

베어링레이스의 온간성형에 있어서 공정개선 및 UBST 해석

김영호*, 배원병**, 박재우***

* 부산대학교 생산기계공학과, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

** 부산대학교 기계설계공학과, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

*** 부산대학교 대학원

ABSTRACT

In this paper, the deformation method for inner and outer races of roller-bearing by means of the warm precision forging is investigated. We adapted the process design such as following that, to increase Die life, reduce heat transfer through conduction and the eccentricity of preform in warm forging of bearing race, the bottom portion of billet is formed during upsetting process. Then it is backward extruded, and thus obtained ring preform is formed by combined extrusion. Also, we compared it with the forming method in China and Japan, and we have known it is more excellent method. Besides, this forming method is simulated by UBST which is based on the merits of UBET and FEM. The results show that it is easy to know the exact location of neutral surface through the inspection of streamline during combined extrusion, and the velocity vector distribution along the surface of velocity discontinuity is investigated. Also the effectiveness of this method is proved by the experiment using model material that is Plasticine.

1. 서론

1.1 연구 배경

60년대 까지 1000°C 이상의 고온에서 행해지는 열간 단조와 2차대전 중 급속히 발달한 상온에서의 냉간단조는 이미 단조산업에서 사용되는 온도 범위가 정되어 있다. 열간과 냉간의 중간 온도 영역에서 제조되는 것을 온간단조라 하며, 냉간단조 보다 더욱 늦게 발달 하였다. 온간단조의 목적은 냉간단조에서 보다 온도를 올림으로써 더 낮은 변형저항을 가지고, 열간에서 보다 온도를 낮춤으로써 더 정밀한 단조품을 얻는 것이다.^[1]

온간단조가 전체적으로 비윤활성은 있지만, 가공대상의 부품에 따라서는 아직도 금형수명이 짧아 충분히 온간단조의 장점을 발휘하지 못하는 경우도 있어서 온간단조의 실용화 단계에서 해결해야 할 문제점으로 형윤활, 형냉각, 금형재료, 프레스 형상 등이 지적되고 있다.^[2] 또한 온간 단조용 금형의 수명은 피가공물로 부터 열영향을 크게 받기 때문에 금형과 피가공물 사이의 접촉시간을 최우하는 프레스의 슬라이드 모션의 영향을 강하게 받는다. 따라서 생산량이 같은 경우 금형과 피가공물과의 접촉시간이 짧을수록, 즉 슬라이드 속도가 빠른 프레스를 사용할수록 가공 중의 펀치 온도가 낮게 되고, 가공 면적이 다소 증가함에도 불구하고 변형 및 마모가 작으므로 금형수명은 길어지게 된다.^[3] 온간단조에서 윤활의 특징은 열적인 영향이 더해지기 때문에 냉간단조 보다도 더욱 복잡해지며, 인산염 피막은 약 250°C를 넘으면 윤활효과가 없어져 버리기 때문에 온간단조를 성공시키기 위해서는 윤활제의 선택도 중요하다.^[4]

일본의 KOMATSU^[5]사에서는 온간단조에 대해 오랫동안 연구

해 왔으며, 베어링 레이스의 온간단조에 있어서 공구수명에 영향을 미치는 원인을 이론적인 계산과 실험으로 부터, 공구와 소재 사이의 접촉시간과 냉각시간이 중대한 영향을 미친다는 것을 알았다. 최근 중국의 WANG ZUTANG^[6] 등에 의해 온간공정에 의해 만들어지는 부품 중 베어링 레이스의 성형을 위한 최적의 절차가 조사되었는데, 링 예비성형체(ring preform)로 부터 복합전·후방 온간 압출이 가장 효율적인 것으로 밝혀졌다. 대부분의 구름-베어링 레이스는 열간공정에 의해 만들어 진다. 열간공정은 냉간이나 온간공정 보다 더 많은 재료와 에너지가 소비된다. 그런데 베어링강의 높은 유동응력 때문에 냉간 압출에 의한 구름-베어링 레이스 성형은 쉽지 않다.

그리하여 본 연구에서는 냉간공정 보다 온도를 높여서 피가공제의 변형저항을 낮추고, 열간공정 보다 온도를 낮게 하여 더 정밀한 제품을 얻고자 온간으로 구름-베어링 레이스를 성형하는 공정에 대해 연구하고자 한다. 또한 안쪽(Inner), 바깥쪽(Outer) 베어링 레이스의 온간성형에서 금형수명을 증가시키고, 전도에 의해 펀치에 전달되는 열의 영향을 줄이기 위해 펀치의 이송거리 줄이는 방향으로 최적의 공정설계를 하고, 또한 검정할 수 있는 시뮬레이션 기법을 개발하여 쉽게 유동양상과 성형에 필요한 하중을 예측하는데 역점을 두기로 한다.

1.2 연구 방법

수치해석적인 방법으로 소성가공 문제를 연구하는데 주로 사용되는 방법으로는 상계법, 상계요소법, 유한요소법 등이 있다. 유한요소법은 많은 계산시간과 현장에서의 실용성등 그 나름대로

의 제약을 가지고 있고, 상계요소법은 유한요소법 보다 해석이 용이하며, 계산시간도 훨씬 단축시킬 수 있어서 여러 소성가공 공정 해석에 많은 기여를 해왔다. 그러나 상계요소법은 해석하고자 하는 형상이 바뀌면 그 형상에 맞는 속도장을 구성해야 하기 때문에 범용성을 기대하기란 매우 어렵다. 또한 속도장은 경험과 직관 의한 가정으로 구성되는 경우가 많으므로 해석자에 따라 달라질 수 있고 해석의 편의를 위해 평행속도장인 직각 삼각형이나 직사각형으로 구성되어 본래의 속도 불연속면을 따라 변형영역을 나누지 않으므로 인해 더 높은 상계해를 초래할 위험이 있다.

그리하여 유한요소법과 상계요소법의 이러한 단점들을 보완한 새로운 해석 방법인 유동함수 상계 요소법(UBST : Upper-Bound Stream function element Technique)이 Sano^[7], Wang^{[8]-(10)} 등에 의해 출현하게 되었다. Sano^[7]는 수치해석적인 측면에서 시도하여 업셋팅과 압출문제에 적용하였다. 그러나 압출문제의 적용에서 너무 많은 요소를 나눔으로 인해 전단 에너지 소비율의 증가로 기존의 상계해 보다 더 높은 해를 초래했다. Wang^{[8]-(10)}은 유동함수의 비압축성조건과 유한요소법의 요소구성의 장점을 이용하여 유동함수 상계요소법을 일반화된 속도장을 가지도록 구성하여 축대칭 공정에 적용하여 상계요소법 보다 더 나은 해를 얻음으로써 유동함수 상계요소법이 여러가지 소성가공 공정에 유용함을 보였다.

그리하여 유동함수 상계요소법의 이러한 장점들을 이용하여 베어링 레이스의 제조에 적용시키고, 모델재료(Plasticine) 실험을 통하여 적은 비용으로 쉽게 이론 해석의 결과를 검토하고자 한다.

2. 베어링 레이스의 성형 절차

Fig 1.는 온간공정으로 예상되는 구름-베어링 레이스 성형을 예시하였다. 각각의 성형절차에 따른 특성은 다음과 같다.

- (a) WANG ZUTANG^[6]에 의해 제안된 방법으로 하나의 링 빌렛(ring billet) 예비성형체를 사용해서 안쪽, 바깥쪽 레이스 둘 다를 복합 전,후방 압출하는 공정이다. 타공정에 비해 이공정의 장점은 일반적으로 실린더 빌렛(Cylindrical Billet)을 우선 업셋팅 하고나서 중앙에 구멍을 뚫었을때 그 예비성형체는 대개 경험적이고 구멍은 편심된다. 안쪽 레이스(Inner races) 성형과 중앙에 구멍 뚫는 피어싱(Piercing)을 결합함으로써 요구되는 작업 수를 감소시킬 뿐만아니라, 다이(Die)를 사용함으로써 링 빌렛의 편심도를 줄인 경우이다. 그러나 안쪽 레이스와 피어싱을 동시에 성형함으로써 하중의 분산이 고르지 못하고, 산화 스케일의 제거가 용이하지 못하다. 또한 피어싱 하기 위하여 소재를 180° 회전하거나 펀치와 다이의 위치를 바꾸어야 하는 불편이 있다.
- (b) 일본의 KOMATSU사에 의해 제안된 방법^[5]으로 처음에 업셋팅 과정을 거치게 함으로써 소재의 형상을 고르게 하고, 산화 스케일의 제거를 용이하게 한다. 그리고 하중의 분산이 고르게 되어 금형의 수명을 증가시킬 수 있다. 그러나 펀치의 가장자리 부분에서 금속유동의 방향이 급격히 변하므로 극심한 마모가 예상되며, 그리하여 업셋팅에 의한 하

중분산은 예상되지만 펀치의 가장자리 부분에 응력집중을 받게 될 것이다.

따라서 금속의 유동을 원활히 하고, 펀치에 걸리는 하중을 분산시켜 최적의 하중이 부과되고, 펀치형상의 단순화와 삽입 깊이를 최소화 하여 펀치의 마모를 줄일 수 있는 최적의 공정(optimum process)을 개발하는 것이 필요하겠다.

- (c) 업셋팅 공정에서 밀부분을 초기단계에 성형함으로써 링 빌렛의 편심도를 줄이고, 두번째 단계에서 펀치의 삽입 깊이를 줄여서 전도에 의한 열의 이동을 감소시킨 경우이다. 또한 밀부분이 성형 초기단계에 비유동영역(Dead Metal Zone)이 되어 가장 하중이 많이 부과될 것이라고 예상되는 두번째 단계에서 하중을 어느정도 분산시킬 수 있을 것이다.

3 이론 해석

3.1 유동함수

유동함수는 유한요소법에서 많이 사용되는 형상함수를 이용하여 각 절점의 유동 함수값으로 특정 지워지는데 그것은 다음 두가지 범주로 나뉘어 진다.

첫째로 변형영역이 축대칭면($r=0$)을 포함하지 않을 경우에는 각각의 요소에 대한 유동함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\psi = \sum_{k=1}^n N_k \psi_k \quad (1)$$

여기서 N_k 는 형상함수이며, k 는 절점 번호, n 은 격자수 그리고 ψ_k 는 k 번째 절점에서의 유동함수 값을 나타낸다.

두번째로는 변형영역이 축대칭면을 포함하고 있을 경우 축대칭면을 따라서 $r=0$ 인 경계에서 속도가 수렴하지 않는 문제가 발생한다. 이를 방지하기 위해 유동함수 ψ 를 $\psi = r\phi$ 로 표현 한다. ϕ 는 각 요소에 대해 다항식 형태로 쓰이는 매개함수로서 아래 식과 같다.

$$\phi = \sum_{k=1}^n N_k \phi_k \quad (2)$$

ϕ_k : k 절점에서 ϕ 값

그리고 유동의 방향에 대한 규약은 유동함수값이 증가하는 방향으로 향하였을때 좌측에서 우측으로 흐르는 유동을 양(+)으로 정의 한다.

3.2 동적가용속도장

축대칭 문제에 있어서 동적 가용속도장은 다음과 같이 유동함수 $\psi(r, z)$ 의 일차 편미분의 형태로 아래 식과 같이 표현할 수 있다.^[11]

- i) 첫째 변형영역이 축대칭면($r=0$)을 포함하지 않을 경우
- $$V_r = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad V_z = -\frac{1}{2\pi} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (3)$$

이고, 여기서 V_r 과 V_z 는 각각 r 과 z 방향의 속도를 나타

낸다.

ii) 두번째로 변형영역이 축대칭면을 포함하고 있을 경우 변형영역이 축대칭면을 포함하고 있으므로 유동함수 ψ 를 $\psi = r\phi$ 로 바꾸면 다음과 같은 식이된다.

$$V_r = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad V_z = -\frac{1}{2\pi} \left(\frac{\phi}{r} + \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad (4)$$

$r=0$ 인 축대칭면의 경계에서 유동함수 (ϕ)값이 0이므로, r 방향 속도 (V_r)는 0(좌)이 되어야 하고, z 방향 속도 (V_z)는 $-\frac{1}{\pi} \frac{\partial \phi}{\partial r}$ 로 된다.

3.3 변형률 속도

변형률 속도는 유동함수의 이차 편미분으로 구성되며, 변형영역이 축대칭면($r=0$)을 포함하지 않을 경우

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial V_r}{\partial r} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \\ \dot{\epsilon}_\theta &= \frac{V_r}{r} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \\ \dot{\epsilon}_z &= \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{2\pi} \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial r} \\ \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{1}{4\pi} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

이고, 변형영역이 축대칭면을 포함하고 있을 경우에는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial V_r}{\partial r} = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial r} \\ \dot{\epsilon}_\theta &= \frac{V_r}{r} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ \dot{\epsilon}_z &= \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial r} \right) \\ \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\phi}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

유동함수를 이용한 동적 가용속도장에서는 비압축성 조건 (incompressibility condition)을 자연스럽게 만족하게 된다.

3.4 유동함수 상계요소법의 변수생성

Fig.2와 같이 KOMATSU 사의 초기 공정에서 선 1~5 ($z=0$)을 따라서 z 방향으로 재료유동이 없으므로, 즉 $V_z=0$ 이므로 하나의 유선(streamline)으로 간주하여 절점 1~5까지의 유동함수값(ϕ_{1-5})은 모두 같은 값을 가지게 된다. 그리고 절점 5, 8, 13, 15, 18을 포함하는 선에서는 r 방향으로 유동이 없으므로

하나의 유선으로 간주되며 각각의 절점에서 같은 유동함수값을 가지게 된다. 즉 선 1~5에 이르는 모든 절점에서의 유동함수값(ϕ_{1-5})과 절점 5, 8, 13, 15, 18에서의 유동함수값은 연결되어 있으므로 0(좌)이 된다. 절점 1, 6, 9를 포함하는 $r=0$ 인 대칭면은 r 방향으로 재료유동이 없으므로, 즉 $V_r=0$ 이므로 하나의 유선으로 간주되고 그 절점에서의 유동함수값(ϕ_1, ϕ_6, ϕ_9)은 0(좌)이 된다. 그밖에 소재와 펀치가 접하고 있는 절점의 유동함수(ϕ_{10}, ϕ_{14})는 식(4)로부터 $\pi \times r \times V_0$ 에 의해서 얻어질 수 있다. 여기서 r 은 다이와 접하고 있는 절점의 r 방향 좌표값들이고, V_0 는 펀치의 속도로서 -1.0이다. 선 11, 14, 16에서는 r 방향으로 재료유동이 없으므로 같은 미지의 유동함수값을 가지게 된다. 선 11, 14에서만 펀치와 접촉하고 있으므로 선 14, 16은 마찰을 고려하지 않았으며, 절점 14의 z 방향의 좌표값을 변수로 하였다. 즉 후방압출문제에서 변수는 절점 7, 12, 11, 14, 16, 17의 유동함수값이다. 여기서 절점 11, 14, 16의 유동함수값은 같으므로 최적화 변수는 총 4개가 되는 것이다. 그리고 후방압출 문제에서 알맞은 유동양상이 일어나기 위한 구속조건은,

$$\begin{aligned} \phi_3 &< \phi_7 < \phi_{11} \\ \phi_{13} &< \phi_{12} < \phi_{11} \\ \phi_{18} &< \phi_{17} < \phi_{16} \end{aligned}$$

이고, 또한 모든 함수값은 양의 값을 갖는다.

Fig.3에 제시한 본 논문의 초기 공정도 앞서 후방압출의 경우와 마찬가지로, 단지 절점 3, 4, 5에서 마찰손실에 의한 에너지를 계산하는 대신에 전단손실에 의한 에너지를 계산하면 된다.

전·후방 복합압출 문제에서(Fig.4) 절점 3, 5, 8, 9, 10, 13, 18, 20, 23을 포함하는 선에서는 r 방향으로 유동이 없으므로 하나의 유선으로 간주되며 이들 각각의 절점에서 같은 유동함수값을 가지게 된다. 또한 절점 16, 19, 21에서는 r 방향으로 재료유동이 없으므로 같은 미지의 유동함수값을 가지게 된다. 이외에 소재와 펀치가 접하고 있는 절점의 유동함수($\phi_1, \phi_4, \phi_6, \phi_{11}, \phi_{14}, \phi_{15}$)는식(3)으로부터 $\pi \times r^2 \times V_0$ 에 의해서 얻어질 수 있다. 그러므로 변수는 절점 2, 7, 12, 17, 22의 유동함수값과 절점 3, 5, 8, 9, 10, 13, 18, 20, 23에서 같은 유동함수값 그리고 16, 19, 21에서 같은 유동함수값이 된다. 그러므로 최적화 변수는 총 7개가 되는 것이다. 그리고 전·후방 복합압출문제에서 알맞은 유동양상이 일어나기 위한 구속조건은,

$$\begin{aligned} \phi_1 &< \phi_2 < \phi_3 \\ \phi_6 &< \phi_7 < \phi_8 \\ \phi_{18} &< \phi_{17} < \phi_{16} \end{aligned}$$

$$\phi_{23} < \phi_{22} < \phi_{21}$$

이고, 여기서도 마찬가지로 모든 함수값은 양의 값을 갖는다.

3.5 에너지 소비율

상제이론은 한계하중이론(limit load theorem)의 하나로 강소성(rigid-plastic)재료에 대해 Prager, Hodge^[12]에 의해 정립되었는데 완전강소성체의 변형에 관한 가용속도장 중에서 실제 공정에 필요한 에너지율은 유동합수 상계요소법의 경우 다음에 주어진 $\dot{W}_c^*(\psi)$ 값을 최소화 하는 것이다.

$$\dot{W}_c^*(\psi) = \sum_{j=1}^l \{ \dot{W}_{v(\psi)} + \dot{W}_{s_j}(\psi) + \dot{W}_{f_j}(\psi) \} \quad (7)$$

변형영역이 확대칭면을 포함하고 있을 경우 다음과 같다.

$$\dot{W}_c^*(\phi) = \sum_{j=1}^l \{ \dot{W}_{v_j}(\phi) + \dot{W}_{s_j}(\phi) + \dot{W}_{f_j}(\phi) \} \quad (8)$$

l : 요소수

전체 에너지소비율은 유동합수값의 함수가 된다. 즉, 최적화 변수가 유동합수값이 된다. 유동합수값은 양의 값이 되어야 하고, 각 공정에 따라 구속조건이 부과되므로 구속조건이 있는 다변수의 비선형함수를 최적화하는데 사용되는 FTM(Flexible Tolerance Method)^[13]를 이용해서 최적화를 수행한다.(Fig.5)

각각의 에너지 소비율에 관한 항들을 구체적으로 살펴 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_v &= \int_v \sigma_0 \dot{\epsilon} dV \\ \dot{W}_s &= \int_s \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} |\Delta V_s| ds \\ \dot{W}_f &= \int_s \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} |\Delta V_f| ds \end{aligned} \quad (10)$$

내부변형 에너지를 (\dot{W}_v)은 변형률 속도장의 함수이며, σ_0 는 항복응력(yield stress)이고, $\dot{\epsilon}$ 은 유효변형률속도(effective strain rate)이다. \dot{W}_s 은 요소와 요소 사이의 경계에서의 속도 불연속면에서 전단변형에 의한 에너지이며, $|\Delta V_s|$ 는 전단면에서의 속도불연속량을 나타낸다.

\dot{W}_f 는 금형과 소재사이에서의 마찰손실에 의한 에너지이며, $|\Delta V_f|$ 는 소재와 다이 접촉면에서의 속도 불연속량을 나타낸다. 그리고 마찰상수(friction factor) m 은 다음과 같이 정의한다.

$$m = \frac{\tau}{\sigma_0 \sqrt{3}} \quad 0 \leq m \leq 1.0$$

여기서 τ 는 일정하다고 가정하며, 재료의 유동응력을 나타낸다.

4 베어링 레이스 성형실험

베어링 레이스의 각 공정에 있어서 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위해 모델재료인 플라스틱으로 시편을 제작하여 실험을 수행하였다.

시편은 재료의 유동양상을 관찰하기 위하여 흑색과 백색 두가지 색깔로 각각 반죽한 뒤 얇은 두께로 번갈아 가며 적층하여 초기 소재를 만들었다. 플라스틱을 반죽하는 횟수가 적으면 재료내에 기포가 남아있어 정확한 유동양상을 관찰하기가 힘들고 가공도중 찢어지는 경향이 있으므로 충분히 기포가 제거되도록 먼저 오븐(Mechanical circulation oven)에서 80°C로 플라스틱을 가열하여 2~3시간 반죽해야 한다. 그리고나서 재료를 얇게 밀어내어 적층하고 24시간 정도 지난 뒤에 실험을 해야 적합한 데이터를 얻을 수 있다. 실험장비는 컴퓨터로 제어 가능한 재료시험기인 MTS에서 실험 하였고, MTS에 부착된 X-Y 레코더로 변위에 따른 하중선도를 그리도록 하였다. 실험 중 금형과 소재의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 항온항습장치를 이용하여 실내온도를 18°C로 유지하고 윤활제는 분리가 용이한 탈크 파우더(m=0.4)를 사용하여 실험을 수행하였다.

Fig.2는 KOMATSU사에 의해 제안된 일반적인 후방압출의 경우 업셋팅에 의한 예비성형체를 후방압출하는 공정이다. 예비성형체로 부터 후방압출했을때 유동양상을 모델재료인 플라스틱인 실험으로 보여주고 있다. 펀치의 가장자리 부분에서 급격한 유동의 변화를 알 수 있다.

Fig.3은 본 논문에서 제시한 후방압출인데 여기서는 초기 업셋팅 공정에서 밀부분이 성형된 상태에서 후방압출하는 공정이다. 따라서 펀치의 이동 거리가 짧아서 실제 공정에서 펀치의 삽입 깊이가 작으므로 전도에 의한 열전달을 어느정도 감소시킬 수 있고, 초기에 비유동영역의 형성으로 하중의 분산을 기대할 수 있다. 다음으로 Fig.4는 슬러그(slug)를 피어싱한 후 전·후방 복합압출을 수행하여 베어링의 안쪽, 바깥쪽 레이스를 성형하는 공정이다. 플라스틱의 적층을 통해 유동양상을 쉽게 예측할 수 있으며, 전단면이 블랭킹(Blanking)되는 순간까지 유선이 남아 있음을 알 수 있다.

5 결과 및 고찰

베어링 레이스의 성형 공정에서 업셋팅으로 인한 잇점을 살펴 보면 먼저 산화스케일의 제거가 용이하고, 부하를 분산시킬 수 있으며, 또한 형상을 고르게 할 수 있다. 그런점에서 WANG ZUTANG^[6]등에 의해 제안된 안쪽 레이스(Inner race) 부분을 편칭과 동시에 성형하는 방법은 공정수를 줄이고 다음 단계에서 작업을 용이하게 하여 생산시간과 금형비를 절감할 수 있다는 장점은 있으나, 업셋팅 공정을 생략함으로써 하중의 분산이 고르지 못하고 산화스케일의 제거가 용이하지 못하다.(Fig.1a) 일본의 KOMATSU사에 의해 제안된 방법^[5]은 유동합수 상계요소법으로 시뮬레이션한 결과 예상했듯이 펀치의 가장자리 부분에서 유동과 속도벡터의 방향이 급격히 변화하여 극심한 마모가 예상되며 응력집중도 발생함을 알 수 있다.(Fig.2) Fig.7에서는 변위에 따른 하중분포를 실험과 비교하여 상계요소법과 유동합수 상계요소법으로 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. 유동합수 상계요소법이 실험값에 더 가까운 해를 나타내고 있음을 알

수 있다. 그리고 본 논문에서 제시한 초기 업셋팅 공정에서 밀 부분이 성형된 상태에서 후방압출하는 공정에서는 우선 예비성형체의 편심을 줄일 수 있고, 두번째 단계에서 편치의 삽입 깊이를 줄여서 전도에 의한 열의 이동을 감소시킬 수 있으며, 또한 밀부분이 성형 초기단계에 비유동영역이 되어 하중을 어느 정도 분산시켰다. Fig.3에 나타낸바와 같이 유선과 속도벡터가 상당히 완만함을 알 수 있다. Fig.8은 그에 해당하는 변위에 따른 하중 분포를 나타낸 것이다. Fig.9은 KOMATSU사에 의해 제안된 방법과 본 논문에서 제안한 것의 변위에 따른 압출하중을 비교한 것인데, 본 논문에서 제시한 것이 편치의 이송거리가 짧고, 압출하중이 다소 적게 부과되는 것을 알 수 있다. 롯트 사이즈(Lot size)가 적은 경우 별 차이가 없었지만, 많은 경우, 하중이 조금 적게 부과되는 것이 편치의 마모와 수명에 상당한 영향을 미칠 것이다.

다음으로 슬러그를 피어싱한 후 전·후방 복합압출을 수행하여 베어링의 안쪽, 바깥쪽 레이스를 성형하는 공정을 유동함수 상계요소법으로 시뮬레이션한 결과 특이한 사실을 발견하였다. 첫째로 링 빌렛의 전·후방 압출동안 유동양상과 중립면의 위치를 유선으로 부터 쉽게 예측할 수 있었다.(Fig.4) 둘째로 변위에 따른 하중분포선도에서 높이감소를 50%를 전후하여 급격히 하중이 떨어짐을 알 수 있다.(Fig.10) 이것은 Fig.11에서 보듯이 요소 ②와 ③에서 전단 영역이 급격히 줄어들기 때문이다. 마지막으로 이러한 링 빌렛의 전·후방 압출동안 중립면과 속도불연속면이 같다고 생각하기 쉬우나, 속도벡터(velocity vector)와 유선으로 부터 다른 위치임을 확인할 수 있었다.

6 결론

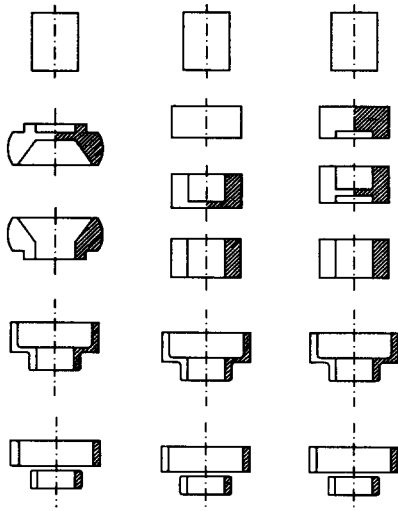
본 연구에서는 베어링 레이스의 온간성형에서 금형수명을 증가시키고, 전도에 의한 열전달을 줄이고, 예비성형체의 편심을 줄이기 위해 초기 업셋팅 공정에서 밀부분을 성형하여 후방압출하고 나서, 슬러그를 피어싱한 후 전·후방 복합압출을 수행하여 베어링 레이스 성형을 위한 최적의 공정을 설계하였다. 또한 유동함수 상계요소법으로 시뮬레이션하여 쉽게 유동양상과 성형에 필요한 하중을 예측하였는데 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공정수를 줄이는 것 보다 하중의 분산을 고르게 하는 것이 금형의 수명을 증가시킬 수 있다.
- 2) 편치의 삽입 깊이를 최소로 하고 금속유동을 원활히 하는 것이 편치의 마모를 줄이고 보다 나은 공정설계를 알 수 있었다.
- 3) 유동함수를 이용함으로써 재료의 유동을 보다 쉽게 시각화할 수 있었다.
- 4) 유동함수 상계요소법 이론을 압출문제에 적용하여 상계요소법과 비교하여 실험값에 더 근접한 상계해를 얻음으로써 그 타당성을 입증 하였다.
- 5) 상계요소법이 직사각형과 직각삼각형으로 해석의 편의를 위해 동적 가용속도장을 구성하는 반면 유동함수 상계요소법은 속도 불연속면을 경계로 일반화된 속도장을 구성하므로 상계요소법의 속도장 구성의 어려움을 개선하였다. 따라서

최소 변형에너지 이론으로 부터 상계요소법 보다 더 낮은 상계해를 기대할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

1. S. Shejkskov, " Warm Forging in Comparison with Hot and Cold Forging" . Advanced Technology of Plasticity, Vol II, pp. 1082~1087, 1993
2. 安藤 弘行, " 温間 鍛造 技術 における 現況 の 問題點 " 株式会社小松製作所
3. 湯淺紋二と 岡本 治郎, " 温間鍛造用金型の 壽命 に対する フレスライドモーションの影響についての考察 ", 小松 技術, 第 26卷 第1號, pp.35~45, 1980
4. 田村 清, " 冷·温間鍛造 における 潤滑劑 の 役割 ", フレス 技術, 第 27卷, 第 8號, pp.25~30, 1990
5. KOMATSU LTD. 温間 鍛造 研究 報告書 Volume I, II, III
6. Z. Wang, G. Chen, L. Tong and Z. Hu, " An Investigation into Optimal Procedure for the Forming of Roller-Bearing Races" , Journal of Materials Processing Technology, Vol.21, pp.263~269, 1990
7. Sano, T., Ohuchi, K., " An Application of Stream Function to UBET(Upper Bound Element Technique) ", Journal of the JSTP , Vol. 32, No. 367, pp.988~993, 1991
8. Y. T. Lin and J. P. Wang, " A New Upper-Bound Elemental Technique Approach to Axisymmetric Metal Forming Processes ", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 33, Mo. 2, pp.135~151, 1993
9. Y. T. Lin and J. P. Wang, " An investigation into the constant friction factor with the upper-bound flow function elemental technique ", Journal of Materials Processing Technology, Vol.36, pp.57~68, 1992
10. Y. T. Lin and J. P. Wang, " A thermal analysis of cold upsetting with the upper-bound flow function elemental technique ", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 37, pp.283~294, 1993
11. V. Nagpal, "General Kinematically Admissible Velocity Fields for Some Axisymmetric Metal Forming Problems", Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Series B, Vol. 96, No. 4, pp. 1197~1201, 1974
12. W.Proger and P.G.Hodge, " Theory of Perfectly Plastic Solid ", Chapman and Hall, London, 1951
13. D. M. Himmelblau, " Applied Nonlinear Programming ", McGraw-Hill Book Company, pp.341~365, 1972



(a) WANG (b) KOMATSU (c) developed process
 Fig.1 Comparison between previous process and developed process for bearing race forming

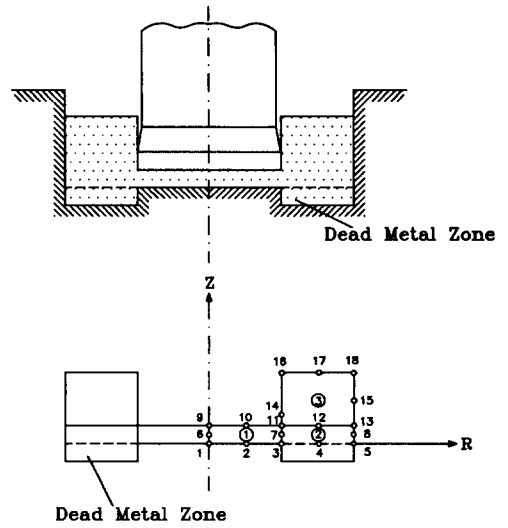


Fig.2 Backward extrusion by KOMATSU's process

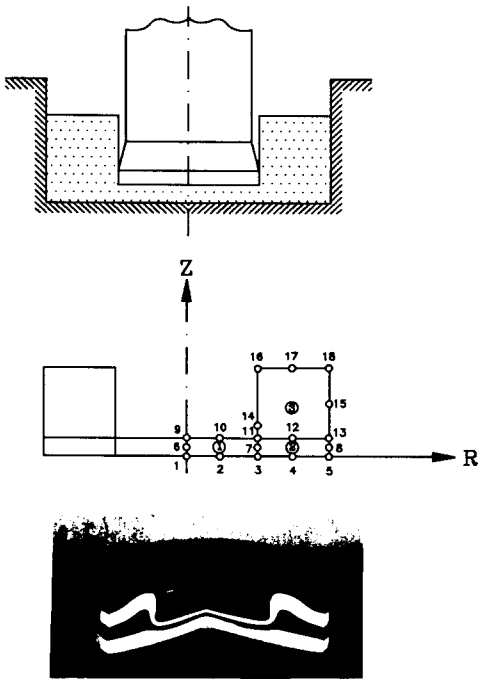


Fig.3 Backward extrusion by developed process

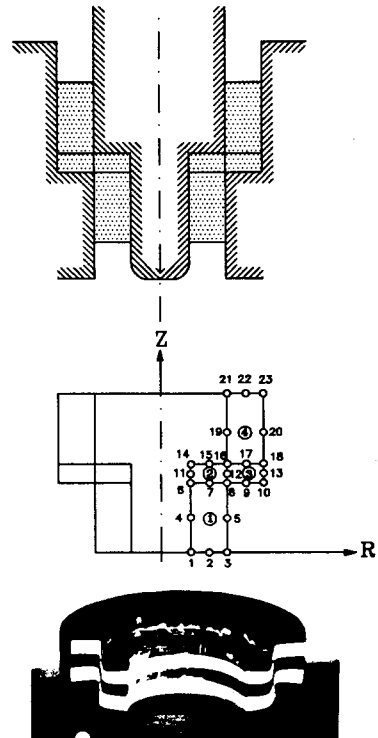


Fig.4 Combined extrusion

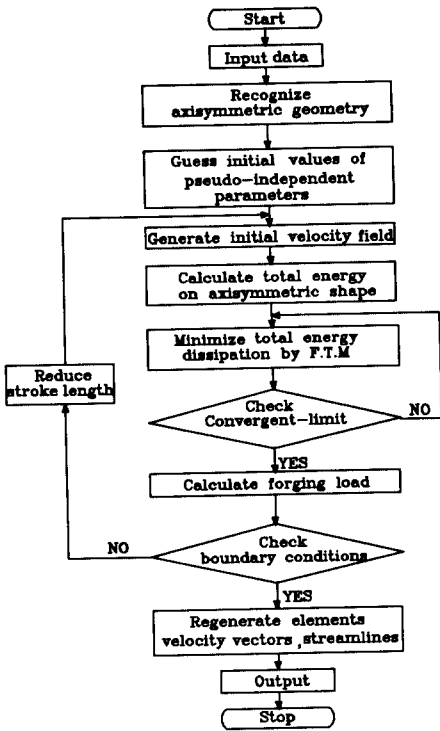


Fig.5 Flow chart for UBST simulation

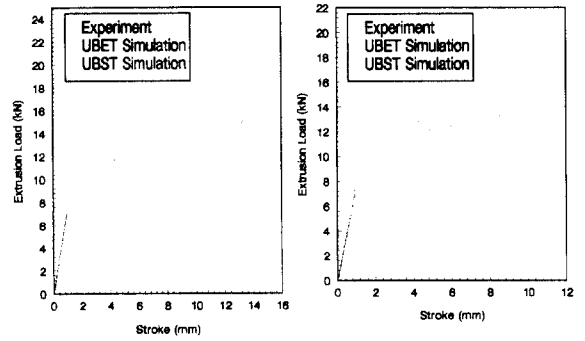


Fig.7 Extrusion load-stroke curves by KOMATSU's process

Fig.8 Extrusion load-stroke curves by developed process

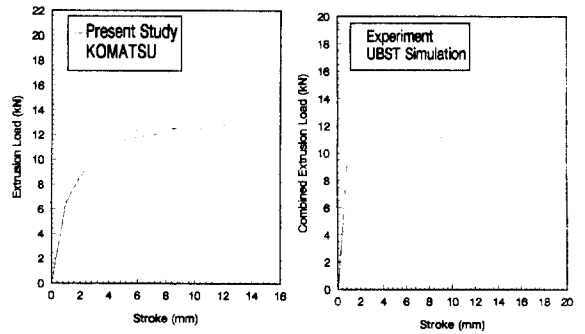


Fig.9 Comparison of extrusion load between KOMATSU's and developed processes

Fig.10 Extrusion load-stroke curves in combined extrusion

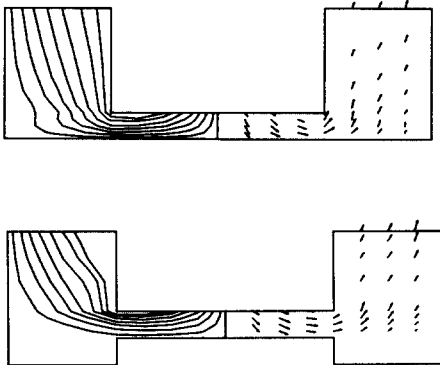


Fig.6 Comparison of streamlines and velocity vector distributions between KOMATSU's and developed processes

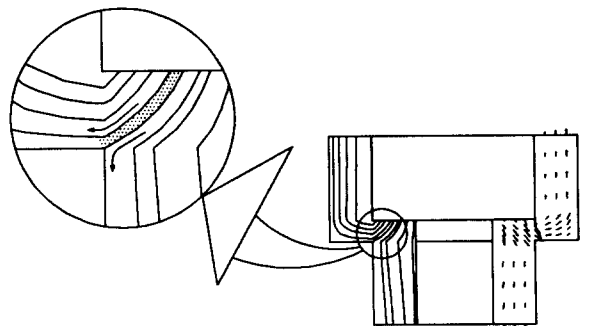


Fig.11 Streamlines and velocity-vector distribution in combined extrusion