

iTECH 합성보의 내화성능에 대한 해석연구

Analytical Study on the Fire Resistance of iTECH Composite Beam

임 윤 희¹⁾ · 강 성 덕²⁾ · 오 명 호³⁾ · 김 명 한⁴⁾ · 김 상 대^{5)†}

Lim, Yoon Hee · Kang, Seong Deok · Oh, Myoung Ho · Kim, Myeong Han · Kim, Sang Dae

요 약 : 본 연구는 하중비, 피복유무의 주요변수를 고려한 iTECH 합성보의 내화성능을 해석적 연구를 통해서 규명한 것이다. 합성보 구조는 개별적인 구조부재보다 내화성능이 우수할 것으로 기대되므로 해석적 연구에 의해서 안전하고 경제적인 내화설계를 제시할 수 있다. 열전달 해석은 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하여 ISO표준화재에 대해서 수행하였으며, EC1 Part 2.2와 EC4 Part1.2에서 제시된 모멘트 능력식과 강재와 콘크리트의 열적특성에 근거하여 내력해석을 수행하였다. 해석의 적절성을 검증하기 위해 실제적으로 수행된 실험결과와 비교를 통해서 그 적절성을 검증하였다.

ABSTRACT : The purpose of this analytical study of an iTECH composite beam subjected to fire conditions is to determine the beam's fire resistance performance using its load ratio and fire protection as parameters. A composite structural system is expected to have a safer and more economical fire safety design than a mere collection of isolated members. Heat transfer analysis was performed on the basis of the finite element program ANSYS 10.0 using an ISO834 standard fire, following the main guidelines proposed by EC1 Part 2.2 and EC4 Part 1.2. To validate the analytical simulation of the iTECH composite beam, comparison of the experimental tests was proposed.

핵심용어 : iTECH 합성보, 열전달 해석, ISO 표준화재, 내화피복, 내화성능

KEYWORDS : iTECH Composite Beam, Heat Transfer Analysis, ISO Standard Fire, Fire Protection, Fire Resistance

1. 서론

1990년 후반 들어 철골조 주상복합 고층건물들이 건설되기 시작했다. 초고층 철골조 구조는 철골보 위에 슬래브가 위치하게 되어 층고가 늘어나는 경향이 있다. 제한된 공간 내에서 최대의 임대면적을 얻기 위하여 층고는 대지의 효율성과 경제성에 있어서 가장 중요한 요인으로 작용하게 된다. 따라서 층고를 효과적으로 절감할 수 있는 합성보에 대한 해결방안을 연구하게 되었고 국내에서는 iTECH 합성보, TSC 보 등을 개발하였다.

iTECH 합성보(Innovative Technical Economical and Convenient Hybrid Composite Beam)는 하부 플랜지를 제외한 강재의 단면이 완전히 콘크리트에 둘러 쌓여있어 높은 내화성을 가질 것이라고 판단되어왔다.

화재가 발생했을 때, 강재와 합성구조물은 강성을 잃게되어 하중능력이 저하된다. 따라서 생명을 보호하고 재산 손실을 막기 위해서, 건물의 필수적인 내화성능이 요구된다. 유럽에서는 구조물의 내화성능에 대한 단일 부재부터 실제 크기의 건축물까지 연구가 거의 막바지 단계에 이르렀다. 그 중 iTECH 합성보와 유사한 유럽의 Slim floor beam은 하부 플랜지를 제외한 강재 단면이 완전히 콘크리트에 둘러 싸여 있어 높은 내화성을 가질 것이라 판단되었고, 이는 실험과 해석적 연구를 통해서 이미 입증되었다. 그러나 국내에서는 합성보에 대한 실제적인 내화성능이 입증되지 않았고 체계적인 수행도 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 iTECH 합성보에 대한 열전달 해석과 내력해석을 통해 내화성능평가를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

ISO 표준화재 곡선에 대하여 범용 유한요소 프로그램인

1) 정희원, 고려대학교 대학원 건축공학과 석사과정(bulebear01@korea.ac.kr)

2) 학생회원, 고려대학교 대학원 건축공학과 박사과정(arp96s@hanmail.com)

3) 정희원, 북포대학교 건설공학부 전임강사, 공학박사(ohmho@mokpo.ac.kr)

4) 정희원, 대전대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사(mhk314@daejin.ac.kr)

5) 교신저자, 정희원, 고려대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Tel.: 02-3290-3743, Fax: 02-921-2439, E-mail: sdk@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

ANSYS 10.0을 이용하여 iTECH 합성보의 열전달 해석을 실시하고 이를 검증하기 위해 실제로 수행된 iTECH 합성보 실험과 비교한다. iTECH 합성보의 온도에 영향을 미칠 수 있는 변수요소에 대한 열전달 해석을 수행하고 이에 대한 모멘트 재분배를 통해 내력해석을 하여 iTECH 합성보의 내화성능을 분석한다.

2. iTECH 합성보

일반적인 H형강을 이용한 합성보는 중립축이 대부분 철골보와 콘크리트 슬래브 경계선 부분에 위치하게 되어 압축측 플랜지의 효과가 적게 된다. 따라서 H형강의 상부플랜지를 제거함으로써 충고를 낮추기 위한 목적으로 개발된 TEC-Beam은 철골 및 RC기둥의 모멘트 접합부위에 사용할 경우 플랜지가 제거된 관계로 구조적 및 시공적 측면에서 제약이 발생하였다. 이러한 제약을 개선할 목적으로 상부플랜지를 추가하고 웹에 오프닝을 두어 구조적 성능 및 접합부 시공성을 향상시키고, 동시에 충고 및 철골 물량의 감소라는 장점을 가지는 iTECH 합성보를 개발하였고, 그림 1과 같다. 그림 2와 같이 기존 철골 합성보를 사용할 경우에는 보의 높이가 585mm이지만 iTECH 합성보를 사용하면 보의 높이를 355mm로 줄일 수 있다. 또한 iTECH 합성보의 하부 플랜지를 제외한 강재를 콘크리트가 감싸고 있기 때문에 내화성능이 높을 것이라고 예상된다.

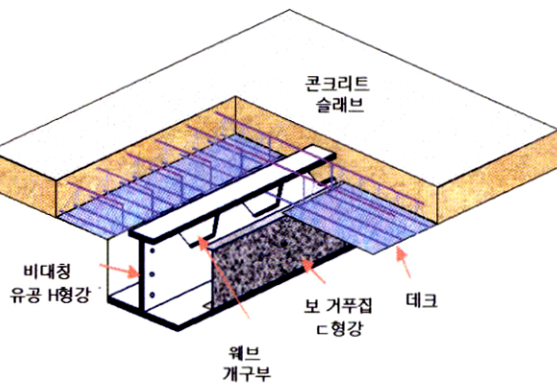


그림 1. iTECH 합성보의 형상

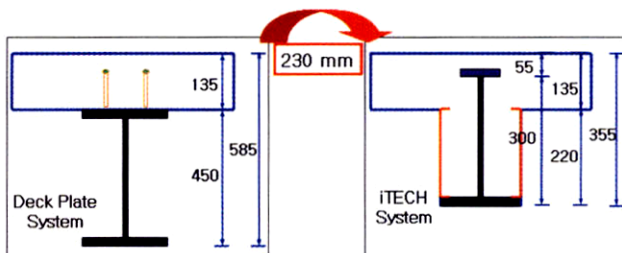


그림 2. 일반 H형강 합성보와 iTECH 합성보의 비교

3. iTECH 합성보 열전달 해석방법

3.1 열전달 해석의 개요

유한요소 프로그램인 ANSYS을 이용하여 열전달에 대해 해석을 수행하였다. 열전달은 열의 이동으로 전도, 대류, 복사의 형태로 전달되고, 물체 내부의 온도는 위치와 시간에 따라서 변하게 되므로 온도 분포를 위치와 시간에 따른 함수로 해석을 한다.

iTECH 합성보는 부재 전 구간에 동일한 크기의 화재가 작용한다고 가정하여 2차원 해석으로 단순화하였고, 열전달 해석의 열 방정식은 식 (1)과 같다.

$$k\nabla^2 T(x,y,t) + Q(x,y,t) = \rho c_p \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 k , T , Q , ρ , c_p 및 t 는 각각 열전도율, 온도, 내부 발생열, 밀도, 비열 및 시간이다.

3.2 재료의 열적 특성

iTECH 합성보의 열전달 해석에 사용된 재료의 열적 특성을 나타내는 비열과 열전도율은 온도에 따른 함수로써 비선형해석에 이용된다. 본 연구에서 강재와 콘크리트의 열적 특성은 Eurocode 4 Part 1, 2를 이용하였다. 여기서 각 함수의 θ 는 강재와 콘크리트의 온도이다.

강재의 열전도율(W/mK)은 열전달 해석에서 열적 특성을 나타내는 값으로 재료의 열전달 능력을 나타내는 척도이다. 강재의 열전도율은 콘크리트보다 크기 때문에 동일한 화재에서 열전도율이 높은 강재가 먼저 내력을 잃게 된다.

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C} \quad (2.a)$$

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

강재의 비열(J/kgK)은 물질 1g의 온도를 1°C 올리는데 필요한 열량을 말한다. 강재의 비열은 콘크리트 비열보다 작고, 비열이 작은 강재의 온도 상승률이 콘크리트보다 더 크다.

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

$$c_a = 666 - 13002/(\theta - 738) \quad \text{for } 600^\circ\text{C} < \theta \leq 735^\circ\text{C} \quad (3.b)$$

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

$$c_a = 650 \quad \text{for } 900^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3.d)$$

콘크리트의 열적 특성은 혼합형태에 따른 콘크리트 종류와 콘크리트에 함유된 수분량에 따라 다르다. 본 연구에서는 보통 콘크리트를 이용한다. 식 (4)는 열전도율(W/mk), 식 (5)는 비열(J/kgk)을 나타낸다.

$$\lambda_c = 2 - 0.24(\theta/120) + 0.012(\theta/120)^2 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$c_c = 900 + 80(\theta/120) - 4(\theta/120)^2 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5)$$

3.3 iTECH 합성보의 열전달 해석을 위한 모델링

본 연구에서 iTECH 합성보의 열전달 해석은 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하여 ISO 표준화재 곡선에 대해 실시하였다. 열전달 해석은 2차원 해석으로 가정하여, PLANE 55 와 SURF 151 요소를 사용하였다. 그림 3의 요소 PLANE 55는 2차원 평면 요소에 사용되고 4개의 노드를 가진다. 열전달 해석에서 부재가 열원으로부터 열을 전달받게 될 때 열원은 추가절점 (Extra Node)을 이용하여 모델링하고, 초기온도 20°C 이후에 ISO 표준화재 온도곡선을 적용한다. 부재의 3면이 화재에 노출되어 있는 것으로 가정하고, 동시에 동일한 화재를 받는 열표면 효과를 구현하기 위해 그림 4와 같은 ANSYS의 SURF 151 요소를 적용하였다. 이 요소는 시간-온도 함수를 이용하여 2차원 열전달 해석에 적용될 수 있는 요소이다.

PLANE 55 와 SURF 151 요소를 사용한 iTECH 합성보의 열전달 해석의 부재 모델링과 요소분할 형상은 그림 5와 같다.

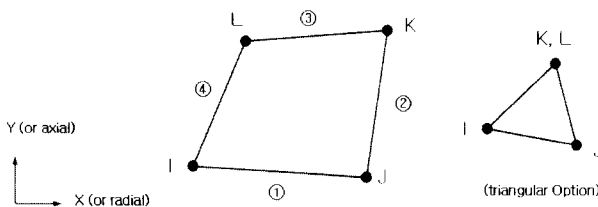


그림 3. PLANE 55 요소 형상

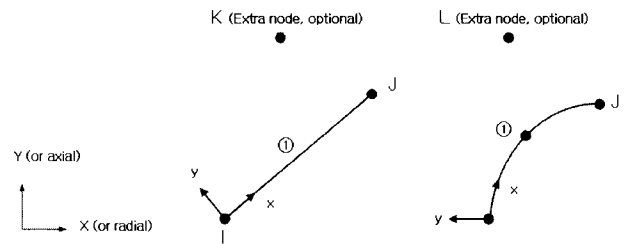


그림 4. SURF 151 요소 형상

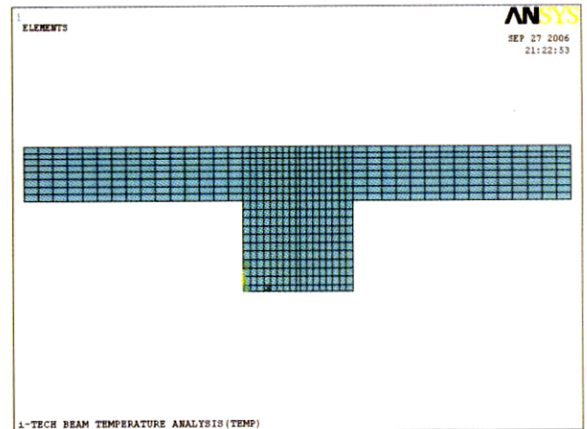


그림 5. ANSYS 10.0을 이용한 iTECH 합성보의 요소분할 형상

3.4 ISO 표준화재를 이용한 열전달 해석결과

대부분의 국가에서 건축물의 내화설계에 두루 적용할 수 있는 표준화된 화재시험방법을 개발하여 사용하고 있는데, 그 국제기준이 ISO 표준화재 곡선, 즉 ISO 834이다. 우리나라 역시 내화성능을 입증하기 위한 실험에서 이 ISO 표준화재 곡선을 사용하고, 국내 KS규격의 F2257-1에서 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서도 ISO 표준화재 온도곡선을 사용하였고, 식 (6)과 같다. 여기서 t 는 시간이고, T_0 는 초기온도이다. (그림 6)

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad (6)$$

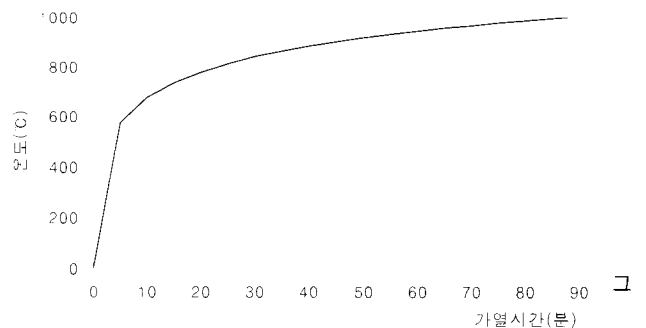


그림 6. ISO 표준화재 곡선

ISO 표준화재 곡선을 이용한 화재시간 60분에 대한 iTECH 합성보의 열전달 해석 결과는 그림 7, 8과 같다. 60분 화재 이후 온도분포를 살펴보면, 화재에 노출된 하부 플랜지가 가장 높은 온도 값을 가지고, 웨브는 위로 올라갈수록 온도가 낮아지고, 상부 플랜지는 일정한 온도분포를 나타낸다. 이는 웨브와 상부플랜지가 콘크리트로 둘러싸여있어 피복재 역할을 하기 때문에, 웨브는 하부플랜지와 멀어질수록 온도가 낮아지고 상부플랜지는 거의 일정한 온도분포를 보인다.

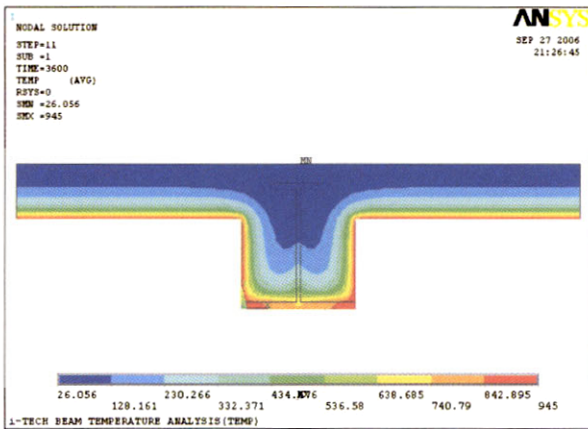


그림 7. ANSYS 10.0의 iTECH 합성보의 온도분포 형상

63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	62	61	57	52	46	42	39	36	33	32	31	31	
71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	70	69	65	58	52	46	42	38	36	35	34	34	34
89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	88	86	81	72	63	55	48	43	40	40	39	40	40
120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	117	111	96	83	71	49	49	43	43	43	44	44	44
177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	176	174	165	144	120	100	80	62	51	47	45	46	47
273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	272	270	260	227	183	147	112	85	66	56	52	52	54
433	433	433	433	433	433	433	433	433	433	433	432	430	421	370	291	218	154	110	83	67	60	60	62
708	708	708	708	708	708	708	708	708	708	708	707	706	701	656	310	305	201	137	100	80	70	69	71
															660	384	244	164	118	83	82	82	84
															703	432	276	186	134	106	95	97	101
															714	404	295	202	148	120	111	116	122
															719	460	306	214	161	136	129	140	149
															723	468	317	227	177	155	153	171	185
															728	478	331	246	200	182	186	213	232
															736	496	357	277	236	223	233	269	294
															753	532	405	333	298	288	303	346	376
															786	603	501	444	414	405	416	456	485
															847	758	707	674	652	637	629	528	629
															888	871	855	838	821	802	780	752	736

(중앙부분은 강재, 나머지는 콘크리트를 나타냄)

그림 8. ISO 표준화재를 이용한 iTECH 합성보의 온도분포

4. 열전달 해석결과의 검증

본 연구에서는 ANSYS 10.0을 이용한 열전달 해석의 모델링과 결과를 검증하기 위해 실제로 수행된 iTECH 합성보 내화실험 결과와 비교하였다.

4.1 iTECH 합성보의 내화실험

iTECH 합성보의 내화실험은 화재에 노출된 iTECH 합성보 (iF-35-00, iF-40-00, iF-50-00)와 3시간 내화성능을 만족

하기 위해 요구피복두께 44mm로 피복한 iTECH 합성보 (iF-35-44, iF-40-44, iF-50-44)를 이용하여 수행하였고, 표 1과 같다.

실험 결과 화재에 노출된 iTECH 합성보는 각각 41분, 52분, 95분까지, 하부 플랜지를 피복한 iTECH 합성보는 3시간 까지 내화성능을 보였다.

표 1. 실험체 일람표

실험체명	i-tech 합성보	피복두께
iF-35-00	iT307x299x9x14(79)x14	None
iF-35-44	iT307x299x9x14(79)x14	44 mm
iF-40-00	iT350x300x11x18(90)x18	None
iF-40-44	iT350x300x11x18(90)x18	44 mm
iF-50-00	iT450x300x11x20(138)x20	None
iF-50-44	iT450x300x11x20(138)x20	44 mm

4.2 iTECH 합성보의 열전달 해석

ANSYS 10.0을 이용한 열전달 해석을 검증하기 위해서 비교 대상의 모델은 하부 플랜지가 노출된 것과 피복을 한 것에 대한 검증을 하기 위해 iF-40-00과 iF-40-44를 선택하였다. 실제 실험과 동일한 조건에서 해석을 하기 위해서, 초기온도는 실제 실험의 온도와 동일하게 설정하였고, 피복 역시 보와 슬래브가 맞닿는 보 끝부분까지 피복재로 둘러쌌다. 각각의 실험에서 내화성능을 가지는 최고 온도인 52분과 3시간에 대해 ISO 표준화재를 이용하여 해석하였다.

4.3 실험 및 해석 결과의 비교

실험과 비교하는 해석 모델의 하부플랜지(B), 웨브(W), 상부플랜지(T)의 온도측정은 실험에서 설치한 열전대와 동일한 위치로 그림 9와 같고, 열전달 해석과 실제 수행된 실험의 온도결과 비교는 피복을 하지 않은 부재에 대해서는 그림 10, 3시간 요구내화피복을 한 부재에 대해서는 그림 12와 같다.

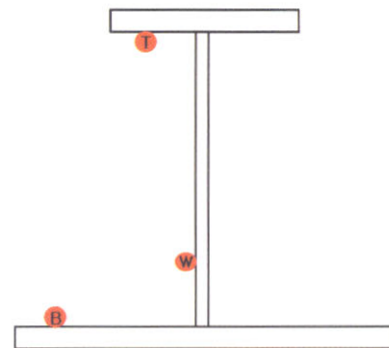


그림 9. iTECH 합성보 온도 측정 위치

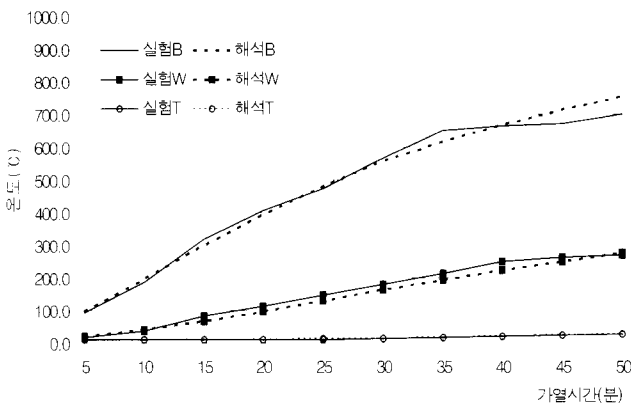


그림 10. iTECH 합성보 iF-40-00에 대한 실험과 해석 결과비교

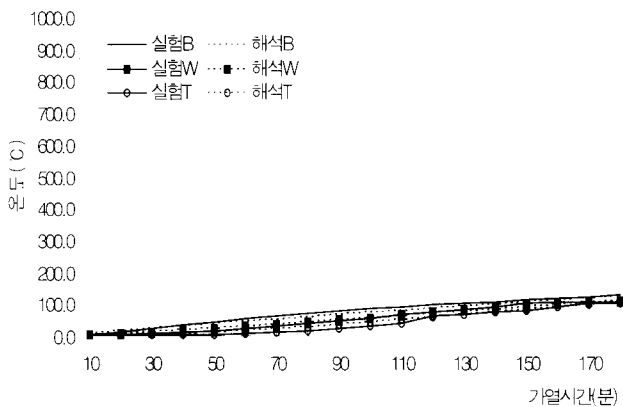


그림 11. iTECH 합성보 iF-40-44에 대한 실험과 해석 비교

피복하지 않은 iF-40-00 모델의 하부플랜지, 웨브, 상부플랜지에서 각각 7%, 2.8%, 4.7%과 같이 실험과의 오차가 발생하였고, 피복한 iF-40-44 모델의 하부플랜지, 웨브, 상부플랜지에서 각각 2.6%, 4.0%, 4.2%의 오차가 발생하였다. 따라서 피복하지 않은 부재와 피복을 한 부재에 대해 각각 오차가 10%를 넘지 않으므로, 해석에 사용된 모델의 적절성이 검증되었다.

5. 열전달 해석을 이용한 iTECH 합성보 내화성능 평가

화재 발생시 부재의 구조적 성능은 상승된 온도에 의해서 저감되기 때문에, 온도상승에 따른 부재의 내화성능 평가가 필요하다.

본 연구에서 iTECH 합성보의 내화성능에 대해서는 실험결과와의 비교를 통해 검증된 iTECH 합성보의 열전달 해석 결과를 바탕으로 모멘트 능력을 구하여 평가하였다. 이때, iTECH 합성보의 내화성능에 영향을 미칠 수 있는 변수요소로서, 단면크기와 피복유무가 내화성능에 미치는 영향을 살펴보

았다. 열전달 해석은 앞에서 검증된 ANSYS 10.0의 모델링을 이용하였고, 모멘트 능력법은 Eurocode 1 Part 2.2에서 제시된 식을 이용하여 평가하였다.

5.1 해석모델

iTECH 합성보의 내화성능에 영향을 미칠 수 있는 변수에 대한 고찰로 단면크기와 피복여부에 대한 연구를 수행하였다. 단면크기는 실제 주거건물에서 주로 사용되는 A-iF-40-00를 기준으로 A-iF-35-00와 A-iF-50-00을 선택하여 비교 평가하였다. 피복유무에 대해서, 피복재료는 뉴-하이코트 SP(밀도: 370 kg/m³, 열전도율: 0.043 W/m·°C)를 이용하였고, KS 규준에서 보부재의 요구내화시간인 3시간을 만족하기 위해, 사용한 피복재의 3시간 요구피복두께 44mm (A-iF-40-44)를 이용하였고, 이 요구피복두께가 어느 정도의 안전범위를 포함하는지 알아보기 위해 요구피복두께의 중간인 22mm (A-iF-40-22)에 대한 것과 비교하였다. 해석모델은 표 2와 같다.

표 2. 열전달 해석 모델 일람표

변수요소	모델명	iTECH 합성보	피복두께
단면크기	A-iF-35-00	iT307x299x9x14(79)x14	None
	A-iF-40-00	iT350x300x11x18(90)x18	
	A-iF-50-00	iT450x300x11x20(138)x20	
피복유무	A-iF-40-00	iT350x300x11x18(90)x18	None
	A-iF-40-22	iT350x300x11x18(90)x18	22 mm
	A-iF-40-44	iT350x300x11x18(90)x18	44 mm

5.2 열전달 해석

열전달 해석은 앞장에서 검증한 해석요소를 이용하여 변수요소인 단면크기, 피복여부에 대해 ISO 표준화재를 이용하여 수행하였다.

단면크기 A-iF-35-00, A-iF-40-00, A-iF-50-00에 대한 60분 열전달 해석결과 온도분포는 그림 12와 같다. 하부 플랜지의 온도를 살펴보면, A-iF-35-00, A-iF-40-00, A-iF-50-00에 대해 각각 60분 화재이후 온도는 828.8°C, 822.1°C, 809.3°C로써, 단면크기와 상관없이 거의 비슷함을 알 수 있었다. 웨브의 온도는 단면에 따라 각각 378.6°C, 328.9°C, 244.8°C로써, 단면이 커짐에 따라 낮은 온도분포를 보인다는 것을 알 수 있었다. 상부 플랜지의 온도는 작은 차이이지만 단면이 가장 큰 A-iF-50-00가 가장 낮은 온도분포를 보였다. 이러한 온도분포 결과는 단면의 크기의 차이가 웨브부분의 길이 차이로 나타남을 알 수 있었고, 따라서 화재에 노출된 하부

플랜지와 콘크리트로 둘러싸인 상부플랜지의 온도는 세 단면에서 비슷하게 나타나고 웨브 길이가 가장 긴, 다시 말해 단면 크기가 가장 큰 A-iF-50-00에서 가장 낮은 온도분포를 나타냈다.

즉, 단면 크기에 따른 온도분포는 단면이 클수록 낮은 온도분포를 보임을 알 수 있다.

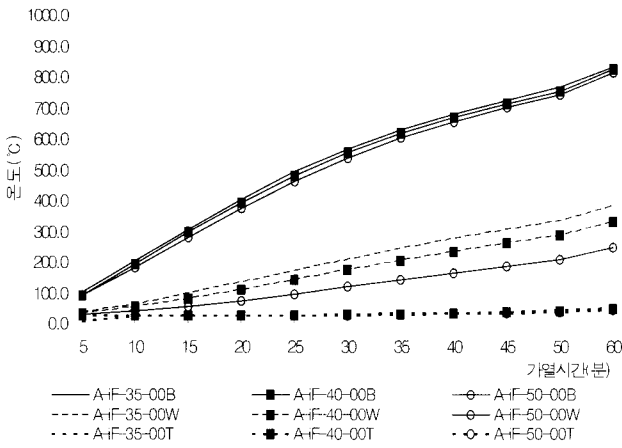


그림 12. 단면의 크기에 따른 열해석의 온도결과

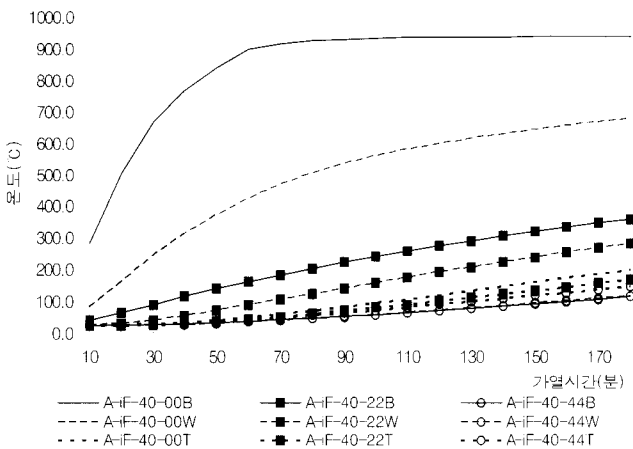


그림 13. 피복여부에 따른 열해석의 온도결과

피복유무에 대한 온도분포 결과는 그림 13과 같다. 피복재는 강재와 콘크리트의 열전도율보다 훨씬 더 낮은 값을 갖기 때문에 3시간 요구피복두께 44mm를 이용한 A-iF-40-44의 하부 플랜지의 온도 112.6°C는 A-iF-40-00(938.2°C)에 비해 온도가 상당히 낮음을 알 수 있다. 또 3시간 요구피복두께의 중간인 22mm에 대한 모델 A-iF-40-22의 3시간 화재 후의 온도는 357.7°C로써 역시 A-iF-40-00보다 온도가 상당히 낮음을 알 수 있다. A-iF-40-22와 A-iF-40-44는 우리나라 강재 허용온도 기준인 538°C를 고려한 결과 모두 안정한 온도 범위 안에 있음을 알 수 있었다. 웨브와 상부플랜지 역시 하부

플랜지와 같은 결과를 나타낸다. 또, A-iF-40-44에서 하부 플랜지와 웨브의 온도가 상부 플랜지의 온도보다 더 낮음을 알 수 있는데, 이는 피복두께가 과도하여 나타난 결과라고 예상할 수 있고, 따라서 3시간 화재 이후 부재의 온도분포 결과로 22mm 두께가 적절함을 알 수 있다.

5.3 모멘트능력 계산 및 내화성능평가

각 변수요소에 대한 iTech 합성정보의 내화성능을 평가하기 위해 본 연구에서는 Eurocode 1 Part 2.2 에 제시된 모멘트 능력법을 사용하였다. 모멘트 능력 M_u (N·m)는 식 (7)에 의해서 계산된다.

$$M_u = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} \Delta x_{ij} \Delta y_{ij} d_i \quad (7)$$

여기서 m과 n은 x와 y방향으로 각각 요소의 분할 수, f_{ij} 는 요소(i, j)의 콘크리트 또는 강재 강도, Δx_{ij} 와 Δy_{ij} 는 요소 치수, d_i 는 소성중립축으로부터 요소(i, j)의 도심까지의 거리이다.

소성 중립축은 완전소성 상태에 도달한 단면에서 전단면의 인장력과 압축력이 같다는 조건을 식 (8)을 이용해서 산정할 수 있다. 여기서, 소성 중립축을 미지수로 놓고 각 단면의 면적에 응력을 곱한 것으로 화재 발생시에는 적절한 강도저감계수를 곱해 주게 된다.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} \Delta x_{ij} \Delta y_{ij} = 0 \quad (8)$$

모멘트 능력으로 상온에서의 모멘트 능력에 대한 화재 발생시의 모멘트 능력의 비, 하중비(Load Ratio)를 구할 수 있다. BS5950 Part8(10)과 ASFP의 Fire protection for structural steel in buildings(2004)에서는 내화성능을 발휘하는 온도(55°C~620°C)에 대한 보통 하중비 범위는 0.45~0.55이다. 본 연구에서 상온을 20°C로 두었다. 하중비 식 (9)와 같다.

$$R = \frac{\text{화재시 모멘트 능력}}{\text{상온에서의 모멘트 능력}} \quad (9)$$

변수요소에 대해 열전달 해석을 이용하여 모멘트 능력과 하중비를 통해 화재 발생시 iTech 합성정보의 내화성능을 평가하였다.

단면크기(A-iF-35-00, A-iF-40-00, A-iF-50-00)에 따

른 모멘트 능력은 표 3과 같다. 앞선 열전달 해석 결과 단면이 가장 큰 A-iF-50-00의 온도분포가 가장 낮았고, 그에 따라 상온에 대해 부재의 모멘트 능력 저감이 작아 가장 큰 하중비 0.49를 가짐을 알 수 있다.

표 3a. A-iF-35-00 부재의 모멘트 능력

요 소	온도 분포 (°C)	소성중립축으로부터 도심까지의 거리(mm)	축 내력 (N)	모멘트 내력 (N·m)
하부 플랜지	740-891	289	4.46	1.29 (21.21)
웨 브	56-646	212	61.38	13.03 (16.55)
상부 플랜지	48-51	1	34.26	0.03 (0.08)
콘크리트 슬래브	34-89	34	77.90	2.65 (4.29)
총 모멘트 내력	17 (42.13) : 하중비 0.40			

* ()는 상온에서의 값

표 3b. A-iF-40-00 부재의 모멘트 능력

요 소	온도 분포 (°C)	소성중립축으로부터 도심까지의 거리 (mm)	축 내력 (N)	모멘트 내력 (N·m)
하부 플랜지	736-888	331	4.65	1.54 (24.24)
웨 브	47-629	243	72.48	17.65 (21.93)
상부 플랜지	43-44	1	34.32	0.03 (0.15)
콘크리트 슬래브	31-89	35	77.91	2.73 (4.53)
총 모멘트 내력	21.95 (50.85) : 하중비 0.43			

* ()는 상온에서의 값

표 3c. A-iF-50-00 부재의 모멘트 능력

요 소	온도 분포 (°C)	소성중립축으로부터 도심까지의 거리 (mm)	축 내력 (N)	모멘트 내력 (N·m)
하부 플랜지	740-892	428	4.49	1.92 (31.48)
웨 브	40-604	316	98.17	31.01 (37.69)
상부 플랜지	38-39	4	34.38	0.12 (0.23)
콘크리트 슬래브	29-89	38	77.92	2.93 (4.77)
총 모멘트 내력	35.98 (74.17) : 하중비 0.48			

* ()는 상온에서의 값

그림 14a-c를 통해서 각 부분의 모멘트 능력의 변화를 알 수 있다. A-iF-35-00, A-iF-40-00, A-iF-50-00에서 모두 화재에 노출되어 가장 높은 온도를 가지는 하부플랜지의 모멘트 능력의 저감이 웨브나 상부 플랜지보다 눈에 띄게 큼을 알 수 있다. 웨브부분의 길이 차이로 가장 긴 A-iF-50-00의 모멘트 능력이 A-iF-35-00, A-iF-40-00보다 큼을 알 수 있다. 또, 하부플랜지의 모멘트 능력 역시 A-iF-50-00가 가장 크지만 큰 차이는 보이지 않음을 알 수 있다. 단면의 크기에 따라 웨브 부분의 길이가 커짐을 앞서 알았고, 따라서 단면이 가장 큰(웨브길이가 가장 긴) A-iF-50-00의 웨브부분의 모멘트 능력이 다른 두 단면에 비해 두드러지게 큼을 알 수 있다. 상부 플랜지의 모멘트 능력은 큰 차이는 아니지만 단면이 커질수록 모멘트 능력도 좋음을 알 수 있다.

따라서 iTECH 합성보의 내화성능은 단면이 클수록 화재 이후 더 낮은 온도를 가지고, 그에 따라 부재의 모멘트 능력이 더 좋음을 알 수 있다.

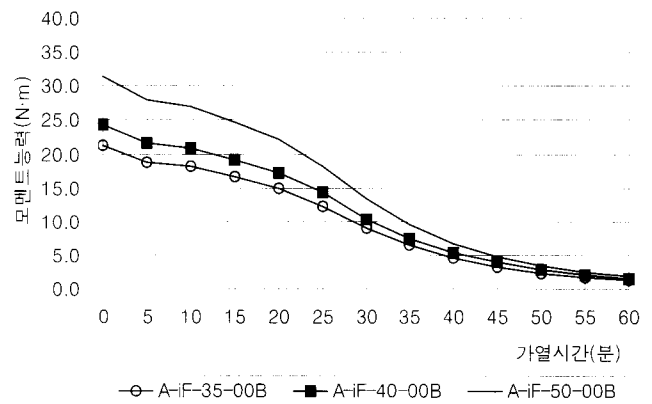


그림 14(a). 단면크기에 따른 하부플랜지의 모멘트 능력

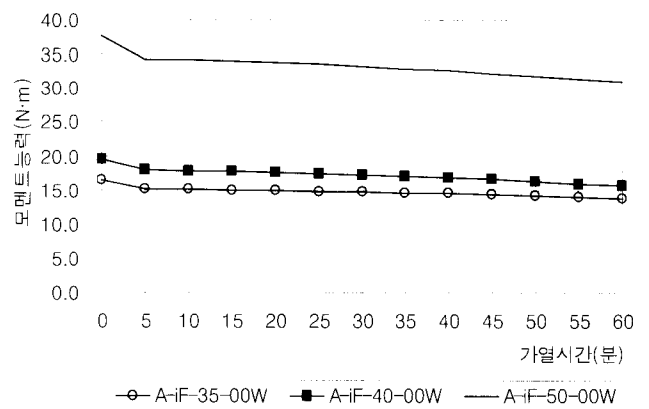


그림 14(b). 단면크기에 따른 웨브의 모멘트 능력

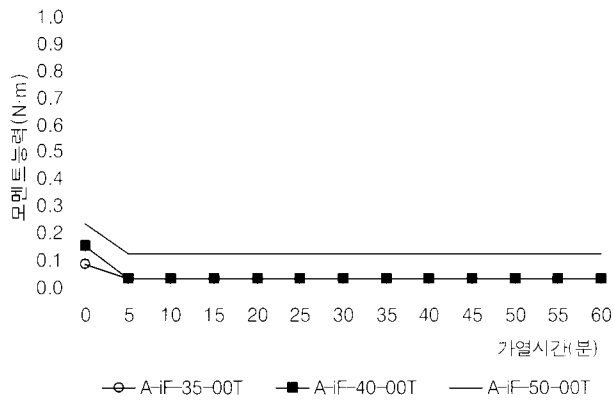


그림 14(c). 단면크기에 따른 상부 플랜지의 모멘트 능력

피복여부에 대한 모멘트 능력의 해석 결과는 표 4와 같다. 피복을 하지 않은 A-iF-40-00의 3시간 화재에 대해 하중비는 0.30으로써 화재 발생시 상당한 구조적 성능저하가 나타남을 알 수 있다. 3시간 화재에 대한 44mm 요구피복두께로 피복한 A-iF-40-44의 하중비는 0.85으로써 화재 발생시 구조적 성능저하가 상당히 작음을 알 수 있고, iF-40-22 역시 하중비 0.78으로써 구조적 성능저하가 작음을 알 수 있다. ASFP의 Fire protection for structural steel in buildings(2004)에서 화재 발생시 구조부재는 보통 0.45-0.55의 하중비 범위를 갖는다고 언급하였다. 따라서 A-iF-40-22와 A-iF-40-44 모두 안정된 범위 안에 있음을 알 수 있다.

표 4. 피복유무에 따른 모멘트 능력 (단위: N·m)

요소	A-iF-40-00	A-iF-40-22	A-iF-40-44	
하부 플랜지	0.64	18.60	21.51	
웹	11.67	18.41	19.42	
상부 플랜지	0.03	0.07	0.07	
콘크리트 슬래브	2.31	2.46	2.46	
하중비	1시간	0.43	0.87	0.88
	2시간	0.34	0.84	0.87
	3시간	0.30	0.78	0.85

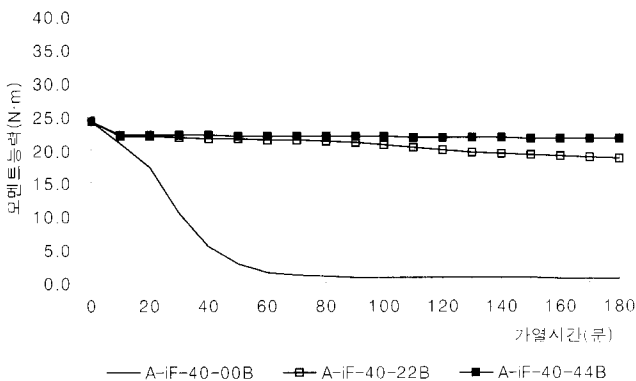


그림 15(a). 피복유무에 따른 하부 플랜지의 내화성능

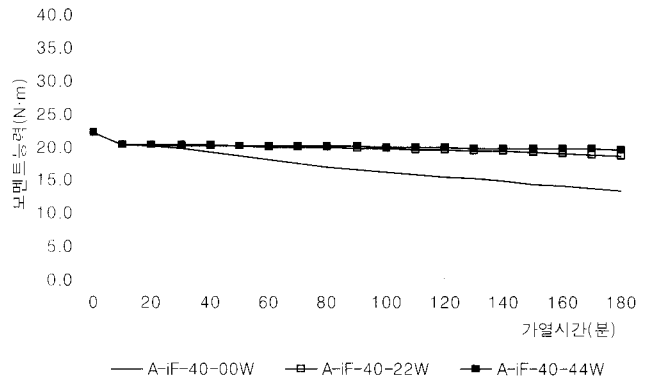


그림 15(b). 피복유무에 따른 웹의 내화성능

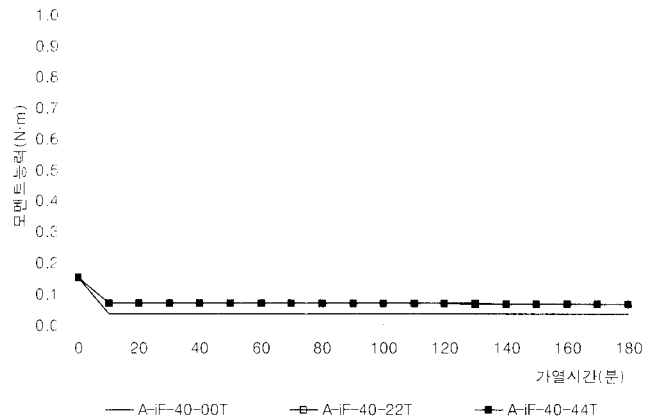


그림 15(c). 피복유무에 따른 상부 플랜지의 내화성능

그림 15a-c를 살펴보면, 시간에 따른 하부 플랜지, 웹, 상부 플랜지의 하중비의 감소가 A-iF-40-00가 상당히 크고, A-iF-40-22와 A-iF-40-44는 하중비의 감소가 적음을 보인다. 즉, 피복으로 인해 부재의 구조성능의 저하가 상당히 적고, 국내에서 인증된 내화피복재를 사용하면 화재 발생시 구조적 성능저하가 상당히 적어 안전함을 알 수 있다.

5.4 유럽의 슬림 플로어 시스템에 대한 연구 결과

Pentti Makelainen, Zhongcheng Ma의 [Fire resistance of composite slim floor beams]은 비대칭 슬림플로어 시스템에 대하여 ISO를 이용한 표준화재와 개구부계수, 화재하중밀도에 의한 자연화재(변수화재)에 대해 2차원 유한요소 프로그램인 TACS-FIR을 이용하여 열해석을 하고, 열해석으로 얻은 온도 결과로 부재의 모멘트 능력과 하중비로 내화성능을 평가하였다. 그 결과 ISO를 이용한 표준화재에 대해 0.47 하중비를 얻었고, 따라서 하중비가 0.47보다 낮다면 60분 내화성을 성취하지만 그렇지 않은 경우 보강이나 바닥 플랜지의 내화피복과 같은 추가적인 조치가 요구된다는 결론을 얻었다. 또, 자연화재에 대해서 화재하중밀도가 1100 MJ/m²보다 작다면 어떤 추가적인

측정 없이도 새로운 슬림플로어 보를 사용할 수 있다는 결론을 얻었다.

6. 결론

iTECH 합성보는 초고층 건물에서 충고를 절감하는 효과와 함께 콘크리트로 둘러 싸여 있어 본래 높은 내화성을 가진다. 본 연구는 화재 발생시 iTECH 합성보의 내화성능에 대한 기초 자료를 제시하고자 열전달 해석과 이에 대한 모멘트 능력과 하중비를 평가하였다. 열전달 해석 결과의 정확성을 검증하고자 실제 실험결과와 비교하였다. 또, 열전달 해석 결과 얻어진 온도에 의한 iTECH 합성보의 모멘트 능력을 통해 내화성능을 알아보았고, 특히 단면크기와 피복두께가 내화성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) ANSYS 10.0 을 이용한 열전달 해석결과와 실제 실험 결과와의 비교를 통해, 피복하지 않은 iF-40-00 모델의 하부플랜지, 웹, 상부플랜지에서 각각 7%, 2.8%, 4.7%, 피복한 iF-40-44 모델에 대해 각각 2.6%, 4.0%, 4.2%의 오차가 발생하였다. 따라서 피복하지 않은 부재와 피복을 한 부재에 대해 각각 오차가 10%를 넘지 않음을 확인하여 열전달 해석의 적절성을 검증하였다.
- (2) 단면 A-iF-35-00, A-iF-40-00, A-iF-50-00의 하부플랜지의 모멘트 능력 변화를 살펴보면, 상온일 때 전체 모멘트 내력에 대해 각각 50%, 48%, 42%를 가지고 있었고 60분 ISO표준화재 이후 8%, 7%, 5%로 큰 폭으로 감소하였다. 반면 웹은 화재 이후 77%, 80%, 86%의 비율을 보였다. 따라서, 웹 모멘트 능력이 가장 좋은, 즉 단면이 가장 큰 A-iF-50-00의 전체적인 내력저하가 가장 작음을 알 수 있고, 단면 크기가 클수록 내화성능이 좋아짐을 알 수 있다. 그러나 각 단면에 따른 하중비를 비교하면, 0.40, 0.43, 0.49로 단면크기가 내화성능에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.
- (3) 피복유무에 따라, 3시간 화재 이후 하중비는 A-iF-40-00은 0.3, A-iF-40-22는 0.78, A-iF-40-44는 0.85로, iTECH 합성보에 피복재를 적용한 경우에 내화성능이 우수함을 알 수 있다. 따라서 하부플랜지의 최소한의 피복만으로 3시간 내화성능을 가짐을 알았다.

감사의 글

본 연구는 2005 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000

-11202-0)지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 민정기, 강석원, 김명한, 김상대 (2005) iTECH 보의 내화성능에 대한 해석적평가, 대한건축학회 논문집(구조계), 대한건축학회, 제 21권, 제 7호, pp.37-46
- 이상록, 권인규, 지남용 (2002) 강재 기둥 및 보의 하중비에 따른 한계온도평가 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 대한건축학회, 제 22권, 제 2호, pp. 399-402
- 정상진 (2003) 열전달해석, (주)태성에스엔이
- 주영규, 김도현, 정광량, 김상대 (2003) iTECH 시스템의 전단 성능에 대한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집(구조계), 대한건축학회, 제 19권, 제 5호, pp. 27-34
- 천성철, 주영규, 정광량, 김상대 (2002) 비대칭 유공 합성보 iTECH beam의 휨성능평가, 대한건축학회 논문집(구조계), 대한건축학회, 제 18권, 제 4호, pp. 67-74
- 천성철, 정광량, 주영규, 김상대 (2002) 충고절감 및 내화성능 향상을 위한 iTECH 합성보, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제14권, 제1호, pp. 55-63
- 최승관, 김성배, 이창남, 김상섭, 김홍열, 신현준 (2005) TSC 보 내화성능에 관한 수치해석적 연구, 대한건축학회 학술발표대회(창립60주년 기념) 논문집, 대한건축학회, 제 25권, 제 1호, pp. 551-554
- Andrew H. Buchanan (2001) Structure Design for Fire Safety, John Wiley & Son. LTD
- ASFP (2004) Fire protection for structural steel in buildings (third edition), ASFP
- British standards institution (1990) British standard structural use of steelwork in building: Part 8 code of practice for fire resistant design, BSI
- ENV (1994) Eurocode 4-Design of composite steel and concrete structures-Part 1-2: General rules- Structural fire design, ENV
- G. M. Newman (1995) Fire resistance of slim floor beams, Journal of Constructal Steel Research, Vol.33, No.1-2, pp. 87-100
- ISO 834-1 (1999) Fire resistance tests - Elements of building construction and materials
- John A. Purkiss (1996) Fire safety engineering design of structures, Butterworth-heinemann
- KS F 2257, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법, 1999, 한국산업규격
- Pentti Makelainen, Zhongcheng Ma (2000) Fire resistance of composite slim floor beams, Journal of

Constructal Steel Research, Vol.54, No.3, pp.
345-363

Y. C. Wang (2002) Steel and Composite Structures:

Behaviour and design for fire safety, Spon Press

(접수일자 : 2006. 6. 15 / 심사일 2006. 7. 3 /

심사완료일 2006. 9. 27)