

박리를 고려한 지하박스구조물의 화재하중해석 II : 내하력

Fire Loading Analysis of Underground Box Structure with Considering of Concrete Spalling II : Load Carrying Capacity

이 계 희†

Lee, Gye-Hee

김 선 훈*

Kim, Sun-Hoon

(논문접수일 : 2007년 5월 3일 ; 심사종료일 : 2007년 6월 7일)

요 지

본 논문에서는 1편에서 얻어진 온도분포와 박리시간이력을 이용하여 지하박스구조물의 열응력을 산정하고 이에 기반한 열모멘트를 산정하였다. 또한 이때의 온도분포를 바탕으로 구조물의 열적비선형성을 고려한 극한모멘트를 산정하여 구조물의 내하력을 산정하였다. 그 결과 상부슬래브의 부모멘트 구간은 단면의 온도경사에 의해서 발생하는 열모멘트에 의해 지배받는 것으로 나타났다. 반면 정모멘트 구간은 박리에 의해 화염에 노출된 철근의 항복응력에 의해 지배받는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 박리이력, 열모멘트, 내하력

Abstract

In this study, based on the temperature distribution and the spalling histories those obtained in the companion paper, the thermal stress and moments of underground box structure were estimated. Additionally, the ultimate sectional moment considering with the thermal nonlinearities of material were estimated and the load carrying capacity of underground box structure was also obtained. As results, the load carrying capacity of negative moment part was dominated by thermal moment that come from thermal gradient of the section. However, the load carrying capacity of the positive moment part was rules by the yield stress of rebar that exposed to the high temperature induced spalling phenomena.

Keywords : *spalling history, thermal moment, load carrying capacity*

1. 서 론

1996년 11월18일에 영국과 프랑스를 잇는 길이 35km의 영불해협터널("Chunnel")에서 발생한 화재는 10시간 가까이 지속되었고 온도는 최고 700°C이상으로 관측되었다. 이 화재로 수백m구간의 콘크리트구조물에 박리가 발생하였고, 하루 폐쇄시 손실액 150만불에 이르는 이 터널을 6개월 가량 폐쇄하여야만 했다. 이때 발생한 박리는 두께 45cm의 프리캐스트 콘크리트로 시공된 터널의 벽면에 10~20cm의 깊이로 발생하였다(Ulm 등, 1999a). 또한 비섬유보강콘크리트에 대한 화재실험에서는 50cm두께의 슬래브에서 30cm깊이의 박리가 발생하는 결과가 얻어졌다(Savov 등, 2005). 이

와 같이 터널에 발생하는 화재는 일반 화재보다 강도가 큰 것이 특징이기 때문에 콘크리트의 박리에 의한 내하력의 손실에 대한 구조적인 접근이 필요하다.

현대 도시의 지하는 통신케이블이나 전력케이블을 포함하는 많은 박스구조물이 설치되어 있다. 대부분의 케이블은 일단 불이 붙으면 쉽게 연소하고 장기간에 걸쳐 연소한다. 케이블 화재는 목재 등과 비교해서 연소에너지가 대단히 크므로(이계희 등, 2007) 앞에서 살펴본 바와 같은 콘크리트 구조의 박리현상과 이에 의한 구조물의 내하력변화를 고려할 필요가 있다. 특히 심층터널은 인접지반의 아치효과나 콘크리트 라이닝이 압축력만 받을 수 있도록 형상이 결정되어 단면의 손실이 발생하여도 자립을 유지할 가능성이 높은 반면 지하박스구조물

† 책임저자, 정회원 · 목포해양대학교 해양시스템공학부 조교수

Tel: 061-240-7237 ; Fax: 061-240-7284

E-mail: lghlsk@mmu.ac.kr

* 정회원 · 영동대학교 토목환경공학과 부교수

· 이 논문에 대한 토론을 2007년 10월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

은 천층터널로 콘크리트단면의 휨저항력으로 토압 및 수압 등의 상시하중을 지지하기 때문에 이러한 화재에 의한 박리의 발생은 구조물의 안전성에 중요한 영향을 미치게 된다. 그러나 현재 국내의 설계기준에서는 화재가 발생한 후에 구조물에 미치는 영향에 대한 평가나 기준은 전무한 상태이다.

화재시 박리를 고려한 구조물의 안전성평가는 아직은 초기적인 단계로 부재별 구조거동의 특징을 평가하거나(Shi 등, 2001; Mounajed 등, 2004) 박리의 원인을 수치해석적으로 분석한 연구(Chung 등, 2005; Tenchev 등 2005)가 있다. 화재시 시간에 따른 구조물의 내하력을 산정한 몇몇 연구(Ulm 등, 1999b; Savov 등, Caner 등, 2005; 2005; Msaad 등, 2006)는 열전도 해석의 결과로 박리가 일어나는 열응력 상태를 추정한다든지, 박리가 시간에 따라 일정하게 일어나는 것을 가정하는 등, 콘크리트의 온도증가나 응력의 변화를 고려하여 간접적으로 박리를 고려한 구조해석을 수행하였을 뿐 직접적으로 박리가 일어난 단면을 모델링하고 이를 이용한 구조물의 내하력을 평가하는 시도는 아직 없었다. 이는 박리현상이 해석모델의 일부분의 소거를 나타내므

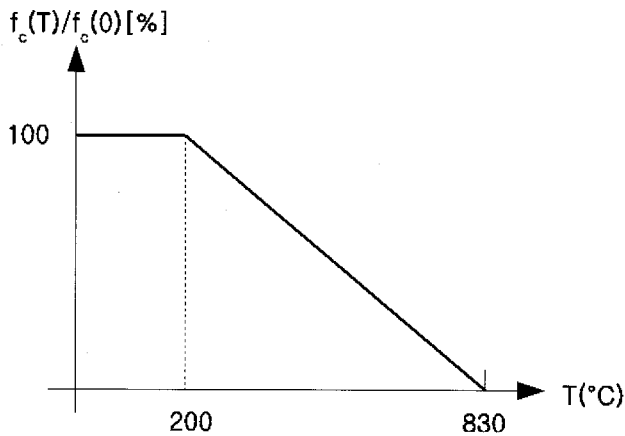
로 이를 구현하기 위해서는 고도의 비선형성을 고려해야 하는 열구조해석에서 시간에 따라 반복으로 해석모델을 수정하고 이에 따른 경계조건을 부여해야하기 때문이다.

본 연구에서는 지하박스구조물에서 발생하는 화재시 박리를 고려한 구조물 자체의 거동과 내하력을 일련의 화재시나리오에 따라 산정하여 화재시 일어나는 구조물의 거동에 대한 이해를 높이고자 한다. 본 논문의 1편(이계희 등, 2007)에서는 화재시나리오에 따라 지하박스구조물 내에서의 온도장을 구성하고 각각의 경우에서 박리거동을 산정하였다. 본 논문에서는 시간에 따른 온도분포와 박리를 고려한 단면에서 발생하는 구조물의 내하력을 산정하고 구조물의 화재거동을 평가한다.

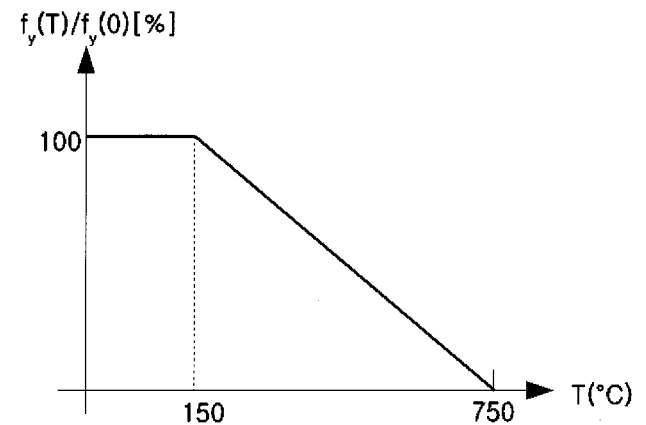
2. 열하중

2.1 온도에 따른 구조재료의 거동

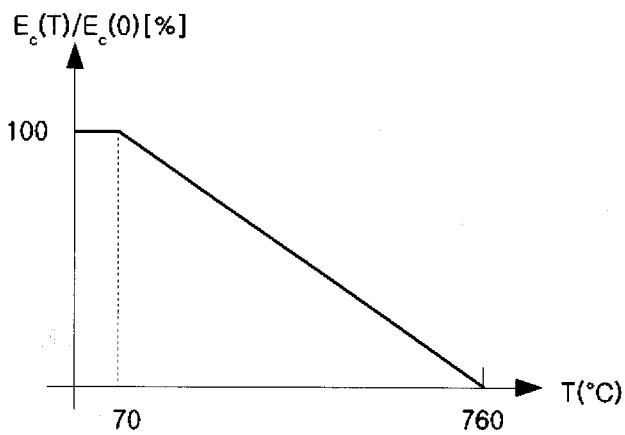
화재시 구조재료 거동특성은 온도의 상승에 따라 비선형적인 거동을 보인다. 특히 콘크리트 구조물에서 인장응력을 지



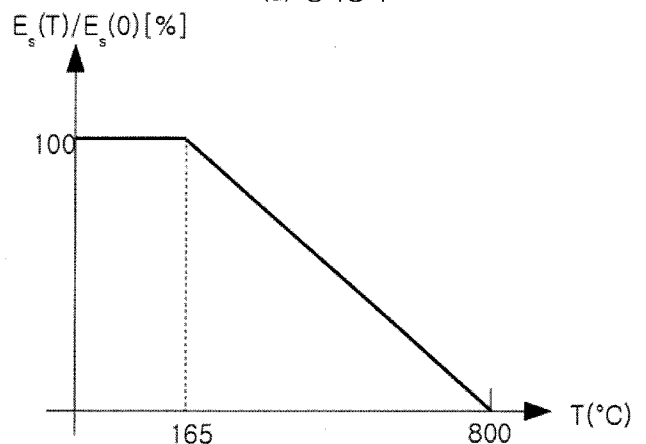
(a) 압축강도



(a) 항복응력



(b) 탄성계수



(b) 탄성계수

그림 1 온도에 따른 콘크리트의 재료특성

그림 2 온도에 따른 강재의 재료특성

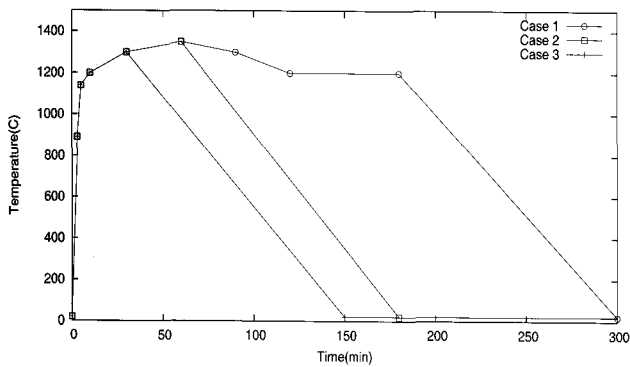


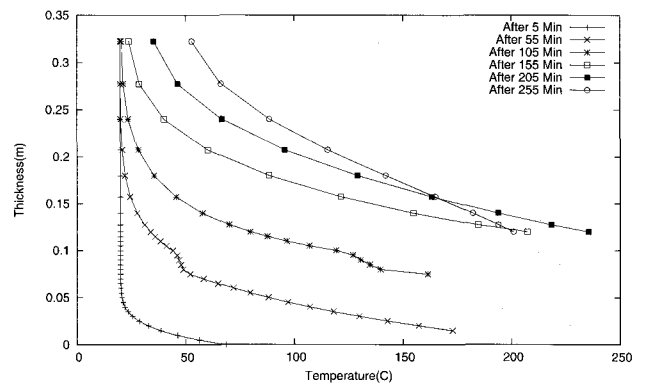
그림 3 해석에서 고려된 화재곡선

지하는 철근의 경우 더욱 온도변화에 민감한 거동을 보인다. 본 연구에서 산정하고자 하는 내하력은 콘크리트가 압축강도에 도달하는 극한상태에서의 구조물의 거동을 기초로 하고 있다. 이러한 거동을 수치해석기법을 이용하여 구현하는 것은 가능하나 구조물의 일반적인 화재거동을 파악하는데에는 구조물의 불안정까지 고려해야하는 수치모델링으로는 비효율적이다. 따라서 본 연구의 열응력해석에서는 구조물의 열팽창 및 자체구속에 의한 구조응답을 산정한다. 이러한 조건에서 구조물의 대변형에 의한 비선형거동은 일어나지 않을 것으로 판단되므로 재료의 비선형성만 고려하여 해석을 수행한다. 이를 위한 콘크리트와 철근의 온도에 따른 물성치는 그림 1~2에 제시되었다.

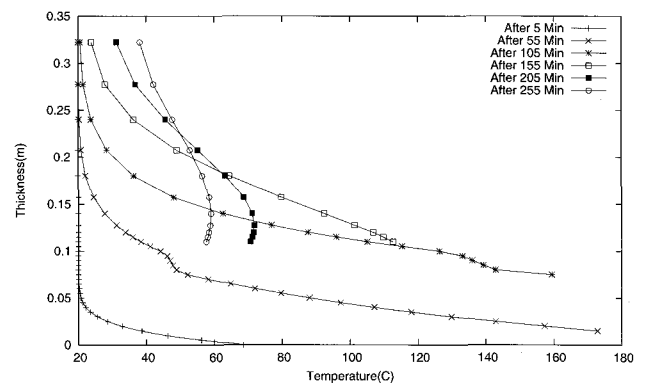
2.2 박리현상을 고려한 온도분포

본 연구에서 고려한 화재곡선은 RWS 화재곡선이며 화재 중 외부의 소화나 기타요인에 의하여 화재가 종료되고 120분의 냉각시간을 갖는 것으로 가정하였다. 각 화재곡선에서 화재의 지속시간은 1/2의 비율로 줄어드는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 각 시나리오별 화재곡선은 그림 3에서 보이는 바와 같다.

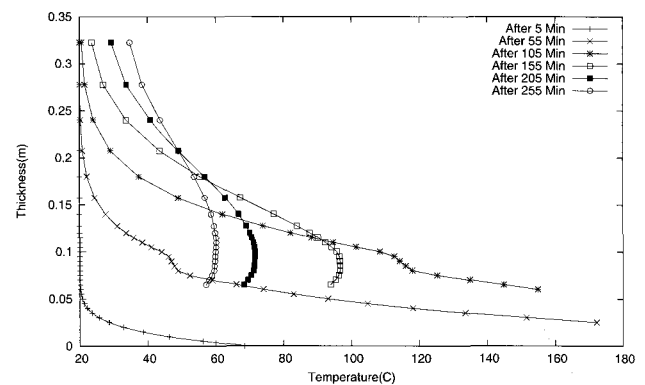
열전도 해석결과, 단면 각층을 나타내는 요소의 중심에서 얻어진 온도분포는 그림 4에 나타내었다. 각 화재경우에 Y축의 최소점이 점차위로 올라가는 경우를 볼 수 있는데, 이는 박리에 의해서 해당위치의 요소가 제거되었음을 나타낸다. 화재시 지하박스구조물내부의 온도가 1000°C이상으로 상승하여도 각 경우 모두 박리가 발생하고 있는 동안에는 콘크리트의 표면온도가 200°C이상으로 상승하지 않는다. 이는 소성 화온도에 도달할 경우 박리가 발생하여 탈락되기 때문이다. 그러나 Case 1의 경우에는 박리한계지점까지 박리가 발생하여 계속적으로 온도가 상승하고 있는 현상을 보여준다. 모든 경우 박스외면의 온도는 해석이 끝나는 시점까지 50°C이상으



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

그림 4 상부슬래브중양의 단면내 온도분포

로 올라가지 않았다. 이는 콘크리트의 낮은 열전도율 때문으로 화재초기에는 온도상승은 화염과 직접 접촉하는 표면에만 국한된다. 이 영향으로 표면부분에 큰 온도 경사가 발생한다. 이러한 온도경사는 화재가 종료되어 내부의 온도가 내려가기 시작한 후에 감소된다. 이러한 온도 분포에서 특기할 점은 화재가 끝나고 내부의 온도가 내려가는 동안에도 열전도에 의하여 콘크리트단면의 온도는 계속 증가한다는 것이다. 즉 콘크리트단면내 온도의 침투점은 화재온도의 침투점과 일치하지 않는다.

표 1 해석에 사용된 구조재료의 물성치

| | 콘크리트 | 철근 |
|------------------------|----------|----------|
| 밀도(kg/m ³) | 2500 | 7850 |
| 열팽창률(1/K) | 1.00E-05 | 1.10E-05 |
| 열전도율(J/mKs) | 2.22 | 46 |
| 비열(J/kg K) | 921 | 419 |
| 탄성계수(MPa) | 26000 | 210000 |
| 항복강도(MPa)* | 35 | 400 |

* 콘크리트는 압축강도

3. 열응력해석

3.1 구조모델링

본 연구에서 사용된 구조재료의 물성치는 표 1에 나타나 있다.

본 연구에서 작성된 모델은 한 방향으로 긴 형상을 가졌기 때문에 평면변형을 따른다고 가정한다. 이러한 평면변형모델은 단위폭을 기준으로 해석되어 철근이 위치한 중심위치에 등가철근량을 나타내는 두께의 철근층을 가정하지만 본 해석과 같이 철근이 차지하고 있는 임의위치에서의 열전도와 박리등을 해석하려면 철근의 실제 위치를 정확하게 나타낼 필요가 있으므로 실제보다 작은 두께로 표시되는 철근층의 사용은 바람직하지 않다. 따라서 단면상에서 철근이 점유하고 있는 위치에 대해서 모델링을 수행하되 철근의 물성치를 동일한 거동을 보이도록 수정하는 것이 필요하다.

해석모델에 대한 표준적인 철근배근량을 $A_s = 19.11cm^2$ 으로 가정하였다. 그러나 일반적으로 콘크리트 구조물에는 주철근과 주철근의 거동을 전달해주는 배력근이 동시에 배치된다. 배력근은 구조물의 내하력에는 영향을 미치지 못하지만 열전달에 있어서는 주철근과 동일한 거동을 수행하므로 열해석에서는 주철근과 배력근을 모두 철근량에 가산한다. 배력근의 배근량이 주철근과 동일하다고 가정하면 열전도해석시 고려해야 하는 철근량은 $A_{sh} = 2A_s$ 이다. 모델에서 단위길이당 배근되는 철근의 부피($V_{st} = 3.82 \times 10^3 cm^3$)를 구하고 이 철근이 두께 2cm의 철근층에 균등하게 배근된다고 가정하면 철근이 배근되는 영역에서의 해당요소의 총부피($V_{SM} = 2 \times 10^4 cm^3$)을 구할 수 있다. 따라서 두 철근량의 부피비가 모델에서 고려되는 철근과 실제 배근되는 철근의 비(식 (1))를 나타낸다.

$$r_s = V_{SM} V_{ST} \quad (1)$$

해석모델에 적용되는 철근재료의 열적물성치는 이 비를 기준으로 하여 수정되어야 한다. 이에 따른 열전도율은 다음과 같다.

$$K_{snew} = K_{steel} r_s = 8.791 JmKsec \quad (2)$$

철근의 비열은 다음과 같은 값으로 수정된다.

$$C_{snew} = C_{steel} r_s = 80.07 JkgK \quad (3)$$

열응력해석에 있어서는 배력근의 구조적으로 기여하지 못하므로 이 경우에 모델링에 따른 철근물성치의 수정은 이를 고려한 부피비($r_{str} = 2r_s$)를 따르게 된다. 유한요소법은 변위법이므로 해석시 얻어지는 변위를 일치시키기 위해서는 강재의 물성치는 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$E_{snew} = E_{steel} r_{str} = 2.01 \times 10^4 MPa \quad (4)$$

$$f_{ysnew} = f_{ysteel} r_{str} = 38.22 MPa \quad (5)$$

3.2 열모멘트

열모멘트는 단면의 열전도해석을 통하여 얻어진 단면의 온도분포를 바탕으로 산출되는 모멘트를 말한다. 이때 각 요소의 온도에 따른 강도와 탄성계수의 변화 및 재료의 온도에 따른 비선형 거동을 고려한다. 일반적으로 박스구조물 내부의 온도가 높으므로 부모멘트가 발생한다. 이는 실제 하중에 의해서 발생하는 모멘트와 부재의 중앙부분에서는 반대방향이고 지점부에서는 같은 방향으로 작용하므로 전체적인 구조물의 내하력에 영향을 미칠 것이다.

3.3 극한모멘트

일반적으로 철근콘크리트 설계에 사용하는 극한모멘트는 콘크리트의 한계상태에서의 저항모멘트를 나타내는 것으로 콘크리트의 압축파괴시의 저항모멘트이다. 본 해석에서는 열전도 해석결과 얻어지는 단면의 온도분포를 고려한 콘크리트와 철근의 한계상태를 각 요소별로 산정하고 이에 기반하여 극한모멘트를 결정하였다. 이때 단면은 평면을 유지하여 변형하는 것으로 가정하고 콘크리트의 인장강도는 무시하였다. 또한 철근이 콘크리트보다 먼저 항복응력에 이르는 것으로 하였다. 이러한 가정은 일반적인 콘크리트의 극한강도를 산정하는데 적용되는 것과 동일한 가정이다.

해석시 단면에 분포하는 철근과 콘크리트의 거동은 열전도 해석에서 얻어진 온도에 종속적인 값이므로 중립축을 나타내는 식의 일반화가 곤란하다. 따라서 본 해석에서는 열전도해

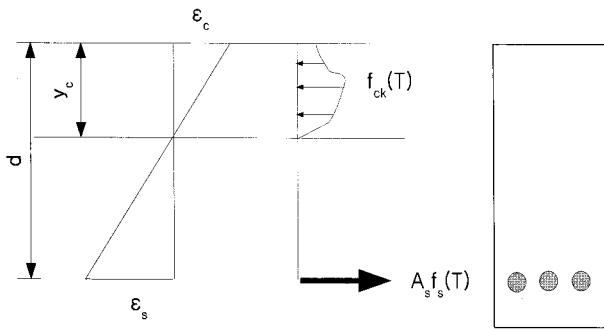


그림 5 단면의 극한모멘트산정

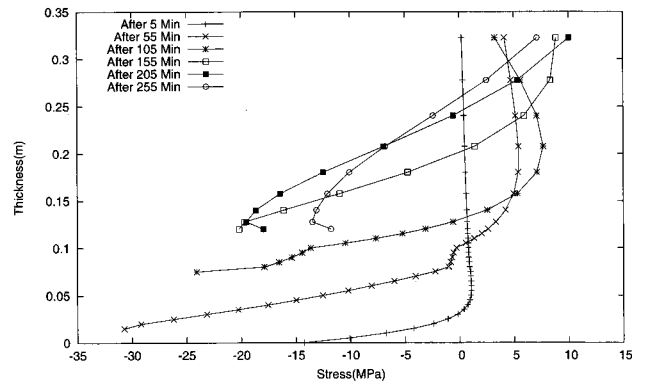
석에서 얻어진 온도분포를 이용하여 변형률에 따르는 각 요소의 응력을 산정하고, 이를 수치적분하여 각 요소에서의 압축력을 산정하고, 이 값과 온도에 따르는 철근의 항복응력과 등가의 압축응력을 나타내는 중립축을 구하였다. 이때 얻어진 응력분포에 따라 구조물의 극한 모멘트를 산정하였다(그림 5).

4. 해석결과

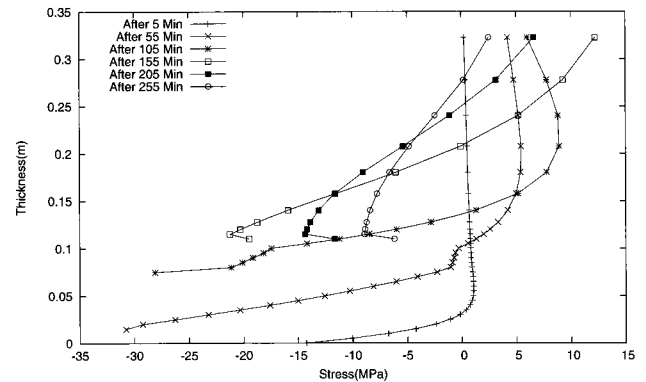
4.1 열응력에 의한 모멘트

화재시 상부슬래브 중앙에서의 열응력분포는 그림 6에서 보이는 바와 같다. 온도차에 의한 열응력은 내측에 큰 압축력을 도입하며 단면에서의 평형을 이루기 위하여 외측부에는 인장력이 발생한다. 화재후 1시간 정도 지난 경우에 이러한 단면내 열응력은 최대가 되며, 거의 콘크리트의 압축강도에 달하는 압축응력이 발생한다. 화재가 종료되면서 내부측의 온도가 감소하면 단면에서의 응력분포는 내측표면에서 약간 안쪽에서 최대 응력이 발생한다. 화재가 종료되면서 온도차에 의한 응력경사는 점차 감소한다. 외측에서 발생하는 인장 응력은 화재후 2시간 정도가 지난 경우에 모두 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 상부슬래브의 지점 부에도 동일하게 나타났다.

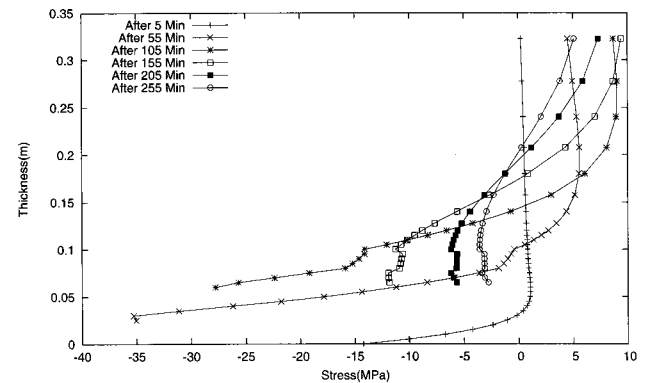
그림 6과 같은 응력분포에 의해 발생하는 열응력은 그림 7에서 보이는 바와 같다. 이 경우 발생하는 최대 부모멘트는 화재강도가 가장 낮은 Case 3에서 오히려 가장 큰 값을 보인다. 이는 Case 1이나 Case 2의 경우에는 온도 상승으로 인하여 콘크리트의 물성치가 열화되어 단면이 부담할 수 있는 모멘트의 한계값이 낮아졌기 때문이다. 이러한 단면의 소성거동으로 Case 1이나 Case 2의 경우에는 화재가 종료된 후 온도가 감소하면서 오히려 정모멘트가 발생하고 있다. 반면 단면의 손상이 적은 Case 3의 화재에서는 화재종료후 단면의 온도가 내려가면서 부모멘트가 0으로 접근하고 있다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

그림 6 상부슬래브중앙의 단면내 열응력분포

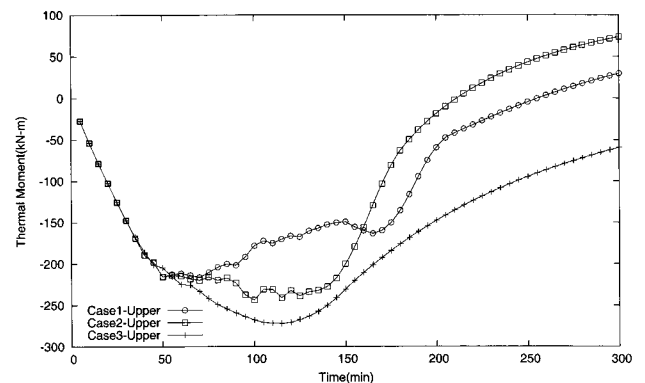


그림 7 상부슬래브 중앙단면의 열모멘트 시간이력

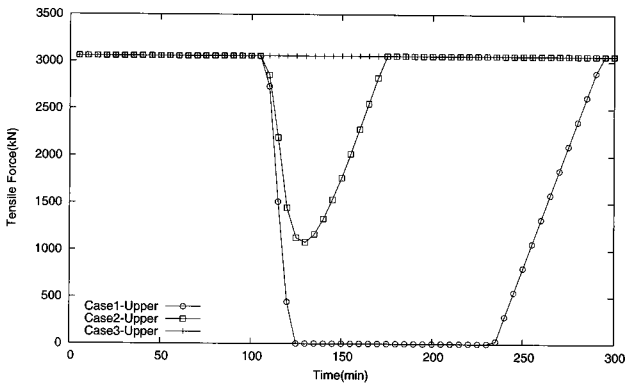


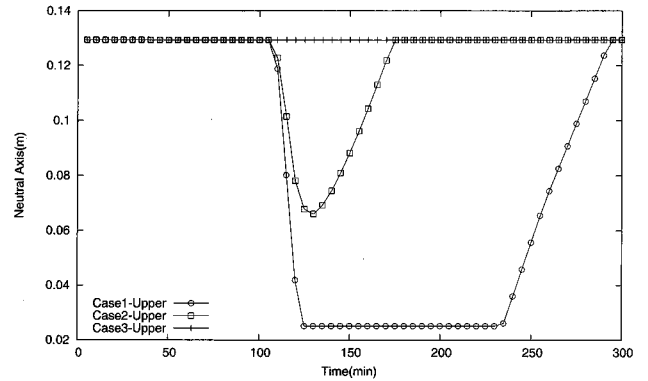
그림 8 상부슬래브 중앙단면의 철근항복응력의 변화

이러한 경향은 상부슬래브의 지점부에서도 동일하게 나타났다. 따라서 열모멘트는 정모멘트구간에서는 내하력을 증가시키는 방향으로 부모멘트 구간에서는 감소시키는 방향으로 작용할 것이다. 측벽부에서는 열모멘트의 크기가 상부슬래브에 미하여 상대적으로 매우 작게 나타났다.

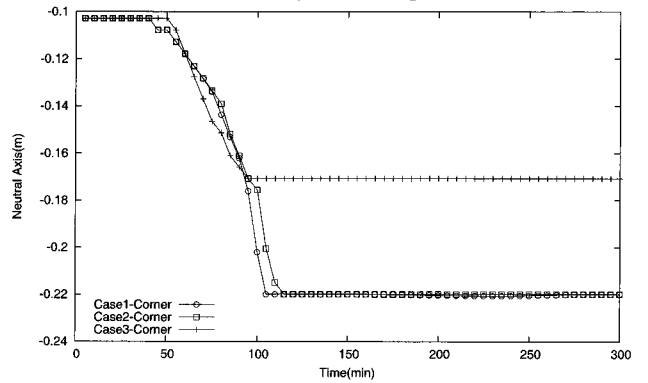
4.2 단면의 내하력평가

상부슬래브 중앙단면에서의 철근의 항복응력은 그림 8에서 보이는 바와 같다. 철근의 항복응력은 그림 2에서 나타낸 바와 같이 온도에 따라 급격히 감소하기 때문에 Case 1의 곡선에서 나타난 급격한 항복응력의 저하는 박리에 의해 철근이 화염에 노출되어 철근의 온도가 급격히 상승했기 때문이다. 따라서 실제로 이러한 현상이 발생하면 해당 단면에서 철근의 저항력을 기대할 수 없기 때문에 붕괴가 발생하는 것으로 가정할 수 있을 것이다. Case 2의 경우에는 이러한 급격한 항복응력의 감소가 완전히 발생하지 않고 온도가 하강함에 따라 다시 강도를 회복하는 것을 볼 수 있다. 철근이 화염에 노출되지 않은 Case 3의 경우에는 항복응력의 변화가 일어나지 않았다. 상부슬래브의 지점부는 주철근이 단면의 외측이 있으므로 상온을 유지하여 항복응력의 변화가 발생하지 않았다. 측벽부에서도 Case 1의 경우에만 약간의 감소를 보였으나 온도의 하강에 따라 다시 원상태를 회복하였다.

화재시 철근의 항복응력과 균형을 이루는 콘크리트의 중립축은 그림 9에 나타난 바와 같다. 인장측 철근이 박스의 내측에 위치하는 상부슬래브의 중앙단면에서는 그림 8에 나타났듯이 화재에 의한 온도상승으로 철근의 항복응력이 급격히 감소하기 때문에 중립축도 마찬가지로 급격히 변화한다. 반면 철근이 외측에 위치하는 상부슬래브의 지점부에서는 철근의 박리에 따라 중립축이 이동하게 된다. 따라서 단면의 중립축은 상부슬래브의 중앙부에서는 박리에 따른 철근의 온도 상승에 의해 지배되고 상부슬래브의 지점부에서는 박리로 인



(a) 상부슬래브 중앙



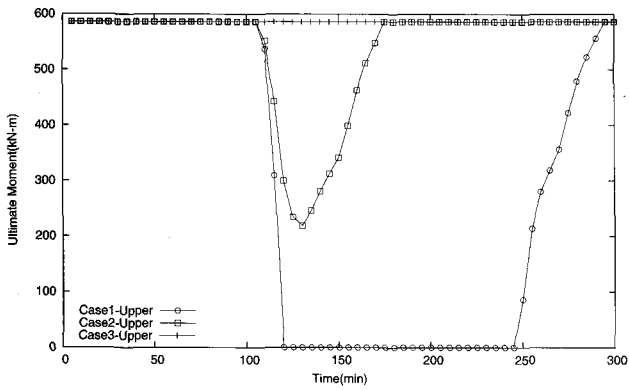
(b) 상부슬래브 지점부

그림 9 시간에 따른 중립축의 변화

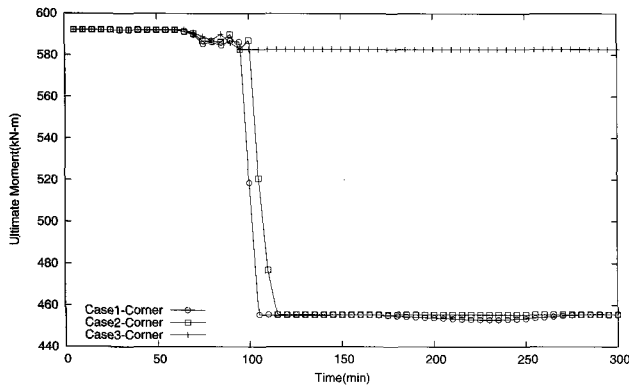
한 콘크리트의 단면변화에 의해 지배된다.

단면의 극한모멘트는 그림 10에 나타나 있다. 단면의 극한모멘트는 철근의 항복응력과 중립축에 의해 결정되기 때문에 이들의 이력곡선의 특징을 그대로 반영하고 있다. Case 1과 Case 2의 경우 화재발생후 100분후에 상부슬래브의 중앙단면과 지점부에서 급격한 내하력감소를 보여준다. 이는 박리에 의한 철근의 노출과 중립축의 이동에서 기인한 것이다. 그러나 철근이 노출되지 않은 Case 3의 경우에는 거의 일정한 극한 모멘트를 유지하고 있다. 측벽부에서의 모멘트는 Case 1의 경우 약 5%의 감소를 보였지만 상부슬래브에 비하여 미미하였다.

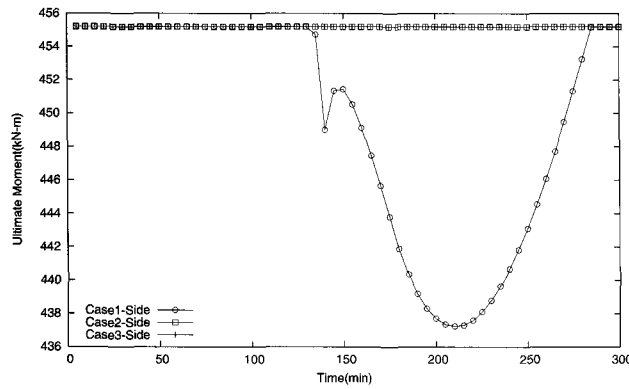
열모멘트와 극한모멘트를 동시에 고려한 단면의 내하력곡선은 그림 11에 나타나 있다. 정모멘트 구간인 상부슬래브의 내하력은 열모멘트가 하중에 의한 모멘트와 상쇄되는 방향으로 작용하기 때문에 화재초기에는 오히려 상승하는 거동을 보인다. 그러나 박리가 발생하여 철근이 노출되면 내하력은 급격히 감소한다. 하중이 상존하고 있는 실제 상태에서는 이러한 내하력의 급격한 감소는 구조물의 붕괴를 유발할 것이다. 화재의 지속시간이 상대적으로 짧은 Case 2의 경우는 내하력의 감소가 작았고, 철근이 노출되지 않은 Case 3의 경우에는 내하력 감소가 일어나지 않고 화재 종료에 따라 증가된 내하력이 원래의 내하력으로 복귀하는 거동을 보인다.



(a) 상부슬래브 중앙

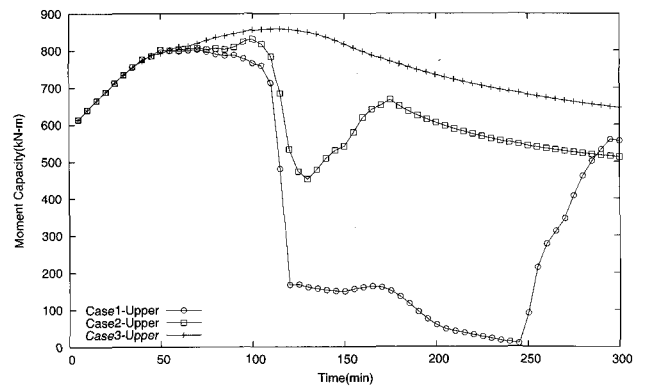


(b) 상부슬래브 지점부

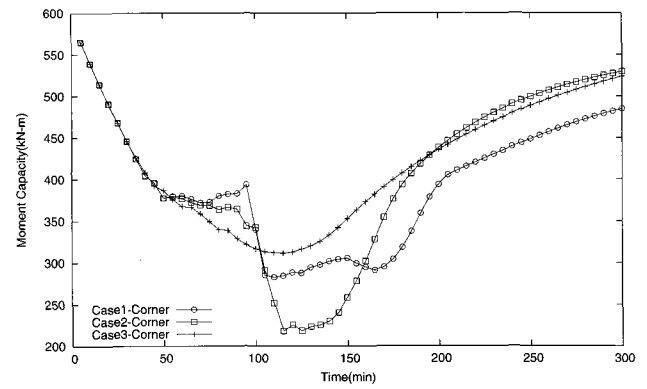


(c) 측벽부 중앙

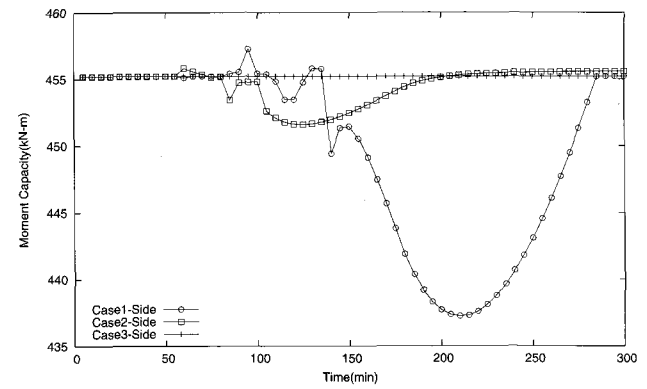
그림 10 하중에 대한 극한모멘트시간이력



(a) 상부슬래브 중앙



(b) 상부슬래브 지점부



(c) 측벽부 중앙

그림 11 내하력 시간이력

부모멘트구간인 상부슬래브의 지점부는 화재에 의한 열모멘트가 부재에 작용하는 하중과 같은 방향이기 때문에 화재 초기에 내하력의 감소가 발생한다. 그러나 내하력의 감소폭은 정모멘트구간에 비하여 작은 편이다. 이 부분에서 특기할 점은 재료의 열손상이 상대적으로 작은 Case 2가 화재의 지속시간이 가장 큰 Case 1보다 더 큰 내하력 감소를 보이는 것이다. 이는 철근의 항복응력이 일정한 값을 유지하는 부모멘트 구간에서는 콘크리트 단면에 의하여 지배되는 열모멘트의 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다. 측벽부에서는 화재의 지속시간이 긴 Case 1에서 약 5%의 내하력 감소가 일어났지만 그 값은 상부슬래브의 경우에 비하여 미미하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 1편에서 얻어진 지하박스구조물의 박리해석결과를 이용하여 구조물의 열모멘트와 극한모멘트를 고려한 내하력을 산정하고 화재시 거동을 분석하였다. 해석결과 박리에 의하여 철근이 노출되는 정모멘트 구간에서의 극한모멘트는 철근의 온도에 따른 항복응력에 의해서 좌우되고 부모멘트구간에 있어서는 박리에 의해서 발행하는 중립축의 이동에 따라 결정되는 것으로 나타났다. 전체적으로는 박스구조물의 화재시 내하력은 정모멘트 구간에 있어서는 철근의 항복에 의한 극한모멘트에 의해 지배되고 부모멘트 구간에서

는 열모멘트에 의해 지배되는 거동을 보였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-B-128-01) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- 이계희, 최익창** (2007) 박리를 고려한 지하박스구조물의 화재 하중해석 I: 박리해석, 한국전산구조공학회 논문집, 20(4), pp.477~483
- ABAQUS Inc** (2005) ABAQUS 6.5 User's Manual.
- Msaad, Y., Bonnet, G.** (2006) Analyses of Heated Concrete Spalling due to Restrained Thermal Dilation: Application to the "Chunnel" Fire, *Journal of Engineering Mechanics*, 132(10), pp. 1124~1132.
- Savov, K., Lackner, R., Mang, H.A.** (2005) Stability assessment of shallow tunnels subjected to fire load, *Fire Safety Journal*, 40, pp.745~763.
- Shi, X., Tan, T.H., Tan, K.H., Guo z.** (2002) Effect of Force Temperature Paths on Behaviors of Reinforced Concrete Flexural Members, *Journal of Structural Engineering*, 128(3), pp.365~373.
- Mounajed, G., Obeid, W.** (2004) A new coupling F.E. model for the simulation of thermal hydro-mechanical behaviour of concretes at high temperatures, *Materials and Structures*, 37, pp.422~432.
- Chung, J.H., Consolazio, G.R.** (2005) Numerical modeling of transport phenomena in reinforced concrete exposed to elevated temperatures, *Cement and Concrete Research* 35, pp.597~608.
- Caner, A., Zlatanic, S., Munfah, N.** (2005) Structural fire performance of concrete and shotcrete tunnel liners, *Journal of Structural Engineering*, 131(12), pp.1920~1925.
- Tanchev, R., Purnell, P.** (2005) An application of a damage constitutive model to concrete at high temperature and prediction of spalling, *International Journal of Solids and Structures*, 42, pp.6550~6565.
- Ulm, F.J., Coussy, O., Bazant, Z.P.** (1999a) The Chunnel'fire. I: Chemoplastic softening in rapidly heated concrete, *Journal Engineering Mechanics*, 1253, pp.272~282.
- Ulm, F.J., Acker, P., Levy, M.** (1999b) The Chunnel'fire. II: Analysis of concrete damage, *Journal Engineering Mechanics*, 1253, pp.283~289.