

강-열점소성 유한요소법을 이용한 알루미늄 링압연 공정 해석

구상완^{*}· 이종찬^{**}· 윤수진^{***}· 김낙수[†]
(2002년 11월 20일 접수, 2003년 3월 5일 심사완료)

Analysis of Aluminium Ring Rolling Process Using Thermo-Rigid-Plastic Finite Element Method

Sangwan Koo, Jongchan Lee, Su-Jin Yun and Naksoo Kim

Key Words: Ring Rolling(링 압연), Heat Transfer(열전달), FEM(유한요소법)

Abstract

The ring rolling process involves not only three-dimensional non-steady material flow and continuous change of radius and thickness of the ring workpiece but also heat transfer among workpiece, rolls and environment. In this study, deformation and heat transfer analyses were conducted by using the three-dimensional thermo-rigid-plastic finite element method. Three cases of plain ring rolling process were, respectively, simulated for the predictions of roll forces and the highest temperature zone during the aluminum process that ductile fracture often occurs. In addition, to prevent fishtail phenomena of the ring workpiece, axial rolls were used for this study.

1. 서 론

링 압연 공정은 링 형상의 소재가 구동률과 압력률 사이에 위치하여, 구동률이 회전하고 압력률이 진입함에 따라 직경이 확장된 제품을 얻을 수 있는 성형 공정이다. 링 압연 공정의 장점은 생산 속도가 빠르며, 강도가 높고, 표면 처리가 좋은 제품을 얻을 수 있으며, 재료의 낭비가 적다는 것이다. 알루미늄과 같은 재료의 단가는 비싼 소재인 경우 링 압연 공정을 통해 생산비용을 대폭 절감하는 효과를 거둘 수 있다. 하지만 실제 산업 현장에서는 링 압연 공정에 대한 충분한 이해가 축적되어 있지 않아 새로운 공정의 개발에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 해

결하기 위해 컴퓨터를 이용한 공정 시뮬레이션 프로그램이 발달하였다. 특히 유한요소법을 이용한 수치 해석이 정확성과 범용성으로 인해 많이 시도되고 있다.

링 압연 공정의 수치 해석은 점진적인 변형해석을 필요로 하므로, 일반적으로 많은 계산 시간이 소요된다. 따라서 초기에는 평면 변형률 조건을 가정하거나,⁽¹⁾ 변형 영역⁽²⁾에 대해서만 국부적으로 수치 해석을 실시하였다. 그러나 이러한 가정은 원추률에 의한 변형이 고려될 수 없는 단점이 있다.

Kim 등⁽³⁾은 소재의 강체 영역에 대해서는 성기계 구성한 계산용 메쉬(mesh)를 별도로 구성하는 새로운 접근 방식을 사용하였다. 이것은 해석시간을 줄이면서도, 완전한 3차원 해석이 가능하게 하였다. 이와 같은 방식은 Lim 등⁽⁴⁾에 적용되었으며, Davey와 Ward⁽⁵⁾는 이러한 메쉬 시스템에 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 업데이트 방식을 결합한 해석 기법을 제안하였다.

링 압연 공정에 대한 열전달 해석은 Song 등⁽⁶⁾에 의해 시도되었지만, 2차원 해석에 대해서만 한정되었다. 본 연구에서는 평링 압연 공정에 대

* 서강대학교 대학원 기계공학과

** Shape Co., Ltd.

*** 국방과학 연구소

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : nskim@ccs.sogang.ac.kr

TEL : (02)705-8635 FAX : (02)712-0799

해 3차원 열전달 해석을 실시하였다. 해석에는 Kim⁽¹⁾이 개발한 프로그램인 RING을 상용화한, 3 차원 링압연 공정 해석 프로그램인 SHAPE-RR을 사용하였고, 소재는 Al 7075를 사용하였다. Al 7075는 공정 중에 가공연화되어 쉽게 연성파괴가 일어나는 기계적 성질이 있다.

2. 이론

2.1 강소성 이론

미소 변형으로 가정하고, 내부효과, 물체력, 그리고 변형에 의한 기하학적 변화를 무시한다면 속도장과 응력장은 다음과 같은 조건을 만족한다.

(i) 평형 방정식(equilibrium equation)

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad \text{in } V \quad (1)$$

(ii) 경계조건(boundary condition)

$$\begin{aligned} v_i &= v_i^* && \text{on } S_u \\ \sigma_{ij} n_j &= t_i^* && \text{on } S_F \end{aligned} \quad \left. \right\} S_u + S_F = S_{total} \quad (2)$$

(iii) 적합 방정식(compatibility equation)

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (3)$$

(iv) 유동 법칙(flow rule)

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij} &= \frac{3}{2} \bar{\sigma} \sigma'_{ij} \\ \text{단, } \dot{\varepsilon} &= \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} \quad \text{및 } \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \end{aligned} \quad (4)$$

(v) 비압축성 조건(incompressibility condition)

$$\varepsilon_{kk} = 0 \quad (5)$$

2.2 열전달 이론

열간에서 링 압연이 이루어지는 경우, 소재와 를 사이의 열전달, 소재와 분위기(environment) 사이의 열전달을 평가하여야 한다. 열전달 해석은 다음과 같은 열평형 방정식에 근거한다.

$$(k_i T_{,i})_i - \rho C \dot{T} + r = 0 \quad \text{in } V \quad (6)$$

여기에서 k_i 는 각 방향으로의 열전도율(Thermal conductivity), T 는 온도, ρ 는 밀도, C 는 비열(Specific heat capacity), ρC 는 열용량(Heat capacity), \dot{T} 는 온도율(Temperature rate), r 은 열생성율(Heat generation)이다.

경계 조건에는 식 (7)과 같이 온도 경계조건과 열유동(heat flux) 경계 조건이 있다.

$$\begin{aligned} T &= T^* && \text{on } S_T \\ q_n &= q_n^* && \text{on } S_n \end{aligned} \quad \left. \right\} S_T + S_n = S_{total} \quad (7)$$

링 압연 공정에서는 열유동 경계조건은 다음과 같이 세 종류로 구분된다.

(i) 대기중으로 열유동

$$\dot{q}_n = h(T_{env} - T_s) \quad (8)$$

(ii) 다른 물체와 접촉하고 있을 때의 열유동

$$\dot{q}_n = h_{ub}(T_{ext} - T_s) \quad (9)$$

(iii) 복사에 의한 열유동

$$\dot{q}_n = \sigma \varepsilon (T_{env}^4 - T_s^4) \quad (10)$$

열전달에서의 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이며, ε 는 Emittance이다.

3. 수치적 모델링

3.1 평링 압연 공정의 모델링

Fig. 1에 평링 압연 공정에 대한 개략도를 나타내었다. 평링 압연 공정에서는 를의 형상이 평평하여, 링의 외곽선을 변형시키지 않고, 직경을 확장시키는 제품을 생산한다. 해석에는 구동률, 압력률과 함께 원추률이 고려되었다. 원추률은 소재의 상부를 변형시켜, 괴쉬테일(fishtail) 현상이 나타나지 않도록 하기 위해서이다. 구동률은 소재에 토크를 전달해서 원주 방향으로 이송시키는 반면, 압력률과 원추률은 공회전한다. 그리고 압력률은 반경방향으로 진입하여, 소재의 단면이 를 형상을 따라 변형되도록 하였다. 해석에 사용한 를 장비의 치수와 각속도는 Table 1과 Fig. 2에 나타내었다. 마찰인자는 전체적으로 0.5이며, 압력률의 이송 속도는 1 mm/sec로 가정하였다. 해석 속도의 향상을 위해 링의 중심축에 대해 기하학적 대칭을 이용하여 절반 모델(half model)을 사용하였다.

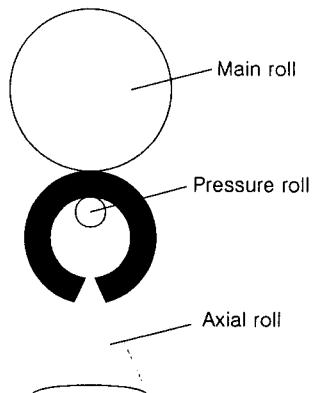


Fig. 1 Schematic diagram of ring rolling process

Table 1 Dimension of each roll

Roll Name	Radius	Angular Vel.
Main Roll	458.5 mm	28 rpm
Pressure Roll	85/115 mm	Idle
Axial Roll	-	Idle

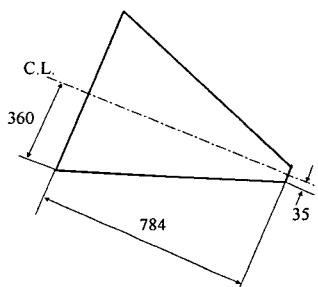


Fig. 2 Dimension of axial roll

3.2 재료의 모델링

3.2.1 유동 응력식

소성 변형시 재료의 변형과 유동 응력(flow stress)과의 관계를 나타내는 식을 유동 응력식이라고 하며, 열간 성형에서는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\sigma_f = C \dot{\varepsilon}^m (MPa) \quad (11)$$

Al 7075에 대해 온도에 따른 유동 응력 계수의 변화를 Table 2에 제시하였다.

Table 2 Coefficient of flow stress at each temperature

Temp.	673K(400°C)		723K(450°C)		773K(500°C)		823K(550°C)	
	C	m	C	m	C	m	C	m
Coeff.	68.9	0.09	41.4	0.135	26.9	0.15	20	0.17

Table 3 Temperature properties of Al 7075

Density	2810 [kg/m³]
Thermal conductivity	0.155 [W/mm·K]
Heat capacity (Mass density*Specific heat)	2.481 [N/mm²·K]
Constant heat transfer coeff. to environment	0.00498 [kW/mm²·K]
Constant heat transfer coeff. to Roller	32.88 [kW/mm²·K]

온도 해석을 위해 열간 성형의 경우의 데이터를 바탕으로 다항식 근사로 보간하였으며, 이를 해석 프로그램에 추가하여 계산을 수행하였다.

3.2.2 온도 물성치

롤(roll)과 공기의 온도는 25°C로 일정하며, 소재의 초기 온도는 420°C로 설정하였으며, Al 7075의 온도에 관련된 물성치들은 Table 3에 제시하였다.

4. 해석조건 및 결과

4.1 해석 조건

알루미늄 링의 작업 조건으로 Case I와 Case II는 예비 성형체의 치수는 다르지만, 최종 성형체의 치수가 같은 두 가지 경우를 설정하였다. Case III에 대해서는 압력롤의 반경이 85mm와 115mm인 경우에 대해 해석하여 비교하였다.

4.2 변형 양상

링 압연 전용 프로그램인 SHAPE-RR로 해석한 결과 Fig. 3와 같은 변형 양상을 얻을 수 있었다. Case I과 Case II는 최종 형상의 단면의 모양은 같으나, 초기 체적이 다르기 때문에, 최종 링 지름의 크기는 달라지게 되었다.

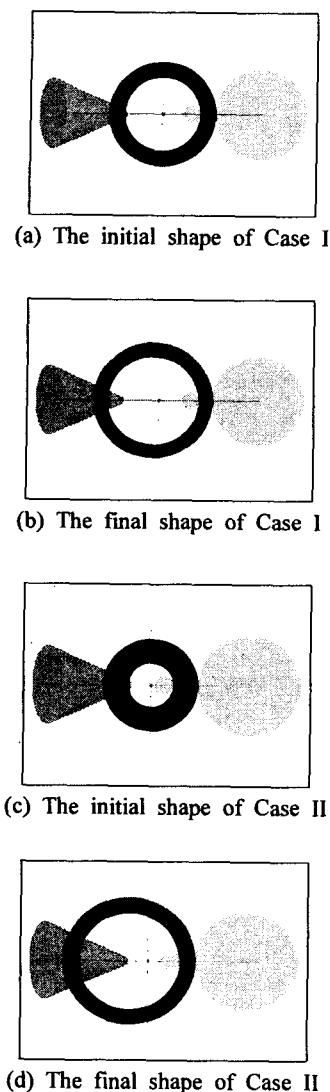
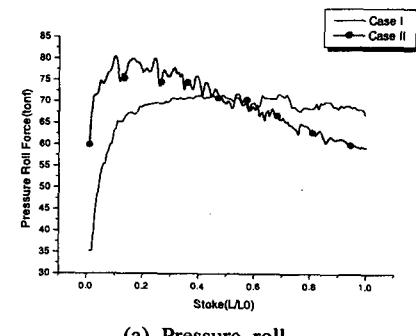


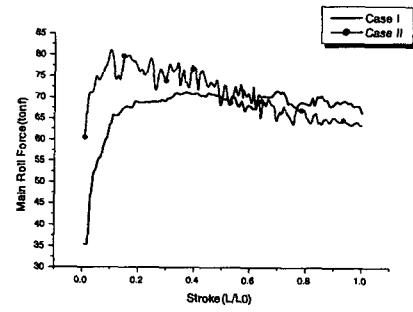
Fig. 3 Process of aluminium ring rolling

4.3 소요 하중의 비교

Fig. 4는 Case I과 Case II의 압력롤과 구동롤에 대하여 하중-이송 곡선을 비교하여 나타내었다. Fig. 4(a)는 압력롤에 걸리는 하중을 보여 주고 있다. 성형체의 를 지름이 커짐에 따라 하중이 점진적으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 압력롤이 일정속도로 진입함에 따라, 를 지름이 커지면서 접촉 영역이 감소하기 때문이다.

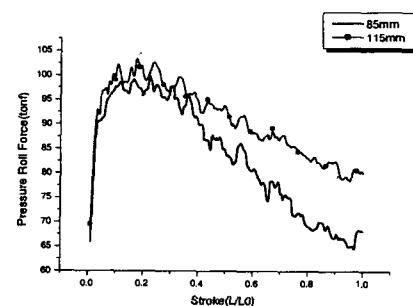


(a) Pressure roll

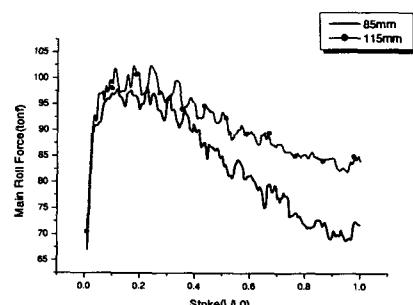


(b) Main roll

Fig. 4 Load-stroke curve



(a) Pressure roll



(b) Main roll

Fig. 5 Load-stroke curve of Case III

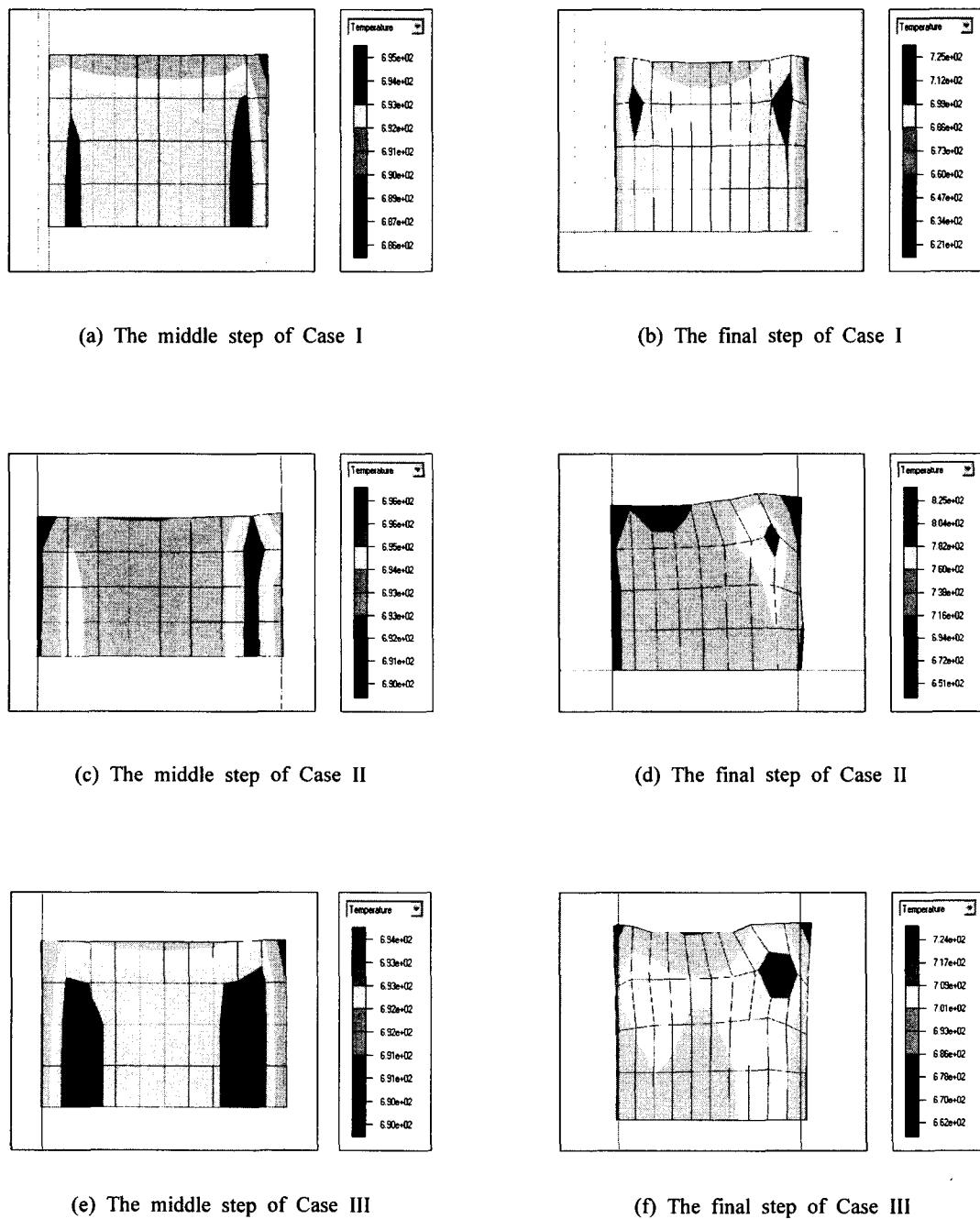
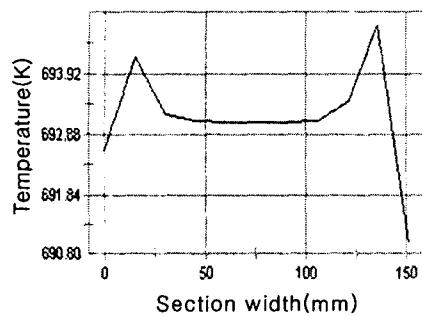
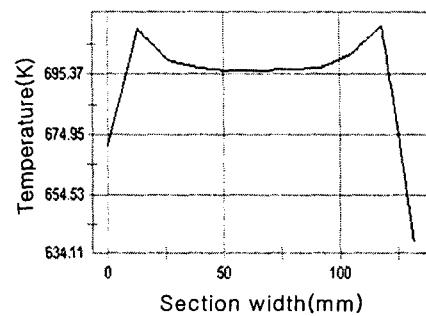


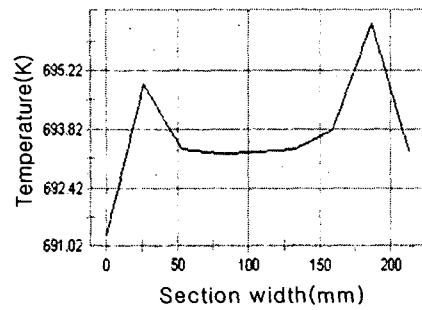
Fig. 6 Temperature distribution



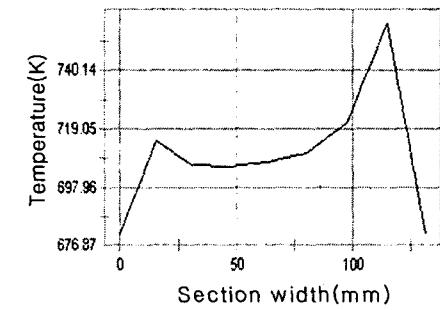
(a) The middle step of Case I



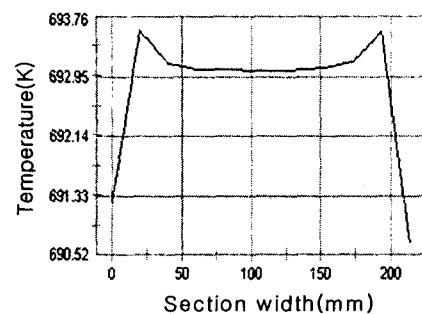
(b) The final step of Case I



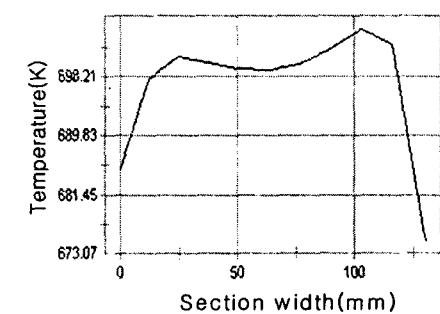
(c) The middle step of Case II



(d) The final step of Case II



(e) The middle step of Case III



(f) The final step of Case III

Fig. 7 Temperature profile along the symmetric plane

Fig. 4(b)에 나타난 메인틀에 걸리는 하중은 압력률에 걸리는 하중과 거의 동일한 경향을 보여준다. 이는 압력률에서 전달하는 하중과 메인틀에 걸리는 하중이 힘의 평형을 이루고 있기 때문이다.

를 치수의 변화에 따른 하중 변화를 알아보기 위해 Case III에 대해 압력률의 이송속도를 균일하게 하고, 틀의 크기를 85mm에서 115mm로 변경하였으며, 해석결과는 Fig. 5에 나타내었다. 압력률이 크면 접촉영역이 넓어지므로 하중이 보다 높게 소요되는 것을 확인할 수 있다.

4.4 단면의 온도 분포

단면의 온도 변화를 해석하기 위해 Case I, Case II, Case III에 대해 해석을 진행하였다. Fig. 6은 공정의 중간단계와 최종단계에 이르렀을 때, 각각의 Case에 대해 단면의 온도분포와 변화양상을 보여주고 있다.

Fig. 6에서 소재의 상부에 피쉬테일 현상이 거의 일어나지 않은 것을 확인할 수 있다. 이것은 원추률을 사용하여 소재의 상부가 평평하게 변형되었기 때문이다. 원추률은 실제 링 압연 공정에서도 사용되며, 제품의 정밀도를 더 높이는 역할을 한다.

압력률과 구동률의 표면에서 대략 20~30mm 떨어진 곳에서는 국부적으로 온도가 급격히 올라가는 영역인 LHTZ(Local High Temperature Zone)이 존재하였다. LHTZ가 공정이 진행될수록 영역이 좁아지는 것을 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 7은 단면에서 대칭면을 따라 온도 프로파일이 변화해 가는 과정을 비교한 것으로, 온도가 매우 높은 지점이 있음을 잘 보여주고 있다. 이런 현상은 대체로 변형이 진행될수록 점차 과도해 졌으나, Case III는 최종 상태에 이르러서는 그러한 현상이 점차 소멸되는 경향을 보이고 있다. 이것은 단면의 온도분포에서 알 수 있듯이 LHTZ가 위쪽으로 상승하였기 때문이다.

각 Case에 대해 최종 상태에 이르렀을 때의 단면에서의 최고 온도를 Table 4에 제시하였다. 공정시간이 길어서 소재가 변형을 많이 하게된 Case II와 Case III 그리고 Case I의 순서로 최고 온도가 높음을 확인할 수 있었다. Al 7075의 반응고 영역은 557°C(827K)에서 시작되므로, 그 위치에 가까운 Case II는 소재가 연성 파괴될 가능성이 높다고 할 수 있다.

Table 4 The highest temperature of a section

	Case I	Case II	Case III
Temperature (K)	725	825	763

치에 가까운 Case II는 소재가 연성 파괴될 가능성이 높다고 할 수 있다. 만약 연성 파괴가 일어난다면, Fig. 7(d)에서 가장 높은 온도를 보여주는 구동률에서 대략 20~30mm 떨어진 곳에서 파괴될 것이다.

5. 결론

알루미늄 링압연의 공정의 수치 모델링을 통해 SHAPE-RR로 해석한 결과, 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 압력률과 메인틀에 걸리는 하중은 해석이 진행될수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 소재의 링반경이 커짐에 따라 하중을 전달하는 압력률과의 접촉영역이 점차 줄어들었기 때문이다.

(2) 압력률의 치수를 크게 할 경우 접촉영역이 늘어나므로 소재에 걸리는 하중은 증대되었다.

(3) 성형체의 단면의 온도는 변형이 진행될수록 상승하였으며, 성형체의 표면에서 20~30mm 들어간 위치에서 가장 높게 나타났다. 그 위치가 점차 위쪽으로 이동하여 국부적으로 온도가 매우 높은 LHTZ(Local High Temperature Zone)이 존재하였다. 이것은 높은 온도에서 재료가 연화되는 알루미늄의 특성에 따라 파단될 가능성을 보여준다.

(4) 대칭면에서 온도 프로파일은 20~30mm에서 들어간 위치에서 온도가 높아지는 현상을 잘 나타내었다. 이런 현상은 대체로 변형이 진행될수록 점차 과도해 졌다.

(5) 공정이 종료되었을 때, 링 성형체의 단면에서의 최고온도는 공정시간이 상대적으로 긴 Case II와 Case III가 높게 나타났다. Al 7075의 반응고 영역은 557°C(827K)에서 시작되므로, 그 위치에 가까운 Case II는 소재가 연성 파괴될 가능성이 높다고 할 수 있다.

후기

본 논문 연구는 서강대학교 산업기술연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Yang, D.Y. and Kim, K.H., 1988, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plain Strain Ring Rolling," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 30, pp. 571~580.
- (2) Yang, D.Y., Kim, K.H. and Hawkyard, J.B., 1991, "Simulation of T-Section Profile Ring Rolling by the 3-D Rigid-Plastic Finite Element Method," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 33, pp. 541~550.
- (3) Kim Naksoo, Susumu Machida and Shiro Kobayashi, 1990, "Ring Rolling Process Simulation by the Three Dimensional Finite Element Method," *Int. J. Mech. Tools Manufact.*, Vol. 30, pp. 569~577.
- (4) Lim, T., Pillinger, I. and Hartley, P., 1998, "A Finite-Element Simulation of Profile Ring Rolling Using a Hybrid Mesh Model," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 80~81, pp. 199~205.
- (5) Davey, K. and Ward, M.J., 2002, "A Practical Method for Finite Element Ring Rolling Simulation Using the ALE Flow Formulation," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 44, pp. 165~190.
- (6) Song, J.L., Dowson, A.L., Jacobs, M.H., Brooks, J. and Beden, I., 2002, "Coupled Thermo-Mechanical Finite-Element Modelling of Hot Ring Rolling Process," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 121, pp. 332~340.