

## 플랜지를 가진 추력 엔진베어링의 성형공정 및 금형 설계

김형종\* · 곽인구\*\*

(2000년 2월 8일 접수)

### Process and Die Design for the Forming of Flanged Thrust Engine Bearings

H. J. Kim and I. K. Kwak

#### Abstract

This study aims to improve the productivity in forming of flanged thrust engine bearings from two kinds of laminated sheet materials by integrating the forming processes or by reducing the number of the subsequent sizing and machining processes or by modifying the forming tools used. For steel-Al rolled blank, a design scheme for the one-step forming operation and the geometry of the tool set required is suggested and is verified its usefulness by the finite element simulation. And for steel-Cu sintered blank, the results of experiment and finite element analysis show that it is possible to improve the dimensional accuracy of formed products and to reduce the number of sizing processes just by modifying the shape and dimensions of initial blanks and flange forming dies, and by controlling the spring force.

**Key Words** : Flanged Thrust Engine Bearing, Finite Element Analysis, Process and Die Design

#### 1. 서 론

플랜지를 가진 두 조각 한 쌍의 추력 엔진베어링(thrust engine bearing)은 실린더 블록에 장착되어 크랭크축의 회전을 지지하는 메인베어링(main bearing)의 일종이다. Fig. 1은 직렬 4기통 엔진의 크랭크축과 이를 지지하는 5개의 메인베어링을 나타내고 있는데, 그중 ③번 베어링은 크랭크축의 회전운동에서 발생하는 반경방향 하중뿐만 아니라, 플랜지의 역할로 축방향의 하중도

동시에 지지하면서 축방향의 미세한 움직임을 방지할 수 있도록 설계되어 있다<sup>(1,2)</sup>.

엔진베어링 제품의 큰 수요자인 자동차, 선박업체에서는 수요의 대부분을 수입에 의존하고 있고 소량만이 국내에서 생산되고 있다. 이러한 수요 특성상 중소기업에서 소량 다품종 방식으로 생산되고 있어 연구개발 투자에 상응하는 효과를 기대하기 어려운 것이 사실이다. 이 때문에 현재까지 엔진베어링의 동특성이나 윤활특성, 마찰특성 등에 대하여 많은 연구가 수행되어온 데 비하

\* 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부  
\*\* 강원대학교 대학원

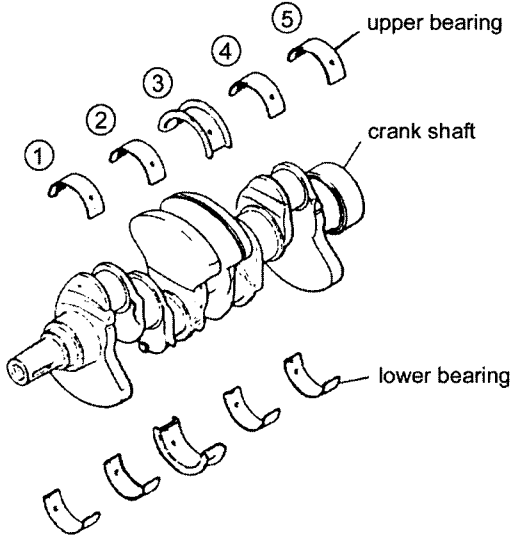


Fig. 1 Configuration of crankshaft and main bearings

여 성형공정에 대한 체계적인 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다. 자연히 공정의 상당부분이 수작업에 의존하고 있거나 필요이상의 많은 공정을 거치게 되어 생산성이 낮을 뿐만 아니라, 치수 정밀도 불량이나 다듬질 가공 시의 과도한 재료손실 등 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 따라서 현 제조공정을 대폭 개선하거나 새로운 제조기술을 개발할 필요성이 대두되나, 현실적으로는 과도한 추가 투자의 부담 없이 이러한 문제점들을 부분적으로나마 해결할 수 있는 방안이 더욱 절실하다고 할 수 있다.

엔진베어링 제조용 소재는 강도와 윤활특성 등 상반된 성질을 동시에 가져야하므로, 일반적으로 강도와 내피로특성이 좋은 강판에 화이트메탈(white metal), 켈멧 메탈(kelmet metal), 알루미늄메탈, 합유소결합금 등 여러 가지 베어링금속을 밀착한 것을 사용하고 있다<sup>(3-5)</sup>.

본 연구에서는 강판과 알루미늄판을 냉간압연으로 접합한 소재(Steel-Al 압연접합 소재)와 강판에 Cu+Sn 또는 Cu+Pb 분말을 소결압착한 소재(Steel-Cu 소결압착 소재)의 두 가지 소재로부터 플랜지를 가진 추력 엔진베어링을 제조하기 위한 성형공정 및 금형을 생산 현장에서 바로 적용할 수 있도록 개선함으로써 공정수, 특히 수작업의 최소화, 생산성과 치수정밀도 및 재료수율 증대, 그리고 비용 절감을 도모하고자 하였다. 이 두 가지 소재는 두께와 재질, 표면 특성 등의 차이 때문에 서로 다른 공정을 거쳐 성형되는데, 각 소재에 대한 기존

성형공정의 문제점을 분석하고 그 개선 방안을 제시하였다. 상용 유한요소코드 PAM-STAMP<sup>(6)</sup> 및 DEFORM 2D/3D<sup>(7)</sup>를 사용하여 기존 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 실제 제품과 비교함으로써 유한요소 해석의 신뢰성을 확인함과 동시에 유한요소 모델링 기법을 확립하고자 하였다. 또한, 개선 공정에 대한 유한요소 해석과 시작금형 제작 및 실험에 의하여 본 연구에서 제안한 공정 개선 방안의 타당성을 검증하였다.

## 2. 성형공정 및 금형 설계

### 2.1 현재 공정의 문제점

#### 2.1.1 Steel-Al 압연접합 소재

Steel-Al 압연접합 소재의 제조 공정은 Fig. 2와 같이 소재의 압연 압착 및 전단, U-굽힘(A-1 공정), 플랜지 성형(A-2 공정) 등으로 이루어지며, 이후 치수보정과 표면가공을 위한 기계가공을 하게 된다. 굽힘 가공에서는 필연적으로 탄성회복에 의한 스프링백 현상이 나타나게 되는데, 이는 다음의 플랜지 성형공정에서 금형에 소재를 고정하는 작업을 어렵게 한다.

Fig. 3은 플랜지 성형 공정을 설명하기 위한 개념도로, U-굽힘 성형된 소재를 금형에 고정시킨 후 두 개의 펀치 사이로 밀어 넣어 플랜지를 성형하게 되는데, 특히 소재를 고정시키는 작업이 전적으로 수작업으로 이루어지기 때문에 생산성을 떨어뜨리는 주 요인이 되고 있다.

Fig. 4는 기존의 U-굽힘 및 플랜지 성형 공정에 대한 유한요소 시뮬레이션 결과를 실험사진과 비교한 것이다. 초기소재의 두께가 균일하지 않아 두께변형을 분포와 같은 정량적 분석은 어려웠으나, 전체적인 변형 양상이나 국부적인 변형 집중 등은 실제 제품과 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 실험사진과 해석 결과에서 모두 소재 양쪽 끝 부분에 매우 심한 변형이 발생한 것을 볼 수 있는데, 초기소재의 길이를 여유 있게 전단하여 성형이 끝난 후 이 부분을 제거하기 때문에 성형공정에는 문제가 없지만 소재의 낭비가 적지 않다.

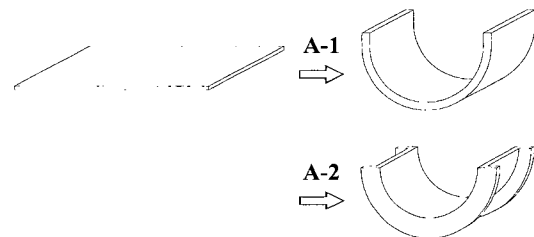


Fig. 2 Forming process for the Steel-Al blank

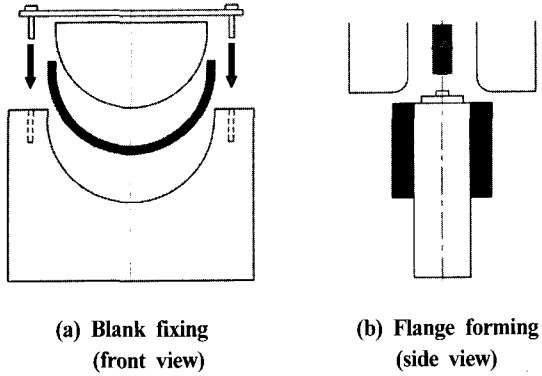


Fig. 3 Fixing and flange forming process of a U-bent Steel-Al blank

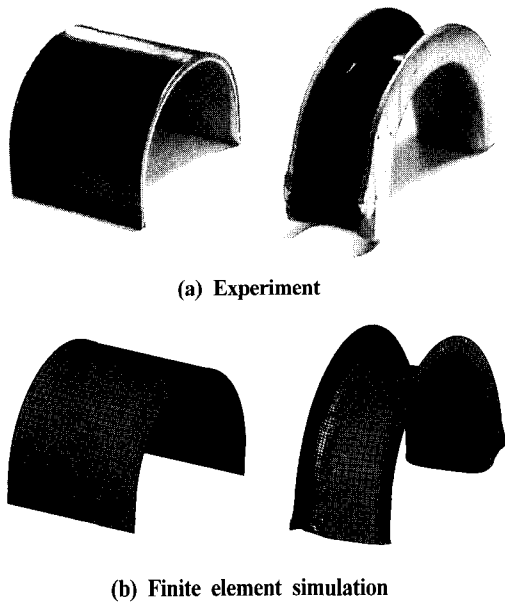


Fig. 4 Comparison between experiment and simulation of the current process for Steel-Al blank

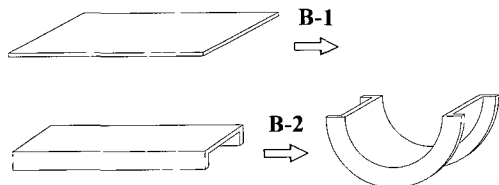


Fig. 5 Forming process for the Steel-Cu blank

### 2.1.2 Steel-Cu 소결압착 소재

Steel-Al 압연접합 소재의 플랜지 성형과정에서는 금형과 소재간에 많은 마찰이 발생하는데, 이 공정을 Steel-Cu 소결압착 소재에 적용할 경우 압연접합 소재에 비하여 두께가 훨씬 두꺼운데다 펀치와 접촉하는 분말소결층이 마찰로 인하여 충분히 변형되지 못하고 파손되거나 벗겨질 위험이 커서 다른 성형공정을 따르고 있다. 즉, Fig. 5에 나타낸 것과 같이 강판에 Cu와 Sn 분말을 소결압착한 판재를 적절한 크기로 절단한 후 플랜지를 먼저 성형(B-1 공정)하고 다음에 U-굽힘(B-2 공정) 작업을 수행하며, 이후 치수조정 작업과 마무리 기계가공을 하게 된다.

Fig. 6은 플랜지 성형과정 시뮬레이션 결과를 소재 단면 사진과 비교한 것인데, 두 경우 모두 플랜지 굽힘반경 안쪽에 필렛(fillet)이 발생한 것을 볼 수 있다. 이 부분은 다음 공정인 U-굽힘 시에 금형이 소재단면 전체와 충분히 밀착하지 못하여 제품 형상이 제대로 얻어지지 않는 문제를 야기할 뿐 아니라 베어링을 하우징에 조립할 때도 간섭을 일으키게 되므로 기계가공으로 제거해야 한다. 굽힘부 바깥쪽의 홈은 초기소재의 분말소결층에 미리 가공한 것으로, 이 홈을 가공하지 않고 성형을 하면 소결층이 불규칙하게 갈라지게 된다.

Fig. 7은 기존의 U-굽힘 공정을 설명하기 위한 개념도로, 상부의 펀치가 하강하면서 소재와 접촉하여 힘을 가하면 스프링으로 지지된 좌우 롤러가 바깥쪽으로 밀려 나가면서 소재를 성형하게 된다. Fig. 8은 성형된 소재의 사진과 시뮬레이션으로 구한 형상을 비교하고 있다. 플랜지가 양쪽으로 벌어지는 현상과 바닥 면이 블록해져 원통도가 나빠지는 현상을 볼 수 있는데, 이는 두 개의 롤러 사이에 위치한 홈더의 가압력과 펀치의 형상이 이러한 현상을 방지할 수 있도록 설계·제작되지 않았기 때문이다. 지금까지는 이러한 치수불량 문제를 보정하기 위하여 성형 후 3단계에 걸친 사이징(sizing) 작업을 실시하고 있다.

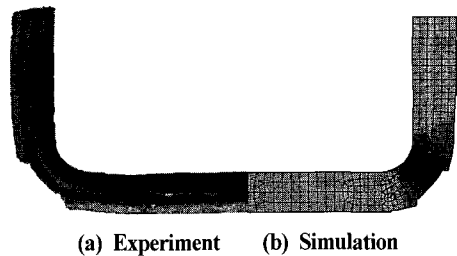


Fig. 6 Section view of the Steel-Cu blank after flanging process

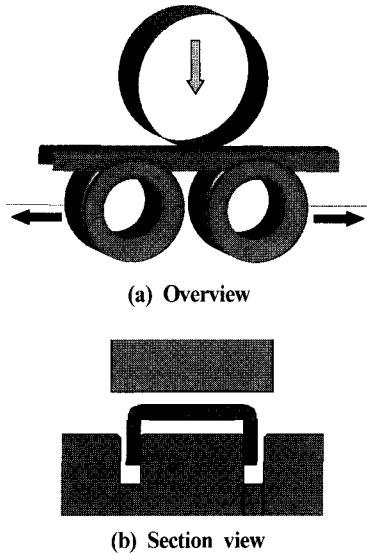


Fig. 7 Schematic diagram of current tool set for U-bending of Steel-Cu blank

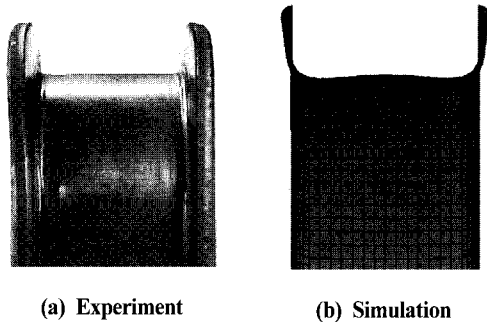


Fig. 8 Comparison between experiment and analysis of the current process for Steel-Cu blank

## 2.2 공정 개선 및 금형 설계 방안

### 2.2.1 Steel-Al 압연접합 소재

Steel-Al 압연접합 소재의 성형은 수작업을 포함한 두 공정으로 이루어지고 있는데, 이를 한 번의 공정으로 완료할 수 있는 Fig. 9와 같은 금형 모델을 제안하였다. 펀치가 하강하면서 소재를 다이 사이로 밀어 넣어 먼저 플랜지를 성형하고 다이 하부의 반원형 돌출부를 만나면 U-형으로 굽혀지게 된다. 이러한 금형에서는 특히 펀치와 다이의 치수정밀도가 중요한데, 별도의 사이징 작업 없이 한 번의 공정으로 성형을 완료하기 때문에 정밀도가 조금만 떨어지더라도 형상이 한쪽으로 치우치거나 과도한 국부변형 등의 결과가 발생하기 때문이다.

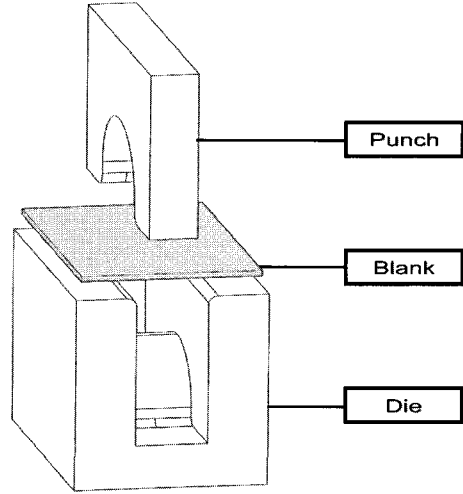


Fig. 9 Schematic diagram of the tool set suggested for one-step forming of Steel-Al blank

### 2.2.2 Steel-Cu 소결압착 소재

플랜지 성형 후에 필렛을 제거하는 대신 초기소재에 미리 적절한 형상의 홈을 가공하고 이에 대응하는 펀치 모서리부에 돌출부를 만들어 성형하는 방법을 고안하였다. 후술하는 바와 같이 유한요소해석을 반복 수행한 결과 홈의 단면 형상은 사다리꼴로 하고 펀치 모서리에 원형 돌출부를 두는 것이 가공과 성형에 가장 적합한 것으로 판단하였다.

또한, U-굽힘 공정에서는 플랜지가 벌어지고, 원통도가 저하되는 문제가 발생한다. 특히 롤러와 접촉하지 않는 소재의 중심부에서 이러한 현상이 두드러지게 나타나는데, 그 원인은 폭방향으로 플랜지를 구속할 수 있는 장치가 없기 때문이다. 롤러와 접촉하는 부분에서는 롤러에 가공되어 있는 홈이 정밀하지는 않지만 플랜지가 바깥쪽으로 벌어지는 것을 어느 정도 막아주고 있는데, 중심부의 아래쪽 홀더에는 이러한 홈이 없어 플랜지의 끝부분과 접촉하기 때문에 플랜지가 벌어지는 원인이 된다. 이를 개선하기 위한 방안으로 Fig. 10과 같은 금형 모델을 제안하였다. 단면 형상에서 보는 바와 같이 펀치에도 홈을 가공하여 성형 중에 플랜지가 벌어지는 것을 방지하도록 하고, 펀치 형상에 대응하여 롤러의 형상도 수정하였다. 홈의 치수는 소재 두께에 따라 정확하게 맞추었다. 특히, 베어링 중심부를 지지하는 홀더에도 롤러와 같은 치수의 홈을 가공하고 현재보다 훨씬 강한 스프링으로 지지함으로써 원통도를 유지할 수 있도록 하였다.

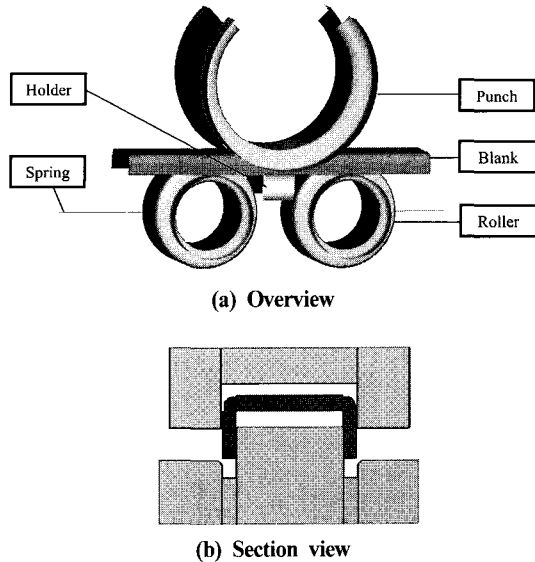


Fig. 10 Schematic diagram of the tool set suggested for U-bending of Steel-Cu blank

### 3. 공정개선 방안의 검증

제안한 성형공정 및 금형 개선방안의 타당성을 검증하기 위하여 상용 유한요소코드를 사용하여 공정 시뮬레이션을 수행하였다. 전체 성형공정의 해석에는 PAM-STAMP<sup>(6)</sup>를, 단면형상의 해석에는 DEFORM2D<sup>(7)</sup>를 각각 사용하였으며, 두께 방향의 변형과 함께 3차원적 변형을 고려하기 위해서는 DEFORM3D<sup>(7)</sup>를 이용하였다.

Table 1 Tensile properties of the bearing materials

Material (Thickness)	Specimen	Young's Modulus E (GPa)	Yield Stress Y (MPa)	Stiffness Coefficient K (MPa)	Hardening Exponent n
Steel-Al Rolled Blank (2.7/0.9)*	0°	153	321	496	0.070
	45°	153	358	539	0.071
	90°	153	387	596	0.076
	Average	153	353	558	0.078
Steel-Cu Sintered Blank (4.2/1.2)*	0°	178	420	505	0.032
	45°	178	440	585	0.050
	90°	178	427	678	0.079
	Average	178	430	586	0.053

\* (total thickness / thickness of Al or Cu layer)

### 3.1 인장시험

유한요소해석에 입력될 재료의 물성치를 구하기 위하여 KS B 0801 13B호 규격의 판재용 시편을 압연방향에 대해 0°, 45°, 90° 방향으로 채취하여 인장시험을 실시하였다. Table 1은 인장시험 결과로 얻어진 각 소재별 기계적 특성을 정리한 것이다. 두 소재 모두 이중금속간의 완전한 접합을 위하여 상당한 공간가공을 받았기 때문에 항복응력이나 인장강도는 비교적 높으나 가공경화지수와 연신율(약 5%)은 매우 작은 것으로 나타났다. 실제 성형공정에서는 충분한 소성변형을 받을 수 있도록 하기 위하여 성형공정 사이에 필요에 따라 적절한 풀림 열처리를 실시하고 있으나, 성형된 소재에 대한 인장시험은 사실상 불가능하므로 본 연구에서는 편평한 초기소재의 인장시험 데이터를 그대로 사용하였다.

Fig. 11은 인장시험에서 소성불안정 또는 국부 necking(necking)이 발생한 부분을 확대한 사진이다. 접합소재에서 소성불안정은 강(steel)보다 상대적으로 강도가 낮은 Al 또는 Cu 층에서 먼저 발생하여 반대쪽 Steel 층으로 전파되는 것이 아니라 양쪽 재료 층에서 거의 동시에 일어나는 것으로 관찰되었다. 특히, Cu 분말 층에는 다른 층과는 달리 국부 necking이라기보다 크랙 전파에 의한 분말조직의 파괴가 현저하게 나타났다.

### 3.2 유한요소 해석

#### 3.2.1 Steel-Al 압연접합 소재

Fig. 12는 개선 공정을 PAM-STAMP와 DEFORM3D의 두 가지 프로그램으로 해석한 결과를 나타낸 것으로,

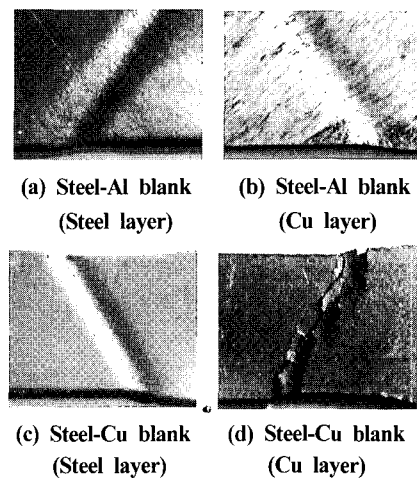


Fig. 11 Photographs of the local necks

현재 공정과 마찬가지로 소재의 끝 부분에 심한 변형이 발생하지만, 한 공정으로도 형상 또는 치수 불량이나 파단이 일어나지 않고 성공적으로 성형을 완료할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 3.2.2 Steel-Cu 소결압착 소재

현재 플랜지 성형공정은 소재 길이 방향으로의 변형이 거의 없는 평면변형을 상태이기 때문에 DEFORM2D를 사용한 2차원 단면해석으로도 두께방향 변형의 정확한 예측과 단면형상의 최적설계가 가능하다. Fig. 13에 나타난 해석 결과로부터, 모서리에 원형 돌출부를 가진 펀치로 직사각형 홈을 가진 소재를 성형할 때는 재료의 미충전에 의한 결함이 발생하나, 사다리꼴 홈을 가진 소재를 성형할 때는 간섭을 일으킬 만한 필렛이나 제품의

수명을 단축시킬 수 있는 결함이 발생하지 않아 성공적인 플랜지 성형이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 14는 개선 U-굽힘 공정을 해석하기 위한 유한요소 모델과 해석 결과로, 중심부 근처에서 플랜지가 벌어지고 원통도가 저하되는 문제가 해결되었음을 확인할 수 있다.

### 3.3 금형 제작 및 실험

전술한 공정개선 방안에 따라 Steel-Cu 소결압착 소재의 U-굽힘 성형을 위한 금형 세트를 제작하였다. Fig. 15는 금형 세트를 크랭크프레스에 장착한 모습이다. 플랜지 성형에서는 제안한 바와 같은 원형 돌출부를 가진 펀치를 제작하는 데 어려움이 있어 돌출부가 없는 기존 펀치를 사용하였다.

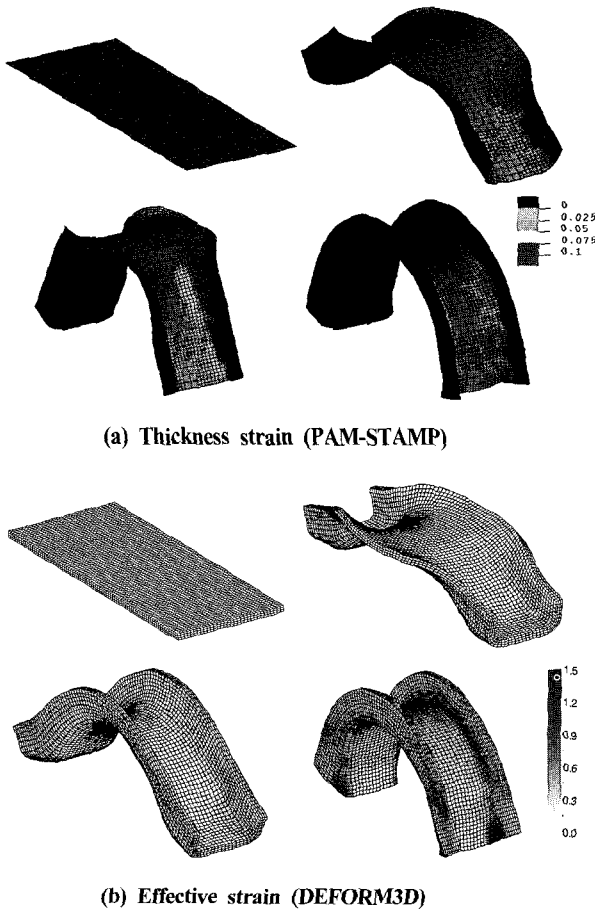


Fig. 12 Deformed shapes of Steel-Al blank in the suggested one-step forming process

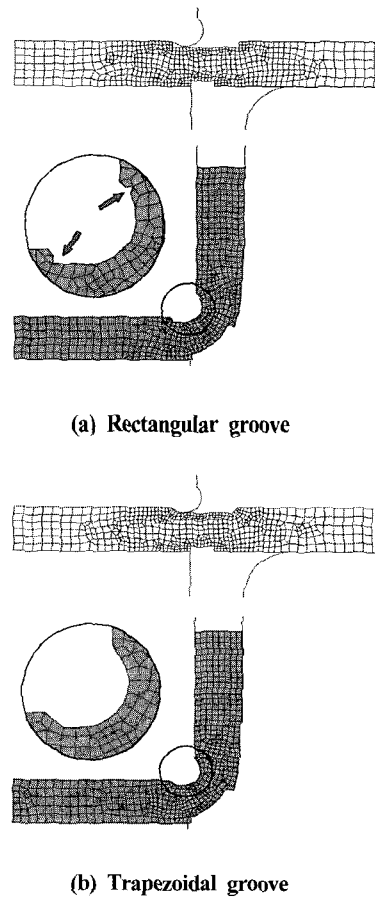
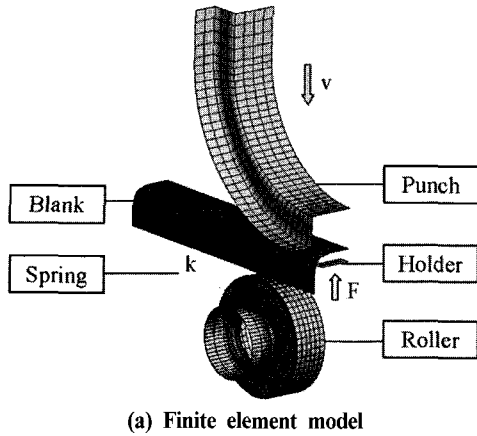
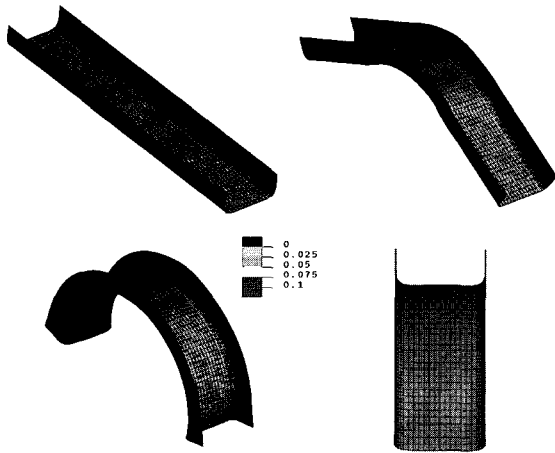


Fig. 13 Deformed shapes of Steel-Al blank with initial groove in the flanging process



(a) Finite element model



(b) Deformed shapes at several forming stages

Fig. 14 Simulation result for the U-bending process by modified tool set for Steel-Cu blank

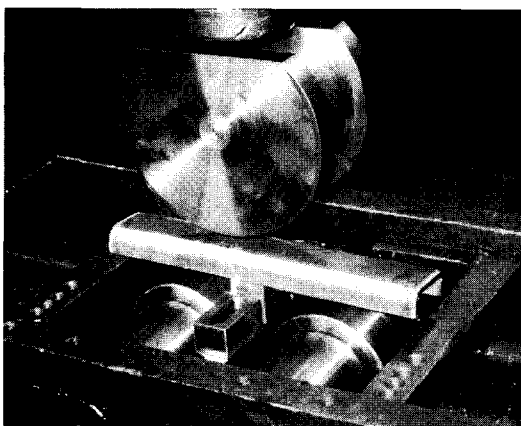


Fig. 15 Die set and blank installed on a crank press

소재판을 만들기 위하여 두께 3.5mm의 강판에 Cu+Sn 분말을 1mm 두께로 도포하고, 900°C의 가열로를 통하여 소결·압착하였다. 소결부 밀도를 향상시키기 위하여 3회에 걸쳐 이 공정을 반복함으로써 최종두께가 4.2mm가 되도록 하였으며, 압착된 소재로부터 210×58 mm 크기의 시편을 전단하였다. Cu+Sn 분말소결층은 연신율이 매우 작기 때문에 플랜지 성형 시 굽힘부에 균열이 많이 발생하여 인접부까지 전파된다. 따라서 Fig. 13과 같이 굽힘반경부의 소결층에 미리 폭 2.0mm, 깊이 0.7mm의 홈을 가공하여 그 안에서만 균열이 발생하도록 한다. 이 부분은 마무리 기계 가공 시 매끄럽게 가공되기 때문에 최종제품에는 전혀 영향을 주지 않는다. 그 반대면 강판 층에는 앞서 제안한 대로 Fig. 13(b)와 같은 사다리꼴 홈을 가공한다.

Fig. 16의 (a)는 소재 양면에 홈을 가공한 초기시편이며, (b)는 플랜지가 성형된 모습으로 돌출부를 가진 펀치를 사용하지 않아 매끄러운 모서리 형상을 얻지는 못하지만, 현재 공정에서처럼 필렛이 발생하여 후속 U-굽힘 성형에 지장을 주는 문제는 없었다. 그리고 (c), (d)는 각각 U-굽힘 성형 도중과 완료 후의 시편 사진이다.

U-굽힘 공정에서 두 개의 롤러 사이에 있는 홀더는 그 아래쪽에 있는 스프링의 지지를 받아 펀치나 롤러와 접촉하지 않는 가운데 부분의 원통도를 유지시켜 주는데, 스프링 지지력이 약하면 중심부에서 펀치와 홀더를 소재에 밀착시키지 못하기 때문에 완전한 원호 형상으로 성형할 수 없다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 롤러를 지지하는 스프링을 최대한 압축시킨 후 홀더 하부에 장착하여 충분히 강한 지지력을 낼 수 있도록 하였다. 또한 중심부에서 두드러지게 나타났던, 플랜지가 벌어지는 현상을 방지하기 위하여 홀더에도 롤러와 같은 치수의 홈을 가공하였다. Fig. 17은 개선된 U-굽힘 금형과 충분한 홀더 지지력으로 성공적으로 성형된 소재의 사진으로, 플랜지가 벌어지는 문제점이 현저하게 감소되고 원통도가 상당히 향상된 것을 확인할 수 있다.

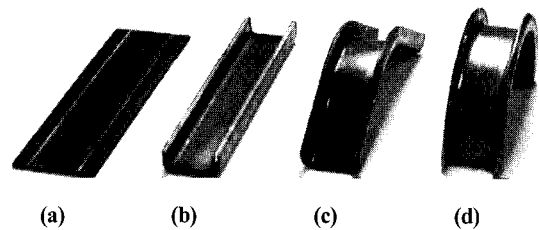


Fig. 16 Initial and deformed blanks at several stages

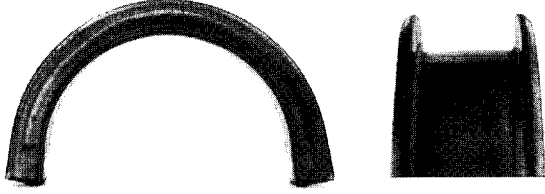


Fig. 17 Successfully bent blank by the suggested tool set

#### 4. 결론

두 종류의 소재로부터 플랜지를 가진 추력 엔진베어링을 제조하기 위한 기존의 성형공정과 금형에 대한 문제점을 분석하고 그 개선 방안을 제안하였다. 유한요소해석과 금형 시작품 제작 및 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Steel-Al 압연접합 소재의 성형공정은 U-형 굽힘, 플랜지 성형, 마무리 기계가공 등으로 이루어진다. U-굽힘 후 중간 성형품을 플랜지 성형 금형에 고정하는 작업이 완전히 수동으로 이루어지고 있어 생산능률이 매우 낮다. 이를 해결하기 위하여 한번의 공정으로 성형할 수 있는 금형 모델을 제안하고 유한요소 해석을 통하여 그 가능성을 확인하였다.

(2) Steel-Cu 소결압착 소재의 성형공정은 플랜지 성형, U-형 굽힘, 마무리 기계가공 등으로 이루어지는데, 플랜지 성형과정에서 플랜지가 접히는 모서리 부분에 필렛이 발생하기 때문에 다음의 U-굽힘 공정에서 소재와 금형이 밀착되지 못하여 플랜지가 바깥쪽으로 벌어지는 문제가 발생하고, 성형 완료 후에도 마무리 기계가공을 매우 어렵게 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 플랜지 성형 편치에 원형 돌출부를 붙이고, 초기소재에 사다리꼴 홈을 가공하는 방안과 플랜지 벌어짐을 방지할 수 있는 U-형 굽힘 금형 설계방안을 제안하였다. 유한요소해석과 금형 제작 및 성형 실험을 통하여 개선 방안

으로 제시한 성형공정과 금형의 타당성을 검증하였다.

(3) 엔진베어링 제조용 다층소재의 기계적 특성을 파악하고 유한요소해석에 입력할 물성치를 얻기 위하여 소재별로 인장시험을 수행하고 그 결과를 정리함으로써 기초자료 확보와 신제품 생산·개발에 활용할 수 있도록 하였다.

(4) 본 연구에서 제안한 공정 개선 방안은 저비용으로 현장에 적용할 수 있으며, 제품의 치수정확도 향상과 공정수 감소로 생산성 제고에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

(5) 향후 금형 형상과 치수의 최적화, 스프링 지지력 등 공정변수의 최적조건, 그리고 재료 수율 증대를 위한 초기 소재 크기의 정확한 계산 등에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 1998년도 산·학·연 공동기술개발 사업의 지원으로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

- (1) Shigley, J. E. and Mischke, C. R., 1989, Mechanical Engineering Design, 5th Ed., McGraw-Hill
- (2) 최재권, 1992, "엔진 크랭크샤프트 베어링의 최소 유막 두께에 관한 연구", 서울대학교 박사학위 논문
- (3) Rothbart, H. A., Mechanical Design and Systems Handbook, McGraw-Hill
- (4) 은정표, 신창선 편역, 1992, "가솔린엔진의 구조", 동신출판사
- (5) 송광호, 심정열, 김병철, 1996, "기계금속재료", 보문당
- (6) Pam System International, 1998, PAM-STAMP™ User's Manual
- (7) SFTC, DEFORM 2D/3D™ User's Guide, Ver 5.0