

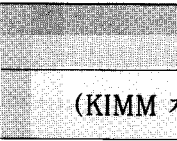
응고수축 결함의 예측을 위한 컴퓨터 응고해석



류성곤

(계명대학교)

- '78 한양대학교 금속공학과 (학사)
- '82 Univ. of Michigan (공학석사)
- '87 Univ. of Wisconsin-Madison (공학박사)
- '87-'89 생산기술연구원 주물연구부 선임연구원
- '89-현재 계명대학교 재료공학과 부교수



이재현

(KIMM 재료기술연구부)

- '79-'86 한양대학교 금속공학과 (학사)
- '87-'90 Iowa State Univ. 재료공학 (석사)
- '90-'93 Iowa State Univ. 재료공학 (박사)
- '93-'94 미국 Ames연구소 연구원
- '94-현재 한국기계연구원 선임연구원



이용태

(KIMM 시험평가부장)

- '70-'74 서울대학교 금속공학 (학사)
- '74-'76 한국과학기술원 재료공학 (석사)
- '76-'80 국방과학연구소 선연 및 연구원
- '80-'84 Case Western Reserve Univ. 재료공학 (박사)
- '84-'85 Case Western Reserve Univ. 연구원
- '85-'90 독일 항공우주연구소(DLR) 연구원
- '90-현재 한국기계연구원 책임연구원

I. 머릿말

고도산업기술의 발달로 가장 재래적인 기술을 고수해온 주조분야에서 마침내 새로운 기술개발에 직면하게 되었다. 특히 컴퓨터의 발전과 함께 컴퓨터기술의 주조산업에의 적용은 응고와 주조 과정을 컴퓨터 스크린에 나타내어 주조하기 전에 주조방안의 결함을 예측할 수 있어 현대 주조공법에서 필수적인 기술이 되고 있다.

산업기술의 발달과 함께 생산현장에서 주조제품은 단조, 용접, 플라스틱 제품 등과 경쟁을 하고 있어 보다 저렴하고 가격의 고품질이 요구되고 있다. 이를 위해 기존의 경험에 따른 trial and error 방식을 지양하고 각 공정의 설계를 컴퓨터를 통해 최적화하며 주조제품의 품질향상과 생산원가 절감을 위한 응고해석은 주조분야에서 필수적이라 하겠다. 이미 선진 외국에서는 주조의 각 공정에서 공정 변수를 컴퓨터해석을 통해 최적화시키는 컴퓨터 기술이 일반화 되고 있다[1,2]. 국내 주조분야에서도 컴퓨터기술에 대한 관심이 점점 커지고 있으며 현장에서도 그 적용이 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 외국의 전문 프로그램이 점차 도입되고 있으며 또한 국내에서도 응고해석 프로그램이 생산기술연구원에 의해 주조현장의 PC 규모에서 적용될 수 있도록 개발되어 적용되고 있다[3,4].

응고해석은 일반적으로 용탕이 주형에 충전된 후 열전도와 응고잠열방출 만을 고려한 열전도 모델, 즉 가장 늦게 응고하는 부분에서 응고수축결함

이 발생할 수 있다는 원리를 이용하고 있다. 응고 해석을 위한 수치해석 방법으로는 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM) 등이 사용되고 있으나, 현재 유한 요소법과 직접차분법(DFDM)이 정착되어 있다. 열전도 모델의 경우 직접차분법이 유한 요소법에 비해 이해하기 쉽고 프로그램도 간단해 실용적이기 때문에 국내에서도 현장에서 PC 규모로 적용될 수 있도록 생산기술연구원에서 프로그램이 개발되어 있다[5]. 본 글에서는 국내개발된 응고해석 프로그램인 EASY-CAST 프로그램을 소개하고 여기에서 사용되고 있는 직접차분법의 원리를 소개하고자 한다.

2. 직접차분법

2.1 기본 미분 방정식

열은 고온부에서 저온부로 흐르므로 열전도에 의한 열이동은 Fourier 제1법칙에 따르게 된다. 1차원의 경우

$$q = -k(\partial T/\partial X) \text{-----(1)}$$

로 표현된다. 여기서 q는 열유속(cal/cm), k는 열전도도(cal/°C/cm), $\partial T/\partial X$ 는 온도구배(°C/cm)이다. - 부호는 열역학의 제2법칙을 만족시키도록 사용되었다. 시스템이 정상상태(steady-state), 즉 온도분포가 시간에 대해서 변화하지 않는 경우에는 문제를 단순하게 하여 식 (1)에 필요한 값을 대입하여 적분하면 되지만 구조물 응고의 경우처럼 물체내의 온도분포가 시간과 함께 변화하고 응고잠열이 발생하는 경우에는 물체 내의 미소요소 dx dy dz에 대해서 다음의 열에너지 보존식(Fourier 제2법칙)이 성립하여야 한다.

$$\begin{aligned} & (\text{열전도에 의해 미소요소내에 유입되는 열량}) + \\ & (\text{미소요소내에 발생하는 응고잠열}) \\ & = (\text{미소요소내의 내부에너지 변화}) + (\text{열전도에 의해 미소요소로부터 유출되는 열량}) \text{-----(2)} \end{aligned}$$

그림. 1에 표시된 것과 같이 3차원의 좌표계에 설정된 단위미소 요소에 대해 (2)를 수식으로 표시하면 (3)과 같다.

$$Q_x + Q_y + Q_z + Q_{gen} = Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz} + dE/dt \text{-----(3)}$$

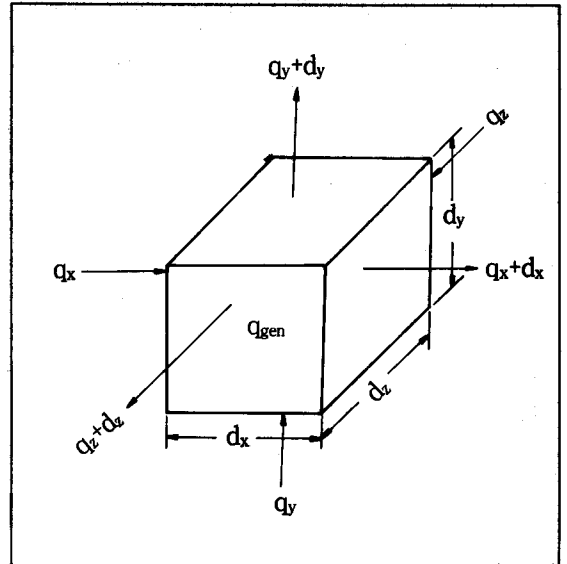


그림 1. 3차원 기본체에서의 열전도

식 (3)의 각항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_x &= -k \, dy \, dz \, (\partial T/\partial X) : X\text{방향에서 유입되는 열량} \\ Q_{x+dx} &= -[k(\partial T/\partial X) + \partial/\partial X (k \, \partial T/\partial X) \, dx] \, dy \, dz : X\text{방향으로 유출되는 열량} \\ Q_y &= -k \, dx \, dz \, (\partial T/\partial Y) : Y\text{방향에서 유입되는 열량} \\ Q_{y+dy} &= -[k(\partial T/\partial Y) + \partial/\partial Y (k \, \partial T/\partial Y) \, dy] \, dx \, dz : Y\text{방향으로 유출되는 열량} \\ Q_z &= -k \, dx \, dy \, (\partial T/\partial Z) : Z\text{방향에서 유입되는 열량} \\ Q_{z+dz} &= -[k(\partial T/\partial Z) + \partial/\partial Z (k \, \partial T/\partial Z) \, dz] \, dx \, dy : Z\text{방향으로 유출되는 열량} \end{aligned}$$

$Q_{gen} = \rho L(\partial f_s / \partial t)$ (ρ : 밀도, L : 응고잠열, f_s : 고상률) : 응고잠열에 의한 발생열량

$dE/dt = \rho C_p dx dy dz(\partial T / \partial t)$ (ρ : 밀도, C_p : 비열) : 내부 열에너지의 변화

앞의 각항을 (3)식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\rho C_p (\partial T / \partial t) = \partial / \partial x (k \partial T / \partial X) + \partial / \partial y (k \partial T / \partial Y) + \partial / \partial z (k \partial T / \partial Z) + \rho L (\partial f_s / \partial t) \quad \text{----(4)}$$

이상과 같은 열전달 방정식을 컴퓨터에 의해 처리하기 위해서는 다음 설명하는 직접차분법과 같은 수치해석법이 사용된다.

2.2. 직접 차분법의 원리

주어진 초기조건과 경계 조건하에서 (4)식을 컴퓨터로 직접 해석하는 것은 불가능하다. 왜냐하면 미분방정식은 연속식인데 비하여 컴퓨터는 불연속적인 값만 취급할 수 있기 때문이다. 따라서 시간에 대해서는 미소시간 Δt (time step)마다, 장소에 대해서는 대표점(mesh point)마다 계산을 하고 임의의 시간과 장소에 대해서는 내삽 또는 외삽에 의해서 구할 수 있다. 그러므로 (4)식은 적당한 간격의 시간, 장소에 관한 값을 나타내는 식 즉 이산화식 또는 차분식으로 변환할 필요가 있다. 종래의 수치해석법에서는 모두가 미분방정식을 기초로 하고 있는 것에 반하여 직접차분법에서는 풀어야 할 계를 직접 컴퓨터 계산이 가능한 차분방정식으로 표현하여 수치해를 구한다. 직접차분법의 경우 절점과 절점에 의해 대표되는 절점영역의 개념이 중요하다. 왜냐하면 온도와 고상률등을 절점에 있어서의 값으로 이산화하고 절점영역에 있어서 각종 보존법칙을 수식으로 표현하기 때문이다.

직접차분법은 절점과 절점영역의 정의 방법에 의해 다음의 2종류로 대별된다.

a) 내절점법

그림 2(a)에 나타난 바와 같이 분할한 미소요소 자체를 절점영역으로 하고 요소의 외심(외접원의 중심)에 절점을 정의한다.

b) 외절점법

그림 2(b)에 나타난 바와 같이 분할요소의 정점에 절점을 정의하고 요소의 각변의 2등분선(3차원의 경우에는 2등분면)에서 구성된 새로운 영역을 절점영역으로 한다.

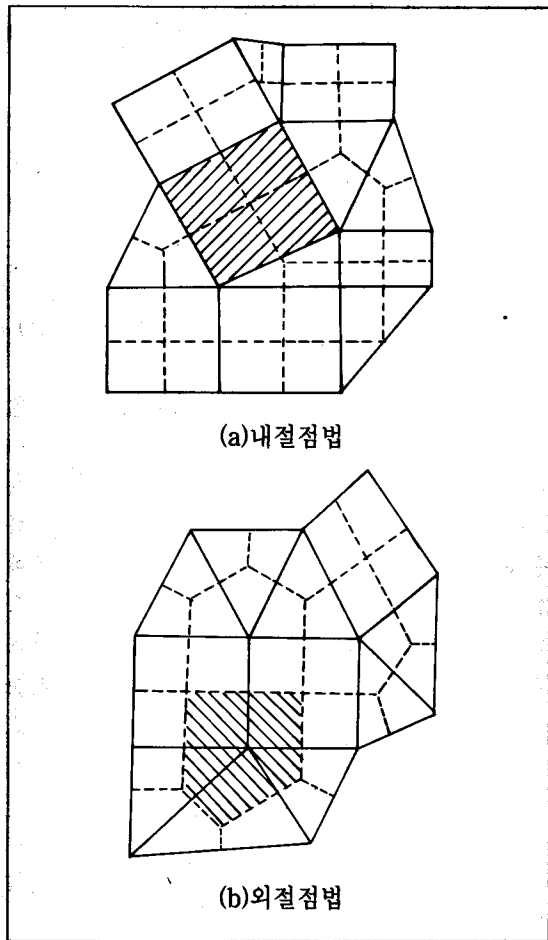


그림. 2. 내절점법에서 Element i에서 열에너지 보존법칙

2.3. 열에너지 보존법칙의 차분화

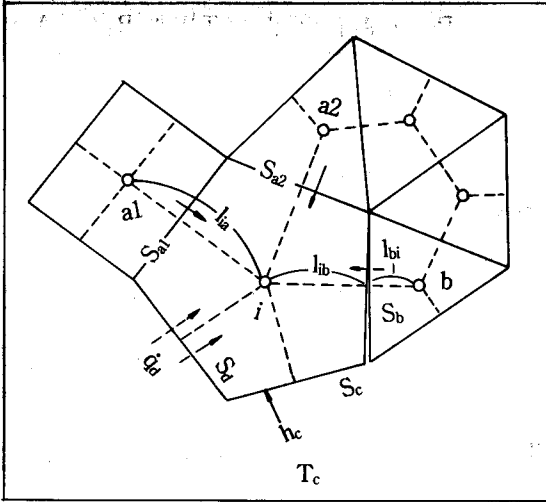


그림. 3. 외절점법에서 Element i에서 열에너지 보존법칙

그림 3에 나타난 바와 같이 여러가지의 경계조건을 가지는 요소 i(절점번호와 결합)에 있어서 열에너지 보존법칙은 다음과 같이 단계적으로 생각할 수 있다.

- (i) 시각 t로부터 (t + Δt)사이 에 요소 i에 축적된 열량 Q ;

$$Q = (\rho C_p V T^{t+\Delta t})_i - (\rho C_p V T^t)_i$$

- (ii) 같은 물질인 인접요소 a와 열저항없이 접촉하여 있는 면 Sa로부터 열전도에 의해 유입되는 열량 Qin a,

$$Q_{in a} = \frac{1}{\lambda_{ia}} \frac{S_a}{l_{ia}} (T_a - T_i) \Delta t$$

λ_{ia} : 절점 i,a 간의 평균 열전도율

$$= \lambda \left(\frac{T_i + T_a}{2} \right)$$

l_{ia} : 절점 i,a 간의 거리

- (iii) 면 Sb에서 주형, core 등 열저항 rb로 접촉하는 경우에 면 Sb를 통하여 유입되는 열량 Qin b,

$$Q_{in b} = \frac{S_b}{r_b + \frac{l_{ib}}{\lambda_i} + \frac{l_{bi}}{\lambda_b}} (T_b - T_i) \Delta t$$

l_{ib}, l_{bi} : 절점 i, b로부터 면 Sb까지의 거리

$$\frac{l_{ib}}{\lambda_i} \frac{l_{bi}}{\lambda_b} : \text{열전도에 의한 열저항}$$

- (iv) 외부온도 Tc, 열전달율이 hc인 경계면 Sc로부터 유입되는 열량 Qin c ;

$$Q_{in c} = \frac{S_c}{\frac{1}{h_c} + \frac{l_{ic}}{\lambda_i}} (T_c - T_i) \Delta t$$

h_c : 열전달율

l_{ic} : 절점 i로부터 면 Sc까지의 거리

- (v) 열유속 qd로 경계면 Sa로부터 유입되는 열량 Qin d ;

$$Q_{in d} = S_d \dot{q}_d \Delta t$$

$\dot{q}_d = J/m^2 \text{sec}$ (단위면적, 단위시간을 통과하는 열량)

따라서 (ii), (iii), (iv), (v)의 유입열량을 축적된 열량 Q와 등식으로 놓으면

$$(\rho C_p V T^{t+\Delta t})_i - (\rho C_p V T^t)_i$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_a \bar{\lambda}_{ia} \frac{S_a}{l_{ia}} (T_a - T_i) \Delta t + \sum_b \frac{S_b}{r_b + \frac{l_{ib}}{\lambda_i} + \frac{l_{bi}}{\lambda_b}} \\
 &\quad (T_b - T_i) \Delta t + \sum_c \frac{S_c}{\frac{1}{h_c} + \frac{l_{ic}}{\lambda_i}} (T_c - T_i) \Delta t \\
 &\quad + \sum_d S_d \dot{q}_d \Delta t
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

가 된다.

2.4. 3차원 응고해석 model

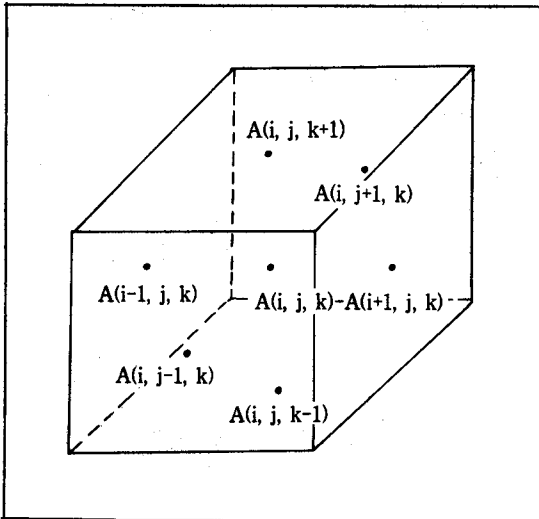


그림 4. 3차원 응고해석 Model

그림 4는 직교좌표계에서 6면체 요소(i, j, k)에 대한 요소형상 및 좌표축을 나타낸 것이다.

시각 Δt 사이에 요소(i, j, k)내에 축적된 열량 Q_a 는,

$$Q_a = \rho C_p V_{i,j,k} (T_{i,j,k}^{t+\Delta t} - T_{i,j,k}^t) \tag{6}$$

또한 Δt 사이에 면 A_{i-1} , A_{i+1} , A_{j-1} , A_{j+1} , A_{k-1} , A_{k+1} ,을 통해 6면체요소 (i, j, k)에 유입되는 열량 Q_b 는

$$\begin{aligned}
 Q_b = & [B_{i-1} \cdot A_{i-1} (T_{i-1}^t - T_i^t) + B_{i+1} \cdot A_{i+1} \\
 & (T_{i+1}^t - T_i^t) + B_{j-1} \cdot A_{j-1} (T_{j-1}^t - T_j^t) + \\
 & B_{j+1} \cdot A_{j+1} (T_{j+1}^t - T_j^t) + B_{k-1} \cdot A_{k-1} \\
 & (T_{k-1}^t - T_k^t) + B_{k+1} \cdot A_{k+1} (T_{k+1}^t - T_k^t)] \\
 & \Delta t
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

로 된다.

Fourier 에너지 보존법칙으로 부터 $Q_a = Q_b$ 이므로 (6), (7)식을 $T_{i,j,k}^{t+\Delta t}$ 에 대해 정리하면 (8)식과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_{i,j,k}^{t+\Delta} = & [1 - \frac{\Delta t}{\rho C_p} \frac{1}{V_{i,j,k}} (B_{i-1} \cdot A_{i-1} \\
 & + B_{i+1} \cdot A_{i+1} + B_{j-1} \cdot A_{j-1} + B_{j+1} \\
 & \cdot A_{j+1} + B_{k-1} \cdot A_{k-1} + B_{k+1} \cdot A_{k+1})] \\
 & T_{i,j,k}^t + \frac{\Delta t}{\rho C_p} \frac{1}{V_{i,j,k}} (B_{i-1} \cdot A_{i-1} T_{i-1}^t \\
 & + B_{i+1} \cdot A_{i+1} T_{i+1}^t + B_{j-1} \cdot A_{j-1} T_{j-1}^t \\
 & + B_{j+1} \cdot A_{j+1} T_{j+1}^t + B_{k-1} \cdot A_{k-1} T_{k-1}^t \\
 & + B_{k+1} \cdot A_{k+1} T_{k+1}^t)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

(8)식에 의해 실제의 열전도 및 응고문제를 해석하기 위해서는 적절한 경계조건이 설정이 필요하다. (8)식에서 B_{i-1} , B_{i+1} , B_{j-1} , B_{j+1} , B_{k-1} , B_{k+1} 은 면 A_{i-1} , A_{i+1} , A_{j-1} , A_{j+1} , A_{k-1} , A_{k+1} 에 대한 각각의 경계조건을 나타낸다.

예를 들면, 물질 1과 물질 2가 면 A_i 에서 열저항 없이 접촉하고 있는 경우:

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{l_{1A}}{\lambda_1} + \frac{l_{2A}}{\lambda_2}}$$

물질 1과 물질 2가 면 A_i 에서 열저항 $1/h$ 을 갖고 접촉하는 경우:

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{l_{1A}}{\lambda_1} + \frac{l_{2A}}{\lambda_2}}$$

물질 1이 면 A_i 에서 공기 혹은 물과 같은 유체와 열저항 $1/h'$ 을 가지고 있는 경우:

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{1}{h'} + \frac{l_{1A}}{\lambda_1}}$$

로 경계조건을 나타낼 수 있다.

2.5. 안정조건

직접차분법에서 전진차분법을 채택할 경우 임의 요소의 시각 $t + \Delta t$ 에서의 온도를 그 요소 및 인접 요소의 시각 t 에 있어서의 값만으로 구하고 있다. 따라서 시간 간격 Δt 가 크면 인접 요소보다도 먼 영역의 영향이 문제가 되어 큰 오차가 발생하게 한다. 앞의 3차원의 경우 다음과 같이 임의의 한계값 이하로 사용하지 않으면 안된다.

$$1 - \frac{\Delta t}{\rho C_p} \cdot \frac{1}{V_{i,j,k}} (B_{i-1} \cdot A_{i-1} + B_{i+1} \cdot A_{i+1} + B_{j-1} \cdot A_{j-1} + B_{j+1} \cdot A_{j+1} + B_{k-1} \cdot A_{k-1} + B_{k+1} \cdot A_{k+1}) \geq 0 \quad \text{-----(9)}$$

식 (9)가 성립하지 않으면 식 (8)에서 $T_{i,j,k}$ 값은 -가 되고 $T_{i,j,k}$ 가 클수록 시각 $t + \Delta t$ 에서 온도는 감소하게 되는 불합리가 야기된다. 따라서 Δt 는 반드시 식 (9)를 만족하도록 하는 값을 가져야 한다.

2.6. 응고잠열의 취급

응고잠열은 고상열(f_s)의 증가와 더불어 고액공존역으로 방출된다. 따라서 고상열과 온도의 관계를 아는 것은 응고과정을 프로그램화하는데 매우 중요하다. 일반적으로 수치해석에서 응고잠열의 방출을 취급하는 방법으로는 등가비열법, enthalpy 법 및 온도회복법이 있다.

3. 응고수축 결합의 예측법

응고수축 결합의 발생과 그 정도(형상, 크기)를 추정하기 위해서는 응고수축 결합의 생성 기구를 고려한 응고 해석이 필요하다. 그러나 엄밀한 해석은 대단히 곤란하고 경제적으로도 문제점이 많다. 따라서 아래 기술한 간이적인 수법으로 수축결합의 발생을 추정하고 있다.

3.1. modulus법

Chvorinov에 의하면 주물의 응고 시간 t_f 는 modulus(주물의 체적 V /주물의 표면적)의 제곱에 비례한다.

$$t_f = k(V/S)^2 \quad \text{-----(10)}$$

이것을 이용하여 modulus의 구배를 붙이면 지향성 응고를 일으키지 않는 수축결합은 주물 본체로 부터 분리시킬 수 있다.

3.2. 등온도 곡선법

이것은 수축결합발생의 충분조건을 구하는 것으로서 등고상선온도법과 한계고상률법으로 나눌 수 있다. 양쪽 공히 비정상 열전도 문제로서 응고 해석을 행하여 고상선온도 또는 유동한계라 여겨지는 한계고상률의 시간변화를 구해 페루프가 생길 경우 그 루프내에 수축결합이 발생된다고 가정하는 방법이다. 즉 응고수축에 의해 유동할 수 있는 영역이 압탕까지 확정되어 있으면 용탕이

보급되지만 폐쇄되어 있으면 용탕보급원이 없기 때문에 그 영역에 수축결합이 발생된다고 여겨진다. 액상 또는 고액공존상의 유동은 표1에서 나타난 바와 같이 합금성분 또는 응고 형태에 따라 다르지만 보통 0.5~1.0사이의 고상률에서는 유동이 불가능하다고 여겨진다.

표 1 : Critical Flow Limit

Alloy	Critical Flow Solid Fraction
Al - 2.4% Si	0.66
Al - 6.2% Si	0.66
Al - 3.0% Si	0.70
Al - 5.5% Si	0.80
Al - 13.8% Si	0.70
Al - 4.5% Si	0.85
AC2B	0.5(금형)
Al - 9.0% Si - 4% Cu	0.3(사형)
Fe - 0.6% C	0.69
DCI	0.75

따라서 고상률 1.0의 폐곡선을 생각하는 등고상선 온도법보다 한계고상률법이 보다 바람직스런 방법이다.

이들 방법은 간편하고 실용적이지만 수축결합의 발생 기구를 완전히 고려한 방법은 아니다. 즉 용탕보급로가 차단되어 유동압력손실이 대단히 크게 됨에 따라 확실히 수축결합이 발생하는 조건을 구하는 것이다. 따라서 용탕보급로가 차단되지 않아도 생기는 결함은 추정할 수 없는 결점이 있다. 더욱이 유동에 의한 열이동을 고려하지 않은 상태에서 어느 정도 정확히 용탕보급로의 차단을 추정할 수 있는가 하는 의문도 남아 있다.

3.3. 온도구배법

이 방법은 응고 말기의 온도구배의 대소에 의해 수축 결함의 발생을 추정하는 방법이다. 이 방법은 판상 또는 봉상의 강주물에서 온도구배가 작은 영역에 중심수축이 생긴다는 Bishop의 실험 결과에 근거를 두고 있다[6].

즉 어느 요소의 온도가 고상선 온도 T_s 에 도달되면 이 요소와 접하고 있는 인접요소를 찾아 그 요소와의 사이에 온도구배의 최대치인 최대온도구배 G 를 구하는 방법이다. 그래서 이 온도구배가 어느 임계온도 구배 이하가 되면 수축결합이 발생된다고 가정하는 것이다. 이 방법은 온도 분포로부터 유동저항을 간접적으로 평가하기 때문에 수축결합의 발생을 예측할 수가 있다. 응고 말기에 온도구배가 작다는 의미는 온도가 균일하여 고상률이 큰 영역이 확장되어 있기 때문에 유동저항이 커져 수축 결함의 발생이 용이해짐을 뜻한다.

이 방법은 등온도곡선법과 마찬가지로 간단하게 이용할 수 있고 등온도곡선이 페루프를 이루지 않을 경우에도 수축 결함의 발생 예측이 가능하다. 그러나 임계온도구배가 주물 형상, 치수, 합금 조성에 따라 변화하는 것이 문제이다. 이것은 이 방법이 유동 저항의 정확한 평가 및 응고량의 증대에 의한 압력 저하의 평가가 고려되지 않기 때문이다.

3.4. 수정온도구배법

온도구배법을 개량한 것으로 온도구배 대신에 다음 인자의 대소로써 수축 결함의 발생을 판단한다.

$$G_t = \max(G\sqrt{t_f}) \text{ 또는 } G_t = \max(G/\sqrt{R})$$

----- (11)

여기서 t_f , R 은 각 요소의 응고 시간 및 응고 속도이다. 수정온도구배 G_t 는 온도구배 G 보다 유동압력손실을 보다 정확하게 평가하고 있다.

이외에도 수축 결함의 예측 방법으로 유동 conductance법, 고상률구배법, 압력구배법, 급탕거리법, 한계고상률 수축량법, 직접 simulation법 등이 있으며 이들의 특징은 표 2와 같다.

표 2. 수치 해석에 의한 수축 결합의 추정법

No	항 법	수축결합 발생조건	특 징
1	등온도, 등고상률곡선법 (a)고상선온도법 (b)한계고상률법	$f_s=1$ 의 페루프내에 발생 $f_s=f_{sc}$ 의 페루프내에 발생	*간편 *페루프가 부재시 판정곤란
2	온도구배법	$f_s=1$ 또는 $f_s=f_{sc}$ 에 있어서 최대온도구배 $G \leq$ 임계값	*간편 *임계온도구배가 형상, 냉각 속도에 따라 변화
3	유동 conductance법	$K_d = \frac{\bar{K}}{\mu f_l \Delta t} \leq$ 임계값	*합금조성의 평가가능 *투과율 K의 data필요
4	고상률 구배법	$f_s=1$ 또는 $f_s=f_{sc}$ 에 있어서 최대고상률 \leq 임계치	*공정합금에 적합 *고상률과 온도의 관계가 1:1일 경우 온도구배법과 동일
5	수정온도 구배법	$G/\sqrt{R} \leq$ 임계값	*온도구배법에 비해 임계값이 냉각속 도에 따라 변화하지 않음
6	압력구배법	$G_p = \frac{\mu u f_s}{K} \geq$ 임계값	*합금조성의 응고평가 가능 *연속의 식을 풀 필요성 있음
7	급탕거리법	급탕가능거리 \leq 급탕필요거리	*복잡형상에의 적용곤란
8	한계고상률 수축감량법	자유표면 및 유동가능 상부요소	*압탕부동의 수축결합의 정량적 평가 가능
9	직접 simulation법	계산압력 \leq 기포발생 임계압력 및 자유표면의 저하	*계산 memory 및 시간의 증가

4. 응고해석 시스템

- (1) 시스템의 구조 : 직접 차분법을 이용한 EASY-CAST 프로그램의 시스템은 Pre-processor, Solver, Post-processor의 세 부분으로 되어 있으며 각 부분의 역할을 도식화하면 그림 5와 같다.
- (2) 컴퓨터 Hardware : Pre-processor와 Post-processor는 IBM 486 PC를 사용하여 그 사양은 표 2와 같고 Solver의 해석 계산은 EWS (Engineering Work Station)가 사용된다.
- (3) 해석조건 : 주물의 응고현상은 매우 복잡하므로 다음과 같이 단순화시켜 응고수축결합을 추정한다.
 - 1) 열전도계산을 행하여 응고수축결합을 예측한다.
 - 2) 온도계산은 직교좌표 분할, 내절점 전진차

분법을 사용한다.

- 3) 초기조건으로서 균일온도의 용탕이 충전된 주형으로부터 시작한다.
- 4) 주물, 주형등의 물성치는 온도에 관계없이 일정하다.
- 5) 용탕중의 대류는 무시한다.
- 6) 응고잠열은 온도회복법으로 취급한다.
- 7) 주형-주물, 주형-대기간에 일정한 열저항치를 설정한다.
- 8) 주물의 과냉각은 고려하지 않고 응고는 액상선 온도에서 부터 시작된다고 가정한다.

5. 맺음말

주조방안의 업무는 방안작성 작업과 방안검토 작업의 2가지로 나눌수 있다. 컴퓨터 모사의 대상은 후자에 적용되며 전자는 modulus 방법 또는

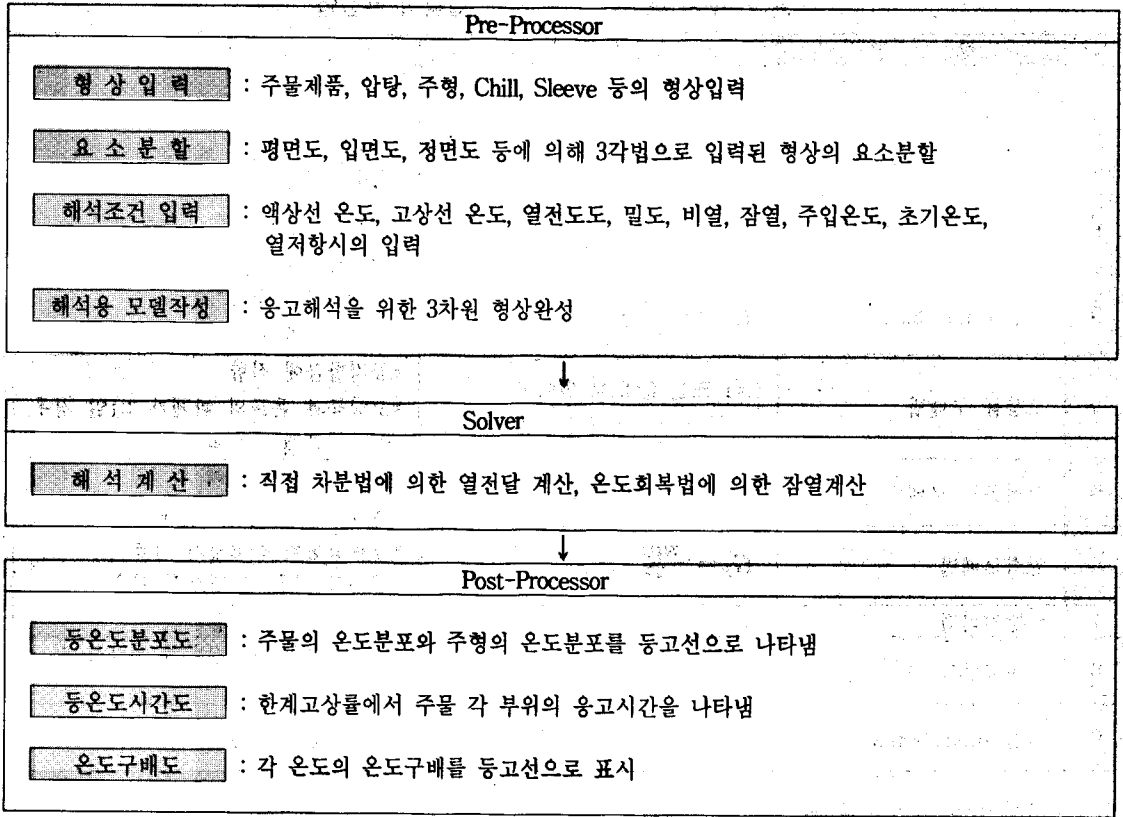


그림 5. 응고해석 시스템의 구성과 역할

표 3. EASY CAST를 위한 컴퓨터 사양

CPU	80486 DX2/50MHz
Coprocessor	80486 DX2에 내장
Graphic board	1024 * 768 * 256을 지원하는 Super VGA(Video RAM : 1MB)
Monitor	위 해상도를 지원하는 21" Monitor
Mouse	Microsoft Mouse

(주) Solver는 Silicon Graphics Work Station을 사용했으며 계산속도는 82mips를 지니고 있다.

각 업체의 방안기준에 의해 시행되고 있다. 컴퓨터 해석의 결과 수축결함이 예측되는 경우 전자로 되돌아가 기술적인 측면에서 적당한 수정을 가한 후 다시 해석하여 검토하며 합격판단이 날 때까지 수정 검토하는 작업을 반복한다. 따라서 응고수축결함의 응고해석은 구조방안 업무의 보조수단이지 결코 구조방안 기술자를 대체하는 것은 아니다. 그러나 구조방안을 강구하는 기술자는

이 보조 수단을 활용함으로써 아래의 여러 장점을 얻을 수 있다.

- 1) 사전검토에 의해 시제품의 제작비용과 제작기간을 단축시키며 이로 인한 제품 납기의 단축
- 2) 불량품 및 보수작업의 절감
- 3) 한계 설계에 의해 압탕 및 불필요한 부위의 크기를 축소시켜 생산성 향상
- 4) 냉금, 보온재, 발열재 등을 적절히 사용함에

- 따른 생산성 및 주물의 건전성 향상
- 5) 응소수축 결함의 원인규명 자료 제공
 - 6) 주조방안 검토의 객관 자료로써 회의자료, 고객에 대한 설명자료 제공
 - 7) 주물공장에서 부품설계자에게 설계 변경을 요구하기 위한 객관적인 자료 제공
 - 8) 냉각속도로 부터 주형해체 시간을 결정하여 조형라인 설계에 대한 자료 제공

참 고 문 헌

- [1] I. Onaka, 응고현상과 주조결함 symposium, 일본주물협회 (1985)
- [2] E. Dunn and D. R. Durham, Technology for Premium Quality Castings, TMS (1988)
- [3] 한국생산기술연구원, 컴퓨터를 이용한 주조기술 지원 사례집 (1994)
- [4] 유성곤, 최정길, 93년도 제 10회 주물기술연수교재, 생산기술연구원 (1993)
- [5] J.K. Choi and C.P. Hong, Modeling of Casting Processes, Yonsei Univ. Press (1992)
- [6] I. Onaka, Computer, 전열 응고해석 입문, 일본 환선출판사 (1985)