

강구조 시스템의 에너지 흡수효율 Energy Absorption Efficiency of Structural Steel System

김 장 훈*
Kim, Jang Hoon

ABSTRACT

The energy concept has been applied to the reported experimental results of six different structural steel connections to investigate the characteristics of system-dependent energy curve and energy absorption efficiency. For this the concept of static and kinematic energy absorption efficiency has been defined. The present paper closes with the implication of the necessity of further investigation to extend the energy concept to reach the engineering practice.

1. 서 론

현대 내진 설계개념⁽¹⁾의 중심은 사람의 생명보호가 우선이고, 다음이 구조물의 최소한의 기능유지, 그리고 마지막으로 구조물 손상의 최소화라고 할 수 있다. 이러한 목적을 적절한 비용으로 달성하기 위하여 내진 설계기준은 구조물이 약한 지진에 대하여는 탄성적으로 거동하도록 요구하고 있으며, 강한 지진에 대하여는 비탄성적으로 거동하되 충분한 연성을 유지할 것을 요구하고 있다. 그러므로 지진의 영향 하에 있는 구조물이 이러한 요구조건에 부합하는가를 판단하기 위하여 적절한 내진 성능평가방법이 필요하다. 특히 내진 성능평가가 지진 후 구조물의 상태 예측, 보수 및 내진 보강, 앞으로 발생할 수 있는 미래의 지진에 대한 구조물의 잔여수명예측 그리고 이에 대한 비용부담-성능개선(Cost-Benefit) 효과 등과 연계되어 고려하여야 할 상황에서는 보다 객관적이고 구체적인 평가방법의 필요성이 제기된다.

새로이 설계되어 건립되는 구조물이나 오래 전에 설계되어 건립된 기존 구조물의 내진 성능평가방법에는 건축구조물에 대하여는 ATC-14⁽²⁾ 및 ATC-22⁽³⁾, ATC-40⁽⁴⁾ 등이 있으며 교량구조물에 대하여는 ATC-6-2⁽⁵⁾ 및 FHWA 매뉴얼⁽⁶⁾ 등이 있다. ATC-40을 제외한 이러한 평가방법들에 있

* 정회원 · 아주대학교 환경도시공학부 부교수

어서 특이할 사항은 제한적이거나 구조물의 거동(즉 힘-변위 관계)을 고려할 수 있으며, 현행 설계기준을 근거로 각 구조요소에 대한 보유능력/요구량 비 (Capacity/Demand Ratio)를 산출하여 평가한다는 점이다. 고려되는 구조요소로는 밀면전단력을 비롯하여 크게는 휨, 전단 및 축방향력이 있으며, 세분하여 정착길이, 이음길이, 전단철근 간격, 구속철근, 피복, 횡지지 없는 구간의 길이, 보-기둥 접합부 강도 및 좌대길이(Seat Width) 등이 있다. 그러나 이러한 방법은 비록 사용은 편리할지라도 구조요소들간 상호작용 및 지진하중의 반복적인 요인(Cyclic Effect)과 시간적인 요인(Duration Effect)을 제대로 고려할 수 없으므로 평가결과에 대한 신뢰성에 의문이 제기된다.

그러므로 실험을 통한 방법이 구조물의 내진 성능평가에 선호되고 있으며, 실제로 많은 실험연구들이 보고되어 있다. 그러나 실험에 의한 평가에도 분명히 한계가 있다. 일상적인 내진 성능평가 작업을 위하여 모든 대상 구조물을 실험한다는 것은 비용과 시간의 측면에서 비효율적이며 가능하지도 않다. 이를 극복하려면 소수의 구조물에 대한 실험결과를 일반화하여 실험과정을 거치지 않은 다수의 다른 구조물의 내진 성능예측에 이용할 수 있어야 한다. 즉 서로 다른 재료간, 상세간, 구조방식간 및 서로 다른 내진 보강방법간의 실험결과를 객관적으로 비교할 수 있어야 한다. 다양한 시험체의 내진 실험결과를 보다 효율적으로 사용하기 위하여는 무차원화 한 에너지 흡수 효율(Normalized Energy Absorption Efficiency)의 데이터베이스화가 선행되어야 한다.⁽⁷⁾ 이는 한 번 실험하고 곧 사장되는 많은 실험결과의 재활용이라는 측면에서도 바람직한 일이라고 생각한다. 에너지 흡수능력은 횡하중전달능력 및 소성변형능력 뿐만 아니라 지진하중의 반복적이며 시간적인 요인이 구조물에 미치는 효과를 포괄할 수 있다. 또한 에너지 흡수능력을 각 구조물의 메카니즘 강도에 대하여 무차원화 하면 서로 다른 재료간, 상세간, 구조방식간 및 서로 다른 크기의 구조체간의 객관적인 비교 또한 가능해진다.

이러한 취지 하에 본 연구에서는 기 실험·보고된⁽⁸⁾ 강구조 시스템의 힘-변위 관계곡선을 구하여 에너지곡선 및 에너지 흡수효율곡선을 작성하고 있으며, 본 논문에서는 그 중에서 서로 다른 상세를 가진 여섯 개의 강구조 시스템에 대한 에너지 흡수효율을 보이고자 한다.

2. 에너지곡선 및 에너지 흡수효율

에너지곡선 및 에너지 흡수효율은 그림 1과 같은 완전 탄성·소성(EPP) 시스템을 기준으로 하여 구조시스템의 힘-변위 관계곡선으로 둘러싸인 면적, 즉 에너지 보유능력을 누적소성변위에 대하여 시각화 한 것이다.⁽⁷⁾ 이 때 EPP 시스템의 무차원화 한 에너지곡선은

$$\frac{\Sigma E_{EPP}}{(F_n^+ + F_n^-) h_c} = \Sigma \Theta_p \quad (1)$$

로서 누적소성변위 자체이므로 누적소성변위에 대하여 기울기 1인 직선이 된다. 고려하는 구조 시스템의 무차원화 한 에너지곡선은 실험결과 얻은 힘-변위 관계곡선으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

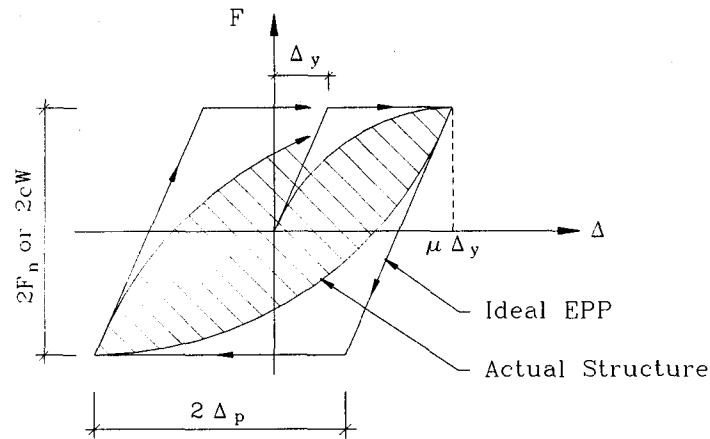


그림 1 Definition of energy absorption efficiency

$$\frac{\Sigma E_{EXP}}{(F_n^+ + F_n^-) h_c} = \frac{1}{4} \Sigma \left(\frac{F_i}{F_n} + \frac{F_{i-1}}{F_n} \right) (\theta_i - \theta_{i-1}) \quad (2)$$

그러므로 EPP 시스템에 대한 구조시스템의 에너지 흡수효율은 식 (2)를 식 (1)로 나누어 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{\Sigma E_{EXP}}{\Sigma E_{EPP}} \leq 1.0 \quad (3)$$

에너지 흡수효율은 결국 EPP 시스템의 에너지곡선 값에 대한 구조시스템의 에너지곡선 값의 비를 의미하며, 이를 달리 표현하면 그림 1의 평행사변형 면적에 대한 빗금 친 부분의 면적의 비가 된다. 이 때 에너지 흡수효율을 평가하기 위한 두 가지 EPP 시스템을 생각할 수 있다: 즉 (1) 정적(Static) EPP 시스템과 (2) 동적(Kinematic) EPP 시스템이다.

2.1 정적 EPP 시스템

정적 EPP 시스템은 그림 2에서 보이듯이 고정된 값 F_b 를 기준으로 에너지 흡수효율을 구하는 것이다. 여기서 F_b 는 주어진 단면의 공칭강도(Nominal Strength)이며, EPP 시스템의 변위나 가

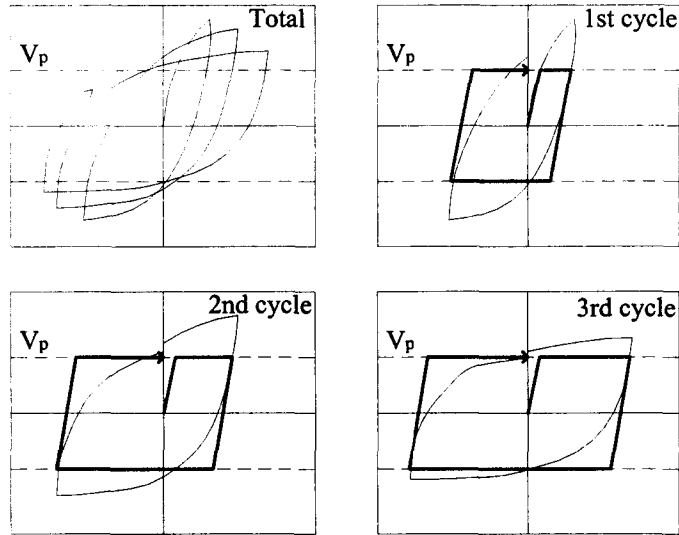


그림 2 Energy absorption efficiency based on static EPP system

력 횡수에 관계없이 일정한 값을 유지하는 것으로 간주한다. 이 때의 에너지 흡수효율은 식 (1), (2), (3)으로부터 구할 수 있으며, 일정한 기준 값에 대한 에너지 양의 상대적인 변화를 보여준다.

2.2 동적 EPP 시스템

동적 EPP 시스템은 그림 3에서 보이듯이 매번의 가력 사이클마다 최대하중 F_{\max}^{cycle} 를 기준으로 하여 그림 1과 같이 에너지 흡수효율을 구하는 것이다. 그러므로 매 가력 사이클의 최대하중은 반복 횟수가 더하여짐에 따라 피로로 인하여 감소하며, 이를 감안하여 에너지 흡수효율을 구하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\sum_{\text{cycle}} (F_i + F_{i-1})(\theta_i - \theta_{i-1})}{2(F_{\max}^{\text{cycle}} - F_{\min}^{\text{cycle}})(\theta_{p, \max}^{\text{cycle}} - \theta_{p, \min}^{\text{cycle}})} \quad (4)$$

여기서 F_i , θ_i , F_{\max}^{cycle} , F_{\min}^{cycle} , $\theta_{p, \max}^{\text{cycle}}$, $\theta_{p, \min}^{\text{cycle}}$ 은 실험결과 얻은 힘-변위 관계곡선으로부터 구할 수 있다. 이렇게 구한 에너지 흡수효율은 ATC-40⁽⁴⁾에서 정의된 감쇠 수정계수(α -factor)로

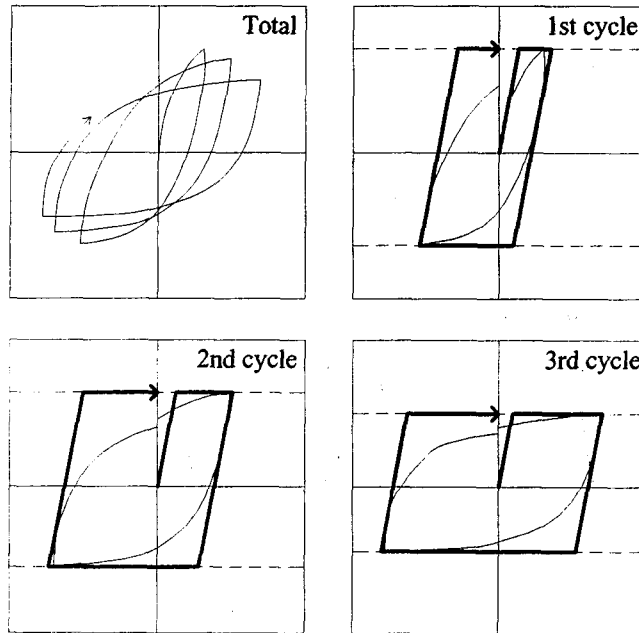


그림 3 Energy absorption efficiency based on kinematic EPP system

간주될 수 있다.⁽⁹⁾

3. 강구조 시스템의 에너지 분석

고려된 강구조 시스템은 SAC (SEAOC, ATC, California Universities) Joint Venture에서 구축한 강구조 접합부 실험 데이터베이스⁽⁸⁾로부터 여섯 개의 접합부를 선정하였다. 접합부 상세에 대한 특성은 표 1에 정리되어 있으며, 실험결과는 표 2에 정리되어 있다. 보고된 각 공시체의 실험결과로부터 재생한 힘-변위 관계곡선은 그림 4에 정리되어 있다. 각 공시체에 대한 에너지곡선은 그림 5에 정리되어 있으며, 에너지 흡수효율은 그림 6에 정리되어 있다.

에너지곡선 및 에너지 흡수효율은 선행논문에서⁽⁷⁾ 예측하였듯이 서로 다른 구조시스템간에 서로 다른 특성을 보여주고 있다. 특히 이들 곡선의 기울기가 암시하는 바는 소성변위가 누적됨에 따른 에너지 소산량의 변화를 시각화 할 수 있다는 점에서 에너지에 근거한 내진성능 해석의 발전 가능성을 보여주는 대목이라고 하겠다. 동적 에너지 흡수효율이 정적 에너지 흡수효율에 비하여 상당히 안정되고 높은 값을 보여주고 있다. 이는 큰 누적 소성변형 하에서도 구조 시스템 내에 에너지 흡수 여력이 남아 있음을 나타내는 것으로서 정적 에너지 흡수효율을 통하여는 찾아내기 어려

운 것임을 알 수 있다.

표 1 Details of structural steel connections

Model	Investigators (Institution)	Shape	Connection Type	Web Connection	Material & Section
LC2E	J.M. Ricles L-W Lu J.W. Fisher (Lehigh)	+	Notch-tough Welds	Bolted with Supplemental Welds	ASTM A572 Gr.50 Col. W14x398 Beam W36x150 w/o Cover Pl.
V4E-1.25-1.5-24	T.M. Murray E.A. Sumner (VPI)	T	End Plate with Bolts	Welded	ASTM A572 Gr.50 Col. W14x120 Beam W24x68 w/o Cover Pl.
EERCRC01	A.S. Whittaker V.V. Bertero (UC Berkeley)	T	Cover Plate	Bolted with Supplemental Welds	ASTM A572 Gr.50 Col. W14x176 Beam W30x99 w/ Cover Pl.
V8ES-1.25-1-30	T.M. Murray E.A. Sumner (VPI)	T	End Plate with Bolts	Welded	ASTM A572 Gr.50 Col. W14x193 Beam W30x99 w/ Rib (T&B)
EERCRC04	A.S. Whittaker V.V. Bertero (UC Berkeley)	T	Cover Plate	Bolted with Supplemental Welds	ASTM A572 Gr.50 Col. W14x176 Beam W30x99 w/ Cover Pl.
SDLS-1	C-M Uang K. Yu C. Gilton (UCSD)	T	Welded Unreinforced Flange (Reduced Beam Section)	Bolted with Supplemental Welds	ASTM A572 Gr.50 Col. W14x176 Beam W30x99 w/o Cover Pl.

4. 결론

본 논문에서는 에너지 개념을 여섯 개의 강구조 접합부 실험결과에 적용하여 그 특성을 살펴보았다. 에너지 흡수효율은 기하학적 및 재료적 측면에서 서로 다른 구조 시스템간의 지진에너지 흡수능력을 상대적이고 객관적으로 비교할 수 있음을 보여 주었다. 또한 에너지 흡수효율을 정적 그리고 동적 성능으로 구분하였는데 이들에 대한 개념 및 용도를 확장하기 위한 추후 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 POSCO의 2002년 사외 위탁과제 사업 지원 하에 수행된 것임을 밝히며, 이에 감사 드린다.

㉞ 2 Test results

Model	F_p (kN)	D_y (mm)	F_{max} (kN)	D_{max} (mm)	Failure Mode
LC2E	1975	39.6	2622	226.6	Ductile fracture of beam flange (T&B)
V4E-1.25-1.5-24	293.3	42.8	313	261	Cracking and separation of end plate from column face
EERCRC01	708	45.7	744	170	Local buckling, Tear in beam flange
V8ES-1.25-1-30	293	91.9	407	379	Local buckling of beam flange
EERCRC04	680	45.7	717	191	Local buckling and ductile tear in beam flange (T&B)
SDLS-1	465.9	41.4	522	190.5	Buckling of unreduced beam flange

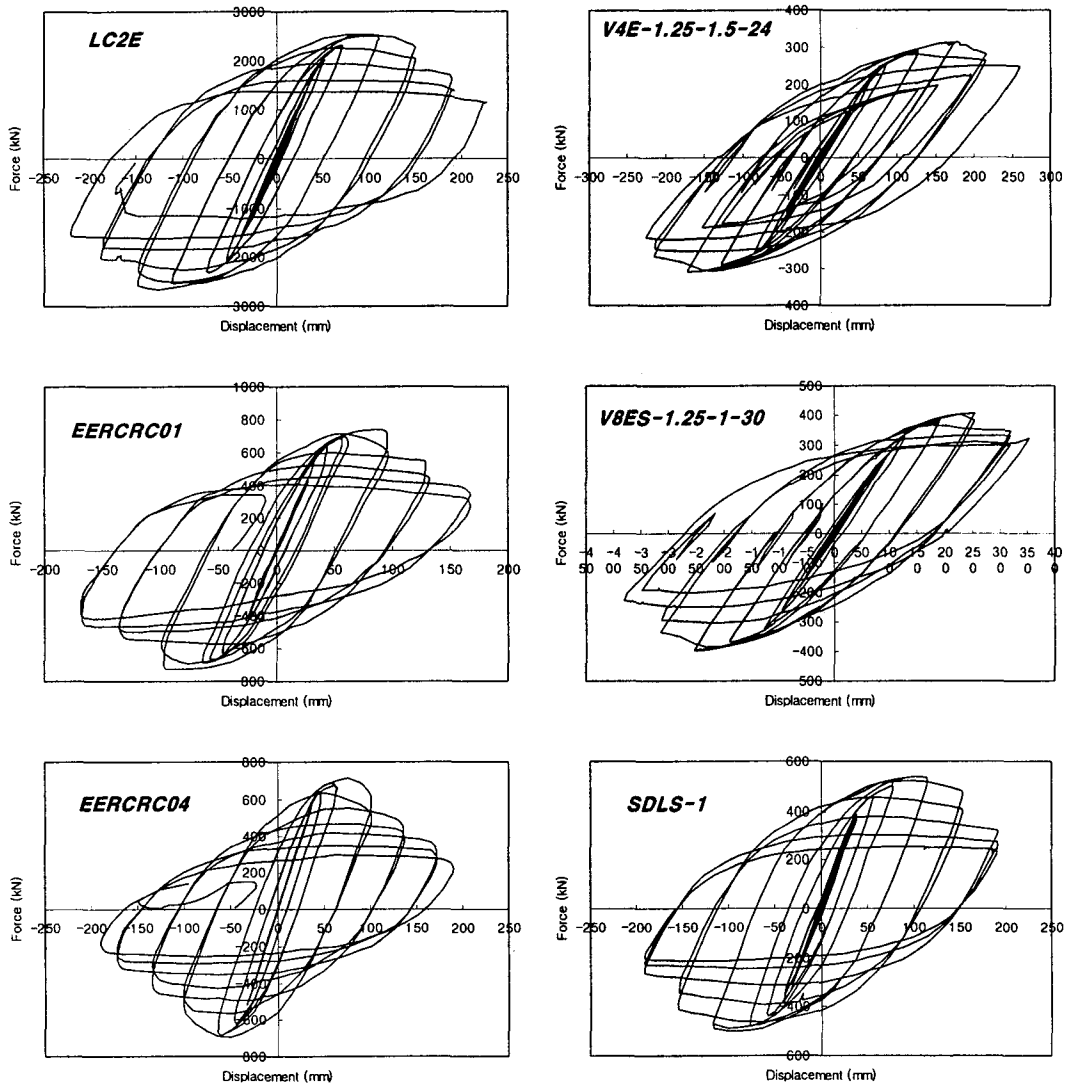


그림 4 Force-displacement relation of various steel connection specimens

참고문헌

1. SEAOC, "Recommended Lateral Force Requirements and Tentative Commentary", 5th ed., Structural Engineers Association of California, 1988.
2. ATC-14, "Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings", Applied Technology Council, 1987.
3. ATC-22, "A Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings (Preliminary)", Applied Technology Council, 1992.
4. ATC-40, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Applied Technology Council, 1996.
5. ATC-6-2, "Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges", Applied Technology Council, 1983.
6. FHWA, "Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges", Report No. FHWA-RD-94-052, U.S. Dept of Transportation, 1994.
7. 김장훈, "에너지 흡수효율에 의한 구조물간 내진 성능 비교", 한국지진공학회 논문집, 5(3), pp. 37-43, 2001.
8. SAC Joint Venture, Database of Steel Connection Tests, <http://www.sacsteel.org>.
9. 김장훈, 좌동훈, "에너지 흡수효율에 의한 철근콘크리트 구조물의 감쇠비 수정계수 결정", 콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 14(2), pp. 161-166, 2002.

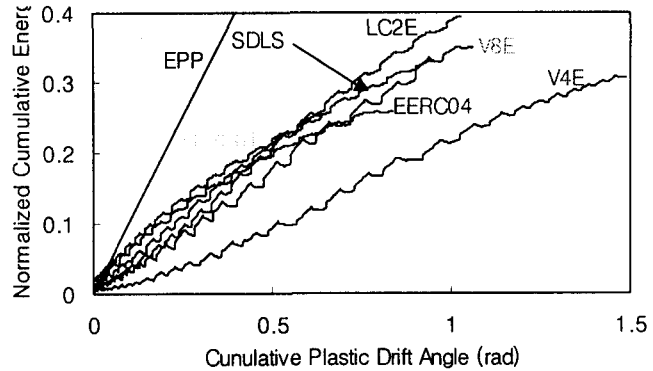


그림 5 Energy curves for various specimens

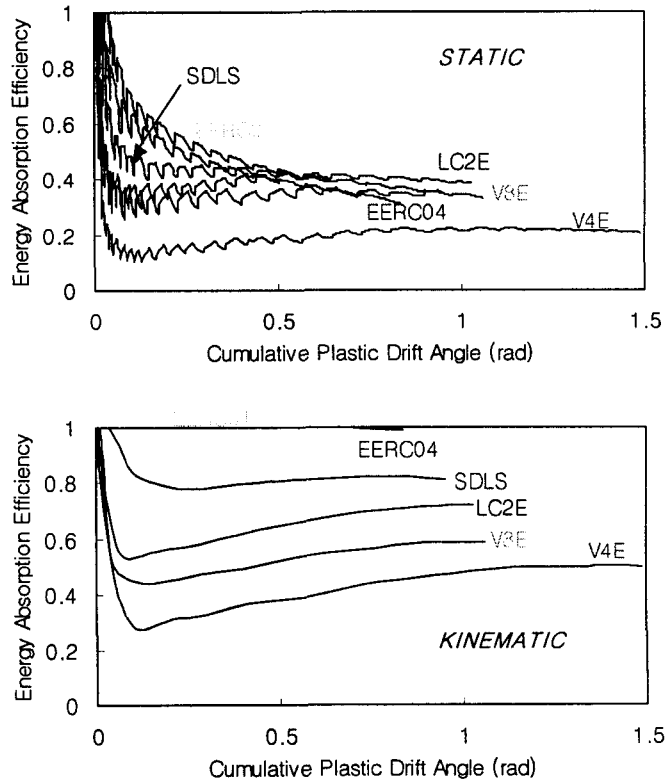


그림 6 Energy absorption efficiency of various specimens