

메인롤을 이용한 대형 형상링롤링의 예비성형체 연구

김현준* · 강종훈**† · 강성수***

* ㈜평산, ** ㈜중앙커플링, *** 부산대학교 기계공학부

Preform design of large sized profile ring rolling using main roll

H.J. Kim*, J.H. Kang**† and S.S. Kang***

* PSM Inc., ** Jac coupling, *** Mechanical Engineering, Busan Nat'l Univ.

(Received July 12, 2013 ; Revised October 31, 2013 ; Accepted November 2, 2013)

Key Words: Profile Ring Rolling(형상링롤링), Finite Element Analysis(유한요소해석), Preform Design(예비성형체 설계), Filling Limit Equation(충진한계식)

초록: 본 연구는 외경부에 단이 존재하는 제품의 링롤링작업을 위한 예비성형체의 설계에 관한 연구이다. 형상링롤링 공정에서 가장 일반적으로 나타나는 결함 중 하나는 미충진이며, 변형량이 적을 경우나 외경부 단의 깊이가 클 경우 발생한다. 이러한 미충진을 방지하기 위해서는 변형량을 증가시키거나 예비성형체를 최종형상에 근접하도록 설계하여야 한다. 결함이 없는 제품을 생산하기 위하여 형상비와 성형비를 이용한 충진한계식을 제안하였다. 충진한계식은 네가지 경우에 대하여 유한요소해석과 시험생산한 결과를 토대로 작성되었다. 실물 크기의 형상링롤링 작업을 수행하고 충진한계식을 이용한 예측과 비교함으로써 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

Abstract: This paper introduces a preform design method for a ring rolling process with an outer step. Underfilling is one of the general defects of the profile ring rolling process. It occurs when the deformation amount is small or step depth of the profiled region is large. To prevent underfilling, increasing the deformation amount or using a preform of size similar to that of the final product are required. Furthermore, the filling limit equation is suggested based on the shape factor and deformation ratio for preventing defects in the products. The filling limit equation has been derived through finite element analyses and production tests for four different cases. For verifying the suggested method, real-sized profile rolling tests were performed, and test results were compared with the predictions of the equation

1. 서론

링롤링은 높은 치수 정밀도, 생산성, 낮은 생산 원가와 원형으로 순환하는 메탈플로(Metal Flow)에 의한 균일 품질 등을 장점으로 인해 링형상 단조품에 널리 적용되는 단조생산 방법이다. 링롤링의 적용 예는 기어림, 슬로잉링, 레일 휠 베어링, 제트엔진과 우주선에 적용되는 링, 핵발전소의 리액터 부품, 연결용 프렌지, 휠, 밸브류 등 모든 링형상 단조품 생산에 매우 광범위하다.

일반적인 링롤링 설비는 Fig. 1 과 같이 원통형

메인롤과 맨드릴이 도넛형상 예비성형체를 반경방향으로, 한 쌍의 엑셀롤이 두께 방향으로 압연하

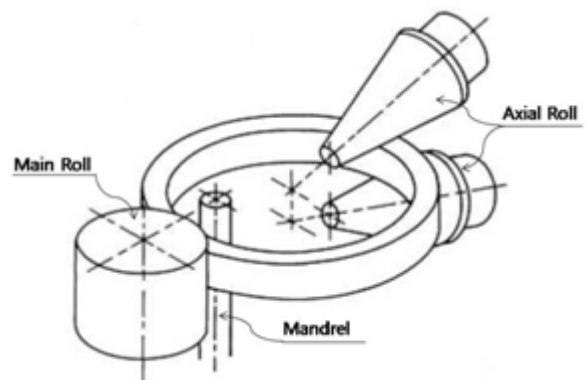


Fig. 1 Schematic illustration of general radial-axial ring rolling method and cross section

† Corresponding Author, jhkang@jacoup.co.kr

여 외경을 확장시키며, 사각의 단면 형상을 가지는 링을 생산한다. 하지만 산업용으로 널리 사용되는 링 제품은 볼트 체결이나 용접을 통하여 다른 부재와 조립이 되는 형태이며, 볼트체결이나 용접으로 조립되는 링제품의 경우 Fig. 2 와 같이 반경방향으로 돌출된 플랜지나 용접을 위한 돌출부로 인하여 낮은 재료회수율을 나타내게 된다.

링롤링에 대하여 Shivpuri 등⁽¹⁾은 사각단면의 링에 대하여 최종 제품의 단면 치수 정밀도를 증대시키기 위한 예비성형체 설계방법을 제시하였으며, Johnson⁽²⁾은 상계해법과 실험을 통하여 링롤링공정에서 사각형상 제품의 유동을 설명하려 하였다. Mamalis 등⁽³⁾은 T 형상의 제품의 유동특성을 실험적으로 검증하였다. 해석적 기법의 발달로 Yang,⁽⁴⁾ Kim,^(5,6) Joun,⁽⁷⁾ Nam,⁽⁸⁾ Davey,⁽⁹⁾ Kim⁽¹⁰⁾ 등이 유한요소해석을 통한 링롤링 공정을 해석하였고, 형상이 있는 제품에 대한 실험적 검증도 추가되었다. Hua⁽¹¹⁾는 형상링롤링의 예비성형체를 일반화하기 위한 해석적, 실험적 연구를 수행하여 최종 형상을 얻기 위한 예비성형체와 최종형상의 관계 정립을 시도하였고, Wang⁽¹²⁾ 등은 대형 링제품의

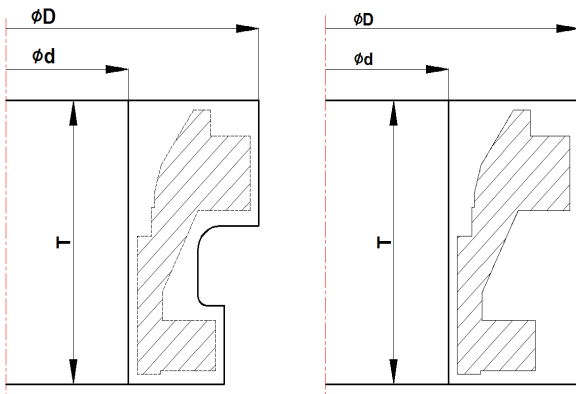


Fig. 2(a) Shape comparison of rectangular section ring and middle region profiled ring(Bolting)

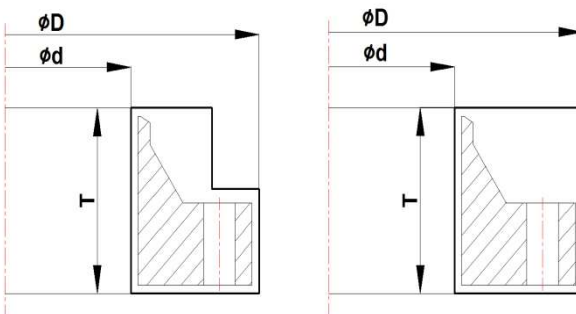


Fig. 2(b) Shape comparison of rectangular section ring and profiled ring for top side step(Welding)

형상링롤링의 안정적 생산에 관하여 연구하였다.

일반적인 사각단면 링의 경우 내경면, 외경면 또는 상면부, 하면부에서 겹침이 가장 많이 발생하지만, 형상단면 링은 형상부 미충진이 대표적인 불량 유형이다. 형상단면 링제품을 제조하기 위해서는 최종 링제품의 형상변화와 변형량을 고려한 예비성형체의 형상과 치수를 결정할 필요가 있다. 유한요소해석을 통하여 미충진을 예측할 수 있으나 해석시간이 과다하여 생산현장에서 적용하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 최종제품과 예비성형체 사이의 형상비와 치수 변화량을 이용하여 최종제품의 충진 여부를 판단하는 충진한계식을 구한 후 시험생산을 통하여 제안된 식의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 형상 링롤링의 충진한계식

2.1 형상 링롤링의 매개변수 정의

외경에 형상이 존재하는 링제품과 예비성형체의 대표적인 형상을 Fig. 3(a),(b)에 나타내었다. Fig. 3(a)는 링롤링을 통하여 구현해야 하는 최종 형상이다. Fig. 3(b)는 링제품을 생산하기 위한 사각단면의 예비성형체 형상이며, Fig. 3(c)는 형상이 있는 링제품을 성형하기 용이하도록 하기 위한 예비성형체이다. 일반적으로 사용되는 사각단면의 예비성형체 치수는 체적 일정량의 법칙과 축방향의 압연량을 고려하여 결정한다.⁽¹⁾

Fig. 3(a)의 형상을 성형하기 위해서는 사각단면의 예비성형체와 형상단면의 예비성형체를 모두 사용 가능하나, Fig. 3(b)와 같이 사각 예비성형체로 성형할 경우, 성형해야 할 성형량이 클 때는 미충진이 발생할 가능성이 있다. 반경방향으로 살 두께 변형량이 큰 경우는 충진이 가능하지만 예비성형체와 최종형상 간의 변형량이 적은 경우 미충진 현상이 발생하게 된다. 예비성형체의 형상을 Fig. 3(c)와 같이 변경하면 최종형상까지 변형되어야 할 성형량이 줄어들게 됨으로 적은 변형량으로 미충진 현상을 해결할 수 있다.

본 연구에서는 축 방향 압연량은 변수로 고려하지 않았는데, 이는 형상이 있는 제품의 링롤링 작업의 경우 중간 위치에 존재하는 단차로 인해 상하 방향의 체적이동이 용이하지 않아 예비성형체 설계 시 두께방향의 변형량을 최소화하여 설계하기 때문이다.

충진한계를 정의하기 위한 형상비(Shape Factor)

는 Fig. 3(b), Fig. 3(c)에 도시된 바와 같이 형상이 있는 위치의 살두께(S_i)와 성형해야 하는 깊이(L_i)의 비로 식 (1)과 같으며, 성형의 난이도를 나타낸다.

$$SF_i = \frac{L_i}{S_i} \quad (1)$$

L_i : 예비성형체와 최종형상부의 성형변위
 S_i : 최종 제품의 살두께

성형비(Deformation Ratio)는 Fig. 3(b), (c)에 도시된 바와 같이 예비성형체의 살두께와 최종 제품의

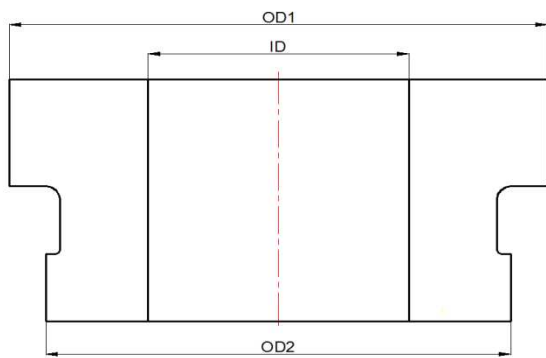


Fig. 3(a) General shape of profiled ring

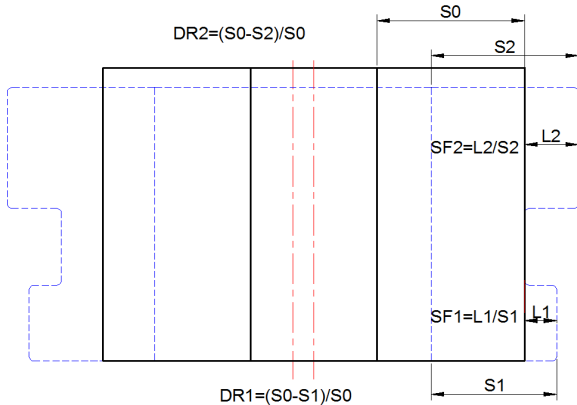


Fig. 3(b) Rectangular section preform for profiled ring

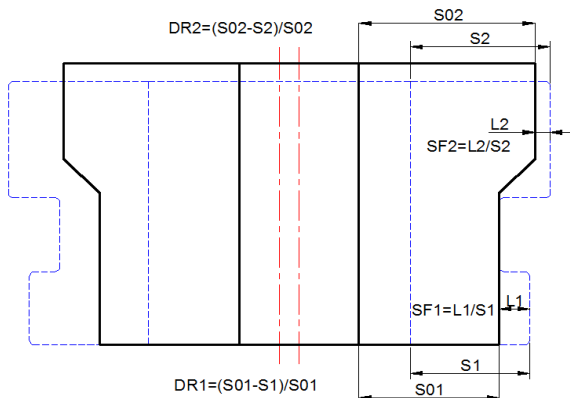


Fig. 3(c) Shaped preform for profile ring

살두께의 성형비로 반경방향의 변형률을 의미하며 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$DR_i = \frac{(S_0 - S_i)}{S_0} \quad (2)$$

S_0 : 예비성형체의 살두께
 S_i : 최종 단조품의 살두께

2.2 유한요소해석 및 시제품 시험

링롤링 공정의 주요 공정 변수들은 메인롤(Main Roll)의 회전과 멘드렐(Mandrel)의 이송에 의한 반경의 변형, 액셀롤(Axial Roll)의 회전과 이송에 의한 축방향의 변형과 최종 단조품의 형상 등이 있다. 본 연구에서는 사각형상 제품을 생산할 때와 동일한 공정조건으로 메인롤, 멘드렐과 액셀롤을 제어하면서 반경방향의 변형량과 최종제품의 형상을 변경한 네 가지 조건에 대하여 유한요소해석을 진행하였다.

유한요소해석에서 적용된 최종 제품은 산업현장에서 널리 요구되는 두 가지 형상을 임의 선정하였으며, 예비성형체 또한 사각단면과 형상단면의 두 가지로 하였고, 최종형상과 예비성형체를 각기 달리하여 네 가지 조건에 대하여 형상비와 성형비를 구하였다. Table 1은 유한요소해석에 적용된 해석 조건을 나타낸다.

원소재는 EN10025 S355NL로 용접구조물에 널리 이용되는 소재이며 열간유동응력은 JMATPRO를 이용하여 계산하였다. 소재는 강점소성체(Rigid-visco-plastic model)로 메인롤, 액셀롤 및 멘드렐은 강체(Rigid-body)로 가정 DEFORM™-3D Ring Rolling 모듈을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석 결과의 적합성을 검증하기 위하여 Case2, Case3, Case4의 세가지 조건에 대하여 시험

Table 1 Simulation condition of ring rolling process

Description	Value
Material	EN10025 S355NL
Initial temperature	1250 °C
Tool Temperature	200 °C
Main Roll Rotary Velocity	40RPM
Mandrel Feeding Velocity	0 ~ 1.5 mm/sec
Axial Roll Feeding Velocity	0 ~ 0.3mm/sec

Fig. 4 Description of 4 Cases of ring rolling analysis condition and analysis result

Class	Preform	Profiled Ring	Analysis Result	Production Test	Position	SF	DR	Filling
Case1				Not Tested	Top	0.26	0.10	X (a)
Case2					Top	0.47	0.06	X (b)
					Bottom	0.28	0.31	O (c)
Case3					Top	0.01	0.21	O (d)
Case4					Top	0.10	0.21	O (e)
					Bottom	0.14	0.26	O (f)

작업을 실시하였다. 작업조건은 유한요소해석에 적용된 Table 1과 같으며, 최대 3000mm까지 성형이 가능한 링롤링 설비를 이용하였다. 시험작업 결과는 유한요소해석과 동일한 형상으로 충전과 미충이 발생함을 확인하였다.

본 연구의 대상이 된 네 가지 조건의 예비성형체, 최종제품, 유한요소해석 결과, 시험작업 결과, 형상비, 성형비를 Fig. 4에 나타내었다.

2.3 형상링롤링 충전한계식의 유도

유한요소해석 결과로 얻어진 Fig. 4에서 최종제품과 예비성형체의 형상에 따라 메인롤과 접촉여부가 달라지는 것을 확인할 수 있다.

Case1과 Case3은 상부(Top)에만 형상이 있는 형태이며, 예비성형체의 형상이 다른 경우이다. 사각 예비성형체를 사용한 Case1은 형상이 있는 예비성형체를 사용한 Case3에 비하여 높은 형상비와 성형비를 나타내게 된다. 따라서 Case1은 높은 성형난이도에 비하여 낮은 성형비를 가지게 됨으로 미충진 현상이 발생하였고, Case3은 최종형상에 근접하는 예비성형체 형상으로 인하여 낮은 형

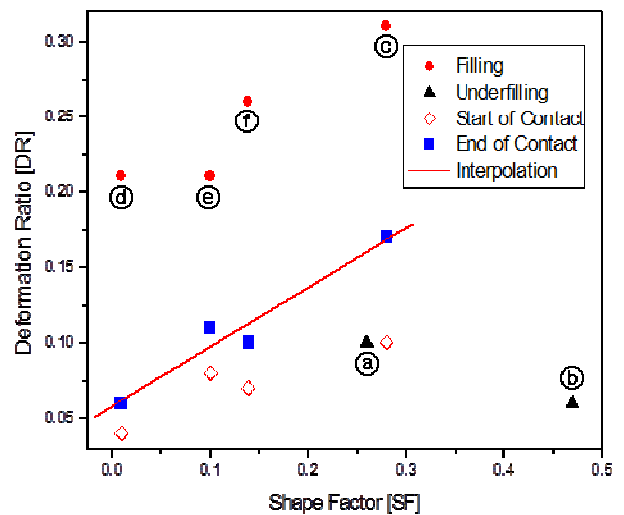


Fig. 5 Deformation diagram to predict underfilling

상비와 높은 성형비로 충전이 완료되었다.

Case2와 Case4는 두개의 플랜지가 있는 형상으로 상부와 하부의 형상비와 성형비가 각각 다르게 나타난다. Case1과 Case2의 상부는 높은 형상비와 낮은 성형비에서는 동일하게 미충진이 발생하고

있음을 확인할 수 있다.

유한요소해석과 시험작업에서 확인한 충진과 미충진 현상을 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다. 네 가지 조건에서 충진, 미충진을 확인할 수 있는 부위는 Case1과 Case3의 상부의 두 지점과 Case2와 Case4의 상부, 하부의 각 두 지점으로 총 여섯 개의 지점이다. 그래프의 신뢰도를 높이기 위해 네가지 조건의 유한요소해석 결과에서 금형과 접촉이 시작된 점(Start of Contact)과 금형과 95%이상 접촉된 점(End of Contact)의 성형비와 형상비를 각각 구하여 함께 도시하였다.

Fig. 5에서 유한요소해석 결과에서 충진이 완료된 점을 기준으로 추세선을 작도하면 추세선 이상의 영역은 충진, 이하의 영역은 미충진영역이며, 선형보간식을 이용하여 충진한계식을 수식화 하면 식 (3)과 같다.

$$F_i = DR_i - 0.404SF_i - 0.055 \quad (3)$$

Here) $F_i > 0$: 충진

$F_i < 0$: 미충진

3 충진한계식의 검증

충진한계식의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 4와 형상과 치수가 다르고, 외경에 동일 크기의 두 개의 플랜지가 있는 제품을 시험생산 하였다.

동일한 크기의 사각 예비성형체를 각각 외경 $\Phi 640$ 과 $\Phi 795$ 로 성형하여 충진여부를 확인하였다.

Outer Dimension	Profiled Ring	Factor		Prediction
		SF	DR	
$\Phi 640$		SF	0.31	Under filling
		DR	0.11	
		F	-0.07	
$\Phi 795$		SF	0.42	Filling
		DR	0.34	
		F	0.12	

Fig. 6 Verification test conditions and prediction with Filling Limit Equation

두 가지 조건을 공식 (3)에 적용하면 Fig. 6과 같이 충진과 미충진 여부를 예측할 수 있으며, 충진한계 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다. Fig. 6의 조건에 따라 실제 작업된 제품을 Fig. 8(a), (b)에 나타내었다. Fig. 6에서 미충진으로 예측된 외경 $\Phi 640$ 제품은 Fig. 8(a)와 같이 상부와 하부에 금형에 접하지 못하고 미충진된 상태로 성형이 완료되었으며 외경 $\Phi 795$ 의 제품은 Fig. 8(b)와 같이 외경부위 전체가 메인롤과 접촉하여 충진이 완료된 것으로 확인되었다. 시험작업을 통하여 제안된 충진한계식의 예측과 시험작업결과가 동일하게 나타남을 검증하였다.

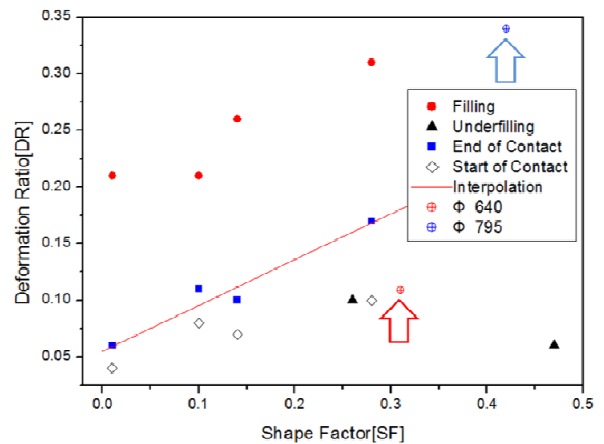


Fig.7 Filling prediction on deformation diagram

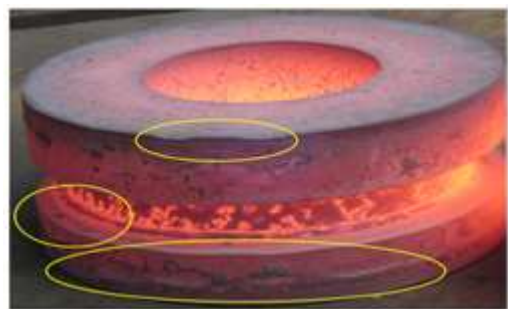


Fig. 8(a) Profile ring rolling test ($\Phi 640$, Underfilling)



Fig. 8(b) Profile ring rolling test ($\Phi 795$, Filling)

4. 결 론

메인롤을 이용한 형상링롤링 공정에서 주요 결함중의 하나인 미충진 결함을 방지하기 위하여 예비성형체와 최종제품 간의 형상비와 성형비를 매개 변수로 한 충전한계식을 제안하기 위하여 유한요소해석과 시험작업을 실시하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 외경에 형상이 존재하는 경우 예비성형체의 형상에 따라 최종 성형품에서 충전과 미충진이 각각 다르게 나타날 수 있음을 유한요소해석과 시험작업을 통하여 확인하였다.

(2) 동일한 최종형상에 대하여 예비성형체의 형상에 따른 형상비와 성형비가 다르게 나타났으며, 유한요소 해석과 실험을 통하여 충진이 완료될 때의 형상비와 성형비를 이용하여 충전한계그래프에 도시하였고, 충전한계그래프에서 충전여부를 판단할 수 있는 충전한계식을 구하였다.

(3) 외경형상이 동일한 제품을 최종 외경치수를 변경하여 형상비, 성형비를 다르게 설계한 후 검증 실시하였다. 두 가지 조건의 시험작업에서 충전한계식을 통한 예측과 동일하게 각각 충전, 미충진이 나타남을 확인하여 충전한계식의 타당성을 검증하였다.

후 기

* 본 연구는 “산업통상자원부,” “한국산업기술진흥원,” “동남지역사업평가원”의 “광역경제권 선도산업 육성사업”으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) Shivpuri, R. and Eruc, E., 1993, “Planning and Simulation of the Ring Rolling Process for Improved Productivity,” *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Vol.33, No.2, pp.153~173.
- (2) Johnson, W. and Needham, G., 1968, “Experiments on Ring Rolling,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.10, pp.95~113.
- (3) Mamalis, A.G., Hawkyard, J.B. and Honson, W., 1976, “Spread and Flow Patterns in Ring Rolling,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.18, pp.11~16.
- (4) Yang, D.Y. and Kim, K.H., 1988, “Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plain Strain Ring Rolling,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.30, No8, pp.571~580.
- (5) Kim, N.S., Machida, S. and Kobayashi, S., 1990, “Ring Rolling Simulation by the Three Dimensional Finite Element Method,” *International Journal of Mechanical Science*, Vol.30, No.4, pp.569~577.
- (6) Cho, S.H. and Kim, N.S., 1992, “Experimental Analysis of Ring Rolling,” *Transactions Korean Society of Mechanical Engineering*, Conf.(1), pp.360~363.
- (7) Joun, M.S., Chung, J.H. and Shivpuri, R., 1998, “An Axisymmetric Forging Approach to Perform Design in Ring Rolling Using a Rigid-Viscoplastic Finite Element Method,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.38, No.10-11, (October 1998), pp. 1183~1191.
- (8) Nam, Y.G., Kim, S.Y., Jeon, C.H., Sung, K.J. and Moon, Y.H., 2011, “A Study on Optimization of Blank Dimension According to Target Ring Dimension in Ring Rolling Process,” *Transactions Korean Society of Mechanical Engineering*, Conf.(1), pp.63~66.
- (9) Davey, K. and Ward, M.J., 2002, “The Practicalities of Ring Rolling Simulation for Profiled Rings,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.125~126, pp.619~625.
- (10) Kim, K.H., Suk, H.G. and Huh, M.Y., 2007, “Development of the Profile Ring Rolling Process for Large Slewing Rings of Alloy Steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.187~188, pp.730~733.
- (11) Hua, L., Qian, D.S. and Pan, L.B., 2009, “Deformation Behaviors and Conditions in L-Section Profile Cold Ring Rolling,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.209, pp.5087~5096.
- (12) Wang, L.G., Zhang, Y.F. and Wu, J.S., 2010, “Simulation and Test on Rolling Pairs of Large Wind-Tower Flange,” *China International Forge Master*, pp.69 ~ 73.