

변형공정지도를 활용한 링롤링 공정 조건 평가

이혁준¹ · 강경필² · 김용환[#]

Use of Processing Maps to Evaluate the Forming Condition during Ring Rolling

H. J. Lee, G. P. Kang, Y. H. Kim

(Received March 4, 2015 / Revised December 7, 2015 / Accepted January 13, 2016)

Abstract

The control of the roll velocities is essential in maintaining stability during ring rolling, but such control is difficult. The determination of the best roll velocities can be helped with the use of FE simulations and processing maps, which give the useful information such as power dissipation and flow instability for hot metal forming processes. In the current study, the workability of 7050 aluminum alloy is evaluated by using processing map. With the developed information, the stability of the ring rolling condition, called the Constant Growth Velocity Condition (CGVC), is evaluated.

Key Words : Constant Growth Velocity Condition(CGVC) Model, Processing Map, Ring Rolling, Workability

1. 서론

다양한 단면 형상을 가진 제품을 제작할 수 있으며, 생산된 제품에 이음매가 없어 기계적 특성이 우수한 링롤링 공정(ring rolling process)은 자동차·항공우주·기계산업 등 다양한 분야에서 활용하고 있다[1~3].

링롤링 공정(Fig. 1)은 링소재(ring workpiece), 메인롤(main roll), 맨드렐(mandrel), 축롤(axial roll)과 가이드롤(guide roll)로 구성된다. 여기서 주금형은 맨드렐이며, 메인롤은 링소재를 회전시킨다. 맨드렐과 메인롤 사이에서 변형되며, 소재 단면적이 감소하고, 직경이 증가한다[3~5]. 링롤링 공정은 타공정에 비해 성형하중이 낮고 단공정이기 때문에, 생산성이 우수하고 일정한 품질의 제품을 생산할 수 있다. 따라서 원형 부품이 필요한 산업 모두에서 이용할 가치가 높다. 현재 링롤링 공정 산업은 축적된 기술이 부족하기 때문에[6, 7], 좋은 제품을 생산하기 위한 공정

조건을 설계하고 이를 평가·검증할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

링롤링 공정 특성상 금형과 소재 사이에서 동적 접촉을 반복하게 되어 제품의 품질을 저하시키는 원인이 된다[8]. 성공적인 제품 제작을 위해서 이런 특징을 고려하여 가이드롤과 축롤 그리고 맨드렐의 움직임 거동을 설계해야만 한다. Yan 등[9]은 링소재의 외경이 일정하게 확장되는 경우 안정적인 성형이 가능하다는 것을 발견하였다. 그 후 Guo 등[3]은 이러한 조건을 링직경 확장일정속도 조건(constant growth velocity condition, CGVC)이라 명명하고 수학적 모델로 정리하였으며, 이 모델을 사용했을 때 동적 접촉을 최소화할 수 있다고 밝혔으며, 강경필 등[8]은 변형공정지도(processing map)를 활용하여 CGVC 모델을 사용했을 때 보다 안정적인 성형이 가능하다는 것을 보였다.

본 연구에서는 다양한 공정의 유동 불안정성을

1. 충남대학교 기계설계공학과

2. 솔루션랩㈜

Corresponding Author : Department of mechanical design engineering, Chungnam national Univ.yonghkim@cnu.ac.kr

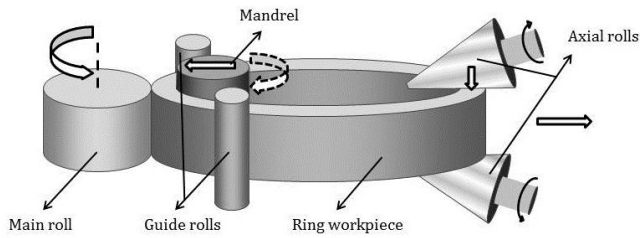


Fig. 1 Configuration about radial-axial ring rolling process

평가하는데 사용된 변형공정지도를 활용하여 링롤링 공정에 있어 CGVC 모델을 사용했을 때 얼마나 안정적인지 보다 자세하게 검증하고자 한다.

2. 관련 이론

2.1 링직경 확장 일정속도 조건(CGVC)

링직경 확장 일정속도 조건은 직경확장속도(v_D)가 결정되면 맨드릴의 압하속도(v_f), 축롤의 압하속도(v_a), 후퇴속도(v_w), 회전속도(n_a), 그리고 메인롤의 회전속도(n_1)를 구할 수 있다. 링롤링 공정은 가공 중 소재가 유실되지 않으며 두께 방향으로의 퍼짐(spread)이 없다고 가정하면, 직경(D)을 다음과 같이 표현할 수 있다[10].

$$D = \frac{(D_0 + d_0)h_0b_0}{2bh} + b \quad (1)$$

$D(d)$: 소재의 현재 외(내)경

$D_0(d_0)$: 소재 초기 외(내)경의 크기

b : 소재의 현재 두께, b_0 : 소재 초기 두께

h : 소재의 현재 높이, h_0 : 소재 초기 높이

위 관계에서 높이와 반경의 변형이 선형적이라 가정하고 식 (1)을 이용하면, 직경 확장속도(v_D)를 다음과 같이 표현할 수 있다[3].

$$v_D = \frac{dD}{dt} = \frac{b_0 \cdot h_0 \cdot (D_0 + d_0)}{b \cdot h} \left\{ \frac{v_a}{b} + \frac{v_f}{h} \right\} - v_f \quad (2)$$

위 식을 통해 v_f 는 다음과 같이 나타낸다.

$$v_f = \frac{v_D}{\left(\frac{b_0 \cdot h_0 \cdot (D_0 + d_0)}{b \cdot h} \left\{ \frac{\tan \alpha}{b} + \frac{1}{h} \right\} - 1 \right)} \quad (3)$$

이어서 v_a , v_w 를 결정하면 다음과 같다.

$$v_a = v_f \tan \alpha \quad (4)$$

$$v_w = v_D \quad (5)$$

링롤링 공정에서 유기적인 움직임을 얻고자 한다면 식 (3)~(5)에서 나타낸 관계를 유지하여야 한다[8]. 기존 모델[3]에서는 n_1 , n_a 를 변수로 제안하였으나, 본 논문에서는 이들이 v_D 와 v_f 과 관련이 없으며, 조업 편의성을 확보하기 위하여 메인롤은 일정하게 회전하며($n_1 = 2 \text{ rad/s}$), 축롤은 공회전한다고 가정하였다.

2.2 변형공정지도

Prasad 등[11]은 동적 재료 거동 모델(modeling of dynamic material behavior)을 이용하여 변형공정지도 [12]를 수정하였다.

변형률 속도 민감도(m)는 재료의 동적 거동을 결정하는데 주요 인자이다. 이를 통해 에너지 효율(η , efficiency of dissipation)을 표현할 수 있으며 다음과 같이 정의한다[13].

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (6)$$

에너지 효율(η)의 값이 높을수록 효과적으로 성형할 수 있다고 알려져 있으나, 미세조직적 측면에서는 언제나 안정적이라 할 수 없다. 따라서 유동 불안정성(flow instability) 개념을 통해 해당 성형조건을 사용 시 안정적인지 판단해야 한다.

일정한 온도와 변형률에서의 유동 불안정성($\xi(\dot{\epsilon})$)은 다음과 같이 표현할 수 있다[12].

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln \left[\frac{m}{m+1} \right]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m \leq 0 \quad (7)$$

유동 불안정성은 온도와 변형률 속도에 따라 얻어지며 $\xi(\dot{\epsilon}) < 0$ 인 영역에서는 불안정한 유동이 발생하게 된다. 유동 불안정성은 단열 가열 전단파가 발생함에 따라 나타나며 높은 변형 속도와 변형으로 인한 국부적 온도 상승이 원인이다[14].

3. 7050 알루미늄 합금의 변형공정지도

3.1 압축 응력 시험 데이터 보정

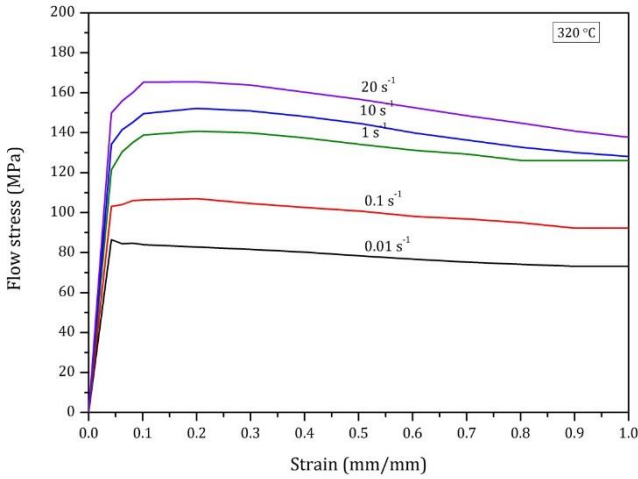


Fig. 2 Flow stress-strain curves in compression of 7050 aluminum alloy at 320°C [16]

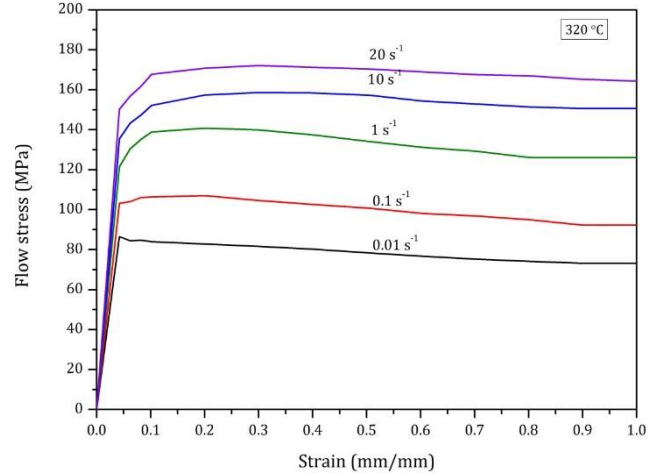


Fig. 3 Corrected flow stress-strain curves, including the effect of deformation heat at 320°C

본 논문에서 사용할 7050 Al합금의 압축 물성은 Luo 등[15]이 320~470°C 범위에서 변형률 속도 0.01~20s⁻¹에서 시험한 데이터(Fig. 2)를 이용하였다. 변형에 의한 열을 고려하여 10, 20 s⁻¹에서 단열조건이라 가정하였다[8]. 보정하는 방법은 다음과 같다.

a) 소성일의 계산

$$W_{i+1} = 0.5(\sigma_i + \sigma_{i+1})(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i) \quad (W_1 = 0) \quad (8)$$

b) 온도증가량의 계산

$$\Delta T_i = W_i / C \quad (C: \text{heat capacity}) \quad (9)$$

c) 보정온도 계산

$$T_i^* = T_i + \Delta T_i$$

$$\sigma_{1,i}^* = \sigma_{1,i} - (\sigma_{2,i} - \sigma_{1,i})(T_{1,i}^* - T_i) / (T_{2,i}^* - T_{1,i}^*) \quad (10)$$

(* 은 보정된 값)

소재의 물성 중 유동응력과 연성을 중요하게 생각하는 이유는 가공을 어떤 온도에서 진행할 지 결정하는 중요한 요인이기 때문이다[16]. 보정한 곡선이 점점 안정되는 현상은 변형에 의해 생긴 가공경화와 온도 상승의 효과로 인한 연화 효과가 상쇄를 일으키기 때문이다[15].

3.2 7050 알루미늄 합금의 불안정 영역

성형에 있어 공정조건 안정성과 관련된 정보는 매우 유용하다[17]. 유동응력 곡선(Fig. 3)을 이용하여 변형공정지도를 그리는 과정은 Fig. 4와 같다.

$\bar{\epsilon} = 1$ 일 때 변형공정지도를 작성하면 Fig. 5와 같다. 470°C, 0.01 s⁻¹에서 에너지 효율이 가장 높고 안정

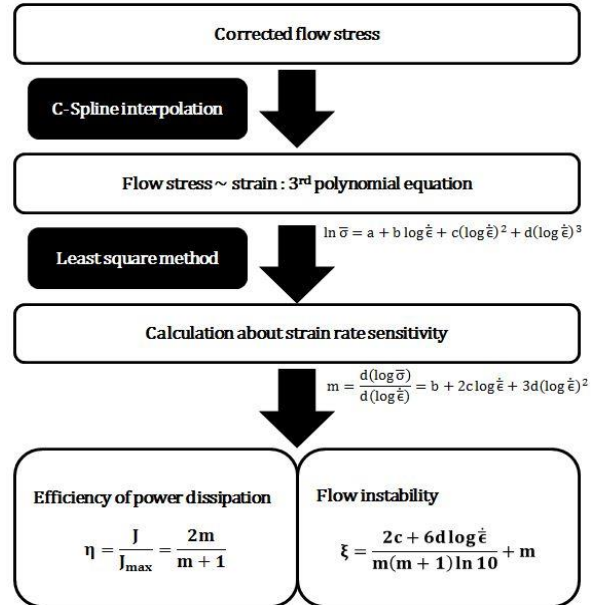


Fig. 4 Flow chart of drawing the processing map

적인 성형이 가능하며, 빠르게 변형될 경우, 320~340°C와 390~470°C 범위 내에서 유동 불안정성이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 중 430~470°C 범위에서 유동 불안정성이 발생하는 이유는 동적 회복으로 인한 가공 연화 때문이라 밝혀졌다[15].

4. 링롤링 공정 유한요소 해석

4.1 유한요소 모델

CGVC 모델의 사용 유무에 따라 나타나는 유동 불안정성을 비교하였다. 상용프로그램 DEFROM[18]

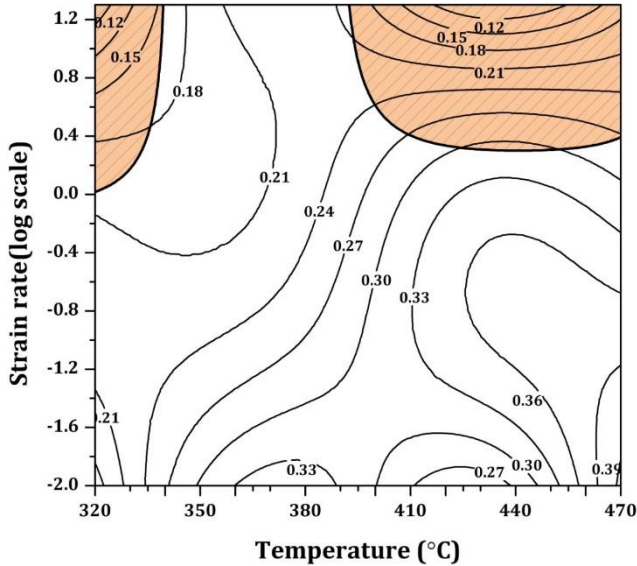


Fig. 5 Processing map of 7050 aluminum alloy about compression (contour line: efficiency of power dissipation, shaded region: flow instability)

을 이용하여 해석을 수행하였다. 금형과 관련된 정보는 Table 1, 2에 나타내었으며, 강체라 가정하였다. 소재는 8절점 육면체 요소를 사용하였으며, 리메쉬 조건을 적용하였다. 전체 절점 수는 11,520개, 요소의 수는 9,240개이다. 해석이 진행됨에 따라 소재가 회전당 1회씩 요소망을 재구성(remesh)하도록 조건을 부여하였다.

4.2 링롤링 공정 해석 조건

CGVC조건의 안정성을 확인하기 위해 강경필 등 [8]이 사용한 실제 공정(Fig. 6)과 비교하였다. CGVC 모델과의 차이점은 맨드렐의 압하속도가 점진적으로 감소하는 것이 아니며, 링 직경 확장 속도가 시간에 따라 계속 변하게 된다. 해당 공정에서 축롤의 압하속도는 평균적으로 0.05mm/s이고 맨드렐의 경우는 0.89mm/s이다. 메인 롤의 회전속도는 일정하다.

실제 공정 조건은 링직경이 불규칙적으로 증가하기 때문에, 맨드렐의 평균 압하속도와 공정시간이 비슷한 조건을 선정하였다. 공정시간과 맨드렐의 압하속도는 $v_D = 7 \text{ mm/s}$, $n_1 = 2 \text{ rad/s}$ 일 때, 식(3)에 의해 맨드렐의 속도 프로파일은 Fig. 7과 같이 결정된다. 이 때 $\bar{v}_f = 0.90 \text{ mm/s}$ 이다. 두 조건 모두 90초에서 맨드렐의 압하가 끝나며, 그 이후는 링 형상을 평탄화시키는 작업이다. 따라서 압하가 끝나는 시점 이

Table 1 Dimension about ring workpiece

Contents		Value
Initial	Outer radius, R_0	(mm) 960
	Inner radius, r_0	(mm) 660
	Height, h_0	(mm) 315
Final	Outer radius, R_f	(mm) 1,327
	Inner radius, r_f	(mm) 1,106
	Height, h_f	(mm) 289
Initial Temperature		(°C) 410

Table 2 Conditions of ring rolling process

Contents		Value
Radius of main Roll, R_1	(mm)	647
Radius of mandrel, R_2	(mm)	157.5
Heat conductivity (Environment), C_{en}	($W/mm^{\circ}C$)	0.3
Heat conductivity (Roll), C_{mold}	($W/mm^{\circ}C$)	5.0
Friction coefficient, μ	-	0.7

후로, CGVC모델의 맨드렐은 제자리에서 공회전 상태이다.

위 두 조건을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

5. 결과 및 토론

공정 중 불안정성이 나타나는 곳은 변형이 빠르게 일어나는 영역이다. CGVC 모델이 사용되지 않은 모델의 경우, 상대적으로 변형률 속도가 높은 영역(Fig. 8)을 볼 수 있다. 해당 부분의 변형 속도가 높은 이유는 주금형인 맨드렐의 직접적인 압하 때문이다. 반대편의 메인롤과 접촉한 영역 역시 상대적으로 빠르게 변형되나, 기본적으로 메인롤의 역할은 밀려나오는 소재를 막으며, 회전시키는 구동력을 제공하는 것이다. 이러한 이유로, 소재 방향으로 전진하며 압하력을 가하는 맨드렐 측에 비해 느리게 변형된다.

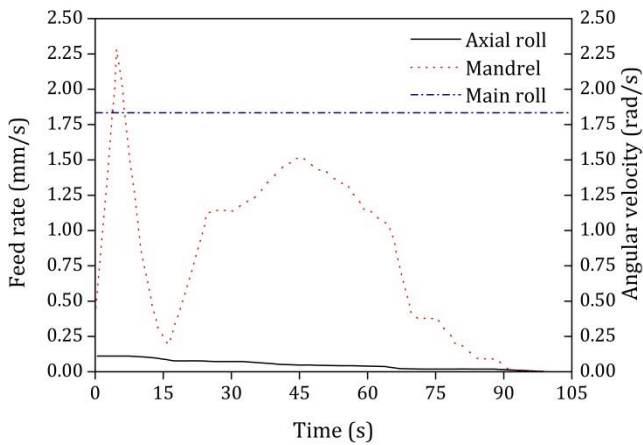


Fig. 6 Feed rate of mandrel and axial roll at real process[8]

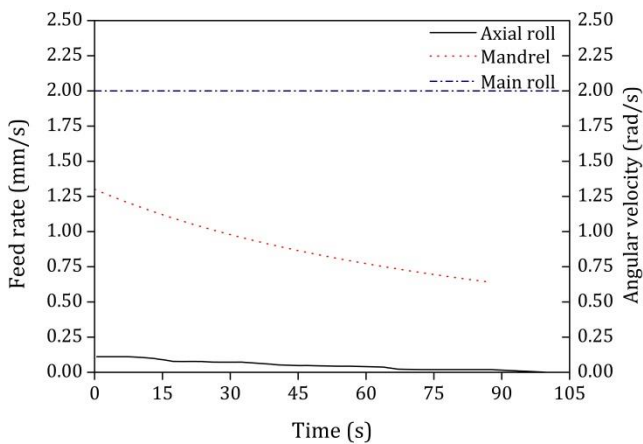


Fig. 7 Profile of feed rate for CGVC model at $v_D = 7\text{mm/s}$

변형률 속도가 큰 영역의 절점(Fig. 9)을 추적하여 온도와 변형률 속도 이력을 변형공정 지도에 나타내면, 각 조건에 대한 성형 난이도(D)를 확인할 수 있다. 성형 난이도는 다음과 같이 정의한다.

$$D = \frac{N_{inst}}{N_{total}} \quad (11)$$

N_{inst} : 변형률 속도, 온도 이력의 총 개수

N_{total} : 유동 불안정성 영역 내 발생 개수

실제 공정의 경우 변형공정지도(Fig. 10 (a))를 통해 확인한 D는 29.1%였으며 반면 CGVC 모델을 사용한 경우(Fig. 10 (b))에는 9.3%로 확연히 감소하는 것을 확인할 수 있다. Table 3에서 각 위치에 따른 유동 불안정성을 나타내었다. 이들을 통하여 CGVC조건을

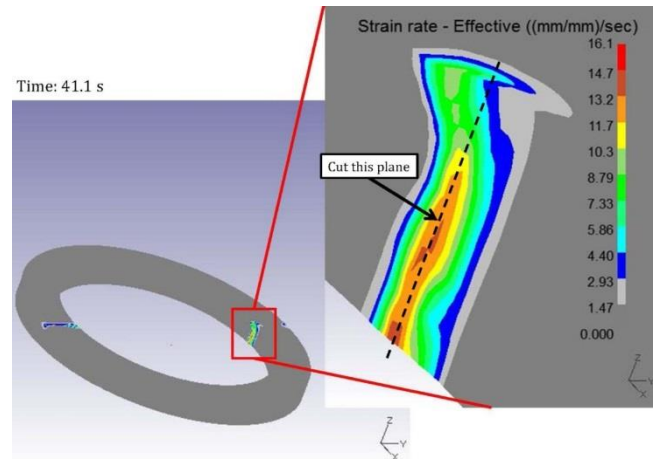


Fig. 8 Predicted region for instability due to high strain rate

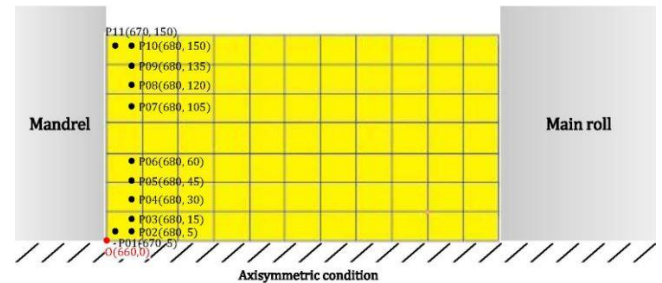


Fig. 9 Measurement points for tracking in the cross section

사용했을 때, 보다 안정적인 성형이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 Fig. 6의 맨드릴 압하속도가 시간에 따라 가감하게 되면 변형이 급격하게 이루어지는 시점이 있어 불안정해지나, Fig. 7의 CGVC 모델은 맨드릴 압하속도가 점진적으로 감소하기에 매 회전마다 변형되는 정도를 보다 안정적으로 조절할 수 있기 때문이다.

각 위치별 발생한 유동불안정성은 Table 3에 나타내었다. 모든 영역에 있어서 CGVC 모델을 사용했을 경우 성형난이도가 감소하는 것을 확인하였다.

추적점 중 P01은 소재의 중앙에 위치하고, P11은 축롤과 접하는 부분이다. 유동 불안정성은 P11에서 P01로 갈수록 유동 불안정성이 높아지는 경향이 있다. 이는 맨드릴의 압하속도가 축롤의 압하속도에 비해 상대적으로 크고, 축롤의 압하에 의하여 발생한 fish-tail이 맨드릴과 메인롤 사이에서 제거될 때 P11이 P01보다 소재 유동이 자유롭기 때문에 변형률 속도와 유동불안정성이 낮은 것으로 판단된다.

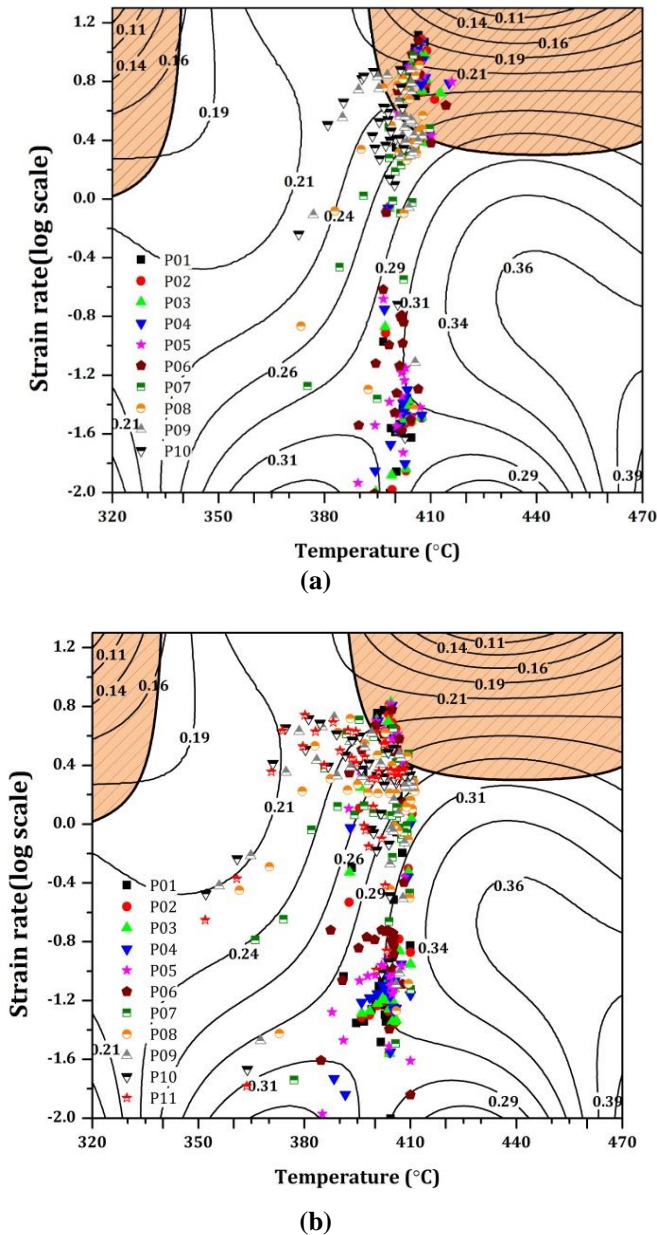


Fig.10 Processing map combined with the results of FE simulation such as temperature and strain rate with (a) real process condition and (b) CGVC model

6. 결론

링롤링 공정은 원형 부품을 생산할 수 있는 효율적인 방식 중 하나로 다양한 분야에서 활용할 가치가 있음에도 비선형성과 불안정성으로 인해 성형 조건을 선정하기 매우 까다롭다. 소재 표면과 금형 사이 발생하는 동적 접촉을 최소

Table 3 Comparative forming difficulty on tracking points of each forming condition

Point	Real Process			CGVC ($v_D = 7 \text{ mm/s}$)		
	N_{inst}	N_{total}	D(%)	N_{inst}	N_{total}	D(%)
Total	80	275	29.1	42	451	9.3
P01	7	26	26.9	7	41	17.1
P02	7	28	25.0	6	41	14.6
P03	7	28	25.0	6	41	14.6
P04	8	28	28.6	5	41	12.2
P05	8	28	28.6	5	41	12.2
P06	8	28	28.6	5	41	12.2
P07	10	29	34.5	2	41	4.9
P08	13	28	46.4	2	41	4.9
P09	9	26	34.6	2	41	4.9
P10	3	26	11.5	1	41	2.4
P11	-	-	-	1	41	2.4

화하기 위해 링 직경 확장속도를 일정하게 유지하고자 하는 CGVC 모델이 개발되었으나 이에 대한 검증이 이뤄지지 않은 상태이다. 이를 위해 본 논문에서는 알루미늄 7050 합금에 대한 변형공정지도를 작성하고 DEFORM에서 제공하는 링롤링 공정 해석 코드를 이용하여 얻은 결과와 결합시켜 성형성을 평가하였다.

또한 링직경 확장속도를 고려하지 않은 경우와 CGVC 모델의 성형성을 비교한 결과, 유동 불안정성을 약 68% 감소시켰다. 이를 통해 CGVC 모델의 성형성이 우수하다는 결론을 내릴 수 있다.

본 논문에서는 제안된 CGVC 모델을 산업 현장에 적용시킬 수 있도록 수정하고, 이 모델을 이용한 성형조건을 링직경 확장속도를 고려하지 않은 공정조건과 비교하여 성형성이 우수함을 입증하였다. 지금까지의 결과를 통해, CGVC 모델이 더 안정적이고 우수한 품질의 제품을 생산할 수 있음을 확인하였다. 다만, 이 결과들은 유한요소 해석을 통해 이루어진 것으로서 실험을 통한 검증이 추가적으로 필요하며, 본 논문에서 제시된 CGVC 모델에서 링직경 확장속도를 어떤 값으로 선택할 것인가에 대한 논의는 아직 이뤄지지 않고 있기에, 이에 대한 토의가 좀 더 필요하다.

후 기

본 연구는 충남대학교 자체연구비 지원사업을 통해 연구한 내용이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] G. Zhou, L. Hua, D. Qian, H. Li, 2012, Effects of Axial Rolls Motions on Radial-axial Rolling Process for Large-scale Alloy Steel Ring with 3D Coupled Thermo-mechanical FEA, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 59, No. 1, pp. 1~7.
- [2] J. T. Jinn, W. T. Wu, 2010, *Proc. NUMIFORM Conf.* (F. Barlat, Y. H. Moon, M. G. Lee eds.), Pohang, Korea, pp. 795~801.
- [3] L. Guo, H. Yang, 2011, Towards a Steady Forming Condition for Radial-axial Ring Rolling, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 53, No. 4, pp. 286~299.
- [4] L. Li, H. Yang, L. Guo, Z. Sun, 2008, A Control Method of Guide Rolls in 3D-FE Simulation of Ring Rolling, *J. Mater. Process and Technol.*, Vol. 205, pp. 99~110.
- [5] L. Hua, Z. Z. Zhao, 1997, The Extremum Parameters in Ring Rolling, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 69, pp. 273~276.
- [6] H. J. Koh, Y. S. Lee, 2011, White Paper of Materials, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea, pp. 417~440.
- [7] J. T. Yeom, E. J. Jung, J. H. Kim, D. G. Lee, N. K. Park, S. S. Choi, C. S. Lee, 2006, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf.*, Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 373~376.
- [8] G. P. Kang, S. Y. Lee, Y. H. Kim, S. S. Hong, S. H. Lee, 2012, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf.*, Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 261~264.
- [9] F. L. Yan, L. Hua, Y. Q. Wu, 2007, Planning Feed Speed in Cold Ring Rolling, *Int. J. Machine Tools & Manuf.*, Vol. 47, No. 11, pp. 1695~1701.
- [10] W. Johnson, I. Macleod, G. Needham, 1968, An Experimental Investigation into the Process of Ring or Metal Tyre Rolling, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 10, No. 6, pp. 455~468.
- [11] Y. V. R. K. Prasad, 2003, Processing Maps: A Status Report, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 12, No. 6, pp. 638~645.
- [12] R. Raj, 1981, Development of a Processing Map for use in Warm-forming and Hot Forming Processes, *Metall. Trans. A*, Vol. 12, No. 6, pp. 1089~1097.
- [13] Y. V. R. K. Prasad, H. L. Gegel, S. M. Doraivelu, J. C. Malas, J. T. Morgan, K. A. Lark, D. R. Barker, 1984, Modeling of Dynamic Material Behavior in Hot Deformation: Forging of Ti-6242, *Metall. Trans. A*, Vol. 15, No. 10, pp. 1883~1892.
- [14] M. Awais, 2006, Finite Element Investigation of Instability in Hot Bar Rolling Process, Master's Thesis, KAIST, p. 107.
- [15] J. Luo, M.Q. Li, B. Wu, 2011, The Correlation Between flow Behavior and Microstructural Evolution of 7050 Aluminum Alloy, *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 530, pp. 559~564.
- [16] J. A. Bailey, 1972, Effect of Strain Rate and Temperature on the Resistance to Torsional Deformation of Several Aluminum Alloys, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 14, No. 11, pp. 735~754.
- [17] P. Zhang, F. Li, Q. Wan, 2010, Constitutive Equation and Processing Map for Hot Deformation of SiC Particles Reinforced Metal Matrix Composites, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 19, No. 9, pp. 1290~1297.
- [18] DEFORM 3D Version 11.0 User's Manual