

박리를 고려한 지하박스구조물의 화재하중해석 I : 박리해석

Fire Loading Analysis of Underground Box Structure with Considering of Concrete Spalling I : Spalling Analysis

이 계 희†

최 익 창*

Lee, Gye-Hee

Choi, Ik-Chang

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

요 지

본 연구에서는 전력구나 공동구와 같은 지하 콘크리트박스구조물의 화재발생시 온도분포와 박리거동에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 온도장은 터널화재에 사용하는 화재곡선을 기본으로 하고 화재시 내부공간에 대한 열유체해석을 수행하여 온도분포를 결정하였다. 박리거동은 탈수화도를 따라 콘크리트의 온도가 기준값에 도달하였을때 발생하는 것으로 하였다. 이때 박리가 일어난 요소를 제거하고 경계조건과 요소망을 재생성하여 해석을 반복수행하였다. 3개의 화재시나리오에 따라 해석을 수행하였고, 해석결과는 각 시나리오별로 타당한 박리거동을 보여주었다. 각 시나리오에 따른 구조물의 내하력은 본 논문의 2편에서 산정되었다.

핵심용어 : 화재해석, 콘크리트박리, 모델재구성

Abstract

In this study, the numerical fire analysis for temperature distribution and spalling behavior of underground concrete box structures that contained lifelines, such as power cables and communication cables. The temperature field of inner space was assumed based on the fire curve with the thermal gradient obtained from CFD analysis. It was assumed that the spalling behaviors of concrete are occurred when the concrete temperature reached the threshold, as dehydration degree. In this case, the elements correspond to spalling parts were removed and the analysis model were updated. Three fire scenarios were analyzed and the results were showed adequate spalling behavior. The bearing capacities of the box structures would be estimated in the companion paper.

Keywords : fire analysis, spalling of concrete, model update

1. 서 론

현대 도시의 지하는 통신케이블이나 전력케이블을 포함하는 많은 박스구조물이 설치되어 있다. 이들 케이블의 절연재료는 폴리에틸렌(polyethylene), 가교 폴리에틸렌(cross-linked polyethylene), 합성고무 등이 사용되고, 피복재료로는 염화비닐(PVC), 클로로프렌(chloroprene) 등이 사용되고 있다. 케이블의 피복재는 일반적으로 자체 난연성능을 가지고 있는 것으로 인식되고 있으나 대부분의 케이블은 일단 불이 붙으면 쉽게 연소하고 장기간에 걸쳐 연소한다. 케이블 화재는 목재 등과 비교해서 연소에너지가 대단히 크고, 유독

가스를 많이 발생하므로 소화하기 어렵고 인명 피해가 발생하기 쉽다. 행정자치부 화재통계 연보에 의하면 2001년도 우리나라 전체화재 건수는 36,169건이며, 이중 전기화재가 12,300건으로 34%를 차지하고 있으며, 전기화재 중 55.2%가 케이블 등 배선에 의한 화재이다. 우리나라 뿐만 아니라 미국, 일본 등 선진국가에서도 케이블에서 화재가 발생되어 인명과 재산손실이 발생되고 있다.

이와 같은 지하박스구조물에서 발생하는 화재는 일반적인 화재보다 지속시간이 길며, 또한 밀폐된 공간에서 발생하기 때문에 화재시 온도 상승이 큰 것이 특징이다. 이러한 화재에 의한 고온이 지속적으로 유지되면 비교적 내화성이 큰 콘크리

† 책임저자, 정회원 · 목포해양대학교 해양시스템공학부 조교수
Tel: 061-240-7237 ; Fax: 061-240-7284
E-mail: lghlsk@mmu.ac.kr

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 10월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2007년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

트 구조라 할지라도 온도증가에 따른 물성치의 열화와 온도변화에 의한 자체구속 및 콘크리트 내부의 수증기압에 의해 압쇄(crushing)되면서 철근피복이 박리되게 된다. 이는 철근의 급격한 온도증가를 유발하게 되며 열에 대해 취약한 재료인 철근의 항복을 유발하여 구조물의 내하력을 급격히 감소시키게 된다. 이는 특히 지하 깊숙히 설치되어 암반의 아치효과에 의하여 자립하고 있는 심층터널보다 토층에서 토압 및 수압 등의 상시하중을 지지하고 있는 박스형태의 지하박스구조물에 있어서는 이러한 영향이 더욱 커지게 된다. 현 설계기준에서는 케이블의 가설시 화재가 발생하지 않도록 예방하는 출화방지에 중점을 두고 있으나 화재가 발생한 후에 구조물에 미치는 영향에 대한 평가나 기준은 전무한 상태이다.

본 연구에서는 이러한 지하박스구조물에서 발생하는 화재기 박리를 고려한 구조물 자체의 거동과 내하력을 일련의 화재시나리오에 따라 산정하여 화재시 일어나는 구조물의 거동에 대한 이해를 높이고자 한다. 본 논문에서는 온도장의 구성과 박리를 고려한 열해석에 대하여 서술하고 박리를 고려한 구조물의 내하력 변화는 본 논문의 2편(이계희 등, 2007)에서 서술될 것이다.

2. 온도장의 구성

2.1 피복재의 발열량

전선의 피복은 대부분이 PE, PP 및 PVC류와 종이 등으로 이루어져 있는데, 종이를 제외하고는 모두 석유화학제품인 합성수지로서 이들과 같은 고분자류들은 높은 발열량을 가지고 있다. 전선 피복류의 발열량을 발열량 분석계를 통하여 분석한 결과의 예가 표 1과 같다(윤진한, 2005). 이 표에서 보는 바와 같이 전선의 피복은 고발열량의 물질로서 약 8,000kcal/kg이상의 높은 열량을 가지고 있다.

2.2 화재곡선

토목구조물에 화재가 발생하면 화재로부터 연소재의 성질에 따라 다량의 가스화 화염에 의한 온도 상승이 발생한다. 특히 지하박스구조물과 같은 밀폐된 공간에서 발생하는 화재

표 1 전선 피복류의 발열량 분석결과 예

발열량(kcal/kg)			
1회	2회	3회	평균
7865	7874	7836	8231
8540	8642	8631	

의 경우에는 화재시 발생하는 열과 가소성 가스의 배출이 원활하지 않기 때문에 시간에 따라 온도가 상승하게 된다. 토목구조물의 입장에서 보면 가스 등에 의한 화학반응으로 발생하는 단면의 손상은 일반적으로 무시할 수 있으므로 구조물에 영향을 주는 주된 요인은 온도상승에 의한 하중이다. 이러한 시간에 따른 온도의 변화를 나타낸 곡선을 화재곡선(Fire curves)이라 한다. 화재곡선중 터널에서 적용이 가능한 화재곡선은 RABT화재곡선과 RWS곡선이 있다(Haak, 1998). RABT 곡선은 유레카프로젝트와 같은 일련의 화재시험의 결과로 얻어진 화재곡선이다. 이 곡선에서는 화재초기에 급격한 온도상승이 있는데 화재발생후 5분만에 1200°C의 온도에 도달한다. 그러나 이 최고온도의 지속시간은 다른 곡선들에 비해 짧은 편인데 도로터널의 경우에는 30분, 철도터널의 경우에는 60분의 최고온도지속후 이후 110분에 걸쳐 온도가 감소하는 것으로 규정되었다. 기본적으로 이 화재곡선은 터널내의 화재에 대한 것이고 터널내에 연소재가 일정한량으로 제한되는 것을 가정한 것이다.

RWS화재곡선은 네덜란드의 운수성인 Rijkswaterstaat에 의해 개발되었다. 이 곡선은 50m³의 연료를 실은 탱크롤리가 300MW의 화재강도를 120분동안 지속하는 경우를 최악의 경우로 보고 산정되었다. 이 곡선은 1979년에 네덜란드의 TNO에서 수행된 실험에 기초를 두고 있으나 최근의 노르웨이에서 수행된 Runehanar터널의 실험규모화재시험의 결과를 반영해 수정되었다.

이외에도 Hydrocarbon곡선이나 Cellulosic화재곡선 등이 있는데, 이들 곡선은 열린 공간을 가정하고 작성되어 주로 건축물의 화재 등에 이용된다. 따라서 인접한 대기로의 열의 소산을 기대할 수 없는 RWS화재곡선의 경우 Hydrocarbon의 경우보다 더 큰 온도상승이 기대된다. 전체적으로 RWS화재곡선은 석유류화재의 빠른 온도상승과 연소가 끝난 후의 점진적인 온도감소를 가정하고 있다. 각 화재곡선의 형상비교는 그림 1과 같다.

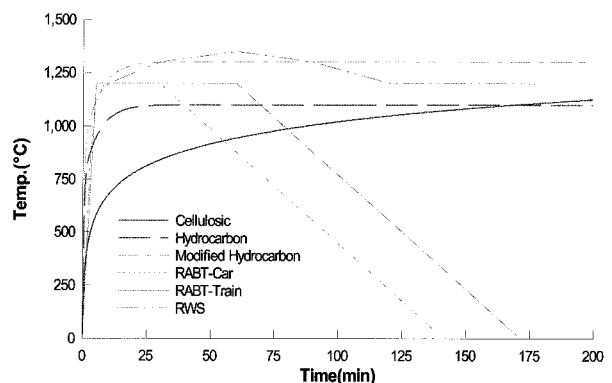


그림 1 각종 화재곡선의 비교

이와 같은 화재곡선들의 특징을 살펴볼 때 지하박스구조물에 적용가능한 화재곡선은 RABT와 RWS라 할 수 있다. 그러나 내부공간에 비하여 가연성물질의 양이 많은 지하박스구조물의 특징을 고려하여 불 때 화재하중의 지속시간이 긴 RWS곡선을 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

화재곡선은 주어진 화재환경과 밀접한 관련이 있고 이러한 모든 점을 수치적으로 고려하기는 쉽지않기 때문에 많은 실험을 통해서 얻어지고 있다. 또한 이들 화재곡선들은 설계기준이라는 측면이 있기때문에 개별적인 화재들의 특성을 모두 포괄하는 경향을 가지고 있다. 이러한 점에서 불 때 각각의 지하박스구조물에 대한 화재곡선의 산정은 실험에 우선적으로 기반해야 할 것으로 판단된다.

2.3 단면내 온도분포

앞절에서 살펴본 화재곡선에서 제시하고 있는 온도는 터널 내의 평균적인 온도이고 지하박스구조물 내부의 온도분포는 제시되지 않고 있다. 지하박스구조물의 구조적인 거동을 지배하는 열거동은 재료의 특성의 변화나 박리로 인한 단면손실과 각 부분의 온도차로 발생하는 자체구속에 의한 상대적인 변형으로 요약할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이들 조건들은 최대한 이상적으로 가정하여 화재발생 초기의 열유체 해석을 수행하여 내부 각위치에서의 온도분포를 산정하였다. 온도분포의 특징들은 기존 화재곡선들과 결합하여 열하중에 의한 지하박스구조물의 화재거동을 추정하는데 사용되었다.

3. 화재시 박리현상의 모델링

박리의 발생을 설명하는 이론은 크게 수증압에 의한 이론과 자체구속에 의한 이론이 있다(Ulm 등, 1999a). 최근 박리의 진행을 화학적인 재료의 변화와 열팽창 및 소성거동의 복합적인 결과로 해석하는 접근법이 개발되었다(Msaad 등, 2006). 이 이론은 박리의 진행을 온도의 함수로 파악할 수 있다는 결론을 얻었으며 이에 따라 온도해석과 응력해석을 분리할 수 있다.

콘크리트의 탄성계수는 골재와 시멘트풀사이의 접촉이 깨어지면서 감소한다. 따라서 탄성계수는 수화물의 질량과 비례한다고 가정할 수 있다. 이 비례관계는 콘크리트 재료의 고유성질이다. 따라서 화재후 탄성계수 $\xi = m_h/m_{h0}$ 에 따른다고 가정할 수 있다.

$$E = \xi E_0 \tag{1}$$

탈수화도(dehydration degree)는 특정시간(τ_ξ)에서의

접근한계($\xi_{eq}(T)$)를 따르는 화학적활성도에 따른 화학반응으로 나타낼 수 있다.

$$\xi = -\frac{1}{\tau_\xi}[\xi - \xi_{eq}(T)] \tag{2}$$

여기서 $K(T) = \frac{E(T)}{3(1-2\nu)}$ 이고 $G(T) = \frac{E(T)}{2(1-\nu)}$ 이다.

소성변형을 고려하기 위하여 소성류를 적용하면 소성변형은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d\varepsilon^{pl} = d\lambda \frac{df}{d\sigma} \tag{3}$$

여기서 $d\lambda$ 는 소성계수로 소성류가 발생하는 경우($f = \dot{f} = 0$)에만 양이다.

한 방향으로 긴 터널의 특성상 2차원 모델의 사용이 일반적이므로 접근을 간단히 하기 위하여 원통형좌표계를 가정한다. 이 때 반경방향(r)은 벽체의 두께 방향으로 가정할 수 있고 원주방향(θ)은 벽체와 평행한 방향으로 가정할 수 있다. 길이방향은 z 좌표로 나타낸다. 이러한 좌표계의 도입은 전체구조계를 축대칭으로 모델링할 수 있도록 한다.

소성변형이 발생하지 않은 상태인 열탄성영역에서 응력의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\sigma = \hat{C}d\varepsilon^el = \hat{C}(d\varepsilon - d\varepsilon^{th}) \tag{4}$$

우리가 화재시 관심을 가지는 박리는 주로 벽체와 평행한 방향으로 일어나므로 벽체방향의 응력은 상대적으로 매우 작고 원주방향의 변형은 구속되어 있으므로 다음과 같은 조건을 가정할 수 있다.

$$\sigma_{rr} \approx 0 \tag{5}$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} \approx 0 \tag{6}$$

따라서 벽체 및 길이방향의 응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{zz} \approx \sigma_{\theta\theta} \approx -\frac{E_0}{1-\nu} \alpha \int_{T_0}^T \xi_{eq}(T) dT \tag{7}$$

이 식은 소성류가 발생하지 않은 경우에만 타당하다. 응력이 소성상태에 도달한 경우 탄성거동은 탄성영역에서 하중이 증가하는 경우로 국한된다. 따라서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$|\sigma_{zz}| = -\sigma_{zz} \leq \frac{3\rho_0\delta_i}{-2\delta_i + \sqrt{3}} \xi_{eq}(T) = f_{bc} \xi_{eq}(T) \tag{8}$$

표 2 일축압축강도에 대한 소성화온도

일축압축강도(MPa)	소성화온도(°C)
30	116.4
35	130.5
40	144.3

여기서 f_{bc} 는 압축강도이다. 위의 두식을 조합하면 소성류가 발생하는 소성화온도 T_{pl} 에 대한 방정식을 결정할 수 있다.

$$\frac{E_0}{1-\nu} \alpha \int_{T_0}^T \xi_{eq}(T) dT = f_{bc} \xi_{eq}(T_{pl}) \quad (9)$$

여기서 온도에 따라 선형으로 변화($T < 773^\circ\text{K} = 500^\circ\text{C}$) 한다고 가정한 ξ_{eq} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi_{eq}(T) = 1 - \frac{0.83}{500}(T - T_0) \quad (10)$$

이 식에 따른 소성화온도 T_{pl} 은 표 2와 같이 구할 수 있다. 선형영역에서 가정하였던 것과 같이 원주방향의 탄성변형률과 반지름방향의 응력을 무시할 수 있다고 가정하면 $\sigma_{\theta\theta} \approx \sigma_{zz}$, $\epsilon_{\theta\theta}^{pl} \approx \epsilon_{zz}^{pl}$ 라 할 수 있고, 소성화온도가 초과되었으므로 응력은 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{zz} = \frac{3\rho_0\delta_i}{2\delta_i - \sqrt{3}} \xi_{eq}(T) = -f_{bc} \xi_{eq}(T) \quad (11)$$

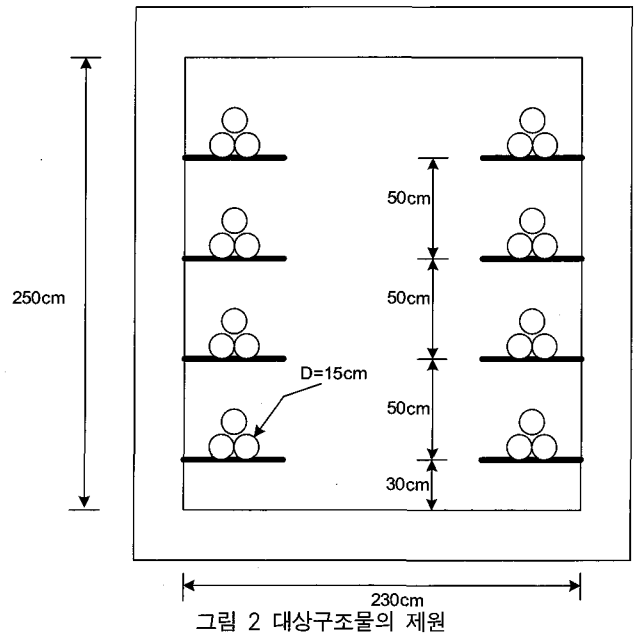
이상과 같은 관계를 이용하여 박리가 일어나는 조건을 정리하면 다음과 같다. 만일 임의의 반경까지 소성화온도인 T_{pl} 를 초과했다고 가정하면 이 반경보다 큰 영역의 콘크리트는 소성화온도 보다 낮은 상태이고 따라서 선형거동을 하게 된다. 경계선에서 축응력의 변화율을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial r} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{E_0}{1-\nu} \alpha \xi_{eq}(T) \frac{\partial T}{\partial r} > 0 \quad (12)$$

경계선에서 내측으로 응력을 산정하면 이 영역은 소성거동을 하기 때문에 $\sigma_{zz} = -\epsilon_{eq}(T) f_{bc}$ 이고, 따라서 응력의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial r} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} = -f_{bc} \frac{\xi_{eq}(T)}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} < 0 \quad (13)$$

따라서 소성영역을 전후하여 응력의 변화율이 급격히 변하고 이러한 현상을 박리로 설명할 수 있다. 이는 박리가 소성화영역의 경계에서 일어난다는 것을 말하고, 이는 소성영역의 기준이 온도의 분포로 설명할 수 있다. 다시 말하면 박리현상



은 콘크리트단면에서의 온도분포의 함수로 설명할 수 있으며 이는 온도해석과 구조물의 응력해석을 분리하여 열전도해석에 의한 온도분포로만 박리영역을 산정할 수 있음을 말한다.

4. 수치해석

4.1 열유체해석

4.1.1 모델링

대상구조물은 전력선이 설치된 박스구조물로 그림 2에서 보이는 바와 같다. 해석모델은 ANSYS/FLOTTRAN(ANSYS, 2005)의 CFD요소를 사용하여 단위폭을 가정한 2차원으로 모델링하였다. 내부의 공기영역만을 모델링하였으면 이 영역을 수평방향과 수직방향의 정방형 요소로 분할하였다.

해석 초기조건으로는 내부의 온도를 절대온도로 하여 293°K 로 가정하고 외부경계에서의 속도벡터는 0으로 경계조건을 부여하였다.

해석대상 재료 물성치는 프로그램에서 제시하고 있는 공기의 역학적 성질을 이용하였고, 해석시 대류효과를 고려하고 온도에 의한 밀도변화를 고려하였으나 공기자체의 비열이나 전달률이 온도에 따라 변하는 것을 고려하지 않았다. 열에 의해 발생하는 공기의 흐름은 층류로 가정하고 비압축성거동을 하는 것으로 가정하였다.

전력선의 연소에 의한 발열은 그림 3과 같이 PVC의 발열 곡선(Heat release ratio curve)을 Heat Generation으로 모델링하여 고려하였다(Numajiri 등, 1998). 이 곡선은 평균적으로 표면의 50%가 연소한다고 가정하고 전력선의 단위

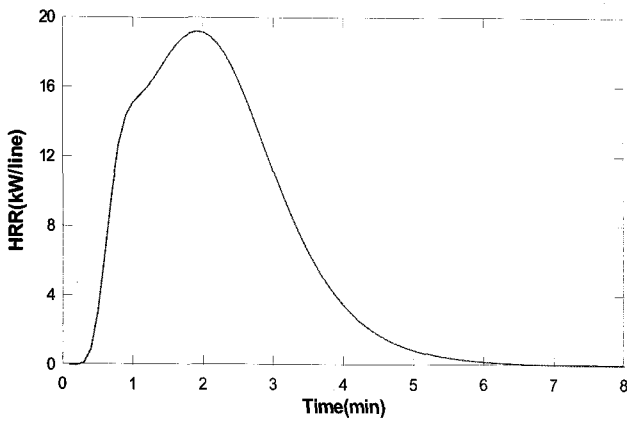


그림 3 전선당 피복재의 발열곡선

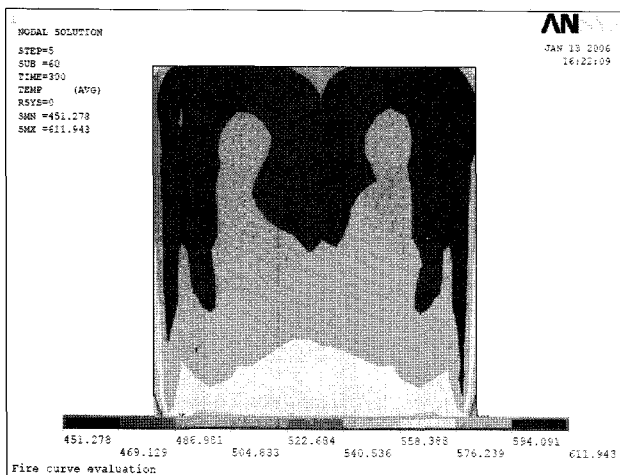


그림 4 화재발생시 5분후의 내부의 온도분포

길이당 발열량을 계산한 것이다. 결과적으로 전력선 하나당 최대발열량은 19.2kW로 하였고, 이 값은 발화후 2분내에 도달하는 것으로 하였다. 최대발열량을 보인 이후로는 동일한 발열량을 수시간 이속 지속하여야만 전력선이 가진 총열량을 발열할 수 있으므로 해석시에는 최대 발열량에 도달한 후 해석시간 내내 최대발열량을 지속하는 것으로 가정하였다.

4.1.2 해석결과

얻어진 온도분포의 결과를 보면 벽면을 따라서 배열된 전력선의 피복이 연소하면서 발생하는 열에너지가 대류현상을 일으켜 벽면과 상부 슬래브에 높은 온도가 발생하는 것을 알 수 있다(그림 4). 온도분포도에서는 양측에서 발생한 대류 현상이 합류하는 상부슬래브의 중앙부가 다른 부분보다 낮은 온도를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 이는 단면의 중심선에 대한 대칭을 이루기 때문에 기인한 것으로 보이며 실제 연소시에는 양측이 완전한 대칭을 이루며 열에너지를 생성할 가능성은 적기 때문에 상부슬래브의 전면에서의 온도차는 크지 않을 것으로 보인다. 결과적으로 상부슬래브와 하부슬래브의 온도차는 평균온도의 7%로 나타났다. 따라서 이 결과

표 3 박리 해석시 고려된 화재시나리오

화재시나리오	화재지속시간	냉각시간
Case1	180분	120분
Case2	60분	120분
Case3	30분	120분

를 열전도 해석시 화재곡선의 온도 시간이력과 조합하여 사용하였다. 이러한 온도차는 상부슬래브에 박리가 집중되는 현상을 설명할 수 있다.

4.2 박리해석

4.2.1 화재시나리오

본 연구에서는 RWS를 기준으로 하여 최고온도에 도달 후 일정한 온도가 지속되고 RABT의 온도 감소 곡선을 따르는 것으로 하였다. 본 해석에서는 최고온도의 지속시간을 해석 파라미터로 하여 표 3과 같은 조건으로 일련의 해석을 수행하였다. 이 해석은 범용구조해석프로그램을 이용하여 수행되었다(ABAQUS Inc, 2005).

4.2.2 요소망의 구성

열해석의 주요과정은 온도에 따른 표면의 박리이다. 이를 모델링하기 위하여 다음과 같은 과정을 수행한다.

- 평면변형률가정을 도입한다.
- 구조물의 대칭성을 고려한다.
- 철근의 열전도율을 고려한다.
- 온도에 따른 열역학적 재료비선형성을 고려한다.
- 박리발생시점은 해당요소의 온도가 소성화온도에 도달한 경우 일어난다고 가정한다.
- 이러한 박리깊이는 상부슬래브의 경우 덮개의 1.5배의 두께, 측면의 경우는 덮개까지 하부슬래브의 경우에는 덮개의 1/2까지 일어난다고 본다.
- 박리가 일어나는 평균두께는 5mm로 가정하고 폭은 5cm내외로 가정한다. 요소망은 이러한 박리형상을 나타낼 수 있도록 작성한다.

박리가 일어나도 철근 등에 의해 박리된 조각이 탈락하는 것이 방지되는 경우도 있다. 이러한 경우에는 구조적으로는 강도가 발현하지 않지만 열전달해석에 있어서는 화염을 차단하기 때문에 박리가 일어나지 않은 경우와 동일한 거동을 한다. 따라서 이러한 영향을 해석에 고려하기 위하여 상부 슬래브에서는 철근덮개의 1.5배, 측면에서는 철근덮개, 하부슬

표 4 구조재료의 열특성

	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

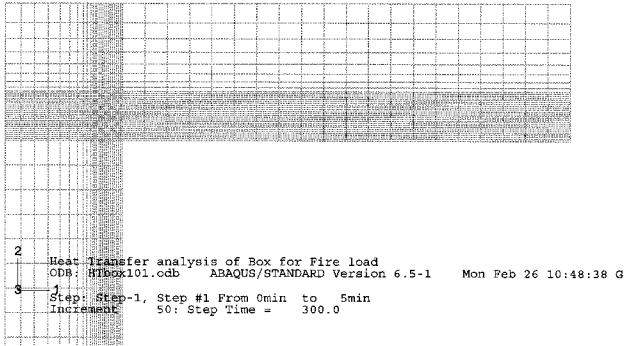


그림 5 요소망의 상세

래브에서는 철근뿔개의 1/2까지의 깊이만 박리가 발생한다고 가정한다. 박리가 발생하지 않은 경우에 열전도에 의한 부재 온도상승 및 이에 의한 강성의 저하는 계속적으로 고려한다.

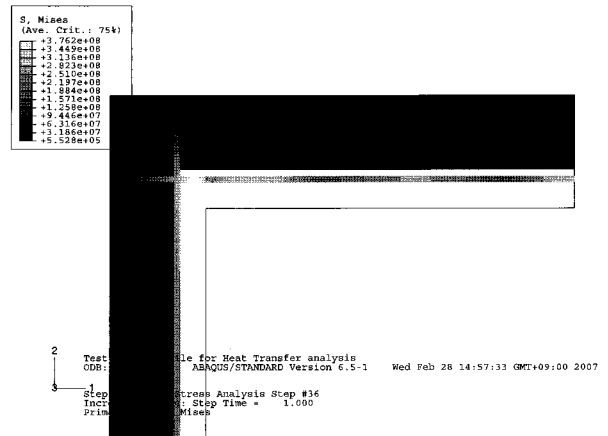
박리 현상은 요소의 소멸로 구현되므로 요소의 두께는 박리깊이를 구현하는 최소단위가 된다. 본 연구에서는 화염에 직접 접하는 부분의 요소두께를 5mm로 하여 박리의 최소두께를 나타내었다. 횡방향으로는 5cm내외의 크기를 부여하여 지나치게 큰 중형비로 인한 정확도의 감소를 고려하였다.

철근망의 두께는 2cm로 하였고 콘크리트요소망에 추가되는 것으로 나타났었다. 일반적으로 구조물에는 주철근에 직각인 방향으로도 배력근을 배치한다. 배력근은 구조물의 강성에는 영향을 주지 않으나 열전달은 가능하게 하므로 재료물성치 중 열해석에 관한 부분은 배력근을 고려하여 재계산하였고, 구조물의 강성을 해석하는 경우에는 배력근을 무시하였다.

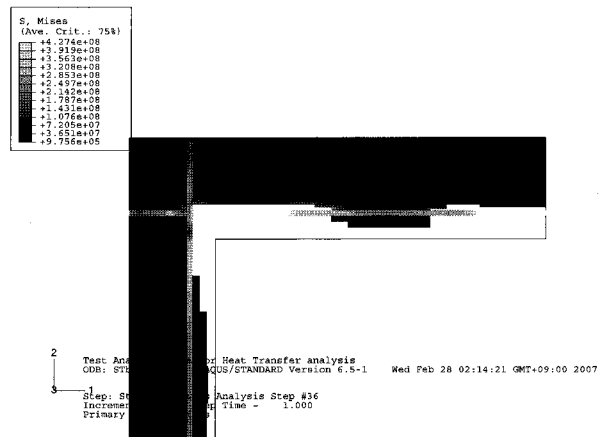
철근요소와 콘크리트 요소가 중복되는 영향은 응력해석에 있어서는 인장부위이고 높은 온도에서 콘크리트의 강성이 작아지는 점을 고려하여 주 내하요소가 철근이라는 가정을 하에 무시하였다. 열해석에 있어서 상대적으로 열전도율이 낮은 콘크리트보다는 철근망에 의하여 열전도가 주로 이루어질 것이므로 중복면적에 대한 고려를 생략하였다. 이와 같이 모델링한 단면의 상세에는 그림 5와 같다.

4.2.3 해석결과

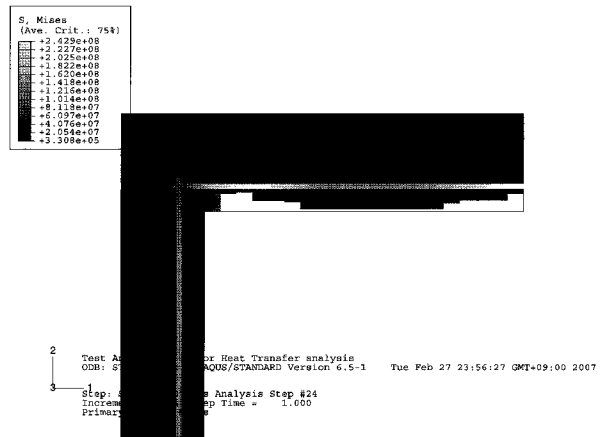
화재에 의해 발생한 최종박리진행형상을 그림 6에 나타내었다. 박리는 처음에는 상부슬래브의 중앙부와 상부슬래브와 벽체가 만나는 곳에서 발생하기 시작하나 실제 구조물에서는 상부슬래브와 벽체가 만나는 모서리는 현치로 마감되어 있으



(a) case1



(b) case2



(c) case3

그림 6 화재종료시 박리형상

므로 상부슬래브의 중앙부에서 보다 큰 박리경향이 나타날 것이다. 박리가 발생되면 노출면이 다시 화염에 노출되므로 콘크리트의 온도가 상승하여 박리를 가속화 시킨다. 화재지속시간이 긴 Case 1의 경우에는 박리한계로 설정한 선까지 박리가 진행되어 최종적으로는 상부슬래브의 철근이 모두 노출된 상태이다. 화재지속시간이 1시간인 Case 2의 경우에는 상부슬래브 중앙과 모서리에서 철근이 노출되었고, 화재지속

시간이 30분이 Case 3의 경우에는 박리가 진행되기는 하였지만 철근이 노출되지는 않았다. 박리가 한계상태까지 발생한 Case 1을 제외하고는 다른 경우 모두 화재의 최고온도 지속시간이 끝난 후에도 박리현상이 계속 진행되었다. 이는 콘크리트의 낮은 열전도율에 기인한 것으로 판단되며 화재후 터널내부의 온도를 가능한 한 빨리 내리는 것이 추가적인 피해를 감소시킬 수 있는 방법으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지하구조물에서 케이블의 피복재등에서 발생하는 화재에 대한 온도장을 구성하고 화재시나리오별로 박리거동을 산정하였다. 온도장의 구성을 위한 열유체해석결과 박스구조물내 상하간의 온도차는 약 7%정도인 것으로 나타났다. 이는 측면보다도 상부슬래브에 박리현상이 집중되는 현상의 이유로 판단된다. 구조물의 박리현상은 소성화온도에 도달한 부분의 요소를 제거하고 모델을 재구성하고 경계조건을 다시 부여하고 재해석을 반복수행하여 고려하였다. 그 결과 적절한 박리거동을 모사할 수 있었다.

본 논문에서 얻어진 박리 거동을 바탕으로 2편에서는 구조물의 내하력을 산정할 것이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- 윤진한 (2005) 전선피복재의 발열량분석보고서, 한국기계연구원.
- 이계희, 김선훈 (2007) 박리를 고려한 지하박스구조물의 화재 하중해석 II: 내하력, 전산구조공학회 논문집(인쇄중).
- 행정자치부 (2001) 화재통계연보(2001).
- ANSYS Inc. (2005) ANSYS 10.0 User's Manual.
- ABAQUS Inc. (2005) ABAQUS 6.5 User's Manual.
- Haack, A. (1998) Fire protection in traffic tunnels: general aspects and results of the EUREKA project, *Tunnelling and underground space technology*, 4, pp.377~381.
- 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.
- Numajiri, F., Furukawa, K. (1998) Mathematical expression of heat release rate curve and proposal of 'burning index', *Fire and material*, 22, pp.39~42.
- 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.