

|||||||
論 文
|||||||

박육 스테인리스 주강에 대한 유동 및 응고해석의 실험적 고찰

최학규 · 박흥일* · 정해용* · 배차헌* · 최병강**

Experimental Study of Flow and Solidification Simulation for Thin Wall Stainless Steel Castings

Hak-Kyu Choi, Heung-Il Park*, Hae-Yong Jeong*, Cha-Hurn Bae* and Byung-Kang Choi**

Abstract

In order to find out the casting conditions of the thin wall stainless steel exhaust manifold for automobile, the melt flow and solidification behavior simulated by the Z-CAST program were evaluated, and experimental casting result on the test casting and exhaust manifold of SSC13 alloy were investigated. From the results of this study, it was shown that the calculated results on fluid flow were in good agreement with practical thin wall test castings under the same casting conditions, as pouring metal is austenitic stainless steel(SSC13) and pouring temperature is 1575, 1630, and 1665°C respectively. That calculated result with designed thin wall exhaust manifold was predicted filling up into the mold cavity, and practical casting was sound. The solidification simulation was predicted shrinkages at the bosses for original exhaust manifold, and designed it without bosses was predicted no defect. Therefore practical exhaust manifold casting was sound and in good agreement with calculated solidification results.
(Received October 18, 2000)

1. 서 론

주형에 고온의 용융금속이 주입될 때 주형공간을 통하여 흐르는 용탕의 순간적인 유동과정 및 충전된 용탕의 응고양상을 관찰하는 것은 매우 곤란하다. 주형공간에서의 용탕의 충전거동은 주물의 품질과 밀접한 관계가 있다. 1965년 Henzel과 Keverian[1]에 의해서 강주물의 응고해석에 컴퓨터를 응용한 이래 hardware와 software의 급속한 발전으로 컴퓨터에 의한 유동 및 응고해석은 최종 주조품의 건전성 예측, 주조공정의 개선 및 개발, 주조품의 신뢰성 확보, 제조원가의 절감 등에 중요한 역할을 하게 된다.

주조품에 대한 유동 및 응고해석은 사형주조를 비롯하여 다이캐스팅이나 중력금형주조, 저압주조, 정밀주조 및 연속주조 등에 확대 적용되고 있다. 주조공정에서 경제적이고 과학적인 주조방안을 설계하기 위하여 유동 및 응고에 대한 많은 연구들이 시도되었으며 실제로 생산제품에 적용되어 용탕 충전시 용탕 흐름 및 응고

해석으로 주조결합들을 예측하고 있다[2-12].

사형주조에 대한 유동 및 응고해석은 많이 이루어져 왔으나 두께가 3 mm 이하인 박육주물의 유동해석은 일부 연구되었지만[13] 활발하게 이루어지지 못하고 있다.

최근 자동차 부품을 얇게 함으로써 중량을 감소시키는 연구의 일환으로 exhaust manifold에 대한 관심이 높다. 현재 개발, 생산되고 있는 스테인리스 주강의 박육 주조품은 일반적으로 진공감압법[14]을 채택하고 있으며, 이러한 공법은 특허에 의한 장벽과 비싼 장비에 의해 생산되고 또 공정제어가 복잡하기 때문에 경제적 주조방법의 필요성이 제기되었다. 따라서 본 연구는 두께가 3 mm 이하인 박판형의 주물시편과 박육 설계된 자동차용 배기 매니폴드 스테인리스 주강 중력사형주조에 대하여 유동 및 응고해석 프로그램인 Z-CAST를 사용하여 얇은 주조품에서의 용탕의 유동과정 및 충전성과 함께 응고해석을 통하여 주조가능성을 검토하였으며, 이에 대한 예측된 결과에 따라 실제 박판형 주조

창원기능대(Chang-Won Polytechnic College)
*부경대학교(Pukyong National Univ.)
**춘천기능대(Chun-Chon Polytechnic College)

시편과 배기매니폴드 주조품을 주조하였다. 또한 수치 해석된 결과와 실제 주조된 주조품을 비교 검증함으로써 두께가 3 mm 이하인 스테인리스 주강에서도 유동 및 응고해석의 효율성을 제시하였다.

2. 해석 방법

두께가 얇은 주조품은 주형 공간이 좁기 때문에 용탕의 흐름이 나빠고 주입된 용탕이 주형의 접촉에 의해 온도가 급격히 떨어짐에 따라 용탕의 점성이 증가하게 되며 이러한 결과로 용탕이 계속 흘러가지 못하고 응고됨으로써 성형불량이나 주조불량이 발생한다. 용탕의 유동성은 점성과 역수의 관계에 있고, 특히 스테인리스 주강 주조품에서 벽 두께가 3 mm 이하일 경우 용탕의 유동성과 충전성은 성공적인 주조품 제작에 있어서 매우 중요한 요소이다. 종전에는 이러한 주조품 개발을 위해 일반적으로 경험에 의한 시행착오를 반복함으로써 많은 비용과 시간을 소비하였으며, 실제로 사형 중력주조에 의한 스테인리스 주강 주조에서 두께가 3 mm 이하의 주조품 제작에 대한 기술적 자료나 정보가 없었다. 따라서 본 연구에서는 두께가 2.1 mm인 자동차용 스테인리스 exhaust manifold의 주조를 위하여 주조시편의 크기를 배기 매니폴드의 크기와 유사하게 설계하였다. 주조시편의 크기는 두께가 1.6, 2.1, 2.6 mm, 폭 50, 길이 245 mm를 설계하였으며 스테인리스 주강의 유동성에 대한 기초 정보를 알기 위하여 유동해석을 시도하였다. 또한 유동해석 결과를 바탕으로 해석조건과 동일한 주조시편을 주조하여 예측된 수치해석 결과와 비교하였으며, 여기서 도출한 고찰을 토대로 두께가 2.1 mm인 배기 매니폴드를 유동과 응고해석을 통하여 스테인리스 주강에서 박육 주조가능성을 검토하였으며, 실제로 배기 매니폴드를 주조하여 결과를 고찰하였다.

주입시 주형 공간내의 용탕의 흐름은 비정상상태이므로 비선형 방정식인 Navier-Stokes 방정식을 초기조건과 경계조건을 이용하여 유한차분법으로 해석하는 SOLA-VOF scheme[15]을 이용한 3차원 유동 및 응고해석으로 Z-CAST 프로그램을 사용하였다.

이 수치해석 프로그램에 사용된 3차원 유동 및 응고 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식(Continuity equation) :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

Navier-stokes 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u + g_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v + g_y \tag{2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w + g_z$$

에너지 방정식

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \tag{3}$$

Volume of Fluid

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial uF}{\partial x} + \frac{\partial vF}{\partial y} + \frac{\partial wF}{\partial z} \tag{4}$$

여기서 ν 는 동점성계수(kinematic viscosity), ρ 는 유체의 밀도, g_x, g_y, g_z 는 x,y,z 방향의 중력가속도, P는 압력, F는 유체부피분율을 나타낸다.

2.1 전처리 및 요소분할

Fig. 1(a)은 박육 스테인레스 주강의 유동성 시험을 위하여 탕구계가 설치된 박육주조시편의 형상을 PC용 AutoCAD R14를 사용하여 입력한 solid 모델을 나타낸다. 시편형상에서 용탕 주입시 주형공간에서 공기저항을 배제하기 위하여 탕구 반대편에 시편과 연결된 폭 20, 길이 220 mm의 릴리스와 지름 20 mm의 배기공을 설치하였다. Fig. 1(b)는 자동차용 배기 매니폴드(exhaust manifold)의 형상도면을 solid 모델링한 것이다.

본 연구에 사용된 주물 두께는 주조시편일 경우 1.6, 2.1 및 2.6 mm, 매니폴드의 경우 두께가 2.1 mm로 얇게 설계되었기 때문에 정밀한 유동 및 응고해석을 위해 요소분할의 수는 각각 113×90×150(1,525,500개)와 190×150×106(3,021,000개)로 하였으며 프로그램에서 자동적으로 요소 분할된다.

2.2 해석조건 입력

박육 배기 매니폴드의 주조성을 예측하기 위한 기초 실험으로서 박육주조시편의 유동성에 대한 유동해석을 하였다. 그리고 유동 해석된 결과와 실제 주조품의 주

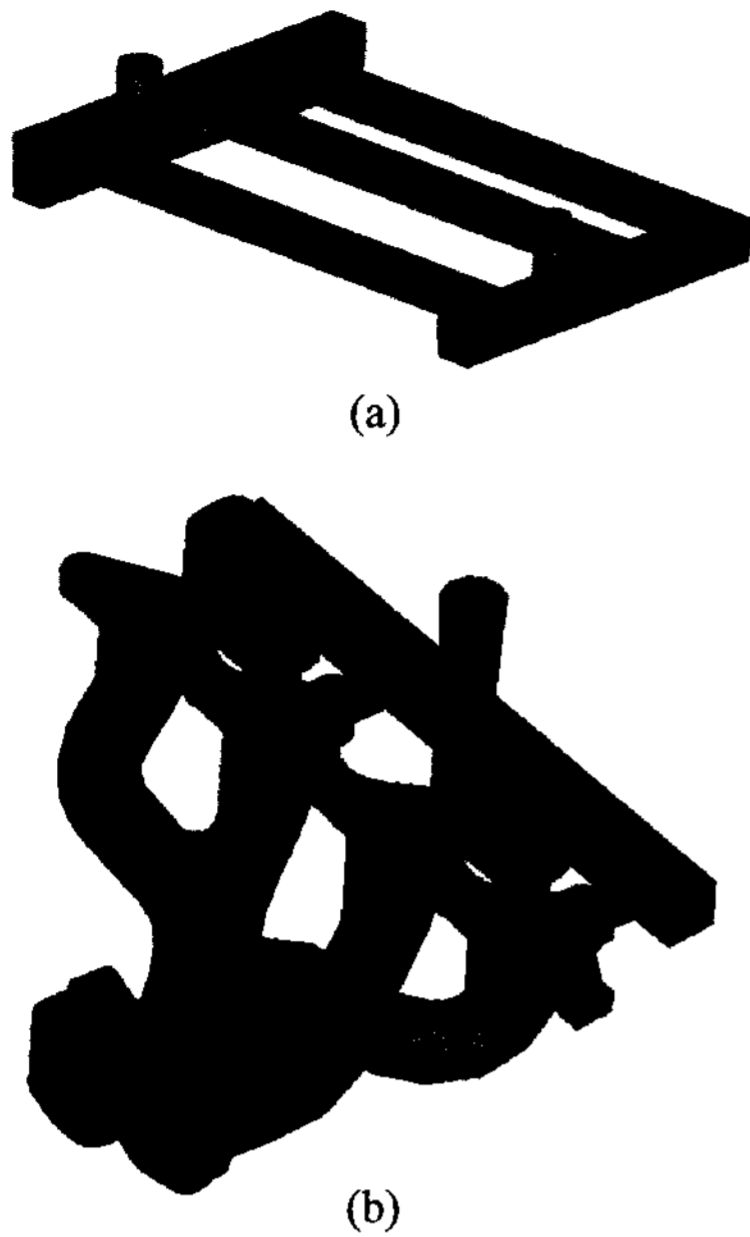


Fig. 1. Three dimensional solid models of (a) test casting and (b) exhaust manifold.

조결과를 비교 검토하기 위하여 주입금속은 스테인리스 주강에서 유동이 좋은 austenite계 stainless 주강인 SSC13, 주입온도는 각각 1575, 1630 및 1665°C, 그리고 주입시간은 1.5 sec로 수치해석 조건으로 하였다. 계산에 사용된 열물성치는 Table 1과 같다. 배기 매니폴드의 경우 동일한 주입금속(SSC13)으로 주조온도 1630°C, 주입시간 3.0 sec로 수치해석하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 박판형 주조시편의 유동해석

3차원 SOLA-VOF 열·유동해석 code인 Z-CAST를 사용하여 오스테나이트계 스테인리스 주강인 SSC13에 대하여, 길이 245, 폭 50, 두께 1.6, 2.1 및 2.6 mm 인 박육 주조 시편의 용탕 유동을 계산하였다. Fig. 2는 주입온도 1575°C, 주입시간 1.5 sec에 대한 충전거동을 나타낸다. Fig. 2(a)는 용탕이 탕구를 거쳐 주입

되는 과정을 나타내며, Fig. 2(b)는 용탕이 인게이트로 들어가는 과정을, Fig. 2(c)와 (d)는 용탕이 주형의 시편 공간으로 계속 충전되는 과정을 나타낸다. Fig. 2(e)는 최종적으로 용탕이 흘러 들어가 응고된 상태를 나타낸다. 이것은 Fig. 2(c)와 (d)에서 나타나듯이 시편 두께 1.6 mm는 너무 얇아 용탕이 충전되는 과정에서 용탕 온도가 급격히 저하되어 흘러가지 못하고 응고되는 과정을 보여주며 두께 2.1 mm에서는 초기에는 용탕 유입이 늦게 진행되나 탕도에 용탕이 충전되어 용탕의 압력을 받게 됨으로써 충전되는 과정을 나타내고 있다.

Fig. 2(e)의 해석 결과에서 시편 두께 2.6 mm는 시편 길이 245 mm를 완전히 충전시켰으나 시편 두께 2.1 mm의 경우 시편길이 끝 부분에서 misrun이 생기는 것으로 예측되었고 시편 두께 1.6 mm일 경우에는 시편 길이의 중간 부분에서 용탕의 흐름이 멈추는 것으로 예측되었다.

유동해석을 수행한 결과와 실제로 주조시편을 비교하기 위하여 해석에 사용된 도면과 동일하게 원형을 제작하였으며 주형은 정밀도가 양호한 펍셋(pep set)형 사형을 사용하였다. 사용된 주물사는 호주산으로 입형이 환형이고 입도는 50-80AFS이었으며 도형제는 사용하지 않았다. 용해는 고주파 유도 용해로(100 kg, 100 Hz)를 사용하여 대기에서 용해하여 1200°C로 예열된 레이들로 주입하였으며 주입온도 측정은 용탕을 주입하기 직전에 digital 침지식온도계(MARKIII, DIGITAL METERSTIC, LEADS and NORTHRUP)로 측정하였다.

Fig. 2(f)는 유동해석과 동일한 조건에서 주조한 시편 형상을 나타낸다. 시편 두께 2.6 mm는 완전 성형되었으나, 시편 두께 2.1 mm와 1.6 mm는 각각 시편 길이 230과 140 mm에서 misrun이 발생하기 시작하였고 시편 두께 2.1 mm는 시편 길이 245 mm에서, 그리고 시편 두께 1.6 mm는 시편길이 195 mm에서 용탕 흐름이 멈추어 응고되었다. Table 2는 주조조건과 주입 완료된 시편의 화학성분을 spectrometer로 분석한 결과를 나타내었다.

Table 1. Thermal and physical properties used in the calculation

Material	Specific heat (cal/g°C)	Density (g/cm ³)	Heat conductivities (cal/cm ² /sec°C/cm)	Latent heat (cal/g)	Solidus temp. (°C)	Liquidus temp. (°C)	Atmosphere (°C)
Casting metal (SSC13)	0.12	7.76	0.0380	64	1399	1454	30
sand mold	0.293	1.5	0.00287	-	-	-	30

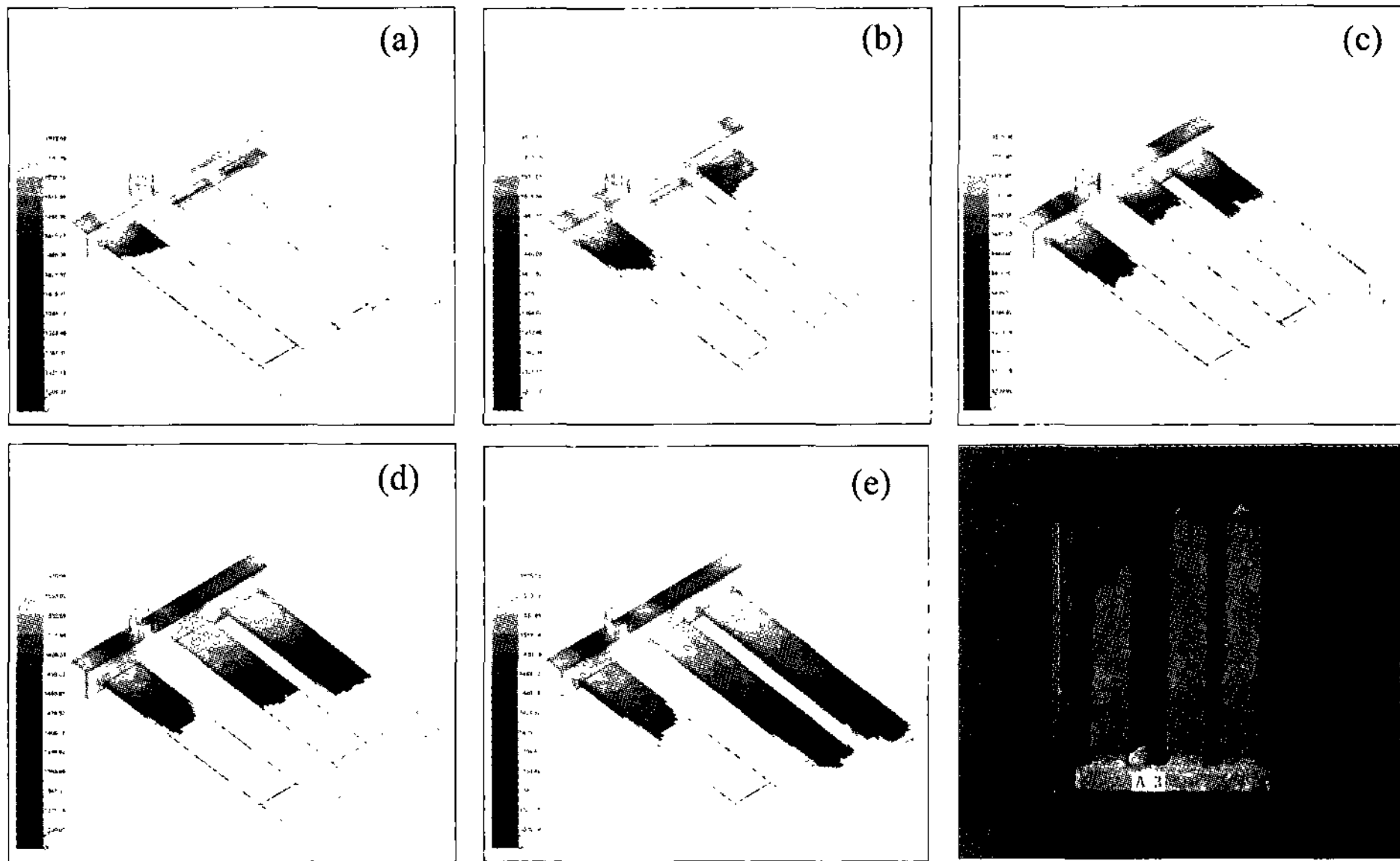


Fig. 2. Calculated filling aspects of thin wall test casting (a, b, c, d, e) and the practical casting(f) at the pouring temperature of 1575°C.

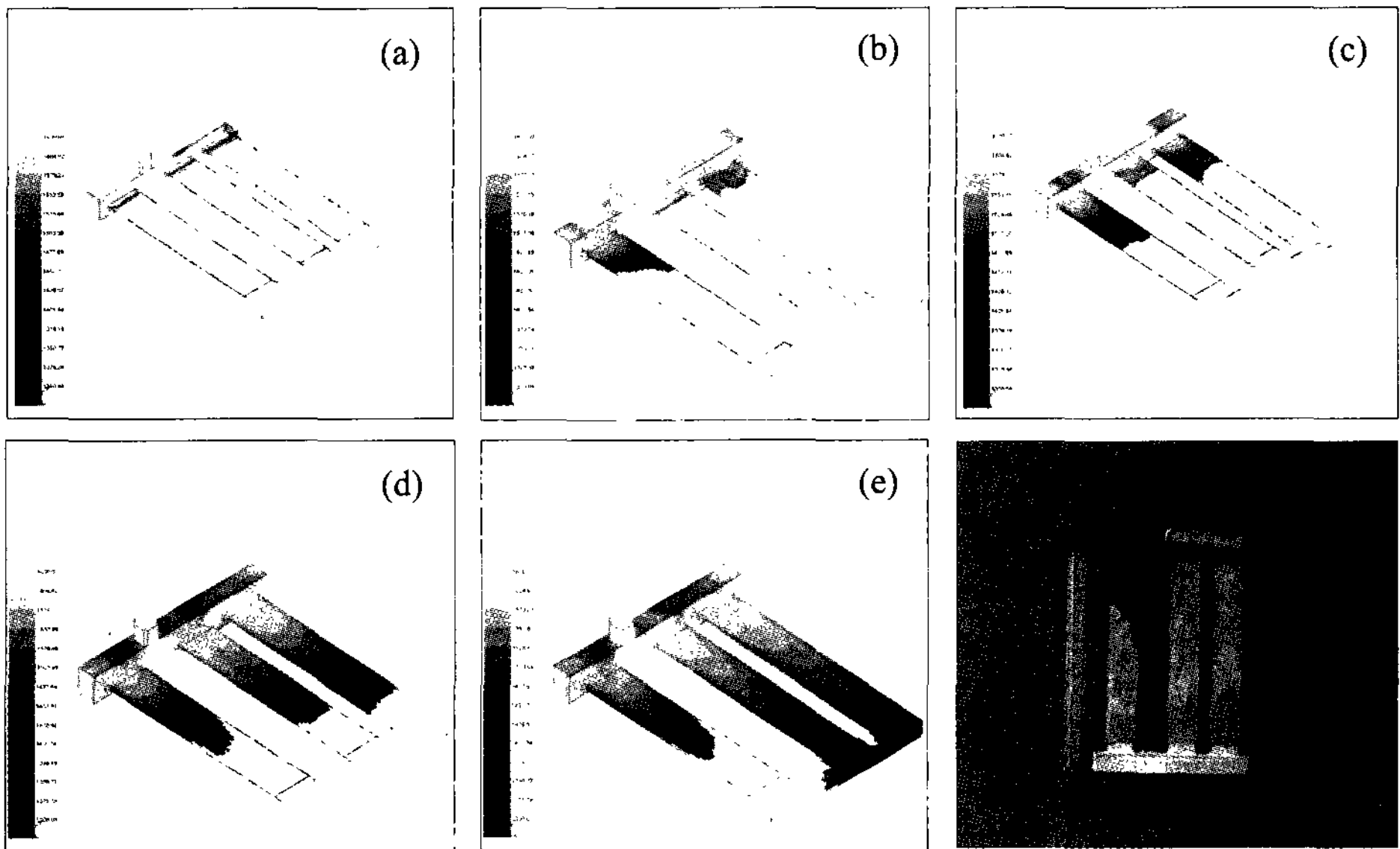


Fig. 3. Calculated filling aspects of thin wall test casting (a, b, c, d, e) and the practical casting(f) at the pouring temperature of 1630°C.

Table 2. Chemical compositions of test alloys and casting conditions

Casting metal	Chemical compositions(wt%)									Pouring tem.(°C)	Pouring time(sec)	atmosphere(°C)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe			
stainless steel (SSC13)	0.06	0.83	0.82	0.02	0.02	9.50	19.0	0.22	bal.	1575	1.5	30

Fig. 3은 주입온도는 1630°C, 주입시간은 1.5 sec 조건으로 유동 해석한 결과이다. Fig. 3(a), (b), (c) 및 (d)는 용탕이 주형의 탕구계에 주입되어 인게이트를 거쳐 시편 공간으로 계속 충전되는 과정을 나타내며,

Fig. 3(e)는 최종적으로 용탕이 흘러 들어가 응고된 상태이다. 시편 두께 2.1과 2.6 mm는 시편길이 245 mm를 완전 충전시켰으나, 시편 두께 1.6 mm는 용탕이 완전 충전되지 못하는 misrun이 예측되었다.

Fig. 3(f)는 유동해석과 동일한 주조조건, 즉 주입온도 1630°C, 주입시간 1.5 sec, 주형은 펍셉형을 사용한 실제 주입된 주조시편의 형상을 나타낸 것이다. 주입방법과 주입금속은 Fig. 2(f)와 동일한 것으로 사용하였다. 시편 두께 2.1과 2.6 mm에서는 시편의 길이 245 mm를 용탕이 완전 충전된 반면, 시편 두께 1.6 mm는 시편길이 128 mm에서 misrun이 발생하여 185 mm에서 응고하였다.

Fig. 4는 주입온도 1665°C, 주입시간 1.5 sec에 대한 충전거동을 나타내며, Fig. 4(e)는 최종적으로 용탕이 흘러 들어가 응고된 상태를 나타낸다. 시편 두께 2.1과 2.6 mm는 시편 길이 245 mm를 용탕이 완전하게 충전되나, 시편 두께 1.6 mm는 용탕이 완전 충전되지 못하고 misrun이 발생될 것으로 예측되었다. Fig. 4(f)는 주입금속은 Fig. 2(f)와 동일한 charge이며 주입온도 1665°C, 주입시간 1.5 sec, 주형은 펍셉형으로 실제로 유동해석과 동일한 주조조건에서 주입된 주조시편형상을 나타낸다. 시편 두께 2.1과 2.6 mm에서는 시편의 길이 245 mm 완전 충전시켰으나, 시편 두께 1.6 mm는 시편길이 188 mm에서 misrun이 발생하여 시편 전체길이인 245 mm까지 흘렀다.

Fig. 5는 시편 두께 1.6 mm에 대한 수치 해석된 결과와 동일한 주조조건에서 실제 주입된 주조 시편 Fig. 2(f), Fig. 3(f) 및 Fig. 4(f)의 최대 유동길이를 비교하였으며 예측된 해석결과보다 실제 주조된 시편이 유동 길이가 긴 것으로 나타났다. 이러한 현상은 시편의 두께가 너무 얇기 때문에 실제로 유동해석을 위한 물성치와 실제 주조된 물성치의 차이에서 기인될 수 있다. 한편 다른 측면에서 분석한다면 해석 프로그램에서 얇은 스테인리스 주강 주조를 위한 data base나 수치 해석 기법의 차이에 기인될 수 있는 것으로 추정할 수 있다.

G. P. Baker[13]는 복잡한 형상의 얇은 주물에서 일정한 밀도 ρ 와 점도 μ 의 비압축성 Newtonian fluidity가 포함된 3차원 Navier-Stock 식을 이용한 SFLOW 프로그램을 사용하여 원통형 박육 매니폴드를 수치 해석하였으며, Z.A.Xu와 F.Mampacy[16]는 Al-10%Si합금을 이용하여 표면장력함수(Pst)가 포함된 개량된 SOLA법으로 50×600×2.5 mm(폭×길이×두께)의 주형에서 유동해석을 하여 실험치와 계산치가 일치되는 결과를 얻었다. Campbell과 Olliff[17]는 두께가 0.6과 1.2 mm에 대한 진공주조 Ni기 superalloy에서 주입온도가 약 1500°C 정도 되면 온도에 의한 충전성은 개선되지 않으며 그렇게 두께가 얇은 것은 열전달에 의한 flowability가 제한되고, 표면장력에 의해 fillability가 제한된다고 강조하였다. 이로부터 얇은 주조품에서

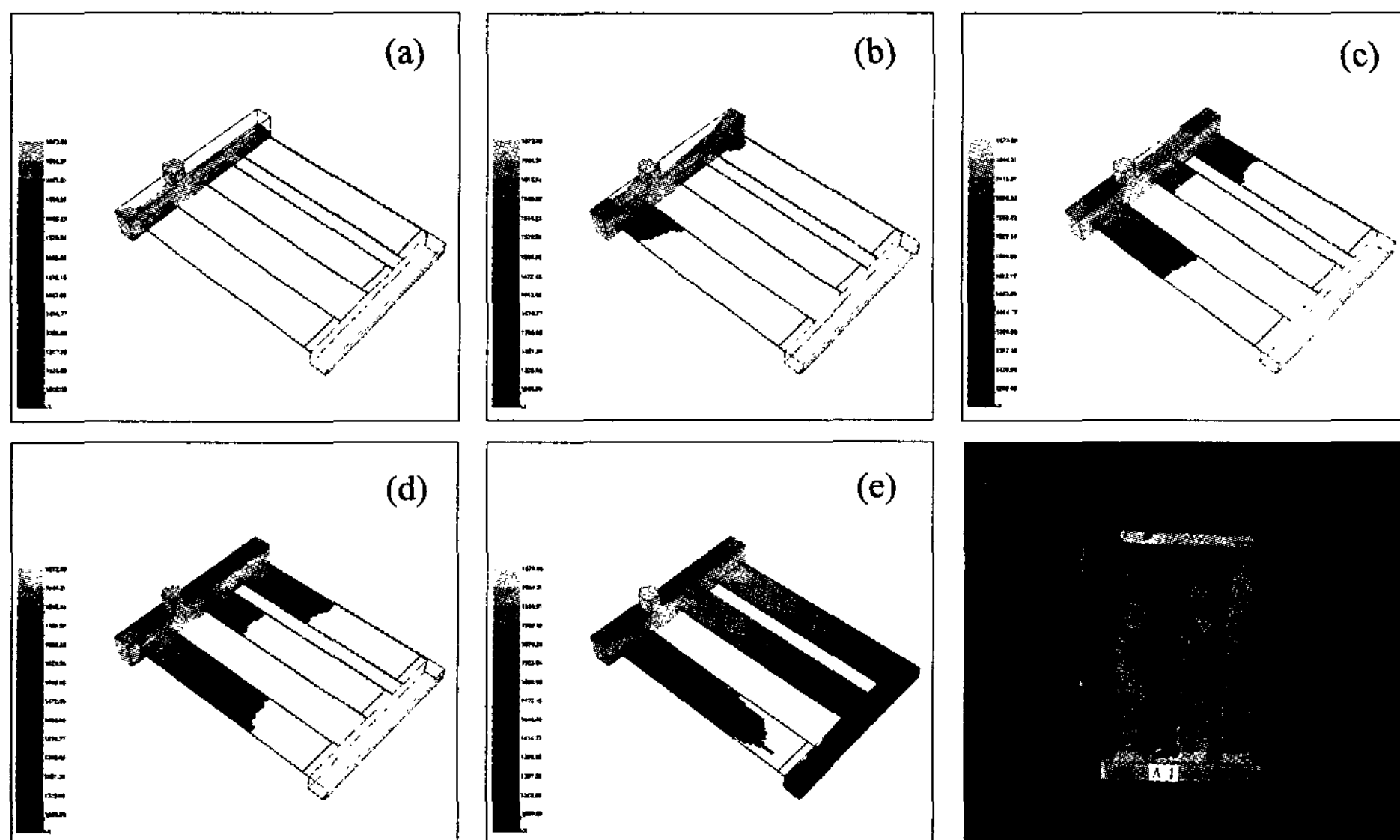


Fig. 4. Calculated filling aspects of thin wall test casting (a, b, c, d, e) and the practical casting(f) at the pouring temperature of 1665°C.

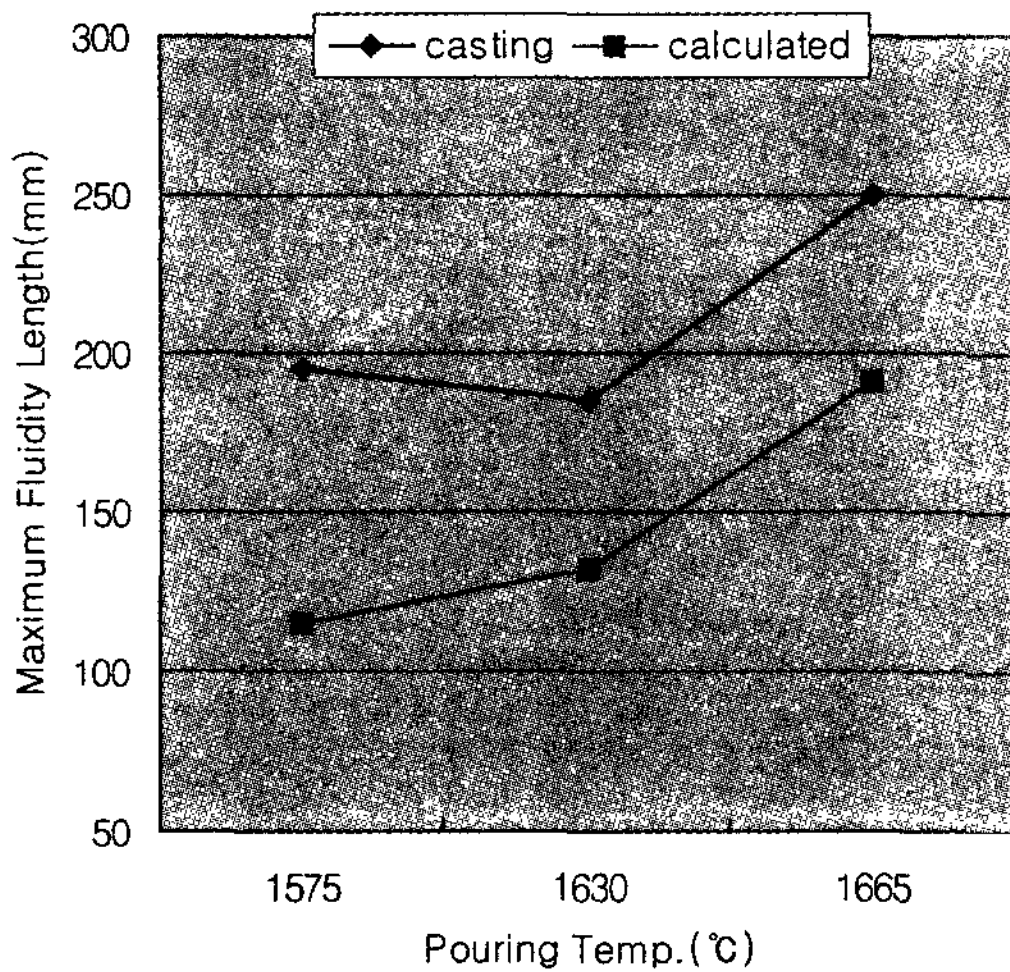


Fig. 5. Maximum fluidity length of calculated results and practical castings at different pouring temperature.

보다 정밀하고 정확한 예측을 위한 용탕의 유동해석에는 이러한 함수들이 고려될 수 있는 사항으로 간주된다.

그러나 본 연구에 사용된 프로그램에서 두께 2.1과 2.6 mm에서 유동길이는 계산치와 주조된 시편이 잘 일치하고 있다. 주입온도에 따른 수치해석 및 주조된 시편의 유동길이는 주입온도의 상승에 따라 증가함을 나타내고 있으며 응고 완료된 시편의 형상에서 수치 해석된 결과와 주조된 주조시편의 형상은 거의 유사한 형상을 보여 전체적으로 잘 일치하였다.

위의 수치 해석된 예측 결과와 실제 주조된 결과로부터 주입금속이 오스테나이트계 스테인리스 주강인 SSC13은, 주입온도가 1575°C 이상일 경우 시편길이 230 mm, 폭 50 mm, 두께 2.1 mm 이상의 치수를 갖는 주조품의 제조가 가능할 것으로 예측되었다.

3.2 박육 배기 매니폴드 유동 해석

박판 주조시편의 시뮬레이션 및 실제 주조실험 결과로부터 두께 2.1 mm까지 용탕 유동 및 충전이 가능한 것으로 고찰되었으나, 배기 매니폴드는 모양이 복잡하고 두께를 2.1 mm로 얇게 설계하여 주조했을 경우 그에 대한 결과를 알 수 없었다. 따라서 박육 설계된 배기 매니폴드에 대한 유동해석 및 응고 해석을 수행함으로써 주조품 개발을 위한 시간적 경제적인 효율을 얻을 수 있을 것으로 기대되었다. 두께 2.1 mm로 박육 설계된 실제의 스테인리스주강(SSC13)의 배기 매니폴드에 대한 용탕의 유동 해석을 하였다. 주조조건으로

는 외형은 CO₂형, 코어형은 shell형으로 하였으며 주입 금속은 오스테나이트계 스테인리스 주강인 SSC13으로 수치해석을 위해 사용된 물성치는 Table 3에 나타내었다. 이때 해석조건은 주입온도 1630°C, 주입시간 3 sec로 하였으며 주입시간은 제품 크기와 비례하여 실제 주입 가능한 시간이 되도록 하였다. Fig. 5(a)는 용탕이 탕구계로 주입되는 용탕의 흐름을 나타내고, Fig. 5(a), (b), (c) 및 (d)는 주입된 용탕이 각각 10%, 30%, 50%, 80% 주형공간으로 충전되는 과정을 나타내며 Fig. 5(e)는 충전 완료된 상태를 나타낸다. 수치해석 결과 박육 설계된 배기 매니폴드 주조시 용탕 충전이 용이할 것으로 예측되었다.

Fig. 5(f)는 유동해석과 동일한 주조조건에서 주조한 배기 매니폴드 주조품 형상을 나타낸 것이다. 제품의 형상에서 misrun이 발생하지 않고 건전하였으므로 해석 결과와 잘 일치하였다.

3.3 박육 배기 매니폴드 응고해석

승용차용 배기 매니폴드는 기존 주철제인 경우 주조품의 최소 벽 두께가 3.0~3.5 mm이며, 중형이상의 승용차의 경우 최소 4~5 mm의 주조품 두께를 갖는다. 주철은 용탕의 유동성이 좋을 뿐만 아니라 응고 수축율이 적어 독립된 후육부가 있더라도 배기 매니폴드 주조시에 큰 문제는 발생하지 않는다. 하지만 오스테나이트계 스테인리스 주강은 주철에 비하여 용탕의 유동성이 좋지 못하고 응고 수축량이 주철의 2~2.5배에 달하기 때문에 독립된 후육부가 있을 경우 수축공의 발생이 예상된다. 특히 주철제보다 두께를 50~75% 정도로 얇게 하면서 수축공을 방지하는 것은 경제적으로 대단히 어려운 일이다.

배기 매니폴드의 주조품 벽 두께를 2.1 mm로 박육 설계하여 주조했을 경우 제품에 대한 수축공 결함 발생 경향을 알기 위하여 응고 해석하였다. 오스테나이트계 스테인리스 주강은 스테인리스 주강에서 유동성이 좋은 반면에 응고 수축량이 많아서 두꺼운 부분은 급탕을 위한 방안이 필요 하며, 응고해석을 위해서는 일반적으로 가장 간단한 modulus에 의해 압탕방안을 설계한다.

해석에 사용된 응고 해석 프로그램은 Z-CAST로서 유동해석에 사용된 동일한 해석프로그램이며 두께가 얇고 모양이 복잡하기 때문에 요소분할 수는 유동해석과 동일한 190×150×106(3,021,000)개이며 해석에 사용

Table 3. Thermal and physical properties used in the calculation

Material	Specific heat (cal/g°C)	Density (g/cm ³)	Heat conductivities (cal/cm ² /sec°C/cm)	Latent heat (cal/g)	Solidus temp. (°C)	Liquidus temp. (°C)	Atmosphere (°C)
Casting metal (SSC13)	0.12	7.76	0.0380	64	1399	1454	30
sand mold(CO ₂)	0.27	1.5	0.00287	-	-	-	30
core (shell)	0.2	1.73	0.00135	-	-	-	30

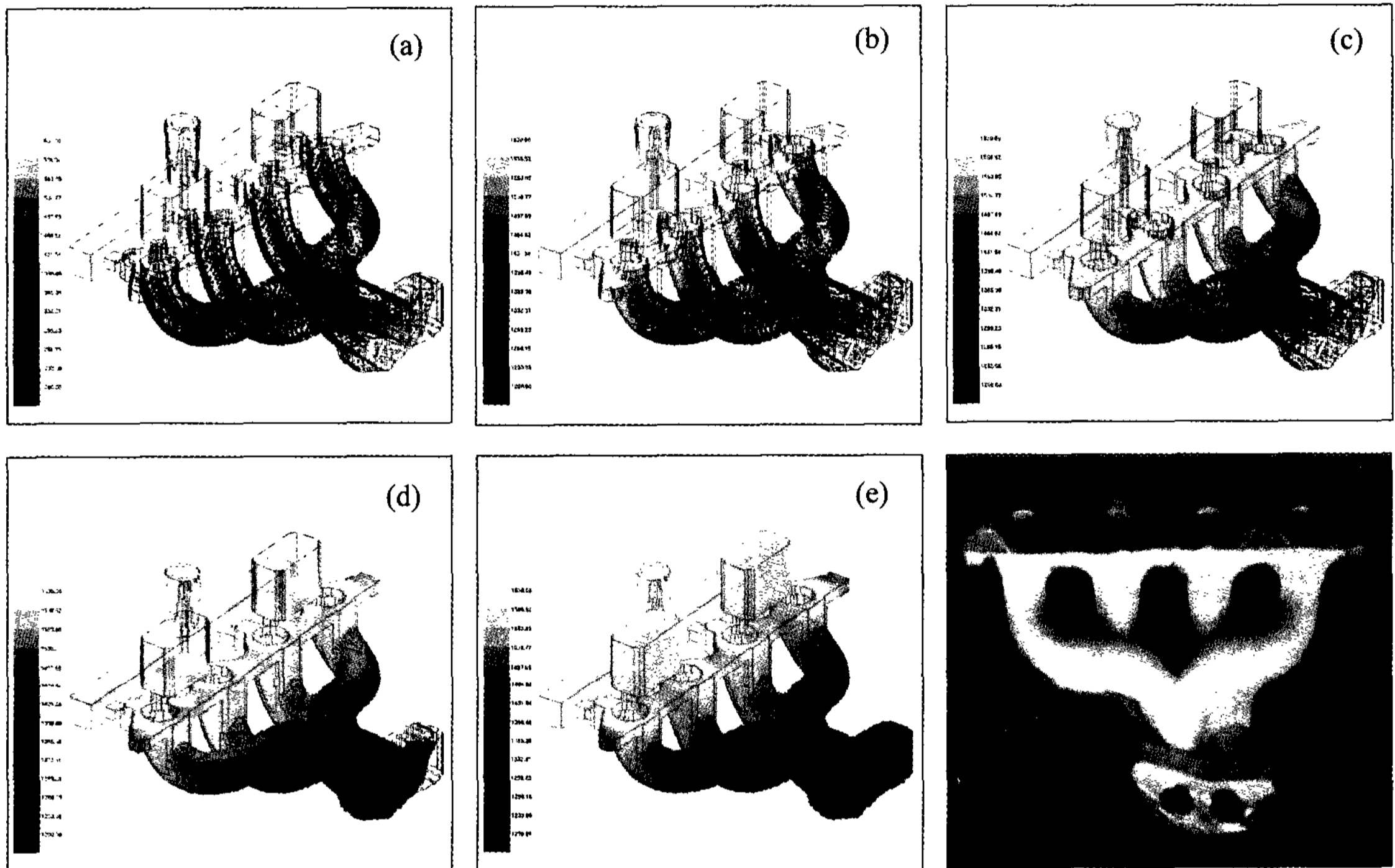


Fig. 6. Calculated solidification results for the thin wall exhaust manifold with bosses (a, b, c, d) and without bosses (e, f, g, h).

된 주조조건 물성치는 Tables 3과 동일하게 하였다.

Fig. 6은 독립된 후육부인 보스(boss)부가 달린 기존 주조품과 보스부를 제거하고 개량 설계된 배기 매니폴드를 주입금속인 오스테나이트계 스테인리스 주강인 SSC13에 대해 주입온도 1630°C, 주입시간 3 sec의 해석조건으로 응고 해석한 것이다. Fig. 6(a), (b), (c) 및 (g)는 보스부가 있는 기존 배기 매니폴드를, Fig. 6(d), (e), (f) 및 (h)는 개량 설계된 주조품의 응고 해석으로부터 수축 결함이 예상되는 위치를 화면상에서 단면 절단한 상태를 나타내었다. 응고시간 분포도 분석에서 Fig. 6(a)와 (b)는 제품의 보스부가 있는 표기된 부분에서 응고가 늦게 진행되어 수축공 발생이 예측되었다. 반면에 개량 설계된 제품의 Fig. 6(d), (e) 및 (h)에서는 수축공이 발생하지 않고 건전할 것으로 예측되었다.

두께가 2.1 mm인 스테인리스 주강 박육 배기 매니폴드에 대한 유동 및 응고해석을 통하여 주입금속 오스테나이트계 스테인리스 주강인 SSC13, 주입온도 1630°C 그리고 주입시간을 3.0 sec로 주입했을 경우 건전한 주조품이 제작될 것으로 예측되었으므로 실제로 주조품을 시험 주조하였다. 해석에 사용된 배기 매니폴드 주조품 설계도에 의해 외형은 목형으로 제작하였으며 중자는 shell로 제작된 코어형을 사용하였다. 외형의 주형은 CO₂ 형으로 사용된 주물사는 호주산으로 입형은 환형, 입도는 50~80AFS이었으며 규산소오다를 약 5%를 사용하여 조형 후 CO₂ 가스를 취입하여 경화시켰으며 주형 내부에 주강용 도형제를 사용하여 주입하기 전에 건조시켰다. 용해는 100 kg의 고주파유도 전기로에서 합금하여 용해하였으며, 예열된 레이들을 사

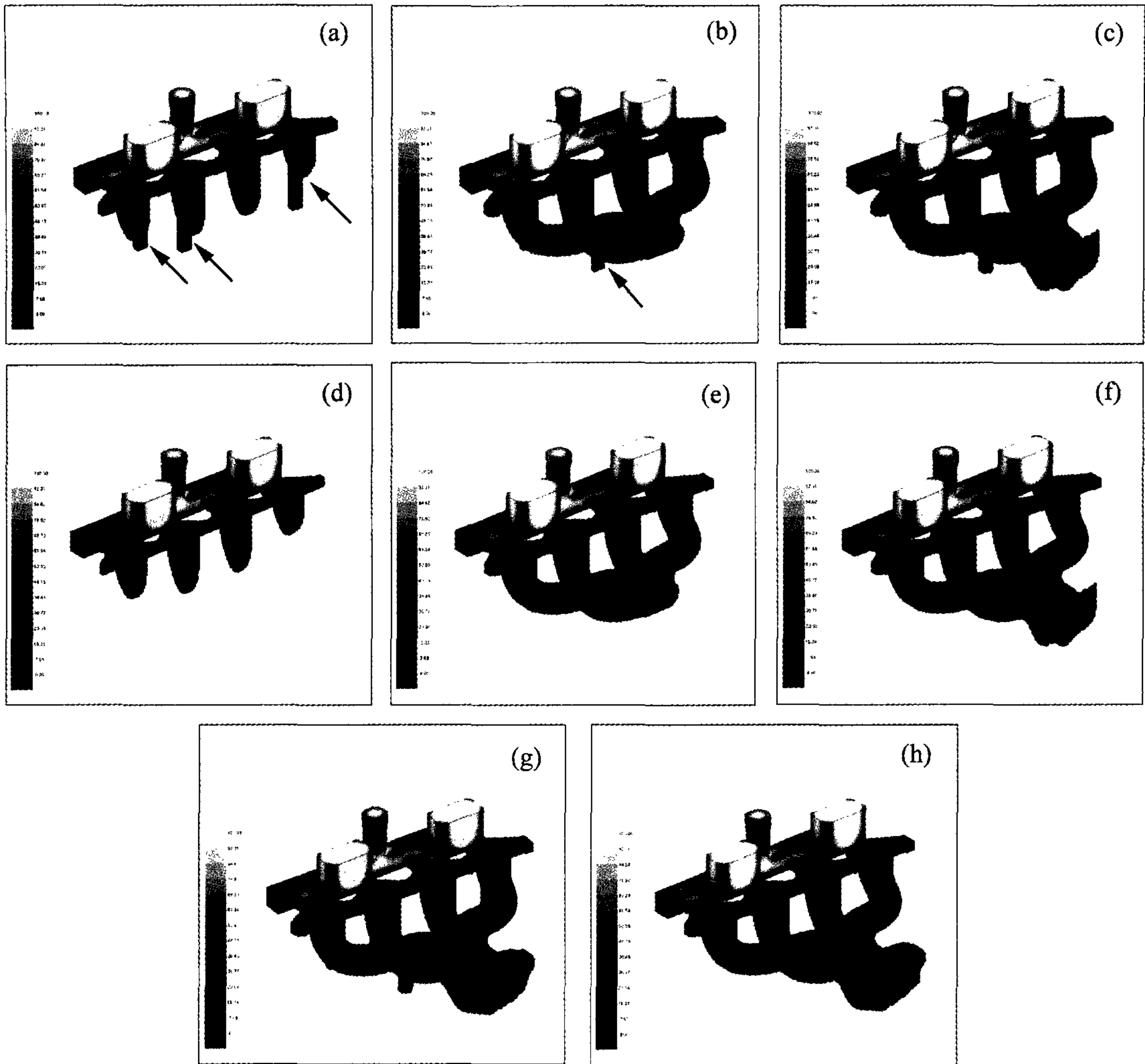


Fig. 7. Calculated solidification results for the thin wall exhaust manifold with bosses (a, b, c, g) and without bosses (d, f, g, h).

용하여 주입시간 3.0 sec로 주입하였다. 주입온도의 측정은 박판형 주조시편에 사용한 동일한 침지식 온도계를 사용하여 1665, 1630, 1575°C 되었을 때 각각 주입하였다.

Fig. 7(a)는 주입온도 1630°C에서 시험 주조된 개량 설계된 배기매니폴드 주조품 형상을 나타낸 것으로 주조품의 외관은 건전하여 주입온도 저하에 의한 misrun은 발생하지 않았으며 유동해석 결과와 잘 일치하였다. Fig. 7(b)는 1630°C에 주입된 주조품의 내부 결함의 상태를 확인하기 위하여 절단한 상태를 나타낸 것으로 주조품이 건전함을 나타내었다. 그러나 실제 시험 주조 후 배기 매니폴드 주조품의 벽 두께를 측정된 결과 주

조품의 벽 두께가 2.3~3.0 mm로 심한 편차를 나타내었다. 이것은 배기 매니폴드의 모양이 복잡하고 곡면이 많을 뿐만 아니라 시제품인 관계로 목형에 의한 원형 제작과 주형 조립과정에서 코어형과의 두께가 정확하게 형성되지 않았기 때문인 것으로 분석되었다. Table 4는 시험 주조된 배기 매니폴드의 화학성분과 주조조건을 나타낸 것이다.

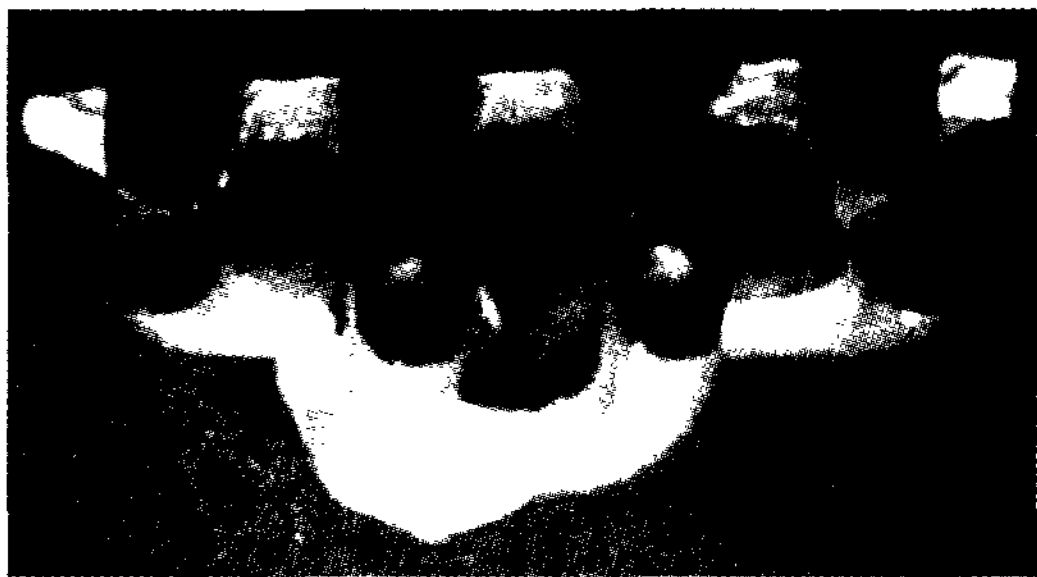
본 연구에서 유동 및 응고해석의 결과와 실제 주조된 주조품을 비교한 결과 본 연구에 사용된 Z-CAST 프로그램은 비교적 잘 일치하였으므로 박육주조품의 개발 및 제조에 있어 개발기간 단축과 경제적으로 유용한 수단임을 제시하였다. 또한 실험 결과에서 보여 준

Table 4. Chemical compositions and casting conditions for exhaust manifold

Casting metal	Chemical compositions(wt%)									Pouring tem.(°C)	Pouring time(sec)	atmosphere(°C)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe			
SSC13	0.069	0.80	0.85	0.03	0.01	9.20	18.5	0.47	bal.	1665 1630 1575	3.0	25



(a)



(b)

Fig. 8. Experimental thin wall exhaust manifold stainless steel casting show: (a) external appearance and (b) cutting a section.

바, 중력사형주조에서도 주입금속 SSC13, 주입온도가 1575°C 이상에서는 주조품의 벽 두께가 3 mm 이하를 갖는 박육 배기 매니폴드의 주조가 가능한 것으로 고찰되었다.

4. 결 론

박육 스테인리스 주강 자동차용 배기 매니폴드의 주조품을 제조하기 위하여 열유동 및 응고 해석 프로그램인 Z-CAST를 이용하여 박판형 주물시편과 박육 설계된 배기 매니폴드에 대한 유동 및 응고 해석을 통하여 그 결과에 따라 실제 주조된 시편 및 배기 매니폴드 주조품과 비교 연구한 결과는 다음과 같았다.

1) 박판형 주조시편을 오스테나이트계 스테인리스주

강인 SSC13을 주입온도 1575°C, 1630°C, 1665°C으로 주입하는 조건에서 유동 해석하였으며, 실제 주조된 시편과 비교한 결과 비교적 잘 일치하였다.

2) 박육 설계된 스테인리스주강 배기 매니폴드 주조품의 유동해석 결과에서 용탕이 주형속으로 용이하게 충전될 것으로 예측되었으며, 실제 주조된 제품도 건전하여 해석 결과와 잘 일치하였다.

3) 보스부를 제거하여 개량 설계된 배기 매니폴드의 응고 해석 결과에서 건전성이 예측되었고, 실제 주조된 주물도 건전하여 응고해석의 결과와 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 중소기업기술혁신사업비의 일부로 수행되었으며, 위탁연구비를 지원해준 태성정밀공업사에 감사드리며, (주)태창정밀과 생산기술연구원 주조공정팀의 도움에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. G. Henzel and J. Keverian : J. Metals, 17(1963) 561
- [2] R. Stoehr and W. S. Hwang, Modeling of Casting and Welding Processes II, Conference Proceedings, AIME (1983) 47
- [3] P. V. Desai, J. Wang, P. Hansen and S. F. Hansen, AFSTransactions, Vol. 163(1987) 435
- [4] C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura, IMONO, Vol. 59, No. 2,(1987) 61
- [5] H. Walther and P. R. Sahm, Modeling and Control of Casting and Welding Processes IV, A. F. Giamei and G. J. Abbaschian eds., TMS, (1988) 635
- [6] R. A. Stoehr and C. Wang, AFS Transactions, Vol. 96, (1988) 733
- [7] Y. C. Lee, S. M. Lee, J. K. Choi, C. P. Hong, Jujo, Vol. 18, No. 2(1998) 179
- [8] W. S. Hwang and R. A. Stoehr, Metals Handbook, 9th ed., vol. 15, (1988) 867
- [9] Sahm, P. R., Numerical Simulation of Casting Solidification in Automotive Applications, Ed. C. Kim, TMS, (1991) 45

- [10] Kallien, L. and Sturm. J., NADCA Transactions, (1991) 305
- [11] J. K. Choi and C. P. Hong : Cast Metals, 4(1992) 226
- [12] P. Haigh, S. Oxley and P. Bond, Proceedings of the 4th Decennial International Conference on Solidification Processing, ed J. Beech and H. Jones, Solidification Processing, (1997) 155
- [13] G. P. Baker, Modeling of Casting and Welding and Advanced Solidification VI, TMS(1993) 405
- [14] Chandley G. D., Counter-Gravity Casting Process for Making Thinwall Steel Exhaust Manifolds, SAE Technical Paper Series, 970920, (1997).
- [15] B. D. Nicholas, C. W. Hirt and R. S. Hotchkiss, "SOLA-VOF: A solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries, Tech. Report LA-8355, (Los Alamos Scientific Laboratory, (1980).
- [16] X. A. Xu and F. Mampacy, Modeling of Casting and Welding and Advanced Solidification VIII, TMS(1998) 45
- [17] Campbell J. and Olliff I. D., AFS Cast Metals Research J., June, (1971) 55