

■■■■■■■■■■
論 文
■■■■■■■■■■

저압주조에 의한 자동차 Al Wheel의 제조(I) : 유동 및 응고해석

추인호 · 류성곤 · 최정길*

Production of Automobile Al Wheel by Low-Pressure Die Casting (I) : Flow and Solidification Simulation

In-Ho Choo, Sung-Kon Yu and Jeong-Kil Choi*

Abstract

A multi-purpose code MAGMA was employed for mold design and process control in producing Al wheel by low-pressure die casting. Three-dimensional solid modeling was followed by mesh generation of casting and molds(top, bottom and side). The simulation of stability of casting cycle time, mold filling simulation with pressure variation from P1 to P2, solidification simulation by solidification time and feeding criteria, and temperature distribution of molds during processes were studied in this research. The thermal stability of molds was attained after 5 cycles when molds were pre-heated at 400°C. The pressure increase from P1 to P2 for mold filling was evaluated as slightly higher, and 6 seconds were taken for the mold filling. The cycle time was believed to be designed properly judged from the solidification time of casting and open/close time of molds.
(Received September 15, 1998)

1. 서 론

우리나라의 자동차산업은 1980년대에 들어와 북미 시장에서의 승용차수출을 계기로 비약적인 발전을 거듭하였고 1990년도에 들어서는 반도체와 함께 수출주력 업종으로 각광을 받고 있다. 그러나 우리나라가 국제 자동차시장에서 우위를 계속 유지하려면 생산기술도 시대와 사회적 환경변화에 부응하지 않으면 안된다. 최근 자동차업계에서도 경량이면서 안전성, 내구성 및 안락성을 갖춘 고품질자동차의 연구 및 개발에 심혈을 기울이고 있다. 또한 자동차의 경량화는 연비 및 주행성능의 관점에서 대단히 중요한 기술과제이다. 연비 및 주행성능을 향상시키기 위해서는 엔진의 효율향상이나 주행저항의 감소에 의한 연비기술과 재료변경에 의한 경량화 기술의 두가지 접근방법을 생각할 수 있다. 연비기술에 대해서는 현재의 자동차로는 거의 한계에 달하여 있어서 이것을 개선하기 위해서는 지금까지의 자동차에 대한 개념을 초월할만한 새로운 발상이 필요하다. 그러나 재료변경에 의한 개선

에는 아직도 많은 여지가 남아 있다[1]. 중량을 1% 가볍게 하면 연비도 1% 개선된다고 하는 자동차 경량화의 한 방법으로 Al합금의 채용이 주목받기 시작하여 차체, 범퍼, 엔진부품, 콤프레서부품등에 Al화가 진행되고 있다. Al합금은 사형주조[2], 중력금형주조[3] 및 저압주조[4, 5] 등을 통하여 제조되고 있다. 본 연구는 기존 주철로 제작되던 자동차의 wheel을 Al합금으로 저압주조하여 부품을 경량화시키므로써 개방된 국제 시장에서 경쟁력을 제고시키고자 함에 그 목적이 있다. 따라서 우선 그 첫단계로 범용해석코드인 MAGMA를 사용하여 저압주조금형의 설계 및 공정제어를 하고자 한다. 저압주조는 금형설계 및 제작에 많은 비용이 소모되며 반복주조시 냉각제어 등 여러 생산인자들을 제어하기가 용이하지 않은 주조법으로서 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 주조금형설계의 최적화 및 제조공정을 제어하는 일이 필수적이다. 본 논문에서는 반복주조시 열유동 및 열전도 현상에 따른 금형의 열적안정성 평가, 용탕충진시 가해지는 압력조건과 응고시의 보압을 고려한 충전 및 유동해석 그리고 상

계명대학교 공과대학 재료공학과(Dept. of Materials Engineering, Keimyung University)

*생산기술연구원 주조공정 연구팀(Foundry Process Research Team, KITECH)

부금형, 하부금형 및 측면금형에 대한 온도분포의 해석을 행하였다.

2. 해석방법

2.1 전처리 및 요소생성

Al wheel의 형상 모델링은 범용CAD인 I-DEAS를

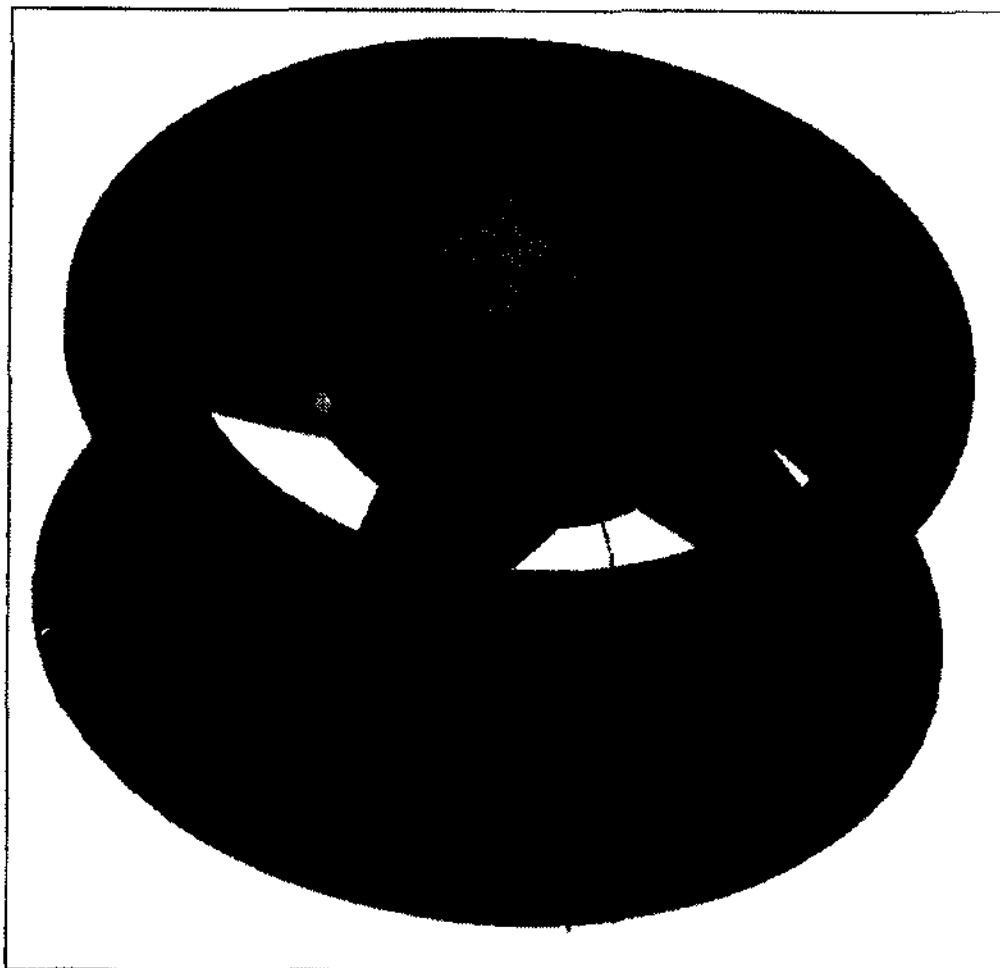


Fig. 1. Three dimensional solid modeling of Al Wheel.

이용하였으며(Fig. 1) 작성 후 MAGMA를 이용하여 상부금형, 하부금형 및 측면금형을 모델링하였다. 또한 반복주조시 금형의 온도변화를 관찰하기 위하여 가상의 열전대를 11개소(상부금형, 하부금형, 측면금형)에 설정하였으며 충전경로를 추적하기 위하여 가상의 tracer particle을 설정하였다. FVM(Finite Volume Method)에 의하여 요소분할을 행하였으며 요소분할후의 주물, 상부금형, 하부금형 및 측면금형의 형상이 Fig. 2에 나타나 있다.

2.2 해석조건 입력

본 연구에 사용된 저압주조공정은 금형이 체결된 후 용탕은 stalk을 통해 두 단계의 충전압력(P1, P2)으로 주입되며 용탕의 충전완료후 주물의 강도향상 및 수축공의 제거를 위해 응고과정중 보압(P3)을 가한다. 주물의 응고완료후 금형이 열리면서 제품이 취출되며 금형표면에 대한 spray 및 coating작업 후 다시 금형이 체결되어 다음 cycle이 진행되는데 이를 도시하면 Table 1과 같다.

주물의 초기온도는 700°C 그리고 금형의 초기예열 온도는 400°C로 설정하였으며 주물-금형, 금형-금형, 금형-냉각수, 금형-대기 등 이물질간의 열저항을 고려

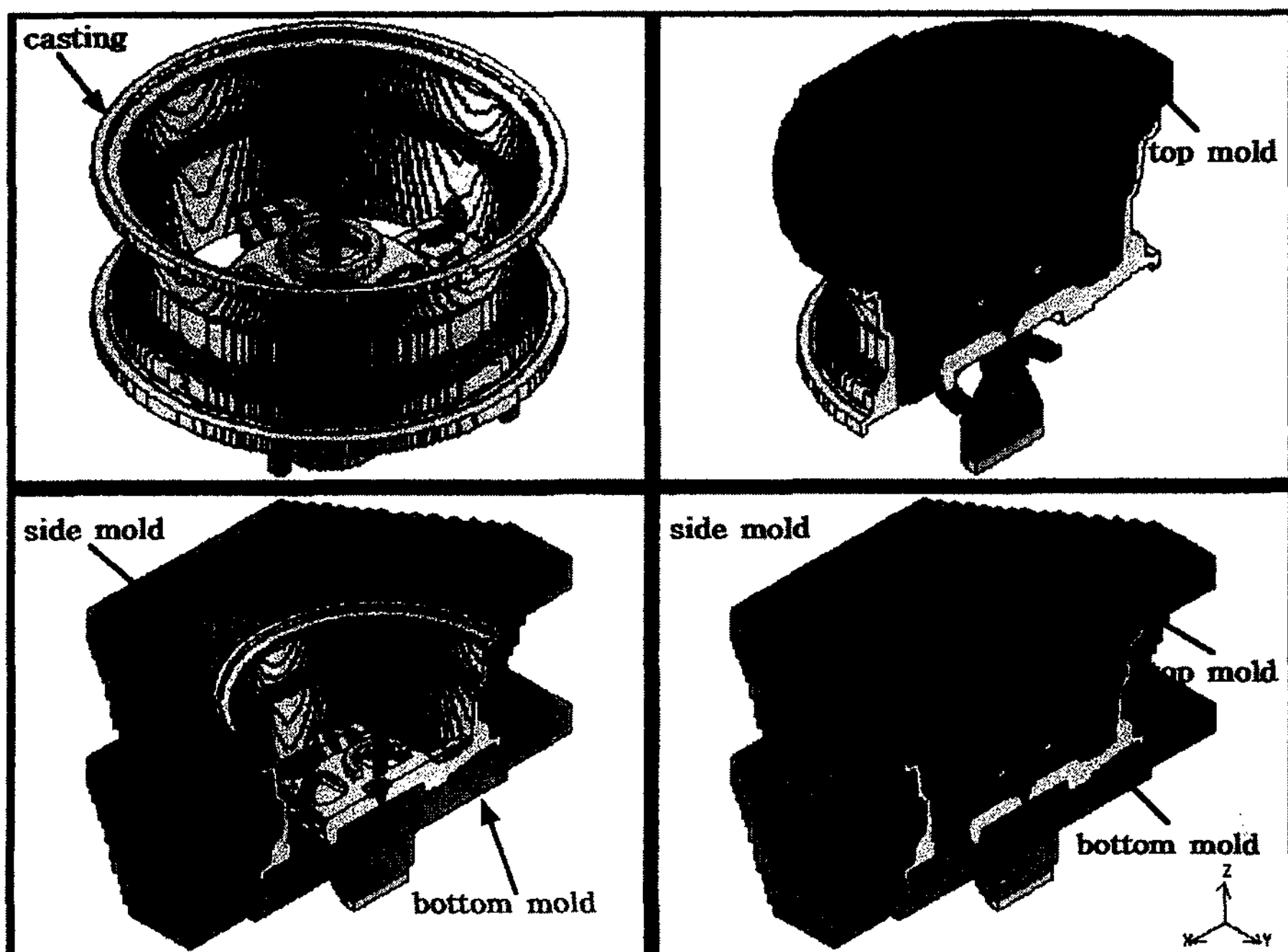
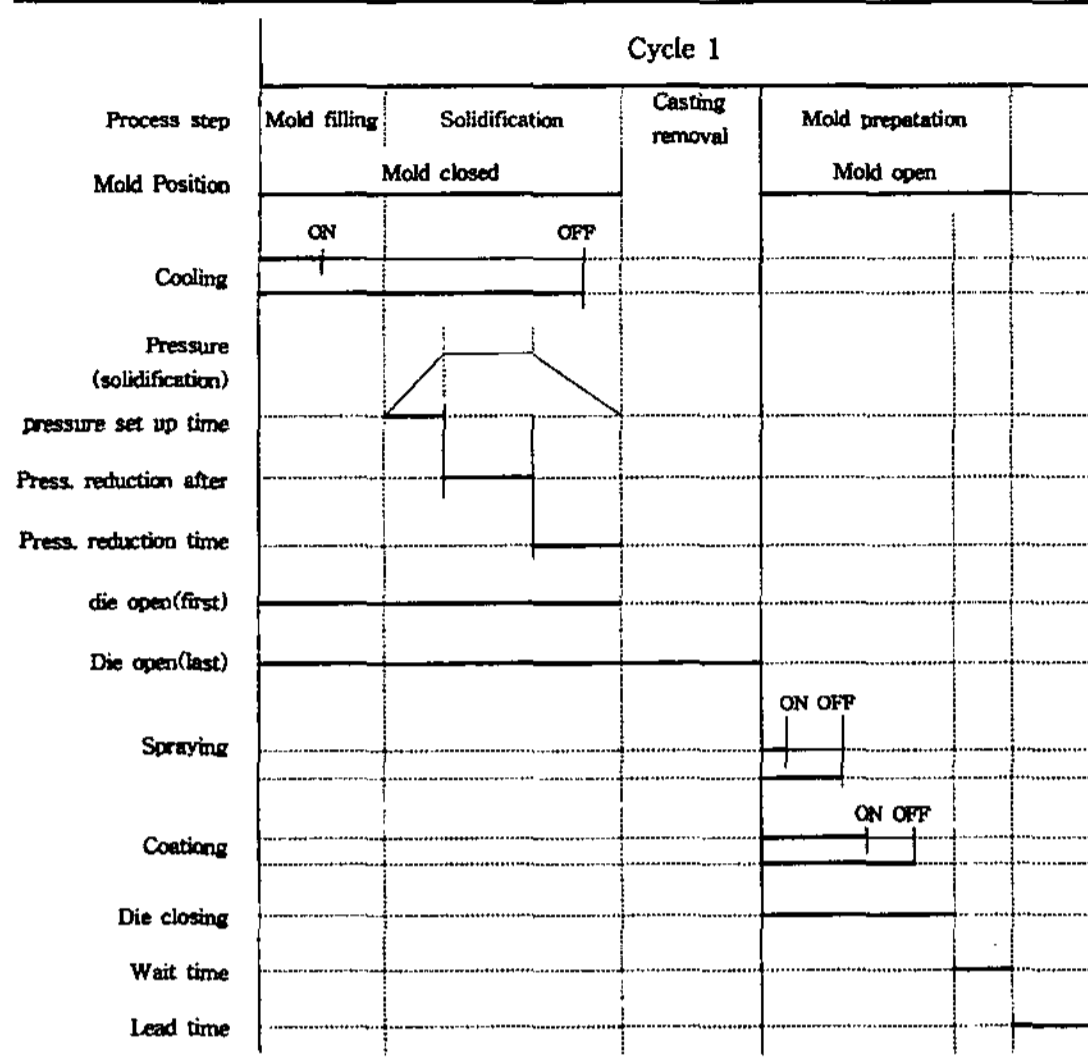


Fig. 2. Mesh generation of casting, top mold, bottom mold and side mold.

Table 1. Time sequence in low-pressure die casting



하여 경계조건을 설정하였다. Table 1에 나타난 용탕 충전, 응고 및 제품취출의 cycle time 등 작업공정별 세부사항이 Table 2에 나타나 있다.

2.3 충전압력의 입력

저압주조시 용탕에 압력을 가하여 제품하부에 설치된 stalk를 통하여 용탕이 두 단계의 충전압력(P1, P2)을 받아 제품내로 주입된다. 충전완료후 초기 주입압력보다 높은 압력(P3)으로 보압하여 응고를 강화시키며 또한 cooling channel에 의한 냉각으로 제품의 적정 강도가 얻어진다. P1, P2 및 P3의 값이 Table 2에 나타나 있다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 냉각곡선

11개소에 가상 열전대를 설치하여 시간에 따른 금형의 온도변화가 7cycle에 걸쳐 해석되었는 바 그 결과가 Fig. 3에 나타나 있으며 cooling channel의 냉각 조건은 Table 2와 같다.

이 경우, 5 cycle까지는 금형의 온도가 cycle이 진행될수록 증가하나 6 cycle부터는 안정상태로 접근하고 있음을 알 수 있다. 또한 cooling channel의 냉각조건(수냉 또는 공냉)을 변화시키므로써 다양한 형태의 냉각 곡선을 얻을 수 있었으며 이는 주물의 응고시간, 금형의 온도분포 그리고 cycle time에 영향을 미치게 된다.

Table 2. Specification of each process in low-pressure die casting

Classification	Contents		
Material	A356.2		
Pouring Temp.	700°C		
Initial Mold Temp.	450°C		
Pressure	P1 = 0.2403 kg/cm ² P2 = 0.2880 kg/cm ² P3 = 0.4882 kg/cm ²		
Cycle time	Total : 260 sec		
	Start on	15 sec	
	Mold Setting Start		
	Mold Setting Finish		
	Mold Filling Start	15 sec	
	Mold Filling Finish		
	Pressure Start	140 sec	
	Pressure Finish		
	Pressure Reduction	15 sec	60 sec
	Pressure Reduction		
	Side Mold Open (30		
	Solidification Finish		30 sec
	Side Mold Open	8 sec	
Upper Mold Open	11 sec		
Casting Release	15 sec		
Mold Original			
Cooling Channel	No.	Parts	Start →
	1	Upper Hub (W.C)	100 → 260
	2	Upper Spoke (A.C)	150 → 240
		Lower Spoke (A.	180 → 250
	3	Lower Hub (W.C)	150 → 260
4	Upper Inlet (W.C)	100 → 260	
Mold Material	Upper · Lower	SKD61	
	Side	FCD50	

3.2 충전해석

용탕의 점진적인 충전거동이 Fig. 4에 나타나 있다.

용탕이 stalk를 통해 주입되어 중심부인 hub가 우선 충전되고 flange를 거쳐 wheel의 하부에서 상부로 충전이 진행되고 있음을 알 수 있다. 또한 tracer particle을 통한 용탕의 충전경로가 Fig. 5에 표시되어 있는데 Fig. 4의 충전거동과 일치함을 알 수 있으며 충전시간이 약 6초임을 알 수 있다. 용탕이 stalk를 지나 gate에

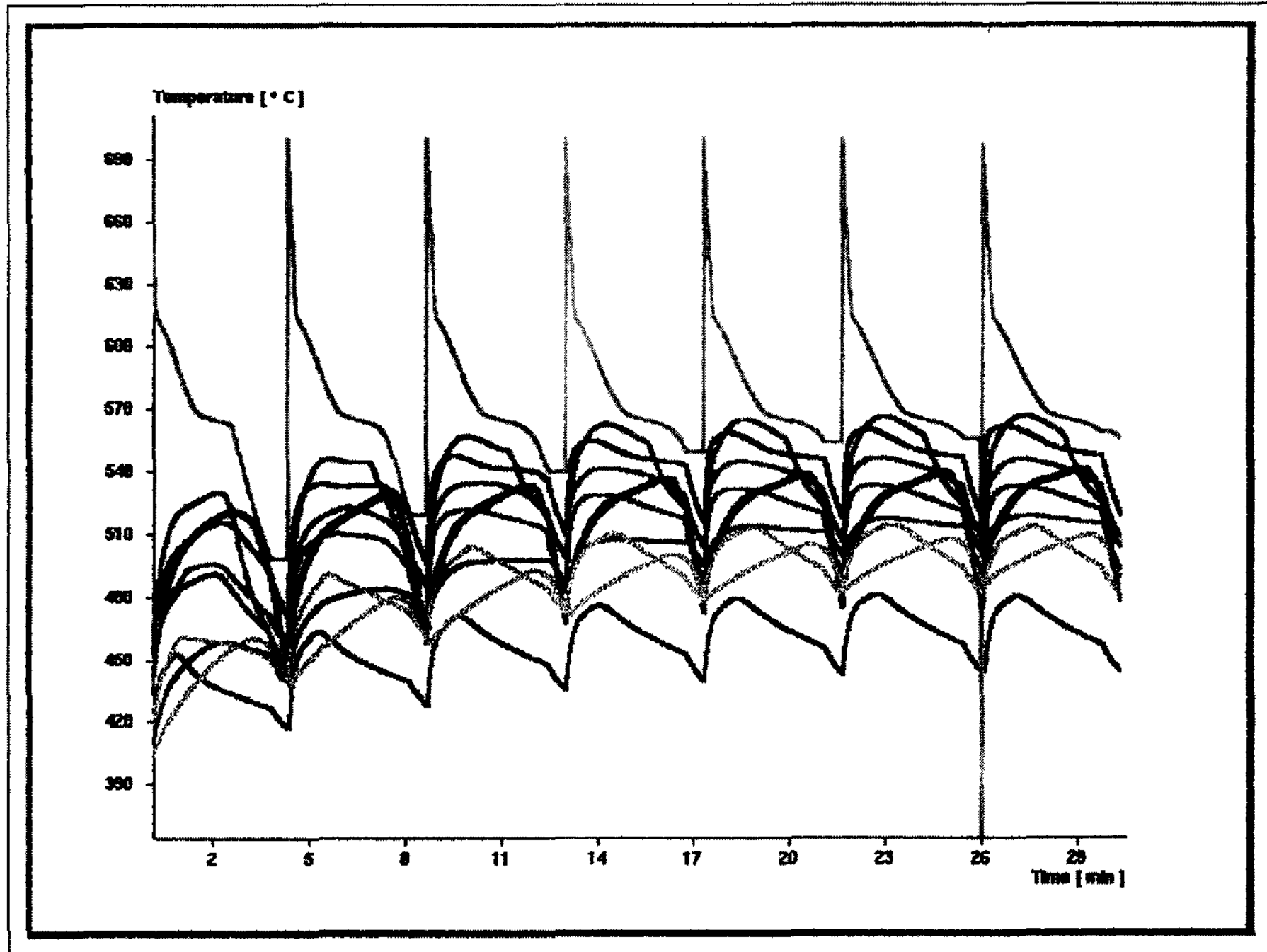


Fig. 3. Cooling curves of seven cycles.

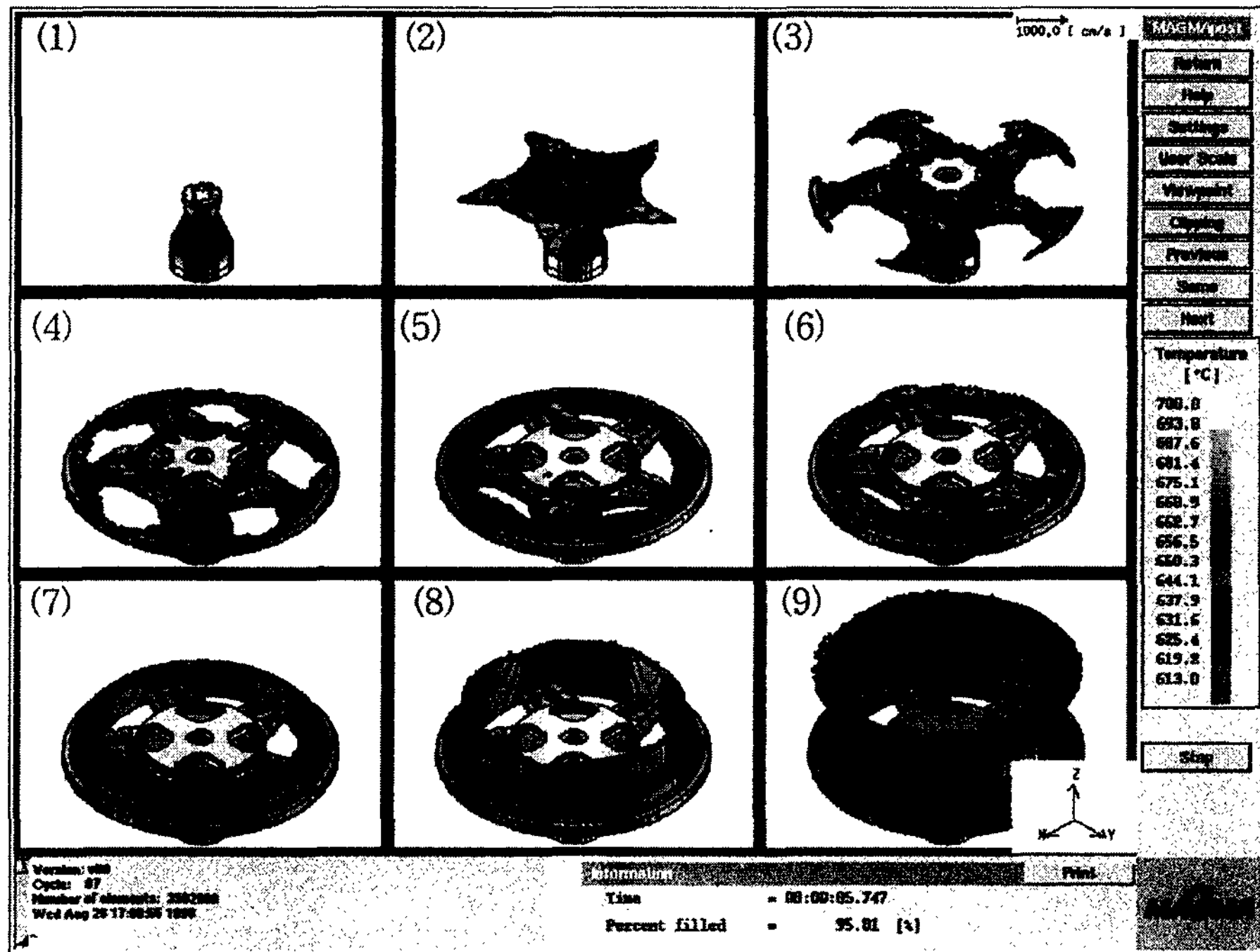


Fig. 4. Sequences of mold filling in low-pressure die casting.

도달되기전 충전압력이 P1에서 P2로 증가되며 Fig. 6은 각 부위의 용탕충진시간을 나타내고 있다.

화살표로 나타낸 부위에서 용탕이 솟구치는 난류가 발생되어 기포결함의 발생가능성이 높다고 판단되며

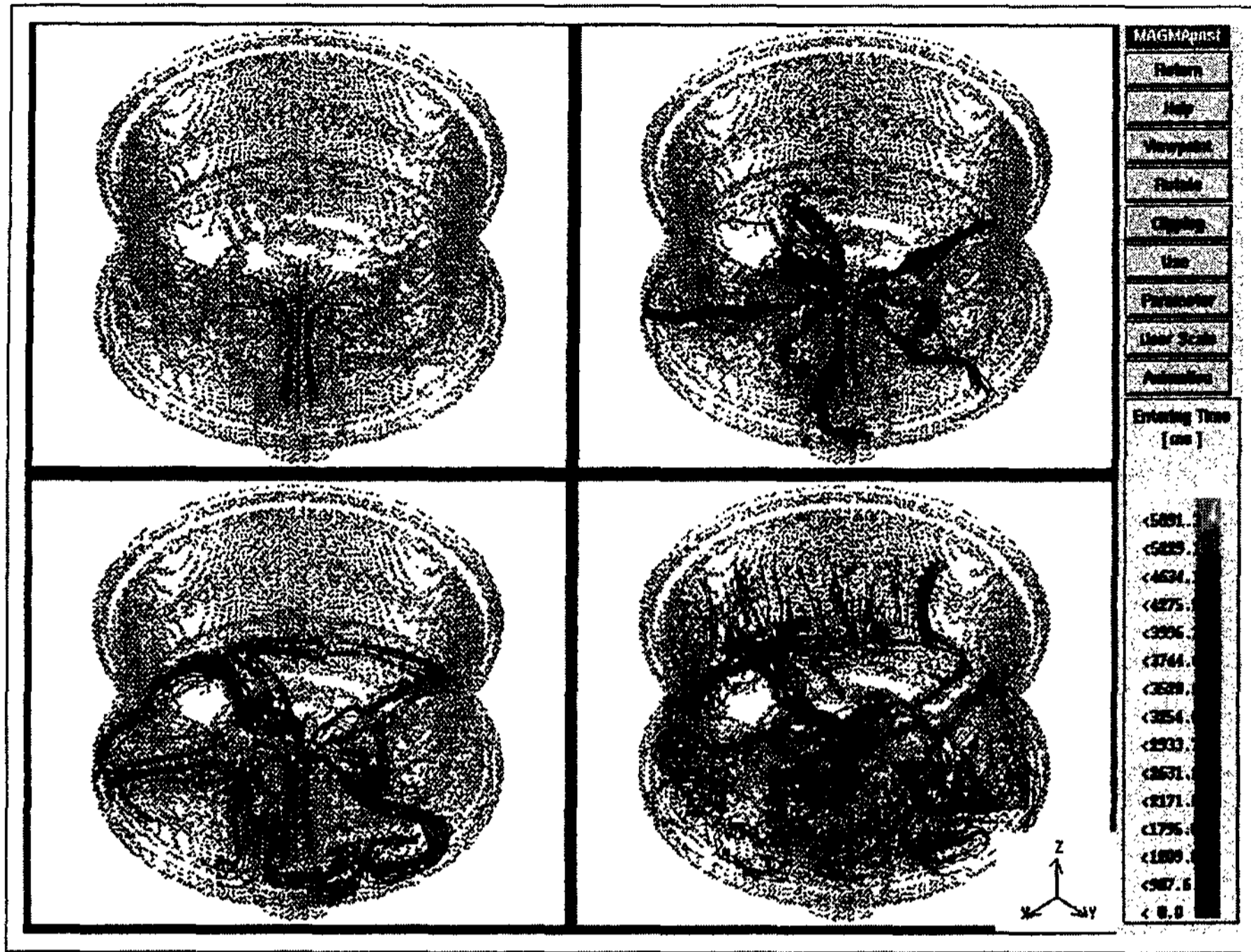


Fig. 5. Sequences of mold filling tracked by tracer particle.

이를 제거하기 위해서는 충전압력 P2를 감소시켜 용탕의 유입속도를 느리게 할 필요가 있다고 여겨진다.

3.3 응고해석

응고의 점진적 진행과정이 Fig. 7에, 그리고 각 부위의 응고완료시간이 Fig. 8에 나타나 있다.

응고는 flange 상부에서 시작되어 stalk쪽으로 지향성응고를 하고 있으며 최종적으로 hub가 응고됨을 알

수 있다. flange 상부의 응고완료시간이 52초 그리고 hub가 200초로 가장 늦다. 또한 고액 공존영역의 응고완료시간이 Fig. 9에 나타나 있는데 비록 flange 상부에서 hub쪽으로 지향성응고가 이루어 지지만 화살표로 표시된 부위에서 폐곡선이 발생되어 응고수축결함에 예측된다.

Fig. 10은 feeding을 응고수축결함의 발생판단으로 한 것이다. 이 feeding이란 인자는 각 차분요소의 상대 밀도를 나타내는 값으로서 주물이 건전한 경우 100%, 수축공과 같이 비어있는 요소는 0%로 표시되며 그 사이의 값들은 수축공의 발생정도를 평가하는데 사용되며 그 수치가 낮을수록 수축공의 발생확률이 높음을 의미한다. 따라서 Fig. 9에서 화살표로 예측된 hub내의 폐곡선부와 결함발생위치가 잘 일치함을 알 수 있다.

3.4 금형의 온도분포해석

주조공정에서 금형의 온도분포가 Fig. 11 및 12에 나타나 있다.

Fig. 11은 금형에서 제품이 취출될 때의 상부, 하부 및 측면금형의 온도분포로서 stalk, stalk의 접점부 및 hub가 높은 온도분포를 나타내며 이로 인해 Figs. 9 및

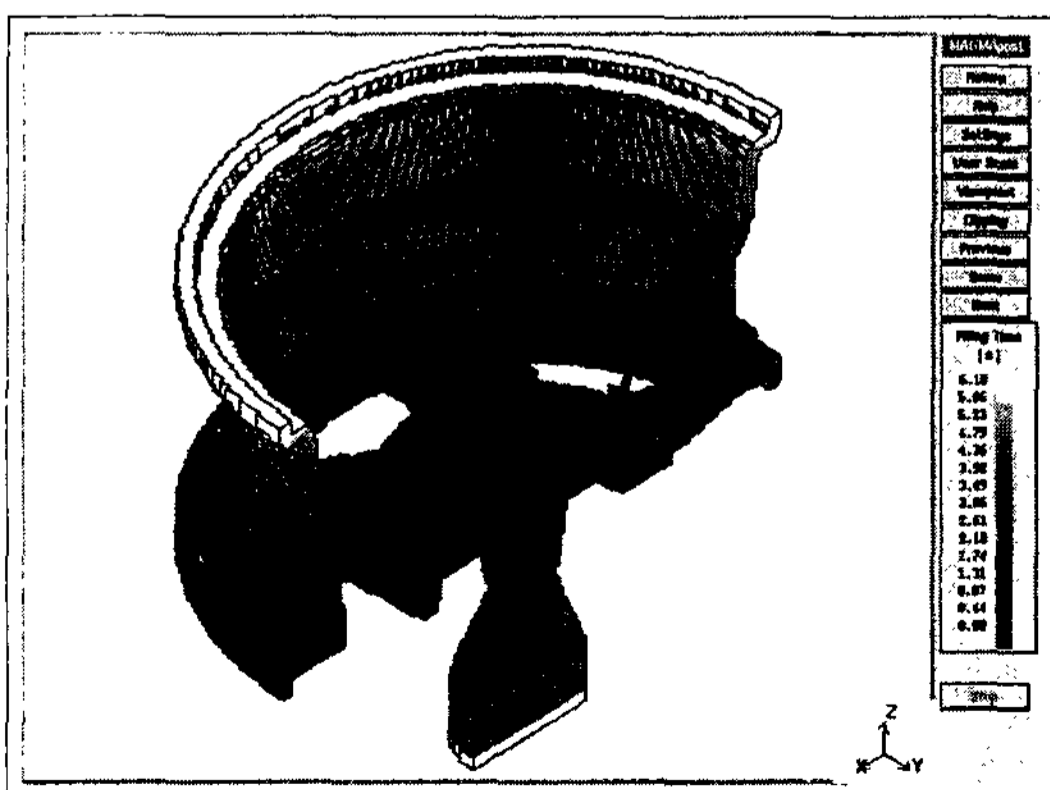


Fig. 6. Simulation of mold filling time.

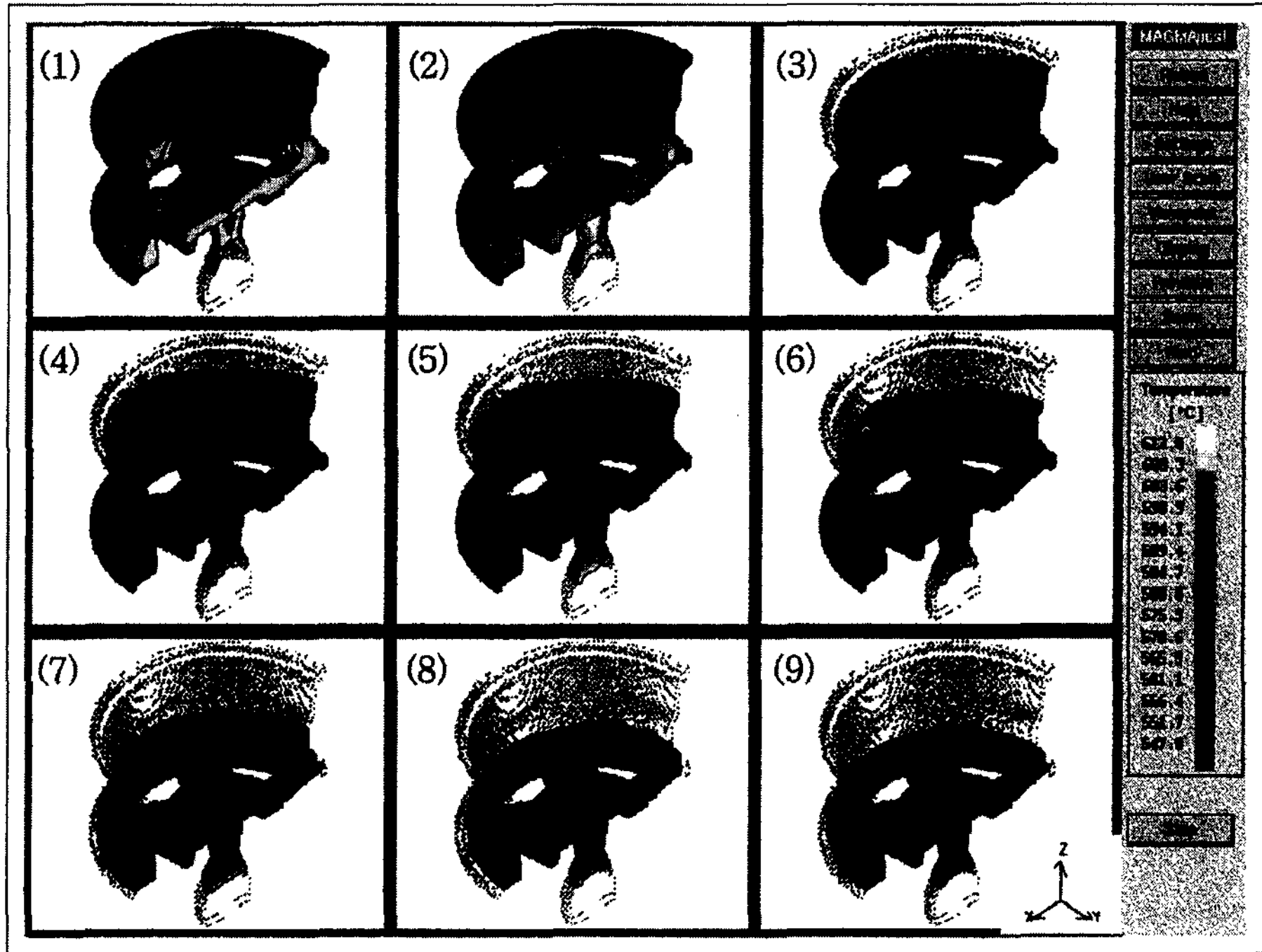


Fig. 7. Sequences of solidification in low pressure die casting.

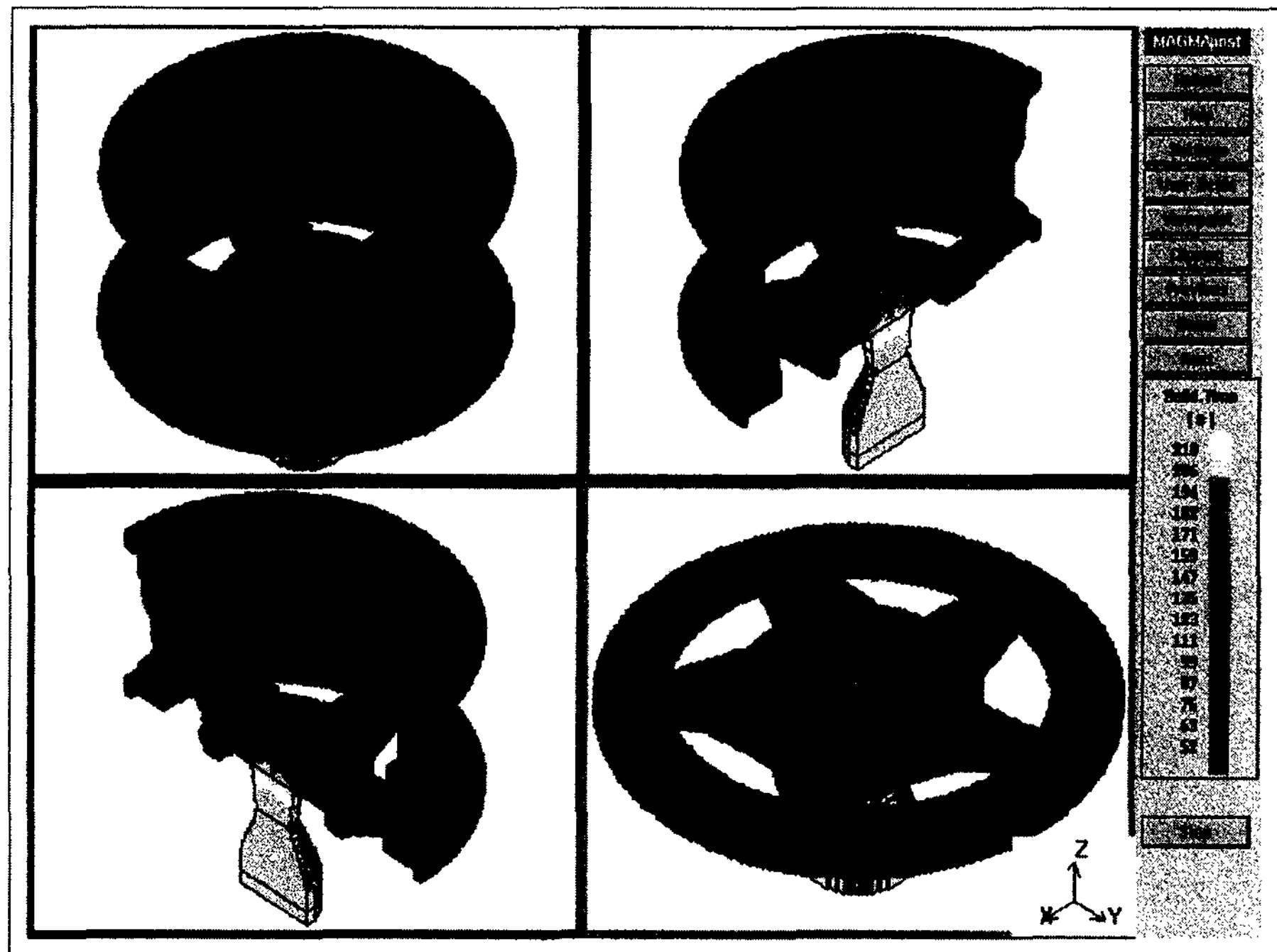


Fig. 8. Shrinkage defects predicted by solidification time.

10에서 예측된 바와 같이 응고완료후 제품내에 수축 공이 발생될 것으로 예측된다. Fig. 12는 용탕이 주입 되기 직전 금형이 닫힌 후의 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 11의 제품취출시에 비해 대기중으로 열발산

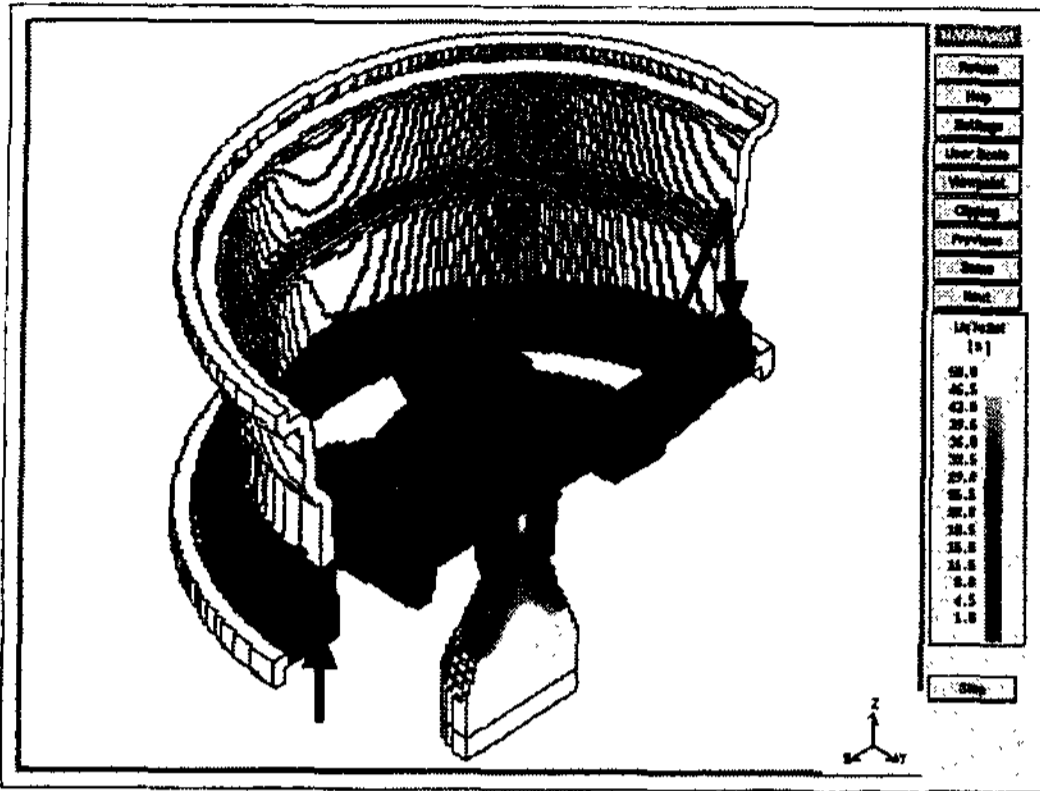


Fig. 9. Solidification time of mushy zone.

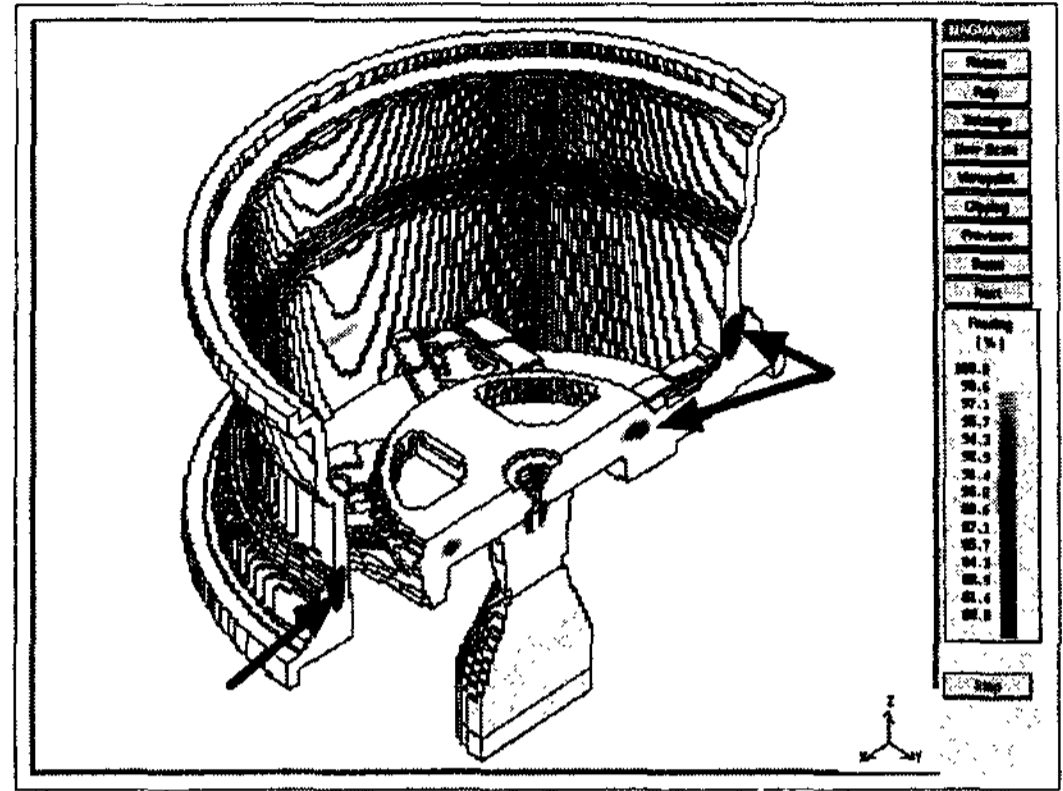


Fig. 10. Shrinkage defects predicted by feeding criterion.

에 의해 온도가 저하되고 있으나 아직 stalk부위 및 hub가 500°C 이상의 고온을 나타내고 있다. 그러나 stalk는 과도한 냉각능에 의해 금형의 온도저하가 큼을 알 수 있다. 따라서 수축공의 발생을 방지하기 위해서는 현행 냉각방안의 수정이 필요하다고 판단된다. 즉 stalk부위에 경사지게 설치되어 있는 cooling channel을 금형에 수직되게 설치하여 열집중현상을 방지하여야 하며 stalk부위의 냉각능을 감소시킬 필요가 있다고 여겨진다.

4. 결 론

범용해석코드인 MAGMA를 이용하여 저압주조법에 의한 Al wheel의 유동 및 응고해석을 행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 금형의 열적인 안정조건은 주입온도 700°C, 초기 금형의 예열온도를 400°C로 하였을 경우 6 cycle부터 이루어 지는 것으로 평가되었다.
- 2) 용탕충진을 위한 P1에서 P2로의 가압변경은 hub

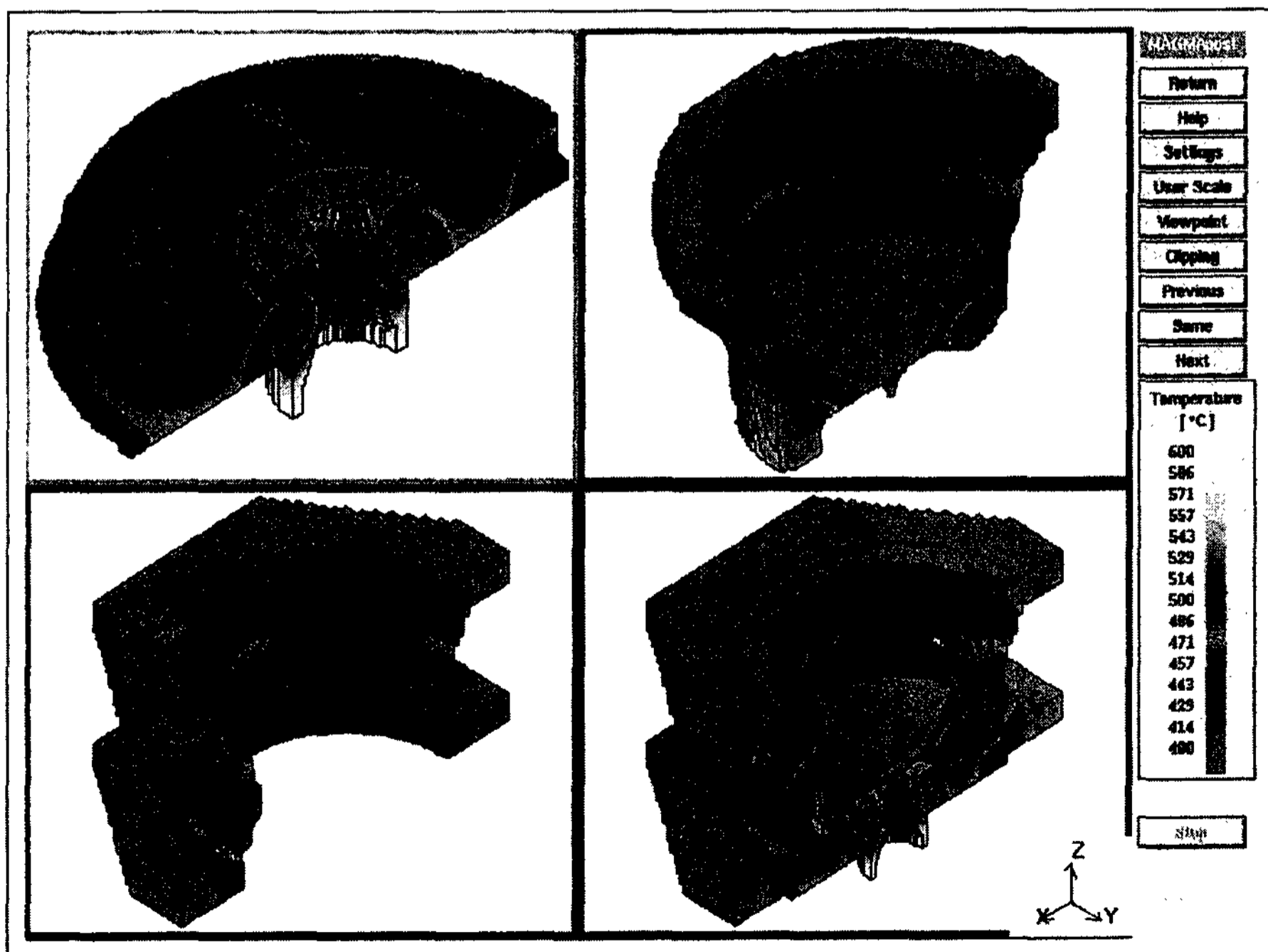


Fig. 11. Temperature distribution of molds when die opens.

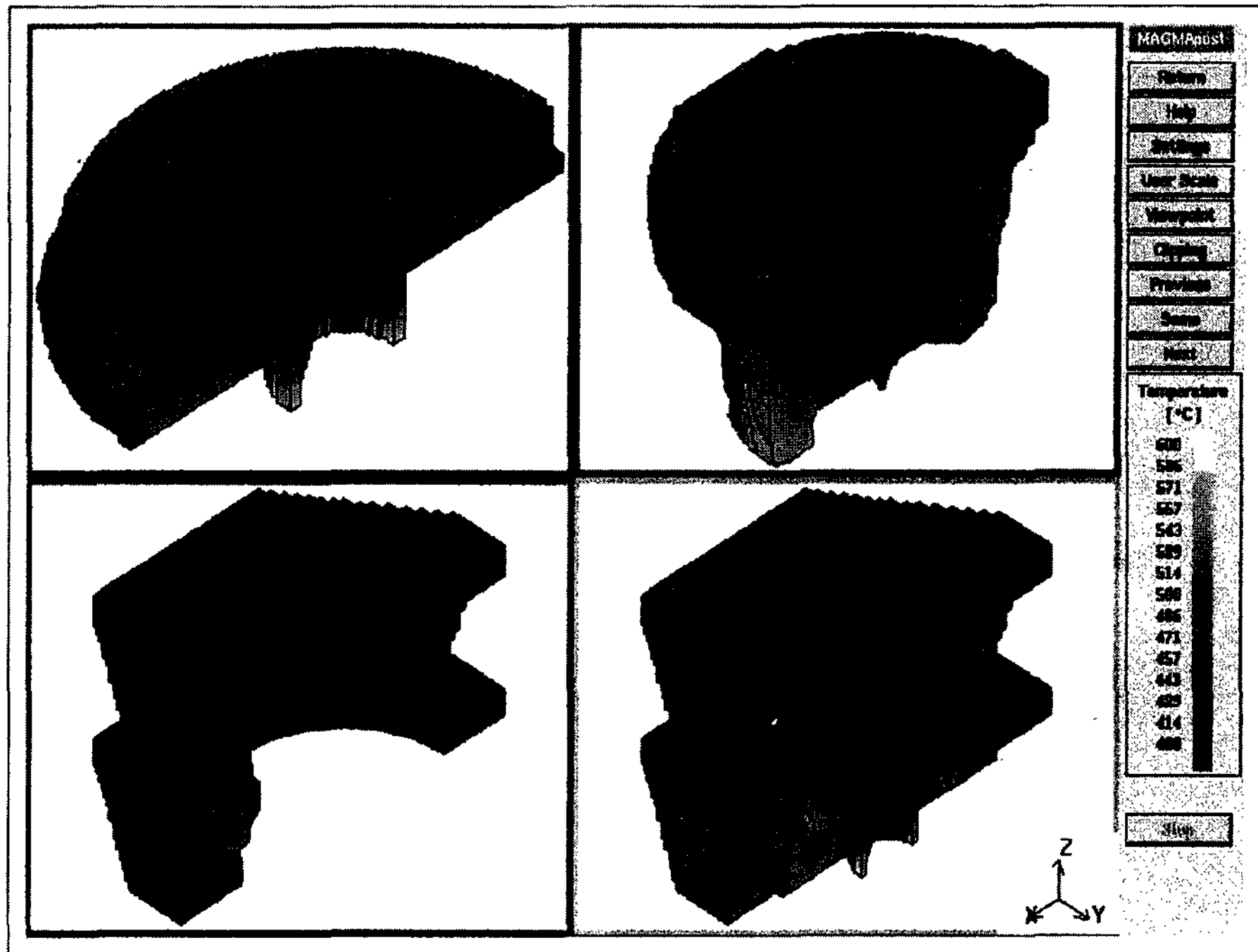


Fig. 12. Temperature distribution of molds when second cycle starts.

부의 난류발생을 일으켜 P2를 감압시킬 필요가 있으며 용탕 충전시간은 약 6초로 나타났다. 또한 tracer particle을 이용하여 용탕충진의 경로를 추적한 결과 추가적인 vent의 필요성 및 그 설정위치가 예측되었다.

3) 응고해석을 통하여 예측된 주물의 수축결함은 금형내의 온도차이에 기인하고 있음을 확인할 수 있었으며 이는 cooling channel의 변경에 의해 제어가 가능할 것으로 여겨진다.

후 기

1. 본 연구는 1998년도 한국과학재단지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 연구기금으로 수행되었습니다.

2. 본 연구의 MAGMA 응고해석에 도움을 준 ATES의 이 재경 과장 및 최 재권 주임에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김종근 : 산업과학기술연구소보고집, (1994) 2.
- [2] B. P. Winter, T. R. Ostrom, T. A. Sleder, P. K. Trojan and R. D. Phelke : CARA87, (1987) 33.
- [3] J. Dillingham, C. W. Ramsay and D. R. Askeland : AFS TRANS, 104 (1996) 1079.
- [4] S. Morimoto, N. Ohnishi and S. Okada : CARA87, (1987) 25.
- [5] P. R. Sahm, M. Achten, T. Zeuner and P. Stojanov : AFS TRANS, 104 (1996) 1103.