

# 대형 주철 주물품에 있어서의 주조 시뮬레이션의 적용<sup>1)</sup>

楊 弋涛 · 阿部泰雄 · 浜野貞明

三井ミーハナイト・メタル(株)

## Application of Cast Simulation for Large-Sized Iron Castings

Yitao Yang, Yasuo Abe, and Sadaaki Hamano

MITSUI Meehanite Metal Co., Ltd.

번역 : 허보영, 엄용수<sup>2)</sup>

### 1. 서 론

복잡한 형상을 가지는 대형 주물에 대해, 탕류의 경향, 최종 응고 위치를 파악하는 것은 어렵다[1]. 컴퓨터에 의한 주조 시뮬레이션이 고속화, 실용화되어 보급 되고 있다. 적절한 주조 방안을 세우기 위해서, 사전에 예측하는 것이 중요하다. 토호쿠 대학이 개발한 주조 시뮬레이션 소프트웨어 Stefan3D(이하 Stefan이라고 한다)를 이용해, 일상 기술 업무 중에 탕류 응고 해석을 실시해, 방안 확정의 참고로 하고 있다. 그 구조를

Fig. 1에 나타낸다.

또, Stefan의 응고 계산 기능을 이용하고, 통상의 탕류와 응고 해석 이외의 용도를 찾아 보았다. 지금까지 탕류응고 해석의 사용은 많이 소개되고 있지만, 본 연구에서는 통상과는 다른 사용 방법을 회사 내에서 확립해, 대형 주철 주물품의 냉각 상태를 해석하여, 해석 하는 타이밍의 최적화, 소둔 시 주물 온도 분포의 예측, 그리고, 간이 모델에 의한 제품 내부 잔류 응력의 예측을 실시해, 주물 생산에 도움이 되는 것을 확인할 수 있었다.

### 2. 방 법

3 차원 CAD 소프트웨어에 의해 유구계를 포함한 형상 모델을 작성하여, STL 형식에서 출력한다. 작성한 STL파일을 주조 시뮬레이션 소프트웨어 Stefan에 적용, 3차원 자동 메쉬를 작성하고, Stefan에 의한 해석을 실시한다. 통상의 응고 해석은, 주물의 응고가 완료한 시점에서 자동적으로 종료하지만, 본 연구에서는 계산을 종료하는 시간은 100%의 응고율에 이른 시점이 아닌, 주물이 완전하게 응고한 후에도, 계산이 그대로 계속되어 계산 시간을 수동으로 지정해, 소정 시간까지 해석을 실시한다. 즉, Stefan의 응고 계산 기능을 연장한 방법이다.

### 3. 결과 와 고찰

#### 3.1 대형 주철 주물품을 해석하는 타이밍의 해석

##### 3.1.1 해석 제품의 모델

중량이 약 40 t인 FC주물의 3D모델을 Fig. 2에 보여주고 있다.

##### 3.1.2 해석의 목적

종래, 이 제품을 해석 할 때까지의 시간은 거푸집에 부은 후 7~9일을 필요로 하여, 생산성을 저해하고 있었다. 빨리 형태 분해를 하게 되면, 갈라지게 되는데, 이것은 제품이 복잡

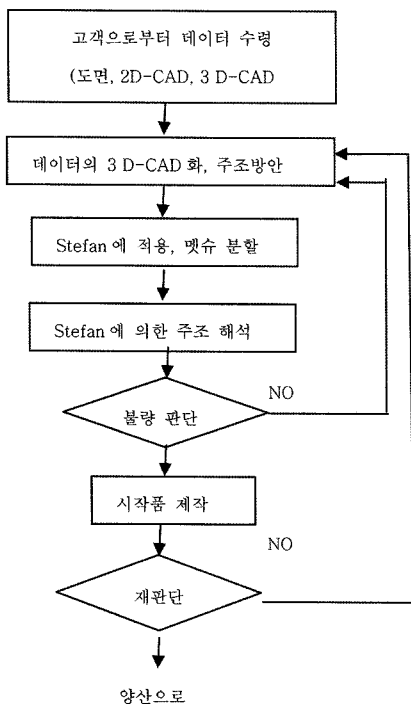


Fig. 1. Cast CAE system

<sup>1)</sup>日本鑄造工學會誌 Vol. 75 No. 8 pp. 557~561에 게재된 자료임.

<sup>2)</sup>경상대학교 나노신소재공학부(School of Nano and Advanced Materials Engineering, Gyeongsang National University)

형상을 가져, 두께의 차이가 크기 때문이라고 생각되어 어쩔 수 없이 해석 시간은 주입 후의 1주간 이상으로 하고 있었다. 해석 시간 단축에 의한 생산성을 올리기 위해, 두꺼운 부분(약 300 mm)을 빨리, 균등하게 냉각시키는 것이 지극히 중요하다. 형태 분해할 때의 두꺼운 부분의 표면 온도는, 3500°C이하(경협치)로 하여, 5일로 해석 가능토록 목표를 설정, 냉각 시뮬레이션 실시한다.

3.1.3 물성치의 조정 및 방침의 결정

Stefan에 부속되는 표준 데이터 베이스의 물성치가 실제로 사용하고 있는 것과 일치하는지의 여부가 해석 정도에 영향을 주므로, 해석하기 전에 물성치를 올바르게 조정하는 것이 필요하다. 이 제품에 관한 물성치를 확인하기 위해서 표준 데이터 베이스 이용해 계산한 결과와 실측한 온도 데이터를 비교하였다. 주물의 물성치를 변경하지 않고 사형의 열전도율을

변화시키면서, 계산을 반복해, Fig. 3에 나타내는 결과를 얻을 수 있었다.

열전도율을 3 수준(0.0010, 0.0015, 0.0020 cal/cm·S·deg)로 한 사형과 접촉하는 주물 표면의 온도 변화의 계산 결과를 각각 Fig. 3의 곡선①,④와⑤에 나타내고 있고, 열전대를 위치①에 접촉시켜 온도를 측정한 실측치를▲로 나타내고 있다. 실측치와 가장 일치한 것은, 곡선①의 열전도율 0.0010로 이 결과로부터, 앞으로의 계산은 Table 1에 나타내는 물성치를 사용한다.

또, 열전도율을 0.0010으로 하는 사형의 2곳(주물의 두꺼운 부분과 접촉하는 사형의 표면과 사형의 중심부의 냉각 속도를 계산해, 그 결과를 각각 Fig. 3의 곡선②과③에 나타내고 있다. 냉각 시간 2일 이후의 사형 중심부의 온도는 그다지 감소하지 않아, 방열이 곤란하다고 말할 수 있다. 곡선①과④를 비교하면, ①의 경우, 3500°C에 이르는 소요 시간은 7일이 필요하지만, ④의 경우, 사형의 열전도율을 50%개선하면, 해석의 목표인 5일째에 350°C까지 냉각하는 것이 가능하게 되었다. 사형을 통하여, 열을 배출하는 것이 중요하기 때문에, 주틀과 주물의 사이의 사형에 있어서의 온도 분포의 변화 경향으로부터 해결책을 찾아낼 방침으로 하였다.

3.1.4 냉각 해석에 의한 해결책

Fig. 4에 나타내는 사형 내의 8곳에 있어서의 온도 분포를 계산하여, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 2일 이후, ③번~⑧번의 온도 변화는 매우 작아지고 있고, 이러한 부분의 열을 빨리, 균등하게 발산시키는 것이 중요하다. 실측과 계산 결과를 비교하기 위해, Fig. 4의 A, B, C, D 4곳에 있어서의 온도

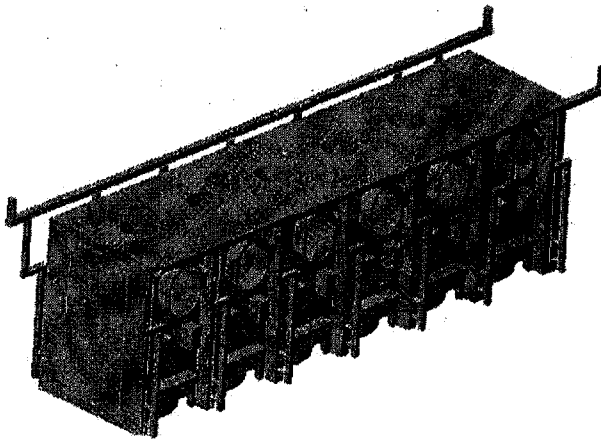


Fig. 2. Analysis model.

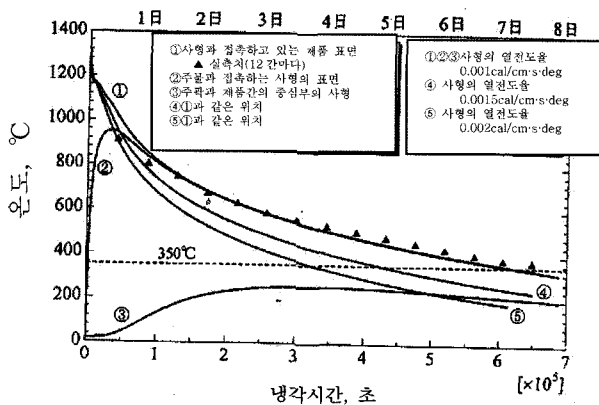


Fig. 3. Casting and in sand model.

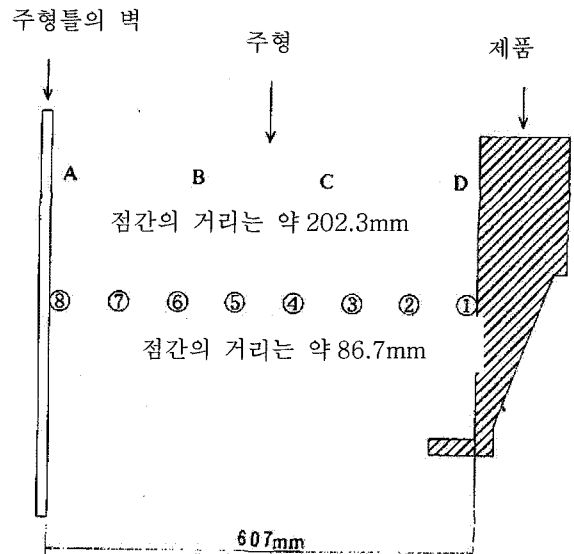


Fig. 4. Calculation position.

Table 1. Physical parameters.

재료명	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	열전도율 (cal/점·m·S·d)	비열 (cal/g·°C)	잠열 (erg/g)	약상선온도 (°C)	고상온도 (°C)	초기온도 (°C)
주물	7.0	0.07	0.2	50	1180	1140	1350
후육 주형	1.5	0.001	0.27				20

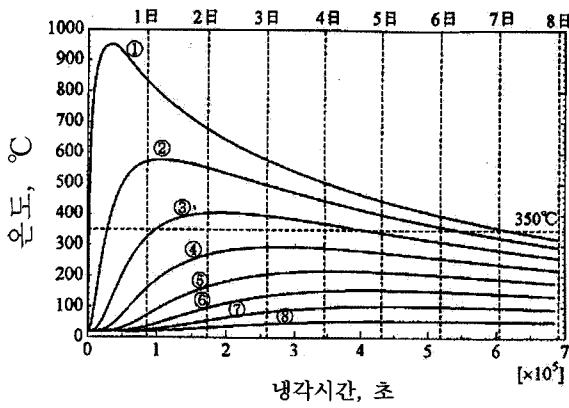


Fig. 5. Temperature variation in sand mold (calculation).

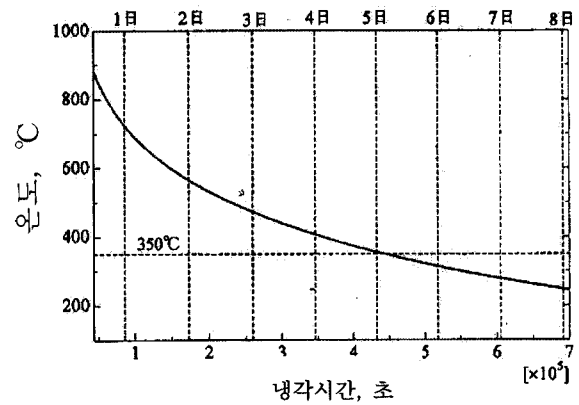


Fig. 8. Calculation result of improvement plan.

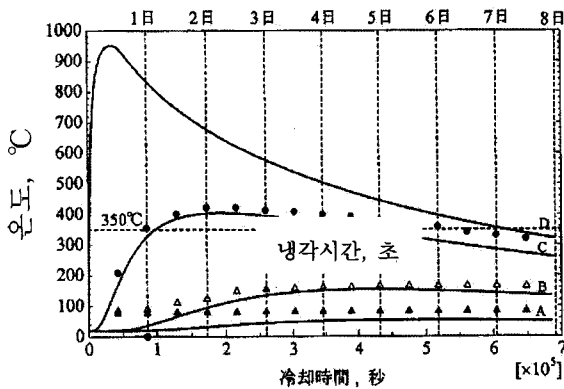


Fig. 6. Comparison of Temperature variation in sand mold between calculation and experiment.

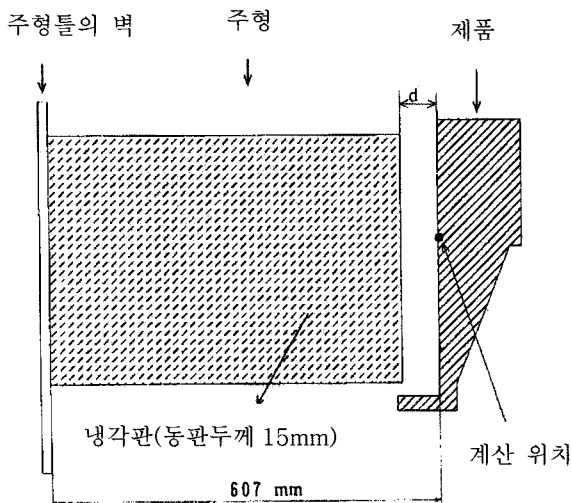


Fig. 7. Insertion of chill into sand mold.

분포를 측정해, 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 곡선은 계산 결과이며, 실측한 결과는 점선으로 나타내, 그 양자를 비교한 결과, 실측 치와 계산치는 거의 일치하여, 본 계산 수법의 신뢰성을 확인할 수 있었다고 말할 수 있다. 프랑 주형의 구성을 변경함으로써, 물성 치는 약간 바뀌게 되지만, 열전도율을 극단

적으로 50%정도 올리는 것은 불가능이라고 생각되어 Fig. 7에서 보여 주듯이 냉각 판을 삽입하는 방법을 검토하였다. 복수의 강판(두께 약 15 mm)을 사형에 삽입하고, 주물 표면까지의 거리를 변화시키고 해석을 실시하였다.

이 거리를 50 mm로 했을 때의 Fig. 7에 나타내는 계산 위치에 있어 해석 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 해석 목표를 달성할 수 있다는 것을 확인했다.

### 3.2 열처리에의 적용

#### 3.2.1 해석의 목적

Fig. 9에서 나타내는 것처럼 두께 차이가 큰 제품을 주조한 후, 잔류 응력이 발생하기 쉽고, 열처리(응력 소거 소결)가 필요하게 되어, 주물의 내부 응력 및 로내 온도 상황을 파악하여, 변형, 분열의 미연 방지를 목적으로 한다.

#### 3.2.2 열처리의 상황을 파악하기 위한 해석

열처리 계산의 이미지 도를 Fig. 10에 나타내었다. 해석에서, 로내의 분위기는 주형 내부로 상정, 공기로서 선택했다. 주틀은 내화 벽들로 상정해, 그 물성 치를 이용하였다. 실제의 “응고 계산”은, 이미 응고된 상태의 560°C로부터 출발 시킨다. 제품 아래의 차체를 지탱하는 부분을 내화 벽들의 물성 치로 사용하였다. 온도 측정은, 천정 부근에 설치한 열전대에 의해 측정하였다. 온도를 실측한 장소의 냉각 곡선 및 Fig. 9에 나타내는 두꺼운 부분 표면 A와 얇은 부분 표면 B의 2 곳의 냉각

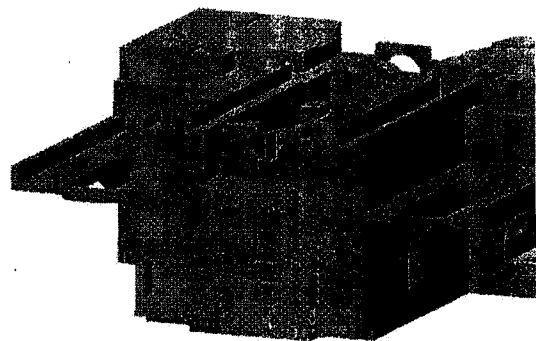


Fig. 9. Analysis model (section) for heat treatment.

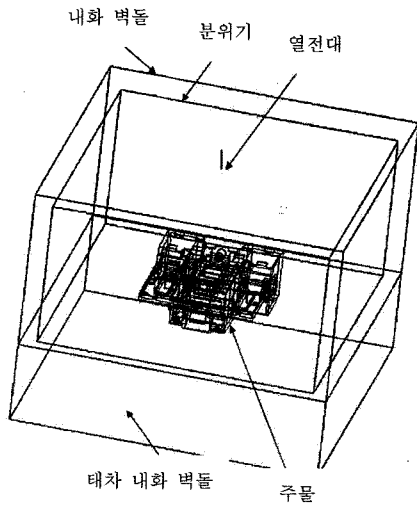


Fig. 10. Analysis image in furnace of heat treatment.

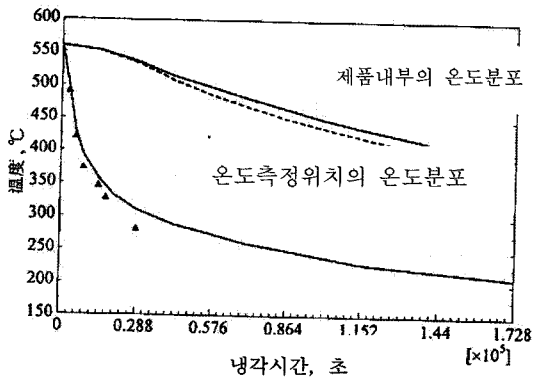


Fig. 11. Temperature distribution in heat treatment furnace (full time keeping).

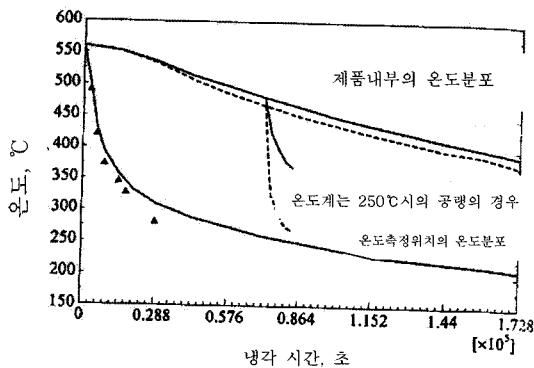


Fig. 12. Simulation of actual operation (taking out at 250°C from heat treatment furnace).

곡선을 계산해, 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 덧붙여 실측한 데이터를 ▲로 표시 하였다.

실측한 온도와 대응 위치의 계산 결과는 대체로 일치하는 것을 확인 하였다. 또, 열전대를 설치한 곳의 온도와 제품의 표면 온도는, 꽤 다른 다는 것이 정량적으로 확인 되어 열 처리 조업 기준의 재검토가 필요하게 되었다. 실제 조업 시, 분

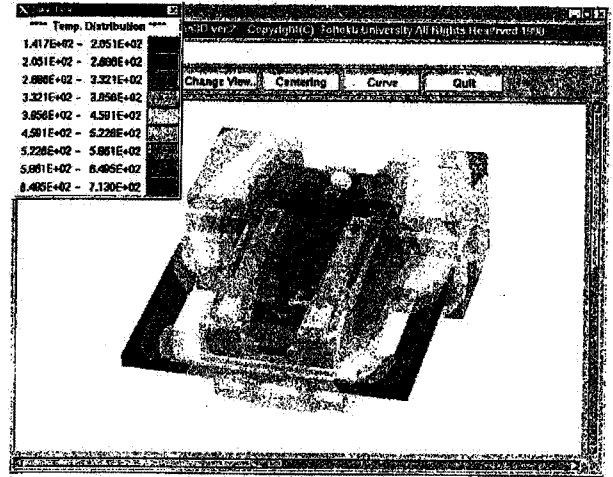


Fig. 13. Temperature distribution of casting.

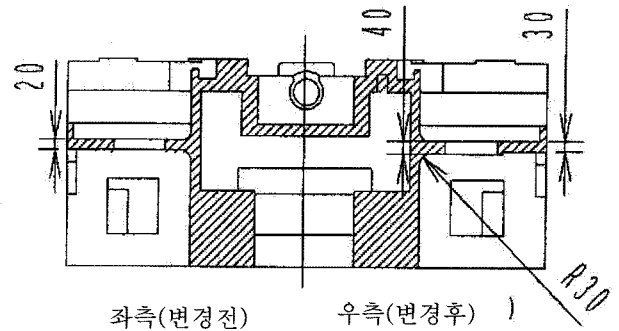


Fig. 14. Improvement of thickness in thin section.

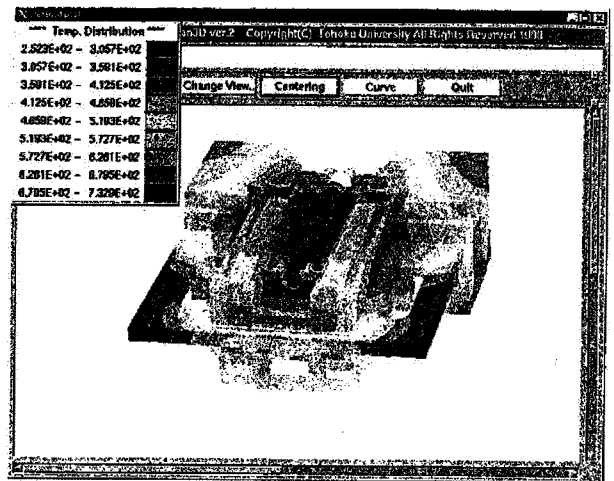


Fig. 15. Temperature distribution of casting after improving thickness in thin section.

위기의 온도가 250°C에 이르면 제품을 꺼내기로 하였다. 이 상황을 상기의 수법으로 시뮬레이션 한 결과, Fig. 12의 결과가 얻어졌다.

로내 상부의 열전대에 의해 측정된 온도가 250°C가 된 시점에서 제품을 처리 로로부터 꺼내면, 제품의 표면 온도는

500°C미만으로부터 급격하게 떨어져, 두꺼운 부분과 얇은 부분의 온도차는 크게 나타나고, 또 다시 잔류 응력이 발생한다고 추측된다. 변형,분열로 연결된다고 생각되어 그 경험에 근거해 제품을 꺼내어, 공냉 시키는 타이밍을 재검토하기로 했다.

### 3.3 주물 잔류 응력의 간이 해석

#### 3.3.1 해석의 목적

Fig. 9에 나타내는 주물을 제조할 때, 두꺼운 부분과 얇은 부분의 차이(단면적비는 약 10:1)가 매우 크기 때문에, 부분 변형에 의한 주물 정도의 저하나 분열이 발생할 우려가 있다. 문제 해결점의 실마리를 얻기 위해서는 응력 해석이 필요하지만, 시판 응력해석 소프트웨어는 고가이기 때문에, 간이 모델을 이용해 Stefan의 응고 계산 기능을 활용해 해석하는 것을 시도했다.

#### 3.3.2 해석용의 간이 모델

잔류 응력은 다음의 식으로 나타낸다.(자세한 것은 주물 편람[2]을 참조)

$$\sigma_1 = -(A_2 / (A_1 + A_2)) E \alpha \cdot \Delta T_G \tag{1}$$

$$\alpha_2 = (A_1 / (A_1 + A_2)) E \alpha \cdot \Delta T_G \tag{2}$$

여기서,

$\sigma_1, \alpha_2$ : 각각 얇고 두꺼운 부분의 잔류 응력

$A_1, A_2$ : 얇은 살색과 두꺼운 부분의 단면적,  $E$ : Young률 (FC의 경우,  $1.08 \times 10^5$  MPa),  $\alpha$ : 열수축율(FC의 경우,  $1 \times 10^{-5} K^{-1}$ ),

$T_G$ : 소성-탄성 경계 온도(주물중에 탄성변형이 발생하기 시작하는 온도, FC의 경우, 500~600°C),

$\Delta T_G$ : 두꺼운 부분의 온도가  $T_G$ 에 달할 때, 두꺼운 부분과 얇은 부분의 온도차.

#### 3.3.3 주물의 온도 분포에 의한 잔류 응력의 계산

식(1), (2)에 의하면, 잔류 응력을 해석하기 위해, 우선  $\Delta T_G$

를 구할 필요가 있다. Stefan의 응고 계산 기능을 이용해, 두꺼운 부분의 온도가  $T_G$ 에 이를 때의 주물의 온도 분포를 해석하여, 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 평균의  $T_G$ 는 약 255°C이고, 식(1)에 대입하면, 얇은 부분에 있어서의 잔류 응력의 절대치는 250 MPa이 되어 FC250 재질에 대해서 위험한 상태라고 말할 수 있다. 이것을 해소하기 위해, Fig. 14에 나타내는 개선안을 생각했다. 형상을 변경한 안(案)에서 도 똑같이 주물의 온도 분포를 계산한 결과를 Fig. 15에 나타낸다.  $\Delta T_G$ 의 평균치는 1650°C가 되어, 잔류 응력은 151 Mpa가 되었다. 형상 변경 전과 비교하면, 대략 40%의 잔류 응력을 저감할 수 있다.

실제 생산에 적용함으로써, 안정된 품질의 제품을 생산할 수 있었다. 본 해석 수법은, 어디까지나 간이법이며, 시판 응력 해석 소프트웨어를 가지고 있지 않은 경우의 대용이라고 생각하고 있다.

## 4. 결 론

주조 시뮬레이션 소프트웨어의 용도를 확충하는 목적이며, Stefan의 응고 계산 기능을 이용한 독자적인 사용법(대형 주철품을 해석하는 타이밍의 최적화, 소결에서의 주물 온도 분포의 예측, 그리고 간이 모델에 의한 제품 내부 잔류 응력의 예측과 저감법)을 확립해, 대형 주철품 생산에 이용할 수 있는 것이 실증되었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Abe, Yang, Yamamoto, Proceeding on Advanced Casting Technology, 136 (2000), Japan.
- [2] A Cast Handbook, Reprinted 4th (Maruzen), 33-36 (1986), Japan.