

## 환상압연 공정의 실용적 모델링 방법에 관한 연구

이두규<sup>1</sup> · 김응주<sup>1</sup> · 이용신<sup>#</sup>

### A Study on the Practical Finite Element Modeling Method for Ring Rolling

D-K. Lee, E-Z. Kim, Y-S. Lee

(Received November 13, 2014 / Revised January 15, 2015 / Accepted May 4, 2015)

#### Abstract

The finite element method has been widely used in the analysis of ring rolling. For ring rolling it requires a high computational expense due to the non-steady state material flow characteristics of the process. The high computational expense causes the finite element analysis to be impractical for industrial applications. In the current study, we aim to develop a practical implicit finite element modeling method for ring rolling. This method uses a step-wise steady state assumption and is called the "Stepped method". The stepped method divides the whole process time of unsteady-state flow model into a finite number of steady-state models. It then solves the process at several specific time steps until convergence is reached. In order to confirm the performance and validity of the newly proposed stepped method, the result from the stepped method were compared to the results from a Lagrangian finite element method and to results from experiments reported in the literature.

**Key Words** : Ring Rolling, Finite Element Method, Stepped Method

#### 1. 서론

환상압연 공정은 두개의 직경이 다른 롤과 롤 사이에 위치한 환형의 소재로 구성된다. 소재는 Fig.1 과 같이 구동 롤(main roll)에 의해 회전하며 맨드릴의 이송에 의해 점진적으로 감소하는 롤 사이 간격을 통과하며 직경이 증가하게 된다.

공정을 통해 얻어진 이음매 없는 환형 제품은 높은 표면 품질, 기계적 성질을 가지며 베어링, 차륜, 제트 엔진용 링 등 기계, 항공분야의 제품생산에 널리 활용되고 있다.

환상 압연 공정에 대한 연구는 실험적, 해석적, 수치적 방법에 의해 1960년대 중반부터 활발히 진

행 되어 왔다. Mamalis 등[1]은 맨드릴 하중, 구동 토크를 해석적 방법인 미끄럼선장법(Slip line field method)을 사용하여 노모그래프(Nomograph)로 나타내었으며 실험 결과와 비교하였다. 이 외에도 해석적 방법으로 상계해법[2], 에너지방법[3]등이 있으나 복잡한 형상의 단면을 갖는 형상 환상압연의 해석에는 어려움이 따른다. 수치적 방법에 의한 연구는 평면 변형을 가정을 통한 2차원 유한요소 해석[4]을 시작으로 다양한 모델링 방법에 대한 연구가 진행되었으며 기존의 성형하중 및 구동토크의 예측에 집중된 연구는 3차원 유한요소법을 통한 접촉 영역 및 폭 퍼짐 예측[5], 결함 예측[6] 등 다양한 범위로 확장되었다.

1. 한국생산기술연구원

# Corresponding Author : School of Mechanical System Engineering, Kookmin University, E-mail:yslee@kookmin.ac.kr

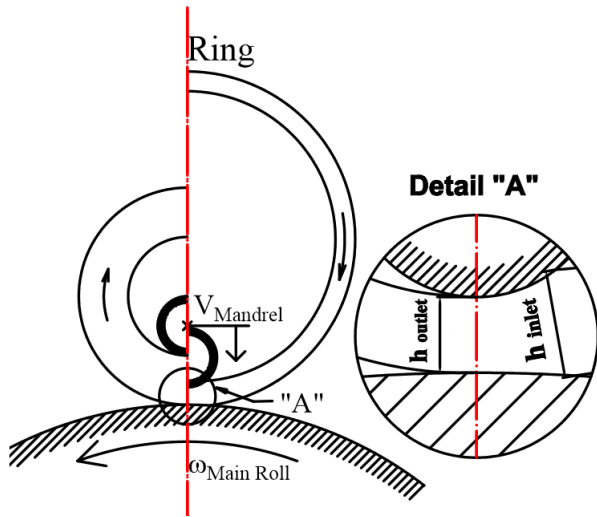


Fig. 1 Schematic diagram of ring rolling

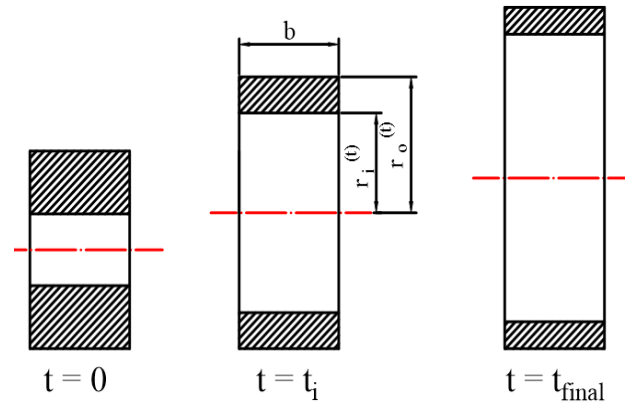


Fig. 2 Dimension of expanding ring specimen

환상압연공정 중 소재는 비정상 상태의 유동 및 다수의 회전을 겪으며 Fig. 1과 같이 롤 사이에서 국부적인 소성변형영역이 발달하는 특징이 있다. 이러한 점진적 변형 특성은 수치해석 시에 많은 해석 시간을 발생시킨다. 이에 산업체에서는 계산 량이 저감된 실용적 모델링 기법의 필요성이 요구되어왔다. 과거의 연구 중 대표적인 계산량 저감 모델링 방법으로 Kim 등[7]의 이중 격자 시스템이 있다. 이는 국부적 소성 변형 영역에서는 조밀 격자를, 이외의 강체 회전 영역에서는 성긴 격자를 사용하는 방법으로 강체 회전 영역의 불필요한 격자수를 줄여 해석 시간을 감소시키는 방법이다.

본 논문에서는 비정상 유동 특성의 환상 압연 공정을 다수의 정상상태화 된 수치해석 모델로 나누어 해석 시간을 저감 시키는 모델링 기법(계단식 해석 기법)을 제안하였다. 제안된 모델링 방법은 수치해석 방법 중 라그랑지안 내연적 유한요소해석 방법으로 적용되었다. 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며 스크립팅 언어인 PYTHON을 통해 다수의 모델 작성을 자동화 하였다.

계단식 해석 기법에 의한 해석 결과는 다음과 같은 비교 연구를 통해 실용성 및 신뢰도를 검증하였다.

(1) 변형률 속도(Strain rate) 의존성의 탄소성 재료 모델에 대한 기존 유한요소 모델과의 결과 비교 및 해석시간 비교

(2) 변형경화성(Strain hardening)의 탄소성 재료 모델에 대한 과거 실험 연구문헌[1]과의 결과 비교

## 2. 계단식 해석 기법

환상압연공정의 유한요소 해석시간 감소를 위한 계단식 해석 기법은 임의의 시점에서 소성 유동방정식의 해들의 획득을 위한 정상상태 모델링방법이다. 계단식 해석 기법을 통해 얻어진 임의의 시점에서의 해들은 내삽(Interpolation)을 통해 연속적인 결과로 변환될 수 있으며, 이러한 해석 기법이 전체 공정에 걸쳐 적용될 수 있다.

계단식 해석 방법(Stepped Analysis Method)의 개략적인 모델링 방법 및 특징은 다음과 같다.

- 각 계단식 해석 모델의 초기값을 결정한다. 소재 체적 불변성에 의해 임의의 시점에서 소재 내 ·외경 치수를(Fig. 2), 그리고 슬립이 없다는 가정에 의해  $i$ 번째 바퀴 회전 시 소재 1회전 소요 시간 및 요구 압하량을 얻을 수 있다.
- 공정 초기 롤 사이 위치한 질점들이 롤 간격을  $i$ 번째 통과하는 시점에서 유한요소 해를 얻기 위해  $i$ 개의 모델을 작성한다.
- $i$ 번째 모델의 해석을 압하 하중 및 구동 토크가 정상상태로 수렴할 때까지 수행한다. 수렴된 결과값은  $i$ 번째 시점에서의 결과값을 의미한다.
- $i$ 번째 모델 해석 결과로 얻어진 정상상태 등가 소성 변형률(Equivalent plastic strain)을  $i+1$ 번째 모델의 초기값으로 사상(Mapping)하여 해석을 수행한다.

### 2.1 유한요소 모델 초기값의 계산

평면 변형률 가정시 소재 체적 불변 가정에 의해

소재 내·외경( $r_o(t)$ ,  $r_i(t)$ )을 소재 회전수에 따라 이산화 하여 소재의 단면적은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A = \pi[(r_o^{(i)})^2 - (r_i^{(i)})^2] \quad (1)$$

$$h^{(i)} = r_o^{(i)} - r_i^{(i)} \quad (2)$$

$$r_i^{(i)} = \frac{A}{2\pi h^{(i)}} - \frac{h^{(i)}}{2} \quad (3)$$

또한 슬립이 없다는 가정에 의해 소재의 회전수에 따른 소요 시간을 계산할 수 있으며 다음과 같다.

$$T_{Step}^{(i+1)} = \frac{\pi(r_o^{(i)} + r_o^{(i+1)})}{r_{Main\ roll}\omega_{Main\ roll}} \quad (4)$$

$$t_{Process}^{(i+1)} = t_{Process}^{(i)} + t_{Step}^{(i)} \quad (5)$$

식 (5)에서  $t_{Step}^{(i)}$  은  $i$  번째 소재 회전 소요시간을 의미한다. 식 (3)의 소재 두께에 해당하는  $h^{(i)}$ 를 시간의 함수로 정리하면,

$$h^{(i)} = h^{(i-1)} - v_{feed}^{(i)} t_{step}^{(i)} \quad (6)$$

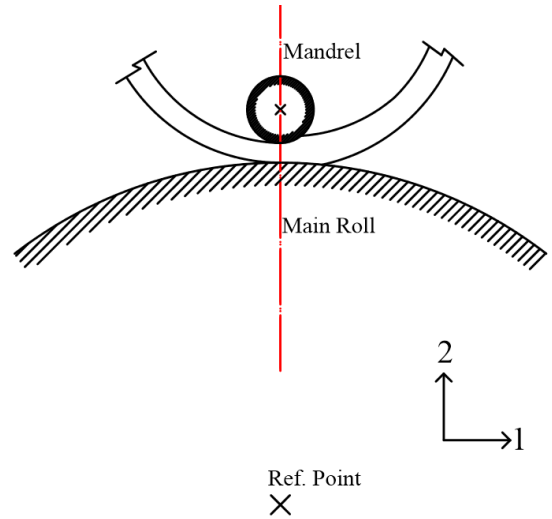
최종적으로 식 (3)과 식 (6)에 의해 소재 회전수에 따라 분류되는 계단식 해석 모델의 초기형상 값들을 얻을 수 있다.

### 2.2 경계조건

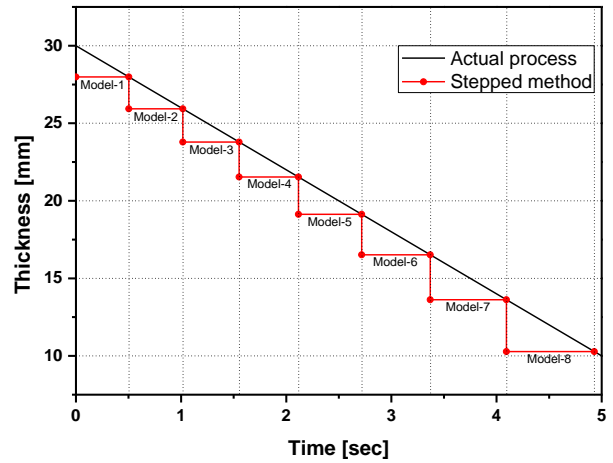
환상압연공정은 점진적으로 이송되는 맨드릴에 의해 소재 단면의 형상이 지속적으로 변화 되므로 비정상 유동 특성을 갖는다. 정상상태 모델링을 통한 해석시간 감소 효과를 얻기 위해 소재 회전 수 만큼의 수치해석 모델과 일정 압하율의 경계조건이 요구된다.  $i$ 번째 모델은 두개의 Substep으로 구성되며 Substep-1은 이전바퀴의 소재 두께( $h^{(i-1)}$ )에서 현재바퀴의 목표 두께( $h^{(i)}$ )로의 두께감소를, Substep-2는  $h^{(i)}$ 로 정상상태 도달 시까지 소재를 회전시켜 준다. 이에 해당하는 경계조건 및 기준점을 Table 1 과 Fig. 3에, 전체 공정시간에 따른 각 계단식 해석 단계의 두께 변화량을 Fig. 4에 도식적으로 표현하였다.

**Table 1 Boundary condition of stepped model**

	Substep-1			Substep-2		
	U1	U2	UR3	U1	U2	UR3
Mandrel	0	$V_{feed}$	0	0		
Main roll	0			0	0	$\omega_{mainroll}$



**Fig. 3 Reference point and coordinate illustration of stepped model for boundary condition**



**Fig. 4 Comparison of Thickness reduction for actual method and stepped method**

### 2.3 정상상태 결정과 결과 사상

앞의 과정들에 의해 작성된 모델을 정상상태 도달시점까지 수치해석하여 얻은 결과 값들을 다음 단계의 해석에 초기치로 사용한다. 이와 같은 과정을 모든 단계의 모델에 대하여 반복 수행하면

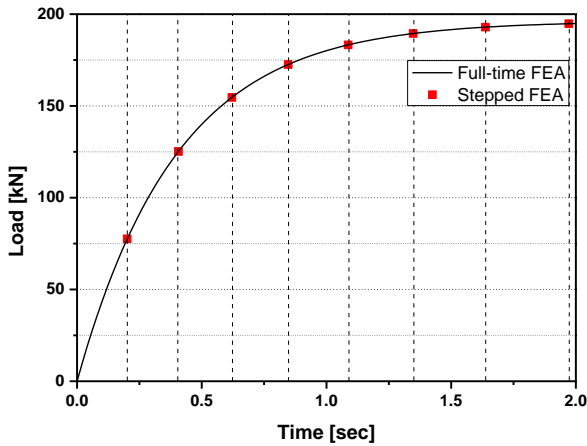


Fig. 5 Time-historical interpolation of discretized time point result data

Fig. 5와 같이 연속적인 결과값을 예측할 수 있다.

완전소성(Perfect plastic) 재료의 경우 소성변형을 변화에 따른 유동응력 변화가 없으므로 계단식 모델간의 유효응력 사상 과정이 요구되지 않는다. 하지만 변형경화성 또는 가공경화성 소재의 경우 변형을 사상 과정이 요구된다. 각 질점에 누적된 변형률 성분의 사상을 위해 이전 모델 해석 결과 중 정상상태 발달 부위의 반경방향 등가소성변형률 분포를 취득한다. 반경방향 변형률 분포는 다음 모델의 초기값으로 적용되어 원주방향으로 사상되며 이를 Fig. 6에 도식적으로 나타내었다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 해석조건

환상압연공정에 대한 유한요소해석 경계조건 및 물성을 Table 2, Fig. 7,8에 도시하였다. 본 연구의 주된 목적인 해석시간 감소 및 결과 타당성 검증을 위해 두가지 경우에 대해 제안된 계단식 해석 기법과 결과 비교하였다.

처음에는 기존의 유한요소해석 모델과 계단식 유한요소해석모델의 해석시간 및 결과를 비교하였으며 열간의 변형률 속도 의존성 소재 유동 특성을 갖는다. 해석시간의 정량적 비교를 위해 각각의 모델은 같은 수, 종류의 요소가 사용되었으며 ABAQUS의 CPU time 변수값을 통해 비교하였다.

두 번째 경우는 Mamalis 등[1]의 냉간 실험결과와 계단식 해석 기법의 결과를 비교하였으며 냉간의 가공경화성 소재 특성을 갖는다.

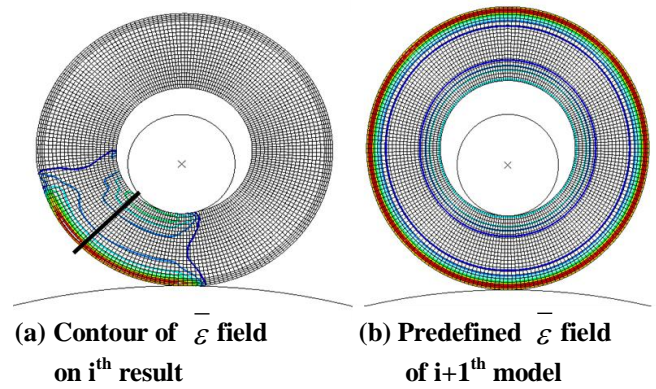


Fig. 6 Mapping of radial equivalent plastic strain distribution

Table 2 Process condition of ring rolling

		Case 1	Case 2
	Material Property	Rate dependent	Work hardening
	Comparison reference	Full-time FEA	Experiment
Process parameter	Mandrel feeding velocity [mm/s]	3.00	0.092
	Main-roll rotation velocity [RPM]	60.0	31.0
	Process time [s]	2.40	62.7
Ring dimension	Inner diameter [mm]	55.0	76.2
	Outer diameter [mm]	110	127
	Width [mm]	100	25.4
Roll dimension	Main roll diameter [mm]	500	228.6
	Mandrel diameter [mm]	40.0	69.9

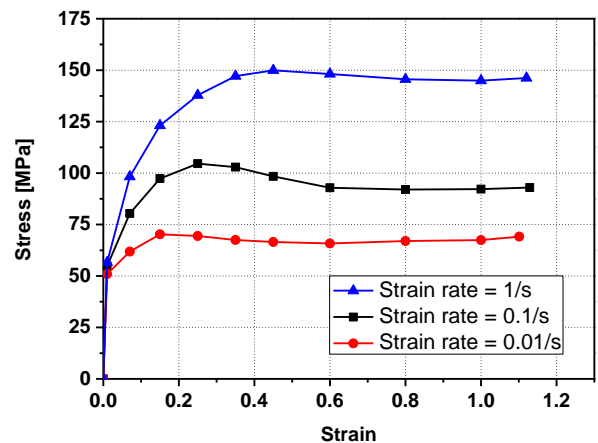


Fig. 7 Stress-strain curve for case 1

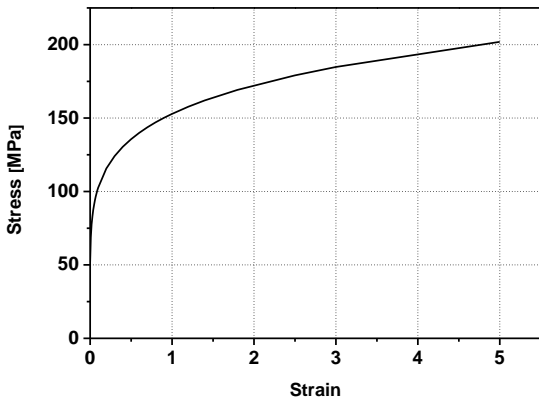


Fig. 8 Stress-strain curve for case2

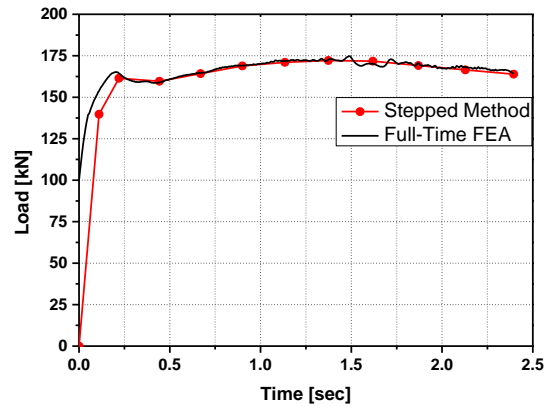


Fig.10 Comparison of forming load result of case1

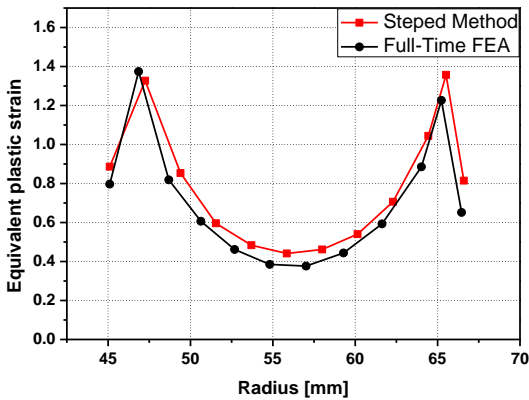


Fig. 9 Comparison of radial equivalent plastic strain distribution result of case 1

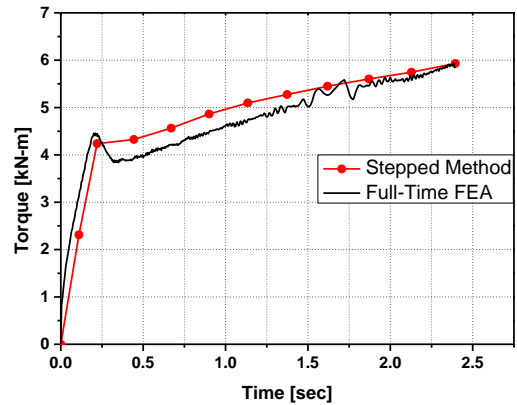


Fig.11 Comparison of driving torque result of case1

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 등가소성변형률 분포 비교

Fig. 9는 소재 10회전시 반경방향 등가소성변형률의 분포를 나타낸다. 기존의 유한요소 모델(Full-time FEA)의 경우 롤 간격을 통과하는 절점(Node)에서, 계단식 해석기법은 정상상태 발달 부위의 절점에서 등가 소성 변형률을 비교하였다. 비교 결과 계단식 해석 기법의 등가소성변형률 분포는 기존의 유한요소 모델과 잘 일치함을 알 수 있으며 이는 요소 유동응력의 일치를 의미한다.

### 4.2 성형하중, 구동토크 비교

환상압연 공정시 맨드릴 이송을 위한 성형 하중 및 메인롤 회전을 위한 구동 토크를 비교하였다. 계단식 해석기법에 의한 결과 점들은 선형보간하여 나타났다. 첫번째 경우인 기존 유한요소 모델과 비교 결과는 Fig. 10,11과 같으며 성형 하중과 구동

토크는 잘 일치함을 알 수 있다.

두 번째 경우인 기존의 실험 연구결과와 비교는 Fig. 12와 같으며 계단식 해석기법은 실험에 비해 낮은 성형 하중을 예측하였다. 이는 폭 퍼짐과 같은 3차원적인 변형을 수반하는 실험 조건을 2차원의 평면변형률 모델로 유한요소 해석하여 발생하는 오차로 판단된다. 실험 시 소재 폭 퍼짐은 롤-소재간의 접촉영역을 증가시키며 이는 성형하중 증가에 기인한다. 그러나 계단식 해석 기법에서 2차원 해석을 위해 폭 퍼짐 효과를 고려하지 않았으므로 더 낮은 하중 값을 예측한 것으로 판단된다. 또한 실험시 제한된 실험기기 용량으로 인해 실제공정에 비해 과도하게 적은 소재 회전당 두께 절입량을 갖는 조건으로 실험을 수행하였다. 이에 의해 목표 압하량을 달성하기 까지 수십 회의 과도한 소재 회전수가 발생하였으며 이에 상응하는 모델수가 요구되는 계단식 해석 기법의 특성상 등가소성변형률의 사상시 오차 누적으로 인해 낮은 성형 하중 값을 예측한 것으로 판단된다.

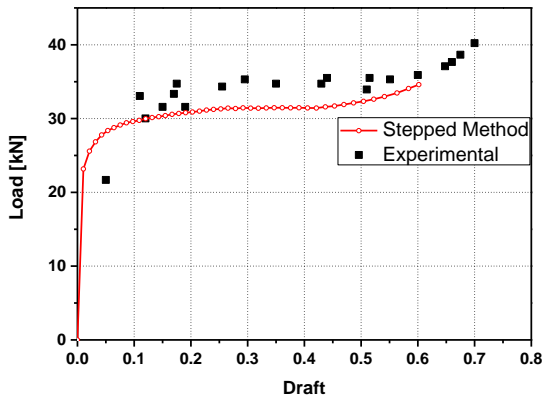


Fig.12 Comparison of forming load result of case 2

## 5. 결론

환상압연공정의 실용적인 유한요소 해석을 위한 정상상태 모델링 방법인 계단식 해석 기법을 제안하였다. 제안된 모델은 열간 공정 조건의 기존 유한요소 모델링 방법과 냉간 공정 조건의 과거 실험 연구 문헌과 비교되었으며 이를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 기존의 유한요소 해석 모델과 등가소성변형률 분포, 성형 하중, 구동 토크를 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었으며 제안된 모델의 신뢰도를 검증하였다. 또한 해석 소요시간을 나타내는 ABAQUS의 CPU time 변수를 비교한 결과 같은 수의 같은 요소를 사용하여 약 75%의 해석 시간 감소 효과를 확인하였다.

(2) 문헌에 보고된 과거 실험 연구상의 결과와 성형 하중을 비교하면 실험결과에 비해 계단식 해석 모델은 약간 낮은 결과 값을 예측하였다. 이는 평면 변형률 해석으로 인한 폭 퍼짐 효과 미반영 및 계단식 모델을 이용한 해석에서는 소성변형률 사상에 의한 오차의 누적이 원인으로 판단된다.

추후에는 정상상태 환상압연의 오일러리안 해석에서 자유곡면 수정 알고리즘을 통한 형상예측 방법을 결합하여 본 논문에서 소개한 환상압연 공정의 계단식 해석 기법에 적용 할 예정이다.

## REFERENCES

- [1] J. B. Hawkyard, W. Johnson, J. Kirkland, E. Appleton, 1973, Analyses for Roll Force and Torque in Ring Rolling, with Some Supporting Experiments, Int. J. Mech. Sci., Vol. 15, No.11, pp. 873~893.
- [2] D. Y. Yang, J. S. Ryoo, J. C. Choi, W. Johnson, 1980, Proc. 21st Int. MTDR Conference, London, Palgrave Macmillan, London United Kingdom, pp. 69~74.
- [3] M. Hayama, 1981, Analysis of Continuous Process in Ring Rolling of Plain Rings, J. Jpn. Soc. Technol., Vol. 22, No. 246, pp. 717~724.
- [4] D. Y. Yang, K. H. Kim, 1988, Rigid Plastic Finite Element Analysis of Plain Strain Ring Rolling, Int. J. Mech. Sci., Vol. 33, No. 8, pp. 571~580.
- [5] Y. S. Ko, H. J. Yoon, N. S. Kim, 2002, Prediction of Spread and Contact Region in Ring Rolling Process using Rigid-plastic Finite Element Method, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 26, No.12, pp. 2670~2677.
- [6] H. K. Moon, M. S. Joun, J. H. Chung, C. N. Park, 2004, Prediction of Defect Formation in Ring Rolling by Three-dimensional Rigid-plastic Finite Element Method, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 28, No.10, pp. 1492~1499.
- [7] N. S. Kim, S. Machida, S. Kobayashi, 1990, Ring Rolling Process Simulation by the Three Dimensional Finite Element Method, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, No.4, pp. 569~577.