

양단 고정단인 건축용 내화강재 적용 보부재의 해석적 내화성능 연구

권인규

강원대학교 소방방재학부

Analytical Study of the Fire Resistance for Beams Consisting of Fire Resistant Steels with a Both Fixed Boundary Conditions

In-Kyu Kwon

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received August 19, 2016; Revised September 19, 2016; Accepted October 5, 2016)

요 약

건축용 내화강재가 적용된 양단 고정단 보부재의 고온 시 최대 내력과 처짐을 해석적으로 평가하였으며, 이 결과를 일반강재 적용 고정 보부재와의 비교평가를 통하여 안전성을 평가한 결과, 건축용 내화강재 적용 부정정 보부재의 내화성능을 일반 강재 고정 보부재로 평가되는 것은 안전측이었으며, 부재길이 길어지면 처짐의 증대와 최대 내력의 감소가 유발되는 등 이에 대한 보완책이 요구되는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The fire resistance of a statistically indeterminate beam made of fire resistant steel was analyzed using the mechanical and thermal databases and compared with that of an indeterminate beam constructed of ordinary structural steel to not only determine the fire resistance performance of a statistically indeterminate beam itself, but also to determine if it is stable to test the fire resistance performance with a determinate beam built with ordinary structural steel instead of an indeterminate beam made from fire resistant steels. The results showed that the fire resistance of an indeterminate beam consisting of fire resistant steels is better than that of a determinate beam made of SS 400 and if the length of the beam built with FR 490 is longer, the displacement of the beam is higher. In addition, the fire test with a determinate beam made of SS 400 is more conservative than that of an indeterminate beam made of FR 490 in the range of the same length. Therefore, another measure should be considered if beams built with FR 490 are longer than those of SS 400.

Keywords : Statistically indeterminate beam, Determinate beam, Fire resistance, Fire resistant steel

1. 서 론

1.1 연구 목적

도심지에서의 화재발생은 건축 구조물의 구조내력 저하 및 인접 건축물로의 확산으로 도시 기능이 마비될 수도 있다. 따라서 건축물의 화재 발생에 대한 예방과 진압의 필요성이 점차 강조되고 있는 추세이고, 주요 구조부에 대한 내화성능의 필요성 인식이 제고되고 있다. 특히 건축물에 적용되는 구조용 강재의 경우, 용접성능은 기존 용접 구조용 강재와 동일하나 고온 시 내력저항 성능을 향상시킨 건축용 내화강재가 새로운 구조재료로 개발되었다^(1,2).

일반적으로 구조용 강재가 적용된 건축물의 구조형식은 보와 기둥으로 형성되는 라멘 구조이다. 특히 거주와 보관의 주 공간인 바닥의 하중은 보부재에 의해서 지탱되고,

기둥부재로 전달된다. 이와 같은 보부재의 단면결정은 바닥에 작용하는 하중의 크기에 좌우되며, 특히 경제조건에 따라 단면의 크기가 결정된다. 따라서 경제적인 구조설계 측면에서 양단 고정단으로 설계되는 것이 일반적이다.

국내의 시행되고 있는 보편적인 보부재 내화성능 평가는 일정한 단면크기와 통상적 일반 구조용 강종 그리고 단순보의 경제조건으로 평가되는 것이 일반적이다⁽³⁾.

따라서 양단 고정단으로 설계되고, 건축용 내화강재가 적용된 보부재의 고온 시의 구조적 거동 확인이 필요하고, 또한 일반 강재와 단순보로 평가되는 현행 평가 방법과의 비교를 통한 안전 측 확인 또한 필요하다고 판단된다. 따라서 본 논문에서는 건축용 내화강재의 고온 기계적 특성과 열적 특성을 이용하고, 열전달 이론과 열응력 해석을 통한 고온 시 거동을 평가하고, 동일한 과정을 통한 일반

강재와 단순보에 의한 현행 내화구조 성능평가 비교를 통하여 안전성을 확인하고자 한다.

1.2 연구 방법 및 범위

건축용 내화강재를 사용한 양단 고정단보의 내화성능을 해석적으로 평가하기 위해서 건축용 내화강재의 고온특성 데이터베이스 및 고온 구조 모델 그리고 고온 시의 선펡창 및 열전도 특성을 활용한다. 고온 시의 구조내력을 평가하기 위한 보부재의 크기는 강재 보부재의 내화성능을 평가하는 통상적 크기인 H-400 × 200 × 8 × 13로 하고, 화재의 크기는 한국산업규격 (KS F 2257-1)⁽⁴⁾에 정의된 표준화재 곡선으로 하며, 화재지속시간은 1시간으로 한다. 그리고 실제 강구조 건축물에 적용되는 보부재 길이에 따른 고온 내력 저감특성을 정량화하기 위하여 부재 길이를 내화시험에 사용되는 표준크기인 4,100 mm를 바탕으로 4,400 mm 그리고 4,700 mm로 설정한다.

본 논문에서는 우리 나라에서 개발된 FR 490강재(항복강도 33 MPa)인 건축용 내화강재를 적용한 부정정 보부재의 고온 내력을 보편적으로 시행하고 있는 우리 나라의 내화구조 시험조건인 일반 강재 적용 보부재(항복강도 24 MPa, 정정구조)와 비교, 평가함으로써 안전성을 검토하고, 보부재 길이 변화에 따른 내화성능 감소 경향을 제시하고자 한다.

2. 기존연구의 고찰

건축용 내화강재는 용접성과 고온 시 구조거동 유지성능이 우수한 강재이며, 특히 600 °C에서도 상온의 설계내력을 유지할 수 있는 것으로 평가되고 있는 강재이다. 이와 같은 특성이 유지될 수 있도록 건축용 내화강재는 특수 합금인 크롬과 몰리브덴 등이 포함되어 있다^(1,2,5,6).

강구조 건축물의 고온 시 내력평가에 적용되는 강재의 고온 데이터베이스는 유러코드 3⁽⁷⁾의 자료를 많이 활용하고 있다. 그러나 유러코드의 강재 특성 자료는 일반강재를 대상으로 구축된 재료의 고온 특성이므로 보편적으로 활용하는 것에는 한계가 있다고 판단된다. 내화강재 적용 강구조 건축물의 고온 해석 연구에는 내화강재의 고온물성 등을 토대로 해석을 수행한 Sakumodo^(8,9)의 연구가 있고, 고온 시의 보 및 기둥부재의 해석적 내력평가는 재료의 고온물성평가 결과를 활용한 Yang과 Chung의 연구가 있다^(10,11). 우리나라에서는 강재의 고온 물성과 열응력 해석을 토대로 건축용 내화강재를 적용한 정정 보부재를 대상으로 권인규의 해석적 연구가 진행되었다⁽¹²⁾.

3. 부정정 보부재의 해석적 내화성능 평가

3.1 보부재의 경계조건 별 내력산정

강재보의 해석적인 내화성능 평가를 위한 경계조건과 재하조건은 현재 적용되고 있는 강재 보부재의 재하가열

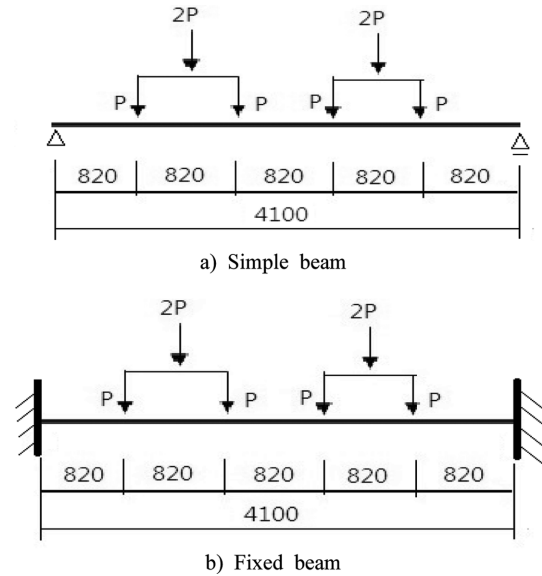


Figure 1. Load distribution condition for each beam.

시험 조건을 참고하여 다음 Figure 1과 같이 계획하였고, 정정 및 부정정 보부재의 최대하중을 각각 계산하였다.

3.2 경계조건에 따른 내력과 처짐 계산

3.2.1 단순보

강재보의 내화성능 또는 피복재료의 두께 결정을 위한 내화시험 시 경계조건은 한단 한지단 그리고 타단 회전단으로 구성되는 단순보가 일반적이다. 단순보의 단면은 보부재에 발생하는 최대 모멘트에 견딜 수 있는 부재로 설계되므로 고정단 조건의 강재보에 비해서 단면이 커질 수 있다.

재하가열시험을 위한 최대하중은 작용 하중에 따른 최대 모멘트와 허용 휨응력의 산출이 요구된다. 그리고 고온 시 내력 평가를 위한 본 논문에서는 온도변화에 따른 강재의 단면적 변화 그리고 횡좌굴 발생은 없는 것으로 가정한다.

스팬 4,100 mm인 보부재의 허용 휨응력은 다음 식(1), (2)에서 큰 값으로 설정한다⁽¹³⁾.

$$f_b = \frac{900}{\left(\frac{l_b \times h}{A_f}\right)} = \frac{900}{\frac{410 \times 40}{20 \times 1.3}} = \frac{900}{630.77} = 142.7(\text{MPa}) \quad (1)$$

여기서, f_b 는 허용휨응력도(MPa), l_b 는 압축플랜지 지점 간 거리(cm), h 는 보춤, A_f 는 플랜지 단면적(cm^2)이다.

$$f_b = \left[1 - \frac{0.4 \left(\frac{l_b}{i_b}\right)^2}{C_m \cdot (\lambda_p)^2} \right] \times f_t = \left[1 - \frac{0.4 \left(\frac{410}{4.24}\right)^2}{1 \times 103.04^2} \right] \times 216.7 = 150.10(\text{MPa}) \quad (2)$$

i_b 는 단면 2차 반경, λ_p 는 한계 세장비이다.

식(1), (2)의 결과로써 최대 휨응력도는 150.10 MPa이며, 최대하중은 다음 식(3)을 이용하여 산출하였다.

$$f_b = \frac{M}{Z} \quad (3)$$

M 는 최대모멘트($N \cdot m$), Z 는 단면계수(m^3)이다.

재하가열시험에 적용되는 4점 재하방식의 최대 휨모멘트는 다음 식(4)와 같다.

$$M_{\max} = 2P \times (0.82 + 0.82 + 0.41) - P \times (0.82 + 0.41) - P(0.41) = 2.46P \quad (4)$$

따라서 한 점 P 에 작용하는 하중은 72.61 kN이고, 전체 최대하중은 $4P = 290.44$ kN이다.

3.2.2 양단 고정보

부정정 구조물은 힘의 평형 조건식으로 반력을 구할 수 없는 조건이므로, 부정정 강재보의 최대하중을 계산하기 위해서는 작용 하중조건에 따른 최대 모멘트가 요구된다.

길이 4,100 mm인 보의 단부 처짐각은 식(5)로 산출되고, Mohr 정리가 적용되었다⁽¹³⁾.

$$\theta_{A_1} = \frac{3.35P}{EI} \quad (5)$$

여기서, E 는 탄성계수, I 는 단면 2차모멘트이다.

다음 식(6), (7), (8)은 휨이 작용되는 단순보의 단부 처짐각과 단부 모멘트 계산에 이용된다.

$$\theta_{A_2} = -\frac{M_A l}{2EI} \quad (6)$$

여기서, M_A 는 A 지점에 작용 모멘트이다.

따라서

$$\theta_{A_1} = \theta_{A_2} = \frac{3.35P}{EI} = -\frac{M_A l}{2EI} \quad (7)$$

가 된다.

따라서 단부 모멘트의 크기는 식(8)과 같다.

$$M_A = M_B = 1.63P \quad (8)$$

탄성하중범에 따라 보의 최대 처짐을 계산하였고, 단순보의 모멘트가 하중으로 작용하였을 경우, 보 중앙부의 최대 모멘트는 식(9)를 적용하여 산출한다.

$$M = \frac{4.13P}{EI} \quad (9)$$

식(10)을 이용하여 단순보의 최대 모멘트를 산출한다.

$$M = \frac{3.42P}{EI} \quad (10)$$

식(9)와 식(10)에 의해서 고정단 보의 최대 모멘트가 산출되고(식(11)), 이 값이 최대 처짐량이다.

$$M = \frac{0.71P}{EI} \quad (11)$$

따라서 고정단 보에 작용하는 단부의 모멘트에 따라 하중의 크기는 다음 식(12)에 따라 계산된다.

$$1.63P = f_b \cdot Z \quad (12)$$

따라서 $P = 109.58$ kN이므로, 4점 지지의 하중은 438.33 kN이다.

3.3 건축용 내화강재의 고온 특성

부정정 조건인 내화강재 적용 보부재의 고온 시 내력특성을 평가하기 위해서는 온도변화에 따른 항복강도와 탄성계수 및 비열과 선팽창계수의 특성 변화 자료가 요구된다. 따라서 본 논문에서 적용된 건축용 내화강재의 기계적 특성과 선형 열팽창 특성 및 비열은 기존연구 결과를 참고하였다⁽¹²⁾.

4. 고온 내력평가

4.1 보부재의 표면온도 변화

화재와 같은 고열 조건에서의 기둥과 보의 거동은 표면온도에 크게 좌우된다. 따라서 본 논문에서는 수식(13)을 적용하여 표면온도를 계산하였다⁽¹⁴⁾.

$$\Delta\theta_s = \frac{\alpha}{\gamma_s c_{ps}} \cdot \frac{F_s}{V_s} (\theta_t - \theta_s) \Delta t \quad (13)$$

여기서, $\Delta\theta_s$ 는 강재 표면온도 차($^{\circ}C$), α 는 대류와 복사에 의한 열전달계수($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$), γ_s 는 강재의 밀도(kg/m^3), c_{ps} 는 강재의 비열($J/kg \cdot K$), F_s 는 화재에 노출된 강재의 단위 길이당 강재 표면적(m^2/m), V_s 는 강재 단위 길이당 체적(m^3/m), θ_t 는 시간 t 에서의 표면온도가열곡선상의 온도($^{\circ}C$), θ_s 는 시간 t 에서 강재의 온도($^{\circ}C$)이고, Δt 는 시간의 간격이다.

화재를 모사하는 대류 그리고 복사 열전달계수는 다음 식(14)를 적용하였다.

$$\alpha = 23 + \frac{5.77\epsilon_r}{\theta_t - \theta_s} \left[\left(\frac{\theta_t + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_s + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (14)$$

여기서, ϵ_r 는 복사능이고, 0.5를 적용하였다.

4.2 해석적 내화성능 결과

건축용 강재 적용 부정정 보부재의 해석적 내화성능은 강재의 열적, 기계적 특성 변화에 따른 내력과 처짐을 계산할 수 있도록 프로그램화된 STA-FR⁽¹⁵⁾을 이용하였다.

Table 1. Maximum Moments and Maximum Loads Versus Lengths of Beam

Lengths (mm)	Maximum moment (kN/m)	Maximum load (kN)
4100	1.63P	438
4400	2.33P	286
4700	2.53P	241

4.2.1 최대하중 변화

실제 강구조 건축물에 적용될 수 있는 길이를 변수로 설정하고, 각각에 대한 최대 모멘트와 최대 하중을 계산하여 Table 1에 제시하였다. 보 길이 변화에 따른 최대하중, 최대모멘트 계산은 보 길이 4,100 mm에 작용하는 하중을 기본으로 설정하였다.

각 온도별 보부재의 내력은 강재 표면온도 상승에 따른 항복강도와 탄성계수가 저하되므로 감소하게 된다. 강재 보부재의 표면온도 상승에 따른 내력 감소는 Figure 2와 같다. 그림에 나타난 바와 같이, 동일한 단면인 경우, 부정정 보부재가 상온에서 일반 강재 정정보에 비해서 높은 내력을 보유하고 있으며, 일정 온도까지 높은 내력을 유지하는 것으로 나타나고 있다. 500 °C 이후 온도구간에서는 건축용 내화강재 적용 부정정 보부재의 내력이 상대적으로 급히 감소하지만, 900 °C까지 내력감소 측면에서 일반강재 정정 보부재보다 안전측으로 판단되었다.

일반강재 보부재 길이 4,100 mm를 대상으로 하고 보부재 길이 4,100, 4,400 mm, 4,700 mm인 고정단 강재보의 내력 감소 경향을 Figure 3에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 일반강재 보부재 길이 4,100 mm의 고온내력과 고정단 보부재 길이 4,700 mm의 고온내력 감소 경향은 다소 유사한 것으로 나타났다. 따라서 건축용 내화강재가 적용되고, 동일한 보부재 길이에 대한 내화성능을 일반강재 정정 보부재로 내화성능을 평가하는 것은 안전측이나, 건축용 내화강재가 적용되고 부정정 보부재가 길어질 경우에는 현행의 보부재 길이로 평가된 결과를 모든 길이에 동일하게 적용하는 것은 재검토되어야 한다고 판단되었다.

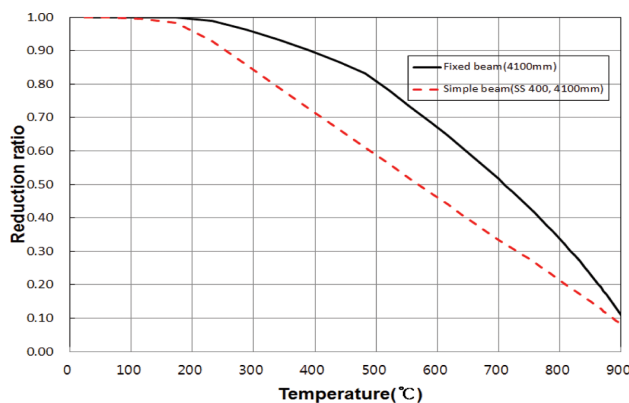


Figure 2. Maximum loads versus temperatures.

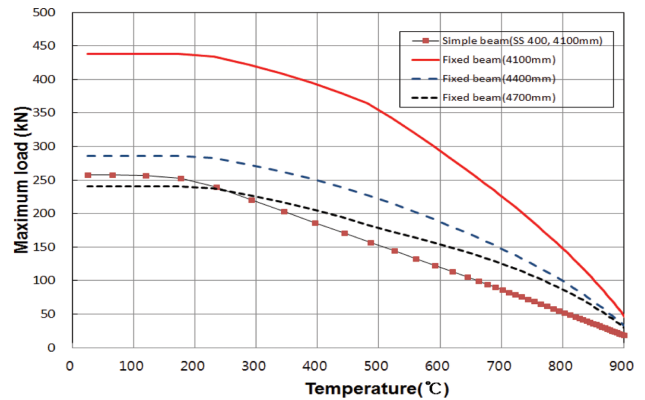


Figure 3. Maximum loads versus lengths and temperatures.

4.2.2 처짐

건축용 내화강재 적용 고정단 4,100 mm 강재보와 일반 강재와 건축용 내화강재가 적용된 단순보 강재보의 표면 온도 상승에 따른 처짐을 계산한 결과는 Figure 4와 같다. 그림에서와 같이 건축용 내화강재가 적용된 단순보 그리고 일반 구조용 강재 적용된 단순보, 건축용 내화강재가 적용된 양단 고정단 보부재의 순으로 처짐량이 높게 나타났다. 따라서 건축용 내화강재 적용 부정정 보부재를 일반

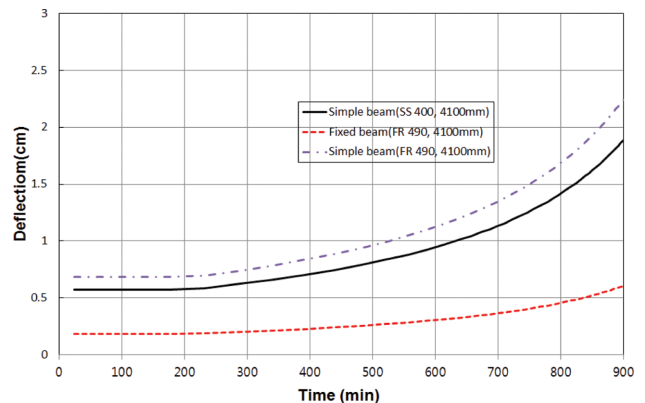


Figure 4. Deflections versus times and different type of beam (4100 mm).

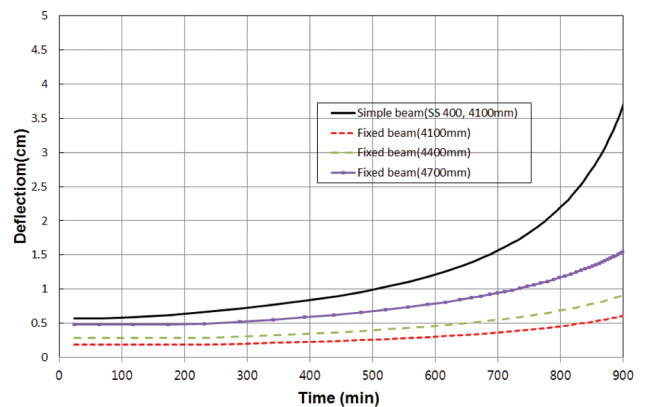


Figure 5. Deflections versus lengths and temperatures.

강재 정정 조건으로 내화성능 평가하는 것은 안전측으로 나타났다.

고정단 강재보의 표면온도 변화 및 길이변화에 따른 처짐량을 해석한 결과는 Figure 5와 같다. 부재 길이가 증가됨에 따라 처짐량은 많게 나타났다. 그러나 4,100 mm인 단순보인 강재보는 가장 긴 4,700 mm의 고정단보다 처짐량이 더 많은 것으로 나타났으므로 처짐측면에서 부재길이 4,100 mm의 일반강재 정정 보부재로 부재길이 4,700 mm인 건축용 내화강재 적용 부정정 보부재를 평가하는 것은 안전측이라 판단되나, 이후의 길이에 대해서 일반강재로 평가되는 것은 보완 및 확인 필요하다고 판단되었다.

5. 결 론

건축용 내화강재로 구성되고, 양단 고정단의 부정정 구조물인 보부재의 내화성능을 해석적으로 평가하고, 이를 정정 구조물인 일반 강재 적용 보부재와의 내화성능 비교를 통하여 실제 강구조 건축물의 화재 시 구조 안전성을 평가하기 위한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 건축용 내화강재로 제작된 부정정 보부재의 고온 시 구조내력 감소 및 부재 길이에 따른 처짐특성을 해석적으로 평가하였다.

2. 동일 부재길이(4,100 mm)를 대상으로 건축용 내화강재 적용 부정정 보부재의 내화성능을 일반강재 적용 정정 보부재로 평가하는 것은 고온 시 내력감소 측면에서 안전측으로 나타났다.

3. 건축용 내화강재 적용 부정정 보부재 고온 시 처짐은 부재길이가 길어지면 증가되고, 부재길이 4,700 mm의 처짐크기는 일반강재 적용 보부재(길이 4,100 mm)보다 작게 나타났다.

4. 건축용 내화강재 적용 부정정 보부재의 고온 시 내력 성능을 일반강재 적용 정정 보부재로 평가하는 것은 동일 길이에서 안전측이나, 보부재의 길이가 길어질수록 처짐과 최대 내력의 저하 부분에 대한 보완과 확인이 필요하다고 판단되었다.

5. 향후 건축용 내화강재 적용 정정 및 부정정 보부재의 비재하가열시험 및 하중재하 가열시험에 의한 정량적 내화시험 비교 연구가 필요하다고 판단되었다.

후 기

본 연구는 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-201510045).

References

1. POSCO Laboratory. "Evaluation and Application for

- 50 kgf/mm² Fire Resistant Steels", Pohang, Korea (1996).
2. POSCO, "Application for Parking Lot Built with Fire Resistant Steels", Seoul, Korea (2001).
3. I. K. Kwon, "Building Fire Protection", Kyungido, Korea (2007).
4. Korean Standard Association, "Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-beam, Column, KS F 2257-7", Seoul, Korea (2005).
5. M. S. Warp and J. G. Speer, "Fire-resistant Steels", Advanced Materials & Processes, Vol. 162, pp. 34-36 (2004).
6. Y. Sakumoto, T. Yamaguchi, M. Ohashi and M. Saito, "High-temperature Properties of Fire Resistant Steel for Buildings", Journal of Structural Engineering, Vol. 118, pp. 392-407 (1992).
7. EN 1993-1-2. European Committee for Standardization (CEN), "Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: Structural Fire Design. CEN:Brussels" (1993).
8. Y. Sakumoto, T. Okada, M. Yoshida and S. Tasaka, "Fire Resistance of Concrete-filled, Fire-resistant Steel-tube Columns", Journal of Civil Engineering, Vol. 96, pp. 169-184 (1994).
9. Y. Sakumoto, T. Yamaguchi, T. Okada, M. Yoshida, S. Tasaka and H. Saito, "Fire Resistance of Fire-resistant Steel Column", Journal of Structural Engineering, Vol. 120, pp. 1103-1121 (1994).
10. K. C. Yang, S. J. Chen, C. C. Lin and H. H. Lee, "Experimental Study on Local Buckling of Fire-resistant Steel Columns Under Fire Load", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, pp. 553-565 (2005).
11. H. Y. Chung, C. H. Lee, W. J. Su and R. Z. Lin, "Application of Fire-resistant Steel to Beam-to Column Moment Connections at Elevated Temperatures", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66, pp. 289-303 (2010).
12. I. K. Kwon, "Study of Structural Stability for H-section Beams Made of Fire Resistant Steels (FR 490) at High Temperatures by Analytical Method", Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 28, pp. 52-57 (2014).
13. D. C. Jang and S. H. Jang, "Solution of Architectural Structural Dynamic", Seoul, Korea (2005).
14. Swedish Institute of Steel Construction, "Fire Engineering Design of Steel Structures", Stockholm, Sweden (1976).
15. I. K. Kwon, "Development of Analytic Program for Calculation of Fire Resistant Performance on Steel Structures", Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea, Vol. 11, pp. 201-208 (2009).