 건설부령으로 공고된 학교교사 표준설계도에 준하여 건립된 학교건축물의 성능수준을 평가하고 동시에 X자형 철골가새와 철근콘크리트 전단벽으로 보강된 구조물에 대한 성능평가를 수행하였다. 이에 대한 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

- 1) 보강을 하지 아니한 기존 4층 학교건축물의 층간변위비는 재현주기 2400년일 때 x방향 0.81%로서 FEMA 356에서 제시하는 기능수행 단계 요구 층간변위비 1%에는 못 미치는 수치이나 pushover 해석결과 구조부재에 소성힌지가 다소 발생되므로 부분적인 보강이 필요할 것으로 판단된다.
- 2) pushover 해석결과 변위증분 5스텝에서 전체의 16% 정도의 소성힌지가 발생되었으며 10스텝 이후에서는 인명안전단계에 이르는 소성힌지가 10%가량 발생되었으나 안전에 큰 위협을 주는 요소는 아닌 것으로 사료된다.
- 3) 4층 학교건축물에서 X자형 철골가새로 보강하였을 때 보강 전에 비하여 층간변위비가 x

방향은 72% y방향은 47% 감소하였다. 또한 철근콘크리트 전단벽으로 보강하였을 때는 보강 전에 비하여 층간변위비가 x방향은 32% y방향은 16% 감소하였다.

4) 4층 학교는 7개소에 3층 학교는 5개소에 내진 보강함으로써 구조물의 최대내력 및 변위성능이 많이 향상되는 것으로 나타났다. 지진에 대한 경각심이 고취되고 있는 현실을 감안할 때 보강기법에 대한 적극적인 검토가 필요할 것이다.

보다 정확한 판단과 신뢰성 있는 데이터 구축을 위해서 지진으로 인한 파괴거동 및 동적 해석에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 문교부 : 건설부 공고 제 130호, (1980)
- 2) 최인학, 김영호, 방중석, *한국리모델링협회지* 33, 63, (2009)
- 3) 대한건축학회, 건축구조기준 및 해설, 기문당, pp.122~164, (2009)
- 4) 최원호, 비선형 지진해석을 통한 건축구조물의 내진성능평가, (주)마이다스 아이티 기술 세미나, pp.1~33, (2003)
- 5) 한국지진공학회, 내진설계기준연구(II), 건설교통부, (1997)
- 6) FEMA, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, pp.1~36, (2000)

(접수:2012.01.07. 수정:2012.02.09. 게재 확정:2012.02.24)