

# 강재 영구거푸집을 사용한 yLRC 합성기둥의 내화성능 연구

## A Study on the Fire Resistance of yLRC Composite Columns with Steel Sheet Forms and Angles

김 보 람<sup>1)</sup> · 강 성 덕<sup>2)</sup> · 김 형 근<sup>3)</sup> · 김 명 한<sup>4)</sup> · 김 상 대<sup>5)†</sup>  
Kim, Bo Ram Kang, Seong Deok Kim, Hyung Geun Kim, Myeong Han Kim, Sang Dae

요약 : yLRC 합성기둥은 기존 합성기둥의 장점과 거푸집 공사의 절감을 가져올 수 있으며, CFT와 비교하였을 때 강재량 감소의 효과와 함께 콘크리트의 충전상태를 유판으로 쉽게 확인할 수 있는 등의 장점을 가지고 있다. 실험결과와 연구를 통하여 yLRC 합성기둥의 구조체로서의 내력은 검증이 되었으나 내화성능에 관한 연구는 수행되지 않았다. 이에 본 논문에서는 yLRC 합성기둥의 내화성능 평가를 위해 콘크리트 면적비, 보강판, 피복유무 등을 변수로 두어 실험과 해석을 수행하였으며, 실험과 해석결과를 비교·고찰하여 내화 성능 평가를 하였다.

**ABSTRACT :** The main objective of this paper is to study the behaviour of yLRC composite columns at elevated temperatures by experimental test. The effects of load ratios, cross-section size and fire protection for the yLRC columns were investigated by the test and compared using the heat transfer analysis performed based on the finite element program ANSYS 10.0 using the ISO834 standard fire curve, following the main guidelines proposed by the EC4 Part 1.2. As heat transfer is the movement of heat by conduction, convection, and radiation, and as temperature inside an object varies by position and time, heat distribution was analyzed by the function of position and time. As the steel's thermal conductivity is higher than that of concrete, steel loses its strength rapidly in a high-temperature situation such as a fire. Fire resistance performance of the yLRC composite column under fire conditions was evaluated throughheat transfer analysis for parametric study.

핵심 용어 : yLRC 합성 기둥, 내화성능, ISO 표준화재곡선, 열전달 해석, 내화피복 두께, 콘크리트 면적비

KEYWORD : yLRC Composite column, Fire Resistance, ISO Standard Fire Curve, Heat Transfer Analysis, Fire Protection, Concrete Area Ratio

### 1. 서 론

#### 1.1 연구배경 및 목적

최근 우리나라 건설시장의 시공현장에서는 공기단축의 필요성이 증대되고 공간의 가변성 실현을 위해 새로운 구조형식을 필요로 하고 있다. 또한, 도심지의 적은 공간을 최대로 활용하여 건물의 유효공간을 확보할 수 있는 시스템을 필요로 하고 있다. 이러한 복잡하고 다양한 요구를 수용하기 위하여 기존의 SRC (T.T Lie 1996), RC조 등의 두 시스템의 장점을 혼용한 합성구조에 대한 연구가 진행 중이며 CFT(Lin-

Hai Han 2003) 기둥이 활발히 적용 되고 있다. 하지만, 내부 콘크리트 충전작업, 충전상태의 유판 확인 및 보-기둥 접합부 시공이 어려운 단점이 있다. 더욱이, 강관을 특별설비를 갖춘 공장에서 주문 생산해야 하므로 제작비용이 과다하며, 동일한 강관의 연속적 사용으로 축하중이 경미한 상충부에서는 비경제적으로 되는 문제점을 갖는다.

이러한 단점을 보완하기 위해 L-형강과 y형 강판을 이용한 강재 무거푸집 시스템 기둥을 개발하게 되었으며, 개발된 강재 무거푸집 기둥(이하 yLRC 합성기둥)은 강재 영구거푸집을 사용한 시스템 기둥의 거동에 관한 실험적 연구(이수진 2005), 강재 영구거푸집을 사용한 실내 크기의 시스템 기둥

1) 정회원, 고려대학교 대학원 건축공학과 석사과정(kbr0330@hotmail.com)  
2) 정회원, 고려대학교 대학원 건축공학과 박사과정(arp96sdk@hotmail.com)  
3) 정회원, 서울도시개발공사 구조팀장(hgkim@i-sh.co.kr)  
4) 정회원, 대진대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사(mhk314@daejin.ac.kr)  
5) 교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사  
(Tel. 02-3290-3334, Fax. 02-921-2438, E-mail : sdk@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

에 관한 실험적 연구(강지연 2006)와 ㄱ-형강과 y형 강판을 이용한 조립 기둥과 TSC보 접합부의 내진성능 평가에 관한 연구(김성진 2006)가 진행되어 구조적 성능과 내진성능은 입증이 되었지만, 화재에 노출이 되었을 때는 구조적 내력저하를 가져올 수 있으므로 내화 성능에 관한 연구가 필요하다.

## 1.2 연구방법 및 범위

본 논문에서는 콘크리트 면적비, 외부 좌굴 보강판, 피복두께를 변수로 yLRC 합성기둥의 내화 실험과 해석을 수행하여 내화성능을 분석하였다. 온도 증가에 따른 재료적 특성은 Eurocode4 Part1.2와 BS5950을 근거로 하였으며, KS F 2257-1(1999) 표준 시간-가열온도 곡선 (이하 KS 표준 시간-가열온도 곡선)에 대해 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. 실험과 해석 결과를 바탕으로 내화성능을 평가하였다.

## 2. yLRC 합성기둥

### 2.1 yLRC 합성기둥의 형상

거푸집이 불필요한 yLRC 합성기둥(RC column with y-shape steel forms and L-angle)은 아래의 그림 1과 같이, 단면 성능 상 가장 효율적인 위치에 철근콘크리트의 주근 역할을 하도록 네 모서리에 ㄱ-형강(ㄱ-angle)을 배치하고, y형 강판(y-shape steel form)은 기둥의 띠철근 역할을 하도록 하였으며, 내측에 강판과 ㄱ-형강은 3점용접으로 일체화 하여 각형을 형성한 후 기둥 내부에 콘크리트를 타설 제작한다. 시공 시 거푸집의 탈부착으로 인한 공기지연이 없으므로 공기를 단축할 수 있는 효과를 가져 올 수 있다.

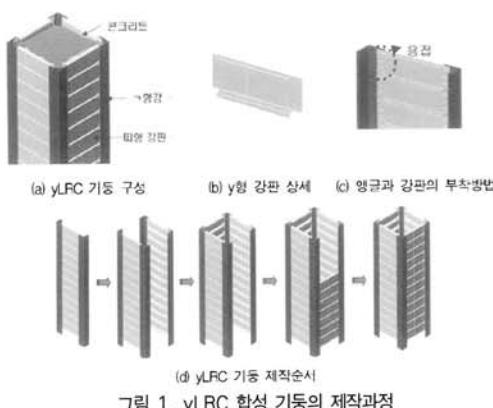


그림 1. yLRC 합성 기둥의 제작과정

yLRC 합성기둥은 철근콘크리트 구조에서의 주근에 해당하는 기능을 'ㄱ'형 강재가 부담하고 후프 근의 역할을 y형 강재가 담당함으로써 충분한 구조성능을 가지게 되며, 이에 대한 구조적 성능을 확인한 결과 철근콘크리트 기둥과 유사한 구조적 거동을 보였다. (강지연 2006)

### 2.2 yLRC 합성기둥의 특징

가장 널리 사용되고 있는 합성기둥인 CFT 기둥과 비교하여 yLRC 합성 기둥의 특징을 살펴보면, CFT 기둥은 특수 제작이 필요한 강관을 사용하여 단면 크기가 커지면 콘크리트를 부어 넣을 때 콘크리트의 측압으로 인한 강관 외벽의 휨변형을 방지하기 위해 두께를 줄이는 데 한계가 있지만, yLRC 합성기둥은 ㄱ-형강과 강판을 조합하여 강재량을 절감할 수 있다.

또한 yLRC 합성기둥은 구조적으로 가장 취약한 기둥의 네 모서리에 ㄱ-형강을 배치하고 그 사이에 강판을 접합하여 최소의 강재량으로 제작 할 수 있는 장점이 있다. yLRC 합성기둥은 앵글의 규격 및 재질을 바꾸어 조합하거나 내부에 철근의 배근 량을 추가하여 조절이 가능하다.

CFT 기둥은 패널존 부분에서의 시공방법이 복잡하고 콘크리트의 충전여부를 육안으로 확인하기 어렵지만, yLRC 합성기둥은 모서리의 ㄱ형강을 제외한 네 면이 전부 개방된 패널존 부분에 보를 접합하므로 시공이 편리하고 현장 확인이 용이하므로 공기단축과 구조체의 품질 향상에 효과가 크다고 할 수 있다.

## 3. 내화실험 계획

### 3.1 내화실험 개요

yLRC 합성기둥의 내화성능의 평가를 위해서 적용한 실험 기준은 국내의 KS 코드인 F 2257-1, F 2257-4, F 2257-7을 이용하였다. (한국산업규격 1999, 한국산업규격 2004, 한국산업규격 2006) 수직부재의 허용변형량과 변형속도의 성능기준은 각각 다음 식 (1), (2)과 같다.

$$C = \frac{h}{100} \text{ mm(허용 변형량)} \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000} \text{ mm/min(허용 변형속도)} \quad (2)$$

$$C = \text{수직 변형량}, h = \text{실험체 초기 높이}$$

### 3.2 실험체 계획 및 제작

모든 실험체의 길이는 3.36m로 하였으며, 실험 변수는 실험체의 콘크리트 면적비, 외부 좌굴 보강판, 피복두께와 같이 3가지 항목으로 설정하여 총 8개의 실험체를 설계·제작하였다.

표 1. 실험체 일람표

실험 체명	단면크기 (mm)	실험 변수			
		콘크리트 면적비 (%)	보강판 (개)	피복 두께 (mm)	재하 하중 (kN)
yLRC-1	300 x 300	96.38	None	None	1188
yLRC-2			4	None	
yLRC-3			None	None	
yLRC-4	350 x 350	97.34	12	None	1484
yLRC-5			None	11	
yLRC-6			None	22	
yLRC-7			None	44	
yLRC-8	400 x 400	97.96	None	None	1825

\* ㄱ-형강은 모든 실험체 70x70x6 사용

아래의 그림 2는 실험체의 내화피복을 도식화 한 그림이다.

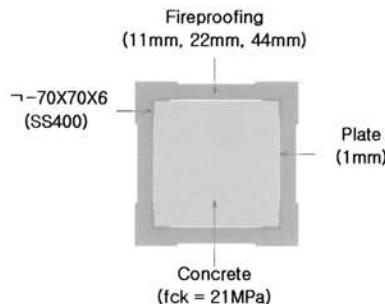


그림 2. 실험체의 내화 피복 모습

피복재는 S사의 N피복재를 선택하였으며, 이 피복재는 피복두께가 44mm일때 3시간 내화성능을 인정받았다.(건설교통부 고시 제 2005 - 137호, 2005). 피복두께를 변수로 하여 yLRC 기둥의 내화성능을 고찰하였다. 표 2는 피복 재료에 대한 사양을 나타내었다.

표 2. N 피복 재료에 대한 사양 ( S사 )

항 목	물 성 값
분 진 도	0.27g/m <sup>2</sup> 이하
부 착 강 도	3,700kg/m <sup>2</sup> 이상
시 공 밀 도	370kg/m <sup>3</sup> 이상

yLRC 합성기둥의 실험체 제작은 일반 ㄱ-형강을 사각의 모서리에 세우고, 각각의 4면 내측에 용접을 하여서 만들어진 내부에 콘크리트를 타설하였다. 실험체 상세는 아래의 그림 3(a), (b)와 같다.

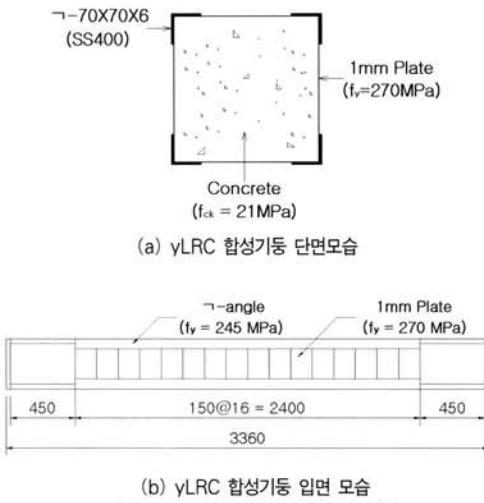


그림 3. yLRC 합성기둥 실험체의 상세

### 3.3 가열 및 가력 계획

실험체의 가열은 아래 그림 4와 같이 ISO 834 표준화재에 근거하여 가열로의 온도를 설정하여 실험을 수행하였다. KS 코드인 F 2257-1의 가열곡선은 식 (3)으로써, ISO 표준화재 곡선의 가열곡선과 동일하다.(ISO 834-1 1999, 한국산업규격 1999)

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad (3)$$

T = 가열로 내부의 평균온도(°C), t = 시간, T<sub>0</sub> = 초기온도

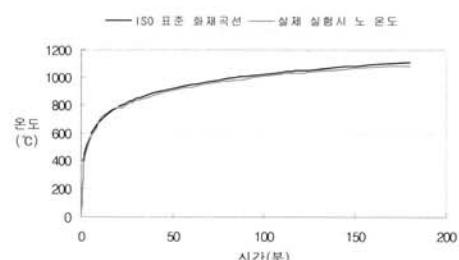


그림 4. 표준화재 곡선과 실제 가열로 내부의 온도

본 실험에서의 가력은 그림 5와 같이 가열로 하단의 유압장치를 이용하여 가력 하였고, 경계조건은 흰지로 하였다.

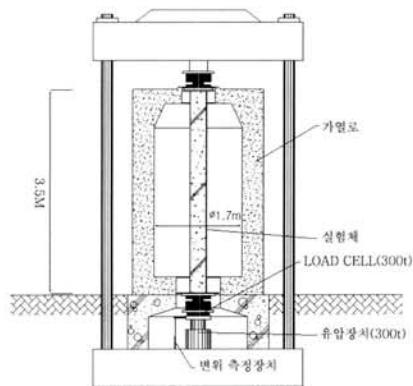


그림 5. 실험체의 설치 상태

또한 실험체에 하중을 먼저 재하한 뒤 기둥의 4면을 가열하였다. 재하 하중은 아래의 식 (4)와 같이, 선행 된 구조성능 연구에서 사용한 철근콘크리트 기둥의 하중 산정식을 적용하였으며(강자연 2006), 각 실험체에 최대 축하중에 50%를 재하 하였다.

$$P_o = f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (4)$$

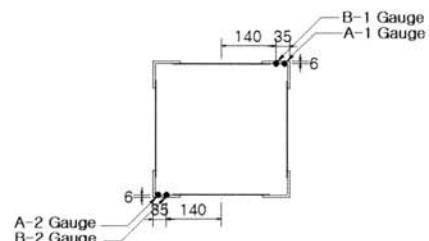
$P_0$  = 최대 축하중,  $f_{ck}$  = 콘크리트 설계강도.

$A_g$  = 전단면적,  $A_{st}$  = 철골의 면적,  $f_y$  = 철골의 항복강도

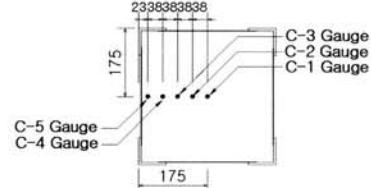
본 연구에서는 재하실험으로 계획을 하였으나, 비재하시에도 변형에 관계없이, “강재의 평균온도가 538°C, 최대온도 649°C를 넘지 않도록 한다.”라는 규정이 있다. 이는 실질적인 내화성능 기준에는 포함되는 사항은 아니지만, 내화성능을 평가하는 척도로서 사용되어진다.

### 3.4 온도 및 변형 측정 계획

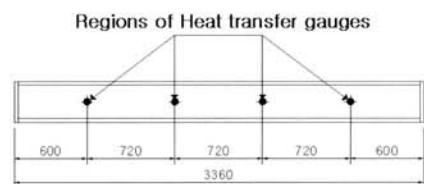
다음의 그림 6(a), (b)와 같이 강재와 콘크리트 내부에 열전대 게이지를 설치하여 온도를 측정하였다. 변형측정은 그림 5에서와 같이, 하단의 유압장치 왼쪽에 변위측정장치(LVDT)를 설치하여 수축 및 팽창변위와 변형속도를 측정하였다. (한국산업규격 1999)



(a-1) 열전대 게이지 - 단면부 : 강재



(a-2) 열전대 게이지 - 단면부 : 콘크리트



(b) 열전대 게이지 - 입면부

그림 6. 열전대 측정 위치 상세

## 4. 실험결과

### 4.1 소재 실험

실험체에 사용된 T-형강의 인장시편은 KS B 0801에 따라 제작하였고, 콘크리트 압축강도 시험용 공시체는 KS F 2404에 따라 직경 100mm, 높이 200mm의 실린더형 몰드를 사용하여 제작하였다. 공시체는 실험체와 동일한 조건인 대기 중 양생( $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ )을 한 후, 28일 압축강도를 측정하였다. 그 결과는 아래 표 3과 같다.

표 3. 강재의 인장강도와 콘크리트의 압축강도

시험편	항복강도 (MPa)		인장강도 (MPa)	연신율 (%)
	T-형강	T - 70x70x6		
플레이트	PL 1mm		270	370
설계강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	물시멘 트비	S/A	단위 골재량( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
21	21.8	52.1	46.4	W C S G
				170 331 838 987

#### 4.2 기동실험 종료모습

그림 7에서, 무피복 실험체(yLRC-8)는 빠른 시간 내에 기둥 중앙부분의  $\Gamma$ -형강이 좌굴을 일으키며 용접부분이 탈락되면서 실험체의 중앙 부분에서 콘크리트의 급격한 변형이 발생하였으며, 기둥의 전체적인 파괴양상을 보였다.

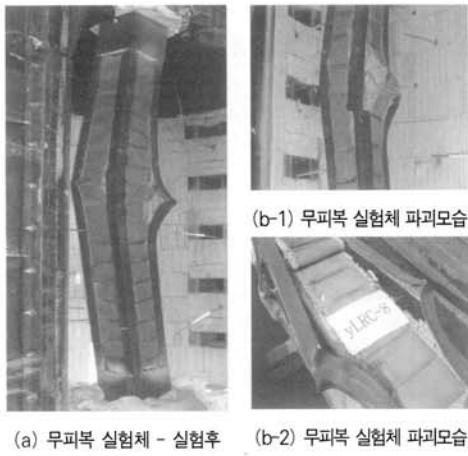


그림 7. 무피복 실험체(yLRC-8)의 파괴모습

그림 8의 피복한 실험체(yLRC-7)는 기동의 법규 내화성능 시간인 3시간 이후에도 급격한 변형이나 좌굴은 발생하지 않고, 실험 전과 유사한 형상을 나타내었다.

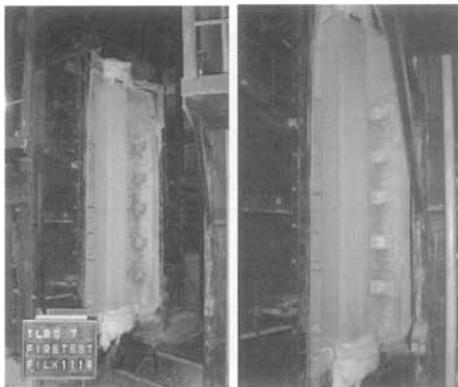


그림 8. 피복 실험체(yLRC-7)의 실험 전 후의 모습

#### 4.3 온도결과

실험체의 시간에 따른 온도변화는 그림 9, 10, 12와 같다. 각 그림에서 A gauge는 실험 시에 온도 측정 열전대 A-1 gauge과 A-2 gauge의 평균값이며, B gauge는 실험 시에 온도 측정 열전대 게이지 B-1 gauge과 B-2 gauge의 평균값을 나타낸다.

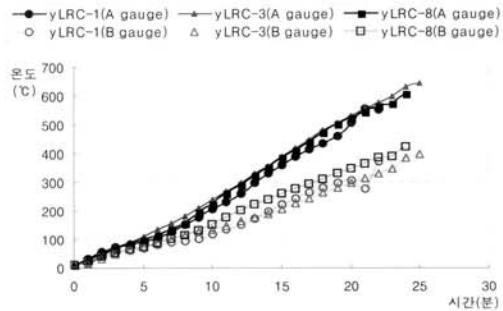


그림 9. 콘크리트 면적비에 따른 시간-온도 곡선  
(yLRC-1(96.38%), yLRC-3(97.34%), yLRC-8(97.96%))

그림 9는 yLRC-1, 3, 8 실험체의 콘크리트 면적비에 따른 시간-온도 곡선을 나타내고 있으며, 각각의 실험체는 Built-Up 방식으로 제작 하였다. 세 실험체의 하중비는 모두 동일하게 50%를 재하 하였고, 콘크리트 면적비가 96.38%, 97.34%, 97.96%로 단면 치수가 다를 경우의 온도를 나타내었다.  $\Gamma$ -형강의 단면크기는 기둥의 크기에 상관없이 동일하였으며, 콘크리트 면적비에 대한  $\Gamma$ -형강의 온도분포는 큰 차이를 나타내지 않았다.

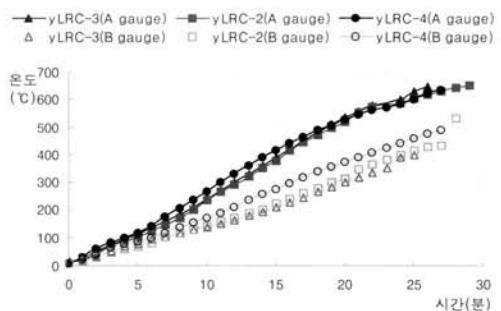


그림 10. 단면 보강에 따른 시간-온도 곡선  
(yLRC-2(중앙부), yLRC-3(무보강), yLRC-4(중앙+양단부))

그림 10은 동일 단면을 사용한 yLRC-2, 3, 4 실험체로서, 화재 시  $\Gamma$ -형강의 국부 및 전체좌굴 현상을 자연시킬 목적으로 기둥의 외부 면에 너비 15cm의 보강판을 덧대어서  $\Gamma$ -형강과 용접을 하였다. 아래 그림 11에서와 같이, 기둥 중앙부의 외면(4면)에 각 1개씩의 보강판을 덧대어서  $\Gamma$ -형강과 용접한 yLRC-2 실험체와 보강을 하지 않은 yLRC-3 실험체, 기둥의 중앙부와 양 단부의 외면에 총 12개의 보강판을  $\Gamma$ -형강과 용접한 yLRC-4 실험체의 시간에 따른 온도 변화를 나타내고 있다. 동일 단면을 사용한 yLRC-2, 3, 4 실험체의 온도분포는 그림 10에서 같이 유사한 양상을 보이고 있다.

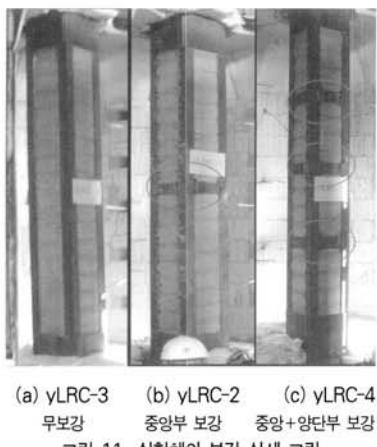


그림 11. 실험체의 보강 상세 그림

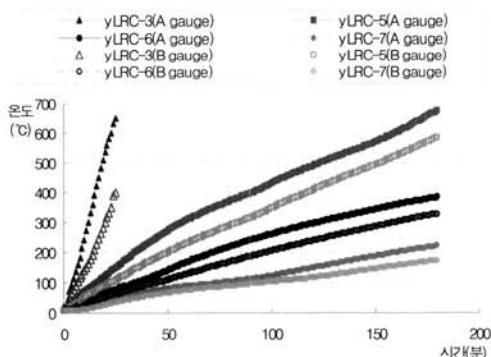
그림 12. 피복두께에 따른 시간-온도 곡선  
(yLRC-3(0mm), yLRC-5(11mm), yLRC-6(22mm), yLRC-7(44mm))

그림 12는 피복두께를 변수로 한 시간-온도 관계 곡선식의 실험 결과이다. 온도측정 결과는 무피복인 yLRC-3 실험체가 가장 높은 온도 분포를 나타냈으며, 피복두께 11mm인

yLRC-5 실험체, 22mm인 yLRC-6 실험체, 44mm인 yLRC-7 실험체의 순으로 낮은 온도분포를 나타내었다. 이는 피복두께가 두꺼울수록 온도의 상승을 억제하는 차단효과를 발휘함을 알 수 있었다.

#### 4.4 변형 결과

yLRC 합성기둥의 내화성능 시간을 평가하기 위해서는 각 실험체의 변형량과 변형속도를 살펴보아야 한다. 허용변형량은 식 (1)과 같이 실험체의 높이로 결정되며, 33.6 mm이다. 허용변형속도는 식 (2)에서와 같이 허용변형량에 근거한 10.08 mm/min 값을 갖는다.

##### 4.4.1 변형량 결과

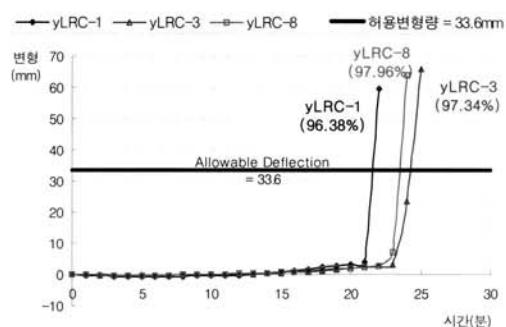
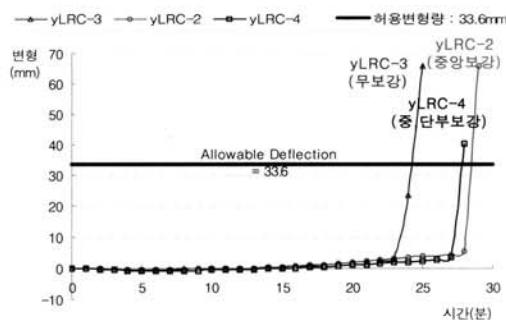
그림 13. 콘크리트 면적비에 따른 시간-변형량 곡선  
(yLRC-1(96.38%), yLRC-3(97.34%), yLRC-8(97.96%))그림 14. 단면 보강에 따른 시간-변형량 곡선  
(yLRC-2(중앙부), yLRC-3(무보강), yLRC-4(중앙+양단부))

그림 13은 콘크리트 면적비 (96.38%, 97.34%, 97.96%)에 대한 실험체의 변형량으로.. 콘크리트 면적비가 97%이상인 yLRC-3, 8 실험체가 yLRC-1 실험체에 비해

약 13.6% 내화 성능시간이 증가되었다. 이는, 실험 재하 장비의 여건상, 재하하중(2100kN)을 초과하는 내력을 갖는 실험체를 제작 할 수 없는 이유로, 미소한 면적비의 증가 (각각 약 0.5%)를 변수로 사용하였다. 하지만, 결과를 통하여, 콘크리트의 면적비가 내화 성능 시간 향상에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

그림 14는 기둥 외부의 보강판 유무에 따른 실험체의 변형량을 나타내었다. 보강판이 없는 yLRC-3번 실험체에 비해, 보강판을 설치한 yLRC-2, 4 실험체가 약 12% 내화성능 시간이 증가되었음을 확인 할 수 있다. 보강판은 기둥의 파괴를 지연시키는데 매우 미미한 역할을 하였으나, 강재인 보강판이 화재에 직접 노출 되어서 기둥의 내화성능시간을 연장시키는데에 큰 역할은 하지 못한다고 판단된다.

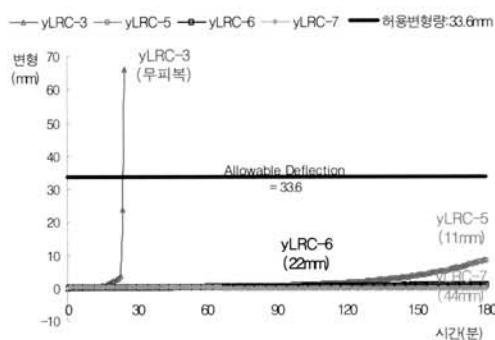


그림 15. 피복두께에 따른 시간-변형량 곡선  
(yLRC-3(0mm), yLRC-5(11mm), yLRC-6(22mm), yLRC-7(44mm))

그림 15는 피복두께(0mm, 11mm, 22mm, 44mm)에 따른 변형량을 나타내었다. 무피복 실험체는 급격한 변형을 보인 반면에, 피복한 실험체들은 3시간 동안 변형이 발생하지 않았다. 하지만 yLRC-5 실험체는 2시간 이후부터 약간의 변형이 발생하였으나, 허용변형량은 넘지 않았다.

#### 4.4.2 변형속도에 대한 결과

다음의 그림들은 변형속도에 대한 결과를 나타내고 있다.

그림 16은 콘크리트 면적비에 따른 변형속도를 나타내었다. 콘크리트 면적비가 97% 이상인 yLRC-3, 8 실험체가 yLRC-1 실험체에 비해 약 13.6% 내화성능시간이 증가되었다.

그림 17은 보강판에 따른 변형속도를 나타내고 있으며, 보강판이 없는 yLRC-3 실험체에 비해, 보강판을 설치한 yLRC-2, 4 실험체가 약 12% 내화성능 시간이 증가되었음을 확인 할 수 있었다.

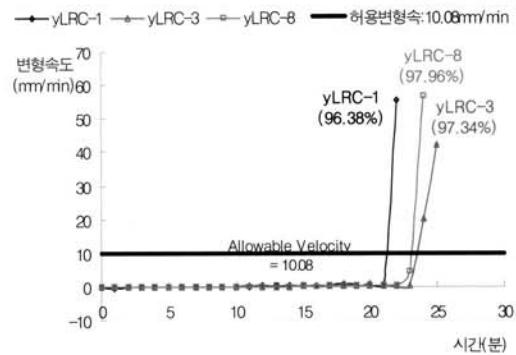


그림 16. 콘크리트 면적비에 따른 시간-변형속도 곡선  
(yLRC-1(96.38%), yLRC-3(97.34%), yLRC-8(97.96%))

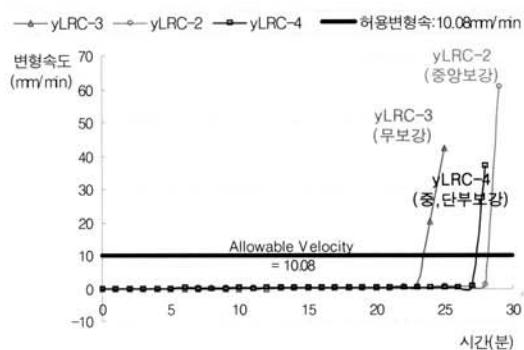


그림 17. 단면 보강에 따른 시간-변형속도 곡선  
(yLRC-2(중앙부), yLRC-3(무보강), yLRC-4(중앙+양단부))

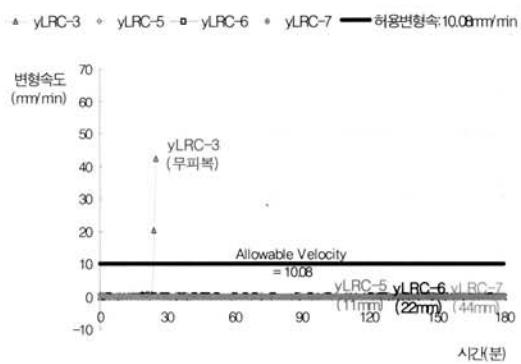


그림 18. 피복두께에 따른 시간-변형속도 곡선  
(yLRC-3(0mm), yLRC-5(11mm), yLRC-6(22mm), yLRC-7(44mm))

피복두께에 따른 변형속도는 그림 18에서와 같이 무피복 실험체의 경우에는 급격한 변형속도를 보인 반면에, 피복한 실험체들은 변형속도에 거의 변화가 없었다.

각 실험체의 내화성능평가를 위한 내화성능 시간을 표 4에 나타내었다.

표 4. 각 실험체의 실험에 대한 내화성능평가

번호	실험체	내화성능평가		
		실험에 의한 내화성능시간		내화성능 시간 (분)
		변형량 (분)	변형 속도 (분)	
콘크리트 면적비	yLRC-1(96.38%)	22	22	22
	yLRC-3(97.34%)	25	24	25
	yLRC-8(97.96%)	24	24	24
좌굴 보강판	yLRC-2(중앙보강)	28	28	28
	yLRC-3(무보강)	25	24	25
	yLRC-4(중·양단보강)	28	28	28
피복 두께	yLRC-3(무피복)	25	24	25
	yLRC-5(11mm)	180 이상	180 이상	180 이상
	yLRC-6(22mm)	180 이상	180 이상	180 이상
	yLRC-7(44mm)	180 이상	180 이상	180 이상

## 5. yLRC 합성기둥의 열전달 해석

고온에 노출 된 기둥부재는 온도가 상승함에 따라서 구조적인 내력의 저하를 가져오게 된다. 이에 따라서 구조부재의 정확한 내화성능평가를 근거로 한 구조부재의 적용이 필요하고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 yLRC 합성기둥의 열전달 해석 결과를 바탕으로 실험치 와 비교, 분석 하였다.

### 5.1 열전달 해석 개요

열전달 해석 방법으로는, 본 연구에서 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하여 KS 표준시간-가열 온도곡선에 대해 수행하였다. yLRC 합성기둥에서 재료의 열적 특성을 나타내는 비열과 열전도율은 온도에 따른 함수로 비선형 해석을 수행하였고, 강재와 콘크리트의 재료적 특성은 Eurocode4 Part1, 2 (ENV, 1994)에 근거하여 아래의 식 (5)~(8)과 같다.

(a) 강재의 비열 ( $c_a$ , 단위 : J/kgK)

$$c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta - 1.69 \times 10^{-3} \theta^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta^3 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} < \theta < 600^\circ\text{C} \quad (5-1)$$

$$c_a = 666 - 13002 / (\theta - 738) \quad \text{for } 600^\circ\text{C} < \theta < 735^\circ\text{C} \quad (5-2)$$

$$c_a = 545 + 17820 / (\theta - 731) \quad \text{for } 735^\circ\text{C} < \theta < 900^\circ\text{C} \quad (5-3)$$

$$c_a = 650 \quad \text{for } 900^\circ\text{C} < \theta < 1200^\circ\text{C} \quad (5-4)$$

(b) 강재의 열전도율 ( $\lambda_a$ , 단위 : W/mK)

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta \quad \text{for } 20^\circ\text{C} < \theta < 800^\circ\text{C} \quad (6-1)$$

$$\lambda_a = 27.3 \quad \text{for } 800^\circ\text{C} < \theta < 1200^\circ\text{C} \quad (6-2)$$

(c) 콘크리트의 비열 ( $c_c$ , 단위 : J/kgK)

$$c_c = 2 - 0.24(\theta / 120) + 0.012(\theta / 120)^2 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} < \theta < 1200^\circ\text{C} \quad (7)$$

(d) 콘크리트의 열전도율 ( $\lambda_c$ , 단위 : W/mK)

$$\lambda_c = 900 + 80(\theta / 120) - 4(\theta / 120)^2 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} < \theta < 1200^\circ\text{C} \quad (8)$$

여기서,  $\theta$  = 강재와 콘크리트의 온도 (°C)

또한, 사용 피복재는 밀도가  $370 \text{ kg/m}^3$ 이며, 열전도율은  $0.043 \text{ W/mK}$ 의 열적 특성을 갖는다.

열전달 해석(정상진 2003)에서는 기둥의 4면이 화재에 동일한 영향을 받고 있다는 가정 하에 2차원 해석을 수행하였고 이때 PLANE 55 와 SURF 151 요소를 사용하였다. PLANE 55는 4개의 노드를 가진 2차원 평면 요소로써 콘크리트와 철골, 피복재의 구성요소이다. 또한, 부재가 외부의 열원으로부터 열을 전달받게 될 때, 열원은 Extra 노드를 생성하여 적용하였으며, KS 표준시간-가열 온도 곡선에 의한 온도를 적용하였다. 기둥의 4면이 동시에 동일한 화재를 받는 열 표면 효과를 구현하기 위해 시간-온도 함수를 이용하여 2 차원 열전달 해석에 적용할 될 수 있는 SURF 151 요소를 적용하였다.

## 5.2 열전달 해석 결과

KS 표준시간-가열 온도 곡선을 이용한 60분 화재에 대한 yLRC 합성기둥의 열전달 해석 결과를 그림 19에 나타내었다. 화재에 직접적으로 노출되어 있는 무피복 조건의 단면에서는 철골에서의 온도가 가장 높게 나타났으며, 중앙부로 갈수록 낮은 온도분포를 나타내고 있다.

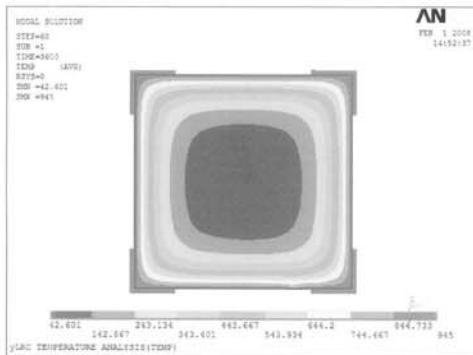


그림 19. yLRC 합성기둥의 열전달 해석 결과 (ANSYS)

그림 20~23은 본 실험에서 실시한 온도의 측정결과와 해석 후 도출된 온도의 결과를 비교한 그림이다. 강재부의 온도 측정은 해석과 실험치 모두 A guage 부분을 비교하였으며, 콘크리트부에서는 C guage 점들에서의 평균값을 비교하여 그림으로 표현하였다.

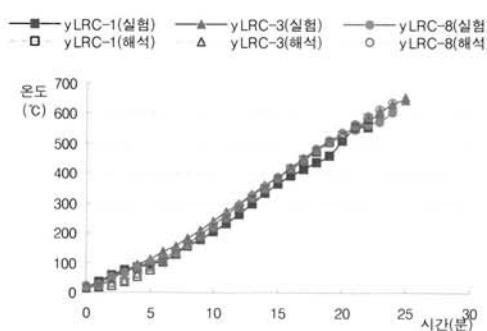


그림 20. 콘크리트 면적비에 따른 시간-강재 온도 곡선  
(yLRC-1(96.38%), yLRC-2, 3, 4(97.34%), yLRC-8(97.96%))

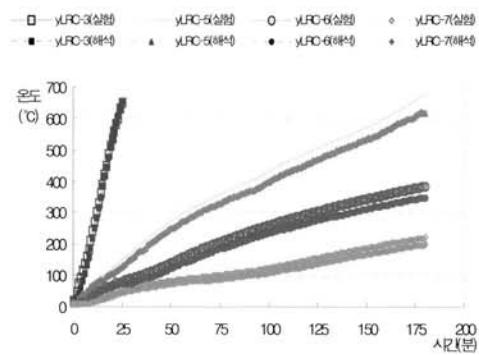


그림 21. 피복두께에 따른 시간-강재 온도 곡선  
(yLRC-3(0mm), yLRC-5(11mm), yLRC-6(22mm), yLRC-7(44mm))

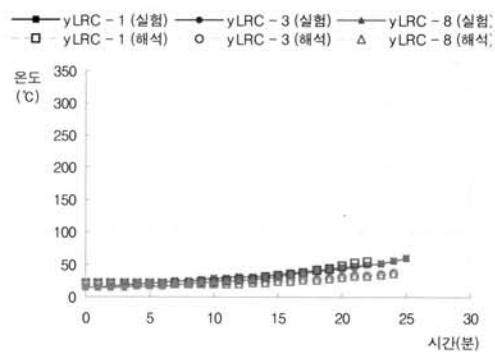


그림 22. 콘크리트 면적비에 따른 시간-콘크리트 온도 곡선  
(yLRC-1(96.38%), yLRC-2, 3, 4(97.34%), yLRC-8(97.96%))

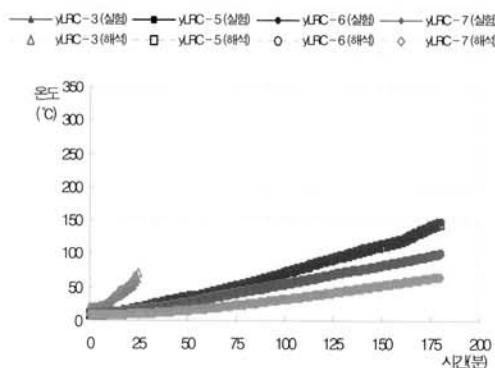


그림 23. 피복두께에 따른 시간-콘크리트 온도 곡선  
(yLRC-3(0mm), yLRC-5(11mm), yLRC-6(22mm), yLRC-7(44mm))

본 실험체가 실험 후 파단 되기 직전까지의 온도분포를 해석치와 비교하였다. 그럼 20~23에서 살펴 볼 수 있듯이, 실험에 의해 계측된 온도와 해석에 의해 계측된 강재부(A gauge)의 온도는 5.7~9.3 %의 오차범위를 가지므로 본 해석방법이 적절하다고 판단된다. 또한 4%미만의 오차 범위를 갖는 콘크리트부(C gauge)에 대한 해석도 적절하다고 판단된다.

10% 내외의 오차를 발생한 피복변수의 yLRC-6과 yLRC-7의 실험체는 실제 실험 시에는 피복재의 파손이 발생하였으나, 해석상에서는 피복재의 파단이 발생하지 않고, 물성치가 시간이 지나도 처음과 동일한 성능을 유지했기 때문에 10%내외의 오차를 발생시켰다고 판단된다.

좀 더 정확한 해석결과를 도출하여 실제 실험과의 오차를 줄이고 실험 시에 발생 할 수 있는 오차를 최대한 제어 할 수 있다면, 실험과 해석결과의 오차를 줄이고 신뢰 할 수 있는 결과를 도출 할 수 있으리라 판단된다.

표 5에 실험에서 측정된 강재부(A gauge)의 온도분포와 해석에서의 강재부(A gauge)의 온도분포와 오차를 나타내었다.

표 5. 해석과 실험 결과의 오차 비교

번호	실험체	ㄱ- 형강 온도분포의 최대 오차시점과 오차			
		시점 (분)	실험 (°C)	해석 (°C)	오차 (%)
콘크 리트 면적비	yLRC-1(96.38%)	20	460.8	504.2	+9.39
	yLRC-2,3,4(97.34%)	11	271.6	247.0	-8.85
	yLRC-8 (97.96%)	23	576.2	609.3	+5.72
피복 두께	yLRC-3 (무피복)	11	271.6	247.0	-8.85
	yLRC-5 (11mm)	180	679.0	619.0	-8.83
	yLRC-6 (22mm)	175	379.9	344.9	-10.1
	yLRC-7 (44mm)	177	220.1	197.1	-10.4

## 6. 결 론

본 연구에서 고온에서의 yLRC 합성기둥의 내화성능에 대한 기초 자료를 제시하고자 내화실험과 열전달 해석을 통해 내화성능을 평가 하였다. 본 논문에서는 실험변수인 콘크리트 면적비, 좌굴 방지 외부 보강판, 피복두께를 비교, 분석하여 평가하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 실험과 열전달 해석을 비교한 결과, 온도 부분에 있어서는 10% 내외의 오차가 발생 하였다.
- (2) 단면치수에 따라 콘크리트 면적비가 96.38% 일 때의

내화 성능 시간은 22분, 97.34% 일 때 25분, 97.96% 일 때는 24분이다. 이는, 실험 재하장비의 여건상, 재하하중(2100kN)을 초과하는 내력을 갖는 실험체를 제작 할 수 없는 이유로, 미소한 면적비의 증가 (각각 약 0.5%)를 변수로 사용하였으며, 콘크리트 비율이 97%이상인 실험체(yLRC - 3, 8)가 97% 미만인 실험체에 비해 약 13.6% 내화 성능 시간이 증가됨을 알 수 있다.

- (3) 규정된 내화 성능시간이 1시간인 피복두께 22mm는 화재노출 시간이 3시간에 도달하여도 허용 변형에 도달하지 않았고, 피복두께 44mm의 변형량과 변형속도는 화재 노출 시간이 3시간에 도달하여도 피복두께 22mm보다 적은 결과 값을 나타내었다. 또한 11mm의 피복두께를 적용하여 실험한 결과, 3시간 동안의 화재에 노출되어도 허용 변형에는 도달하지 않았다.
- (4) 기둥 외부에 좌굴 보강판이 있는 경우의 내화성능시간은 28분, 보강판이 없는 경우는 25분으로, 약 12%의 내화 성능 시간의 향상을 나타내었으나, 그 성능증가가 매우 미미하여 차후 피복이 없는 상태의 yLRC 합성기둥의 효율적인 보강방안에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 한국산업규격, (1999) KS F 2257-1, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법-일반요구사항  
 한국산업규격, (2006) KS F 2257-7, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법-기둥의 성능 조건, 2006  
 한국산업규격, (2004) KS F 2257-4, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법-수직 내력 구획 부재의 성능 조건  
 건설교통부 고시 제 2005 - 137호, (2005) 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙 - 내화구조 인정내용  
 임윤희, 강성덕, 오명호, 김명한, 김상대 (2007) SC 합성기둥의 내화성능에 대한 해석연구, 한국강구조학회 논문집,  
 한국강구조학회, 제 19권 3호, pp. 335-343  
 이승재, 강성덕, 오명호, 김명한, 김상대 (2007) SC 합성기둥의 내화성능에 대한 실험연구, 한국강구조학회 논문집,  
 한국강구조학회, 제 19권 4호, pp. 425-434  
 이수진, 김상연, 윤영호, 김형근, 김성배, 이창남 (2005) 강재 영구거푸집을 사용한 시스템 기둥의 거동에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 대한건축학회, 제 25권 제1호, pp. 559-562  
 강지연, 이수진, 윤영호, 김형근, 이창남, 김상섭 (2006) 강재 영구거푸집을 사용한 실대 크기의 시스템 기둥에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 가을학술발표대회 논문집,  
 한국 콘크리트학회, pp. 22-24

- 김성진, 김성배, 김형근, 윤영호, 이창남, 김상섭 (2006) 강관  
영구거푸집을 이용한 기둥-보 접합부의 내진성능 평가.  
한국강구조학회 학술발표대회논문집, 한국강구조학회,  
pp. 63-68
- 정상진 (2003) 열전달해석, (주)태성에스엔이
- Lin-Hai Han, You-Fu Yang, Lei Xu (2003) An experimental  
study and calculation on the fire resistance of  
concrete-filled SHS and RHS columns *Journal of  
Constructional Steel Research*, Volume 59, Issue 4, pp.  
427-452
- Lin-Hai Han, Jing-si Huo (2003) Concrete-filled hollow  
structural steel columns after exposed to ISO-834 fire  
standard *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129,  
No. 1, pp. 68-78
- Lin-Hai Han, Xiao-Ling Zhao, M.ASCE, You-Fu Yang,  
Jin-Bin Feng (2003) Experimental study and  
calculation of fire resistance of concrete-filled hollow  
steel columns *Journal of Structural Engineering*, Vol.  
129, No. 3, pp. 346-356
- Y.Sakumoto, T.Yamaguchi, T.Okada, M.Yoshida, S.Tasaka,  
H.Saito (1994) Fire resistance of fire-resistance steel  
columns *Journal of Structural Engineering*, Volume  
120, Issue 4, pp. 1103-1121
- T.T Lie and V.K.R.Kodur (1996) Fire resistance of steel  
columns filled with bar-reinforced concrete *Journal of  
Structural Engineering*, Volume 122, Issue 1, pp.  
30-36
- ENV (1994) Eurocode 4 Design of composite steel and  
concrete structures Part 1.1: General rules and rules  
for building, ENV
- ENV (1994) Eurocode 4 Design of composite steel and  
concrete structures Part 1.2: General rules and rules  
for building, ENV
- ISO 834-1 (1999) Fire resistance tests - Elements of building  
construction and materials

(접수일자 : 2008. 2. 12 / 심사일 2007. 3. 10 /

제재확정일 2008. 5. 22)