

열간성형공정에서 벌크 아몰퍼스 소재의 변형거동

이용신[#]

(2004년 8월 18일 접수)

Deformation Behavior of Bulk Amorphous Alloys During Hot Forming Process

Yong-Shin Lee

Abstract

The purpose of this study is to examine the bulk/sheet forming characteristics of bulk amorphous alloys in the super cooled liquid state. Recently it is reported that amorphous alloys exhibit stress overshoot/undershoot and non-Newtonian behaviors even in the super cooled liquid state. The stress-strain curves with the temperature-dependences as well as strain-rate dependence of Newtonian/non-Newtonian viscosities of amorphous alloys are obtained based on the previous experimental works. Then, those curves are directly used in the thermo-mechanical finite element analyses. Upsetting and deep drawing of amorphous alloys are simulated to examine the effects of process parameters such as friction coefficient, forming speed and temperature. It could be concluded that the superior formability of an amorphous alloy can be obtained by taking the proper forming conditions.

Key Words : Amorphous Alloy, Newtonian/Non-Newtonian, Sheet Forming, Compression, Finite Element Method

1. 서 론

최근의 전자·통신 및 정밀의료 부품들은 제품의 경량화 및 직접화로 인해 크기는 작으면서도 많은 기능이 요구되어지는 다기능·소형화 추세에 있다. 따라서, 부품들은 복잡한 형상을 가지며, 기계적으로 초고기능성과 초정밀도가 요구되어진다. 이에 부응하여 고기능 고강도 소재의 개발, MEMS 및 나노생산기술의 개발에 관한 수 많은 연구가 발표되어 왔으나 실용화에는 아직도 고비용의 생산비를 낮추어야 하는 등의 선결 문제가 남아있다. 한편, 통상의 공학재료를 전통적인 성형공정으로 마이크로 부품을 생산할 경우에는 부품의 강도 및 정밀도 등이 문제점으로 발생하게 된다. 일례로, 마이크로 또는 나노 크기의

정밀도를 요구하는 다이에 다결정재를 성형할 경우, 결정립의 크기에 따라 성형성이 좌우되며, 결정립의 크기가 표면 조도를 결정한다.(Fig.1 참조) 결국 결정립의 크기, 방향, 가공경화등이 초정밀 표면과 성형에 한계를 발생시키게 된다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 노력으로 우수한 기계적 성질과 성형성을 갖춘 신소재의 개발에 많은 연구가 진행되어 왔다

아몰퍼스 합금은 상온에서는 매우 높은 강도, 내마모성 및 내부식성을 갖으며 수려한 표면 형상을 나타내고 있어 고급의 구조재료로 각광을 받고 있다. 더불어 과냉액체상태(Super cooled liquid state)에서는 비정질상태로 되어 결정질 금속에 내재하는 미끄럼면이나 경계면이 없는 등방위체이며, 결정립에 의한 변형제한이 없는 완전뉴토니

[#] 교신저자: 국민대학교 기계자동차공학부
e-mail : yslee@kookmin.ac.kr

안 점성유동을 가진 성형성이 우수한 소재이다.

그러나 아몰퍼스 합금의 응용은 매우 작은 온도구간에서 비정질구간이 존재하는 것과 비정질 특성을 얻기 위해서는 매우 높은 냉각속도가 필요하기 때문에 초기에는 매우 작은 형태로의 응용만 가능했다.⁽¹⁻³⁾ 최근의 집중적인 연구 개발에 의하여 벌크 상태로의 제조가 가능한 합금조성과 제조기술이 확립되어 앞으로 벌크 비정질합금의 응용이 확대될 전망이다. 한편으로는 과냉액체상태를 유지하는 온도 범위도 넓혀지고 있으나, 과냉액체 구간에서도 유동조건에 따라서는 응력의 급격한 증가 및 감소 (Stress overshoot/ undershoot)에 의한 응력 진동과 논 뉴토니안 거동이 발생되는 것도 보고되고 있다.

이에 본 논문에서는 벌크 아몰퍼스 소재의 응력 진동 및 과냉액체상태구간 경계 근처에서의 논 뉴토니안 거동까지도 반영하는 열·기계학적 성형 해석을 수행하고 주요공정변수가 성형성에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

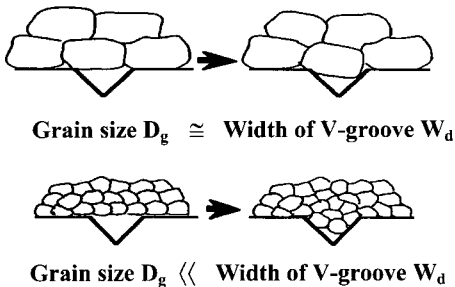


Fig. 1 Microformability of superplastic alloy of polycrystalline aggregates

2. 아몰퍼스 합금의 물성 고찰

아몰퍼스 합금의 소재 개발에 관한 선행연구와 아몰퍼스 합금 소재를 사용한 성형실험의 선행연구를 조사하였다.

A. Inoue 연구그룹⁽⁴⁻⁶⁾은 부식 저항이 좋고 낮은 열팽창계수를 갖는 Zr-based 아몰퍼스 합금을 개발하였다. 그들이 개발한 아몰퍼스 합금의 점성유동을 실험으로 확인하였으며, 성형공정의 최적상태를 얻기 위한 기초연구를 수행하였다. 유효 점성계수는 온도가 증가할수록 평탄하게 감소함을 관찰하였고, 750K에서 765K 사이의 온도에서 점성계수가 일정한 구간을 가짐을 보여 최적의 작업 온도를 이 구간으로 예상하였다.

Kawamura⁽⁷⁻⁸⁾는 Inoue 그룹의 Zr-based 아몰퍼스 합금과는 조성이 다른 $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$ 의 기계적 물성을 조사하여 온도별 풀림 열처리를 통해 온도가 높아질수록 탄성계수와 경도 증가와 열팽창계수 감소함을 보였다. 또한, 과냉액체상태 구간에서도 논뉴토니안 점성유동과 변형경화가 있음을 실험으로 확인하였다.

William L. Johnson⁽⁹⁻¹⁰⁾는 일정 온도내에서 변형율속도의 증가는 국부적 공간에서 불안정하고 논 뉴토니안 유동을 일으킴을 Vogel - Fulcher - Tamann (VFT) 모델로 설명하였다.

Y. Saotome⁽¹¹⁻³⁾ 그룹은 변형률속도 민감도지수 0.5인 다결정의 Al-78Zn 초소성소재와 아몰퍼스소재 ($Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$, $La_{55}Al_{25}Ni_{20}$, $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$)의 V-굴곡 다이 성형 실험을 통하여 Al-78Zn 초소성소재는 결정립의 크기와 회전이 다이의 크기, 폭과의 상관관계를 나타내는 데 비해, 아몰퍼스 합금은 결정립의 성형의존성을 고려하지 않아도 되는 우수한 미세 성형성이 보임을 확인하였다. 또한, 마이크로 기어의 미세압출 성형을 성공적으로 수행하였다.

본 연구에서는 선행연구의 대표적인 벌크 아몰퍼스 합금 즉 Pd 계열($Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$), Zr 계열($Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$)을 선택하여 점성계수의 온도의존성과 변형률 속도의존성을 상세히 조사하였다.

Zr계열 아몰퍼스 소재의 일축인장 실험에서 축방향 진응력과 축방향 진변형률속도 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 응력과 변형률 속도가 완전 선형을 유지함을 알 수 있으며, 과냉액상온도 구간이 682K에서 767K까지 약85K 정도로 나타남을 알 수 있다. Pd계열 소재도 응력과 변형률속도가 선형을 유지하며, 577K에서 673K까지 약96K의 과냉액상온도 구간을 가짐을 알 수 있었다. 수직점성계수의 온도 의존성을 Fig. 3에 나타내었다. 수직점성계수가 온도의 변화에 따라 선형적으로 변해가는 것을 볼 수 있으며, 최소자승법을 이용한 Zr계열과 Pd계열 물성 계수들이 각각 $A = 1.0 \times 10^{-13}$, $B = 2.7 \times 10^4$ 와 $A = 5.5 \times 10^{-13}$, $B = 2.14 \times 10^4$ 으로 구해진다.

한편, 아몰퍼스 합금의 뉴토니안 점성거동이 과냉액체상태구간이라도 특정영역에서만 나타남을 Fig. 4에서 알 수 있다. 변형률속도가 증가하거나 온도가 유리전이온도(glass transition, T_g)에 가까울수록 변형률 민감도 지수가 변하는 것을 볼 수 있다. 즉, 논뉴토니안 거동과 변형경화가 있

음을 알 수 있다. 따라서, 벌크 아몰퍼스 합금의 성형 해석을 위해서는, 뉴토니안거동만을 고려해서는 안되며, 변형률속도변화와 온도변화를 고려한 논뉴토니안거동 특성까지 고려해야 한다. 또한, 성형 중 소성일에 의해 발생하는 열발산을 고려해야 하므로 열전달 해석을 해야한다. Fig. 4는 W-J.Kim과 H-K.Jeung의 Zr-based alloy 일축인장 실험을 통해 얻어진 응력-변형률 그래프를 바탕으로 Fig. 3와 Fig. 4의 온도 및 변형률 속도의존성을 이용하여 추출한 응력-변형률 선도이다. 본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS를 이용하였으며, 아몰퍼스의 물성은 Fig. 5 그래프를 테이블화하여 사용하였다. 이를 통해 성형시 유동형태에 마찰이 미치는 영향, 온도에 따른 유동형태 변화와 변형률 속도의 영향을 조사하였다.

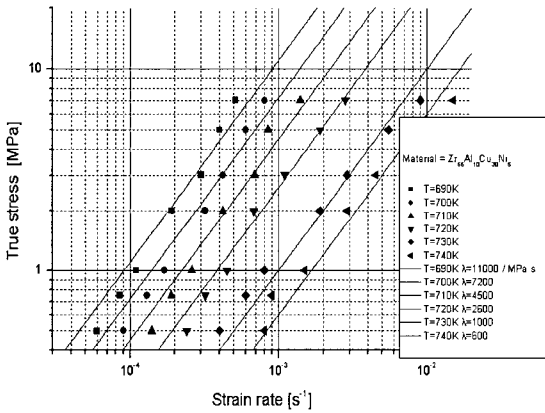


Fig. 2 Characteristic flow curves in supercooled liquid state : $Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$ (Ref[4])

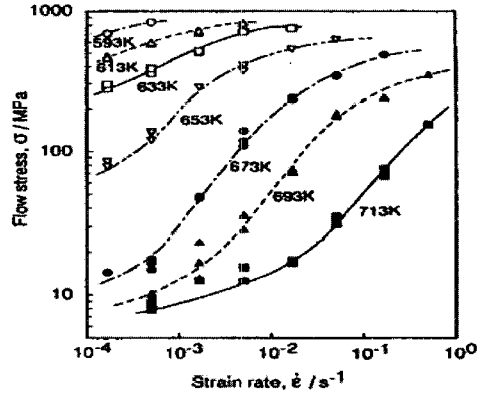


Fig. 4 Newtonian & non-Newtonian behavior of viscosity : $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ (Ref[7])

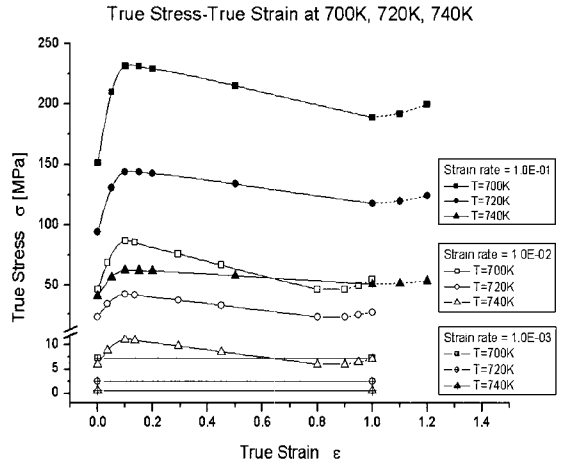


Fig. 5 Stress-Strain Curves of Zr-based Amorphous material : $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$

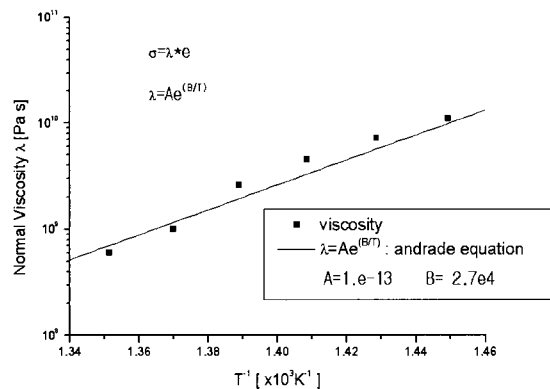


Fig. 3 Temperature dependence of normal viscosity in supercooled state : $Zr_{55}Al_{10}Cu_{30}Ni_5$ (Ref[4])

3. 축대칭 압축 성형해석

압축성형은 간단한 성형공정이지만, 압축변형과 전단변형이 복합되어 있고, 마찰의 크기에 따라 다양한 형태의 변형을 관찰할 수 있다.

원통형 시편의 기하학적 대칭성으로 축대칭 2D 해석을 하였다. 벌크 아몰퍼스 소재로는 크기가 가장 큰 것으로 반경과 높이가 각각 10mm 인 원통을 20%, 40% 압축 하였다. 압축 성형시 펀치와 소재간 마찰계수를 0, 0.1, 0.2, 0.3, 고찰 등으로 가정하였으며, 다이와 소재부분은 고착경계로 구속하였다 (Fig. 6 참조). 소재의 반경 대 높이의 형상비에 따른 변화도 고찰하였다.

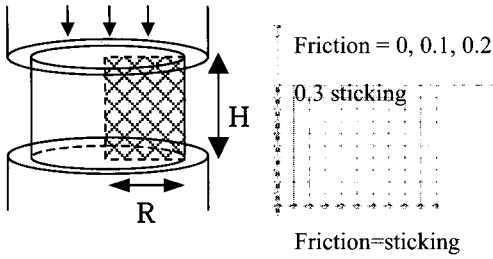


Fig. 6 Schematic of upsetting

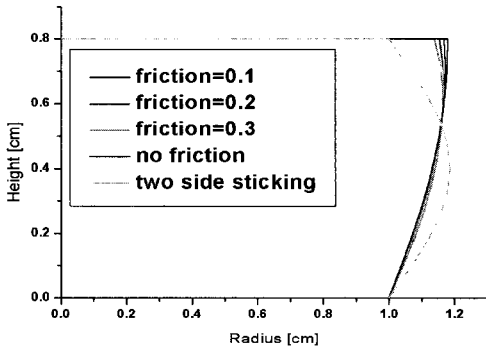


Fig. 7 Side profile in deformed shape of Zr-base Amorphous (H/R=1)

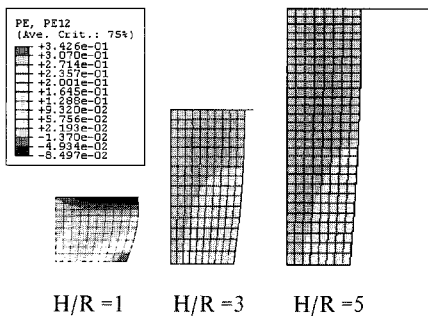


Fig. 8 Distribution of shear strain (H/R = 1,3,5)

3.1 마찰계수의 영향

마찰계수 변화에 따른 옆면의 형상을 Fig. 7에 나타내고 있다. 펀치·소재간의 마찰계수변화에 따른 변형을 보면, 마찰계수가 0.3에 이르기까지 옆면의 형상이 크게 변하지 않음을 볼 수 있다. 또한, 고착경계면의 둔각이 약 120° 정도로 일반 공학재료보다 작음을 알 수 있다. 이것은 아몰퍼스 소재가 일반 공학재료보다 마찰계수의 영향을 적게 받으며, 전단변형의 국부화와 응력집중 발생이 적음을 알 수 있다. 또한 시뮬레이션에서는 높이와 반경의 비, 즉 형상비(H/R)를 1, 3, 5로 변화

주었을 경우에 전단변형률의 분포를 Fig.8에 보여주고 있다. 형상비가 커짐에 따라 변형률의 국부화가 작아지고 옆면의 형상에 기울기의 변화가 작아지고 있어 마찰 계수의 영향이 작아지는 경향을 확인할 수 있다.

3.2 성형성이 우수한 알루미늄과의 비교

성형성이 비교적 우수한 일반 알루미늄 합금을 같은 조건으로 압축성형을 시뮬레이션하여 아몰퍼스 소재의 압축성형과 비교하였다. 해석에 사용한 물성계수는 Table 1에 주어진다. Fig. 9에서는 40%의 압축율로 압축한 Zr 계열 아몰퍼스 봉과 초소성을 가지는 알루미늄 봉의 전단변형률 분포를 비교하였다. 펀치와 소재의 마찰계수는 0, 0.2, sticking의 세가지를 고려하였다. 펀치와 접촉하는 면의 마찰계수가 증가함에 따라 알루미늄 봉의 전단변형률 분포는 아몰퍼스 봉에 비하여 국부화가 빨리 진행되는 경향을 볼 수 있다. 또한, 변형된 봉의 옆면 형상을 보면 알루미늄 봉은 마찰계수의 영향으로 옆면이 바닥면 다이에 접혀서 붙는 현상(side folding)을 보여주고 있다. 아몰퍼스 소재는 통상의 금속재료보다 마찰계수의 영향을 작게 받음을 확인할 수 있었다.

Table 1. Zr-based alloy and superplastic alloy material Properties

| | Zr-based Amorphous | Superplastic Aluminum |
|-------------------------------------|------------------------|--|
| Young's Modulus[Pa] | 1×10^{16} | 6.9×10^{10} |
| Poisson's ratio | 0.4 | 0.33 |
| Constitutive Eqn | See Fig. 5 | $\sigma = K \epsilon_e^{0.2} \dot{\epsilon}_e^{0.3}$ |
| Thermal expansion coefficient [1/□] | 1.01×10^{-05} | 2.36×10^{-05} |
| Specific heat [J/kg□] | 753.48 | 900 |
| Density [kg/m ³] | 6100 | 2705 |
| Conductivity [W/m□] | 2.1 | 231 |

3.3 열발산의 영향

소성일에 의한 열발산의 영향을 조사하기 위해

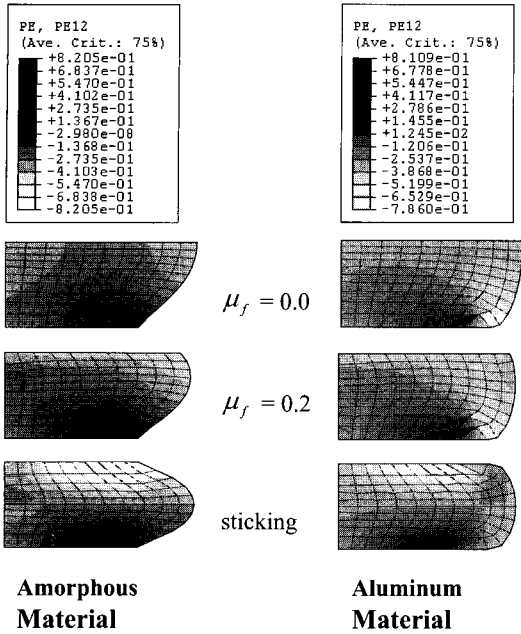


Fig. 9 Comparison of shear strain distributions between superplastic material and amorphous alloy (Reduction ratio : 40%)

서 열·기계학적 해석의 결과와 열전달을 고려하지 않는 등온 기계학적 해석의 결과를 Fig. 10 ~ Fig. 13에 나타냈다. 소재의 초기온도는 720K 이고, 펀치 속도는 0.3 mm/s로 아몰퍼스 소재는 온 뉴토니안 점성거동도 겪을 것으로 예상된다. Fig. 10에서 보여 주는 등온해석에 의한 온도 분포는 열전달이 없이 소성일로 인한 온도의 증가만을 계산한 결과이다. 열전달을 고려한 열·기계학적 해석에 의한 온도분포는 등온해석에 의한 온도분포보다 구배가 작고, 최대온도도 약5도 정도 낮다. 이는 열전달에 의해 온도 구배가 작아 지나 아몰퍼스 소재의 열전달 계수가 매우 작아 열전달이 작기 때문이다. 이러한 작은 온도의 증가일지라도 초기온도에 비하여는 최대 10도 정도 높아지는데 이 정도의 온도 증가도 점성을 낮추는 효과가 있음을 Fig.11, 12에서 확인할 수 있다.

Fig.11 에서는 유효 변형률 속도 분포를 보여주고 있다. 본 연구의 축대칭 압축은 펀치 이송에 의한 형상변화유도의 공정으로 두 해석의 경우에 비슷한 분포를 보여주는 것은 쉽게 예측된다. 그러나 Fig.12 에서 보여주는 유효응력 분포는 뚜렷한 차이가 있다. 두 종류의 해석에서 유효변형률 속도의 분포가 비슷할 지라도 소성일 발산에 의

한 온도증가로 점성계수가 작아지게 되어 열·기계학적 해석에 의한 유효응력은 크기도 작고 분포에서도 구배가 비교적 완만한 것을 예측하고 있다.

이러한 온도의 증가에 의한 차이점은 압축하중을 통해서도 확인할 수 있다.(Fig.13 참조) 등온해석에 의해 예측되는 압축하중은 열·기계학적 해석에 의한 것보다 약 2.3 배정도 크게 나타나고 있다. 온 뉴토니안 변형특성을 보이는 구간에서는 온도와 변형률 속도가 점성에 미치는 영향이 뉴토니안 변형특성 구간에 비하여는 작을지라도 일반적인 금속소재보다는 점성과 응력분포에 미치는 영향이 아직도 큰 것을 보여주고 있다.

이상의 분석으로부터 아몰퍼스 소재의 열간 성형에서는 소성일에 의한 열발산이 작을 지라도 열전달 계수도 작기 때문에 국부적인 온도증가가 있으며, 과냉액상구간에서 점성의 온도에 대한 의존도가 매우 높기 때문에 열전달을 해석에 반영하는 열·기계학적 해석을 반드시 수행하여야 할 것으로 생각된다.

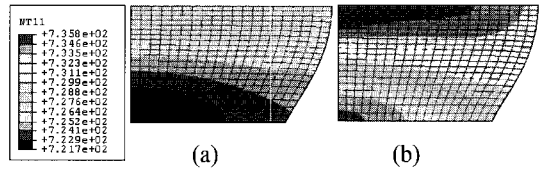


Fig. 10 Distribution of temperature (a) by thermo-mechanical analysis and (b) by purely mechanical analysis (P/V=0.3mm/s, Temp=720K)

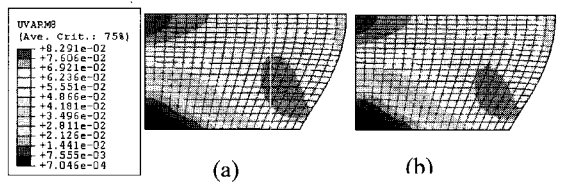


Fig. 11 Distribution of effective strain rate (a) by thermo-mechanical analysis and (b) by purely mechanical analysis (P/V=0.1mm/s, Temp=720K)

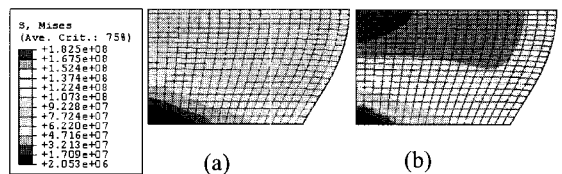


Fig. 12 Distribution of effective stress (a) by thermo-mechanical analysis and (b) by purely mechanical analysis (P/V=0.1mm/s, Temp=720K)

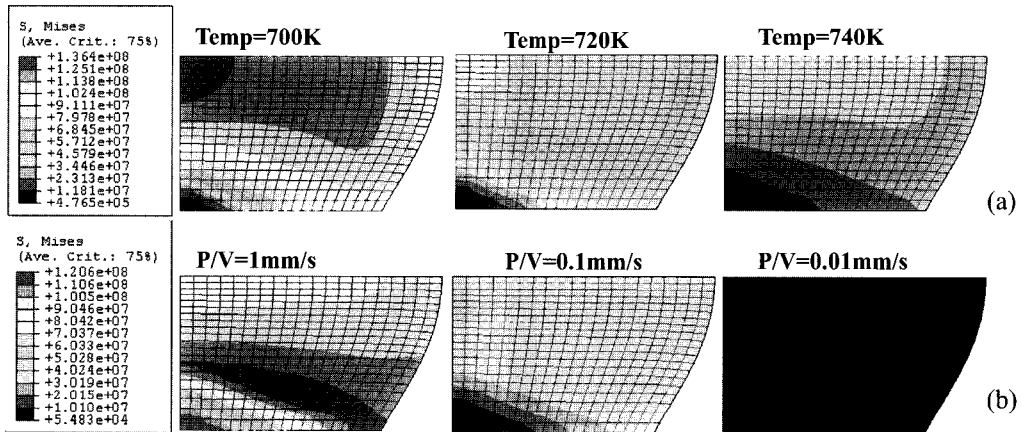


Fig. 14 Distribution of effective stress
(a) for three initial temperatures of 700K, 720K and 740K (Punch Velocity = 0.3mm/s)
(b) for three punch velocities of 1mm/s, 0.1mm and 0.01mm/s (Initial Temp=720K)

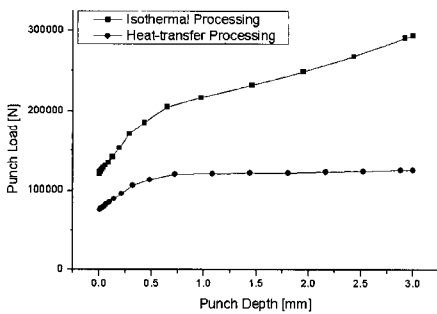


Fig.13 Punch Loads (720K, P/V=1mm/s)

3.4 성형 속도의 영향

변형률속도의 증가 또는 과냉액체온도 구간에서 온도가 유리전이온도 근처로 낮아지거나 결정화온도로 높아지면 논 뉴토니안 거동이 나타난다. 이러한 논 뉴토니안 거동이 공정에 미치는 영향을 조사하기 위하여 펀치속도와 초기소재의 온도를 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 성형속도와 온도의 변화에 따른 해석결과 중에서 유효응력 분포를 Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 14 (a)에서는 펀치속도는 0.3mm/s로 같으며 시편의 초기온도가 700K, 720K, 740K인 세가지의 경우를 비교하고 있다. 소재의 초기온도에 따른 유효응력의 차이가 매우 큰 것을 나타내고 있다. 700K, 720K인 경우에는 740K인 경우에 비해 최대 유효응력이 각각 약 2.5 배, 1.5 배 정도에 이르고 있다. 온도가 과냉액상온도 시작구간에 이룰수록 유효응력의 크기증가가 더 커지는 것을 보여주고 있다. 이로부터 시편의 초기온도는 소재가

성형 중에 겪는 최대 온도가 결정화온도보다 약간 낮게 되도록 하여 유리전이온도보다는 되도록 높게 설정하는 것을 제안한다.

Fig 14(b)에서는 시편의 초기온도를 동일하게 하고, 펀치속도를 0.01mm/s, 0.1mm/s, 1mm/s의 세가지 경우에 대하여 유효응력 분포를 비교하였다. 펀치 속도는 변형률 속도 변화 직접 영향을 미친다. Fig 14(b)에서 보여주는 응력분포의 변화는 Fig. 14 (a)에서 보여주는 초기온도변화의 영향보다 매우 크게 나타나고 있다. 펀치속도가 0.01mm/s에서 0.1mm/s로 커지는 경우에 최대 유효응력의 크기는 약 5 배정도 되나, 0.1mm/s에서 1mm/s로 커지는 경우에는 약 2 배정도로 되어 유효응력의 증가속도가 낮아지고 있다. 이러한 현상은 초기온도가 낮아질수록 유효응력의 증가속도가 커지는 것과는 다른 현상으로 공정 설계 시에 유리한 점으로 작용할 수도 있으나 유효응력의 분포가 펀치속도가 커질수록 빠르게 국부화 되어 국부적인 결함 또는 크랙 발생의 가능성을 내포하고 있어 공정 설계시에는 주의하여야 할 점이다. 이와 같은 현상은 펀치 속도가 커짐에 따라 논 뉴토니안 거동이 보다 완연하게 변형을 지배하는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

본 연구 해석에서는 시편초기의 온도와 펀치속도의 변화에 따라 유효응력의 크기에는 변화가 있으나 형상변화와 변형률 분포는 비슷한 것을 보여주고 있었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 펀치의 이송에 의한 형상변화유도의 공정으로 비슷한 변형률 속도분포를 보여주게 된다.

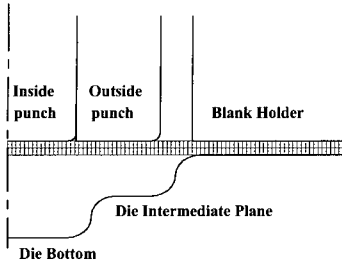


Fig. 15 Schematic of multi-head punch deep drawing

4. 뿔 드로잉 성형해석

벌크 아몰퍼스 소재는 현재까지 개발된 소재의 크기 제한으로 인하여 판재성형에의 응용이 보다 활발할 것으로 기대된다. 이에 본 연구에서도 두께 1mm, 지름 40mm 인 아몰퍼스 판재 다단 뿔 드로잉 공정을 시뮬레이션 하였다(Fig. 15 참조). 안쪽 펀치의 바닥과 마주하는 다이 바닥면 사이의 간격이 0.9mm 가 될 때까지 성형을 지속 하였다. 통상적으로 두개의 단이 있는 경우, 뿔 드로잉 공정은 두 단계의 공정으로 이루어진다. 그러나, 본 연구에서는 벌크 아몰퍼스의 판재 성형성을 조사하기 위하여 먼저 두 개의 펀치를 일체형

으로 만들어 한번의 공정(CASE 1)으로 성형하는 경우를 시뮬레이션하였다. 그리고, 일반 금속의 경우에서와 같이 두 단계의 공정순서를 갖는 공정- 1단계에서 두 펀치를 동시에 이송하여 판재가 다이 중간면에 닿도록 한 후에 2 단계에서는 바깥 펀치를 고정하고 안쪽 펀치만 판재가 다이 바닥면에 닿을 때까지 드로잉하는 공정(CASE 2)과 1단계에서 안쪽의 펀치만 이송하여 판재가 다이 바닥에 닿아 두께가 0.9mm 가 되도록 한 후에 2 단계에서 바깥 펀치를 이송하여 중간 스트레칭된 판재가 다이 중간 면에 닿도록 드로잉하는 공정 (CASE 3)- 을 고려하였다. 뿔 드로잉이 진행되는 동안에 판재의 형상 변화를 보면, 블랭크 홀더의 위치를 고정하였기에 판재의 드로잉 보다는 굴곡부를 지나면서 판재의 굽힘과 펴짐 그리고 굴곡부를 지난 후의 스트레칭이 쉽게 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 16에서는 유효응력과 변형률 분포를 보여 준다. 변형률의 분포는 세 경우에 전반적으로 비슷하나 응력분포는 약간 다르게 나타난다. CASE 1의 경우에는 판재의 중간 단에서 유효응력이 다른 두 경우보다 크게 나타나고 있으나, 이 곳에서의 국부파손의 가능성은 낮을 것으로 판단된다

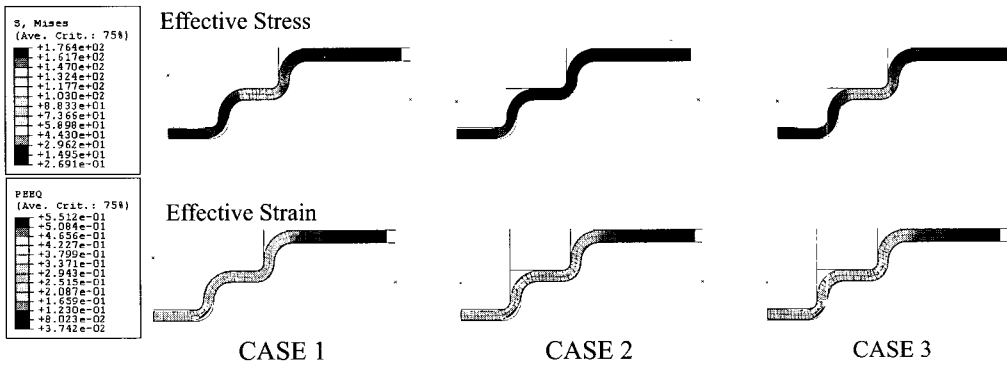


Fig. 16 Distribution of effective stress and effective strain at the final stage

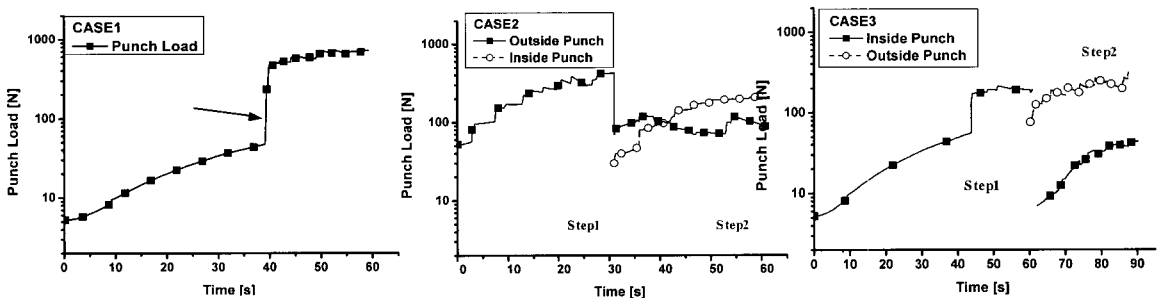


Fig. 17 Variations of punch loads with time for three cases

이것은 CASE 1공정이 중간 단계에서 아몰퍼스 판재의 두께를 줄이는 압축변형을 일으키는 응력 성분 에 의한 것이기 때문이다. Fig.17에서는 세 경우에 대하여 압축하중의 변화를 보여준다. CASE 2 와 CASE 3 의 경우에는 두 번째 단계에서 두개의 편치하중을 합하여 최대하중을 구한다. 초기에는 일체형 편치를 이용한 드로잉의 경우에 편치하중이 작으며 안쪽 편치가 먼저 움직이는 CASE 3와 비슷하나 후반에는 최대 성형하중의 크기가 세 경우에 비슷한 것으로 나타나고 있다.

일체형 편치를 이용할 경우에 다른 경우에 비하여 요구되는 성형하중의 크기 변화가 거의 없고, 한번의 뒤틀 드로잉으로 이중 굴곡을 얻는 것으로 보아 아몰퍼스 소재의 우수한 성형성을 확인할 수 있었다. 이를 통해 아몰퍼스 합금의 뒤틀 드로잉에서는 프로세스 스케줄의 변화에 따른 영향이 적음을 예측할 수 있다.

5. 결 론

아몰퍼스 합금은 과냉액체상태 구간이라도 응력의 진동 (Stress overshoot/undershoot)과 큰 뉴토니안 거동도 보인다. 본 연구에서는 이와 같이 특이한 변형특성을 포함하는 광범위한 변형률 속도와 온도 구간에서의 응력-변형률 곡선 데이터를 유한요소해석에 직접 사용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 축대칭 압축성형의 유한요소해석은 아몰퍼스 소재가 일반 공학재료보다 마찰계수의 영향을 적게 받음을 예측하였다. 특히 고착경계에서 전단 변형의 국부화와 응력집중이 작게 발생한다는 것을 예측하여, 아몰퍼스 소재의 우수한 성형성을 확인하였다. 형상비(H/R)가 커짐에 따라 마찰계수의 영향이 작아짐을 보였다.

(2) 아몰퍼스 소재는 성형 중에 소성 일에 의한 열발산은 크지 않으나, 열전도가 늦어 국부적인 온도 증가가 있으며, 이에 따른 점성의 변화가 성형성에 큰 영향을 끼치는 것을 보여주었다. 이에 벌크 아몰퍼스 성형 해석을 위해서는 반드시 열전달 해석을 포함하는 열-기계학적 해석이 필요함을 확인하였다.

(3) 아몰퍼스 소재 성형의 초기온도는 소재가 성형 중에 겪는 최대 온도가 결정화온도보다 약간 낮게 되도록 하여 유리전이온도보다는 되도록 높게 설정하는 것을 제안한다. 성형속도에 관하여는 소재의 일부가 뉴토니안 점성거동을 겪어도 좋으나 응력의 국부화는 크지 않도록 제한되어야 한다.

(4) 다단 뒤틀 드로잉 시뮬레이션에서는 아몰퍼스

소재가 공정 스케줄의 영향을 적게 받음을 예측하였으며, 한번의 공정으로 이중 굴곡을 얻을 수 있는 아몰퍼스 소재의 우수한 판재 성형성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 한국생산기술연구원이 주관하는 차세대신기술개발사업 중 벌크 아몰퍼스 및 하이브리드 정형부품 제조 기술개발과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Y. Saotome, A. Itoh, S. Amada, 1993, "Superplastic Micro Forming of Double Gear for Milli-machines", advanced Technology of Plasticity, Proceeding of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity.
- (2) Y. Saotome, H. Iwazaki, 2000, Microsystem technologies, Vol. 6, pp. 126~129.
- (3) Y. Saotome, 1977 "Microforming and Fabrication of Micromachines with Amorphous Alloys", Proc. The 3rd Int. Micromachine Symposium.
- (4) Y. Saotome, A. Inoue, 2000, "New Amorphous Alloys as Micro materials and Processing Technology", The 13th Annual Int.Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 288~292.
- (5) A. Inoue, 2000, "Stabilization of Metallic Supercooled Liquid and Bulk Amorphous Alloys", Acta mater. Vol 48, pp.279~306.
- (6) Ho-Sou Chen, H. Kato, A. Inoue, 2000, "A Fictive Stress Model Calculation of Stress Overshoot", The Japan Society of Applied Physics, Vol. 39, pp.1808~1811.
- (7) Y. Kawamura, T. Shibata, A. Inoue and T. Masumoto, 1977, *Scripta Materialia*, Vol. 37, No.4, pp. 431~436.
- (8) M. L. Vaillant, V. Keryvin, T. Rouxel, Y. Kawamura, 2002, *Scripta Materialia*, Vol. 47, pp. 19~23.
- (9) William L. Johnson, 1996, "Bulk Metallic Glasses a New Engineering Material", Current Opinion in Solid State & Materials Science.
- (10) J. F. Loffler, W. Johnson, 2001, "Crystallization Pathways of Deeply Undercooled Zr-Ti-Cu-Ni-Be Melts", *Scripta mater.*, Vol 44, pp. 1251~1255.