

〈論 文〉

구리 피복 알루미늄 봉의 정수압 압출에 의한 성형

박훈재* · 나경환* · 조남선* · 이용신**

Hydrostatic Extrusion of Copper-Clad Aluminum Rod

Hoon-Jae Park, Kyoung-Hoan Na, Nam-Seon Cho and Yong-Shin Lee

Abstract

The present study is concerned with the hydrostatic extrusion process for the copper-clad aluminum rod through metallurgical joining. The rigid viscoplastic finite element analyses are performed for the steady state extrusion process of the bimetal rod. An algorithm for finding the interface profile of the bimetal rod by tracking a particle path in Eulerian domain is presented. The distributions of the effective strain rate, equivalent stress and hardness are examined for the several extrusion ratios. Experiments are also carried out for the copper-clad aluminum rod at room temperature. It is found out that the finite element predictions are generally in good agreement with the experimental observations. The detail comparisons of the extrusion loads predicted by the finite element method with those by experiments are given.

Key Words : Copper-Clad Aluminum Rod, Hydrostatic Extrusion, Viscoplastic Finite Element Method, State Variable Model, Interface Profile Correction

1. 서 론

과학기술의 발전과 더불어 고부가가치 제품의 요구가 증대되고 있고, 이를 충족시키기 위해서는 복합재, 고강도 합금강, 특수 금속 등의 새로운 소재의 개발이 필수적이다. 클래드는 복합소재의 일종으로 어떤 금속을 다른 금속으로 피복하고 그 경계면에

서 주로 확산에 의하여 새로운 금속조직으로 접합하고 있는 것으로 정의되며, 성질이 다른 금속을 합쳐 단일 금속으로는 얻을 수 없는 새로운 기능이나 보다 고도의 성능을 발휘시킨 재료로 그 종류는 다양하며, 용도 또한 광범위하다.

정수압 압출공정은 고압의 유체로 둘러싸인 소재가 유체의 압력이 임계점에 도달했을 때 금형의 형상에 따라 성형되는 공정으로 봉재, 형재, 관재, 극세선 및 복합재 등의 고속압출을 가능하게 함으로써 제품의 생산성 향상, 제품의 기계적 특성 향상 및

*생산기술연구원

**국민대학교 기계공학과

난소성 재료(Al, Ti, Zr, Cu)의 성형성 해결 등 여러 측면에서 획기적인 성형방법이다. 금속을 성형하기 위해 정수압을 응용하려는 생각은 이미 19세기로 거슬러 올라가 1893년에 Robertson에 의해 특허화되었으나⁽¹⁾ 공정 또는 장치제작의 난점들로 인하여 1960년대 후반에 이르러서야 비로서 산업용 정수압 압출장치의 개발에 성공하였다. 그 이후 Bridgman은 금속이나 다른 재료에 정수압을 작용시키면 연성이 증가된다는 사실을 실험적으로 증명하였다.⁽²⁾ 1970년대에 이르러 Ahmed⁽³⁾는 금형각도, 압출속도 및 재질 등의 압출인자가 클래드 봉의 성형에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. Nishihara는 고압이 재료의 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구의 중요성을 인식하여 여러 온도 범위에서 실험적 연구가 진행되어 연강, 마그네슘, 티타늄, 그리고 아연 등의 재료의 강도와 연성을 여러 압력과 온도에서 결정하였다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 클래드 봉재의 정상상태 정수압 압출공정을 이해하고 압출소재의 유동특성을 예측하기 위해 점소성 유한요소해석을 수행한다. 특히 오일러리안 해석에서 클래드재 경계면의 올바른 위치를 예측하는 알고리즘을 제시한다. 또한 구리가 피복된 알루미늄 클래드 봉의 정수압 압출 실험을 병행하여, 제시된 수치해석 모델에 의해 예측된 값들의 타당성을 비교·검토하고 클래드 봉재의 정수압 압출공정을 규명하고자 한다.

2. 수치해석

본 연구에서는 이종재의 금속조직학적 접합에 따른 복합재를 만드는 정수압 압출공정에 관한 유한요소해석을 위하여 금속재의 변형경화성 점소성 변형은 상태변수모델로 묘사하였고, 오일러리안 검사체적내에서의 상태변수의 변화는 유선적분법으로 예측한

다. 클래드 봉재의 정상상태 성형공정의 오일러리안해석에서는 이종재 접합면의 위치를 포함하는 검사체적을 초기에 가정하여야 한다. 그러나 많은 경우에 초기에 가정된 경계면은 최종의 위치와 일치하지 않으며 올바른 경계면의 위치는 해의 하나로 구하여야 한다. 본 연구에서는 경계면을 가로질러 물질유동이 없어야 하는 점을 이용하여 올바른 경계면을 예측한다.

2.1 구성방정식

성형가공중인 소재의 대변형은 미세조직의 변화를 유발하고 이에 따라 재료의 기계적 성질의 변화를 일으킨다. 금속의 경우에는 대개 변형경화성과 변형률 속도의존성을 모두 갖고 있으며 미세조직의 변화에 따라 물성특성도 변하게 된다. 이에 미세조직의 발전에 따른 기계적 성질의 변화를 반영하도록 상태변수모델들이 제시되어 왔으며, 스칼라 상태변수모델의 경우에는 변형경화의 정도를 상태변수로 나타내고 있다. 이 경우에 구성방정식은 다음과 같은 형태로 구성된다.

$$\sigma' = \sigma'(d'_e, \sigma^*; \theta) \quad (1)$$

$$\dot{\sigma}^* = \dot{\sigma}^*(d'_e, \sigma^*; \theta) \quad (2)$$

위의 식에서 σ' 와 d'_e 은 각각 유동응력과 상당변형률속도이고 θ 와 σ^* 은 온도와 상태변수이다. 위식들은 편차응력과 편차변형률속도의 관계를 규명하는 유동규칙과 더불어 소성변형의 구성방정식을 확립하게 된다. 본 연구에서 이용한 상태변수모델은 Hart⁽⁷⁾에 의해 제시되고 Dawson 등에 의하여 간략화된 모델로 참고문헌(5)에 상세히 주어져 있다. 간략화된 Hart모델에서 상태변수 σ^* 는 하드니스로 지칭되고 있는데, 전위의 국부적 밀도를 수학적 표현화한 것으로 통상의 경도와는 다르다. 변형이 진행됨에 따라 전위의 밀도는 증가하고 이에 따른 전위 엉킴의 증가는 전단변형경화를 야기시킨다.

따라서 변형경화정도는 식 (2) 형태의 상태 변수 발전식으로 묘사될 수 있다.

2.2 수치해석모델

속도, 압력 및 온도 분포를 유한요소법을 이용하여 구하고, 상태변수는 유선적분법을 도입하여 계산하며, 이종재 경계면의 위치를 수정하는 알고리즘과 더불어 본 연구의 수치해석모델을 완성한다. 온도분포를 구하는 Galerkin 유한요소정식화과정은 보편적인 것으로 본 논문에서는 생략을 하고, 속도 및 압력, 상태변수를 구하는 수치해석 방법과 경계면 수정을 위한 알고리즘을 간략히 소개한다.

● 속도와 압력 : 오일러리안 검사체적내에서는 금속의 유동은 가상일률에 관한 범함수로부터 구할 수 있다. 즉

$$\delta J = - \int_V \boldsymbol{\sigma} \cdot \delta \mathbf{d} dV + \int_V \mathbf{b} \cdot \delta \mathbf{u} dV + \int_S \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{u} dS = 0 \quad (3)$$

많은 경우에 금속은 비압축성유동을 가정하며, Consistent Penalty 유한요소정식화(CPFEM)과정에서는 구속조건으로 사용된다.

$$\int_V \delta p [p - \lambda \text{tr}(\mathbf{d})] dV = 0 \quad (4)$$

윗식에서 λ 는 요소내의 Gauss Quadrature 점마다 변하는 벌칙상수로 유효전단점도의 10^6 배로 사용하였다. 압력항(p)는 복합유한요소정식화에서와 같이 직접 형상함수로 근사화되거나 조합과정전에 소거되어 벌칙유한요소법과 같이 절점에서의 속도만을 미지수로 다음과 같은 최종의 유한요소정식을 만든다.

$$[K_\mu + K_\lambda]\{U\} = \{F\} \quad (5)$$

윗식에서 소행렬 $[K_\mu]$ 는 점소성유동특성에 의한 강성행렬이어서 비선형이며, 소행렬 $[K_\lambda]$ 는 체적변형이 없도록 구속하는 역할을

한다.

● 상태변수 : 유선적분법에서는 오일러리안 검사체적 내에서 물질의 유동경로를 찾고, 그 유선에 따라 상태변수발전식을 적분하여 상태변수 분포를 구한다. 유선적분법은 참고문헌(6)에 상세히 소개되고 있다.

● 경계면 수정 : 구리와 알루미늄의 올바른 경계면은 오일러리안 검사체적 입구에서 접촉부에 있는 입자의 유동경로를 추적하여 예측한다. 오일러리안 검사체적 내의 입자의 하류 유동경로의 위치는 현재 위치에 대한 Taylor급수 전개로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} = \mathbf{x}^t + \frac{\partial \mathbf{x}^t}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial^2 \mathbf{x}^t}{\partial t^2} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots (6)$$

윗식에서 $\mathbf{x}^{t+\Delta t}$ 와 \mathbf{x}^t 는 각각 입자의 시간 $t + \Delta t$ 와 t 에서의 위치 벡터이고, 시간 증분 Δt 는 유선상의 거리를 입자속도 크기로 나누어 구한다. 따라서 식 (6)은 시간 증분 Δt 의 세제곱 이상의 고차항을 무시한 후 입자의 속도벡터와 시간 Δt 동안의 유선상의 거리로 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} \approx \mathbf{x}^t + \mathbf{u}^t \left(\frac{|\Delta \mathbf{x}^t|}{|\mathbf{u}^t|} \right) + \frac{1}{2} \mathbf{u}^t \cdot \nabla \mathbf{u}^t \left(\frac{|\Delta \mathbf{x}^t|}{|\mathbf{u}^t|} \right)^2 \quad (7)$$

가정된 경계면을 수정하기 위해서는 먼저 오일러리안 검사체적 입구에서 접촉부에 매우 근접한 알루미늄(또는 구리) 입자의 유동경로를 식 (7)에 따라 구한다. 실제의 공정에서는 경계면을 가로질러 물질유동이 없어야 하므로 앞에서 구한 경로가 처음에 가정한 경계면을 가로질러 구리(또는 알루미늄) 부분으로 들어가면 입자의 유동경로와 가정한 경계면과의 편차로부터 물질유동이 없는 수정된 경계면을 구하고 그에 따른 유한요소격자를 새로 만든다. 시뮬레이션은 올바른 경계면을 갖는 유한요소격자에서 수렴된 해를 얻을 때까지 위의 작업을 되풀이

한다.

3. 실험

3.1 실험장치 구성

정수압 압출실험은 실험 연구용으로 개발된 150 Ton급 수평식 정수압 압출기에서 수행하였다. 본 정수압 압출기는 0~25 mm/s까지 램의 속도를 변화시킬 수 있으며, 램의 변위와 속도를 측정할 수 있는 LVDT와 압출하중을 측정하기 위한 로드셀을 갖추고 있다. 정수 압출기의 주요제원은 Table 1과 같고 압출기의 외관은 Fig. 1에 나타내었다.

● 금형 : 금형의 설계 및 제작기술은 금형의 수명, 압출제품의 결함, 압출압력 등에 영향을 미친다. 단일 관재와 봉재의

압출시와는 달리, 복합재의 압출시에는 금형의 각도가 중요시 되어, 이에 적절한 금형각도로 추천된 바 있는 80°의 금형 원추각을 기준으로 압출비를 변화시켜가면서 금형을 설계하였으며, 출구부분은 3 mm 길이의 랜드 부위를 두고 여유각 3°의 각도로 벌어지게 하였다.

● 밀폐 : 정수압 압출장치의 특성중의 하나로서 초고압의 발생과 유지를 위해 다 음부위에는 특수한 밀폐가 필요하다.

- (1) 금형과 콘테이너 사이의 정적 밀폐
- (2) 램과 콘테이너 사이의 동적 밀폐
- (3) 모재와 클래드재와의 밀폐

3.2 압출실험

압출시편은 직경 32.5 mm의 알루미늄 (pure aluminum) 환봉과 외경 35 mm, 두

Table 1 Specification of hydrostatic extruder

Extrusion force	1.5 MN	Max. ram speed	25 mm/sec
Working extrusion pressure	14 Kbar	Container type	Wire-wound
Max. billet diameter	35 mm	Hydraulic power	40 Kw
Max. billet length	200 mm	Total weight	30 KN

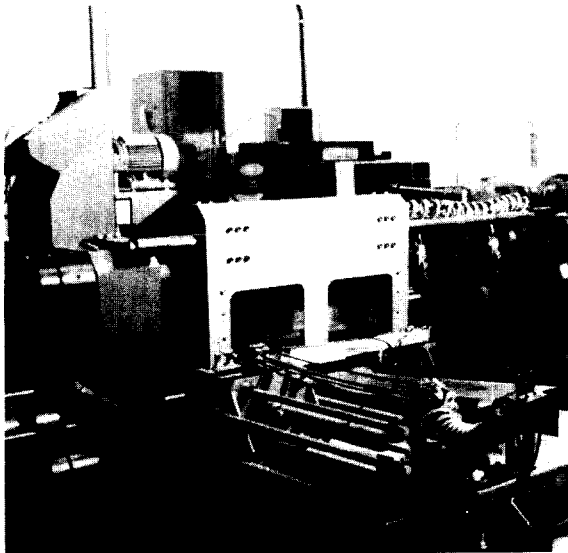


Fig. 1 Hydrostatic extruder

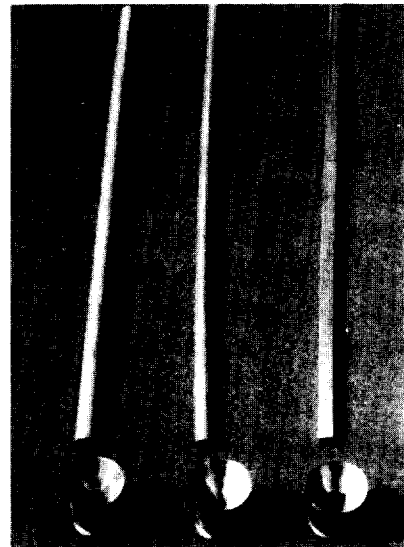


Fig. 2 Die and products

계 1.25 mm 인 구리 튜브(OFEC copper tube)를 사용하였다. 시편이 정상상태에 도달하기까지의 금형면과 시편 사이의 마찰을 최소한 줄이기 위해 시편선단에 MoS_2 액화분말을 뿌려 시편을 장착하였다. 압력전달 매체로 상업용 피마자유(castor oil)를 사용하였으며, 이는 압출공정중에 금형과 시편 사이에 윤활제의 역할도 함으로써 압출된 제품의 표면상태가 양호했다. 압출압력을 구하기 위한 펀치의 하중은 유압프레스 램과 펀치사이에 설치된 로드셀로 측정하였다. 로드셀에서 검출된 전압을 기록계에 연결하여 펀치의 하중을 그래프로 얻었다. 하중은 정상상태의 값을 취하였으며, 압출실험은 상온의 냉간상태에서 세가지 압출비에 대해 실행되었다. 금형과 압출제품은 Fig. 2에 보여지고 있다.

4. 결과 및 고찰

구리가 피복된 알루미늄 봉재를 압출하기 위한 정수압 압출 실험은 초기단계에서 압출하중이 최대가 되고 점차 정상상태에 도달한다. 그것은 다이와 소재사이의 윤활막

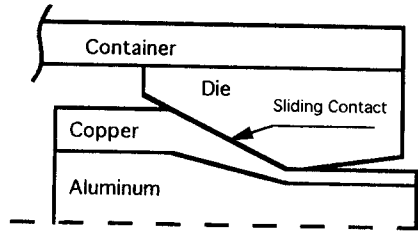


Fig. 3 Hydrostatic extrusion model

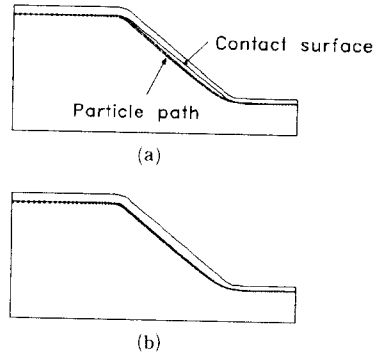


Fig. 4 (a) Before and (b) after contact surface correction

이 초기단계에서는 충분하게 성형되지 않아서 발생하는 현상으로 추측된다. 또한 압출된 제품의 시작부분이나, 표면처리가 적절치 못하였던 시편의 표면은 매끄럽지 못한

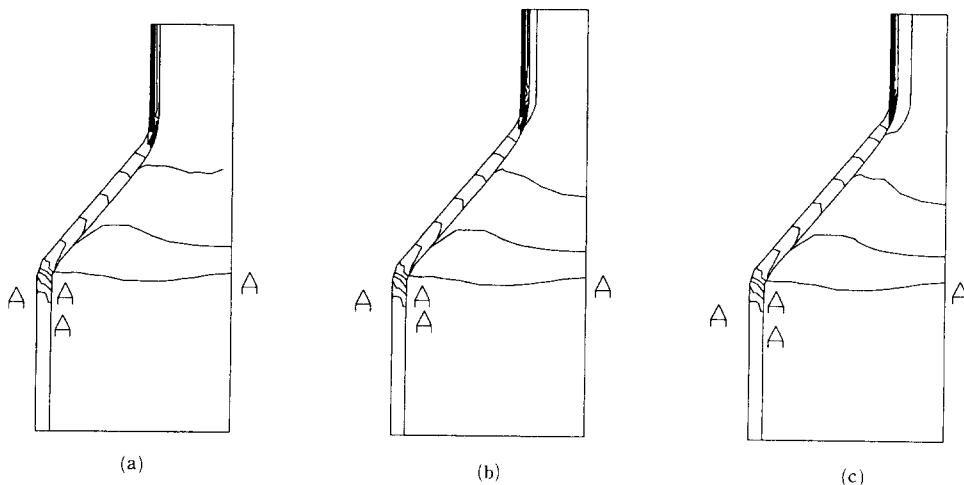


Fig. 5 Distribution of the hardness for the extrusion ratios of (a) 5.44 (b) 8.50 (c) 12.25
A-A: $\sigma^* = 0.6 \times 10^8$ Pa, $\Delta\sigma^* = 0.15 \times 10^8$ Pa

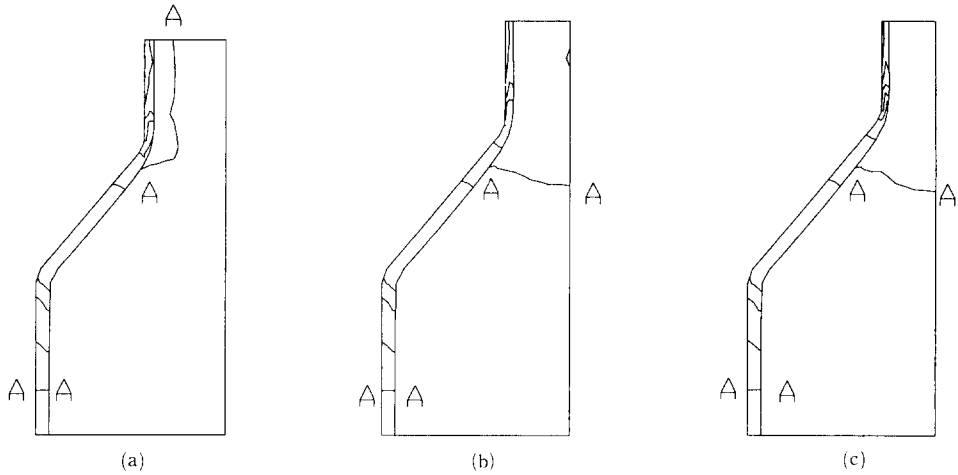


Fig. 6 Distribution of the effective stress for the extrusion ratios of (a) 5.44 (b) 8.50 (c) 12.25
 A-A : $\sigma' = 1.0 \times 10^8 \text{ Pa}$, $\Delta\sigma' = 1.0 \times 10^8 \text{ Pa}$

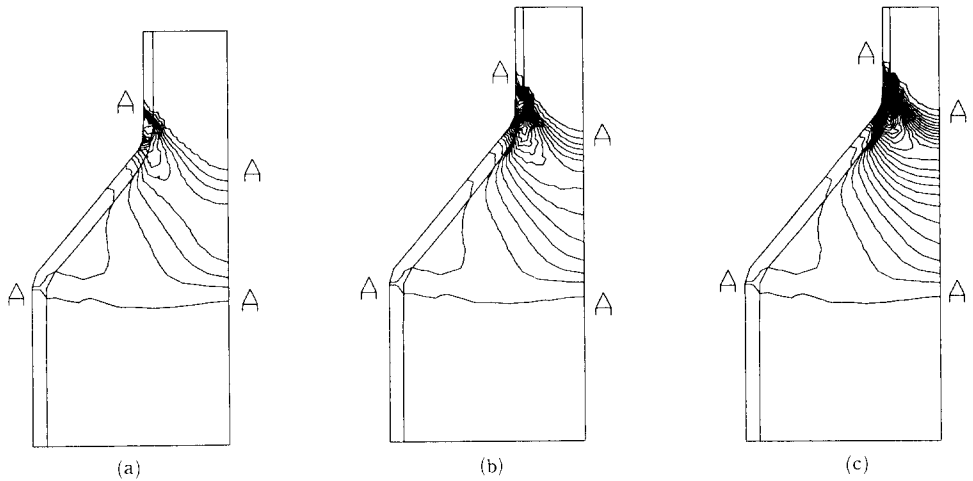


Fig. 7 Distribution of the effective deformation rate for the extrusion ratios of (a) 5.44 (b) 8.50 (c) 12.25
 A-A : $d'_e = 0.01\text{s}^{-1}$, $\Delta d'_e = 3.0\text{s}^{-1}$

유효로 인하여 표면결함을 보여주기도 하였다.

유한요소해석을 위한 축대칭 정수압 압출공정의 개략도가 Fig. 3에 주어져 있다. Fig. 4에서는 초기에 가정된 경계면을 갖는 유한요소격자와 제시된 경계면 수정 알고리즘에 의해 얻어진 최종의 유한요소격자를 보여주고 있으며 뒤에 보여주는 결과들은 수정된 유한요소격자에서 얻은 것이다.

Fig. 4에서 예측된 경계면은 다이 랜드부 근처에서 구리의 두께감소가 급격히 일어나는 현상을 보여주고 있으며 이것은 다이 사이에서 압출이 진행되는 중에는 알루미늄의 변형이 봉의 반경 감소에 큰 역할을 하고 있는 것을 의미한다.

실험에서와 같이 다이각도는 40° , 압출비는 5.44, 8.50 그리고 12.25에 대하여 구리 피복 알루미늄 봉재의 정수압 압출공정의

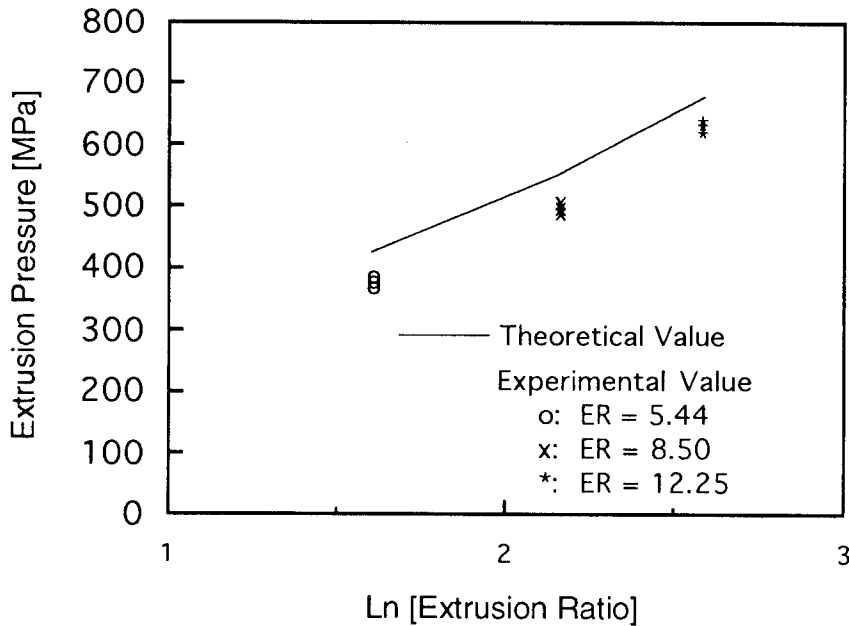


Fig. 8 Extrusion pressure vs. extrusion ratio

유한요소해석 결과가 Fig. 5~7에서 보여지고 있다. 하드니스는 봉재표면에서 중심부보다 큰 값을 보여주고 있는데 이는 다이와 소재의 접촉부분에 큰 전단변형이 있으며, 구리가 알루미늄보다 큰 변형경화성을 갖기 때문이다. (Fig. 5) 이러한 현상은 압출비가 커질수록 보다 뚜렷하게 나타나고 있다. Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 유동응력은 하드니스와 비슷한 분포를 보여주고 있는 반면, 유효변형률속도는 변형구역(deformation zone)에서 큰 값을 나타내고 최대치는 형상적인 구속이 큰 다이의 출구 랜드부위 직전에서 보여지고 있다. (Fig. 7) 압출공정에서 소재의 초기 단면적을 최종의 단면적으로 나눈 값으로 정의되는 압출비(extrusion ratio : ER)는 종종 주요 공정변수로 사용되어 왔다. 본 연구의 유한요소해석에 의해 얻은 압출압력의 압출비에 따른 변화가 실험에서 측정된 값과 비교된 것이 Fig. 8에 보여지고 있다. 압출비에 따른 압출압력의 크기와 증가되는 경향이 비슷한 것은 본

연구의 유한요소해석의 타당성을 입증한다. 그리고 경계면에서의 접합은 주로 이중재 사이의 확산 현상으로 설명되고 있고 주요한 접합변수로는 경계면의 표면상태, 온도 및 압력으로 알려져 있으며 본 실험 결과에서는 금형각도와 압출비가 클수록 접합되는 확률이 높게 나타났다.

5. 결 론

구리 피복 알루미늄 봉의 정수압 압출공정의 오일러리안 강소성 유한요소해석에서 경계면을 수정하는 알고리즘이 제시되었다. 소재의 변형경화성과 변형률속도 의존성은 상태변수모델로 표현된 유한요소해석과 압출실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구리 피복 알루미늄 봉의 정수압 압출성형에서 압출압력은 압출비의 자연로그에 선형적으로 비례하는 것으로 나타났다.
- (2) 압출비의 변화에 따라 압출하중을 측

정하여 소성이론해석 결과와 비교한 결과 서로 15% 이내로 근접하였으며, 이것으로 이론해석의 유효성을 입증하였다.

(3) 압출제품의 하드니스 분포는 클래드재의 높은 변형경화성과 금형 접촉부에서의 큰 전단변형으로 인해 표면에서 크게 나타나며, 압출비가 커질수록 뚜렷해진다.

(4) 변형률 속도는 금형출구쪽의 랜드부와 접촉하는 부분에서 가장 크며, 압출비가 클수록 큰 소성변형을 필요로 하게 되어 변형률 속도 또한 커짐을 예측할 수 있다.

참고문헌

- (1) Robertson, J., 1893, British Patent No. 19356.
- (2) Bridgman, P. W., 1952, McGraw-Hill, pp. 177~179.
- (3) Ahmed, N., 1978, J. of Mech. Working Tech., Vol. 2, pp. 19~32.
- (4) Inoue, N. and Nishihara, M., 1985, Hydrostatic Extrusion.
- (5) Lee, Y.-S., Dawson, P. R. and Dewhurt, T. B., 1990, "Bulge Predictions in Steady State Bar Rolling," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 30.
- (6) Dawson, P. R., 1984, "A Model for the Hot and Warm Forming of Metals with Special Use of Deformation Mechanism Maps," International Journal of Mechanical Science, Vol. 26.
- (7) Hart, E. W., 1976, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 98.
- (8) 나경환, 조남선, 박훈재, 1992, KAITEC-HPKR91540.