

케이블이 관통하는 방화벽에서의 비정상상태 열전도에 대한 연구

김형규, 조재규*, 권성필, 김원국, 윤인섭*
 서울대학교 화학공정신기술연구소, 서울대학교 응용화학부*

A Study of Unsteady Heat Conduction in a Cable Penetrated Firewall

Hyung Gyu Kim, Jaekyu Cho*, Seong-Pil Kwon, Wonguk Kim, En Sup Yoon*
 Institute of Chemical Processes, Seoul National University
 School of Chemical Engineering, Seoul National University*

서론

현재 우리나라에는 전력생산을 목적으로 14기의 원자력발전소가 운전되고 있고, 6기가 건설 중에 있으며, 앞으로도 장기적인 계획에 따라 2020년까지 약 20여기의 원전이 추가로 건설될 예정이다. 이와 같은 원전수의 급격한 증가로 인해서 최근에는 원전운전의 안전성문제에 대한 사회적인 관심이 증대되고 있는 실정이다. 화재로 인한 원전사고의 위험성은 이미 잘 알려져 있으며, 그 가운데서도 케이블 화재사고의 위험성은 매우 중요하다. 예를 들어 1975년 3월 22일 Tennessee Valley Authority Browns Ferry 원자력발전소에서 일어난 내부 화재사고는 케이블 관통부의 내화시험방법 자체를 기존의 ASTM E-119에서 새로운 ASTM E-814 혹은 UL-1479으로 바꾸게 만들었고, 이 새로운 시험방법에 따라 기존의 충전 시스템들은 다시 재평가되어 안전성을 개선하게 되었다. 우리나라의 경우 일찍부터 충전 시스템의 국산화에 노력하여, 이미 일찍부터 국내에서 개발된 기술로 시공할 수 있게 되었다. 하지만, 충전 시스템의 내화성능을 입증할 수 있는 유일한 방법인 내화시험이 실제로 시공되어 있는 상태를 만족스럽게 반영하지 못하고 있어서 불의의 화재가 발생할 경우 시공되어 있는 충전 시스템이 요구되는 방화성능을 제대로 발휘하지 못할 수도 있다. 더욱이 방화벽내의 케이블 관통부위는 원자력발전소 하나 당 평균 3천에서 1만개에 이르며, 이들은 화재가 발생했을 때 원자력발전소의 심층방호(Defense-in-depth)의 역할을 담당하고 있다. 본 연구에서는 원자력발전소의 케이블 화재전파를 막아주는 케이블 관통부위 충전 시스템의 건전성을 효율적으로 평가할 수 있는 시뮬레이터를 개발하기 위해 필요한 방화벽의 케이블 관통부위 충전 시스템에서의 비정상상태 열전도현상이 다루어졌다

이론

1. 수학적 모델의 개발

열전도도가 온도나 압력의 변화에 대해 일정하며 충전 시스템 내에서 추가로 열이 발생하지 않는다는 조건 하에서, 방화벽 케이블 관통부 충전 시스템에서 일어나는 비정상 상태 열전도현상은 직각 좌표계에서 다음과 같은 포물선형 편미분 방정식으로 기술된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

여기서 는 단열재의 열확산계수(thermal diffusivity)라고 하는데, 이것은 그 물질의 특성이며 면적을 시간으로 나눈 차원을 가진다. 관찰하고자 하는 방화벽 케이블 관통부 충전 시스템은 직각 좌표계 위에서 (그림 1)과 같이 여러 개의 케이블 봉이 나란히 들어있는 직육면체로 단순화 시킬 수 있다. 우선, 조건을 단순화 시키기 위해, 충전 시스템의 내부는 물론 표면까지도 초기온도가 T_0 로서 일정하고, 경계앞면의 온도와 케이블 전체의 온도는 항상 최고 온도 T_h 로서 일정하다고 가정한다.

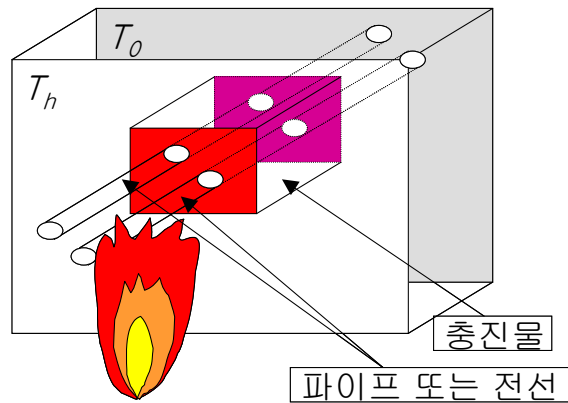


그림 1. 파이프가 관통하는 방화벽

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (2)$$

$$T(x, y, 0) = T_h \quad \text{for } 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y \quad (3)$$

$$T(x, y) = T_h \quad \text{for } (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \leq r_i^2, i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

더욱이 직육면체를 둘러싸고 있는 위, 아래, 그리고 양 옆 4면이 모두 단열이라고 가정한다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X} = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=Y} = 0 \quad (5)$$

마지막으로, 경계뒷면과 접하는 공간의 공기온도는 항상 초기온도 T_0 로 일정하다고 가정할 때, 경계뒷면을 통해 단위면적 당 빠져나가는 열흐름은 경계뒷면 온도와 초기온도 간의 온도차와 전열계수 h 에 비례하므로 경계뒷면에서의 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z} = h(T - T_0) \quad (6)$$

결국, 방화벽 케이블 관통부 충전 시스템에서 일어나는 비정상 상태 열전도현상은 포물선형 편미분방정식 식(1)과 초기조건 식(2) 및 경계조건 식(3)부터 식(6)으로 수식화 될 수 있다.

2. 제안된 알고리즘

위에서 유도한 복잡한 3차원의 초기값 편미분방정식을 풀기 위해서, 연속 2단계 알고리즘을 사용한다. 이 방법에서는 x-y-z축 공간에 대한 초기값 편미분방정식 문제로부터 환원된 z축 성분과 x-y축 평면에 대한 각각의 초기값 편미분방정식을 연속적으로 반복해서 계산한다. z축으로 전달되는 열은 연속 과완화 (SOR: Sequential Over-Relaxation) 법을 이용하여 계산하고, x-y 평면 위에서의 확산되는 열은 유한요소법 (FEM: Finite Element Method)을 이용하여 계산한다. 우선, 케이블 관통부 충전 시스템 내부의 z축으로 전달되는 열에 관해 기술하면,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

식 (7)을 n개의 불연속 에너지수지로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= \alpha \cdot \left(\frac{T_2 - 2T_1 + T(0, t)}{\Delta z^2} \right) \\ \frac{dT_2}{dt} &= \alpha \cdot \left(\frac{T_3 - 2T_2 + T_1}{\Delta z^2} \right) \\ &\vdots \\ \frac{dT_n}{dt} &= \alpha \cdot \left(\frac{T_z - 2T_n + T_{n-1}}{\Delta z^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

첫 번째 계산의 초기조건은 모든 유한요소에 대해 T_0 로서 일정하지만, 두 번째부터의 계산에서는 유한요소의 초기온도는 식(8)으로부터 계산된 p 개의 온도 T_p 이다. 그리고 경계앞면의 온도는 최고온도 T_h 로 항상 일정하다.

$$T(z, 0) = T_0 \quad (9)$$

$$T(z, 0) = T_p \quad (10)$$

$$T(0, t) = T_h \quad (11)$$

여기서 경계뒷면과 접하는 공간의 공기온도는 항상 초기온도 T_0 로 일정하다고 가정할 때, 경계뒷면을 통해 단위면적 당 빠져나가는 열흐름은 경계뒷면 온도와 초기온도 간의 온도차와 전열계수 h 에 비례하므로 경계뒷면의 온도 T_z 는 식(6)을 전진차분 근사식으로 치환하면, 다음과 같이 정리된다.

$$T_z = \frac{h \cdot T_0 + \frac{k}{2 \cdot \Delta z} (4T_n - T_{n-1})}{h + \frac{3k}{2 \cdot \Delta z}} \quad (12)$$

그밖에도, 경계뒷면에서의 시간의 변화에 따른 x - y 평면상에서 열의 확산은 다음과 같이 수식화 될 수 있으며, 실제로 p 개의 유한요소에 대해 적용할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

각각의 유한요소에 대한 초기조건은 식(8)으로부터 p 번 새로 계산해서 얻는다. 케이블 전체의 온도는 항상 최고온도 T_h 로서 일정하다고 가정한다. 시간 t 와 공간 x 의 함수인 온도는 직교배열(Orthogonal Collocation) 상태인 각 유한요소의 온도함수 $T_j(t)$ 와 요소함수 $j(x)$ 간의 곱의 전체의 합으로 나타낼 수 있다.

$$T(x, t) = \sum_{j=1}^{N_p} T_j(t) \phi_j(x) \quad (14)$$

식 (13)을 이용하여 식 (14)과 그와 관련된 초기조건 및 경계조건을 다음과 같은 일련의 대수방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{T} = (\mathbf{K} + \mathbf{M} + \mathbf{Q}) \cdot \mathbf{T} + \mathbf{G} \quad (15)$$

위의 식(15)는 각각의 방정식을 계산한 결과를 조작하면 식(1)의 총괄 열전도의 값을 얻을 수 있음을 뜻한다.

실험 및 결과

위에 제시한 알고리즘을 적용하고 matlab(버전 6.1)을 이용하여 프로그램을 작성하였다. 화재가 발생한 곳의 온도 $T_h = 1200^\circ\text{C}$, 초기 온도 $T_0 = 0^\circ\text{C}$ 로 하였으며, 벽면을 관통하는 파이프의 개수는 2개로 하였다. FEM의 작업은 matlab에서 제공하는 함수들을

이용하였으며, 계산의 정확도를 높이기 위해서 세분화(refine)를 1회 실시하였다. 이번 실험에서 열전도도 계수 $h = 1.0$ 으로 가정하였으며, y, z 축 면은 단열이라 가정하여 가능한 모델을 단순화 하였다. 펜티엄4 1.8GHz의 컴퓨터로 계산할 때 소요된 시간은 약 2분이었다. 실험 결과 요소의 개수는 총 100개이며, 이 결과를 토대로 605×605 행열을 작성하여 이를 다음 그림 2~4의 그래프로 나타내었다.

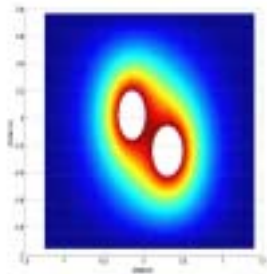


그림 2. 평면도

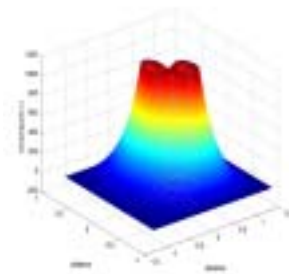


그림 3. 온도 분포도 1

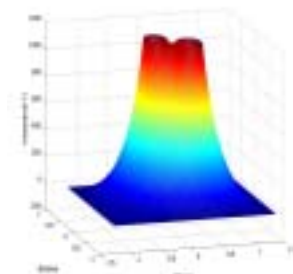


그림 4. 온도 분포도 2

그림 2는 파이프가 관통하는 부분을 볼 수 있도록 평면으로 나타낸 그림이다. 그림 3과 그림 4는 비스듬한 각도에서 본 그래프이다. 가로와 세로는 각각 x, y 축을 나타내며, 높이는 온도의 분포를 나타낸다. 온도의 분포는 z 축으로의 열전도를 무시하고 단순히 FEM을 적용하여 평면상의 열전도만을 고려한 것과 비교적 유사하게 나타났으며, 온도 분포의 형태상으로도 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나 위의 결과는 단순히 평면상의 열전도만을 고려하지 않고, 그에 수직인 축 방향으로의 열전도를 고려함으로써 좀 더 실제 현상을 잘 표현하고 있다.

결론

입체 물체에서의 3차원 열전도에 대한 연구는 그동안 수차례 시도되어 왔다. 하지만, 기존의 3차원 열전도 현상에 관한 연구들은 현실과 동떨어진 가정 및 현상에 대한 부적절한 모사 등 미비한 점들이 많았다. 본 연구에서 실시한 3차원 열전도 해석 기법은 좀 더 실제 현상에 근접한 계산 결과를 얻을 수 있다는데 그 의미를 찾을 수 있다. 앞으로 본 연구에서 수립한 여러 가정들을 보다 현실에 적합하도록 수정, 보완함으로써 현실과 유사한 3차원 열전도 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 연구를 수행하여야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- Becker, E. B., F. C. Graham and J. T. Oden, *Finite Elements*, Prentice-Hall, Inc., 1981.
- Golebiowski, J. and S. Kwieckowski, "Dynamics of Three-dimensional Temperature Field in Electrical System of Floor Heating", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **45**, 2611-2622(2002).
- Alazmi, B. and K. Vafai, "Constant Wall Heat Flux Boundary Conditions in Porous Media under Local Thermal Non-equilibrium Conditions", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **45**, 3071-3087(2002).
- Bennett, C. O. and J. E. Myers, *Momentum, Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, Singapore, 1982.