

열전달과 열탄소성변형의 연결해석

이 용기, 한홍남, 오규환, 이 동녕
서울대학교 금속공학과

Coupled Analysis of Heat Transfer and Thermoelstoplastic deformation

Yong-gi Lee, Heung Nam Han, Kyu Hwan Oh, Dong Nyung Lee

Abstract

The study is concerned with the coupled analysis of heat transfer and thermoelstoplastic deformation. The thermoelstoplastic model is very useful for the analysis of residual stress and the analysis of thermal stress as well as the analysis of metal forming. Heat of deformation, phase transformation and contact heat transfer boundary are considered. The contact heat transfer boundary is treated by the interpolation of shape function. The analysis of deformation and the analysis of heat transfer are carried out for the cold upsetting and the hot rolling. The computed results are found to be in good agreement with the experimental results.

1. 서론

소성가공공정은 소성변형을 통하여 원하는 형상을 만드는 방법이다. 가공공정중 재료의 변형거동은 가공중 결합발생이나 가공후 제품의 조직 및 기계적 성질등에 많은 영향을 미친다. 따라서 온도, 마찰, 상변화, 가공속도와 형상등의 각종 인자들이 재료의 변형에 미치는 영향을 조사하여 최적의 조업조건 설정할 필요가 있다. 재료의 변형거동에 미치는 각종 인자들의 영향에 대한 연구는 수치해석적인 방법을 통하여 경제적으로 행해질 수 있다. 최근에는 복잡한 형상을 다룰수 있는 유한요소법이 널리 이용되고 있다.

금속은 온도에 따라 재료의 성질이 변화하므로 변형거동은 온도에 크게 영향을 받는다. 대부분의 소성가공이 열간가공으로 가공중 온도가 변하고 가해진 변형에너지가 대부분 열로 발생되므로 가공중 재료의 변형을 정확히 해석하기 위해서는 변형과 열전달을 연결해석해야한다. 온도의 영향을 고려한 금속의 변형거동을 해석하는 방법에는 크게 열탄소성과 열점소성해석이 있다. 열점소성해석은 계산속도가 빠르지만 열변형과 탄성변형을 고려할 수 없다. 열탄소성해석은 계산시간은 비교적 오래 걸리지만 변형후 잔류응력과 탄성회복등을 얻을 수 있으며 열탄성변형에 의한 열응력문제와 같은 미소변형문제에도 적용할 수 있는 장점이 있다.

1970년대 말부터 온도의 영향을 고려한 재료의 변형거동을 유한요소법으로 해석하기 시작하였다. 초기에는 열전달 해석을 통해 각 시간에서 온도를 계산한 후 재료의 변형을 계산하였으므로 열전달 계산시 재료의 변형에 의해 발생하는 변형열과 형

상변화를 고려하지 못했다. 1980년에는 Rebelo와 Kobayashi [1,2]가 열전달과 열점소성해석을 연결하여 단조문제에 적용하였다. Zienkiewicz [3] 등은 열점소성을 이용하여 압출과 압연시 정상상태에 대해 계산하였다. Pillinger [4] 등은 열탄소성모델을 이용하여 단조문제를 연결해석을 하였으나 접촉부의 열전달경계조건을 이용하지 않았다. 양동열 [5] 등은 접촉부의 열전달을 격자재구성없이 처리하는 방법을 제시하고 열전달과 열점소성해석을 연결하여 열간단조에 적용하였다.

이 연구에서는 변형열 발생과 상변화를 고려하였고, 접촉 경계조건을 형상함수의 내삽을 통하여 처리하였으며, 변형해석을 위하여 열탄소성 모델을 이용하였다. 그리고 상은 업셋팅과 열간 압연문제를 해석하였다.

2. 열탄소성 모델

2.1 구성방정식

열탄소성해석에서 응력과 변형률의 관계는 온도에 의한 재료의 유동응력차이와 열변형률에 의해 탄소성해석의 경우와 차이가 생긴다. 열탄소성변형에서 미소총변형률은 열변형률, 탄성변형률과 소성변형률로 구성되고 이들 변형률들의 합이 미소총변형률과 같다고 가정할 수 있다. 이때 미소총변형률은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon^E + \varepsilon^P + \varepsilon^{Th} \quad (1)$$

여기서 ε 은 미소총변형률, ε^E 은 탄성변형률, ε^P 는 소성변형률이고 ε^{Th} 는 열변형률이다. 이때 응력은 다음식과 같이 탄성변형률과 선형적인 관계가 성립한다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^P - \varepsilon_{kl}^{Th}) \quad (2)$$

여기서 C_{ijkl} 은 탄성구성행렬이다. 소성변형은 변형경로에 따라 유동응력이 달라지므로 식(2)를 중분형태의 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^P - d\varepsilon_{kl}^T) + g_{ij} dT \quad (3)$$

여기서

$$g_{ij} = \frac{dC_{ijkl}}{dT} C_{klmn}^{-1} \sigma_{mn} \quad (4)$$

von Mises 항복식과 조합유동법칙(associated flow rule)을 이용하여 식 (3)의 소성변형률중분항을 제거하면 식 (3)은 다음식으로 표시된다.

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl}^{\tan} (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^{Th}) + \left[g_{ij} - \frac{C_{ijkl} S_{kl} (S_{mn} g_{mn} + r)}{S_{ij} C_{ijkl} S_{kl} - \frac{2}{3} S \bar{\sigma}} \right] dT \quad (5)$$

$$r = -\frac{2}{3} \bar{\sigma} \frac{d\bar{\sigma}}{dT} = -\frac{2}{3} \bar{\sigma} \left(\frac{d\sigma_0}{dT} + \frac{dE_{\tan}^P}{dT} \bar{\varepsilon}^P \right)$$

$$C_{ijkl}^{\tan} = C_{ijkl} - \frac{C_{ijkl} S_{mn} S_{pq} C_{pqkl}}{S_{rs} C_{rstu} S_{tu} - \frac{2}{3} S \bar{\sigma}}$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_0(T) + E_{\tan}^P(T) \bar{\varepsilon}^P$$

$$S = -\frac{2}{3} \bar{\sigma} E_{tan}^P$$

여기서 s_{ij} 는 편차응력, $\bar{\sigma}$ 는 유효유동응력, σ_0 는 초기항복응력이고 E_{tan}^P 는 소성계수이다.

2.2. 유한요소 수식화

재료의 체적력과 관성을 무시하면 어떤시간 t 에서 가상일의 원리에 의해 물체의 평형상태는 아래와 같이 표시된다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta e_{ij} dV = \int_{S_F} P_i \delta U_i dS_F \quad (6)$$

여기서 σ_{ij} 는 Cauchy응력텐서, e_{ij} 는 Eulerian미소변형률텐서, P_i 는 표면하중, U_i 는 변위, V 는 시간 t 에서의 부피, S_F 는 시간 t 에서의 표면적이다. 이 식을 대변형 문제에 적용하기위해서 원래 부피와 표면적에 대하여 나타내면

$$\int_{V_0} T_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV_0 = \int_{S_{F_0}} t_i \delta U_i dS_{F_0} \quad (7)$$

여기서 T_{ij} 는 2차 Piola-Kirchhoff응력텐서, ε_{ij} 는 Green-Lagrange변형률텐서, t_i 는원래 표면적 S_{F_0} 에서 기술되는 표면하중이다. 윗식을 증분형태로 바꾸고 각 절점으로 이산화시키면 다음과 같은 행렬식을 얻는다.

$$\underline{K} \Delta \underline{U} = \underline{F} \quad (8)$$

여기서 \underline{K} 는 강성행렬, \underline{F} 는 하중벡터이고 $\Delta \underline{U}$ 는 구하고자하는 변위벡터이다..

3. 열전달 모델

3.1. 열전달 기본방정식

열전달 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$C \dot{T} = K T_{,ii} + Q^g \quad (9)$$

여기서 C 는 단위체적당 열용량, K 는 열전도도이며 Q^g 는 단위체적당 총열발생량으로 다음식과 같이 변형과 무관한 열발생량 Q^b 와 변형열의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Q^g = Q^b + k^* \bar{\sigma} \varepsilon \quad (10)$$

여기서 k^* 는 총변형에너지가 열에너지로 바뀌는 비율을 나타내는 상수로서 일반적으로 0.85-0.95의 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 0.9를 택하였다.

열강소성이나 열점소성 변형과 달리 열탄소성 변형은 열변형이나 탄성변형에 의해 부피의 변화가 생긴다. 이러한 부피의 변화를 고려하여 단위체적당 열용량, C 는 다음과 같이 보정된다.

$$C = \frac{C_0}{(1 + \varepsilon_{ii})} \quad (11)$$

열전달해석에서 상변화를 고려하기위하여 다음과 같은 상변화 경계조건을 사용한다.

$$\Delta q^s ds = \pm \frac{L dv}{dt}, \quad T = T_{tr} \quad (12)$$

여기서 ΔQ^s 는 상변화에 의해 생기는 상변화 경계면에서의 열유량, L 은 상변화시 단위 부피당 잠열이고 V 는 상변화된 부피이다. 열전달방정식과 경계조건을 변분식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \int_V K T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V C \dot{T} \delta T dV - \int_V Q^G \delta T dV - \int_{Q_n} \delta T dS = 0 \quad (13)$$

식 (14)를 이산화하여 선형화시키면 다음과 같은 행렬식으로 표시할 수 있다.

$$\underline{K} \Delta \underline{T}^{(i)} = \underline{Q}^{(i-1)} \quad (14)$$

여기서 각 항은 다음과 같이 표시된다.

$$\underline{K} = {}^t \underline{K}^k + {}^t \underline{K}^c + {}^t \underline{K}^r$$

$$\underline{Q}^{(i-1)} = {}^{t+\Delta t} \underline{Q}^{b(i-1)} + {}^{t+\Delta t} \underline{Q}^{c(i-1)} + {}^{t+\Delta t} \underline{Q}^{r(i-1)} - {}^{t+\Delta t} \underline{Q}^{k(i-1)}$$

$$\underline{T}^{(i)} = \underline{T}^{(i-1)} + \Delta \underline{T}^{(i)}$$

여기서 윗첨자 k, c 와 r 은 각각 열전도에 의한 항, 열전달 경계조건에 의한 항과 복사 경계조건에 의한 항을 나타내고 Q^b 는 식 (13)의 두번째와 세번째항에 의한 값이다. 또한 윗첨자 (i) 와 $(i-1)$ 은 반복계산횟수를 나타낸다. 시간적분은 상변화에 의한 잠열을 처리하기 위하여 Euler Backward Scheme을 이용하였다.

3.2 접촉열전달경계조건의 처리

열탄소성변형과 열전달해석이 연결될 경우 변형에 의해 접촉되는 면이 바뀌게 된다. 접촉되지않은 경우에는 열전달 계수가 비교적 작고 열전달 경계에서 주위온도가 일정하다고 가정할 수 있다. 그러나 접촉된 경우에는 열전달 계수가 접촉되지않은 경우의 수천배나 되고, 상대편 온도도 접촉된 상대편의 온도를 이용하여 접촉면의 양쪽으로 열평형이 이루어지도록 해야한다. 그러므로 열전달 경계조건은 접촉여부에 따라 다음과 같이 나누어진다.

i) 접촉이 일어나지않은 경우

$$q_n = h(T_e - T_s)$$

ii) 접촉이 일어난 경우

$$q_n = h_{cont}(T_{cs} - T_s)$$

여기서 q_n 은 경계면에서의 열유량, h 는 접촉되지않은 경우의 열전달 계수, h_{cont} 는 접촉된 경우의 열전달 계수, T_s 는 열전달 경계면의 온도, T_e 는 접촉되지않은 경우의 외부온도이고 T_{cs} 는 접촉된 경우의 상대편 온도이다.

두 물체가 접촉될 때 접촉면에서 양쪽의 절점의 위치가 일치하지 않는다. 그러므로 접촉면의 상대편 온도, T_{cs} 를 쉽게 알수가 없으며, 부분적으로 접촉이 일어난 경계요소가 생길 수 있다. 이러한 문제를 해석하기 위해 Rebelo[2]등은 경계부의 절점재 구성방법을 사용하여 접촉되는 부분의 양쪽 절점을 일치시켰다. 그러나 이 방법은 접촉면의 형상이 복잡할 경우 적용에 어려움이 있고, 초기요소망을 구성할 때 접촉될 두 물체의 격자간격을 비슷하게 해야하는 단점이 있다. 따라서 이 연구에서는 형상함수를 이용하여 이웃한 절점으로부터 내삽하여 T_{cs} 를 구하였다. 또한 국부적으로 접촉된 경계요소는 접촉된 부분의 분률을 이용하여 처리하였다.

접촉경계조건에서 T_s 항과 T_{cs} 항 모두 구해야 할 온도로 표시되므로 식 (14)의 오른쪽 항으로 들어가야 한다. 그러나 이 경우 \underline{K} 행렬이 비대칭이 되고 밴드의 크기

가 매우 커지게되므로, 이 연구에서는 T_s 항만 식 (14)의 오른쪽항에 포함시키고 T_{cs} 항은 열유량 경계조건을 이용하여 식 (14)의 왼쪽항에 포함시켜서 반복계산을 통해 열평형이 이루어지도록했다.

4. 결과 및 고찰

4.1 냉간 축대칭 업셋팅 해석

AISI 1015강의 냉간 축대칭 업셋팅시 변형열에 의한 온도상승과 변형을 해석하였다. 계산에 이용한 물성치는 Rebelo등[2]에 의해 제시된 값을 이용하였고, 초기요소망은 그림 1과 같다. 마찰계수는 0.65, 다이이동속도는 10mm/sec로 하였다.

그림 2에 33% 압축시킨 경우의 소성변형률의 분포와 온도분포를 나타내었다. 접촉부의 가장자리부분이 가장 심하게 변형되었고 소재의 중심부도 심하게 변형되었다. 변형에 의한 소재의 온도증가는 최고 80℃정도이며 다이의 온도증가는 3℃정도로 미약했다. 변형이 짧은 시간동안 이루어지므로 열전도에 의한 영향은 미약하고 소재의 온도분포는 주로 열발생분포에 의해 결정된다. 그러므로 온도분포와 소성변형률 분포는 대체로 일치된 양상을 나타낸다. 그러나 소재의 접촉부 가장자리는 큰 접촉열전달 계수에 의해 다이쪽으로 빠르게 열을 빼앗기므로 변형에 비해서 온도상승이 작다.

그림 3(a)에 주어진 각 위치에서 압하율에 따른 온도변화를 Polh[7]의 실험값과 함께 나타냈다. 실험결과와 계산결과는 비교적 잘 일치하였다. 압하율이 증가함에 따라 온도상승속도가 빨라지는데, 그이유는 압하율이 증가함에 따라 유동응력과 동일 압하율에 해당하는 변형률이 증가하기 때문이다.

4.2 열간 압연 해석

저탄소강의 열간압연시 온도변화 및 압연후 탄성회복과 열수축에 의한 압연소재의 두께변화를 조사하였다. 평면변형을 가정하였고, 저탄소강의 유동응력은 변형률 속도의 영향은 무시하고 온도와 변형률에만 의존한다고 가정하였고 표 2의 값을 계산에 이용하였다[7]. 다른 열적 기계적 성질은 문헌에 제시된 값을 이용하였다[7-9]. 계산에 이용된 압연소재의 두께는 38mm, 로울의 지름은 250mm이고 마찰계수는 0.2였다. 주위공기의 온도는 20℃로 고정되었다고 가정하였고 로울의 온도는 초기에 20℃이고 소재와 접촉에 의한 온도상승효과를 고려하였다.

그림 4와 5에 각각 초기온도 865℃, 로울회전속도 4rpm, 압하율 20%인 조건과 초기온도 825℃, 로울회전속도 10rpm, 압하율 19.2%인 조건에서 압연할 때의 로울과 소재의 온도변화를 나타냈다. 이때 시간은 로울과 피용접재가 접촉하기 시작하는 시간을 0초로 하고 소재표면온도는 표면에서 1.8mm위치에서의 값으로 하였다. 접촉이 시작되면 로울표면은 온도가 급격히 상승하고 소재표면은 급격히 감소한다. 소재의 중심부는 변형열에 의해 소재가 로울과 접촉이 일어나면 온도가 상승했다가 감소한다. 계산된 결과와 실험결과는 경향은 일치하지만 상당한 오차를 있다. 그이유는 실험값은 앞선 공정에 의해 접촉직전에 소재의 표면과 중심에 온도차이를 가지고 있으나 계산시 소재의 온도가 균일하다고 가정했기 때문이다. 소재표면의 온도를 실험값과 일치시켜보면 계산된 결과는 실험값과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 압연속도가 증가하면 소재표면의 온도가 적게 감소한다. 그 이유는 압연속도가 증가하면 소재가 로울과 접촉하는 시간이 감소하여 로울쪽에서의 열손실이 적게 되기때문이다.

압연후 탄성회복과 열수축에 의해 소재의 두께는 로울간격과 차이가 생긴다. 그림

6에 시간에 따른 소재의 두께의 변화를 나타냈다. 소재가 로울사이를 빠져나오면 초기에 탄성회복에 의해 두께가 조금 증가하다가 열수축에 의해 시간이 지남에 따라 두께가 감소한다. 열간압연시 정밀한 압연을 하기 위해서는 탄성회복과 열수축을 고려해야한다.

5. 결 론

열전달과 연탄소성변형을 연결해석하는 유한요소 프로그램을 개발하고 상온 업셋팅과 열간압연을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연탄소성변형과 상변화를 포함하는 열전달해석을 연결해석하는 유한요소 프로그램을 개발하였다.
2. 접촉 열전달 경계조건에서 상대편 온도를 격자점 재구성없이 이웃한 절점에서 내삽법을 통하여 구하는 방법을 제시하였다.
3. 상온 업셋팅해석을 통하여 가공중 변형열에 의한 온도증가를 구하고 실험값과 잘 일치함을 확인하였다.
4. 열간압연해석을 통하여 소재의 온도변화를 실험값과 비교하여 잘 일치함을 확인하였고 압연이 끝난 후 탄성회복과 열수축에 의한 소재의 두께변화를 조사하였다.

참고 문헌

1. N. Rebelo and S. Kobayashi : Int. J. Mech. Sci., 22 (1980) 699
2. N. Rebelo and S. Kobayashi : Int. J. Mech. Sci., 22 (1980) 706
3. O. C. Zienkiewicz, E. Oñate and J. C. Heinrich : Int. J. Num. Meth. Eng., 17 (1981) 1497
4. I. Pillinger, P. Hartley, C. E. N. Sturgess and G. W. Rowe : Int. J. Num. Meth. Eng., 25 (1989) 87
5. 박치용, 조종래, 양동열 : 대한기계학회논문집, 14 (1990) 1166
6. W. Pohl : Doctoral Disseration, University of Stuttgart (1972)
7. ASM : *Metals Handbook*, 9th.(ed.), 14 (1988) 164
8. M. Pietrzyk and J. G. Lenard : NUMIFORM 89 (1989) 343
9. 김낙수 : 소성가공학회지, 2 (1993) 65

표 1. 저탄소강의 유동응력과 소성변형률의 관계

$\bar{\sigma} = K (\epsilon^p)^m$				
Temperature	627℃	675℃	815℃	900℃
K (MPa)	525	395	330	220
m	0.15	0.13	0.32	0.18

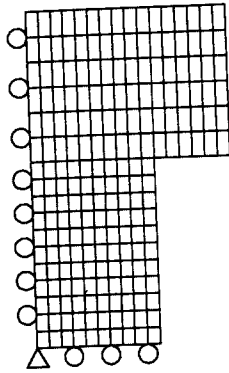
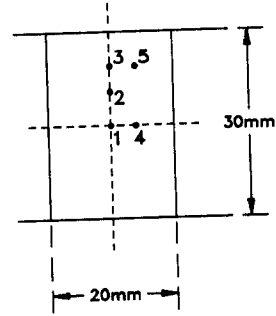
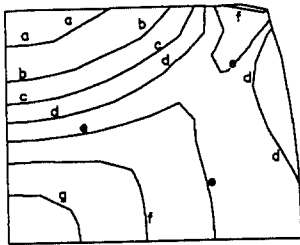


그림 1. AISI 1015 강의 냉간업셋팅 계산을 위한 초기 요소망 및 경계조건



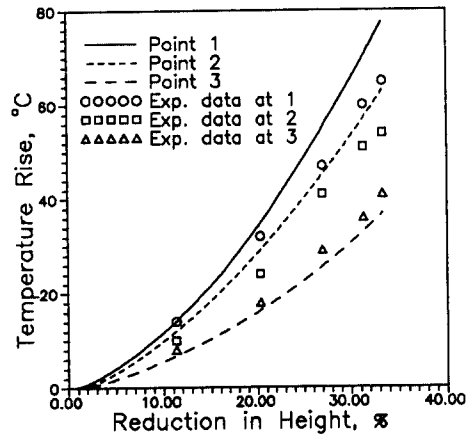
Initial location	
R	Z
1	0.0
2	0.0
3	0.0
4	4.0
5	4.0

(a)

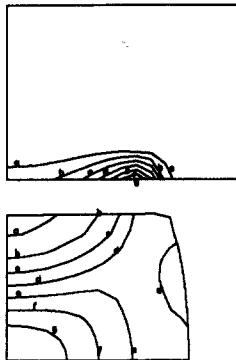


Min(-)=0.147E-01
Max(+)=0.865E+00
Contour levels
a=0.500E-01
b=0.150E+00
c=0.250E+00
d=0.350E+00
e=0.450E+00
f=0.550E+00
g=0.650E+00

(a)



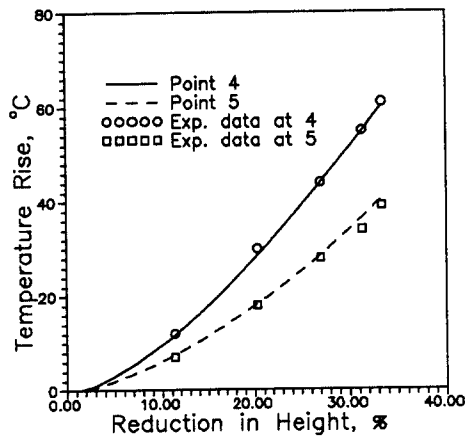
(b)



Min(-)=0.000E+00
Max(+)=0.236E+02
Contour levels
a=0.200E+02
b=0.180E+02
c=0.160E+02
d=0.140E+02
e=0.120E+02
f=0.100E+02
g=0.800E+02

Min(-)=0.000E+00
Max(+)=0.800E+02
Contour levels
a=0.200E+02
b=0.400E+02
c=0.600E+02
d=0.800E+02
e=0.700E+02
f=0.600E+02
g=0.800E+02

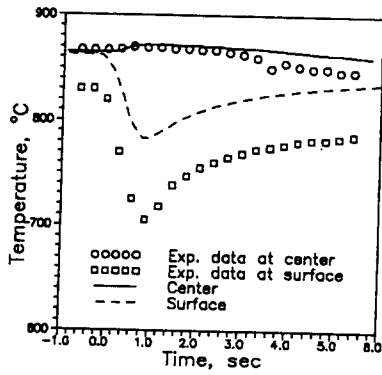
(b)



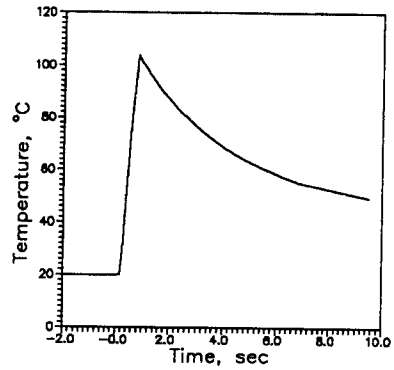
(c)

그림 2. 33%압하율에서 (a) 소성변형률 분포와 (b) 온도 분포

그림 3. (a) 온도를 측정된 위치와 (b), (c) 각 위치에서의 압하율에 따른 온도변화

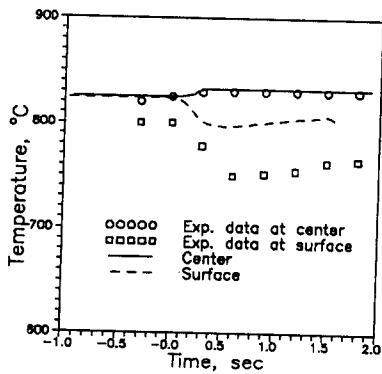


(a)

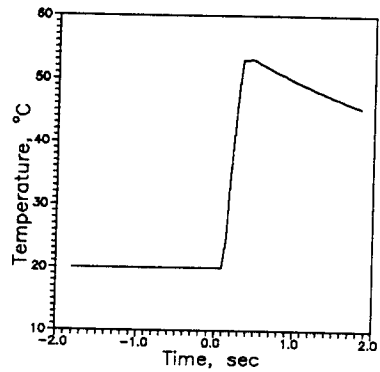


(b)

그림 4. (a) 압연소재의 표면 및 중심과 (b) 로울표면의 시간에 따른 온도변화
(로울회전속도 : 4 rpm, 초기압연소재온도 : 865°C, 압하율 : 20%)

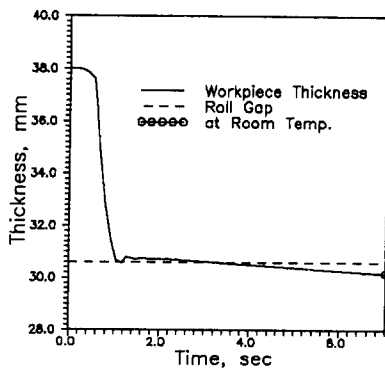


(a)

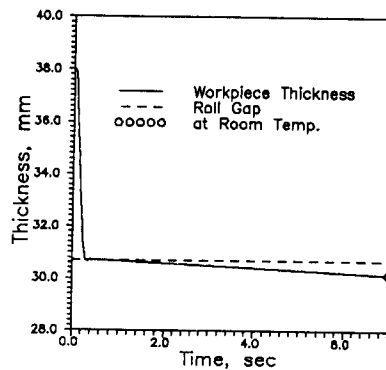


(b)

그림 5. (a) 압연소재의 표면 및 중심과 (b) 로울표면의 시간에 따른 온도변화
(로울회전속도 : 10 rpm, 초기소재온도 : 825°C, 압하율 : 19.2%)



(a)



(b)

그림 6. (a) 그림4의 압연조건(b) 그림 5의 압연조건에서의
압연소재의 시간에 따른 두께변화