

화재에 의한 지하공동구의 온도 및 응력해석

김현준 · 임초롱 · 유현경 · 정철현[†]

단국대학교 토목환경공학과

(2011. 4. 19. 접수 / 2011. 10. 31. 채택)

Temperature and Stress Analysis of Box Culvert in Fire

Hyun-Jun Kim · Cho-Rong Im · Hyeon-Kyeong Yoo · Chul-Hun Chung[†]

Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

(Received April 19, 2011 / Accepted October 31, 2011)

Abstract : This paper has presented a finite element analysis of structural behaviour of box culvert during and after fires. The fire tests were carried out in a furnace on RC slabs using the ISO 834 standard fire curve. The load capacity after cooling of the RC slab that was not loaded during the fire tests was evaluated by means of additional 3 points bending tests. In the past, stress-strain models of concrete under fire loading have been proposed by several researchers. Comparisons are made with the load-displacement relations of RC slabs after fire loading using the existing stress-strain models with temperature, such as Schneider, EUROCODE 2, Lie, Shi and Nan model. By comparing the load-displacement relations, Lie model was found to result in a maximum load about 2.0% higher than that of test. Based on the fire test results of RC slabs, this paper presents an extensive analytical study on the fire response of box culvert during and after fires.

Key Words : box culvert, ISO 834 standard fire curve, stress-strain model, during and after fire

1. 서론

최근들어 지하공간에 대한 관심이 높아지면서 많은 사회 기반시설들이 지하공간에 구축되는 사례가 증가되고 있다. 지하공간에 설치되는 구조물 중에서 전력선 등이 배치되는 암거구조물은 중요한 사회 기반시설로서 화재 발생시 신속한 대처가 어렵고, 재산손실과 시민불편을 초래하는 사회적 문제를 야기시킨다. 국내에서 화재로 인해 지하공동구가 완전히 붕괴된 사례는 발생하지 않았으나, 동대문 통신구 화재(1994년), 여의도 공동구 화재(2000년), 구리시 전력구 화재(2006년) 등 화재에 의한 피해 정도와 그 규모가 늘어나고 있는 추세이다. 지하 전력구에서 발생하는 화재의 주요 원인은 전기합선, 절연과피 등의 합선과 관련이 있으나, 국내에서 전력선이 배치되는 지하공동구에 대한 화재곡선이 정의되어 있지 않다. 이계희 등¹⁾은 RWS와 RABT 화재곡선을 가정하여 화재 박리를 고려한 전력구의 내하력 산정 연구를 수행하였다. 그러나

RWS와 RABT 화재곡선은 터널내 유조차에 의한 화재를 대상으로 제시된 것으로 전력선이 배치되는 지하공동구의 화재곡선으로는 과다한 측면이 있는 것으로 판단된다. 심중성 등²⁾은 화재로 손상된 지하 박스구조물의 열해석을 수행하여 화재 영향을 평가하였으나, 이 해석은 탄성해석이 적용되어 화재로 인한 발생온도에 따른 재료의 역학특성이 반영되지 않았고, 박스구조물의 하중조건은 무시하고 단지 화재로 인한 온도하중만이 고려되어 화재시 공동구의 실제 구조거동을 평가하기에는 무리가 있다. 방명석은³⁾ 지하철정거장 화재시 강구조물의 내화안전성을 평가하였으며, 정철현 등⁴⁾은 화재시 온도증가로 인한 RC 슬래브의 강도특성을 평가하였다.

화재로 인한 온도해석에서는 온도해석과 응력해석이 연속적으로 이루어지는데, 온도해석에서 얻어진 단면내 발생온도를 적용하여 응력해석이 수행되어야 한다. 콘크리트는 화재로 인해 각 단면내에서 발생하는 온도에 따라 강성 및 강도감소가 발생되는데, 이로 인해 응력-변형률 곡선이 큰 영향을 받는다. 화재 중에 발생한 콘크리트의 강성 및 강도감소는 콘크리트가 상온상태로 냉각된 이후에도

[†] To whom correspondence should be addressed.
chchung5@dankook.ac.kr

강도회복이 일어나지 않고, 손상상태를 지속하게 된다. 강재의 경우 가열 중에는 발생온도에 따라 강성 및 강도감소가 크게 발생되다가 화재 후에 강재가 상온상태로 냉각된 이후에는 대부분의 강도를 회복하는 것으로 여러 연구결과에서 확인되었다^{5,6)}. 따라서 화재 중 해석에서는 화재로 인한 단면내 발생온도가 콘크리트와 강재와 강재의 역학적 특성에 미치는 영향을 고려하여야 하며, 화재 후 해석에서는 발생온도가 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향을 고려하여야 한다.

본 연구에서는 ISO 834 화재곡선을 적용하여 지하공동구 벽체부를 모사한 실험체에 대한 화재실험 및 화재해석을 수행하였다. 화재 가열실험 및 화재 후 구조실험이 수행된 RC 슬래브에 대한 예비해석을 통해서 콘크리트와 강재의 발생온도에 따른 응력-변형을 특성을 평가한 후, 해석 및 실험결과가 가장 잘 맞는 것으로 판단되는 재료모델 적용하여 지하공동구에 대한 화재 온도해석 및 응력해석을 수행하였다. 온도해석 및 응력 해석시 하중조건은 지하공동구 박스구조물 설계시 적용되는 사용하중 상태와 극한하중 상태를 적용하여 각각에 대해서 해석을 수행하였다. 해석결과로부터 지하공동구의 화재 전, 화재 중 및 화재 후 각 단계에서 구조거동을 비교분석하였다.

2. 화재 가열실험 및 화재 후 구조실험

2.1. ISO 834 화재곡선에 의한 가열실험

가열실험 및 화재 후 구조실험에 적용된 RC 슬래브 실험체는 벽체부를 모사한 경우로서 Fig. 1과 같다. 실험체의 두께 및 단면내 철근배근은 실제 공동구 박스 구조물 벽체부의 설계단면을 동일하게 적용하였다. Fig. 1의 (b)에 나타난 가열 실험시 단면내 발생온도의 측정지점은 표면에서부터 20, 50(주철근 위치), 100, 150(압축철근 위치), 180 mm 5개소로서 이들 지점에 열전대(K-type)를 매설하였다. 실험체의 제작과정과 가열 실험시 온도측정 데이터의 손실을 감안하여 Fig. 1의 (a)에서와 같이 2개소에 열전대를 설치하였다.

실험체 제작에 사용된 콘크리트의 설계강도는 35 MPa이고, ϕ 인 실린더 표준공시체의 28일 강도는 평균 30 MPa로 대기양생으로 인해 낮게 평가되었다. 콘크리트 양생시 현장여건상 증기 양생실에서 양생하지 못하고 대기 중에 천막을 덮어 증기양생을 실시하였다.

ISO 834 곡선은 주로 건축구조를 대상으로 규정되었지만, 구조물의 내화 설계시 온도조건으로 광범위하게 적용되고 있다^{7,8)}. 현재 국내외에서 전력선이 배치되는 공동구의 화재곡선이 규정되어 있지 않

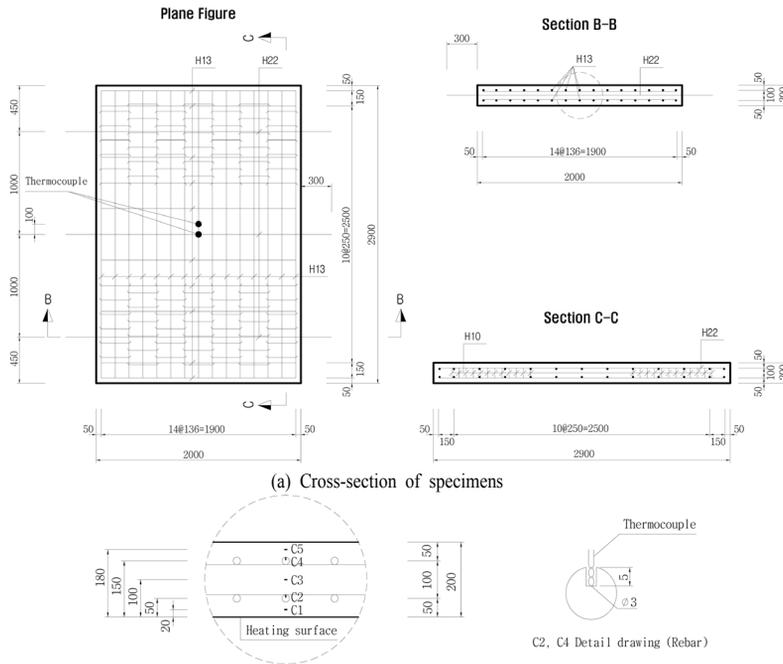


Fig. 1. Cross-section and position of thermocouples to measure temperature.

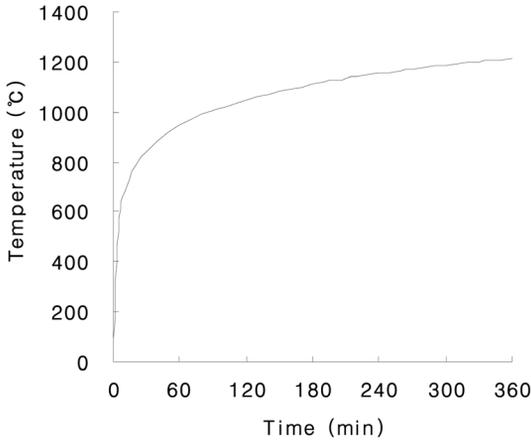


Fig. 2. ISO 834 fire curve.

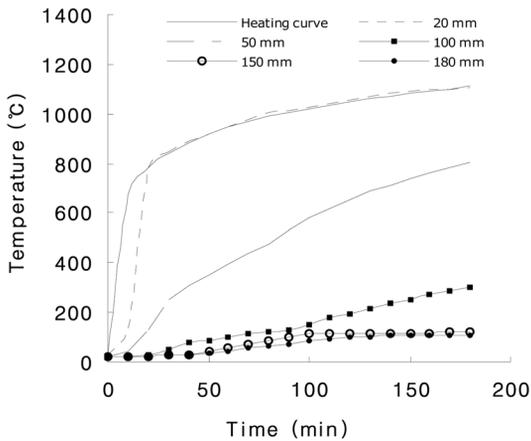


Fig. 3. Temperature distribution.

아 Fig. 2와 같은 ISO 834 화재곡선 적용하여 화재 가열실험을 수행하였다.

Fig. 3은 가열실험에서 측정된 실험체 단면내 발생온도의 시간이력이다. 온도하중을 받는 표면에서 20 mm 깊이의 콘크리트 온도는 가열곡선 온도와 거의 유사한 수준을 보이는데 이는 내화실험 도중에 폭발이 발생하여 이 부분 콘크리트가 탈락되었기 때문이며, 단면내 깊이가 증가할수록 발생온도가 현저하게 감소하다가 150 mm 이상 깊이부터는 수렴하는 경향을 보였다.

2.2. 화재 후 구조실험

가열실험이 수행된 실험체를 상온으로 냉각시킨 후에 구조실험을 수행하였다. 휨 파괴를 유도하기 위하여 RC 슬래브의 양단을 지간이 2,500 mm인 단순지지 조건으로 하여 구조실험을 수행하여 화재 손



Fig. 4. Test setup.

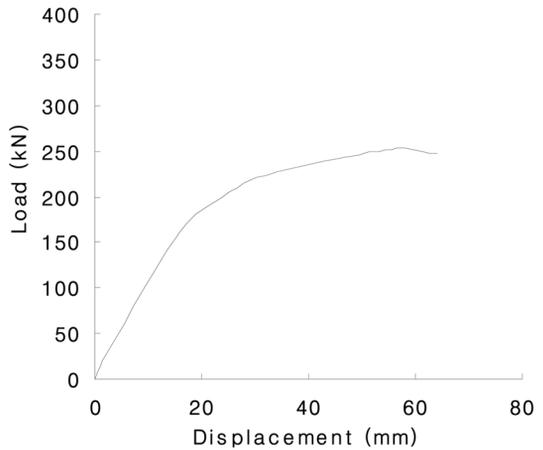


Fig. 5. Load-Displacement relationship.

상 후의 내력을 평가하였다. 구조실험은 1,000 kN 용량의 가력기를 이용하여 변위제어 방법(1 mm/180 sec)으로 하중을 가하여 중앙부에서의 처짐을 측정하였으며, 구조실험의 전경은 Fig. 4와 같다.

구조실험을 통해서 측정된 중앙부에서의 하중-처짐 곡선은 Fig. 5로서 실험체의 최대내력은 253.8 kN으로 평가되었다.

3. 지하공동구의 화재 온도해석 및 응력해석

3.1. 재료의 열적특성

철근콘크리트 구조물의 단면내에서 온도에 영향을 받는 열적특성에는 열전도도(thermal conductivity), 비열(specific heat) 및 열팽창계수 등이 있다. 본 연구에서 수행된 온도해석시 적용된 콘크리트와 강재의 열적특성은 Fig. 6~7과 같다. 이외에 화재에 의한 온도 해석시 요구되는 특성들은 기존 연구결과

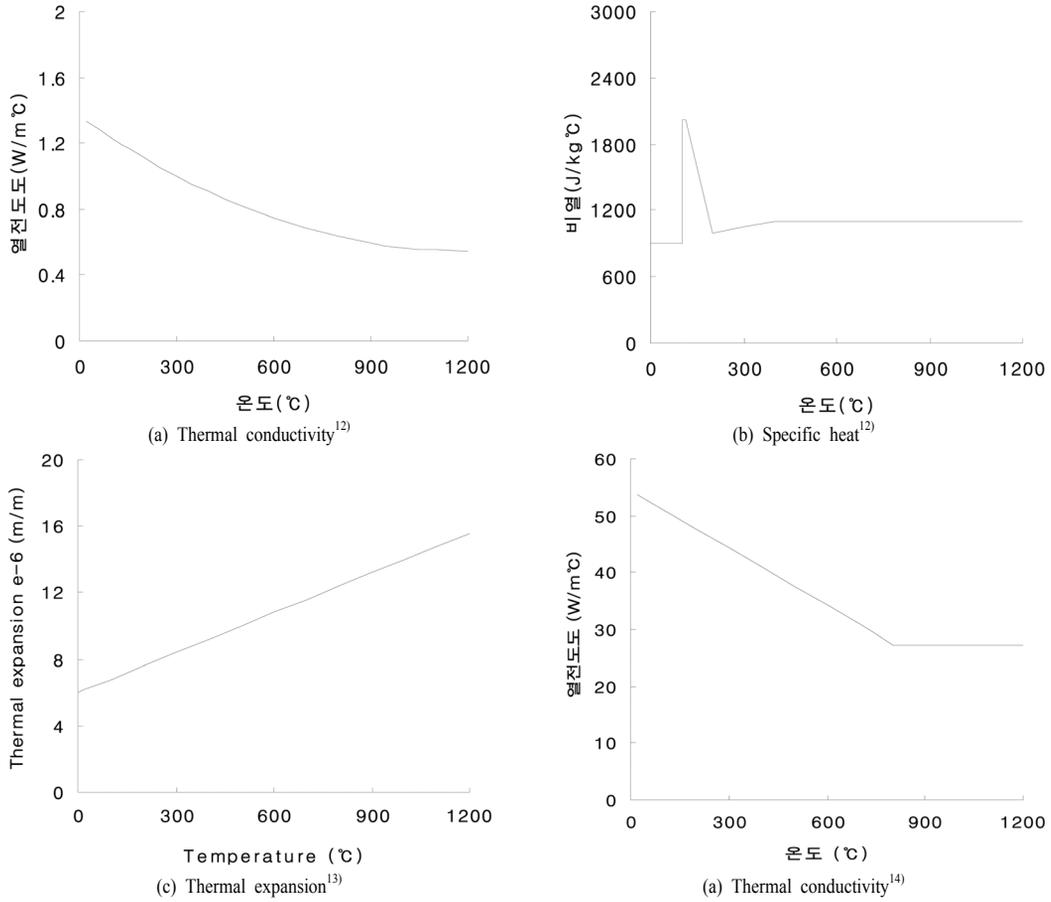


Fig. 6. Thermal properties of concrete.

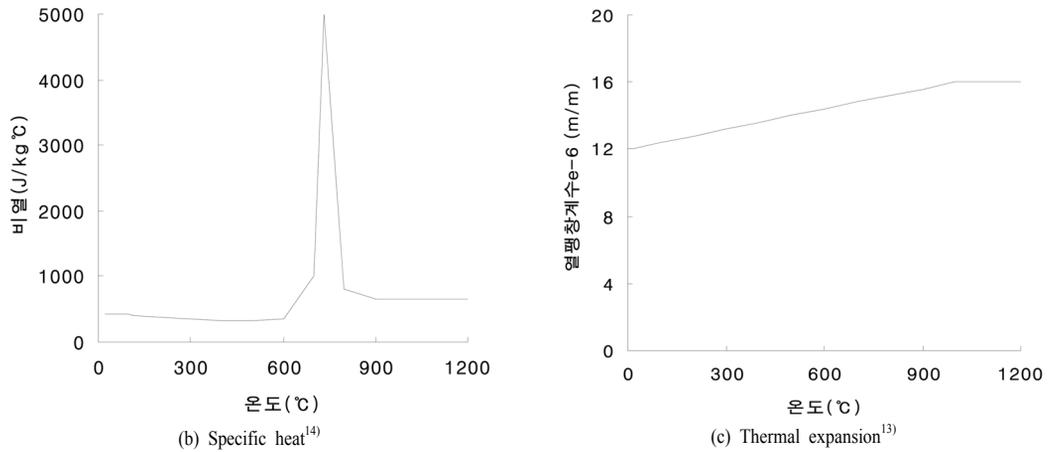


Fig. 7. Thermal properties of steel.

를 참고하여 고온에서의 대류계수(가열면)⁹⁾는 $400 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, 비 가열면 대류계수¹⁰⁾는 $10.0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, 방사율¹¹⁾은 0.6423을 적용하였다.

3.2. 재료모델

3.2.1. 콘크리트

콘크리트의 응력-변형률 특성은 온도하중에 크게

영향을 받는데, 화재 후에 상온으로 냉각된 이후에도 발생온도로 인해 손상을 입은 콘크리트의 강도 특성은 회복되지 않는 특성이 있다. 따라서 화재 중 및 화재 후 구조거동을 평가하기 위해서는 단면 깊이별 발생온도의 영향을 고려한 응력-변형률 특성이 반영되어야 한다. 온도 영향을 고려한 응력-변형률 곡선은 기존 연구자에 의해서 많은 모델이 제안되었다. 각 연구자가 제시한 모델별로 차이를 보이는데, 화재실험이 수행된 Fig. 1과 같은 RC 슬래브 실험체에 대한 예비해석을 통해서 이들을 평가하였다.

화재 가열실험에서 측정된 단면깊이별 발생온도를 Schneider¹⁵⁾, EUROCODE 2¹²⁾, Lie¹⁶⁾ 및 Shi¹⁷⁾의 제안식에 적용하여 응력-변형률 곡선을 산정하면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 보면, Schneider¹⁵⁾의 제안식은 가열면에서 150 mm 깊이까지 재료성능이 감

소되는 결과를 보이며, EUROCODE 2¹²⁾는 100 mm 깊이까지 재료성능이 감소되는 경향을 보였다. Lie¹⁶⁾의 제안식은 100 mm 깊이에서 다소 강성이 감소하지만, Shi¹⁷⁾의 제안식은 50 mm 깊이까지 재료성능이 감소하는 결과를 보였다. 전반적으로 가열면으로부터의 단면깊이가 50 mm까지는 강도가 매우 낮고, 100 mm 깊이 이상부터는 최대강도에서는 약간의 차이는 보이나, 최대강도시 변형률은 제안식별로 큰 차이를 보였다.

각 연구자의 제안식에 적용하여 산정된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 이용하여 가열실험 후 상온으로 냉각된 RC 슬래브 실험체에 대한 비선형 해석을 수행하였다. 해석은 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.8에 의해서 수행되었다. 재료비선형 해석시 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 가열실험시 각 단면내에서 측정된 온도를 적용하

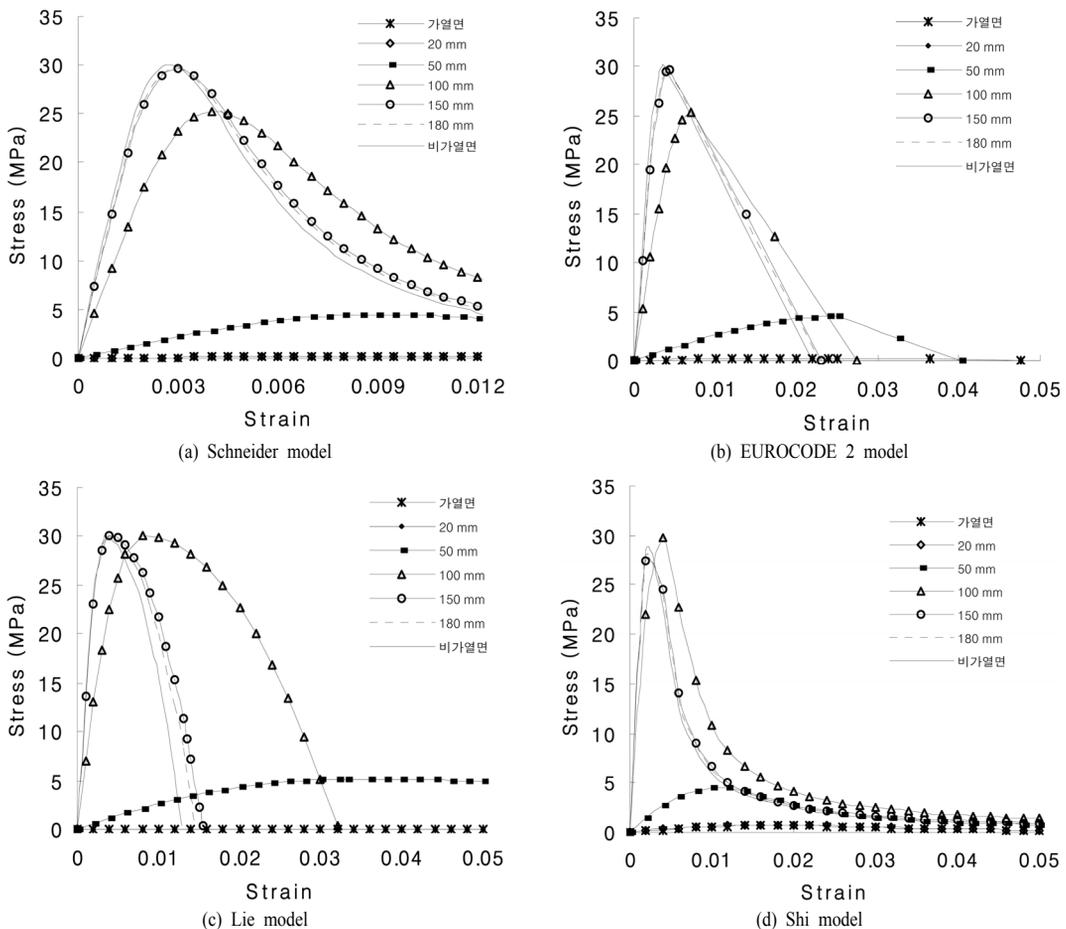


Fig. 8. Stress-strain curves for concrete at various temperature.

여 결정하였는데, Fig. 9와 같은 구간으로 분류하여 각 구간에서의 발생온도를 적용하여 응력-변형률 곡선을 산정하였다. 강재의 경우에는 고온상태에서는 항복강도의 손실이 크게 발생하지만, 상온상태로 돌아오면 콘크리트와는 달리 강재의 항복강도는 대부분을 회복된다^{5,6)}. 따라서 비선형 해석시 화재 중 단계에서는 강재의 강도 감소를 고려하고, 화재 후 단계에서는 강도 감소를 고려하지 않는 완전탄소성 거동을 보이는 응력-변형률 곡선¹⁸⁾을 적용하였다.

각 연구자가 제안한 콘크리트의 응력-변형률 모델을 적용하여 화재 후 실험체에 대한 해석과 실험에서 산정된 하중-처짐 곡선을 Fig. 10에 비교하였다. Lie¹⁶⁾가 제안한 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 적용한 경우는 실험 및 해석결과가 거의 유사한 수준을 보였다. EUROCODE 2¹²⁾에 규정된 모델을 적

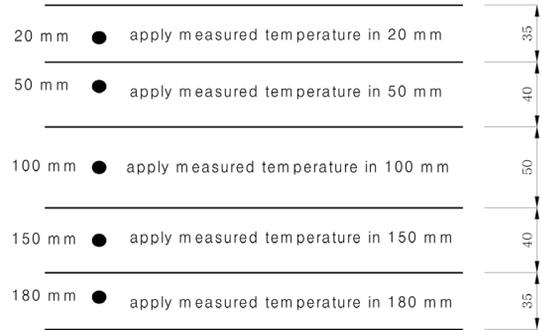


Fig. 9. Division of cross section.

용한 경우는 전반부 강성에서 차이를 보이지만, 최대내력에서는 약 5.8% 정도의 차이를 보였다. Schneider¹⁵⁾의 모델은 실험결과를 잘 예측하는 결과를 보였고, Shi¹⁷⁾의 모델은 실험결과에 비해서 단면내력을 약 81% 수준으로 낮게 평가되는 결과를 보였

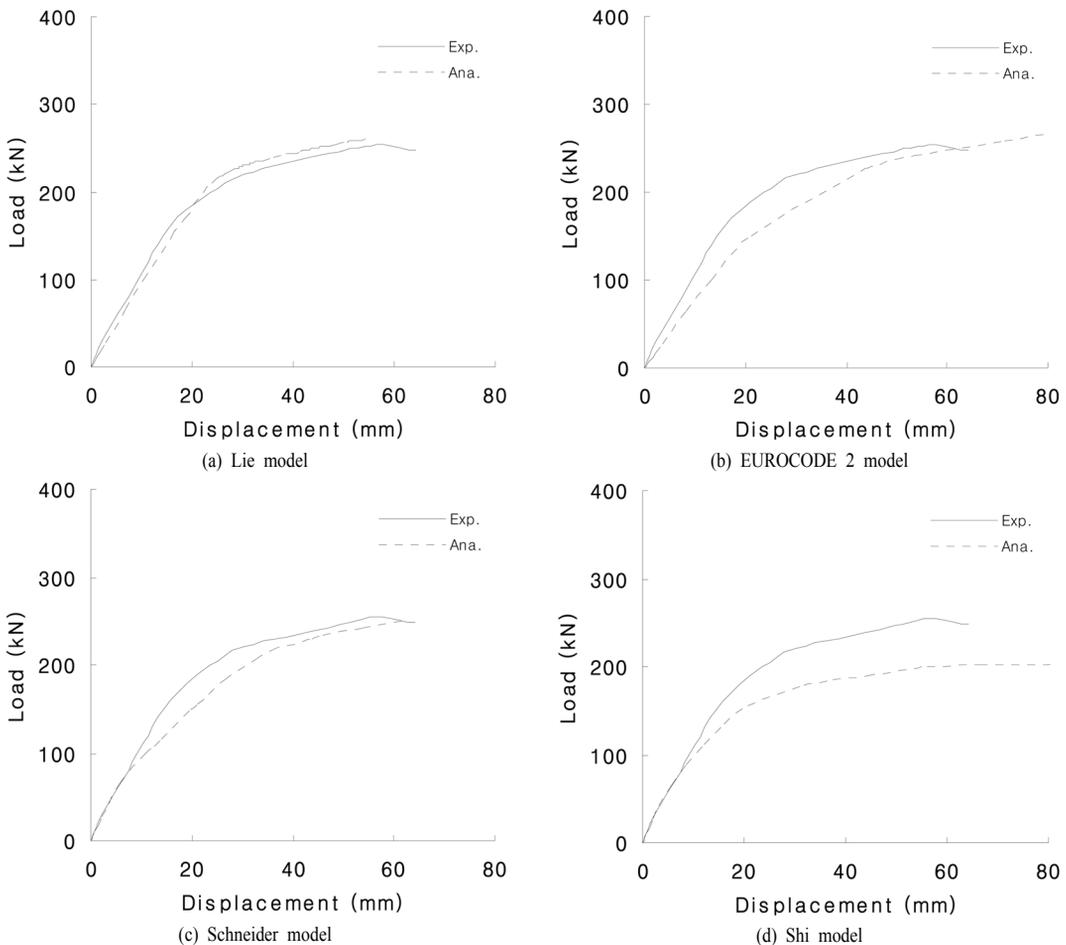


Fig. 10. Comparison of load-displacement curves of post-fire-test.

다. 이상의 결과를 토대로 지하공동구의 화재 온도 해석 및 응력해석시 콘크리트의 재료모델은 Lic¹⁶⁾가 제안한 응력-변형률 곡선을 적용하였다.

3.2.2. 강재

고온상태에서 강재의 응력-변형률 곡선은 여러 연구자가 제안하였는데, 발생온도 증가에 따라 항복강도가 크게 감소하는 경향을 보인다.

본 연구에서는 화재 가열실험이 수행된 이후에 상온으로 냉각된 실험체에 배근된 철근을 채취하여 인장실험을 통해서 항복강도와 인장강도를 측정하였다. 인장시편은 온도 영향을 받지 않은 시편 3개와 온도 영향을 받은 시편 2개 등 총 5개를 시편을 채취하였다. 철근의 인장실험에서 측정된 항복응력 및 인장강도를 Table 1에 정리하였다. 온도 영향 유·무에 상관없이 유사한 강도 수준을 보였다. 따라서 철근은 화재로 인한 온도하중을 받는 도중에는 강도 및 강성의 감소가 뚜렷하게 발생되지만, 상온으로 냉각된 이후에는 대부분의 강도 및 강성을 회복되기 때문에 지하공동구의 화재 후 해석에서는 위와 같은 철근의 응력-변형률 특성이 반영되어야 한다.

3.3. 지하공동구의 해석조건

해석대상 구조물은 지하공동구에 적용되는 표준 단면을 대상으로 하였다. 설계에 적용된 박스구조물의 토피는 표준적으로 적용되는 5 m이며, 콘크리트의 설계기준강도는 35 MPa, 철근의 항복강도는 400 MPa이다. 하중산정에 적용되는 각 재료의 단위중량은 Table 2와 같고, 설계시 적용되는 극한 하중상태에서의 하중 및 하중증가계수는 Table 3과 같다¹⁹⁾.

Table 1. Strength for steel of pre- and post-fire-test

	Yield load (kN)	Max. load (kN)	Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)
pre-fire	67.82	80.18	535.28	632.83
	68.42	82.10	540.02	647.99
	70.14	84.32	553.59	665.51
post-fire	67.90	81.92	535.91	646.57
	63.20	77.60	498.82	612.47

Table 2. Unit weight(kg/m³)

재료	철근 콘크리트	표층	기층	보조기층	동상방지	토사	지하수
단위중량	2,500	2,300	2,000	2,000	2,000	1,900	1,000

Table 3. Load factor(KCI Code¹⁴⁾)

하중계수	고정하중	연직도압	횡도압	횡수압	양압력	활하중	
						연직	수평
하중계수	1.20	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6

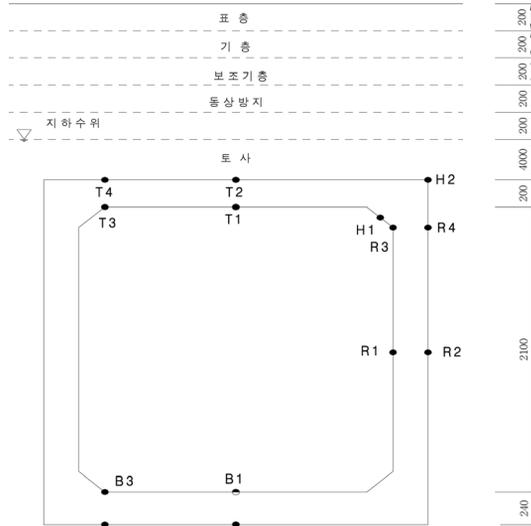
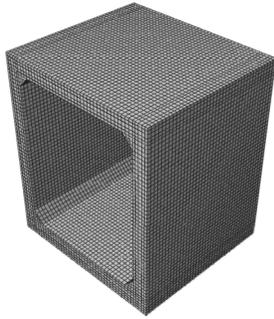


Fig. 11. Design condition of box culvert.

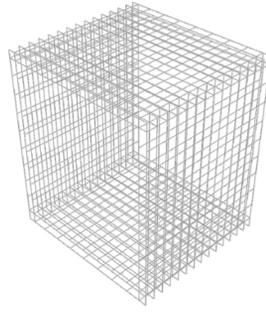
설계 시 표준단면에 적용되는 시공조건은 Fig 11과 같고, 이 조건에 따라 최대하중효과를 발생시키는 사용하중 및 극한하중 상태에서의 하중조합을 고려하였다. 본 해석에서는 화재 전 단계는 응력해석, 화재 중 및 화재 후 단계는 온도해석과 응력해석을 수행하였다. 화재 전 단계는 탄성해석, 화재 중 및 화재 후 단계에서는 재료비선형 해석을 수행하고, 화재의 영향에 따른 구조거동을 비교하기 위하여 Fig. 11에 나타난 위치에서의 응력을 평가하였다.

3.4. 유한요소모델

지하공동구가 종방향으로 연속된 것으로 가정하여 표준단면에 대해서 해석을 수행하였다. 화재 전과 화재 후에 대한 해석모델의 형상은 Fig. 12와 같고, 화재 중 해석모델의 형상은 Fig. 13과 같다. 화재 전·후의 경우는 공동구의 길이방향으로 연속적인 것으로 가정하여 모델 양단의 축방향 변위를 구속한 3차원 해석을 수행하였고, 화재 중의 경우에는 화재로 인한 온도해석과 화재 손상을 고려한 재료 비선형 해석이 연속적으로 진행되기 때문에 3차원 해석은 지나치게 과다한 해석시간이 소요되어 2차원 해석을 수행하였다. 해석은 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.8에 의해서



(a) 콘크리트 모델



(b) 철근 모델

Fig. 12. 3D finite element model.

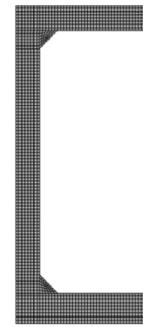


Fig. 13. 2D finite element model.

수행되었다. 종방향으로 화재발생 조건과 하중재하 조건이 동일하여 2차원 해석으로도 실제와 동일한 해석결과를 얻을 수 있기 때문에 해석시간의 효율성을 감안하여 2차원 해석을 수행하였다. 해석모델은 설계시 조건과 동일하게 적용하였으며, 박스 하면의 지지조건은 설계시와 동일하게 지반상수를 고려한 스프링 모델을 적용하였다. 3차원 유한요소모델 작성시 콘크리트는 SOLID 요소, 철근은 트러스 요소로 모델하였고, 2차원 유한요소모델에서 콘크리트와 철근은 2차원 평면변형 요소로 모델하였다.

화재 중 및 화재 후 조건에 대한 비선형 유한요소해석시 콘크리트는 실험결과에 가장 잘 맞는 Lie¹⁶의 응력-변형률 모델을 적용하였고, 철근 모델은 온도의 영향을 고려하여 각 연구자가 제안한 모델이 콘크리트에 비해서 차이가 크지 않아 Lie¹⁸가 제안한 완전 탄소성 형태의 응력-변형률 모델을 적용하였다. 콘크리트의 재료모델은 화재 중·후 해석에서 발생온도에 따른 영향을 고려하였고, 철근은 화재 중 해석에서만 발생온도의 영향을 고려하고 화재 후 해석에서는 발생온도의 영향을 고려하지 않았다.

화재로 인한 온도해석 및 응력해석 시 하중조건은 지하공동구 설계시 적용되는 사용하중 상태와 극한하중 상태를 적용하여 각각에 대해서 해석을 수행하였다. 해석결과로부터 지하공동구의 화재 전, 화재 중 및 화재 후 각 단계에서 화재영향에 따른 구조거동을 평가하였다.

3.5. 해석결과

각 해석결과에서 TS1, RS1, BS1, TS3, RS3, BS3로 표기된 철근의 위치는 박스 내측 표면부에서 50 mm 깊이에 위치하는 내측철근이며, TS2, RS2, BS2, TS4, RS4, BS4로 표기된 철근은 박스 외측 표면부에서 50 mm 깊이에 위치하는 외측철근이다. 이 철

근의 위치는 Fig. 11에 표기된 콘크리트 측정위치에서 단면 깊이가 50 mm인 곳에 해당한다.

3.5.1. 화재 전

지하공동구에 화재가 발생하기 전 사용하중 및 극하하중 상태에서 발생하는 최대응력을 Table 4에 정리하였다. Table 4에 정리된 지하공동구 박스 단면 내에서의 측정위치는 Fig. 11과 같다. 화재 전 해석 결과는 화재 중 및 화재 후 해석결과와 비교하기 위한 것으로 화재의 영향이 포함되지 않아 전반적으로 낮은 수준의 응력이 발생되었다.

3.5.2. 화재 중

지하공동구 박스 구조물의 내면 전체에 ISO 834 화재가열곡선(180분)을 적용하여 화재 도중 사용하중 및 극하하중 상태에서 발생하는 단면 내 온도 및 응력분포를 산정하였다. 화재곡선에 의한 온도해석과 이 온도하중에 의한 응력해석을 연속적으로 수행하였다. 화재 중 온도해석으로부터 박스구조물의 단면 깊이별로 발생하는 온도의 시간이력은 Fig. 14와 같다(측정지점 : Fig. 11). 박스구조물의 상부슬래브, 하부슬래브 및 벽체의 단면 깊이별 발생온도는 유사한 수준을 보였다.

화재 중 온도해석에서 얻어진 발생온도를 콘크리트는 Lie¹⁶의 모델에 강재는 Lie¹⁷의 모델에 적용하여 응력해석에 필요한 콘크리트와 강재의 응력-변형률 곡선을 산정하였다. 이 발생온도와 재료특성을 적용하여 사용하중 상태에서의 화재 중 응력해석을 수행하여 박스구조물에서 발생하는 처짐 및 콘크리트 응력을 Fig. 15~16에 나타내었다. Fig. 16에서 보면 화재 도중에 슬래브 및 벽체 중앙부 내측 면에서는 전반적으로 압축응력이 발생하고, 외측 면에서는 인장응력이 발생되었다. 현치부에서는

Table 4. Max. stress at service and ultimate loads for pre-fire stage(MPa)

Member	Position		Concrete stress		Steel stress	
	concrete	steel	service load	ultimate load	service load	ultimate load
top slab	T1	TS1	0.658	0.948	0.962	1.132
	T2	TS2	-1.726	-2.660	-7.696	-11.925
	T3	TS3	-2.628	-4.229	-2.803	-4.546
	T4	TS4	1.564	2.533	4.101	6.589
bottom slab	B1	BS1	0.422	0.492	0.700	0.318
	B2	BS2	-1.351	-1.978	-6.479	-9.563
	B3	BS3	-2.242	-3.607	-2.592	-4.498
	B4	BS4	1.164	1.882	3.456	5.555
wall	R1	RS1	1.564	2.593	4.825	8.158
	R2	RS2	-2.696	-4.364	-12.093	-19.502
	R3	RS3	-2.242	-4.063	-2.869	-4.498
	R4	RS4	1.164	2.314	3.769	5.927
haunch	H1		-1.158	-1.848		
	H2		-1.159	-1.849		

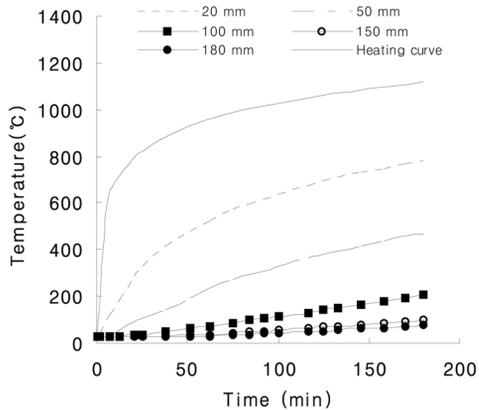
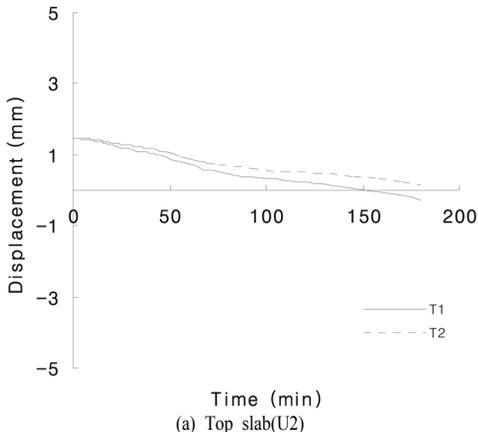


Fig. 14. Results of thermal analysis during fire.

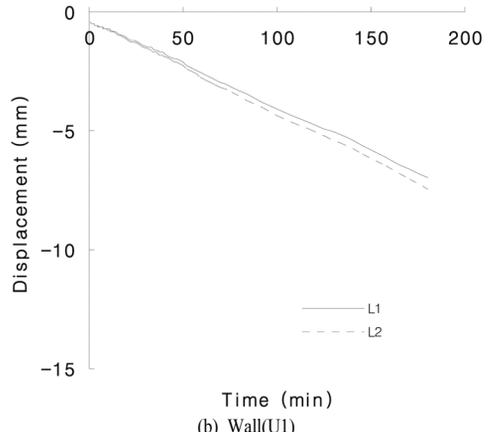
는 내·외면 모두 압축응력 상태를 보였다. 박스구조물 내측 면에서 최대 압축응력 발생 시점에서의 화재시간 및 발생온도를 Table 5에 정리하였다. Table 5에 서 보면 콘크리트의 최대 압축응력이 발생하는 시점에서 화재로 인한 발생온도는 약 690℃ 수준이다.

Table 5. Max. stress and temperature at service load during fire

Position	Max. stress(MPa)	Fire time(min)	Temperature(℃)
T1	-8.665	14.29	689.6
B1	-8.386	14.29	689.6
R1	-9.476	14.29	689.6



(a) Top slab(U2)



(b) Wall(U1)

Fig. 15. Displacement of box culvert at service load during fire.

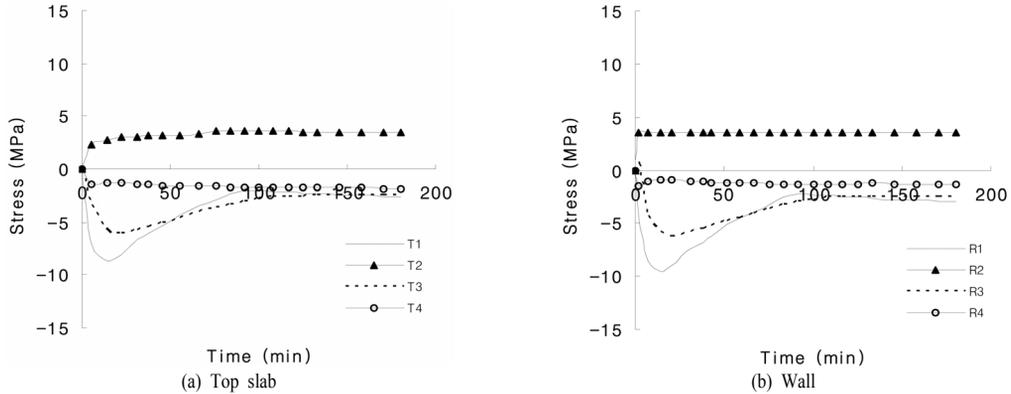


Fig. 16. Stress of concrete at service load during fire.

Table 6. Max. stress at service and ultimate loads for during fire stage(MPa)

Member	Position		Concrete stress		Steel stress	
	concrete	steel	service load	ultimate load	service load	ultimate load
top slab	T1	TS1	-8.655	-8.641	-54.862	-31.848
	T2	TS2	3.565	3.576	166.205	160.739
	T3	TS3	-6.087	-4.763	67.715	157.787
	T4	TS4	-1.859	-5.795	40.360	40.297
bottom slab	B1	BS1	-8.386	-8.210	-32.376	28.283
	B2	BS2	1.509	1.651	52.765	53.374
	B3	BS3	-6.253	-4.899	62.012	159.086
	B4	BS4	-2.216	-5.741	23.952	20.292
wall	R1	RS1	-9.476	-10.487	-103.175	-94.712
	R2	RS2	3.569	3.568	437.079	447.973
	R3	RS3	-6.189	-4.918	58.181	140.358
	R4	RS4	-1.660	-5.307	40.790	38.811
haunch	H1		-4.001	-3.733		
	H2		-4.002	-3.724		

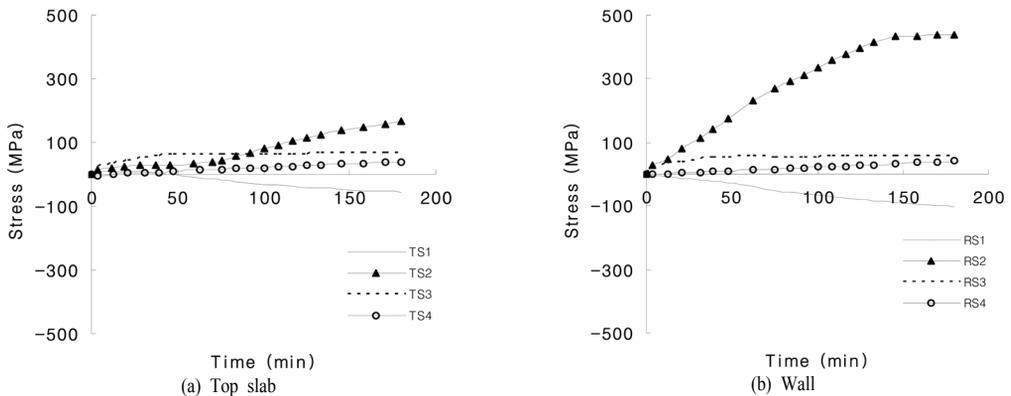


Fig. 17. Stress of steel at service load during fire.

화재 중에 사용하중 상태에서 박스구조물에서 발생하는 철근의 응력은 Fig. 17과 같다. 화재 도중에

내측 면에 위치한 철근에서는 전반적으로 압축응력이 발생하고, 외측 면에 위치한 철근에서는 인장응

력이 발생되는데, 현치부의 철근은 인장응력이 발생되었다. 온도증가에 따라 벽체 외측 면에 위치한 철근(RS2)에서는 항복응력을 초과하는 큰 인장응력이 발생되었다. 사용하중 상태에서 화재 중 온도 및 응력해석으로부터 산정된 박스구조물 각 단면위치에서의 최대 응력을 Table 7에 정리하였다.

극한하중 상태에서 화재 중 온도해석 및 응력해석을 수행하여 박스구조물에서 발생하는 처짐 및 콘크리트 응력을 Fig. 18~19에 나타내었다. Fig. 19에서 보면, 화재 도중에 박스구조물의 내측 면에서는 전반적으로 압축응력이 발생하고, 외측 면에서는

인장응력이 발생되는데, 경향은 사용하중 상태와 유사하다. 박스구조물 내측 면의 최대 압축응력 발생 시점에서의 화재시간 및 발생온도를 Table 7에 정리하였다. Table 7에서 보면 콘크리트의 최대 압축응력이 발생하는 시점에서 화재로 인한 발생온도는 약 680°C 수준이다.

화재 중 극한하중 상태에서 박스구조물에서 발생하는 철근의 응력은 Fig. 20과 같다. 화재 도중에 내측 면에 위치한 철근에서는 전반적으로 압축응력이 발생하고, 외측 면에 위치한 철근에서는 인장응력이 발생되는데, 현치부의 철근은 인장응력이 발생되었다. 벽체 외측 면에 위치한 철근에서는 사용하중 상태에서와 마찬가지로 항복응력을 초과하는 큰 인장응력이 발생되었다. 극한하중 상태에서 화재 중 온도 및 응력해석으로부터 산정된 박스구조물 각 단면위치에서의 최대 응력을 Table 7에 정리하였다.

Table 7. Max. stress and temperature at ultimate load during fire

Position	Max. stress(MPa)	Fire Time(min)	Temperature(°C)
T1	-8.641	14.26	689.4
B1	-8.201	15.33	701.9
R1	-10.490	13.55	680.5

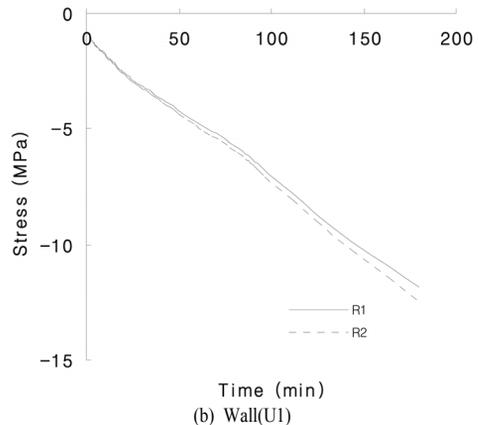
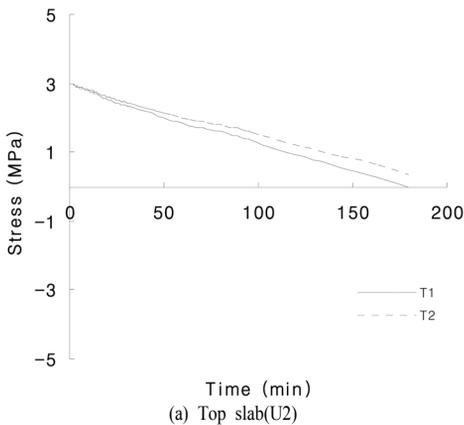


Fig. 18. Displacement of box culvert at ultimate load during fire.

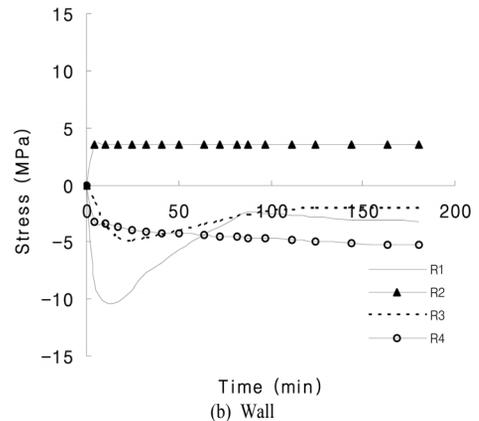
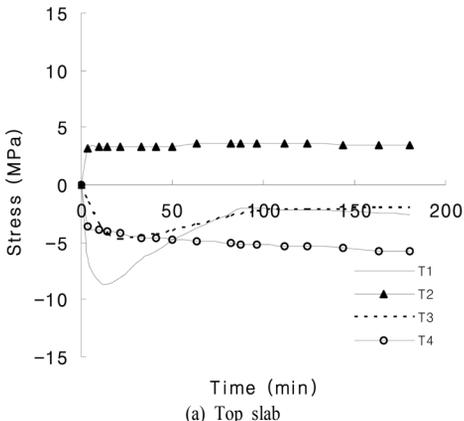


Fig. 19. Stress of concrete at ultimate load during fire.

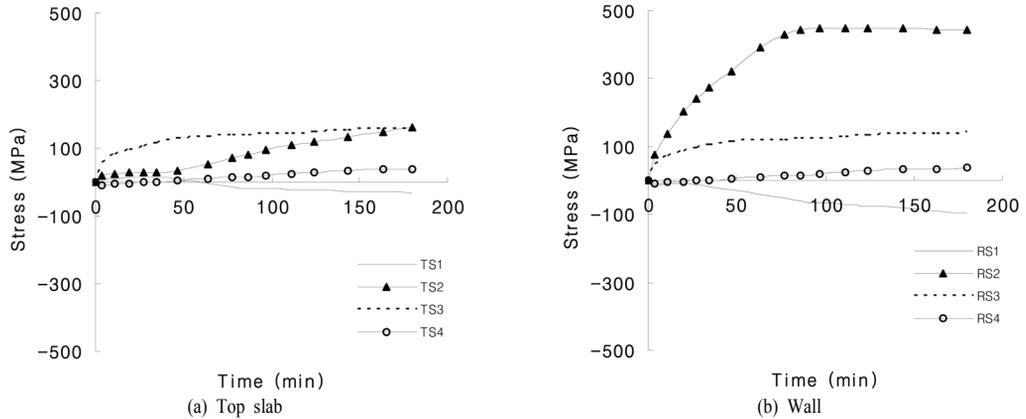


Fig. 20. Stress of steel at ultimate load during fire.

3.5.3. 화재 후

화재 후 단계에 대한 비선형 해석시 콘크리트의 재료모델은 발생온도의 영향을 고려한 Lie¹⁶⁾의 모델을 적용하고, 강재의 응력-변형률 곡선은 온도의 영향을 받지 않는 Lie¹⁸⁾가 제안한 상온상태의 완전 탄소성 재료모델을 적용하였다. 지하공동구 박스 구조물내에 발생한 화재가 종료되고, 구조물이 상온 상태로 냉각된 이후 사용하중 및 극하하중 상태에서 발생하는 단면 내 각 위치에서의 최대응력은 Table 8과 같다. 화재 후 지하공동구에서 발생하는 콘크리트 및 철근의 응력수준은 화재 전 상태에 비해서는 큰 수준이지만, 화재 중 상태에 비해서는 상당히 낮은 수준을 보였다.

3.5.4. 비교분석

화재 전, 화재 중 및 화재 후 지하공동구 박스구조물에서 발생하는 콘크리트 및 철근의 응력변화를 사용하중 상태는 Fig. 21, 극한하중 상태는 Fig. 22에 비교하였다. 단면내에서 응력의 비교위치는 Fig. 13에 표기된 상부슬래브(T1, T2), 하부슬래브(B1, B2) 및 벽체(R1, R2)이다. Fig. 21~22에서 보면, 화재 중에 박스 내측 면 콘크리트에서 가장 큰 압축응력이 발생되고, 외측 면에 위치한 철근에서 항복응력을 초과하는 인장응력이 발생되었다. 이 응력수준은 화재 전 및 화재 후 단계에서의 발생응력에 비해 매우 큰 수준에 해당한다. 또한, 철근에서 발생하는 인장응력은 발생온도의 영향으로 감소되는 철근의 항

Table 8. Max. stress at service and ultimate loads for post-fire stage(MPa)

Member	Position		Concrete stress		Steel stress	
	concrete	steel	service load	ultimate load	service load	ultimate load
top slab	T1	TS1	2.290	3.033	-10.531	40.613
	T2	TS2	-0.030	-0.061	-4.668	-25.456
	T3	TS3	-6.210	-8.733	4.246	12.413
	T4	TS4	-0.12	-0.016	0.913	-3.547
bottom slab	B1	BS1	2.742	3.031	-10.602	32.717
	B2	BS2	-0.034	-0.062	-3.933	-13.101
	B3	BS3	-6.431	-8.801	4.917	12.360
	B4	BS4	-0.017	-0.024	-1.130	-3.677
wall	R1	RS1	3.019	3.042	15.941	8.728
	R2	RS2	-0.030	-0.040	-39.068	-37.661
	R3	RS3	-5.998	-10.157	4.500	12.742
	R4	RS4	-0.009	0.00002	-4.902	1.235
haunch	H1		-2.229	-3.2233		
	H2		-0.070	-0.1008		

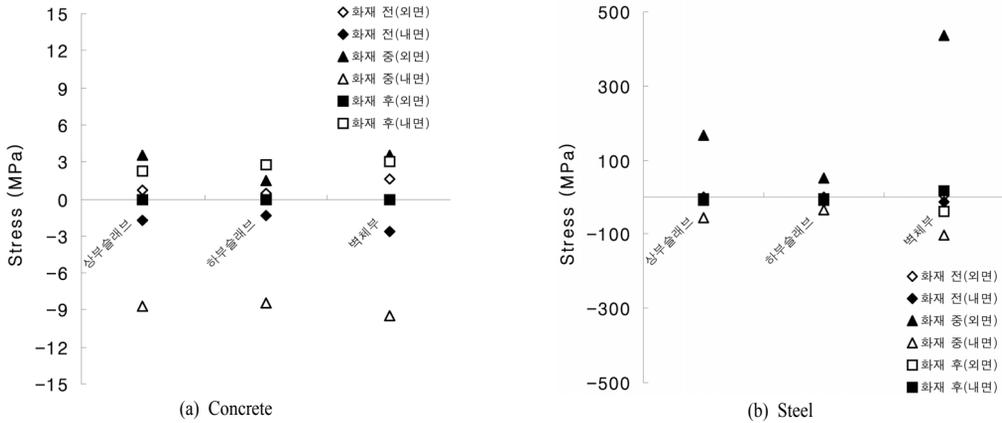


Fig. 21. Comparison of stress at service load.

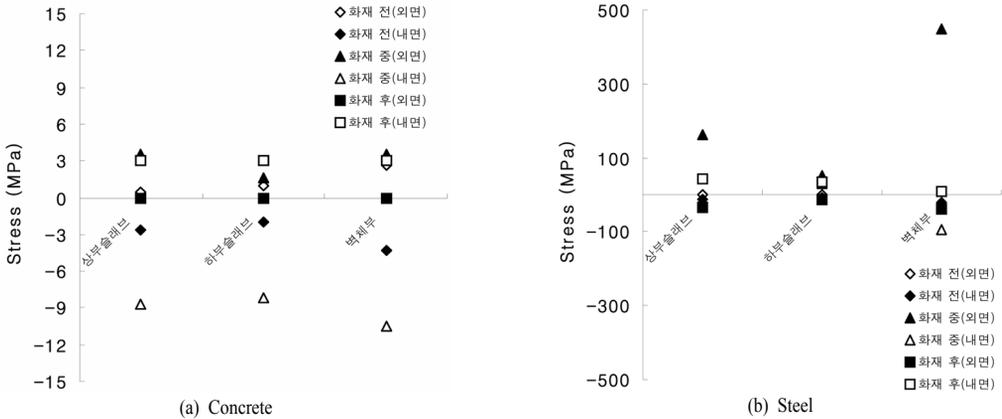


Fig. 22. Comparison of stress at ultimate load.

복강도를 크게 초과하는 수준으로 설계조건에서 규정하는 하중재하 상태에 있는 지하공동구가 화재 상태에 놓이게 되면 구조적으로 매우 취약한 상태가 될 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 전력선 등이 배치되는 지하공동구 압거구조물에서 화재(ISO 834 화재곡선)가 발생한 경우를 상정하여 화재 전, 화재 중 및 화재 후 상온으로 냉각된 상태에 대해서 온도해석 및 재료비선형 응력해석을 수행하였다. 온도해석 및 응력 해석시 하중조건은 지하공동구 박스구조물 설계시 적용되는 사용하중 상태와 극한하중 상태를 적용하여 각각에 대해서 해석을 수행하였다. 해석결과로부터 지하공동구의 화재 전, 화재 중 및 화재 후 각 단계에서 구조거동을 비교분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

1) 화재실험에서 측정된 발생온도를 반영한 Lie의 콘크리트의 응력-변형률 모델이 화재 후 구조실험에서 측정된 실험체의 하중-처짐 관계를 가장 잘 예측하는 것으로 평가되었다. 따라서 Lie의 콘크리트 모델을 적용하여 지하공동구 화재해석을 수행하였다.

2) 철근은 화재 중에 온도의 영향으로 항복강도가 크게 감소하고, 상온으로 냉각후에는 대부분의 강도를 회복하는 것으로 기존 연구결과에서 언급되었지만, 상온으로 냉각된 경우에 대해 실험적으로 검증된 결과는 없는 실정이다. 본 연구에서는 화재 후 실험체가 상온으로 냉각된 이후에 채취한 철근과 온도 영향을 받지 않은 철근에 대한 인장시험을 통해서 항복강도 및 인장강도가 유사한 수준을 보임을 수치적으로 검증하였다. 이 실험결과는 반영하여 지하공동구의 화재 후 해석을 수행하였다.

3) 사용하중 및 극한하중이 작용하는 하중조건에서 화재 전과 화재 후에 지하공동구 박스 내면에

서는 콘크리트가 인장상태이고 화재 중에는 압축상태를 보이는데, 발생응력이 콘크리트의 허용응력을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 철근에서는 모두 항복응력보다 작은 수준의 응력이 발생되었다.

4) 사용하중 및 극한하중이 작용하는 하중조건에서 화재 중에는 화재 전과 화재 후에 비해서 콘크리트와 철근의 응력이 가장 크게 발생되는데, 콘크리트의 응력은 허용응력을 초과하지 않지만, 철근의 경우에는 모든 하중조건에서 항복응력을 초과하는 인장응력이 발생된다. 이 인장응력은 발생 온도의 영향으로 감소되는 철근의 항복강도를 크게 초과하는 수준으로 설계조건에서 규정하는 하중재하 상태에 있는 지하공동구가 ISO 834 화재곡선 상태에 놓이게 되면 구조적으로 매우 취약한 상태가 될 것으로 판단된다.

향후, 전력선 등이 배치되는 지하공동구에서 발생하는 화재로 인한 구조거동을 보다 정확히 평가하기 위해서는 공동구에 배치된 전력선 등에 의해서 발생하는 화재곡선의 도출과 화재해석시 고온에서 발생하는 콘크리트의 탈락현상이 반영되는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 이계희, 김선훈, 최익창, “화재 박리를 고려한 전력구의 내하력산정”, 2007 대한토목학회 정기학술대회, 구조분과, pp. 269~272, 2007.
- 2) 심종성, 이광명, 문도영, 박진영, “화재로 손상된 지하박스구조물의 열해석”, 학술발표회논문집, 한국구조물진단유지관리학회지, pp. 235~240, 2003.
- 3) 방명석, “지하철정거장 화재에 대한 강구조물의 내화해석”, 한국안전학회지, 제25권, 제6호, pp. 125~129, 2010.
- 4) 임초롱, 정철현, 김유석, “화재시 온도증가로 인한 RC 슬래브의 강도 특성”, 한국안전학회지, 제25권, 제4호, pp. 48~60, 2010.
- 5) Outinen, J. and Makelainen, P., “Mechanical Properties of Structural Steel at Elevated Temperatures and after Cooling Down”, Proceeding of the second international workshop, Structures in Fire, SiF 02', pp. 273~289, 2002.
- 6) 오혁희, “화재에 의한 지하박스 구조물의 역학적 특성”, 서울시립대학교 도시과학대학원 토목공학과 지반공학전공 석사논문, pp.63~66, 2005.
- 7) ISO., “Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction”, International Standard ISO 834, Geneva, 1975.
- 8) Yang, H., Han, L. H. and Wang, Y. H., “Effects of heating Loading Histories on Post-Fire Cooling Behaviour of Concrete-Filled Steel Tubular Columns”, Journal of Constructional Steel Research, 64, pp. 556~570, 2008.
- 9) 한병찬, 권영진, 김재환, 신영수, 최은규, “온도의존성 열특성 계수를 고려한 화재에 노출된 철근콘크리트 골조의 해석적 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회지, 제19권, 제3호, pp. 283~292, 2007.
- 10) 이태규, “고온 하에서 기화열을 고려한 철근콘크리트 부재의 온도해석”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회지, Vol. 29, No. 4A, pp. 355~363, 2009.
- 11) 전세진, 정철현, 진병무, “LNG 저장탱크의 개선된 온도해석 모델”, 대한토목학회논문집, 제23권 제6A호, pp. 1087~1094, 2003.
- 12) EUROCODE 2., “Design of Concrete Structures-Part 1.2: General rules-Structural Fire Design”, Brussels, July, 2004.
- 13) American Society of Civil Engineers, “Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities”, 1980.
- 14) EUROCODE 3., Design of Steel Structures-Part 1.2: General rules-Structural Fire Design, Brussels, 2002.
- 15) Schneider U., “Concrete High Temperatures-A General Review”, Fire Safety Journal, 13, pp.55~68, 1988.
- 16) Lie, T. T. and Irwin, R. J., “Fire Resistance of Rectangular Steel Columns Filled with Bar-Reinforced Concrete”, Journal of Structural Engineering, 121(5), pp. 797~805, 1995.
- 17) Shi, X., Tan, T. H., Tan, K. H. and Guo, Z., “Concrete Constitutive Relationships Under Different Stress-Temperature Paths”, Journal of Structural Engineering, December, pp. 1511~1518, 2002.
- 18) Lie, T. T., “Structural fire Protection”, New york: American Society of Civil Engineers, 1992.
- 19) 국토해양부 제정, “콘크리트구조설계기준”, 사단법인 한국콘크리트학회지, 2007.