

아몰퍼스합금 성형공정의 모델링 현황

이용신#

Current Status of Modeling for Forming of Amorphous Alloys

Y-S Lee

1. 서론

아몰퍼스 상태란 무정형 즉 형식이 없는 상태를 말하며, 어원은 그리스어의 A-morpho에 기인한다. 학문적으로는 원자가 규칙적으로 정렬된 구조를 갖는 결정에 대응하는 용어로서 비정질, 무정형 또는 유리모양이라는 의미로 사용된다.

아몰퍼스 합금은 구성금속의 원자 배열이 장거리 규칙성이 없는 불규칙한 상태의 합금이다. 아몰퍼스 합금은 유리와 같이 외관이 수려하고 기계적성질이 우수하며 과냉액상구간을 갖는다. 과냉액상 구간에서는 결정금속에 존재하는 미끄럼면이나 결정립계가 없는 등방위체이다. 더불어 완전 뉴토니안 점성에 기인한 빼어난 성형성으로 인하여 1990년대에는 꿈의 소재라 불리며 연구계는 물론 산업계의 이목도 집중시켜왔다. 80년대 말까지는 아몰퍼스 합금의 비정질특성을 얻기 위하여 높은 냉각속이 필요하여 소재의 크기가 작은 제품에 응용이 주를 이루었다. 마이크로 또는 나노 크기의 MEMS 부품의 개발에 관한 많은 응용 연구들이 좋은 예이다. 그러나 90년대 이후에는 벌크 상태로 제조가 가능한 합금조성과 제조기술이 개발되어 최대 100mm 크기의 봉과 판재 등이 제조되어 신기능성 소재로의 응용가능성이 증대되고 있다.

MEMS 또는 NEMS의 부품들은 에칭, 광리소그라피, 무전해도금, 전기화학적 증착 또는 미세절삭과 같은 방법으로 제조되었다. 그러나 이러한 제조 방법들은 생산비의 측면에서 단조나 압출 같은 전통적인 성형공정에 비해 경쟁력이 뒤진다.

아몰퍼스 합금의 전통적인 성형공정을 개발하기 위하여는 실험적연구와 전산모사 등을 이용한 모델링연구가 병행되어야 효율적이다. 미세부품의 경우에는 단위체적당 표면적이 커져서 성형공정을 마이크로 영역까지 확대하기 위하여는 성형기술적 측면과 더불어 재료적인 측면도 고려되어야 한다. 아몰퍼스 합금의 경우에는 기존의 다결정재료는 결정립 크기에 의해 제한되는 단점을 극복할 수 있고 (Fig. 1참조), 우수한 성형성으로 인하여 각광을 받고있다. 아몰퍼스 합금은 유리전이온도와 결정화온도사이의 온도구간 (ΔT_x)에서 과냉액상상태를 갖는다. 이 영역 내에서는 완전뉴토니안 점성을 갖으나 변형률속도가 높거나 영역의 경계에서는 논뉴토니안 점성을 나타내고 특히 변형초기에는 정상상태에 이를 때까지 과응력상태(stress overshoot)와 저응력상태(stress undershoot)를 되풀이하는 응력진동도 보여준다.

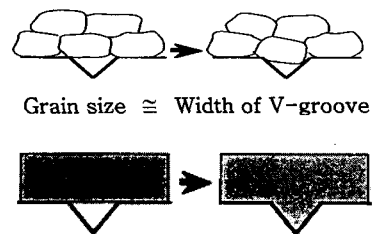


Fig. 1 Microformability of superplastic alloy & amorphous alloys

한편 성형공정 중인 아몰퍼스 소재는 부품의 형상으로부터 야기되는 비균질 변형을 필수적으로

교신저자: 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail: ysllee@kookmin.ac.kr

겪고, 이는 소재의 일부가 뉴토니안 점성을 갖지 못하게 되며 전체 성형성을 제한할 수 있음을 의미한다. 따라서 엔지니어들은 이와 같은 아몰퍼스 소재의 변형을 모델링 할 수 있는 도구를 필요로 하게 된다. 본 논문에서는 최근에 시작되어 확산되고 있는 아몰퍼스 성형공정의 모델링에 관한 연구들로부터 물성모델, 모델링 기법 및 결과들을 종합정리하고 추후에 수행되어야 할 모델링 연구의 분야를 소개하고자 한다.

2. 아몰퍼스 합금의 물성

2.1 물성 고찰

아몰퍼스 합금의 개발과 개발된 소재의 물성에 관한 많은 연구들이 보고되었다. 본 연구 논문은 성형해석 기술에 관한 것으로 제한하기에 물성고찰에 관한 대표적인 연구들을 간략히 소개한다.

Inoue[1~3] 연구그룹은 부식 저항이 좋고 낮은 열팽창계수를 갖는 Pd-계열, Zr-계열 등등 여러 종류의 아몰퍼스합금을 개발하였다. 그들은 개발한 아몰퍼스 합금의 점성유동을 실험으로 확인하였으며, 성형공정의 최적상태를 얻기 위한 기초연구를 수행하였다. Kawamura[4~5]는 Inoue 그룹의 Zr-계열 아몰퍼스합금과 조성이 다른 Zr-계열 아몰퍼스 합금을 개발하였다. 온도별 풀림 열처리를 통해 온도가 높아질수록 탄성계수와 경도 증가와 열팽창계수 감소함을 보였다. 또한, 과냉액체상태 구간에서도 논뉴토니안 점성유동과 변형경화가 있음을 실험으로 확인하였다. Johnson[6~7]는 Be을 포함하는 Zr-계열 아몰퍼스 합금 Vitreloy 를 개발하였다. 과냉액상 온도구간 내에서도 변형률속도의 증가는 국부적 공간에서 불안정하고 논뉴토니안 유동을 일으킴을 Vogel-Fulcher-Tamann (VFT) 모델로 설명하였다.

2.2 응력-변형률선도

아몰퍼스 소재 성형공정의 해석에 필요한 구성방정식 즉 응력-변형률선도는 통상의 금속의 경우와 판이하다. 일반적인 아몰퍼스 합금의 외력에 대한 반응은 초기에 즉각 나타나는 탄성변형과 내부의 미세조직 안정적 변화에 상응하여 지속적으로 변형되는 점성변형의 합으로 나타난다. 천이상태를 지나 과냉액상구간에서 점성거동을 나타내며, 적절한 변형률속도 하에서는 완전한 뉴토니안 점성거동을 과도한 변형률속도 하에서는 논

뉴토니안 점성거동을 나타낸다. 응력-변형률속도 공간에서 뉴토니안 거동과 논뉴토니안 거동을 보여주는 예가 Fig. 2에 보여진다[4]. 한편 초기의 탄성변형에서 점성거동으로 변하여 가는 동안에는 변형률속도의 크기에 따라 과응력상태와 저응력상태를 되풀이 겪으며 정상상태 변형구역에 진입한다. Fig. 3에는 Pd-계열 아몰퍼스합금의 과냉액상 온도에서 변형률속도에 따른 응력-변형률선도를 보여준다. 따라서 아몰퍼스 합금의 성형공정해석 모델은 Fig. 2, 3의 특성을 모두 반영하여야는 구성방정식을 사용하거나 변형률 속도에 따른 응력-변형률선도를 도표화한 데이터를 필요로 한다.

지금까지 소개된 구성방정식은 Chen등이 제안한 가상응력모델[1]이 있으며 다음절에서 간략히 소개한다.

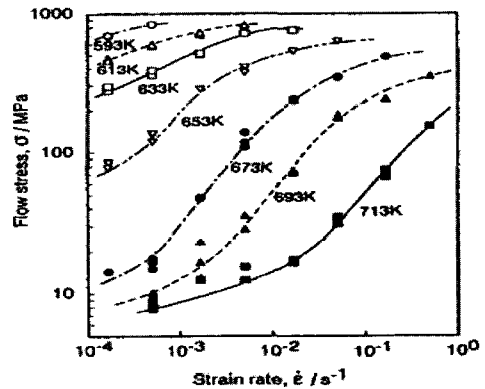


Fig. 2 Newtonian & non-Newtonian behavior of viscosity : $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ (Ref[4])

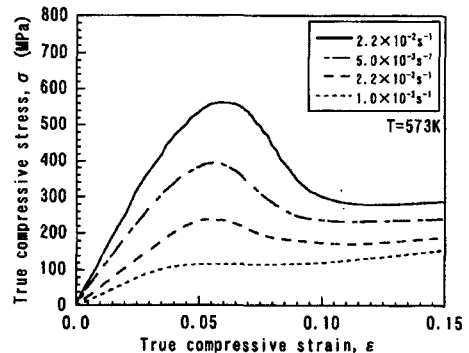


Fig. 3 Stress-Strain curves showing stress overshoot /undershoot for Pd-based amorphous alloys (Ref[1])

3. 유한요소해석모델

유한요소법은 성형중인 소재의 불균질 변형과 국부적인 변형특성을 예측하는데 많이 쓰이는 수치해석법이다. 아몰퍼스 합금 변형의 수치해석은 질량 보존, 모멘텀 보존과 필요 시에 에너지 보존을 고려하여야 한다. 아몰퍼스 합금의 마이크로 성형의 경우에는 소재가 거의 균일온도를 갖는 것으로 가정하여 등온해석을 수행하여도 큰 문제가 없다. 그러나 수 밀리미터 크기 이상의 경우에는 소재내의 온도분포가 작을지라도 아몰퍼스 소재 점성의 온도의존성이 매우 크기 때문에 열전달을 해석에 포함하여야 한다. 위의 보존식들은 일반적인 금속의 성형해석과 같으므로 본 논문에서는 생략한다.

유한요소해석 모델은 보존식들과 더불어 아몰퍼스 소재의 물성을 모사하는 구성방정식을 필요로 한다. Chen[8]등이 제안한 가상응력모델은 아몰퍼스의 변형거동을 점탄성 Maxwell 모델의 탄성과 비탄성으로 모사하였다. 탄성은 금속의 경우와 같으나 비탄성거동은 정상상태에 이르기 전까지의 과응력·저응력의 응력진동을 상태변수인 가상응력(Fictive stress)을 도입하여 모사하였다. 여기서는 Chen 등이 일축인장에 대하여 모사한 가상응력모델을 삼차원 유한요소해석에 적용하도록 확장한 구성방정식들을 소개한다. 먼저 응력의 시간에 따른 변화는 변형률속도와 비선형적으로 변하는 응력완화시간(Relaxation time: τ_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 τ_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 τ_N 은 소재 고유의 응력완화시간이며, 실제의 해석에서 τ_f 의 초기치는 τ_N 에 매우 근접한 값을 사용하고, 가상응력(σ_f)의 초기치는 영으로 한다. Fig. 4에서는 Pd-계열 아몰퍼스 소재의 일정한 변형률 속도에서 온도변화에 따른 일축인장의 균질변형을 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 얻은 결과를 보여준다.

아몰퍼스 성형공정의 유한요소 해석에서는 위의 구성방정식들을 계산하는 부프로그램을 만드는 방법 외에도 Fig. 3, 4 등을 도표화하여 사용하는 것도 가능하다.

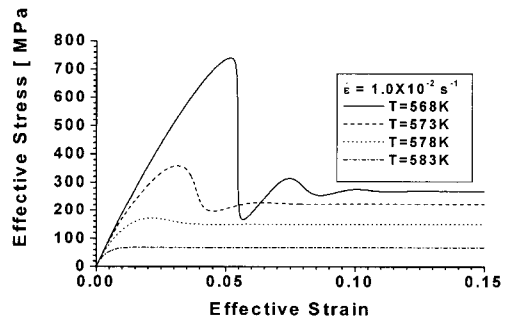


Fig. 4 Stress-Strain curves at the fixed strain-rate of 0.01 for Pd-based amorphous alloys

4. 성형공정해석

아몰퍼스 합금의 성형공정을 유한요소법을 이용하여 수치해석하는 연구를 발표한 논문은 아직은 많지 않은 실정이다. 다음에 몇몇 발표된 논문의 연구를 간략히 소개하고자 한다.

4.1 정상상태 압출

정상상태 연속 압출공정의 열·기계학적 유한요소 해석이 Dometriou와 W. Johnson에 의해 수행되었다. 그들의 유동해석에서는 Zr-계열 아몰퍼스(Zr_{41.25}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni₁₀Be_{22.5}: Vitreloy-1)의 논뉴토니안 유동을 고려하였다. 연속주조의 압출 중인 아몰퍼스는 비압축성 유동은 Navier-Stokes 식을 풀어 구하

였고, 채널 속에서 아몰퍼스의 정상상태 대류 열 전달도 고려되었다. 모멘텀 보존과 에너지 보존이 완전 결합된 열·기계학적 해석에서 Vitreloy-1은 온도와 변형률속도 의존성을 갖는 뉴턴유체 점성이 가정되었다. 정상상태의 유동을 해석하여 변형초기의 과응력이나 저응력현상은 해석에 반영되지 않았다. Fig. 5에는 정상상태의 오일러리안 유한요소 해석으로 구한 축방향 유동 속도의 분포를 보여준다. 이러한 속도 분포를 바탕으로 표면의 마찰에 의한 점성유동의 감속과 이를 보상하는 중심부 가속, 전단 얇아짐(Shear Thinning) 등의 압출유동 특성을 분석하였다. 또한 정상상태에서 몰드의 온도분포는 거의 일정하나 아몰퍼스 소재는 몰드로의 열손실로 인하여 입구와 입구에서 1cm 떨어진 지점 사이에서도 상당한 온도차가 있음을 예측하였다.

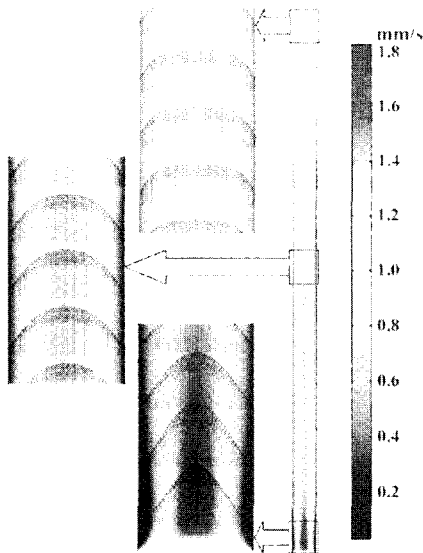


Fig. 5 Steady state axial velocity profile (Ref[11])

4.2 마이크로 단조

아몰퍼스 합금의 개발 초기에는 소재의 크기가 수백 마이크로미터 이하로 작아, 응용 예도 마이크로 기어의 압출과 같은 마이크로 성형이 주를 이루었다[8~10]. Kim[12] 등은 Saotome 등이 수행한 마이크로 업셋팅과 Nano-imprinting의 유한요소 해석을 수행하였다. Kim 등은 가상응력모델의 계산 알고리즘을 부프로그램으로 만들어 범용프로그램인 MSC.MAR와 결합하여 해석을 수행하였다.

소재의 크기를 고려하여 등온해석을 수행하였다. 업셋팅의 유한요소 해석에서는 아몰퍼스의 변형이 정상상태에 이르기 전에는 과응력상태를 겪는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다(Fig. 6 참조). 그들의 Nano-imprinting 유한요소해석에서는 금형의 형상이나 공정조건이 성형의 성공여부에 치명적인 조건이 됨을 보여주었고, 유한요소해석이 공정설계에 큰 공헌을 할 수 있음을 확인하였다.

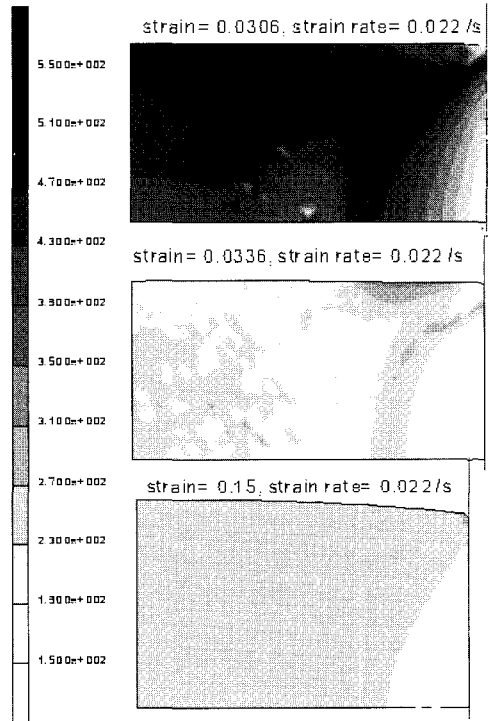


Fig. 6 Distribution of effective stress during upsetting (Ref[12])

4.3 밀리 업셋팅과 밀리 판재성형

Lee[13~14]는 소재의 크기가 수 밀리미터가 되는 벌크 아몰퍼스 합금의 응력진동과 과냉액상구간 경계에서의 뉴턴유체 거동까지도 반영하는 유한요소해석을 수행하였다. 소재의 크기를 고려하여 열·기계학적 해석을 수행하였다. 업셋팅해석에서는 가상응력모델 계산 알고리즘을 부프로그램으로 만들어 상용의 ABAQUS와 결합하여 해석을 수행하였다(Fig.4 참조). 또한 각종 공정변수가 성형성에 미치는 영향을 조사하였으며, 공정수행 초기온도와 펀치속도가 가장 중요한 인자인 것을 확인하였다.

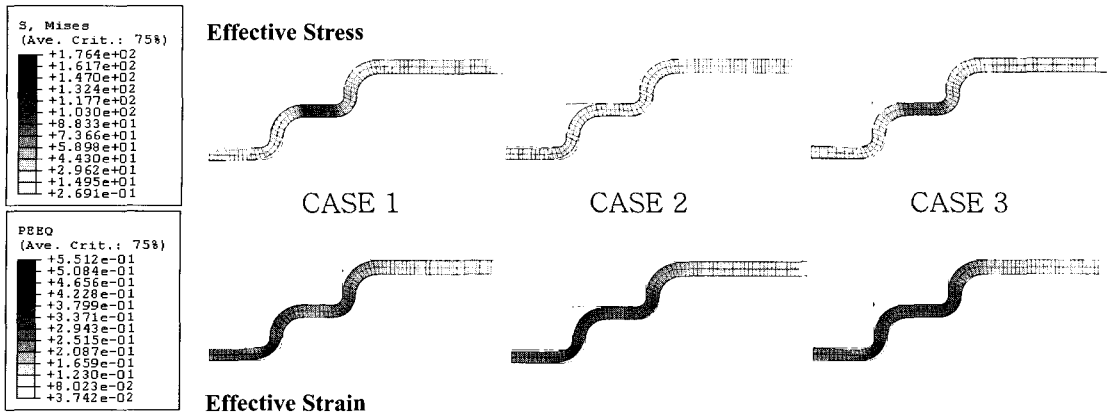


Fig. 7 Distribution of effective stress and strain at the final stage for three cases(Ref[13])

더불어, 통상적으로 두 패스를 요하는 밀리판재의 다단 딥 드로잉 공정 해석을 수행하였다. 두개의 펀치를 일체형으로 만들어 한번의 공정으로 수행하는 경우(CASE 1), 일반 금소판재의 성형에서와 같이 1 단계에서는 두개의 펀치가 동시에 이송하고 2 단계에서는 안쪽의 펀치만 이송하는 경우(CASE 2), 마지막으로 안쪽의 펀치가 바닥까지 먼저 이송된 후에 고정되고 바깥 쪽의 펀치가 2 단계로 이송하는 경우(CASE 3)를 해석하여 최종단계에서의 응력분포와 변형률 분포를 비교하였다(Fig. 7). 유한요소해석은 일체형 펀치를 이용한 한 번의 공정으로도 최종 형상을 성공적으로 얻을 수 있음을 예측하였다. 이러한 결과는 아몰퍼스 소재의 우수한 판재 성형성으로 인한 것으로 사료되었다.

5. 맺음말

아몰퍼스 합금을 미세 및 밀리 부품의 제조에 적용하기 위한 성형공정을 개발에 필수적인 공정 해석 모델링에 관한 연구들을 검토하였다. 아몰퍼스 소재의 과냉액상영역에서의 변형특성과 이를 모사하는 가상응력모델, 성형공정의 모델링 기법 및 그에 따른 해석 결과들을 간략히 소개하였다.

아몰퍼스 합금의 성형은 고온에서 성형되거나 소재의 크기가 마이크로 단위일 경우에는 등온공정으로 가정하여 해석을 하여도 적절한 것으로 사료된다. 그러나 크기가 수 밀리미터 이상으로 커

지면 열전달 현상을 해석에 반영하여야 한다.

이는 과냉액상온도 구간에서 아몰퍼스 소재의 점성이 온도에 매우 민감하기 때문이다. 고온에서는 10도 미만의 간격에서 온도별로 기계적 물성과 열물성에 관한 데이터를 정밀하고 안정되게 측정할 수 있는 기술의 개발도 이루어져야 한다.

성형해석의 기법은 기존의 공정해석 모델들 중에서 적절한 적용이 가능하나 물성모델의 개발에는 여지가 많다. 지금까지는 응용 분야가 제한적이고, 형태도 비교적 단순한 부품들에 적용이 시도 되었다. 최근에는 과냉액상 온도구간이 넓어지고, 비교적 가격 경쟁력이 있으며, 크기가 큰 벌크 아몰퍼스 합금의 개발이 급격히 이루어져 응용 분야가 확대 될 것으로 기대된다. 이에 형상이 복잡한 삼차원 형상의 벌크부품 개발에 일조할 수 있는 수치해석 연구들도 시도되어야 할 것이다. 고온에서 성형 후에 상온으로의 냉각과정에 관한 모델링 연구는 전무한 상태로 실용적인 공정설계를 위해서는 냉각과정의 열·기계학적 수치해석 연구와 그에 필요한 물성측정 연구가 시급한 실정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 한국생산기술연구원이 주관하는 차세대신기술개발사업 중 벌크 아몰퍼스 및 하이브리드재 정형부품 제조 기술개발(과제번호:10006940)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kato, Y. Kawamura, A. Inoue, H. S. Chen, 1998, Appl. Phys. Lett. Vol.73, p. 3665.
- [2] A. Inoue, 2000, Stabilization of Metallic Supercooled Liquid and Bulk Amorphous Alloys, Acta mater. Vol 48, pp.279~306.
- [3] 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.
- [4] Y. Kawamura, T. Shibata, A. Inoue, T. Masumoto, 1977, Scripta Materialia, Vol. 37, No.4, pp. 431~436.
- [5] M. L. Vaillant, V. Keryvin, T. Rouxel, Y. Kawamura, 2002, Scripta Materialia, Vol. 47, pp. 19~23.
- [6] William L. Johnson, 1996, Bulk Metallic Glasses a New Engineering Material, Current Opinion in Solid State & Materials Science.
- [7] J. F. Loffler, W. Johnson, 2001, Crystallization Pathways of Deeply Undercooled Zr-Ti-Cu-Ni-Be Melts, Scripta mater., Vol 44, pp. 1251~1255.
- [8] 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.
- [9] Y. Saotome, H. Iwazaki, 2000, Microsystem technologies, Vol. 6, pp. 126~129.
- [10] Y. Saotome, 1977, Microforming and Fabrication of Micromachines with Amorphous Alloys, Proc. The 3rd Int. Micromachine Symposium.
- [11] M. Demetriou, W. Johnson, 2004, Steady non-Newtonian flow of Vitreloy-1 in continuous extrusion, Materials Science & Engineering, (in press).
- [12] S. Yoon, K. Baik, H. S. Kim, 2004, Microforming of Bulk Metallic Glasses: Constitutive Modelling and Applications, Trans. of Materials Processing, KSTP, Vol. 13, No. 2, pp. 168~1732.
- [13] Y-S Lee, 2004, Deformation Behavior of Bulk Amorphous Alloys during Hot Forming, Trans. of Materials Processing, KSTP, Vol. 13, No. 8, pp. 696~703.
- [14] Y-S Lee, 2004, Finite Element Simulations for Hot Forming of Bulk Amorphous Alloys, ISMANAM 2004, Tohku Univ. Japan.