

論 文

구리-알루미늄 클래드 봉의 정수압 압출 특성 연구

김 창 훈* · 김 시 영**

A Research on Hydrostatic Extrusion of Copper-Clad Aluminum Bar

Chang-Hoon Kim · Si-Young Kim***

〈 목 차 〉	
Abstract	3.1 실험장치구성
1. 서론	3.2 압출실험
2. 유한요소해석	4. 결과 및 고찰
2.1. 구성방정식	5. 결 론
2.2. 유한요소정식화	참고문헌
3. 실험	

Abstract

The present study is concerned with the hydrostatic extrusion process of copper-clad aluminum rod through metallurgical joining. In this study, the rigid plastic finite element program, HICKORY, is used to analyze the steady state extrusion process of the bimetal rod. Simulations are performed for copper-clad aluminum rod with several extrusion ratio to give the distributions of effective strain rate, equivalent stress and hardness. Experiments are also carried out for aluminum-inserted copper rod at room temperature. It is found out that finite element predictions are generally in good agreement with the experimental observations. The detail comparison of the extrusion loads by the finite element method with those by experiments are given.

* 부경대학교 제어기계공학과 대학원생
 ** 부경대학교 제어기계공학과 교수

1. 서 론

기술의 발전과 산업의 고도화는 고부가가치 제품의 요구를 증대시키고 있고, 이를 충족시키기 위해서는 복합재, 고강도 합금강, 특수금속 등의 새로운 소재의 개발이 필수적이다. 클래드는 복합소재의 일종으로 어떤 금속을 다른 금속으로 피복하고 그 경계면에서 금속결합상태로 접합하고 있는 것으로 정의되며, 성질이 서로 다른 금속으로 구성되기 때문에 단일 금속으로는 얻을 수 없는 새로운 기능이나 보다 고도의 성능을 발휘시킨 재료로 그 종류가 다양하며, 용도 또한 광범위하다.

정수압 압출 공정은 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 난소성 재료(Ti, Zr 등)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 제작상의 난점들로 인하여 1960년대 후반에 이르러서야 비로소 산업용 정수압 압출 장치의 개발에 성공하였다. 그 이후 Bridgman은 금속이나 다른 재료에 정수압을 작용시켜 연성을 증가시킨다는 사실을 실험적으로 증명하였다^[2]. 1970년대에 이르러 Ahmed^[3]는 금형각도, 압출속도 및 재질 등의 압출인자가 클래드 봉의 성형에 미치는 영향을 실험으로 연구하였다. Nishihara는 고압이 재료의 기계적 특성에 미치는 영향의 중요성을 인식하여 여러 온도 범위에서 실험적 연구가 진행되어 연강, 마그네슘, 티타늄, 그리고 아연 등의 재료의 강도와 연성에 미치는 압력과 온도의 영향을 조사하였다^[4].

이에 본 연구에서는 클래드 봉재의 정수압 압출 공정을 이해하고 압출 소재의 유동특성을 이해하기 위해 소성변형 유한요소해석 프로그램을 이용해 이론해석을 수행하며, 예측된 값들의 타

당성을 비교, 검토하기 위해 구리와 알루미늄을 외재와 내재로 선정하여 실험을 병행하여 봉재의 정수압 압출공정을 규명하고자 한다.

2. 유한요소해석

본 연구에서는 이중재로 구성된 클래드 복합재료를 만드는 정수압 압출공정에 관한 유한요소해석을 위하여 Lee와 Dawson 등에 의해 개발된 유한요소 프로그램 Hickory^[5]를 사용하였다. 금속재의 성형공정해석을 위하여 Hickory에서는 상태변수 모델로 금속재의 변형경화성 점소성 변형을 모델하였고, 오일러리안 검사체적내에서의 상태변수의 변화는 유선적분법으로 예측하고 있다.

2.1 구성방정식

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

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma}(d_e', \sigma^*; \theta) \quad (1)$$

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

위의 식에서 $\dot{\sigma}$ 과 d_e' 은 각각 유동응력과 상당변형률 속도이고 θ 와 σ^* 는 각각 온도와 상태변수이며 $\dot{\sigma}^*$ 는 하드니스의 시간 미분값이다. 위의 식들은 편차응력과 편차변형률속도의 관계를 규명하는 유동규칙과 더불어 소성변형의 구성방정식을 확립하게 된다. 본 연구에서 이용한 상태변수 모델은 Hart^[7]에 의해 제시되고 Dawson 등

에 의하여 간략화된 모델로 참고문헌[5]에 상세히 주어져 있다. 간략화된 Hart모델에서 상태변수 σ^* 는 하드니스로 지칭되고 있는데, 특히 전위의 국부적 밀도를 수학적으로 표현한 것으로 설명될 수 있다. 변형이 진행됨에 따라 전위의 밀도는 증가하고 이에 따른 전위엥크의 증가는 전단변형경화를 야기시킨다. 따라서 변형경화정도는 (2)식 형태의 상태변수 발전식으로 묘사될 수 있다.

2.2 유한 요소 정식화

Hickory는 속도, 압력 분포를 유한요소법을 이용하여 구하고, 오일러리안 해석의 경우에 상태변수는 유선적분법을 도입하여 계산한다. 온도분포를 구하는 Galerkin 유한요소정식화과정은 보편적인 것으로 본 논문에서는 생략을 하고, 속도 및 압력, 상태변수를 구하기 위한 Hickory에 채택된 수치해석 방법을 간략히 소개한다.

속도와 압력 : 오일러리안 검사체적내에서는 금속의 유동은 가상일체에 관한 범함수로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta J = - \int_V \sigma \cdot \delta d \, dV + \int_V b \cdot \delta u \, dV + \int_s t \cdot \delta u \, dS = 0 \quad (3)$$

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

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

위식에서 λ 는 요소내의 Gauss Quadrature 점마다 변하는 벌칙상수로 유효전단점도의 10^6 배로 사용하였다. 압력항(p)는 복합 유한요소 정식화에서와 같이 직접 형상함수로 근사화되나 조합과정 전에 소거되어 벌칙유한요소법과 같이 절점에서

의 속도만을 미지수로 다음과 같은 최종의 유한요소정식을 만든다.

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

위식에서 소행렬 K_μ 는 점소성유동특성에 의한 강성행렬이어서 비선형이며, 소행렬 K_λ 는 체적 변형이 없도록 구속하는 역할을 한다.

상태변수 : 유선적분법에서는 오일러리안 검사체적내에서 물질의 유동경로를 찾고, 그 유선에 따라 상태변수발전식을 적분하여 상태변수 분포를 구한다. 유선적분법은 참고문헌[6]에 상세히 소개되고 있다.

3. 실험

3.1 실험장치 구성

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

Table 1 Main specification of hydrostatic extruder

No	Item	Specification
1	Extrusion Force	1.5MN
2	Maximum Extrusion Pressure	1.4GPa
3	Working Extrusion Pressure	1.2GPa
4	Maximum Ram Speed	25mm/sec
5	Maximun Billet Diameter	40mm
6	Maximum Billet Length	200mm
7	Container Type	Wire-Wound
8	Total Electrical Power	40KW
9	Extruder Weight	60KN

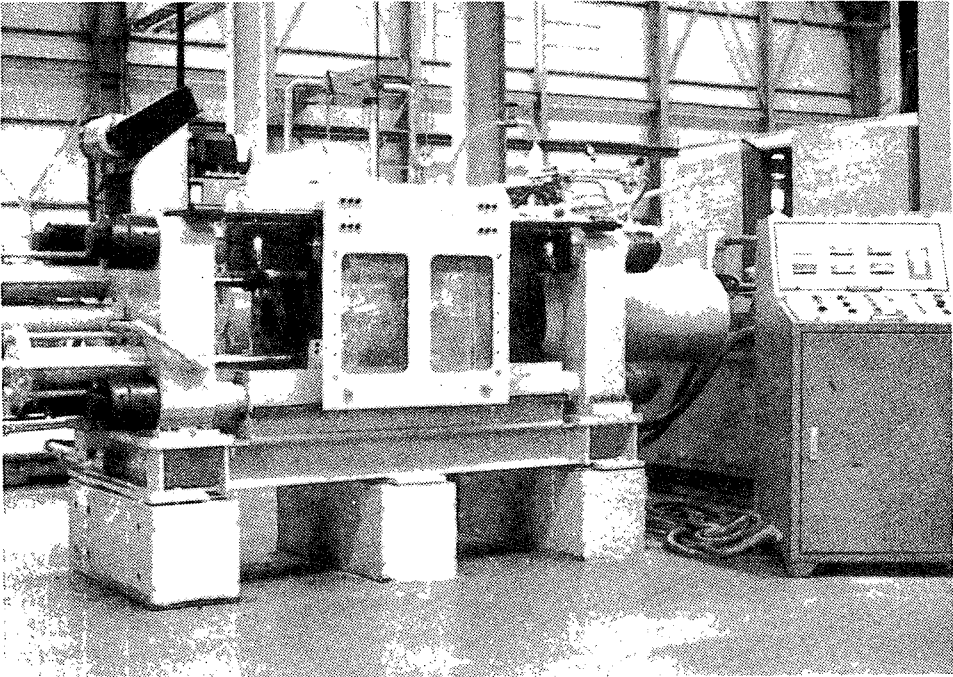


Photo 1 Hydrostatic Extruder

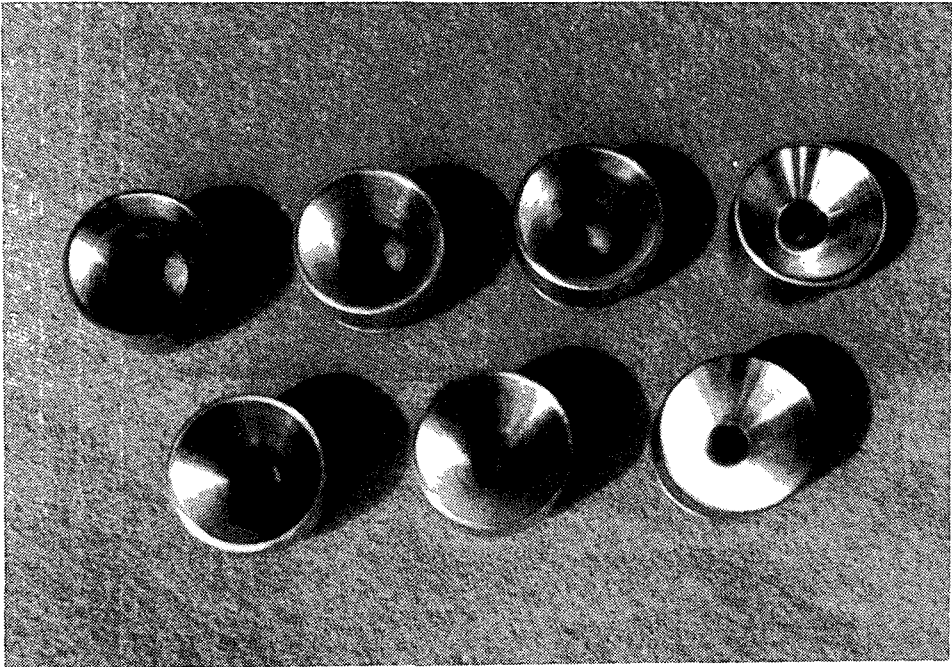


Photo 2 Extrusion Dies

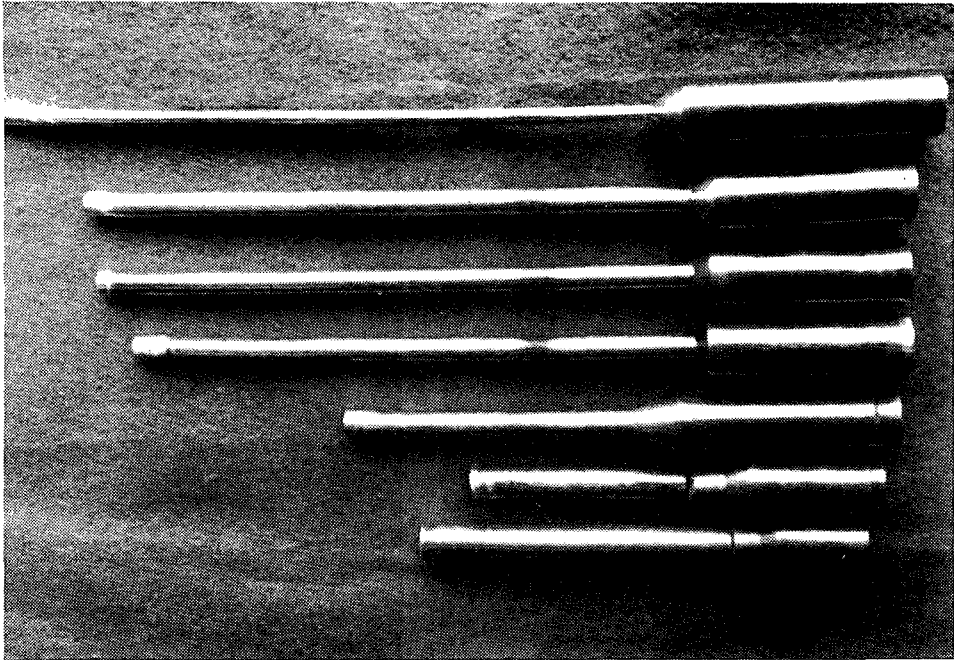


Photo 3 Extruded products

금형 : 금형의 설계 및 제작기술은 금형의 수명, 압출제품의 결함, 압출압력 등에 영향을 미친다. 단일 금속의 판재와 봉재의 압출시와는 달리, 복합재의 압출시에는 금형의 각도가 중요시되어, 이에 적절한 금형각도를 찾기 위해 금형 원추각과 압출비를 변화시켜 가면서 금형을 설계하였으며, 출구부분은 3mm 길이의 랜드 부위를 두고 여유각 3° 로 벌어지게 하였다.

밀폐 : 정수압 압출장치의 특성중의 하나로서 초고압의 발생과 유지를 위해 다음 부위에는 특수한 밀폐가 필요하다

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

3.2 압출실험

압출시편은 알루미늄(Al1100) 환봉과 구리(Commercially Pure Copper)를 사용하였다. 압출

금형의 원추반각은 22.5°, 30° 및 40° 로 하고 압출비는 4.00, 6.25 및 9.00으로 하였다. 시편이 정상상태에 도달하기까지의 금형면과 시편 사이의 마찰을 최소화한 줄이기 위해 시편선단에 MoS₂ 액화분말을 뿌려 시편을 장작하였다.

압력전달 매체로 상업용 피마자유(castor oil)를 사용하였으며, 이는 압출공정중에 금형과 시편사이에 윤활제의 역할도 함으로써 압출된 제품의 표면상태가 양호했다. 압출압력을 구하기 위한 펀치의 하중은 유압프레스 램과 펀치 사이에 설치된 로드셀로 측정하였다. 로드셀에서 검출된 전압을 기록계에 연결하여 펀치의 하중을 그래프로 얻었다. 하중은 정상상태의 값을 취하였으며, 압출실험은 상온의 냉간상태에서 세가지 압출비와 금형각에 대해 실험하였다. 압출금형과 압출제품은 Photo 2와 Photo 3에서 보여준다.

4. 결과 및 고찰

구리가 피복된 알루미늄 봉재를 제조하기 위한 정수압 압출실험은 초기단계에서 압출하중이 최대가 되고 점차 정상상태에 도달함을 보여준다. 그것은 다이와 소재 사이의 윤활막이 초기단계에서는 충분히 형성되지 않아서 발생하는 현상으로 추측된다. 또한 압출된 제품의 시작부분이나, 표면처리가 적절치 못하였던 시편의 표면은 매끄럽지 못한 윤활로 인하여 미세결함을 보여주기도 하였다.

유한요소해석을 위한 축대칭 정수압 압출공정 모델은 Fig. 1에 주어져 있다. 다이반각 30° 압출비 4.00, 내재의 반경비 0.733에 대하여 구리피복 알루미늄 봉재의 정수압 압출공정의 유한요소해석 결과가 Fig. 2에서 Fig. 4까지 보여준다.

Hardness(하드니스)는 봉재표면에서 중심부 보다 큰 값을 보여주고 있는데 이는 다이와 소재의 접촉부분에 큰 전단변형이 있으며, 구리가 알루미늄보다 큰 변형경화성을 갖기 때문이다. 이러한 현상은 압출비가 커질수록 보다 뚜렷하게 나타나고 있다. 유동응력은 Hardness(하드니스)와

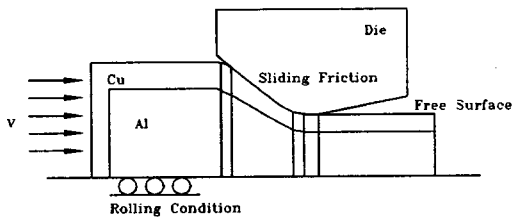
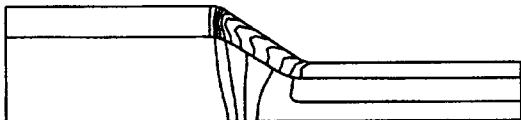
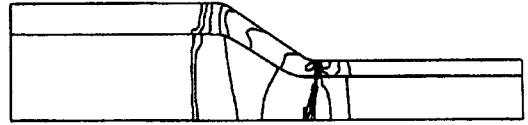


Fig. 1 Bi-metal hydrostatic extrusion model



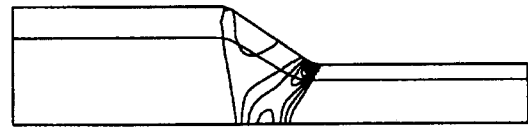
Minimum Contour value : 0.170[GPa]
 Maximum Contour value : 0.422[GPa]
 Contour Interval : 0.020[GPa]

Fig. 2 Contour of hardness



Minimum Contour value : 19.0[Pa]
 Maximum Contour value : 0.456[GPa]
 Contour Interval : 0.050[GPa]

Fig. 3 Contour of Effective stress



Minimum Contour value : 0.000[1/s]
 Maximum Contour value : 23.9[1/s]
 Contour Interval : 2.50[1/s]

Fig. 4 Contour of Effective strain rate

비슷한 분포를 보여주고 있는 반면, 유효변형률 속도는 형상적인 구속이 큰 다이의 출구 랜드부 위 직전에서 최대로 나타나고 있다. 유한요소해석에 의해 얻은 압출압력의 압출비에 따른 변화가 실험에서 측정된 값과 비교된 것이 Fig. 5에

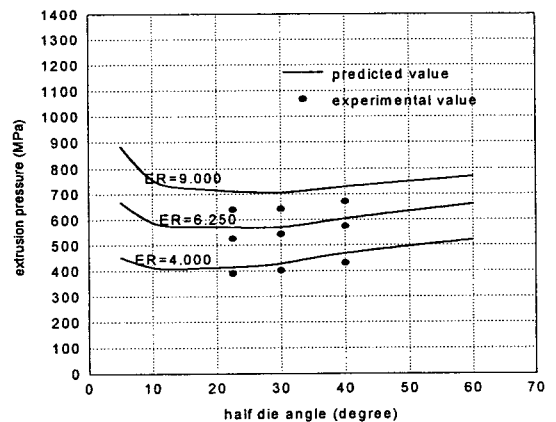


Fig. 5 Hydrostatic extrusion pressure for the various experimental conditions

보여지고 있다. 압출비에 따른 압출압력의 크기와 증가되는 경향이 비슷한 것은 본 연구의 유한요소해석의 타당성을 입증한다.

5. 결 론

구리와 알루미늄으로 조합된 클래드 복합재의 정수압 압출공정을 이해하기 위해 Hart모델에 기초를 둔 강소성 유한요소법 Program, Hickory를 이용한 이론해석과 몇 개의 공정조건에 따른 압출 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험결과 구리-알루미늄의 접촉면경계면에서 전조마찰이 유지될 경우, 정상상태에서 접촉면의 미끄럼 현상은 거의 발생하지 않고 압출전의 빌렛 단면적비는 압출후에도 유지된다.
2. 압출비와 금형각의 변화에 따라 압출하중을 측정하여 소성이론해석 결과와 비교한 결과 서로 15% 이내로 근접하는 경향을 확인하였으며, 이것으로 이론해석의 유효성을 입증하였다.
3. 압출제품의 Hardness(하드니스) 분포는 외측재인 구리의 높은 변형경화성과 금형 접촉부에서의 큰 전단변형으로 인해 표면에서 크게 나타난다.
4. 유효변형률속도는 금형접촉부의 랜드부와 접촉하는 부분에서 가장 크며, 또한 압출비가 클수록 큰 소성변형을 필요로 하게 되어 변형률

속도 또한 커짐을 예측할 수 있다.

5. 실험결과 금형반각40° 근처에서 압출재의 표면상태가 가장 양호하였으며 압출공정 진행중의 압출하중도 안정된 정상상태의 값을 보여 주었다.

참고문헌

- [1] J. Robertson, British Patent No. 19356, 1893
- [2] P. W. Bridgman, McGraw-Hill, pp177-179, 1952
- [3] N. Ahmed, J. of Mech. Working Tech., Vol.2, pp.19-32, 1978
- [4] N. Inoue and M.Nishihara, Hydrostatic Extrusion, 1985.
- [5] Y. S. Lee, P. R. Dawson and T. B. Dewhurst, "Bulge predictions in steady state bar rolling processes", IJNME, 1990.
- [6] P. R. Dawson, International Journal of Mechanical Science, 26, 227, 1984.
- [7] E. W. Hart, "Constitutive relations for inelastic deformation of metals", Journal of Engineering Materials and Technology, 98, 193, 1976.
- [8] 나경환, 조남선, 박훈재, KITECH-PKR91540, 1992.