

컴퓨터 모사를 응용한 자동차용 주조 부품 개발



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

최재권
(계명대학교 재료공학과)



'95. 2 계명대학교 재료공학과 (학사)
'95-현재 계명대학교 재료공학과 석사과정



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

1. 머릿말

컴퓨터의 발전과 함께 다양한 산업분야에 관련 기술을 응용하는 새로운 기술영역이 획기적으로 증대되고 있다. 컴퓨터 기술을 주조산업에 적용하는 가장 보편화된 기술분야로는 복잡하고 어려운 주조공정을 수행하기 전에 응고와 주조과정을 컴퓨터로 모사(Simulation)하여 응고 후 주조품에 발생할 수도 있는 결함이나 미세조직을 미리 예측함으로써 이를 피할 수 있는 최적의 주조공정과 주조방안을 설계하는 분야라 할 수 있다. 산업 기술의 발달과 함께 생산현장에서 보다 저렴하면서도 고품질의 주조제품이 요구되고 있고, 이를 실현하기 위해서는 컴퓨터 모사기법을 응용한 각 주조공정의 과학적인 설계가 필수적인 신기술로 인식되어지고 있다.

종래의 주조공정과 컴퓨터 응고해석을 사용한 주조공정을 서로 비교하여 도식화하면 그림 1과 같이 요약되어질 수 있다. 컴퓨터를 응용한 새로운 기술은 주조방안을 설계한 다음에 컴퓨터 응고해석을 수행하여 설계된 주조방안의 적부를 검토하여 최적의 설계방안을 확정함으로써 시제품 제작 전에 주조방안의 최적화를 가능하게 하고자 함이다. 또한 주조분야에서 이용되는 컴퓨터 기술은 적절한 주조방안의 설계뿐만 아니라 응고공정 변수에 따른 미세조직의 변화와 미세결함까지도 예측하여 주조품을 생산하는데 결정되어야 하는 공정변수를 과학적으로 제어가 가능하게 하고자

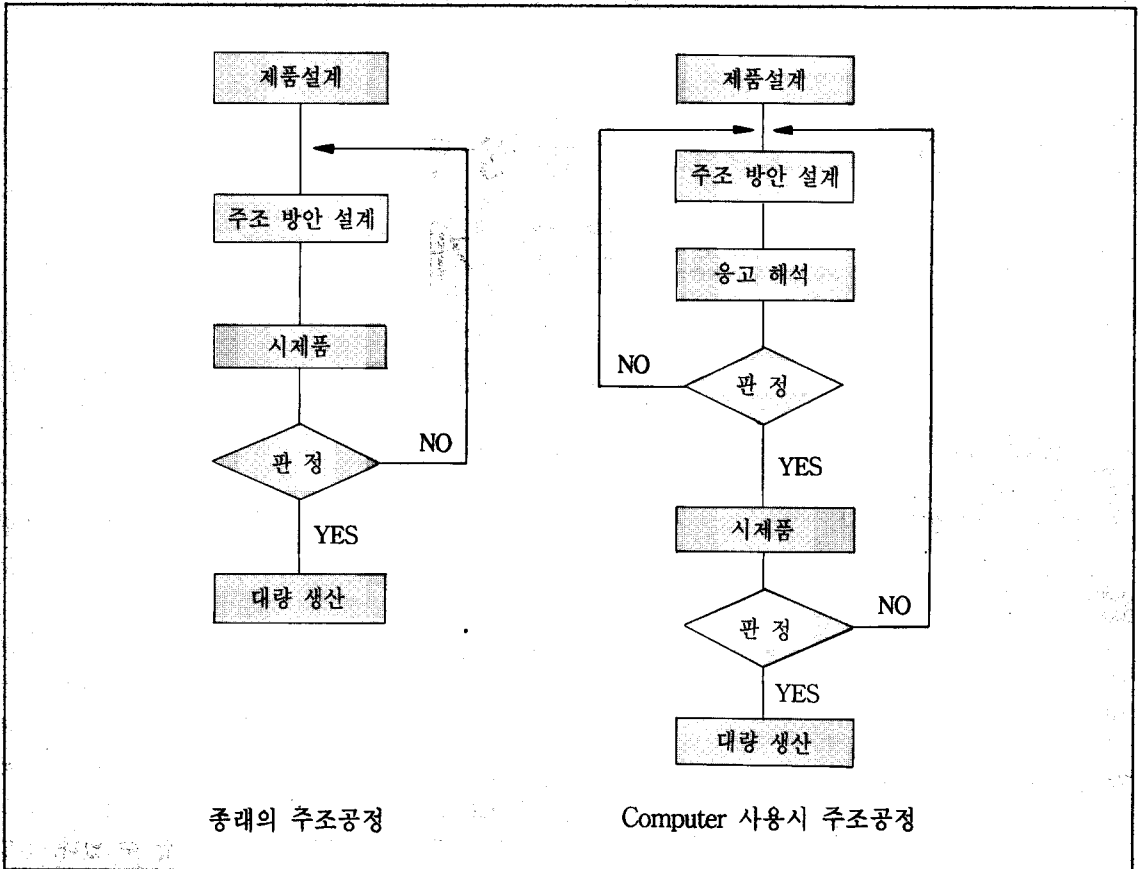


그림1. 종래의 주조공정과 응고해석에 의한 주조공정

함이다. 이러한 목적으로 주조공정에서의 컴퓨터 모사기술이 그 중요성과 적용범위가 보다 광범위하게 확대되고 있다.

국내 주조분야에서도 컴퓨터 모사기술에 대한 관심이 고조됨에 따라 외국의 전문 프로그램이 점차 도입되고 있으며, 국내 프로그램도 자체적으로 개발되고 있다. 이와 같이 주조분야에서 컴퓨터 모사기술의 중요성이 확대되고, 개발된 프로그램도 다양해지고 있기 때문에 주조부품을 제작하는데 사용되는 컴퓨터 모사기술의 기본 원리를 소개하고자 한다. 아울러 컴퓨터 모사기술을 응용하여 주조부품을 개발하는 사례로, 현재 과거치 중간핵심과제로 유성기업과 KIMM 공동으로 개발중인 자동차용 스텔레스 Exhaust Manifold가 개발되고 있는데 여기서 이 부품의 양산을 위해

국내 생산기술연구원에서 개발된 응고해석 프로그램인 EASYCAST와 유동해석 프로그램인 EASY-FAST를 사용하여 적절한 주조방안이 어떻게 설계되고 있는지를 소개하고자 한다.

2. 컴퓨터 모사기술의 적용분야

주조 및 응고 분야에서 컴퓨터 모사 (Computer Simulation) 기법이 다양하게 적용되고 있으며 그 적용범위 또한 지속적으로 확대되고 있다. 가장 많이 활용되는 분야로 용탕의 응고시에 발생하는 응고수축 결함을 예측하는 응고해석 프로그램과 주형에 용탕의 충전과정을 모사하는 유동해석 프로그램이 있으며, 이들 두 분야의 프로그램이 최적 주조방안을 설계하는데 중요한 역할을 하고

있다. 현재 주조분야에서 다양하게 활용되고 있는 컴퓨터 모사기술의 적용분야를 살펴 보면 다음과 같다.

2.1 응고수축 결합 모사 분야

1965년 Henzel [1]에 의해 주강에서의 응고수축 결합이 열전도 수치해석을 통해 시도된 이래 컴퓨터의 Hardware 와 Software의 발전에 의해 응고수축 결합의 모사기법에 많은 진전이 이루어져 왔고, 이와 같은 비약적인 발전이 다음과 같은 요인에 의해 더욱 더 가속화되고 있다 [2,3,4].

- i) Hardware의 진보 : Supercomputer, Mainframe computer, Work station 의 등장으로 메모리 용량이 비약적으로 확장되고, 이에 따라 계산 속도가 빨라짐으로써 대규모 연산이 가능하게 되었다. 또한 PC도 발달되어 복잡한 형상의 제품에 대한 입력처리가 작업자의 책상 위에서 손쉽게 이루어지게 되었다.
- ii) 데이터의 입출력 속도 증대 : 기 개발된 상업용 Software는 컴퓨터나 수치해석에 관한 지식이 없어도 쉽게 데이터를 입출력할 수 있게 되었다. 또한 출력이 칼라 그래픽으로 나타나기 때문에 계산 결과를 쉽게 이해할 수 있다.
- iii) 삼차원 형상 입력 : 복잡한 주조제품의 3차원 형상 입력이 가능하며 CAD화된 설계 도면의 직접 입력이 가능하여 보다 정확한 예측결과를 얻을 수 있다.
- iv) 수축결합의 예측 방법 발전 : 등응고 시간 및 등고상률 곡선법, 온도 구배법, 수정온도 구배법, 유동 Conductance법, 고상률 구배법, 압력 구배법, 급탕거리법, 한계고상률법, 직접 Simulation법 등이 개발되어 보다 정확한 응고수축 결합을 예측할 수 있게 되었다.
- v) 수치해석 방법의 진보 : 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM) 등이 사용되고 있고 일반 주조분야에서는 차분법에 의한 응고해석이 가장 보편화되어 있다. 현재 가

장 보편화된 상업용 프로그램은 차분법을 이용한 Hitachi 사의 HICASS, Osaka 대학의 SOLAN, 독일 Magma사의 MAGMA SOFT, 프랑스의 SIMULAR가 있고 유한 요소법을 사용하는 프로그램으로서는 미국 UES사의 PROCAS가 널리 사용되고 있다. 또한 국내에서는 최근 생기원에서 차분법을 이용하여 EASYCAST 프로그램을 개발하여 현장에 보급하고 있다.

2.2 유동해석 분야

주조공정은 우선 주형에 용탕을 주입하는데 부터 작업이 시작되므로 용탕의 유동을 이해해야만 한다. 유체역학과 컴퓨터의 발달에 힘입어 유동해석의 모사도 상당히 발전하였다. 유동해석의 목적은 응고해석에 사용될 주형의 초기온도 분포 예측, Mis-run, 모래 및 슬래그 등 개재물 혼입, 공기 및 가스의 혼입 등과 같이 유동에 의해 야기되는 결합의 예측에 있다. 유동해석은 미국의 Los Alamo 국립연구소를 중심으로 개발된 MAC, SMAC, SOLA-VOF 등의 유동해석 프로그램이 잘 알려져 있다. 현재 많이 사용되는 유동해석 전용 프로그램으로는 미국의 Flow Science사의 FLOW3D, 일본 동북대학의 STEFAN, 영국의 ASTEC 등이 있다. 적절한 주조방안을 위해서는 응고해석과 함께 유동해석이 병행되어야 하므로 응고해석과 유동해석을 위하여 개발된 프로그램은 대부분 응고해석과 유동해석을 함께 사용할 수 있게 확장되어 있다. 국내에서도 EASYCAST와 함께 유동해석을 위한 EASYFAST가 개발되어 있다.

2.3 주조 결합 및 조직예측 분야

이미 소개한 응고 및 유동해석 외에도 열전달을 기초로 편석, 열응력, 응고조직예측 및 기계적 성질 등에 대한 모사가 가능하며 가스 및 기공이나 비금속 개재물에 의한 예측에도 적용이 확장되고 있다. 다음과 같은 결합을 예측할 목적으로

컴퓨터 프로그램이 사용되고 있다.

- i) 편석 및 응고결함 : 열전달을 기초로 하여 온도 구배 및 냉각속도를 고려하고 수치상 간의 액상 유동을 이용하여 거시편석, 미세공동 등을 예측할 수 있고, 특히 초내열합금의 일방향응고 과정에서 합금성분의 편석과 액상유동에 의해 발생하는 Freckle 결함 등 예측까지도 가능하므로 주조 제품의 품질 향상을 위해 컴퓨터 모사가 중요하게 사용된다. 이러한 초내열합금의 일방향응고에서 Freckle 결함의 예측은 그림 2(a)에서와 같이 온도구배, 응고속도, Local solidification time의 함수인 GAP(gradient acceleration parameter)를 사용하여 예측할 수 있고 미세기공은 그림 2(b)에서와 같이 고상에서 온도구배와 Local solidification time 함수인 Xue 함수를 사용하여 예측 할 수 있다 [5]. 이와같이 주조에서 결함의 예측은 정밀도와 안정성이 요구되는 터빈 블레이드와 같은 항공부품의 개발에 필수적이다.
- ii) 열응력 및 변형 : 용탕이 응고되는 과정에서 부위별 냉각속도 차이에 의한 내부응력, 주형의

변형 및 주형과의 반응, 응고 및 고상 내의 상변태에 의한 체적의 변화 등에 의한 변형과 Tearing을 예측하여 방지할 수 있다. 열응력을 위한 상용화 프로그램으로 ANSYS, MARC 등이 있고, 기계적인 측면에서 열전달 방정식에 의존한 프로그램으로는 주조시 상변태, 유동시의 응고, 주형의 영향 등이 고려되는 프로그램의 개발이 요구된다.

- iii) 응고조직 해석 : 주조품은 위치와 두께 등의 차이에 따라 냉각속도가 달라지므로 서로 다른 금속학적 미세조직을 가지게 된다. 이러한 미세조직의 차이를 예측하기 위하여 열전달 이론을 기초로 핵생성, 수치상의 성장이론 등을 응용하여 응고조직의 2차원 해석이 실시되고 있다[6]. 금속의 미세조직의 차이에 의하여 주조품의 기계적 성질이 달라지게 되므로 컴퓨터 해석을 통한 예측이 상당히 중요한 분야이다. 보다 확실한 미세조직의 예측을 위해서는 주조공정상 주형의 종류 및 형태, 불균일 핵생성, 용탕의 충전 상태 등 여러가지 조건이 함께 고려되는 컴퓨터 모사에 관한 연구가 계속되고 있다.

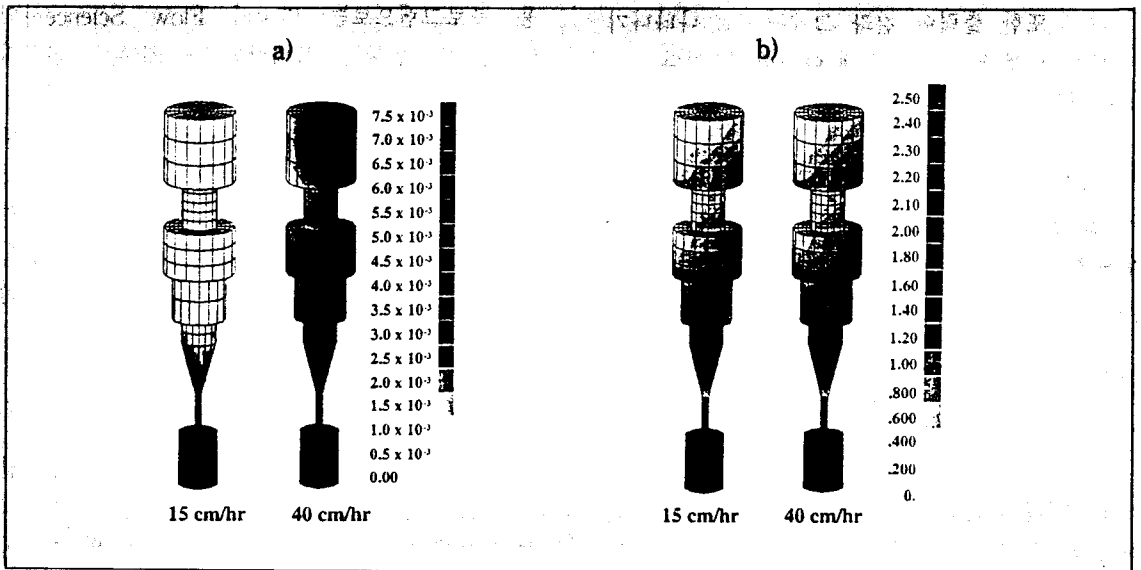


그림 2. Ni 기 초내열합금에서 일방향응고시 응고속도에 따른 (a) freckle 결함 예측을 위한 GAP 분포도. (b) 미세고공 예측을 위한 Xue parameter 분포도 [5]

3. 실제 응용사례 (Exhaust Manifold의 응고 및 유동해석)

자동차용 Exhaust Manifold를 경량화 및 박육화를 위하여 기존의 주철제 부품을 스텐레스 소재로 대체하기 위한 연구가 유성기업과 본 연구원에 의해, 이에 관련된 컴퓨터 모사는 본 연구원과 계명대에 의해 연구가 진행되고 있다. 새로이 개발되는 Exhaust Manifold는 주조품의 두께를 줄이기 위해 진공흡입압을 이용한 반응력주조라고 불리는 새로운 주조방안을 이용하고 있다. 이 제품 개발을 위하여 EASYCAST 프로그램을 이용한 응고해석과 EASYFAST 프로그램을 이용한 유동해석을 실시하여 적절한 주조방안을 설계하여 주조작업을 수행하고 있다.

본 절에서는 앞에서 소개한 컴퓨터 모사기법이 실제로 어떻게 적용되는지 살펴보기 위하여 시제품 제작에 사용된 응고해석과 유동해석에 관한

예를 소개하고자 한다. 응고해석은 새로운 제품의 적절한 주조방안 설정을 위해 우선 기존의 주철제 Exhaust Manifold의 주조방안에서 각 압탕의 역할을 분석한 결과이고, 유동해석은 현재 개발중인 스텐레스제의 Exhaust Manifold에서 (그림 5 시제품 참조) 용탕유입 과정을 통해 현재 설정된 주조방안의 적정성을 분석한 결과이다.

3.1 응고해석

기존에 생산되고 있는 Exhaust Manifold는 구상흑연 주철(GCD 40)로 만들어지고 있다. 주조방안으로는 하나의 주형에 2개의 Exhaust Manifold가 제작되어 중심축을 기준으로 대칭을 이루고 있다. 따라서 3차원 형상을 모델링할 때 하나의 Exhaust Manifold만 취하여 중심선을 단열면으로 취급할 수 있다. 이러한 주조방안 및 제품의 3차원 형상은 그림 3과 같고, 이에 따라 계산을

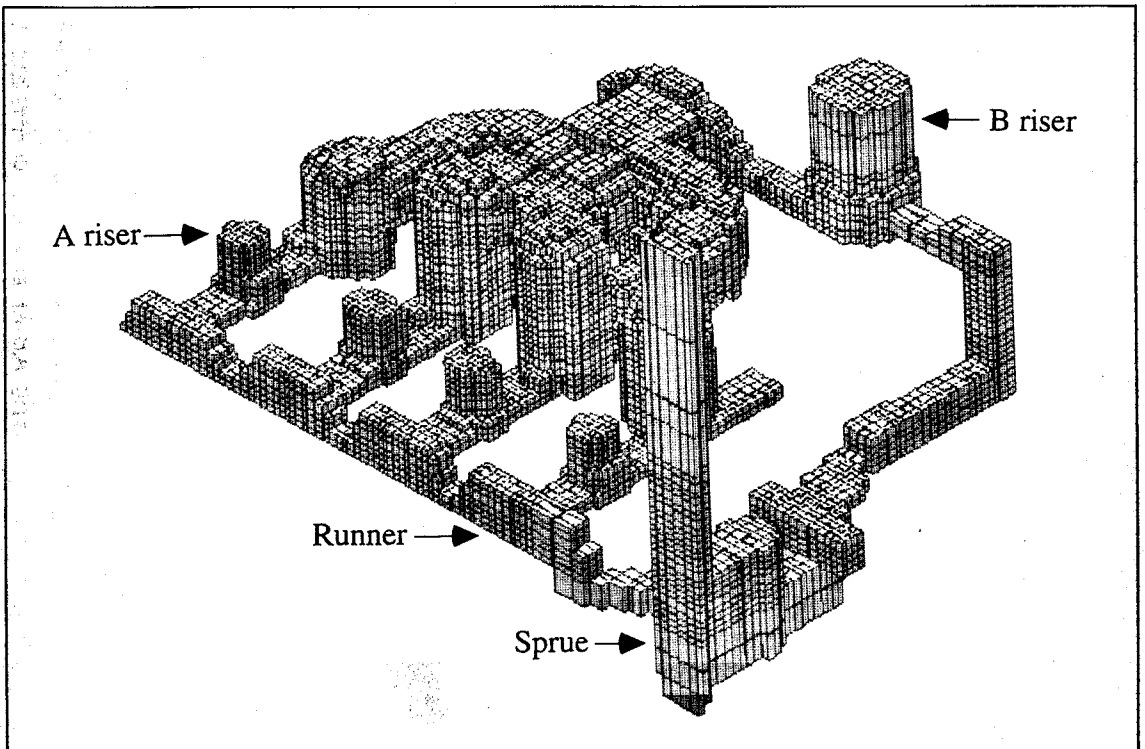


그림 3. 상용화된 주철제 exhaust manifold의 주조방안에서 3차원 형상입력

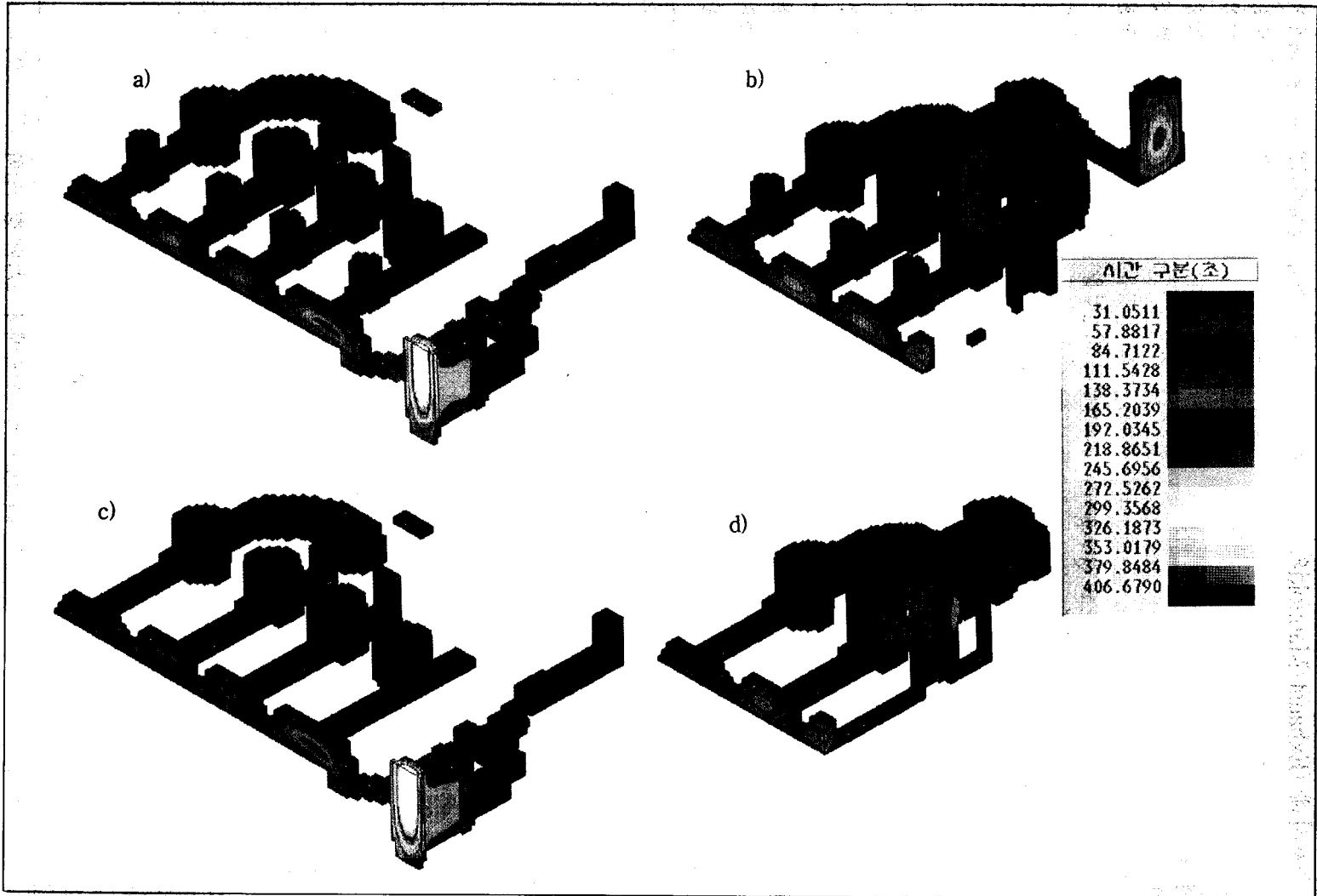


그림 4. 주철제 exhaust manifold에서 압탕 A,B 가 있을경우 a) 수평절단 및 b) 수직절단면에서, 압탕 A,B 가 없을 경우 c) 수평절단 및 d) 수직절단 면에서 응고해석결과.

위한 요소수는 x축 72, y축 34, z축 54개 합계 132,192개로 이루어져 있다. 여기서 압탕은 4개의 튜브 부분에 4개(B riser)와 집진부에 1개 (A riser)가 설치되어 있다. 이 두 부분의 압탕의 역할을 분석하여 주조방안의 타당성을 검토하고 현재 개발중인 스텐레스 Exhaust Manifold의 적절한 주조방안을 위해 A 압탕과 B 압탕이 있을 경우와 없을 경우로 나누어 응고해석을 실시하였다. 응고수축 결합의 추정 방법으로는 응고가 완료되는 시간의 분포도를 이해할 수 있는 등응고시간 법을 사용하였는데, 응고가 가장 늦은 부위가 제품의 내부에 생기게 되면 이곳에 수축결합이 생길 수 있다고 추정된다. 여기서 응고는 고상율이 0.7일때 액상의 유동이 불가능하다는 실험적인 결과로부터 한계 고상율 0.7을 사용하였다. 응고수축 결합 해석 결과 압탕 A와 B가 모두 있을 경우 형상이 입력된 전체적인 등응고시간 분포도에서는 제품 표면의 전체적인 등응고시간 분포도만 확인할 수 있고 내부 수축결합을 예측할 수 없었다. 따라서 제품 내부의 결합 존재를 파악하기 위해서 수평 및 수직 절단면 설정하여 그림 4(a,b)에서와 같이 부분별로 관찰하였다. 이러한 작업의 결과로 이 부품에서는 제품 내부에서 응고가 가장 늦게 일어나는 폐곡선이 발견되지 않았다. 그러나 압탕 A와 B가 모두 없을 경우에는, 그림 4(c,d)에서 보는 것과 같이 수평 절단면에서는 제품내부에 폐곡선이 관찰되지 않았으나, 수직 절단면에서는 제품 내부에 폐곡선이 발생하는 것으로 관찰되었다. 따라서 압탕 A와 B는 각각의 역할을 하고 있음을 알 수 있고 본 주물에서 압탕 및 주조방안이 잘 설정 되었음을 알 수 있다. 이와 같이 응고 수축 결합의 예측만으로도 적절한 주조방안을 위한 많은 정보를 얻을 수 있다.

이와 같이 기존 제품의 주조 방안을 분석하여 개발중인 Exhaust Manifold를 위한 개략적인 주조방안을 마련하였고 최적의 주조방안을 위해 계속적인 응고해석을 통해 적절한 주조방안을 설정하였다. 설정된 주조방안에서 다음과 같이 유동해석을 통하여 주조방안의 적정함을 분석하였다.

3.2 유동해석

현재 개발중인 스텐레스계 Exhaust Manifold의 유동해석에 있어서 3차원 형상을 모델링할때 x,y, z 3축 공히 등분할을 하였다. 개발되고 있는 실제 시제품은 그림 5에서 보여지는 것과 같고, 이와 같은 제품의 모델링을 위한 요소수는 그림 6의 3차원 컴퓨터 형상에서 보는 것과 같이 x축 69, y축 38, z 축 35개로 합계 91,770개로 이루어져 있다. 용탕이 Sprue와 Runner를 통하여 3초내에 주입이 완료되는 조건에서 S형의 Runner를 배기구 및 흡기구 쪽으로 설치하고 반대쪽에 압탕을 설치하였을 경우 등 여러 주조방안에서 유동해석을 실시하였다.

여러가지 주조방안에 의한 유동해석 결과 그림 6에서 보는 것과 같이 S형의 Runner를 배기구 쪽으로 설치하고 흡입구 쪽에 4개의 Riser를 설치하였을 경우, 그림 7에서 보듯이 배기구 쪽에서 흡입구 쪽으로 조용하고 순차적인 용탕의 충전이 이루어져 가장 적절히 유입됨을 예상할 수 있다. 또한 제품 각 부위의 온도분포가 거의 균일하므로 제품 전체에 걸쳐 균일한 기계적 성질을 기대할 수 있다.

위와 같이 응고해석과 유동해석을 통하여 현재 개발 중인 Exhaust Manifold를 위한 적절한 주조방안을 설정하고 있으며 실제 시제품 주입을 통해 설정된 주조방안의 적정성을 검토, 교정하여 최적의 주조방안을 위한 연구가 수행 중에 있다.

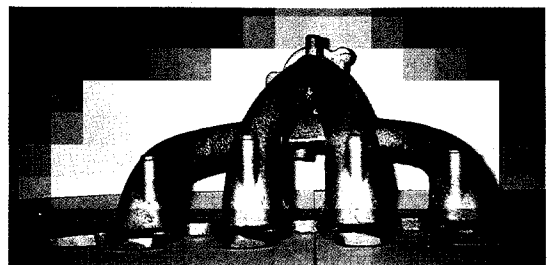


그림 5. 현재 개발중인 스텐레스 소재 exhaust manifold 시제품

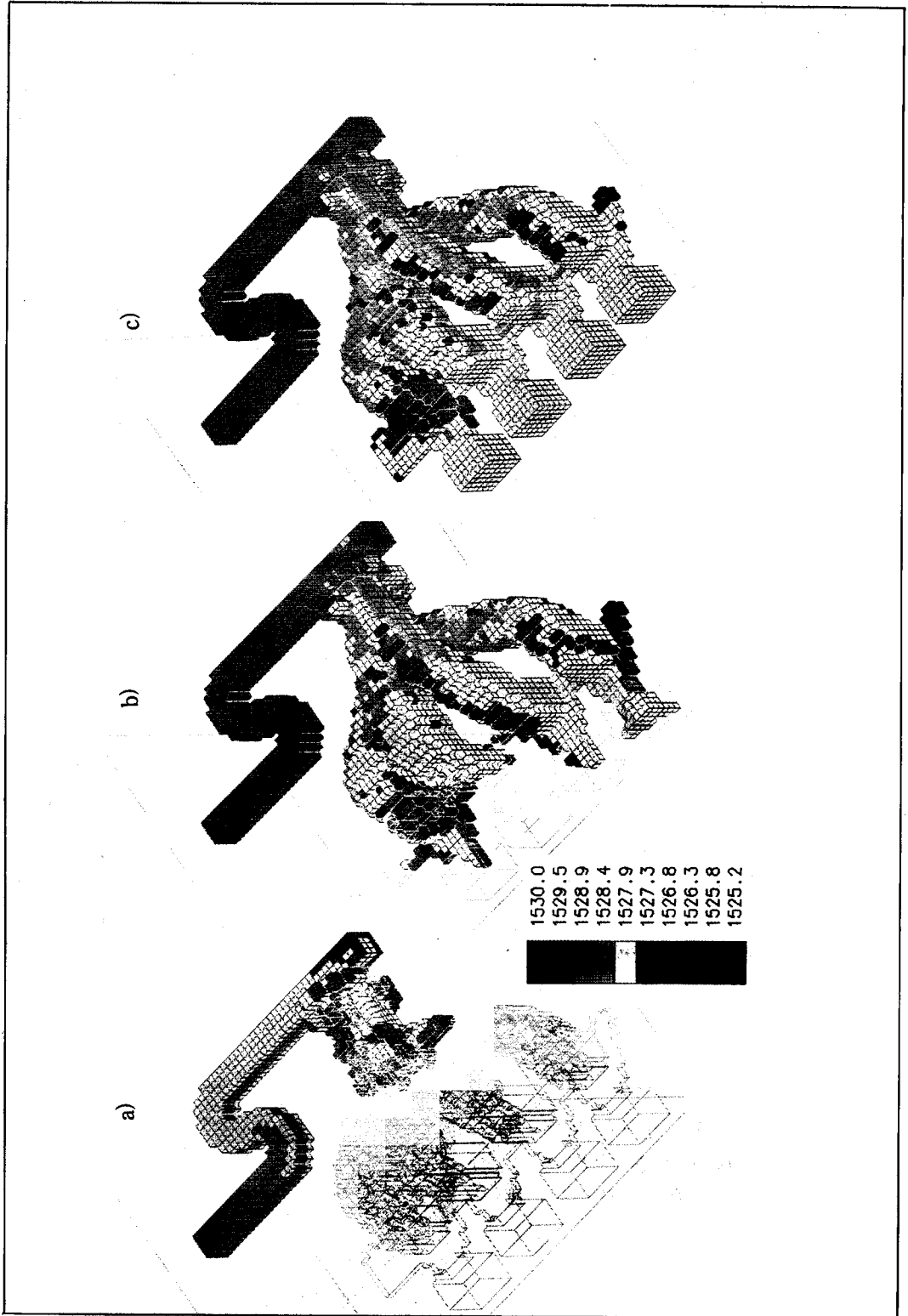


그림 6. 스텐레스 소재 exhaust manifold에서 배기구쪽에 runner가 있는 주조방안의 유동해석 결과.
a) 35% b) 80% c) 100% 충전시 충전분포 및 온도분포

4. 맺음말

앞에서 기술한 것과 같이 응고해석 및 유동해석 등 컴퓨터 모사를 이용하여 주조품을 개발하는 새로운 응용분야가 보다 다양하게 이용되고 있다. 컴퓨터 모사기법을 응용함으로써 실제로 주조 작업을 수행하지 않고도 최적의 주조방안을 설정할 수 있게 되었다. 이에 따라 새로운 주조품을 개발할 경우, 값비싼 시제품의 제작을 통한 시행착오 없이 컴퓨터 프로그램을 이용하여 응고해석을 수행함으로써 주조방안 설계상의 오류에 의한 응고수축 결함을 예측할 수 있다. 또한 적절한 압탕설계와 유동해석을 미리 예측함으로써 용탕의 적절한 충전이 이루어지도록 주조방안을 설정할 수도 있다. 따라서 이러한 신기술을 이용하여 시제품의 제작비용과 제작기간을 단축시킬 수 있으며, 아울러 주조품의 각 부위별 응고속도를 예측함으로써 미세조직을 조절하여 주조품의 품질 향상을 이룰 수 있는 필수적인 기술이다.

국내주조분야 에서도 컴퓨터 모사기술에 대한 관심이 높아지고 있고, 국내에서 개발된 프로그램도 현장에 점차 보급되어 활용되고 있다. 그러나 현재까지는 대부분의 응고 및 유동해석 프로그램이 일반 주조분야의 주조방안 설계를 위해 사용되고 있는 실정이다. 앞으로는 보다 복잡한 형상을 가지는 정밀주조나 고압 및 저압 주조, 또는 반중력주조 분야와 같은 복잡한 주조공정에서도

적용될 수 있는 컴퓨터 모사기술의 개발이 시급한 실정이다. 정밀주조 분야에서는 적절한 주조방안 뿐만 아니라 응고 중에 발생할 수도 있는 결함과 미세조직을 예측하여 최적의 공정변수를 설정하는 기술이 고부가가치의 정밀주조품을 개발하는데 있어서 필수적인 신기술로 대두되고 있다. 특히 항공기 엔진용 터빈 블레이드나 항공기 기체용 정밀주조 부품과 같은 정밀도와 안정성이 요구되는 주조품을 개발하는데 있어서는 공정변수들의 과학적인 분석없이 생산이 불가능하기 때문에 이 분야에서의 컴퓨터 모사기술의 적용은 무엇보다도 선행되어야 할 과제이다.

참 고 문 헌

- [1] J.G. Henzel Jr. and J. Keverian : J. Metals, 17(5) (1965) 561
- [2] 연구보고 49, Computer 주조방안에 관한 연구, 일본주물협회 (1989)
- [3] Computer simulation 사례집, 일본주물협회 (1990)
- [4] 홍준표, 한국주조학회지, 15(1) (1995) 5
- [5] A.L. Purvis, C.R. Hanslits, and R.S. Diehm, J. Metals, 46(1) (1994) 38
- [6] M. Rappaz and C.A.Gandin, Acta Metall, 41(1993) 345