

고항복비 강재를 이용한 내진구조시스템의 내진성능 Earthquake Resistance Performance of Frames with High-Yield Ratio Steels

오상훈*

Oh, Sang Hoon

ABSTRACT

Nowadays, various grades of high-strength steels are available. The application of ultra-high grades of steels for building structures, however, is limited only to the elements stressed under tension. The highest grade of steels generally used has a tensile strength of around $600N/mm^2$. Most research is focused on lower yield ratios of high strength steel in the inelastic range to ensure the stability of structures. In this paper, however, the possibility of an effective application of high strength steel with high yield ratio to building structures is discussed. An efficient structural system and a design method based on earthquake response analysis and experimental results are proposed.

1. 서론

최근 건축구조물에서도 대형화 및 초고층화 함에 따라 기계류, 압력 용기, 선박 등을 중심으로 사용되어져 왔던 고강도강에 대한 수요가 증가하고 있다. 압력용기 및 기계류에 대한 설계방법과는 대조적으로 건축구조물은 대지진하에서 소성변형능력을 기대하고 있다. 강재의 강도가 증가하면서 응력-변형도 관계는 기본적으로 다음과 같은 경향을 나타내게 된다.

- 1) 영계수는 거의 일정한 값을 나타낸다.
- 2) 인장응력 σ_u 를 증대시키는 것 보다 항복응력 σ_y 를 증대시키는 것이 쉽다. 따라서 인장강도가 높아지면서 항복비 $Y(=\sigma_y/\sigma_u)$ 가 높아진다.
- 3) 인장강도가 증가함에 따라 연신률이 저하된다.
- 4) 인장강도가 증가함에 따라 용접성이 떨어진다.

인장응력 하에서 고강도강은 독립된 스트럿 혹은 케이블의 사용성을 높이기 위해 개발된 것으로 강도가 높아지면서 단면을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 압축응력 하에서는 영계수가 같기

* 정회원 · 포항산업과학연구원, 책임연구원

때문에 좌굴하중에 지배를 받아 단면을 현저하게 저감시킬 수 없다. 따라서 인장응력 뿐만 아니라 압축응력을 동시에 받는 건축구조물에서는 사용 강재량을 절감시키기에는 한계가 있었다. 또한 영계수가 일정하므로 인장 내력이 증가함에 따라 탄성범위에서의 변형이 커지게 된다. 그러므로 구조물은 고강도강을 적용함으로써 강성이 작아지게 된다.

소성변형능력은 재료의 항복비 및 연신률 등에 영향을 받기 때문에, 부재와 골조의 소성변형능력(에너지 흡수능력)은 인장내력이 증가할수록 작아지게 된다. 따라서 고풍복비를 가지는 고강도강의 결점을 개선하기 위해서는 새로운 구조시스템을 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 고풍복비를 가지는 고강도강을 건축구조에 효과적으로 적용할 수 있는 방법으로 유강혼합 방식에 의한 구조시스템을 이용할 것을 제안하고, 이 구조시스템의 유효성을 지진응답해석 및 실험을 통하여 검증하였다.

2. 고강도강 적용을 위한 유강혼합 구조 시스템

고강도강으로 이루어진 부재는 소성변형능력이 작기 때문에 탄성에 머물도록 해야 한다. 그러나, Akiyama에 의해 제안된 유강혼합구조를 이용하면 고강도강의 사용성을 확대할 수 있다. 유강혼합 구조시스템은 한 층에 의도적으로 유요소(휨강성이 매우 작음)와 강요소(휨강성이 매우 큼)를 혼합배치하는 구조이다. 다른 강성을 가지는 부재로 이루어진 유강혼합구조는 구조물의 내진성능을 향상시킬 수 있다. 유강혼합구조의 복원력 특성은 그림 1에 나타낸 바와 같이 강요소와 유요소의 합인 형태로 나타낼 수 있다. 이 경우 종국상태까지 강요소가 충분한 소성변형에 의해 에너지를 흡수한 상태에서도 유요소는 탄성역에 머물 수 있다.

고항복비-고강도강은 단면을 작게 할 수 있으므로 휨강성이 작아지므로 수평하중에 대해 유요소로 사용하여 탄성에 머물게 하면 소성변형에 의한 내력열화 및 취성파괴를 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

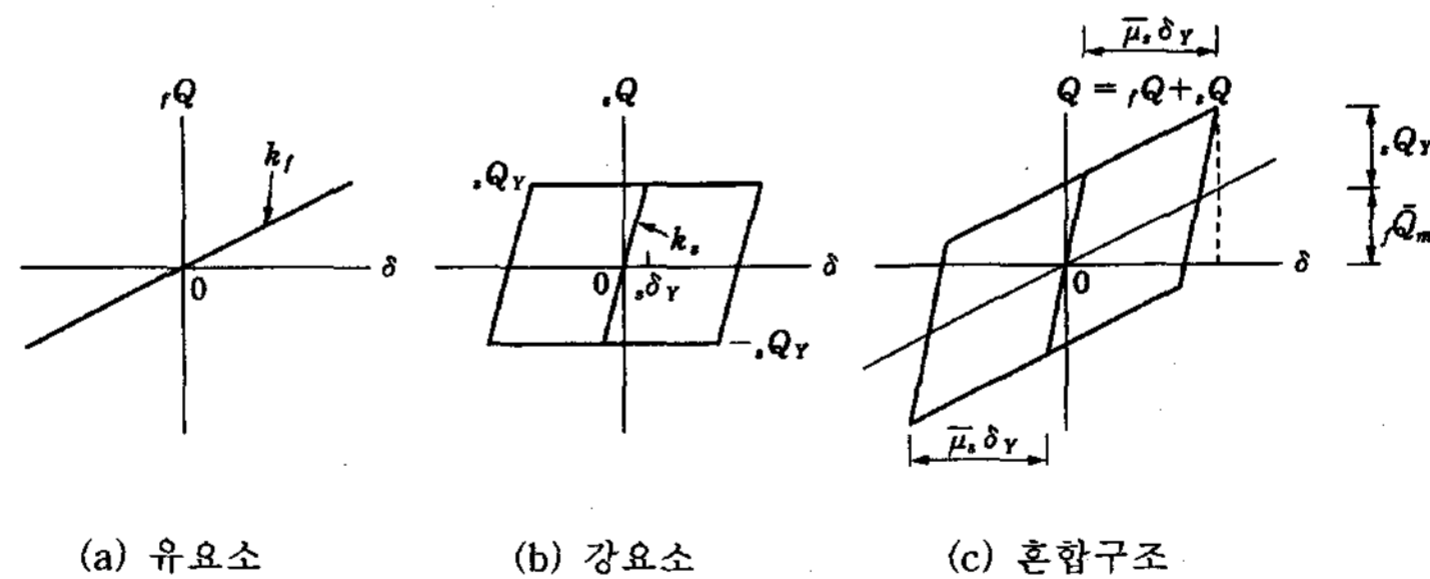


그림 1 유강혼합구조의 복원력 특성

3. 유강혼합 구조시스템의 응답해석

3.1 1층 모델에 대한 해석결과

고항복비-고강도강의 적용방법을 조사하기 위하여 유강혼합구조를 대상으로 지진응답해석을 실시하였다. 지진응답 해석을 위한 해석모델을 그림 2에 나타내었다. 해석모델의 외주부는 강요소로 사용하기 위한 기둥(연강)으로 내주부는 유요소로서의 기둥(고강도강)으로 이루어져 있다. 보는 Rigid로 가정하였다. 해석모델의 설계변수는 다음과 같다.

- 1) 유요소의 강성(K_f)에 대한 강요소의 강성(K_s)의 강성비(K_s/K_f). 범위는 1.0~10.0

2) 강요소의 항복내력(M_s)에 대한 유요소의 항복내력(M_f)의 내력비(M_f/M_s). 범위는 0.7~1.4 강요소 및 유요소의 복원력 특성은 그림 3과 같이 가정하였다. 입력지진파로는 El-Centro NS파, Hachinohe EW파, Kobe NS파 및 인공지진파를 이용하였다. 각 지진파에 대해 구조물에 입력되는 등가 속도 $V_E=120\text{cm/s}$ 가 되도록 가속도 기록의 크기를 조절하였다.

여기서 V_E 는 다음과 같이 정의 된다.

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (1)$$

여기서 E =지진에 의해 구조계에 입력되는 총에너지, M = 구조계의 총질량

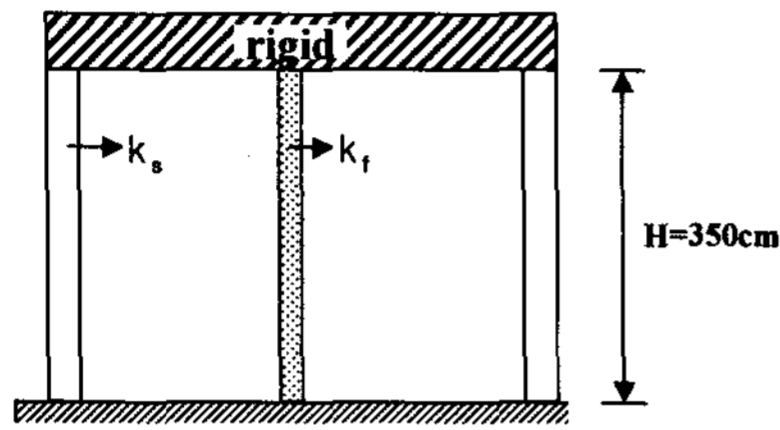


그림 2 해석모델

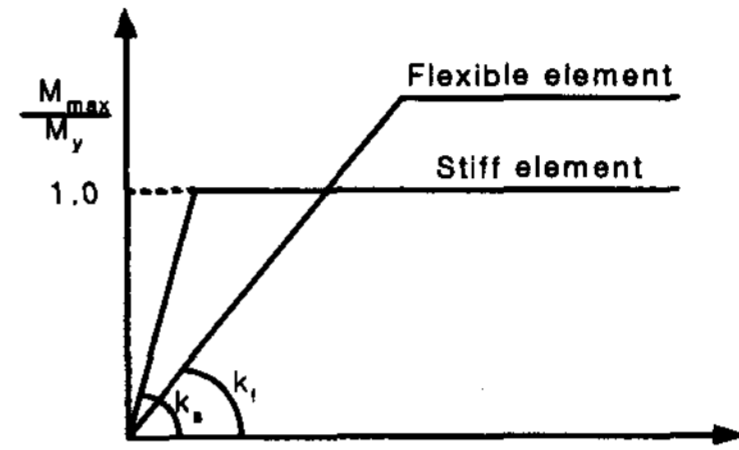


그림 3 기둥의 복원력 특성

지진응답해석 결과를 그림 4에 나타내었다. 이 그림은 강요소 기둥의 항복변형($s\delta_y$)에 대한 유요소의 항복변형($f\delta_y$)의 항복변형비($f\delta_y/s\delta_y$)와 구조물이 종국상태에 도달했을 때의 손상과의 관계를 나타내고 있다.

유요소의 손상비는 근사적으로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{W_f}{W_f + W_s} = \frac{1}{(f\delta_y/s\delta_y)^2} \times \frac{n_f}{n_f + n_s}$$

(2)

여기서 W_f :유요소의 소성변형에너지, W_s :강요소의 소성변형에너지, $f\delta_y$:유요소의 항복변형, $s\delta_y$:강요소의 항복변형, n_f :유요소의 개수, n_s :강요소의 개수

(2)식에 의한 근사 값은 그림 4에서 굵은 실선으로 표시되어 있다.

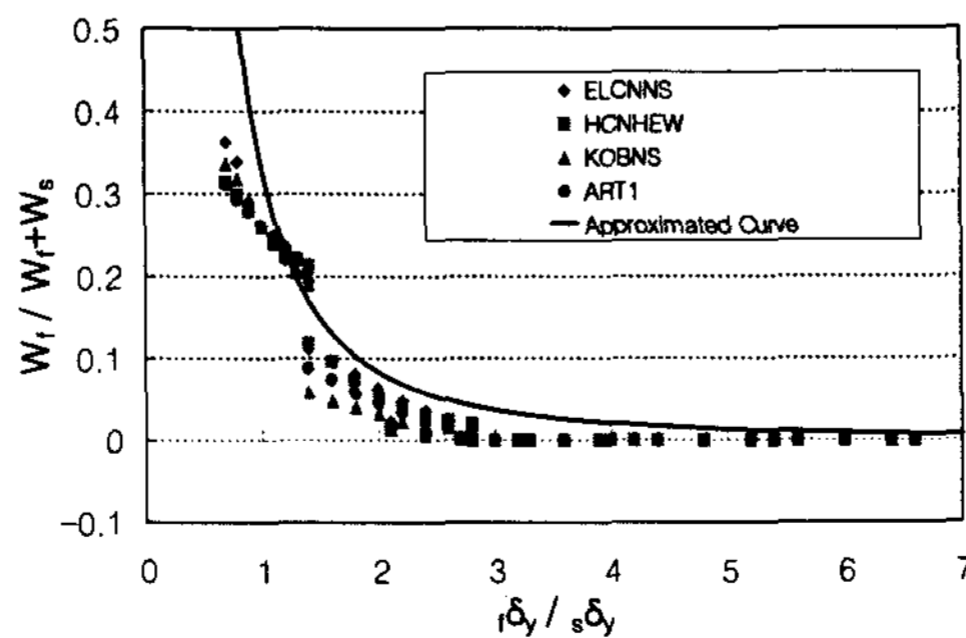


그림 4 유요소와 강요소의 손상비

3.2 다층 모델에 대한 해석결과

유강혼합구조에서의 고강도강의 적용성 검토를 위해 다층구조에 대한 지진응답해석을 실시하였

다. 해석모델을 그림 5에 나타내었다. 해석모델은 6층, 9층 및 20층에 대해 실시하였다. 해석모델 설계에서의 설계변수는 1층 모델에서와 같다.

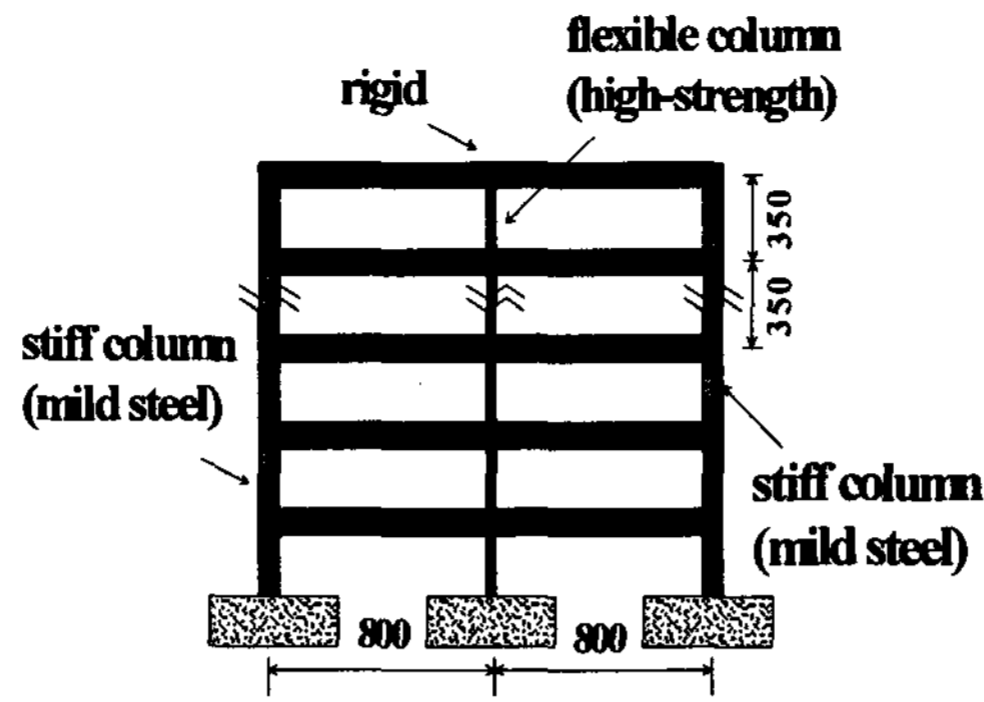


그림 5 다질접계 해석모델

6층 구조에 대한 해석결과의 한 예를 그림 6에 나타내었다. 그림 6은 유요소와 강요소의 내력을 같게 하고, 강성비(K_s/K_f)를 변화시킨 경우이다. 유요소와 강요소의 강성의 차이에 의해 손상분포가 달라지고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 손상은 1층에 집중하는 경향을 보이고 있으나, 강성비가 커짐에 따라 1층에서의 손상집중하는 현상은 완화되는 경향을 보이고 있다. 그리고 강성비(K_s/K_f)가 4.0보다 큰 경우에는 유요소인 내주부에서의 손상은 발생하지 않고 탄성에 머물고 있음을 알 수 있다.

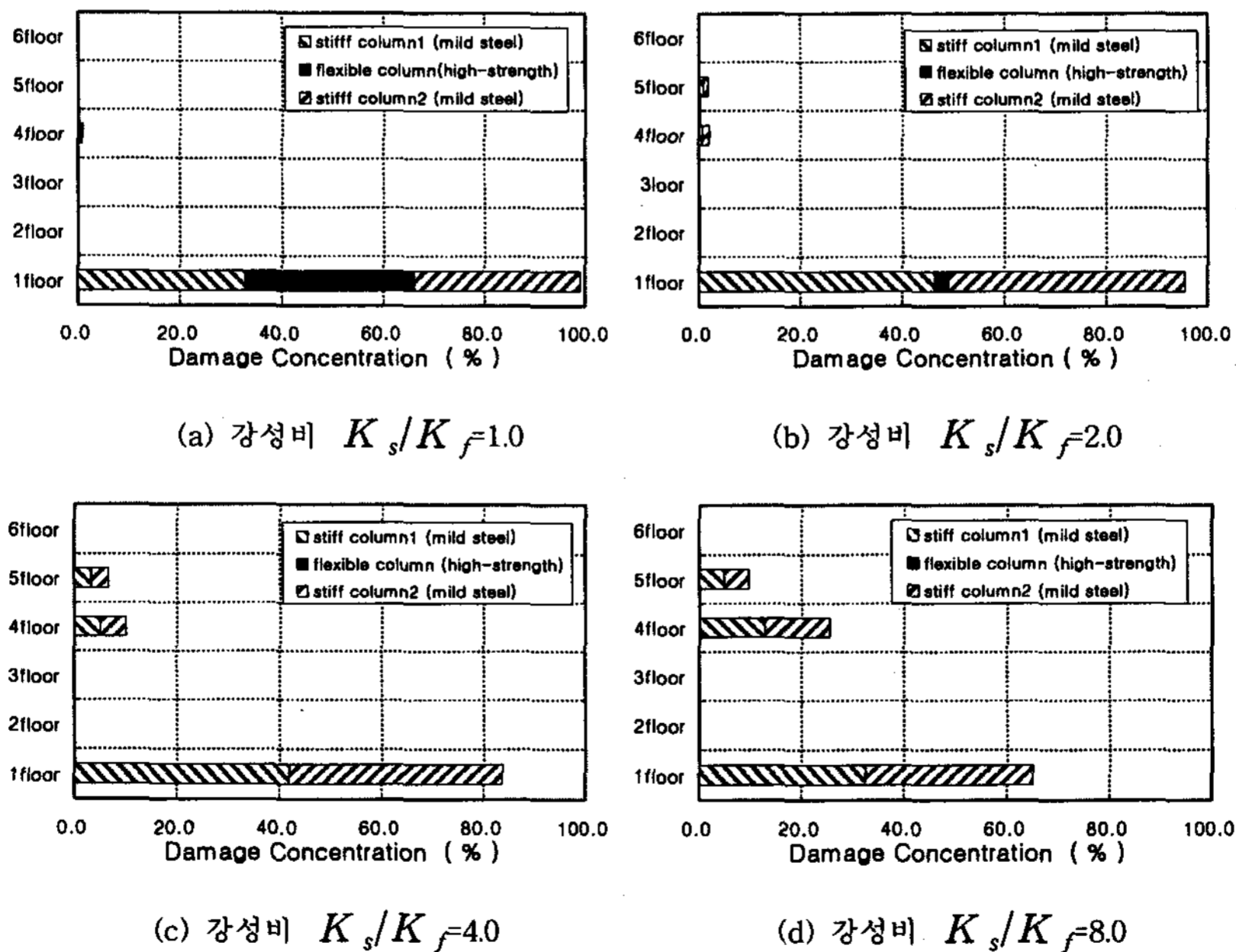


그림 6 6층건물에서의 손상분포(내력비 $M_s/M_f=1.0$)

그림 7은 1층에서 항복변형비($f_y \delta_y / s_y \delta_y$)와 유요소에 발생한 소성변형에너지의 관계를 나타낸 것이다. 횡축은 강요소의 항복변형에 대한 유요소의 항복변형의 비를 나타내고 있으며, 종축은 1

층에 발생한 전체 손상에 대한 유요소의 손상의 비를 나타내고 있다. 해석모델의 층수에 관계없이 강요소에 대한 유요소의 항복변형비가 커질수록 유요소가 받는 손상은 작아지고 $f\delta_y / s\delta_y$ 가 3.0~4.0이상일 때는 유요소에는 손상이 발생하지 않고 탄성에 머물고 있음을 알 수 있다.

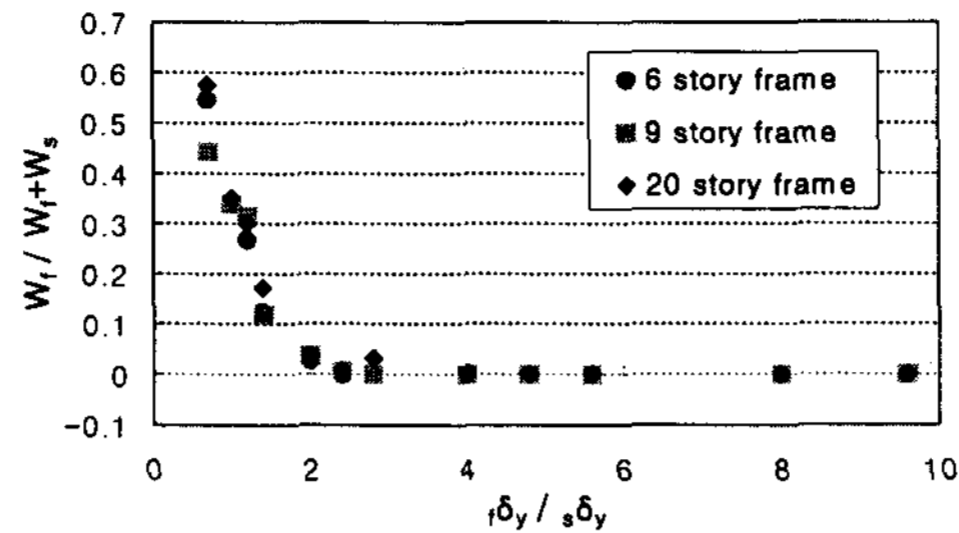


그림 7 1층에서의 유요소의 손상비

4. 유강혼합구조에 대한 실험적 연구

4.1 실험개요

실험체 Set-Up상황을 그림8에 나타내었다. 실험체는 순수 라멘골조로 되어 있으며, 수평방향으로 반복가력을 하였고, 횡방향의 변위를 측정하였다. 해석모델과 마찬가지로 실험체는 바깥 양쪽에 강요소로 사용된 기둥을 배치하였고, 중앙에는 유요소로 사용한 기둥을 배치하였다. 실험체에 사용된 강종 및 실험변수를 표 2에 나타내었다. 실험체의 외주부는 연강(SS400)을 사용하였고, 내주부는 고향복비-고강도강(SSA440, SM570) 혹은 연강(SS400)을 사용하였다. 내주부와 외주부의 항복변형비를 변화시켰다. 외주부의 단면은 그대로 두고 고향복비를 가지는 내주부의 단면을 변화시켜 항복변형비가 달라지도록 계획하였다. 표 2에서 실험체명 뒤에 붙는 숫자는 강요소의 항복변형에 대한 유요소의 항복변형비($f\delta_y / s\delta_y$)를 나타내고 있다. 예를 들어 FSM282의 경우 강요소의 항복변형에 대한 유요소의 항복변형은 2.82배임을 뜻한다. 또한 실험체명에서 SS는 SS400강종으로만, SM은 SM570강종으로만, SA는 SSA440강종으로만 이루어진 실험체를 뜻하며, FSM은 외주부는 SS400강종이고 내주부는 SM570강종으로 이루어진 경우이며, FSA는 외주부는 SS400강종이고 내주부는 SSA440강종으로 설계된 경우이다.

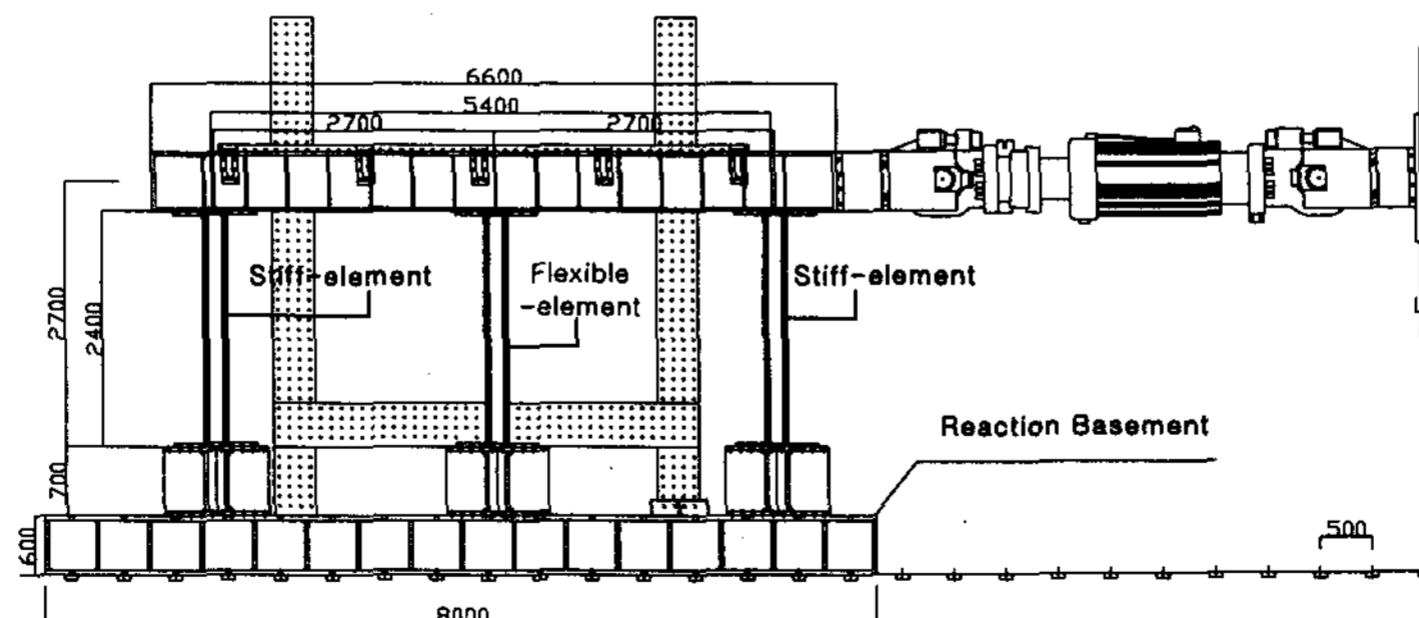


그림 8 실험체의 Set-up상황

표1 소재의 기계적 성질

강종	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	E (N/mm^2)	ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	σ_y/σ_u	연신률 (%)
SS400	316	461	2125	1518	0.69	22.79
SM570(9t)	572	620	2142	2728	0.92	16.78
SM570(19t)	572	640	2238	2622	0.89	18.38
SSA440	514	637	2135	2457	0.81	17.27

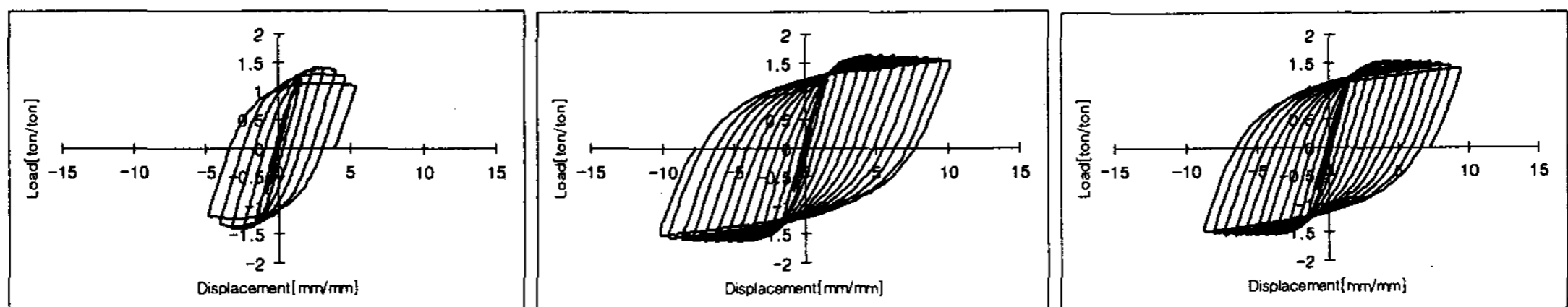
표2 실험체의 강성비 및 항복변형비

실험체명	외주부	내주부	강성비	항복변형비
SS100	SS400	SS400	1.00	1.00
SM100	SM570	SM570	1.00	1.00
SA100	SSA440	SSA440	1.00	1.00
FSM282	SS400	SM570	1.72	2.82
FSM327	SS400	SM570	2.72	3.27
FSM417	SS400	SM570	5.71	4.17
FSM225	SS400	SM570	1.56	2.25
FSM290	SS400	SM570	3.39	2.90
FSA273	SS400	SSA440	2.07	2.73
FSA321	SS400	SSA440	2.76	3.21
FSA334	SS400	SSA440	3.80	3.34
FSA430	SS400	SSA440	6.60	4.30
FSA494	SS400	SSA440	10.17	4.94

실험체에 사용되어진 강재들의 기계적 성질을 표1에 나타내었다. 외주부에 사용된 SS400강종의 항복비는 0.69로 나타났으며, 내주부에 사용된 SSA440과 SM570강종의 항복비는 0.81~0.92의 분포를 나타냈다.

4.2 하중-변형 관계

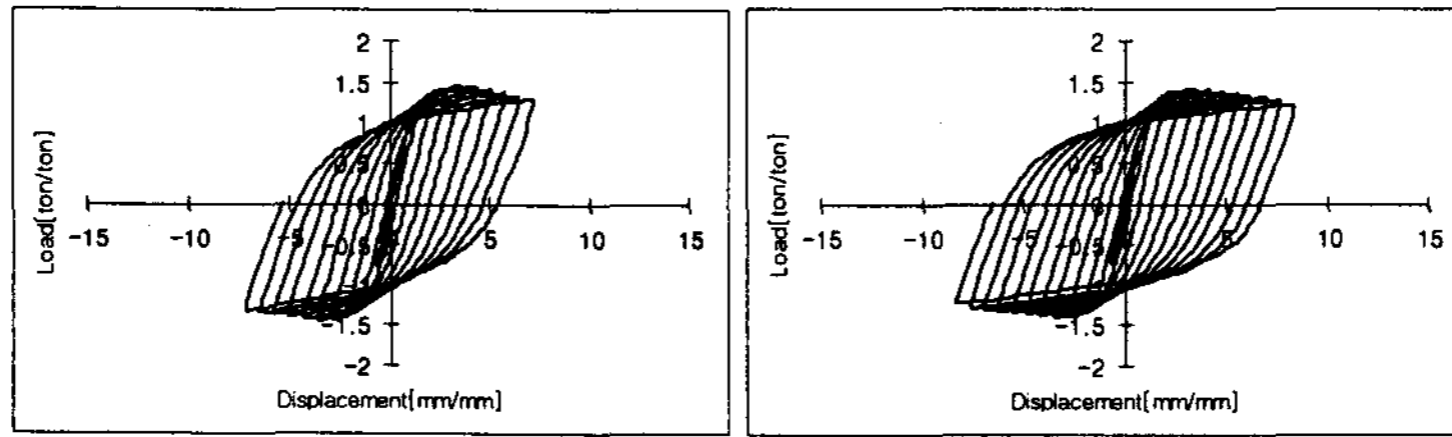
SS100과 FSA시리즈에 대한 실험에서 얻어진 하중-변형 관계를 그림 9에 나타내었다. 횡축과 종축을 항복변형 및 항복하중으로 나누어 무차원화하였다. 하중-변형관계를 비교할 때 소성변형능력에서 현저한 차이가 있음을 알 수 있다. FSA시리즈에서는 고풍복비를 가지는 SSA강을 사용하였음에도 불구하고 저항복비를 가지는 SS400강재로만 이루어진 SS100실험체보다 항복 이후의 내력상승률 및 변형능력이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 항복변형비가 3~4정도에서 골조의 소성변형능력이 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.



(a) SS100

(b) FSA273

(c) FSA321



(d) FSA430

(e) FSA494

그림 9 무차원화 하중-변형관계

4.3 변형도-회전각 관계

변형도-누적회전각의 관계를 그림 10 및 그림 11에 나타내었다. 그림 10은 모든 기둥을 같은 강종의 SS400을 사용한 경우의 변형도 분포를 나타내고 있다. 반면 그림 11은 외주부는 SS400, 내주부는 SM570강재를 사용한 FSM시리즈 실험체에 대한 결과를 나타내고 있다.

횡축은 반복하중에 의한 누적회전각을 나타내고 있고, 종축은 각 실험체에 변형도를 나타내고 있다. 그림 11에서 수평으로 굽게 나타낸 실선은 SM570강재의 항복 변형도를 나타내고 있다.

같은 강종으로 이루어진 실험체의 경우, 회전각이 증가함에 따라 변형도가 거의 같은 양상으로 증가하고 있다. 그러나 유강혼합 구조에서는 외주부에서는 SS100 실험체와 마찬가지로 변형도가 증가하고 있으나, 내주부에서는 변형도가 크지 않은 것을 알 수 있다. 또한 내주부와 외주부의 항복 변형비가 3배 이상인 경우에는 외주부가 종국 상황에 도달하더라도 탄성에 머물고 손상을 입지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 유강혼합구조에서 강요소가 탄성강성이 크고 소성변형능력을 확보하고 있다면 충분한 에너지 흡수능력이 있는 것으로 판단된다.

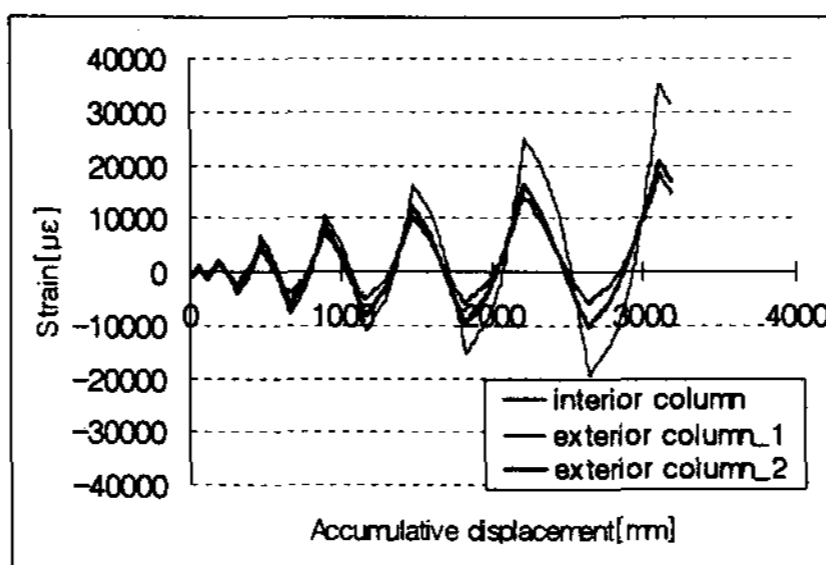
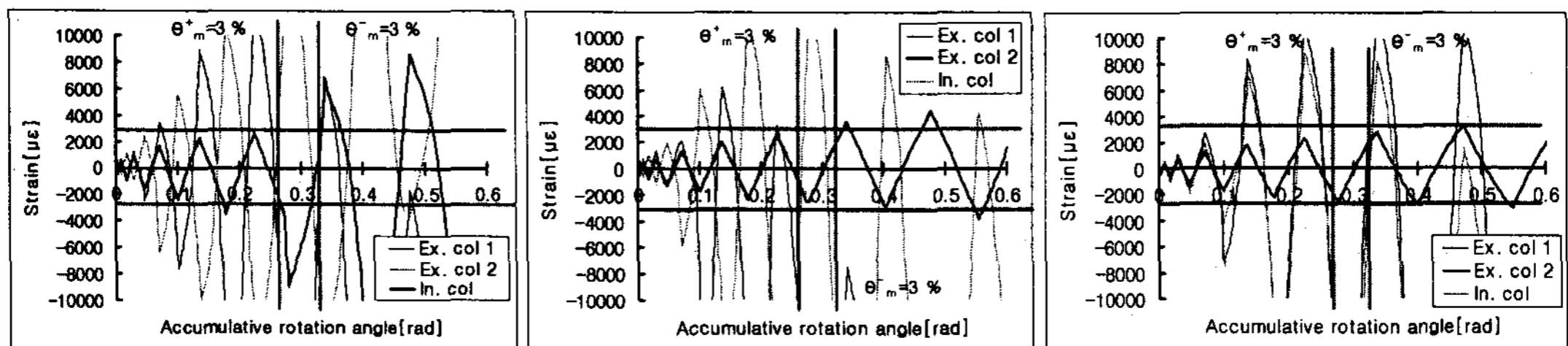


그림 10 SS100(전부SS400강종)의 변형도-누적회전각 관계



(a) FSM225

(b) FSM290

(c) FSM327

그림 11 외주부와 내주부의 변형도 분포의 비교

4.4 에너지 흡수능력

반복하중을 받는 철골부재는 그림 12에 나타낸 바와 같이 하중-변형관계 곡선은 골격부분 (skeleton part), 연화부(Bauschinger part) 및 제하부(unloading part)의 3부분으로 분해할 수 있다. 각 실험체에 대한 에너지 흡수량을 비교하여 그림 13에 나타내었다. 총 흡수에너지는 그림 12에서 나타낸 각 부분의 합으로 나타내었다. 같은 강종으로 구성되어진 실험체에서는 고향복비를 가지는 SM570강종으로 이루어진 SM100실험체 비해 저항복비강인 SS400강종으로 이루어진 SS100실험체의 에너지 흡수량은 연화부에서 약 5.54배에 달했다. SSA440강종으로 이루어진 SA100실험체는 SS100실험체에 비해 항복비는 높으나 진폭이 SS100실험체에 비해 크기 때문에 골격부에서 에너지 흡수량이 많았다. 그러나 SS400강종과 SM570 혹은 SSA440강종을 혼합한 유강혼합구조에서는 골격부에서의 에너지 흡수량은 SS100과 비슷하게 나타났으나, 연화부에서의 에너지 흡수량은 크게 나타났다. 결국 총에너지 흡수량은 FSM290실험체는 SS100실험체에 비해 약4배에 도달하였고, FSA273에서는 약 4.57배에 달하였다.

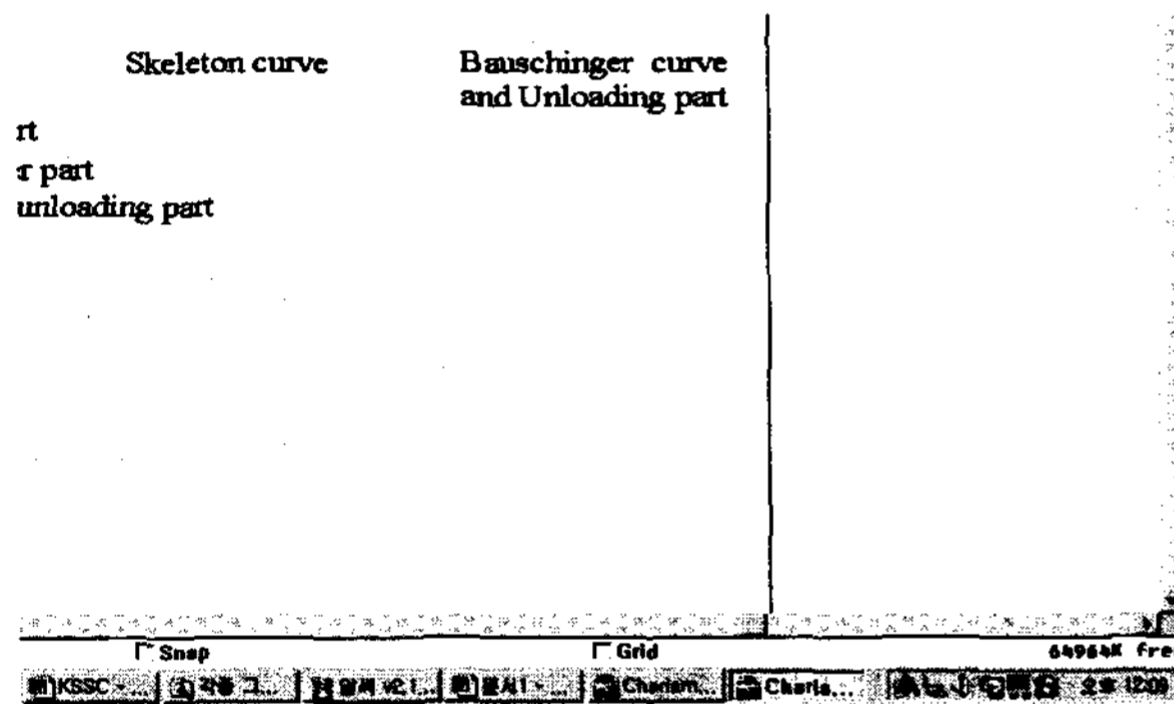


그림 12 반복 하중-변형관계 곡선의 분해

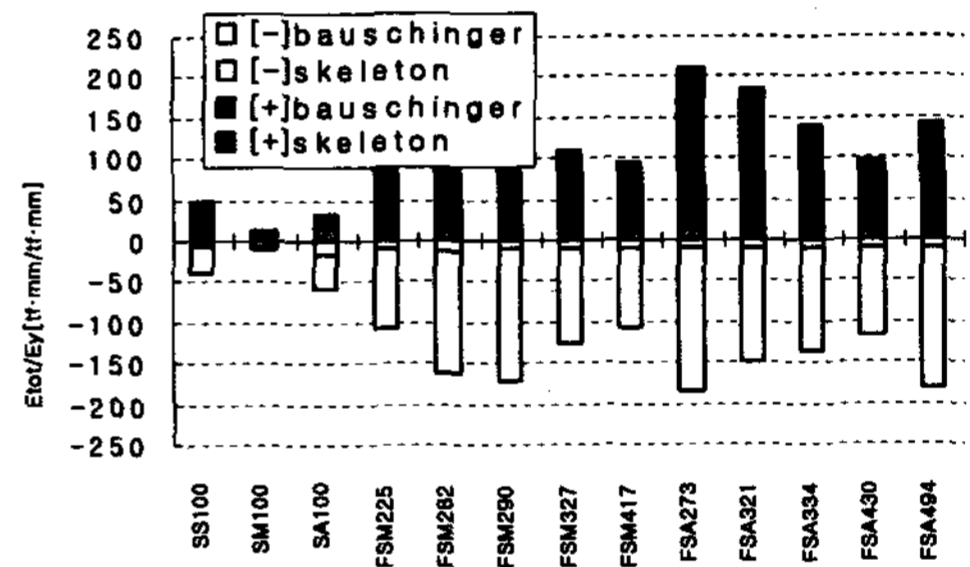


그림 13 각 실험체의 종국에너지 흡수능력

5. 결론

본 연구에서는 고향복비를 가지는 고강도강은 횡강성이 작은 유요소와 강성이 큰 강요소로 이루어진 유강혼합구조를 이용하면 유요소로 효과적으로 사용할 수 있음을 제시하고, 지진응답해석과 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 유요소에 비해 강요소의 강성이 3배 이상인 경우에는 고향복비를 가지는 고강도강으로 설계된 유요소는 강요소가 종국상태에 도달하여도 탄성에 머물 수 있었다.
- 2) 고향복비를 가지는 고강도강을 유요소로 사용하였을 때의 종국에너지 흡수능력은 저항복비를 가지는 연강으로만 설계된 경우에 비해 많은 에너지를 흡수할 수 있었다. 또한 강요소에 대한 유요소의 항복변형비가 3.0~4.0일 때 가장 큰 값을 나타내었다.
- 3) 고향복비를 가지는 고강도강은 일반적인 연강을 혼합 배치함으로써 내진구조에 적용 가능하다. 이러한 설계는 고향복비-고강도를 탄성에 머물게 할 수 있으며, 이러한 특성을 고려하면 다양한 건물에 적용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Akiyama, H. 1985. *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings*. University of Tokyo Press.
2. Akiyama, H. & Takahashi, M. 1990. *Influence of Baushinger Effect on Seismic Resistance of Steel Structures*. Trans. of A.I.J., No.418.
3. Harada, Y. & Akiyama, H. 1995. *Seismic design of Flexible-stiff Mixed Frame with Energy Concentration*. J. Struct. Const. Eng., A.I.J. No.472.
4. Kato, B. & Akiyama, H. 1973. *Theoretical Prediction of the Load-Deflection Relationship of Steel Members and Frames*. IABSE Symposium, Preliminary Publication, Lisbon.