

새로운 혼합알고리즘을 이용한 CPFS 내에서의 일어나는 동적 열전달의 수식화 및 해석

윤 중 필 · 권 성 필* · †윤 인 섭

서울대학교 응용화학부, *서울대학교 화학공정기술연구소
(2003년 11월 10일 접수, 2003년 11월 21일 채택)

Modeling and analysis of dynamic heat transfer in the cable penetration fire stop system by using a new hybrid algorithm

Jongpil Yun · Seong-Pil Kwon* and En Sup Yoon

*Institute of Chemical Processes, Seoul National University**

School of Chemical Engineering, Seoul National University

(Received 10 November 2003 ; Accepted 21 November 2003)

요 약

본 논문은 원자력발전소 방화벽에 설치된 케이블관통부 충전시스템(CPFS: Cable penetration fire stop) 안에서 일어나는 동적 열전달 현상을 수식화하고, 새로운 혼합알고리즘을 이용해서 수치적으로 계산하여, 3차원 그래픽으로 나타내는 작업에 관한 연구이다. CPFS 내에서의 열전도 현상을 주어진 초기조건과 경계조건하에서 포물선 편미분방정식(Parabolic PDE)으로 수식화하였다. 계산을 단순화 하기 위하여 전체 열 흐름을 z-축 직선상에서의 일어나는 열전도 성분과 x-y-좌표 평면상에서 일어나는 열전도 성분으로 나누었다. z-축과 평행한 직선상에서 일어나는 열전도를 나타내는 PDE는 연속과완화법(SOR: Sequential over-relaxation)을 이용하여 유한불연속 점들에 대한 연립상미분방정식(ODE)으로 만들어서 풀었고, x-y-좌표 평면상에서 일어나는 열전도에 관한 PDE는 Galerkin 유한요소법(FEM: Finite element method)을 적용하여 ODE로 전환해서 풀었다. 여기서 시간과 공간의 함수인 온도는 각 직선상의 점들과 각 평면상의 요소절점들에 대해서 일정한 시간간격으로 초기온도와 경계온도를 업데이트하여 번갈아 가며 계산한다. 이러한 일련의 계산결과를 바탕으로 CPFS시스템 내에서의 온도분포의 동적인 변화를 계산해 낼 수 있었다. 결론적으로 관통하는 케이블이 CPFS시스템의 온도분포에 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 시뮬레이션 결과는 CPFS내의 온도분포를 쉽게 이해할 수 있도록 3차원 그래픽으로 나타냈으며, 관통하는 케이블이 방화시스템의 온도분포에 매우 중요한 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 계산결과를 실험결과와 직접 비교함으로써, 개발된 모델과 계산 알고리즘의 정당성을 보였다.

Abstract - In this work dynamic heat transfer in a CPFS (cable penetration fire stop) system built in the firewall of nuclear power plants is three-dimensionally investigated to develop a test-simulator that can be used to verify effectiveness of the sealant. Dynamic heat transfer in the fire stop system is formulated in a parabolic PDE (partial differential equation) subjected to a set of initial and boundary conditions.

First, the PDE model is divided into two parts; one corresponding to heat transfer in the axial direction and the other corresponding to heat transfer on the vertical planes. The first PDE is converted to a series of ODEs (ordinary differential equations) at finite discrete axial points for applying the numerical method of SOR (successive over-relaxation) to the problem. The ODEs are solved by using an ODE solver. In such manner, the axial heat flux can be calculated at least at the finite discrete points. After that, all the planes are separated into finite elements, where the time and spatial functions are assumed to be of orthogonal collocation state at each element. The initial condition of each finite element can be obtained from the above solution. The heat fluxes on the vertical planes are calculated by the Galerkin FEM (finite element method). The CPFS system was modeled, simulated, and analyzed here. The simulation results were illustrated in three-dimensional graphics. Through simulation, it was shown clearly that the temperature distribution was influenced very much by the number, position, and temperature of the cable stream, and that dynamic heat transfer through the cable stream was one of the most dominant factors, and that the feature of heat conduction could be understood as an unsteady-state process.

Key words : Dynamic heat transfer, Finite element method, Successive over-relaxation, Partial

1. 서 론

최근 원자력발전소의 수가 급격히 증가함에 따라 원자력발전소의 안전운전에 관한 사회적 관심도 높아지고 있다. 특히 운전중인 원자력 발전소의 화재사고는 원자력발전소 내에 있는 제어시스템에 급속히 전파되어 중대한 사고로 발전할 수 있다. 그러므로 이러한 잠재적으로 중대한 위험요소의 규모를 파악하여 위험을 예방하고 통제하는 관리체계가 어느 때 보다 절실히 요구되고 있다. 이러한 위험관리의 하나로써 사용되어 왔던 시험방법인 기존의 ASTM E-119가 1975년 미국의 Browns Ferry 원자력발전소 사고 이후 ASTM E-814 또는 UL-1479로 바뀌게 되었다[1]. ASTM E-814는 방화 시스템의 안정성을 증명하기 위해서 유관으로 불꽃의 통과 여부를 확인하는 F-rating뿐만 아니라 정해진 온도의 초과여부를 확인하는 T-rating도 동시에 수행하도록 되어 있다. 일반적으로 원자력발전소 하나당 구획 사이의 케이블이 통과하는 방화시스템의 수는 3,000에서 10,000개에 이른다. 이렇게 많은 기존의 방화시스템에 새로운 시험방법인 ASTM E-814를 적용시켜 성능위주 시험을 실시하는 데에는 많은 어려움이 따르므로, 시험용 시뮬레이터를 개발하여 사용하는 것이 편리하다. CPFS 내의 온도분포를 계산할 수 있는 시험용 시뮬레이터는 T-rating 수행에 특히 효과적이다[2].

본 연구에서는 CPFS(Cable penetration fire stop) 시스템 내에서 일어나는 열전도현상을 일정한 초기조건과 경계조건 하에서 포물선 편미분방정식(Parabolic PDE)으로 기술하였다. 이때 CPFS에서 자체적으로 발생되는 열은 없고, 가열면 이외에도 케이블, 받침대, 벽면으로부터 열이 전도된다. 본 수치계산과 실험에서 사용된 가열면의 온도는 Fig.1.1에 나타난 ASTM E-119 Standard temperature-time curve(표준온도시간곡선)을 따른다고 가정한다.

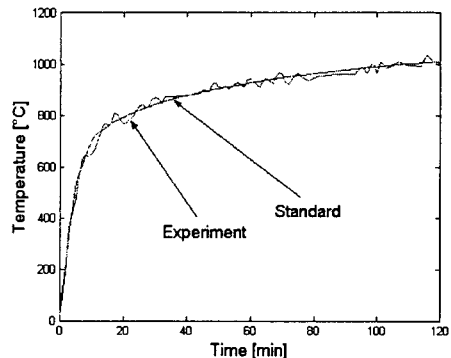


Fig. 1.1 The standard temperature-time curve of ASTM E-119 and the experimental time-temperature curve.

계산을 단순화 하기 위해서 전체 열전달을 z-축 직선상의 열전달 성분과 x-y-좌표 평면상의 열전달 성분으로 나눈다. 먼저 z-축 직선상에서 일어나는 동적 열전달을 나타내는 PDE를 연속과 완화법(SOR: Successive over-relaxation)을 이용하여 상미분방정식(ODE)으로 전환 하여 푼다.

다음으로 각각의 x-y-좌표 평면들을 유한 개의 요소로 나눈다. 그리고 앞서 SOR을 통해 계산된 결과값들을 각 요소절점의 초기값으로 놓고, Galerkin 유한요소법(FEM: finite element method)을 ODE로 전환하여 문제를 해결한다. 각 평면상의 절점에서 얻어진 결과값들은 다시 각 직선상의 절점의 초기온도로 사용된다. 이와 같이 SOR과 Galerkin FEM을 번갈아가며 시행함으로써, 전체 CPFS 내에서 일어나는 열의 흐름을 계산해 낼 수 있게 된다.

본 연구의 목표는 원자력발전소의 방화벽에 설치된 CPFS의 안전성을 시험할 수 있는 시뮬레이터에 사용될 모델과 계산 알고리즘을 개발하는 것이다. 더욱이 계산 값을 실험값과 비교함으로써, 본 연구에서 개발된 시험용 시뮬레이터의 신뢰도를 높일 수 있었다.

2. 이론 및 알고리즘

2.1. CPFS시스템의 해석

열전도도 k 가 온도나 압력의 변화에 대해 일정하며 충전 시스템 내에서 추가로 열이 발생하지 않는다는 가정하에서, 케이블관통부 충전시스템(CPFS: Cable penetration fire stop)에서 일어나는 비정상 상태의 열전도 현상의 지배방정식은 직각좌표에서 식(2-1)과 같은 포물선 PDE로 기술된다.

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

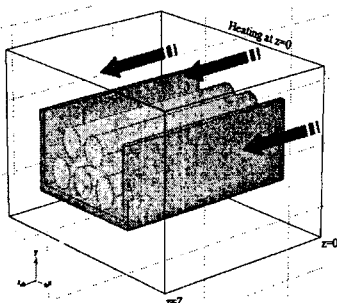


Fig. 2.1 CPFS 시스템의 개략도.

본 연구에서 구현하고자 하는 시스템은 방화벽의 케이블 관통부 충전시스템으로 직각 좌표에서 5개의 케이블과 하나의 받침대로 구성된 직육면체로서, Fig. 2.1에서와 같이 단순화시킬 수 있다.

실리콘으로 구성된 충전시스템의 내부는 모든 경계영역에서 식(2-2)와 같이 초기온도 T_0 와 같다고 가정 한다.

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \text{ on } \partial\Omega = \partial\Omega_{\text{wall}} + \partial\Omega_{\text{tray}} + \sum_{j=1}^n \partial\Omega_{\text{cable}}^{j \text{th}} \quad (2-2)$$

j 번째 케이블의 온도 $T_{\text{cable},j}$ 는 아래 식(2-3)에 나타난 것과 같이 위치와 시간에 따라 변한다. 경계면 온도와 열전도도 k 가 매우 큰 케이블 전체의 온도 T_{cable} 는 식(2-4)와 같이 경계면 시작부분($z=0$)의 온도는 항상 ASTM E-119표준온도시간곡선 $T_h(t)$ 를 따라서 변한다.

$$T_{\text{cable},j} = f(x, y, z, t) \quad \text{on } \partial\Omega_{\text{cable}}^{j \text{th}} \quad (2-3)$$

$$T(x, y, 0, t) = T_h(t) \quad \text{on } \partial\Omega_{\text{cable}}^{j \text{th}} \quad (2-4)$$

그리고 방화벽의 온도 T_{wall} 과 받침대의 온도 T_{tray} 는 식(2-5)와 식(2-6)에 나타내었다. 이 경우 두 온도는 경계영역을 따라서 z-축 방향으로만 온도변화가 일어난다. 그밖에도 방화벽과 받침대는 식(2-7)과 같이 $z=0$ 에서 ASTM E-119표준온도 시간곡선의 온도를 따른다.

$$T_{\text{wall}} = f(z, t) \quad \text{on } \partial\Omega_{\text{wall}} \quad (2-5)$$

$$T_{\text{tray}} = f(z, t) \quad \text{on } \partial\Omega_{\text{tray}} \quad (2-6)$$

$$T(x, y, 0, t) = T_h(t) \quad \text{on } \Omega \quad (2-7)$$

여기서 $T_h(t)$ 는 Fig. 1.1에서 볼 수 있듯이 일정하게 시스템의 한쪽 끝 $z=0$ 을 가열하는 온도로서, ASTM E-119 표준온도 시간곡선을 따르는 온도다 [1,2].

마지막으로 뒷경계면($z=Z$)과 접하는 공기의 온도는 항상 초기온도 T_0 와 같고, 공기의 대류현상을 통하여 일정하다고 가정할 때, 뒷면을 통해 단위면적당 빠져나가는 열의 흐름은 뒷면의 온도 $T(x, y, Z, t)$ 와 초기온도 T_0 간의 차이 ΔT 와 전열계수 h 에 비례한다고 할 때, 뒷면에서의 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다[3].

새로운 혼합알고리즘을 이용한 CPFS 내에서의 일어나는 동적 열전달의 수식화 및 해석

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z} = h(T - T_0) \quad (2-8)$$

따라서 CPFS시스템에서 일어나는 비정상 상태 열전도 현상은 포물선 PDE 식(2-1), 초기조건 식(2-2) 및 경계조건 식(2-4), 식(2-7), 식(2-8)로 표현될 수 있다.

2.2. 혼합 알고리즘(Hybrid algorithm)

위에서 유도한 초기조건과 경계조건을 갖는 PDE 형태의 지배방정식을 풀기 위해서, 연속 2 단계 복합알고리즘을 사용한다. 우선 이 방법에서는 x-y-z-좌표 공간에 대한 초기값 PDE문제로부터 환원된 z-축 직선성분과 x-y-좌표 평면성분에 대해 만들어진 각각의 초기값 PDE를 번갈아 연속적으로 계산한다. Z-축 직선상으로 전달되는 열은 유한차분법 (FDM: Finite difference method)의 일종인 연속과완화법 (SOR: Successive over-relaxation) 을 이용하여 계산하고, x-y-좌표 평면상에서 확산되는 열은 유한요소법(FEM: Finite element method)의 일종인 Galerkin 법을 이용하여 계산한다. Fig.2.2는 제시된 혼합알고리즘을 적용한 CPFS 시스템이다.

2.2.1 SOR계산과정

케이블관통부 충전시스템 내부의 z-축 직선에서의 열전달 지배방정식은 다음과 같다[4].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2-9)$$

식 (2-9)를 n개의 불연속 에너지수지로 나타내면 다음과 같다.

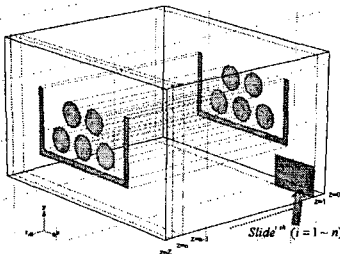


Fig. 2.2 SOR and FEM 적용 위한 분할된 그림.

우선, SOR 계산의 초기조건은 모든 직선에 존재하는 이산화된 점들에 대해 온도 T_0 로 설정한다. 그리고 FEM 계산에서는 x-y-좌표 평면상의 각 요소결점의 수를 p , 온도를 $T_p(t)$ 라 할 때, 식(2-10)으로부터 계산된 n p 개의 온도가 얻어지고, 이들을 다시 각 직선에서의 이산화된 점들의 초기온도로 이용된다. 또한 가열되는 평면 $z=0$ 에서의 온도는 ASTM E-119 표준온도 시간곡선을 따르는 온도 $T_0(t)$ 로서 시간에 따라 연속적으로 변한다. 여기서 z-축 방향으로의 온도 분포를 식으로 표현 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \alpha \left(\frac{T_2 - 2T_1 + T(0, t)}{\Delta z^2} \right) \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \alpha \left(\frac{T_3 - 2T_2 + T_1}{\Delta z^2} \right) \\ &\vdots \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} &= \alpha \left(\frac{T(Z, t) - 2T_n + T_{n-1}}{\Delta z^2} \right) \end{aligned} \quad (2-10)$$

여기서 뒷면($z=Z$)과 접하는 공기의 온도 $T(x, y, Z, t)$ 는 초기온도 $T_0=T(0, t)$ 로 항상 일정하다고 가정할 때, 뒷면을 통해서 단위면적당 빠져나가는 열의 흐름은 뒷면의 온도 $T_2=T(Z, t)$ 와 초기온도 T_0 간의 온도 차이 ΔT 와 전열계수 h 에 비례하므로 뒷면의 온도 T_2 는 식(2-8)을 전진차분 근사식으로 치환하여 다음과 같이 정리된다[5].

$$T(Z, t) = \frac{h \cdot T(0, t) + \frac{k}{2 \cdot \Delta z} (4T_n - T_{n-1})}{h + \frac{3k}{2 \cdot \Delta z}} \quad (2-12)$$

이상의 수식을 그림으로 나타내면 Fig. 2.2와 같다. 어느 시간 t 에 z-축 방향으로 $z=0$ 에서 $z=Z$ 까지 나아가는 직선상의 모든 절점에서의 온도를 SOR로 계산하고, 그로부터 얻어진 결과값들 T_i 을 각 x-y-좌표 평면상의 모든 요소결점에서의 초기값으로 사용하여 열전달 지배방정식[6] 을 Galerkin FEM으로 계산한다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T)$$

그 결과를 가지고 다음 시간 $t + \Delta t$ 에서 z-축

방향으로 SOR을 이용하여 다시 계산한다. 이상의 과정을 번갈아 반복함으로써 최종적으로 시간과 공간의 함수인 온도 $T(x,y,z,t)$ 를 계산할 수 있다. 즉, 1-D의 SOR과 2-D의 Galerkin FEM을 이용하여 각 시간 마다 변하는 온도분포를 계산할 수 있다.

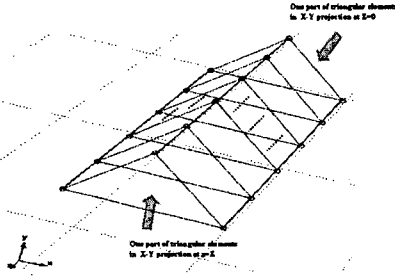


Fig. 2.3 Triangular mesh on Z-direction.

2.2.2 FEM계산과정

x-y-좌표 평면 위에서 벽, 케이블, 받침대 각각의 부분경계영역을 $\partial\Omega_{wall}, \partial\Omega_{cable}^{jth}, \partial\Omega_{tray}$ 라고 할 때, 전체 경계영역은 부분 경계영역들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\partial\Omega = \sum_{i=1}^n \partial\Omega_i = \partial\Omega_{wall} + \partial\Omega_{tray} + \sum_{j=1}^m \partial\Omega_{Cable}^{jth}$$

실린드 x-y-좌표 평면 위에서의 온도 T 는 케이블 ($\partial\Omega_{cable}^{jth}, j=1,2,3,4,5$), 받침대 ($\partial\Omega_{tray}$) 그리고 벽 ($\partial\Omega_{wall}$)에 의해 둘러싸인 경계 조건을 갖는 시간 t 와 공간 (x, y) 의 함수이다. 즉, 온도 T 는 서로 직교배열(Orthogonal Collocation) 을 이루는 공간변수 $\phi_i(x,y)$ 와 시간변수 $\tau_i(t)$ 의 곱으로 추산할 수 있다[7, 8].

$$T = f(x, y, t) \text{ on } \partial\Omega \quad (2-13)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \phi_i \tau_i \quad (2-14)$$

본 연구에서 다루고 있는 CPFS시스템의 지배방정식은 다음과 같은 열전도식이므로

$$\rho_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) \quad (2-15)$$

이상을 행렬의 표현으로 만들어주면 다음과 같다. 식(2-14)를 식(2-15)에 대입한 후 내삽함수를 가중치(weight function)로 사용하는 중량잔차법인 Galerkin Residual 형태로 만들어 주면 식(2-16)과 같아진다[5, 8, 9].

$$\iint_A \Phi \left(\frac{\partial}{\partial t} (\Phi^T T) - \alpha \nabla^2 (\Phi^T T) \right) dA = 0 \quad (2-16)$$

이를 공간의 함수에 대해서만 적분한다. 여기서 도함수의 차수를 2차에서 1차로 낮추어 주도록 Green Theorem를 적용 후에 일차원 적분형태로 단순화 시킨 후 대류조건(convection)을 추가하고 정리하면 식(2-17)과 같은 상미분방정식(ODE) 형태로 단순화 되어진다.[8, 10]

$$A \frac{dT}{dt} + BT = C$$

where $A = \iint_A (\Phi\Phi^T) dA,$

$$B = \iint_A (\nabla\Phi\nabla\Phi^T) dA \cdot \alpha + \int_x (\Phi\nabla\Phi^T) dx \cdot \frac{h}{\rho_p} \quad (2-17)$$

$$C = \int_x \Phi dx \frac{h}{\rho_p} T_f$$

이는 처음에 열전도 현상을 초기조건과 경계조건 하에서 포물선 PDE의 형태로 나타나는 지배방정식을 유한요소의 결점들에 대한 연립 ODE로 단순화시킨 것이다. 이상과 같은 식들은 CPFS시스템 내에서 일어나는 열전도 현상을 해석하는데 있어서 필요한 모델로 사용된다. 본 연구에서 다루고 있는 CPFS시스템의 열전달에 대한 지배방정식에 따라 뒷면($z=Z$) x-y-좌표 평면상에서 시간의 변화에 따라 일어나는 열의 확산은 직각 좌표에서 다음과 같이 수식화 할 수 있으며, Galerkin FEM을 적용하여 p 개의 요소결점에 대해 풀 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2-18)$$

각 요소결점에 대한 초기조건은 z-축 직선상의 각 결점에 대해 p 번 새로 계산해서 얻는다. $z=0$ 에서 가열되는 ASTM E-119 표준온도 시간곡선의 온도 $T_h(t)$ 가 시간에 따라 증가함에 따라, 각각의 x-y-좌표 평면에서는 열전달로 인해 전체 평면의 온도가 서서히 증가하게

새로운 혼합알고리즘을 이용한 CPFS 내에서의 일어나는 동적 열전달의 수식화 및 해석

된다. 여기서 각 요소에서의 온도는 시간의 함수와 x-y-좌표로 나타내지는 공간의 함수의 곱으로 추산되며, 이 때 이 함수들 간에는 직교배열(Orthogonal Collocation)이 전제된다.

$$T(x, y, t) = \sum_{i=1}^{840} \tau_i(t) \phi_i(x, y) \quad \text{at } z = Z \quad (2-19)$$

식(2-12)와 식(2-18) 그리고 그와 관련된 초기조건 및 경계조건을 이용하여 위에서 얻어진 식(2-17)와 같이 일련의 ODE로 전환 된다. 이 상에서 보면 포물선PDE형태의 식 (2-1)은 ODE 형태의 식(2-17)으로 대체될 수 있으며, 이를 통하여 초기조건을 바탕으로 각 요소의 결점에서 적절한 해를 얻을 수 있다. 시간에 따른 축적에 관한 항을 무시할 경우나 일정한 시간에서 대해서 계산을 할 경우 식 (2-17)이 첫째 항이 사라져서 대수방정식으로 의 전환이 가능하다.

2.3. 프로그램용 알고리즘

본 연구에서 사용된 혼합알고리즘에 관한 흐름도를 Fig 2.4에 나타내었다. 이는 다음과 같은 과정들을 거친다. 초기 데이터 값으로 임의의 케이블의 경계 온도 $\partial\Omega_{Cable}^{i th}$ 과 관련된 물성치들이 입력된다[2].

시간 $t = t_i$ 에서의 계산과정을 보면, 위의 순서도에서 나타난 것처럼 우선 임의로 주어진 경계조건을 나타내는 값들과 초기값들을 가지고 z-축 방향으로 CPFS에서의 온도를 SOR로 계산한다. 그리고 그 값을 초기값으로 놓고 x-y-좌표 평면 위에서 온도분포를 Galerkin FEM으로 계산한다. 이런 과정이 후에 임의의 값으로 정해져있었던 케이블 위에 경계온도를 위에서 얻어진 값들로 바꿔 놓고 케이블 모듈의 x-y-좌표 평면 위에서 온도분포를 Galerkin FEM으로 계산한다. 그리고 다시 z-축 직선상의 열전달을 SOR로 계산해낸다. 이런 과정을 통해 처음 CPFS의 온도분포를 계산할 때 가정했었던 케이블 주변의 온도를 이번엔 위에선 구한 값으로 대신해서 다시 전체를 계산해서 특정시간 t에서의 온도분포를 계산하게 된다. 이런 과정이 끝나면 Δt 후인 그 다음 번의 시간에 대해 SOR로 새로 계산된 받침대와 벽의 온도를 이용하여 위의 과정을 다시 반복한다. 그리고 이런 일련의 과정은 원하는 시간에 이를 때까지 반복하게 된다.

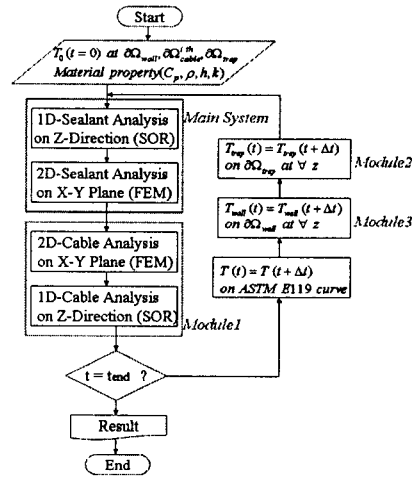


Fig. 2.4 Programming Algorithm.

3. 프로그램 모사결과

3.1. Matlab구현결과

CPFS 시스템을 통과하는 케이블의 시간에 따른 온도분포를 Fig. 3.1에 나타냈다. CPFS의 경계를 구성하는 케이블, 받침대, 벽에서의 시간에 따른 온도들은 z-축 직선을 따라 계산되었으며, 각 x-y-좌표 평면상에서의 값들을 이용해서 전체 CPFS시스템 내에서의 온도분포를 계산하는데 사용했다. 다음은 CPFS 시스템 내에서 얻어진 온도분포에 관한 결과이다[11].

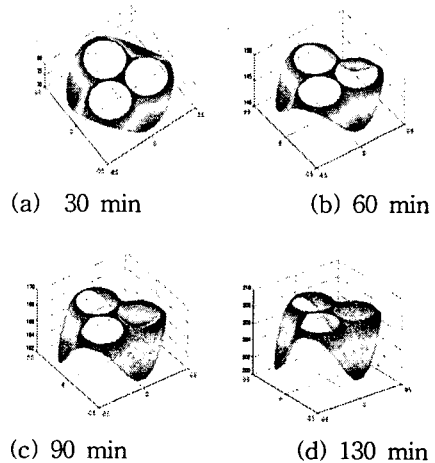


Fig. 3.1 Dynamic temperature distribution on the cable at z=Z.

Fig. 3.2에는 케이블로부터 전달되는 열의 흐름뿐만 아니라 벽과 받침대로부터 전달되는 열의 흐름을 잘 보여주고 있다. 수치 계산을 통한 결과로서 180분이 경과한 후에 CPFS 시스템내에서의 온도분포는 $40^{\circ}\text{C} \sim 214^{\circ}\text{C}$ 로 나타났고, 이상의 수치적으로 계산된 결과들을 시간에 따라 나타내면 Fig.3.3과 같은 시간에 따른 동적인 열전달 현상을 볼 수 있게 된다. Fig.3.3은 CPFS시스템 내에서의 동적인 열전달을 가장 잘 나타낸 그림인데 ASTM E-119 표준온도 시간곡선을 따라 온도가 증가되는 $z=0$ 부분과 반대 벽면인 $z=4$ 에서의 온도 profile이 비선형적임을 알 수 있다.

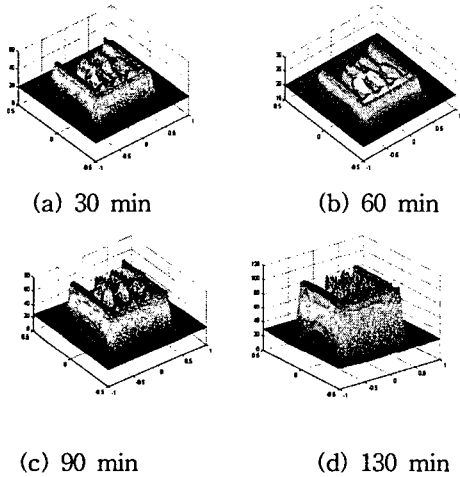


Fig. 3.2 Dynamic temperature distribution on CPFS at $z=Z$.

또한 시간의 증가에 따른 5개 평면에서의 온도변화를 확인해봄으로써 단열재의 물리적 성능을 알아 볼 수 있다. 또한 Fig 3.4에서는 같은 데이터를 가지고 시간의 변화에 따라 각각의 x-y-좌표 평면 위에서의 온도변화를 보여준다. 이상의 계산을 위해서 Table 3.1에 주어진 물성치, 파라미터 그리고 경계치를 사용했다.

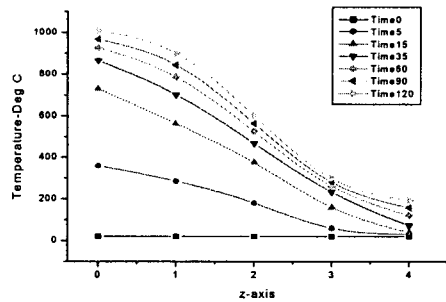


Fig. 3.3 Maximum temperature profile at a few x-y slides for some time.

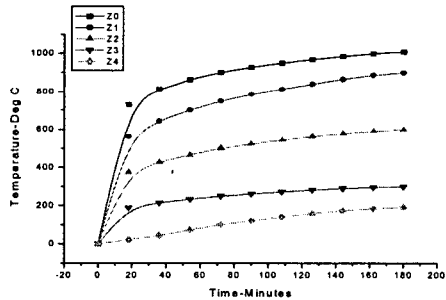


Fig. 3.4 Maximum temperature profile at a few x-y slides for some time.

Table 3.1. The subdomain parameters (at $293\text{k} \sim 573\text{k}'$)[2]

PARAMETER	DESCRIPTION	SUBDOMAIN VALUE				
		SEALANT (SiO ₂)	CABLE (PVC)	CABLE (Cu)	WALL (CaCO ₃)	TRAY (Fe)
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	Density	0.3×10^3	1400	9840	1900~2300	7850
$C_p(\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K})$	Heat Capacity	44/60.1	1.05×10^3	380	880	460
$k(\text{W}/\text{m} \cdot \text{K})$	Thermal Conductivity	7.5×10^{-2}	0.16	387	0.8~1.4	45.8
Q	Heat source	0	0	0	0	0

온도가 ASTM E-119 표준온도시간곡선을 따라 2시간 동안 약 1000℃까지 상승하는 조건으로 계산하였다. 상용 소프트웨어 MatLab 버전(6.5)을 이용하여 프로그램을 작성 하였으며, 펜티엄IV 2.0GHz의 컴퓨터를 이용 하여 약 8분의 계산시간이 소요되었다.

3.2. 실험결과와의 비교

실험값은 가열되는 면의 반대면($z=Z$)에서 측정된 온도값이다. 따라서 CPFS 시스템 내부의 온도 profile을 비교할 수 없었고, 특정 요소결점에서의 수치적인 계산결과와의 비교를 나타낸 것이다. Fig.3.5와 Fig.3.6 에서는 트레이와 벽, 케이블 과 충전물에서의 온도에 관해 실험값과 계산값을 비교해보았다.

수치적인 계산을 통해서 평면 전체에 대한 온도분포를 얻을 수 있는 반면, 실험은 한정된 위치에서 만의 온도를 얻을 수 있으므로 가장 큰 값만을 비교해서 나타냈다. 이것도 마찬가지로 CPFS 시스템 내부에서의 온도 profile은 알 수 없지만 반대 벽면에서 최종 시간에 비슷한 최대치 온도 결과를 비교해 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과를 실험값과 비교함으로써 본 프로그램의 신뢰도를 높이는 것이 무엇보다 중요한 작업이다. 예를 들어 열전달계수의 조절을 통해 실험값과의 차이를 좁힐 수 있었다 [12]. 수치적 계산결과에 따르면, 180분이 경과한 후에 CPFS 시스템 내에서의 온도분포는 시간에 따라 로 나타났고, 이는 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소 방화벽에 설치된 케이블관통부 충전물시스템(CPFS)에서 일어나는 동적 열전달 현상을 수치적으로 모사하기 위하여 CPFS시스템을 모델링하고 새로운 혼합알고리즘을 개발했다. 더욱이 본 연구에서 개발된 시험용 시뮬레이터는 실험 데이터를 이용한 Validation 을 통해 그 신뢰도를 높일 수 있었는데 이러한 실험과 모사를 통해 다음과 같은 결론에 이르렀다[12].

본 연구에서는 3차원 열전도 해석기법을 통해 계산된 CPFS 내의 온도분포가 실제 시험에 의해서 얻어진 값과 매우 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 연구의 주안점 가운데 하나가 CPFS시스템을 관통하는 케이블이 안전

성에 미치는 영향을 알아 보는 것이었는데, 수치적인 시뮬레이션을 통해서 케이블에 의해서 관통된 충전물 내에서 시간의 변화에 따른 공간상의 온도분포를 보임으로써, 충전물을 통과하는 케이블이 실제로 시스템 내의 동적인 열전도 현상에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 즉, CPFS 시스템 내에서 케이블의 밀집 상태와 배열이 시스템 안전성에 결정적인 영향을 미침을 알 수 있었다. 더욱이 충전물 내에서 의 열전달이 비정상 상태로 일어남을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서 제안된 혼합 알고리즘을 이용해서 시간에 따라 경계 조건이 변하는 포물선 PDE를 효율적으로 풀 수 있었으며, 또한 이 혼합알고리즘은 다른 유사한 시스템에도 적용이 가능하다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다. 마지막으로 케이블 내의 온도분포가 비정상 상태의 동적 열전달 현상을 보임을 확인했다. 본 연구를 통한 이런 수치적인 접근은 성능위주의 CPFS 시스템을 구축하는데 매우 유용한 정보가 될 것이다. 앞으로의 연구는 보다 복잡하고 다양한 기하구조에 초점을 맞춰서 진행될 것이다[11,12].

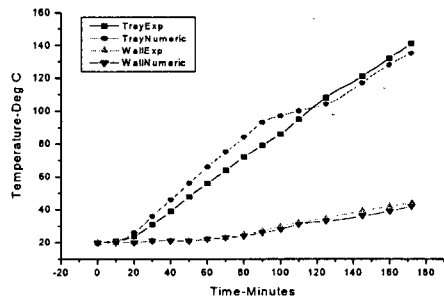


Fig. 3.5 Experimental and numerical results on the tray and the wall.

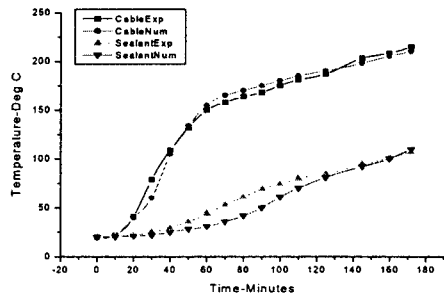


Fig. 3.6 Experimental and numerical results on the cable and the sealant.

참 고 문 헌

- [1] ASTM, "ASTM Standards in Building Codes: Specifications, Test Methods, Practices, Classifications, Terminology", *American Society for Testing and Materials, 30th ed, Philadelphia, Pa,* (1993).
- [2] D. Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", *2nd ed,* (1998).
- [3] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, "Fundamentals of Heat Transfer", *Wiley, New York,* (1981).
- [4] F. Monte, "An Analytic Approach to Unsteady Heat Conduction Processes in One-dimensional Composite Media", *Int'l. J. Heat Mass Transfer, 45,* p.1333-1343, (2002).
- [5] R.V. Southwell, "Relaxation Methods in Engineering Science", *Oxford Press, London,* (1940).
- [6] F.P. Incropera, D. Witt and P. David, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", *4th ed., John Wiley & Sons, New York,* (1996).
- [7] E.B. Becker, F.C. Graham and J.T. Oden, "Finite Elements", *Prentice-Hall,* (1981).
- [8] S. Moaveni, "Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS", *Prentice-Hall,* p.289-292, (1999).
- [9] G. Feirweather, "Finite Element Galerkin Methods for Differential Equation", *Marcel Dekker, New York,* (1978).
- [10] M. Abramowitz, I.A. Segun, "Handbook of Math. Functions", *Dover, New York,* (1968).
- [11] Matlab Manual, V. 6.5, "Partial Differential Equation Toolbox User's Guide", *The Mathworks,* (2002).
- [12] J.V. Beck, K.J. Arnold, "Parameter Estimation in Engineering and Science", *John Wiley and Sons New York,* p.444, (1997)
- [13] T.J. Ross., L.R. Wagner and G.F. Luger, "Objected-oriented programming for scientific codes, thoughts and concepts?: examples in C++", *J. Comp. Civil. Eng., 6,* p.480-514, (1992).
- [14] X.A. Kong and D.P. Chen, "An objected-oriented design of FEM program", *Comp. and Struct., 57,* p.156-166, (1995).
- [15] M. Jakubith, Memofix: Chemie und Chmietechnik, VCH, Weinheim, (1992).