

Cu-Al 층상 복합재료의 직접압출시 공정변수의 영향

윤여권[†] · 김희남 · 김용수^{*}

명지대학교 기계공학과 · 서울산업대학교 안전공학과

(2000. 10. 24. 접수 / 2000. 12. 5. 채택)

The Effect of Process Parameter in Direct Extrusion of Copper Clad Aluminum Composite Materials

Yeo-Kwon Yun[†] · Hee-Nam Kim · Yong-Su Kim^{*}

Department of Mechanical Engineering, Myungji University

^{*}Department of Safety Engineering, Seoul National University of Technology

(Received October 24, 2000 / Accepted December 5, 2000)

Abstract : Copper clad aluminum composite materials are being used for economic and structural purposes. The development of an efficient production method of copper clad aluminum composite material rods by extrusion is very important. This paper describes experimental investigations in the direct extrusion of copper clad aluminum rods through conical dies. There are several parameters that have an influence on determining a sound clad extrusion. These variables are extrusion temperature, extrusion ratio, semi-cone angle of die, extrusion force, extrusion velocity, friction of between the container and billet, percentage of copper used and ratio of flow stress of copper to aluminum. In order to investigate the influence of extrusion temperature, extrusion ratio, semi-cone angle of die on the hot direct extrudability of the copper clad aluminum composite material rods, the experimental study have been performed with these variation.

Key Words : copper clad aluminum composite materials

1. 서 론

오늘날의 산업기술은 하루가 다르게 발전과 변화를 거듭하고 있으며, 국가간 산업분야의 신기술 개발을 둘러싼 경쟁이 치열해 지면서 선진국들의 기술적 순위가 다변화되고 있으며, 특히 신기술의 개발과 활용을 통하여 개발도상국의 노동집약적 산업에서도 새로운 비교순위가 정해지고 있는 실정이다. 현재 전기의 전도체재료로 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 작업에 취급이 어렵고 물류비용도 비싸다. 이러한 문제로 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 가격 면에서 30~40%가 절감되며, 중량을 약 60%까지 경량화 할 수 있는 효과를 기대할 수 있다. Cu-Al 층상 복합재료란 Al을 내재로, Cu를 외재로 사용하여 Al의 외주를 Cu로 둘러싼 형태의 재료로써, 각기 다른 금속이 층상으로 적층되어 그 경계면에서 압력으로 인하여 접합되어 있는 재료이다. 이러한 복합재료의 압출가공법은 종래의 단일 금속으로 얻기 어려운 기계적 성질과 물리적 특성을 개선하고 요구하는 제품을 보다 경제적으로 생산하기 위한 필수적인 소성 가공법이다. 이 가공법에서 내재와 외재의 파괴 없이 경계면 접합을 달성하기 위한 압출조건과 방법은 단일재료의 압출과는 차이가 있다. 현재까지 여러 가지 층상 복합재료의 압출에 관한 연구가 활발히 진행되어왔다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
yoona@hanmail.net

B.Avitzur^{1,2)} 등은 복합재료 봉의 압출시 내재와 피복재의 반경비와 강도비 및 다이각이 압출성에 미치는 영향에 관하여 연구하였고, D.Y. Yang³⁾ 등은 만곡된 다이를 통과하는 축 대칭 복합재료 봉의 상계해에 관한 연구를 하였으며, H.J.Park⁴⁾은 정수압 압출법을 이용하여 Cu-Al 층상 복합재료 봉 압출에 관한 유한요소해석과 실험을 하는 등 여러 가지 연구가 이루어져 왔으나, 대부분 정수압 압출을 이용한 층상복합재료 압출에 관한 연구이었으며, N. Ahmed⁵⁾는 정수압 압출법으로 구리 피복 알루미늄 선을 압출하는데 있어서 다이반각과 단면감소율이 압출성에 미치는 영향과 압출압력에 대하여 연구하였고, H. Tokuno⁶⁾등은 납합금을 내재로 Al을 외재로한 복합재료 봉의 압출실험을 상계해를 이용하여 변형을 해석한 바 있다. 그러나 직접압출법을 이용한 Cu-Al 층상 복합재료 봉의 압출에 있어서 여러 가지 압출비와 온도구간 및 다이반각 등의 공정변화에 따른 압출특성을 실험한 연구는 거의 없는 실정이다. 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 압출 실험을 실시함으로써, Cu-Al 층상 복합재료 봉의 직접압출 가능성을 검토함과 아울러 공정변수의 변화에 따른 압출하중을 정량적으로 분석하고 압출품의 품질을 관찰하여 이들 공정변화가 압출품질에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1. 금형의 설계 및 제작

본 실험에 사용한 금형의 컨테이너와 다이(die) 및 램(ram)은 열간 금형용으로 많이 사용되는 합금 공구강(STD61)을 사용하였으며, Fig. 1의 (a)와 같은 형상과 Table 1과 같은 치수로 기계가공과 열처리(HRC57)를 통하여 제작하였다. 특히 빌렛(billet)과 접촉되는 다이의 접촉면과 베어링 랜드(bearing land)부분 및 컨테이너의 내면은 빌렛과의 마찰을 최소화할 수 있도록 다이아몬드 콤파운드를 이용한 래핑(lapping)으로 경면(mirror face)처리하였다. 또한 압출시 금형의 온도를 압출조건 온도로 가열하기 위하여 금형에 별도의 가열장치를 제작하여 부착하였으며, 압출조건 설정온도로 일정하

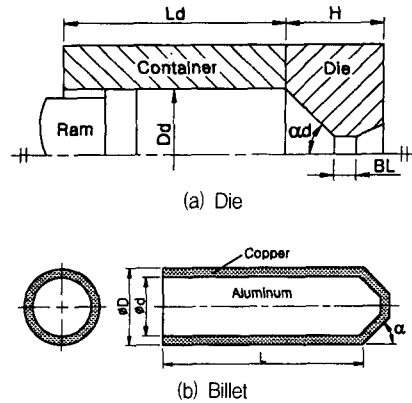


Fig. 1. Geometry of die and billet

Table 1. Dimensions of die and billet (unit:mm)

	Inner dia. (Dd)	Contain. length (Ld)	Die height (H)	Bearing length (BL)	Semi-cone angle α d (°)
Die	35.4	150	45	5	35
					45
					55
					65
Billet	Outer dia. (D)	Billet length (L)	Sleeve thickness (t)	Core dia. (d)	Semi-cone angle α (°)
	35	65	3	29	35
					45
					55
65					

게 유지하고 제어할 수 있도록 온도 컨트롤러를 장치하였다. 빌렛을 압출온도까지 가열하였을 때 열 팽창을 고려하여 컨테이너의 안지름을 빌렛의 바깥지름보다 0.4 mm 더 크게 설계·제작하였다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 금형 및 공구의 사진이다.

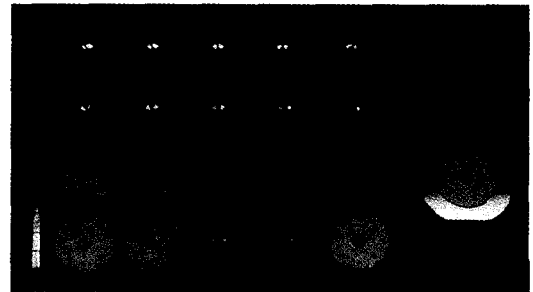


Fig. 2. Photograph of all dies and tools

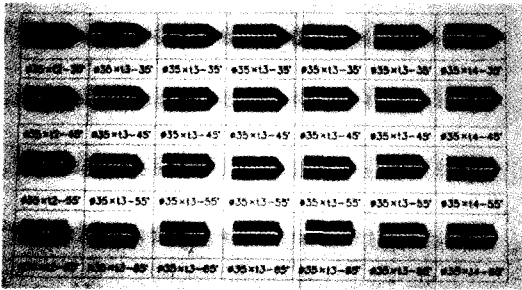


Fig. 3. Photograph of all composite billets

2.2. 빌렛의 설계 및 제작

Cu-Al 층상 복합재료 붕을 압출하기 위하여 전도성이 우수한 Cu (commercially pure)를 외재(sleeve)로 사용하고 Al합금(A6061)을 내재(core)로 하여 소오의 형상과 치수로 가공한 후 탈유제(trichloroethylene)를 사용하여 외재의 내면과 내재 외면의 기름을 깨끗이 제거한 후 내재와 외재를 조합하여 복합 빌렛(composite billet)을 제작하였다.

Fig. 1의 (b)에 빌렛의 형상을 나타내었고, 각 부분의 치수는 Table 1과 같다. Fig. 3은 본 실험에 사용된 복합 빌렛의 사진이다.

2.3. 압출실험

본 연구에서 사용한 압출장비는 램(ram)이 전진함에 따라 빌렛을 가압하여 압출이 진행되는 동안 램의 변위와 속도에 따른 압출하중의 변화를 정량적으로 측정할 수 있는 LVDT (linear variable displacement transducer)와 로드 셀(load cell)이 장착된 200 Ton 용량의 만능시험기(U.T.M) 를 사용하였고, 전기로를 이용하여 빌렛을 압출온도까지 가열하였다. 또한 압출도중에 급형으로의 열 손실을 방지하고 압출온도를 일정하게 유지할 수 있도록 급형에 별도의 가열장치 및 온도조절장치를 장착하였다.

본 실험에서 압출온도의 변화에 따른 압출특성을 고찰하기 위하여 Table 2와 같이 압출온도를 각각 150℃, 200℃, 250℃, 300℃, 350℃, 400℃로 변화시켜 압출한 후 압출품의 품위와 압출하중 등의 고찰을 통하여 가장 안정적인 압출온도를 설정하였다. Table 2의 조건에 의한 압출실험을 통하여 설정된 압출온도의 조건에서 Table 3과 같은 조건으로 압출비를 다양하게 변화시켜 각 압출비에 대하여 다이반각을 35°, 45°, 55°, 65°로 변화시키면서 압출함으로써 압출비와 다이반각의 변화에 따른 압출특성에 대하여 실험하였다. 압출이 진행되는 동

Table 2. Extrusion conditions (1)

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

Table 3. Extrusion conditions (2)

Extrusion Ratio	Semicone angle α (°)	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	65			
12.25				

안 컨테이너 및 다이와 빌렛 사이의 마찰을 줄이기 위하여 윤활성이 우수한 국내 G사의 Gate-C를 이형 윤활제로 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 압출온도의 영향

압출비 6.25, 다이반각 45°일 때 압출온도의 변화에 따른 압출이 진행되는 과정에서의 압출하중의 변화와 최대 압출하중을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서 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 85톤(tons)에 이르고 400℃에서는 약 50톤으로 나타나 150℃일 때의 최대 압출하중이 400℃에서 보다 약 1.7배 정도 높은 것을 알 수 있었으며, 압출온도가 300℃ 이상에서는 최대 압출하중 이후 램 변위에 따른 하중의 급격한 변화가 없는 안정적인 정상 압출 상태를 나타내고 있으며 압출온도 150℃에서 250℃ 구간에서 외재와 내재의 항복응력의 차이가 300℃에서 400℃ 구간에서 보다 크게 나타

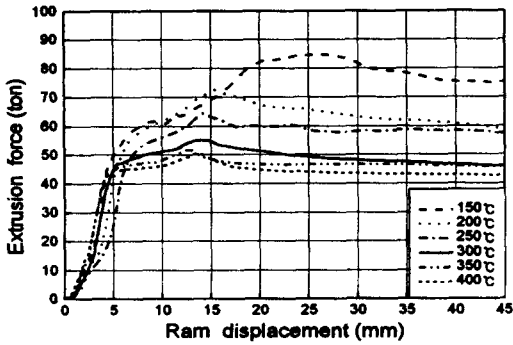


Fig. 4. Ram displacement vs. Extrusion force curves during the extrusion

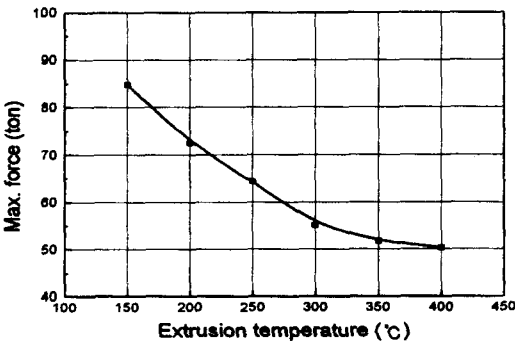


Fig. 5. Extrusion temperature vs. max. force curves

나 낮은 압출온도 영역에서 두 금속간의 항복응력의 차가 큼을 알 수 있다.

또한 Fig. 5에서 압출온도가 150°C에서 300°C까지는 압출온도의 변화에 따라 최대 압출하중의 차이가 크며, 300°C에서 400°C 구간에서는 최대 압출하중의 차이가 비교적 작아 압출온도가 압출하중에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4에서 나타낸 압출온도의 변화에 따른 압출품의 사진이다. 그림에서 A는 압출온도가 150°C일 때의 압출품으로서 Cu와 Al의 유동응력 차이가 심하여 내재(Al)가 외재(Cu)에 인장력을 가해 외재가 파괴되었음을 보여주며, B는 300°C 일 때

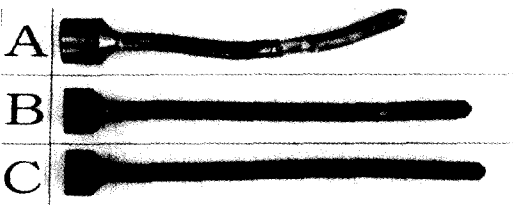
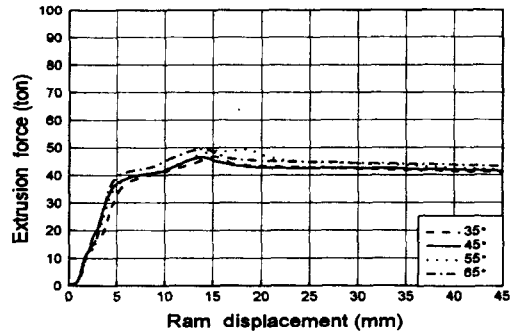


Fig. 6. Photograph of extruded products (extrusion temperature, A:150°C, B:300°C, C:400°C)

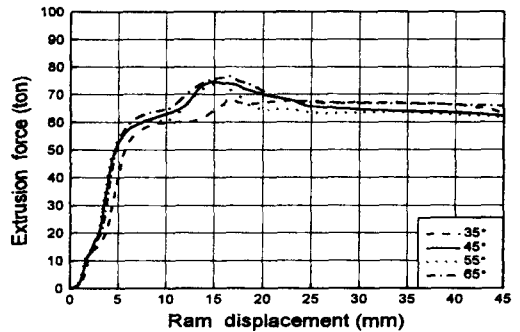
의 압출품으로서 표면에 균열이나 주름(wrinkle) 등의 결함이 없이 표면품위가 양호하며, C는 400°C 일 때의 압출품으로서 표면에 윤활제가 고착되어 있음을 볼 수 있다. 따라서 압출하중의 변화상태와 압출품의 품질을 고찰하였을 때 압출온도는 300°C 부근이 안정적임을 알 수 있었다.

3.2. 압출비와 다이반각의 영향

Fig. 7의 (a), (b)는 압출온도 300°C에서 압출비가 4.24와 8.50일 때 다이반각의 변화에 따른 압출하중의 변화를 나타낸 것으로서 램이 약 5mm 진행될 때까지 압출하중이 급격히 상승하는 것은 빌렛이 컨테이너 내부에 완전히 채워질 때까지 압축되는 과정을 나타내며, 그 후 처음 굴곡점에서 선단의 외재(Cu)가 항복되어 다이 출구를 통과하며 램이 약 15mm 진행된 지점에서 두 번째 항복점에 이르러 내재(Al)가 항복되어 외재와 함께 층상으로 다이출구를 통과하며 최대 압출하중에 도달한 후 압출이 이 계속 진행되면서 정상상태에 도달됨을 알 수 있



(a) E.R. 4.24



(b) E.R. 8.50

Fig. 7. Ram displacement vs. extrusion force curves showing the effects of different semi-cone angle of die at extrusion temperature 300°C

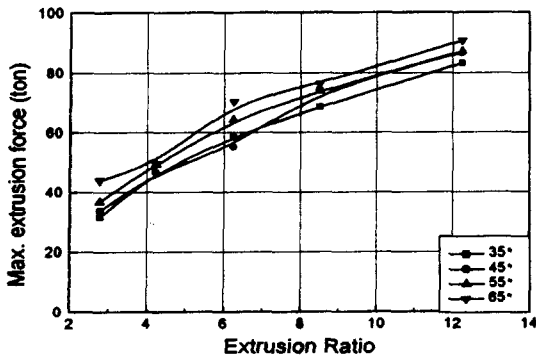


Fig. 8. Extrusion ratio vs. max. extrusion force curves showing the effects of different semi-cone angle of die at extrusion temperature 300°C

다. 그림에서와 같이 단일재의 압출과는 달리 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 윤활 작용을 원활히 하여 마찰이 하중의 변화에 미치는 영향이 작음을 의미한다. Fig. 8은 Fig.7에서와 같이 압출비의 변화와 다이반각에 따른 최대 압출하중을 나타내었다. Fig. 8에서 동일한 다이반각에 대해 압출비가 증가할수록 압출하중이 증가됨을 볼 수 있으며, 또한 동일한 압출비에 대하여 다이반각이 증가할수록 압출하중이 대체적으로 증가하였으나, 압출비 4.24와 6.25에서는 다이반각이 35°일 때가 45°에서 보다 압출하중이 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 다이반각의 감소에 따른 빌렛과 다이면의 접촉면 증가에 인한 것으로 생각된다. Fig. 9는 각 압출비에서 다이출구를 통과한 압출품의 사진으로서 외재의 파괴 없이 압출되었음을 볼 수 있다.

3.3. 경계면 접합조건

층상복합재료는 압출을 통하여 두 금속이 경계면에서 압접이 되어야 단일금속의 경우와 같은 기능을 발휘할 수 있다. Fig. 10은 압출비와 다이반각 등의 공정변수의 변화에 따른 경계면 접합여부를 고찰하기 위하여 압출 도중에 제품을 채취하여 축

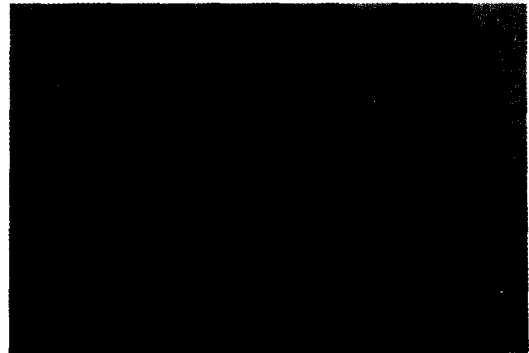


Fig. 9. Photo. of the extruded products (E.R. 12.25, 8.50, 6.26, 4.24, left to right)

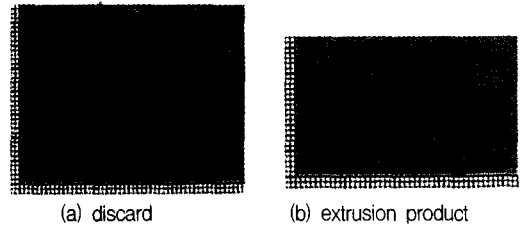


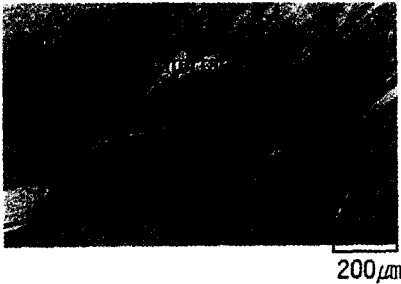
Fig. 10. Section photograph of discard and extrusion product

방향으로 1/2을 절단한 후 합성수지(polyester)로 마운팅하여 연마한 시편의 단면과 압출품의 단면 사진이다. 이것을 폴리싱(polishing)한 후 금속현미경을 이용하여 각 압출조건에 따른 압출품의 Cu-Al 경계면의 접합상태를 관찰하였다.

Fig.11의 (a)는 컨테이너 내부의 변형 전 빌렛의 조직사진으로서 Cu와 Al사이의 경계면이 잘 접합되지 않은 상태이며, Cu의 결정립이 변형되지 않은 표준조직의 형태를 보여주고 있다. Fig. 11의 (b)는 압출비가 8.50, 다이반각 45°의 변형영역에서의 금속조직 사진으로서 다이 접촉면에서의 유동저항에 의하여 Cu와 Al이 압축력을 받아 Cu의 결정립이 변형방향으로 많이 압축되어 있는 것을 볼 수 있으며, Al 경계면과의 접합이 진행되는 과정을 보여주고 있다. 이러한 소성변형 과정을 거쳐 다이출구를 통과하여 압출된 제품의 축 방향과 원주 방향의 계면접합 상태를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서와 같이 계면접합을 만족시키는 압출조건에서 다이 출구를 통과한 압출품의 Cu와 Al의 경계면은 접합에 필요한 신생면 생성과 압축력을 받아 압접이 이루어졌음을 볼 수 있었으며, 또한 Cu 층의 결정립이 압출방향으로 길게 압축되어 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 압출비 2.78, 다이반각 65°의 조건에서 압출된 압출품의 축 방향과 원주 방향의 조직사진

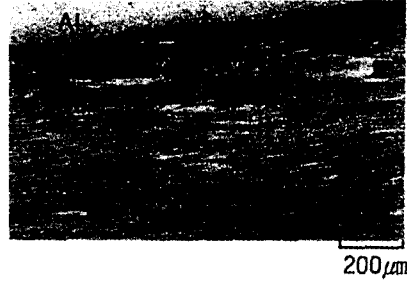


(a) Before extrusion (×100)



(b) Deformation zone (×100)

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



(a) Axial direction (×100)

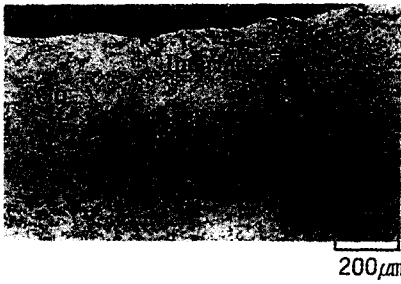


(b) Radial direction (×100)

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



(a) Axial direction (×100)



(b) Radial direction (×100)

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

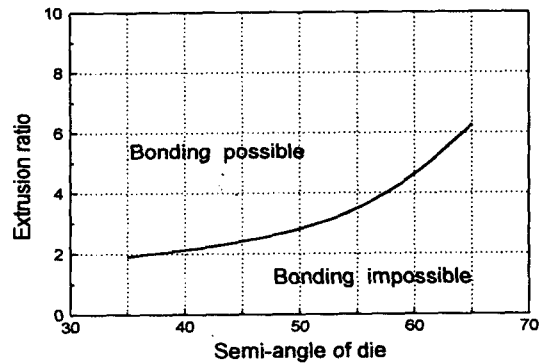


Fig. 14. Prediction of bonding possibility (extrusion temperature 300°C)

으로서 작은 압출비에서 다이반각이 클 경우 다이의 변형영역 내에서 신생면이 계면접합에 필요한

만큼 생성되지 않고 압축력도 약하여 Cu와 Al 계면이 접합되지 않았음을 보여준다. 이와 같이 압출비에 따른 부적절한 다이반각과 압출조건은 계면접합 조건을 만족시키지 못하고 다이출구를 통과한 후에도 Cu와 Al 사이의 계면이 접합되지 않음을 알 수 있다. 압출조건에 따라 압출된 제품의 현미경 고찰을 통하여 압출비가 비교적 클 때 다이내의 변형영역에서 계면접합에 요구되는 신생면의 생성과 압축력을 충족하여 계면접합이 이루어지며, 압출비가 작을 때 다이반각이 어느 한계 이상

이 되면 압접에 필요한 경계면에서의 신생면과 압축력이 부족하여 계면접합이 완전하게 이루어지지 못함을 알 수 있었다. 위와 같이 본 실험조건에서 각 압출비와 다이반각의 변화에 따라 다이출구를 통과하여 압출된 Cu-Al 층상 복합재료의 계면접합에 대한 실험과 고찰을 통하여 Fig. 14와 같이 압출비와 다이반각의 변화에 따른 계면접합 가능성을 예측할 수 있는 그래프를 나타내었다.

4. 결론

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 내재와 외재의 파괴 없이 Cu-Al 층상 복합재료 봉을 용이하게 압출할 수 있었다.

(2) 압출비 6.25, 다이반각 45°일 때 압출온도가 150°C에서 외재의 파괴가 발생하였으며, 압출온도가 높아짐에 따라 항복응력이 감소하여 최대 압출하중이 낮아지는 경향을 나타낸다.

(3) 동일한 압출비에서 다이반각이 커짐에 따라 최대 압출하중은 증가한다.

(4) 압출비가 4.24 이상일 때 다이반각이 비교적 큰 영역에서도 계면이 접합될 수 있으며, 압출비가 낮을수록 다이반각이 작은 영역이 계면접합에 유리하다.

(5) 압출온도 300°C에서 압출비와 다이반각의 변화에 따라 계면 접합이 가능한 조건을 예측할 수 있었다.

참고문헌

- 1) B. Avitzur, R. Wu, S. Talbert and Y. T. Chou., "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) B. Avitzur, R. Wu, S. Talbert and Y. T. Chou., "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) D. Y. Yang, Y. G. Kim and C.M.Lee., "An Upper Bound Solution for Axi-symmetric Extrusion of Composite Rods Through Curved Dies," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, pp. 565~575, 1991.
- 4) H. J. Park, K. H. Na, N. S. Cho, Y. S. Lee and S. W. Kim., "A study of the hydrostatic extrusion of copper-clad aluminium tube," J. of Materials Processing Technology, Vol. 67, pp. 24~28, 1997.
- 5) N. Ahmed., "Extrusion of Copper Clad Aluminum Wire", J. of Mechanical Working Technology, Vol.2, pp. 19~32, 1978.
- 6) H. Tokuno and K. Ikeda., "Analysis of deformation in extrusion of composite rods", J. Materials Processing Technology, Vol. 26, pp. 323~335, 1991.
- 7) H. K. Oh and B.W. Ryu, "Effects of process variables on the deformation field in extrusion through conical die", J. Mechanical Working Technology, Vol. 11, pp. 71~86, 1985.
- 8) S. M. Byon and S. M. Hwang, "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, 1997.
- 9) R. Sliwa, "Plastic zones in the extrusion of metal composites", J. of Materials Processing Technology, Vol. 67, pp. 29~35, 1997.
- 10) 김희남, 윤여권, 강원영, 박성훈., "Cu-Al 층상 복합 재료 봉의 직접압출에 관한 연구(I)", 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집(I), pp.124~127, 2000.
- 11) 김희남, 윤여권, 강원영, 박성훈., "Cu-Al 층상 복합 재료 봉의 직접압출에 관한 연구(II)", 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집(I), pp. 55~58, 2000.