

양단고정 단부구속에 따른 H 형 강재기둥의 좌굴 후 잔존내력 평가 §

아베베 다니엘 예쉬와웁* · 최재혁*** · 김진향*
 * 조선대학교 건축공학과, ** 조선대학교 건축학부 (건축공학전공)

Evaluation of Post-Buckling Residual Strength of H-Section Steel Column for Both Ends are Fixed Condition

Daniel Yeshewawork Abebe*, Jae Hyouk Choi*** and Jin Hyang Kim*

* Dept. of Architectural Engineering, Chosun Univ.,
 ** School of Architecture (Architectural Engineering), Chosun Univ.

(Received June 25, 2012; Revised September 11, 2012 ; Accepted September 17, 2012)

Key Words: Fixed Ended Column(단부구속기둥), Post-Buckling Residual Strength(좌굴 후 잔존내력), Plastic Deformation(소성변형), Non-Linear FEA(비선형유한요소해석)

초록: 연쇄붕괴는 충격이나 폭발 등의 비정상 하중에 의하여 구조물의 하중 전달요소가 제거됨으로써 구조물의 일부 또는 전체가 연쇄적으로 붕괴되는 현상을 말한다. 예상외의 하중이 기둥부재에 작용할 경우, 좌굴이 발생하며 내력저하가 급격히 진행되어 붕괴에까지 이르게 된다. 하지만 좌굴 후 에너지를 흡수할 수 있는 잔존내력이 충분하면 붕괴를 막을 수 있다. 따라서, 구조물이 최종 붕괴상태에 도달되는 전 과정에 대한 기둥부재의 하중-변형관계를 명확히 파악할 필요가 있다. 본 논문에서는 비선형유한요소해석을 실시하여 H 형 강재기둥의 단부 구속조건이 고정일 경우 잔존내력의 변화추이를 파악하였다. 또한, 처짐이론을 기반으로 이론식을 도출하여 해석값과의 적합성을 검토하였다.

Abstract: Progressive collapse is a chain reaction of failures propagating throughout a portion of a structure that is disproportionate to the original local failure. When column members are subjected to unexpected load (compression load), they will buckle if the applied load is greater than the critical load that induces buckling. The post-buckling strength of the columns will decrease rapidly, but if there is enough residual strength, the members will absorb the potential energy generated by the impact load to prevent progressive collapse. Thus, it is necessary to identify the relationship of the load-deformation of a column member in the progressive collapse of a structure up to final collapse. In this study, we carried out nonlinear FEM analysis and based on deflection theory, we investigated the load-deformation relationship of H-section steel columns when both ends were fixed.

- 기호설명 -

P : 축하중
 M_p : 소성모멘트
 Δ : 축력에 의한 변위
 θ : 소성회전각
 L : 기둥의 길이
 Z_p : 소성단면계수
 A : 단면적
 σ_y : 항복응력

P_y : 항복하중
 σ_o : 초기 항복응력
 ε : 변형률
 C, P : Cowper-Symonds 변형률 변수
 E : 탄성계수
 E_{tan} : 접선계수
 E_p : 소성경화계수
 λ : 세장비
 I : 단면 2 차모멘트

1. 서론

연쇄붕괴에 대한 연구는 1968 년 영국의 Ronan Point Apartment 의 붕괴를 계기로 시작되어, 1998 년 미국 오크라호마 연방청사 건물의 차량테러에 의한

§이 논문은 2012 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2012. 6. 26-27., 대전컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, jh_choi@chosun.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

연쇄붕괴 사건과 2001년 세계무역센터의 항공기 충돌 테러로 인한 붕괴 이후 연쇄붕괴에 대한 관심이 더욱 증가하고 있다.⁽¹⁾ 구조물의 우발적 하중에 의한 낙하물에 의한 충격은 기둥부재의 붕괴에 큰 영향을 미친다. 상부 구조물의 붕괴에 의해 하부구조물의 손상으로 이어지는 진행성 붕괴를 방지하기 위한 연구가 활발히 전개되고 있다.⁽²⁾

Bazant⁽³⁾는 소성힌지가 발생한 기둥의 소성 회전각을 통한 연직하중 평가식을 제안하였다. Ohi⁽⁴⁾는 기둥을 연직저항요소로 하는 구조물이 낙하물에 의한 충격으로 연쇄붕괴가 발생하지 않을 조건을 제시하였다. 이철호⁽⁵⁾는 이상하중에 의한 기둥손실을 가정한 2경간 보의 거동을 규명하였다. 이경구⁽⁶⁾는 폭발하중을 받는 압축재의 연직하중에 대한 잔여저항능을 평가하였다.

강재기둥의 탄성영역에서의 좌굴하중에 대한 연구는 1744년부터 시작되어 현재 많은 실험과 연구가 지속되고 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 하지만 대부분 초기 소성좌굴하중 및 미소변형 범위에서 연구가 이루어져 왔다. 예상외의 하중이 작용했을 때 강재기둥은 좌굴하중이 큰 소성변형능력을 나타내어 좌굴 후 대변형영역에서 기둥부재의 변형능력 및 내력에 관한 연구가 필요하다. 또한, 연쇄붕괴를 방지하기 위해서는 기둥부재의 하중-변형관계를 명확히 하는 것이 매우 중요하다.⁽¹¹⁻¹³⁾

따라서, 본 연구에서는 양단고정의 H형 강재기둥의 연직하중에 대한 소성변형거동과 좌굴 후 잔존내력을 평가하기 위해 비선형유한요소해석을 실시하였다. 그리고 처짐이론을 기반으로 이론식을 도출하여 해석값과의 적합성을 검토하였다.

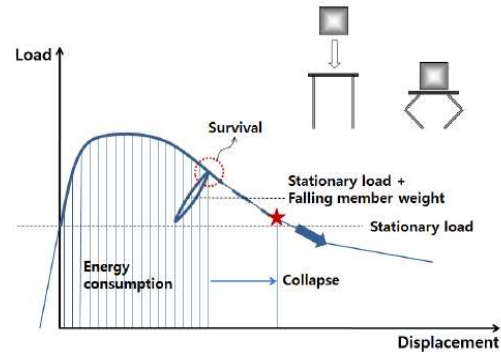
2. H형 강재기둥의 좌굴 후 거동

2.1 구조물에 대한 연쇄붕괴방지 조건

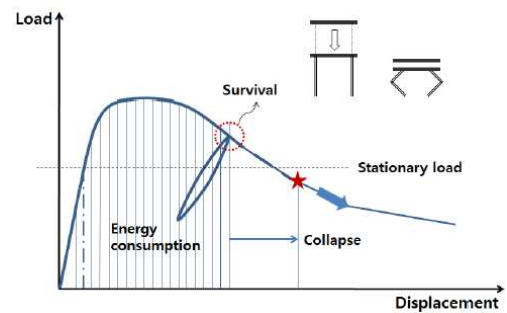
구조물의 연쇄붕괴조건을 정의하려면 연직방향에 대한 하중-변형관계를 명확히 하는 것이 매우 중요하다. Fig. 1은 낙하물의 충격에 의한 연쇄붕괴조건을 나타낸다. 상시하중외에 별도의 낙하물에 의한 충격(Fig. 1(a))과 상시하중에서의 우발적 부재손상으로 낙하하는 경우이다(Fig. 1(b)). 기둥부재의 에너지흡수능력이 상시 지지 하중과 낙하물의 충격하중을 합한 연직하중보다 클 경우 구조물의 연쇄붕괴는 발생하지 않는다.

2.2 구속조건에 대한 이론적 좌굴 후 거동

Fig. 2는 회전되지 않도록 양단이 고정된 기둥에서 압축하중에 의한 기둥부재의 좌굴이론의 개념적 모델을 나타낸다. 그림과 같이 양단부의 회전을 구속하



(a) Case that the weight of falling objects and the stationary load are considered separately



(b) Case that the weight of falling objects included in the stationary loads

Fig. 1 Conditions of progressive collapse prevention for structures due to falling object

고 수직방향으로만 변형이 가능하다. 양단고정의 기둥부재가 하중을 받아 항복할 경우 Fig. 2(b)와 같이 3개의 소성힌지가 발생한다. 축방향 하중과 좌굴에 대한 기하학적 형태에서, 기둥의 절반을 자유물체도로 나타내었을 때 모멘트 평형으로부터 축력과 변형량은 각각 식 (1)과 식 (2)에 의해 계산된다.^(3,14)

$$P = \frac{4M_p}{L \sin \theta} \tag{1}$$

$$\Delta = \frac{L}{2}(1 - \cos \theta) \tag{2}$$

삼각이론을 이용한 식 (3)을 이용하여 소성회전각을 제거하는 것으로 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\sin \theta = \frac{2\sqrt{L\Delta - \Delta^2}}{L} \tag{3}$$

$$P = \frac{4M_p}{L\sqrt{\frac{1}{4} - \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{\Delta}{L}\right)\right]^2}} \tag{4}$$

$$\Delta = \frac{L - \sqrt{L^2 - (4M_p/P)^2}}{2} \tag{5}$$

식 (4)로부터 변위 Δ 는 식 (5)와 같다.

재료특성 및 단면특성을 고려한 단면의 전소성모멘트는 식 (6)과 식 (7)을 식 (5)에 대입하여 식 (8)을 유도할 수 있다.

$$M_p = Z_p * \sigma_y \tag{6}$$

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A} \tag{7}$$

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \left(\frac{2Z_p}{LA}\right)^2 * \left(\frac{1}{P/P_y}\right)^2} \tag{8}$$

식 (5)의 일반적인 하중-변위 곡선은 Fig. 3 과 같다.

3. 비선형유한요소해석

3.1 재료모델

단부 구속조건에 따른 H형 강재 기둥의 좌굴 후 잔존내력을 평가를 위해 범용 비선형유한요소해석

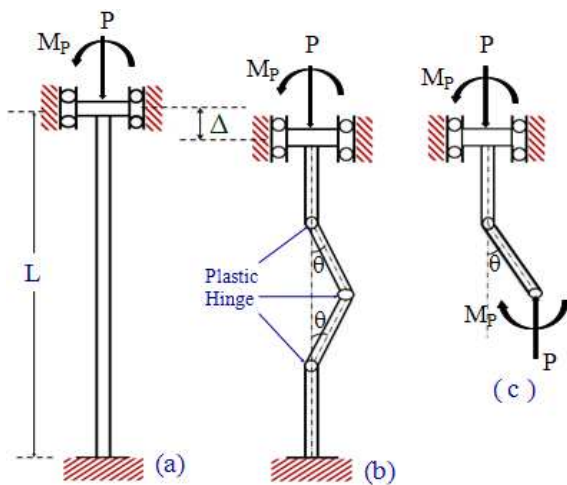


Fig. 2 (a) Fixed ended column model, (b) Bazant's plastic buckling mechanism model and (c) Free body diagram

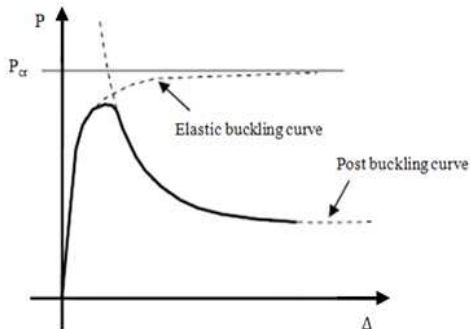


Fig. 3 Elastic buckling load-displacement curve

프로그램인 LS-Dyna 를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석모델은 SS400 재질의 H-100×100×6×8 단면형상을 사용하였다. 셀 요소를 이용하고 상하부는 강체로 모델링하였다. 잔류변형을 위해 대변형 운동을 고려하였으며, Plastic Kinematic 모델을 이용하여 재료특성을 모델링하였다. 좌굴해석부분과 강체 사이의 접촉요소는 Explicit dynamic 제약조건을 고려할 수 있도록 Extra Node 를 설정하였다.

일반적으로 경화규칙은 등방성 경화(Isotropic hardening), 운동학적 경화(Kinematic hardening) 또는 등방성과 운동학적 경화의 조합(Combination of kinematic and isotropic)이 있다. 등방성과 운동학적 경화는 경화변수 β 를 0(kinematic)부터 1(isotropic)까지 조정하여 다양화 할 수 있다. 변형률은 식 (9)와 같이 Cowper-Symonds 모델을 사용하여 항복응력의 크기로 계산된다.⁽¹⁵⁾

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{n}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{aff}) \tag{9}$$

$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}} \tag{10}$$

유한요소법에서 Kinematic hardening rule의 변형률-종속 소성모델을 사용하여 Scalar 매개변수(β -경화 매개변수)는 0 을 사용하였다.

Fig. 4 에 Kinematic hardening rules 을 나타내었다. Kinematic hardening 은 그림과 같이 항복표면이 동일한 모양과 크기로 유지되며, 응력공간은 단순 이동된다. 좌굴과 좌굴 후 거동은 부재의 재료와 단면속성에 따라 달라진다. 해석에 사용된 기계적 성질을 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다. Table 2 와 같이 해석값의 비교를 위해 세장비를 변수로 하였다.

Table 1 The property of material used in the analysis is indicated in the table below

Property	Specimen	Upper and Lower Rigid body
Young's Modulus (GPa)	205	205
Poison's ratio	0.3	0.3
Density (kg/m ³)	7860	7700
Yield Strength (MPa)	345	-
Tangent Modulus (MPa)	756	-
Hardening Parameter	0	-
Strain rate [C] (s ⁻¹)	40	-
Strain rate [P]	5.0	-
Failure Strain	0.75	-

Table 2 Sectional features of specimen

Property		Values	
Section area (mm ²)	A	2.19x10 ³	
Plastic modulus (mm ³) 2.1.	Z _x	4.12x10 ⁴	
	Z _z	8.76x10 ⁴	
Moment of area (mm ⁴)	I _x	1.34x10 ⁶	
	I _z	3.83x10 ⁶	
Slenderness ratio	CASE I	λ _x	3
		λ _z	5
	CASE II	λ _x	6
		λ _z	10
	CASE III	λ _x	12
		λ _z	20
	CASE IV	λ _x	18
		λ _z	30

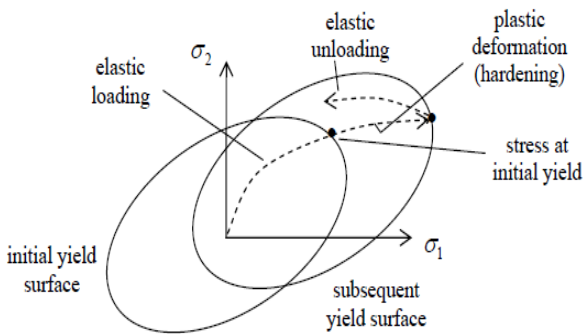


Fig. 4 Kinematic hardening rules

Table 2 의 시험체의 단면 특성을 감안할 때 시험체의 길이는 식 (11)에서 계산된다.

$$L = k * \lambda \tag{11}$$

k 는 단면 2 차반경으로 식 (12)에 의해 주어진다.

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{12}$$

그러므로 각 CASE 별 시험체의 길이는 125mm, 250mm, 500mm, 750mm 가 된다.

3.2 하중 및 경계조건

시험체는 양단고정의 경계조건을 위해 해석모델의 하부강체는 모든 변위 및 회전을 완전 구속하였다. 상부강체는 Y 축 방향의 변위를 자유로 하고 하부 강체와 같이 모든 회전은 완전 구속하였다. Fig. 5 에 해석 모델과 하중 및 경계조건을 나타내었다. 하중은 중심 축 하중을 상부강체에 강체변위를 부여하는 것으로

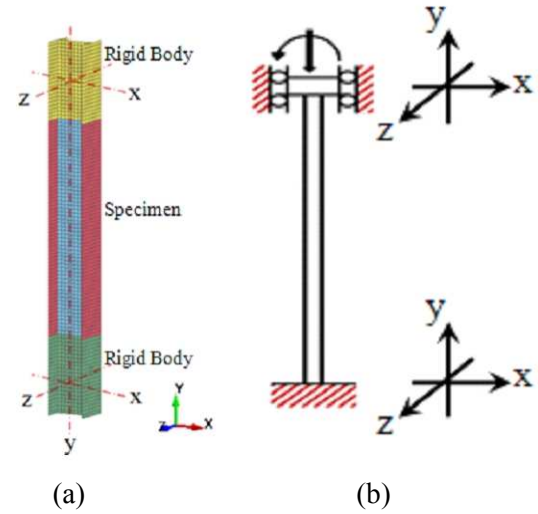


Fig. 5 (a) Analysis model, (b) Loading and constraint condition

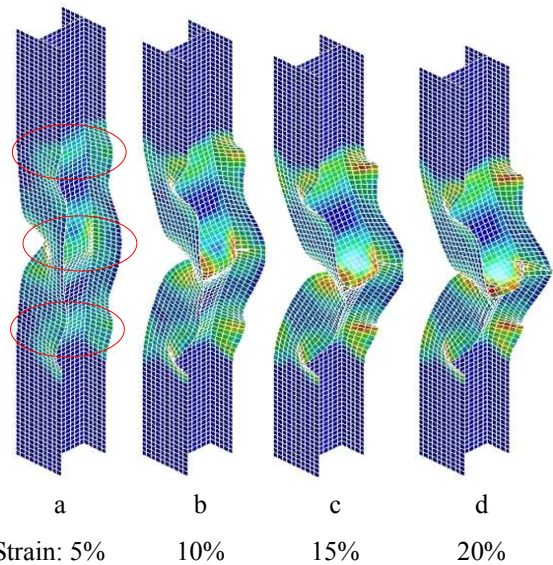


Fig. 6 The deformation Shape of analysis result for case II

제하 하였으며, 100mm/sec 로 선형적으로 하중증분 하였다.

4. 비선형유한요소해석 결과

4.1 파괴형상

대다수 파괴는 단면의 일부에서 항복이 발생한 후 좌굴에 의해 발생한다. Fig. 6 에 해석모델의 변형과 파괴형상을 나타내었다. Fig. 6(a)1 에서와 같이 시험체의 국부좌굴이 부재의 중앙부와 양단부 끝부분의 플랜지에서 발생하는 것을 확인하였다. 해석결과의 변형형상은 Fig. 2 에 보여진 이론적 소성변형과 동일하다. 기둥부재가 완전히 좌굴되기 이전에, 부재의 플

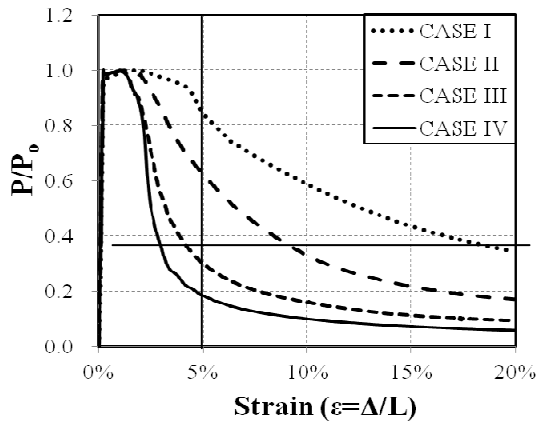


Fig. 7 load and deformation curve result

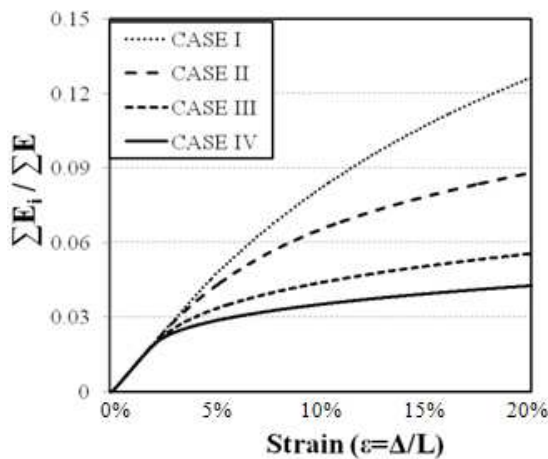


Fig. 8 Comparison of cumulative energy absorption

랜지는 임계하중에 도달한 이후 중앙부위가 국부적으로 좌굴이 발생한다. 하지만 일반적으로 국부좌굴은 단기간에 발생하기 때문에 크게 문제되지 않는다. 따라서, 부재는 전체적인 좌굴의 영향을 받으며, 모든 시험체에서 동일한 파괴형상을 확인할 수 있었다.

4.2 하중-변위 관계와 에너지 흡수능력

Fig. 7 에 하중-변위 해석결과를 나타내었다. 모든 시험체에 대해 최대하중 도달 이후 강도가 일정하게 유지된 후 내력저하가 발생하는 것을 확인하였다. CASE I 시험체의 경우 약 4%의 변형까지 지속적인 강도를 유지하였고 최대하중 도달 이후 다른 시험체 비해 비교적 내력저하가 완만하게 나타났다. 또한, 변형률 4% 일때 각각의 하중비율은 CASE I ~ VI 에 대해서 0.2353, 0.3883, 0.7205, 0.9460 의 값을 나타내었다. 한편, 하중비율($P/P_0 = 0.4$)에 대한 CASE I ~ VI 의 변형률은 16.68%, 8.42%, 3.89%, 2.83%의 값을 나타내었다. 에너지흡수능력을 Fig. 8 에 나타내었다. 초기상태 혹은 탄성상태에서 기둥부재의 에너지 흡수능력은 모든 세장비율에 대하여 동일하지만 비탄성

상태에서는 에너지 흡수능력이 큰 차이를 보였다. 기둥의 세장비가 증가할수록 에너지흡수능력이 감소하였다. 세장비율이 2 배 증가할 때 전체에너지 흡수능력 및 기둥부재의 저항능력이 50%이상 줄어드는 것을 확인하였다. 따라서, 기둥부재의 에너지 흡수능력은 세장비에 크게 의존하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

양단고정의 H형 강재기둥의 연직하중에 대한 소성변형거동과 좌굴 후 잔존내력을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 축방향 압축하중에 대한 H형 기둥부재의 파괴형상은 부재의 중앙부분과 양단부 끝부분의 플랜지에서 좌굴이 발생하는 것을 확인하였다.
- (2) 기둥의 내력저하는 1.5~2.5% 변형률 구간까지 일정하게 유지되다가 세장비가 높을수록 내력저하가 급속하게 나타나는 것을 알 수 있었다.
- (3) 기둥부재의 세장비가 2 배 정도 증가하면 기둥의 에너지 흡수능력은 약 50%이상 감소하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 2011-0020027, 과제번호: 2012-0004069)

참고문헌

- (1) Nair, R.S., 2003, "Progressive Collapse Basics, Proceedings of AISC-SIDNY Symposium on Resisting Blast and Progressive Collapse," AISC, New York.
- (2) Hwonmo, P., 2011, "Evaluation on the Post-buckling Energy Absorption of H-Shaped Steel Column for Prevention Progressive Collapse," Master thesis, Chosun University.
- (3) Bažant, Z.P. and Zhou, Y., 2002, "Why Did the World Trade Center Collapse? -Simple Analysis," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, pp. 2~6.
- (4) Li, Z., Ohi, K. and Ito, T., 2003, "Sensitivity Analysis in Vertical Load Carrying Capacity of Framed Structures to Member Disappearance," *Journal of Constructional Steel*, Vol.11, pp.325~332.
- (5) Lee, C.H., Kim, S.U., Lee, K.G. and Han, K.H., 2009 "Simplified Nonlinear Dynamic Progressive Collapse Analysis of Welded Steel Moment Frames Using Collapse Spectrum," *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 21, No. 3, pp. 267~275.
- (6) Lee, K.K., 2010, "Evaluation of Residual Capacity of Steel Compressive Member Under Blast Load,"

- Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 26, No. 10, pp.37~44.
- (7) Shanley, F.R., 1946, "The Column Paradox," *Journal of Aeronautical Science*, Vol.13, pp.261~264.
- (8) Shanley, F.R., 1947, "Inelastic Column Theory," *Journal of Aeronautical Science*, pp. 261~264.
- (9) Ben, K.T., Hiroshi, A.K. and Keihiko, I.N., 1975, "Post-Buckling Behavior of Short Steel Columns," *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, Vol. 299, pp. 67~76.
- (10) Livesley, R.K., 1968, *Introduction to Matrix Structural Analysis*.
- (11) Park, H.-M., Yeshewawork, D., Kim, H. S. and Choi, J.-h., 2011, "Analytical Evaluation of Residual Strength for Steel Frame in Case of Column Member Loss," *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 24, No. 6, pp.675~683.
- (12) Shakerley, T.M. and Brown, C.J., 1996, "Elastic Buckling of Plates with Eccentrically Positioned Rectangular Perforations," *Int. Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 38, Issue 8-9, Vol. 825~838.
- (13) Daisuke, S.T. and Ahmer, W.D., 2008, "Post-buckling Behavior of Pre-stressed Steel Stayed Columns," *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 1224~1239.
- (14) Paris, P.C., 1954, "Limit Design of Columns," *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 21, pp. 43~49.
- (15) ANSYS LS-DYNA user's manual version 12.0.