

CPFS 내에서 일어나는 동적 열전도 현상을 해석하기 위한 수식 및 혼합알고리즘 개발

윤종필, 권성필¹, 윤인섭*

서울대학교 응용화학부, 서울대학교 화학공정신기술연구소¹
esyoon@pslab.snu.ac.kr

Development of the model and the hybrid algorithm for analyzing the dynamic heat conduction in the CPFS system

Jongpil Yun, Seong-Pil Kwon¹, En Sup Yoon*

Institute of Chemical Processes, Seoul National University¹
School of Chemical Engineering, Seoul National University
esyoon@pslab.snu.ac.kr

Abstract: 본 연구는 원자력 발전소에 있는 방화벽의 케이블 관통부위에 설치된 CPFS(Cable Penetration Fire Stop)시스템 안에서 일어나는 동적 열전달 현상을 3 차원으로 나타낼 수 있는 시험시뮬레이터에 사용될 수학적 모델과 수치계산 알고리즘의 개발에 관한 것이다. CPFS 내에서 일어나는 열전도 현상을 나타내는 지배방정식은 주어진 조건들 하에서 포물선형 편미분방정식(Parabolic PDE)으로 나타난다. 문제를 단순화하기 위해 열의 흐름을 두 성분으로 나누었다. 즉, 케이블과 평행한 선을 따라서 일어나는 열전도와 벽면과 평행한 평면 위에서 일어나는 열전도로 나누었다. 먼저 선을 따라 일어나는 동적 열전도 현상을 나타내는 PDE 를 연속과완화(SOR: Successive Over-Relaxation)를 적용하여 유한한 불연속 점들에 대한 연립 상미분방정식(ODE)으로 전환했고, 그 연립방정식은 ODE Solver 를 이용하여 풀 수 있었다. 둘째로, 각 불연속 점에 위치한 평면 위에서 일어나는 열전도를 계산하기 위해서, 유한요소의 합을 근사식으로 이용하여 PDE 를 ODE 로 전환해서 계산하는 유한요소법(Finite Element Method)이 이용된다. 여기서 시간과 공간의 함수 $T(x, y, z, t)$ 인 온도는 각 선의 점들과 각 평면의 요소들에 대해서 일정한 시간간격으로 초기온도와 경계온도를 업데이트하여 계산을 반복한다. 이러한 일련의 계산결과를 바탕으로 CPFS 시스템 내에서의 온도분포의 동적인 변화를 해석한다. 결론적으로 관통하는 케이블이 CPFS 시스템의 온도분포에 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과는 CPFS 내의 온도분포를 쉽게 이해할 수 있도록 3 차원 그래픽으로 나타냈으며, 상용소프트웨어 FEMLAB 으로 계산한 결과와 비교해서 개발된 모델과 계산 알고리즘의 정당성을 보였다.

Keywords: 동적 열전도, 연속과완화(SOR), 유한요소법(FEM), CPFS(Cable Penetration Fire Stop), FEMLAB

1. 서론

최근 원자력 발전소의 급격한 증가로 인하여 원자력 발전소 운전의 안전성 문제에 대한 사회적인 관심이 증대되고 있다. 특히 운전중인 원자력발전소 내부의 화재 사고는 원자력발전소 제어시스템에 급속히 전파되어 중대한 사고를 유발시킬 수 있으며, 특히 원자력 발전소 구획들 사이에 있는 방화벽에 설치된 CPFS 시스템의 안전성이 중요하다. 1975년 미국의 Browns Ferry 원자력발전소 사고 이후 CPFS 시스템의 안전기준이 기존의 ASTM E-119 에서 ASTM E-814 또는 UL-1479 로 바뀌게 되었다. 그리고 ASTM E-814 는 방화시스템의 안전성을 증명하기 위해서 F-rating 뿐만 아니라 T-rating 까지 요구하고 있다.[1] 그런데 기존의 모든 CPFS 시스템에 새로운 ASTM E-814 을 적용시켜 안전성 시험을 하는 데는 한계가 있으므로, 충전물 내에서의 온도분포를 계산하는 test simulator 를 개발이 필요하다. 따라서 본 연구를 통해 원자력 발전소 구획들 사이의 방화벽에 설치된 CPFS 시스템을 비정상상태의 열전도를 해석할 수 있는 시뮬레이터의 개발을 하려고 한다.

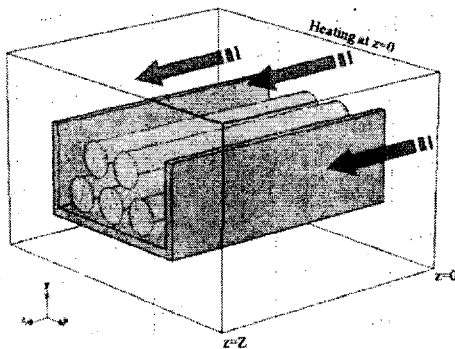
2. 이론 및 알고리즘

2.1. CPFS 시스템의 해석

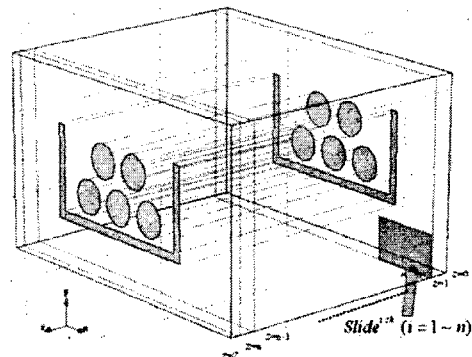
열전도도 k 가 일정하며, 충전 시스템 내에서 추가로 열이 발생하지 않는다는 조건하에서, 방화벽에 설치된 CPFS 시스템에서 일어나는 비정상상태의 열전도현상은 직각 좌표계에서 다음과 같은 포물선형 편미분 방정식(Parabolic PDE)으로 기술된다.[2]

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

본 연구에서 구현하고자 하는 시스템은 방화벽 케이블 관통부 충전 시스템으로 직각 좌표계 에서 5 개의 케이블과 하나의 받침대로 구성된 직육면체로 [Fig.-1]과 같이 단순화 시킬 수 있다.[6]



(a) CPFS systems



(b) SOR and FEM 적용 위한 분할된 그림

[Fig.1: CPFS 시스템의 개략도]

위에서 유도한 3 차원 초기값을 가진 복잡한 편미분 방정식을 풀기 위해서, 연속 2 단계 알고리즘을 사용한다. 우선 이 방법에서는 x-y-z 축

공간에 대한 초기값 편미분 방정식(PDE) 문제로부터 환원된 z 축 선들과 x-y 축 평면들에 대한 편미분방정식(PDE)을 교대로 반복해서 계산한다. z 축으로 전달되는 열은 연속과완화(SOR: Sequential Over-Relaxation)법을 이용하여 계산하고, x-y 평면 위에서의 확산되는 열은 유한요소법 (FEM: Finite Element Method)을 이용하여 계산한다.

2.1.1.SOR 계산과정

케이블 관통부 충전 시스템 내부의 z 축상의 열전달 현상은 다음과 같다.

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

여기서 경계면(z=Z)과 접하는 공간의 공기온도 $T(x, y, Z, t)$ 는 초기온도 T_0 로 항상 일정하다고 가정할 때, 경계면(z=Z)을 통해 단위면적당 빠져나가는 열의 흐름은 경계면 온도 T_z 와 초기온도 T_0 간의 온도차 ΔT 와 전열계수 h 에 비례하므로 경계면의 온도 T_z 는 전진차분 근사식으로 치환하여 나타내면, 다음과 같이 정리된다.

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

2.1.2. FEM 계산과정

CPFS 시스템 내에서 일어나는 열전도 지배방정식은 경계면(z=Z) 에서의 시간의 변화에 따른 x-y 평면상에서 열의 확산은 다음과 같이 수식화 할 수 있으며, FEM 을 적용하여 p 개의 유한요소에 대해 해석할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (21)$$

각각의 유한요소에 대한 초기조건은 절점의 수만큼인 p 번 새로 계산해서 얻는다. z=0 에서 가열되는 ASTM standard temperature-time curve 의 온도 $T_h(t)$ 는 시간에 따라 변할 것이고 각각의 x-y 평면 위에서는 열전달로 인해 평면 전체의 온도가 서서히 증가하게 될 것이다. 여기서 시간 t 와 공간 x 의 함수인 온도는 직교배열(Orthogonal Collocation)상태인 각 유한요소의 온도함수 와 요소함수 간의 곱의 전체의 합으로 나타낼 수 있다.[3]

$$T(x, t) = \sum_{i=1}^{N_f} T_i(t) \phi_i(x) \quad (22)$$

최종적으로 관련된 초기조건 및 경계조건을 이용하여 위에서 전개하였듯이 식(22)를 다음과 같은 연립방정식으로 나타낼 수 있다.[4]

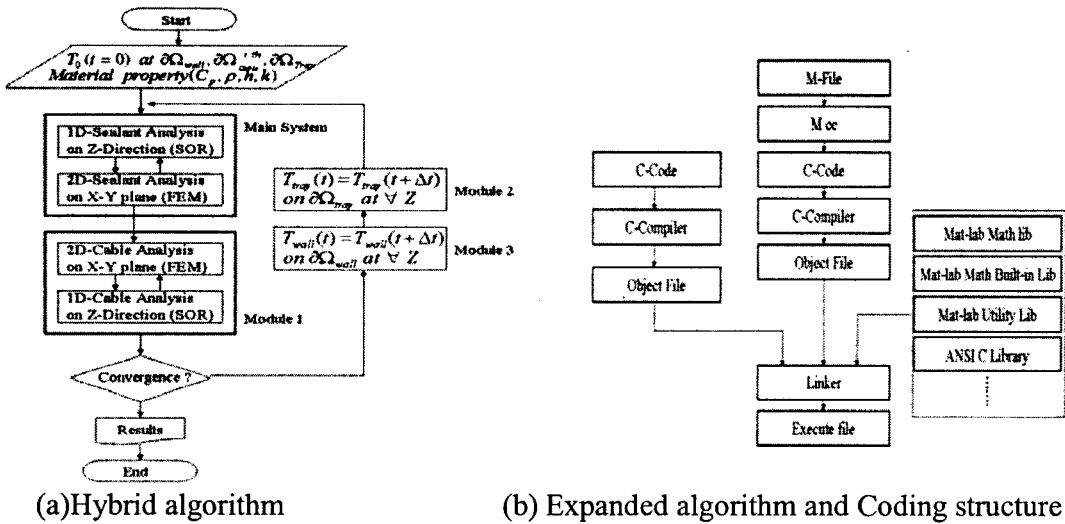
$$M \frac{dT}{dt} + KT = L \quad (23)$$

where $M = \sum_i \left\{ \int_{\Omega} (\phi_j \cdot \phi_i) dx \right\}$

$$K = \sum_j \left\{ \int_{\Omega} (\nabla \phi_j \cdot \alpha \nabla \phi_i) dx + \int_{\partial\Omega} (\phi_j \cdot \phi_i) ds \right\}, L = \sum_j \left\{ \int_{\partial\Omega} (l \cdot \phi_i) ds \right\}$$

이상에서 보면 포물선형 PDE인 식(1)은 위의 식(23)으로 대체될 수 있으며, 이를 통하여 초기조건을 바탕으로 각 요소에 해당하는 적절한 해를 얻을 수 있다. 시간에 따른 축적이 없는 경우 또는 정해진 시간에서 공간에 대한 계산을 실시할 경우 식(23)은 $M=0$ 가 되므로 더욱 간단한 대수방정식으로 전환이 가능하다.

2.2. 개선된 알고리즘 제안



[Fig.-2: Algorithms]

[Fig.-2]의 (a)는 본 연구에서 제안한 혼합알고리즘이고 이는 다음과 같은 과정들을 거친다. 초기 데이터 값으로 임의의 케이블의 경계온도 $\partial\Omega_{Cable}^{i th}$ 과 각종 물성치를 대입해준 후에 시간 $t = t_i$ 에서의 계산순서를 보면 다음과 같다. 위에 순서도에서처럼 초기에 임의로 주어진 초기조건과 경계조건에 대한 값들을 가지고 1 차원 z 축 방향으로 충전물 위의 온도들을 SOR 로 계산한 후에 다시 그 값 들을 가지고 초기값으로 세워 2 차원 x-y 평면 위에서 충전물 의 온도분포를 FEM 으로 계산한다. 일련의 이런 과정이 모두 다한 후에 임의의 값으로 일단 정해주었던 케이블 위에 경계조건들을 위에서 얻어진 값들로 다시 바꾼다. 이번엔 모듈 1 인 케이블 모듈의 x-y 평면 위에서 온도분포를 FEM 으로 계산하고 그 다음 다시 z 방향으로의 온도분포들을 SOR 로 다시 역으로 계산해낸다. 이런 과정을 통해 처음 충전물 주변의 온도분포를 계산해 낼 때 가정했었던 케이블 경계주변의 온도를 이번엔 위에서 구한 실제 값으로 대입해 다시 전체를 계산해주면 특정시간 t 에서의 온도분포를 정확히 발견하게 된다. 이런 과정을 통해 처음 충전물 주변의 온도분포를 계산해

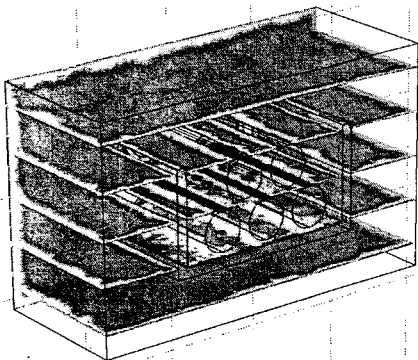
널 때 가정했었던 케이블 경계주변의 온도를 이번엔 위에선 구한 실제 값으로 대입해 다시 전체를 계산해주면 특정시간 t 에서의 온도분포를 정확히 발견하게 된다. 이런 과정이 끝나면 time stepping 으로 Δt 후인 그 다음 번의 시간에 모듈 2의 받침대 모듈과 모듈 3의 방화벽 모듈에서 SOR로 계산되는 1차원방향으로의 계산된 값들을 가지고 위의 전체적인 과정들을 시간의 수렴전까지 다시 반복하게 된다. 이때 매번 계산될 때마다 다음과 같은 데이터가 DB로 구축이 되고 결국 필요한 값들을 그래프로 도출해 낼 수 있게 된다.

[Fig.-2]의 (b)는 계산된 알고리즘을 C로 전환하는 과정을 나타냈다. 기존의 m-file로 작성된 코드를 C로 전환하는데, Matlab Compiler Toolbox를 이용했다. 또한 보다 복잡한 모델에 대한 신뢰도를 높일 수 있도록 재료의 열역학적 특성 및 물성 DB를 구축하면서 OpenGL/C/C++ 같은 3D 그래픽 객체의 개발로 응용인터페이스의 개발할 계획이다.

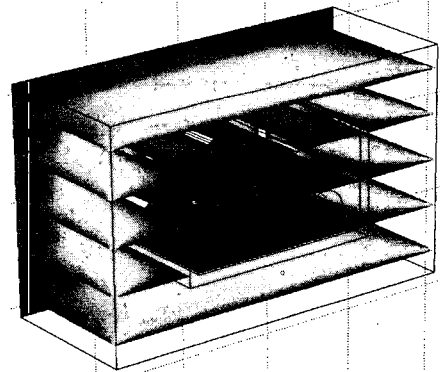
3. 실험 및 결과

3.1. 결과 데이터의 모사

위 알고리즘을 CPFS 시스템에 적용한 결과 아래의 그림을 얻을 수 있었다. 케이블이 통과하는 방화시스템에서 화재발생 후 시간의 변화에 따른 온도 분포변화에 대한 시뮬레이션결과이다.



(a) ASTM 표준온도 적용 후 5분



(b) ASTM 표준온도 적용 후 30분

[Fig.-3: Dynamic Temperature Distribution]

이 계산에서는 열전달 계수를 1로 놓고서 온도가 ASTM 표준온도시간 곡선을 따라 약 1200까지 상승한다는 조건으로 Matlab(버전 6.1)을 이용하여 프로그램을 작성하면, 펜티엄 IV 1.8GHz의 컴퓨터를 이용하여 약 18분의 계산시간이 소요되었다.

4. 결론

CPFS 시스템 안에서 일어나는 동적 열전도 현상을 해석하기 위해서 계산 결과를 3차원으로 나타냈다. 원자력 발전소의 여러 구획들 사이에 있는 방화벽에 설치된 CPFS 시스템 내에서 열전도가 어떻게 일어나는가를

알아보기 위해 여러 방법들이 사용되어 왔다.[5] 본 연구에서 실시한 3 차원 열전도 해석기법을 통해 실제 상황에 근접한 결과를 얻을 수 있었다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다. 본 연구는 CPFS 시스템을 관통하는 케이블에 연구의 주안점을 두어졌다. 이번 연구의 장점은 케이블이 관통하는 물질의 시간의 변화에 따른 공간상의 온도분포를 보여주었다는 것이다. 더욱이 본 연구에서 제안된 혼합알고리즘은 열전도 현상을 해석하는데 있어서 매우 효율적인 방법이다. 따라서 본 연구에서는 케이블의 통과가 충전물의 열전도 현상에 중요한 요소이며, [Fig.-3]의 온도를 비교함으로써 ASTM 표준온도시간곡선의 온도에 따라 변화는 동적인 과정임을 알 수 있다.[1] 앞으로의 연구과제로는 보다 복잡하고 다양한 기하구조와 방화벽 내부의 동적 열전도에 대한 연구가 진행될 것이다.[6] 그리고 기존의 상용프로그램에서 벗어나서, 본 논문에서 제안된 혼합알고리즘을 기반으로 한 stand alone program 을 개발하게 될 것이다.

4.참고문헌

1. ASTM (1993), "ASTM standards in building code: specifications, test methods, practices, classifications, terminology", American Society for Testing and Materials, 30th ed., Philadelphia, Pa.
2. B. Alazmi 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).
3. E. B. Becker , F. C. Graham and J. T. Oden , "Finite Elements", Prentice-Hall, Inc.(1981).
4. G. Feirweather, "Finite Elements Galerkin Methods for Differential Equation", Marcel Dekker.(1978)
5. J. Golebiowski, S. Kwieckowski, "Dynamics of Three-dimensional Temperature Field in Electrical System of Floor Heating", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45, 2611-2622(2002).
6. J. K. Cho, S. Kwon, H. G. Kim, W. Kim and E. S. Yoon, "Dynamics of Unsteady Heat Conduction in a Cable Penetration Fire Stop System Built between Compartments of a Nuclear Power Plant", *Proceedings of PSE Asia 2002*, 173-176(2002).