

## 아몰퍼스 판재 성형의 스프링 백에 관한 연구

윤상헌\*(국민대 대학원 기계공학과), 이용신(국민대 기계자동차공학부)

### A Study on Spring Back in Sheet Forming of Amorphous Alloys

S.H. Yoon (Graduate School of Mech. KMU), Y-S Lee(School of M&AE., KMU)

#### ABSTRACT

This paper is concerned with spring back after sheet forming of bulk amorphous alloys in the super cooled liquid state. The temperature-dependence and strain-rate dependence of Newtonian/non-Newtonian viscosities as well as the stress overshoot/undershoot behavior of amorphous alloys are reflected in the thermo-mechanical Finite Element simulations. Hemispherical deep drawing operations are simulated for various forming conditions such as punch velocity, die corner radius, friction, blank holder force, clearance and initial forming temperature. Here, spring back by an instantaneous elastic unloading was followed by thermal deformation during cooling and two modes of spring backs are examined in detail. It could be concluded that the superior sheet formability of an amorphous alloy can be obtained by taking the proper forming conditions for loading/unloading.

**Key Words** : Spring back, Amorphous alloy(아몰퍼스 합금), Newtonian/Non-Newtonian(뉴토니안/논뉴토니안 거동), Sheet forming(판재성형), Finite Element Method(유한요소법)

#### 1. 서론

아몰퍼스 상태란 무정형 즉 형식이 없는 상태를 말하며, 어원은 그리스어의 A-morpho 에 기인한다. 학문적으로는 원자가 규칙적으로 정렬된 구조를 갖는 결정에 대응하는 용어로서 비정질, 무정형 또는 유리모양이라는 의미로 사용된다. 아몰퍼스 합금은 유리와 같이 외관이 수려하고 기계적성질이 우수하며 과냉액상구간을 갖는다. 과냉액상 구간에서는 결정금속에 존재하는 미끄럼면이나 결정립계가 없는 등방위체이며, 완전 뉴토니안 점성에 기인한 뛰어난 성형성으로 인하여 1990 년대에는 꿈의 소재라 불리며 연구계는 물론 산업계의 이목도 집중시켜왔다. 초기에는 아몰퍼스 합금의 비정질특성을 얻기 위하여는 높은 냉각속도가 필요하게 되어 개발되는 소재의 크기가 작았다. 마이크로 또는 나노 크기의 MEMS 부품의 개발에 관한 많은 응용 연구들이 좋은 예이다. 그러나 1990 년대 이후에는 벌크 상태로 제조가 가능한 합금조성 및 제조기술이 발달되어 최대 100mm 크기의 봉과 판재 등이 제조가 가능하여 신기능성 소재로의 응용 가능성이 증대되고 있다.

아몰퍼스 합금의 전통적인 판재 성형공정을 개발하기 위하여는 실험적 연구와 전산모사 등을 이용한 모델링연구가 병행되어야 효율적이다. 아몰퍼스 합금은 유리전이온도와 결정화온도사이의 온도구간( $\Delta T_x$ )에서 과냉액상상태를 갖는다. 이 영역 내에서는 완전 뉴토니안 점성을 갖으나 변형률속도가 높거나 온도가 유리전이온도에 가까워지면 변형률속도 민감도지수가 변하는 것을 보여준다. 즉 과냉액상구간의 경계에서는 논뉴토니안 점성을 나타내고 특히 변형초기에는 정상상태에 이를 때까지 과응력 상태(stress overshoot)와 저응력 상태(stress undershoot)를 되풀이하는 응력진동도 보여준다[1].

본 연구에서는 위와 같이 특이한 특성의 응력-변형률 관계를 반영하는 열·기계학적 유한요소법을 이용하여 아몰퍼스 판재성형 공정의 수치해석을 수행한다. 마찰 계수, 다이 코너 반경, 롤리어런스, 성형온도, 편치속도 및 블랭크 홀더 하중 등의 공정조건들의 영향을 조사한다. 더불어 그러한 공정조건들에 따른 성형후의 스프링 백의 변화를 조사한다. 궁극적으로는 아몰퍼스 판재성형에서 다양한 공정조건이 스프링 백에 미치는 영향을 조사하여 공정설계에 지침이 되는 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 유한요소해석

성형과정 중인 아몰퍼스 소재는 부품의 형상으로부터 야기되는 비균질 변형을 필수적으로 겪고, 이는 소재의 일부가 뉴토니안 점성을 갖지 못하게 되며 전체 성형성을 제한할 수 있음을 의미한다. 유한요소법은 성형 중인 소재의 불균질 변형과 국부적인 변형특성을 예측하는데 많이 쓰이는 수치해석 방법이다. 아몰퍼스 합금 변형의 수치해석은 질량 보전, 모멘텀 보전과 필요 시에 에너지 보전을 고려하여야 한다. 위의 보전식은 일반적인 금속의 성형해석과 같으므로 본 논문에서는 생략한다.

유한요소해석 모델은 보전식들과 더불어 아몰퍼스 소재의 물성을 묘사하는 구성방정식을 필요로 한다. Chen[8] 등이 제안한 가상응력모델은 아몰퍼스의 변형거동을 점탄성 Maxwell 모델의 탄성과 비탄성으로 묘사하였다. 탄성은 금속의 경우와 같으나 비탄성거동은 정상상태에 이르기 전까지의 과응력-저응력의 응력진동을 상태변수인 가상응력(Fictive stress)을 도입하여 묘사하였다. 여기서는 Chen 등이 일축인장에 대하여 묘사한 가상응력모델을 삼차원 유한요소해석에 적용하도록 확장한 구성방정식들을 소개한다. 먼저 응력의 시간에 따른 변화는 변형률속도와 비선형적으로 변하는 응력완화시간(Relaxation time:  $\tau_f$ )으로 표현한다.

$$\dot{\sigma}_{ij} = 2\mu\dot{\epsilon}_{ij} + \lambda\dot{\epsilon}_m\delta_{ij} - \frac{\sigma_{ij}}{\tau_f} \quad (1)$$

위 식에서  $\tau_f$ 는 변형이 진행됨에 따라 아몰퍼스 미세 구조적인 변화가 정상상태에 도달할 때까지 변하는 변수로 그 발전식은 가상응력의 발전에 비례하는 것으로 가정하였다. 즉,

$$\frac{d\tau_f}{dt} = \left(\frac{\tau_N}{\sigma^*}\right) \cdot g\left(\frac{\tau_f}{\tau_N}\right) \cdot \frac{d\sigma_f}{dt} \quad (2)$$

$$g(x) = \frac{(1-x)[-\ln(1-x)]^2}{(1-x)[-\ln(1-x)] - x}, \quad x = \frac{\tau_f}{\tau_N}$$

그리고 가상응력의 발전식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d\sigma_f}{dt} = \frac{\sigma_e - \sigma_f}{\tau_f} \quad (3)$$

위 식들에서  $\tau_N$ 은 소재 고유의 응력완화시간이며, 실제의 해석에서  $\tau_f$ 의 초기치는  $\tau_N$ 에 매우 근접한 값을 사용하고, 가상응력( $\sigma_f$ )의 초기치는 영으로 한다. Fig. 1에서는 일정한 변형률 속도에

서 온도변화에 따른 Pd-계열 아몰퍼스 소재의 일축 인장의 균질변형을 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 얻은 결과를 보여준다. 아몰퍼스 성형공정의 유한요소 해석에서는 Fig. 1 등을 도표화하여 사용할 수 있다.

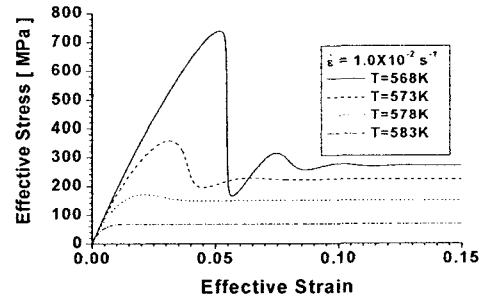


Fig. 1 Typical stress-strain curves at the fixed strain-rate of 0.01 for Pd-based amorphous alloys.

## 3. 판재성형공정해석

벌크 아몰퍼스 판재의 반구 펀치 딥 드로잉 공정을 유한요소해석을 수행하였다. 블랭크의 두께는 1mm, 지름 40mm이며, 판재와 다이 사이의 간격은 1mm를 유지하도록 하였다. 더불어 성형 후 상온으로 냉각하는 열-탄성 변형을 조사하였다.

### 3.1 반구펀치 딥드로잉

펀치속도, 다이곡률, 클리어런스, 마찰계수, 블랭크 홀더 하중(BHF), 초기성형온도 등등의 다양한 공정조건에 영향을 조사하였다. 여러 조건들 중에서도 펀치속도, 블랭크 홀더하중 및 초기성형온도의 영향은 매우 치명적인 것으로 예측되었다. 통상의 금속을 판재성형하는 경우와는 달리 다이 곡률, 클리어런스 및 마찰계수의 영향은 상대적으로 덜 심한 것으로 조사되었다.

펀치속도의 증가는 유동응력의 증가에 의한 펀치하중의 증가와 펀치 접촉부의 블랭크두께의 급격한 감소를 야기시킨다(Fig. 2,3 참조). 국부적으로 높은 변형률 속도는 그 곳에서 뉴토니안 점성에 의한 성형성 제한을 야기시킬 수 있으므로 적절한 펀치속도의 제한이 필요할 것으로 예측된다.

블랭크 홀더의 하중이 커질수록 블랭크 홀더에 접촉되어 있는 시편을 구속하여 펀치와 다이 사이의 블랭크에는 스트레칭이 크게 일어나 시편의 두께가 얇아진다. 이와 같은 국부지역에서의 변형 집중은 전체적인 성형성을 제한한다. 따라서 블랭크 홀더 하중의 적절한 선택이 성형 후 판재의 균질도에 큰 영향을 준다. 아몰퍼스 소재의 점성은 온도

의존성이 매우 크다. 일례로 Pd-계열 아몰퍼스 합금의 경우에 568K 에서 573K 로 단지 5 도만큼의 증가가 초기 비선형 진동구간에서 최대 유동응력의 크기를 400MPa 에서 800MPa 로 두 배정도로 증가를 일으킨다. 이와 같은 이유로 아몰퍼스 판재 성형공정은 반드시 열· 기계학적 해석이 필요하며 초기성형온도의 선정은 매우 중요하다. 본 논문에서는 보여지지 않고 있으나 초기성형 온도의 적절한 증가는 성형성을 향상시키는 것으로 예측되었다. 더불어 초기성형온도는 유한요소해석에 의해 예측되는 최대 온도 증가량 만큼 유리천이온도에서 빼 값을 사용할 것을 제한한다. 기타의 공정조건의 영향은 무시할 정도로 작은 것은 아니나 본 논문에서는 생략을 하며 독자들은 참고문헌[13]을 참조할 수 있다.

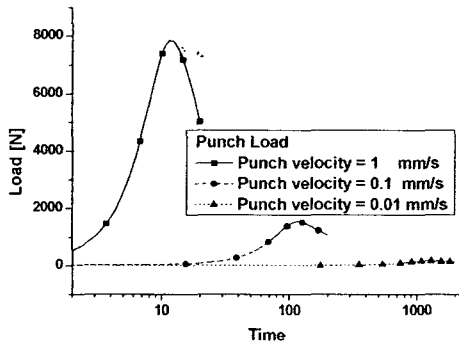


Fig. 2 Variation of punch loads for several punch velocities

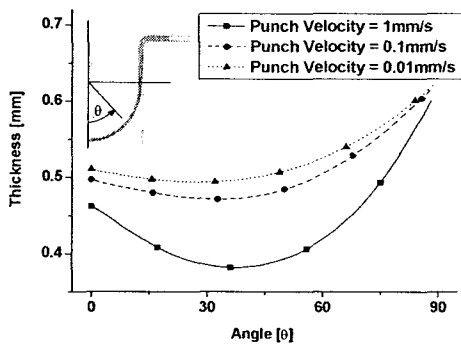


Fig. 3 Thickness variations of amorphous sheet in the punch-contact zone.

### 3.2 스프링백 예측

과냉액상온도에서의 성형된 아몰퍼스 판재는 비교적 빠른 속도로 상온까지 냉각되어 아몰퍼스의 수려한 외관을 갖도록 된다. 이때 고온에서 성형된 후에 다이와 펀치를 제거한 후에 상온까지 냉각되

는 과정에는 판재의 형상이 변하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 후 변형 즉 스프링 백을 두 가지의 성분으로 나누어 모델링한다. 성형 후에 다이와 펀치를 제거하는 과정에서 발생하는 즉각적인 탄성 회복(Instantaneous elastic recovery)과 상온으로 냉각되는 과정에서의 열전달과 그에 따른 열· 탄성 변형(Thermo-elastic deformation)으로 구분하여 모델링을 진행한다. Fig. 4 에서는 스프링백의 두 성분을 분리하여 보여주고 있다. 즉 P에서 P<sub>1</sub>으로의 변위는 즉각적인 탄성회복이고, P<sub>1</sub>에서 P<sub>2</sub>으로의 변위는 냉각되는 과정에서의 열변형에 의한 성분이다.

앞 절에서 조사한 주요 공정 변수들 즉 펀치 속도, 블랭크하중 및 초기성형온도에 따른 스프링백의 변화를 Fig. 4 에서 정의한 점 P의 변위와 플랜지의 각도 변화를 Table 1, 2, 3 에 비교하여 검토하였다. 블랭크 홀더 하중의 증가는 즉각적인 탄성 변화(P→P<sub>1</sub>)를 줄이는 방향으로 영향을 준다. 이것은 아몰퍼스 판재 중에서 펀치나 다이와 접촉하지 않는 부분은 블랭크 홀더의 하중에 의한 신장이 커서 스프링 백을 줄이는 것으로 사료된다. 그러나 후속되는 냉각과정 동안의 변위(P<sub>1</sub>→P<sub>2</sub>)는 거의 비슷한 것으로 나타나고 있다. 플랜지의 최종 기울기는 블랭크 홀더 하중이 클수록 경사각이 작아져 원래의 기울기에 가깝게 되나 3500N정도의 큰 홀더 하중의 경우에는 역 방향으로의 경사도 나타난다. 0.01 mm/s에서 1mm/s까지의 펀치 속도의 증가는 즉각적인 탄성회복에 가장 큰 차이를 나타내고, 초기성형온도의 변화는 큰 열변형의 차이를 예측하고 있다. 이와 같은 지침은 설계자에게 도움을 줄 것으로 기대된다.

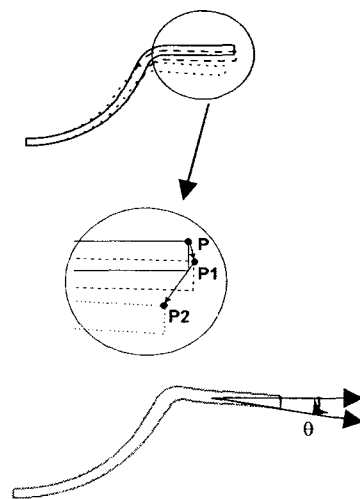


Fig. 4 Schematic for two modes of spring back.

Table. 1 Spring back for several blank holding forces

BHF [N]	Disp.(P→P <sub>1</sub> )		Disp.(P→P <sub>2</sub> )		Slope
	Ur 10 <sup>-3</sup> [mm]	Uz 10 <sup>-3</sup> [mm]	Ur 10 <sup>-3</sup> [mm]	Uz 10 <sup>-3</sup> [mm]	θ 10 <sup>-3</sup> [degree]
350	5.71	-14.6	-73.4	-40.8	-8.169
1000	5.07	-15.3	-74.2	-40.5	-3.253
2000	4.70	-15.7	-75.1	-40.5	-0.695
3500	3.86	-16.4	-76.3	-40.6	15.02

Table. 2 Spring back for several punch velocities

Punch Vel. mm/s	Disp.(P→P <sub>1</sub> )		Disp.(P→P <sub>2</sub> )		Slope
	Ur 10 <sup>-3</sup> [mm]	Uz 10 <sup>-3</sup> [mm]	Ur 10 <sup>-3</sup> [mm]	Uz 10 <sup>-3</sup> [mm]	θ 10 <sup>-3</sup> [mm]
1	18.22	-76.7	-74.8	-45.5	17.6
0.1	4.70	-15.7	-75.1	-56.3	0.93
0.01	0.44	-1.40	-75.3	-39.4	-0.03

Table. 3 Spring back for several initial temperatures

Initial Temp. [K]	Disp.(P→P <sub>1</sub> )		Disp.(P→P <sub>2</sub> )		Slope
	Ur 10 <sup>-3</sup> [mm]	Uz 10 <sup>-3</sup> [mm]	Ur 10 <sup>-3</sup> [mm]	Uz 10 <sup>-3</sup> [mm]	θ 10 <sup>-3</sup> [mm]
700	9.37	-32.2	-74.1	-41.7	29.19
720	4.66	-16.6	-77.9	-42.6	19.45
740	1.27	-4.2	-81.9	-43.6	2.39

#### 4. 결론

벌크 아몰퍼스 판재의 반구 펀치 딥 드로잉 공정을 열·기계학적 유한요소해석을 수행하였다. 과냉 액상구간에서의 완전 뉴토니안 점성, 높은 변형률 속도나 유리전이온도 근처에서의 논뉴토니안 점성 그리고 변형초기에 과응력 상태(stress overshoot)와 저응력 상태(stress undershoot)를 되풀이하는 응력진동을 유한요소해석에 반영하였다.

펀치속도, 다이곡률, 클리어런스, 마찰계수, 블랭크 홀더 하중(BHF), 초기성형온도 등등의 다양한 공정조건에 영향을 조사하였으며, 펀치속도, 블랭크 홀더 하중 및 초기성형온도의 영향은 매우 치명적인 것으로 예측되었다.

성형 후에 다이와 펀치를 제거하는 과정에서 발생하는 즉각적인 탄성회복과 상온으로 냉각되는 과정에서 열전달과 그에 따른 열·탄성 변형을 각각 구분하여 모델링하였다. 펀치속도, 블랭크 홀더 하중 및 초기성형온도 등이 스프링 백에 미치는 영향을 세밀히 조사하였으며, 본 연구의 결과는 아몰퍼스 판재성형공정의 설계에 지침이 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 한국생산기술연구원 연구원이 주관하는 차세대신기술개발사업 중 벌크

아몰퍼스 및 하이브리드재 정형부품 제조 기술개발(과제번호:10006940)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. H-S Chen, H. KaTo, A. Inoue, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, pp.1808-1811, 2000.
2. H-S Chen, Y. Kawamura, H. KaTo, A. Inoue, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, pp.5184-5187, 2000.
3. H-S Chen, Y. Kawamura, H. KaTo, A. Inoue, *Materials Science and Engineering*, A304-306, pp.785-762, 2001
4. H-S Kim, H. Kato, A. Inoue, H. Chen, *Acta Materialia*, 52, pp.3813-3823, 2004
5. J. Lu, G. Ravichandran, W.L. Johnson, *Acta materialia*, 51, pp.3429-3443, 2003
6. Y. Saotome, H. Iwazaki, *Microsystem technologies*, Vol. 6, pp. 126-129, 2000.
7. Y. Saotome, A. Inoue, "New Amorphous Alloys as Micromaterials and Processing Technologies.", *The 13th Annual Int. Conf. on MEMS*, pp.288-292, 2000.
8. 윤상현, 고현권, 김용일, 이용신, *대한기계학회 2003년도 추계학술대회*, pp.1804-1809, 2003.
9. M.L. Vaillant, V. Keryvin, T. Rouxel, Y. Kawamura, 2002, *Scripta Materialia*, Vol. 47, pp. 19-23.
10. William L. Johnson, 1996, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*.
11. J.F. Loffler, W. Johnson, 2001, *Scripta mater.*, Vol. 44, pp.1251-1255.
12. M. Demetriou, W. Johnson, 2004, ? Steady non-Newtonian flow of Vitreloy-1 in continuous extrusion? *Materials Science & Engineering*, (in press).
13. 이용신, 2004, ? 벌크아몰퍼스 소재의 성형공정 해석모델 개발? Technical report to KITECH.
14. Y-S Lee, 2004, 뒤틀 deformation Behavior of Bulk Amorphous Alloys during Hot Forming? *Trans. KSTP*, Vol. 13, No. 8, pp 696-703.
15. Y-S Lee, 2004, 뒤틀 finite Element Simulations for Hot Forming of Bulk Amorphous Alloys? ISMANAM 2004, Tohku Univ. Japan