한국산학기술학회논문지
Vol. 9, No. 1, pp. 136-142, 2008

화재에 의한 사장교 케이블의 유한요소 해석

송용선[1], 이병식[1], 박원태[1*], 김형주[2]

FEM Analysis on the Damage for the Cable of Cabled-suspension Bridges by Fire

Young-Sun Song[1], Byung-Sik Lee[1], Weon-Tae Park[1*] and Hyeong-Joo Kim[2]

요 약 최근 케이블을 이용한 현수교 또는 사장교 형식의 교량들이 건설되고 있다. 이러한 교량에서 자동차 충돌등의 사고에 의한 교량위 화재로 손상을 받는 경우가 종종 발생되고 있으나, 화재에 의한 교량구조물의 안정성에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 국도확장사업구간에 시공되고 있는 사장교 교량을 대상으로 하여, 상용소프트웨어인 Solid Works 2007을 사용하여 모델링하고, COSMOS FloWorks 2007소프트웨어에 의한 열전달 해석 및 열응력 해석을 통하여 와이어, 교량위 화재 발생시 와이어. 사재방재 파이프 및 그 주변에 대한 사재방재케이블의 안전을 검토 하였다. 해석변수로는 열원의 온도, 방호책과 열원사이의 거리, 풍속, 스텐인레스강관 끝단의 높이를 사용하였다.

Abstract Recently, cabled-suspension bridges and suspension bridge have been increasingly built in korea. But such structures were often damaged by fire due to car collison. In this study, the cabled-suspension bridges constructed under the kind of the project of national road aggrandizement are modeled using Solid Works 2007. The COSMOS FloWorks 2007 software are used for Heat Transfer Analysis and Thermal Stress Analysis. The safety of wire, HDPE pipe and stainless steel pipe are investigated. The major variables for the analysis are the temperature of the heat source, the distance between the fire-proof bulk head and the heat source, wind velocity, and the height of the end of Stainless steel pipe.

Key words : FEM, Heat Transfer Analysis, Thermal Stress Analysis

1. 서 론

국내외적으로 최근 건설되는 장대교량들의 경우 대부분 케이블을 이용한 사장교의 형식을 으로 되어있다. 이러한 교량 위에서의 자동차 충돌 등으로 인한 화재에 의해 교량이 붕괴되거나 상판이 손상을 입는 사고가 종종 발생되고 있다. 2006년 10월 3일 오전 짙은 안개속의 29중 충돌의 서해대교 사고는 많은 사상자를 발생시켰으며, 방송의 시뮬레이션 화면상에서 케이블이 있는 구간이 화재에 장시간 노출되는 것으로 방영되었다. 서해대교가 착공될 당시만 하더라도 교량방재에 대한 개념 및 케이블 내화에 대한 기준이 없었던 것으로 사료된다.

사장교와 같은 교량 위에서의 화재발생 시, 장시간 화재에 노출된 케이블은 섭씨 200도를 넘게 되면 강선의 강도가 떨어지게 되고 약 500도를 초과하면 강도가 50% 이하로 저항력이 줄어들게 되어 열응력에 의해 케이블이 늘어나 케이블이 구조부재로써 역할을 할 수 없는 상태가 되어, 결국에는 케이블이 끊어지는 사고가 발생하게 된다. 안개 발생시 안개경고에 대한 전광판 송신에 그치지 말고 가로등 하단에 안개 등 설치, 화재에 대비한 급수전 및 피난 시설 설치, 지상 또는 지하저수조 및 펌프장 설치와 더불어 교량의 방염, 방화 기준등 교량방재 전체에 대한 설계 및 시설기준이 절대적으로 필요한 시점이 되었다. 그러나 국내의 경우 교량 화재에 대한 방재연구가 전무한 상태이다.

따라서 본 연구의 목적은 현재 국내의 각종 사장교의 주변 상습 안개지역에서 차량사고로 인한 화재발생의 개연성을 배제시킬 수 없기 때문에, 화재발생으로 인해 케이블을 싸고 있는 파이프 및 케이블의 안전성에 대한 정

[1]공주대학교 건설환경공학부, 공학박사
[2]군산대학교 토목환경공학부, 공학박사
*교신저자 : 박원태(pwtae@kongju.ac.kr)

량적 검토가 필요하다고 판단되어, 화재 발생시 사재 방재 안전성을 검토하는데 있으며, 특히, 화재에 의해 발생하는 열에 의해 사재 방재 파이프와 케이블에 대한 안전성을 열-유동해석을 통해 정량적으로 분석하여 그 안전성을 검토하는데 있다. [1~5]

2. 열전달 해석

2.1 열전달 해석의 기본이론

사장교 사재의 케이블 단면내의 온도분포를 구하기 위하여 2차원 선형-비정상열전도 방정식을 이용하였으며, 임의의 케이블 단면에서 임의의 시간 t에서의 온도 T의 변화는 다음과 같은 열전도 방정식의 지배를 받는다.

$$K(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2})+Q=\rho C\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,

T : 단면내 임의 위치에서 온도로 임의 시간 t와 위치 x, y, z의 함수

K : 열전도 계수($W/m^{\circ}C$)

Q : 단면내부에서 발생하는 단위체적당 열에너지 (W/m^3)

ρ : 밀도(kg/m^3)

C : 비열($J/kg\ ^0C$)

유한요소를 이용하여 해석하기 위해서 변분법을 적용한 후 전체 좌표계의 절점온도에 대하여 각각의 요소를 조합하면 식(2)와 같다.

$$[C]\{\dot{T}\}+[K]\{T\}=[R] \quad (2)$$

여기서,

$[K]=[K]^{cnd.}+[K]^{conv.}$

$[R]=[R]^{heat}+[R]^{conv.}$

여기서, 첨자 cond.는 전도를, conv.는 대류를, heat는 발열을 뜻하며, $[\bullet]$는 다음과 같다.

$[C]$: 열용량 행렬

$[K]$: 열전도 행렬

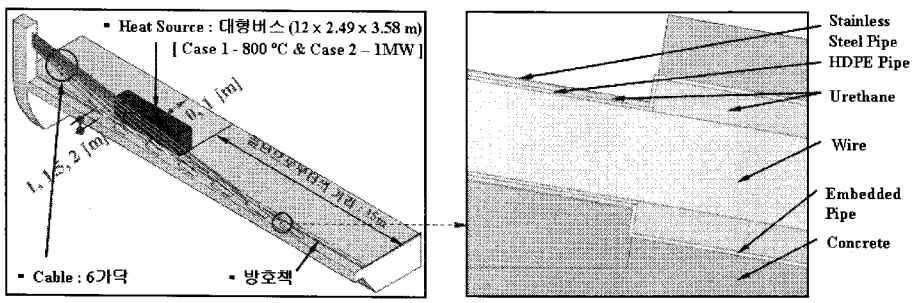
$[R]$: 열하중 벡터

2.2 해석 모델

본 연구에 사용된 해석모델은 사장교 형식의 교량구조물로 주탑간 거리가 125m 인 4개 주탑으로 되어 있으며 교량폭은 23m 이다. **그림** 1의 (a)는 주탑이 있는 곳에서 1/4 대칭 모델을 나타내고 있으며, **그림** 1의 (b)는 케이블 단면을 나타낸 그림으로, 중심부에 스테인레스 강으로 이루어진 와이어가 있으며 콘크리트 내부의 와이어 부분은 우레탄으로 감싸고 다시 embedded 파이프로 감싸고 있다. 또한, 콘크리트 바깥으로 노출된 와이어 부분은 HDPE파이프로 감싸고 다시 스텐인레스 강관이 덥혀진 부분까지 우레탄으로 감싸게 된다.

열원은 대형버스에서 화재가 발생한 상황으로 가정하여, 직육면체로 모델링 하였다. 화재발생 시, 열원의 온도를 가정해야 하는데, 긴 터널의 밀폐된 공간에서 화재 시의 최고 온도는 1,000°C가 넘는 경우도 있으나, 통상적인 터널의 대부분의 최고온도는 약 800°C 정도로 알려져 있다. 그러나, 본 연구의 대상 교량구조물 상에서의 화재발생은 차량충돌의 경우 온도 자체가 터널에 비해서는 비교적 낮다고 볼 수 있다. 열원을 온도로서도 주어줄 수 있지만, 일률의 단위인 Watt로서 주어줄 수도 있다.

문헌들에 나와 있는 화재발생 시의 열원의 일률은 약 0.25MW에서 최대 2.5MW 정도이다. 실제로 화재가 발생하는 경우, transient해석을 수행하는 것이 더 타당성이 있다



(a) 1/4 대칭 모델 및 열원 (b) 케이블 단면 구조

그림 1. 1/4 대칭 모델 및 열원 케이블 단면 구조

고 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 transient 해석 관점에서 열전달 해석과 유동해석을 수행하였다.[1～5]

한편, 열원의 이격거리가 교량의 끝단으로부터 35m 떨어져 있고, 방호책으로부터의 거리가 0m 경우에 화재가 발생되었다고 가정하였으며, 스텐인레스 강관의 끝단이 콘크리트로부터의 수직높이가 h=1.5m인 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

2.3 경계 조건

경계조건과 관련하여, 주변 온도 20℃의 환경 복사를 고려하였고 교량 주변 공기층의 외부유동으로 인하여 케이블에서 전도가 이루어지는가를 계산하기 위하여 외부유동 해석을 수행하였으며, 고체부분의 열전도를 고려하였다. 또한 팬 등과 같이 외부에서 강제적인 유동을 유발하는 인자가 없으므로 가열과정에 의하여 생기는 유체의 밀도변화 때문에 일어나는 유동현상인 자연대류 열전달을 고려하기 위하여 자연대류를 일으키는 부력으로 중력을 선정하였으며 유동장은 정상 상태의 층류와 난류 유동으로 가정하였다. 열원 및 대상체 표면에 대해서는 흑체 조건을 사용하여 각각의 재질에 따르는 방사율을 적용하였다.

표 1. 재료 물성치

재질	밀도 (kg/m3)	열전도계수(W/mK)	비열(J/KgK)
열원(강재)	7,874	43	895
콘트리트	2,300	1.37	8,800
우레탄 foam	50	0.0279	1,507
외이어, 스테인레스 강관	8,100	26.6	600
HDPE 파이프, Embedded 파이프	950	0.461	1,796

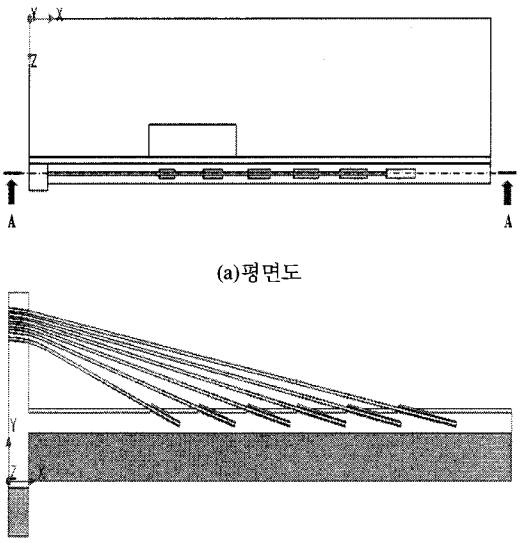
20℃에서의 발열체 및 대상체의 방사율은 열원은 0.6～0.7, 스테인레스 강관은 0.074, HDPE 파이프은 0.95를 각각 나타내며, 표 1은 해석모델을 구성하는 재료의 20℃에서의 물성치를 나타내며, 실제해석에서는 온도 의존 데이터를 사용하였다.

해석은 열원의 온도를 상온(20℃)부터 시간의 변화와 함께 최고 800℃까지 변화시켰고, 방호책과 열원과의 거리가 0 m, 풍속이 x-y-z 방향으로 0 m/s, 도로면인 콘크리트부터 스텐인레스 강관의 끝단의 수직 높이 h=1.5 m인 경우에 실제로 화재가 발생할 경우와 같이 열원이 시간에 따라 온도가 변하는 데이터를 갖는 시간 의존 해석을 수행하여 시간 변화에 따른 온도분포를 계산하였다.

시간 의존 해석에서의 열원은 초기온도 20℃에서 시작하여 2400초까지 최고 800℃로 증가한 후 3600초까지 450℃로 감소하여 시간에 따라 온도가 변하는 열원을 적용하였다.

본 해석을 수행하기 위하여 모델링은 3차원 모델링 상용 소프트웨어인 SolidWorks 2007을 사용하였으며, 열전달 해석과 유동해석은 COSMOSFloWorks 2007을 사용하여 결과를 얻었다.

3. 해석결과 및 고찰



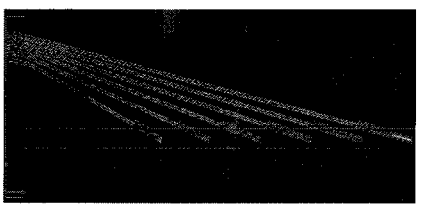
(a)평면도

(b) A-A 단면도

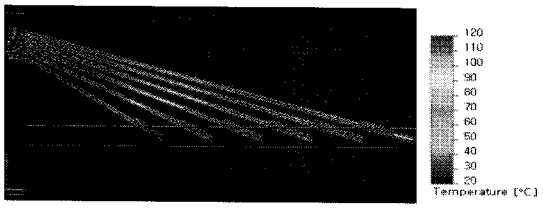
그림 2. 케이블 수직 단면도

고체 부분의 열 유동분포를 검토하기 위하여 그림 2의 (a)는 교량의 평면도를 나타내며 (b)는 A-A에 대한 단면도를 보여주고 있다.

그림 3은 고체 부분의 열 유동분포를 그림 2의 단면에서 시간에 따른 온도분포를 나타내며, 케이블의 온도분포가 시간이 지남에 따라 점차 상승하고 있음을 보여주고 있다.



(a) 1500 [sec]



(b) 2400 [sec]

그림 3. 단면에서 고체 및 기체의 온도 분포

그림 4는 케이블 형상 순서를 나타내고 있으며 위쪽부터 차례대로 번호를 지정하고 있다. 그림 5은 그림 4의 케이블 내부의 와이어 표면에 대하여 시간에 따른 온도 분포를 나타내며, 시간이 경과함에 따라 서서히 온도가 상승함을 알 수 있다.

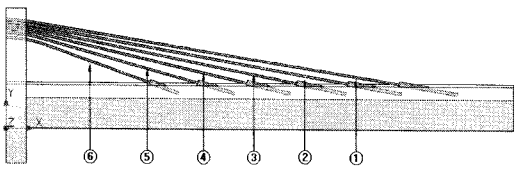
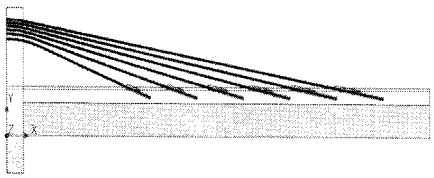
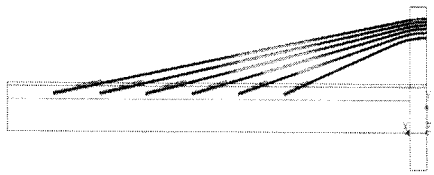


그림 4. 와이어, HDPE-pipe 및 스테인레스 강관의 형상 순서

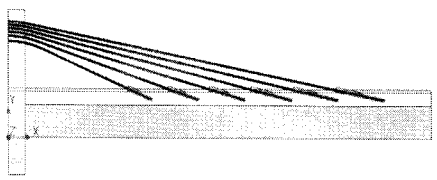


(ㄱ) 정면도

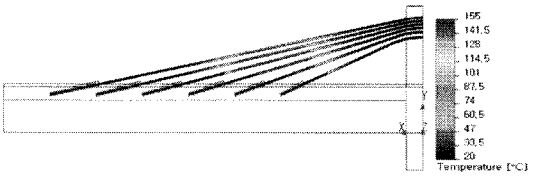


(ㄴ) 배면도

(a) 1500 [sec]



(ㄱ) 정면도



(ㄴ) 배면도

(b) 2760 [sec]

그림 5. 와이어 표면 온도 분포

그림 6은 시간대별 와이어의 표면에 대한 최대온도를 보여주고 있다. 와이어의 표면의 최대온도가 시간 따라서 온도가 상승하다가 2,760 초에서 최대가 되며 이후 감소하는 경향을 보이고 있다. 와이어 표면의 최대온도는 와이어 2번에서 발생되며, 약 155 ℃가 된다.

실제 화재가 발생하였을 때는 와이어의 온도가 일정한 온도를 갖는 열원에 비해 상당히 낮은 온도분포를 보이고 있어 시간의존 해석을 하여야 할 것으로 사료된다.

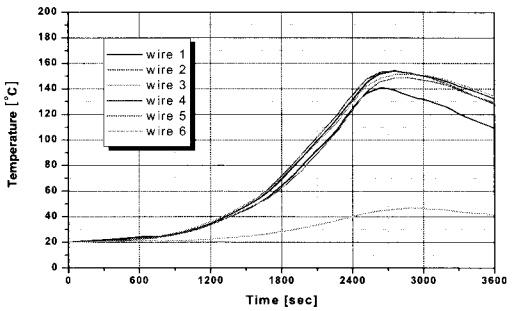
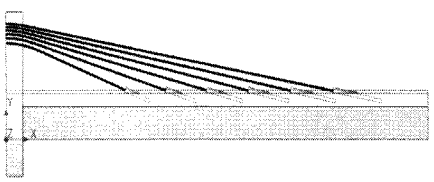
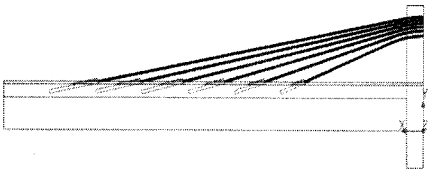


그림 6. 시간대별 와이어 표면의 최대 온도

그림 7은 HDPE 파이프 표면에서 시간에 따른 온도분포를 나타내며, HDPE 파이프 표면에서 온도는 시간의 경과에 따라 서서히 상승함을 알 수 있다. 그림 8에서는 시간대별 각각의 HDPE 파이프 표면에서 최고온도를 나타내고 있다. 시간에 따라 최고온도가 상승하다가 2,520 초에서 최대값을 갖고, 이후 감소하는 경향을 보이고 있다. 이때 HDPE 파이프 표면온도의 최대값은 HDPE 파이프 5번에서 약 605 ℃가 발생된다.

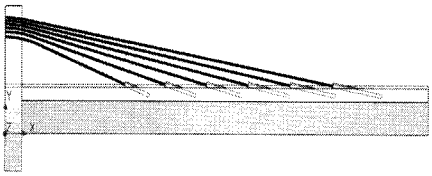


(ㄱ) 정면도

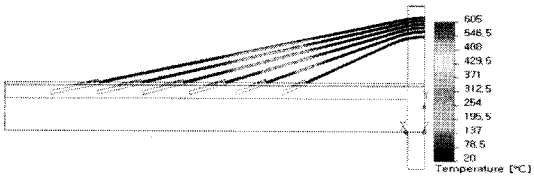


(ㄴ) 배면도

(a) 1500 [sec]



(ㄱ) 정면도



(ㄴ) 배면도

(b) 2520 [sec]

그림 7. HDPE 파이프 표면 온도 분포

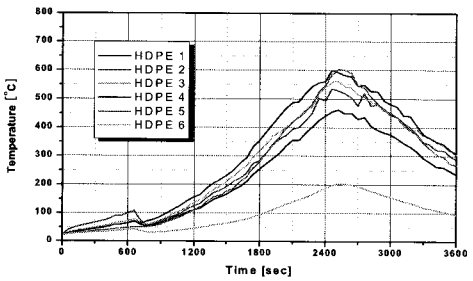
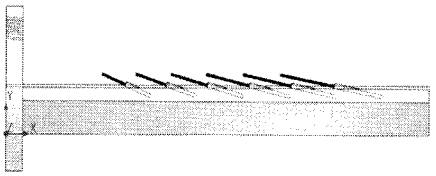
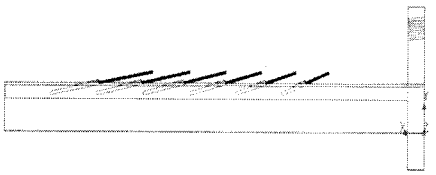


그림 8. 시간대별 HDPE 파이프 표면의 최고 온도

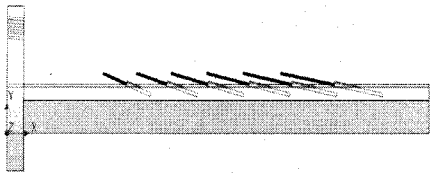


(ㄱ) 정면도

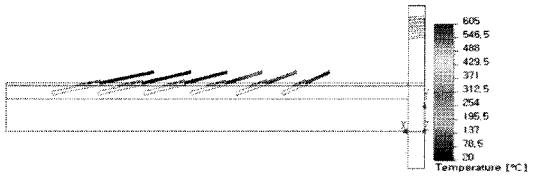


(ㄴ) 배면도

(a) 1500 [sec]



(ㄱ) 정면도



(ㄴ) 배면도

(b) 2520 [sec]

그림 9. 스테인레스 강관 표면 온도 분포

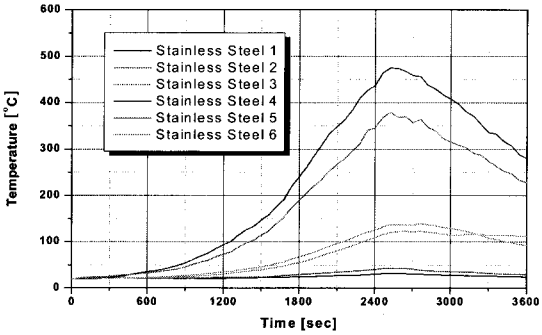


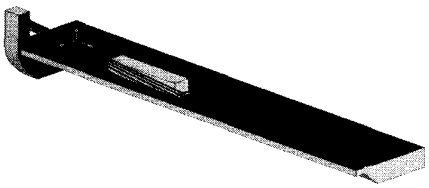
그림 10. 시간대별 스테인레스 강관 표면의 최고

그림 9는 그림 4의 스테인레스 강관 표면에서 시간에 따른 온도 분포를 나타내고 있으며 시간이 경과함에 따라 서서히 온도 상승함을 알 수가 있다.

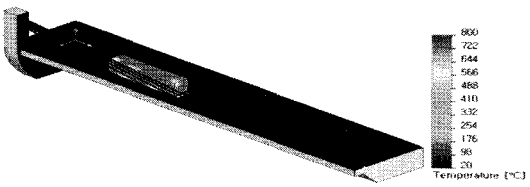
그림 10은 시간대별 스테인레스 강관 표면에서의 최고온도를 나타내고 있다. 시간이 경과함에 따라 온도가 상승하다가 2,520 초에서 최대값을 가지며, 이후 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 때 스테인레스강관 표면에서 온도의 최대값 스테인레스 강관의 4번에서 발생되며, 약 475℃가 된다.

그림 11는 시간대별 고체의 표면의 온도 분포를 나타내며, 시간이 2,400 초일 때 가장 높은 온도를 나타내고, 이후 점차 감소하는 경향을 보인다.

그림 12은 시간대별 기체의 유동에 대한 온도 분포를 나타내며, 시간이 경과함에 따라 유동장의 형태가 변화하고 있음을 알 수 있다.

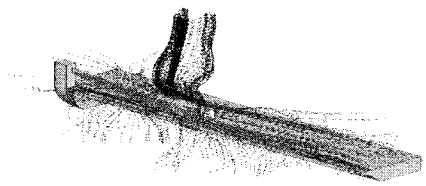


(a) 1500 [sec]

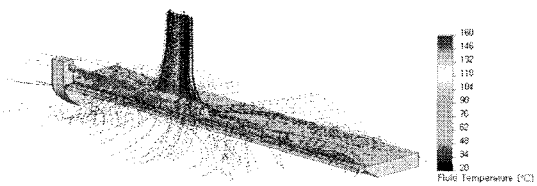


(b) 2500 [sec]

그림 11. 시간대별 고체 표면의 온도 분포



(a) 1500 [sec]



(b) 2500 [sec]

그림 12. 시간대별 기체 유동 온도 분포

4. 결 론

화재 발생의 경우, 시간의 변화와 함께 열원의 온도변화에 따라 transient해석을 통하여 열전달 해석과 유동해석을 하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 transient해석에 대한 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 스테인레스 강관의 경우 본 연구에서 가정한 열원의 온도변화에 따른 최고 온도가 약 475℃로 재료의 용융점보다 훨씬 낮아 문제가 없을 것으로 판단되었다.

(2) 와이어(wire)는 표면 최고온도가 약 155℃를 넘지 않으므로 본 연구에서 시뮬레이션 한 굵은 6개의 케이블은 강도측면에서 문제가 없을 것으로 판단된다.

(3) HDPE 파이프의 경우는 용융점이 약 134℃이므로, 화재발생 후 약 20분정도까지는 문제가 없으나, 약 20분 후에는 소재의 온도가 용융점보다 상승하므로, HDPE 파이프를 보호를 위한 내열성을 갖는 HDPE소재의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. 이정오, 박희용, "열전달", 범한서적출판(주), 1992.
2. 최준석외 7인, "실물터널 화재실험을 통한 터널화재 위험도 평가", 한국소방학회논문지, 제16권 3호, pp.71-76, 2002.
3. 김화중, "지하생활 공간의 화재하중 및 화재성상분석을 통한 화재 위험도 예측기법 개발", 한국건설기술연구원, 건설교통부, 한국건설기술평가원 지원 중간보고 발표자료.
4. COSMOSFloWorks Fundamentals (User's Manual), DAS, 2007.
5. Klaus-Jurgen Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice_Hill, pp.268-277, 1982.

송 용 선(Young-Sun Song) **[정회원]**

- 1981년 2월 : 고려대학교 토목공학과(공학사)
- 1981년 2월 : 고려대학교 토목공학과(공학석사)
- 1988년 8월 : 충남대학교 토목공학과(공학박사)
- 1993년 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
지반공학, 사면안정

이 병 식(Buung-Sik Lee) **[정회원]**

- 1985년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1987년 8월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 5월 : 텍사스주립대학교 (오스틴) 토목공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
지반동역학, 지반환경(비점오염)

박 원 태(Weon-Tae Park) **[정회원]**

- 1983년 2월 : 부산대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2005년 10월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
구조공학, 강구조공학, 복합재료

김 형 주(Hyeong-Joo Kim) **[정회원]**

- 1983년 2월 : 고려대학교 토목공학과 졸업(공학사)
- 1985년 2월 : 고려대학교 대학원 토목공학과 졸업(공학석사)
- 1990년 10월 : 일본히로시마대학 대학원 구조공학과 토질공학연구실졸업(공학박사)
- 1992년 9월 ~ 현재 : 군산대학교 토목환경공학부 교수

<관심분야>
연약지반 및 준설매립공학