

# 정수압 압출을 이용한 Copper-clad Aluminum 복합재 제조에 대한 연구

한운용\*, 이경엽#, 박훈재\*\*, 윤덕재\*\*, 김승수\*\*

## A study on the Fabrication of Copper-clad Aluminum Composite using Hydrostatic Extrusion

Woon Yong Han\*, Kyong Yop Rhee# , Hoon Jae Park\*\*, Duk Jae Yoon\*\* and Seung Soo Kim\*\*

### ABSTRACT

In this work, a copper-clad aluminum composite was fabricated using hot hydrostatic extrusion with various extrusion ratios (8.5, 19, 49) and semi-die angles (30, 45, 60 degree) at a temperature of 320°C. Material characteristics of copper-clad aluminum composites were determined from compression tests and hardness tests. The results showed that for ER of 8.5, the optimum semi-die angle was below or equal to 30 degree and a pressure drop was about 31%. For ER of 19, the optimum semi-die angle was in the range of 40 to 50 degree and a pressure drop was about 38%. In the case of ER=49, the optimum semi-die angle was above or equal to 60 degree and a pressure drop was about 36%. Compressive yield strength was maximum for ER of 8.5 and semi-die angle of 30 degree and the value of maximum was 155 MPa. Uniform hardness distribution was obtained as the extrusion ratio increases and the semi-die angle decreases. In the case of ER=8.5 and semi-die angle of 30 degree, the lowest extrusion pressure and the maximum compressive yield strength was obtained. Therefore, it was concluded that the optimum extrusion condition for fabricated copper-clad aluminum composites under hydrostatic pressure environment was ER of 19 and semi-die angle of 30 degree.

**Key Words** : Copper-clad Aluminum composites(Copper-clad Aluminum 복합재), Hydrostatic extrusion(정수압 압출), Extrusion pressure(압출 압력), Extrusion ratio(ER)(압출비), Semi-die angle(금형 반각)

### 1. 서론

최근의 산업환경에서 고기능, 고성능 제품의 수요가 증대함에 따라 따라 고강도, 내식성, 경제성 등이 우수한 소재의 개발이 요구되고 있다. 클래드 복합재는 이러한 성질을 만족시키는 소재로 각광을

받고 있다.<sup>1</sup> 클래드재(clad material)는 복합소재의 일종으로, 이종 또는 동종의 재료가 어떤 금속을 전면에 걸쳐 피복하고, 계면에서 접하고 있는 것으로 정의된다.<sup>1</sup> 기존의 직/간접의 일반 압출법으로 클래드재를 성형할 시 좌굴 등의 영향으로 피복재와 심재가 균일하게 형성되지 않아 클래드재 성형

접수일: 2004년 1월 15일; 게재승인일: 2004년 4월 9일  
\* 경희대학교 대학원 기계공학과  
# 교신저자: 경희대학교 테크노공학대학  
E-mail rheeky@khu.ac.kr Tel. (031) 201-2565  
\*\* 한국생산기술연구원(KITECH)

의 어려움이 있었다. 이에 반해 정수압 압출 공정은 유체로 둘러싸인 소재가 정수압 상태에서 유체의 압력이 임계점에 도달했을 때 정상상태 압출과 고속 압출이 가능하여 좌굴의 영향을 피할 수 있는 장점이 있다. 또한, 정수압 압출 공정은 압력전달 매체로 인해 소재와 컨테이너 사이의 마찰을 제거할 수 있고, 따라서 표면이 양호한 제품을 성형할 수 있다. 이러한 장점들로 인해 기술 선진국에서는 정수압 압출법을 이용하여 초전도 선재나 부스바(bus-bar) 등이 생산되고 있다.<sup>3,4</sup> 그러나 국내의 경우 정수압 압출법을 이용한 클래드재의 생산에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 공정 변수에 따른 Copper-clad Aluminum 복합재의 제조 가능성을 규명하는데 목적이 있다. 이를 위해 각각의 공정 변수에 따라 압출 성형된 Copper-clad Aluminum 복합재에 대한 압축시험 및 경도시험을 수행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 정수압 압출기

열간 정수압 압출 실험은 150 tonf급 수평형 열간 정수압 압출기를 사용하여 수행하였다. 컨테이너는 강선을 적층하는 방식에 의해 설계되었으며, 컨테이너의 크기는  $\phi 40 \times 480$  mm로 제작되었다. 컨테이너 가열은 카트리지 히터를 사용하여 임의로 제어 가능하도록 설계 제작되었다. 정수압 압출기의 주요 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of hydrostatic extruder

Extrusion Force	150 tonf
Max. Extrusion Pressure	12.0 Kbar
Max. Punch Speed	22.5 mm/sec
Max. Billet Diameter	35 mm
Max. Billet Length	200 mm
Container Heating Temperature	400 °C
Hydraulic Power	40 KW



Fig. 1 Photograph of extrusion dies

### 2.2 압출 금형

압출 금형의 설계는 금형의 수명과 압출 성형된 제품의 표면 상태에 영향을 미친다. 본 실험에 사용한 압출 금형의 형상은 원추형으로 세 경우의 압출비 (8.5, 19, 49)와 압출각 (금형 반각 30°, 45°, 60°)을 달리하여 설계하였다. 금형의 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.3 압력전달 매체

압력전달 매체는 정수압 압출공정에서 필수적인 요소라 할 수 있다. 압력전달 매체로 인해 소재와 컨테이너 사이의 마찰을 제거할 수 있고, 소재와 금형 사이에 유막이 형성되어 압출 성형된 제품의 표면 상태가 양호한 제품을 얻을 수 있다. 본 실험에서는 열간 정수압 압출에서도 발화하지 않는 선형저밀도 폴리에틸렌수지(LLDPE)를 사용하였다.

### 2.4 Copper, Aluminum 표면처리

Copper/Aluminum 클래드 빌렛을 제조하기 위한 전처리 과정으로 외경  $\phi 35$  mm, 내경  $\phi 32$  mm의 구리(OFEC) 튜브와, 직경  $\phi 32$  mm의 알루미늄(1060계) 봉재(전체 단면적에서 구리가 차지하는 단면적이 16%) 표면의 이물질을 시약(tri-chloro-ethylene)으로 세척하였다. 또한, 두 재료간의 표면적을 넓혀 이중 재료간의 접합이 잘 이루어지도록 샌드페이퍼(#100)로 구리 튜브 안쪽면과 알루미늄 봉재의 표면을 브러싱(brushing) 하였다.

### 2.5 클래드 빌렛 제조 공정

정수압 압출시 클래드 빌렛의 양 끝단은 피복재인 구리와 심재인 알루미늄 사이로 압력전달 매체가 스며들지 못하도록 밀폐하는 과정이 필요하다. 이를 위해 빌렛 뒷부분 선단에 플러그를 접합하였으며, 앞부분 선단은 압출 초기 압력을 유지하기

Table 2 Experimental condition of hydrostatic extrusion

Billet dimension(mm)		Diameter of die hole(mm)	Semi-die angle (degree)	Extrusion ratio	Working temperature
Copper	Aluminum				
φ35×1.5t	φ32	5	30	49	320℃
			45		
			60		
		8	30	19	
			45		
			60		
	12		30	8.5	
			45		
			60		

위해 금형 각도에 맞춰 스피닝 가공하여 제조하였다.

### 2.6 열간 정수압 압출 실험

구리튜브와 알루미늄 봉재를 이용하여 클래드 빌렛을 제조한 후 150 tonf급 수평형 열간 정수압 압출기를 사용하여 세 경우 압출비(8.5, 19, 49)와 압출각(30°, 45°, 60°)에 따라 각각 열간 정수압 압출 성형하였다. 압출 하중은 유압 프레스램과 펀치 사이에 설치된 로드셀을 이용하여 정상상태 하중값을 택하여 압출 압력을 측정하였다. Table 2는 정수압 압출 실험 조건을 나타내고, Fig. 2는 정수압 압출 실험 공정도를 나타낸다.

### 2.7 압축 시험

공정 변수에 따라 압출 성형된 Copper-clad Aluminum 복합재의 항복 강도의 변화를 측정하기 위해 압축 시험을 행하였다. 압축 시험은 인장 시험보다 높은 변형을 범위까지 시험이 가능하여 압출 등 대부분의 소성변형에서는 necking이 발생하는 인장시험보다 변형을 범위가 높은 압축 시험을 하는 것이 일반적이다. 압축 시험을 통하여 압출비, 압출각에 따른 압축항복강도의 변화를 측정하였다. 압축 시험은 ASTM E209<sup>5</sup>에 준하여 길이 대 직경이 2:1이 되게 제작하였다. 압축 시험은 변형도의 영향을 최소화하기 위해 1 mm/min의 시험 속도로 측정하였다.

### 2.8 경도 시험

공정 변수에 따라 압출 성형된 Copper-clad

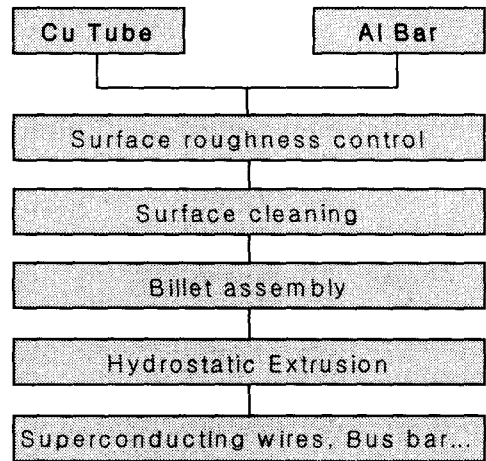


Fig. 2 Flow chart for a processing of copper-clad aluminum composite

Aluminum 복합재에 있어 압출비 및 압출각이 압출 성형된 Copper-clad Aluminum 복합재의 경도 분포에 미치는 영향을 관찰하기 위해 경도 시험을 행하였다. 경도 시험의 조건은 50 gf의 하중으로 10초 동안 부과하여 실시하였으며, 압출비 및 압출각에 따라 압출 성형된 Copper-clad Aluminum의 축방향 단면을 연마하여 단면의 중심부로부터 위치별로 경도를 측정하여 전체적인 경도 분포 경향을 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

압출비 및 압출각 변화에 따른 압출 압력의 변화를 측정하였으며 이에 대한 결과를 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. Fig. 3은 압출각 30°에서 압출비에 따른 압출 압력을 나타낸다. 정상상태에서의 압출 압력 변화는 압출비 8.5일때 약 200 MPa, 압출비 19일때 약 420 MPa, 압출비 49일때 약 590 MPa이 측정되었다. Fig. 4는 압출각 45°에서 압출비에 따른 압출 압력 변화로서, 압출비 8.5일때 약 210 MPa, 압출비 19일때 약 260 MPa, 압출비 49일때 약 420 MPa이 측정되었다. Fig. 5는 압출각 60°에서 압출비에 따른 압출 압력 변화로서, 압출비 8.5일때 약 290 MPa, 압출비 19일때 약 360 MPa, 압출비 49일때 약 380 MPa이 측정되었다. 결론적

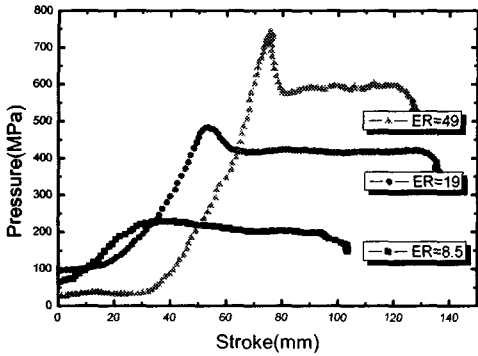


Fig. 3 Pressure-stroke curve of copper-clad aluminum composites for ER=8.5, 19, 49 at semi-die angle of 30°

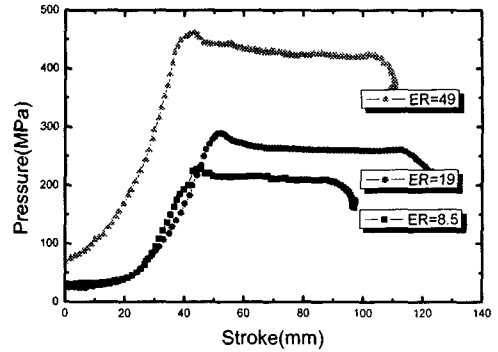


Fig. 4 Pressure-stroke curve of copper-clad aluminum composites for ER=8.5, 19, 49 at semi-die angle of 45°

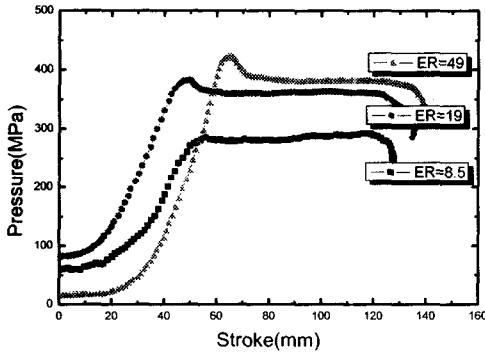


Fig. 5 Pressure-stroke curve of copper-clad aluminum composites for ER=8.5, 19, 49 at semi-die angle of 60°

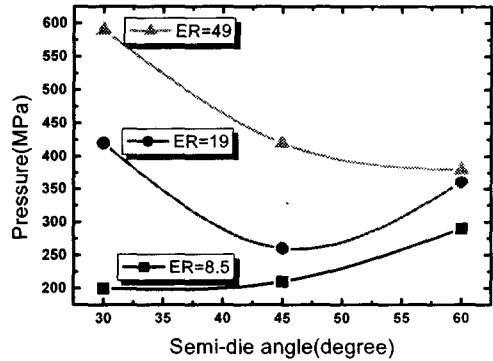


Fig. 6 Relationship between extrusion pressure and semi-die angle

으로 각각의 압출각에 대해 압출비가 증가할수록 압출 압력이 증가한다는 사실을 알 수 있다. 이는 압출 금형 직경이 작을수록 압출될 때 더 높은 마찰전단응력이 작용하는 치수효과 때문이다.

압출각이 압출압력에 미치는 영향에 대한 결과는 Fig. 6에 나타나 있다. 그림에 나타나 있듯이 압출비가 8.5인 경우 압출각이 30°에서 60°로 증가함에 압출압력은 200 MPa에서 290 MPa로 연속적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 압출비 8.5에서는 최적의 압출 금형 반각이 30° 부근이거나 30°보다

Table 3 Relationship between extrusion pressure, P and extrusion ratio, R

Semi-die angle (degree)	Extrusion pressure, P (MPa)
30	$P = 225 (\ln R - 1.22)$
45	$P = 120 (\ln R - 0.52)$
60	$P = 49 (\ln R + 3.98)$

적은 범위에서 존재함을 나타낸다고 하겠다. 압출비 19인 경우에는 압출각이 증가함에 따라 압출압

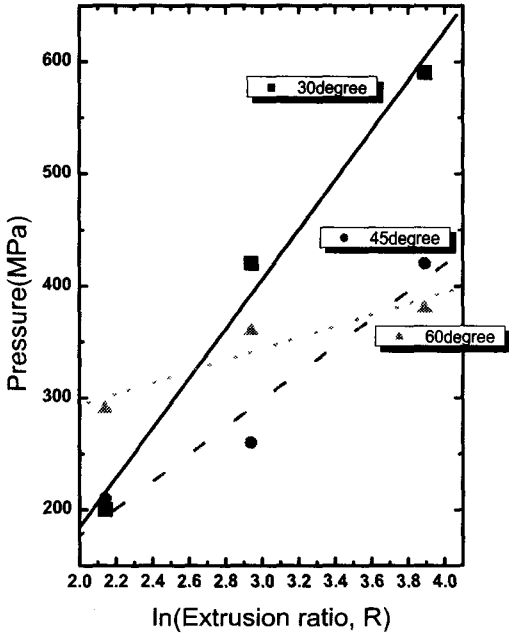


Fig. 7 Variation of extrusion pressure as a function of extrusion ratio for die angle of 30°, 45°, 60°

력이 감소하다 다시 증가함을 알 수 있다. 이는 압출비 19에서는 최적의 압출각이 40°에서 50° 범위에서 존재함을 나타낸다고 하겠다. 압출비 49에서는 압출각이 증가함에 따라 압출압력은 연속적으로 감소해 최적의 압출 금형 반각이 60° 부근이거나 60°보다 큰 범위에서 존재함을 알 수 있다. 이러한 경향을 나타내는 것은 압출각이 증가할수록 여분일(redundant work)이 증가하는 반면에 마찰일(frictional work)이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

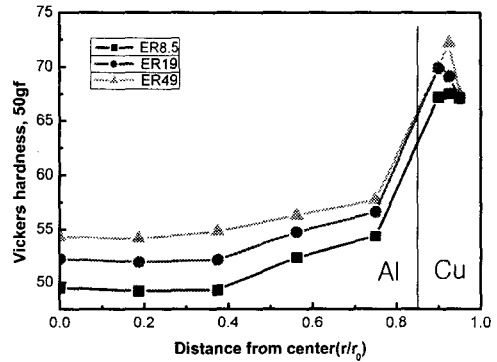
Fig. 7은 세 경우 압출각에 있어 압출비는 로그 좌표로 압출압력은 일반좌표를 적용, 압출비에 따른 압출압력의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에 나타나 있듯이 세 경우 모두 압출압력은 압출비가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 가정할 수 있다. 이는 Loh와 Chueng<sup>6</sup>의 연구결과와도 잘 일치한다. 따라서 세 경우에 있어 압출압력(P)과 압출비(R)의 관계를 선형적으로 도출하였으며 이를 Table 3에 나타내었다.

정수압 압출을 이용한 클래드 복합재 제조시 압

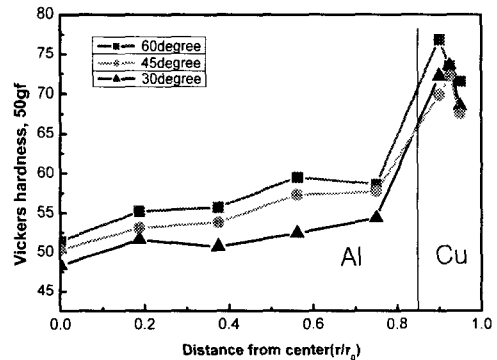
Table 4 Variation of compressive yield strength as functions of extrusion ratio and semi-die angle

(unit:MPa)

Extrusion ratio \ Semi-die angle	8.5	19	49
30°	155	84	94
45°	58	82	95
60°	62	84	96



(a) Hardness distribution at semi-die angle of 45°



(b) Hardness distribution at extrusion ratio of 19

Fig. 8 Hardness distribution in extruded copper-clad aluminum

출비 및 압출각이 강도에 미치는 영향을 이해하기 위해 Copper-clad Aluminum 복합재의 압축강도를 측정 이를 Table 4에 나타내었다. Table 4에 나타나

있듯이 압축강도는 압출비가 8.5이며 압출각 30°에서 가장 높은 155 MPa이 측정되었다. 이는 압출시 압출각이 감소할수록 금형과 빌렛의 마찰 표면적이 증가하여, 마찰에 대한 소성 변형을 심하게 받아 가공경화가 일어남으로서 항복강도가 높아졌으리라 사료된다.

Fig. 8(a)는 압출각 45°에서 압출비 8.5, 19, 49로 압출 성형된 Copper-clad Aluminum 복합재의 경도 분포로서 압출비가 높을수록 경도값은 증가하였다. 이는 정수압 압출 성형된 경우 여분일 때문에 표면에서의 변형율이 중심에서의 변형율보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 압출비가 클수록 경도 분포가 더 균일하게 분포한다는 것을 알 수 있다. 따라서 압출비가 큰 변형에서는 경도가 민감하게 반응하지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 압출비 19에서 압출 금형 반각 30°, 45°, 60°로 압출 성형된 Copper-clad Aluminum 복합재의 경도 분포를 나타낸다. 경도 분포는 압출각이 감소할수록 더 균일하게 분포한다는 사실을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 정수압 압출법을 이용하여 Copper-clad Aluminum 복합재를 제조시 압출비 및 다이각의 영향을 연구하였다. 또한 각각의 압출비 및 다이각에 따라 압출 성형된 Copper-clad Aluminum 복합재에 대한 압축시험 및 경도시험을 수행하였다 다음은 본 연구에서 얻은 결론이다.

(1) 압출 압력이 가장 낮은 최적의 금형 각도가 압출비에 따라 다르게 존재하였다. 압출비가 8.5일 경우 30° 이하에서, 압출비가 19일 경우 45° 부근에서, 압출비가 49일 경우에는 60° 이상에서 최적의 금형 반각이 존재하였다. 또한, 압출비가 8.5일 경우에는 31%, 압출비가 19일 경우에는 38%, 압출비가 49일 경우에는 36%의 압출 압력 감소 효과를 나타내었다.

(2) 압축 항복강도는 압출비가 8.5 이며 압출각이 30°에서 가장 높은 155 MPa이 측정되었다. 또한, 압출각이 45°, 60°에서는 압출비가 증가할수록 항복 강도가 증가됨이 측정되었다. 이는 재료의 입도 변화에 따른 항복 강도 향상 효과를 가져왔기 때문이다.

(3) 압출 성형된 Copper-clad Aluminum 복합재의 경

도 분포는 압출비가 높을수록 경도값이 증가하였다. 이는 정수압 압출 성형된 제품에서 redundant work 때문에 표면에서의 변형율이 중심에서의 이상적인 변형율보다 크기 때문이다. 또한, 압출비가 높을수록, 압출각이 감소할수록 경도 분포가 더 균일하였다.

#### 참고문헌

1. Ikera, S., Saito, S., "Manufacturing Process and Properties of Clad Metals by Plastic Working," J. Mater. Process. Technol., Vol. 45, pp. 395-400, 1994.
2. Kang, C.G., Jung, Y.J. and Kwon, H.C., "Finite Element Simulation of Die Design for Hot Extrusion Process of Al/Cu Clad Composite and Its Experimental Investigation," J. Mater. Process. Technol., Vol. 124, pp. 49-56, 2002.
3. BINGERT, J.F., BINGHAM, B.L., SEBRING, R.J and KELLY, A.M., "Hydrostatic Extrusion of BSCCO/Ag Composite Wire," Journal of Electronic Materials, Vol. 24, pp. 1859-1863, 1995.
4. Park, H.J., Na, K.H., Cho, N.S., Lee, Y.S. and Kim, S.W., "A Study of Hydrostatic Extrusion of Copper-clad Aluminium Tube," Vol. 67, pp. 24-28, 1997.
5. Standard Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional of Rapid Heating Rates and Strain Rates. STD.ASTM E209-ENGL 2000.
6. N. H. LOH and J. S. T. CHEUNG "HYDROSTATIC EXTRUSION OF WIRES", Journal of Mechanical Working Technology, Vol.19, pp. 45-54, 1989.