

# 직접압출에 의한 Cu-Al 층상 복합재료 봉의 금속유동과 계면접합

윤여권\*, 김희남\*\*

## Metal Flow and Interface Bonding of Copper Clad Aluminum Rods by the Direct Extrusion

Yeo Kwon Yun\*, Hee Nam Kim\*\*

### ABSTRACT

Composite materials consist of two or more different material layers. The usefulness of clad metal rods forms the possibilities of combination of properties of different metals. Copper clad aluminum composite materials are being used for economic and structural purposes. In this study, composite billet consists of commercially pure copper and aluminum (A6061) and experimental conditions consist of the combinations of clad thickness, extrusion ratio, and semi-cone angle of die. In order to investigate the influence of these parameters on the hot direct extrudability of the copper clad aluminum composite material rods, the experimental study have been performed with various extrusion temperatures, extrusion ratios, semi-cone angles of die, and composition rate of Cu:Al.

**Key Words** : Copper clad aluminum composite materials (구리 피복 알루미늄 층상 복합 재료), Extrusion ratio (압출비), Semi-cone angle of die (다이 반각), Composite billet (복합 빌렛)

### 1. 서론

현대 과학기술의 발전으로 압출에 의해 생산되는 제품의 용도와 기능도 다양해지고 있으며, 요구되는 기계적, 물리적 성질 또한 단일재료의 압출로는 얻을 수 없는 성능을 요구하고 있는 실정이다.

특히 기계와 화학, 핵 공업분야 뿐만 아니라 일상적으로 사용되는 생활용품에 이르기까지 단일재료의 압출만으로는 요구되는 기능을 만족할 수 없게 되었다. 이러한 요구를 충족하기 위한 층상 복합재료는 단일금속재가 가지고 있는 기계적, 물리적 장점을 부각하고 단점을 상호보완하며 사용되는 재

료에 따라 다양한 종류를 가지고 있다. 이러한 층상 복합재료의 압출에서는 기계적 성질이 서로 다른 이종(異種)금속재료를 사용하여 압출하기 때문에 내재와 외재의 파괴 없이 경계면 접합을 위한 압출조건과 방법이 단일금속재의 압출과는 차이가 있다. Cu-Al 층상 복합재료 봉이란 내재인 Al의 외면을 외재인 Cu 슬리브(sleeve)로 둘러싼 형태로써, 그 경계면에서 압접으로 인하여 접합되어 있는 봉을 일컫는다. 한편 Cu-Al 복합재료로 제작된 버스바(bus-bar)는 기존의 동(Cu) 버스 바에 비해 가격이 저렴하고 중량을 약 60%까지 가볍게 할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

2001년 2월 9일 접수

\* 명지대학교 대학원

\*\* 명지대학교 기계공학과

이러한 복합재료의 압출에 관한 연구로서 상계 이론을 이용하여 압출압력을 예측하고 내재와 외재의 파괴에 관한 기준을 제시하는 등 여러 연구<sup>(1,2,3)</sup>가 이루어져왔다. 또한 변형영역에서의 속도장을 가정하고 이상적인 재료유동을 예측하기 위한 연구<sup>(4)</sup>와 복합재의 압출시 공정변수변화에 따른 변형영역에서의 소성 유동상태의 변화에 관한 연구<sup>(5)</sup>가 이루어졌다. 그리고 정수압 압출법을 이용하여 Cu-Al 층상 복합재료 봉을 압출함에 있어서 다이반각과 단면감소율 등이 선재 압출에 미치는 영향과 압출압력에 미치는 영향과 Cu-Al 층상 복합재료 튜브 압출에 관한 유한요소해석과 실험을 통해 압출비와 다이반각의 변화에 따른 계면접합에 관한 연구<sup>(6,7)</sup>가 보고되는 등 층상복합재료를 압출에 관한 많은 연구가 진행되어왔다. 그러나 직접압출법을 이용하여 Cu-Al 층상 복합재료 봉을 압출함에 있어서 여러 가지 압출비에 걸쳐 다이반각의 변화에 따른 금속유동 및 계면상태에 대한 연구는 거의 없는 실정이며 계면접합에 대한 기준도 미비한 실정이다. 본 연구에서는 Cu-Al 층상 복합재료 봉의 직접 압출시 압출비 및 다이 반각과 빌렛 내·외재의 구성비 변화가 금속유동과 계면면 접합에 미치는 영향에 관한 실험을 통하여 생산현장에서 보다 경제적이고 효율적으로 Cu-Al 층상 복합재료 봉을 압출하기 위한 기반을 다지는데 목적이 있다.

## 2. 금속유동

이종(異種)금속재료의 압출에서 내·외재가 비례적 유동을 하기 위해서는 균일한 신장이 되어야 하며, 압출 전·후의 내재와 외재의 반경비는 식(1)과 같이 변형되어야 한다.

$$\frac{R_{fi}}{R_f} = \frac{R_i}{R_0} \quad (1)$$

여기서,

$R_0$ 는 변형 전 외재의 외부 반지름

$R_i$ 는 변형 전 내·외재의 계면면 반지름

$R_f$ 는 변형 후 외재의 외부 반지름

$R_{fi}$ 는 변형 후 내·외재의 계면면 반지름이다.

만약 내재가 외재보다 더 경질(硬質)일 때 내재는 외재보다 더 작은 변형율을 나타내며, 내재가 외재보다 변형이 작다는 것은 내재가 외재보다 신

장이 작음을 의미한다. 따라서 외재가 내재에 인장력을 작용시켜 내재의 파괴를 초래하며, 이와 같이 내재가 파괴되는 경우는 식(2)와 같은 형태로 변형된다.

$$\frac{R_{fi}}{R_f} > \frac{R_i}{R_0} \quad (2)$$

반면에 외재가 내재보다 더 경질이고 변형이 작다면 외재는 내재보다 신장이 작다. 따라서 내재가 외재에 인장력을 가하여 외재의 파괴를 일으키게 하며, 다음 식(3)과 같은 변형결과를 가져온다.

$$\frac{R_{fi}}{R_f} < \frac{R_i}{R_0} \quad (3)$$

Cu-Al 층상 복합재료의 압출에서는 외재가 내재보다 더 단단한 재료이므로 외재가 파괴될 경우 식(3)과 같이 변형된다. 또한 층상 복합재료의 직접 압출에서는 각 압출비에 대해 다이반각이 변화됨에 따라 변형영역에서 내재와 외재의 소성유동 거동이 달라지게 된다. 이러한 소성변형 과정변수의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 편차요소( $\epsilon$ )가 0(zero), 즉 압출 전과 다이를 통과하여 압출된 후의 내재와 외재의 반경비가 동일하고 편심반경( $e$ )이 0(zero)일 때는 내·외재가 구면유동으로 완전한 균질변형을 하는 이상적인 경우이다. 또한,  $e \neq 0$  이고  $\epsilon = 0$  일 때는 외재가 환형으로  $R_i/R_0 = R_{fi}/R_f$ 인 비례유동을 하며,  $e \neq 0$ 이고,  $\epsilon > 0$  또는  $\epsilon < 0$  일 때에는 출구에서 내재의 반경은  $\epsilon$ 의 영향을 받아 비례유동을 위한 변형이 발생하지 않게 되고 식(2) 또는 식(3)과같은 형태로 변형된다. 실제 복합재료의 압출에 있어서는 내재와 외재의 금속적·기계적 성

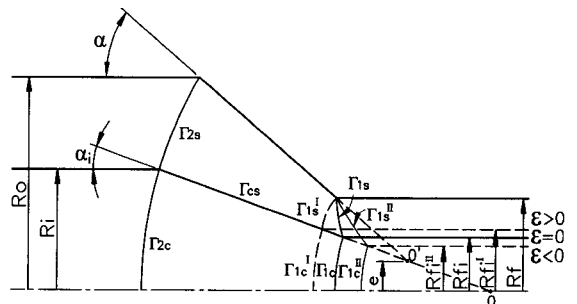


Fig. 1 Schematic diagram of extrusion process variation

질이 서로 다르므로 압출 전·후에 내재와 외재의 반경비가  $R_i / R_0 = R_{fi} / R_f$  인 완전한 비례유동을 얻는 압출은 매우 어려운 일이므로, 실험을 통하여 내재와 외재의 반경비 차이를 최소로 하고 경계면 접합을 위한 압출조건을 구하는 것은 의미가 있다.

### 3. 실험방법 및 장치

#### 3.1 금형의 설계 및 제작

본 실험에 사용한 컨테이너와 다이는 열간가공용 금형재료로 주로 사용되는 합금공구강(STD61)을 사용하여 소요의 형상과 치수로 기계가공과 열처리(HRC57)를 통하여 제작하였으며, 특히 빌렛의 선단과 접촉되는 다이의 접촉면과 베어링 랜드(bearing land) 부분 및 컨테이너의 내면은 빌렛과의 마찰을 최소화할 수 있도록 래핑(lapping)공정을 거쳐 경면(mirror face)으로 마무리하였다. 또한, 압출 실험시 금형의 온도를 압출조건 온도와 동일한 온도로 가열하기 위하여 금형에 별도의 가열장치를 제작하여 부착하였으며, 압출조건 설정온도로 일정하게 유지, 제어할 수 있도록 온도 컨트롤러를 장치하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 금형의 형상이며, Table 1에 금형의 치수를 표시하였으며, Fig. 3은 금형의 사진이다.

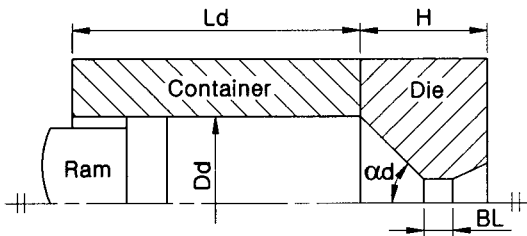


Fig. 2 Geometry of die

Table 1 Dimensions of die

Inner diameter ( Dd )	Container length ( Ld )	Die height ( H )	Bearing length ( BL )	Semi-cone angle $\alpha d(^{\circ})$
35.4	150	45	5	35
				45
				55
				65

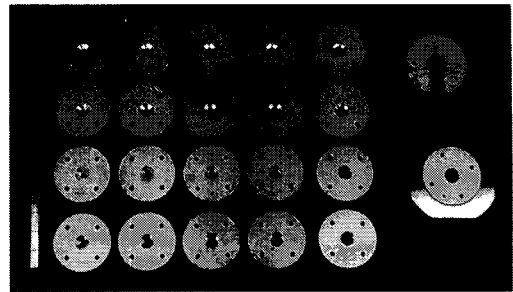


Fig. 3 Photograph of dies and tools

#### 3.2 빌렛의 설계 및 제작

Cu-Al 층상 복합재료 봉을 압출하기 위하여 Cu (commercially pure copper)를 외재로 사용하였으며, Cu와 우수한 접합특성을 가지고 있으며 전연성이 우수한 Al합금(A6061)을 내재로 사용하여 Table 2와 같은 치수로 외재의 내·외면을 가공한 후 내재의 외경을 가공하여 외재와 조합하여 빌렛(billet)을 제작하였다. 빌렛 제작공정에서 층상경계면, 즉 내재의 표면과 외재 내면의 표면처리는 압출된 제품의 경계면 접합에 영향을 미치는 중요한 요소이므로 탈유제(trichloroethylene)를 사용하여 내재 외면과 외재의 내면의 기름을 깨끗이 제거하였다.

빌렛을 구성하는 내재와 외재의 비율이 금속유동 및 경계면 접합에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Cu와 Al의 체적비율이 21%:79%, 31%:69%, 40%:60%가 되도록 외재의 두께를 2, 3, 4mm로 하였으며 빌렛의 선단각을 다이의 원추각과 동일하게 35°, 45°, 55°, 65°로 가공하여 빌렛을 제작하였다.

본 실험에 사용된 빌렛의 형상은 Fig. 4와 같고 Table 2에 빌렛의 각 부분 치수를 나타내었다.

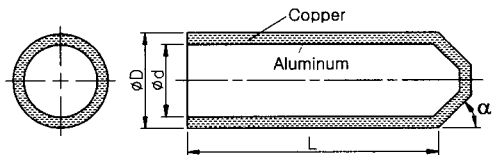


Fig. 4 Geometry and photograph of composite billets

Table 2 Dimensions of composite billets

Outer diameter ( D )	Billet length ( L )	Core diameter ( d )	Sleeve thickness ( t )	Semi-cone angle $\alpha$ (°)
35	65	27	4	35
				45
				55
				65
		29	3	
		31	2	

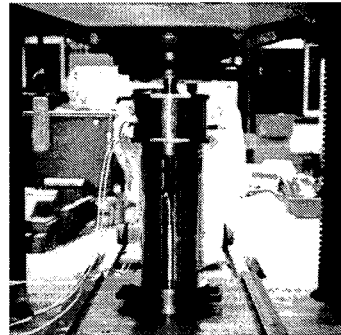


Fig. 5 Photograph of experimental setting

3.3 압출실험

본 연구에서 압출장비는 램(ram)이 전진함에 따라 빌렛에 압출하중을 가하여 압출이 진행되는 동안 램의 변위에 따른 압출하중 변화를 정량적으로 측정할 수 있는 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)와 로드 셀(load cell)이 장착된 200톤 용량의 만능시험기를 사용하였다. 전기로를 이용하여 빌렛을 압출온도까지 가열하였으며, 압출도중에 금형으로의 열 손실을 방지하고 압출온도를 일정하게 유지할 수 있도록 금형에 별도의 가열장치 및 온도조절장치를 장착하였다. 본 실험에서는 Cu-Al 층상 복합재료의 직접압출시 이상적인 온도로 제시<sup>8)</sup>된 바 있는 300℃를 압출온도로 설정하여 압출비 2.78, 4.24, 6.25, 8.50, 12.25 에 대하여 다이반각을 35°, 45°, 55°, 65°로 변화시키면서 압출함으로써 압출비와 다이반각의 변화에 따른 압출성에 대하여 실험하였다. Fig. 5는 압출장비에 금형이 장착되어 본 실험조건에 의해 압출이 진행되는 사진이다.

Table 3에 본 실험의 압출조건을 나타내었으며, 압출이 진행되는 동안 컨테이너 및 다이와 빌렛 사이의 마찰을 줄이기 위하여 윤활제로 국내 G사의 Gate-C (graphite+paraffin)를 사용하였다.

Table 3 Extrusion conditions

Extrusion ratio	Semi-cone angle $\alpha$ (°)	Extrusion temperature (°C)	Ram speed (mm/sec)	Lubricant
2.78	35	300	0.8	Gate-C (Graphite+Paraffin)
4.24	45			
6.25	55			
8.50	55			
12.25	65			

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압출하중 및 금속유동

Fig. 6은 압출온도 300℃에서 압출비가 4.24로 압출시 다이반각의 변화에 따른 압출하중의 변화를 나타낸 것으로서 램이 약 5mm진행될 때까지 압출하중이 급격히 상승하는 것은 빌렛이 다이 구멍을 빠져 나오기 전에 컨테이너 내부에 완전히 채워질 때까지 압축되는 과정을 나타내며, 그 후 처음의 항복점에서 선단의 외재(Cu)가 다이 출구를 통과하며 램이 약13mm 진행된 지점에서 내재(Al)가 외재와 함께 층상으로 다이출구를 통과하여 압출되는 최대 압출하중에 도달한 후 압출이 계속 진행되면서 정상상태에 도달됨을 알 수 있다. 여기서 동일한 압출비에 대하여 다이반각이 증가할수록 압출하중도 증가한다. 이와 같이 압출비와 다이반각에 따라 실험된 압출하중은 압출금형의 강도설계에 활용될 수 있으며, 경제성을 한층 높일 수 있는 효과를 기대할 수 있다. 압출조건에 따른 빌렛의

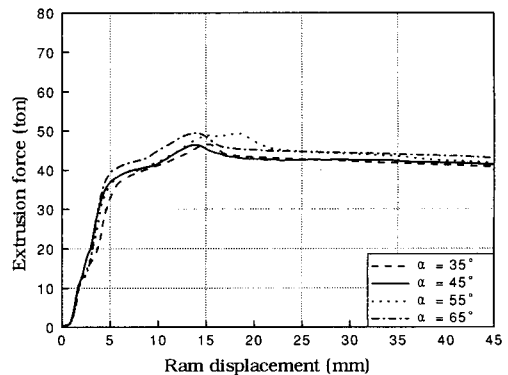


Fig. 6 Ram displacement vs. extrusion force curves

소성변형 거동을 고찰하기 위하여 컨테이너내의 빌렛 길이가 약15~20mm 남았을 때 압출을 정지시킨 후 컨테이너 내부에 잔류된 시편(specimen)을 채취하였다. 채취된 시편과 다이틀 통과한 정상 압출품을 정밀 고속절단기를 이용하여 축방향으로 1/2을 절단하여 마운팅(mounting)하고 연마한 다음 공구 현미경을 이용하여 각 부분의 치수를 측정하였다. Fig. 7은 Cu와 Al의 구성체적 비율이 31%:69%가 되도록 외재의 두께가 3mm로 제작된 빌렛이 압출비 6.25에서 다이반각의 변화에 따라 압출된 시편의 단면이다. Fig. 8의 (a)는 외재의 두께가 2mm인 빌렛의 원추면 변형영역 내에서의 단면과 다이구멍을 통과한 압출품의 축방향과 원주방향의 단면이며, (b)는 외재의 두께가 4mm인 빌렛의 원추면 변형영역 내에서의 단면과 다이구멍을 통과한 압출품의 축방향과 원주방향의 단면을 보여주는 사진이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 완전한 압출(sound extrusion)이 이루어졌으며, 이와 같이 다이의 출구를 통과하여 압출된 제품의 반경비( $R_{fi}/R_f$ )를 공구 현미경을 이용하여 측정한 결과 반경비의 차이가 2% 이내로 나타나 내재의 전체 원주면에 외재가 균일하게 피복(clad)되었음을 알 수 있었다.

Fig. 9는 이와 같은 공구현미경을 이용한 압출품의 반경비 측정을 통하여 외재의 두께가 3mm인 경우 압출비와 다이반각의 변화에 따른 반경비의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 압출 전 빌렛 내재와 외재의 반경비( $R_i/R_o$ )는 0.829이며, 압출된 후 내재와 외재의 반경비는 압출조건에 따라 0.829~0.836의 범위에 있음을 알았다. 따라서 직접압출에 의해 다이 출구를 통과한 Cu-Al 층상 복합재료 봉에서 외재의 두께 변화를 나타내는 편차요소( $\epsilon$ )는  $\epsilon > 0$ 로 변형되며, 본 실험에서 빌렛은 외재가 내재보다 더 단단한 경우이므로 식(3)에 비교해보면 외재의 파괴가 발생하지 않는 유동조건임을 알 수 있다. 또한 각 압출비에서 다이반각이 45°~55° 일 때가 전반적으로 압출 전·후의 반경비가 비례유동에 보다 근접하게 변형됨을 알 수 있다.

이와 같이 압출 전·후에 내·외재의 반경비의 차이가 미소함은 원추형 다이를 이용한 Cu-Al 층상 복합재료의 직접압출에서 이종(異種) 금속의 소성 변형 거동이 비례유동에 근접함을 알 수 있다.

Fig. 10은 외재의 두께를 변화시켜 압출할 경우 압출비 6.25에서 다이반각의 변화에 따른 압출전과 후의 내재와 외재의 반경비 변화를 나타낸 것이다.

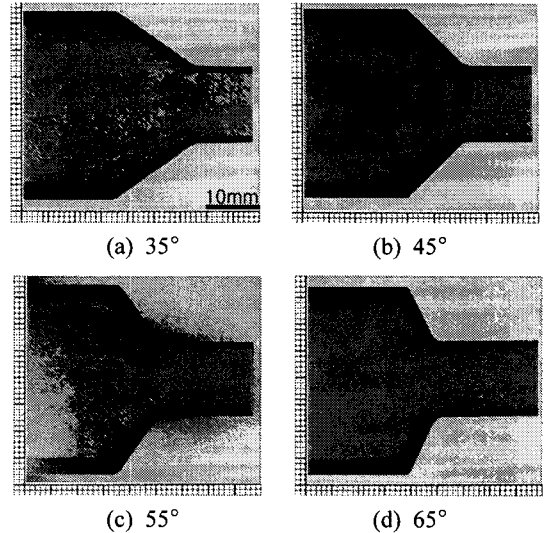


Fig. 7 Cross-sections of extruded specimen along the variation of semi-cone angle of die (sleeve thickness 3mm)

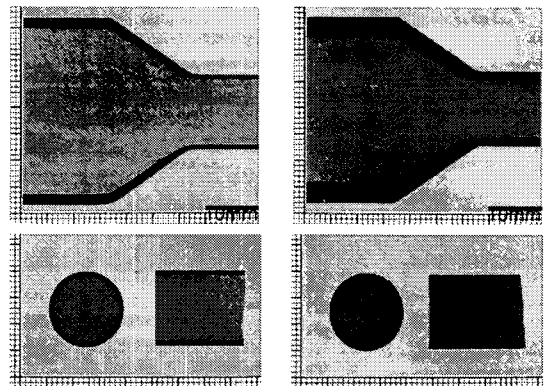


Fig. 8 Cross-sections of extruded specimen along the variation of sleeve thickness

Fig. 10에서 (a)는 압출전 내재와 외재의 반경비( $R_i/R_o$ )가 0.886인 빌렛을 압출비 6.25에서 다이반각의 변화에 따라 압출된 시편의 내재와 외재의 반경비를 나타낸 것으로서 비례유동 조건일 때의 압출품의 반경비( $R_{fi}/R_f=0.886$ )에 근사하게 유동되었음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 10에서 (c)는 내재와 외재의 반경비가 0.771인 빌렛을 압출하였을 때 압출된 시편의 반경비를 표시한 것으로서, (a)에 비해 외재 층의 두께가 상대적으로 얇게 피복(clad)되었

음을 알 수 있었다. 따라서 동일한 압출비에서 외재의 두께가 두꺼울수록 편차( $\epsilon$ )는 상대적으로 증가하며, 또한 출구에서 외재와 내재의 속도 불연속면은  $\Gamma_{1s}$ 과  $\Gamma_{1c}$ 의 형태로 나타남을 알 수 있다.

또한, 압출비를 6.25로 압출할 경우 빌렛의 구성비에 대해 다이반각이 45° 와 55° 일 때가 압출 후 내·외재의 반경비가 보다 비례유동에 근접하게 변형됨을 알 수 있었다.

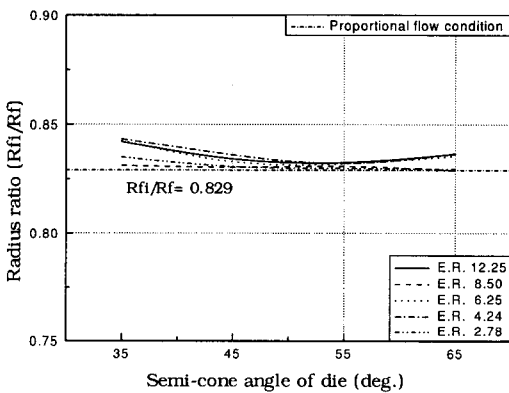


Fig. 9 Radius ratio variations according to extrusion condition (sleeve thickness 3mm)

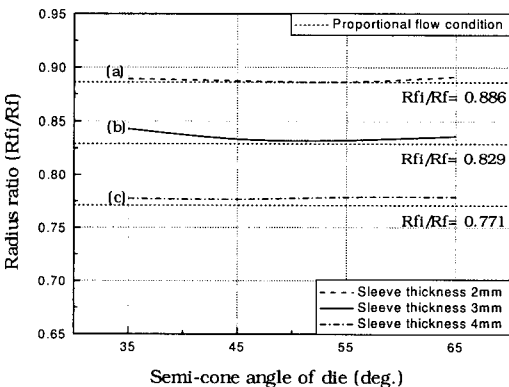


Fig. 10 Radius ratio variations according to extrusion condition (extrusion ratio 6.25, sleeve thickness 2, 3, 4mm)

#### 4.2 경계면 접합

압출가공에 의해 생산되는 Cu-Al 층상 복합재료는 기계적으로 단일 금속과 같은 기능을 수행해야 하므로 두 금속의 층상 경계면(interface)은 접합

이 되어야 한다. 층상 복합재료의 압출에서는 기계적 성질이 서로 다른 이종(異種)금속재료를 사용하여 압출하기 때문에 내재와 외재의 파괴 없이 경계면 접합을 위한 압출조건과 방법이 단일 금속의 압출과는 차이가 있다. 따라서 압출비와 다이반각 등 공정변수의 변화에 따른 경계면 접합의 가능성을 찾고 예측하는 것은 반드시 필요하다.

본 실험의 압출조건에 의한 경계면 접합상태 및 변형과정에 있어서 경계면 변화와 금속조직의 변화를 고찰하기 위하여 Fig. 7과 Fig. 8에서 보여준 바와 같이 마운팅한 시편을 폴리싱(polishing)하여 경면(mirror face)으로 연마한 후 부식(etching)시켜 금속 현미경으로 관찰하였다. Fig. 11의 (a)는 컨테이너 내부의 변형 전 빌렛의 조직사진으로서 Cu와 Al 사이의 경계면이 접합되지 않은 상태이며, Cu의 금속의 결정립이 거의 변형되지 않은 표준 조직의 형태를 보여주고 있다. Fig. 11의 (b)는 압출비 8.50, 다이반각 45°의 다이 원추면에서 변형과정에서의 금속조직 사진으로서 다이 접촉면에서의 유동저항에 의하여 Cu와 Al이 압축력을 받아 Cu의 결정립이 변형방향으로 많이 압축 변형되어 금속유동(metal flow)이 발생하면서 Al 경계면과의 접합이 진행되는 과정을 보여주고 있다. Fig. 12의 (a), (b)는 압출비 8.50, 다이반각 45°의 조건에서 다이를 통과한 압출품의 축 방향과 원주 방향에서의 조직을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 계면접합을 만족시키는 압출조건에서 다이 출구를 통과한 압출품의 Cu와 Al의 경계면은 접합에 필요한 압축력을 받아 압접이 이루어졌음을 볼 수 있으며, Cu 층의 결정립이 압출방향(extrusion direction)으로 길게 압축되어 있음을 알 수 있다. Fig. 13의 (a), (b)는 압출비 2.78, 다이반각 65°의 조건에서 압출된 압출품의 축 방향과 원주 방향의 조직사진으로서 작은 압출비에서 다이반각이 클 경우 경계면이 접합되지 않았음을 볼 수 있는데, 이는 다이의 변형영역 내에서 신생면이 부족하고 경계면 접합에 필요한 압축력도 약하여 압접이 이루어지지 않는 것으로 생각된다. 이와 같이 압출비에 따른 부적절한 다이 반각과 압출조건은 계면접합 조건을 만족시키지 못하고 다이출구를 통과한 후에도 Cu와 Al사이의 경계면이 접합되지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 압출조건의 변화에 따라 압출된 제품의 현미경고찰과 내·외재의 분리 시험을 통하여 압출비가 8.50이상으로 큰 범위에서는 본 실험조건인 다이 반각에서

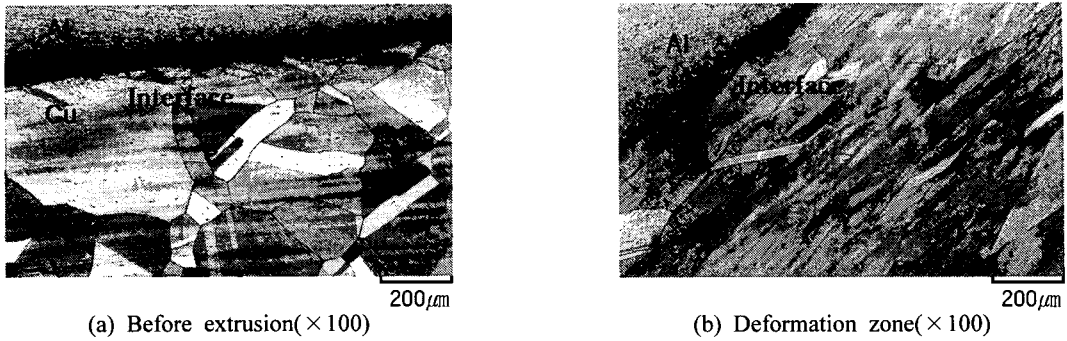


Fig. 11 Interface conditions (E.R. 8.50, semi-cone angle of die 45°)

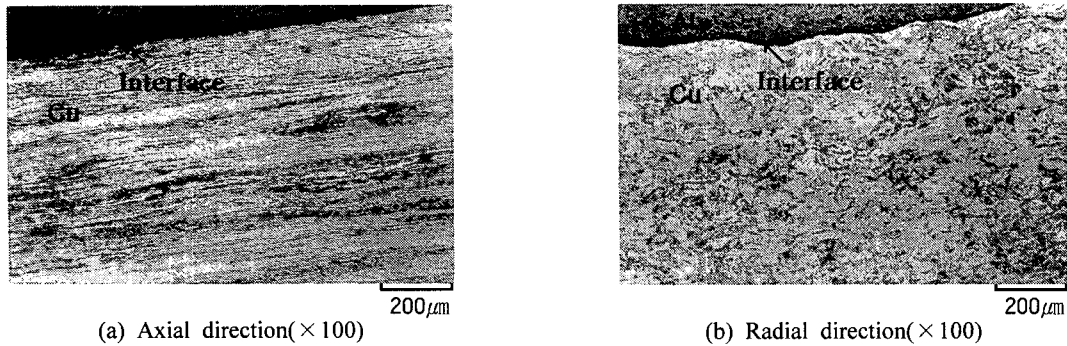


Fig. 12 Bonding interface condition after extrusion (E.R. 8.50, semi-cone angle of die 45°)

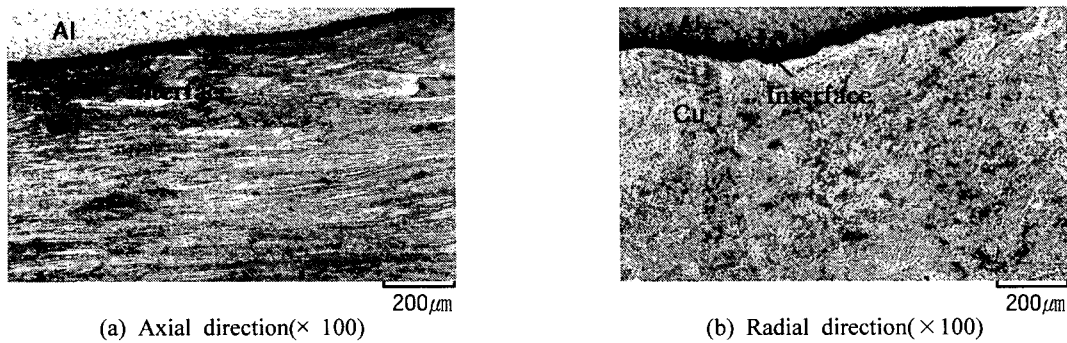


Fig. 13 Not bonding interface condition after extrusion (E.R. 2.78, semi-cone angle of die 65°)

경계면 접합이 이루어졌음을 알 수 있었으며, 경계면 접합조건과 압출하중과의 관계를 고려해 볼 때 압출비 8.50에서 다이반각 45°~55° 범위와 압출비 12.25일 때 다이반각 55°~65°의 범위가 적합하다. 또한 압출비 6.25이하에서는 다이반각이 35°~45°의 범위가 적합하며, 압출비 2.78에서 다이 반각이

55°와 65°일 때와 압출비 4.24와 6.25에서 다이반각 65°에서 압출된 제품의 내재와 외재의 경계면 분리현상이 나타났다. 위와 같은 경계면에 대한 현미경적 관찰과 내·외재 분리시험을 통하여 압출 온도 300℃, 압출속도 0.8 mm/sec의 조건에서 압출비와 다이반각의 변화에 따른 경계면 접합 가능성

를 예측할 수 있는 그래프를 Fig. 14에 나타내었다.

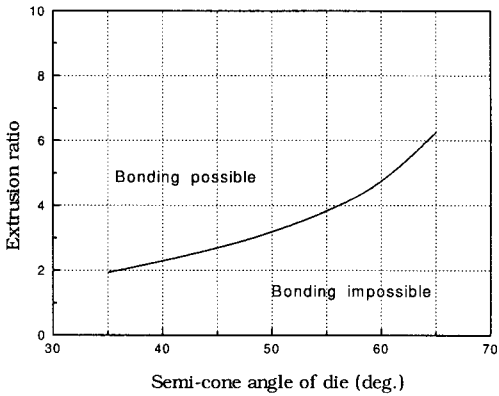


Fig. 14 Prediction of bonding possibility

### 5. 결론

Cu-Al 층상 복합재료의 직접압출에서 압출비와 다이반각 및 빌렛 구성비가 금속유동 및 경계면 접합에 미치는 영향에 대하여 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압출비 2.78~12.25의 범위에서 내재와 외재의 파괴 없는 압출품을 얻을 수 있었으며, 외재의 두께변화를 나타내는 편차요소( $\epsilon$ )는  $\epsilon > 0$ 로 변형되어 외재층의 두께가 상대적으로 얇게 압출된다.

2. 금속유동과 경계면 접합조건을 고려해 볼 때 압출비 8.50에서 다이반각  $45^\circ \sim 55^\circ$  범위와 압출비 12.25일 때 다이반각  $55^\circ \sim 65^\circ$ 의 범위가 적합하다. 또한 압출비 6.25이하에서는 다이반각이  $35^\circ \sim 45^\circ$ 의 범위가 적합하며 압출비 2.78에서 다이반각이  $55^\circ$ 와  $65^\circ$ 일 때와 압출비 4.24와 6.25에서 다이반각  $65^\circ$ 에서 압출품 내재와 외재의 경계면 분리현상이 나타났다.

3. 원추형 다이를 이용한 Cu-Al 층상 복합재료의 직접압출에서 압출비와 다이반각의 변화에 따라 경계면 접합이 가능한 조건을 예측할 수 있었다.

### 참고문헌

1. Avitzur, B., Wu, R., Talbert, S., and Chou, Y.T., "Criterion for the Prevention of Core Fracture During Extrusion of Bimetal Rods," J. of Eng. for Ind., Trans. ASME, Vol. 104, pp. 293-304, 1982.

2. Avitzur, B., Wu, R., Talbert, S., and Chou, Y.T., "An Analytical Approach to the Problem of Core Fracture During Extrusion of Bimetal Rods," J. of Eng. for Ind., Trans. ASME, Vol. 107, pp. 247-253, 1985

3. Yang, D.Y., Kim, Y.G., and Lee, C.M., "An Upper Bound Solution for Axisymmetric Extrusion of Composite Rods Through Curved Dies," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, pp. 565-575, 1991.

4. Tokuno, H., Ikeda, K., "Analysis of Deformation in Extrusion of Composite Rods," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 26, pp. 323-335, 1991.

5. Sliwa, R., "Plastic Zones in the Extrusion of Metal Composites," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 67, pp. 29-35, 1997.

6. Ahmed, N., "Extrusion of Copper clad Aluminum Wire," J. Mechanical Working Technology, Vol. 2, pp. 19-32, 1978.

7. Park, H.J., Na, K.H., Cho, N.S., Lee, Y.S., and Kim, S.W., "A Study of the Hydrostatic Extrusion of Copper Clad Aluminium Tube," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 67, pp. 24-28, 1997.

8. 김희남, 윤여권, 강원영, 박성훈, "Cu-Al 층상 복합 재료 봉의 직접압출에 관한 연구(I)," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집(I), pp. 124-127, 2000

9. 김희남, 윤여권, 강원영, 박성훈, "Cu-Al 층상 복합 재료 봉의 직접압출에 관한 연구(II)," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집(I), pp. 55-58, 2000.

10. 김희남, 윤여권, 강원영, 박성훈, "직접압출에 의한 Cu-Al 층상 복합 재료 봉의 계면접합," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 55-58, 2000.