

## 대형잉곳 전산모사 결합 정량화 및 활용연구

남궁 정<sup>1#</sup>· 김용찬<sup>1</sup>· 김문철<sup>1</sup>· 윤중목<sup>2</sup>· 채영욱<sup>2</sup>· 이동희<sup>3</sup>· 오상훈<sup>3</sup> · 김남수<sup>4</sup>

### Cast Defect Quantify on the Simulation for Large Steel Ingots and Its Application

J. Namkung, Y. C. Kim, M.C. Kim, J.M Yoon, Y. W. Chae, D. H. Lee, S. H. Oho, N. S. Kim

#### Abstract

Cast defect in large steel ingots are estimated in quality and compared each other cast conditions on simulation results by now. The cast defects, micro-crack, shrinkage, pin hole which are predictable in simulation with a reasonable accuracy. In this study, 15 ton steel ingot casting was simulated for solidification model and cast defect prediction. And the real cast was carried out in a foundry for the compeer to the simulation results, the cast defect prediction. Also, the quantity of predicted defect was tried to measuring with the defect mach counting for the various simulated cast conditions. The defect quantity work was used to find the optimized cast condition in DOE(design of experiment) procedure.

**Key Words:** cast defect, large steel ingot, simulation, cast defect, quantify, application

#### 1. 서 론

최근 주조공정설계 및 제품의 품질향상을 위하여 전산모사기술이 널리 보급되고 있으며 실용적으로 그 활용도가 점차 확대되고 있다. 특히 주조 공정의 주입/응고해석 과정에서 결함예측기능은 그 결과로서 주조방안설계 및 품질관리에 대단히 중요한 요소이며 높은 신뢰도를 필요로 한다. 주조공정중 주입공정에서 발생하는 결함으로서는 탕경, 기포, 산화막 혼입, 슬ラ그 등의 비금속 개 배물의 혼입 등을 들 수 있으며 응고 냉각공정중에 발생하는 결함으로서는 중력 수축공, 분산수축 공, 열간파열, 열간균열, 냉간균열, 냉간파단 등을 그 예로 들 수 있다. 현재 전산모사결과로서 가용한 예측결함의 종류는 후자에 국한되고 있다.

응고공정의 전산모사는 1980년대 초반부터 본격화 되었으며, 결함 예측을 위해 등온도 곡선법, 등고상률 곡선법, 등응고시간 곡선법 등의 폐곡선법과, 온도구배법, Niyama 법 등의 시열적 매개변

수법 등이 개발되었다.

이들 결함 예측방법은 특정 하나의 모델이 모든 주조공정의 경우에 있어서 선택되기 보다는 주제품의 형태 및 주조재의 종류에 따라 보다 계산 예측에 대한 적중률이 높은 경우가 다르므로 주제품 유형에 따라 경험을 통해 선택적으로 활용되고 있다. 형상이 단순하고 응고시간이 긴 대형 잉곳 주조 제품중 일반 합금강 및 탄소강에서의 주로 Niyama 결함 예측 모델을 사용하고 있다.

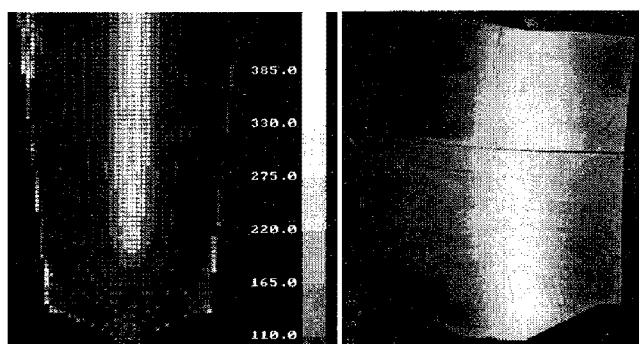


Fig.1. Photos of a predicted casting defect in simulation and real cast defect in the central cross section for an 8 ton steel ingot.

1. 포항산업과학연구원, 비철재련연구단

2. 애니캐스팅

3. 포스코 특수강, 기술연구소

4. 두영산업

# 남궁 정: 포항산업과학연구원, E-mail: namkung@rist.re.kr

**Niyama Defect** 예측모델은 응고해석에서 예측되는 온도 구배가 수축공 생성을 예측하는 방법으로서 수축공을 방지하는데 필요한 임계 온도구배와 응고시간에 관계를 다음과 같이 제안하고 있다.

$$\text{Niyama Parameter} = G/R^{0.5}$$

여기서, G(온도구배)는 응고종료시의 대상요소와 주위요소와의 온도차, R(냉각속도)는 응고 종료 시 시간 충분 동안의 온도변화율을 나타낸다.

그림 1은 SUS304, 8톤 강괴를 대상으로 **Niyama Defect** 예측모델은 사용하여 예측한 결과와 실제 주조된 잉곳의 중심 절개면에 존재하는 결함을 관찰한 예를 보이고 있다.

이러한 결함 전산모사 예측은 비교적 참고할 만한 신뢰도를 가지고 활용되고 있으나 보다 정확한 결함의 예측의 신뢰도 향상이 지속적으로 요구되고 있다. 또한 현재까지 결함예측은 상대비교 및 정성적인 수준에서 사용되고 있었다. 본 연구에서는 15톤 탄소강 잉곳의 전산모사 결함예측 결과와 실제 현장주조실험에 얻어진 잉곳의 내부 결함과의 비교실험을 통하여 예측결과의 신뢰도를 검증하고 예측되는 결함의 정량화 모델화와 그의 활용연구 예를 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 SCM440, 15톤 잉곳 주조실험

본체 중량이 15톤인 SCM440 합금을 압탕비 15%를 적용하고 그림 2와 같은 주조시스템을 형

상모델로 하여 표 1과 같은 공정조건을 적용하여 전산모사와 현장주조 실험을 실시하였다.

전산모사 계산 및 실제 주조에서 몰드 및 상부정반 표면 5mm 깊이에서 온도 센서를 설치하여 실시간 온도변화를 비교 측정하였다.

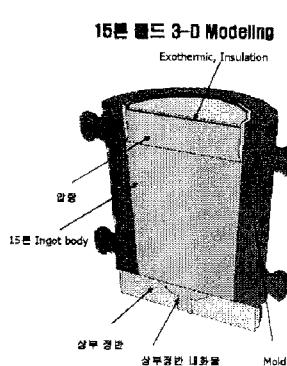


Fig. 2. 3D model of 15 ton ingot cast system.

각각의 온도측정결과는 계산조건과 실제주조 조건의 열전달 조건을 조율하여 결합예측의 신뢰도를 높이는 방법으로 활용 하였다.

Table 1. Ingot casting process conditions

Alloy	Size	Pouring Temp.	Feeding
SCM440	15 ton	1550°C	Bottom

### 2.2 잉곳 결함예측 비교분석 및 정량화

주조된 15톤 잉곳은 중심 단면에 대하여 횡향으로 8등분, 종 방향으로 3등분 하여 전체 24개의 중심단면으로 나누었다. 이를 주편을 절삭가공 및 연마가공을 통하여 경면상태로 하여 표면에 드러나는 macro 주조결함을 관찰하고 전산모사결과에서 예측된 잉곳의 중심단면의 위치와 분포에 대하여 비교 분석하였다. 한편, 주조결함의 정량화는 실제 주조제품에서 관찰되는 결함의 경우 결함의 형상이나 크기가 다양하고 복잡하며 표면으로 드러난 결함 이외의 부분 이외에 다른 결함이 존재 가능성이 높기 때문에 그 부피나 면적을 정량적으로 측정하는 것은 한계가 있다. 따라서, 실제주조제품의 중심단면에서 관찰되는 결함발생 영역과 전산모사 결함예측 영역과의 위치 및 분포 정도가 근사하게 일치하는 계산조건 및 적합한 결함예측의 강도를 적용하여 예측하였다. 그 결과를 바탕으로, 그림 3에 나타낸 결함격자 분률 및 위치에 따른 가중치 적용하여 계산하여 정량화 하는 방법을 이용하였다.

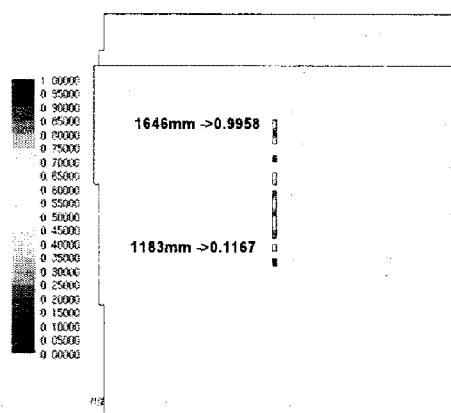


Fig. 3. Cast defect quantify model of the steel ingot.

### 3. 결과 및 고찰

**3.1 전산모사/현장주조결함 비교분석결과**  
 현장주조실험에서 측정된 몰드 및 정반의 온도분포 데이터와 전산모사 계산결과 온도분포를 비교 분석하였다. 온도분포 분석비교에 의한 전산모사 열전달 경계조건을 조율하고 주조결함의 예측 강도수준을 강종 및 주조제품 특성에 따라 조율한 조건으로부터 얻은 실 주조와 전산모사 결함 예측결과를 그림 4, 5에 타나 내었다. 그림 4와 같이 잉곳 압탕의 수축현상을 비교적 유사하게 예측하고 있으며 그림 5와 같이 잉곳 중심부의 주조결함은 실제 주조제품에서 미소하게 관찰되고 있는 결함수준에서도 그 결함의 위치 및 분포 정도가 정확하게 예측되고 있으므로 그 적중도는 채택 가능한 수준으로 사료된다.

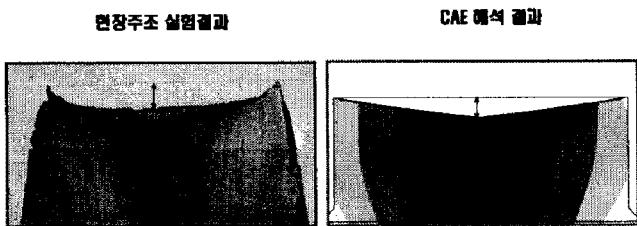


Fig.4. Comparison of the hot top shrinkages for the real 15 ton SCM440 cast ingot and simulated ingot.

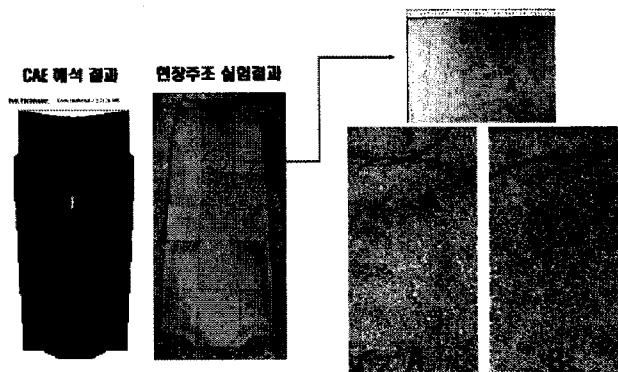


Fig.5. Comparison of the internal cast defect for the real 15 ton SCM440 cast ingot and simulated ingot.

### 3.2 결함정량화 및 활용결과

전산모사결함 예측결과로부터 결함의 량을 수치화 하는 정량화 모델을 적용하여 여러가지 형태 주조공정조건에 따라 적용한 결과를 그림 6에 나타냈었다. 각각의 조건별로 다른 주조조건에 따라 결함의 수준이 유사할 경우 상대적 우열을 구분하는데 어려움 없이 보다 명확하게 비교할 수 있다.

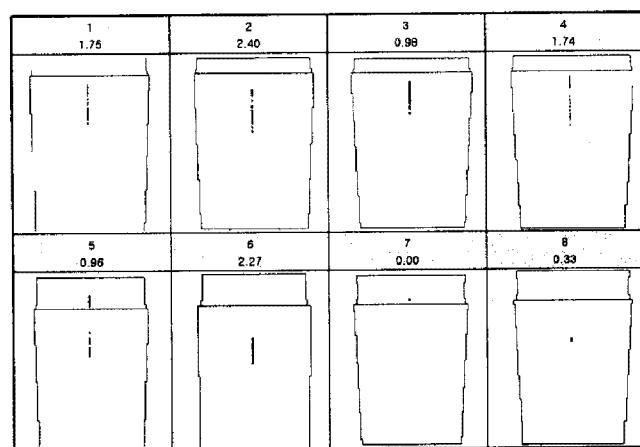


Fig.6. Cast defect quantified results for the various steel ingot shapes and cast conditions.

주조결함의 예측 및 정량화 된 결과를 활용할 수 있는 예를 들면 실험계획법, 반응표면 분석법, 다구찌 기법 등과 같은 통계기법을 활용할 수 있게 된다. 따라서, 대형 잉곳 주조공정의 다양한 조건 설계의 적용결과로 얻어지는 정량화 값을 통하여 그림 7에서 보여준 예와 같이 주요인자도 출 및 공정 및 설계인자의 최적화 조건을 도출하는데 활용 되어 질 수 있게 되었다.

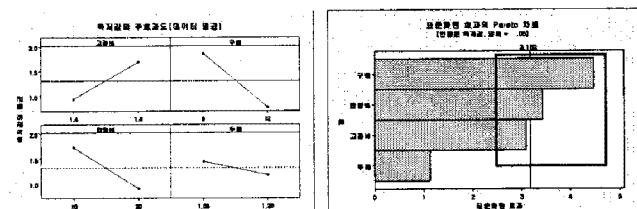


Fig.7. Example view of effectiveness comparison for the various ingot cast parameters.

#### 4. 결 론

대형 잉곳 전산모사결과의 예측신뢰도 향상 및 예측 되는 주조결함의 정량화를 통한 활용 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 대형 잉곳 주조 공정중 측정된 몰드 및 정판의 표면온도 데이터를 활용하여 전산모사 열전달 경계조건과 같은 계산조건의 조율을 실시함으로서 예측되는 온도분포 결과 적중수준을 높일 수 있었다.

(2) 온도예측의 신뢰도 확보를 기반으로 한 압탕 수축현상 및 내부 주조결함수준을 예측하는데 있어서 수정된 Niyama결합 예측법을 사용하고 강종에 따른 결함예측강도 특성조건을 설정하여 적용한 결과 실제주조제품의 내부 미소한 주조결함 발생 위치 및 그 분포범위를 비교적 적중하여 예측할 수 있었다.

(3) 예측되는 내부 주조결함의 정량화를 위하여 결합 셀 충진도 계산 및 위치별 가중치 모델을 적용한 결과 다양한 잉곳 형상 및 주조공정조건에 따라 결함의 수치화가 가능하였고 그 정량화 수치를 통계적인 기법에 활용함으로서 잉곳 형상설계 및 공정조건의 최적화가 가능하였다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 청정기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으며, 현장주조 적용시험 평가를 적극 도와주신 포스코 특수강 기술연구소와 제강공장 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] I. Ohnaka and T. Fukusako: Trans. ISIJ, 21 (1981) 485.
- [2] C. Weiss J. t. Berry: Int. J. Heat. Mass Transfer, 25 (1982) 590-592.
- [3] E. Niyama: IMONO(J. Japanese Foundry Engr. Society) Vol.49 (1977) 101-107.
- [4] E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa and S. Saito: IMONO(J. Japanese Foundry Engr. Society) Vol. 52, (1980) 635-640.
- [5] I. Ohnaka, Y. Nagasaka and T. Fukusako: IMONO(J. Japanese Foundry Engr. Society), Vol. 54 (1982) 54.
- [6] E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa and S. Saito: AFS Internat. Cast Metals Journal, Vol. 7, No. 3(1982) 52-62.
- [7] B.P. Winter, R. D. Pehike, and P.K.. Trojan: AFS Transaction, 91(1983) 81-88.