

변형경화성을 갖는 점소성재의 인발공정에서 결함성장의 유한요소해석

함승연, 이용신
국민대학교 기계공학과

Finite Element Analysis of Damage Evolution in Drawing of Hardening Viscoplastic Metals

Hahm, Seung-Yeun and Lee, Yong-Shin
Department of Mechanical Engineering, Kookmin University

ABSTRACT

Strip drawing of strain-hardening, viscoplastic materials with damage is analyzed by a rigid plastic finite element method. A process model is formulated using two state variables, one for strain hardening from slip dominated plastic distortion and the other for damage from growth of microvoids. Application of the model to steady state drawing is given via implementation in a consistent penalty finite element formulation. The predicted density changes as a result of void growth are compared to those from experiments reported in the literature. The effects of drawing conditions such as drawing speed and die angle on the mechanical property changes are studied.

1. 서 론

공학 재료의 성형 가공은 재료의 미세 조직(Microstructure)의 변화를 수반하는 소성 변형에 의하여 원하는 형태의 제품을 만든다. 미세 조직의 변화들 중에서 미세 기공(Microvoid)의 발생 및 성장은 재료의 기계적 성질을 열성화시키며, 결국에는 재료의 파괴를 유발하게 되는데 이러한 현상을 총칭하여 재료 결함(Material Damage)이라 칭한다.^[1-5] 따라서 성형 가공되는 재료에 미세 결함이 있는 부분은 즉각적으로 제거되어야 하며, 그렇지 않을 경우 다음 단계의 가공 공정에서 재료의 파괴를 가져 오거나, 그 부분에서 결함의 성장이 가속화되어 제품 수명의 단축을 가져오게 된다.

인발, 압출 또는 압연시에는 다이 사이의 변형이 일어나는 지역의 중심부에는 악어 모양의 균열(Central Burst)이 발생하는 것이 보고되어 왔고^[7,8] 이를 규명하기 위한 많은 연구가 있었다. Coffin과 Rogers^[7]는 Central Burst가 미세 기공의 성장에

의한 것임을 확인하였다. Avitzur^[8], Pepe^[14] 등은 Central Burst를 일으키는 인발 공정 해석을 위하여 상계법, 미끄럼 선장법을 이용하였다. 위의 연구들은 미세 기공의 성장에 따른 체적 변화를 고려하지 않은 소성 변형을 해석하여 응력과 변형률(또는 변형률 속도) 분포를 얻고 후처리 과정으로 기공률 발전식을 이용하여 축적된 기공률을 계산하였기 때문에, 미세 기공의 성장에 따른 기계적 성질의 열성화가 공정 해석에는 반영되지 못하였다. 최근에 들어 Aravas^[15]는 Gurson^[10]에 의해 개발된 다공질 재의 항복식(Yield Function)을 사용하여, 압출 성형되는 연성재 내의 기공률 성장을 예측하고자 하였다. Gurson은 완전 강소성 기질 내에서 구형 기공의 성장을 연구하여 다공질 재의 항복식을 개발하였기 때문에 기질의 변형 경화가 없는 것으로 가정하였다. 결과적으로 Aravas의 연구는 인발된 재료의 기공률을 과대 예측(4% 이상)하는 경향을 보여 주었다.

본 연구에서는 미세 기공을 포함하고 있는 변형 경화성, 변형률속도 의존성 금속(Strain-Hardening, Viscoplastic Metal)의 성형가공 공정해석 모델을 개발하고자 한다. 이 모델은 미세 조직들의 변화에 따른 기계적 성질의 변화를 반영하기 위하여 두개의 상태 변수를 도입하는데, 첫번째 상태 변수는 전위 밀도의 증가에 의한 변형 경화를, 두번째 상태 변수는 미세 기공의 성장에 따른 재료 열성화를 반영하고자 한다. 궁극적으로 본 연구에서는 기공률의 성장을 추적할 수 있는 유선적분법을 포함하는 성형가공 공정해석 모델을 제시하고, 알루미늄 스트립 드로잉공정에 적용하여 각종 공정조건이 결함의 성장등 기계적성질의 변화에 미치는 영향을 연구한다.

2. 수치해석모델

본 연구의 성형해석모델은 인발, 압출 및 압연등의 입체성형공정의 해석에 관점을 두고 있다. 이러한 성형공정은 대변형에 의해 소재의 형상을 변화시키고, 또한 미세 조직의 변화가 동반된다. 거의 모든 공학재료는 결함을 내재하고 있고 소재의 변형과 더불어 그 결함들은 더욱 커지게 된다. 결함을 내재하는 소재의 성형가공 해석에서는 기공의 성장에 따른 체적 변화가 명백하므로 변형체 역학에서 고려하는 보존식(Conservation Equations)에는 운동량보존외에 질량보존을 포함시켜야 한다. 소성일의 열발산에 따른 온도 변화를 예측하기 위하여 에너지 보존도 고려하여야 한다.

2.1 속도 및 압력

기공률의 성장에 가장 중요한 인자인 정수압은 소성유동의 해석에서 부정정변수(Statically Indeterminate variable)로 이의 정확한 계산에는 어려움이 있었다. 이를 위하여 본 연구에서는 질량보존법칙에서 유도되는 압축성유동의 연속 방정식을 구속 조건으로 하고, 운동량보존으로부터 얻어지는 평형방정식의 가상일을 극소화하는 형태의 Consistent Penalty 유한요소모델(CPFEM)이 제시되었다.

$$\delta J = - \int_V \underline{\sigma} \cdot \delta \underline{d} dV + \int_V \underline{b} \cdot \delta \underline{v} dV + \int_{s_0} \underline{t} \cdot \delta \underline{v} dS \quad (1)$$

소재의 변형경화성 및 변형률속도의존성의 변형특성은 윗식의 첫번째항에서 편차응력 텐서에 관한 구성방정식으로 반영된다.

$$\underline{\sigma}' = (1 - \Phi) \frac{\sigma_e}{3d_e} \underline{d}' \quad (2)$$

σ_e 와 d_e 의 비는 Hart에 의해 개발된 스칼라 상태변수모델의 항복조건으로부터 취하였다. 즉

$$\sigma_e = \sigma_e(d_e, \sigma^*; \theta) \quad (3)$$

윗식에서 상태변수 즉 하드니스(σ^*)는 전위운동에 기초한 소성변형의 강도를 나타낸다. 소성변형이 진행됨에 따라 전위밀도와 전위엇킵이 증가하여 전위엇킵은 전위운동에 저항으로 작용하게 된다. 따라서 변형경화성은 하드니스의 발전식으로 묘사될 수 있다. Hart모델의 상세한 설명은 참고문헌 [11]와 [12]에 주어져 있다.

소재의 체적변형이 단지 기공의 성장에 의한것임을 가정하면, 질량보전은 다음과 같이 표현된다.

$$tr(\underline{d}) = \frac{\dot{\Phi}}{1 - \Phi} \quad (4)$$

윗식은 구속조건으로 만족될수 있으며, 압력으로 벌칙화(penalization) 한후에 범함수를 구하면 다음과 같다.

$$\delta I = \int_V \left[P - \lambda \left\{ tr(\underline{d}) - \frac{\dot{\Phi}}{1 - \Phi} \right\} \right] \delta p dV \quad (5)$$

여기에서 λ 는 penalty parameter이고, 본 연구에서는 유한요소의 Gauss 선택점에서의 유효 점성계수의 10^6 배로 값을 취하였다. 본 연구의 주관점인 미세기공들의 성장은 체적변화를 일으키며, 이의 예측을 위한 기공률 성장모델로 Lee 와 Dawson^[6]에 의해 개발된 것을 사용하였다. 그들은 구형의 기공을 중앙부에 포함하는 기질이 원통형과 구형인 단위모형에서 다양한 외력을 받을때 기공의 성장을 조사하였다. 기질은 변형경화성을 갖는 점소성재로 Hart 모델이 이용되었고, 제시된 기공률 발전식은 유효 변형률 속도, 기공률 그리고 정수압 응력을 하드니스로 나눈비의 함수로 표시되었다.

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma^*}, d_e, \Phi \right) \quad (6)$$

참고문헌 [6]과 [13]에 상세한 설명이 주어진 (6)식의 기공률 성장모델에서주요특징은 정수압응력이 상태변수인 하드니스로 나눈비가 사용된 것으로 그 장점은 변형이 작은 지역에서 기공률 성장을 정확히 예측할 수 있는 점이다.

속도와 압력을 형상함수를 이용하여 근사화 한후 (1)식과 (5)식을 유한요소정식화하면 다음과 같다.

$$[K_\mu]\{U\} + [G]^T \{-P\} = \{F\} \quad (7)$$

$$[M_p]\{-P\} = -\wedge [G]\{U\} + \{F_\phi\} \quad (8)$$

$$\wedge = \sum_i^{NQP} \lambda_i W_i$$

여기에서 W_i 는 Gauss 가중계수이고, NQP는 Gauss 선택점의 수이다. (7)과 (8)식에서 $\{-P\}$ 를 소거하면 단지 속도만이 미지수로 되어 다음과 같은 최종의 유한요소정식을 얻는다.

$$[K_\mu + K_\lambda]\{U\} = \{F\} - [G]^T [M_p]^{-1} \{F_\phi\} \quad (9)$$

$$[K_\lambda] = \wedge [G]^T [M_p]^{-1} [G] \quad (10)$$

여기에서 유한요소 강성행렬 $[K_\mu + K_\lambda]$ 는 대칭성을 유지하고 있으며, 속도의 함수로 비선형성을 내포하고 있으므로 반복법을 이용하여 강성행렬을 수정시켜가며 속도를 구한다. 일단 속력을 구하면 압력은 (8)식에서 후처리로 구할수 있다.

2.2 온도, 하드니스 와 기공률

온도 분포는 에너지 보존식에서 Galerkin 의 가중 잉여치를 최소화하여 얻는다. 이 과정은 보편적인 것으로서 본 논문에서는 생략하였다. 두개의 상태변수 즉 하드니스 와 기공률은 유선적분법(Streamline integration method)를 이용하여 구하였다. 유선적분법에서는 먼저 입자의 유동경로를 찾는 것으로 부터 시작한다. 유선상에서의 입자속도는 다음과 같다.

$$v_s = \frac{\partial x_s}{\partial t}$$

Eulerian 검사체적내에서의 유선은 그 선상의 수 많은 점들의 좌표값(x_s)으로 명시 될 수 있다. 다음단계에서는 그 경로를 따라 하드니스와 기공률의 발전식을 적분하여 Eulerian 검사체적내의 임의 점에서의 하드니스와 기공률을 계산할 수 있다.

3. 스트립 드로잉 공정해석

본 연구에서 제시한 공정해석모델의 타당성을 검토하기 위하여 연속 다섯 패스의 스트립 드로잉 공정이 선택되었다. Coffin 과 Rogers는 알루미늄 스트립 드로잉에서 기공들의 성장에 따라 감소된 실제의 밀도를 측정하였으며, 그것은 유한요소해석 예측결과의 비교대상이 되었다. 그들의 실험에 사용된 스트립은 폭 5.0cm, 두께 0.5cm로 2차원 평면변형해석의 일반적인 조건을 만족시키고 있다.(그림1)

유한요소해석에서 사용하는 mesh의 크기는 실험에 사용된 시편의 크기와 상응하나 중심면의 대칭성을 고려하여 스트립의 윗쪽 반을 요소분할 하였고, 그것은 174개의 9-절점 Lagrangian 요소, 속도 및 온도분포 해석을 위하여는 모두 767개의 절점으로 구성되었다.(그림2) 문헌에 보고된 바에 의하면 두개의 드로잉 다이사이의 중심부에

서 기공률의 성장이 커서 Central bursting의 원인이 되고 있다. 이에 따라 mesh의 형태도 변형지역(deformation zone)에서 세밀하도록 만들었고, 이 지역에서 유선적분법을 효율적으로 사용하기 위해 유한요소의 크기에 따라 유선적분구간크기를 자동조절하는 법이 고안되었다. 각요소에서 소성유동방향으로의 요소간격의 약 1/10이 적절한 유선적분 구간크기로 추천되었다. 가공중인 스트립은 대변형에 수반되는 소성일발산에 의한 온도증가, 다이 및 대기와 접촉에 따른 열손실등이 있어 온도변화를 겪게된다. 수치해석에서는 실험조건과 같이 인발되기전의 스트립의 온도는 373K(알루미늄 용융점의 40%), 인발속도는 1,2,3 cm/s로 하였다. 두개의 상태변수 (σ^* , Φ)의 초기치는 Eulerian 유한요소해석에서 검사체적입구에서의 경계조건이 된다. 첫번째 상태변수인 하드니스(σ^*)는 알루미늄 고유의 것이고, 기공률(Φ)의 초기치는 0.0011로 알루미늄의 이론밀도와 실험에서 첫번째 드로잉공정전에 측정한 실제밀도로부터 구하였다. 이어지는 두번째 이후의 공정에서의 검사체적입구에서 상태변수의 경계조건은 앞선 공정의 검사체적 출구에서의 상태변수값이 사용되었다.

첫번째 공정해석은 Coffin 과 Rogers가 행한 실험과 일치하여 15° 다이 각도로 각 패스당 13.5%의 두께감소를 이루는 연속 5패스 드로잉공정이 선택되었다. 그림3와 그림4에서는 처음 세 패스(각각 두께감소율은 13.5%, 25.2% 그리고 35.3%)에서 하드니스와 기공률의 분포를 보여주고있다. 첫번째 패스후에 하드니스는 중심부보다 표면에서 증가되었는데 이것은 다이와의 접촉부에서 보다 큰 전단변형률을 유발하기 때문이다. 반면에 기공률은 표면보다 대칭면 즉 중심부에서 큰값을 주었는데 이것은 인발공정의 특성에서 중심부에서는 인발방향으로 큰 인장력을 일으키고 결과적으로 양의 정수압응력이 크게되어 기공의 성장을 촉진시키기 때문이다. 비슷한 경향들은 이어지는 패스에서 보다 뚜렷하게 나타나고 있다. 이와 같이 중심부에서 기공률이 커진것은 문헌에 보고된 바와 같은 Central burst의 원인이 될 수 있다.

두번째 패스에서는 표면근처에서도 기공률이 성장하는 것이 보이고 있는데 이것은 다이 접촉부에서 큰 전단변형에 기인하는 것으로 실험에서 보고된 표면크랙의 원인이 되고있다. 두번째 패스에서 알루미늄 스트립의 평균변형률 증가는 첫번째 패스와 같으나, 하드니스의 증가율은 줄어들고 있으며, 이것은 변형이 진척됨에 따라 변형경화성의 발전속도 즉 전단변형에대한 저항(유동응력)의 증가속도는 점차 작아지는것을 의미한다. 그러나 변형이 진척됨에 따라 기공률은 그 증가속도가 커지고 있으며, 그것은 기공의 성장속도는 기공이 클수록 커지기 때문이다. 또한 각 패스의 검사체적 출구면에서 하드니스의 두께방향으로의 분포는 기공률의 분포보다 완만한데 이것은 실험에서 보고된 것과 같은 경향이다. 이어지는 공정에서도 하드니스와 기공률의 발전은 비슷한 경향이 나타나는 것으로 조사되었다.

알루미늄 스트립의 인발공정중에는 기공률의 성장에따라 실제의 알루미늄 밀도가 감소하게 된다. Coffin 과 Rogers는 두께감소율에 따른 알루미늄이 밀도감소를 보고하였으며, 이것은 본 연구의 수치해석에 의한 결과와 비교되었다. 그림5에서 보여지는 바와 같이 두께감소율에 따른 밀도변화의 크기 및 경향이 비교적 일치하고 있으며, 제시된 모델의 타당성을 입증하고있다.

인발가공에서 소재의 소성유동 및 기공률의 성장에 영향을 주는 중요한 인자에는 인발다이각도, 인발속도 및 마찰계수등이 있다. 일반적으로 높은 마찰계수와 인발속도는 기공률의 성장을 촉진시키는 것으로 본 연구에서 조사되었으며, 이러한 경향은 실험에 의해 관측된 것과 같다. 그림6와 그림7에서는 10°, 20°, 30°의 다이각도에서 두께감소를 20%로 인발하는 공정해석에서 얻어진 하드니스와 기공률의 분포를 보여주고 있다. 같은 두께감소율의 인발공정에서는 다이각도가 클수록 소성변형지역이 작으나, 두께방향의 큰 압축으로 인발방향으로 큰 인장력을 발생시킨다. 따라서 다이각도가 크면 중심부에서는 보다 큰 양의 정수압응력이 발생되고 기공률의 성장속도가 커지게되어, 인발후에는 소재의 평균기공률도 증가됨을 보여주고 있다.

4. 결 론

소성가공중에 일어나는 대변형은 소재의 미세조직을 변화시켜 재료의 기계적 성질을 열성화시키는 경우가 종종있다. 본 연구에서는 두개의 상태변수, 하드니스와 기공률을 도입하여 소성변형에 따라 유발되는 변형경화성과 미세기공의 성장에 따른 기계적성질의 열성화를 공정해석모델에 반영하였다. 미세기공의 성장에 따른 체적변화를 반영하기위해, 질량보전법칙을 구속조건으로 하는 Consistent Penalty Finite Method(CPFEM)을 이용하였으며, CPFEM은 기공률 성장에서 매우 중요한 정수압응력을 정확히 계산할 수 있었다. 또한 정상상태 성형공정의 Eulerian 해석에서 유선을 따라 상태변수의 발전을 추적할 수 있는 유선적분법이 본 연구의 공정해석 모델에 도입되었다.

연속 다섯패스의 알루미늄 스트립 드로잉 공정을 유한요소 해석을 하여 문헌에 보고된 결과와 비교 검토하였다. 유한요소 해석에 의한 하드니스와 기공률 변화에 대한 예측은 실험결과와 일치하여, 제시된 공정모델의 타당성이 입증되었다. 또한 드로잉속도, 드로잉 다이각도등의 드로잉 공정조건이 기공률의 성장등 기계적 성질의 변화에 미치는 영향을 조사하였다.

본 연구에서는 기공들의 합체(coalescence)나 생성(nucleation)이 비교적 적은 경우 즉 기공률 2~3%미만의 소재의 성형공정을 대상으로 하였다. 이러한 경우에는 본 연구에서 제시한 바와 같이 기공률의 변화만을 반영하는 공정해석으로도 기계적 성질의 변화를 예측할 수 있으나, 기공들의 합체나 생성이 활발하고 국부적인 파괴에 이를 때는 기공의 형상 및 분포등이 고려되어야하며 앞으로의 연구과제라 할 수 있겠다.

참 고 문 헌

- [1].Kachanov, L.M., Time of the fracture process under creep conditions. Izv. Akad. Nauk. SSSR O.T.N.Tekh. Nauk. 8,26(in Russian), 1958
- [2].Krajcinovic, D., Damage mechanics, Mechanics of Materials, 8:117-197,

1989

- [3].Leckie, F.A., The constitutive equations of continuum creep damage. Phil. Trans. of the R. Soc. of Lond., A, 288:27-48, 1978
- [4].Cocks A.C.F. and M.F. Ashby, On creep fracture by void growth, Progress in Materials Science, 27:189-44,1982
- [5].McClintock, F.A., A criterion for ductile fracture by growth of holes. ASME Journal of Applied Mechanics, 35:363-371, 1968
- [6].Lee, Y-S and P.R.Dawson , Modeling ductile void growth in Viscoplastic materials, Mechaics of Materials 15: 21-34, 1993
- [7].Coffin, Jr. L.F. and H.C. Rogers, Influence of pressure on the structural damage in metal forming processes, Trans. ASM, 60:672-686, 1967
- [8].Avitzur B., Analysis of central bursting defects in extrusion and wire drawing, ASME Journal of Engineering for Industry, 90:79-91,1986
- [9].Engelman M.S., R.L. Sani, P.M. Gresho, and M. Bercovier, Consistent versusreduced integration penalty methods for incompressible media using several old and new elements, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2:25-42, 1982
- [10].Gurson, A.I., Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I - Yield criteria and flow rules for porous ductile media. J. of Engineering Meterials and Technology, ASME, 99:2-15, 1977
- [11].Hart E.W, Constitutive relations for inelastic deformation of metals Journal of Engineering Materials and Technology, 98:193-202, 1976
- [12].Lee Y-S. and P.R. Dawson. Obtaining residual stresses in metal forming after neglecting elasticity, ASME Journal of Applied Mechanics, 111:318-327, 1989
- [13].이용신, 연성금속내의 미세기공성장에 따른 기계적성질의 변화를 반영 하는 성형 가공 공정해석 모델개발, KSF 931-1000-011-1, 1994
- [14].Pepe J.J, Central Burst Formation During Hydrostatic Extrusion, Metals Engineering Quarterly,ASM, 16:46-52, 1976
- [15].Aravas N., The analysis of void growth that leads to central bursts during extrusion, J. Mech. Phys. Solids, 34:55-79,1986

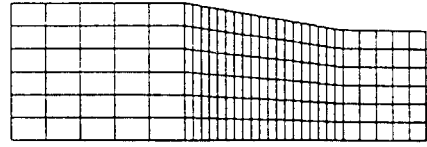
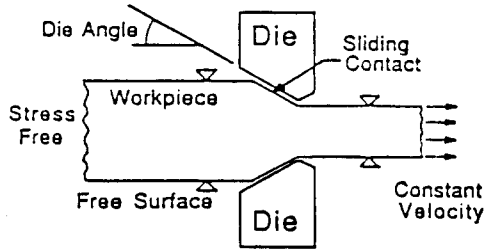


그림 1 스트립드로잉공정의 개략도 그림 2 스트립드로잉공정의 유한요소 mesh

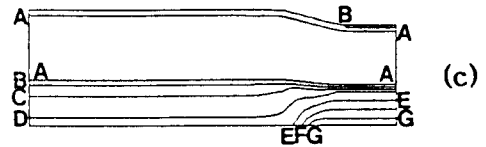
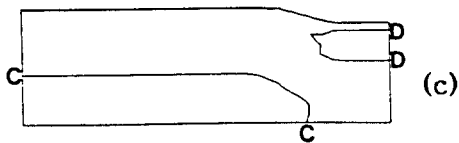
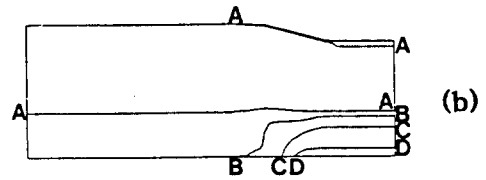
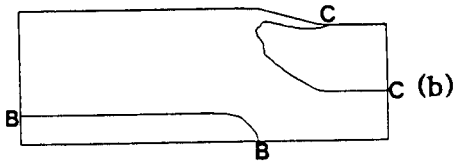
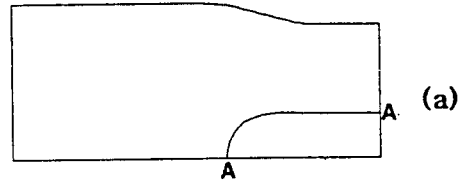
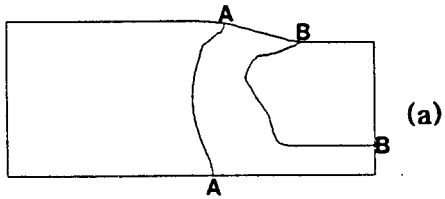


그림 3 하드니스분포: (a) Pass1, 13.5%두께감소 (b) Pass2, 25.2% 두께감소 (c) Pass3, 35.3%두께감소 $A=75\text{Mpa}$, $\Delta\sigma=25\text{MPa}$, 드로잉 각 15°

그림 4 기공률분포: (a) Pass1, 13.5%두께감소 (b) Pass2, 25.2% 두께감소 (c) Pass3, 35.3%두께감소 $A=0.001$, $\Delta\phi = 0.25 \times 10^{-3}$, 드로잉 각 15°

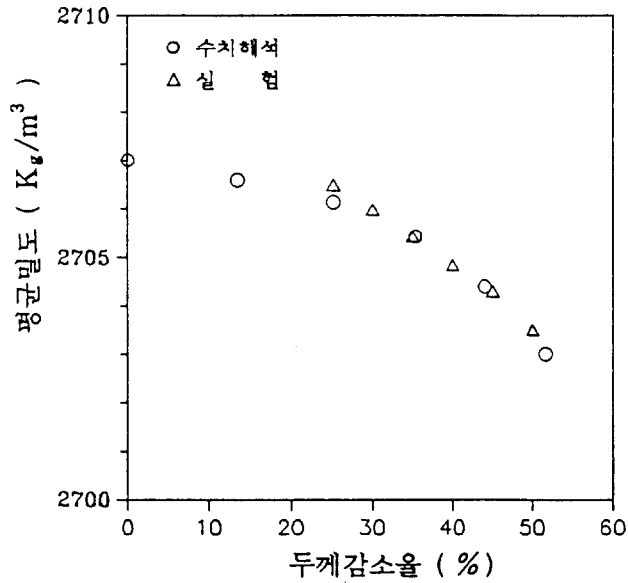
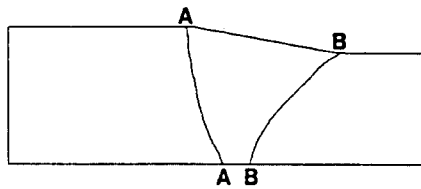
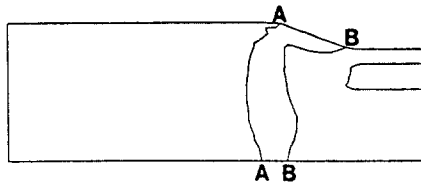


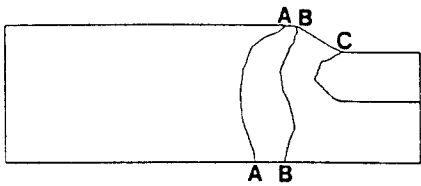
그림 5 두께감소에 따른 평균밀도변화



(a)

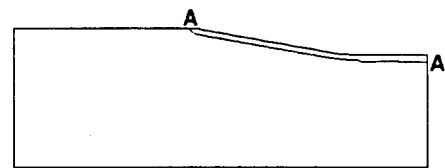


(b)

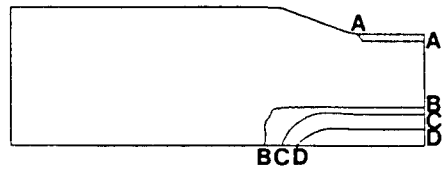


(c)

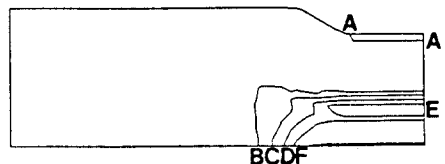
그림 6 하드니스분포: (a)드로잉 각=10° (b)드로잉각=20° (c) 드로잉각=30° : 20%두께감소, A=75Mpa, $\Delta\sigma = 25\text{MPa}$



(a)



(b)



(c)

그림 7 기공률분포: (a)드로잉 각=10° (b)드로잉각=20° (c)드로잉각=30° : 20% 두께감소, A=0.001, $\Delta\phi = 0.25 \times 10^{-3}$