

論 文

실린더 라이너 주조공정에 대한 충전 및 응고해석[†]

김정훈 · 김창희[†]

Filling and Solidification Analysis for the Casting Process of Cylinder Liner

Jung-Hoon Kim and Chang-Hee Kim[†]

Abstract

Computer simulation of mold filling and solidification has been performed in order to analyze the flow and solidification phenomena for the casting process of cylinder liner. The simulation result of mold filling shows that the molten metal flows into the mold in stable without scattering. The simulation results of solidification indicate that the last solidified area is located in the feeder. The temperature variation in casting is measured in actual casting and the result is compared with calculation result.

Key words : Cylinder Liner, Casting Process, Mold Filling, Solidification.

(Received May 26, 2004 ; Accepted August 6, 2004)

1. 서 론

주조공정에 있어서 건전한 주조품을 얻기 위해서는 공기 및 가스의 포집, 재료물의 혼입 등과 같은 주조 결함이 발생하지 않도록 탕도계, 압탕 및 주형에 대해 적절한 방안설계가 이루어져야 한다. 적절한 주조방안을 도출하기 위해 실제 주조에 의한 시행착오법에 의존할 경우 시간과 비용이 많이 소요될 뿐만 아니라, 주조방안 도출 과정에 대한 정량화 및 향후 방안 개선에 필요한 기술의 표준화가 극히 어렵다. 특히 대형 저속 디젤엔진에 사용되는 주조 부품의 경우 그 단위 중량이 크므로 주조 실패에 따른 비용 손실이 막대하게 된다. 따라서 이러한 시행착오법을 대체할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 주조해석 기술이 발달되어 져 왔으며, 국내에서도 업계 및 학계에서 해석 프로그램 개발 또는 상용 해석 프로그램의 활용이 각광받고 있는 추세이다[1-7].

용탕의 충전해석을 통하여 탕도계 및 주형 내에서의

용탕의 흐름을 파악하여 적절한 탕도계를 도출할 수 있게 되며, 응고해석을 통해서는 수축공 등의 발생위치를 예측할 수 있어 압탕 크기 및 냉금 배치 등 주물의 열전달에 미치는 인자의 영향을 고려한 방안설계가 가능하게 된다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 대형 저속 디젤엔진의 핵심 부품 중의 하나인 실린더 라이너의 사형주조 공정에 대해 충전 및 응고해석을 수행하였으며, Fig. 2에 나타내어져 있는 것과 같은 실제 제품의 시험주조 시온도측정을 통해 해석결과와 비교하였다. 해석에 있어 세 종류의 엔진에 적용되는 실린더 라이너들을 그 대상으로 하였다.

2. 해석 전처리

2.1 솔리드 모델링 및 격자 생성

해석대상인 실린더 라이너 소재부, 압탕부, 탕도계 및 주형에 대한 3차원 솔리드 모델링은 MAGMAs oft

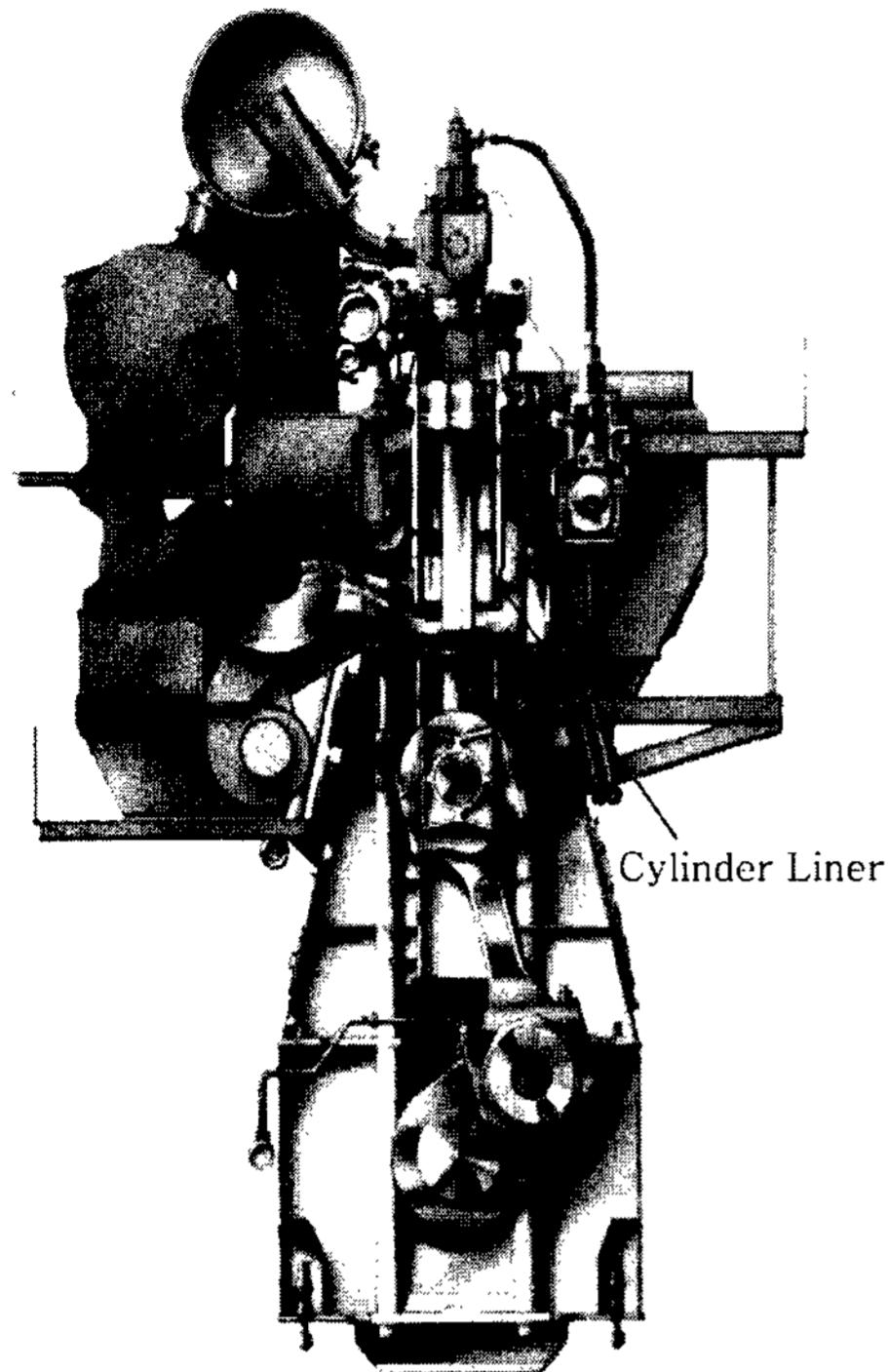


Fig. 1. Cross-section of a low-speed two-stroke diesel engine.



Fig. 2. Cylinder liner casting.

의 3차원 모델러인 MAGMApre를 이용하여 모델링하였다. 실린더 라이너 소재부의 부분적인 곡면에 대해서는 CATIA를 사용하여 모델링한 후 STL 파일형식으로 변환하여 MAGMApre에서 불러들여 곡면위치에 대한 정보를 활용하였다. 대형 실린더 라이너의 경우 그 크기를 고려해 볼 때, 충전 및 응고해석에 필요한 격자 수가 매우 많이 요구되므로, 해석대상에 대한 전체

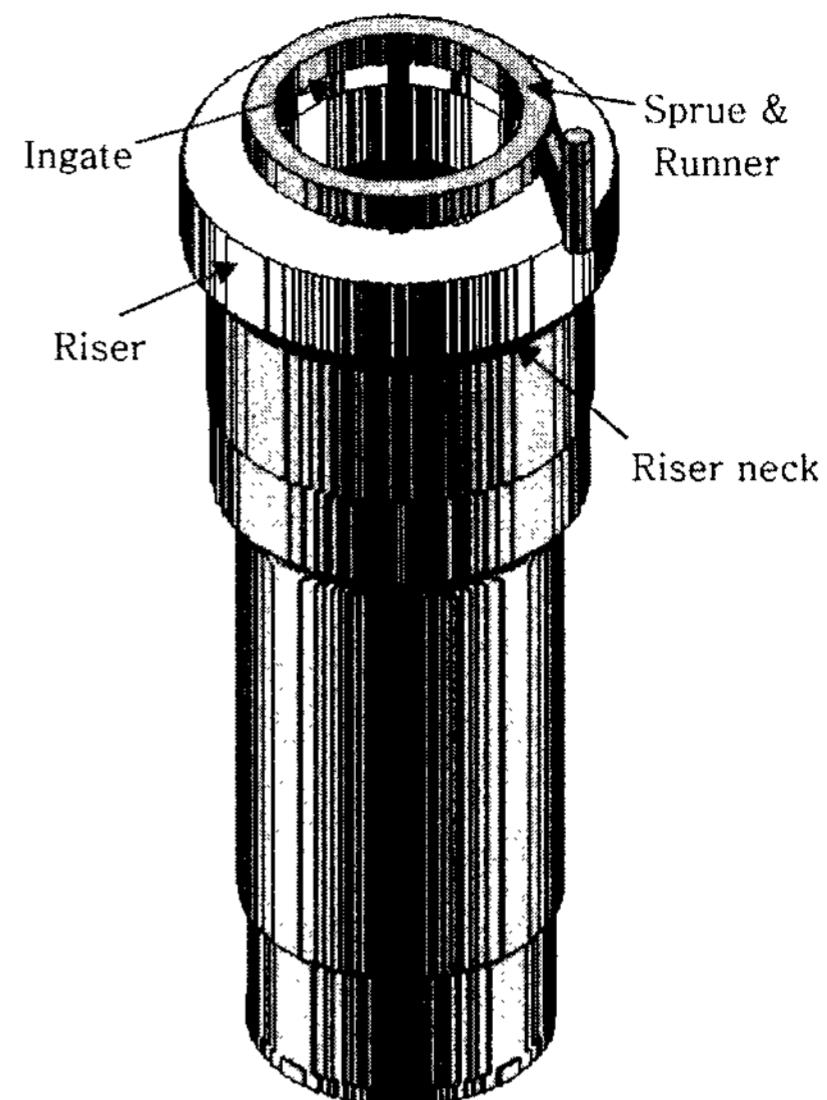


Fig. 3. Solid modeling of the casting for A-type engine.

모델링을 MAGMApre 내에서 완성함으로써 이후 어지게 되는 격자 수를 줄일 수 있게 하였다. 소형 부품의 경우 복잡한 곡면에 대한 모델링을 CATIA 등을 이용해 모델링한 후 STL 파일형식으로 변환하여 MAGMApre의 인터페이스 기능을 이용하여 솔리드 데이터를 만들어 활용할 수 있으나, 실린더 라이너와 같은 대형 부품의 경우에 이 기능을 이용하여 솔리드 데이터를 만들 경우 격자 수가 급격히 증가하여 해석이 불가능하게 될 우려가 크다. 해석대상 중 용탕으로 채워지는 부분에 대한 모델링 결과를 Fig. 3, 7 및 11에 각각 나타내었다. Fig. 3은 A기종 엔진에 적용되는 실린더 라이너에 대한 것이며, Fig. 7 및 11은 B 및 C 기종에 적용되는 것으로, 완제품의 경우 그 중량이 4~6톤에 달한다.

격자생성에 있어 유한체적법(Finite Volume Method)에 의해 분할하였다. Fig. 3의 경우에는 주형을 포함하여 전체 계산영역에 대해서 약 986만개 격자, 용탕으로 채워지는 부분에 대해서는 137만개의 격자를 만들었다.

2.2 해석조건 설정

해석에 사용된 대표적인 물성치는 Table 1에 나타내어져 있다. 주물의 재질은 FC25 계열이며, 주형은 furan주형이다. A기종에 대한 용탕의 주입온도는 $1,340^{\circ}\text{C}$ 이며, B기종 및 C기종에 대한 용탕의 초기온

Table 1. Physical properties used in the calculation.

Material	Cast metal	Mold
	1,340(A)	
Initial temp (°C)	1,290(B)	25
	1,330(C)	
Latent heat (KJ/kg)	215	-
Liquidus temp (°C)	1,190	-
Solidus temp (°C)	1,140	-

도는 각각 $1,290^{\circ}\text{C}$, $1,330^{\circ}\text{C}$ 이다. 주형의 초기온도는 25°C 로 설정하였다. 비열, 밀도, 열전도도 및 용탕과 주형간의 열전달계수는 온도에 따라 변화되는 값을 설정하였다. 충전해석에 필요한 용탕의 주입조건은 주형으로부터 레이들까지의 높이에 의한 압력값을 기준으로 하였다.

3. 충전해석

용탕이 탕도계 및 주입구를 통해 원활히 주입되는지를 확인하기 위하여 충전해석을 수행하였으며, A기종에 적용되는 실린더 라이너를 대상으로 하였다.

본 해석대상에 사용된 주입구는 샤워게이트의 형태로 되어 있으며, 원주방향으로 12개의 주입구를 통해 용탕이 주형으로 주입되는 것으로 구성되어 있다.

Fig. 4에 실린더 라이너 주조공정에 대한 충전해석 결과를 나타내었다. 충전해석을 통해 용탕은 탕도계를 지나 주입구를 채우면서 주형으로 충전되고 있으며, 용탕이 비산되지 않고 중자 벽면을 타고 흘러내리는 안정된 충전양상을 보이는 것으로 확인되었다.

따라서, 충전해석을 통하여 실린더 라이너 주조공정에 사용된 탕도계가 적정하게 배치된 것으로 판단된다.

4. 응고해석

A기종에 적용되는 실린더 라이너에 대해 충전해석에 연이어서 응고해석을 수행하였으며 해석결과는 다음과 같다.

Fig. 5는 응고 중의 잔류액상 분포를 나타낸 것으로 최종 응고부위가 압탕부위에 존재함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 압탕이 가장 늦게 응고되면서 제품부분에 충분히 급탕이 되고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 응고완료시간 분포를 나타낸 것으로, 순차적인 응고가 일어나며 국부적인 응고지체영역이 발생

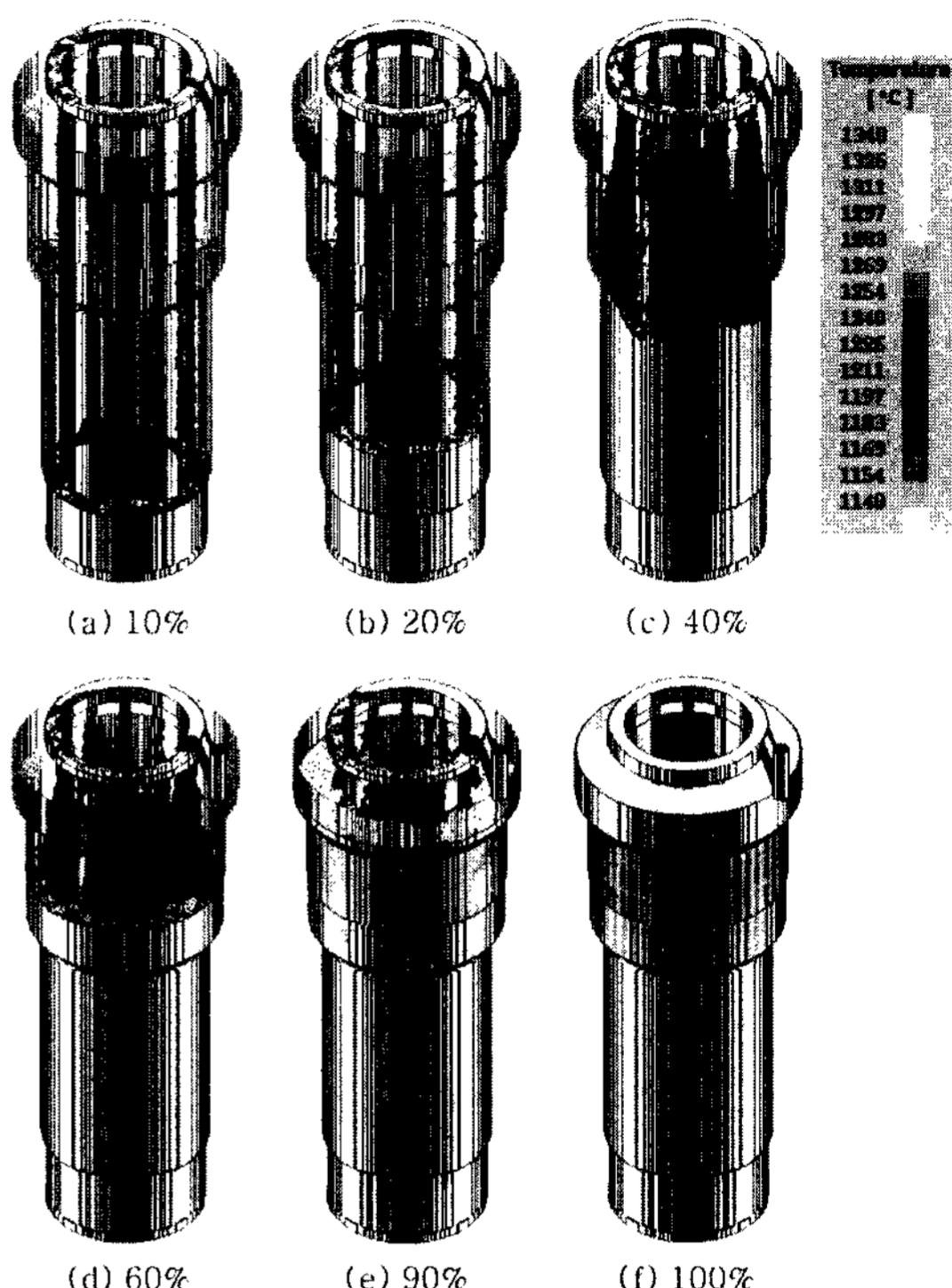


Fig. 4. Calculated filling sequence of the cylinder liner casting.

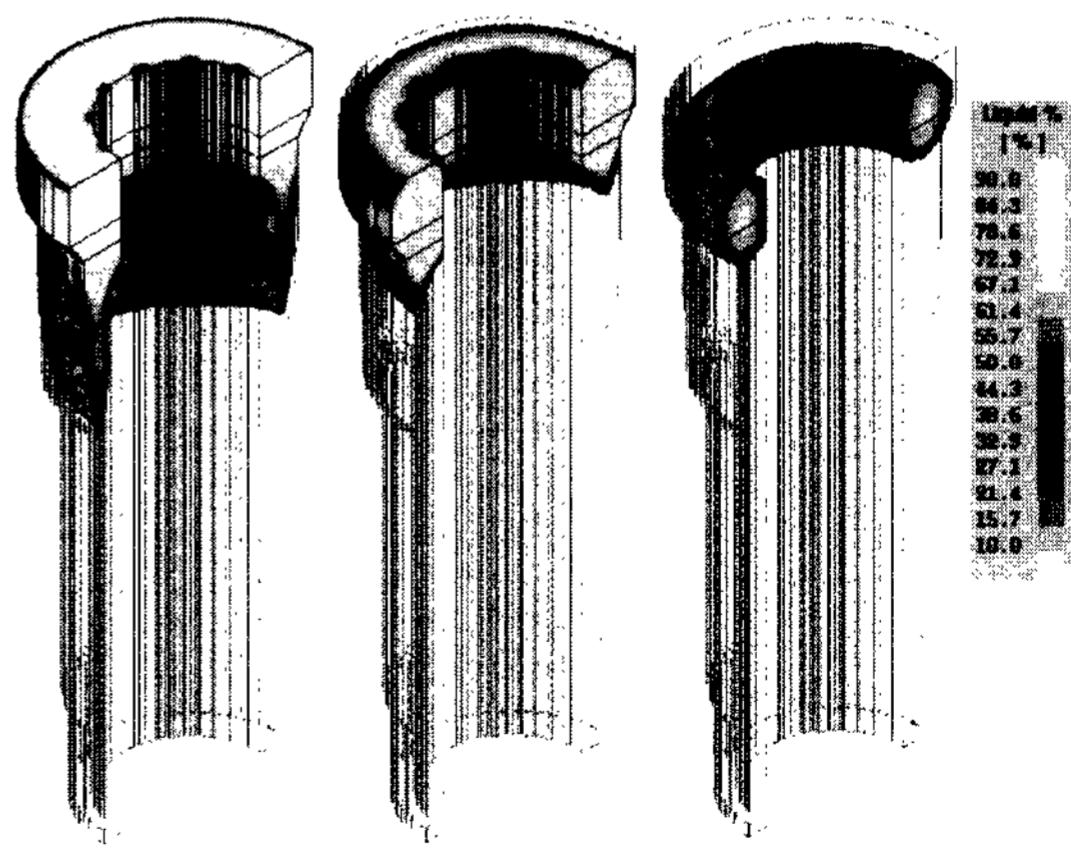


Fig. 5. Solidification sequence of the casting.

하지 않는 것으로 확인되었다.

B기종에 적용되는 실린더 라이너의 경우 응고해석만 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

Fig. 8은 90% 응고완료시의 온도분포를 나타낸 것으로, 소재 하단부로부터 압탕쪽으로 순차적인 응고가 잘

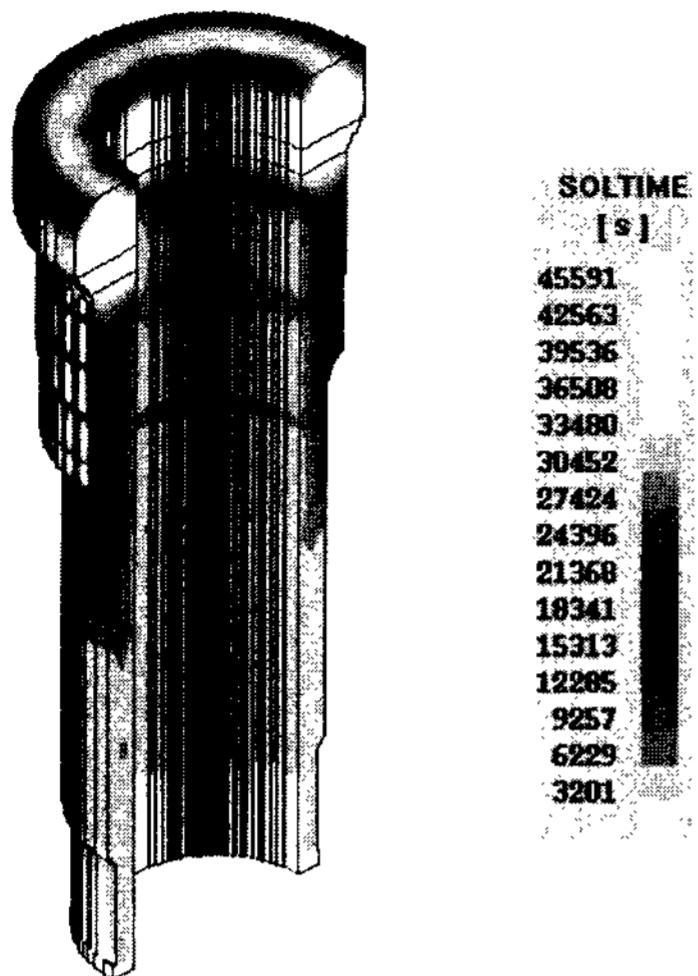
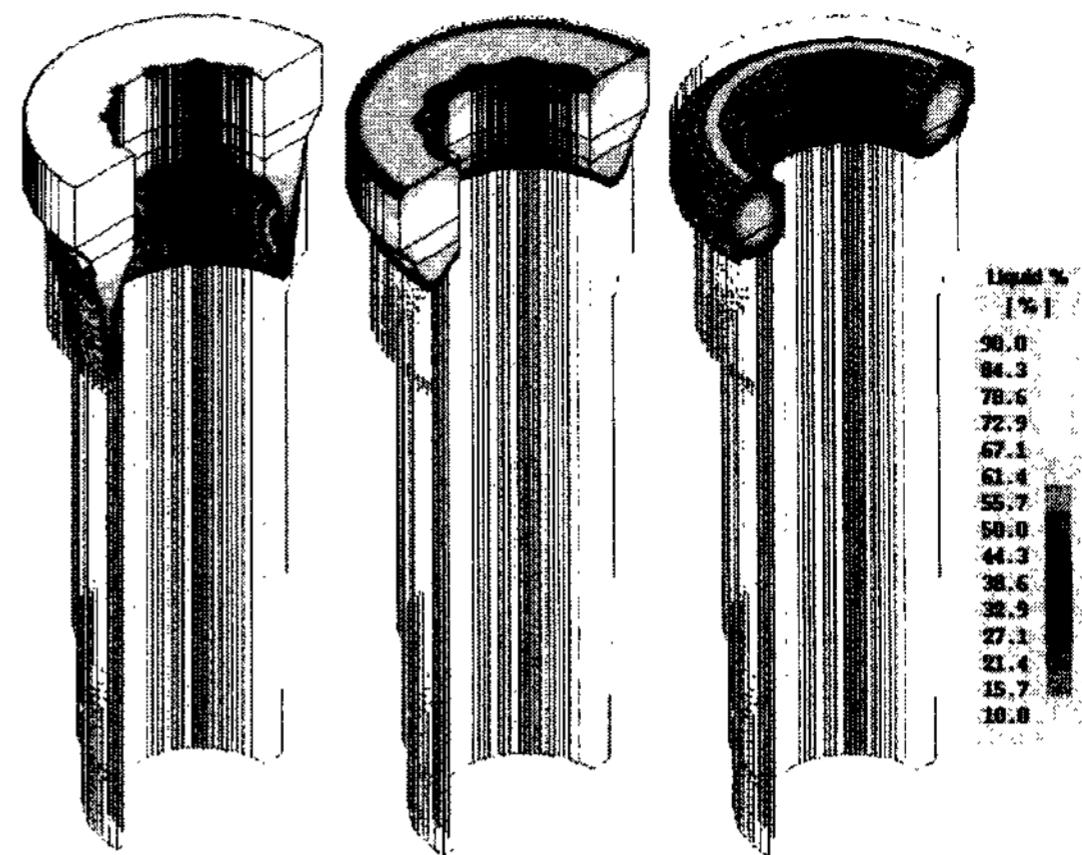


Fig. 6. Solidification time distribution.



(a) 70% solidified (b) 80% solidified (c) 90% solidified

Fig. 9. Solidification sequence of the casting.

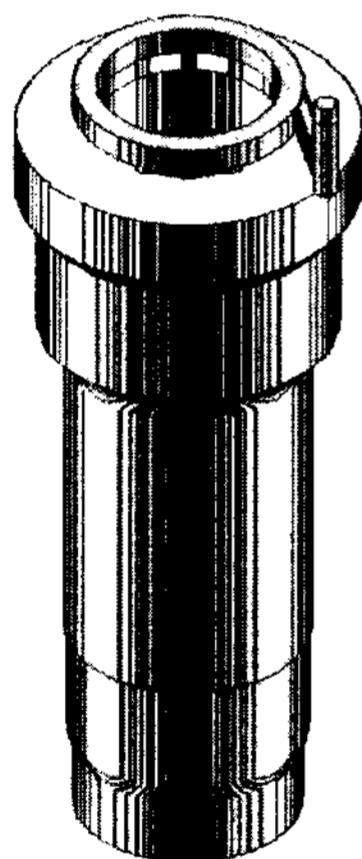


Fig. 7. Solid modeling of the casting for B-type engine.

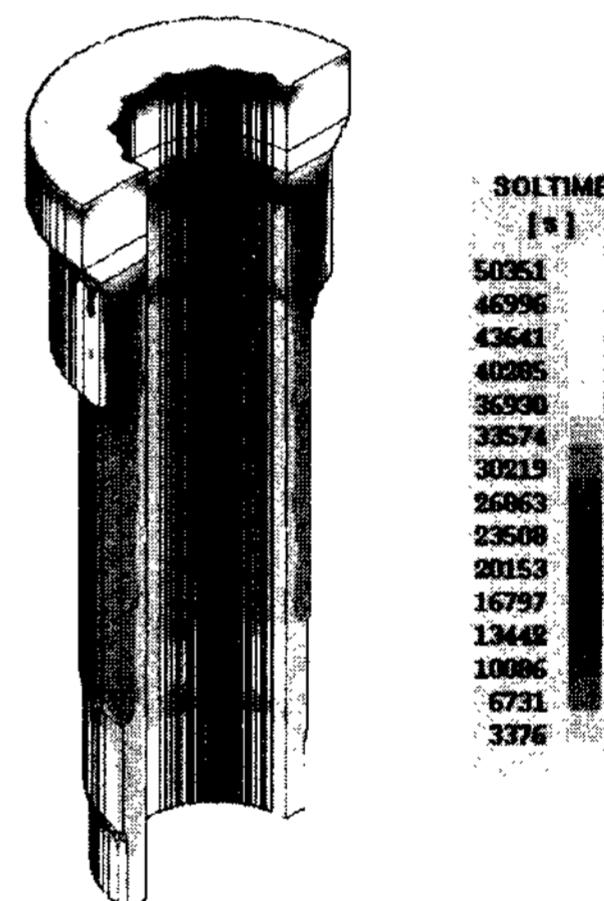


Fig. 10. Solidification time distribution.

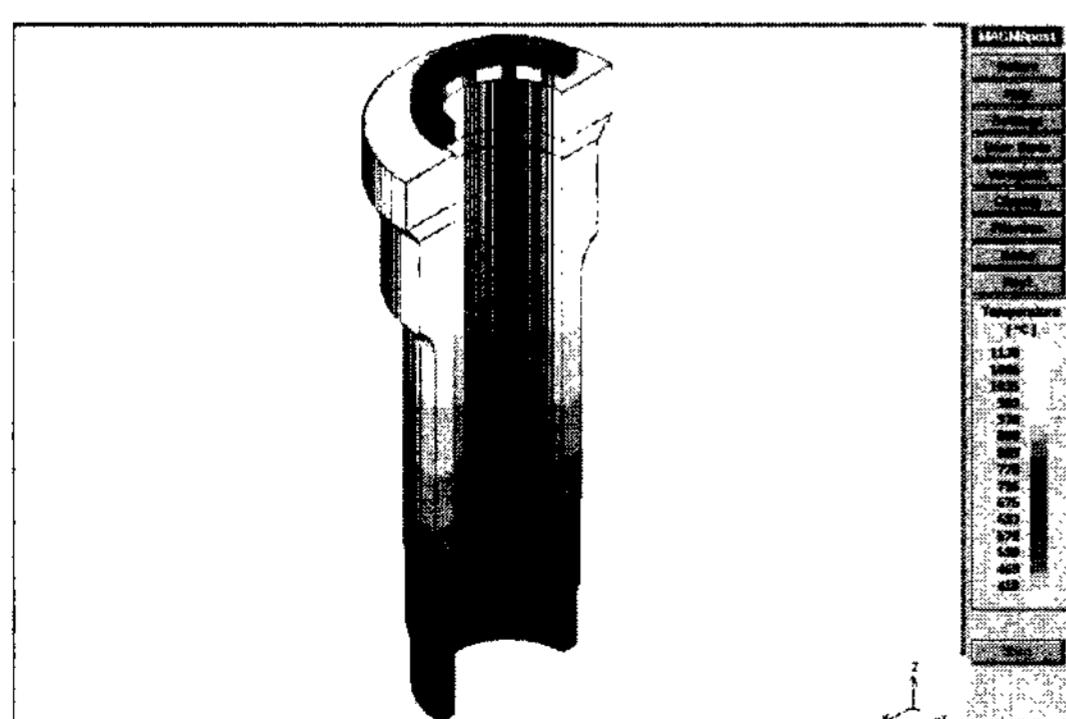


Fig. 8. Calculated temperature distribution of casting at 90% solidified.

이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 응고 중의 잔류액상 분포를, Fig. 10은 응고완료시간 분포를 나타낸 것으로 A기종의 경우와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

C기종에 대해서는 주조방안 변화에 따른 영향을 파악하기 위해 응고해석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

주조방안(I)에 비해 주조방안(II)은 압탕의 크기를 증가시키고 압탕 외측 냉금의 크기를 감소시킨 것이다. Fig. 12는 응고완료시간 분포를 나타낸 것으로, 주조방안(I)의 경우 주조방안(II)에 비해 압탕 크기가 작으므로 응고완료시간이 적게 걸리는 것으로 나타나고 있으

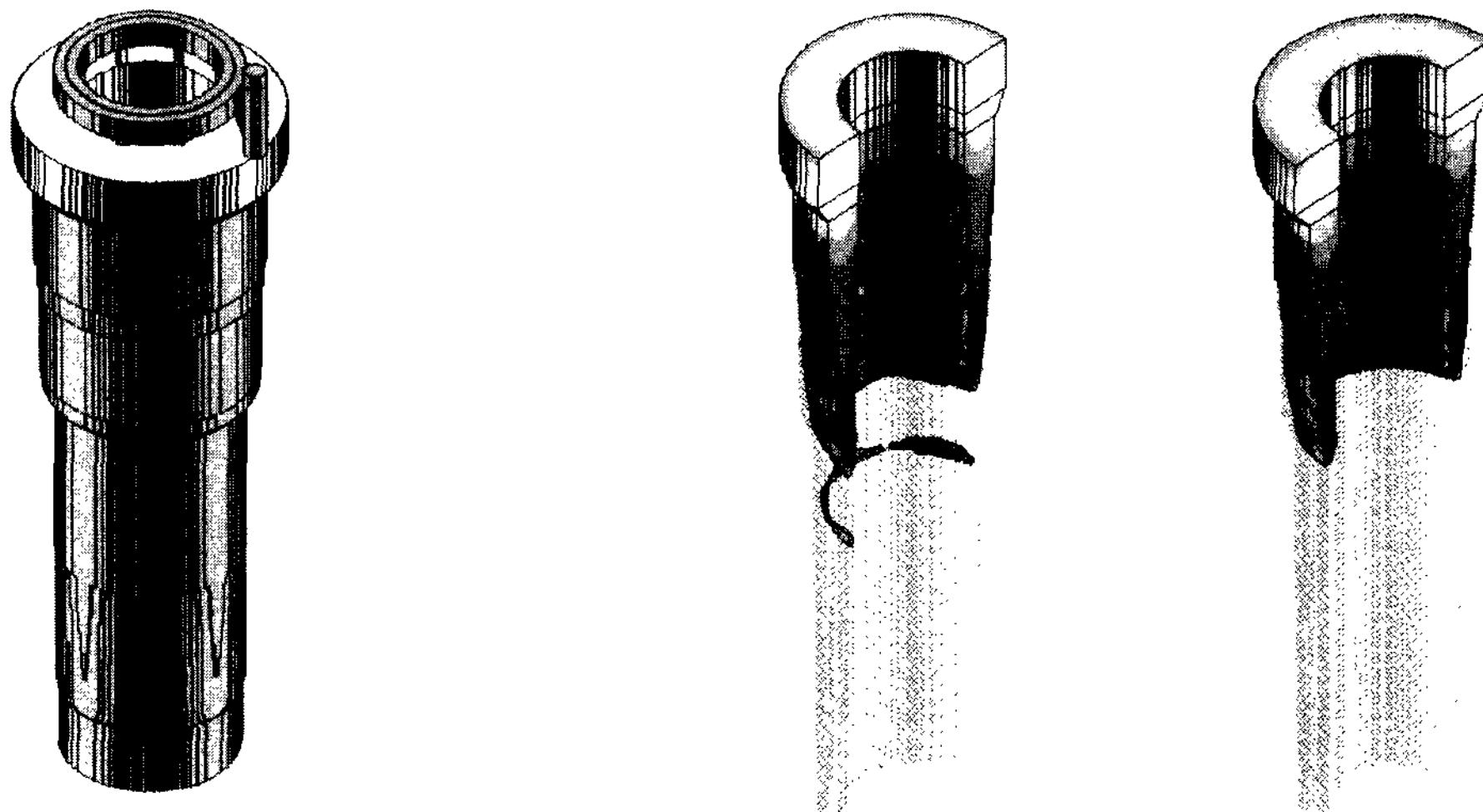
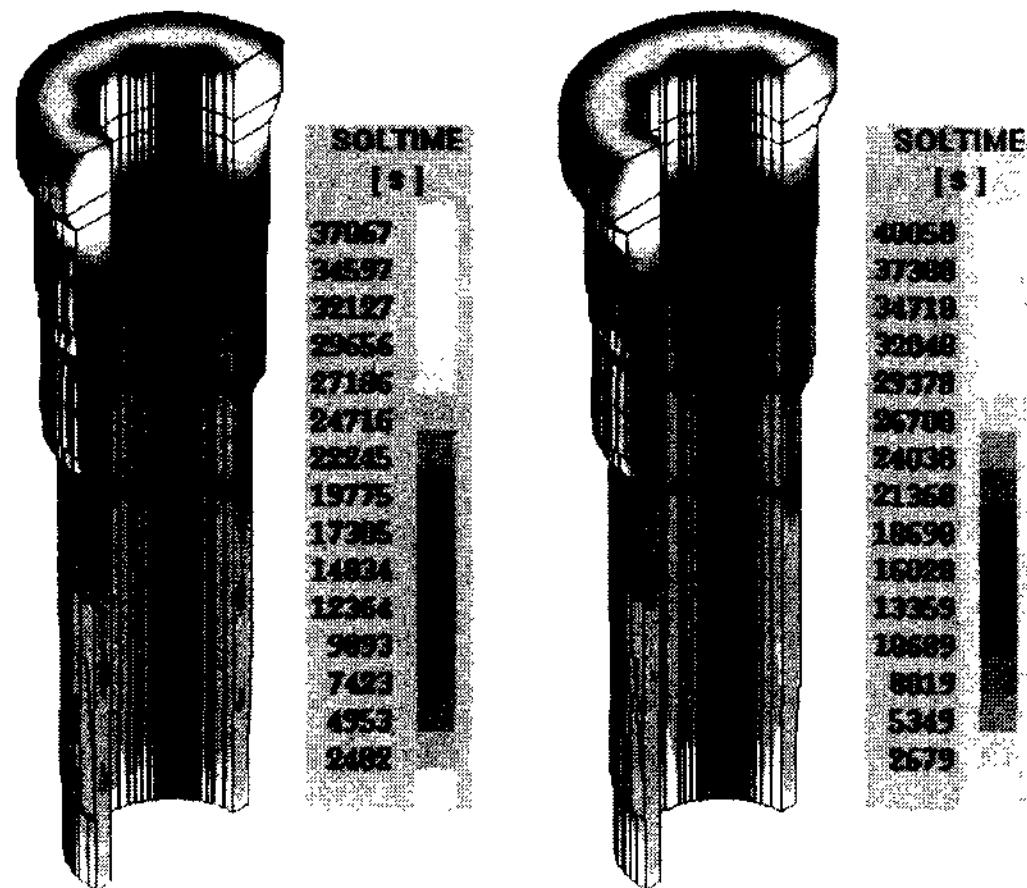


Fig. 11. Solid modeling of the casting for C-type engine.

(a) Casting design(I) (b) Casting design(II)

Fig. 13. Liquid melt after 60% solidified.



(a) Casting design(I)

(b) Casting design(II)

Fig. 12. Solidification time distribution.

나, 국부적으로 고립된 응고자체구간이 존재하므로 수축공에 의한 불량 발생 가능성이 있을 것으로 파악되었다.

Fig. 13은 60% 응고완료시의 잔류액상 분포를 나타낸 것으로, 주조방안(II)의 경우가 수축공 발생 가능성 이 적은 것으로 판단된다.

A 및 B기종에 대한 해석결과, 응고시의 온도분포, 잔류액상분포 및 응고완료시간 분포를 통해 실린더 라이너 주조공정에 사용된 주조방안은 적합한 것으로 판단된다. 또한 C기종에 해석을 통해 압탕 크기, 냉금 크기 및 위치, 소재두께 등의 주조방안 변화 필요시

사전에 주조해석을 통해 적정 주조방안 설계가 가능함을 알 수 있었다.

5. 해석결과와 측정값의 비교

해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 실제 주조 시 실린더 라이너의 표면온도를 측정하였으며, 이를 해석 결과와 비교하였다.

실린더 라이너의 소재 표면 온도는 K-type 열전대를 사용하여 측정하였으며, 기록계를 이용하여 실시간 확인 및 온도 데이터 저장이 가능토록 하였다.

세 기종에 대한 소재 표면온도 측정값과 계산결과값을 비교한 것을 Fig. 14~16에 나타내었다. 공석변태점 (690°C)에 도달하기까지의 경향은 계산결과값과 측정값이 유사하나, 약 50°C 내외의 온도차가 있었다. 전체 측정구간에 걸쳐 온도차이를 보이는 것은 대형 주물품에 있어서의 주물과 주형간의 air gap 발생에 따른 영향을 계면 열전달계수가 충분히 반영하지 못하고 있는 것으로 사료된다. 또한 중자 내부의 강제냉각 효과를 충분히 반영하지 못한 것도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. B 및 C기종의 경우에 있어서는 유동에 의한 열전달이 고려되지 않은 것도 추가적으로 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 해석에 의한 냉각곡선과 측정에 의한 온도변화 곡선을 비교해 본 결과, 해석에

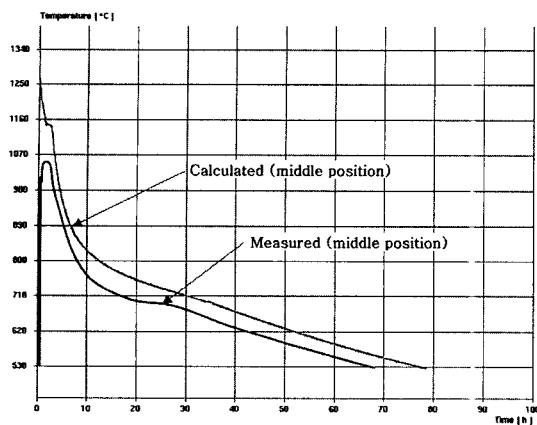


Fig. 14. Comparison of calculated and measured temperature profile for A-type casting.

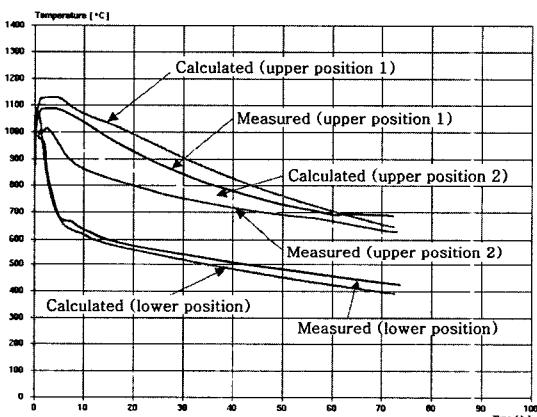


Fig. 15. Comparison of calculated and measured temperature profile for B-type casting.

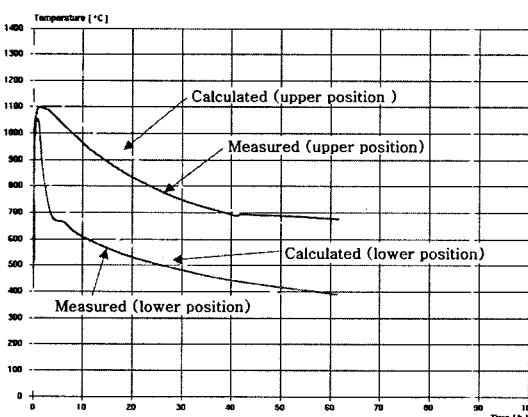


Fig. 16. Comparison of calculated and measured temperature profile for C-type casting.

의해 실제 제품의 냉각곡선의 경향을 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

대형 디젤 엔진에 사용되는 핵심부품 중의 하나인 실린더 라이너의 사형주조 공정에 대해 충전 및 응고해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충전해석 결과, 용탕이 비산되지 않고 중자 벽면을 타고 흘러내리는 안정된 충전양상을 보이는 것으로 확인되었다.

2) 응고해석 결과, 소재 하단부로부터 압탕쪽으로 순차적인 응고가 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있었으며, 최종 응고부위가 압탕부위에 존재함을 확인할 수 있었다.

3) 따라서, 실린더 라이너 주조공정에 사용된 주조방안은 적정한 것으로 판단되었으며, 실제 주조품에 있어서도 주조결함이 발생하지 않는 것이 확인되었다.

4) 또한, 주조방안 변화 필요시 사전에 주조해석을 통해 적정 주조방안 설계가 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. Salcudean and Z. Abdullah : Proc. of the 8th Int. Heat Transfer Conf., "Numerical Simulation of Casting Processes", 2, (1986) 459-464.
- [2] D. D. Goetsch and J. A. Dantzig : Metall. and Mater. Trans., "Modeling Micro-structure Development in Gray Cast Irons", 25A(5), (1994) 1063-1079.
- [3] N. P. Gray and G. C. Coyle : Proc. of the 7th Conf. on Modeling of Casting, Welding and Adv. Solidification Proc., "Verification of Defect and Temperature Predictions for Commercial Software Using a Variable Geometry T-plate Casting", (1995) 849-856.
- [4] J. A. Spim and A. Garcia : Mater. Sci. Eng. (A), "Numerical Analysis of Solidification of Complex Shaped Bodies: Coupling of Mesh Elements of Different Geometries", 277, (2000) 198-205.
- [5] S.-B. Kim and C.-P. Hong : J. Kor. Foundrymen's Soc., "Heat and Fluid Analyses and It's Application to the Design of the Casting Process", 13, (1993) 131-145.
- [6] Y.-C. Lee and J.-K. Choi : J. Kor. Foundrymen's Soc., "The Practical Examples of Removal of Casting Defects by Computer Simulation", 18, (1998) 124-131.
- [7] S.-K. Yu : Kor. J. Mater. Res., "Solidification Simulation of Gray Iron Sheave Product with Consideration of Graphite Precipitation", 9, (1999) 139-143.