

<論 文>

# 가속냉각시 강판에 발생하는 응력 및 변형에 대한 연구

김 호 영\* · 김 창 영\* · 주 응 용\*\* · 장 래 응\*\*

(1988년 5월 16일 접수)

## Analysis of Stress and Distortion that Develop during Accelerated Cooling of Plate

H. Y. Kim, C. Y. Kim, W. Y. Choo, and R. W. Chang

**Key Words :** Accelerated Cooling(가속냉각), Thermal Stress(열응력), Residual Stress(잔류응력), Plate Buckling(평판좌굴), Flatness(평탄도), 1-dim. Analysis(1차원 해석)

### Abstract

To analyze the nonflatness and residual stress in accelerated cooled plate, a numerical analysis model has been developed. Two factors, i.e. temperature and phase transformation, are considered in calculating the stress distribution that develops during cooling. The plastic strain and plate-buckling, which are often shown in accelerated cooled plate, were determined from this stress. Mean temperature in through thickness direction and temperature difference in width direction are considered in the model to simplify the calculation. The temperature and stress distribution changes caused by phase transformation are involved in terms of the effective specific heat and the effective thermal expansion coefficient. With the model, accelerated cooling of 10mm(*t*) \*3000mm(*w*) plate was simulated. The condition of accelerated cooling was 10°C/sec from just after hot rolling to 500°C. The initial temperature-difference ratio,  $\Delta Tr$ , in width direction is an important factor in evaluating the stress distribution. When  $\Delta Tr$  is 0.08, buckling occurs during cooling and 7kgf/mm<sup>2</sup> of residual stress develops at the edge of plate. To secure the flatness,  $\Delta Tr$  should be less than 0.07. Small scaled cooling test was conducted to verify the exactness of the model and the results proved the usefulness of this numerical analysis model.

기 호 설 명

*b* : 압축응력이 작용하는 판폭  
*d(T), C(T), α(T)* : 섭씨온도 *T*°C인 강의 밀도, 비열, 열팽창계수  
*E(T), Y(T)* : 섭씨온도 *T*°C인 강의 탄성계수, 항복응력  
*H(T)* : 섭씨온도 *T*°C인 강의 물에 대한 열전달계수

*h* : 판두께  
*L* : 판길이  
*t* : 시간  
*u* : 두께방향 변위  
*Wt* : 냉각수 온도  
*w(i)* : *i*번째 요소의 판폭방향 길이  
 $\Delta Tr$  : (압연직후 판내온도편차)/(압연직후 판평균온도)  
 $\Delta t$  : 시간증분  
 $\Delta \epsilon_{pl}$  : 소성변형률 증분  
 $\epsilon$  : 전체변형률

\*정회원, 산업과학기술연구소 강재연구부

\*\*산업과학기술연구소 강재연구부

- $\epsilon_{el}$  : 탄성변형율
- $\epsilon_{th}$  : 열변형율
- $\epsilon_{pl}$  : 소성변형율
- $\nu$  : 프와송비
- $\sigma$  : 응력

## 1. 서 론

최근 제철소에서는 고장력강의 기계적 성질 향상 및 원가절감을 목적으로 가공열처리 방법(TMCP, Thermo-Mechanical Control Process)을 적극 도입하고 있다. 이를 위해, 압연기 후단에 냉각설비를 설치하여 압연판을 적절한 냉각속도로 냉각하는 공정을 가속냉각(ACC, Accelerated Cooling)이라 한다<sup>(1,2)</sup>.

가속냉각에 의해 판을 제조할 때 불균일 냉각 등에 기인한 판변형 및 잔류응력의 발생은 가공열처리 방법의 실제 적용에 많은 제약요소로 작용하고 있다. 변형에 의해 평탄도가 나쁜 판은 제품으로서 가치를 상실하고, 평탄하더라도 과도한 잔류응력이 있을 경우에는 판을 절단할 때 캠버 등을 야기하여 2차 가공성을 보장하지 못한다<sup>(1,3,4)</sup>.

본 연구에서는, 폭방향 불균일 냉각에 따른 열응력이 판변형 및 잔류응력의 주요원인이라는<sup>(5)</sup> 고려하여 냉각중에 압연판의 온도분포 및 열응력을 예측할 수 있는 수치해석 모델을 구성하였다. 온도와 응력 계산에 상변태 현상을 고려하였으며, 판변형은 압축성분 열응력에 의한 좌굴현상으로 고려하여 해석하였다<sup>(3,6)</sup>.

## 2. 이론해석

### 2.1 온도분포계산

판변형 및 잔류응력의 원인이 되는 가속냉각중의 압연판 온도분포를 계산하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 가속냉각공정은 노즐을 통해 분사되는 냉각수에 의한 냉각이므로, 주된 열전달은 대류를 통해 강판의 상하 표면에서 냉각수로 행해진다.
- (2) 강판 위에서 냉각수의 폭방향흐름을 무시하여, 폭방향에 대해 유효 냉각수량분포는 균일하다.
- (3) 냉각중 강판의 온도분포는 폭방향 중심에 대해 대칭이다.
- (4) 가속냉각공정의 Biot number, Bi가  $0.05 < Bi$

$< 0.4$ 이므로 계산의 편의를 위해 두께방향의 온도분포를 무시하고 평균온도를 사용한다. 또한 길이, 폭방향의 열전달은 무시한다.

이러한 가정을 근거로 하여, 냉각수의 열전달계수를 강판의 온도에 대한 함수  $H(T)$ 로 정의할 때, 임의의 시간  $t$ 에서 온도  $T(t)$ 인 강판의 시간  $t + \Delta t$ 일 때 온도  $T(t + \Delta t)$ 는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$H(\bar{T}) * [\bar{T} - Wt] * w(i) * \Delta t = d(\bar{T}) * C(\bar{T}) * [T(t + \Delta t) - T(t)] * w(i) * h \quad (1)$$

여기서,

$$\bar{T} = [T(t + \Delta t) + T(t)] / 2$$

### 2.2 응력 및 변형율의 계산

가속냉각시 강판에 발생하는 응력 및 변형율을 근사적으로 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 판에는 외력이 작용하지 않으므로 응력은 온도편차에 의한 열응력성분만 작용한다.
- (2) 압연판은 길이에 비해 두께 디멘손이 매우 작은 형상이므로 폭방향 온도편차에 의한 압연방향 응력성분이 주된 응력이다.
- (3) 재료는 등방성, 비압축성, 탄성-강소성체이다.
- (4) 가속냉각 개시직전에 압연판 내부에는 잔류응력이 없고, 초기 상태는 온도분포에만 의존한다.
- (5) 압연방향에 수직인 단면은 항상 수직인 단면을 유지한다.

이러한 가정과 온도계산의 가정을 바탕으로, Fig. 1과 같이 폭방향으로  $n$ 개의 요소로 구성된 1차원 모델을 설정한다.

임의의 시간  $t$ 에서  $t + \Delta t$ 로 진행할 때,  $i$ 번째 요소의 온도는 식 (1)에 의해  $T(i, t)$ 에서  $T(i, t + \Delta t)$ 로 되고 이에 따른 응력과 변형율의 관계는 다음과 같다.

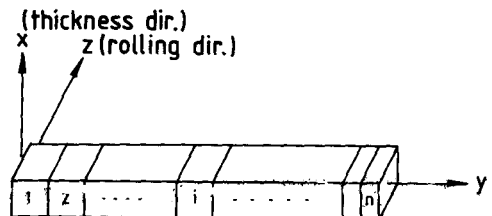


Fig. 1 Thermal stress analysis model for plate

$$\epsilon_{th}(i, t + \Delta t) = \epsilon_{th}(i, t) + \alpha(\bar{T}) * [T(i, t + \Delta t) - T(i, t)] \quad (2)$$

$$\epsilon(i, t + \Delta t) = \epsilon_{th}(i, t + \Delta t) + \epsilon_{el}(i, t + \Delta t) + \Delta\epsilon_{pl}(i) \quad (3)$$

$$\sigma(i, t + \Delta t) = \begin{cases} E(\bar{T}) * \epsilon_{el}(i, t + \Delta t) & (\text{탄성영역}) \\ \frac{\epsilon_{el}(i, t + \Delta t)}{|\epsilon_{el}(i, t + \Delta t)|} * Y(\bar{T}) & (\text{소성영역}) \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $\bar{T} = [T(t + \Delta t) + T(t)]/2$   
적합조건으로부터,

$$\epsilon(1, t + \Delta t) = \dots = \epsilon(i, t + \Delta t) = \dots = \epsilon(n, t + \Delta t) \quad (5)$$

힘의 평형조건으로부터,

$$\sum_{i=1}^n w(i) * \sigma(i, t + \Delta t) = 0 \quad (6)$$

식 (2)~(6)의 관계를 적용하여 반복계산을 통해 응력 및 변형율을 계산한다.

### 2.3 평탄여부의 판정

냉각중에 판의 일부가 평면을 벗어남으로써 평탄도를 해치는 판변형은 주로 압축응력에 의한 좌굴 현상에 기인한다고 가정하여 판재에서 좌굴이 발생할 수 있는 임계 압축응력을 다음과 같이 계산하였다.

Plate-bending theory<sup>(6)</sup>로부터, 두께  $h$ 의 판 끝에서 압연방향의 균일 압축응력  $\sigma$ 가 작용할 때 두께방향 변위  $u$ 에 대한 미분방정식은,

$$\frac{E * h^3}{12 * (1 - \nu^2)} * \nabla^4 u + h * \sigma * \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

이고, 압축응력 구간의 폭을  $b$ 라 할 때 경계조건을 적용하여 임계좌굴응력  $\sigma_{cr}$ 을 구하면,

$$\sigma_{cr}(b) = K * \frac{E * \pi^2}{12 * (1 - \nu^2)} * \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (8)$$

여기서,

$$K = \begin{cases} 4 & (\text{판중앙좌굴}) \\ 0.97 * (b/L)^2 + 0.425 & (\text{판가장자리좌굴}) \end{cases}$$

이다.

온도편차에 의한 열응력은 폭방향 분포를 가지므로 식 (8)을 그대로 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 압축성분 응력이 작용하는 구간  $b$ 에 대해서,

$$\int_0^b \sigma dy \geq b * \sigma_{cr}(b) \quad (9)$$

를 만족하면 좌굴이 발생하여 판의 평탄도가 나빠진다고 판정하였다.

## 3. 수치해석 모델 구성 및 계산

### 3.1 수치해석 모델 구성

가속냉각을 시뮬레이션하기 위한 수치해석 모델은 이론해석결과를 바탕으로 Fig. 2의 흐름도에 따라 구성하였다. 압연직후의 판온도분포를 입력자료로 하여, 주어진 냉각조건에 대해 변형을 및 응력, 좌굴 발생여부를 추적하고 냉각완료 후의 잔류응력을 계산한다.

수치해석에 적용한 재료의 열적, 기계적 성질을, 50kgf/mm<sup>2</sup>급 가속냉각강을 중심으로 Fig. 3, 4에 도시하였다. 탄성계수  $E$ 는 참고문헌 (7)의 값을, 그외의 재료정수는 냉각속도에 따른 변태에 의한 영향을 고려한 것이다<sup>(8)</sup>. 비열은 변태잠열을 포함하는 결보기비열로, 열팽창계수는 변태에 의한 부피변화를 포함하는 결보기열팽창계수로 정의하였다. 실험을 통해, 냉각속도에 따른 변태온도, 결보기열팽창계수, 항복응력 등을 측정하였으며, 비열과 변태잠열을 이용하여 결보기비열을 계산했다. 냉각수의 열전달계수는 분무노즐에서 냉각수량 0.2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> min일 때의 값이다<sup>(9)</sup>. 변태구간의 항복응력

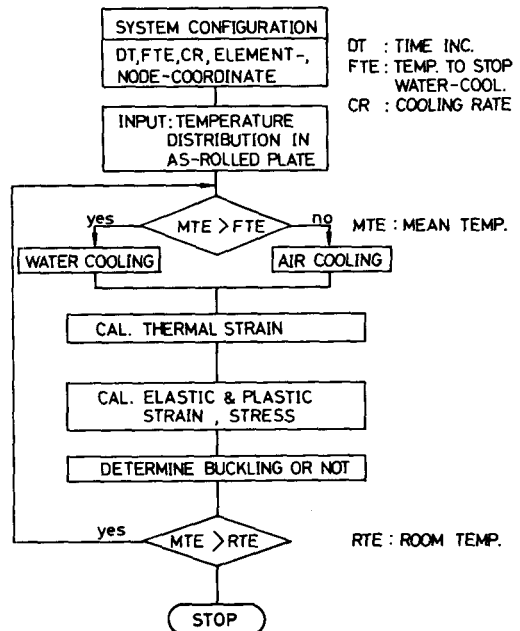


Fig. 2 Flow chart for Accelerated Cooling simulation

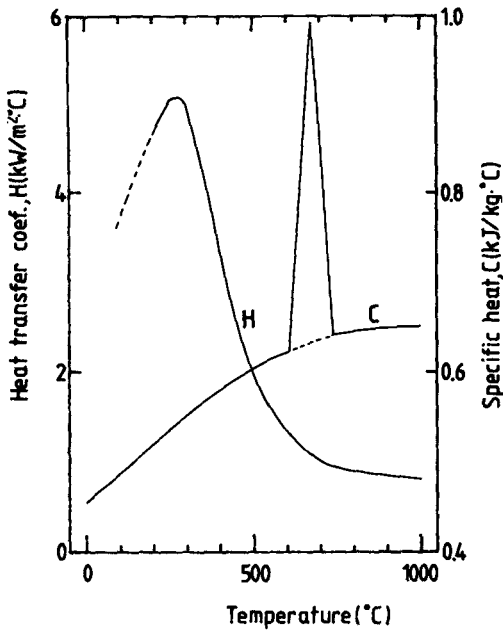


Fig. 3 Thermal properties vs. temperature of 50kgf/mm<sup>2</sup> grade TMCP steel<sup>(8,9)</sup>

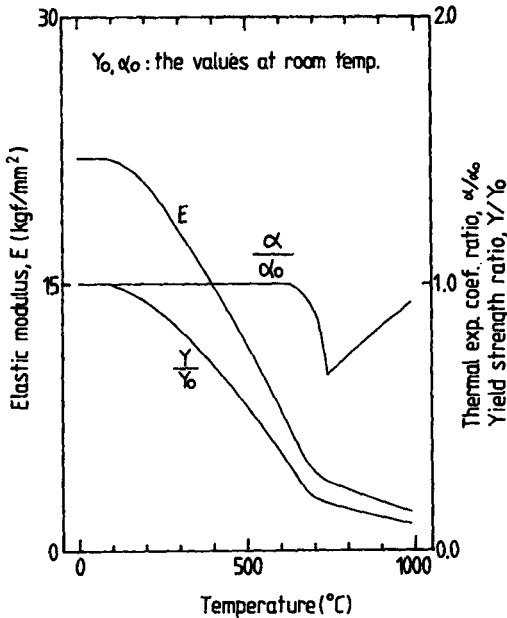


Fig. 4 Mechanical properties vs. temperature of 50kgf/mm<sup>2</sup> grade TMCP steel<sup>(7)</sup>

은 페라이트와 오스테나이트의 분율에 따라 실험치를 토대로 계산한 것이다.

### 3.2 가속냉각 시물레이션 및 결과고찰

50kgf/mm<sup>2</sup>급 가속냉각강의 냉각조건은 압연판

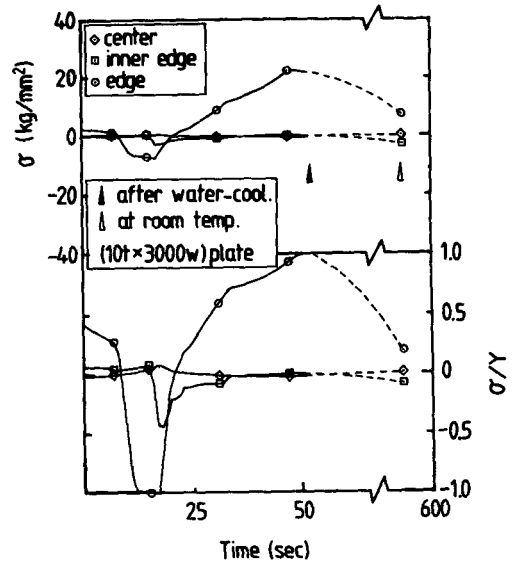


Fig. 5 Calculated stress history during accelerated cooling (cooling rate=10°C/sec,  $\Delta Tr=0.08$ )

을 변태온도 이상에서 냉각속도 5~20°C/sec로 400~600°C까지 냉각한 후 공냉하는 것으로 알려져 있다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는, 대표적인 가속냉각조건으로 냉각속도 10°C/sec인 경우를 택하여, 두께 10mm, 폭 3000mm의 압연판에 대해 계산한 결과를 이용하여 판변형에 대하여 논의한다.

Fig. 5는 압연 직후 판 평균온도에 대한 압연 직후 판내 온도편차의 비,  $\Delta Tr$ 이 0.08일 때, 가속냉각중의 열응력 및 그때의 항복응력에 대한 열응력 비를 도시한 것이다. 판 가장자리의 응력값을 살펴보면, 냉각초기에는 온도편차에 의한 열응력만 있으므로 인장응력이 작용하다가, 변태온도구간에 이르러 변태에 따른 부피팽창이 일어나면 그로 인해 압축응력이 작용한다. 변태온도구간에서는 판 단면적에 대한 변태가 진행되는 부분의 단면적비에 따라 응력분포 및 그 크기가 결정되는데, 압연판의 가장자리에서 변태가 진행중일 때는 변태가 진행되는 부분의 면적비가 작기 때문에 가장자리의 응력이 항복강도까지 상승하여 소성변형율이 발생한다. 이후 판중양부가 변태온도구간에 도달함에 따라 가장자리에서는 다시 인장응력이 작용하고, 상온까지 이러한 인장응력상태가 지속되어 잔류응력이 된다. 판중양부의 응력은 그때의 가장자리 응력에 대응하는 값을 나타내는데, 이러한 응력변화양상은 열응

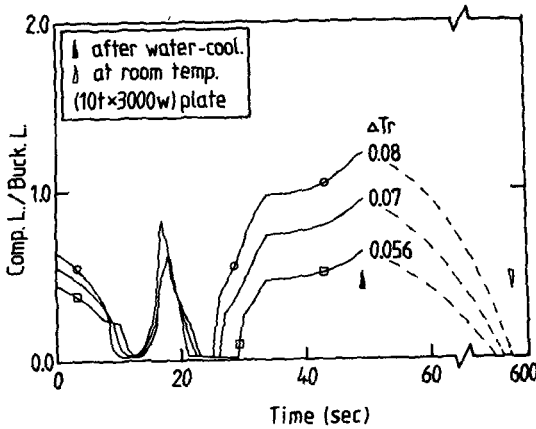


Fig. 6 (Compressive load/Buckling load) history during accelerated cooling for the various  $\Delta Tr$

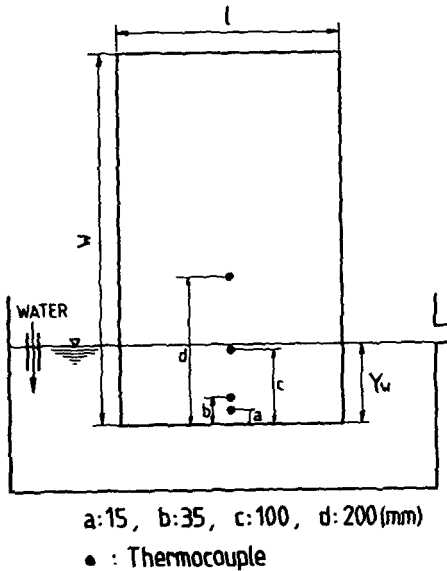


Fig. 7 Schematic configuration of experiment

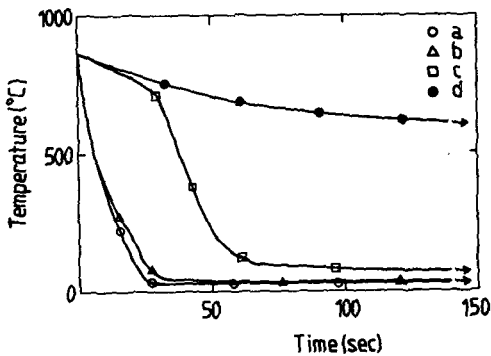


Fig. 8 Measured temperature history in plate for  $Yw = 105m$

력 및 변태응력에 관한 기존의 연구결과와 잘 일치하고 있다<sup>(10,11)</sup>.

가속냉각중에 압연판 일부에 발생하는 압축하중에 대해, 좌굴발생여부를 예측하기 위해 냉각중에 그때의 좌굴하중과 압축하중을 비교하였다. Fig. 6에  $\Delta Tr$ 에 따른 계산결과를 나타내었는데  $\Delta Tr > 0.07$ 에서는 냉각중에 좌굴이 발생함을 알 수 있다. 따라서 평탄도를 확보하기 위해서는  $\Delta Tr$ 을 0.07 이하로 관리해야 함을 알 수 있다.

#### 4. 검증실험

##### 4.1 검증실험

앞에서 제시한 이론해석에 의해 예측되는 판의 평탄도 및 잔류응력의 정확도를 평가하기 위해 모델 실험을 통한 검증을 행하였다. 그러나 실험실적인 규모로는 평탄도를 정량화하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 측정된 온도분포를 입력자료로 하여 계산된 잔류응력과 측정된 잔류응력을 비교함에 의해 이론해석의 타당성을 보이고 더 나아가 실공정에 적용가능함을 보이고자 하였다.

가속냉각과 유사한 온도분포를 판내에 유도하기 위해 크기  $10(t) \times 500(w) \times 300(l)$ 의 판에 열전대를 부착하여  $900^{\circ}\text{C}$ 로 균일가열한 후 Fig. 7과 같이 폭방향 일부분  $Yw$ 를 수냉각하였다. 열전대는 판의 하단부로부터 각각 15, 35, 100, 200mm 위치에 4개를 부착하여 냉각중의 온도를 측정하였다. Drilling 장치는 미국 Micro Measurement사의 RS-200 milling guide를, 스트레인 게이지는 일본(주)동경측기연구소의 FRS-2-11을 사용했다.

##### 4.2 결과 및 고찰

$Yw = 105\text{mm}$ 일 때 측정된 온도분포의 일부를 Fig. 8에 나타내었다. 냉각개시온도는  $867^{\circ}\text{C}$ 이었고,  $100^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각속도는 위치 a, b에서는  $33^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ , 위치 c에서는  $13^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ , 위치 d는 대체로 공냉의 것에 가까웠다. 냉각개시 후 30초가 경과하면 위치 a, b는 상온으로 냉각되고, 70초가 경과하면 위치 c까지, 15분이 경과하면 판 전체가 상온으로 냉각되었다.

냉각중 응력상태 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 냉각개시 후 30초일 때 열팽창계수에 따른 수축으로 인해 위치 a, b에서는 인장응력이, 공냉부에서는 상대적으로 압축응력이 작용하고 있다(Fig. 9

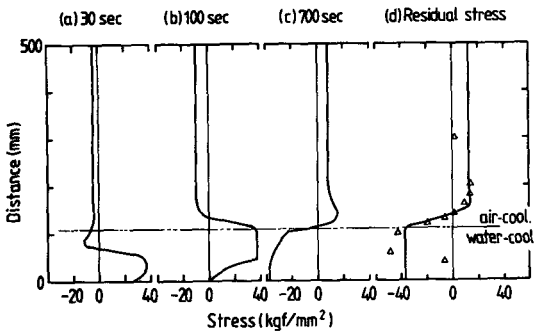


Fig. 9 Calculated and measured stress distribution in plate for  $Y_w=105\text{mm}$

(a). 100초가 되면 위치 c까지 인장응력구간이 되고, 한편 이때까지의 과다한 열응력에 의해 발생한 소성변형을 때문에 하단부에서는 오히려 응력 크기가 줄었다(Fig. 9(b)). 이후 냉각이 진행되면서 온도편차가 작아짐에 따라, 미리 발생한 소성변형으로 인해 수냉부에는 압축응력이 공냉부에는 인장응력이 발생하여(Fig. 9(c)), 냉각종료 후 잔류응력이 된다.

Fig. 9(d)에 계산한 잔류응력과 측정된 잔류응력을 함께 나타내었다. 수냉구역을 제외하고는 응력 분포와 그 크기에서 측정결과와 계산결과는 매우 잘 일치한다. 수냉구역에서 측정치가 재료의 항복강도보다 큰 것은, 이 부분의 냉각속도가 30°C/sec 이상이어서 가속냉각에 의한 것과는 달리 저온변태 조직이 생성되어 이에 따른 항복강도의 상승에 의한 것이라 생각된다. 이를 뒷받침해주는 것으로서 Brinell경도 값이 공냉부에서는 124, 수냉부에서는 204가 측정되었다. 한편 하단부에서 측정치의 크기가 급격히 작아지는 것은 거리 '0'의 자유단에서 응력이완현상 때문으로 생각된다.

검증실험의 계산결과에서 변태응력에 의한 영향이 나타나지 않는 것은, 실험에서 발생하는 판내 온도편차(최고 700°C)가 가속냉각의 경우(200°C 이내)보다 매우 크기 때문에 상대적으로 열응력의 영향이 변태응력의 영향보다 더 크게 작용했기 때문으로 생각된다.

### 5. 결 론

가속냉각공정을 시뮬레이션하기 위한 수치해석 모델을 구성하고 이를 검증하기 위한 검증실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서는 압연판의 가속냉각시 판내에 유도되는 응력 및 변형을 해석하기 위해, 압연직후의 판온도분포를 입력자료로 하여 수냉각중의 온도, 응력을 계산하고 또한 좌굴여부를 추적하는 수치해석 모델을 구성하였다.

(2) 온도편차에 의한 열응력과 변태에 따른 변태응력을 함께 고려하기 위해 결보기비열과 결보기열 팽창계수를 도입함으로써, 냉각속도에 따른 온도분포 및 응력상태 변화에측 모델을 단순화하였다.

(3) 판재의 차별냉각실험을 통한 수치해석 모델의 검증실험 결과, 본 연구에서 구성한 수치해석 모델은 불균일냉각에 의해 유도되는 열응력 및 잔류응력 해석에 적합하였다.

(4) 두께 10mm, 폭 3000mm의 압연판을 10°C/sec로 가속냉각하는 것을 수치 모델을 이용하여 시뮬레이션한 결과,

(가) 압연 직후 판내온도편차비,  $\Delta Tr$ 가 0.08인 경우, 냉각도중에 좌굴이 발생하였으며 냉각후 가장자리에 7kgf/mm<sup>2</sup>의 잔류응력이 발생하였다.

(나) 냉각중에 좌굴을 방지하여 평탄도를 확보하기 위해서는 압연 직후 판내온도편차비,  $\Delta Tr$ 를 0.07 이하로 관리하는 것이 요구된다.

(5) 판재에서 상대적으로 냉각속도가 빠른 부분의 잔류응력은, 온도편차가 커서 열응력의 영향이 클 때(검증실험의 경우)에는 인장성분으로 작용하고 온도편차가 상대적으로 작아서 변태응력의 영향이 클 때(가속냉각의 경우)에는 압축성분으로 작용한다.

### 후 기

본 연구에서 잔류응력 측정은 현대중공업(주)의 용접 기술연구소의 협조를 받아서 행한 것이다. 도움을 주신 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) 大友朗紀, 神尾寛, 中村秀夫, 吉原正典 外, 1984, "壓延鋼材のオンライン熱處理", 鐵と鋼, A193~196, A197~200, A201~204, A205~208.
- (2) P. D. Southwich (ed.), 1986, Accelerated Cooling of Steel, Proc. of Ferrous Metal. Comm. of AIME Held in Pittsburgh, Pennsylvania, Aug. 1985.
- (3) H. Yoshida, 1984, "Analysis of Flatness of Hot-rolled Steel Strip after Cooling", Trans. ISIJ, Vol. 24.

- pp. 212~220.
- (4) G. Gulielmetti, M. Ghersi, F. Catani and P. Fontana, 1987, "Accelerated Cooling Process for Plates", Proc. of Int. Steel Rolling Conf. held in Deauville, France, Jun. 1987, D3.
- (5) 주응용, 김호영, 김창영, 김상준, 1986, "2후판 Roller Quencher를 이용한 가속냉각 기초실험", 포항제철 연구결과보고서.
- (6) R. Szilard, 1974, Theory and Analysis of Plates, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 151~154, pp. 491~504.
- (7) Engineering Data for Stress Analysis, 1983, "Metal", The Babcock & Wilcox Co.
- (8) 鋼材の強制冷却, 1977, 日本鐵鋼協會 共同研究會編, pp. 109~112.
- (9) 三塚 正志, 1968, "高溫鋼板のスプレ冷却に関する研究", 鐵と鋼, Vol. 14, pp. 1457~1471.
- (10) F. G. Rammerstorfer, D. F. Fischer and W. Mitter, 1981, "On Thermo-elastic-Plastic Analysis of Heat-treatment Process Including Creep and Phasetransformation", Computer & Structure, Vol. 13, pp. 771~779.
- (11) 米谷茂, 1983, 残留應力の發生と對策, 養賢堂, 日本, pp. 115~131.