

技術解説

컴퓨터에 의한 鑄物의 凝固解析

홍준표*

1. 서론

鑄物의 품질과 생산성을 향상시키기 위해서는 정확하고 신속한 鑄造方案의 작성이 필요하다. 鑄造品의健全성은 주로 熔湯이 鑄型内에서 凝固하는 과정에서 결정된다. 따라서 凝固過程에 있어서의 여러가지 현상을 정확히 파악하고, 凝固過程을 정량적으로 제어하는 것은 鑄造方案을 설정하는데 있어서 대단히 중요한 일이라 하겠다.

金屬加工法이라고 하는 것은 “目的으로 하는 ①形狀과 치수로 가공할 것 ②金屬組織의變化 및 성능을 구비할 것” ...의 두가지 요건을 만족시켜야 한다. 鑄造는 熔湯의 流動性を 이용하여 이를 鑄型에 주입하므로써 目的으로 하는 形狀과 치수의 제품을 만들기 때문에 다른 加工法에 비하여 ①에 있어서는 타의 추종을 불허하는 우수한 특징을 가지고 있다. 그러나 ②의 “目的으로 하는 金屬組織의變化 및 성능의 구비”라는 점에서는 반드시 우수하다고는 할 수 없다. 이것은 熔湯이 鑄型内에서 凝固하는 과정에서 金屬組織의變化와 성능이 결정되며, 收縮孔, 氣孔 및 偏析등 각종 鑄造缺陷이 발생하기 쉽기 때문이다. 따라서 우수한 加工法으로서 보다 널리 발전·응용되기 위해서는 凝固過程을 정확하게 파악하고 정량적으로 제어하므로써 鑄造品의 品質과 성능을 향상시키고, 生産性を 높일 수 있어야 하겠다.

凝固現象은 상당히 복잡하고, 아직 학문적으로도 해결하지 못한 점이 많아, 종래에는 이 문제를 간단하게 解析的인 방법으로 해결할 수 없었다. 그러나 컴퓨터技術의 발달과 더불어 최근에는 실제의 凝固現象을 數値모델化하여 컴퓨터에 의해 정량적으로 해석할 수 있게 되었다.

종래의 鑄造工業에서는 凝固現象에 기초를 둔 鑄造組織 및 성능의 제어에 있어서 상당히 소홀히 하였다고 할 수 있다. 이러한 문제는 完全鑄造品뿐만 아니라 잉고트 및 각종 中間鑄造品의 경우에도 마찬가지라고 할 수 있다. 즉, 中間鑄造品의 경우에도 초

기의 鑄造組織의 良否에 의하여 그후의 鍛造加工등에 직접적인 영향을 주며, 최종의 完全製品의 金屬組織과 성능에 큰 영향을 미치기 때문이다. 따라서 鑄造品의 제조시에는 凝固現象을 정확히 파악하고 정량적으로 제어하여 鑄造品의 品質과 生産性向上에 만전을 기해야 하겠다. 이러한 목적을 위해서 컴퓨터에 의한 凝固解析의 필요성이 절실히 강조되고 있는 것이다.

2. 凝固解析의 기초

鑄型内에서의 용탕의 凝固狀況을 알기 위해서는 液體金屬이 보유하고 있는 熱量이 어떻게 固體金屬과 鑄型쪽으로 전달되어 가는 가를 알아야 한다. 凝固現象을 解析하는 방법에는 크게 (i) 解析的인 방법 (analytical method)과 (ii) 數值的인 방법 (numerical method)이 있다. 解析的인 방법은 어떤 특정한 문제의 경우에만 해답을 얻을 수가 있으며, 일찌기 Neumann이나 Schwarz 등에 의해 凝固潛熱의 방출을 고려한 純金屬의 1차원 凝固問題에 대한 해석해가 도입되었다. 그러나 이 방법은 많은 가정을 수반하게 되므로 복잡한 실제 鑄物의 凝固問題에는 적용될 수 없다. 이러한 이유때문에 數值的인 방법이 실제의 凝固解析에 널리 적용되게 된 것이다. 종래부터 널리 凝固解析에 이용되고 있는 數値解法으로는 差分法 (Finite Difference Method)^{1),16)}과 有限要素法 (Finite Element Method)²⁾을 들 수 있다. 또한 최근에는 境界要素法 (Boundary Element Method)^{3),11)}이라고 하는 새로운 방법이 개발되어, 복잡한 任意形狀의 2차원 및 3차원문제에도 적용될 수 있게 되었다.

差分法과 有限要素法은 소위 領域法이라고 하여 영역전체를 微少要素로 분할할 필요가 있으나, 境界要素法의 경우에는 境界만을 문제의 대상으로 하는 특징을 가지고 있어 문제의 차원수를 1개 감소시켜 데이터작성 및 계산시간등이 단축되는 장점이 있다. 그러나 수학적인 취급과 프로그래밍의 용이함에 있어서는 差分法이 가장 유리하다고 볼 수 있다.

* 연세대학교 공과대학금속과 부교수

2.1 差分法에 의한 熱傳導解析

鑄型中에 있어서의 鑄造品의 凝固問題를 취급하기 위해서 수학적 취급인 간단한 差分法을 채택하여 2차원문제를 예로 들어 설명하기로 한다.

相變化를 수반하는 2次元 熱傳導 基礎微分方程式은 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial T}{\partial y}) + \rho L \frac{\partial fs}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, ρ : 밀도, C : 비열, K : 열전도율,
 T : 온도, t : 시간, L : 응고잠열,
 fs : 凝固率

을 각각 나타낸다.

差分近似에는 ① Taylor 전개에 의해 差分近似하는 방법⁴⁾과 ② 領域을 미소要素로 분할하고 要素에 있어서의 Fourier의 energy 保存法則)으로 부터 直接差分式을 구하는 방법⁵⁾이 있다.

여기서는 ②의 방법을 채택하기로 한다.

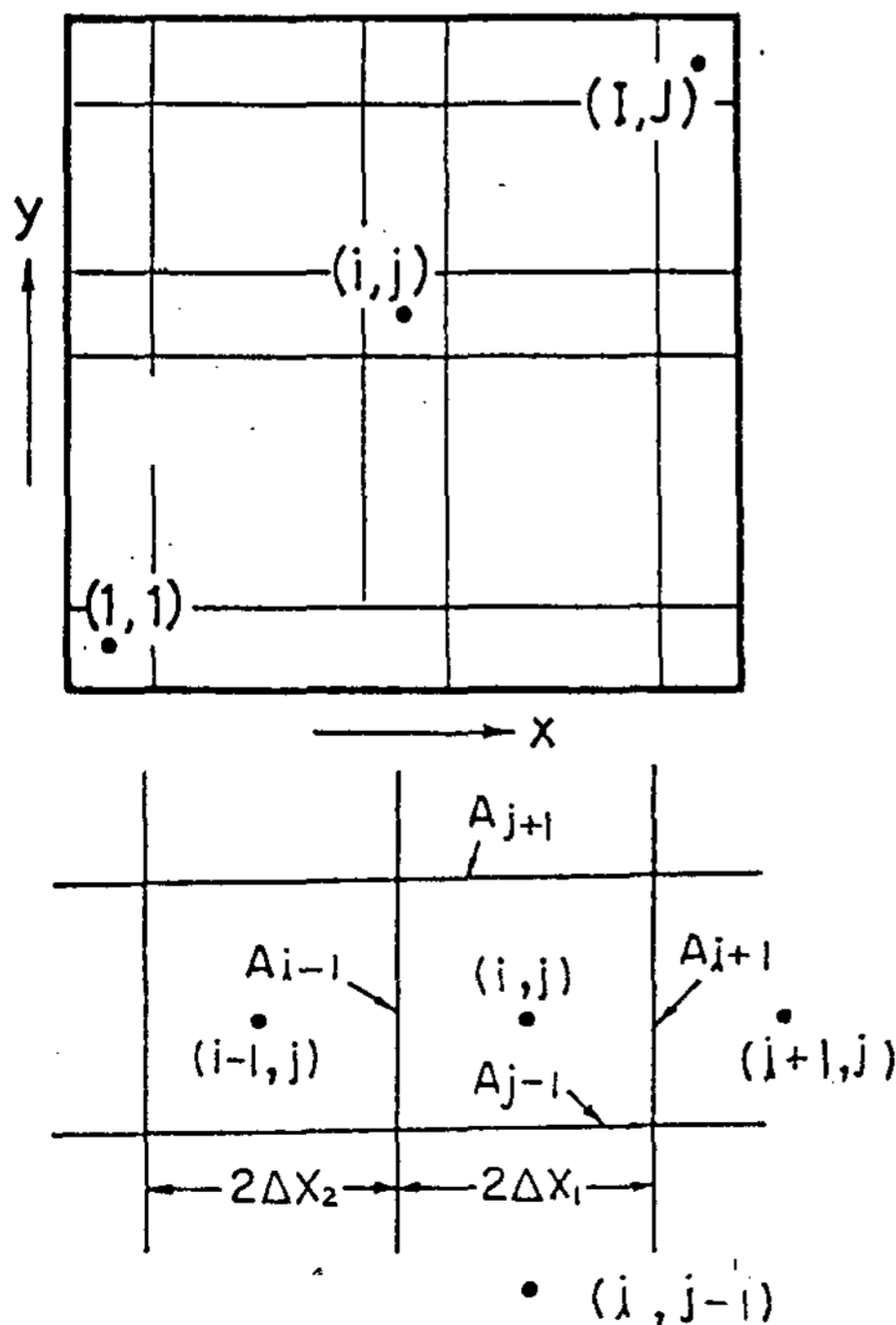


그림 1 差分法에 있어서의 座標系와 微少要素 (i, j)에 있어서의 熱收支

그림 1에 표시하는 座標系와 微少要素 (i, j)의 時間 Δt 에 있어서의 熱容量變化에 대해서 생각하기로 한다. 要素의 代表點 - 節點 (여기서는 內節點)으로 서 要素를 나타내면, 要素內에서의 溫度는 일정하며, 그 要素內의 온도는 節點의 좌표로서 표시할 수 있다. 要素 (i, j)에 있어서 Fourier의 保存法則을 고려하면, 다음과 같은 관계가 얻어진다. 즉, 時間 Δt 에 있어서의 要素 (i, j)內의 熱量變化量 Q_A 는,

$$Q_A = \frac{\rho C}{\Delta t} V_{ij} (T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t) \dots (2)$$

로 표시된다. 또한, 面 A_{i-1} , A_{i+1} , A_{j-1} 및 A_{j+1} 에 있어서의 熱의 流出入量 Q_B 는

$$Q_B = B_{i-1} \cdot A_{i-1} (T_{i-1,j}^t - T_{i,j}^t) + B_{i+1} \cdot A_{i+1} (T_{i+1,j}^t - T_{i,j}^t) + B_{j-1} \cdot A_{j-1} (T_{i,j-1}^t - T_{i,j}^t) + B_{j+1} \cdot A_{j+1} (T_{i,j+1}^t - T_{i,j}^t) \dots (3)$$

로 표시된다.

Fourier의 保存의 法則으로 부터 식 (2) 및 (3)에 의하여 다음과 같은 差分式이 얻어진다.

$$\frac{\rho C}{\Delta t} \cdot V_{ij} (T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t) = B_{i-1} \cdot A_{i-1} (T_{i-1,j}^t - T_{i,j}^t) + B_{i+1} \cdot A_{i+1} (T_{i+1,j}^t - T_{i,j}^t) + B_{j-1} \cdot A_{j-1} (T_{i,j-1}^t - T_{i,j}^t) + B_{j+1} \cdot A_{j+1} (T_{i,j+1}^t - T_{i,j}^t) \dots (4)$$

여기서, V_{ij} 는 要素 (i, j)의 체적을 나타낸다. 또, B_{i-1} , B_{i+1} , B_{j-1} 및 B_{j+1} 은 각각 面 A_{i-1} , A_{i+1} , A_{j-1} 및 A_{j+1} 에 있어서의 境界條件을 나타낸다.

식 (4)를 미지수 $T_{i,j}^{t+\Delta t}$ 에 대해서 정리하면 다음식을 얻는다.

$$T_{i,j}^{t+\Delta t} = \left\{ 1 - \frac{\Delta t}{\rho c} \frac{1}{V_{ij}} (B_{i-1} \cdot A_{i-1} + \dots) \right\} T_{i,j}^t + \dots$$

$$\begin{aligned}
 & B_{i+1} \cdot A_{i+1} + B_{j-1} \cdot A_{j-1} + \\
 & B_{j+1} \cdot A_{j+1}) \} T_{i,j}^t + \frac{\Delta t}{\rho c} \frac{1}{V_{ij}} \\
 & (B_{i-1} \cdot A_{i-1} \cdot T_{i-1,j}^t + B_{i+1} \cdot \\
 & A_{i+1} \cdot T_{i+1,j}^t + B_{j-1} \cdot A_{j-1} \cdot \\
 & T_{i,j-1}^t + B_{j+1} \cdot A_{j+1} \cdot \\
 & T_{i,j+1}^t) \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

식 (5)에 의하여 실제의 熱傳導 및 凝固問題를 해석하기 위해서는 적당한 境界條件의 설정이 필요하다. 예를 들어 面 A_{i-1} 의 境界條件 B_{i-1} 의 설정에 대해서 설명하기로 한다.

物質 1과 物質 2 (또는 同一한 物質)가 面 A_{i-1} 에서 熱抵抗없이 접촉하고 있는 경우

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2}} \dots\dots\dots (6)$$

物質 1과 物質 2가 面 A_{i-1} 에서 熱抵抗 $1/h$ 을 갖고 접촉하고 있는 경우(鑄物과鑄型이 접촉하고 있는 경우),

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2}} \dots\dots\dots (7)$$

환경(空氣, 물)과 熱抵抗($1/ha$)을 갖고 접촉하고 있는 경우,

$$B_{i-1} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{\Delta x_1}{k_1}} \dots\dots\dots (8)$$

식 (5)에서는 時間에 대해서 前進差分을 사용하고 있기 때문에 Δt 는 다음식에 의해서 제한된다.

$$\begin{aligned}
 & 1 - \frac{\Delta t}{\rho c} \frac{1}{V_{ij}} (B_{i-1} \cdot A_{i-1} + B_{i+1} \cdot A_{i+1} \\
 & + B_{j-1} \cdot A_{j-1} + B_{j+1} \cdot A_{j+1}) \geq 0 \dots (9)
 \end{aligned}$$

凝固時의 凝固潛熱의 放出은 (i) 等價比熱法 (ii) 溫度回復法 (iii) Enthalpy法 등에 의해서 취급할 수 있다. 6)

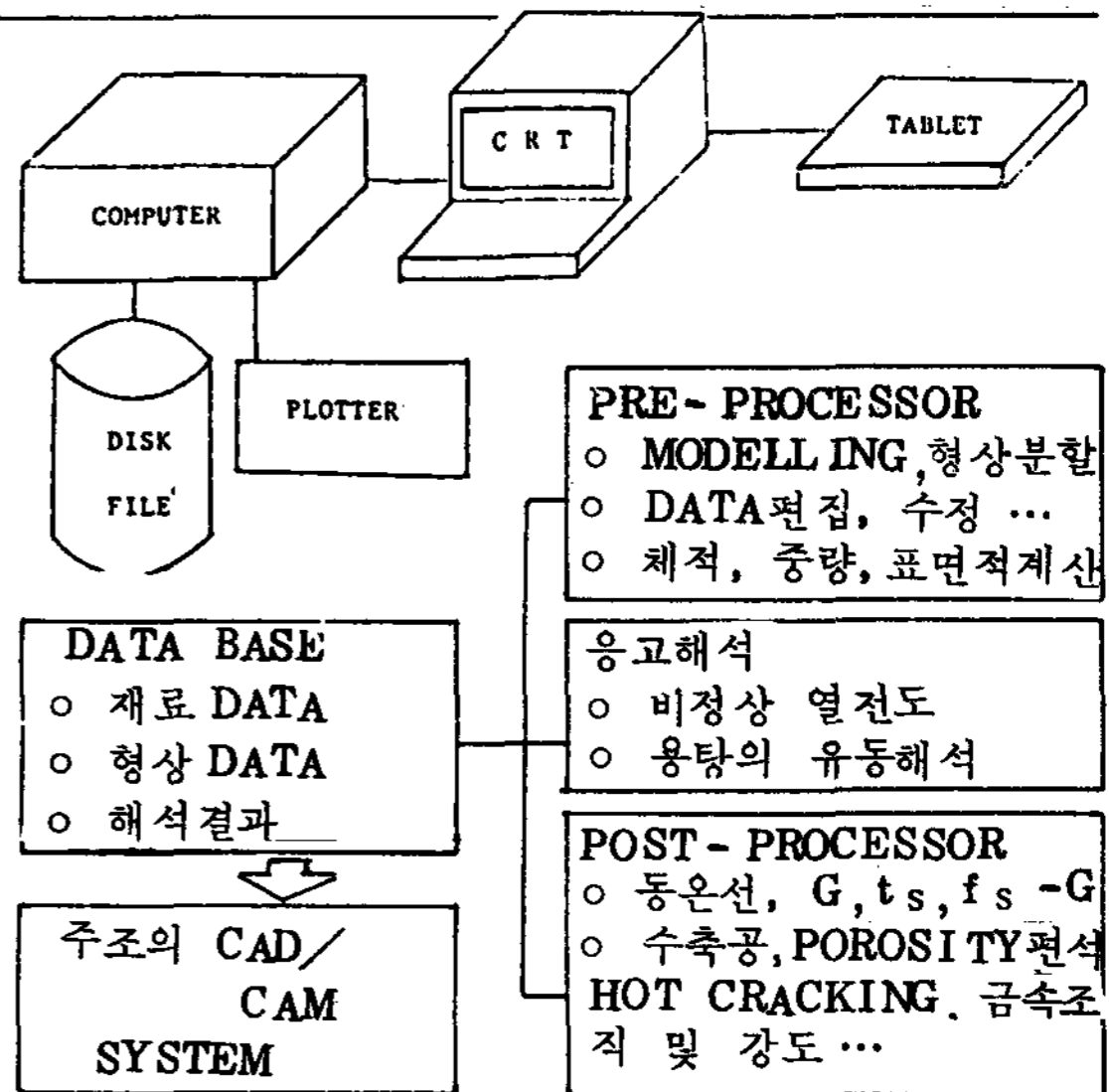


그림 2 凝固解析을 위한 컴퓨터 System (日本素形材 center)

그림 2에 凝固解析을 위한 컴퓨터 System의 한예를 표시한다.

2.2 凝固解析의 활용범위

최근, 각종 金屬加工法의 발달과 더불어 鑄造工業의 경제성이 상대적으로 떨어져 그 발전이 크게 위축되고 있는 실정이다. 선진국에서는 이러한 어려운 여건과 불황을 타개하기 위해서 컴퓨터技術을 적극적으로 鑄造工業分野에 도입·활용하고 있다. 7)

鑄造工業에서의 컴퓨터의 적용에는 크게 다음과 같은 두가지 목적이 있다고 본다. ①省人力化 및 生産性向上 ②品質의 高級化

受注, 見積, 管理, 圖面處理 및 자료정리, 鑄込, 鑄型틀 해체 및 후처리 등에 있어서의 컴퓨터利用은 省人力化 및 生産性向上 등을 주목적으로 하며, 鑄造方案, 熔解, 鑄物砂處理의 自動化 등은 品質向上을 주목적으로 한다고 할 수 있다. 또한 造型, 檢査, 熱處理 등에서의 적용은 두가지 목적을 겸하고 있다고 볼 수 있다.

이상과 같이 컴퓨터는 각종 工程에 적용될 수 있으나, 그중에서도 가장 중요한 것은 熱傳導 및 凝固解析에의 응용이라고 할 수 있다.

熱傳導 및 凝固解析은 그림 3에 표시한 것과 같이 크게 두가지 분야에 직접 關係를 가지고 鑄物設計에 적용된다고 할 수 있다. 즉, ①鑄造工程에 관한 解析, ②鑄造組織 및 性能의 豫測에 관한 解析으로 나눌

수 있다.

鑄造工程에 관해서는, 熱傳導 및 熔湯의 流動등을 해석하므로써 注湯條件, 湯口系設計등을 할 수 있으며, 凝固解析의 결과를 적용하여 押湯設計 및 冷金の 배치등을 할 수 있다.

鑄造組織 및 性能豫測에 관해서는 熱傳導 및 凝固解析을 토대로 하여 熱應力計算, 冷却速度的 計算, 溫度勾配 및 凝固時間등을 계산하여 收縮孔缺陷豫測, 鑄物의 熱變形, 熱間균열, 鑄造組織 및 기계적 성질 등을 예측할 수 있다. 또한 熔湯의 流動解析을 병행하여 偏析의 발생도 예측할 수 있다.

3. 凝固解析의 應用例

컴퓨터에 의한 凝固解析의 이점은 鑄造方法이나 鑄合金의 종류에 관계없이 일반적으로 널리 이용될 수 있는 점이다. 또한 鑄造品의 形狀이나 치수의 제

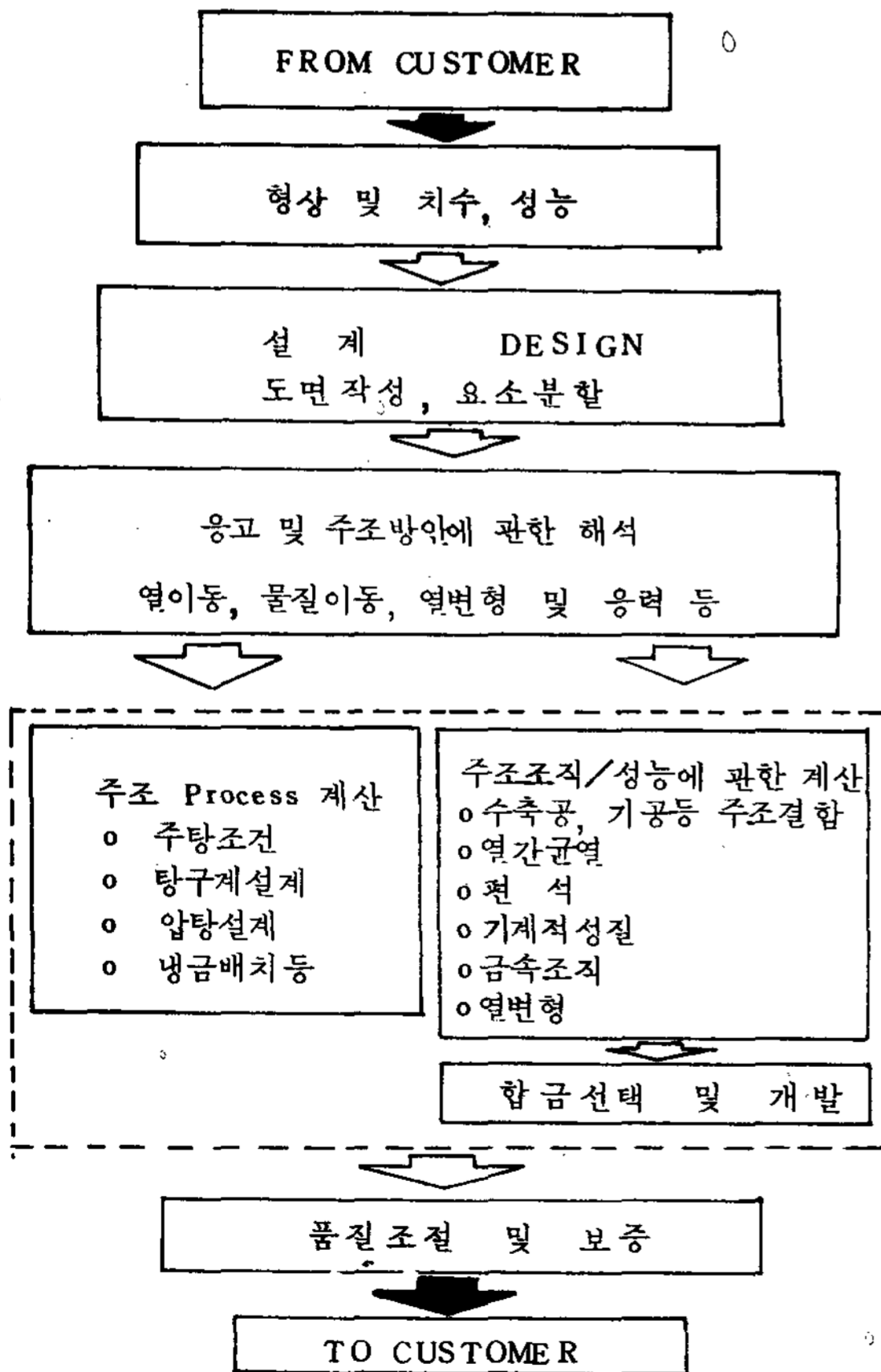


그림 3 컴퓨터에 의한 鑄造設計

한도 받지 않는다. 그림 3에 표시한 몇가지 경우에 대하여 실제 시뮬레이션의 예를 들어 보기로 한다.

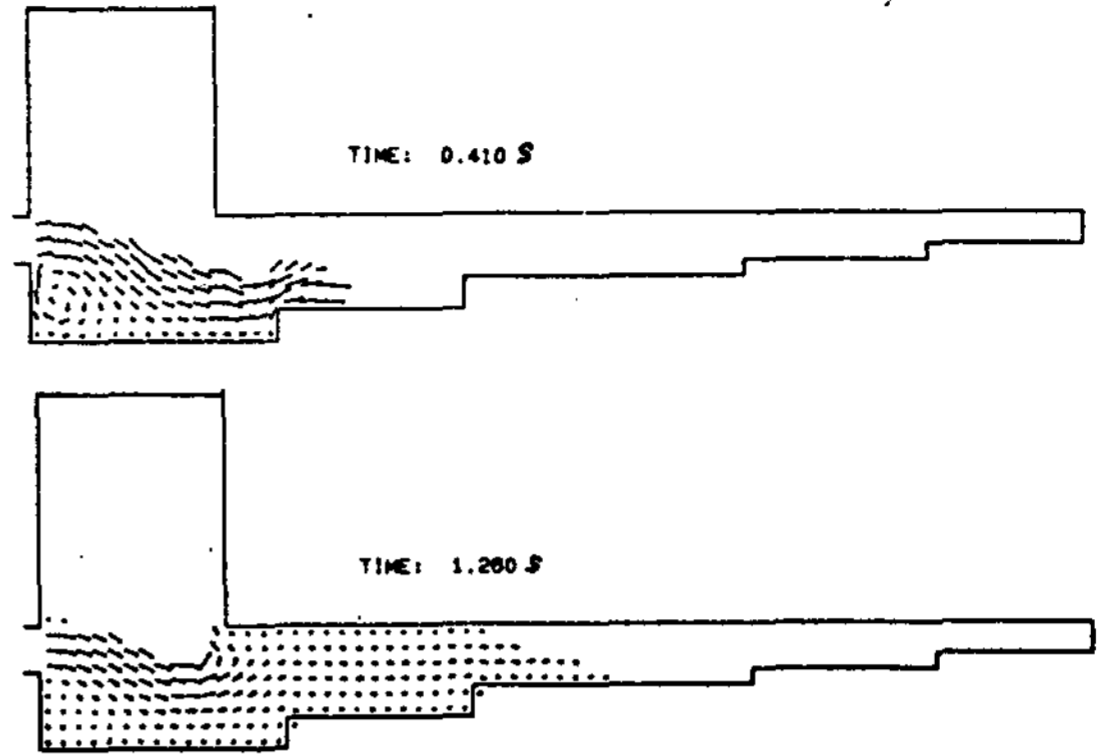


그림 4 SMAC法에 의해 계산된 판상 鑄型内에서의 流體의 흐름⁸⁾

그림 4는 SMAC法에 의해서 해석된 계단상 鑄物에서의 熔湯의 흐름을 나타낸 것이다.⁸⁾

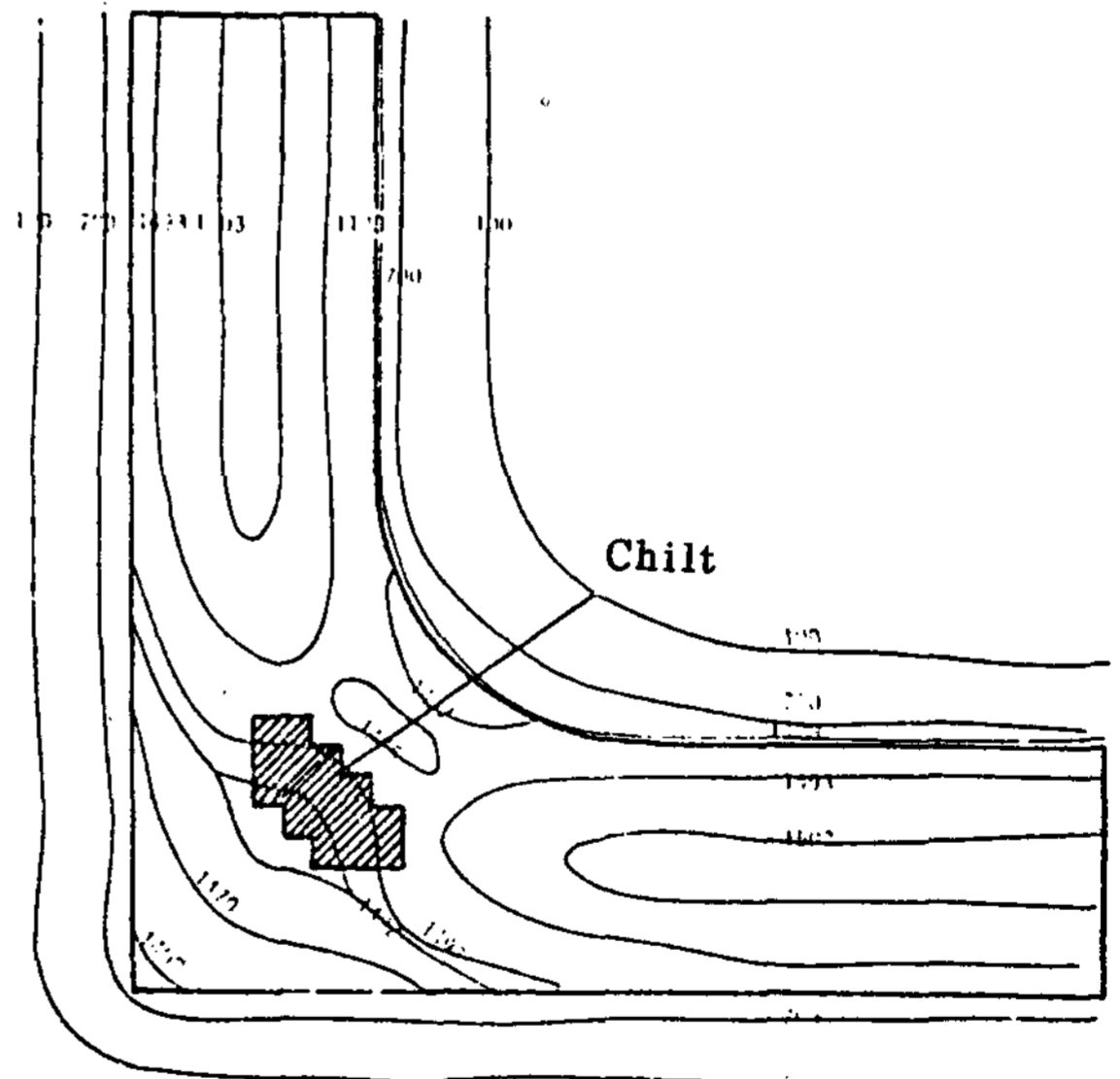


그림 5 内部 冷金を 사용했을 때의 凝固解析의 例⁹⁾

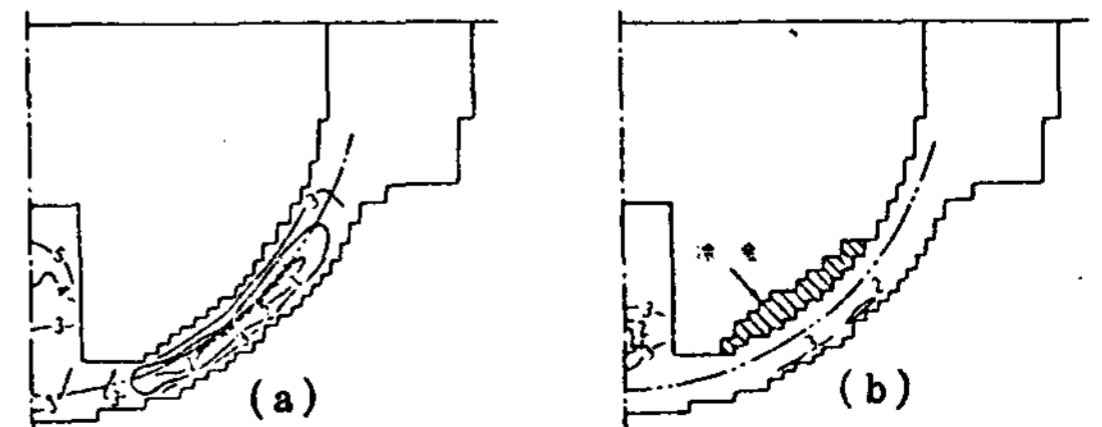


그림 6 外部冷金を 사용한 경우의 凝固解析의 例¹⁰⁾
(a) 冷金を 사용하지 않을 경우, x표부분에 收縮孔이 發生, (b) 冷金を 사용한 경우

그림 5 및 6은 内部冷金⁹⁾ 및 外部冷金¹⁰⁾을 사용했을 때의 等溫線과 溫度勾配를 각각 나타낸 것이다. 이와같이 적당한 冷金을 사용하므로써 收縮孔등의 결함을 방지할 수 있다.

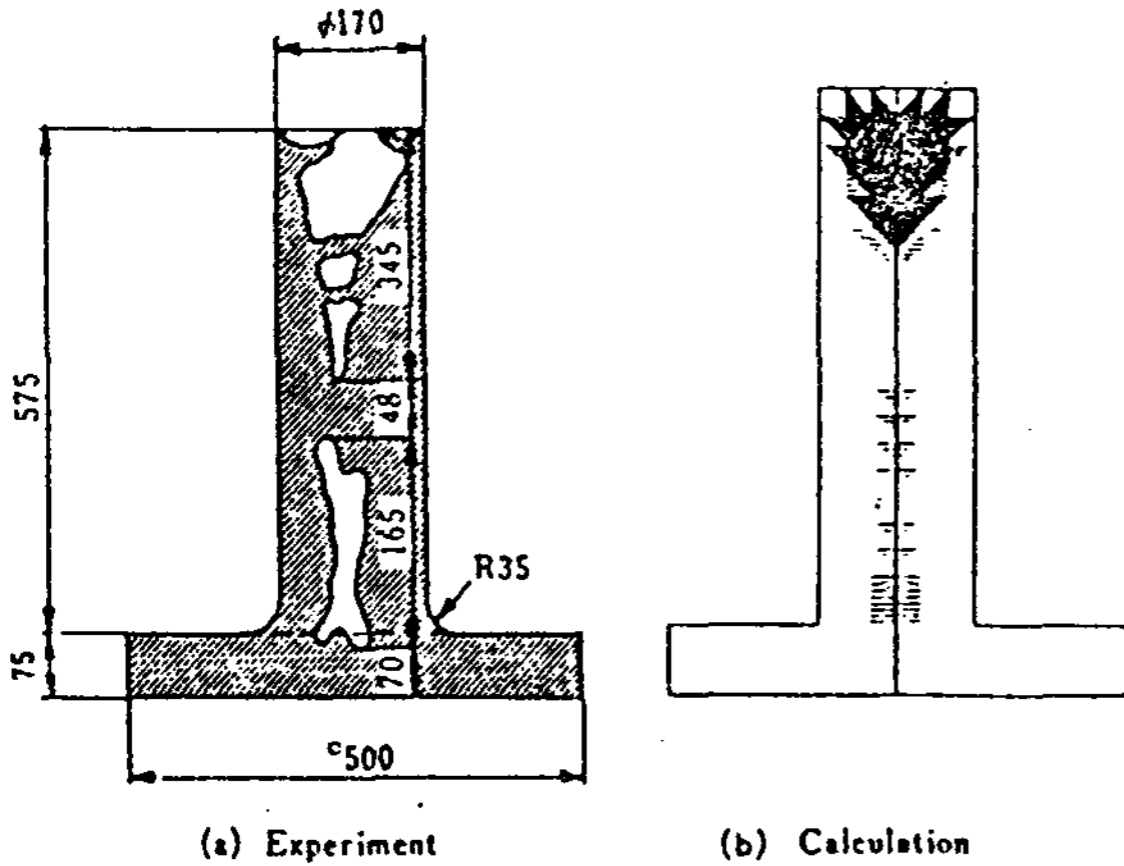


그림 7 鑄鋼의 平版押湯 모델의 실험결과와 계산결과¹²⁾

그림 7은 平版押湯모델의 실험결과와 凝固解析에 의한 押湯設計의 예를 나타낸 것으로 수축공의 발생위치 및 분포를 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

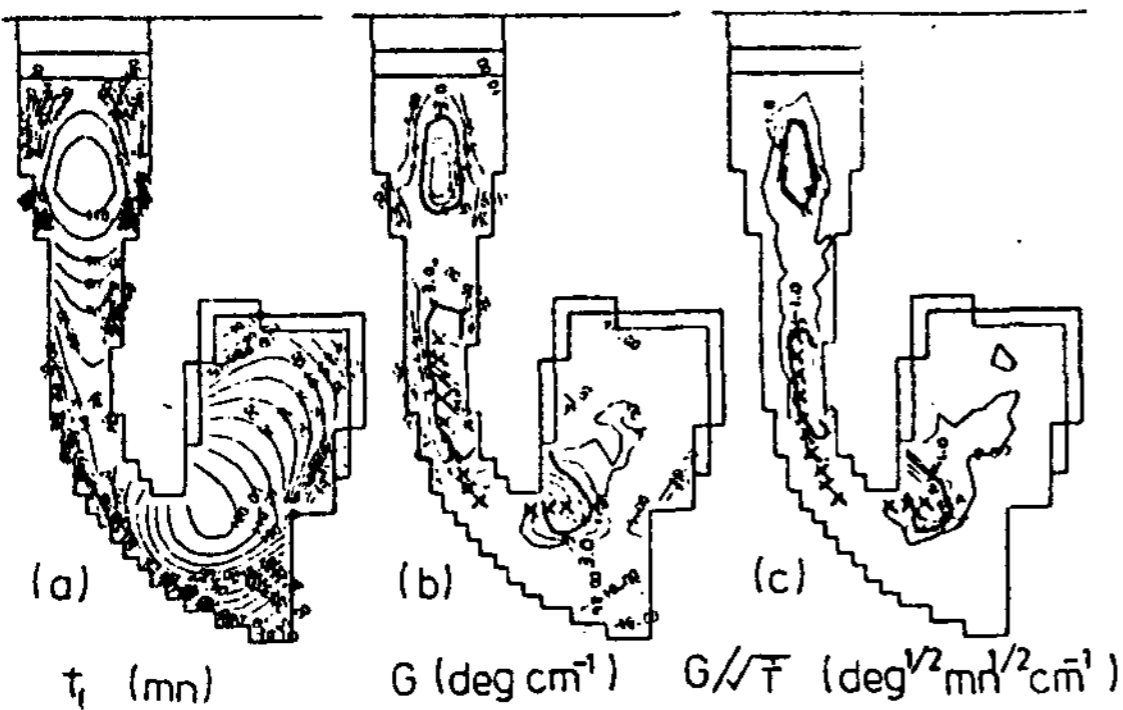


그림 8 盲押湯을 사용한 ring casting의 初期設計에 따른 凝固解析의 例 (x표 부분에 收縮孔이 發生)¹³⁾

그림 8은 鋼鑄物에 있어서 凝固解析에 의한 수축공 결함의 예측결과를 나타낸 것이다. 그림 9는 그림 8의 鑄物을 設計變更한 경우로서 수축공의 발생을 방지한 경우를 나타낸다.

그림 10은 凝固解析에 의한 기계적성질의 예측예를 나타낸 것으로, 냉각속도를 계산하여 crankshaft의 硬度를 해석한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 試驗片을 사용하여 모형실험한 결과와 잘 일치하고 있음을 보여 준다.

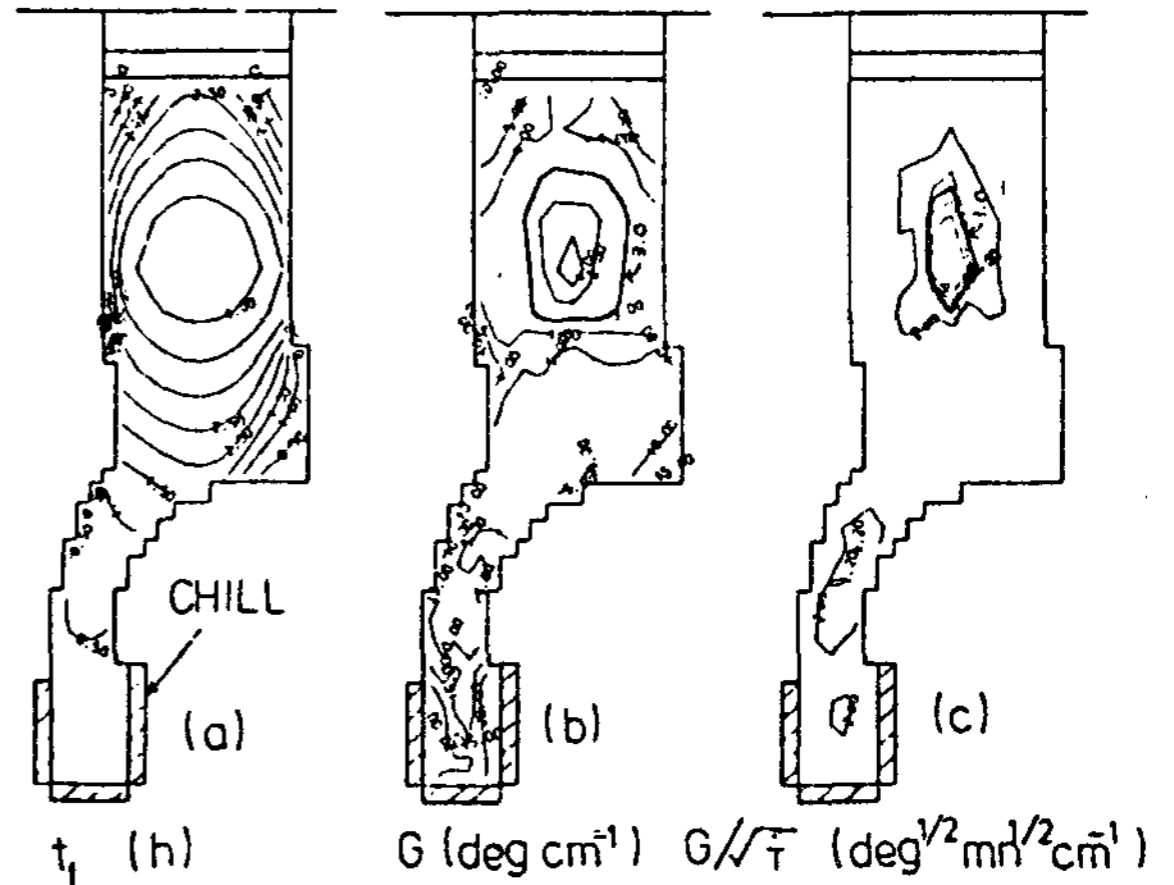


그림 9 그림 8의 設計를 변경하여 收縮孔缺陷의 발생을 방지한 凝固解析의 例¹³⁾

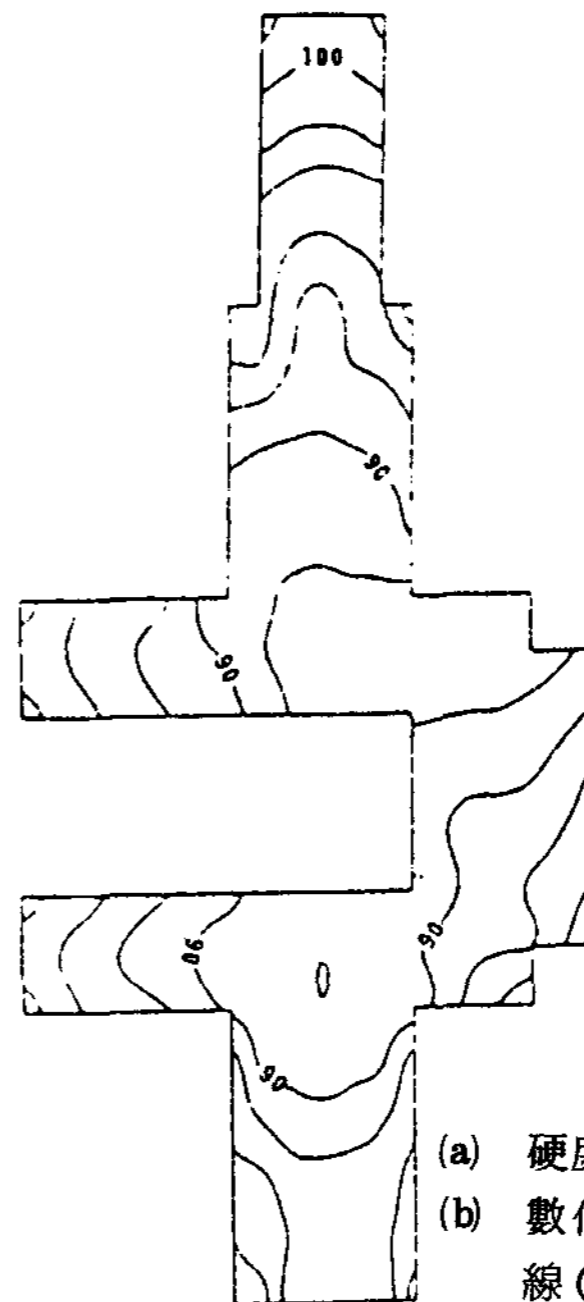
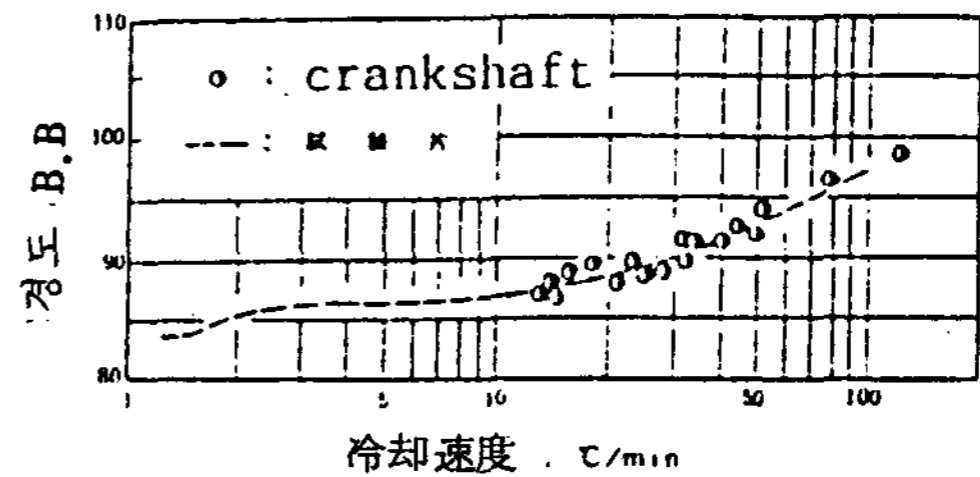


그림 10 Crankshaft의 凝固解析에 의한 冷却速度와 硬度와의 관계¹⁴⁾

(a) 硬度와 冷却速度와의 관계
(b) 數値解析에 의한等硬度曲線 (숫자는 HRB를 나타냄)

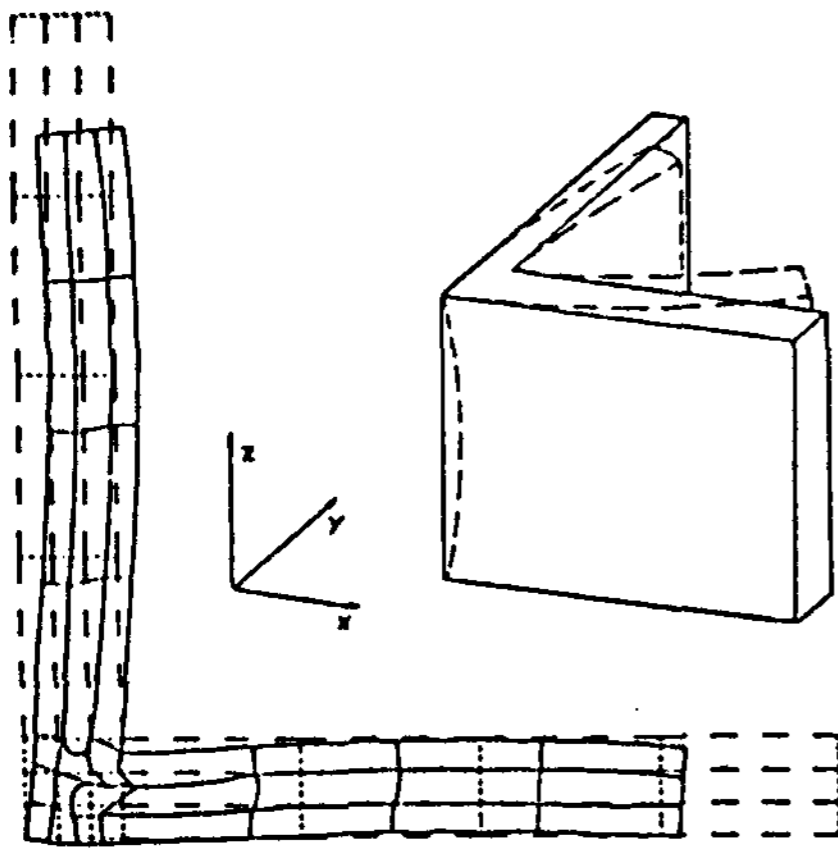


그림 11 冷却時에 발생된 應力の 計算例¹⁵⁾

그림 11은 冷却時의 應力解析을 한 경우를 나타낸다. 이상에서 예를 들어 설명한 것과같이, 熱傳導 및 凝固解析은 鑄造의 각 분야에 널리 효율적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이상 간단하게 鑄物의 凝固解析에 관한 기초사항과 실제 응용에 관한 예를 소개하였다. 컴퓨터에 의한 凝固解析의 새로운 技術에 의하여 각종 鑄造缺陷의 防止, 鑄造方案의 신속한 設定, 鑄物의 強度 및 性能 豫測, 鑄物과 鑄型의 熱應力 및 變形 解析, 고온균열의 방지등을 가져올 수 있다고 생각된다. 따라서 鑄造工場의 현대화를 위해서 컴퓨터技術의 적극적인 도입과 응용이 크게 기대되는 바이다.

참 고 문 헌

1) R.J. Sarjant, M.R. Slack: J. Iron Steel Inst., 177(1954), 428

2) G. Comini, S Del Guidice, R.W. Lewis, O. C, Zienkiewicz: Int. J. Num. Meth. Engng., 8(1974), 613
 3) C.P. Hong, T. Umeda, Y. Kimura: Boundary Elements, Springer-Verlag, (1983), 153
 4) G.M. Dusinberre: Heat Transfer Calculations by Finite Differences, (1961), Int. Textbook Co.
 5) 大中逸雄: 鐵と鋼, 65(1979), 1737
 6) C.P. Hong, T. Umeda, Y. Kimura: Metall. Trans. 15B, (1984), 91
 7) 홍준표: 한국주조공학회 1985年度 秋季鑄物技術講演會, 3
 8) R. A. Stoehr, W. S. Hwang: Modelling of Casting and Welding Processes, J. T. Berry, J. Dantzig Eds., AIME(1984), 47
 9) F. Syvertsen: in Computer Simulation and Modelling of Solidification, Foundry - Institute, AIT Aachen, 1984
 10) E. Niyama et al: AFS Int, Cast Metals, 6, (1981), 16
 11) 洪俊杓, 梅田高照, 木村康夫: 鑄物 56 (1984), 758
 12) 千ヶ岩健兒, 今福一英: 鑄物, 55(1983), 271
 13) E. Niyama et al: CIATF - Chicago, USA, Paper No, 10
 14) 牧村實等: 鑄物, 56 (1984) 15, 421
 15) G. Rieder, G. Hirt: Unpublished work, Inst. Techn. Mechanics, AIT Aachen(1984)
 16) 梅田高照, 洪俊杓, 木村康夫: 大韓金屬學會誌, 22, (1984), 104