

유한요소법을 활용한 웨도륜의 프레스 성형공정 설계

강 범수*, 이 진희, 변 상규, 최 한호(부산대), 김 완두(한국기계연구원)

Process Analysis and Design in Forming of Bearing Rings by the FEM

B.S. Kang, J.H. Lee, S.K. Byun, H.H. Choi and W.D. Kim

Abstract

This study aims detecting forming defects for the forming process of bearing rings, which is designed by an industry expert. The designed process consists of one forming operation for the outer ring and four operations for the inner ring. The thickness of the sheet used is 1.6mm, and is in between of thin sheet and bulk material. Here the rigid-plastic finite element method is applied to the analysis and design of the process without considering anisotropy of thin sheet. Thinning and folding defects are detected if the initially designed process is applied for manufacturing. So a new process is designed by referring the results of the FEM. It is confirmed that the industry expert agree the possibility of defects derived from FEM results.

1. 서론

금속 판재를 복잡한 형상의 부품으로 성형하는 판금 프레스가공은 프레스랭의 압축 행정을 이용하여 형공구에 의해 금속판을 인장, 압축, 굽힘등의 응력상태를 발생시켜 원하는 형상치수로 소성변형을 부여하는 가공법으로 굽힘, 스트레칭, 디프 드로오잉, 플랜징(flanging), 커어링(curling)등이 있다[1-2]. 이러한 프레스성형방법은 압연법과 다양한 프레스 및 금형의 개발에 따라 급속도로 발전하여 근래 자동차, 항공기 및 전기공업등에 널리 이용되고 있다. 대부분의 복잡한 형상의 부품은 여러가지 공정이 조합된 다단계 공정으로 이루어져 있으므로 경제적으로 원하는 부품을 생산하기 위한 적절한 공정설계와 공정제어는 아주 중요하다. 이러한 공정설계는 공정결정, 금형설계, 예비성형체 설계등과 같은 많은 영역이 포함된다. 그러나 대부분의 프레스 성형공정의 설계를 숙련자의 경험적 지침, 직관 및 실험에 의한 시행착오를 통하여 공정변수와 공정 수의 결정을 하고 있으므로 새로운 제품개발을 위한 시간소비와 최종제품의 단가 상승을 초래한다. 그러므로 새로운 부품의 개발, 공정개선 및 최종제품의 결함 방지등을 위해서는 이러한 시행착오를 행하기 이전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 원하는 제품의 성형이 가능한 공정설계를 행할 수 있는 연구가 필요하다.

금속성형공정의 설계를 위한 소재의 유동해석 및 예비성형체 설계에 사용되는 초등 해석법, 미끄럼 선장법 및 상계법등과 같은 전통적인 해석방법과 이러한 해석방법에 기본적인 CAD시스템들은 복잡한 부품의 성형공정에 대해서는 적용이 곤란한 점이 있으므로[3-7], 최근 유한요소법이 널리 사용되고 있다.

자동차용 부품중의 하나인 볼 베어링 케도륜은 프레스 성형공정으로 생산되며, 내륜과 외륜으로 구성되어 있고, 다단계의 성형공정을 거쳐 생산되므로 공정동안 소재가 여러형태의 변형으로 인해 공정설계에는 많은 시행착오가 발생한다. 따라서 실제 금형을 제작하여 시험을 행하기 이전에 전 공정에 걸친 소재의 변형양상과 결합생성의 여부등을 미리 예측하는 것이 필요하다. 최근 유한요소법을 활용한 다단계 금속성형공정의 설계 및 예비성형체 설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 적절히 설계된 공정은 실제 공정설계에 필요한 정보를 미리 제공함으로써 공정설계에 소요되는 시간과 경비의 절감에 많은 도움이 될 것이다[8-13].

본 연구에서는 감소성 유한요소법을 활용하여 두꺼운 판재로 부터 생산되는 볼 베어링 케도륜의 다단계 프레스 성형공정을 해석하였다. 실제 전문가에 의해 설계된 공정절차에 따라 유한요소 시뮬레이션을 행하였으며, 성형과정 동안의 소재 변형양상, 초기위치에 따른 두께비와 유효변형률분포로 부터 발생 가능한 결함을 예측하여 개선가능성을 조사하였다.

2. 문제 정의 및 유한요소 모델링

볼 베어링 케도륜은 자동차 엔진룸에 포함된 부품으로서 그림 1에 나타난 바와 같

이 외륜, 내륜 및 볼 베어링으로 구성되어 있으며, 냉간 프레스 성형공정을 통하여 생산된다. 최종성형후 볼 베어링이 들어가는 부분은 후속의 기계가공으로 최종 치수를 맞춘다. 레도륜은 벨트에 의해 회전되는 회전체로서 기계적 특성이 양호하여야 하며, 최종으로 성형된 제품을 열처리를 행하므로 응력집중등이 방지되어야 한다. 또한 볼베어링 레도륜은 다단계 프레스 성형공정을 거치므로 이로 인한 소재의 두께감소 및 겹침(folding)과 같은 결함의 발생 가능성이 높으므로, 이에 대한 예측은 공정설계에서 아주 중요한 사항이다.

초기소재인 판재는 탄소강이며 두께는 1.6mm로서 두꺼운 판재이다. 이방성과 스프링 백 효과를 무시하였다. 볼 베어링 레도륜의 냉간 프레스 성형공정을 공정설계 전문가에 의해 채택된 외륜 및 내륜의 다단계 성형공정을 강소성 유한요소법을 이용하여 해석하였으며, 이에 대한 수식화 및 계산기법은 이미 잘 정립되어 있다[14].

비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙함수(penalty function) K를 도입하면, 강소성 재료에 대한 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2} (\sigma_{ij}' \sigma_{ij}')^{1/2}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$, σ_{ij}' 는 편차응력, f_i 는 표면력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률속도이다.

식 (1)은 일반적인 유한요소 분할화과정을 거치면, 질점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 Newton-Raphson법을 이용하여 해를 구하며, 이를 위해서는 초기속도장이 필요하므로 자동적인 초기속도장의 발생을 위하여 Oh[15]가 제안한 방법에 따라 재료를 선형점성재료로 취급하여 초기속도장을 구하였다.

시뮬레이션은 축대칭이므로 1/2만을 해석하였으며 계산조건은 다음과 같다.

- 다이와 소재사이의 마찰 조건 : 마찰상수 $m = 0.1$ 을 사용
- 소재의 유효응력-변형률 관계 : $\bar{\sigma} = 117.3 \bar{\epsilon}^{0.11}$ (kg/mm²)

3. 볼 베어링 레도륜의 프레스 성형공정

볼 베어링 레도륜은 외륜(outer ring)과 내륜(inner ring)으로 구성되어 있으며, 이의 생산을 위하여 전문가에 의해 설계된 공정절차는 다음과 같다.

그림 2에 보이는 바와 같이 외륜은 소재(블랭크)의 중앙부를 먼저 블랭킹하여 원형 구멍을 낸 뒤에 1차 드로오잉을 행한 후, 2차 드로오잉(사이징)으로 최종치수를 유지하며, 내경을 원하는 치수로 최종 블랭킹을 행하고 열처리를 한다. 외륜의 성형공정에 있어서는 펀치 및 다이 반경의 조절이 중요하다.

그림 3은 내륜의 성형을 위한 전문가의 공정 절차를 나타낸다. 먼저 블랭크의 중앙부를 블랭킹하여 1차 드로오잉을 행하거나 블랭크를 1차 드로오잉(그림 3(a))한 후, 중앙부를 블랭킹한다. 다음으로 2차 드로오잉을 행한다(그림 3(b)). 2차 드로오잉된 예비 성형체의 중앙부 구멍을 피어싱 한다. 다음으로 구멍 주위를 플랜징 하는 공정인 버어링(burring)을 행한다(그림 3(c)). 최종으로 소재의 단면을 둥글게 하기 위한 커얼링

(curling)공정이 추가된다(그림 3(d)). 외륜과 마찬가지로 최종제품의 열처리를 행한다.

외륜에 비해 내륜은 많은 공정절차를 거쳐서 최종제품으로 성형되기 때문에 각 단계에서 두께의 두께 감소와 겹침등과 같은 결합발생의 가능성이 높다. 따라서 이에 대한 문제점을 사전에 파악, 결합의 발생이 없는 최종제품을 성형하기 위한 공정변수를 예측하는 것이 아주 중요하다.

4. 유한요소 시뮬레이션

본 연구에서는 앞에서 언급한 전문가의 공정을 토대로 강소성 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 사용한 금형 및 소재의 치수는 그림 2와 그림 3에 나타난 치수와 동일하며, 다이 및 펀치의 반경도 전문가에 의해 제시된 치수를 그대로 사용하였다.

4.1 외륜의 유한요소 시뮬레이션

그림 4는 외륜 성형공정의 시뮬레이션을 위한 초기소재의 격자시스템 및 다이와 펀치의 형상을 나타낸다. 소재는 미리 블랭킹 되어 있으며 펀치가 움직여 소재가 변형된다. 실제 공정은 펀치의 아래쪽에 스프링으로 지지되는 평판이 존재하여 소재를 역으로 누르게 되어 있다(그림 2참조). 유한요소 시뮬레이션에서 이의 고려를 위하여 펀치와 마주치는 반대면의 절점에 펀치의 속도와 동일한 속도를 부여하였다. 또한 다이의 위쪽에 있는 블랭크 홀더도 스프링에 의해 지지되어 있다. 이는 소재가 미끄러지며 성형되도록 유지하면서 위 방향으로 소재가 들리는 것을 방지하는 역할을 한다. 이를 시뮬레이션 과정에서는 블랭크 홀더를 고정시키고 소재와 블랭크 홀더사이의 마찰만을 고려, 소재가 들리지 않고 미끄러지며 드로오잉 되도록 하였다.

그림 5는 최종 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 원으로 표시된 부분에서 소재의 두께가 감소하는 현상이 나타난다. 이는 그림 6의 초기위치에 따른 두께비(t/t_0)의 그래프에서 명확히 확인된다. 여기서 t 는 현재의 소재두께이며, t_0 는 초기소재의 두께이다. 그림 7의 유효변형률 분포에서 보듯이 이 부분에서 변형률이 가장 높다. 따라서 최종제품으로 성형한 후, 열처리를 하게 되면 이 부분에서 잔류응력으로 인한 변형 가능성이 높음을 알 수 있다. 전문가의 설계공정은 여기에서 생기는 두께감소를 고려하여 다시 설계되어야 한다. 한 공정을 추가하거나, 금형의 코너반경을 재설계하여야 할 것이다. 최종 변형된 제품의 형상을 3차원으로 도시한 것이 그림 8에 나타나 있다.

4.2 내륜의 유한요소 시뮬레이션

내륜의 프레스성형을 위한 전 공정은 크게 1차 드로오잉, 2차 드로오잉, 버어링, 커얼링의 4단계로 구성된다.

4.2.1 1단계 공정(1차 드로오잉)

그림 9는 내륜 성형공정을 위한 첫번째 공정인 1차 드로오잉 공정을 위한 격자 시스템과 다이 및 펀치의 형상이다. 실제 공정은 미리 블랭킹이 되어 있지 않은 소재를 사용하였지만, 미리 블랭킹하는 공정이 선행되어도 무관하므로 시뮬레이션에서는 미리 중앙부를 블랭킹한 소재를 사용하였다. 실제의 프레스 구조는 외륜의 경우와 마찬가지로 펀치의 반대편에 스프링에 의해 지지되는 평판이 존재하므로(그림 3(a)참조), 이의

고려를 위하여 펀치 반대편의 절점에 펀치와 동일한 속도를 부여하여 시뮬레이션 하였다. 또한 최종 제품의 치수만큼 성형된 후에는 스프링에 의해 지지되는 평판이 고정되므로 그림 9에 보는바와 같이 다이가 존재하는 것 처럼 근사하여 시뮬레이션 하였다. 또한 최종성형후의 절단 공정을 미리 예측하여 초기 블랭크의 외경과 내경에 약간의 여유를 두어 시뮬레이션하였다. 1차 드로오잉 한 최종 시뮬레이션 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림 11은 이때의 유효변형을 분포를 나타낸다. 소재두께의 변화는 거의 없으나 곡면으로 변하는 부분과 바닥부분에서 상대적으로 큰 변형을 받았음을 알 수 있다. 이는 블랭크 호울더 및 다이와 소재사이의 마찰력과 펀치의 하강으로 인하여 소재가 인장을 많이 받았기 때문으로 생각되며, 만약 더 깊게 드로오잉 한다면 판 두께가 감소하는 결과를 가져올 것이다.

4.2.2 2단계 공정(2차 드로오잉)

그림 12는 1차 드로오잉에서 성형된 소재를 2차 드로오잉을 위해 설계한 다이와 펀치에서 성형하는 중간과정을 나타낸다. 시뮬레이션을 위한 경계조건은 1차 드로오잉공정과 동일하게 하였다. 그림 13은 2차 드로오잉의 최종단계까지 시뮬레이션 한 결과이다. 다이와 펀치 및 소재 사이의 마찰과 펀치의 진행으로 인한 마찰력의 증가로 블랭킹된 부분의 소재 두께가 얇아졌음을 알 수 있다(원부분 참조). 그림 12와 그림13에서 보면 상당한 거리를 소재의 성형에 크게 관계없이 펀치가 이동하여야 함을 알 수 있다. 이 거리동안 움직이는 과정에서 다이와 펀치 및 소재사이의 마찰력으로 인하여 최종형상의 소재 두께감소가 가중됨을 알 수 있다. 따라서 전문가에 의해 설계된 다이의 깊이를 감소시키면 소재두께의 감소현상을 상당히 줄일 수 있을 것이다. 그림 14에 나타난 초기위치에 따른 두께비의 그래프에서 보듯이 제품의 바닥을 형성하는 부분의 두께가 상당히 감소되었음을 알 수 있다. 그림 15는 2단계 성형후의 제품형상을 3차원 그래픽화 한 것이다.

4.2.3 3단계 공정(버어링)

그림 16은 세번째 공정인 버어링공정의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 공정에서는 앞 공정에서 발생한 소재의 두께감소 현상이 더욱 심화되는 것을 알 수 있다. 이 현상도 다이와 펀치 및 소재사이의 마찰에 기인함을 알 수 있다. 또한 바닥을 형성을 부분을 수직하게 펴는 과정에서의 심한 변형으로 인해 크랙(crack)발생 가능성을 예측할 수 있다. 이는 그림 17의 유효변형을 분포와 그림 18의 초기위치에 따른 두께비의 그래프에서도 확인할 수 있다. 이러한 크랙의 가능성을 방지하기 위해서는 내경을 블랭킹 할 때, 최대한 최종치수를 고려하여 절단하여야 함을 알 수 있다.

4.2.4 4단계 공정(커얼링)

마지막 공정인 커얼링 공정은 소재의 끝 단면을 등글게하는 공정이다. 이의 시뮬레이션 결과가 그림 19와 그림 20에 나타나 있다. 이 공정에서는 곡선으로 휘어져야 할 부분의 격자가 거칠어 곡선성형을 제대로 볼 수 없었으나, 최종 형상까지 성형이 완료되었음을 알 수 있다(그림 20참조). 그림 20에서 보는 것 처럼 소재 두께감소가 발생하는 부분과 접침의 가능성이 있는 부분을 발견할 수 있었다. 이는 그림 21의 초기위치에 따른 두께비의 그래프와 그림 22의 유효변형률분포에서도 확인할 수 있다. 따라

서 커어링 공정에서는 겹침의 방지를 위한 최적 공정변수를 구하는 것이 필요하다. 그림 23은 내륜의 최종형상을 3차원으로 그래픽 한 것이다.

5. 결론

강소성 유한요소법을 이용하여 볼 베어링 궤도륜의 생산을 위한 다단계 프레스 성형공정의 해석을 전문가의 공정에 따라 외륜과 내륜으로 나누어 행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 현재의 공정설계 전문가에 의하여 설계된 외륜의 프레스 성형공정은 곡면 코너 부위에서 두께감소가 발생하므로 실제의 금형설계시에는 펀치와 다이의 코너반경을 수정하거나 예비공정의 설계가 필요하다.
- (2) 전문가에 의하여 설계된 내륜의 다단계 프레스 성형공정은 각 단계에서의 변형이 중첩되어 심한 두께감소와 겹침결함이 예상되므로 이를 방지할 수 있는 금형의 설계가 필요하다. 또한 최종제품의 열처리변형을 최소화하기 위하여 전 영역에 걸쳐 균일한 변형률분포를 유지할 수 있도록 하는 예비성형과정의 설계가 필요하다.

참고문헌

1. D.F. Eavy and E.A. Reed, "Techniques of Pressworking of Sheet Metal", 2nd ed., Prentice-Hall, N.J., 1974.
2. K. Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill Book Co., 1985.
3. C.R. Boër, "Process Modelling of Forming of Structural parts with Thin Ribs", Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, No. 5, pp. 337-349, 1984.
4. T. Kuwabara, T. Jimma and K. Miyazaki, "A Novel Process Design Method for Multiple Draw of Rectangular Shells", Advan. Tech. of Plasticity, Vol. 3, pp. 1167-1172, 1990.
5. G.B. Yu and T.A. Dean, "A Practical Computer-Aided Approach to Mould Design for Axisymmetric Forging Die Cavities", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 25, No. 1, pp. 1-3, 1985.
6. K.R. Vemuri, S.I. Oh and T. Altan, "BID : A Knowledge-Based System to Automate Blocker Design", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 29, No. 4, pp. 505-518, 1989.
7. J.C. Gerdeen, "Development of a computer program "AXIFORM" for the analysis of forming of axisymmetric sheet metal parts", Proc. 12th NAMRC, pp. 209-213, 1984.
8. S.M. Hwang and S. Kobayashi, "Preform Design in Disk Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 3, pp. 231-243, 1986.
9. B.S. Kang, N.S. Kim and S. Kobayashi, "Computer-Aided Preform Design in Forging of airfoil Section Blade", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 30, No. 1, pp. 43-52, 1990.
10. B.S. Kang and S. Kobayashi, "Preform design in Ring Rolling processes by the Three-Dimensional Finite Element Method", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 31, No. 1, pp. 139-151, 1991.
11. B.S. Kang, "processes Sequence Design in a heading Process", J. of materials Processing Tech., 27, pp. 213-226, 1991.
12. B.S. Kang and S. Kobayashi, "Process Sequence Design in Cold Forging to Form a Constant velocity Joint Housing", Accepted for publication in Int. J. Mach. Tools and Manufacture., 1992.

13. B.S. Kang, J.H. Lee and Others, "Preform Design in Flashless Forging of Rib/Web-Shaped Plane-Strain Component", Accepted for publication in J. of Materials processing Tech., 1993.
14. S. Kobayashi, S.I. Oh and T. Altan, "metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press, 1989.
15. S.I. Oh, "Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrarily Shaped Dies", Int. J. Mech. Sci., Vol. 24, pp. 479-493, 1982

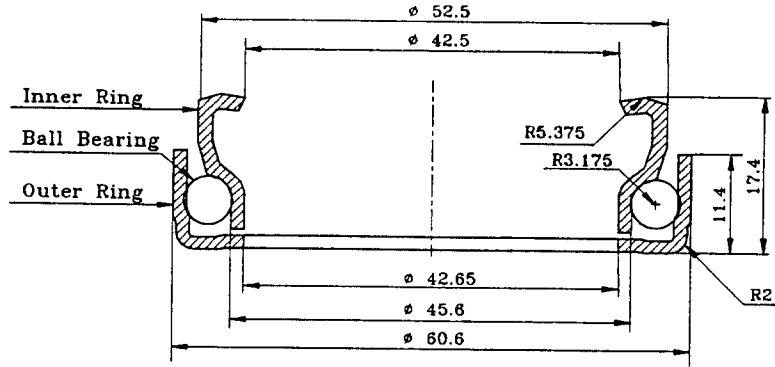


그림 1. 볼 베어링 가이드의 형상 및 치수

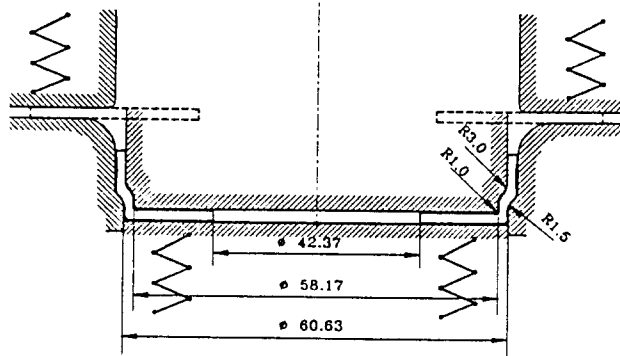
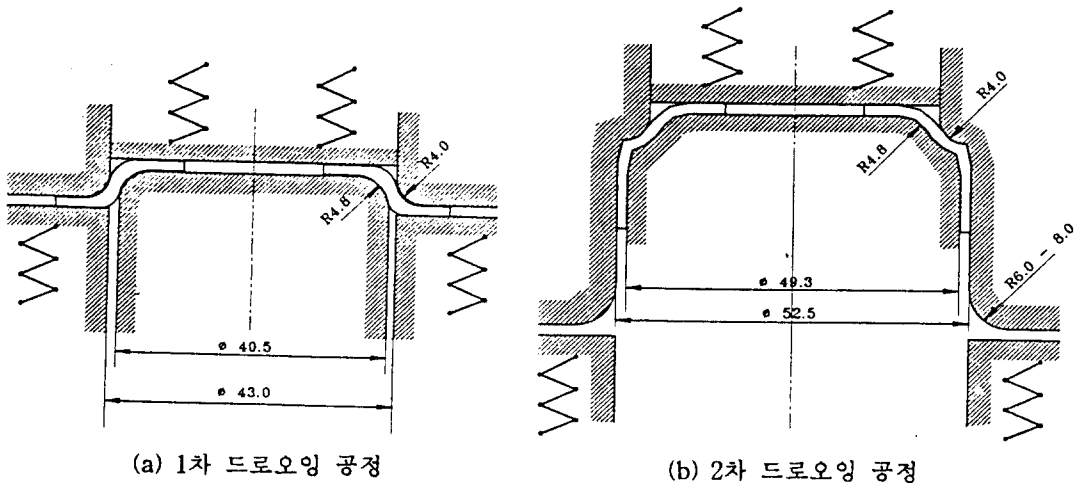
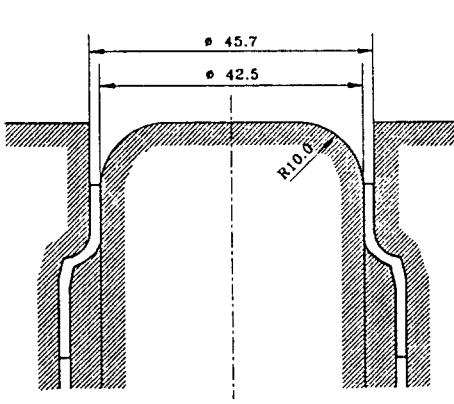


그림 2. 외륜 성형과정

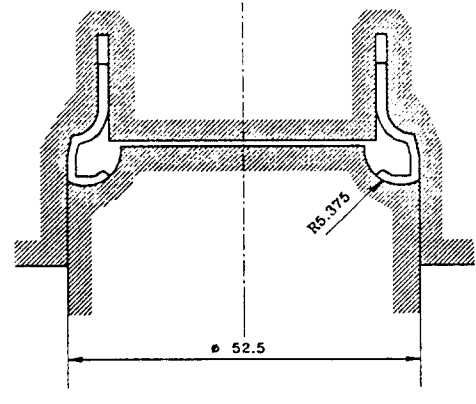


(a) 1차 드로오잉 공정

(b) 2차 드로오잉 공정



(c) 3차 버어링 공정



(d) 4차 커얼링 공정

그림 3. 내륜의 성형공정

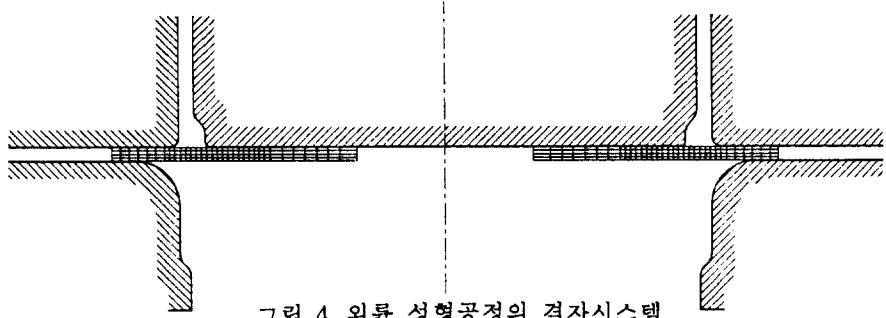


그림 4. 외륜 성형공정의 격자시스템

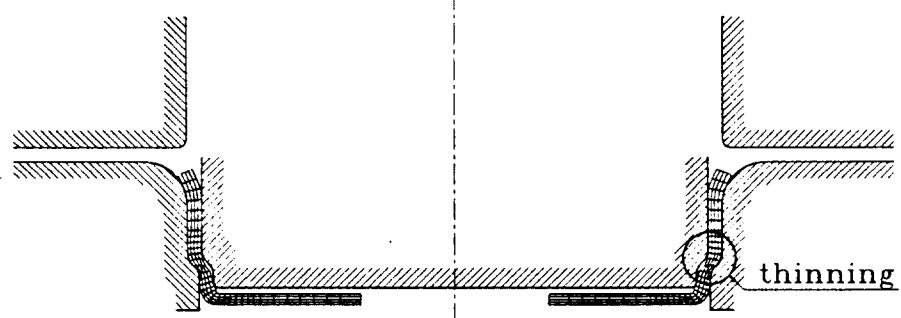


그림 5. 외륜 성형공정의 최종결과

Thickness distribution

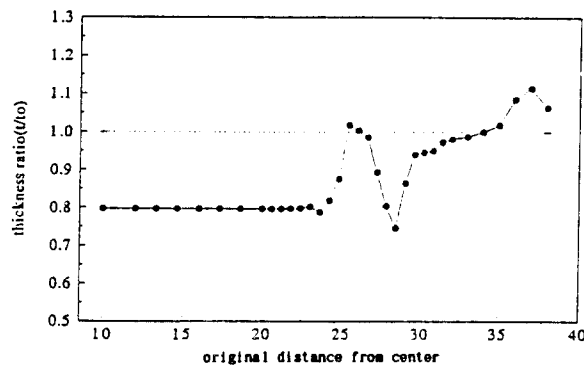


그림 6. 외륜의 초기위치에 따른 두께비 그래프

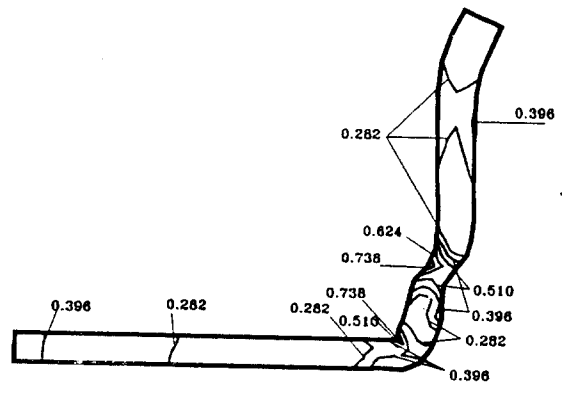


그림 7. 외륜 성형공정후의 유효변형률 분포

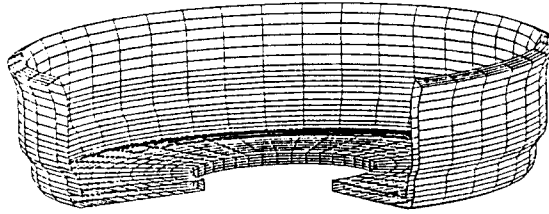


그림 8. 외륜 최종결과의 3차원 형상

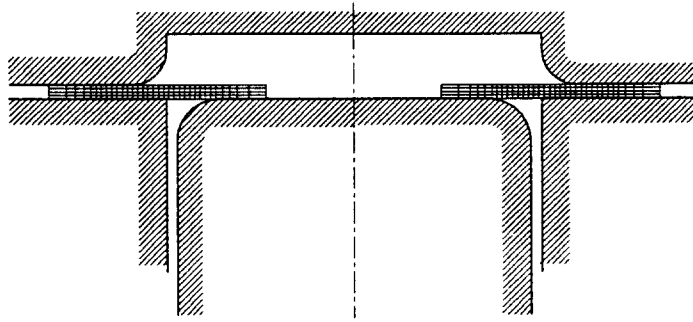


그림 9. 내륜 1단계 성형공정 격자시스템

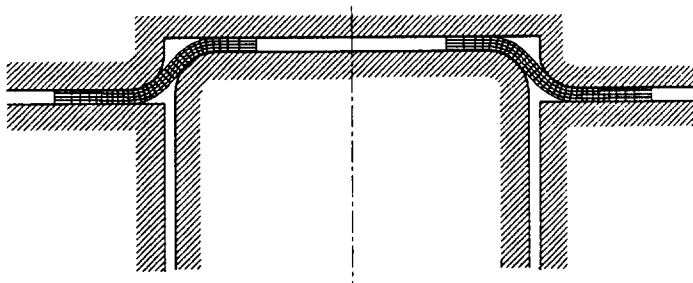


그림 10. 내륜 1단계 성형공정 최종결과

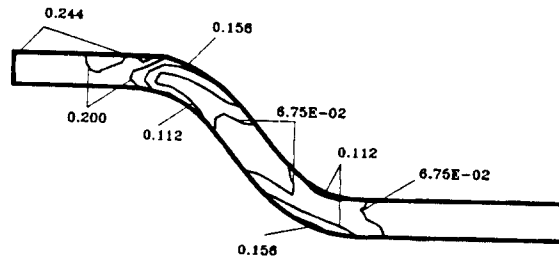


그림 11. 내륜 1단계 성형공정후의 유효변형률 분포

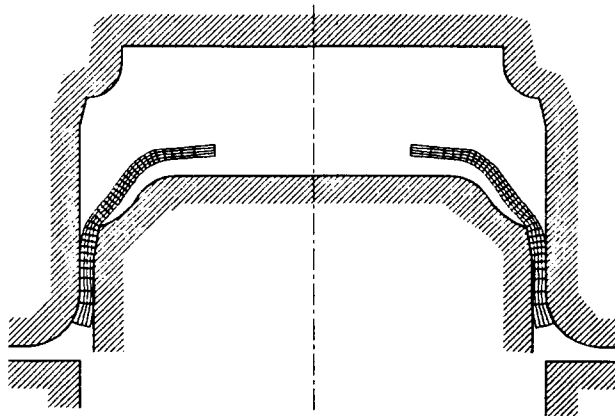


그림 12. 내륜 2단계 성형공정의 중간 과정

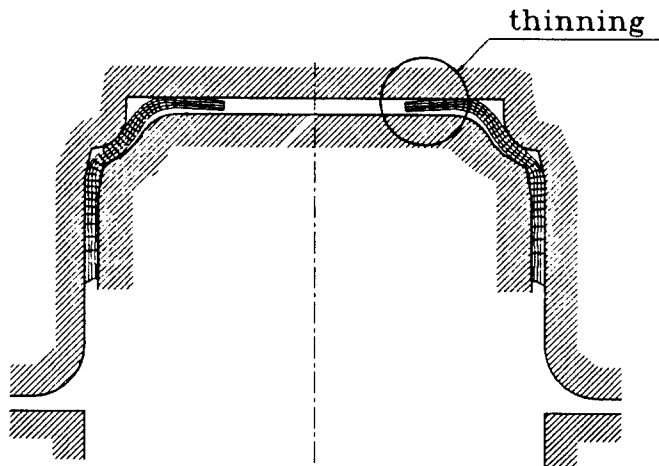


그림 13. 내륜 2단계 성형공정 최종결과

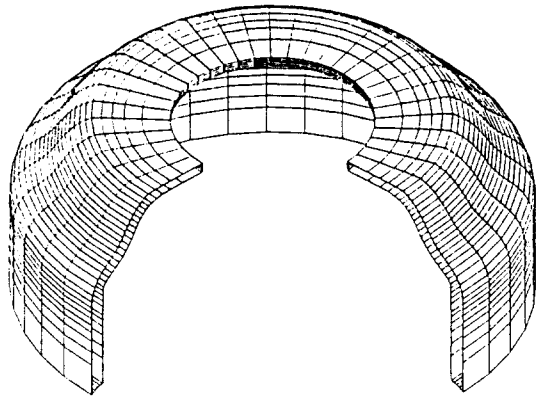
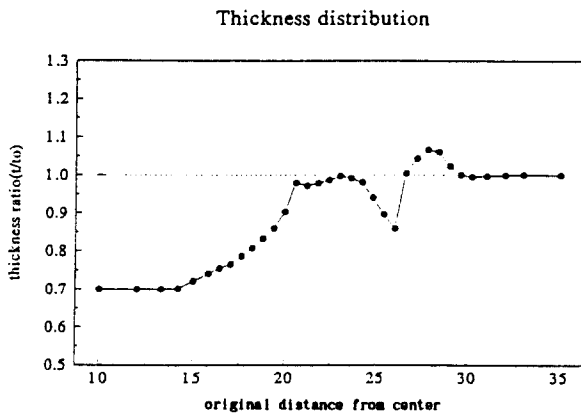


그림 14. 내륜 2단계의 초기위치에 따른 두께비 그래프 그림 15. 내륜 2단계 최종결과의 3차원 형상

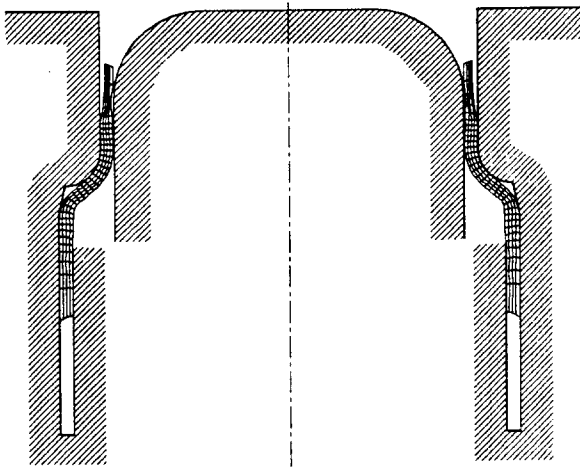


그림 16. 내륜 3단계 성형 공정 최종결과

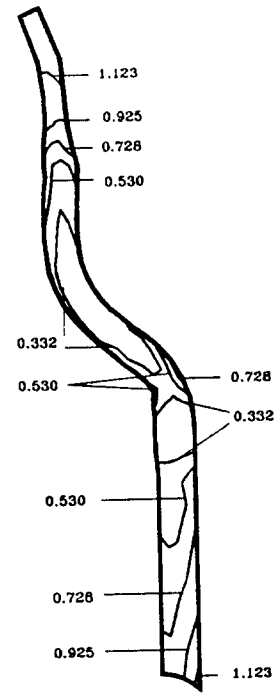


그림 17. 내륜 3단계 성형공정후의 유효변형률 분포

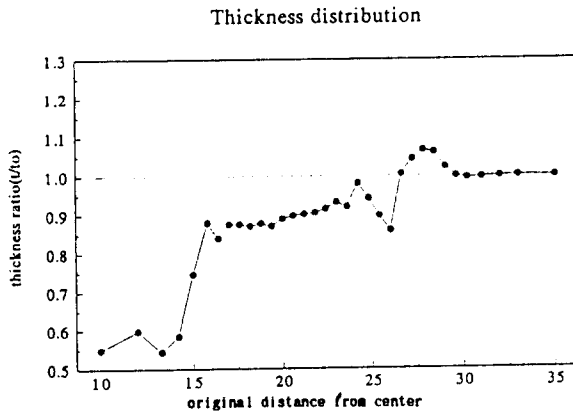


그림 18. 내륜 3단계의 초기위치에 따른 두께비 그래프

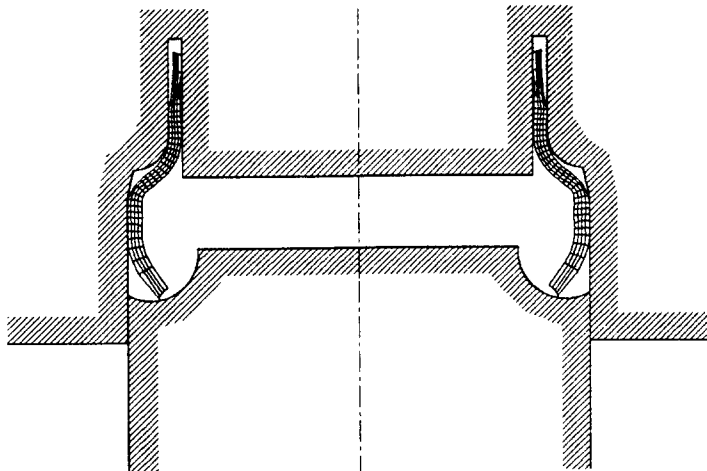


그림 19. 내륜 4단계 성형공정 중간과정

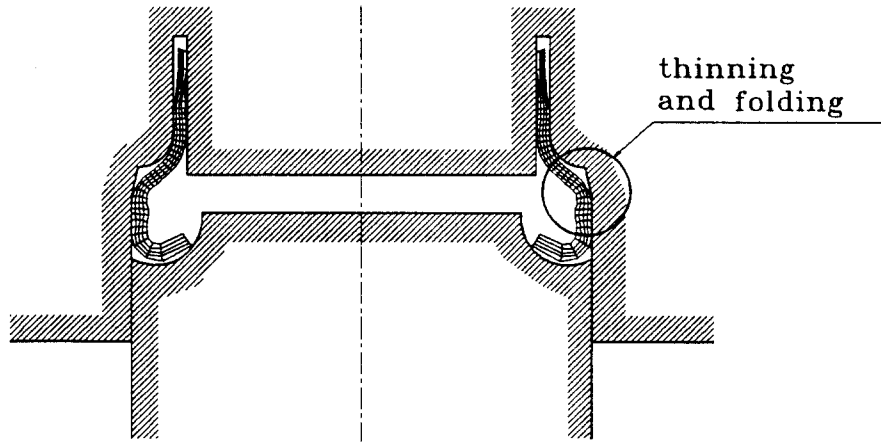


그림 20. 내륜 4단계 성형과정 최종결과

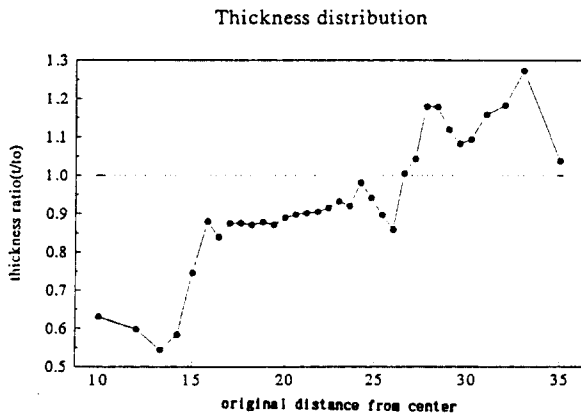


그림 21. 내륜 4단계의 초기위치에 따른 두께비 그래프

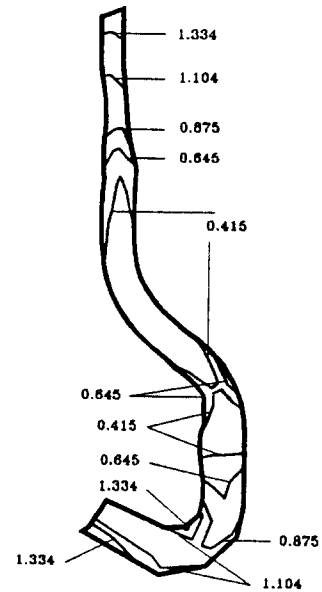


그림 22. 내륜 4단계 성형 과정의 유효변형률 분포

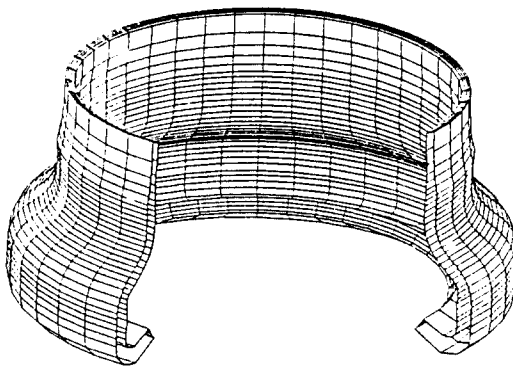


그림 23. 내륜 4단계 최종결과의 3차원 형상