

論 文

# FDM에 의한 응고해석시 계산시간 단축을 위한 Algorithm연구

이재경, 전주매, 전기찬

## Efficient Algorithm for the Solidification Simulation by FDM

Jae-Kyung Lee, Ju-Mae Jeon and Ghi-Chan Jun

### Abstract

Efficient algorithm for the solidification simulation by FDM is described from the practical point of views. If a proper time step  $\Delta t$  is selected, the calculation is accelerated by implicit algorithm with the temperature recovery method of latent heat method. The implicit routine in the calculation is processed by SOR method(relaxation factor = 1.5, truncation error =  $10^{-4}$ ). The calculation is more accelerated by linear-interpolated explicite algorithm with a time step larger than the minimum value of the time step. This explicit method, which is applicable to the practical casting simulation problems, produces almost same results with about 40% faster calculation speed compared with the conventional explicit method.

(Received April 15, 1994)

### 1. 서 론

응고현상을 수치해석하는 방법으로 FDM(Finite Difference Method)이 비교적 단시간에 정확한 해석결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. FDM은 크게 음적 해법(Implicit Method, 후퇴 차분법)과 양적 해법(Explicit Method, 전진 차분법)으로 구분할 수 있다. 두 수치해법의 계산 결과는 엄밀해에 의해 얻어진 온도 분포를 비교해 보면, 실용적인 관점에서 볼 때 엄밀해에 근사한 해를 얻을 수 있으며, 일반적으로 양적해법은 프로그래밍이 비교적 용이하고 계산 정밀도가 우수한 반면 열 물성치, 요소의 크기, 경계 조건 등에 따라 수치해석상 시간 증분(Time Step),  $\Delta t$ 가 안정조건에 의해 제한된다는 단점을 가지고 있고, 음적 해법은 시간 증분을 크게할 수 있으며 동일  $\Delta t$ 에서는 비교적 계산 정도가 좋은 반면 프로그래밍이 비교적 복잡하다는 단점

을 갖는다.[1] 대체로 계산시간, 계산 정도의 측면에서 볼때, 양적 해법이 음적 해법에 비해 보다 실용적인 수치해석 방법으로 이용되고 있다고 할 수 있다.

최근 3차원의 복잡 형상을 가진 주조품에 대한 응고해석이 주조 금형 설계, 주조품의 품질 평가등에 주조 CAE 기술로서 실용화되고 있으며, 선진 기업에서는 실용 가능한 주조 해석 시스템을 개발 또는 도입하여 주조품 개발 및 관리에 효율적으로 활용하고 있는 실정이다.[2] 국내에서도 일부 연구기관의 주도로 시스템의 개발이 진행중이고 또한 일부 업체에서는 선진 상용 소프트웨어를 도입하여 적용중인 것으로 알려져 있다.

특히 응고해석의 실용화가 성공적으로 추진되고 있는 일본의 경우 연구자들 뿐아니라 현장 실무자들도 각종 주조품 제조에 있어서 응고해석기술을 실무에 응용하는데 많은 노력을 기울여 온

결과 유용한 노하우가 많이 축적되었으며, 일부 선결과제가 남아있음에도 실용화가 이루어졌다. 그러나 현재까지도 응고 해석이 실용화되는데 어려움을 겪는 몇가지 요인 중 하나는 제품 형상이 복잡할 경우, 이에 대한 입력데이터 작성 및 컴퓨터의 연산시간이 지연된다는 점이다. 이러한 점을 해결하기 위해 형상입력 부분에서는 전용 입력기(Pre-Processor) 개발 또는 범용 CAD 소프트웨어 응용 등 많은 연구가 진행되었다. 또한 양적 해법의 경우, 일반적으로 전 요소에 동일 시간 증분  $\Delta t (= \Delta t_{min})$ 가 적용되며 이  $\Delta t_{min}$ 이 복잡 형상의 주조품의 경우에 매우 작아지게 되어 총 계산시간이 상당히 소요되는 문제가 발생된다. 따라서 실용화의 측면에서 응고 해석을 수행하는데 소요되는 계산시간을 단축시키기 위해 해석 Algorithm에 대한 일련의 연구가 이루어져 왔다. 일본의 新山에 의하면 1970년대 부터 계산 시간의 단축을 목적으로 Flux-Boundary Method[3], Localized Heat Absorption Function [4], 시간 증분  $\Delta t$ 를 높이기 위한 등가 비열의 정의[5] 등의 연구가 발표되었으나, 그 연구 결과가 실제로 실용화되었다고 보고된 바는 없었다. 그러나 최근에 HYBRID법(음해법+양해법)을 제시하여 기존 해법에 비해 계산시간 단축효과가 매우 현저하다고 보고되었으며[6], 이 Algorithm은 1991년 실용 소프트웨어인 HICASS에서 적용된 것으로 알려져 있다.[7] 또한 일본의 大中은 1980년대 초반에 선형 내삽 전진 차분법을 제시하였으며 이 algorithm은 1980년대 후반에 실용소프트웨어인 SOLDIA, SOLAN 등에 적용된 것으로 알려져 있다. 국내에서도 1980년대 부터 응고해석에 관한 연구결과가 발표되었으며 대부분 전진 개량 차분법에 기초한 수치해석 방법에 의해 연구가 수행되었다.[8-14] 그간 국내의 연구는 주로 각종 수치해석 모델의 제시와 검증 사례를 중심으로 이루어 왔으며 실용화의 관점에서 이루어진 연구는 매우 드물었다고 볼 수 있다. 그러나 최근 FDM에 의한 응고해석시 음적 해법 적용을 통해 계산시간을 단축시키고자 하는 연구가 발표되었다.[15] 연구 결과에 의하면 잠열처리를 엔탈피법을 사용한 음적 해법이 잠열처리를 온도 회복법을 사용한 양적해법에 비해 계산정도, 계산시간이 개선되었

다.

본 연구는 자동차 주조품과 같은 대형 복잡형상의 주조품에 적용 가능한 EWS용 응고해석 시스템을 개발하는 과정에서 main solver인 해석 module이 전진 개량 차분법이 적용되어 전술한 바와같이 시간 증분  $\Delta t$ 가 제한되므로서 계산시간이 지연되어 이를 개선하고자 양적 해법, 음적 해법 등 몇가지 Algorithm을 검토한 결과이며, 연구결과 SOR법을 적용한 음적 해석과 선형 내삽 전진 차분법이 계산시간 단축에 개선 효과가 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 두 수치해법을 기존의 전진 개량 차분법과 각각 비교하므로서 선형 내삽 전진 차분법이 비교적 계산 정도가 정확하고 계산시간도 절감되는 수치해석 방법임을 제시하고자 하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 양적해법[1]

응고 현상을 포함하는 3차원 비정상 열전도 미분방정식은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 3차원 직교 좌표계에서 임의의 육면체 요소(i,j,k)에 대하여,

$$\rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} \left( K \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( K \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( K \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + \rho \cdot L \frac{\partial f_s}{\partial t} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

- 여기서,  $\rho$  : 밀도(g/cm<sup>3</sup>)
- C : 비열(cal/g·°C)
- K : 열 전도도(cal/cm·°C)
- L : 응고잠열(cal/g)
- $f_s$  : 응고율

Fourier의 에너지 보존 법칙으로 부터 내절점법에 의한 전진 개량 차분식을 유도하여  $\Delta t$ 이후의 요소내의 미지 온도  $T^{t+\Delta t}$ 에 대하여 정리하면 다음 식이 얻어진다.

$$T^{t+\Delta t}_{i,j,k} = \left[ 1 - \frac{\Delta t}{\rho \cdot C} \cdot \frac{1}{V} \sum_{i=1}^6 B_i A_i \right] T^{t}_{i,j,k} + \frac{\Delta t}{\rho \cdot C} \cdot \frac{1}{V} \sum_{i=1}^6 B_i A_i T^t(\text{주위요소}) \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

여기서,  $A_i, B_i$ 는 요소(i,j,k)에 대한 각각 경계면과 경계조건을 나타내고, V는 요소(i,j,k)의 부피를 나타낸다.

양적 해법을 적용하는 경우, 다음과 같이 시간 증분에 대한 안정조건을 고려해야 한다.

$$1 - \frac{\Delta t}{\rho \cdot C} \cdot \frac{1}{V} \sum_{i=1}^6 B_i A_i \geq 0 \quad \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

이로부터 각 절점 요소는 열 물성치, 경계조건, 절점 요소의 크기에 따라 시간 증분,  $\Delta t$ 가 지배되는데 각 미소요소의  $\Delta t$ 중 최소의  $\Delta t$ 에 의해 계산을 수행해야 안정된 해를 얻을 수 있다.

또한 양적 해법에서는 응고잠열의 평가를 위해서 온도 계산시 우선 응고 잠열의 방출을 고려하지 않고 온도 계산을 한 후,  $\Delta t$ 시간 마다 계산된 온도로 부터 온도 강하량을 구하고 아직 응고가 진행중인 경우 고상율의 증가에 따라 응고 잠열 양을 계산하여 온도를 회복시키는 온도 회복법을 적용하였다.

**2.2 음적해법**

보고된 바에 의하면, 전술한 양적 해법과 응고 잠열을 온도 회복법에 의해 처리한 음적해법, 엔탈피법에 의해 처리한 음적 해법 세가지를 비교 계산한 결과 계산속도는 양적해법, 엔탈피법을 적용한 음적 해법, 온도 회복법을 적용한 양적 해법의 순으로 점점 빠르게 계산되며, 계산의 정도는 양적 해법과 엔탈피법을 적용한 음적해법이 대체로 정확하고, 온도 회복법을 사용한 음적해법이 다소 정도가 떨어짐을 나타내었다.[15] 또한 온도 회복법을 사용한 음적 해법의 경우에도 상변태 온도 구간이 넓을 경우 어느 정도 허용될 수 있는 수치해석 결과를 얻을 수 있다고 하였다.

본 연구에서는 실용적인 관점에서 잠열을 온도 회복법으로 처리한 경우의 음적해법을 적용하였으며, 수치해는 SOR(Successive Over-Relaxation, 연속상향 이완)법을 적용하여 구하였다.

식 (1)에 나타낸 열전도 미분 방정식을 차분화 하면, 시간  $t + \Delta t$ 에서, 절점 P에서의 온도  $T_p$ 는 식(4)와 같이 일반화할 수 있다.[16]

$$a_p T_p = \sum a_{nb} T_{nb} + b \quad \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

여기서,  $a_p, a_{nb}, b$ 는 각각  $\rho, C, K, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z, T_p^i$ (기저 온도)에 의한 상수항이고, 첨자 nb는 이웃요소를 나타낸다. 식 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_p = \frac{\sum a_{nb} \cdot T_{nb} + b}{a_p} \quad \dots\dots\dots \text{식(5)}$$

반복 계산시의  $T_p$ 값을  $T_p^*$ 로 하면,

$$T_p = T_p^* + \left( \frac{\sum a_{nb} \cdot T_{nb} + b}{a_p} - T_p^* \right) = T_p^* + \alpha \cdot \left( \frac{\sum a_{nb} \cdot T_{nb} + b}{a_p} - T_p^* \right) \quad \dots\dots\dots \text{식(6)}$$

여기서,  $\alpha$ : 이완계수(Relaxation Factor)

이로부터 반복계산이 수렴될 때, 즉  $T_p$ 가  $T_p^*$ 와 같아질때 수렴된 온도값을 원래의 방정식 (4)를 만족시키게 된다.

본 연구에서 채택한 수렴 조건은 다음과 같다.

$$\text{Error} = \frac{|T_p - T_p^*|}{|T_p|} < 1 \times 10^{-4} \quad \dots\dots\dots \text{식(7)}$$

**2.3 선형 내삽 전진 차분법[17]**

양적 해법은 해석계 전체를 미소 요소로 분할한 후 안정 조건에 따라 최소의 시간증분,  $\Delta t$ 를 갖는 요소를 찾아내고, 그 값을 전 요소의 계산에 적용하므로 작은  $\Delta t$ 를 갖는 한개의 요소로 인해 계산 시간이 매우 길어질 수 있다.

그러나 각각의 요소의 체적, 열 물성치가 달라지면  $\Delta t$ 값도 달라지게 되는데 이러한 각각의  $\Delta t$ 를 그대로 사용할 수 있게 되면 계산 속도가 빨라 질 수 있게 된다.

이와같이 하여 선형 내삽을 이용하는 개략적인 계산 순서는 다음과 같다.

- (1) 전 요소에 대한 시간 증분,  $\Delta t$ 를 구하여 전 요소중 최소의  $\Delta t$ 를 찾아  $\Delta t_{min}$ 을 정의한다.
- (2) 각 요소의 안정 범위내에서  $\Delta t_{min}$ 의 정수배가 되는  $\Delta t_i$ 값을 결정한 후,  $\Delta t_i = ID_i \cdot \Delta t_{min}$ 이 되는  $ID_i$ 를 정의 한다.
- (3) 온도 계산을 수행한다.  $\Delta t_{min}$ 의 정수배(NC)에 따라 시간이 진행되는데, 이때 각 요소는 고유  $ID_i$ 를 가지므로 NC가  $ID_i$ 의 정수배가 될 때에만 다음시간 증분,  $\Delta t$ 의 온도를 계산하면 된다.

여기서, 다음 시간 증분,  $\Delta t$ 에 대한 온도를 계산하기 위해서는 대상 요소(i)의  $\Delta t$ 이전의 기저 온도,  $T_i^B$ 와 인접 요소(j)의  $\Delta t$ 이전의 기저 온도,  $T_{j-1}^B$ 가 필요한데, 대상 요소와 인접요소와의 ID 값이 다를 경우에는 다음과 같은 내삽식에 따라 근사값을 구한다.

$$T_{j-1}^B = T_j^B + (T_j - T_j^B) \cdot r_{ij} \quad \dots\dots\dots \text{식(8)}$$

$T_j^B$ : 인접요소의  $\Delta t$ 이전,  $ID_j$ 에 의해 구해진 온도

$T_j$ : 인접요소의  $\Delta t$ 이후,  $ID_j$ 에 의해 구해진 온도

$$r_{ij} = r_{0ij} \cdot \text{FLOAT}(\text{NC}-1)$$

$$r_{0ij} = \text{FLOAT}(\text{MOD}(\text{ID}_i, \text{ID}_j)) / \text{FLOAT}(\text{ID}_j)$$

여기서,  $\text{FLOAT}(\ )$ : 실수화 함수,  $\text{MOD}(\ )$ : 두수의 나눈 값의 정수부

이때,  $\Delta t_i$ 가 안정조건에 따라 인접 요소와의 편차가 너무 커지게 되는 경우, 내삽에 의한 오차가 크게 되므로 적당한 범위에서  $ID_{\max}$ 를 제한할 필요가 있다.

또한 온도 회복법에 의한 잠열 방출도 각 요소마다 다른 시간 증분,  $\Delta t$ 에 의해 계산하였다.

본 연구에서 이용된 수치계산용 컴퓨터는 IBM RS6000 EWS이다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 수치해석의 모델로서 요소수 5,

618( $8 \times 27 \times 26$ )개를 갖는 단순 형상모델과 요소수 165,148( $106 \times 38 \times 41$ )개를 갖는 복잡 형상 모델로서 실용목적의 자동차 엔진의 주요 주조품인 크랭크샤프트에 대하여 수치해석하였다. Fig. 1에 수치해석 모델을 나타내었다. 수치계산에 이용된 물성치 및 경계조건은 Table 1, Table 2와 같다.

복잡 형상 주조품에 대하여 전술한 세가지 수치해법의 계산 결과 Table 3과 같은 응고 완료시간이 얻어졌다. Table 3에서 나타낸 시간 증분 ratio는 종래의 양적 해법의 시간 증분을 기준으로 하였을 때의 상대치이다.

수치해석 결과를 평가하기 위한 파라메타는 주조 프로세스에 따라 달라질 수 있으나 대표적인 것으로는 온도, 응고 시간, 온도 구배등이 적용되고 있으며, 온도 구배 데이터는 비교적 민감하게 결과를 나타냄으로 인해 실용적인 측면에서 응고 완료시간이 많이 사용된다. 이에 대하여는 연구자들에 의해 지속적인 연구가 진행중에 있으나 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 응고 완

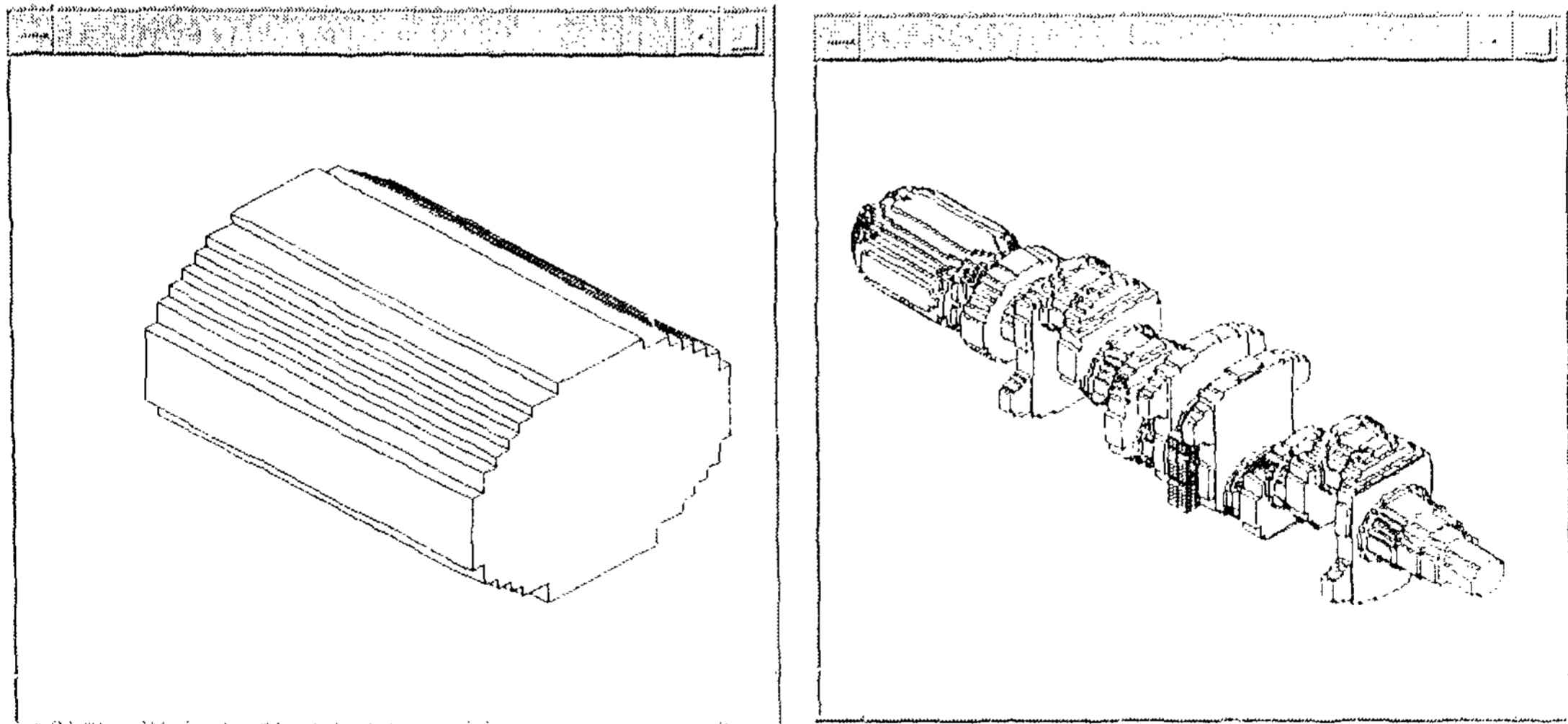


Fig. 1. Schematic model for calculation (a) Simple shaped model (b) Crank shaft model

Table 1. Thermal properties used in calculation

	density (g/cm <sup>3</sup> )	specific heat (cal/g·°C)	thermal conductivity (cal/°C·cm·sec)	T <sub>L</sub> (°C)	T <sub>S</sub> (°C)	latent heat (cal/g)
FCD	7.6	0.119	0.04	1160	1150	47
Mold	1.65	0.25	0.004	—	—	—
Chill	7.5	0.16	0.08	—	—	—

**Table 2.** Boundary condition

boundary condition	heat transfer coefficient (cal/°C·cm·sec)
mold/casting	0.1
mod/air	0.001

료 시간을 수치 해법을 비교·평가하기 위한 데이터로 사용하였다.

Table 3에 나타난 바와 같이 온도회복법을 적용한 음적 해법의 응고완료시간 예측 결과는 기존의 양적 해법에 비해 약 1.7%의 편차를 나타내었는데, 이는 보고된 바[15]와 같이 음적해법의 경우 온도 회복법을 적용하여 잠열을 처리하는 경우에는 엔탈피법에 비해 응고 시작 시점에서는 온도를 과대 평가하는 문제로 인해 오차의 누적으로 잘못된 해가 나타날 우려가 있으나 응고 완료시간의 예측은 시간 적분의 결과로 대체로 비슷한 결과를 나타낸다는 사실과 대체로 일치하는 결과라고 생각된다. Table 3에 나타난 바와 같이 음적해법이 계산 시간의 면에서 양적 해법에 비해 개선된 효과를 나타내기는 하지만, 시간 증분이 매우 커짐에 따라, 음적 해법의 특성상 시간  $t + \Delta t$ 에서의 온도를 이용하므로 온도구배를 실제보다 크게 계산해서 온도를 낮게 예측할 수 있게 되어 온도구배는 실제와는 달리 점점

작아지게 되는데 이러한 현상때문에 응고완료 시간은 다소 길게 나타난다고 한 보고와 일치하고 있다.[18]

長坂에 의하면[17] 2차원 열전도 문제에 대한 Bruch-Zyvoloski의 해석해와 종래의 양적 해법 및 선형 내삽 전진 차분법의 결과는 약 0.8%이내의 범위에서 일치한다고 하였는데, 본 연구 결과 선형 내삽법을 적용한 양적 해법의 경우 종래의 양적 해법에 비해 약 0.87%의 편차를 나타내었으므로 長坂의 결과와 그대로 비교하기는 어려우나 대체로 비슷하다고 생각된다.

양적 해법과 음적 해법의 계산 시간을 비교하기 위해 Fig. 1 (a)에 나타난 바와 같이 단순형상 모델에 의해 계산한 결과는 Table 4에 나타난 바와 같다.

음적 해법은 반복법에 의해 계산되는 경우가 많으므로 본 연구에서는 Gauss-Seidel반복법과 SOR법 두가지를 적용하여 계산하였다. 계산 결과에 의하면 Gauss-Seidel법은 양적 해법에 비해 약 8.2~16.5%의 편차를 나타내었으며, 계산 시간의 절감효과도 없었으나, SOR법의 경우에는 약 3.9~8.2%의 오차를 나타내어 상대적으로 양호한 결과를 나타내었으며, 시간 증분이 일정 수준 이상, 즉  $\Delta t$  ratio가 20 이상일 경우 계산시간 절감 효과가 나타나게 됨을 알 수 있었다. SOR

**Table 3.** Results of solidification analysis by explicit and implicit algorithm

analysis algorithm	solidification time (sec)	time step ratio ( $\Delta t = 0.1\text{sec}$ )	CPU time (sec)
1. EXPLICIT(Conventional)	334.3	1	28,037
2. EXPLICIT(Linear-interpolated)	331.4	5	17,670
3. IMPLICIT	340.0	20	20,784

**Table 4.** Comparison of implicit algorithm with explicit algorithm

analysis algorithm		iteration	$\alpha^*$	time step ratio ( $\Delta t = 0.14\text{sec}$ )	CPU time (sec)	solidification time(sec)
IMPLICIT	GAUSS-SEIDEL iteration method	16~20	1	10	397	105.0
		27~35	1	20	351	109.0
		39~49	1	30	343	113.0
	SOR method	11~21	1.5	10	336	100.8
		16~22	1.5	20	201	103.6
		21~24	1.5	30	173	105.0
EXPLICIT(CONVENTIONAL)				1	230	97.0

\* $\alpha$  : relaxation factor

법의 적용에 있어서 이완 계수를 1.5로 하게 될 때 표에 나타난 바와 같이 해를 구하기 위한 반복 횟수가 Gauss-Seidel 반복법과 비교할 때 동일 시간 증분에 대해 감소하게 되어 계산시간이 단축되는 효과가 나타났다. 또한 전술한 바와 같이 시간 증분이 증가하게 됨에 따라 응고 완료시간이 다소 길어지게 됨을 알 수 있다.

Table 3에 나타난 바와 같이 실용 목적으로 음적 해석을 적용한 경우 해석 결과는 양적 해법에 비해, 계산 시간 절감 효과는 약 26% 정도 나타났다. 그러나  $\Delta t$  ratio가 증가할수록 계산 시간이 절감되는 효과가 증가하는 반면, 상대적으로 양적 해법과의 편차가 증가하게 되어 결과의 정도가 불안정해 질 수 있는 문제가 있다. 이에 관하여는 잠열처리를 엔탈피법을 수정하여 시간 증분에 무관하게 일정한 계산 결과를 얻을 수 있는 방법이 최근 제시되었다.[15] 이 방법은 계산 정도의 면에서는 보다 우수하고 계산 시간의 면에서는 양적해법에 비해서는 좋지만 위의 방법에 비해서는 다소 떨어지는 결과를 나타내는 바, 본 연구에서는 양적 해법의 적용으로 음적해법의 적용으로 음적해법에 비해 보다 빠르게 계산하면서 계산 정도가 그대로 유지되는 수치해법으로서 선형내삽법을 적용한 양적해법을 채용하였다.

기존의 양적 해법과 선형 내삽법을 적용한 양적 해법의 계산 시간을 비교하기 위해 Fig. 1 (b)에 나타난 바와 같이 복잡 형상 모델에 의해 계산한 결과는 각각 Table 5 및 Table 6에 나타난 바와 같다.

Table 5에 의하면 주입 후 1초가 경과하는데 걸리는 계산시간(CPU Time)은 기존의 양적 해법은 평균 약 83.9sec였으며, 선형 내삽법을 적용한 양적 해법의 경우에는 50.8sec로 약 39%의 계산 속도의 향상 효과를 나타내었다. 전체 계산 시간의 경우는 Table 3에 의하면 약 37%의 계산 효율을 나타냄으로서 전체적으로 계산 시간의 개선 효과가 나타남을 알 수 있다. 또한 전술한 바와 같이 계산 결과의 정도면에 있어서도 매우 양호한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구 결과 나타난 계산 효율은 長坂[15]이 보고한 38.7%와 거의 일치하는 결과이다.

2.3절의 선형내삽의 계산 순서 (2)에 나타난 바와 같이  $ID_i$ 에 따라 전 요소의 시간 증분이 결정

Table 5. Results of conventional and linear-interpolated explicit algorithm

the computing time during 5sec after pouring		
after puring (sec)	conventional (sec)	linear-interpolated (sec) $ID_{max} = 10$
1	84.0	49.0
2	84.0	49.0
3	83.6	57.0
4	84.0	50.0
5	84.0	49.0
average	83.9	50.8
efficiency	39% ↑	

되면 실제 수치 계산에서 적정  $ID_{max}$ 를 결정하게 되는데, 이  $ID_{max}$ 의 증가에 따른 계산 소요시간을 Table 6에 나타난 바와같이  $ID_{max}$ 가 증가함에 따라 계산 시간은 점점 감소하여 계산 시간의 향상 효과가 나타나며, 일정  $ID_{max}$  이상, 본 연구의 경우 20이상이 되면 그 이상의 향상 효과는 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 선형 내삽에 의해 근사치를 구함으로써 해석 대상 요소와 인접 요소의 시간 증분차가 너무 커지게 될 경우 내삽으로 인한 오차가 커지게 되므로 적정값을 취해야 하는데 계산결과 적정  $ID_{max}$ 는 대체로 10~20인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 일차 보간에 의해 근사해를 구하는데, 이에 대하여 2차 근사 또는 Error Function을 이용할 수 있고 내삽방법도 여러가지로 검토될 수 있으나, 내삽에 계산시간이 소요될수록 내삽의 의미가 희석되므로 선형 내삽법이 가장 실용적인 방법이라고 생각된다.

Table 6. Effect of linear-interpolated explicit algorithm on the calculation

the computing time by $ID_i$ value				
after pouring (sec)	$ID_{max}, \Delta t_i = ID_i \cdot \Delta t_{min}$			
	5	10	20	30
1	58.0	49.0	52.0	51.0
2	57.0	49.0	43.0	45.0
3	68.0	57.0	50.0	52.0
4	64.0	50.0	51.0	46.0
5	60.0	49.0	43.0	46.0
average	61.4	50.8	47.0	47.4
efficiency	27%	39%	44%	43.6%



#### 4. 결 론

응고 해석을 실용적으로 이용하기 위하여 기존에 적용되던 양적 해법을 음적 해법과 선형 내삽법을 적용한 양적 해법에 의해 수치 계산하고 비교·평가하였다. 그 결과 온도 회복법을 적용하여 잠열 처리 계산을 행한 음적 해법의 경우에는 기존의 양적 해법에 비해 계산 속도의 면에서는 어느정도 계산 속도의 향상효과가 나타났으나 시간 증분의 증가에 따라 계산 결과의 정도가 점점 불안정해졌으며, 선형 내삽법을 적용한 양적 해법의 경우 음적 해법보다도 더 계산속도가 증가하면서도 계산 정도가 양호하게 나타남으로서 실용적인 수치해법으로서 사용할 수 있음을 보였다.

본 연구는 응고 해석을 실용 시스템화하는 과정에서 이루어진 결과이며, 전 시스템의 개발 과정 및 그 적용에 대하여는 근간 보고할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- [ 1 ] 大中逸雄, 컴퓨터傳熱·凝固解析 入門, 鑄造プロセスへの適用, 丸善(株), (1985) 41
- [ 2 ] 日本鑄物協會, 컴퓨터 シミュレーション 事例集, (1990)
- [ 3 ] 新山英輔: 鑄物, 49 (1974) 608
- [ 4 ] 新山英輔, 安齊浩一: 鑄物, 57 (1985) 784
- [ 5 ] 赤 守衛, 新山英輔, 井川克也: 鑄物, 61 (1989) 808
- [ 6 ] K. Anzai, T. Uchida, E. Niyama : Proceedings of Modeling of Casting and Solidification Processes 1991 Ed. by C. P. Hong, E. Niyama, W. So. Hwang, (1991) 345
- [ 7 ] 新山英輔, 安齊浩一: 型技術, 8 (1993) 18
- [ 8 ] C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura : 鑄物, 61 (1989) 808
- [ 9 ] C. P. Hong, J. K. Choi and D. O. Kim : Conf. Proceeding, 55th Internatinal Foundry Congress, Moscow, CCCP, Sep. 32 (1988) 3
- [ 10 ] 김종원, 이영철, 홍준표 : 주조, 9 (1989) 67
- [ 11 ] 김지준 : 연세대학교 석사학위논문, (1990)
- [ 12 ] 유승목, 이두호, 김종기, 소찬영, 홍준표 : 주조, 11 (1991) 54
- [ 13 ] 김성빈 : 연세대학교 석사학위논문, (1992)
- [ 14 ] 최정길 : 연세대학교 박사학위논문, (1993)
- [ 15 ] 김태규, 최정길, 홍준표, 이진형 : 주조, 13 (1993) 323
- [ 16 ] S. V. Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Co., (1980) 41
- [ 17 ] 長坂悅敬, 木口昭二, 山西昭夫: 鑄物, 59 (1987) 321
- [ 18 ] 생산기술연구원, 금형 주조시 응고예측을 위한 음적해법의 연구, (1992) 6