원추형 다이를 이용한 Cu-Al 층상 복합재료의 직접압출

윤 여 권* · 김 희 남†

(2000년 12월 5일 접수, 2001년 7월 31일 심사완료)

The Direct Extrusion of Copper Clad Aluminum Composite Materials by Using the Conical Dies

Yeo-Kwon Yun and Hee-Nam Kim

Key Words: Extrusion Temperature(압출온도), Semi-Cone Angle of Die(다이반각), Extrusion Ratio (압출비), Interface Bonding(경계면 접합), Copper Clad Aluminum Composite Material Rods(구리 피복 알루미늄 복합재료 봉), Conical Dies(원추형 다이)

Abstract

This paper describes experimental investigations in the direct extrusion of copper clad aluminum rods through conical dies. Composite materials consist of two or more different material layers. Copper clad aluminum composite materials are being used for economic and structural purposes and the development of an efficient production method of copper clad aluminum composite material rods by extrusion is very important. It is necessary to know the conditions in which successful uniform extrusion and sound cladding may be carried out without any defects in the direct extrusion. There are several variables that have an influence on determining a sound clad extrusion. 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 and semi-cone angles of die. Subsequently, the microscopic inspection of interface bonding is carried out for extruded products. By measuring hardness, along extrusion way of products, a variation of hardness has been discussed. Proportional flow state has been considered by measuring radius ratio of Cu sleeve and Al core before and after extrusion.

1. 서 론

산업기술이 하루가 다르게 발전과 변화를 거듭하며 고도화됨에 따라 요구되는 제품의 품질과 성능의 기대수준이 높아져 가벼우면서도 기계적 성질이 우수하고 가격이 저렴한 복합재료와 신소재의 개발과 더불어 이러한 재료를 효율적으로 제품화할 수 있는 가공방법의 개발이 요구된다.

이러한 요구를 충족하기 위한 층상 복합재료는 한 금속의 전체 면을 다른 금속이 층상으로 둘러싸고 있는 재료로서, 두 금속이 층상의 경계면에서 압접으로 인하여 접합되어 있는 재료를 말한다. 이러한 재료 중 Cu-Al 층상 복합재료란 Al을 내재(core)로 만들고, Cu를 외재(sleeve)로 하여 내재의 외면을 둘러싼 형태의 재료를 일컫는다.

현재 수배전반 및 전기의 전도재료로 사용되는 버스 바(bus bars)는 주로 전도성이 우수한 구리(Cu)를 사용하고 있다. 그러나 구리는 가격이 고가일 뿐만 아니라 비중이 커서 버스 바 설치 작업시 취급이 어려운 문제 등으로 말미암아 구리 버스 바를 대체할 전도체의 제조에 관한 관심이 집중되어 왔다. 이러한 구리 버스 바의 경제적인 대체 재료로 Cu-Al 층상 복합재료가 주로 사용되어지고 있으며, 구리 버스 바에 비하여 가격면에서 30~40%가 절감되며, 중량은 약 60%까지

* 명지대학교 대학원
† 책임저자, 회원, 명지대학교 기계공학과
E-mail : hnkim@mju.ac.kr
TEL : (031)330-6423 FAX : (031)338-6423

가볍게 할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

이러한 복합재료의 압출가공법은 종래의 단일 금속으로 얻기 어려운 기계적 성질과 물리적 특성을 개선하고 요구되는 제품을 보다 경제적이고 효율적으로 생산하기 위한 필수적인 소성 가공법으로서 현재까지 Cu-Al 층상 복합재료의 압출에 관한 연구가 활발히 진행되어왔다.

Avitzur[1,2] 등은 복합재료 봉의 압출시 내재와 피복재의 반경비와 강도비 및 다이각이 압출성에 미치는 영향에 대해 연구한 바 있으며, Ahmed[3]는 정수압 압출법으로 구리 피복 알루미늄 선을 압출하는데 있어서 다이반각과 단면감소율이 압출성에 미치는 영향과 압출압력에 대하여 연구하였다. 또한 Yang[4] 등은 만곡된 다이를 통과하는 축 대칭 복합재료 봉의 상계해에 관한 연구를 하였으며, Park[5]은 정수압을 이용하여 Cu-Al 층상 복합재료 봉의 압출에 관한 유한요소해석과 실험을 하는 등 여러 가지 연구가 이루어져 왔으나, 대부분 정수압 압출을 이용한 층상복합재료 압출에 관한 연구이었으며, Tokuno[6] 등은 납 합금을 내재로, Al을 외재로 사용한 복합재료 봉의 압출에 상계해를 이용하여 변형을 해석한 바 있다. 또한 상계해석과 유한요소법을 이용한 복합재료의 압출에 관한 연구[7-9]가 다양하게 이루어져 왔으며, 직접압출법을 이용하여 외재가 Cu, 내재가 Al인 Cu-Al 층상 복합재료 봉을 효과적으로 압출하기 위한 연구[11~14]가 수행된 바 있다.

본 연구에서는 산업현장에서 보다 경제적이고 용이하게 Cu-Al 층상 복합재료 봉을 압출하기 위하여 금형의 구조가 비교적 간단한 원추형 다이를 이용한 직접압출법으로 압출온도와 압출비 및 다이반각을 여러 가지로 변화시켜 압출실험을 실시함으로써, Cu-Al 층상 복합재료 봉의 직접압출 가능성을 검토함과 아울러 공정변수의 변화에 따른 압출하중을 정량적으로 분석하고 압출품의 품위를 관찰하여 이들 공정변화가 압출성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 비례유동의 조건

Avitzur 등[2]에 의하면 이종(異種)금속재료의 압출에서 내·외재가 비례적 유동을 하기 위해서는 균일한 신장이 되어야하며, 압출 전·후의 내재와 외재의 반경비는 식 (1)과 같이 변형되어야 한다.

$$\frac{R_{fi}}{R_f} = \frac{R_i}{R_0} \tag{1}$$

여기서,

R_0는 변형 전 외재의 외부 반지름

R_i는 변형 전 내·외재의 경계면 반지름

R_f는 변형 후 외재의 외부 반지름

R_{fi}는 변형 후 내·외재의 경계면 반지름이다.

만약 내재가 외재보다 더 경질(硬質)일 때 내재는 외재보다 더 작은 변형율을 나타내며, 내재가 외재보다 변형이 작다는 것은 내재가 외재보다 신장이 작음을 의미한다. 따라서 외재가 내재에 인장력을 작용시켜 내재의 파괴를 초래하며, 이와 같이 내재가 파괴되는 경우는 식 (2)와 같은 형태로 변형된다.

$$\frac{R_{fi}}{R_f} > \frac{R_i}{R_0} \tag{2}$$

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.

$$\frac{R_{fi}}{R_f} < \frac{R_i}{R_0} \tag{3}$$

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

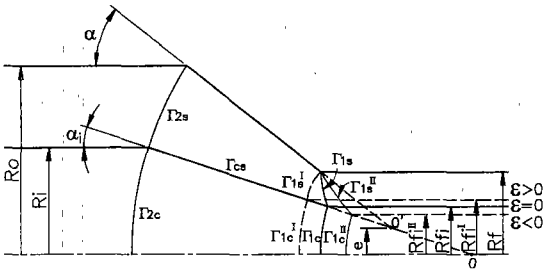


Fig. 1 Schematic diagram of extrusion process variation

인 완전 비례유동을 얻는 압출은 매우 어려운 일이므로, 실험을 통하여 반경비의 차이를 작게 할 수 있는 압출조건을 구하는 것은 의미가 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 금형의 설계 및 제작

본 실험에 사용한 금형의 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 압출조건의 온도와 동일한 온도로 가열하기 위하여 금형에 별도의 가열장치를 제작하여 부착하였으며, 압출조건의 설정온도로 일정하게 유지, 제어할 수 있도록 온도 컨트롤러를 장치하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 금형의 형상이며, Table 1에 금형의 치수를 표시하였다.

3.2 빌렛의 설계 및 제작

Cu-Al 층상 복합재료 봉을 압출하기 위하여 Cu (commercially pure copper)를 외재로 사용하고, Al 합금(A6061)을 내재로 사용하여 소요의 형상과 치수로 가공한 후 탈유제(trichloroethylene)를 사용하여 외재의 내면과 내재 외면의 기름을 깨끗이 제거한 다음, 외재와 내재를 조합하여 빌렛(billet)을 제작하였다. 본 실험에 사용된 빌렛의 형상은 Fig. 3과 같고 Table 2에 빌렛의 각 부분 치수를 나타내었으며, Fig. 4는 빌렛의 사진이다.

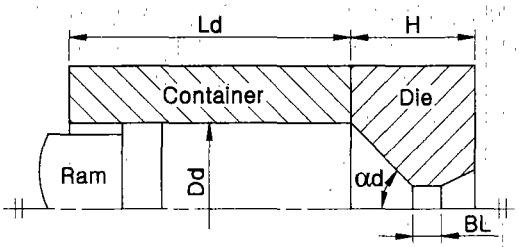


Fig. 2 Geometry of die sets

Table 1 Dimensions of die (unit : mm)

	Inner diameter (Dd)	Contain. length (Ld)	Die height (H)	Bearing length (BL)	Semi-cone angle αd (°)
Die	35.4	150	45	5	35
					45
					55
					65

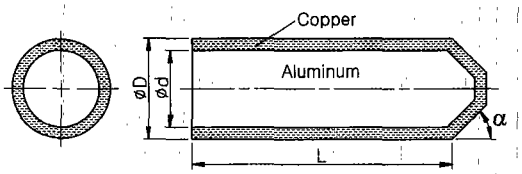


Fig. 3 Geometry of billet

Table 2 Dimensions of billet (unit : mm)

	Outer diameter (D)	Billet length (L)	Sleeve thickness (t)	Core diameter (d)	Semi-cone angle α (°)
Billet	35	65	3	29	35
					45
					55
					65

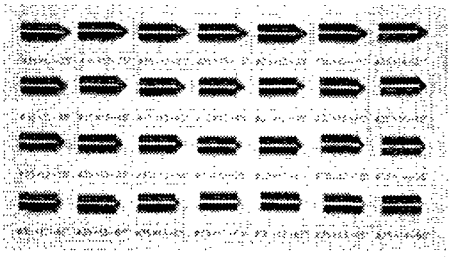


Fig. 4 Photograph of billets

또한, 다이반각 변화에 따른 금속의 유동상태와 초기 유동 속도차이를 고찰하기 위하여 Al내재를 분할하여 분할된 평면을 연삭한 후 격자 망을 새기고 선단반각을 35°, 45°, 55°, 65°로 가공한 후 외재와 조합하여 빌렛을 제작하였다.

3.3 압출실험

본 연구에서 사용한 압출장비는 램(ram)이 전진함에 따라 빌렛에 압출하중을 가하여 압출공정이 진행되는 동안 램의 변위에 따른 압출하중의 변화를 정량적으로 측정할 수 있는 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)와 로드 셀(load cell)이 장착된 200톤(tons) 용량의 만능시험기를 사용하였고, 전기로를 이용하여 빌렛을 압출온도까지 가열하였으며, 압출도중에 금형으로의 열손실을 방지하고 압출온도를 일정하게 유지할 수 있도록 금형에 별도의 가열장치 및 온도조절장치를 장착하였다. 본 실험에서 압출온도의 변화에 따른 압출성을 고찰하기 위하여 압출온도를 각각 150℃, 200℃, 250℃, 300℃, 350℃, 400℃로 변화시켜 압출한 후 결과 고찰을 통하여 가장 안정적인 압출온도에서 압출비 2.78, 4.24, 6.25, 8.50, 12.25 에 대하여 다이반각을 35°, 45°, 55°, 65°로 변화시키면서 압출을 함으로써 압출비와 다이반각의 변화에 따른 압출성에 대하여 실험하였다. 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.

Fig. 5는 압출장비에 금형이 장착되어 본 실험의 조건에 의해 제품이 압출되고 있는 사진이다.

Table 3 Extrusion conditions

Extrusion temperature (℃)	Semi-cone angle α(°)	Extrusion ratio	Ram speed (mm/s)	Lubricant
150 200 250 300 350 400	45	6.25	0.8	Gate-C (Graphite+ Paraffin)

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

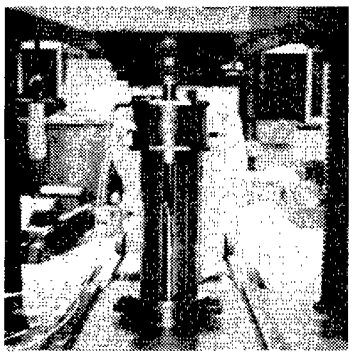


Fig. 5 Photograph of the experimental setting

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압출온도의 영향

압출비 6.25, 다이반각 45° 일 때 압출온도의 변화에 따른 압출하중의 변화와 최대 압출하중을 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6에서 정상적인 압출구간은 최대 압출하중을 지나 압출하중이 약간 저하된 후 급격한 하중의 변화가 없이 압출이 진행될 때이며, 그림에서 압출온도가 낮아짐에 따라 재료 유동에 필요한 항복응력이 높아져 압출하중이 증가되는 경향을 볼 수 있으며, 압출온도가 150℃에서 최대 압출하중이 약 85톤에 이르고 400℃에서는 약 50톤으로 나타나 150℃일 때의 최대 압출하중에 비해 약 1.7배정도 높은 것을 알 수 있었으며, 압출온도 300℃ 이상에서는 최대 압출하중 이후 램 변위에 따른 하중의 급격한 변화가 없는 안정적인 정상압출 상태를 나타내고 있으며 압출온도 150℃~250℃ 구간에서 외재와 내재의 항복응력의 차이가 300℃~400℃ 구간에서 보다 크게 나타나 낮은 압출온도 영역에서 두 금속간의 항복응력의 차가 큼을 알 수 있었다. 또한 Fig. 7에서 압출온도가 150℃~300℃까지는 압출온도의 변화에 따라 최대 압출하중의 차이가 크며, 300℃~400℃구간에서는 최대 압출하중의 차이가 비교적 작아 압출온도가 압출하중

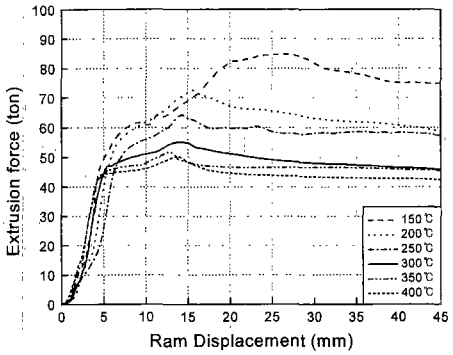


Fig. 6 Load-displacement curves showing the effects of different extrusion temperature

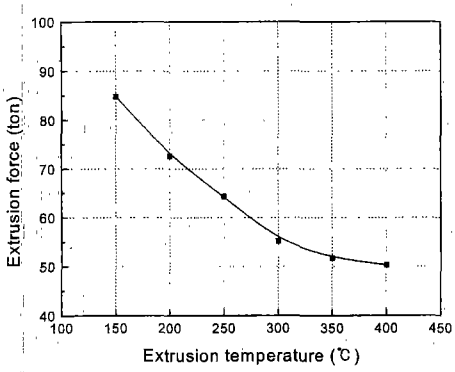


Fig. 7 Extrusion force-temperature curves showing the effects of different extrusion temperature

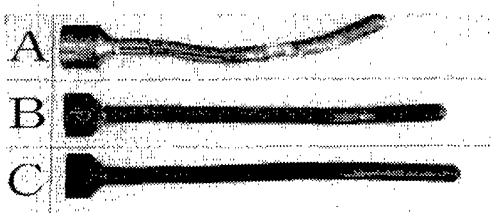


Fig. 8 Photograph of the extruded products with different temperature

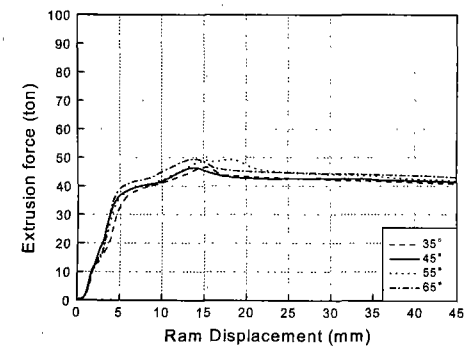
에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었다. Fig. 8은 압출비 6.25, 다이반각 45° 에서 압출한 제품의 사진이다. Fig. 8에서 A는 압출온도가 150℃일 때의 압출품으로서 Cu와 Al의 유동응력 차이가 심하여 내재가 외재에 인장력을 가해 외재가 파괴되었음을 보여주며, B는 300℃ 일 때의 압출품으로서 표면에 주름(wrinkling)이나 균열(crack) 등의 결함이 없이 표면품위가 양호하며, C는 400℃ 일 때의 압출품으로서 표면에 윤활제(graphite)가 고착되어 있음을 볼 수 있다. 따라서 압출하중의 변화와 압출품의 품위를 고찰하였을 때 압출온도는 300℃부근이 안정적임을 알 수 있었다.

4.2 압출비 및 다이반각의 영향

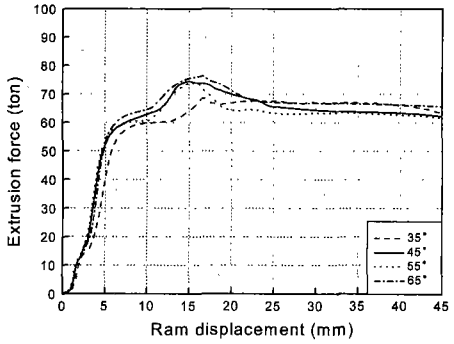
4.2.1 압출하중

Fig. 9의 (a), (b)는 압출온도 300℃에서 압출비가 4.24와 8.50일 때 다이반각의 변화에 따른 압출하중의 변화를 나타낸 것으로서 램이 약 5mm 진행될 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 항복되어 다이 출구를 통과하며 램이 약 15mm 진행된 지점에서 두 번째 항복점에 이르러 내재(Al)가 항복되어 외재와 함께 층상으로 다이 출구를 통과하여 압출되는 최대 압출하중에 도달한 후 압출이 계속 진행되면서 정상상태에 도달됨을 알 수 있다. 그림에서와 같이 층상 복합재료 압출에서는 외재와 내재의 항복응력 차이로 인하여 압출하중 곡선에서 두 개의 항복점이 나타나는 것을 볼 수 있다. 램이 전진하여 압출이 진행됨에 따라 컨테이너와 빌렛 사이의 접촉면적이 점차 감소되어 압출하중이 점점 낮아지는 현상은 직접압출의 공정 특성이다. 그림에서 최대 압출하중에 이르러 빌렛이 항복되어 정상 압출이 시작되면서 하중이 급격히 감소하지 않고 서서히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 본 실험에 사용한 윤활제가 컨테이너와 빌렛 사이의 윤활작용을 원활히 하여 마찰이 하중의 변화에 미치는 영향을 작게 하였음을 의미한다. Fig. 10에 이와 같이 Cu-Al 층상 복합재료 압출에서 압출비와 다이반각의 변화에 따라 측정된 최대 압출하중을 나타내었다. 그림에서 동일한 다이반각에 대해 압출비가 증가할수록 압출하중이 거의 비례적으로 증가됨을 볼 수 있으며, 또한 동일한 압출비에 대하여 다이반각이 증가할수록 압출하중은 증가한다. 이와 같이 각 압출비와 다이반각에 따라 실측된 압출하중은 압출금형의 강도설계와 제작에 활용될 수 있으며, 적정한 용량의 압

출기 선택에도 이용함으로써 경제성을 한층 높일 수 있는 효과를 기대할 수 있다.



(a) E.R. 4.24



(b) E.R. 8.50

Fig. 9 Load-displacement curves showing the effects of different semi-cone angle of die

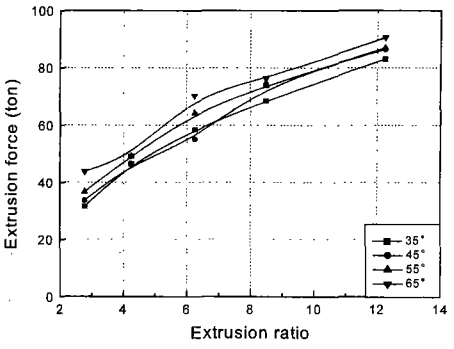


Fig. 10 Load-Extrusion ratio curves showing the effects of different semi-cone angle of die

4.2.2 압출품의 품위 및 유동특성

Fig. 11은 본 실험의 압출조건에 의해 압출된 제품의 사진으로서 외재의 파괴 없이 압출되었음을 볼 수 있다. 압출조건의 변화에 따른 빌렛의 소성변형 거동을 고찰하기 위하여 컨테이너 내의 빌렛 길이가 약 15~20mm남았을 때 압출을 정지시킨 다음 컨테이너 내부에 잔유된 시편(discard)을 채취하였다. Fig. 12의 (a)는 압출비12.25, 다이반각35° 에서 채취된 시편을 정밀고속절단기를 이용하여 축 방향으로 1/2을 절단한 후 마운팅(mounting)한 단면 사진이며, Fig. 12의 (b)는 다이 구멍을 통과한 압출품의 원주방향과 축 방향의 단면을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 완전한 압출(sound extrusion)이 이루었으며, 이와 같이 다이의 출구를 통과하여 압출된 전체 제품의 반경비(R_{fi}/R_f)를 공구 현미경을 이용하여 측정한 결과 반경비의 차이가 2% 이내로 나타나 내재의 전체 원주 면에 외재가 균일하게 피복(clad)되었음을 알 수 있었다. Fig. 13은 이와 같은 공구현미경을 이용한 압출품의 반경비 측정을 통하여 압출비와 다이반각의 공정변수 변화에 따른 반경비의 변화를 나타낸 그래프이다.

그림에서 압출 전 빌렛 내재와 외재의 반경비 (R_i/R_0)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(ε)는 $\varepsilon>0$ 로 변형되며, 본 실험에서 빌렛은 외재가 내재보다 더 단단한 경우이므로 식 (3)에 비교해 보면 외재의 파괴가 발생하지 않는 유동조건임을 알았다.

또한 각 압출비에서 다이반각이 45° 일 때가 전반적으로 압출 전· 후의 반경비가 비례유동에 보다 근접하게 변형됨을 알 수 있다.

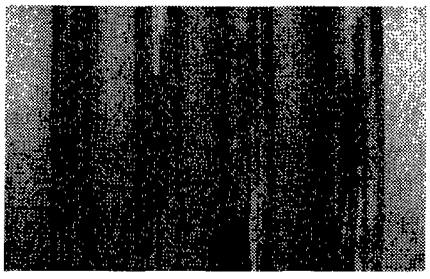
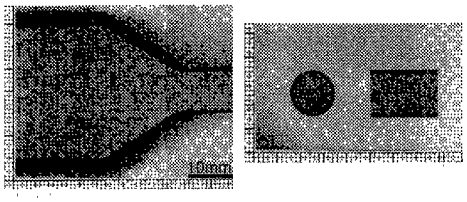


Fig. 11 Photograph of the extruded products



(a) discard (b) product

Fig. 12 Section of discard and extrusion product

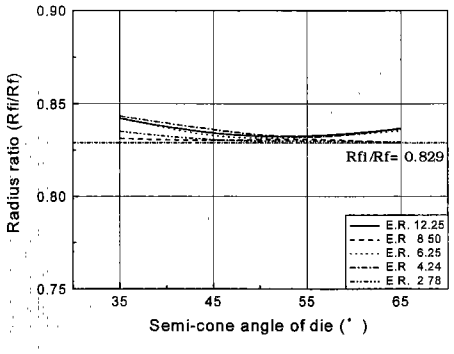
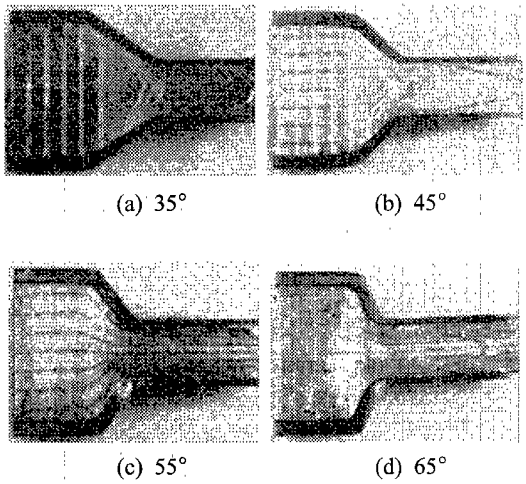


Fig. 13 Radius ratio variations

4.2.3 경도변화

Fig. 14는 변형 영역에서 빌렛의 소성변형 거동 상태와 내재와 외재의 유동속도를 고찰하기 위하여 내재에 격자망을 새긴 빌렛을 제작하여 압출비 6.25, 압출온도 300℃, 압출속도 0.8 mm/sec의 조건에서 다이반각을 35°, 45°, 55°, 65°로 변화시켜 압출한 후 빌렛의 축 방향으로 중심을 따라 외재를 절단한 시편이다. 그림에서 다이 반각의 변화함에 따라 내재의 중심부와 외재와 접촉 경계면에서 유동속도의 차이가 현저함을 볼 수 있다. Fig. 14의 (a)는 다이반각이 35° 일 때의 사진으로서 내재 중심부에서 외재와 접하는 접촉 경계면으로 격자망의 간격이 거의 일정하게 변형됨을 볼 수 있으며, (b)는 45° 일 때의 사진으로서 35° 에 비해 접촉 경계면 쪽에서 격자 간격이 조밀하게 압축되어 있음을 볼 수 있으며, 다이반각이 증가됨에 따라 접촉 경계면 쪽으로 격자간격이 더욱 조밀하게 압축되어 있음을 볼 수 있다.

이것은 다이반각이 커짐에 따라 빌렛과 다이 접촉면에서의 유동저항이 증가됨에 인한 것으로 생각되며, 이로 인하여 압출 후 경도도 달라지게 된다. 또한 내재 중심부와 내재가 외재와 접하는 접촉 경계면에서의 초기 유동속도 차이는 다이



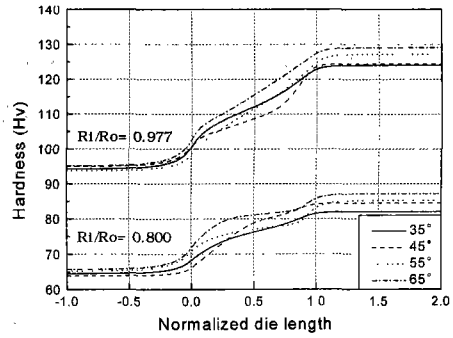
(a) 35° (b) 45°

(c) 55° (d) 65°

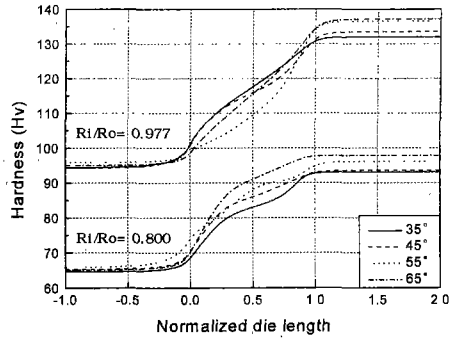
Fig. 14 Metal flow shown by distortion of grid-net

반각이 35°, 45°, 55°, 65° 일 때 각각 3, 3.8, 5.2, 7.6 mm/sec 임을 알 수 있었다. 따라서 다이반각이 증가할 수록 초기 유동속도의 차이가 커짐을 알 수 있었으며, 내재 중앙부와 외재와 접하는 경계면에서의 초기 유동속도의 차이가 다이반각이 45° 일 때에 비해 65° 에서 약 2 배정도 크게 나타나 다이반각의 변화가 유동속도 차이에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

압출비와 다이반각의 변화에 따른 경도변화를 고찰하기 위하여 Fig. 12와 같이 마운팅된 시편을 폴리싱(polishing)한 후, 마이크로 비커즈 경도 시험기를 이용하여 R_i / R_0=0.977인 외재 층의 변형경로와 R_i / R_0=0.800인 내재의 변형경로를 따라 경도를 측정하였다. Fig. 15의 (a)는 압출비 2.78에서의 경도변화를 보여주는 그래프로서, 압출 전 외재의 경도는 Hv94 이며, 다이반각이 35° 일 때 압출된 후 R_i / R_0=0.977의 경로를 따라 경도는 Hv124로 약 32% 증가되며, 압출 전 내재의 경도는 Hv 64 이며, 압출된 후 R_i / R_0=0.800인 경로를 따른 경도는 Hv82로 약 28% 증가됨을 알 수 있었다. 또한, Fig. 15의 (b)는 압출비 12.25에서 경도변화를 보여주고 있으며, 압출 전 외재의 경도는 Hv95 이며, 다이반각이 35° 일 때 압출된 후 R_i / R_0=0.977의 경로를 따른 경도는 Hv137로 약 44% 증가되며, 압출 전 내재의 경도는 Hv 64 이며, 압출된 후 R_i / R_0=0.800인 경로를 따른 경도는 Hv97로 약 49% 증가됨을 알 수 있었다.



(a) Extrusion ratio 2.78



(b) Extrusion ratio 12.25

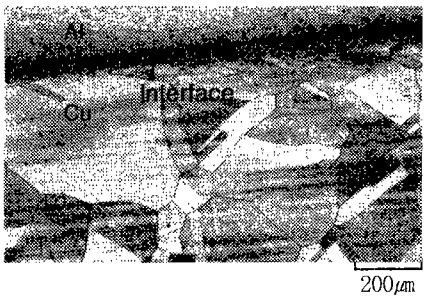
Fig. 15 Graph showing hardness variation

또한 동일한 압출비에서 다이 반각이 증가됨에 따라 경도도 다소 증가하나 그 차이는 4%이하로 작게 나타났다. 따라서 직접압출에 의해 원추형 다이를 통과하여 압출된 Cu-Al 층상 복합재료에서 R_i / R_0=0.977인 외재 층의 경도는 압출비와 다이 반각에 따라 약 32%~44% 정도 증가됨을 알 수 있었다.

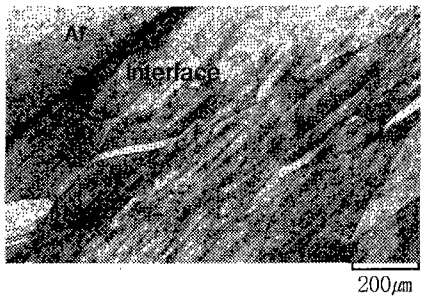
4.2.4 경계면 접합

압출에 의해 생산되는 층상 복합재료는 기계적으로 단일금속과 같은 기능을 수행해야 하므로 두 금속의 층상 경계면은 접합이 되어야 한다.

층상 복합재료의 압출에서 압출비 및 다이반각 등 공정변수의 변화에 따라 내재와 외재의 파괴없이 경계면 접합을 이루는 압출조건을 구하는 것은 중요하다. 본 실험의 압출조건에 의한 압출품의 경계면 접합상태를 고찰하기 위해 Fig. 12와 같이 합성수지로 마운팅된 시편을 폴리싱하여 경면으로 연마한 후 부식(etching)시켜 금속현미경으로 관찰하였다. Fig. 16의 (a)는 컨테이너 내부의 빌렛 조직사진으로서 외재와 내재의 경계면이 접합되지 않은 상태이며, 외재(Cu)의 결정립이 변형되지 않은 표준조직의 형태를 보여주고 있다.



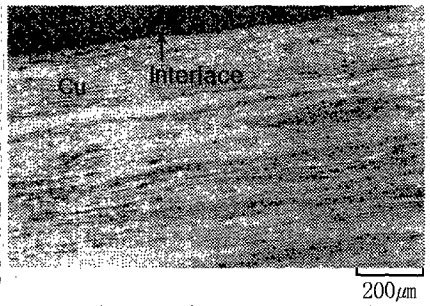
(a) Before extrusion (×100)



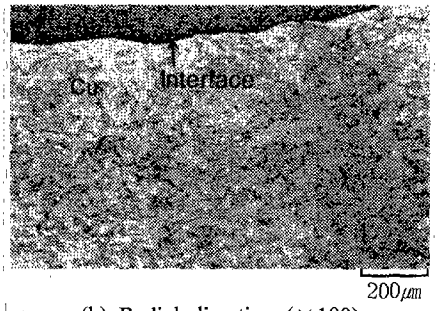
(b) Deformation zone (×100)

Fig. 16 Interface conditions

Fig. 16의 (b)는 압출비 8.50, 다이반각 45°의 다이 원추면에서 변형되는 금속조직으로서, 다이 접촉면에서의 유동저항에 의해 외재와 내재가 압축을 받아 외재의 결정립이 압출방향으로 변형되어 가고 있는 과정을 보여주고 있다. Fig. 17의 (a)와 (b)는 이러한 변형과정을 거쳐 다이의 출구를 통과한 압출품의 축 방향과 원주 방향에서의 조직을 보여준다. 그림에서와 같이 접합을 만족시키는 조건에서의 경계면은 접합에 필요한 신생면의 생성과 아울러 압축력에 의해 계면의 압접이 이루어짐을 알 수 있었다. Fig. 18의 (a)와 (b)는 압출비 2.78, 다이반각 65°의 조건에서 다이 출구를 통과한 압출품의 축 방향과 원주 방향의 조직을 보여주는 사진으로서, 작은 압출비에서 다이 반각이 클 경우 다이의 변형영역에서 경계면 접합에 필요한 신생면과 압축력이 부족하여 두 금속의 경계면이 압접되지 않았음을 보여주고 있다.

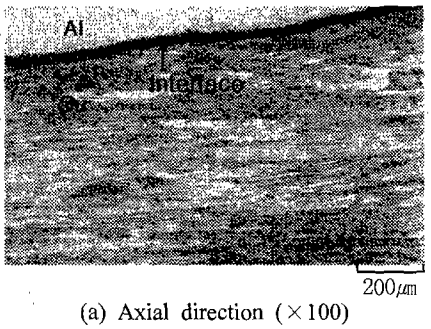


(a) Axial direction (×100)

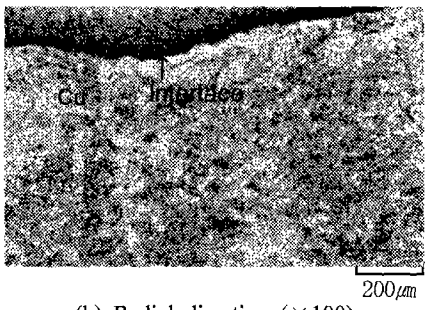


(b) Radial direction (×100)

Fig. 17 Bonding interface condition after extrusion



(a) Axial direction (×100)



(b) Radial direction (×100)

Fig. 18 Not bonding interface condition after extrusion

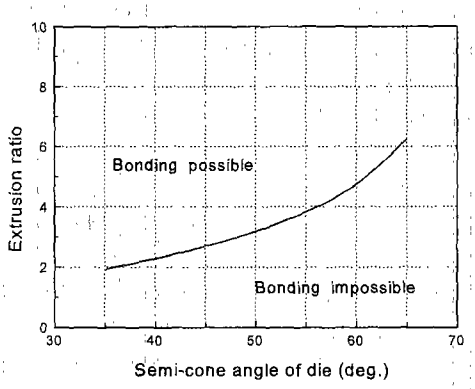


Fig. 19 Prediction of bonding possibility

이와 같이 압출비에 따라 부적절한 다이 반각에서 다이 출구를 통과한 압출품의 경계면은 접합되지 않음을 알 수 있었다. 이와 같은 금속현미경을 이용한 경계면 고찰과 내재와 외재의 분리시험을 통하여 각 압출비에서 다이 반각의 변화에 따라 직접압출된 Cu-Al 층상 복합재료의 계면 접합조건을 확인할 수 있었으며 그 결과에 따라 계면접합 가능성을 예측할 수 있는 그래프를 Fig. 19에 나타내었다.

5. 결 론

Cu-Al 층상 복합재료 봉의 직접압출에서 압출온도 및 압출비와 다이반각이 압출성에 미치는 영향에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 직접압출법을 이용하여 압출비 2.78~12.25의 범위에서 외재와 내재의 파괴 없이 경계면 접합을 이루는 Cu-Al 층상 복합재료 봉을 용이하게 압출할 수 있었다.

(2) 압출온도가 150℃에서 외재의 파괴가 발생하였으며, 압출온도가 높아짐에 따라 항복응력이 감소하여 최대 압출하중이 낮아지는 경향을 나타냈으며, 300℃~400℃구간에서 최대 압출하중의 차이가 비교적 작았다.

(3) 압출온도 350℃이상에서는 윤활제(graphite)가 압출품 표면에 고착되어 표면의 품위가 떨어짐을 알 수 있었다.

(4) 다이반각이 커짐에 따라 최대 압출하중이 증가하며, 또한 초기 유동속도의 차이가 커진다.

(5) 압출품의 경도는 압출비와 다이반각에 따라 외재는 약32%~44% 증가하며, 내재는 28%~49% 정도 증가된다.

(6) 경계면 접합조건과 압출하중의 관계를 고려해 볼 때 압출비 8.50에서 다이반각 45°~55°의 범위와 압출비 12.25일 때 다이반각 55°~65°의 범위가 적합하며, 압출비 6.25이하에서는 다이반각이 35°~45°의 범위가 적합하다.

(7) 압출비가 4.24 이상일 때 다이 반각이 비교적 큰 영역에서도 경계면이 접합될 수 있으며, 압출비가 낮을수록 다이반각이 작은 영역이 경계면 접합에 유리하며, 각 압출비에서 다이반각의 변화에 따라 경계면 접합이 가능한 조건을 예측할 수 있었다.

참고문헌

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

(2) Avitzur, B., Wu, R., Talbert, S. and Chou, Y.T., 1985, "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.

(3) Ahmed, N., 1978, "Extrusion of Copper clad Aluminum Wire," *J. Mechanical Working Technology*, Vol. 2, pp. 19~32.

(4) Yang, D.Y., Kim, Y.G. and Lee, C.M., 1991, "An Upper Bound Solution for Axi-symmetric Extrusion of Composite Rods Through Curved Dies," *Int. J. Mach. Tools Manufacturing*, Vol. 31, pp. 565~575.

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

(6) Tokuno, H. and Ikeda, K., 1991, "Analysis of Deformation in Extrusion of Composite Rods," *J. Materials Processing Technology*, Vol. 26, pp. 323~335.

(7) Oh, H.K. and Ryu, B.W., 1985, "Effects of Process Variables on the Deformation Field in Extrusion Through Conical Dies," *J. Mechanical Working Technology*, Vol. 11, pp. 71~86.

(8) Byon, S.M. and S.M. Hwang, S.M., 1997, "Die Shape Optical Design in Bimetal Extrusion by the Finite Element Method," *J. of Manufacturing Science and Engineering, Trans. ASME*, Vol. 119, pp. 143~150.

(9) Sliwa, R., 1997, "Plastic Zones in the Extrusion of Metal Composites," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 67, pp. 29~35.

(10) Sheppard, T., 1999, EXTRUSION OF ALUMINIUM ALLOYS, Kluwer Academic Publisher.

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

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

(13) 김희남, 윤여권, 강원영, 박성훈, 2000, "직접압출에 의한 Cu-Al 층상 복합 재료 봉의 계면접합," 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 437~440.

(14) 강원영, 윤여권, 박성훈, 김희남, 2000, "Cu-Al 층상 복합재료 직접압출시 금속의 유동상태와 경도변화," 대한기계학회 추계 학술대회 논문집, pp. 759~ 765.