

Cu-Al 층상 복합재료 직접압출시 금속의 유동상태와 경도 변화

강원영* · 윤여권* · 박성훈* · 김희남**

Variations of Metal Flow State and Hardness on the Direct Extrusion of Copper Clad Aluminum Rods

W. Y. Kang, Y. K. Yoon, S. H. Park, and H. N. Kim

Key Words : Direct extrusion (직접압출), Extrusion ratio (압출비), Proportional flow(비례유동), Semicone angle of die (다이반각), Copper clad aluminum composite material rods (구리 피복 알루미늄 복합재료봉)

Abstract

A composite material consists of two or more different material layers. Copper clad aluminum composite materials are being used for economic and structural reasons. This study is concerned with experimental investigation in the direct extrusion of copper clad aluminum rods through conical dies. The suggestion are given for the proper extrudability of copper clad aluminum rods via hot direct extrusion.

This paper presents the variation of flow state and hardness at a variable of extrusion ratio and semi-angle of die. By measuring after and before extrusion radius ratio of Cu sleeve and Al core, proportional flow state has been considered. And also by measuring hardness, through extrusion way, a variation of hardness has been considered

1. 서론

산업이 고도화되고 기술의 발전이 급속히 진전됨에 따라 요구되는 부품의 성능과 기능이 다양화되고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 새로운 신소재의 개발과 아울러 신기술의 개발은 필수적이다. 층상 복합재료는 두 종류 이상의 서로 다른 금속이 층상으로 접합되어있는 재료로써, 단일 금속으로 얻기 힘든 기계적 성질을 개선하고 경제적인 효과를 얻기 위해 주로 사용되어지고 있다.

Cu-Al 층상 복합재료란 Al내재의 전둘레를 Cu 외재로 둘러싼 형태로써, 두 가지 각기 다른 기계적 성질을 가진 금속이 층상으로 적층된 상태에서 압출에 의하여 그 경계면에서 압접으로 인하여 접합된 재료로서 전기 및 열의 양도체로 사용된다. 특히, 전기 전도의 필수품인 Cu bus-bar는 가격이 고가일 뿐만 아니라 비중이 커서 bus-bar 설치 작업에서 취급이 어렵고 물류비용도 비싸게 된다. 이러한 경제적인 기대 효과로 인하여 Cu-Al 층상복합재료 압출에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

현재 유럽 등지에서는 Cu-Al 층상 복합재료가 전철급전선, 변압기 단자, 컨트롤 유니트, 호텔 배전반 모선, 전압제어장치, 변전실용 등으로 사용되고 있으며, 특히 전기 및 열의 양도체로 첨단기계의 전기 전도재료와 초소형 경량화 기계에

* 명지대학교 기계공학과 대학원

** 명지대학교 기계공학과

많이 사용되고 있다. 이와 같은 용도로 복합재료의 효율적인 압출에 관한 연구와 생산은 매우 중요하다 할 수 있다.

지금까지 복합재의 압출에 관한 연구로 N. Ahmed⁽¹⁾는 간접압출법으로 구리 피복 알루미늄 선을 압출 하는데 있어서 다이반각과 단면감소율이 압출성에 미치는 영향과 압출압력에 대하여 연구하였고, B. Avitzur⁽²⁾⁽³⁾등은 복합재료 봉의 압출시 해석적인 방법으로 내재의 파괴를 방지하기 위한 기준과 내재와 피복재의 반경비와 강도비 및 다이각이 압출성에 미치는 영향에 관하여 연구하였고, D. Y. Yang⁽⁴⁾ 등은 만곡된 다이를 통과하는 축 대칭 복합재료 봉의 상계해에 관한 연구를 하였으며, H. Tokuno⁽⁵⁾ 등은 납함금 코어와 Al 슬리브 복합재료 봉의 압출실험을 상계해를 이용하여 변형을 해석하였으며, R. Sliwa⁽⁶⁾는 복합재의 압출시 변형영역에서의 소성유동상태의 변화를 연구하였으며, H. J. Park⁽⁷⁾ 등은 정수압 압출법을 이용하여 Cu-Al 층상 복합재료 봉 압출에 관한 유한요소해석과 실험을 하였으나, 대부분이 정수압 압출을 이용한 연구였으며, 직접압출법을 이용한 Cu-Al 층상 복합재료 봉 압출에 있어서 여러 가지 압출비에 걸쳐 다이반각의 변화에 따른 유동특성과 경도변화에 대해 실험한 연구는 거의 없는 실정이다.

여러 가지 압출비에 걸쳐 다이반각의 변화에 따른 유동특성과 경도변화의 고찰을 통하여 이상적인 비례유동을 유도하고 요구되는 경도를 만족시키기 위한 압출조건을 찾는 것은 의미가 있다.

본 연구에서는 H. N. Kim⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 등이 보다 경제적이고 용이하게 Cu-Al 층상 복합재료 봉을 압출하기 위하여 금형의 구조가 비교적 간단한 직접압출법을 이용하여 다이반각, 압출비 및 압출온도의 변화가 직접압출에 미치는 영향에 대하여 실험한 것을 바탕으로 압출비와 다이반각의 변화에 따른 금속유동상태와 압출품의 경도 변화에 대하여 고찰하였다.

2. 비례유동의 조건식

B. Avitzur 등⁽²⁾에 의하면 2종 금속재료의 압출에서 비례유동(Proportional flow)이 발생하기 위해서 내재와 외재는 이상적인 신장이 되어야만 한다고 하였다. 변형된 결과는 균질(Uniform flow)

또는 비균질 유동(Non-uniform flow)이지만 두 상황 모두 다음 상태를 따라야 한다.

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

여기서

- R_0 는 변형 전 외재의 외부 반경
- R_i 는 변형 전 내재와 외재의 접촉경계면 반경
- R_f 는 변형 후 외재의 외부 반경
- R_{fi} 는 변형 후 내재와 외재의 접촉경계면 반경

만약 내재가 외재보다 더 경질(硬質)일 때 내재는 외재보다 더 낮은 변형률을 나타내는 경향이 있으며, 내재가 외재보다 변형이 작다는 것은 내재가 외재보다 신장이 작음을 의미한다. 따라서, 외재가 내재에 인장응력을 작용시켜 내재의 파괴를 초래한다.

이론적으로 내재가 파괴되는 경우는

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

반면에 외재가 내재보다 더 경질이고 변형이 작다면 외재는 내재보다 신장이 작다. 그러므로 내재가 외재에 인장응력을 가하여 외재의 파괴를 가져온다.

이론적으로 외재가 파괴되는 경우에는

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

로 표현할 수 있으며, Cu-Al 층상 복합재료 봉의 압출의 경우는 Cu외재가 Al내재보다 더 경한 재료이므로 식(3)의 경우와 같다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 금형의 설계 및 제작

본 실험에 사용한 금형은 합금공구강(STD61)을

이용하여 제작하였으며, 압출도중 금형으로의 열 손실을 방지하고 압출온도를 일정하게 유지시키기 위하여 컨테이너 외주에 별도의 가열장치를 부착하였으며, 금형온도를 일정온도로 제어할 수 있도록 온도 조절장치를 장치하였다. Fig. 1 은 본 실험에 사용된 금형의 사진이다.

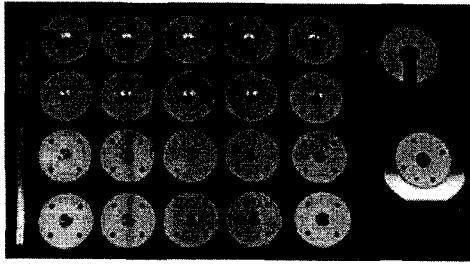


Fig. 1 Photograph of die set

3.2 빌렛의 설계 및 제작

Cu-Al 층상 복합재료 붕을 압출하기 위하여 구리를 외재로 하고 알루미늄 합금(A6061)을 내재로 하여 소요의 치수로 기계 가공한 후 탈유제(Trichloro-ethylene)를 사용하여 표면의 기름을 깨끗이 제거한 후 역지 끼워맞춤으로 빌렛을 제작하였다.

또한, 다이반각의 변화에 따른 Cu와 Al의 유동 상태를 고찰하기 위하여 내재를 분할하여 격자망(Grid-net)을 새긴 후 외재와 조합하여 빌렛을 제작하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 빌렛의 사진이며, Fig. 3에 빌렛과 금형의 형상을 나타내었으며, Table 1에 빌렛과 금형의 치수를 표시하였다.

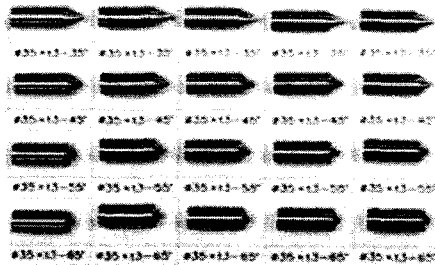
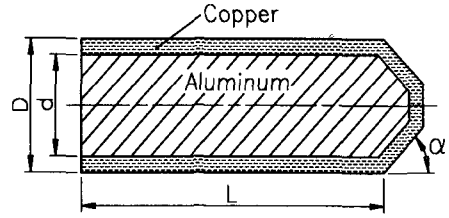
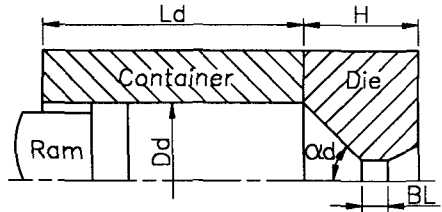


Fig. 2 Photograph of billets



(a) Billet



(b) Die

Fig. 3 Geometry of billet and die

Table 1 Dimensions of billet and die

(unit : mm)

Billet	Outer diameter (D)	Billet length (L)	Sleeve thickness (t)	Core diameter (d)	Semicone angle $\alpha (^\circ)$
	35	65	3	29	35 45 55 65
Die	Inner diameter (Dd)	Contain. length (Ld)	Die height (H)	Bearing length (BL)	Semicone angle $\alpha d (^\circ)$
	35.4	150	45	5	35 45 55 65

3.3 압출실험

본 연구에서 사용한 압출장비는 램(Ram)이 전진함에 따라 빌렛을 가압하여 직접압출이 진행되는 동안 램의 변위와 속도에 따른 압출하중의 변화를 정량적으로 측정할 수 있는 200 Ton 용량의 만능시험기(U.T.M.)를 사용하였고, 전기로를 사용하여 빌렛을 압출온도까지 가열하였다.

Table 2에 본 실험의 압출조건을 나타내었으며, 금형과 빌렛사이의 마찰을 줄이기 위하여 윤활제로 국내 G사의 Gate C (Graphite+Paraffin)를 사용하였다.

Table 2 Extrusion conditions

Extrusion Ratio	Semicone angle α (°)	Extrusion temperature (°C)	Ram speed (mm/sec)	Lubricant
2.78	35	150	0.8	Gate C (Graphite+Paraffin)
4.24	45	200		
6.25	55	250		
8.50	55	300		
12.25	65	350		
		400		

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압출비와 다이반각의 영향

Fig. 3은 압출비가 4.24일 때, 각각의 다이반각에 대하여 램의 변위에 따른 압출하중의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 압출비가 비교적 낮을 때에는 다이반각이 최대 압출하중의 변화에 미치는 영향이 작음을 알 수 있었으며, 램 변위가 5mm 진행될 때까지 압출하중이 급격히 상승하는 것은 빌렛이 컨테이너 내부에 완전히 채워질 때까지 압축된 후 Cu외재가 압출되는 과정을 나타내며, 이후 최대 압출하중을 지나 압출이 진행되면서 정상상태의 압출이 진행됨을 볼 수 있다.

Fig. 4는 본 실험의 압출조건에 의해 압출된 제품의 사진으로써, 전체적으로 외재의 파괴 없이 압출되었음을 볼 수 있었으며, 동일한 다이반각에 대해 압출비가 증가할수록 압출하중이 증가됨을 볼 수 있었으며, 또한 동일한 압출비에 대하여 다이반각이 증가할수록 압출하중이 대체적으로 증가하였다.

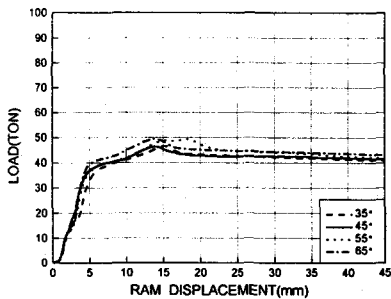


Fig. 3 Load-displacement curves showing the effects of different semi-angle of die (ER4.24)

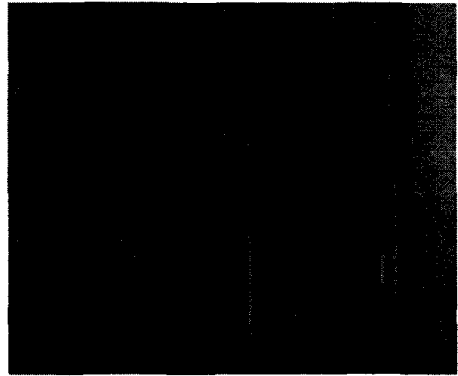


Fig. 4 Photograph of the extruded products (E.R 12.24, 8.50, 6.25, 4.24, left to right)

4.2 압출온도의 영향

압출온도의 변화에 따른 압출하중의 변화와 윤활제가 압출품의 표면에 미치는 영향을 고찰하기 위해 다이반각 45°, 압출비 6.25에서 압출온도를 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C로 각각 변화시켜 압출하였다. Fig. 5는 압출온도에 따른 압출하중의 변화를 나타내는 그래프이다. 정상적인 압출구간은 최대 압출하중을 지나 압출하중이 약간 저하된 후 급격한 하중의 변화가 없을 때이며 그림에서 볼 수 있듯이 압출온도가 낮아짐에 따라 압출하중이 증가되는 경향을 볼 수 있으며, 압출온도가 150°C에서 250°C까지는 압출하중이 급격히 변화되며 300°C에서 400°C 구간에서는 압출온도의 상승에 따른 압출하중의 변화가 작음을 알 수 있다. 압출온도가 300°C 이상에서는 최대 압출하중 이후 램 변위에 따른 하중의 급격한 변화가 없는 안정적인 정상상태를 나타내고 있다.

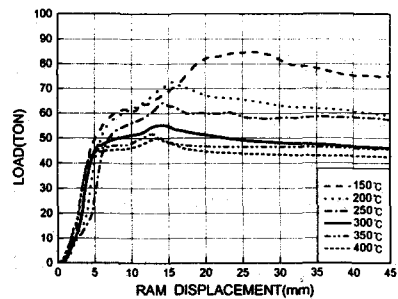


Fig. 5 Load vs. displacement curves showing the effects of different extrusion temperature

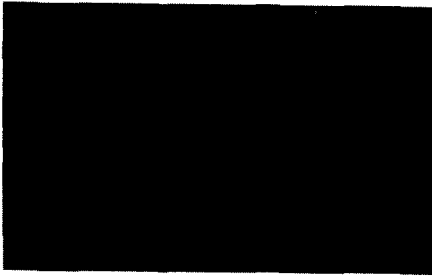


Fig. 6 Fractured sleeve (Extrusion temp. 150°C)

Fig. 6은 압출온도 150°C에서 압출한 압출품으로서 내재와 외재의 유동응력 차이가 크므로 인하여 내재가 외재에 인장력을 가해 외재가 파파된 경우의 사진이다.

4.3 유동상태 고찰

Fig. 7은 금속의 유동속도와 상태를 고찰하기 위해 내재에 격자망을 새긴 빌렛을 제작하여 압출비 6.25, 압출온도 300°C, 압출속도 0.8 mm/sec의 조건에서 다이반각을 35°, 45°, 55°, 65°로 변화시켜 압출한 시편이다. 그림에서 다이반각의 변화에 따라 Cu-Al 접촉 경계면과 내재 중앙부의 유동속도의 차이가 현저함을 볼 수 있으며, 다이반각이 35° 일 때에는 내재 중앙부에서 원주방향으로 격자망의 간격변화가 일정하여 균일한 유동이 됨을 알 수 있으며, 다이반각이 증가됨에 따라 Cu-Al 접촉 경계면 쪽으로 격자 간격이 더욱 조밀하게 압축되어 있음을 볼 수 있다. 이것은 다이반각이 증가됨에 따라 내재와 외재가 다이 접촉면에서의 유동 전단저항이 증가됨에 인한 것으로 생각된다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 조건에서 내재를 분할하지 않은 빌렛을 압출한 후 축방향으로 1/2을 절단한 제품의 단면사진으로서 실제 압출의 조건과 동일한 상태에서의 유동상태를 보여주며 유동양상이 유사함을 보여준다.

그림에서 다이반각이 증가할수록 내재의 변형구역 경계면이 다이 입구에서 멀리 떨어진 곳에서 빨리 시작되어 유동이 부드럽지 못함을 보여주는 것을 볼 수 있는데, 이는 다이반각이 커짐에 따라 외재가 소성지역의 경계면을 따라 원활히 유동되지 못하고 저항을 받으며 변형이 진행되다가 다이 출구에서 멀리 떨어진 지점에서 급격히 변형되는 유동을 나타내 변형구역에서의

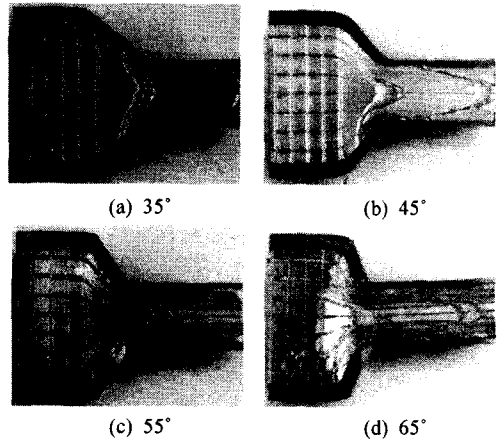


Fig. 7 Cross-section of discards (Grid-net)

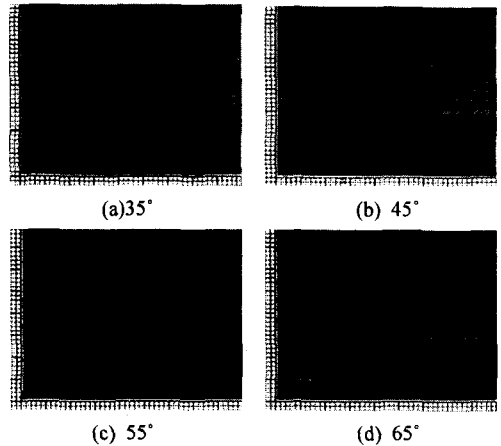


Fig. 8 Cross-section of discards

외재의 두께가 두꺼워짐을 볼 수 있는데, 이는 다이반각이 증가됨에 따라 외재가 소성지역 경계면에서의 유동저항이 커짐에 의한 것이다.

Fig. 9는 압출 후 외재와 내재의 비례유동을 고찰하기 위해 본 실험의 압출조건에 의하여 압출된 압출품의 축 방향 단면에서 외재의 반지름과 내재의 반지름을 공구현미경을 이용하여 측정된 반지름비를 나타낸 그래프이다.

그림에서 압출 전 빌렛의 외재와 내재의 반지름비 $R_i/R_0 = 0.826$ 이며, 압출 후 반지름비는 $R_{fi}/R_f = 0.829 \sim 0.836$ 의 범위에 존재함을 알 수 있었다.

빌렛의 초기 반지름비와 압출품의 반지름비가 거의 같거나 차이가 미소함은 소성변형 거동이 비례유동에 가까움을 의미한다.

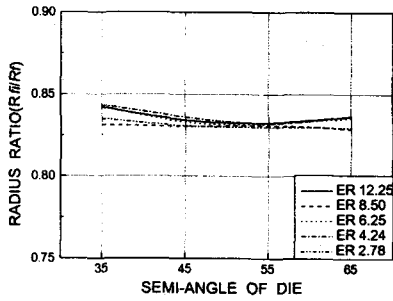


Fig. 9 Semi-angle of die vs. Radius ratio
(Extrusion temp. 300°C)

또한, 2장의 식 (3)과 비교하면 빌렛의 반지름비가 압출 후의 반지름비보다 작으므로 외재의 파괴가 일어나지 않는 조건을 만족함을 알 수 있다.

4.4 경도 측정 및 고찰

Fig. 10은 압출비 6.25, 다이반각 45° 로 압출한 압출품의 변형과정을 나타내는 현미경 조직사진으로서, (a)는 압출 전, (b)는 변형구역, (c)는 압출 후의 압출품을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 압출이 진행되어 빌렛이 변형구역에 들어 오기 전까지 표준 조직을 가지고 있던 Cu외재가 변형구역에서 압축되면서 전단력을 받아 슬립(Slip)이 형성되면서 변형이 진행되고, 이후 다이의 베어링 랜드를 통해 출구를 빠져 나오면서 조직이 치밀하게 압축되어 있음을 볼 수 있다.

이와 같이 빌렛이 컨테이너에 장입되어 압출될 때까지 여러 변형과정을 거쳐 소요의 치수와 형상으로 성형되며, 특히 외재의 경도는 내마모성과 관련되는 기계적 성질이므로 요구되는 경도를 충족할 수 있는 압출조건 설정 또한 중요한 변수이다. 각 압출비에서 다이반각의 변화가 압출품의 경도 변화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 8과 같이 압출 도중의 제품을 채취하여 축 방향으로 1/2 절단하여 연마한 후 마이크로 비커스 경도시험기(Micro vickers hardness tester)를 이용하여 경도를 측정하였다.

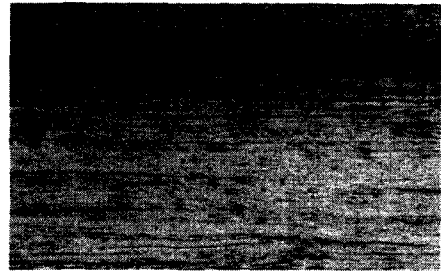
Fig. 11의 (a)-(c)는 각각 압출비 2.78, 6.25, 8.50에서 $R_i/R_0 = 0.977$ 의 변형경로 따라 경도를 측정 한 그래프이다. 그림에서와 같이 압출비의 변



(a) Before extrusion.



(b) Deformation zone



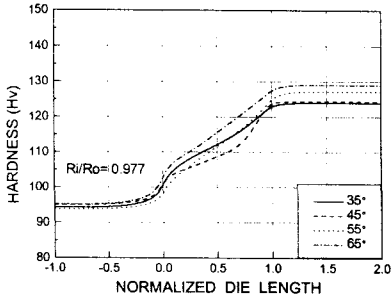
(c) After extrusion

Fig. 10 Optical microscopic view (×100)

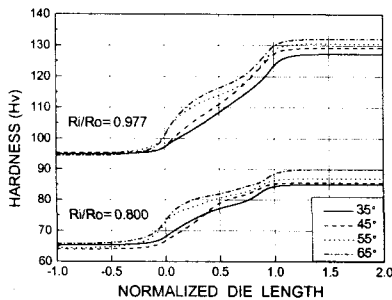
화에 따라 압출 후 경도는 압출 전에 비하여 약 40%~50% 정도 증가되며, 동일한 압출비에서 다이반각이 증가할수록 대체로 경도가 증가하는 경향을 보이나, 그 차이가 4% 이하로 작은 것을 알 수 있다.

또한 다이 입구까지는 경도의 변화가 거의 일정하다가 변형구역에 도달하여 변형이 진행됨에 따라 경도도 급격히 증가하며, 변형이 다이의 베어링 랜드(Bearing land)부에 도달하면 다시 일정한 경도를 유지하면서 다이 출구를 빠져 나온다.

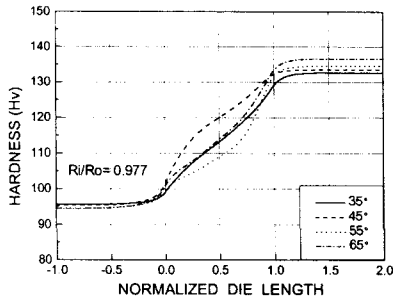
Fig. 11의 (b)는 압출비 6.25에서 $R_i/R_0 = 0.977$ 과 $R_i/R_0 = 0.800$ 부위에서의 변형 경로를 따라



(a) Extrusion ratio 2.78



(b) Extrusion ratio 6.25



(c) Extrusion ratio 8.50

Fig. 11 Normalized die length vs. Hardness
(Extrusion temp. 300°C)

측정한 경도 변화를 나타낸 그래프로서, $R_i/R_0=0.800$ 인 Al내재의 변형경로에 따라 경도변화를 살펴보면 다이반각이 증가할수록 외재와 접하는 계면에서도 경도가 높아지는 경향을 볼 수 있다.

따라서 직접압출법을 이용하여 층상 복합재료를 압출함에 있어서 일정한 소성변형거동과 경도를 얻을 수 있다.

5. 결론

직접 압출법을 이용한 Cu-Al 층상 복합재료 봉

의 압출에서 압출비와 다이반각의 변화에 따른 유동상태와 경도의 변화에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 직접압출법을 이용하여 압출온도 250°C ~ 300°C, 압출비 2.78~12.25 범위에서 외재의 파괴 없이 비례유동을 얻을 수 있었다.

(2) 다이반각이 증가됨에 따라 내재 중앙부와 Cu-Al 경계면에서의 초기 유동속도 차이가 커짐을 알 수 있었다.

(3) 압출품의 경도는 압출비가 높아짐에 따라 증가되며, 또한 동일한 압출비에서 다이반각이 커짐에 따라 다소 증가하는 경향을 나타냈다.

참고문헌

- (1) N. Ahmed, "Extrusion of Copper Clad Aluminum Wire", Journal of Mechanical Working Technology, Vol.2, pp.19-32, 1978.
- (2) B. Avitzur, R. Wu, S. Talbert and Y. T. Chou, "Criterion for the Prevention of Core Fracture During Extrusion of Bimetal Rods", J.Eng. for Ind., Trans. ASME, Vol. 104, pp.293-304, 1982.
- (3) B. Avitzur, R. Wu, S. Talbert and Y. T. Chou, "An Analytical Approach to the Problem of Core Fracture During Extrusion of Bimetal Rods", Journal of Engineering for Industry., Trans. ASME. Vol.107, pp.247-253, 1985.
- (4) D. Y. Yang, Y. G. Kim and C. M. Lee, "An Upper Bound Solution for Axisymmetric Extrusion of Composite Rods Through Curved Dies", Int.J. Mach. Tools Manufact., Vol.31, pp.565-575, 1991.
- (5) H. Tokuno and K. Ikeda, "Analysis of deformation in extrusion of composite rods", J. Materials Processing Technology, Vol.26, pp.323-335, 1991.
- (6) R. Sliwa, "Plastic zones in the extrusion of metal composites", Journal of Materials Processing Technology Vol.67, pp.29~35, 1997.
- (7) 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", Journal of Materials Processing Technology Vol.67, pp.24~28, 1997
- (8) 김희남, 윤여권, 강원영, 박성훈, "Cu-Al 층상 복합재료 봉의 직접압출에 관한 연구(I)", 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집(I), pp.124~127, 2000
- (9) 김희남, 윤여권, 강원영, 박성훈, "Cu-Al 층상 복합재료 봉의 직접압출에 관한 연구(II)", 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집(I), pp.55~58, 2000