

PC Box 교량의 화재에 대한 열응력해석

The Fire induced Thermal Stress Analysis of PC Box Bridge

최창근* 이계희** 최인혁*** 김일곤****
Choi, Chang-Koon Lee, Gye-Hee Choi, In-Hyuk Kim, Il-Kon

ABSTRACT

In this study the fire, due to overturning of oil tanker on the bridge induced heat transfer analysis and thermal stress analysis are carried out. The results of analysis for fire history of 1 hour present very large thermal gradient near the surface. However, the temperature increase of tendon & rebar that is the main resistant member of bridge is not sufficient to change material properties. The Von-Mises yield criteria is used to calculate the depth of delamination, The depth of delamination is about 4cm at center of fire and this value is close to measured value.

1. 서론

구조설계 및 시공기술의 발달에 따라 도로에서 교량이나 터널 등 구조물이 차지하는 비중이 점차 커지고 있다. 특히 용지가 부족한 도심이나 산악지형에서는 이런 경향이 더욱 큰 편이다. 따라서 도로에서 일어나는 충돌이나 화재 등의 사고들이 이러한 도로구조물에 미치는 영향에 대한 검토의 필요성이 증가되고 있다. 이러한 경향의 연장선상에서 본 연구에서는 교량상에서 발생한 화재에 대하여 구조해석을 수행하고 구조물의 안전성을 검토하였다.

2. 화재개요

해석대상 구조물에 발생한 화재는 교량상을 주행하던 유조차의 전복에 의하여 발생하였으며 2

* 한국과학기술원 토목공학과 석좌교수
** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** (주)시텍건설턴트 이사
**** 시설안전기술공단 부장

개의 거더사이의 캔틸레버부에 주로 피해를 미쳤다. 화재시 유조차에서 유출된 유류가 두 거더사이의 틈으로 유출되어 캔틸레버부를 따라 흘러내리면서 화재가 진행되었으며 이에 의해 콘크리트에 최대 4cm깊이의 박리가 발생하였다. 화재 종료후 손상부위의 시료에 대한 화학적분석을 수행한 결과 화재시 최고 온도분포가 그림 1에서 보는 바와 같이 얻어졌다. 이 때 이와 같은 최고 온도분포는 지속시간은 10분 이내인 것으로 밝혀졌다.

표 1. 대상교량의 개요

준공년도	형식	길이	교폭	설계하중
1987.12	PC Box Girder (MSS공법)	10@50.0m=500m	11.0m	DB-24

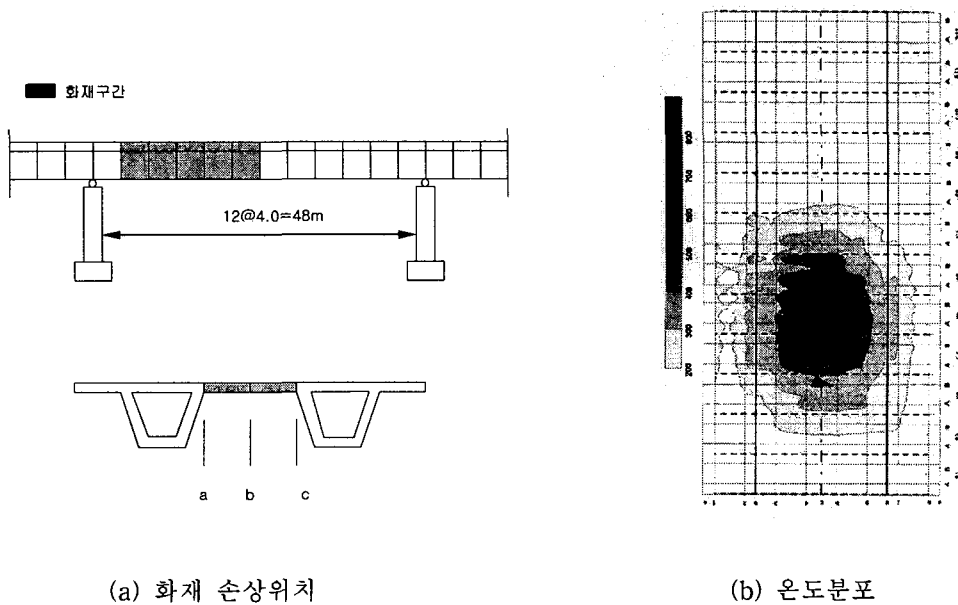


그림 1. 화재개요

3. 구조해석

3.1 온도에 따른 재료의 물성치

대상교량의 주 구조재료인 콘크리트의 물성치중에서 열전도 해석시에는 비열, 열전도율 등이, 구조해석시에는 열팽창계수, 압축강도, 탄성계수 등이 필요하다. 이외에도 열전도 해석시에는 대기

에 의한 열흐름을 고려하는 열확산계수 및 외기대류계수의 고려가 필요하다. 이중에서 콘크리트의 비열 및 열확산계수, 외기대류계수 등은 온도에 따른 변화를 무시할 수 있으므로 표 2와 같은 값을 구조해석에 사용하였다. 이밖에 온도에 따른 재료의 물성치 변화는 그림 2와 같이 고려하였다.

표 2. 열전도 해석물성치

콘크리트비열 J/(m ³ sec °C)	열확산계수 m ² /sec	외기대류계수 J/(m ² sec °C)
3.014 x 10 ⁶	8.86 x 10 ⁻⁷	11.63

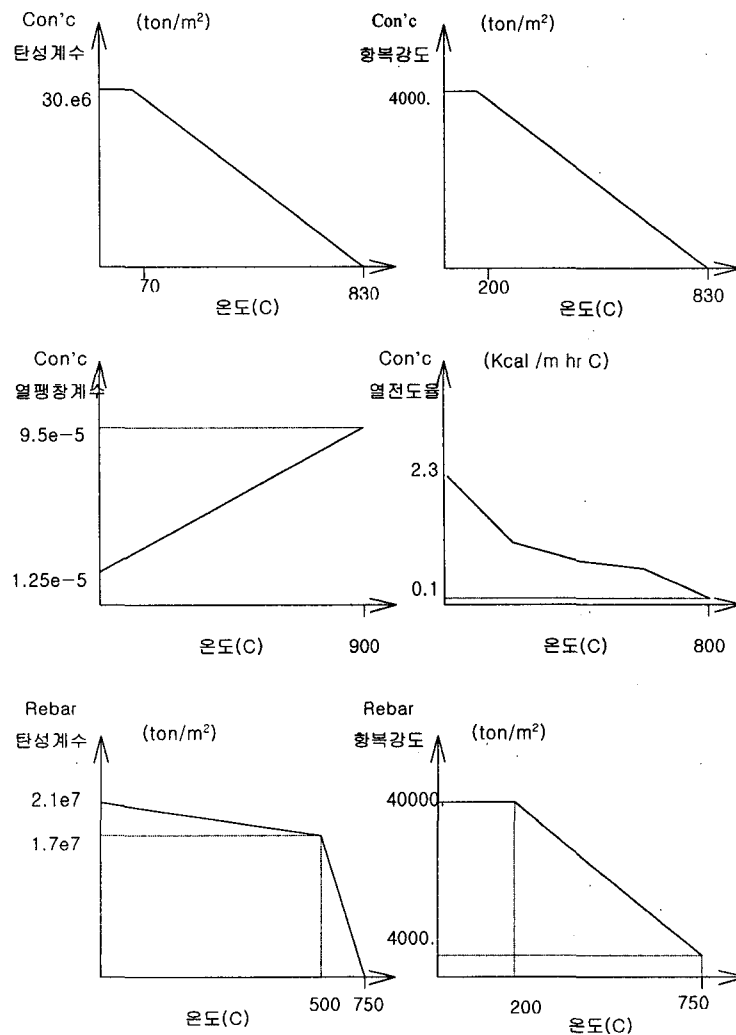


그림 2. 온도에 따른 재료의 물성치

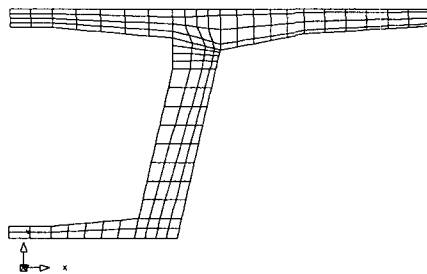
3.2 열전도 해석

3.2.1 2차원 해석

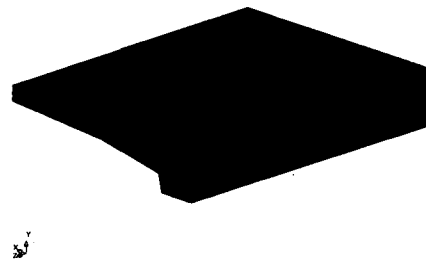
화재시 발생한 구조물표면의 고온이 시간에 따라 구조물내부로 전파되는 양상과 내부에서의 온도분포를 파악하기 위하여 열전도 해석을 수행하였다. 이 때 해석프로그램으로는 DIANA를 사용하였다.

대상구조물은 종방향으로 일정한 단면을 가지고 있기 때문에 단면에서의 온도분포의 산정을 통해 온도분포를 대략적으로 추정할 수 있다. 따라서 2차원 해석을 통하여 전반적인 단면의 온도분포를 산정하고 이를 기초로 3차원 모델링 및 해석을 수행하였다.

온도분포의 산정을 위한 단면의 2차원 모델링은 그림 3(a)과 같다. 여기서 각 요소는 8절점을 가진 열전도요소이며 외기와 접촉하는 부분과 화재 발생면에서는 대류에 의한 열전도를 고려하기 위하여 3절점 대류요소를 사용하였다. 앞에서 살펴본 바와 같이 콘크리트의 열전도율은 작은 편이기 때문에 화염과 직접 접하는 부분에서의 온도경사가 상당히 클 것으로 예상된다. 따라서 이 부분의 요소는 내부의 요소보다 훨씬 작은 크기를(Y방향, 요소망의 크기비 1:8) 갖도록 모델링하였다. 그러나 표면을 따라서는 온도경사가 그다지 크지 않을 것으로 예상되므로 균일한 크기(X 방향)의 요소를 사용하였다.



(a) 2차원 모델



(b) 3차원 모델

그림 3. 열전도 해석모델

위와 같은 2차원 모델이 작용하는 주어진 표면에서의 온도는 그림 4(a)과 같이 간략화하여 가정하였다. 이 때의 외기 온도는 0°C 로 가정하였다. 화재 후에도 3000초이후까지 발산에 의한 온도의 변화추이를 계산하였다.

화재에 의한 열하중의 입력은 구조물의 표면에 화재에 의한 온도이력을 직접 입력하여 해석을

수행하였다. 그러나 이 방법을 사용하여 열전도 해석을 수행하는 경우에는 화재에 의한 온도상승은 구조물의 경계조건에 해당되므로 적절한 가정에 의하여 고려할 수 있으나 화재 종료후의 온도 변화는 구조물의 물성치나 온도분포등 구조물 내부조건에 의해서이므로 적절한 가정이 불가능하다. 따라서 본 해석에서는 화재의 온도가 최고점에 달한 뒤 화재가 종료되었다고 가정하고 이후에는 외기와의 열교환에 의하여 구조물의 온도가 감소한다고 가정하여 해석을 수행하였다.

해석결과 온도상승은 표면부에 국한되었으며 특히 주부재인 PS Tendon부분의 온도상승은 무시할 정도의 작은 값을 보였다.

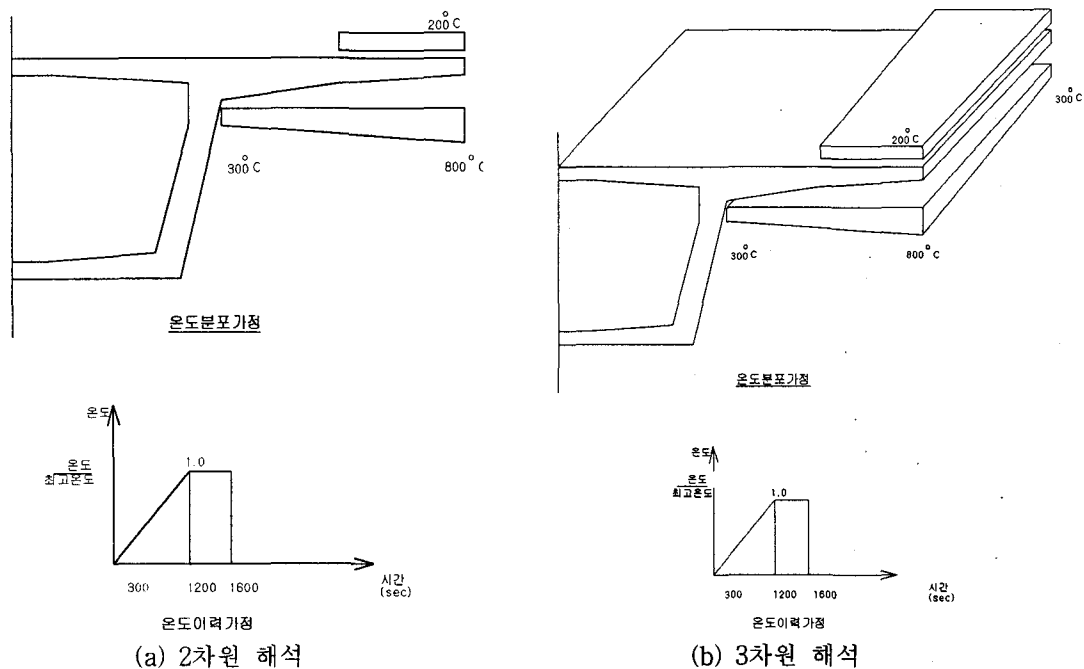


그림 4. 열전도 해석을 위한 온도분포

3.2.2 3차원 열전도 해석

앞 절의 2차원 해석에서 볼 수 있듯이 화재에 의한 온도 변화는 주로 캔틸레버부에 집중되어 있고 이외의 부분에는 온도변화가 거의 없었다. 따라서 캔틸레버부만을 3차원으로 모델링하여 열전도해석을 수행하였다. 이 때 얻어진 각 절점에서의 온도는 열용량 해석에 이용되었다.

그림 3(b)는 열전도 해석을 위해 캔틸레버부를 모델링한 것이다. 이 모델의 각 요소는 모두 20 절점인 3차원 열전도요소이고 각 요소의 표면에는 대류에 의한 방열효과를 나타내기 위하여 8절

점 2차원요소를 사용하였다. 이 해석모델에 적용한 3차원 온도분포는 그림 4(b)과 같다. 3차원 열전도 해석에서도 2차원 열전도 해석과 마찬가지로 화재의 온도가 최고점에 달한 뒤 화재가 종료되었다고 가정하고 이후에는 외기와의 열교환에 의하여 구조물의 온도가 감소한다고 가정하여 해석을 수행하였다.

위와 같이 3차원 모델을 이용하여 해석을 수행한 결과는 2차원 해석의 결과와 유사한 결과를 보였다. 3차원 해석의 경우도 2차원 해석의 경우와 마찬가지로 고온의 분포는 구조물의 표면에만 국한되며 단면의 깊이에 따른 분포는 급격한 경사를 보였다. 또한 화재중심부에서의 3cm정도의 깊이에서 200° C내외의 온도분포를 보여 물성시험에서 얻어진 콘크리트의 최대온도분포와 유사한 값을 보였다. 따라서 화재에 의한 영향은 콘크리트의 피복 두께이내에만 영향을 미치는 것으로 나타났다.

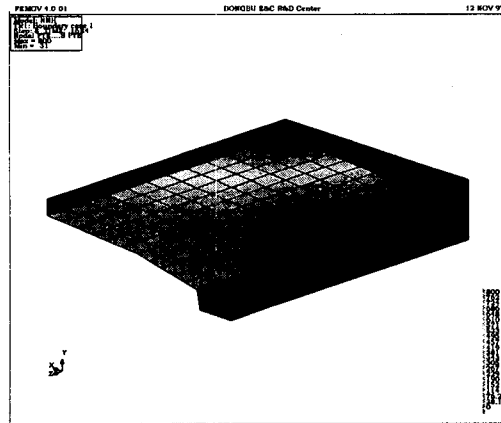


그림 5. 화재발생 1600초 후의 3차원 온도분포

3.3 열응력해석

열응력 해석에서는 앞 절의 열전도 해석에서 얻어진 온도분포를 이용하여 이에 의해 유발된 응력을 산정하였다. 해석모델은 3차원 열전도 해석에서 사용한 모델과 동일한 모델이나 대류에 의한 열확산을 고려하기 위해 모델링하였던 대류요소를 제거하고 지점조건을 적용하였다. 또한 캔틸레버부의 상부근과 하부근을 고체요소에 매입되도록 모델링하였다. 또한 자중에 의한 휨모멘트 및 PS힘에 의한 영향을 고려하여 교축방향으로 20.0 kg/cm²의 압축력을 작용시켰다.

해석에 사용한 구조물내부의 온도분포는 최고온도를 보인 화재발생후 1600초후의 3차원열전도 해석에서 얻어진 온도분포이다.

온도분포에 의해 얻어진 응력의 분포는 그림 6에서 보는 바와 같다. 여기서 볼 수 있듯이 표면에서의 응력분포는 화재중심부보다 화재온도가 낮은 외각부에서 큰 값을 보인다. 이는 온도의 증

가에 따른 콘크리트 항복강도의 저하로 낮은 응력에서 재료가 항복함에 따라 나타나는 현상이다.

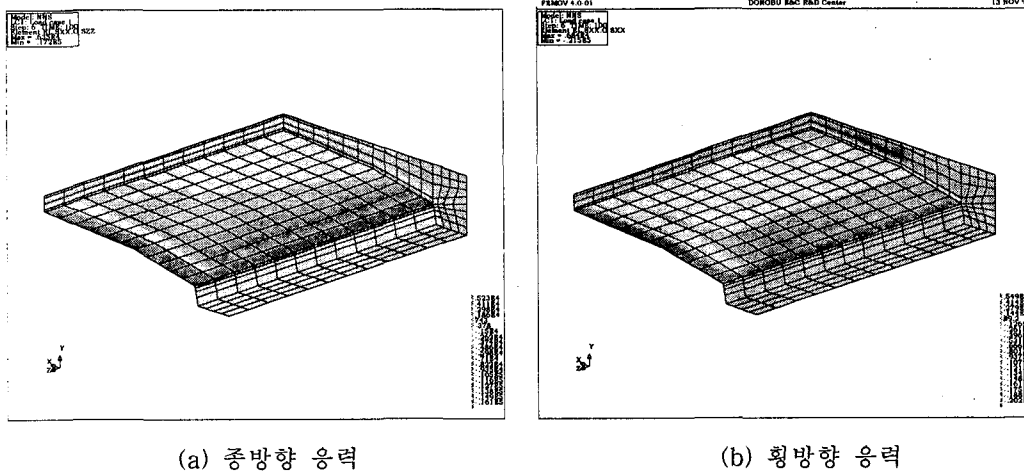


그림 6. 열응력분포

3.4 박리깊이의 산정

온도에 의한 박리의 발생메카니즘은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째 온도상승에 의한 열팽창이 주변의 콘크리트에 의하여 구속되어 큰 압축응력이 발생하게 되고, 이 때 압축응력이 콘크리트의 압축강도를 초과할 경우 콘크리트의 표면에 crushing나 좌굴과 유사한 현상이 일어나면서 박리가 일어나게 된다. 또 하나의 원인은 구조물내의 수증기압력이 온도와 함께 증가하여 큰 인장응력을 유발하고 박리를 일으키게 된다. 그러나 구조적으로 규명할 수 있는 부분은 첫 째 경우가 대부분이다. 따라서 화재에 의한 박리현상은 콘크리트의 압축력이 압축강도를 초과하여 발생하는 것으로 가정하였다. 그러나 일반적으로 언급되는 콘크리트의 압축강도는 1축압축강도이므로 본 해석에서는 Von-Mises항복조건을 적용하여 재료의 항복을 판단하였다. Von-Mises항복조건에 의하면 재료의 항복은 다음과 같은 조건을 만족시키는 경우 발생한다.

$$\frac{1}{6} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} \geq \frac{\sigma_y^2}{3}$$

이 때 좌항을 second invariant라 하며 J_2 로 표기한다. 화재의 중심부에서 깊이에 따른 J_2 의 값은 그림 7과 같다. 이 경우 화재의 중심부에서 표면부의 J_2 값이 내부보다 작은 것은 고온에 의하여 재료의 항복강도가 저하되어 낮은 응력에서 항복이 일어난 원인과 구속조건에 의한 것으로 판단되었다.

이와 같은 조건에 의해 박리가 재료의 항복점 부근에서 일어난다고 가정하면 화재중심부에서

최대 박리깊이는 4cm 정도로 철근의 피복두께이내에서 발생하는 것으로 나타났다.

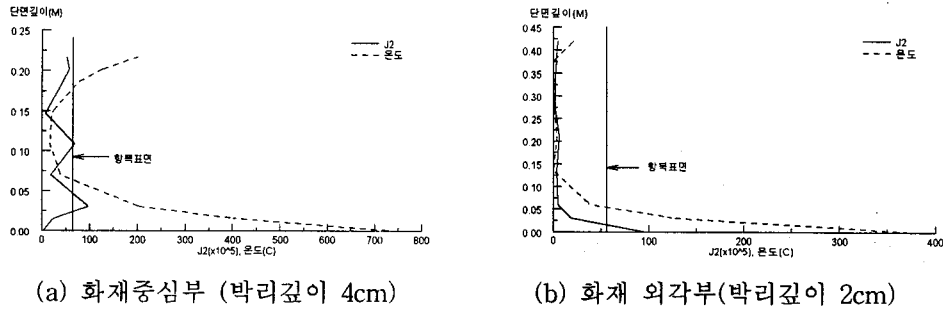


그림 7. 박리깊이의 산정

4. 결론

본 논문에서는 PC Box교량에 발생한 화재에 의한 열전도 해석 및 열응력 해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트의 표면에서 발생한 열전도해석시 표면에서 급격한 온도경사가 발생하므로 이 부분의 모델링시 이에 대한 적절한 고려가 필수적이다.
- 2) 콘크리트의 낮은 열전도를 때문에 1시간정도 지속된 화재에 의한 영향은 일반적인 피복 깊이이내이다.
- 3) Von-Mises 항복조건을 적용하여 박리깊이를 구한 결과 실제 현장에서 발생한 박리깊이와 근접한 값을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. ACI216R-89, *Guide for determining the fire endurance of concrete elements*
2. TNO Building and Construction Research, *DIANA 6.1 User's Manual*, 1996
3. 시설안전기술공단, *노량대교 정밀안전진단보고서*, 1997
4. 김진근, 김국한, 양주경, "온도저감 공법을 고려한 콘크리트의 수화열해석기법에 관한 연구," 한국콘크리트 학회 논문집, 제7권, 제6호, 1995.
5. Chidiac, S.E. and Mirza, F.A. "Thermal stress analysis 열 새 welding processes by the FEM," *Computer & Structures*, Vol. 46, No. 3, 1993