

# 등속조인트 인너레이스 케이지 링 압연공정의 강소성 유한요소해석

문호근<sup>1</sup>, 박정휘<sup>2</sup>, 이민철<sup>3</sup>, 전만수<sup>#</sup>

## Rigid-Plastic Finite Element Analysis of a Ring Rolling Process of the Inner Race Cage of a Constant Velocity Joint

H. K. Moon, J. H. Park, M. C. Lee, M. S. Joun

### Abstract

In this study, a rigid-plastic finite element method is applied to simulating a ring rolling process of the inner race cage of a constant velocity joint for the passengers' cars. The ring rolling process is mathematically modeled by several assumptions. The defect formation at the side ends is predicted in detail. The predictions are compared with the experiments and a good agreement is observed in terms of deformed shape.

**Key Words** : Cage, Ring Rolling, Rigid-Plastic Finite Element Method, Experiment

### 1. 서 론

상온에서 링 압연(ring rolling)은 중공 축대칭 형상의 제품을 고정도로 생산할 수 있는 장점을 지니고 있다. 링 압연의 대표적인 사례로 베어링의 내외륜을 들 수 있다. 실제 베어링의 내외륜은 선삭 가공된 소재를 링 압연하고 열처리한 후에 연삭가공으로 제작되고 있다. 사실상 링 압연에 의하여 주요 형상 치수가 결정되므로 링 압연공정은 매우 중요하다. 선삭 공정에서 발생한 어느 정도의 치수 공차는 링 압연공정에서 무마되는 경우가 흔하다. 링 압연공정의 특성은 공정이 알맞게 설계되었을 경우, 고정도의 형상 및 치수 공차를 맞추는데 적합하다는 점이다. 그리고 자동화가 용이하므로 생산성이 탁월하고, 제품의 강도를 증가시키는데도 효과적이다.

반면, 공정의 개발 시에 많은 시행착오가 불가피하며 이로 인한 막대한 개발 비용과 기간이 소요되는 문제를 안고 있다. 잘못된 공정 설계는 갖

은 금형 및 공구의 파손을 야기시키고 대량의 불량품을 생산하게 되어 막대한 피해를 입히는 경우가 허다하다. 이러한 문제로 인하여 링 압연은 공정의 장점에 비하여 상대적으로 그 활용이 작은 편이다. 물론 베어링의 내외륜과 같이 생산량이 막대하면서 동시에 고정도를 요구하는 부품의 생산기술로써 링 압연은 전술한 문제점을 극복하고자 고도 남을 정도로 강점을 지니고 있다. 그리고 부품의 생산 규모가 증가함에 따라 제조 공법의 적용을 달리함으로써 원가 절감과 품질 제고가 동시에 가능한 경우가 다수 있을 것으로 추측된다. 그 한 예로 자동차의 등속조인트의 부품인 인너레이스 케이지(inner race cage)를 링 압연으로 생산한다면, 제조원가와 품질 경쟁력의 동시 확보가 가능할 수 있다. 선진국에서는 인너레이스 케이지를 이미 링 압연 공법으로 생산하거나 이에 관한 심도 있는 연구를 실시하고 있다[1, 2].

링 압연은 다른 소성가공 기술에 비하면 다품종 소량생산에 훨씬 적합하다. 점진적 성형 방법

1. 세플러코리아

2. 경상대학교 대학원 기계공학과

3. 경상대학교 2단계 BK21 첨단기계항공고급인력양성사업단

# 교신저자: 경상대학교 기계항공공학부,

E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

의 일종으로 성형하중이 단조 등에 비하여 작게 들어가므로 상대적으로 크기가 작은 금형, 즉 멘드렐(mandrel)과 작업 롤(work roll)의 교체로 손쉽게 생산 제품의 교체가 가능하기 때문이다. 문제는 전술한 바와 같이 공정 개발이 용이하지 않다는 점에 달려 있다. 만약 공정 개발이 용이하다면, 링 압연은 적용 분야가 크게 넓어질 것이다.

컴퓨터 시뮬레이션 기술은 이러한 고질적 문제를 해결하는데 효과적일 것이라는 점은 주지의 사실이다. 이미 단조 등에서는 다양한 형태의 컴퓨터 시뮬레이션 기술이 공정 설계 업무의 일환으로 현장에 매우 깊숙이 파고들고 있다. 그러나 링 압연 분야에서는 상황이 조금 다르다. 많은 연구자[3~16]들이 이 분야에 관한 연구를 실시하였으나, 그 결실이 기업체의 링 압연공정 설계 기술자들과 직접 연결되지 못하고 있는 실정이다. 물론 가장 큰 원인은 링 압연 문제의 복잡성과 계산시간 등에 있다. 최근의 PC의 급속한 발전으로 이제 계산시간 문제는 더 이상 장애가 되지 않고 있다. 그러나 역학 문제 그 자체가 복잡하고 어렵기 때문에 적절한 가정을 통한 현실적 해를 구하는 것이 당면 과제이다.

본 연구에서는 등속조인트 인너레이스 케이지의 링 압연공정의 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하고, 그 결과를 실험 결과와 비교함으로써 접근방법의 타당성을 입증하고자 한다. 따라서 본 논문은 등속조인트 인너레이스 케이지의 링 압연공정 해석 기술을 확보하여 공정최적설계의 기틀을 마련하는데 연구의 목적을 두고 있다.

## 2. 문제의 정의 및 해석 모델

Fig. 1 은 등속조인트가 조립되어 있는 자동차의 전륜 조립체를 나타내고 있다. 원으로 표시되어 있는 부분이 등속조인트이다.

Fig. 2 는 인너레이스 케이지가 조립되어 있는 등속조인트 조립체를 나타내고 있다. 이 조립체에서 인너레이스 케이지는 아웃터레이스(outer race)와 인너레이스(inner race) 사이에서 볼(ball)을 지지하는 역할을 수행한다. 따라서 인너레이스의 재료는 내마모성이 우수해야 하므로 SCr415H 또는 SCr420H 등이 사용되고 있다. 현재 우리나라에서 인너레이스 케이지는 전적으로 단조 후 가공 공법으로 제조되고 있다. 이 제품이 링 압연에 의하여 생산된다면, 가격 및 품질 양면에서 유리하다

고 사료된다. 본 논문에서는 공정 개발 중에 발생한 형상 결함을 규명하기 위하여 그 발생 과정을 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 이용하여 예측함으로써 해석 방법의 타당성을 입증하고자 한다.

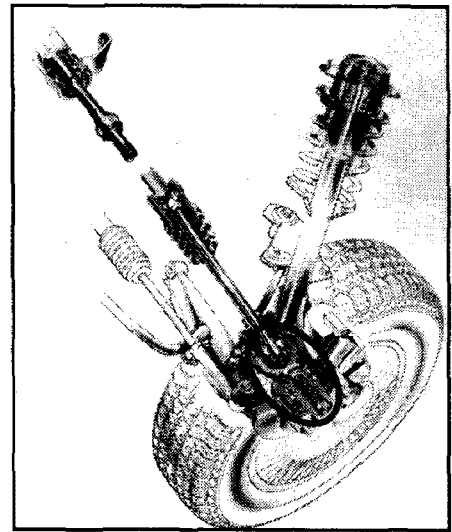


Fig. 1 Front wheel assembly of car which is assembled with velocity joint

### Inner Race Cage

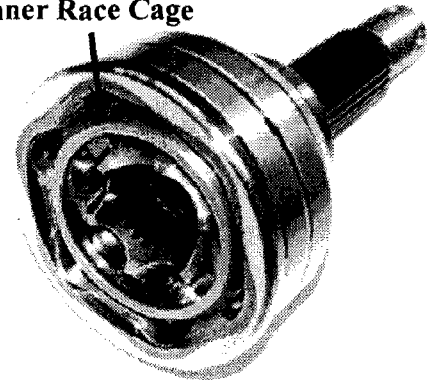


Fig. 2 Velocity joint which is assembled inner race cage

Fig. 3 은 등속조인트 인너레이스 케이지의 링 압연공정을 나타내고 있다. 해석을 위한 공정은 기본적으로 소재 또는 예비형상, 작업 롤, 멘드렐 등으로 구성되어 있다. 작업 롤은 압하력을 지탱하면서 성형에 필요한 동력을 전달하는 역할을 수행한다. 멘드렐은 기본적으로 공회전을 하며, 압하력을 부과하는 역할을 담당한다. 즉, 작업 롤은 정지한 상태에서 회전하며, 이에 따라 압하력과 마찰에 의한 구동력을 소재에 부과한다. 반면, 멘드렐은 상하로 이송되며, 이에 필요한 압하력만을 소재에 전달한다.

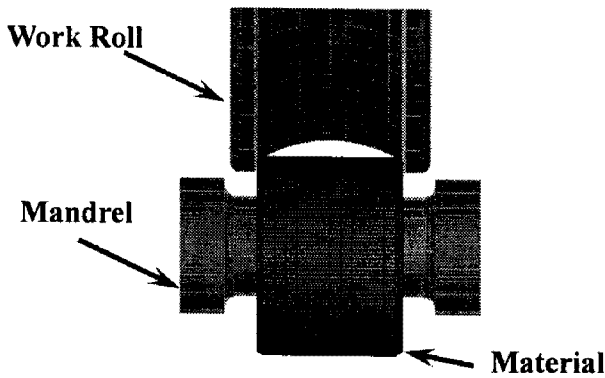


Fig. 3 Ring rolling process of inner race cage

일반적으로 냉간 링 압연은 윤활유의 분위기에서 실시된다. 따라서 맨드릴은 무마찰이라고 가정을 한다. 이 가정이 없으면, 맨드릴의 회전속도가 미지수가 되므로 문제의 난이도가 크게 증가하게 된다. 한편 압연이 이루어지기 위하여 작업 롤은 소재와 어떤 영역에서 동일한 원주속도로 운동해야 한다. 문제는 그 영역, 즉 일종의 중립점을 구하기가 쉽지 않다는데 있다. 그 이유는 소재의 전체 표면의 크기에 비하여 접촉영역이 매우 작고 이로 인하여 접촉면에서 요소망의 수를 크게 하는데 한계가 따르며, 경험적으로 볼 때 압연공정에서 중립점의 위치를 수치적으로 정확하게 구하는 것은 일반적으로 용이한 일이 아니다. 따라서 본 연구에서는 압축응력이 최대인 지점에서 중립점이 발생하는 것으로 간주하였다. 따라서 전술한 방식으로 하나의 절점을 중립점으로 결정한 후 이 절점과 그에 대응하는 작업 롤 상의 점의 원주방향의 속도를 일치시켰고, 다른 절점에서는 일정전단 마찰법칙을 적용하여 마찰응력을 고려하였다.

### 3. 유한요소해석 및 결과의 검증

링 압연은 수십 번의 회전 이후에 공정이 종료된다. 따라서 단조에 비하면 스트로크가 수십 배에서 수백 배까지 큰 문제이다. 그러므로 해석스텝 수가 매우 많기 때문에 계산시간이 그만큼 많이 소요되는 문제가 있다. 이러한 문제를 회피하기 위하여 Kim 등[5]이 개발한 기법을 Moon 등[9]이 부피변화를 최소화시키는 방향으로 개선시킨 바 있다. 이 기법의 특징은 해석모델과 기준모델을 사용하는 것이다. 본 연구에서는 이 개발된 기법을 사용하였다.

해석조건은 다음과 같다.

- 소재의 초기형상 및 치수: Fig. 4
- 소재의 유동응력:  $\bar{\sigma} = 350.0(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.14})^{0.2}$
- 작업 롤과 소재 사이의 마찰상수:  $m = 0.1$
- 맨드릴과 소재 사이의 마찰상수  $m = 0.0$
- 작업 롤의 회전속도:  $N_0 = 200\text{rpm}$
- 맨드릴의 이송속도: Fig. 5

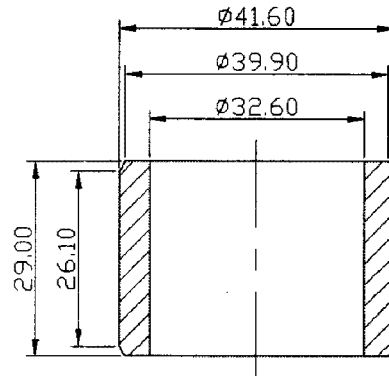


Fig. 4 Initial shape and dimension of material

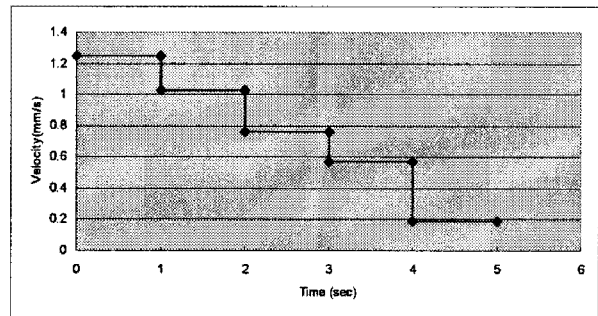


Fig. 5 Velocity of the mandrel

총 35,768 번의 해석스텝의 계산으로 Fig. 6의 해석결과를 얻었다. 일반 단조 공정 해석이 300 내외의 해석스텝으로 해석 결과를 얻는 것에 비하면 링 압연의 해석스텝의 수가 약 100 배 많으며, 계산시간은 그에 비례한다는 점이 링 압연공정의 해석 시에 고려해야 할 특징 중의 하나이다.

Fig. 6(a)는 초기 요소망을 나타내고 있으며, Fig. 6(f)에 최종해석 결과를 나타내었다. 그림에서 색깔의 분포는 유효변형률의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 초기의 소재는 폭변화를 거의 발생시키지 않다가 대칭면이 작업 롤에 접촉되면서 폭이 줄고 바깥 부분이 작업 롤로부터 분리되는 현상을 보이고 있다. 이는 공정설계를 어렵게 만드는 주 요인이 되는 것이다.

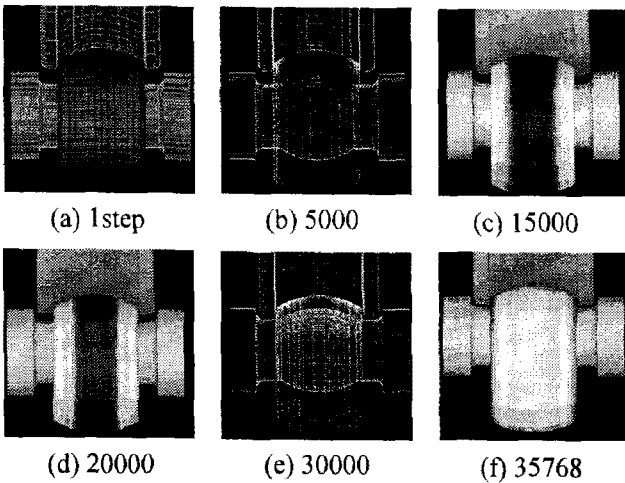


Fig. 6 Simulation result

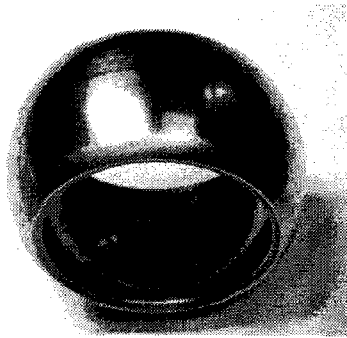


Fig. 7 An inner race cage, ring rolled for this study

Fig. 7 은 실험결과로 얻은 인너레이스 케이지이며, 사진에서 보는 바와 같이 바깥 부분은 작업 롤과 분리되어 표면의 거칠기가 다르다는 것을 알 수 있다.

Table 1 에 인너레이스 케이지의 최대 직경과 최대 폭에 대한 초기값과 최종 해석결과를 나타내었다. 최대오차가 0.190%로 비교적 잘 맞는 결과를 얻었다.

Table 1 Initial and final value of diameter and width

	Maximum diameter		Final width	
	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment
Initial	41.600	41.623	29.000	29.010
Final	52.444	52.544	28.594	28.605

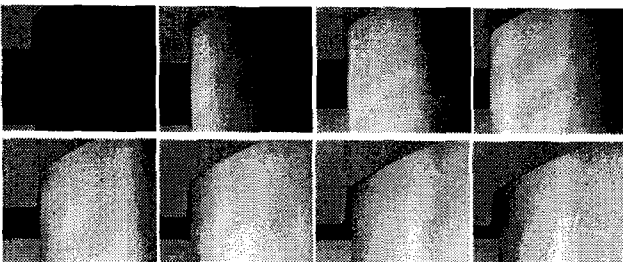
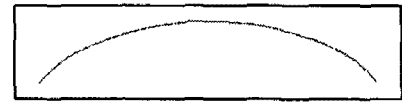


Fig. 8 Detailed view of defect formation near the edge

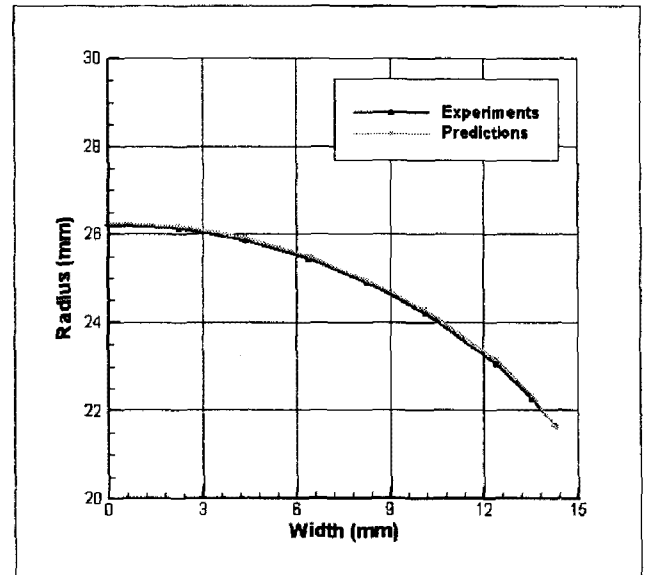
Fig. 8 에 시뮬레이션 중 가장자리의 변형을 확대하여 나타내었다. 그리고 Fig. 9 는 해석결과와 실험결과로 얻은 단면의 형상을 비교하고 있다.



(a) Predictions



(b) Experiments



(c) Comparison

Fig. 9 Comparison of the defect formed between the experiments and predictions

Fig. 9 (b)는 실험결과로 얻은 인너레이스의 단면 형상을 형상측정장비를 사용하여 측정한 것이다. Fig. 9 (c)에서 보는 바와 같이 해석결과와 실험결과가 대체적으로 비슷한 형태를 유지하고 있다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 가장자리에서 작업 롤과 소재가 분리됨으로써 발생한 형상 결함의 예측결과와 실측결과가 유사함을 알 수 있다. 이 결함은 링 압연공정의 설계에서 매우 중요한 문제중의 하나이다

#### 4. 결 론

본 연구에서는 등속조인트의 인너레이저 케이지의 링 압연공정에 대한 강소성 유한요소해석이 실시되었다. 유한요소해석을 위한 링 압연공정의 해석모델을 제시하였고, 최대 직경이 52.5mm 인 인너레이저 케이지의 링 압연공정의 해석에 적용되었다. 해석 결과의 검증은 위하여 실험 결과와 비교하였다. 비교 결과, 해석 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치함을 확인하였다. 특히 케이지 링 압연에서 문제로 지적되어 온 케이지의 가장자리의 형상 결함을 비교적 정확하게 예측하였으므로 이를 방지하기 위한 공정의 설계, 즉 예비성형체의 형상, 맨드렐의 이송 속도 프로파일 등을 최적 설계할 수 있는 기반이 구축되었다.

#### 후 기

본 연구는 (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터의 정밀냉간단조평가시스템을 사용하여 이루어졌으며, 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 지원으로 실시된 연구결과의 일부임.

#### 참 고 문 헌

- [1] K. Sawamiphakdi, P.M. Pauskar, K.Q. Jin and G.D. Lagoti, 2002, Ring rolling process modeling using explicit finite element analysis, *Adv. Tech. Plast*, vol.1
- [2] P.M. Pauskar, K. Sawamiphakdi and D.Q. Jin, Static implicit vs. dynamicwexplicit finite element analysis for ring rolling process modeling, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> international conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, Vol. 712, pp. 412~417.
- [3] Doege, E. and Aboutour, M., 1987, Simulation of ring rolling process, *Adv. Tech. Plast.*, Vol.2, pp. 279~284.
- [4] Toya, Y., Ozawa, T. 3nd Nishiguchi, M., 1984, Analysis of simulation in ring rolling, *Proc. 3rd Int. Conf. On Rotary Metalworking Processes*, pp. 279~284.
- [5] Kim, N. S., Machida, S. and Kobauashi, S., 1990, Ring rolling process simulation by the three dimensional finite element method, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 33, pp.541~550.
- [6] Yang, D. Y., Kim, K. H. and Hawkyard, J. B., 1991, Simulation of T-section profile ring rolling by the 3D rigid-plastic finite element method, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 33, pp. 541~550.
- [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, *Int. J. Mech. Tools and Manu.*, Vol. 38, pp. 1183~1191.
- [8] Hamzah, S. and Stahlberg, U., 1998, A study of pore closure in the manufacturing of heavy rings, *J. Mater. Process. Tech.* 84, pp. 25~37.
- [9] Joun, M. S., Moon, H. K., Park, J. M., Chung, J.H. and Park, C. N., 2001, Three dimensional rigid-plastic finite element analysis of a ring rolling process, *Int. J. Mech. Tools and Manu.*, Vol. 40, pp. 81~93.
- [10] Xie, C. L., Dong, X. H., Li, S. J. and Huang, S. H., 2000, Rigid-Viscoplastic dynami explicit FEA of the ring rolling process, *Int. J. Mech. Tools and Manu.*, Vol. 40, pp. 81~93.
- [11] Davey, D. and Ward, M. J., 2002, The practicalities of ring rolling simulation for profiled rings, *J. Mater. Process. Tech.* 5970, pp.1~7.
- [12] Davey, K., and Ward, M. J., 2002, A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, pp. 165~190.
- [13] Ko, Y. S., Yoon, H. J. and Kim, S. N., 2002, Prediction of spread and contact region in ring rolling process using rigid plastic finite element method, *KSME(A)*, Vol. 26, No. 12, pp. 2670~2677.
- [14] Utsunomiya, H., Saito, Y., Shinoda, T. and Takasu, I., 2002, Elastic-Plastic finite element analysis of cold ring rolling, *J. Mater. Process. Tech.* 5969, pp. 1~6.
- [15] Koo, S. W., Lee, J. C., Yoon, S. J. and Kim, S. N., 2003, Analysis of Aluminum ring rolling process using thermo-rigid-plastic finite element, *KSME(A)*, Vol. 27, No. 5, pp. 815~822.
- [16] 문호근, 전만수, 정재현, 박창남, 2004, 3차원 강소성 유한요소법을 이용한 환상압연공정중 형상결함의 예측, *대한기계학회논문집 A권*, 제28권, 제10호, pp. 1492~1499.