

技術資料

# 주조기술의 컴퓨터 응용에 대한 최근의 동향

김 기 영

## Recent Trends on the Application of Computer to Solidification Processing

K. Y. Kim

### 1. 서 언

대부분의 실용금속은 응고 시 수축하므로 주물에는 이에 따른 응고 수축결함을 방지하기 위하여 압탕 설치가 필요하며, 주입 시의 용탕의 유동 상태에 의하여 표면 결함 및 성분 편석이 직접 영향을 받게 된다. 또한 응고층 내부의 온도차, 응고 수축 등은 주물 변형 및 표면 결함의 원인이 된다. 이러한 모든 결함은 주물 제조 공정 중 율속 단계가 되고 있는 후처리 공정 및 기계가공에 소요되는 경비 및 시간을 더욱 증가시켜 원가 압박의 직접원인이 된다. 더구나 다품종 소량 생산 산업화에의 추이, 복잡 박육 주물의 증가, 납기 단축, 엄격한 원가 절감에의 요청과 같은 최근의 경향을 고려하면 위의 결함을 방지하기 위한 대책 마련의 중요성을 절감하게 된다.

이를 극복하기 위해서는 기술개발요원이 필요하나 중소기업체가 대부분인 주물업계는 극심한 현장 기능 인력난과 함께 인재 부족에 허덕이고 있는 실정이다. 따라서 이를 타개하기 위해서는 인간을 대신 할 수 있는 강력한 도구인 로봇 및 컴퓨터 이용 기술의 적극 개발이 요청되고 있다.

최근 컴퓨터 하드웨어의 급속한 발전과 더불어 종래에는 대형 컴퓨터에서만 가능하였던 기술 계산이 탁상용의 P/C에서 가능해지고 있는 실정이다. 따라서 컴퓨터의 적극 활용이 인력난에 봉착해 있는 주물 업계의 현실 타개에 가장 도움이 될 수 있는 방법의 하나로 크게 기대되고 있다. 본 글에서는 최근의 컴퓨터를 이용한 주조 기술의 동향 - 주물의 수축결함 예측 및 응고해석 시스템 개발, 응고조직의 예측과, 용탕 유동해석, 열응력 해석에 대해서 살펴 보았다.

### 2. 응고수축 결함의 예측

응고수축결함의 예측이 응고해석의 주목적이라 할 수 있다. 수축결함은 응고수축에 의한 체적감소를 보충하기 위한 용탕 보급이 불충분한 경우에 일어난다. 이를 방지하기 위하여 압탕을 설치하여 최종 응고부가 압탕이 되도록 지향성응고를 시켜야만 한다. 응고수축결함은 최종응고부에서 발생하게 되는데 이를 판정하기 위한 방법으로 등액상선온도법, 등고상선온도법, 유동한계고상율법, 온도구배법,  $G/R$  ( $G$ 는 온도구배,  $R$ 은 냉각속도),  $G/\sqrt{R}$ 법 등이 있다<sup>(1)</sup>. 이 중 용탕 유동저항을 고려한  $G/\sqrt{R}$ 법이 응고수축결함 예측에 가장 유효한 것으로 알려져 있다.

이 중  $G/\sqrt{R}$ 법의 물리적 의미를 설명하면 다음과 같다<sup>(2)</sup>. 단순화하기 위해서 합금이 일방향으로 덴드라이트 응고를 하고 있는 경우를 생각한다 (그림 1). 덴드라이트의 선단은 액상선 온도의 위치에, 응고완료부는 고상선온도의 위치에 있다고 생각한다. 응고가 진행함에 따라 응고수축이 일어나고 이것을 보충하기 위해서 용탕은 덴드라이트 사이로 보급된다. 따라서 이 용탕보급 통로의 폭  $D$ 는 덴드라이트 주축 간격에, 그 길이  $L$ 은 고·액 공존구역의 길이에 대응한다.  $D$ ,  $L$ 과 응고조건과의 관계는

$$L \propto 1/G, \quad D \propto R^{-0.5} \quad (1)$$

로 된다. 즉 온도구배가 클수록 용탕보급통로의 길이는 짧아지고, 폭은 냉각속도가 빠를수록 좁아진다.

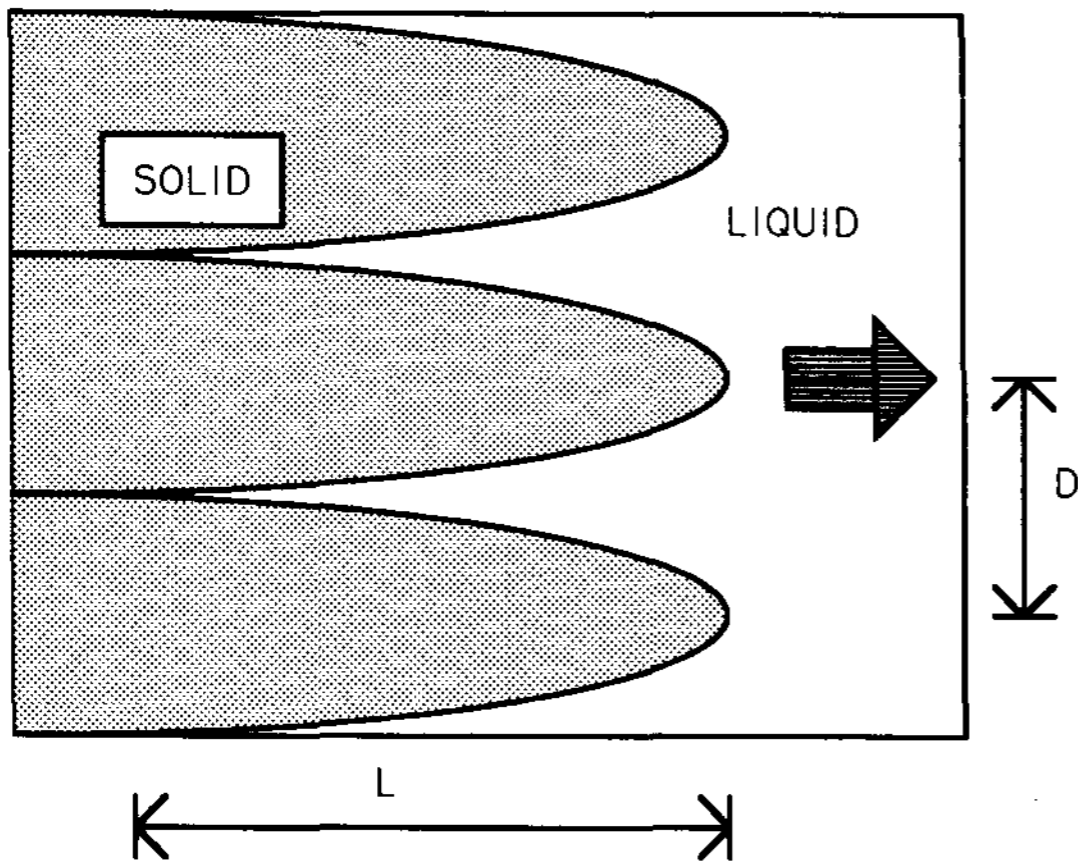


그림 1. 일방향 덴드라이트 응고의 모식도(2).

이와 같은 덴드라이트의 사이를 생각하면, 덴드라이트 뿌리부와 선단부 간의 압력손실( $\Delta P$ )은 유속  $v$ 인 경우의 유체역학의 공식

$$\Delta P \propto Lv^2/D \quad (2)$$

에 의하여 구할 수 있다. 이 압력손실이 수축공이나 기공을 생성하기 위한 부압보다 큰 경우에는 결함이 생긴다. 유속  $v$ 는 응고속도  $V$ 에 비례하고 냉각속도는  $G \cdot V$ 로 표현되므로 (2)식에 (1)식을 대입하면 압력손실의 응고조건 의존성이 다음과 같이 얻어진다.

$$\Delta P \propto R^{1.5}/G^3 \quad (3)$$

간단히 하기 위해서 (3)식의 평방근을 취하여 이것을  $P'$ 라 하면

$$P' \propto R^{0.5}/G, \quad P'' \propto G/R^{0.5} \quad (4)$$

로 되어 결함예측 파라미터  $G/\sqrt{R}$ 과 같은 형태로 된다.

이와 같이 결함의 생성은 응고조직 형성 기구와 밀접한 관계가 있으며 응고해석의 결과를 올바르게 이용하기 위해서는 응고현상의 이해가 선행되어야 한다.

### 3. 응고 해석 시스템의 개발

응고해석 시스템은 현재까지는 복잡형상의 주

물을 2차원 형상으로 근사하여 결함을 예측하는 방법이 주류를 이루어 왔다. 이러한 소프트웨어는 국내에서도 개발되어<sup>(3)</sup> 업체에서 사용되고 있으며, 일부 제품에서는 높은 적중율을 보이고 있다. 그러나 복잡 형상 주물의 정확한 응고 결함 예측을 위해서는 주물 실제 형상을 그대로 입력하여 계산할 수 있는 3차원 응고해석 소프트웨어의 개발이 주물인들에 의하여 강력히 요청되고 있다. 이에 부응하여 최근 각국에서 여러가지 소프트웨어가 개발되어 시판이 시작되고 있는 단계이고 국내에서도 최근 개발이 진행 중이다.

응고해석 소프트웨어는 프리 프로세서, 솔버 및 포스트 프로세서로 구성 되어 있으며 솔버에는 차분법이나 유한요소법이 이용되고 있다.

차분법 이용 소프트웨어에서 현재 가장 난이도가 높은 부분이 주물의 형상을 입력하는 프리 프로세서로써 응고해석의 율속단계가 되고 있다. 이의 개선을 위하여 소프트웨어 개발 팀들은 제품도면으로부터 직접형상을 입력하는 방법을 개발하여 아주 복잡한 형상의 주물이 아닌 경우에는 3차원 좌표 입력이 가능한 상태이지만 자유형상의 곡선의 입력 및 과도한 입력 시간이 아직 해결되어야 할 문제점으로 남아있다<sup>(4)</sup>. 현재 시판되고 있는 3차원 응고해석 소프트웨어를 이용하여 크랭크 샤프트의 해석을 할 경우 데이터 작성 및 입력시간은 계산 시간보다 약 2배 정도 긴 것으로 보고되고 있다<sup>(5)</sup>. 복잡형상일 경우 이들의 소요시간은 더욱 길어지게 될 것이다.

유한요소법 이용 소프트웨어는 자유로운 형상의 입력이 가능하기 때문에 자유곡면의 입력 또는 CAD/CAM용 소프트웨어를 이용한 형상 입력이 가능한 반면 계산 시간이 긴 단점을 가지고 있으며, 어느정도 큰 용량의 컴퓨터가 필요하기 때문에 이것이 주물업체에 소프트웨어를 보급하는 데 있어서 치명적인 약점으로 지적되고 있다.

### 4. 응고 조직의 예측

주물의 응고조직은 셀 및 덴드라이트 등의 미세조직과 이들로 형성되는 결정립으로 이루어져 있으며, 이러한 응고조직은 응고 조건 즉 온도 구배 및 냉각속도에 의하여 결정된다. 따라서 응고해석시에 있어서 매크로적인 온도구배 및 냉각속도를 마이크로적인 응고조직 형성 및 성장 이론(덴드라이트 및 등축정 성장)과 접목시킴으로써 최종

응고 조직 및 성분 편석을 예측하는 방법이 시도되고 있다. 간단한 예를 들면, 덴드라이트의 주축 간격은 냉각속도의  $-1/2$  또는  $-1/3$ 승에, 덴드라이트 2차 압 간격은 냉각속도의  $-1/3$ 승에 비례한다고 보고되고 있으므로 이를 이용하면 주물의 부위별 조직크기의 예측이 가능하며, 또한 조직의 크기와 기계적 성질과의 관계를 이용하면 부위별 기계적 성질의 예측까지 가능하게 된다.

응고조직의 예측은 전열 계산 뿐만 아니라 핵생성, 성장에서부터 덴드라이트 성장 및 용질의 확산 등을 종합적으로 고려하여야 하므로, 현재 Swiss의 EPFL 등에서 활발히 연구되고 있으나 프로그램의 실용화 단계까지는 이르지 못하고 있

다<sup>(6-9)</sup>. 최근에는 계산 결과를 그래픽 처리에 의해서 결정립 형태를 나타내는 방법도 개발되기 시작했다. 그림 2는 시간에 따른 등축정의 성장과정을 나타낸다<sup>(10)</sup>.

### 5. 용탕 유동 행석

용탕의 흐름은 응고와 함께 표면 주름 및 개재물 혼입 등 구조결함에 큰 영향을 끼치므로 구조방안 작성 시 주 고려대상이 되어 왔다. 종래에는 주로 탕구방안에 관한 수력학적인 해석이 행해져 왔으나, 최근에는 열이동을 고려한 유동계산이 주목을 끌고 있다. 탕도 및 주형 공간에서의 용탕의 흐름은 주형에의 열이동, 국부적인 응고층의 발달, 점성의 변화, 주형 내의 가스압의 변화 등을 고려한 해석을 통하여 특히 표면 주름 결함의 예측이 가능하게 되었다. 현재는 주로 두께가 얇은 다이캐스팅이나 금형 주물을 대상으로 하여 실용화가 진전되고 있으며, 3차원 유동해석의 결과도 보고되고 있다.<sup>(11)</sup>. 일본에서는 P/C용 2차원 소프트웨어가 시판되고 있으며, 국내에서는 아직 유동해석 프로그램이 시판되고 있지는 않으나, 일부 대학 및 연구소에서 개발 중이다.

그림 3,4,5는 차분법을 이용하여 자동차 다이캐스트 부품 (자동변속용 트랜스미션케이스, 주입중량 19.6kg)을 해석한 결과<sup>(11)</sup>이다. 그림 3은 탕도를 절단하지 않은 주방상태의 제품이고, 그림 4는 결함 예측도이다. 그림 5는 그림 4의 a부를 확대한 것으로써 실제 가공시에 나타나는 결함의 위치 (밀 그림)를 결함예측도와 비교하면 잘 일치하고 있는것을 알 수 있다.

그림 6,7은 알루미늄제 다이캐스트 부품 내의

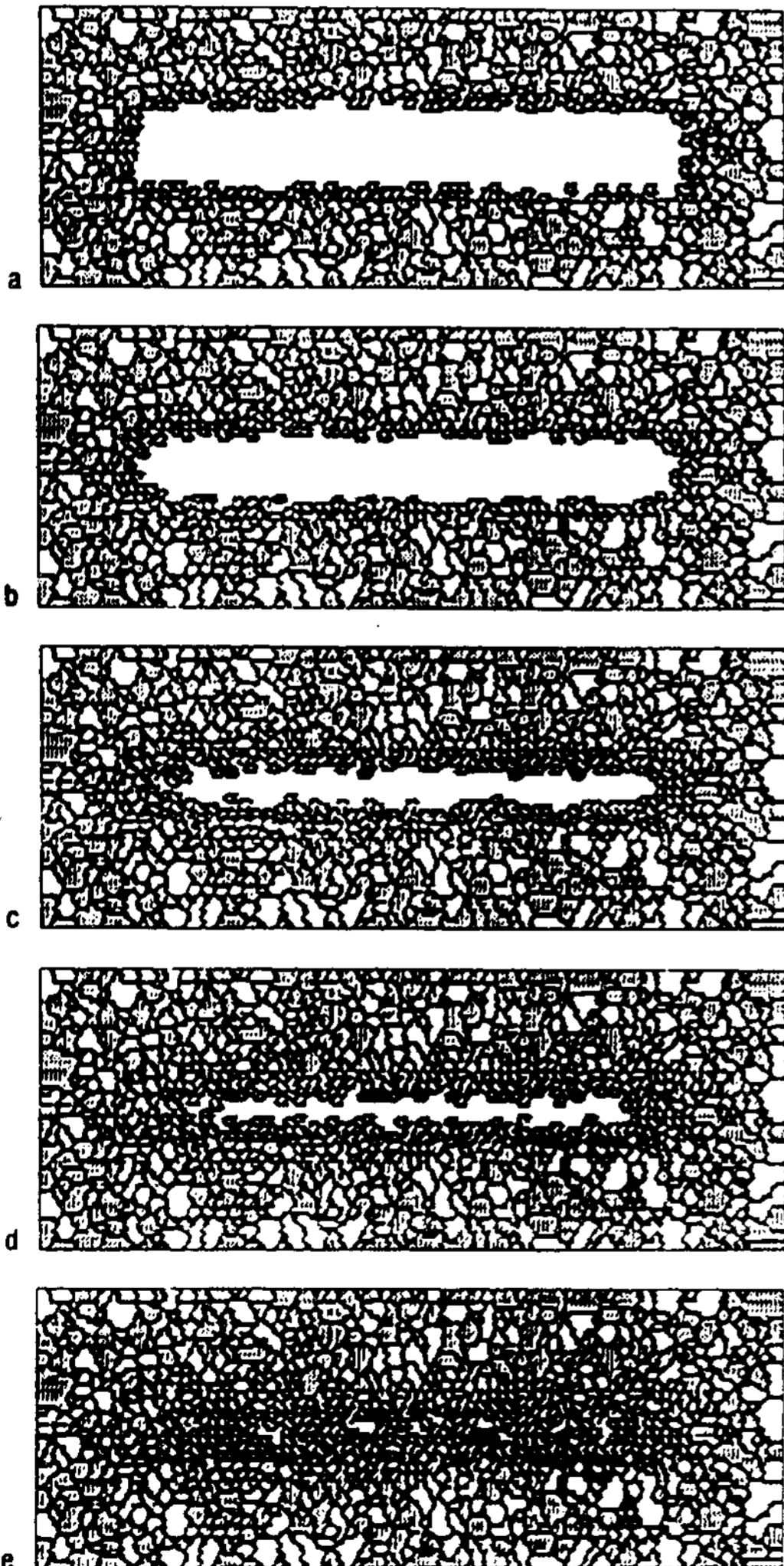


그림 2. 등축정응고의 시뮬레이션 결과<sup>(10)</sup>.

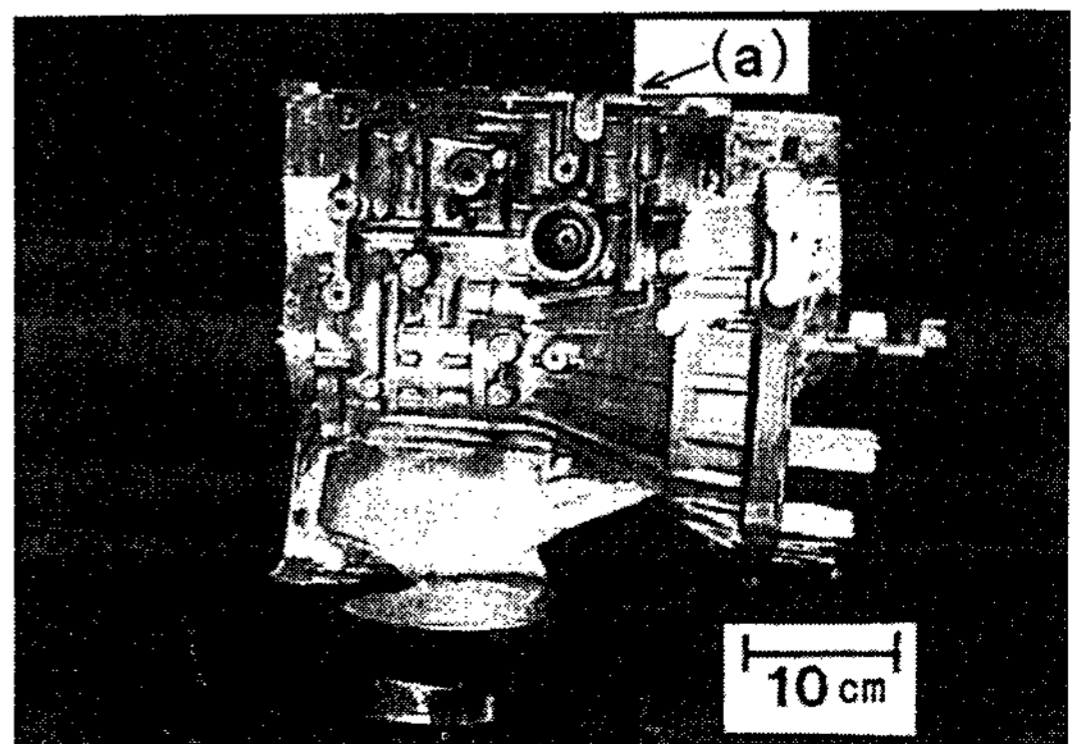


그림 3. 자동변속용 트랜스미션 케이스<sup>(11)</sup>.

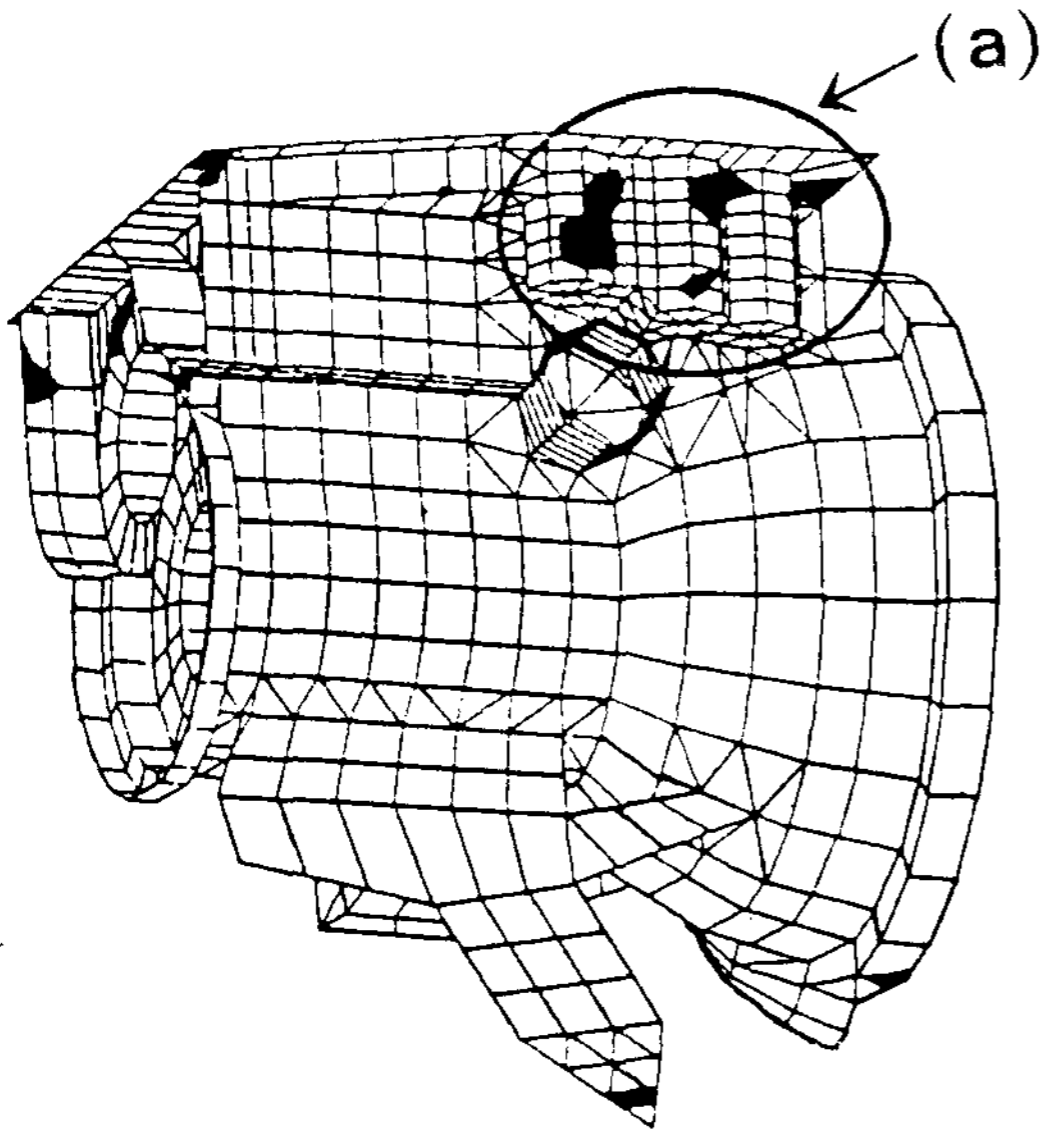


그림 4. 3차원 용탕유동 해석에 의한 결함 발생 위치<sup>(11)</sup>.

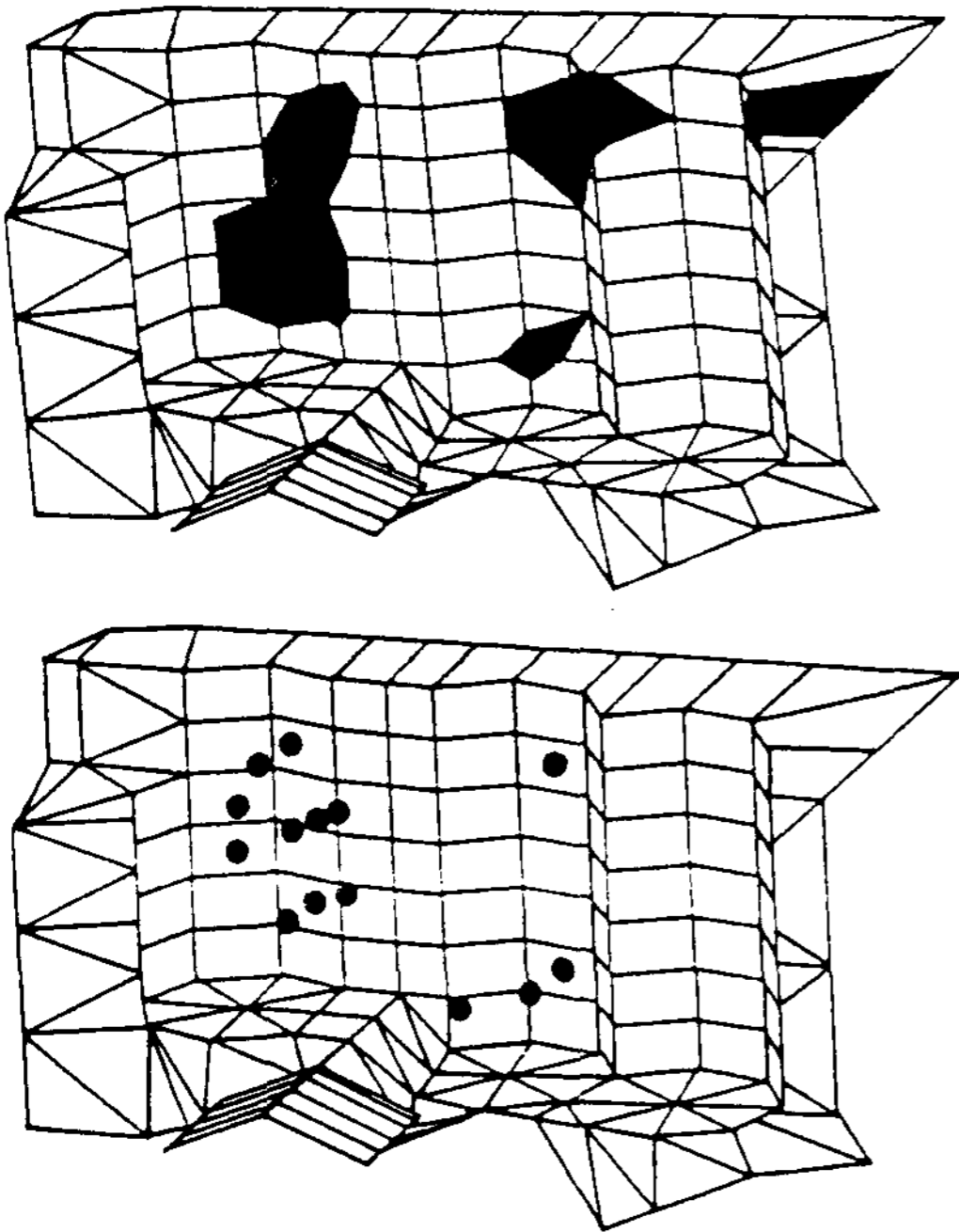


그림 5. 위 : 그림 4a 부의 확대도 (해석 결과)<sup>(11)</sup>  
아래 : 가공 시 나타난 결함의 위치 (관찰 결과).

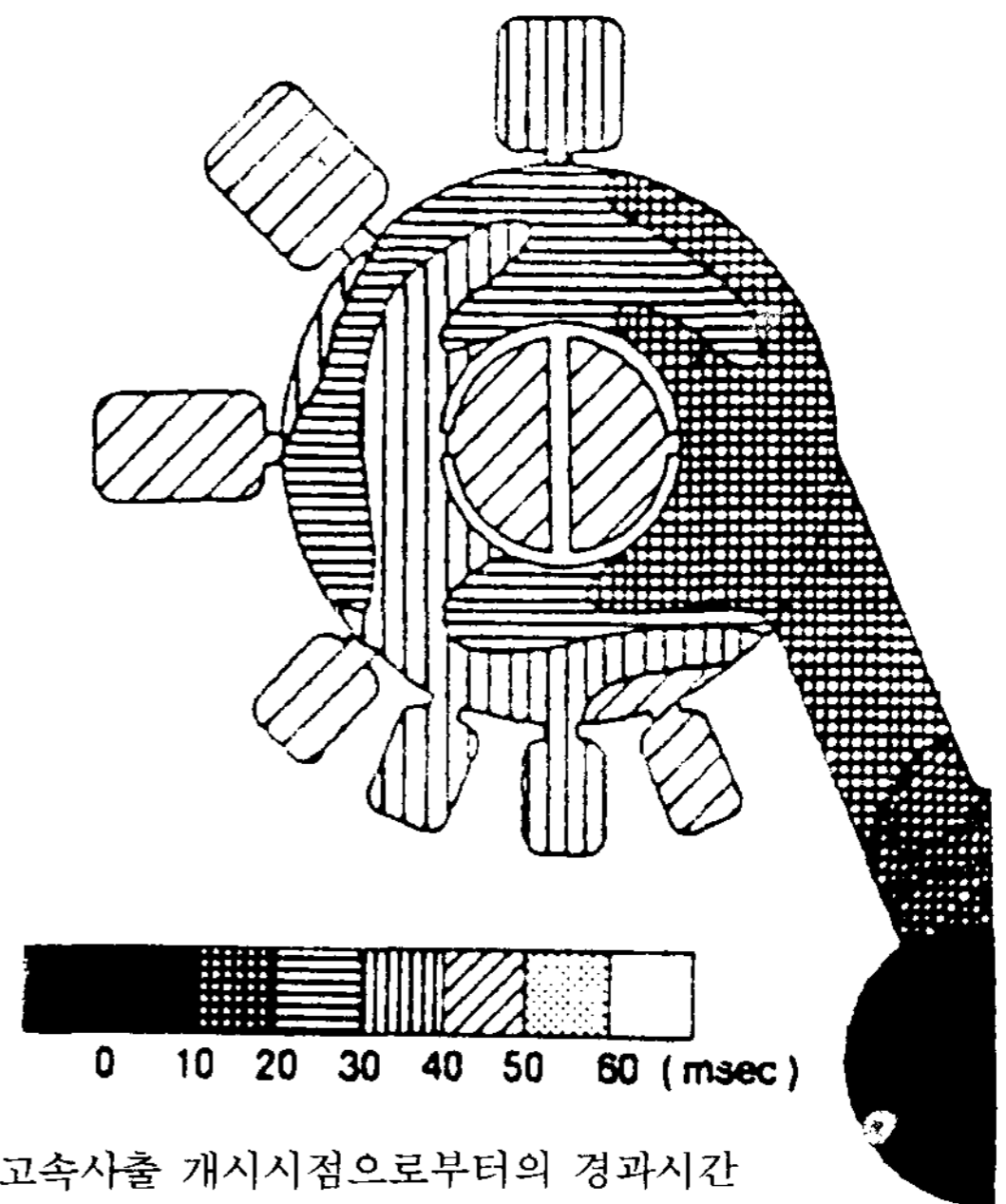
용탕흐름의 실측도와 3차원 근사 모델에 의한 해석 결과<sup>(12)</sup>를 나타낸 것인데 이로 부터 계산에 의

하여 주입 시의 용탕흐름의 예측이 가능한것을 알 수 있다.

### 6. 열응력해석

주물은 응고냉각 시의 체적 수축 및 주물 내부의 온도 차에 기인한 열수축의 차에 의하여 내부 응력이 발생하며, 이 중 일부는 소성 변형으로서 나타나게 된다. 응고온도 부근의 고온에서는 주물은 거의 강도가 없으므로 응고 시 발생하는 응력에 의하여 고온 크랙, 벌징등 각종 결함을 유발하게 된다. 특히 강의 연속주조에서는 이러한 결함을 예측하기 위하여 1970년대부터 응고응력과 응고전열의 연성 계산이 활발하게 이루어져 왔다. 계산 모델도 탄성, 탄소성 및 탄소성과 크립까지 고려한 계산이 이루어지고 있으며<sup>(13~15)</sup> 국내에서도 이에 대한 연구가 진행되어 왔다<sup>(18~20)</sup>.

그러나 일반 주물에 이러한 계산이 적용되기 시작한 것은 극히 최근의 일로서 금형주물을 대상으로 한 해석 결과가 발표되고 있다. 계산 방법은 유한요소법을 개발하는 것 보다는 시판되고 있는 범용 유한요소 해석 프로그램 이용하고 있으며, 사용자 자신이 프로그램을 이용하고 있는 것이 최근의 추세이다. 왜냐하면 비선형 문제의 경우 범



고속사출 개시시점으로부터의 경과시간

그림 6. 실험에 의한 용탕 충전 시간<sup>(12)</sup>.

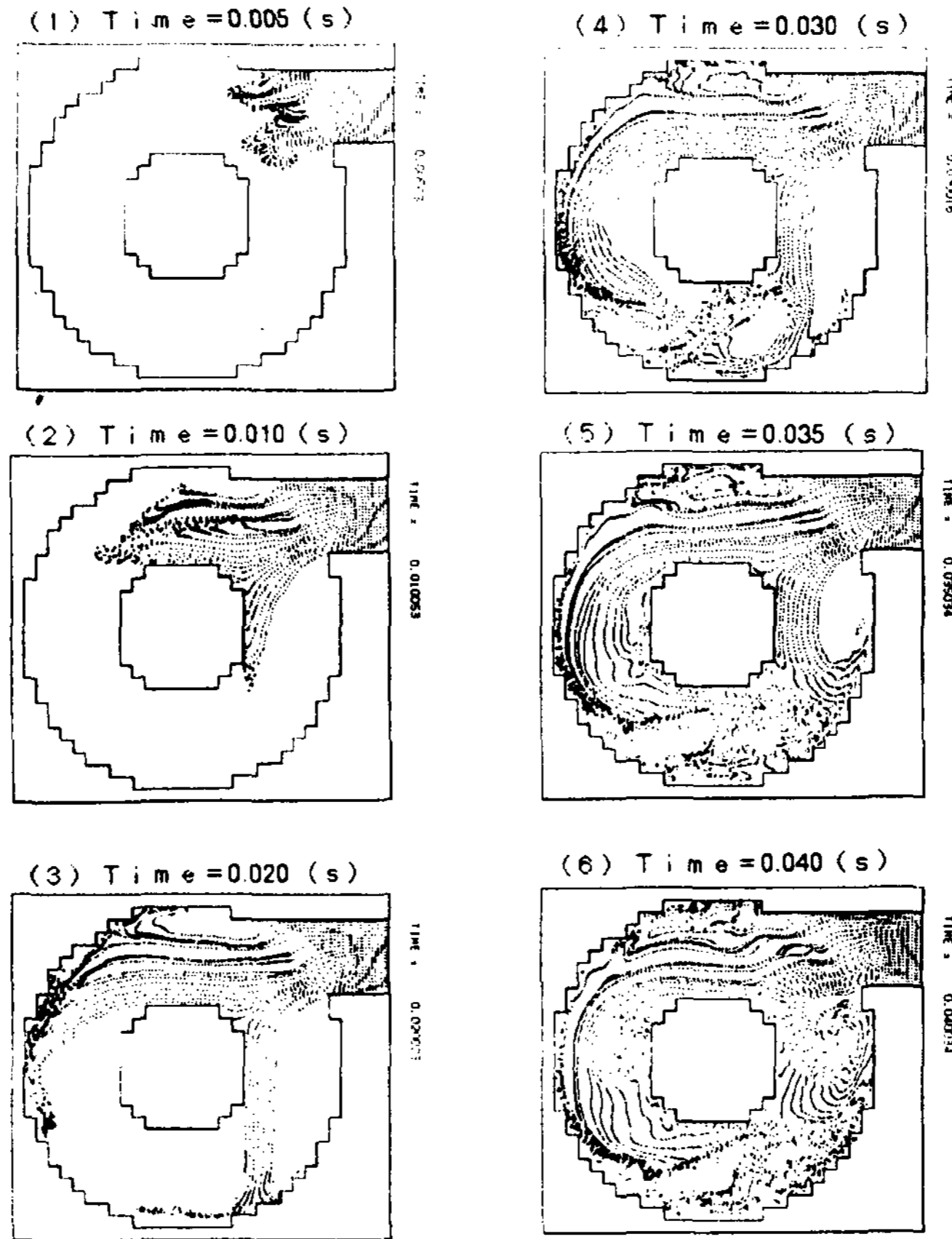


그림 7. 의3차원 모델에 의한 용탕유동 해석 결과<sup>(12)</sup>.

용 소프트웨어를 이용하는 것이 해의 안정성, 정확도가 뛰어나고, 주조 뿐만 아니라 압연 단조가 공동 광범위한 문제 해결에 사용할 수 있기 때문이다.

이러한 프로그램은 거의 미국에서 개발되었으며 그중 ABAQUS, ADINA, NASTRAN, MARC, ANSYS 등이 현재 세계 각국에서 널리 사용되고 있다. 광범위한 문제해결에 사용할 수 있는 반면에 어떤 특정 용도에 사용하기 위해서는 그 방면에 관한 모델의 시뮬레이션에 꽤 많은 시간과 노력을 요한다. 하드웨어로서는 워크스테이션급 이상이 요구되나 최근에는 32bit P/C용도 시판되기 시작하였다. 제품 형상 및 데이터의 작성은 별도의 전용 소프트웨어를 이용하면 자유곡면을 포함하는 복잡형상의 입력이 가능하다.

그림 8은 강의 연속주조 시의 응력 분포의 일례<sup>(21)</sup>이다. 그림 9는 장방형의 단면을 갖는 Al합

금 금형주물의 응고냉각 시 변형을 예측하기 위한 탄소성 계산의 예<sup>(22)</sup>로써 응고 중 응고수축에 의하여 주물 중심을 향하여 변형이 일어난 경우이다. 그림 10은 요즈음 주목을 끌고 있는 스트립캐스팅에서의 주형과 주물의 변형을 동시에 계산한 결과<sup>(23)</sup>이다.

### 7. 결론

전 세계적으로 주물제조에 컴퓨터의 이용은 서언에서 언급한 이유로 인하여 증가일로에 있다. 그러나 컴퓨터는 어디까지나 인간의 명령을 충실히 수행할 수 있는 도구에 지나지 않으므로 컴퓨터 소프트웨어를 효율적으로 이용하기 위해서는 각각의 환경에 적합한 프로그램의 선택 또는 개조가 필요하다. 특히 재료의 고온물성치에 대한 데이터가 매우 적고, 재료간의 열전달 계수 등은 각

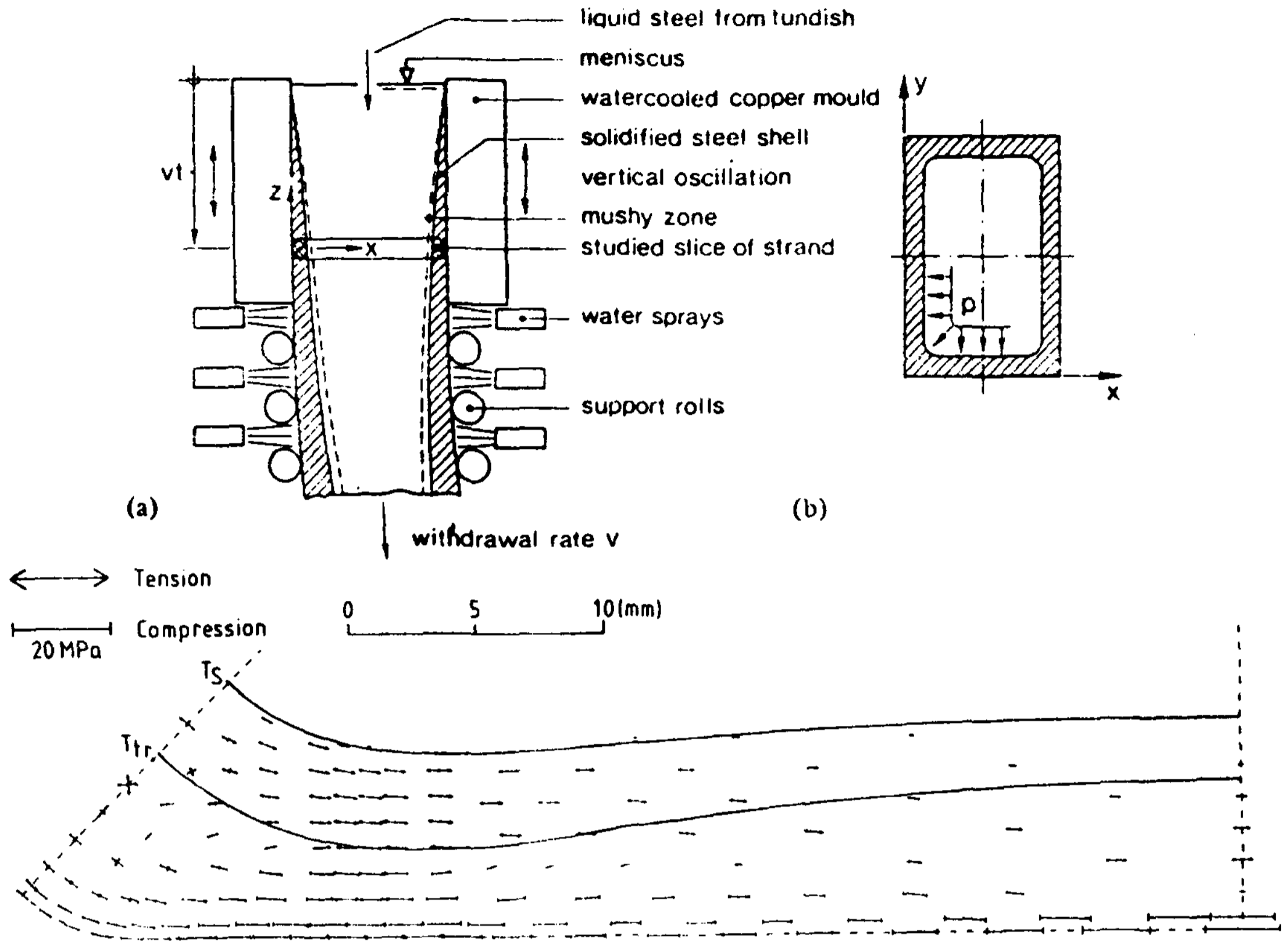


그림 8. 2차원 열응력 해석에 의한 강의 연속주조 시주편 내의 응력 분포<sup>(21)</sup>. (횡단면의 일부분 만을 나타낸다.)

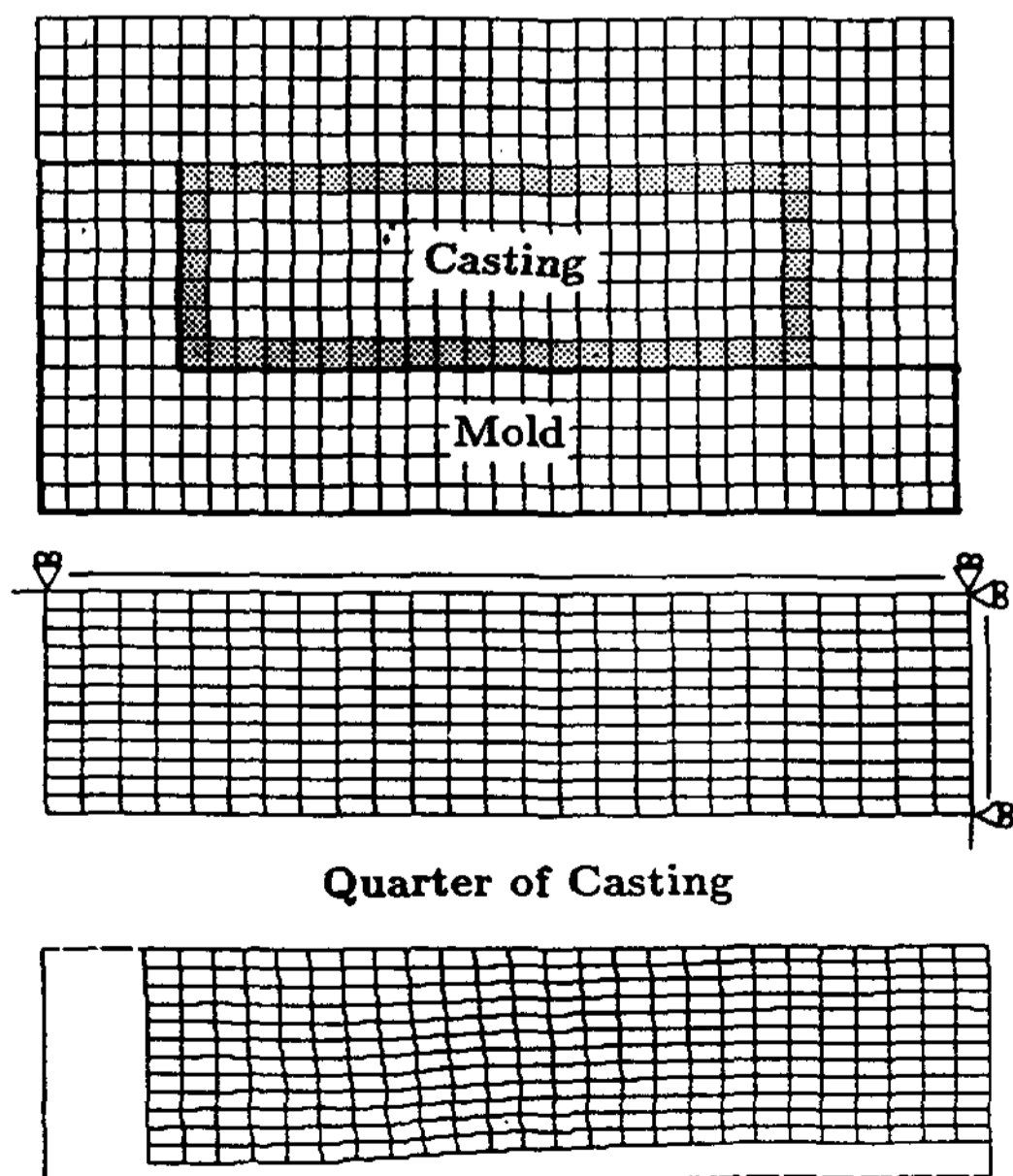


그림 9. Al합금 금형주물의 변형 해석 결과<sup>(22)</sup>.

경우에 따라 변하는 것이므로 컴퓨터 소프트웨어 사용자들은 모델 실험 및 생산 시의 데이터를 축적하여 이의 관리를 철저히 하지 않으면 안된다. 또한 시판 소프트웨어는 사용 중 부족한 점이 항상 발견되므로 이의 효율적 개조를 위해서는, 소프트웨어 개발자 및 동일 소프트웨어 사용자들의 위원회의 구성을 통한 주기적인 상호 정보 교환이 바람직하다.

이와 같이 주조분야에서의 문제해결을 위하여서는 소프트웨어 뿐만아니라 노련한 주조 전문가의 노우하우가 필요하므로 이런 전문가의 대체를 목적으로 인공지능의 분야인 엑스퍼트 시스템이 최근 주목되고 있다. 여기에는 경험법칙, 이론, 기본적 데이터 베이스 및 계측을 포함하는 통합 시스템의 구축이 바람직하다.

참 고 문 헌

(1) I. Ohnaka, Imono, 1988, vol. 60, pp 876-

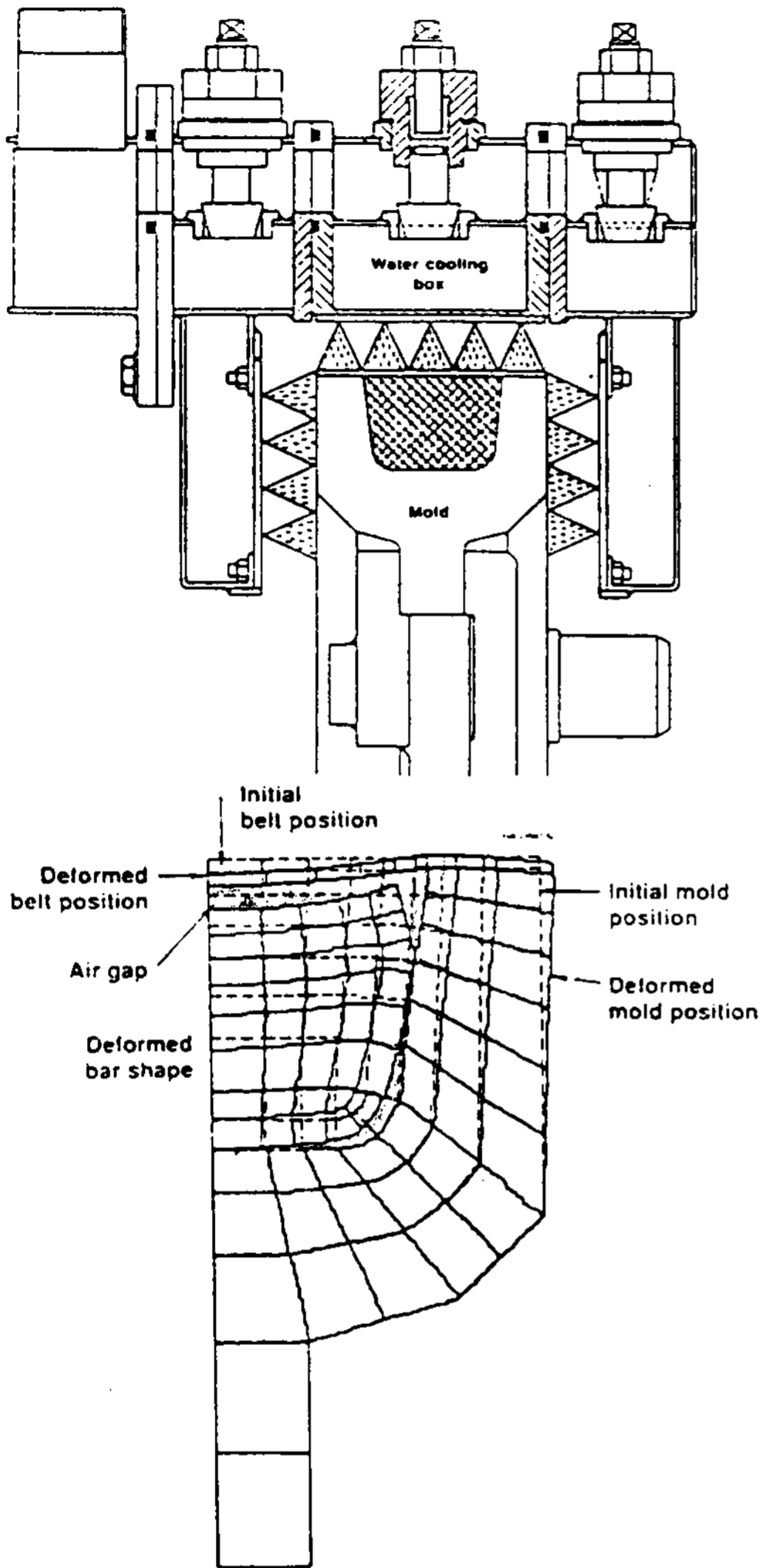


그림 10. 스트립캐스팅에 있어서 주형과 주물의 변형 해석 결과<sup>(23)</sup> (아래 그림에서 검은 부분에 에어갭에 해당한다.)

881.

(2) T. Suzuki, Lecture on the Solidification Analysis and Riser using P/C, Sokeizai Center, 1990.  
 (3) 최정길, 주조, 1990, vol. 10, pp 477-484.  
 (4) C. W. Kim, The 18th Annual Automotive Materials Symposium, 1991.

(5) The Japan Foundrymen's Society, The Collected Examples of Computer Simulation, 1990.  
 (6) W. Oldfield, Trans. of The ASM, 1966, vol. 59, pp 945-961.  
 (7) I. Maxwell and A. Hellawell, Acta Mat., 1975, vol. 23, pp 229-237.  
 (8) Ph. Thevoz et al., Met. Trans. A, 1989, vol. 20A, pp 311-322.  
 (9) M. Rappaz, International Materials Reviews, 1989, vol. 34 (3), pp 93-123.  
 (10) S. G. R. Brown and J. A. Spittle, Cast Metals, 1990, vol. 3 (1), pp 18-22.  
 (11) Y. Ohtsuka et al., 57th World Foundry Congress, Osaka, 1990, No. 9.  
 (12) K. Anzai et al., Imono, 1988, vol. 60 (12), pp 763-769.  
 (13) A. Grill et al., Met. Trans. B, 1976, vol. 7B, pp 177-189.  
 (14) J. E. Kelly et al., Met. Trans. A, 1988, vol. 19A, pp 2589-2602.  
 (15) K. Okamura and H. Kawashima, Tetsu-to-Hagane, 1989, vol. 75, pp 91-98.  
 (16) 이성호, 이동녕, 대한금속학회지, 1988, vol. 26, pp 293-306.  
 (17) 정인범 외, 대한금속학회지, 1988, vol. 26., pp 440-453.  
 (18) R. E. Smelser and O. Richmond, Modeling of Stresses and Welding Processes, 1988.  
 (19) H. Sakuta et al., Imono, 1989, vol. 61, pp 489-494.  
 (20) H. Sakuta et al., Imono, 1989, vol. 61, pp 570-574.  
 (21) J. O. Kristiansson, Journal of Thermal Stress, 1984, vol. 7, pp 209-226.  
 (22) K. Y. Kim et al., 5th Engineering Foundation Conference on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, 1990.  
 (23) J. C. Liu et al., ibid.