벌크 아몰퍼스 성형의 유한요소 해석

윤상헌 * · 고헌권* · 김용일 * · 이용신 **

Finite Element Analysis for forming of bulk amorphous materials

S-H Yoon, H-K Go, Y-I Kim, and Y-S Lee

Key Words : Amorphous alloy(아몰퍼스합금), Sheet forming(판재성형), Compression(압축성형), Finite Element Method (유한요소법)

Abstract

The purpose of this study is to clarify the bulk/sheet forming characteristics of bulk amorphous alloys in the supercooled liquid state. The temperature dependences of Newtonian viscosities of amorphous materials are obtained based on the previous experimental works. Finite element analyses for compression forming and sheet deep drawing of amorphous materials are performed. Effects of friction coefficients and temperature are examined and formability of amorphous material is explained in detail.

1. 서 론

최근의 전자 제품, 통신 제품 및 정밀의료 제품의 부품들은 다기능을 갖으며 소형화되는 추세이다. 이에 부품들은 복잡한 형상에 초고기능, 초정밀도를 요구하며 초고강도의 재료로 만들어진다. 이러한 부품들의 생산에는 MEMS 또는 나노생산 기술 등의 새로운 생산기술이 개발되고 있으나, 고비용을 요하여 실용화에는 많은 문제점을 내포하고 있다. 한편 기존의 공학재료를 이용하여 전통적인 소성가공기술로 생산되는 소형 부품들은 강도 및 정밀도에 한계를 갖는다. 일례로 Fig. 1 에서 보여지는 바와같이 마이크론 또는 나노 단위의 다이로 다결정재를 성형을 할 경우, 다이의 폭에 비해 소재의 결정립이 충분히 작으면 다이 형상과 유사한 형상으로 성형되나 결정립이 커지면 원하는 형태로 성형이 이루어지지 않는다. 더불어 결정립의 크기가 표면 조도를 좌우하여 유리와 같은 매끄러운 표면을 얻을 수 없게한다. 이는 초정밀부품 또는 마이크로 단위의 소형부품을 생산함에 있어 결정립의 크기 및 방향, 가공경화 등의 문제가 초정밀 표면 또는 초정밀 성형에 한계를 야기 시킨는 것을 의미한다. 이에 가공비용이 저렴한 전통적인 생산기술로도 생산 가능하도록 우수한 성형성을 갖춘 소재의 개발이 연구의 핵심이 되어왔다.

아몰퍼스 합금은 원자 배열이 무질서하여 결정질 금속에 내재하는 미끄럼 면이나 경계면이 없어 등방위체이고, 가공경화가 거의 없는 완전 탄소성체이다. 특히 과냉액체상태 (Supercooled liquid state)에서 결정립에 의한 변형의 제한이 없이 완전 뉴토니안 점성유동으로 정밀표면의 성형을 가능케하는 우수한 성형성을 갖는다 (Fig.2 참조).

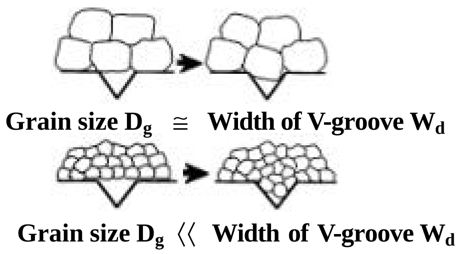

Fig. 1 Deformation mechanism and microformability of superplastic alloy of polycrystalline aggregates

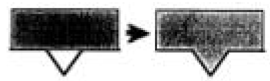

Fig. 2 Deformation mechanism and microformability of amorphous alloy in the supercooled liquid state

* 국민대학교 기계설계학과
** 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail : yslee@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-4677 FAX : (02)910-4839

또한 과거 비정질 합금은 급냉응고법에 의해 제조되어 벌크 상태로의 응용은 거의 없었다. 하지만 최근 분말 합체에 의한 벌크 비정질 합금 제조 기술의 발전과 단순 응고 법에 의해 벌크 상태로 제조될 수 있는 새로운 비정질 합금 개발로 벌크 비정질 합금의 응용은 앞으로 크게 확대될 전망이다. 이에 본 연구에서는 벌크 아몰퍼스 소재의 대변형 성형 해석 기술을 개발하고자 한다.

아몰퍼스 합금을 이용한 성형가공에서는 온도에 따른 점성변화와 온도가 유동형태의 변화에 미치는 영향, 유동형태에 마찰이 미치는 영향이 성형의 성공여부를 좌우하는 중요한 요인으로 대두하게 된다. 아몰퍼스 소재 점성유동의 수치해석을 확립하고, 온도 변화에 따른 점성변화와 유동형태의 변화, 마찰이 성형에 미치는 영향을 조사한다

2. 아몰퍼스 물성 고찰

2.1 과거 연구의 요약

아몰퍼스 합금의 과냉 액체 상태에서의 완전 탄소성, 완전 뉴토니안 점성유동특성을 모사하는 모델링 및 성형에 관련한 과거의 연구를 조사 요약한다.

Y. Saotome 와 동료 연구자들은 Al-78Zn 초소성 소재을 사용하여 변형률속도 민감도 지수 0.5 인 소재로 밀리성형을 연구하였다. V-굴곡 다이를 이용한 성형성 실험을 수행하여 다이의 폭과 결정립의 크기에 따른 성형특성을 조사하였다. 결정립 크기와 다이 폭의 관계에 따라 다이에 성형되는 정도가 달라짐을 실험으로부터 확인하였다. 그들은 변형 메커니즘은 결정립 경계 미끄러짐(grain boundary sliding)과 결정립 회전(grain rotation)을 포함하게 됨을 확인하였다. Al-78Zn 과 같은 초소성재는 다이 형상에 따라 표면 거칠기, 다결정구조, 결정립 크기의 인자들이 미세 성형에 제한사항으로 나타남을 확인하였다. Al-78Zn 초소성소재와 $Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$, $La_{55}Al_{25}Ni_{20}$, $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ 아몰퍼스소재의 V-굴곡 다이 성형 실험을 통하여 슈퍼플라스틱 합금은 성형성에 있어 결정립의 크기와 회전이 다이의 크기, 폭과의 상관관계를 나타내는 데 비해, 아몰퍼스 합금은 결정립의 성형의존성을 고려하지 않아도 되는 우수한 미세 성형성이 보임을 나타내었다. 또한 아몰퍼스 합금이 완전 뉴토니안 점성유동을 나타내는 변형을 민감도 지수가 1 임을 보였고, 수직점성계수(normal viscosity, m_n) 가 온도 의존성을 Andrade 식으로 나타냈다. 초소성 기술로 미세 후방압출, 전방압출, 단조를 통하여 차세대 소재인 아몰퍼스 합금으로 낮은 응력하에서 초미세 성형을 성공적으로 수행하였다.

A. Inoue 연구그룹은 부식 저항이 좋고 낮은 열팽창계수를 갖는 Zr-based alloy 의 점성유동을 설명하고, 성형공정의 최적상태를 얻기 위한 기초를 조사하였다. 압축상태에서 상대변위는 비정질 상태에 의존한다. 유효 점성계수는 온도가 증가할수록 평탄하게 감소함을 보였고, 750K 에서 765K 사이의 온도에서 가 일정해 지는 구간을 가짐을 보여 최적의 작업 온도를 이 구간으로 예상하였다.

Kawamura 등은 Zr-base BMG의 기계적 물성을 조사하여 $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$ 의 열기계학적 물성이 각각의 온도별 풀림 열처리를 통해 온도가 높아질수록 탄성계수와 경도 증가와 열팽창계수 감소함을 보였다.

Willian L. Johnson 연구그룹은 일정 온도 내에서 변형율속도의 증가가 국부적 공간에서 극도로 불안정하고 비 뉴토니안 유동를 일으킴을 Vogel - Fulcher - Tamann (VFT) equation 으로 설명하였다.

2.2 뉴토니안 점성 물성계수

본 연구에서는 과거의 연구로부터 Pd-계열 아몰퍼스 소재 ($Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$) 와 Zr-계열 아몰퍼스 소재 ($Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$)의 점성계수를 조사 정리하였다. 먼저 Pd-계열 아몰퍼스 소재의 일축인장 실험에서 축방향 진응력과 축방향 진변형률 속도 관계를 Fig. 3 에 나타내었다. 응력과 변형률 속도는 완전 선형을 유지하며 과냉액상온도 구간은 577K에서 673K까지 약 96K 정도이다. △Tx 구간에서의 수직점성계수의 온도에 따른 변화는 Andrade 식을 가정하였다.

$$\mu_n = ? \times ?xp(?/?) \quad (1)$$

최소자승법에 의해 구한 물성계수는 $A = 5.5e^{-3}$ 이고 $B = 2.14e^4$ 이다. Pd-계열 아몰퍼스 소재의 수직점성계수의 온도의존성은 Fig. 4에 주어진다.

Zr- 계열 아몰퍼스 소재에 대하여 얻은 과냉액상온도 구간은 682K 에서 767K 까지 약 85K 정도로 나타났다 (Fig. 5). 그림에서 보이는 바와 같이 응력과 변형률 속도는 완전 선형관계를 보이고 있다. Tx 구간에서의 점성계수의 온도에 따른 변화를 정의하는 Andrade 식의 Zr-계열 아몰퍼스 소재의 상수들은 $A = 1.0e^{-3}$ 이고 $B = 2.7e^4$ 이다.

과거 연구의 결과 분석에 의하면 아몰퍼스 소재는 △ Tx 내에서는 완전한 뉴토니안 점성을 갖으므로 △Tx 구간에서의 변형에 대한 구성방정식은 다음과 같이 모사 할 수 있다.

$$s_{ij} = 2m_s dij' + l\, d_{kk} d_{ij} \quad (2)$$

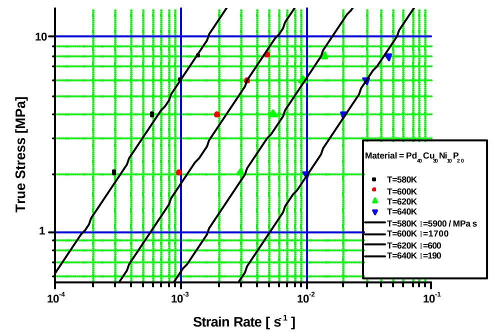

Fig. 3 Characteristic flow curves in the supercooled liquid state ($Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$)

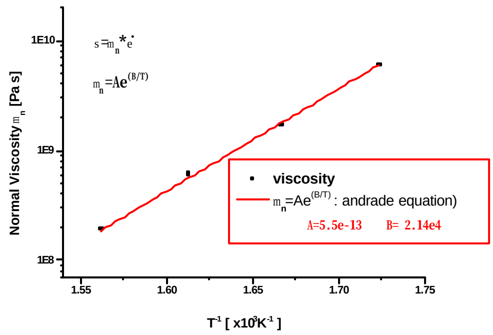

Fig. 4 Temperature dependence of normal vis cosity in the supercooled liquid state ($Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$)

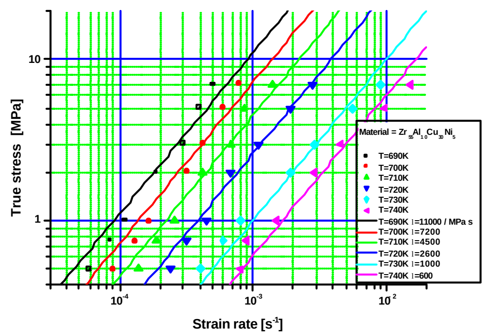

Fig. 5 Characteristic flow curves in the supercooled liquid state ($Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$)

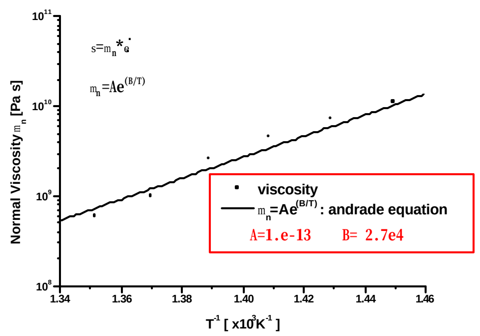

Fig. 6 Temperature dependence of normal viscosity in the supercooled state ($Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$)

위 식에서 전단점성계수 m_s 는 아몰퍼스 소재의 뉴토니안 유동의 경우에는 변형률 속도에는 무관한 상수이나 온도의존성을 갖는다.

과거 연구를 조사 분석하여 얻은 수직점성계수와 유한요소해석에 쓰이는 식(2) 의 전단점성계수와의 관계는 $m_n = 3m_s$ 로 유도 되어진다.

3. 축대칭 압축 성형해석

아몰퍼스 합금의 완전 탄소성, 완전 뉴토니안 점성유동특성을 나타내는 과냉액상을 유지할 경우에 대변형 특성을 이해하기 위하여 축대칭 압축 성형 공정을 시뮬레이션한다. Fig. 7 에 축대칭 압축성형의 개략도와 유한요소격자가 주어진다. 축대칭 압축성형은 간단한 성형공정이면서도 압축변형과 전단변형이 복합되어 있으며 마찰의 크기에 따라 다양한 형태의 변형을 관찰할 수 있게 한다. 펀치의 압축속도는 소재의 평균적 변형율 속도가 10^{-2}(1/s)에서 10^{-3}(1/s)정도가 되도록 10^{-3}(mm/s) 를 유지하며 20%, 40%의 압축을 해석에서 고려하였다. 공정변수로는 먼저 마찰계수를 선정하여 다이와 접촉하는 바닥면은 완전접착을 만들고 반면에 펀치와 접촉하는 윗면은 마찰계수가 영 ($m_f = 0$)인 경우로부터 완전접착(Sticking, $m_f = 1.0$)경우까지를 고려하여 성형특성을 조사하고자 하였다. 반경과 높이의 비는 1, 3, 5로 변화시켰다. 단 Zr-아몰퍼스의 열물성 및 밀도는 앞에서 조사한 재료와 조성이 다른 $Zr_{41.2}Ti_{12.1}Be_{22.5}Cu_{12.5}Ni$ 의 값을 사용하였으며, 표면에서 열손실없는 단열조건(adiabetic condition)을 가정하여 최대의 온도 증가를 조사하였다.

Table. 1 Material properties

	Zr - BMG	Superplastic Aluminum
Young' s Modulus[Pa]	1e+16	69e+9
Poisson' s ratio	0.33	0.33
Constitutive eqn	$s = k^{A} \cdot e_e^{0} \cdot \dot{e}_e^{1}$	$s = k^{Al} \cdot e_e^{0.2} \cdot \dot{e}_e^{0.3}$
Thermal expansion coefficient [1/ K]	1.01e-05	2.36e-5
Specific heat [J/kg-sec]	746	900
Density [kg/m3]	6100	2705
Conductivity [J/m-sec-K]	2.1	231

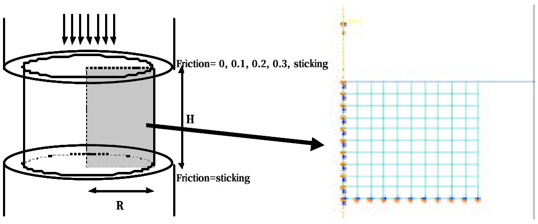

Fig. 7 Schematic of Axisymmetric Compression

Fig. 8 에는 마찰계수에 변화에 따른 옆면의 형상을 비교하고 있다. 첫 번째 주시할 점은 펀치와 접촉하는 면에서 마찰계수의 변화에 따른 변형의 차이이다. 마찰계수가 0.3 에 이르기까지에는 옆면의 형상이 크게 변하지 않는 것이다. 이것은 아몰퍼스 소재가 일반의 공학재료보다 마찰계수의 영향을 적게 받는다는 것을 의미한다. 두 번째는 고착경계모서리에서 변형된 소재의 각도이다. 보통의 공학재료는 고착경계에서 큰 전단변형이 발생하여 소재 모서리의 둔각이 굉장히 커지나 아몰퍼스 소재의 경우에는 둔각의 크기가 120°정도로 예측되고 있다. 이것은 고착경계에 의해 큰 전단변형이 예측되는 곳에서도 아몰퍼스 소재는 일반 공학재료보다 전단변형의 국부화 또는 응력집중이 작게 발생한다는 것을 의미한다

Fig. 9 에서는 높이와 반경의 비 H/R=1, 3, 5 인 경우에 전단변형률 분포의 비교를 각각 보여주고 있다. 형상비(H/R)가 커짐에 따라 마찰계수의 영향이 보다 작아지는 경향을 확인시켜 주고 있다.

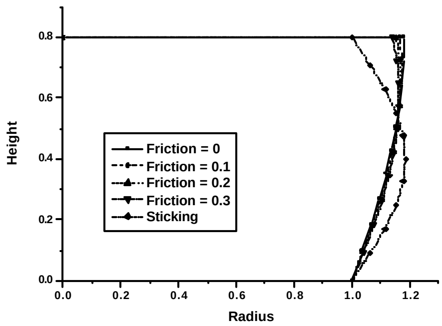

Fig. 8 Side Profile in Deformed Shape (H/R=1)

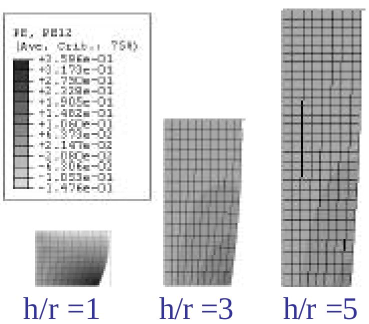

Fig. 9 Distribution of Shear Strain (H/R=1, 3, 5)

Fig. 10 에는 40% 압축된 Zr-계열 아몰퍼스 봉과 초소성 알루미늄 봉의 전단변형률 분포를 보여주고 있다. 펀치와 접촉하는 면에서의 마찰계수가 증가함에 따라 초소성 알루미늄 봉의 전단변형률 분포는 아몰퍼스 봉에 비하여 국부화가 빨리 진행되는 경향을 보여주고 있다. 즉 국부적으로 전단변형률 변화가 커서 초소성 알루미늄 봉의 경우에 성형의 진행이 먼저 제한될 것으로 예측된다.

변형된 봉의 옆면 형상을 비교하여 보면 알루미늄 봉이 마찰계수의 영향을 보다 크게 받는 것을 알 수 있다. 펀치와 접촉하는 윗면의 모서리각의 크기는 마찰계수가 증가함에 따라 커지는데 알루미늄 봉의 모서리각이 더 빨리 커지며 고착접촉의 경우에 두 소재의 모서리각 차이가 최대가 되는 것을 보여주고 있다. 이러한 경향으로부터 Zr-계열 아몰퍼스 봉이 초소성 알루미늄 봉보다 마찰계수의 영향을 적게 받으며, 전반적으로 Zr-계열 아몰퍼스 봉의 성형성이 초소성 알루미늄 봉의 성형성 보다 나은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10 Distribution of Shear Strain

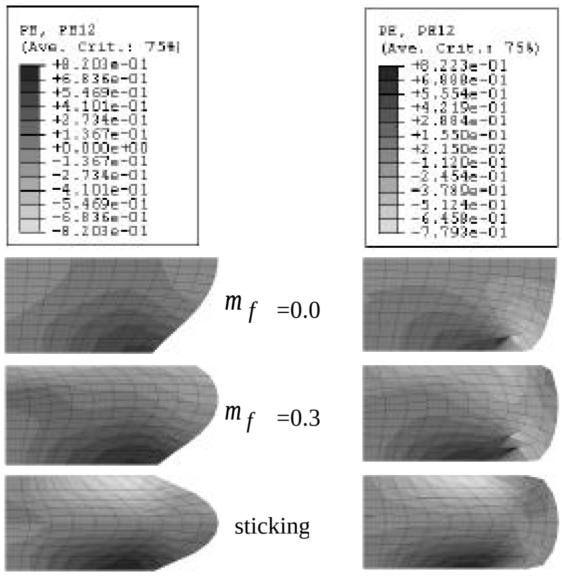

Fig. 11~12 는 온도증가분포를 보여주고 있다. 알루미늄 소재의 평균적 온도증가는 아몰퍼스 소재의 온도 증가보다 매우 크지만 공간적인 온도분포는 작은 것을 보여주고 있다. 알루미늄의 경우 소재의 크기가 작으며 압축성형 중에 열발산을 일으키는 성형속도보다 열전달 속도가 빠른 것에 기인하는 것으로 추측된다. 아몰퍼스 소재의 온도 증가량은 알루미늄 온도증가의 1/100 정도이나 온도분포가 있는 것을 보여주고 있다. 이는 아몰퍼스 소재의 유동응력이 일반공학소재보다 매우 작아도, 열전도율 또한 작은 것에 기인한다.

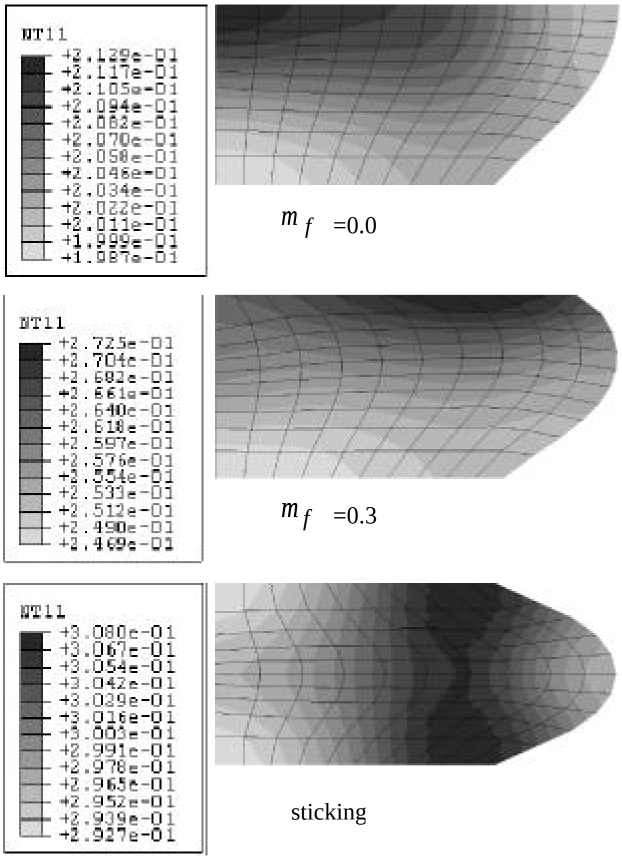

Fig. 11 Distribution of Temperature of Amorphous material

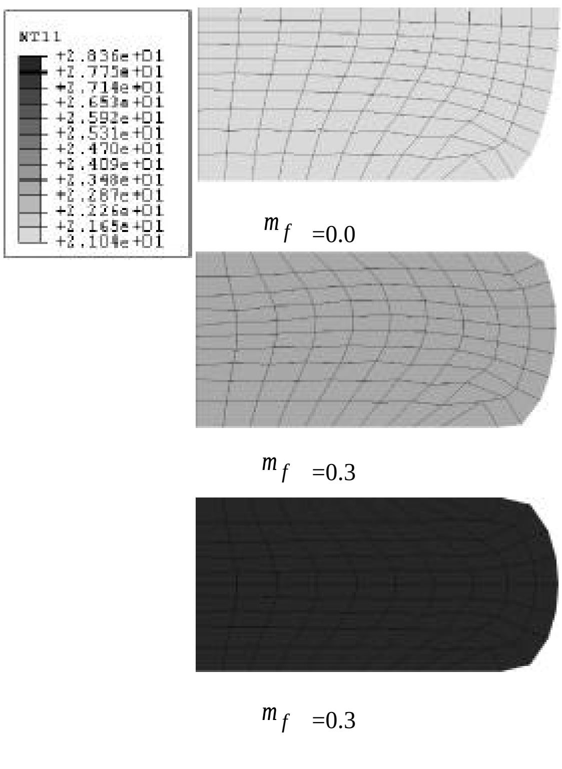

Fig. 12 Distribution of Temperature of Superplastic material

이러한 예측이 시사하는 바는 매우 중요하다. 일반적으로 지금까지 개발된 아몰퍼스 소재의 가장 큰 약점은 과냉액상온도구간 즉 △Tx 가 매우 좁다는 것이다. 만약에 성형중인 소재가 소성일 발산에 의해 온도가 △Tx 구간을 벗어나게 한다면 결정화가 진행되어 뉴토니안 점성 특성을 잃게 된다. 그러나 본 연구의 시뮬레이션에 의하면 40% 압축된 아몰퍼스 소재의 온도 증가는 매우 미미한 것으로 예측되어, 국부적인 온도증가 분포의 영향이 적어, 추후의 공정개발에서 소성일 발산에 의한 온도 증가가 공정을 제한하는 것은 드물 것으로 기대된다. 물론 위의 두 결론은 잠정적인 것으로 다양한 크기의 소재를 갖고 다양한 공정조건에 대하여 실험과 시뮬레이션을 통하여 결과를 재확인 하여야한다.

4. 딮 드로잉 성형해석

벌크 아몰퍼스 판재에 단을 갖는 펀치와 다이를 이용한 딮 드로잉 공정을 시뮬레이션하였다. 드로잉 개략도와 유한요소격자는 Fig. 13 에 주어진다.

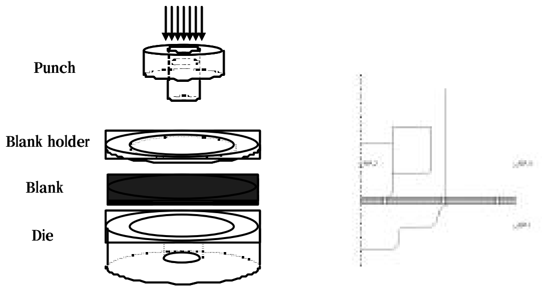

Fig. 13 Schematic and Finite Element Mesh of Multi-head Punch Deep Drawing

Fig. 14~15는 2 단 펀치 딮 드로잉이 진행되는 동안에 판재의 형상변화를 보여주고 있다. 통상적으로 두개의 단이 있는 경우에는 딮 드로잉이 두 단계의 공정으로 이루어진다. 본 연구에서는 성형성이 매우 우수한 벌크 아몰퍼스 판재를 대상으로 하기에 먼저 두 개의 펀치 헤드를 일체형으로 만들어 한번의 딮 드로잉으로 최종 형상을 얻는 공정과 두 개의 펀치 헤드 중 안쪽의 헤드를 먼저 드로잉한 후 바깥쪽의 헤드를 딥드로잉하는 2 단 딮드로잉을 시뮬레이션하였다. 블랭크와 다이 사이의 간격을 판재의 두께인 1㎜ 로 유지하도록 구속하였다. 이에 판재의 드로잉보다는 스트래칭, 굽힘과 펴짐, 전단 등이 보다 쉽게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 2 단 딮 드로잉을 하는 경우에서 일체형 펀치로 딮 드로잉을 하는 경우보다 굴곡부에서 두께변화 등이 적게 나타나는 경향을 보였다.

두 경우 모두 다이 바닥 모서리 굴곡부에는 소재가 미미하게 채워지지 않은 것이 보여진다. 일체형 펀치를 이용한 한번의 딮드로잉으로도 이중 굴곡을 얻을 있을 것으로 보아 상당히 우수한 아몰퍼스 재의 성형성을 예측하게 한다.

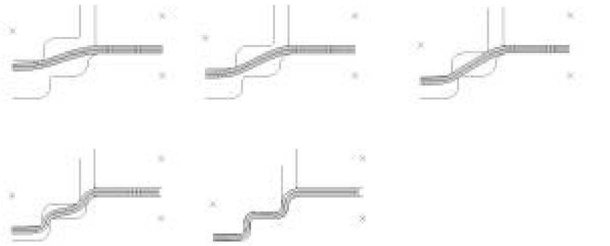

Fig. 14 Deformation during Multi-Head Punch Deep Drawing

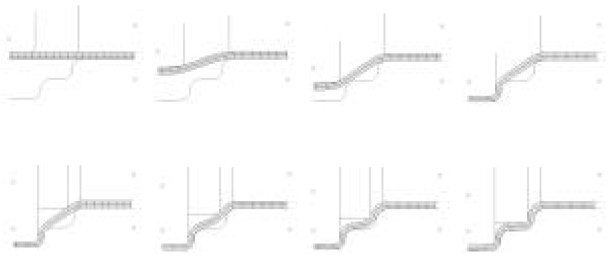

Fig. 15 Deformation during Multi-Head Punch Deep Drawing

5. 결론

벌크 아몰퍼스 소재의 대변형 압축성형 해석 기술 확립을 목적으로 물성모델 연구와 온도에 따른 점성의 변화, 마찰, 온도 및 기타 공정변수의 영향을 축대칭 압축성형 해석을 통하여 조사하고 축대칭 딮 드로잉 공정의 해석을 시도하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) Pd-계열 $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ 와 Zr-계열 $Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$ 점성계수의 과냉액상구간에서 온도 의존성을 Andrade 식 $\mu_n = ? \times ?xp(?/?)$ 으로 가정하였다. Pd-계열 $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ 의 상수는. $A = 5.5e^{-3}$, $B = 2.14e^4$ 이고, $Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$ 의 상수는 $A = 1.0e^{-3}$ 이고 $B = 2.7e^4$ 으로 주어진다.

(2) 축대칭 압축성형의 유한요소해석은 아몰퍼스 소재가 일반의 공학재료보다 마찰계수의 영향을 적게 받는다는 것을 예측하였다. 특히 고착경계(Sticking) 모서리 근처에서도 일반 공학재료보다 전단변형의 국부화 또는 응력집중이 작게 발생한다는 것을 예측하여, 아몰퍼스 소재의 우수한 성형성을 확인하였다. 유한요소해석은 높이와 반경의 비(H/R)가 커짐에 따라 마찰계수의 영향이 더욱 작아지는 경향을 보여주었다.

(3) 아몰퍼스 소재의 성형에서는 소성일 발산과 열전달에 의한 온도분포가 성형성에 미치는 영향보다는 온도 변화에 따른 점성계수의 변화가 성형성에 미치는 영향이 클 것으로 예측되었다. 따라서 소성일 발산에 의한 온도 증가가 공정을 제한하는 것은 드물 것으로 기대된다.

(4) 벌크 아몰퍼스 소재의 축대칭 딮 드로잉 성형의 유한요소해석은 판재의 플랜지 부분 두께를 일정하도록 구속할 경우에 판재가 다이 안쪽으로 이동하는 드로잉보다는 스트래칭, 굽힘과 펴짐, 전단 등이 보다 쉽게 일어나는 것을 예측하였다.

참고문헌

(1) Y. Saotome, A. Itoh and S. Amada, 1993, "Superplastic Micro Forming of Double Gear for Milli-machines", *Advanced Technology of Plasticity,* Proceeding of the Fouth International Conference on Technology of Plasticity.

(2) Y. Saotome, H. Iwazaki, 2000, "Superplastic Extrusion of Microgear Shaft of 10 ㎛ in Module", *Microsystem Technologies*, Vol. 6, pp. 126~129

(3) Yasunori Saotome, Akihisa Inoue, 2000, "New Amorphous Alloys as Micromaterials and the Processing Thchnologies", *The 13th Annual Int. Conf. on MicroElectroMechanicalSystems*, pp. 288-292.

(4) Yasunori Saotome, 1997, "Microforming and Fabrication of Micromachines with Amorphous Alloys", *Proc. The 3rd Int. Micromachine Symposium*.

(5) William L. Johnson, 1996, "Bulk Metallic Glasses - A new Engineering Material", *Current Opinion in Solid State & Materials Science*.

(6) M. L. Vaillant, V. Keryvin, T. Rouxel, Y. Kawamura, 2002, "Changes in the Mechanical Properties of a Zr55Cu30Al10Ni5 Bulk Metallic Glass due to Heat Treatments below 540. C", *Scripta Materialia*, Vol. 47, pp. 19~23.