

講 座

### 鑄物生産에 있어서의 컴퓨터技術의 應用 (3)

金 剛 漢\*

#### 3 - 2. 압탕방안의 전산화

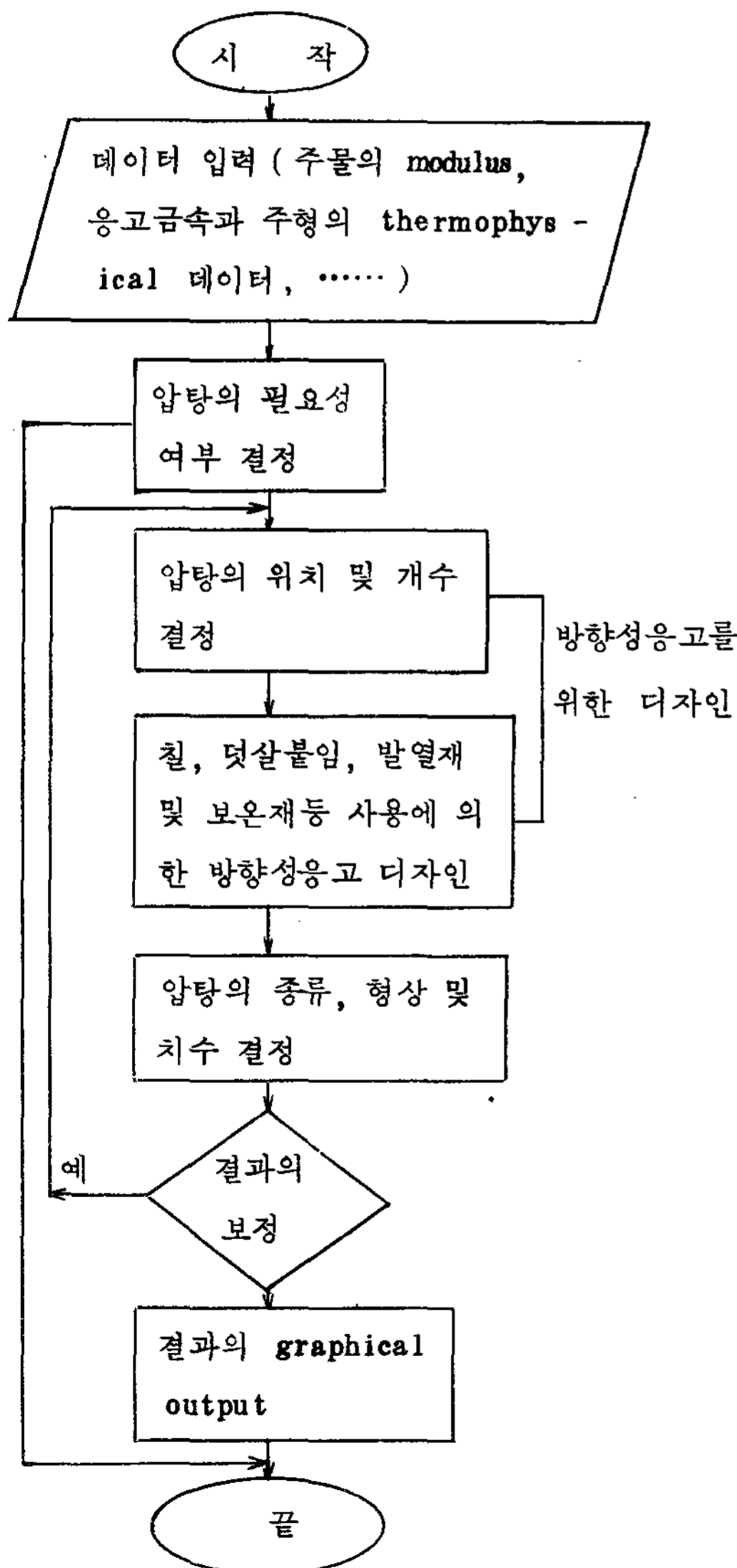


그림 1. 일반적인 압탕방안 과정에 대한 흐름도

\* 忠北大學校 工科大學金屬科 助教授

주물의 수축공결함은 응고금속의 수축과 주형의 이동 현상으로인해 발생하는 것으로 이러한 불량을 사전에 방지하기 위해서는 압탕을 최종 응고구역으로 하는 방향성 응고를 얻도록 해야하며, 이를 위해 첼, 덧살붙임, 보온재, 발열재등이 적용되기도 한다. 압탕방안의 전산화는 이와 같은 주물의 방향성 응고와 주조수율을 높일 수 있는 최적의 압탕방안을 컴퓨터기술을 이용하여 얻도록하는 것으로서, 그림 1의 일반적인 압탕방안의 각 과정은 personal 컴퓨터, 미니 또는 대형 컴퓨터를 적용하여, 부분적으로 또는 체반적으로 전산화된다.

#### 3-2-1. Personal 컴퓨터를 이용한 압탕방안의 전산화

Personal 컴퓨터는 미니 또는 대형컴퓨터에 비해 기억용량과 계산처리 속도는 떨어지나 가격이 저렴하고 이동과 취급이 간편한 한편, graphics 기능도 갖고있다. 이같은 personal 컴퓨터의 이점을 이용하여 주조방안자는 방안에 있어 이 컴퓨터를 보조적인 수단으로 효과적으로 이용할 수 있다. 예를들어, 압탕방안에 관련된 기존의 여러 도형, 계산식, 데이터등은 프로그램에 적용되어 신속, 정확히 압탕 및 압탕목부의 치수를 얻을 수 있으며, section modulus 계산에 의한 압탕위치 결정도, digital tablet과 pen (그림 2), 그리고, 적절한 software의 도움으로 전산화될 수 있다. 이러한 personal 컴퓨터에 의한 압탕방안의 전산화는 비전문가도 압탕방안을 할 수 있도록하는 완전한 전산화에 대해 주조 엔지니어의 역할을 돕는 정도의 부분적인 전산화라 할 수 있는데, computer hardware 기술의 발달, 또는 적절한 software 개발과 실험데이터의 공급여하에 따라서는 전산화의 정도와 방안의 정확성을 크게 향상시킬 수도 있다.

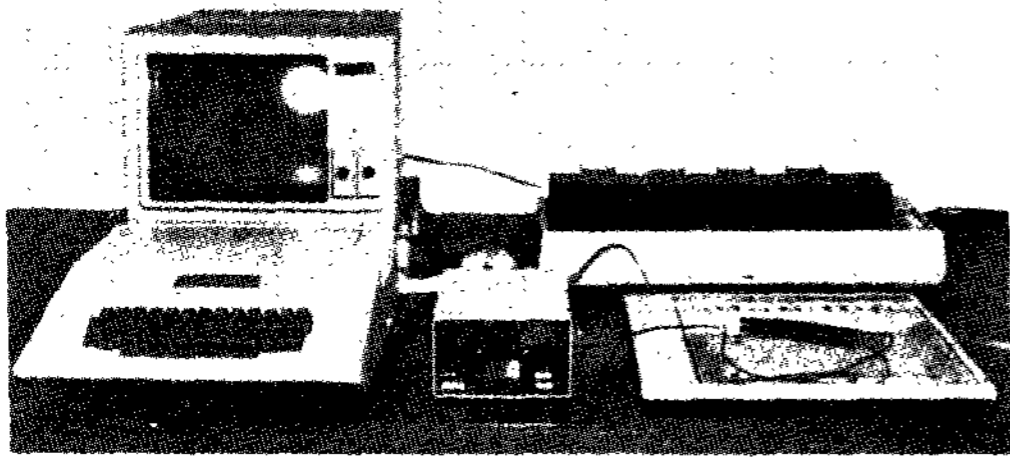


그림 2. Personal 컴퓨터 시스템

a) 압탕방안에 필요한 데이터

압탕방안을 위해서는, 주물중량, modulus, 응고금속의 수축량, mold dilation, 주입온도등 여러 데이터가 필요하다. 이중 주물의 중량, modulus는 주물품의 종류에 따라 매번 계산해야되고, 더우기 주물품의 형상이 복잡할 때는 많은 시간과 노력을 요한다. 이와 같은 점을 고려하여, 현재 personal 컴퓨터를 이용한 주물의 중량과 modulus를 구하고자하는 연구가 세계 각국에서 진행중이며, 이미 제한된 주물의 형상, 정확도를 갖고 있지만은, 이러한 계산을 할 수 있는 software가 개발되어 사용되고 있다.

b) 압탕의 필요성 여부결정

대부분의 금속은 응고시 액상, 응고, 고상에서의 수축과 생형과 같이 주형의 강도가 약한 경우 주형의 이동으로인한 mold dilation으로 인해 수축공결함이 발생되고, 압탕의 필요성 여부는 응고금속의 총 수축량과 mold dilation의 합의 값으로 판단한다. 그러나 모든 금속이 응고시 수축하는 것은 아니고, 회주철의 경우는 흑연정출에 의한 부피팽창으로 인해 압탕이 없이도 수축공결함이 없는 건전한 주물을 주조할 수도 있다. 이러한 회주철의 응고시 총 수축량은 다음과 같은 계산식에 의해 구할 수 있다. 즉,

$$S_o = 2 - \frac{1}{1+a(T_L - T_E)} - \left( \frac{1-S_3}{1-Y} \right) \left[ \frac{\rho_a}{\rho_G} (X - Y) + (1 - X) \right]$$

(단,  $S_o$  = 총 수축량,  $S_3$  = 액상수축 = 0.039,  $\rho_a$  = 공정온도에서의 austenite의 밀도 = 7.30 g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_G$  = 공정온도에서 흑연의 밀도 = 2.21 g/cm<sup>3</sup>, a =

조정 austenite와 액상금속의 평균 체팽창계수 =  $16.5 \times 10^{-6} / ^\circ F$ ,  $T_L$  = 액상온도,  $T_E$  = 공정온도, X = 총 탄소량, Y = 공정온도에서 austenite에 대한 흑연의 용해도 =  $\frac{2-0.1 Si}{100}$  ) .

또한, mold dilation에 의한 수축은, 생형일 경우, 약, 1.5%의 주형공간의 팽창이 있으며, 주형의 강도가 큰 자경성 주형등에서는 mold dilation은 무시한다.

c) modulus 계산에 의한 주물의 방향성 응고 디자인.

Chvorinov의 법칙에 의하면, 한 주물의 응고시간은 그 주물의 modulus 크기에 비례한다. 만일 한 주물을 몇개의 부위로 나누고 각 부위의 modulus (section modulus)를 계산 비교하면 이 주물의 응고진행방향을 예측할 수 있게 된다. 예를들어, 그림 3에 보이는 어느 원통형 주물의 단면에서 각 section I, II, III의 modulus가 I < II < III 크기의 순서라면 이 주물

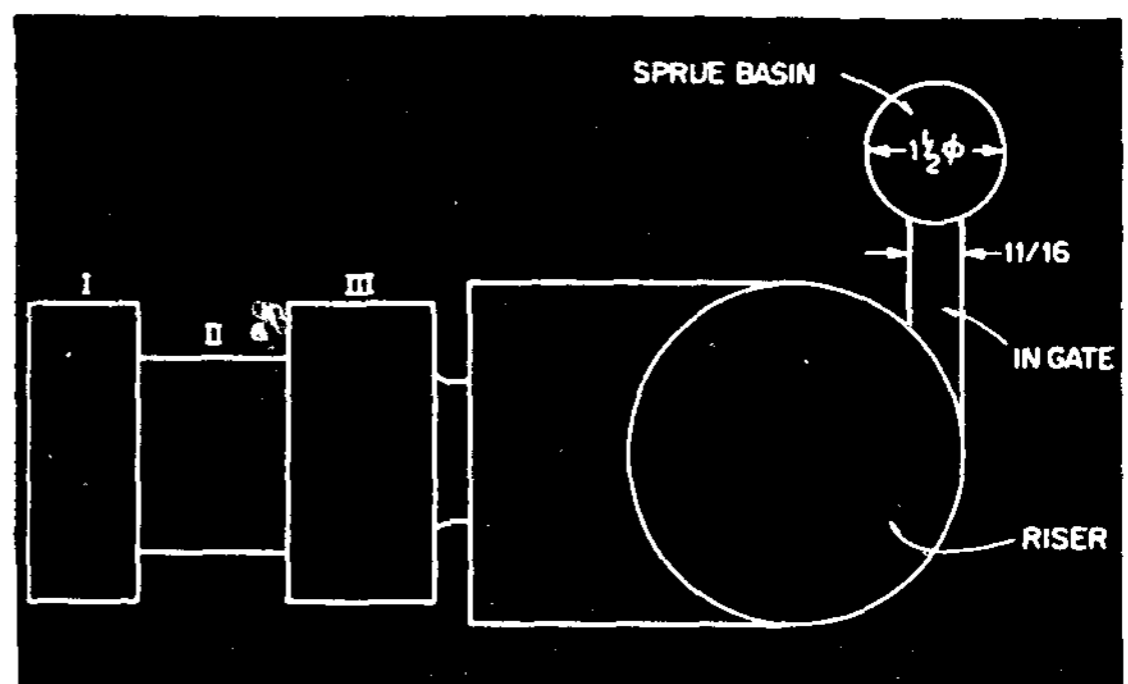


그림 3. 압탕 및 탕구계를 포함한 원통형 주물의 평면도

은 I → II → III의 방향으로 응고가 진행되는 방향성 응고를 얻는다. 그러나 만일 각 section의 modulus가, II < I < III의 크기의 순서로 되면, 이 주물의 응고순서는 II → I → III이 되어 방향성 응고가 일어나지 않는다. 이와같은 경우에 section I에 chill을 적용하면, I의 modulus는 감소하여 I → II → III의 방향성 응고를 얻도록 디자인 할 수 있다. 이와같은 원리로 주물의 modulus 또는 section modulus 계산

은 압탕의 위치와 수 결정, 칠, 덧살붙임, fillet radii, 보온재, 발열제 등 사용에 의한 방향성 응고를 위해 적용될 수 있다. 그러나, 필요 압탕수의 결정을 위해서는 주물의 section modulus 계산만으로는 안되고, 압탕의 급탕거리 데이터와, 칠, end surface 등에 의한 급탕거리의 증가에 대한 데이터가 필요하다.

이러한 modulus 또는 section modulus 계산을 이용하는 압탕방안은 그 적용이 쉽고 간단한 장점이 있으나 주물의 형상, core와 fin의 존재, 주형의 재질, 과열도 등에 따라 주물의 기하학적인 modulus와 실제 modulus와의 차이가 있어, 실제 modulus를 얻기 위한 많은 실험 데이터와 노력이 필요하고, 기하학적인 modulus도 주물의 형상이 복잡해짐에 따라 신속, 정확히 얻기가 힘든 단점이 있다.

d) 압탕의 종류, 형상 및 치수결정

압탕의 종류(그림 4)는 개방형직압탕, 폐쇄형직압탕, 개방형횡압탕, 폐쇄형횡압탕과 특수압탕이 있고, 그림 5에서와 같은 종류의 형상이 있다. 이와같은 압탕의 종류 및 형상의 결정은 조형의 용이도, 압탕효과 및

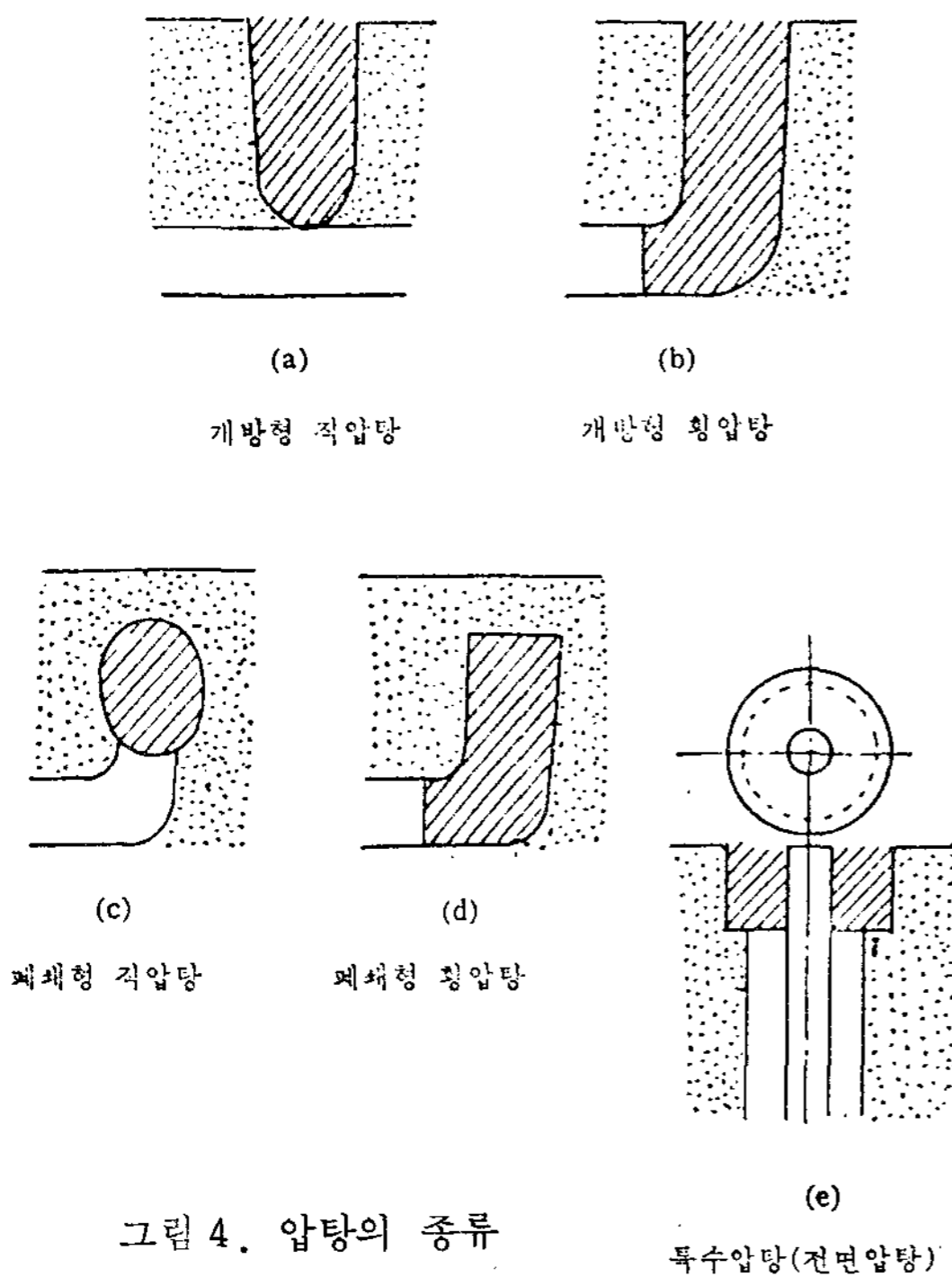


그림 4. 압탕의 종류

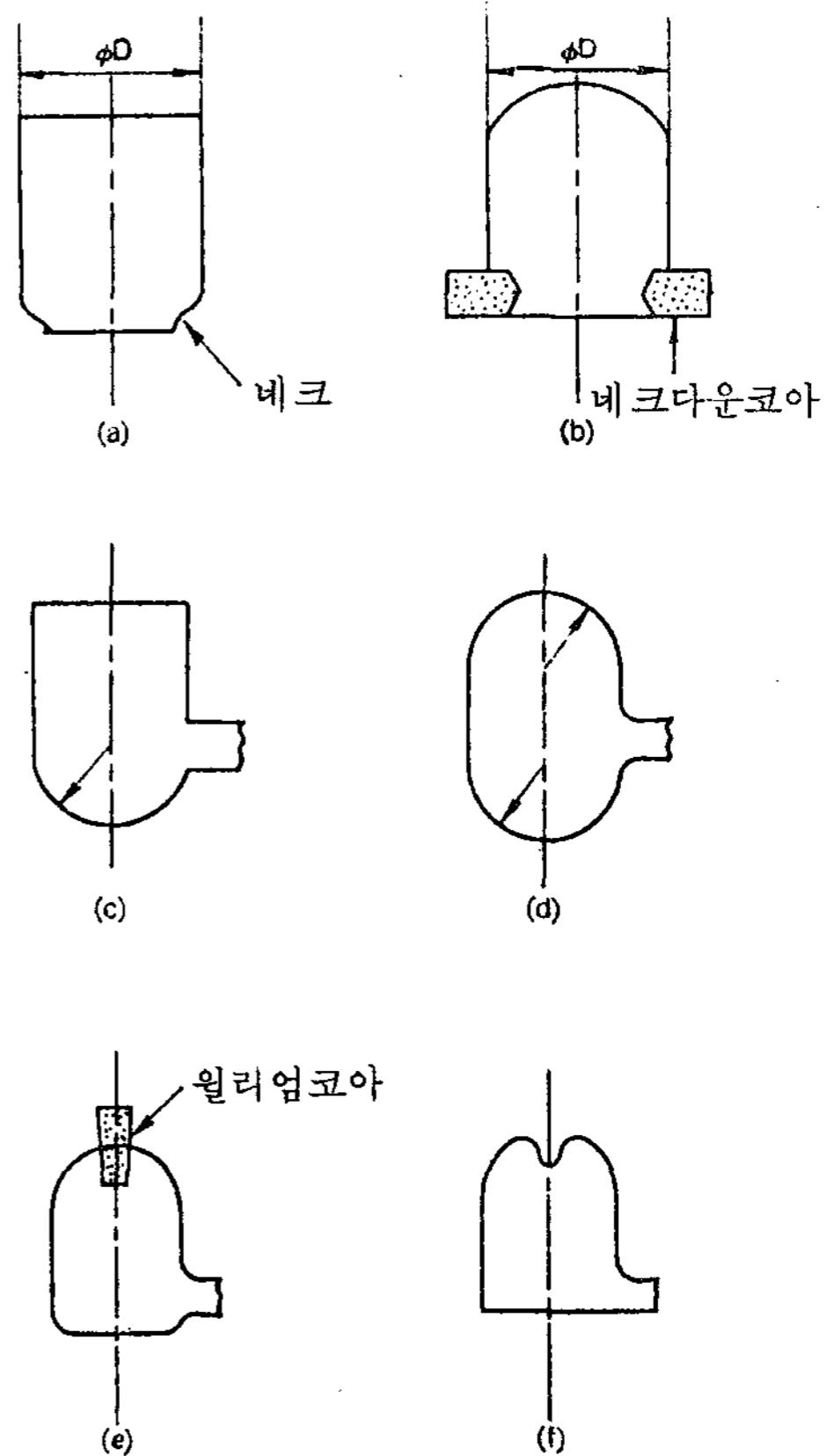


그림 5. 여러 종류의 압탕형상

주물응고 후 압탕제거가 용이하도록 고려하여 결정한다. 이러한 각 종류 및 형상의 압탕은 personal 컴퓨터의 그래픽스 능력을 이용하여 컴퓨터에 기억시킨 후 필요에 의해 컴퓨터스크린 위에 불러내어 압탕방안에 이용할 수 있고, 또 압탕의 치수가 결정된 후에는 결과를 printer 또는 hardcopy를 사용하여 도시적으로 나타낼 수 있다.

한편, 압탕치수 결정에 있어, 압탕은 주물보다 늦게 응고하고, 주물의 수축을 보충할 수 있는 충분한 용량을 갖고 있어야 함과 아울러 압탕의 제거와 조형에 유리한 조건을 만족시켜야 한다. 이미 이와같은 조건을 만족시키는 주물의 각재질에 대한 적정한 압탕치

수 결정을 위한 많은 연구결과가 있었고, personal 컴퓨터를 이용하면 이와같은 연구결과는 손쉽게 프로그램되어 압탕치수가 계산된다. 압탕치수 결정에 관련된 각종 계산식, 수치등은 프로그램에 쉽게 적용될 수 있으나, 예를들어, 그림 6과 같이 도표로 제시되어 있을 때는 우선 이를 수식화해야 한다. 특히 데이터가 직선이 아니고 곡선 관계식으로 나타나있는 경우는 수식화가 다소 복잡하나 컴퓨터기술을 이용하여, regression 방법에 의해 analytical eq이나 또는 polynomial eq을 유도할 수 있다. 이그림의 건전한 주물을 위한 상부 곡선은 log - log graph 를

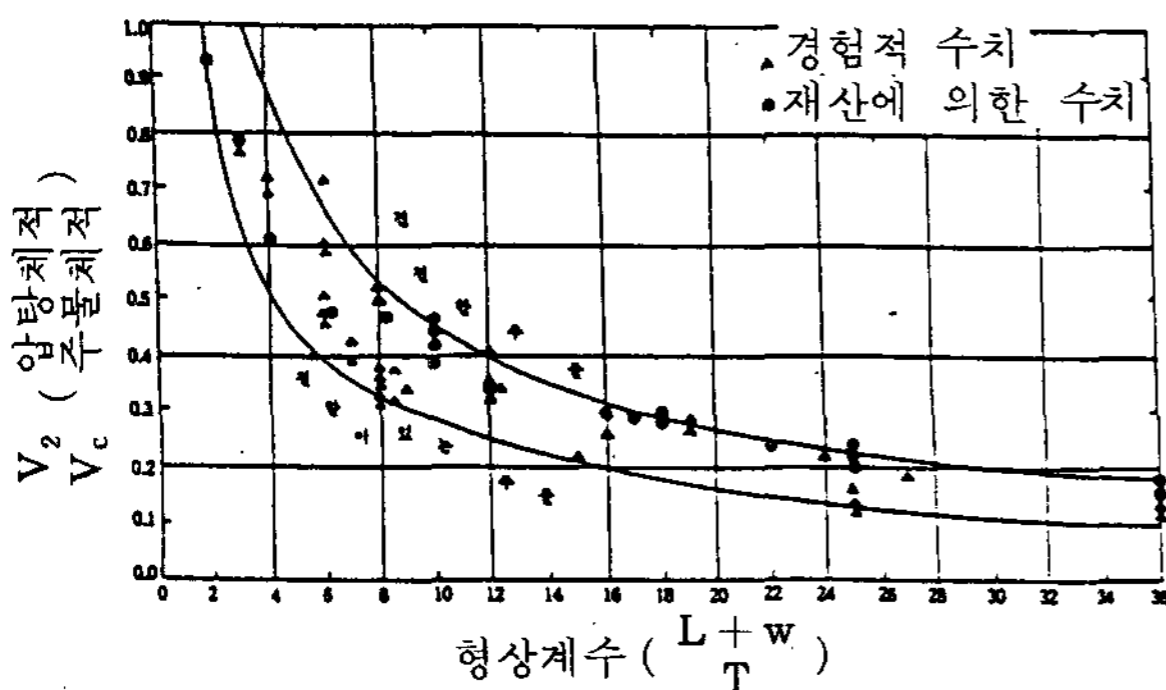


그림 6. 주강에 있어서 형상계수로 부터 최소 유효 압탕체적을 산출하는 도표

이용하면 직선으로 나타나고, 이 직선식을 regression 방법에 의해 구하면, 그 직선식은

$$\frac{V_R}{V_c} = 10^{0.39} \left( \frac{L+W}{T} \right)^{-0.73} \quad \text{이}$$

되고, 이를 압탕치수 계산을 위한 프로그램에 이용할 수 있다.

e) 결과의 검토 및 보정

방안의 결과 얻어진 압탕치수는 먼저 주조방안자의 경험에 의해, 그 다음, 실주조 실험과정을 통해 적정여부를 판단하여 필요한 경우 보정을 가한다.

3-2-2. 미니 또는 대형컴퓨터를 이용한 압탕방안의 전산화

용탕은 갖고 있는 superheat와 잠열의 대부분을 주위의 주형으로 방산함으로써 응고가 진행되고, 이러한 응고 계면의 진행은, 주형과 응고 금속사이에 air gap이 형성되지 않는다면,  $\alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}$

의 unsteady-state heat conduction 방정식의 FDM (finite difference method) 또는 FEM (finite element method) 등에 의한 numerical solution에 의해 simulation될 수 있다 (단,  $\alpha$  = thermal diffusivity, t = 시간, T = 온도). 여기서, 많은 수의 matrix문제를 취급해야되는 finite element 기술은 기억용량이 크고 계산처리 속도가 빠른 미니 또는 대형컴퓨터를 적용해야되고, finite difference 기술은 personal 컴퓨터의 적용에 의해서도 가능하나 효과적인 활용을 위해서는 미니 또는 대형컴퓨터의 적용이 바람직하다.

a) 압탕방안에 필요한 데이터

미니 또는 대형컴퓨터에 의한 압탕방안에는 personal 컴퓨터에 의한 압탕방안에서 필요한 데이터외에 열전달 방정식의 해결에 필요한 여러 thermophysical 데이터가 필요하다. 즉, 앞의 unsteady - state heat conduction eq.에서 thermal diffusivity  $\alpha$ 는  $\frac{k}{SC_p}$  ( $k$  = 열전도도,  $\ell$  = 밀도,  $C_p$  = 비열)이고, 이들  $k, \ell, C_p$ 는 온도에 따라 변한다. 그러므로 정확한 응고곡선의 simulation을 위해서는 온도 함수로 표시되는 주형 및 응고금속의  $k, \ell, C_p$  데이터가 필요하다. 그러나, 많은 순금속의 경우는 온도함수로 나타나있는 thermophysical 데이터가 이용가능하나, 주물의 대부분을 차지하는 합금의 경우는 이들 thermophysical 데이터가 없거나 또는 있더라도 믿을만하지 못한 경우가 많다. 주형의 경우에 있어서도 열전도도는 그림 7에서 보이는 바와같이 기존 열전도도 데이터가 서로 크게 다른 것을 볼 수 있는데, 이는 주형의 열전도도가 주형사의 입형, 입도분포, 조성, ramming 정도에 따라 변하기 때문이다. 또한, 사형주물의 응고시는 응고금속과 주형과는 접촉되어 있는 것으로 가정되나, 열전도도가 큰 주형이나 사형주물이라도 chill을 사용하는 경우는 응고가 진행됨에 따라 주형벽과 응고금속사이에는 air gap이 발생되고, 응응금속으로부터의 열은 이 air gap을 통한 대류열전도에 의해 주형으로 전달된다; 이 경우 금속의 응고속도는 이 air gap의 두께정도에 따라 달라지게 되는데, 이 air gap의 두께는 금속의 종류, 주형의 열전도도, 주형의 형상등

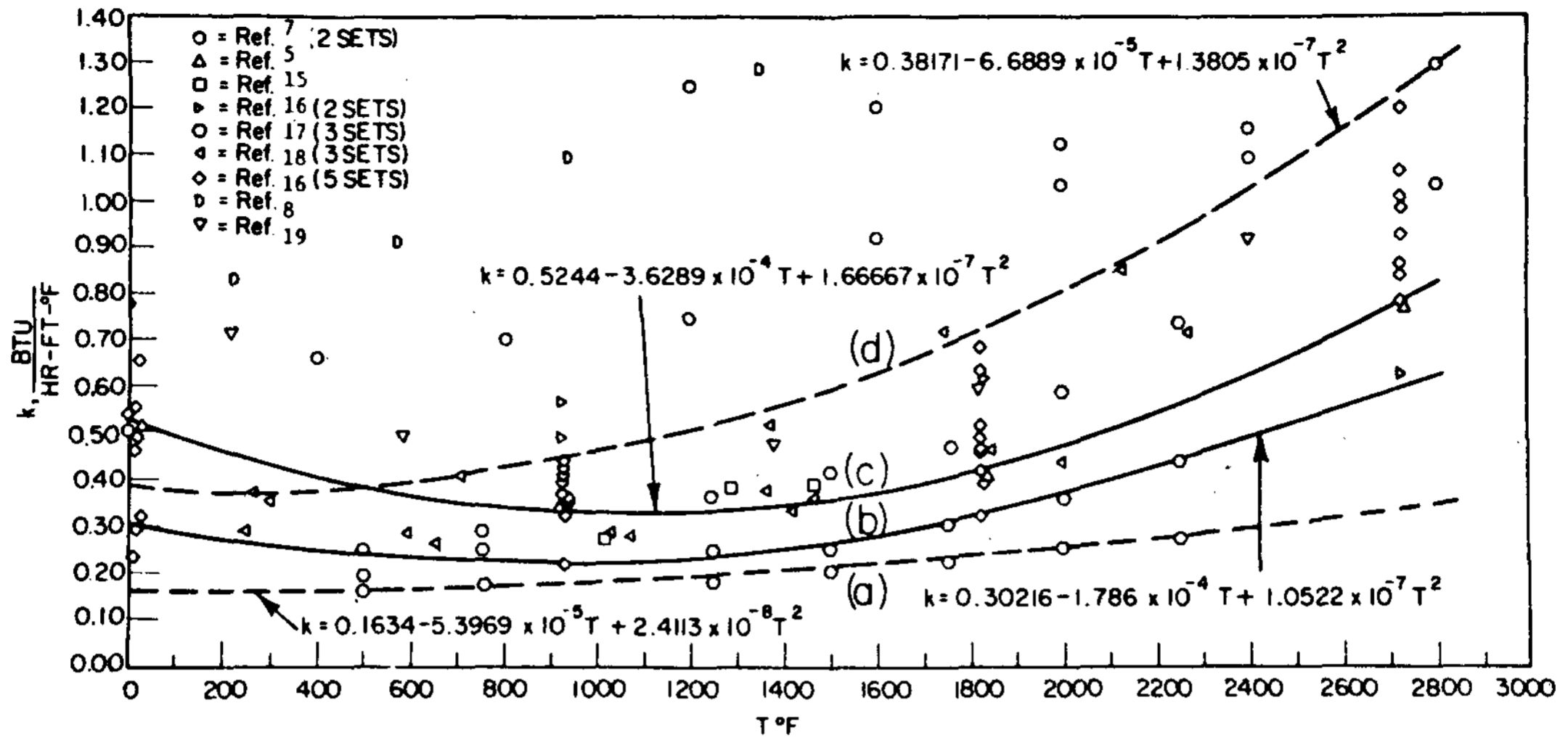


그림 7. 기존 알려진 molding sand의 열전도도 데이터의 집합.

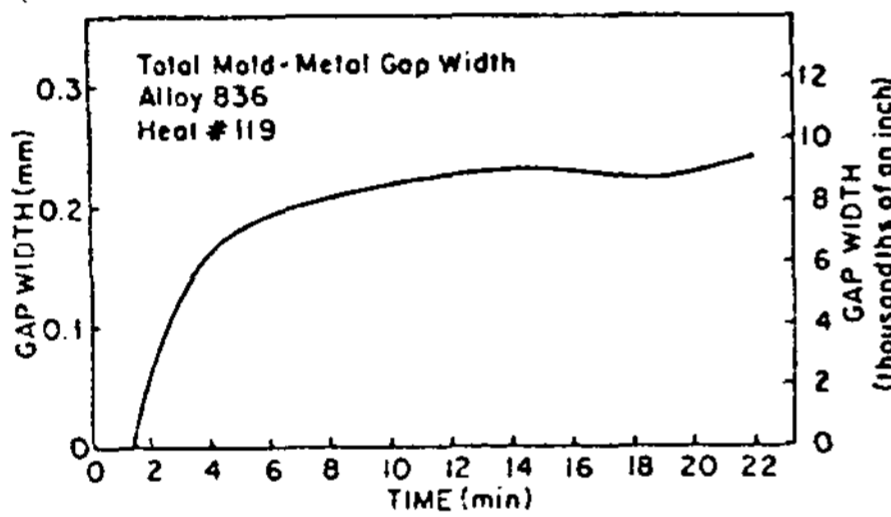


그림 8. 전조형 사형에서 응고하는 원통형 leaded red brass (alloy 836) 주물의 응고시간에 따른 gap formation.

에 따라 다르며, 응고시간에 비례하여 증가된다. 예를 들어, 그림 8은 전조형 사형주형에서 용해 금속으로 leaded red brass(alloy 836)을 사용하여 원통형 주물을 주조했을 때, 응고과정중 주형벽과 주물표면 사이의 air gap의 크기를 나타낸 그래프이다. 여기서 air gap은 응고시간에 따라 증가되며, 열전달 계수 h값도 응고시간에 따라 감소하게 된다.

계수 h값도 응고시간에 따라 감소하게 된다.

그러므로, 정확한 응고곡선의 simulation을 위해서는 온도함수로 표시되는  $\ell, C_p, k$ 의 값과 아울러, air gap 관련하여 정확한 h값이 사용되어야 한다.

한편, 미니 또는 대형컴퓨터로는 personal 컴퓨터로는 가능하지 않은 복잡한 형상의 주물일지라도, 체적 및 modulus를 정확히 구할 수 있다. 즉, 이는 tri-

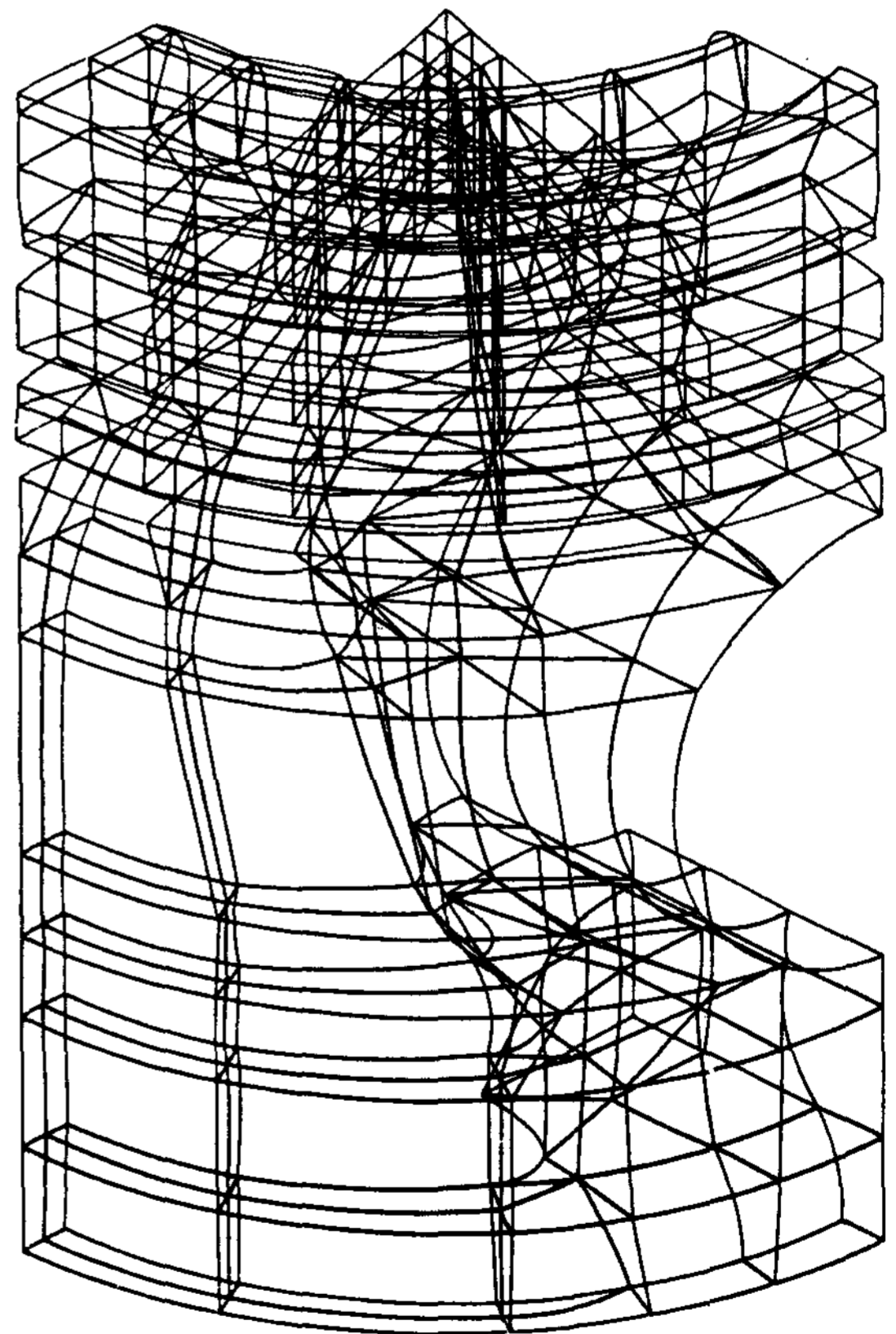


그림 9. 디젤엔진피스톤의 finite element model. angle, rectangle, tetrahedron, hexahedron 등의 소위 finite elements를 이용한 geometrical modeling이나 plate, cube, cylinder, bar 등의 기초적인

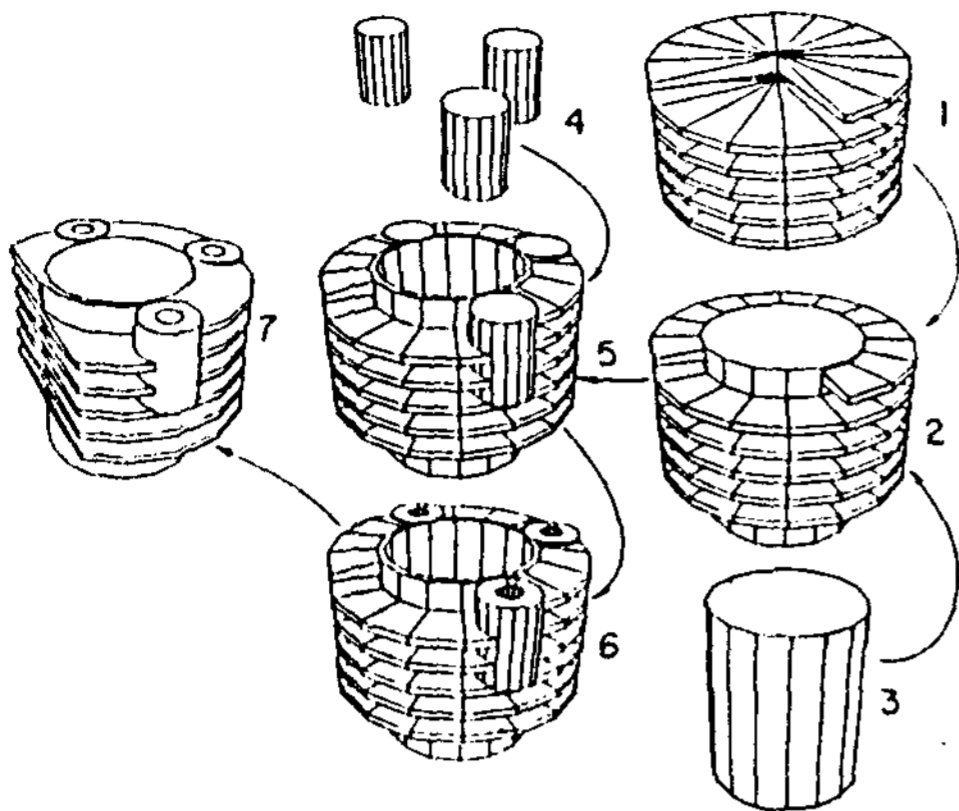


그림 10. plate, cube, cylinder, bar 등의 기본적인 형상을 조립하여 geometrical modeling을 하는 대략적인 그림.

형상을 이용하는 geometrical modeling을 이용하여 가능하다. 그림 9와 10는 각각의 방법을 이용한 geometrical model을 보여 주고 있다.

b) 응고곡선 simulation에 의한 방향성 응고디자인 주물의 방향성 응고를 위한 디자인은 응고곡선 simulation의 반복에 의해 정확히 얻어질 수 있다.

즉, 먼저 주물자체만의 응고곡선을 simulation 하면 수축공 불량의 위치를 예측할 수 있게 되어, 일차로 압탕의 위치와 필요압탕수를 결정할 수 있다 :

이같은 응고곡선 simulation은, 통상, 용탕이 주입온도에서 순식간에 주형의 빈공간에 주입되는 소위 instantaneous mold filling의 가정하에 이루어지나, 전체 주물의 응고시간에 비해 주입시간이 차지하는 비율이 커질 수록 이와같은 가정은 옳지 못하게 되고, 주물의 수축공 불량 위치는 탕구계에 따라 변하게 된다. 예를들어, 그림 11에서는 탕구계 위치 (C-1, C-2, C-3)에 따라 주물내의 온도분포 변화가 있음을 볼 수 있고, 따라 수축공 불량발생 위치의 변화를 예측할 수 있다.

그러나 수축공결함 부위에 압탕의 설치가 부적당하거나 압탕의 급탕거리의 제한 또는 적은 크기의 압탕사용을 위해 칠, 덧살붙임, 발열재 또는 보온재를 사용할 수 있고, 이들의 올바른 사용여부는 응고곡선의 simulation을 통해 확인된다.

위에서 언급된 응고곡선 simulation은 열전달 방

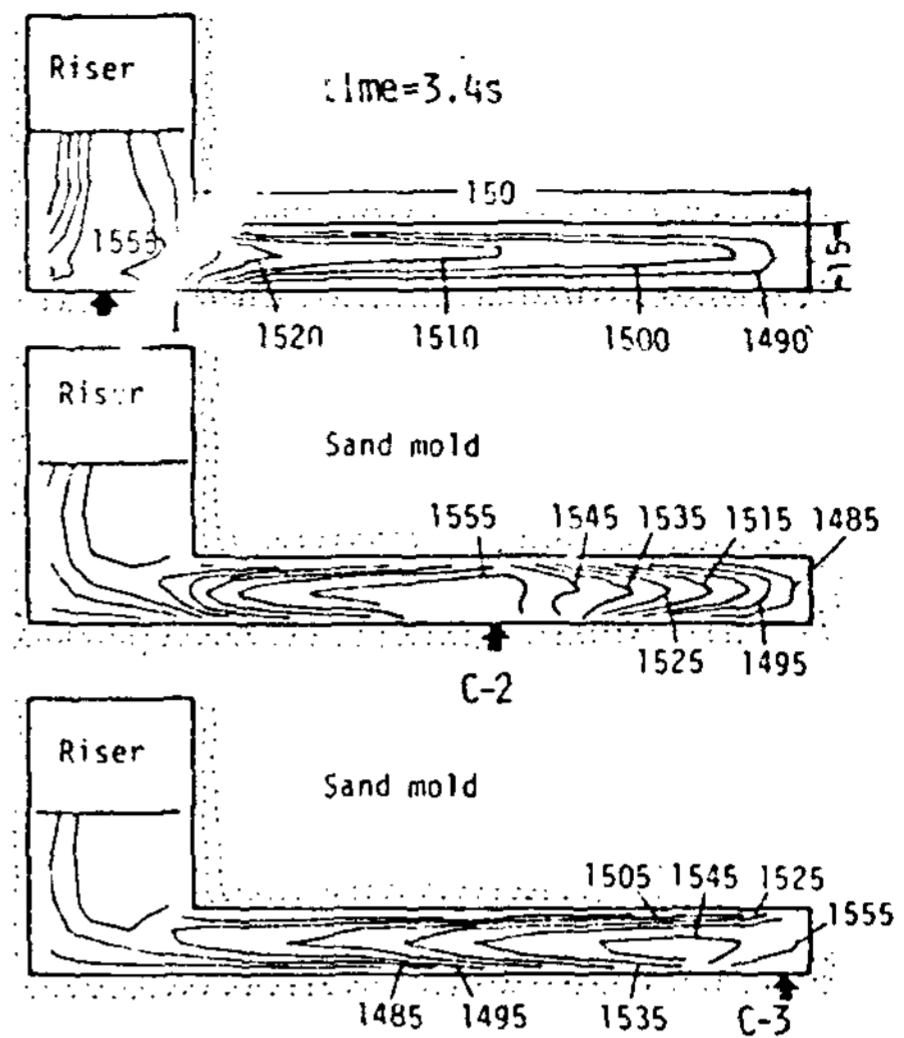


그림 11. 주강 주물에서 탕구의 위치에 따른 응고곡선의 변화

정식을 해결함으로써 얻어졌기 때문에 응고시간에 따른 응고계면의 위치를 알 수 있고 또한 주물의 응고시간도 알 수 있다. 그러나 주물의 수축공결함 부위의 예측을 위해서는 응고시간에 관한 정보는 꼭 필요한 것은 아니고 단지 주형벽으로부터 응고계면의 이동만을 알면 된다. Heine는 section modulus 계산에 의한 주물내의 iso-modulus points를 연결하여 이러한 응고계면의 이동을 simulation하였고, 이를 구조방안에 적용하였다. 그림 13은, gear blank (그림 12)와 그 우측에 소정크기의 압탕이 부착되어 있는 그림으로 상부 그림에서는 압탕의 설치에도 불구하고 gear blank 주물에 2개의 수축공불량이 발생되었으나 압탕목부의 위치를 다소 변경함으로써 주물의 불량이 1개로 줄어들었음을 하부그림에서 볼 수 있다. 이 나머지 1개의 수축공불량을 제거하기 위해 수축공불량 부위에, chill, 압탕설치등을 고려할 수 있다.

이상과 같은 section modulus 계산에 의거한 응고곡선의 simulation은 복잡한 열전달 계산을 다루지 않고, 또한, 여러 thermophysical 데이터가 없이도 훌륭히 구조방안에 적용될 수 있으나, 주물을 몇개의 부위로 나누어 각 부위의 section modulus 계산에 의거하여 주물의 응고순서를 아는 방법에 비해서는 훨씬

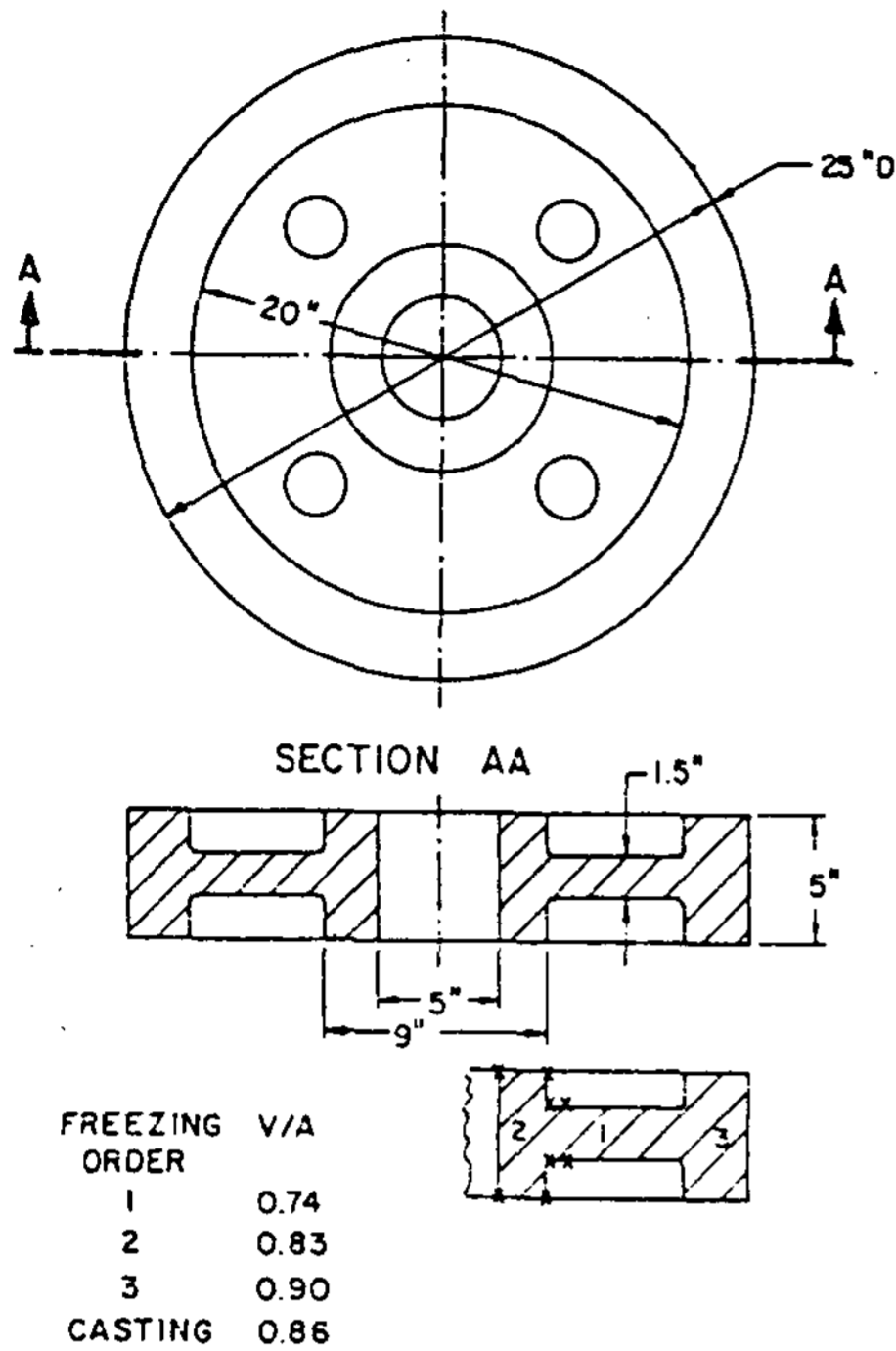


그림 12. Gear blank의 도면.

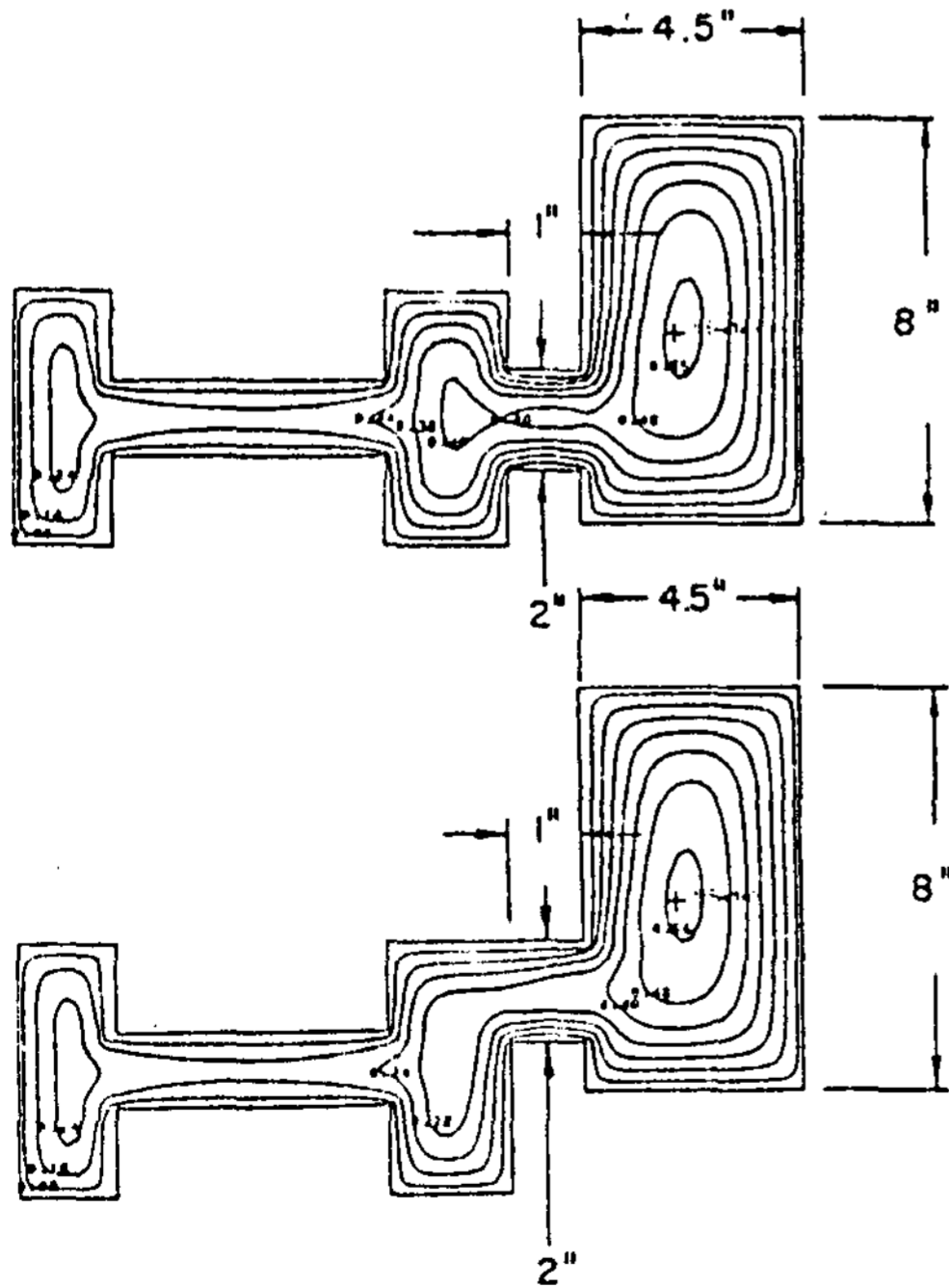


그림 13. 그림 12의 gear blank casting에서 riser contact 위치에 따르는 응고곡선의 변화.

더 많은 계산이 필요해 미니 또는 대형컴퓨터의 사용을 요하고, 또한 주물의 형상, core, fin 등에 따라 기

하학적 modulus와 실제 modulus의 차이가 발생하는 등 section modulus 방법이 가지는 단점을 그대로 가지고 있다.

c) 압탕의 종류, 형상 및 치수결정 및 결과의 보정 미니 또는 대형컴퓨터를 사용한 압탕방안에서도 압탕의 종류 및 형상 결정과 압탕치수 결정은, 일차적으로 personal 컴퓨터에 의한 압탕치수 결정과 같은 방법을 사용할 수 있다. 그러나, 이어 그림 9에서와 같이 압탕까지를 포함한 응고곡선 simulation에 의해 일차적으로 결정된 압탕형상 및 치수의 적정여부를 판단하고 필요한 경우 보정을 할 수 있다. 이와같이 미니 또는 대형컴퓨터를 사용하는 압탕방안에서는 채택된 방법의 정확성으로, 기존 압탕방안에서 안전도를 고려하여 다소 과대하게 결정된 압탕의 크기를 최소로 줄일 수 있다.

참고문헌

1. W.C.Erickson: AFS Int. Cast Metals J., March 1980, P.30
2. R.D.Pehlke, R.E. Marrone, and J.O. Wilkes: Computer simulation of solidification, AFS, Des Plaines, Illinois, 1976
3. A. Jeyarajan and R.D.Pehlke: AFS Trans., 1976, V. 84, P. 647.
4. R.W.Heine and J.J.Vicker: AFS Trans., 1983, V. 89, P. 127
5. I. Ohnaka and T. Fukusako: Solidification simulation of castings by direct finite difference method, to be published.
6. 주조방안 (주물기술총서 4): 한국기계연구소
7. R.D.Pehlke: Casting Engineering & Foundry World, Spring 1983, P.42.
8. H.F.Taylor: AFS Trans., V.66, 1958, P.49.
9. H.D.Brody and R.A.Stoehr: J. of Metals Sept., 1980, P.20.
10. P.K.Das: AFS Trans., V.87, 1979, P.597.