

# 화재에 노출된 교량하부 강합성 구조물에 대한 열-구조 연성 병렬화재해석

윤 성 환<sup>1</sup> · 길 흥 배<sup>2</sup> · 이 일 근<sup>2</sup> · 김 우 석<sup>3</sup> · 박 대 호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 건설환경공학과, <sup>2</sup>한국도로공사 도로교통연구원, <sup>3</sup>충남대학교 토목공학과

## Thermal-Structure Interaction Parallel Fire Analysis for Steel-Concrete Composite Structures under Bridge Exposed to Fire Loading

Sung-Hwan Yun<sup>1</sup>, Heungbae Gil<sup>2</sup>, Ilkeun Lee<sup>2</sup>, Wooseok Kim<sup>3</sup> and Taehyo Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

<sup>2</sup>Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation, Hwaseong, 431-767, Korea

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

### Abstract

The objective of this research is to evaluate of global and local damage for steel-concrete composite structures under highway bridge exposed to fire loading. To enhance the accuracy and efficiency of the numerical analysis, the proposed transient nonlinear thermal structure interaction(TSI) parallel fire analysis method is implemented in ANSYS. To validate the TSI parallel fire analysis method, a comparison is made with the standard fire test results. The proposed TSI parallel fire analysis method is applied to fire damage analysis and performance evaluation for Buchen highway bridge. The result of analysis, temperature of low flange and web are exceed the critical temperature. The deflection and deformation state show good agreement with the fire accident of buchen highway bridge.

**Keywords** : steel-concrete composite structure, Buchen highway bridge, thermal-structure interaction, parallel fire analysis, fire damage evaluation

### 1. 서 론

최근 고속도로 교량에서 발생된 I-580 Oakland Bay Bridge(2007) 화재사고 뿐만 아니라 국내에서도 고속도로 교량에서의 차량 충돌, 전복, 방화 등으로 인한 화재발생이 증가함에 따라 교량 구조물의 화재손상이 지속적으로 발생되고 있다(Korea Expressway Co., 2011). 특히 일반 차량의 화재에 비해 석유화학물질을 수송하는 유조차 화재는 짧은 시간에 1,000°C이상의 고온이 발생되어 교량 구조물에 전반적·국부적 손상을 초래하여 구조적 기능이 상실되고 심각한 경우 구조물 붕괴가 발생될 수 있다(Choi, 2008; Paul *et al.*, 1986).

이에 본 연구에서는 화재에 노출된 교량상부 구조물에 대한 손상평가를 위해 열-구조 연성(thermal-structure interaction, 이하 TSI) 병렬화재해석 기법이 제안된다. 이 때 구성재료의 열적·열역학적 특성을 고려하여 온도와 시간에 따른 과도비선형(transient nonlinear) 모델이 적용되고, 제안된 화재해석 기법은 ANSYS solver(2007)에 연결되어 12개의 cpu가 적용된 병렬화재해석이 수행된다. cpu 개수가 증가되면 해석의 효율성도 증가되지만 이는 선형적으로 증가되지 않으며(Park *et al.*, 2011) 본 연구에서는 병렬해석의 효율성은 고려되지 않는다. 화재해석결과는 표준화재시험(Compendium of UK, 1989)과 비교 검증되며, 최종적으로 국내에서 발생된

\* Corresponding author:

Tel: +82-2-2220-4562; E-mail: cepark@hanyang.ac.kr

Received July 10 2013; Revised July 31 2013;

Accepted August 1 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

강-콘크리트 합성구조인 부천고가교 화재(2010)에 대한 화재 손상해석이 수행된다.

### 2. 화재 하중

교량 구조물과 같은 개활지에서 발생하는 화재의 경우 가스 등에 의한 화학반응으로 발생하는 단면의 손상은 일반적으로 무시할 수 있으며 구조물에 영향을 주는 핵심요인은 온도상승에 의한 화재하중이다. 이와 같은 화재하중은 시간에 따른 온도의 변화를 나타낸 화재곡선(fire curve)으로 정의되며 구조물의 화재에 대한 성능을 평가하기 위해서 각 화재 사례 및 화재실험을 기초로 하여 화원의 종류에 따른 화재곡선이 제안된다. 열린 공간에서 일반적인 화재에 대해서는 ISO 834(1999) 표준화재곡선이 적용되고, 석유화학물질에 의한 화재가 발생할 경우 10분 안에 약 1,000℃의 고온이 발열되며 짧은 시간 안에 1,120℃까지 온도가 상승된다. 이와 같이 연소율이 짧은 시간에 순식간에 초과되는 휘발성 가스나 화학제 등의 물질의 경우 최근 EUROCODE 2(2004)에서 제안된 hydrocarbon 화재곡선이 적용된다. ISO 834(1999) 및 hydrocarbon 화재곡선의 관계식이 식 (1)과 (2)에 각각 나타나 있고, 시간에 따른 온도분포는 Fig. 1에 비교되어 나타나있다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad (t : \text{min}, T_0 : 20^\circ\text{C}) \quad (1)$$

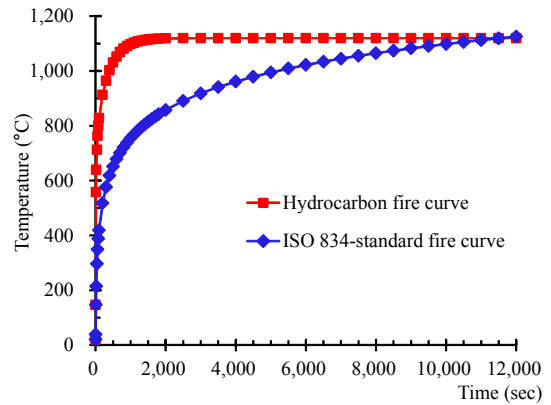


Fig. 1 Comparison of fire curve

$$T = T_0 + 1,100 \left[ 1 - 0.325 e^{-0.1667t} - 0.204 e^{-1.417t} - 0.471 e^{-15.833t} \right] \quad (2)$$

### 3. TSI 병렬화재해석

화재해석을 위해 먼저 구조물 형상에 대한 모델링을 수행한 후 시간에 따른 온도변화를 고려한 과도 비선형(transient nonlinear) 열전달 해석이 수행된다. 열전달 해석은 온도에 따른 열적 재료상수인 비열, 밀도, 열전도계수, 열팽창계수 (EUROCODE 2, 2004) 및 경계조건을 설정한 후 전도, 대류, 복사에 따른 열전달 해석이 수행되며 부재 단면 내 온도분포가 산정된다. 산정된 온도분포는 시간에 따른 하중 스텝별로 열역학적 구조 해석에서의 온도하중으로 작용되며, 온도에 따

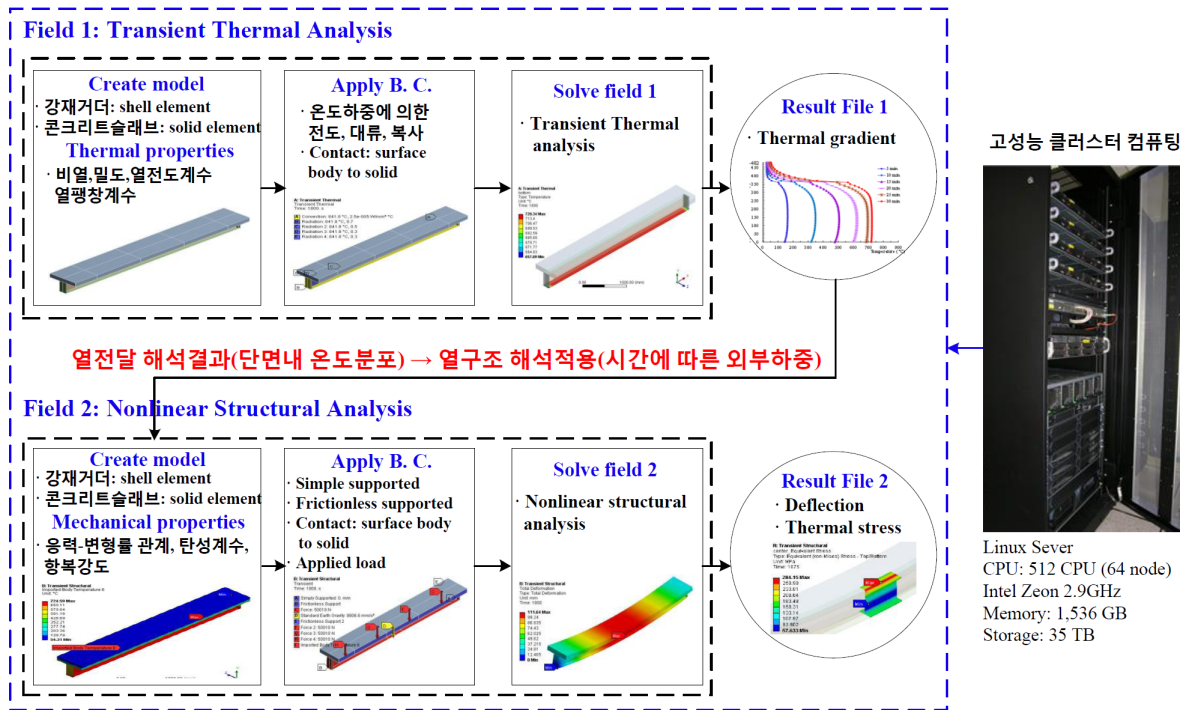


Fig. 2 TSI parallel fire analysis

른 비선형적 재료 특성인 응력-변형률 관계, 탄성계수, 항복강도(EUROCODE 2, 2004) 및 지지조건, 온도하중, 적용하중과 같은 경계조건에 따른 열역학적 구조해석이 수행된다. 이때 해석의 효율성을 높이기 위해 고성능 클러스터 컴퓨팅을 이용한 병렬해석기법이 적용되며 제안된 TSI 병렬화재해석 프로세스는 Fig. 2에 나타나 있다.

### 3.1 과도 비선형 열전달 해석

열전달 메커니즘은 두 요소 사이의 온도 차이에 의해 한 요소에서 다른 요소로 에너지가 전달되는 현상을 말한다. 기본적으로 전도(conductivity), 대류(convection), 그리고 복사(radiation)의 세 가지 방법으로 전달되며, 전도의 경우 입자 상호간에 작용으로 고에너지 입자에서 저에너지 입자로 전달된다. 대류의 경우 고체 표면과 주위 기체 사이에서 발생하는 에너지의 전달이며, 복사는 원자나 분자의 전자입자가 변화면서 물체가 전파의 형태로 방출되는 에너지이다.

먼저 열전도에서는 온도 구배(temperature gradient)에 의해 물체 내부의 에너지 교환이나 완전 접촉하고 있는 두 물체 간의 에너지 교환이 일어난다. 두께가  $dx$ 에 대한 온도차  $dT$ 가 발생될 때 구배 방향으로 전도되는 전도 열전달율(heat flow rate,  $q_{cond}$ )은 식 (3)과 같다.

$$q_{cond} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

여기서,  $k$ 는 열전도 계수,  $dT/dx$ 는 온도 기울기를 각각 나타낸다. 물체를 통한 전도 열전달율은 열전도율과 온도 차이에 비례하고 물체의 두께에 반비례한다.

대류에서는 물체와 주위 유체 사이에서의 에너지 교환이 일어나면서 온도차에 따른 밀도차에 의해 발생되며 대류 열전달율  $q_{conv}$ 는 유체와 물체 표면과의 온도 차와 대류계수에 의한 함수인 식 (4)와 같다.

$$q_{conv} = h(T_s - T_B) \quad (4)$$

여기서,  $h$ 는 대류 열전달 계수,  $T_s$ 는 표면 온도,  $T_B$ 는 주변 유체 온도를 나타낸다.

복사에서는 전자파에 의한 무 물체간 혹은 하나의 물체로부터 에너지 교환이 일어나며 불투명한 재질의 경우 복사 에너지는 표면에서 극히 짧은 거리 내에서 흡수되거나 방사되기 때문에 복사에너지의 상호작용은 표면에서 이루어지는 것으로 가정한다. 두 표면 간의 복사 열전달율  $q_{rad}$ 는 식 (5)과 같다.

$$q_{rad} = \epsilon \sigma_s (T_b^4 - T_\infty^4) \quad (5)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 표면 방사율( $0 < \epsilon < 1$ ),  $\sigma_s$ 는 Stefan-Boltzmann 상수( $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ ),  $T_b$ 는 body temperature,  $T_\infty$ 는 주변 온도를 각각 나타낸다.

고속도로 교량 화재의 경우 열원에서 부재표면까지의 대류 및 복사에 의해 구조체로 열이 전달되며, 부재 내부에서는 전도에 의해 열전달이 이루어진다.

화재발생에 따른 구조물의 과도 비선형 열전달 해석 지배방정식은 식 (6)과 같다.

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T, t)\} \quad (6)$$

여기서, 열저장효과를 나타내는 열저장 구간(heat storage term)의 비열 매트릭스(specific heat matrix)  $[C]$ 는 비열(specific heat,  $C$ )과 밀도(density,  $\rho$ )의 함수이고, 열전도 매트릭스(conductivity matrix)  $[K]$ 는 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)의 함수이며,  $[Q]$ 는 열유량 매트릭스,  $\dot{T}$ 는 시간에 따른 온도변화율을 나타낸다.

### 3.2 비선형 열역학적 구조해석

열전달 해석을 통해 얻어진 내부 온도분포가 열하중으로 적용되어 재료특성의 변화, 부재의 하중능력 및 단면력 손실 평가를 위한 열역학적 구조 해석이 수행된다. 열역학적 구조 해석에서 전체변형률(total strain,  $\epsilon_t$ )는 온도의 변화에 따른 열적 변형률(thermal strain,  $\epsilon_{th}$ )과 외부에서 작용하는 하중에 의한 응력변형률(stress related strain,  $\epsilon_s$ )으로 구성되며 식 (7)과 같다.

$$\epsilon_t = \epsilon_{th}(T) + \epsilon_s(\sigma, T) \quad (7)$$

열역학적 구조는 온도차에 의한 열역학적 구조와 재하 하중에 의한 응력, 구속조건이 있는 상태에 의한 응력으로 구성되며 식 (8)과 (9)에 각각 나타나 있다.

$$\sigma = \sigma_{th} + \sigma_l + \sigma_r \quad (8)$$

$$\sigma_{th} = E\alpha(\Delta T - T_0) \quad (9)$$

여기서,  $\sigma_{th}$ 는 온도차에 의한 열역학적 구조,  $\sigma_l$ 은 하중에 의한 응력,  $\sigma_r$ 은 구속조건에 의한 응력,  $E$ 는 탄성계수,  $\alpha$ 는 열팽창계수,  $\Delta T$ 는 온도차,  $T_0$ 는 초기 온도를 각각 나타낸다.

### 3.3 재료의 열적 특성

단위질량의 물체 온도를 1°C 증가시키기 위해 필요한 에너지인 비열(specific heat)은 콘크리트의 경우 일반적으로 상온에서 800~1,000J/kg/K 정도이지만, 고온일수록 커지는 경향이 있다. 고온 시 물의 증발, 탈수반응, 탈탄산반응 등에 기인하는 잠열의 영향이 크며 200°C 이하에서는 물의 증발 등에 따른 함수율 영향이 크다. 본 연구에서는 함수율이 3%인 콘크리트 비열이 고려되고 강재의 경우 735°C에서 최고 5,000J/kg/K가 나타난다.

열전도율(thermal conductivity)은 보통 콘크리트의 경우, 상한값(upper-limit)과 하한값(lower-limit)을 각각 제한하고 있으며, 합성구조일 때는 외부에 강재가 있음을 고려하여 열전도율이 높은 상한값이 적용된다(EUROCODE 2, 2004; EUROCODE 4, 2005).

열팽창(thermal expansion)은 강재의 경우 비교적 일정한 팽창계수를 가지지만 콘크리트의 경우 온도 증가에 따라 열팽창이 진행되고 600-800°C에서 수축이 발생하는데 이는 콘크리트 시멘트 페이스트가 고온에서 수축하는 경향이 있기 때문이다.

EUROCODE(2004; 2005)에서 제안하고 있는 온도 변화에 따른 콘크리트 및 강재의 비열, 열전도, 그리고 열팽창과 같은 열적 특성이 Fig. 3에 나타나 있다.

### 3.4 재료의 열역학적 특성

화재에 노출된 구조물의 변형 및 열응력과 열역학적 거동을 구하기 위해서는 구성 재료의 온도에 따른 응력-변형률 관계, 탄성계수, 압축 및 항복 강도 등 역학적 특성이 요구된다. 고온에서의 콘크리트 응력-변형률 곡선, 탄성계수 및 압축강도 저감은 EUROCODE 4(2005)에서 제안된 모델이 적용된다. 응력-변형률 관계는 상승부와 하강부로 나눌 수 있고 하강부는 최대응력과 최대변형률이 연결되며, 압축강도는 온도가 증가될수록 서서히 감소되어 700°C 이상일 때 상온의 10%까지 감소된다.

강재의 응력-변형률 관계는 선형적인 초기 변형과 타원 관계를 따르고 온도 증가에 따른 탄성계수 및 항복강도는 감소되며, 700°C 이상일 때 상온의 10-20% 수준까지 감소된다. 콘크리트 및 강재의 고온에 대한 열역학적 특성이 Fig. 4에 각각 나타나 있다.

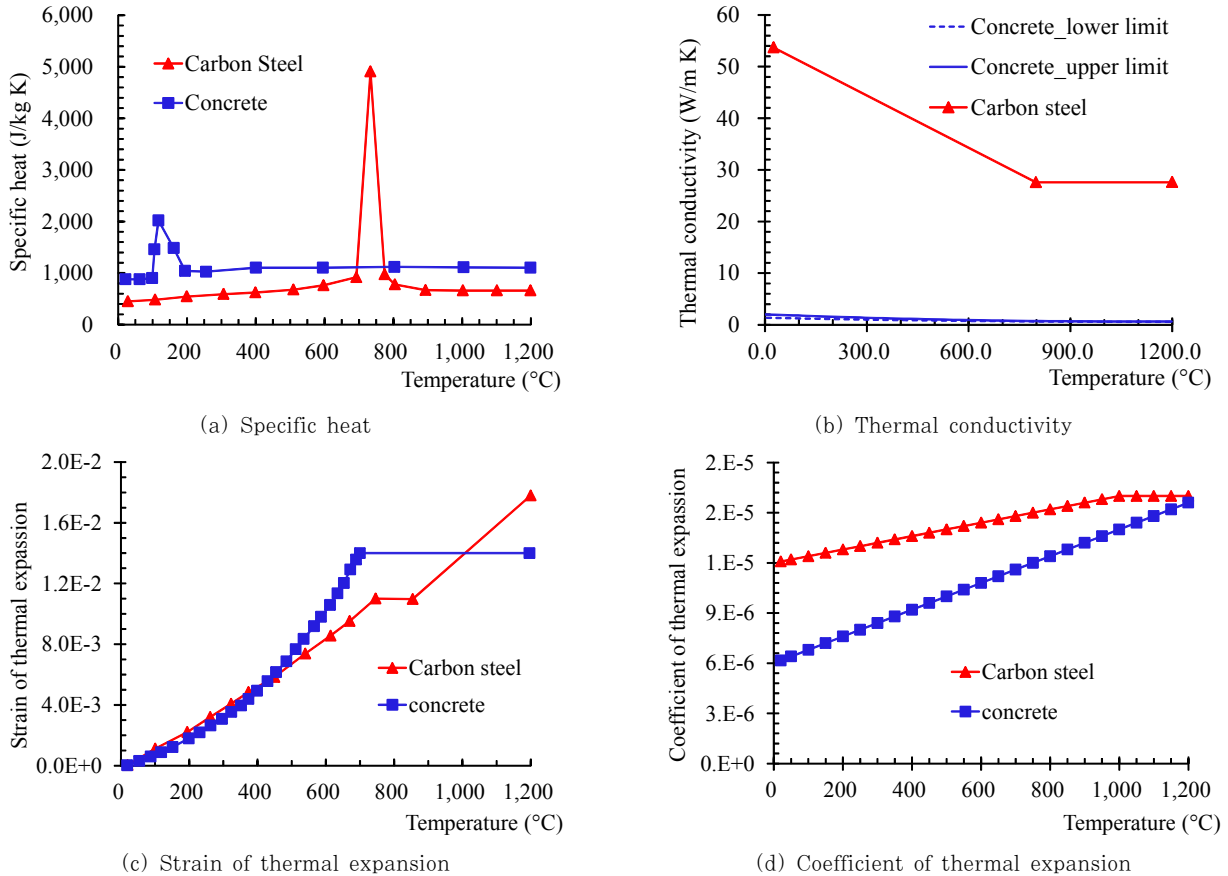
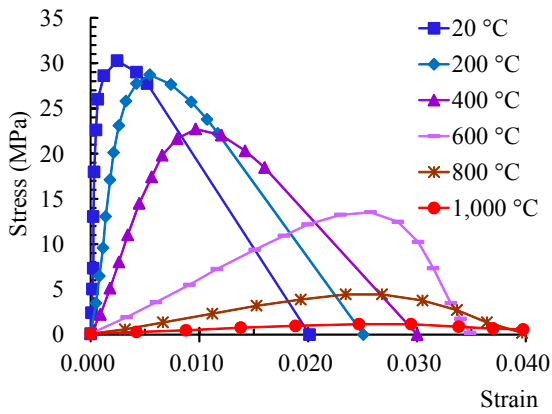
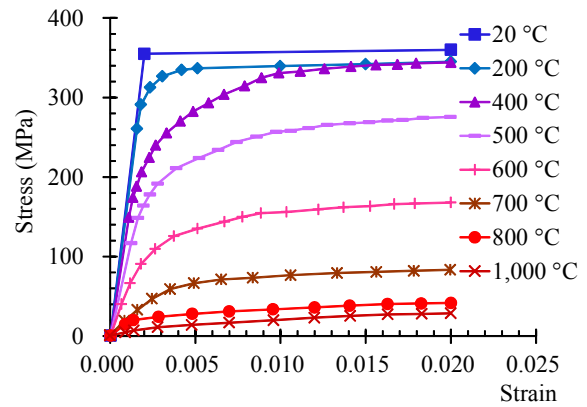


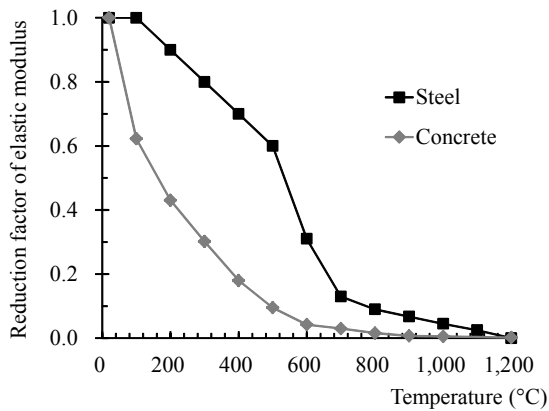
Fig. 3 Thermal properties of concrete and steel



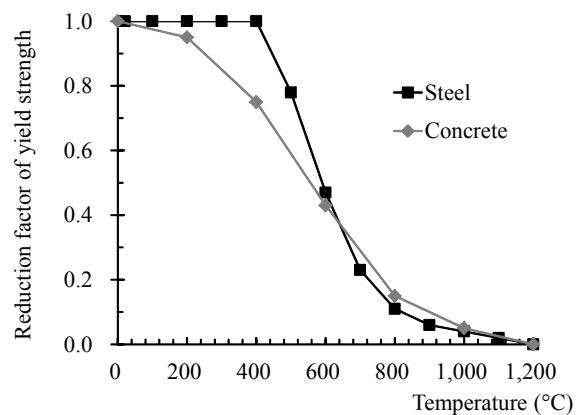
(a) Stress-strain relationship of concrete



(b) Stress-strain relationship of steel



(c) Reduction factor of elastic modulus



(d) Reduction factor of yield and compressive strength

Fig. 4 Thermal structure properties of concrete and steel

#### 4. TSI 병렬화재해석 검증

##### 4.1 강-콘크리트 합성구조 상세 재원

제안된 TSI 병렬화재해석 검증을 위해 영국에서 수행된 표준화재시험(Compendium of UK, 1989) 중 I-steel 거더와 콘크리트 슬래브 합성구조에 대한 수치해석이 수행된다. I-steel 거더의 경우 길이 4,500mm, 단면 높이 356mm, 플랜지 폭 171mm, 플랜지 두께 14.5mm, 복부 두께 9.5mm이고, 콘크리트 슬래브의 경우 길이는 동일한 4,500mm, 폭 665mm, 두께 126mm이며 합성구조의 전체 및 단면 형상은 Fig. 5에 나타나 있다.

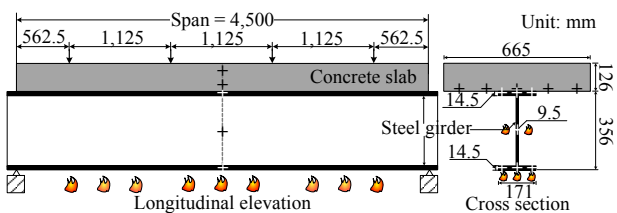


Fig. 5 Standard fire test(Compendium of UK, 1989)

##### 4.2 기하학적 모델링 및 열전달 해석 경계조건

해석을 위한 강재와 콘크리트의 요소형태는 균질성(homogeneous)과 등방성(isotropic)으로 가정하였다. 먼저 강재 거더의 경우 shell element가 적용되었고 콘크리트 슬래브의 경우 3차원 입방체의 solid element 1차 요소(8절점)가 적용되었으며, mesh size 20mm, nodes 75,618개, elements 65,257개로 구성되어 있다.

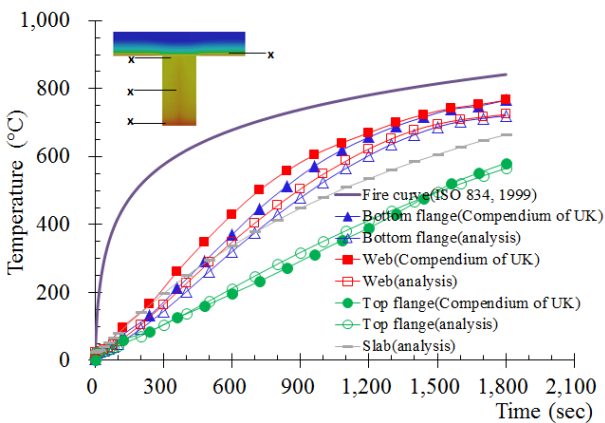
합성구조에 대한 화재하중은 영국의 표준화재시험(Compendium of UK, 1989)과 동일한 ISO 834(1999) 화재곡선이 표준시간-가열온도 곡선을 따라 초기 온도 20°C에서 총 30분 동안 가열된다. 가열면에는 시간에 따른 온도변화에 대하여 대류 및 복사가 적용되고, 부재 내부에서는 전도가 일어나며, 가열 이외의 면에서는 단열상태가 된다. 복사에 대한 부재별 방사율(emissivity)은 강재거더 하부 플랜지, 복부, 상부 플랜지 및 콘크리트 슬래브 하부별로 각각 0.7, 0.5, 그리고 0.3이 각각 적용된다(Kodur et al., 2010). 화재 열전달 모델과 대류계수 및 복사에서의 Stefan-Boltzmann 상수가 포함된 경계조건은 Table 1에 나타나 있다.

**Table 1** Boundar condition of thermal analysis

Fire curve: ISO 834 fire curve(1999)			
Convection	• Ambient temperature(°C)	22	
	• Convection coefficient(W/m <sup>2</sup> °C)	25	
Radiation	• Stefan-Boltzmann 상수(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	5.67×10 <sup>-8</sup>	
	• Emissivity	Bottom flange	0.7
		Web	0.5
		Top flange	0.3
		Slab	0.3

**4.3 열전달 해석결과**

열전달 해석과정은 열하중을 여러 구간으로 분할하여 점진적으로 적용하고 각 하중 증분에 대하여 평행조건에 만족할 때까지 반복계산을 수행하는 뉴턴-랩슨법(Newton-raphson method)을 적용하였으며 하중스텝은 총 해석 시간 1,800 sec에 따라 각 하중스텝별로 substep을 설정하여 정확한 해를 구하기 위한 반복해석이 수행된다. 과도 비선형 열전달 해석 시 가열시간동안 부재변형의 형상변화가 단면 내 온도분포에 영향을 주지 않는 것으로 가정하였다. 강재-콘크리트 합성구조의 강재거더 하부 플랜지, 복부, 상부 플랜지, 그리고 콘크리트 슬래브 온도분포에 대한 실험 및 해석결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 합성구조 열전달 해석결과 하부 플랜지의 경우 약 18분 경과 후 565°C의 온도분포가 나타났고, 이는 상부 플랜지의 382°C와 비교하여 높은 온도 분포를 나타내었다. 상부 플랜지의 온도분포가 상당히 낮은 이유는 합성구조에서 상부 콘크리트 슬래브가 단열 역할을 함으로서 전달된 열을 소산시키기 때문이다. 복부의 온도분포는 18분 일 경우 587°C로 이는 하부 플랜지와 비교하여 비교적 조금 높게 나타났으며, 하부 플랜지 및 복부는 콘크리트 슬래브 하단과 비교하여 크게 나타났다. 각 부재별 열전달 해석결과는 합성구조 표준화재시험(Compendium of UK, 1989)과 비교하여 잘 일치하였다.



**Fig. 6** Comparison of thermal analysis result

**4.4 열역학적 구조해석 역학적 특성 및 경계조건**

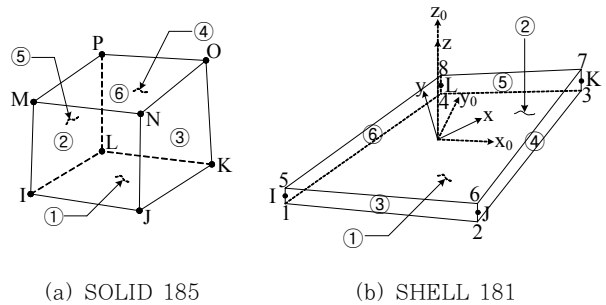
비선형 열역학적 구조해석은 앞서 제시된 시간변화에 따른 온도증가에 대한 재료의 응력-변형률 관계, 탄성계수 및 항복강도 감소와 같은 열역학적 특성이 고려되며 강재 및 콘크리트의 역학적 특성인 밀도, 항복응력 및 압축강도, 탄성계수, 그리고 프아송비가 Table 2에 나타나 있다. 열역학적 구조해석은 열전달 해석모델과 같은 요소분할이 적용되고, 요소형태는 슬래브의 경우 1차 요소인 SOLID 185, I-steel 거더의 경우 SHELL 181 요소가 각각 적용되었으며 이는 Fig. 7에 나타나 있다.

열전달 해석 결과인 단면 내 온도분포는 시간에 따라 순차적으로 입력값으로 불러들여져 열하중으로 적용된다. 경계조건은 양단 단순보로 지지되고 상부 슬래브 측면의 경우 연속경간을 고려하여 지지된다. 또한 강재와 콘크리트는 일체거동을 하는 것으로 가정하였고 콘크리트의 폭렬은 무시된다. 합성구조의 접착 알고리즘은 composite action을 위한 bonded (surface body to solid) 상태로 모델링되었고, penalty method가 적용되었다.

재하하중은 표준내화시험(Compendium of UK, 1989) 방법에 따라 먼저 하중을 재하한 후, 열하중이 가해지는 30분 동안 재하하중이 일정하게 유지되도록 하며, 해석 시 가열면 이외의 온도는 20°C로 설정하였다. 이 때 재하하중은 부재의 허용 휨응력에서 자중에 의한 휨응력을 제외한 값으로 결정하였고 4점 재하 방식으로 각 재하점 당 50.01kN, 총 200.06kN이 작용된다.

**Table 2** Mechanical properties of materials

	Steel	Concrete
Density(kg/m <sup>3</sup> )	7,800	2,240
Strength(MPa)	275	30
Elastic modulus(MPa)	205,000	27,444
Poisson's ratio	0.3	0.18



**Fig. 7** Solid and shell element geometry



### 4.5 열역학적 구조해석 결과

합성구조의 TSI 병렬화재해석 결과는 표준화재시험 결과와 비교되어 Fig. 8에 나타나 있다. 약 10분 후 높은 온도에 따라 강도 및 강성 저감에 따른 소성 변형이 시작되면서 처짐 정도가 증가된다. 이후 약 21분이 지나면서 급격히 발생하는 가열시간 20분 이후에서 600°C 이상의 높은 온도분포로 소성현상이 발생되면서 구조물은 파괴에 이르게 되면서 구조적 성능을 잃게 된다. 구조물의 파괴 이후 거동은 시험 결과와 비교하여 비교적 과소평가 되었으나, 이는 수치해석 상에서 발생가능한 차이이며, 구조적 성능이 발휘되는 초기 온도 상승 이후 21분까지 거동이 잘 일치되었다.

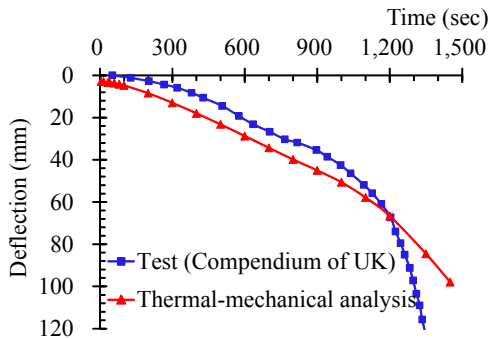


Fig. 8 Comparison of structural deflection

## 5. 부천고가교 TSI 병렬화재해석 및 손상평가

### 5.1 부천고가교 상부 합성구조 상세 재원

중동나들목 부천고가교 하부에서 발생한 화재(2010)에 대한 TSI 병렬화재해석이 수행되고 단면 내 온도 분포 및 온도에 따른 구조물의 전반적·국부적 손상이 평가된다. 부천고가교

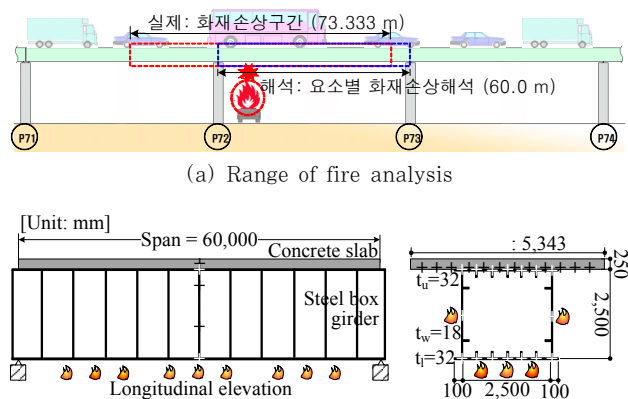


Fig. 9 Buchen highway bridge

상부 합성구조에서 강제 박스 거더의 경우 길이가 60,000 mm, 단면 높이 2,500mm, 플랜지 폭 2,500mm, 플랜지 두께 32mm, 웹 두께 18mm이고, 콘크리트 슬래브의 경우 유효 폭 5,343mm, 두께 250mm 이다. 화재발생에 대한 전경 및 해석 범위와 구조 상세가 Fig. 9에 나타나 있다.

### 5.2 기하학적 모델링 및 열전달해석 경계조건

TSI 병렬화재해석을 위한 요소 형태는 콘크리트 슬래브의 경우 solid 1차 요소(8절점), 강제 박스 거더, 수직 및 수평 보강재(stiffener), 격벽(diaphragm)의 경우 shell element가 적용되었고, 총 nodes 71,899 개, elements 57,835 개로 구성되어 있다. 합성구조의 접촉 알고리즘은 surface body to solid 접촉 및 penalty method가 적용되었다.

화재하중은 석유화학물질의 화재발생에 대하여 Hydrocarbon 화재곡선이 적용되었다(EUROCODE 2, 2004). 가열면에는 hydrocarbon 화재곡선의 시간에 따른 온도에 대하여 대류 및 복사가 적용되고, 부재 내부에서는 전도가 일어나며, 이외의 단면에서는 단열상태가 된다. 화재 열전달 모델 및 부재별 열전달 해석의 세부 경계조건은 Fig. 10과 Table 3에 각각 나타나 있다.

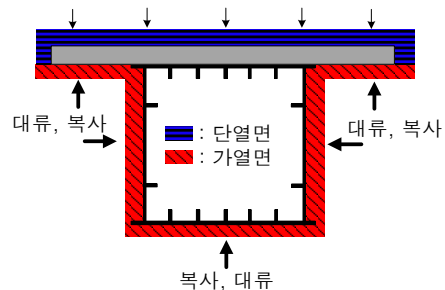


Fig. 10 Thermal transfer model of fire

Table 3 Boundary condition of thermal analysis

Fire curve: hydrocarbon fire curve			
Convection	• Ambient temperature(°C)	22	
	• Convection coefficient(W/m <sup>2</sup> °C)	Stagnant Air	
Radiation	• Stefan-Boltzmann 상수(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	5.67×10 <sup>-8</sup>	
	• Emissivity	Bottom flange	0.7
		Web	0.5
		Top flange	0.3
Slab		0.3	

### 5.3 화재 성능평가

화재에 대한 성능평가기준은 화재에 의해 발생된 온도가 규정된 임계온도(critical temperature)에 이르는 시간을 기준

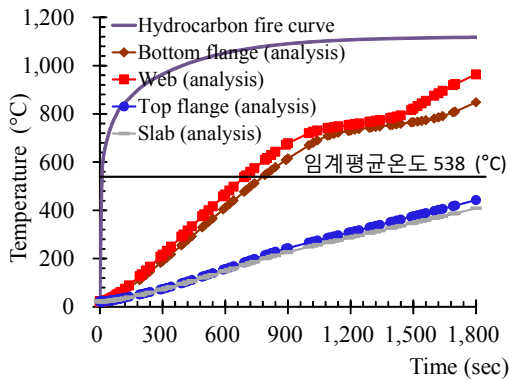
**Table 4** Critical temperature(ASTM E119, 2000)

Steel	Temperature(°C)
Structural steel	538
Reinforcing steel	593
Prestressed steel	426
Normal concrete	650

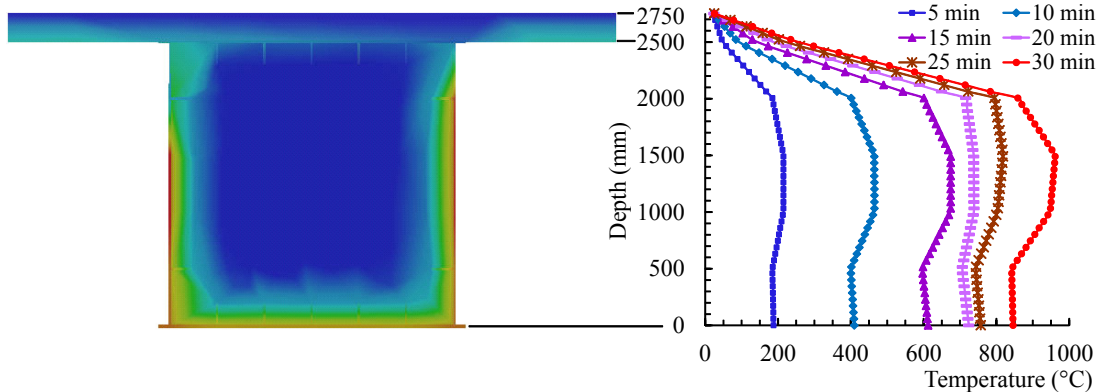
으로 내화성능을 평가한다. ASTM E119(2000)에서 제안하고 있는 강재 종류별 임계온도는 Table 4에 나타나 있다.

**5.4 열전달해석 결과**

부재별 온도분포는 30분 경과 후 강재 하부 플랜지, 복부, 상부 플랜지, 그리고 콘크리트 슬래브별로 각각 최대 848°C, 963°C, 442°C, 408°C의 온도분포가 나타났다. ASTM E119(2000)에서 제안하는 임계온도와 비교하여 하부 플랜지 및 복부의 경우 각각 약 13분 경과 후 546°C, 약 12분 경과 후 545°C로 임계온도를 초과하였다. 상부 플랜지 및 콘크리트 슬래브는 임계온도에 비해 비교적 낮은 온도분포를 나타내는데 이는 합성구조에서 상부 콘크리트 슬래브가 단열 역할을 함으로서 전달된 열을 소산시키기 때문이다. 총 가열시간 30분 이후 합성구조의 온도분포는 Fig. 11에 나타나 있고, 시간 별 단



**Fig. 11** Result of thermal analysis



**Fig. 12** Thermal gradients across the girder-slab cross section

면 내 온도경사(thermal gradient)는 Fig. 12에 각각 나타나 있다.

합성구조 단면에서의 온도경사는 원호와 같은 형태를 나타내고 복부에서 가장 높은 온도분포를 나타낸다. 이는 복부의 강재 두께가 하부 플랜지와 비교하여 얇기 때문이며, 콘크리트와 접촉되는 상부 플랜지에서 점점 감소되어 콘크리트 슬래브 상부에서는 상온의 온도가 나타났다. 따라서 화재에 노출된 구조물의 거동은 외부 하중보다 적용된 화재 시나리오의 초기 온도경사에 영향을 많이 받게 되는 것을 알 수 있다.

**5.5 열역학적 구조해석 역학적 특성 및 경계조건**

TSI 병렬화재해석 검증에서와 같이 온도 증가에 대한 응력-변형률 관계, 탄성계수와 항복강도 감소에 대한 열역학적 특성이 고려되고, 적용된 강재 및 콘크리트의 역학적 특성은 Table 5에 나타나 있다.

외부하중으로는 시간에 따라 입력된 단면 내 온도분포는 열하중과 자중이 작용되었고, 연속성을 고려하여 슬래브 중·횡방향으로 대칭조건(symmetry)이 고려되었다.

**Table 5** Mechanical properties of materials

	Steel	Concrete
Density(kg/m <sup>3</sup> )	7,800	2,300
Strength(MPa)	350	30
Elastic modulus(MPa)	210,000	28,554
Poisson's ratio	0.3	0.18

**5.6 열역학적 구조해석 결과**

부천고가교 상부 합성구조의 전체 처짐과 강재박스 거더의 변형 형상이 Fig. 13에 나타나 있다. 열하중이 지속적으로 전달되면서 15분 일 때 최대 처짐 245mm가 발생되었고, 30분 경과 후 강재박스 거더의 하부 플랜지와 복부에서는 다



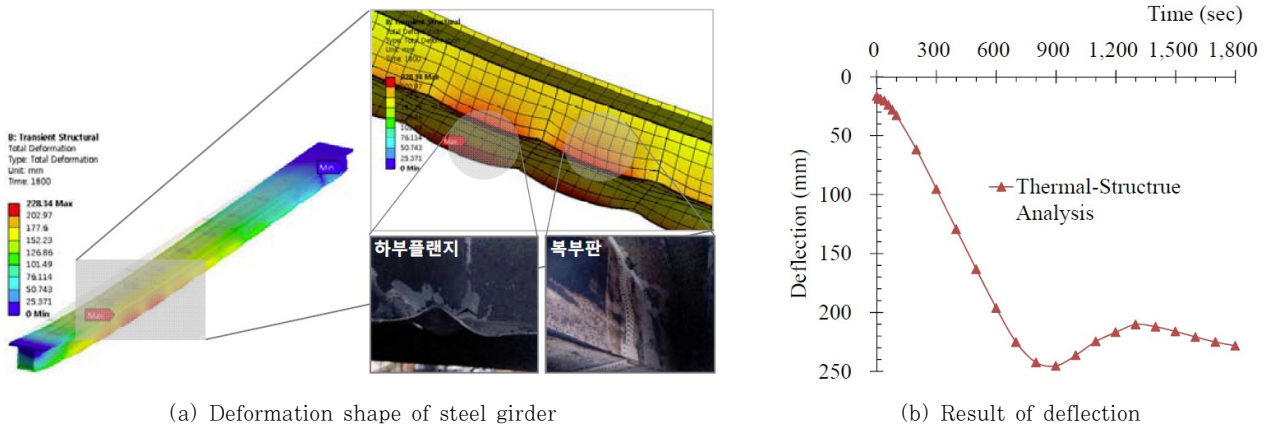


Fig. 13 Deflection and deformation shape of Buchen highway bridge

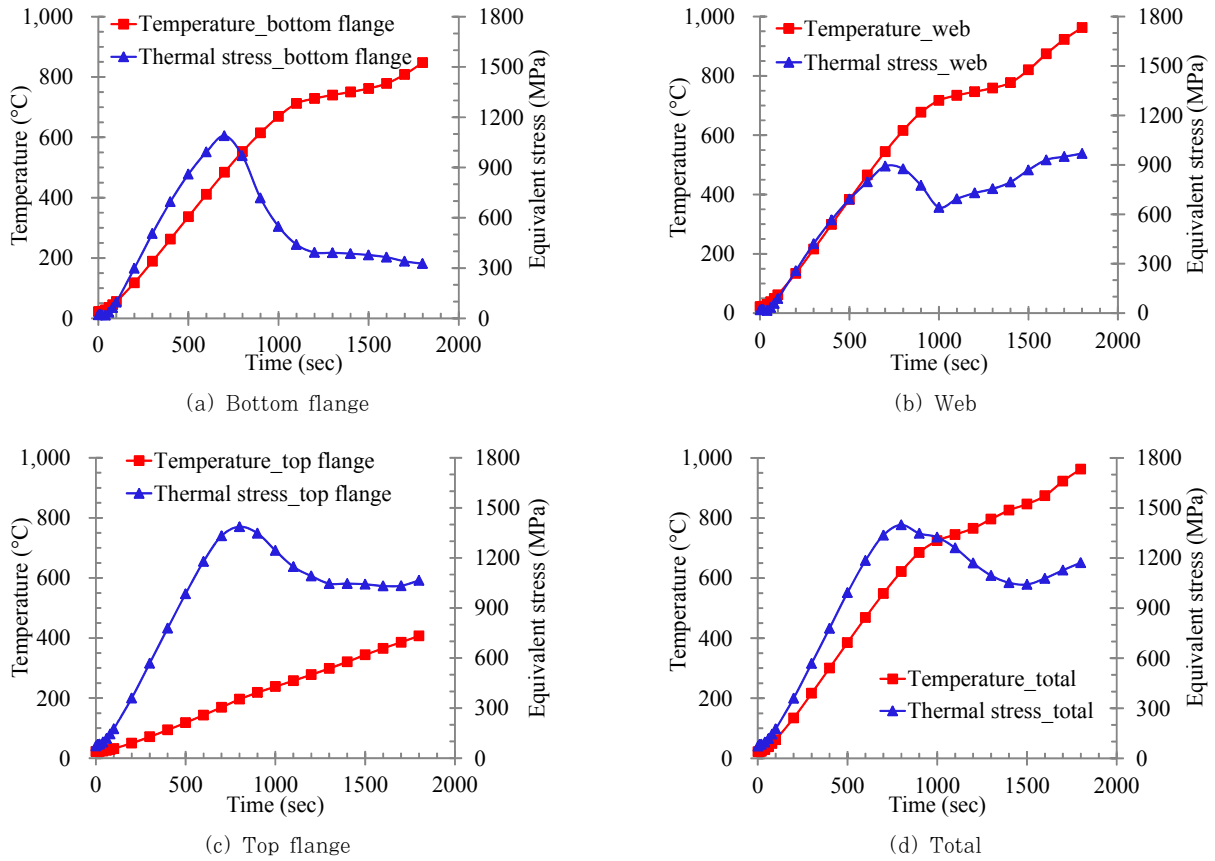


Fig. 14 Thermal stress according to temperature for steel girder

이어프램 사이에서 좌굴 변형이 발생되었으며 이 때 변형 형상이 실제 화재 발생 이후 변형 형상(한국도로공사, 2010)과 잘 일치하였다.

합성구조에서 강재거더의 부재별 시간에 따른 온도 상승에 대한 열응력 변화가 Fig. 14에 나타나 있다. 열응력은 열팽창에 의한 수직·수평방향 변위가 크게 발생하는 경우 이에 상응하는 응력도 크게 발생된다. 초기 가열 이후 약 11분 경과 후 하부 플랜지 및 복부에서 각각 1,089MPa과 891MPa의 높은

열응력이 발생되었는데, 이는 400℃ 이상 상승된 하부 플랜지와 복부에서 상부 플랜지로 빠르게 열팽창이 발생되기 때문이다. 이후 온도가 상승함에 따라 플랜지와 복부의 열응력은 저하되기 시작한다. 상부 플랜지의 열응력은 가열 후 13분 경과 후 최대 1,386MPa의 열응력이 발생되는데, 이는 하부 플랜지와 복부의 최대 열팽창 이후 가열면의 내려저하가 발생되고 이로 인해 중립축이 내력 손실이 적은 상부 플랜지로 이동하기 때문에 발생된다.

6. 결 론

교량하부에서 발생한 화재에 대한 상부 합성구조물의 화재 손상평가를 위해 열-구조 연성 병렬화재해석 기법이 제안되었다. 특히 강재 보와 콘크리트 슬래브의 합성구조에 대한 상호 이질적 재료의 과도 비선형 열적·역학적 재료특성을 고려하였고 제안된 해석기법의 검증에 위해 영국에서 수행된 합성구조의 표준화재시험과 비교하여 잘 일치함을 보였다.

실제 부천고가교에서 발생한 화재사고에 대해 과도 비선형 열-구조 연성 병렬화재해석이 수행되었고, 먼저 열전달 해석 결과 강재 거더의 하부플랜지와 복부의 경우 최대 848℃와 963℃로 임계온도를 초과하였고 최초 초과시간은 약 12분 이후로 나타났다. 상부 플랜지와 콘크리트 슬래브의 경우는 슬래브의 단열 효과로 인해 임계온도보다 낮은 온도분포가 나타났다. 열전달 해석 이후 상부 합성구조의 열역학적 구조 해석 결과, 전반적 처짐은 최대 245mm가 발생되었고 하부 플랜지와 복부의 변형 형상이 실제 화재발생 이후 형상과 잘 일치하였다. 열팽창에 의한 열응력은 초기 가열 약 11분 경과되면서 하부 플랜지와 복부에서 높게 발생되었고 이후 가열면 내하력 저하로 중립축이 상부로 이동하면서 상부 플랜지의 열응력이 증가되었다. 향후 화재 발생 위치에 따른 정확한 화재손상평가를 위해서는 화재에 따른 온도가 대기 중으로 전파되는 유체-구조 연성해석을 수행해야하며 본 연구의 후속 연구로 진행 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원의 연구지원(제 201211831021029호)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

ANSYS (2007) *ANSYS Release 11.0 Documentation*, ANSYS Inc., USA.

ASTM E119-82 (2000) *Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials*, American Society for Testing and Materials.

Choi, J.H. (2008) *Concurrent Fire Dynamics Models And Thermomechanical Analysis Of Steel And Concrete Structures*, Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology.

Compendium of UK (1989) *Standard Fire Test Data for Unprotected Steel-2*, Published by British Steel Technical and Swinden Laboratories.

EUROCODE 2 (2004) *Design of Concrete Structures, Part 1, 2: General rules, Structural fire design*, European Committee for Standardization.

EUROCODE 4 (2005) *Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1, 2: General rules, Structural fire design*, European Committee for Standardization.

ISO 834-1 (1999) *Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction and Materials*.

Kodur, V., Gu, L., Garlock, M.E.M. (2010) Review and Assessment of Fire Hazard in Bridges, *Journal of the Transportation Research Board*, 2172(1), pp.2~29.

Korea Expressway Corporation (2011) *Design and Construction for the Fire Restoration of Bucheon Highway Bridge*, Korea Expressway Corporation.

Park, J.W., Yun, S.H., Park, T. (2011) Analysis of Reinforced Concrete Panel subjected to Blast Load using Parallel and Domain Decomposition, *Journal of the Computational Structural Engineering*, 24(4), pp.365~373.

Paul A. Croce, Krishna S. Mudan (1986) Calculating impacts for large open hydrocarbon fires, *Fire Safety Journal*, 11(1-2), pp.99~112.

요 지

본 논문은 교량 하부에서 발생한 화재에 대한 강-콘크리트 합성구조의 전반적·국부적 손상평가를 위한 수치해석적 연구이다. 수치해석의 정확성 및 효율성을 높이기 위해 구성재료의 과도 비선형 열적·역학적 특성이 고려된 열-구조 연성병렬 화재해석 기법이 제안되고, ANSYS solver와 연결되어 해석이 수행되며, 표준화재시험과 비교·검증된다. 검증된 해석기법을 통해 국내에서 발생한 부천고가교 합성구조에 대한 화재손상해석이 수행된다. 해석결과 강박스 거더의 하부 플랜지 및 복부의 경우 임계온도를 초과하였고 구조적 처짐과 변형 형상이 화재사고 결과와 비교적 잘 일치하였다.

핵심용어 : 강-콘크리트 합성구조, 부천고가교, 열-구조 연성, 병렬화재해석, 화재손상평가