한국소성가공학회 '95춘계학술대회 논문집 pp. 19~30

유한요소법을 활용한 궤도륜의 프레스 성형공정 설계(II)

변 상 규*, 김 태 호*, 강 범 수*, 김 완 두**
* 부산대학교 항공우주공학과, ** 한국기계연구원

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

S.K. Byun*, T.H. Kim*, B.S. Kang*, W.D. Kim**
* Dept. Aerospace Eng. Pusan National Univ.
** Korea Institute of Machinery & Metals

Abstract

The analysis had been already completed to detect forming defects for the forming processes of C/R bearing rings. But some unpredicted problems were found through the experiments. So expert redesigned new forming processes to prevent the problems and new analysis was .began according to the new processes to find faults for the processes. The forming processes consist of 1 for the outer ring, 6 inner ring. The thickness of metal sheet used is changed to 1.5mm from 1.6mm. Elasto-plastic finite element method is applied to involve the effect of spring back. The most representative alteration is forming of two predents to assist later forming. Thinning and distribution of high residual stress are derived from the results of simulations. It is confirmed that the industry expert agree the possibility of defects derived from the new FEM results.

1. 서론

금속판재를 소재로 이어붙임없이 프레스를 이용하여 소성변형을 유발하여 원하는 치수 및 형상으로 성형하는 공정을 판금 프레스 가공이라 부른다. 이는 프레스 램의 압축행정을 이용하여 형공구에 의해 금속판에 인장, 압축, 굽힘 등의 응력상태를 유발시켜 소성변형을 부여하는 가공법으로[1-4] 이러한 공정들은 압연법과 다양한 프레스 및 금형의 개발에 따라 급속도로 발전하여, 대량생산이 요구되는 자동차 및 전자부품 산업 등의 분야에서 활용이 확대되어 가고 있는 추세이다. 선진국에서는 특히 자동차 부품의 제작에 널리 활용하여 기어류, 풀리류, 하우징류 등의 부품들을 생산하고 있고, 고부가가치화 및 저비용화를 달성하기 위하여 복잡한 형상의 부품 성형, 고정도의 원형에 가까운 형상을 성형하기 위한 정밀정형(net shape 또는 near net shape) 개념의 도입, 공정 자동화, 여타 공법과의 기술조합등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 프레스 단조기술은 제품설계, 공정설계, 금형 설계, 소재, 윤활, 프레스 기계 등의 요소기술이 조합된 것으로 이러한 기술들이 고도로 균형 있게 조화가 이루어질 때 비로소 고정도 제품의 안정적 생산이 가능하게 된다. 이중 공정설계 및 금형 설계 기술은 제품의 원가를 낮추는데 큰 비중을 차지하며, 이의 효율적인 수행은 개발에 소요되는 경제적, 시간적인 면에서의 절

감효과를 기할 수 있으며, 생산에 있어서 공정수의 감소 등에 의해 제품 생산단가를 낮추는 것이 가능하게 된다[5]. 그러나 대부분의 프레스 성형공정의 설계는 숙련자의 경험적 지침 및 직관, 실험에 의해 수행되고 있으므로 컴퓨터 시뮬레이션 등의 보강책이 요구되고 있다. 전통적으로 초등해석법, 미끄럼 선장법, 및 상계법과 같은 해석방법이 적용되어 왔으나 복잡한 형상의 해석과 정밀한 예측결과를 얻기가 곤란한 점이 있으므로 유한요소법의 활용이 시도되어지고 있다[6-11]

C/R(clutch release) 베어링은 자동차의 동력전달장치의 일부인 클러치에 장착되는 부품으로 두꺼운 판재를 소재로 하여 프레스 성형공정으로 생산되어지며, 외륜(outer ring)과 내륜(inner ring), 볼(ball) 로 구성된다. 이중 내륜은 복잡한 다단계의 연속성형을 거쳐 생산되며, 연속공정동안 소재가 심하게 소성변형을 받게 되므로 공정설계에 시행착오의 발생 가능성이 높다. 또한 C/R 베어링은 클러치 페달을 밟았을 때 축하중이 가해지는 특성이 있으므로 이의 탄성해석을 통해 제품의 안정성을 예측하는 것도 중요한 부분이다. 이들에 관한 유한요소 해석은 공정설계에 필요한 정보를 미리 제공함으로써 제품개발에 따른 노력절감과 제품의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서 이미 공정설계 전문가에 의해 1차로 설계된 공정도에 따라 성형해석을 수행한 바 있다. 그러나 실제 생산공정에 그 결과를 적용하였을 때 일부공정에서 문제점이 발생하였다. 그리하여 그 문제점들을 보완하여 2차로 설계된 공정도에 따라 상용 유한요소 패키지인 MARC를 이용하여 재 시뮬레이션을 수행하게 되었다. 이 결과를 바탕으로 다단계 연속 성형공정동안 소재의 변형양상, 유효 변형률 분포, 잔류응력 분포 등을 고찰하고 여기에서 발생 가능한 문제점을 예측하여 새로운 공정도의 도입에 따른 결함발생 가능성과 개선점을 조사하였다.

2. 문제정의 및 유한요소 모델링

C/R 궤도륜은 그림 1의 단면 치수도에 나타난 바와 같이 내륜과 외륜으로 구성되어 있으며 냉간 프레스 가공후 기계가공 공정으로 볼이 들어가는 부분의 치수를 맞추고 열처리를 거쳐 완성된다. 그러므로 응력집중 등이 방지되어야 하며, 다단계 프레스 성형으로 인한 소재의 두께감소 및 증가, 겹침(folding)과 같은 결함 발생 가능성이 높으므로 결함의 발생을 방지하고 보다 성형이 용이하다고 생각되는 예비성형체를 제시하는 것이 필요하다. 이미 연구된 1차 해석과 새로이 제시된 2차 공정도에 따른 해석에서 사용된 모델링 조건은 아래와 같다.

2.1 1차 해석

초기 소재는 탄소강으로 이루어진 1.6mm의 두께를 갖는 두꺼운 판재를 사용하였다. 성형품은 축대칭 형상이므로 1/2를 제어체적으로 선택하여 2차원 축대칭(axisymmetric) 기법을 사용하였으며, 두꺼운 판재이므로 이방성을 무시하였다. 또한 탄성회복(spring back)의 영향을 무시하고 강소성 유한요소법으로 해석하였다. 강소성 유한요소법에서 사용된 지배방정식의 수식화 및 계산기법은 이미 잘 정립되어 있으므로[12] 생략한다. 다이와 소재 사이의 마찰 조건에서 마찰상수(m)는 0.1을 사용하였으며, 소재의 유효응력-변형률 관계는 $\bar{\sigma} = 117.3\ \bar{\varepsilon}^{0.11}$ (kg/mm^2)를 사용하였다.

2.2 2차 해석

2차 해석에서는 상용 패키지인 MARC를 사용하였으며 소재는 초기두께가 1.5mm인 탄소강을

사용하였다. 소재의 탄성복원량을 관찰하기 위하여 탄소성 유한요소법으로 2차 공정도에 따라 해석을 수행하였다. 이방성은 무시하였으며 마찰력, 소재의 유효응력-변형률 관계 및 해석에 포함된 제어체적은 1차 해석때와 동일하게 적용하였다.

3. 1차 공정도및 이에 따른 C/R 베어링 궤도륜의 성형공정 해석

C/R 베어링 궤도륜의 1차 공정도에 따른 성형공정은 다음과 같다. 외륜의 성형공정에서는 드로오잉(drawing)공정을 거친 후 소재 중앙부를 지름이 42.61mm의 원형으로 블랭킹(blanking)하고, 기계가공 공정과 열처리 공정을 거쳐 완성된다. 내륜의 성형공정에서는 1차 2차 드로오잉 공정을 거쳐 중앙부를 원형으로 블랭킹하고, 버어링(burring)과 커얼링(curling)공정, 기계가공, 열처리 공정을 거쳐 완성된다. 유한요소해석에서는 소재의 초기형상이 미리 블랭킹되어 있다고 가정하고 열처리 공정은 생략하여 외륜은 1단계, 내륜은 4단계로 나누어 해석을 수행하였다. 해석결과에서는 소재의 두께감소(thinning), 접침(folding)등의 결함 발생 가능성과 이러한 부위에서 프레스 성형공정이 끝난 후 열처리시 잔류응력에 의한 제품의 최종 형상의 변화 가능성을 예측할 수 있었으며[13] 이는 그림 2에서 보여지고 있다.

그러나 실제 현장에서 실험을 수행하였을 때 내륜 성형의 마지막 공정인 커얼링 공정에서 해석결과와는 다르게 소재가 굽어지지 않는 현상이 발견되었다(그림 3). 이는 커얼링 되는 부위로 유입되는 소재의 유동량이 해석에 의한 예측량보다 많아서 그 부위의 두께가 증가했고, 또한 아랫다이의 반경이 작음으로 인해 발생되는 소재와 금형사이의 마찰력이 증가했기 때문으로 생각되어진다. 그러므로 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 소재의 두께를 1.5mm로 줄이고, 탄성회복의 영향도 고려하여 공정변수들을 재조정하여 새로이 작성된 2차 공정설계도에 따라 궤도륜의 성형공정 전반에 대해 탄소성 유한요소해석을 재 수행하게 되었다.

4. 2차 공정도에 따른 C/R 베어링 궤도륜의 성형공정

외륜의 성형공정(그림 4-a)은 시뮬레이션을 통하여 소재두께가 얇아짐에 의해 발생되는 문제점의 발견에 주안점을 두었다. 2차 공정설계도에서 많은 공정변수들이 변경된 내륜의 성형공정 절차는 다음과 같다. 1차 드로오잉을(4-b) 거쳐 2차 드로오잉 공정에서 소재의 일부 부위를 코이닝(coining) 성형하고(그림 4-c), 중심에서 32mm 바깥쪽 부위를 원형으로 잘라낸다(trimming). 플랜징(flanging) 공정(그림 4-d)을 거친 소재를 지름 43.5mm의 원형으로 블랭킹하고난 후 1, 2차 벤딩공정을 수행한다(그림 4-e). 마지막으로 반경이 5mm인 펀치를 사용하여 커얼링 공정을 수행하고(그림 4-f) 기계가공 및 열처리 공정을 거쳐 완성된다. 이때 1차 해석에서는 미리 수행되었다고 가정되었던 트리밍 및 블랭킹 공정을 이번 해석에서는 공정도에 따라 수행하였으며, 이에 의해서 발생되는 유효 응력 및 변형률 분포의 변화 등은 유한요소 해석에서 파악이 곤란하고, 그 영향도 미미할 것으로 예상되므로 그 부위의 소재를 없애는 것으로 대체하였다. 그러므로 내륜의 성형에서는 1, 2차 드로오잉, 플랜징, 1, 2차 벤딩, 커얼링 공정의 6개 공정을 대상으로 해석을 수행하였다. 또한 2차 드로오잉 공정에서는 원하는 형상으로 소재의 성형을 유도하기 위하여, 소재의 일부 부위를 코이닝 성형시켜서 예비덴트(pre-dent)를 가공하여, 벤딩 또는 커얼링 되는 부위로 과도하게 유입되는 소재 유동을 제한 및 차단하여 이 공정들에서의 성형을 용이하게 하였다. 1차 공정 해석의 결과로부터 두께감소가 예상되는 내경부위(그림 2. (c) 참조)를 커얼링 성형하는 점도 2차 공정설계에 새로이 도입된 내용이다.

5. 외륜 성형공정에 대한 유한요소 시뮬레이션

외륜 성형공정 해석은 두께 1.5mm, 지름 90mm인 원형 판재를 소재로 하여 한번의 드로오잉 공정에 대해 수행되었다. 그림 5에서는 해석에 사용된 초기 격차 시스템 및 다이 형상을 보여주고 있다. 펀치의 아랫방향 스트로크는 23mm이며, 공정동안 아랫다이와 블랭크 호울더는 고정되어 있고, 소재가 블랭크 호울더를 빠져나오는 동안 마찰력이 작용하게 된다. 그림 6에서는 외륜 성형공정 해석의 결과형상 및 유효 변형률 분포를 보이고 있으며 포인트 c와 f부위에서 높은 값이 분포되고 있음을 알 수 있다. 특히 c에서는 유효 응력도 최고값을 보이고 있으므로, 최종 열처리 공정시에 높은 잔류응력으로 인한 성형품의 변형이 예상된다. 성형후의 주요 부위의 두께 분포도는 그림 7에 나타나 있는데, e바깥의 플랜지-엎 성형되는 부위의 두께가 증가했고, c의 두께가 1.211mm로 가장 얇음을 알 수 있다. 그러므로 제품을 실제 사용했을 때 축방향으로 부과되는 압축 하중에 의해 이 부위에서 결함이 발생할 가능성이 있다. c부위의 이러한 결함들을 제거하기 위하여 이 부위의 펀치 곡률을 조금 크게 조절하여 후속 기계가공으로 원하는 치수만큼 절삭하는 것이 유리할 것으로 생각된다. 외륜의 최종 3차원 형상은 그림 8에 나타나 있다.

6 내륜 성형공정에 대한 유한요소 시뮬레이션

내륜을 성형하기 위한 공정에서는 1, 2차 드로오잉 공정, 플랜징 공정, 1, 2차 벤딩 공정, 커얼링 공정 등이 해석에 포함되었다.

6.1 1, 2차 드로오잉 공정

내륜 성형공정 해석에 사용된 초기 격자 시스템 및 다이 형상은 그림 9에서 보여지고 있고, 연속공정 전반에 걸쳐 많은 변형이 예상되는 부분은 격자를 조밀하게 나누었다.

1차 드로오잉 공정에서는 2차 드로오잉 공정에서 수행할 2개의 예비 덴트 성형을 용이하게 하기 위하여 실제 제품 치수보다 약 1.5mm 깊게 드로오잉 하였다. 외륜에서와 같이 아랫 다이와 블랭크 호울더는 고정되어 있으며 소재는 마찰력만 받게 된다. 그림 10에서는 1차 드로오잉 공정의 해석 결과 형상 및 유효 변형률 분포를 보이고 있다. b와 c부위에서 대체로 높은 값이 분포되고 있으며, 각 부위에서의 두께 분포는 아래와 같다.

a = 1.407 mm	b = 1.327 mm	c = 1.498 mm	d = 1.5 mm

2차 드로오잉 공정에서는 펀치와 다이를 동시에 소재쪽으로 이동시켜 드로오잉된 깊이를 줄이면서 두개의 예비 덴트를 성형한다. 해석 결과 형상 및 유효 변형률 분포는 그림 11에서 보여지고 있다. 공정도에 따르면 예비덴트는 b와 c부위에서 성형되기로 되어 있으나 b에서는 드로오잉으로 인한 두께 감소로 소재가 다이에 차지 않아 예정된 형상으로 성형되지 않았다. 유효 변형률 및 응력값은 예비 덴트의 위치인 b와 c에서 최대 분포를 보이고 있으며 편의상 b를 예비데트 A, c를 예비덴트 B로 부르기로 하겠다. 각 부위의 두께분포는 아래와 같다.

a = 1.406 mm	b = 1.264 mm	c = 0.933 mm	d = 1.5 mm

2차 드로오잉 공정후에는 지름 62mm의 원형으로 트리밍을 수행하고 다음 공정인 플랜징 공정을 수행하게 된다.

6.2 플랜징 공정

플랜징 공정은 펀치의 하강으로 인해 소재의 굽혀진 바깥부분을 펴는 공정이다. 해석 결과는 그림 12에 나타나 있으며, 예비덴트 B부위의 유효 응력 및 변형률 분포가 매우 높아서, 그 부위에 높은 잔류응력이 분포됨을 알 수 있다. 또한 d에서 e구간이 펴지면서 높은 응력 분포를 보이고 있다. 각 부위의 두께분포는 아래와 같으며, 앞 공정과 비교하여 미소한 변화를 보였다.

a = 1.410 mm	b = 1.259 mm	c = 1.369 mm	d = 1.070 mm	e = 1.5 mm

이 공정에 대한 1차 해석에서는 a-b 구간의 두께분포가 약 1mm로 나타나 두께감소가 문제점으로 나타났으나(그림 2-c 참조) 2차 해석에서는 이 구간에서 보다 두꺼운 두께분포를 보이고 있다. 이는 2차 해석에서는 블랭킹 공정을 해석 전에 미리 수행하지 않았기 때문이라 생각되므로 2차 해석의 결과가 실제 상황에 더욱 부합될 것으로 생각된다. 성형이 끝난 소재는 소재 내경부위를 지름 45mm의 원형으로 블랭킹 하고 다음 공정을 수행하게 된다.

6.3 1, 2차 벤딩 공정 및 커얼링 공정

1차 벤딩 공정은 앞 공정에서 플랜징 된 부위를 펀치로 눌러서 안쪽 다이에 붙이는 공정으로 2차 벤딩 공정을 용이하게 하기위해 첨가된 공정이다. 성형이 끝난 후의 결과는 그림 13에 나타나 있으며, 펀치에 의해 성형되는 e-f 구간의 변형률 분포가 증가했고, 예비덴트 B에서의 잔류응력이 높게 나타나고 있다. 주요 부위의 두께분포는 아래와 같다.

a = 1.385 mm	b = 1.3 mm	c = 1.368 mm	d = 1.205 mm	e = 1.596 mm	f = 1.5 mm

윗 표에서 나타난 각 부위의 두께 분포를 플랜징 공정후의 결과와 비교해 보면, 벤딩성형되는 구간과 예비덴트 B의 두께는 증가했으나, 아랫쪽 c에서의 두께분포는 변화가 없는 것으로 확인되었다. 이는 벤딩에 의해 발생된 소재의 유동이 예비덴트 B에 의해 흡수되어 그 부위의 두께를 회복시키고, 다음 구간으로는 유입되지 않았음을 의미한다. 이는 예비덴트 B에 의해 벤딩 성형이 용이하게 진행되었다는 것을 의미한다.

2차 벤딩 공정은 1차로 벤딩 성형된 부위를 제품에 요구되는 치수 및 형상으로 성형하기 위한 공정이다. 이 공정에서는 변형의 정도가 크지 않기 때문에 해석결과(그림 14참조)에서 큰 변화가 없었다. 또한 공정이 끝난 후 아랫 다이를 소재로부터 분리시켰을 때 소재에 탄성회복이 나타남을 알 수 있었다. 그러나 그 양이 작아서 다음의 커얼링 공정을 수행하는데 문제를 일으키지 않았다.

커얼링 공정은 해석상의 최종 공정으로 1차 공정도에 따른 현장 실험에서 성형이 실패한 공정으로, 예비덴트 A를 중심으로 소재 단면 하단의 곡률을 줄이는 공정이다. 그림 15에 나타난 결과 그림에서는 예비덴트 B에서 압축하중으로 인해 가장 높은 유효 변형률값이 분포되고 있으며, 예비덴트 A에서의 유효 응력값도 증가했음을 알 수 있다. 각 부위의 두께 분포는 아래와 같으며, 그림 16에 분포도가 나타나 있다.

a = 1.392 mm	b = 1.373 mm	c = 1.419 mm	d = 1.266 mm	e = 1.62 mm	f = 1.5 mm

두께 분포를 앞 공정과 비교해 보면, 전 구간에 걸쳐 고루 두께가 증가되었음을 알 수 있다. 이로 인해 1차 공정해석의 결과에서 보여진 겹침현상은 나타나지 않았다. 커얼링 성형되는 부위의 두께가 증가하였으나 그 양이 크지 않고 반면, 예비덴트 A의 두께가 상당히 증가했다. 이는 커얼링 공정으로 인해 유발된 소재 유동이 예비덴트 A의 두께를 증가시켰음을 의미한다. 또한 c구간의 소재가 공정동안 압축하중을 받음으로 인해 두께가 증가했으나, 이중 상당량의 소재가 예비덴트 B로 유입되어 이 부위의 두께를 회복시키는 데 이용되었다. 전체적으로는 예비덴트 A부위의 두께가 상대적으로 얇게 나타났고, 소재의 유동을 유도, 또는 차단하는 기능을 가지고 있으므로 소재를 성형하는데 많은 도움을 주었다고 생각된다. 내륜의 최종 3차원 형상은 그림

17에 나타나 있다.

7. 탄성해석

C/R 베어링 완제품의 안정성을 알아보기 위하여, 실제 하중상태하에서 탄소성 유한요소법을 이용하여 탄성 해석을 2차원과 3차원으로 나누어 수행하였다. 내륜과 외륜은 프레스 성형을 거쳐 기계가공이 끝난 최종형상을 이용하여, 변형가능한 물체(deformable body)로 삼아 격자를 나누었으며, 볼은 변형되지 않는 물체(rigid body)로 가정하였다. 내륜 상단부에 작용하는 외력은 집중하중으로 2440N을 가하였으며, 외륜 하단부에 작용되는 반력은 집중하중에 상당하는 분포하중으로 입력하였다. 궤도륜과 볼의 초기 접촉각은 제품 측정에 의해 구해진 22.5° 를 사용하였으며, 2차원 해석에서는 축대칭 기법으로, 3차원에서는 볼 1/2이 차지하는 각도인 12° 를 제어체적으로 삼아 해석을 수행하였으며, 초기 형상은 그림 18에 나타나 있다. 해석후의 결과는 그림 19와 20에 각각 나타나 있으며, 궤도륜의 탄성변형으로 인해 접촉각은 26.5° 로 변화되었다. 이는 볼이 궤도륜으로부터 이탈되는 예상각도인 45° 에 훨씬 못 미치는 값으로써, 신뢰성이 있는 제품으로 판단된다. 2차원 해석의 경우 유효 응력은 내륜보다 외륜에 높게 분포되어 있으며, 볼과 접촉하는 부위에서 가장 높은 값을 보였다. 탄성 영역을 궤도륜의 안전역이라 할 때 외륜은 실제하중의 2배까지 견딜 수 있다는 것을 추가 시뮬레이션으로 확인했다. 3차원 해석에서는 볼과 궤도륜이 접촉하는 부위에서 응력 집중이 발견되었으며, 대체적으로 2차원 해석에서보다 응력 분포가 높게 나타났다. 그리고 궤도륜이 탄성영역에 존재할 수 있는 초대 하중도 입력 하중의 1.4배로 낮아졌다. 이는 2차원 해석에서는 축대칭 형상이므로 볼이 원형 단면을 가진 둥근 막대(beam)로 인식되는 반면, 3차원에서는 구(sphere)로 인식되기 때문이며, 3차원 해석의 결과가 더욱 신빙성이 있다고 판단된다.

8. 결론

본 연구에서는 이미 수행된 1차 해석 및 실험에서 나타난 문제점을 보완하기 위하여 공정설계 전문가에 의해 새로이 제시된 C/R 베어링 성형공정도에 따라 두께 1.5mm의 소재를 이용하여, 탄소성 유한요소법으로 MARC를 이용하여 해석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과로부터 각 공정에서의 공정변수에 대한 고찰 및 결함 발생 가능성을 예측하고, 1차 해석 결과와 상호 비교해 보았다.

1) 외륜성형 공정

외륜의 해석에서는 특정부위에서 잔류응력 분포가 높고, 두께가 얇아지는 문제점이 발생하였으며 후속 열처리 공정 및 실제 사용시에 결함 발생으로 이어질 가능성이 예상된다. 이를 방지하기 위해서는 이 부위의 펀치 곡률을 조정하고, 후속 기계 가공으로 치수를 맞추는 것이 유리할 것으로 생각된다.

2) 내륜 성형공정

1차 해석에서와는 달리 커얼링 공정에서 겹침현상이 나타나지 않았고, 두께가 고르게 분포되어 있어 성형 상태가 좋게 나타났다. 2차 드로오잉 공정에서 성형된 두개의 예비덴트는 소재의 유동을 차단하여 벤딩 공정과 커얼링 공정에서 성형을 용이하게 하기 위해 성형되었다. 그러나 예비덴트 A는 그 부위의 두께가 예상보다 얇아짐으로 인해 원하던 형상으로 성형이 불가능했

다. 예비덴트 B는 후속 공정들에서 두께가 점차로 증가하며, 이 부위로 향하는 소재의 유입을 흡수, 차단 하는 기능을 수행하였다. 그러나 이 부위에서의 잔류응력이 전 공정에 걸쳐 높게 분포되어 열처리 등의 후속공정에서 변형이 예상되므로 이를 줄일 수 있는 연구가 필요하다. 예비덴트 A는 커얼링 공정에서 유발되는 소재 유입을 흡수하면서 두께가 현저하게 증가하고, 소재 유동을 차단하는 효과를 거두었다. 이로 인해 1차 공정도에 의한 실험에서 가장 문제가 되었던 커얼링 공정을 유도하는 기능을 충분히 수행하였다고 생각된다.

3) 탄성해석

탄성해석에서는 볼과 궤도륜의 접촉각과 하중상태에 대해 점검해 보았다. 하중 부과시 접촉각의 변화는 기준 각도인 45° 에 훨씬 미치지 못하였고, 궤도륜의 안전역을 탄성범위내라고 가정할 때 안전계수는 2차원 해석의 경우 2, 3차원의 경우 1.4로 나타나서 제품이 안정성이 입증되었다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. A.N. Bruchanov, and A.V. Rebelski, in Closed Die Forging And Warm Forging, Verlag Technik, Berlin, (1955) (Translation from Russian).
3. D.F. Eavy and E.A. Reed, "Techniques of Pressworking of Sheet Metal", 2nd ed., Prentice-Hall, N.J., 1974.
4. K. Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill Book Co., 1985.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. D.Y. Yang, and K.H. Kim, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plane Strain Ring Rolling," Int.J. Mech. Sci., Vol. 30, No. 8, pp. 571-580, (1988)
10. S.I. Oh, et al.,"Capabilities and Applications of FEM code DEFORM: the Prospective of the Developer," J. of Materials Processing Technology, Vol. 27, pp. 25-42, (1991)
11. C.H.Lee and S.Kobayashi, "New Solution to Rigid-Plastic Deformation Problem Using a Matrix Method", Trans ASME, J. Eng. Ind., Vol.95, (1973), pp.865-873
12. S. Kobayashi, S.I. Oh and T. Altan, "metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press, 1989.
13. B.S. Kang, S.K. Byun et al.,"Process Analysis and Design in Forming of Bearing Rings by the FEM", 한국 소성가공 학회지, 제 3권, 1994.

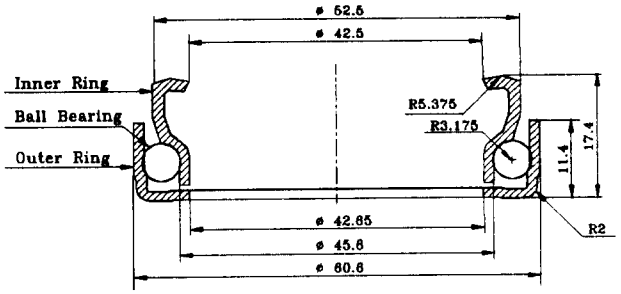
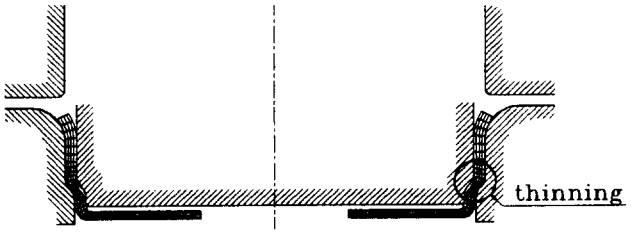
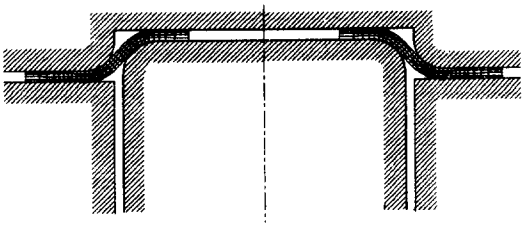


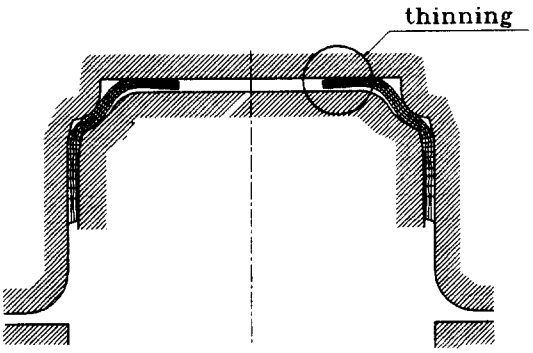
Fig. 1 Configuration and dimensions for ball bearing rings



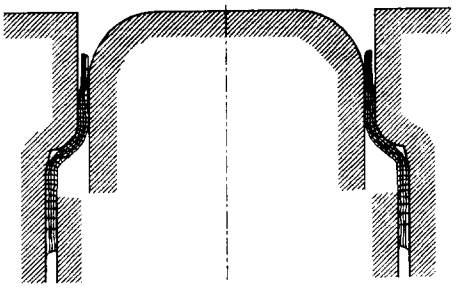
(a) drawing process for forming of outer ring



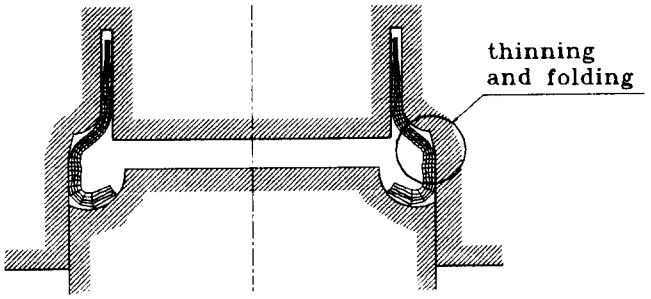
(b) 1st drawing process for forming of inner ring



(c) 2nd drawing process



(d) burring process

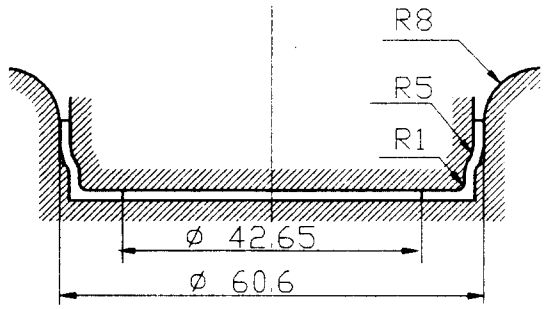


(e) curling process

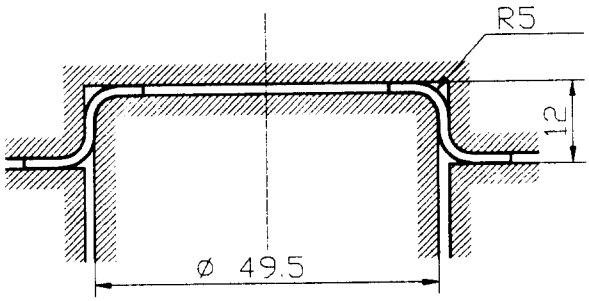
Fig. 2 Results from the 1st forming process

(a) desirable shape (b) shape from experiments

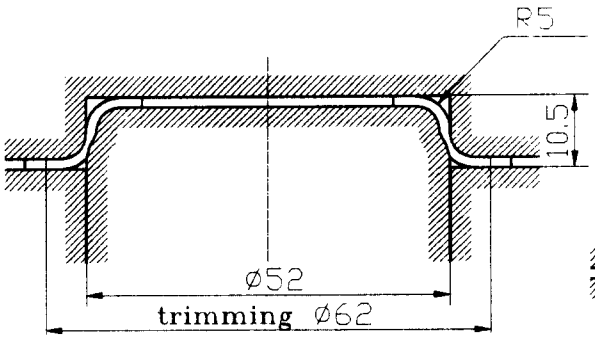
Fig. 3 Defect from inner ring by the experiments



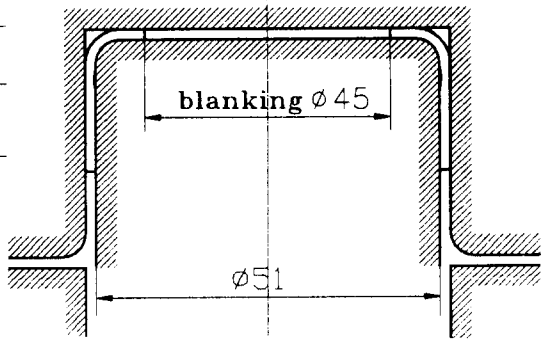
(a) drawing process for forming of outer ring



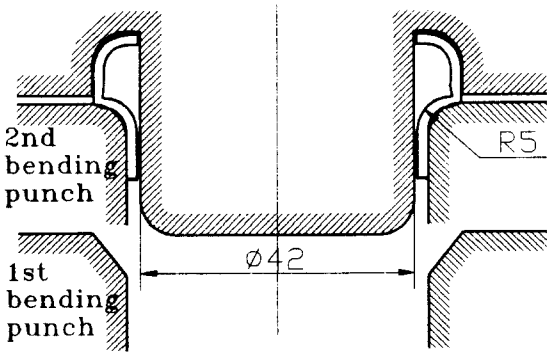
(b) 1st drawing process for forming of inner ring



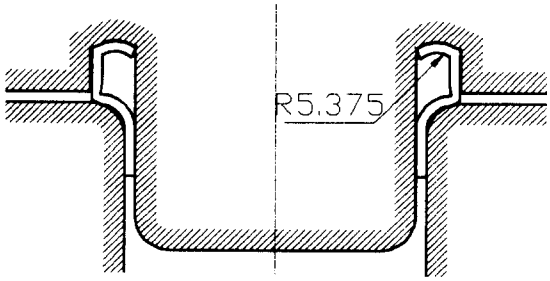
(c) 2nd drawing process



(d) flanging process



(e) 1st & 2nd bending process



(f) curling process

Fig. 4 New processes for forming of rings

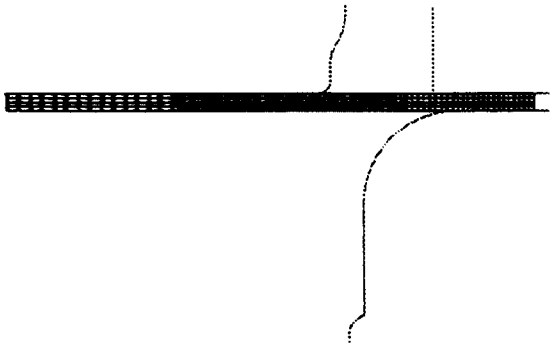


Fig. 5 Initial mesh system and die set-up for outer ring

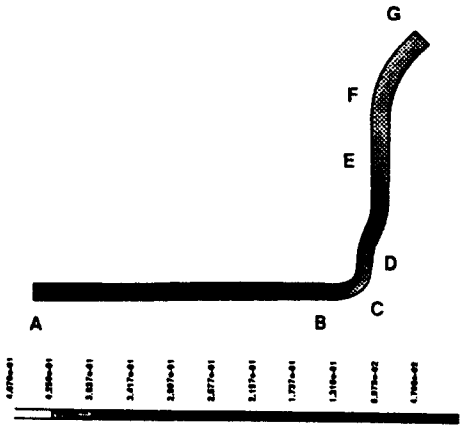


Fig. 6 The final result and distribution of effective plastic strain for outer ring

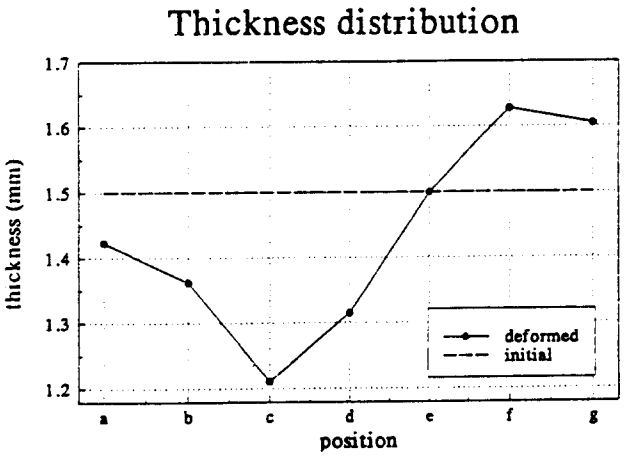


Fig. 7 The distribution of thickness for outer ring

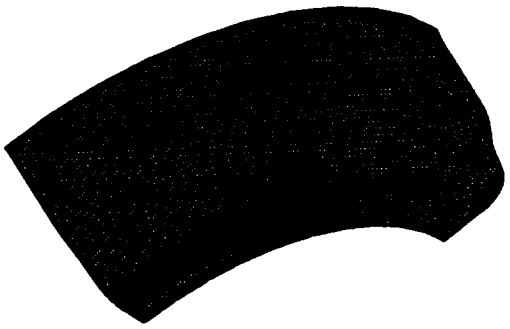


Fig. 8 3 dimensional figure of outer ring

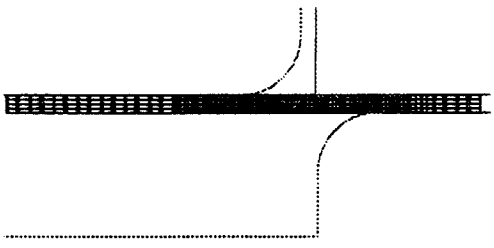


Fig. 9 Initial mesh system and die set-up for inner ring

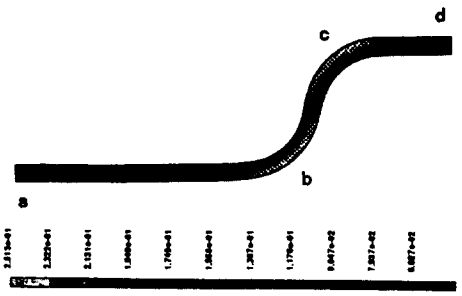


Fig. 10 The result of 1st drawing process for inner ring

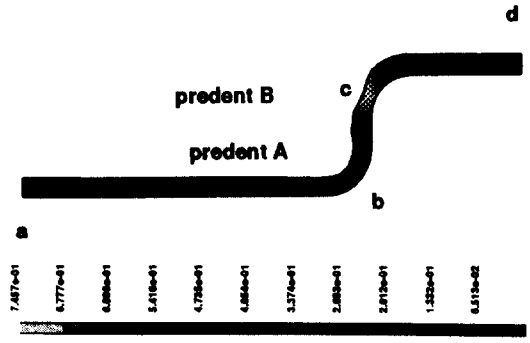


Fig. 11 The result of 2nd drawing process

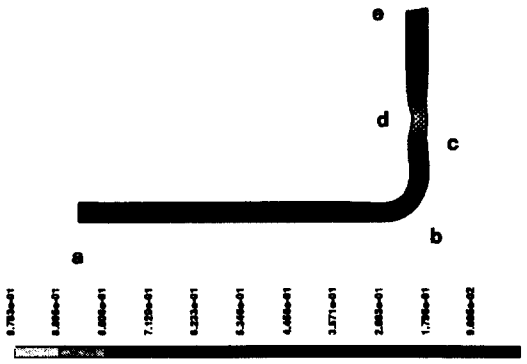


Fig. 12 The result of flanging process

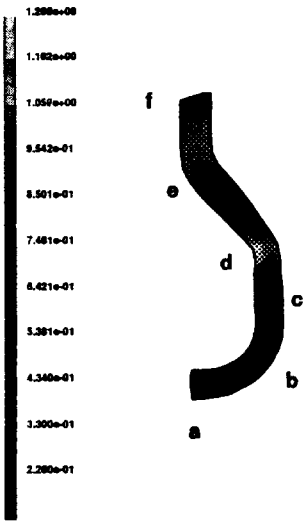


Fig. 13 The result of 1st bending process

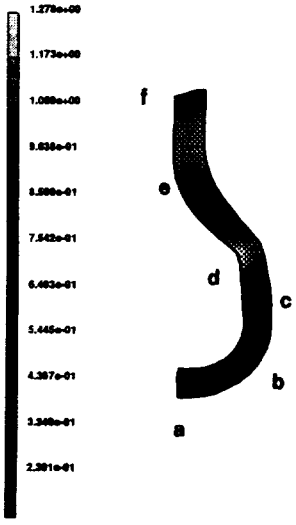


Fig. 14 The result of 2nd bending process

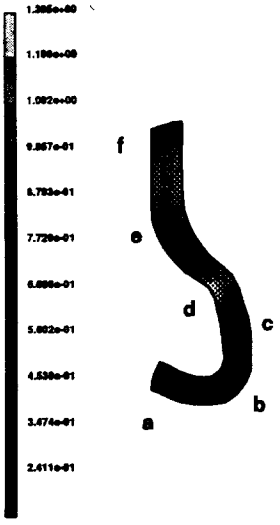


Fig. 15 The result of curling process

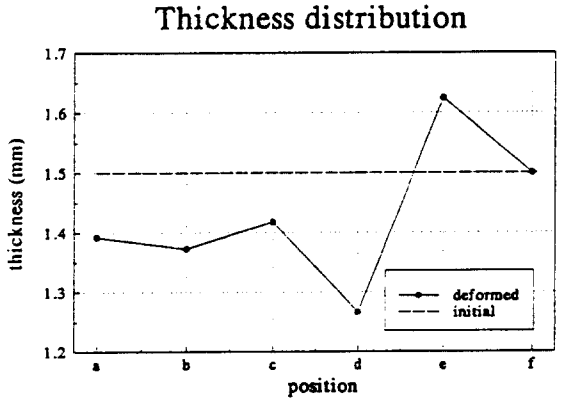


Fig. 16 The distribution of thickness for inner ring

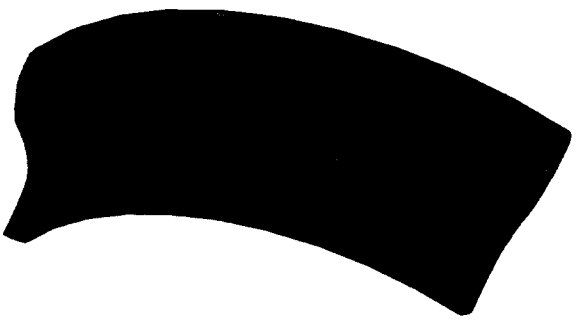
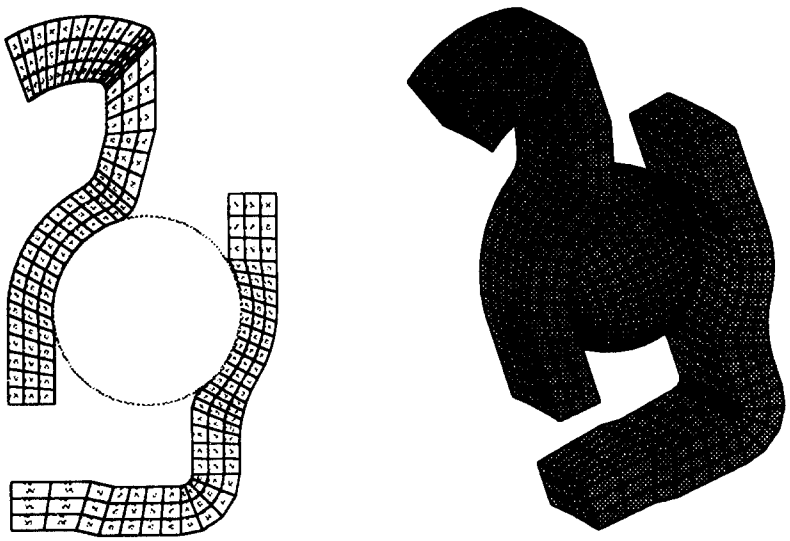


Fig. 17 3 dimensional figure of inner ring



(a) 2 dimensional anal. (b) 3 dimensional anal.

Fig. 18 Initial mesh system for analysis of elastic deformations

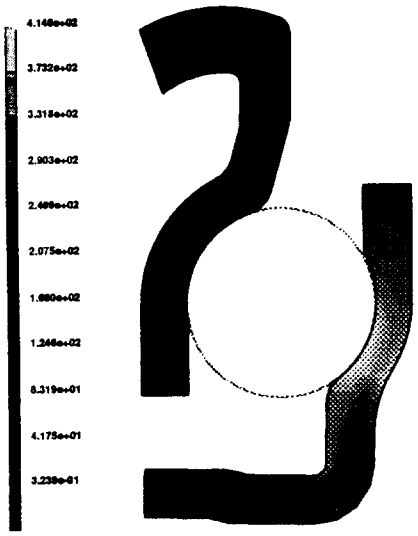


Fig. 19 Result of 2D elastic analysis (effective stress)

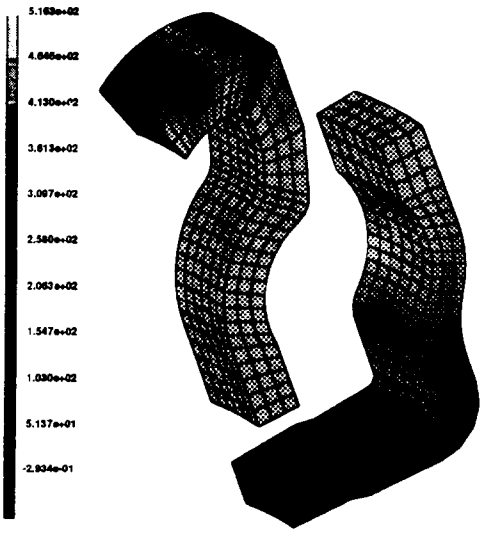


Fig. 20 Result of 3D elastic analysis (effective stress)