

구리-타이타늄 복합선재의 번들압출 성형특성

이용신¹ · 김종식² · 윤상현² · 이호용[#]

Forming Characteristics for the Bundle Extrusion of Cu-Ti Bimetal Wires

Y. S. Lee, J. S. Kim, S-H Yoon, H. Y. Lee

(Received April 27, 2009)

Abstract

Forming characteristics for the bundle extrusion of Cu-Ti bimetal wires are investigated, which can identify the process conditions for weak mechanical bonding at the contact surface during the direct extrusion of a Cu-Ti bimetal wire bundle. Bonding mechanism between Cu and Ti is assumed as a cold pressure welding. Then, the plastic deformation at the contact zone causes mechanical bonding and a new bonding criterion for pressure welding is developed as a function of the principal stretch ratio and normal pressure at the contact surface by analyzing micro local extrusion at the contact zone. The averaged deformation behavior of Cu-Ti bimetal wire is adopted as a constitutive behavior at a material point in the finite element analysis of Cu-Ti wire bundle extrusion. Various process conditions for bundle extrusions are examined. The deformation histories at the three points, near the surface, in the middle and near the center, in the cross section of a bundle are traced and the proposed new bonding criterion is applied to predict whether the mechanical bonding at the Cu-Ti contact surface happens. Finally, a process map for the direct extrusion of Cu-Ti bimetal wire bundle is proposed.

Key Words : Bundle Extrusion, Cu-Ti Bimetal Wire, Finite Element Analysis

1. 서 론

복합재료봉은 고강도, 고전도도, 내마모성, 내충격성과 같은 여러가지 기계적 성질을 동시에 만족시킬 수 있으므로 제조방법에 대하여 관심이 많다[1~2]. 층상복합재료 봉의 산업적 수요가 늘어남에 따라 이중금속봉의 압출에 대한 연구가 지속되어 왔다[3~4].

특히 미세 선재 제조 기술은 정보, 나노, 생명, 우주공학과 같은 첨단 산업분야에 절대적으로 필요한 정밀 부품 소재를 제조하는 기술이다. 이러한 미세 선재를 경제적으로 성형하도록 개발되고 있는 방법 중의 하나가 번들 인발/압출이다. 선재

와 튜브를 압입하여 만든 이중 봉을 적층하여 여러 차례 압출 등을 거치면 이중선재의 크기는 수 마이크로미터에서 수백 나노 미터로 작아지게 된다. 이 때 외재를 박리하면 미세 선재를, 내재를 제거하면 미세 튜브를 얻을 수 있다.

이중 봉의 단선 및 번들 압출 시에 내재와 외재 사이에서 확산에 의한 접합이 이루어지면 접합부에는 새로운 물질이 생성되어 박리한 후에도 계면에 새로운 물질이 남아 있게 되어 원하는 제품을 얻지 못하게 된다. 따라서 접합부에는 확산이나 용융에 의한 결합은 원하지 않는 형태이고, 소성변형에 의한 기계적 결합이 바람직하다. 클래드제의 압출 성형 방법에 대한 연구로는 Cu-Al

1. 국민대 기계자동차공학부
2. 국민대 대학원 기계설계학과
교신저자: 동국대 기계공학과, hoyong@dongguk.edu

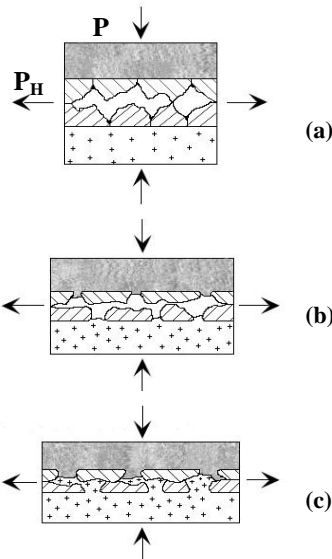


Fig. 1 Bonding mechanism in cold pressure welding:
 (a) original contact shape showing surface roughness, (b) local fracture by microcrack at the contact surface, (c) completion of local extrusion

층상 복합 재료의 직접 압출 시 공정 변수의 영향[5], 층상 복합 재료 봉의 금속 유동 특성[6], 계면 접합[7], Cu-Al층상 복합재의 간접압출 조건 도출 및 접합특성[8], Cu-Al 층상 복합재의 압출 공정 해석[9], Cu-Ti 층상 압출재의 제조 및 특성에 관한 연구[10] 등이 있다. 최근에는 층상복합재의 압출공정에서의 불균일변형[11]과 성형특성[12~13]에 관한 해석이 있었으나 대부분 층상복합재의 특성을 가지게 하기 위하여 계면에서 모재의 강도가 가까이 접근하는 접합특성을 연구하였고 약한 접합에 관한 연구는 찾아볼 수 없는 실정이다.

본 연구에서는 변형 압출의 최종단계, 수많은 Cu-Ti 미세선재가 적층된 변형을 직접 압출하는 공정을 유한요소 해석하여 계면에서 기계적 결합에 의한 낮은 강도의 접합을 판별할 수 있는 공정조건을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 국부압출

냉간 및 온간에서 이중재의 성형중에는 접합부에서의 국부적 소성변형에 의한 기계적 접합이 주된 접합기구이다. 따라서 그러한 기계적 접합은

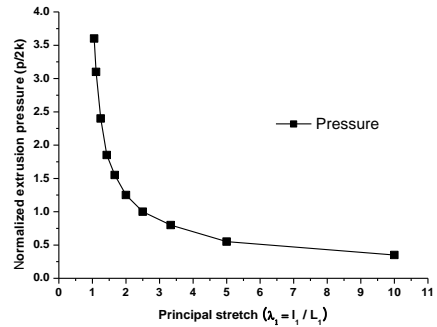


Fig. 2 Relationship between critical local pressure and principal stretch

냉간 압접 즉, 고체 상태에서의 접합으로 분류된다. 냉간 압접에 의한 고상 접합의 기구는 (1)접합부 표면의 팽창에 의한 미세크랙의 발생과 (2)발생된 크랙 사이로 모재의 국부압출로 요약되는 단계를 Fig. 1에서 나타내고 있다.

따라서 Fig. 1 (a)에서 (b)로 변하는 첫 단계에서는 국부압출형태를 만드는 과정으로 표면 자체의 거칠기와 표면의 팽창이 주요인자이고, 두 번째 단계에서는 국부압출에 의한 소성 유동을 일으키는 접촉부의 압력과 소재의 유동응력 등이 주요인자가 될 수 있다.

소성변형에 의한 냉간압접에서 접합조건은 접합면의 확장정도와 그 면에 대한 수직압력의 관계로 볼 수 있다. 냉간압접에서 접합면의 확장에 의해 새롭게 생성된 면들의 근접과정은 미시적인 관점에서 국부압출로 간주한다. 평균적으로 컨테이너의 벽면마찰이 없는 평면 압출공정으로 근사화 할 수 있으며, 파괴된 취성막들은 마찰이 매우 큰 금형역할을 한다. 본 연구에서는 접합면에서 취성막 파괴에 관여하는 인자를 주인장비로 선정하여 주인장비의 크기에 따른 국부압출의 임계압력을 구한다. 주인장비(λ)는 주변형률(ϵ_1)과 다음의 관계로 주어진다.

$$\lambda = \text{Exp}(\epsilon_1)$$

참고문헌 [14]에 주어진 바와 같이 국부압출에서의 임계압출압력은 미끄럼선장법(slip line field method)을 이용하였으며 주인장비와 임계압출압력과의 관계는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며 임계압출압력 이하에서는 접합이 이루어지지 않는 것으로 판단하였다.

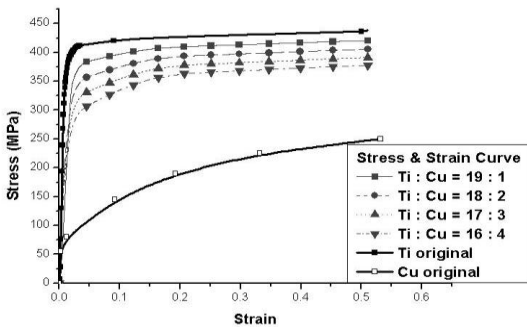


Fig. 3 Averaged stress-strain curves for compression of Cu-Ti bimetal bar

2.2 번들 압출 해석 모델

수만 내지는 수십만 가닥의 Cu-Ti 미세 이중 선재들이 적층되어 있는 번들의 변형을 Cu와 Ti 각 소재의 위치와 물성을 정확하게 반영하여 유한요소 해석하는 것은 거의 불가능하다. 이에 본 연구에서는 단일 이중선재의 평균적 거동을 구하여 Cu-Ti 미세 선재 번들의 물성으로 사용하고자 한다. Cu-Ti 이중선재의 평균적 응력-변형을 선도를 얻기 위하여 Ti와 Cu가 각각 19:1, 18:2, 17:3, 16:4의 단면적 비율로 구성된 원형 봉의 압출해석을 수행하였다. Fig. 3은 유한요소 해석으로 얻은 Cu-Ti 이중선재의 평균적 응력-변형을 선도를 보여준다. Cu-Ti의 단면적 비율에 따른 응력-변형을 관계를 Cu-Ti 미세선재 번들 압출의 유한요소해석에는 번들 내의 입의 점에서의 물성으로 사용하게 된다. 단일 미세선재의 직경은 거의 수백 나노미터 이하로 작기 때문에 평균적 물성을 이용한 해석의 결과를 단일 미세선재의 접촉부에서도 그 미세선재 위치의 점과 같은 변형이력을 겪는 것으로 간주하여 접합여부를 판별한다. 물론 단일 미세선재 내부의 국부적인 응력크기의 변화가 있을 것으로 예측되나 그 크기가 매우 작으므로 우선은 국부적인 변화는 작을 것으로 가정하였다.

3. 번들 압출 해석

이중 미세 선재 번들 압출의 유한요소 해석을 수행하여 번들 단면 내에서 세 지점(번들소재의 표면 근처, 표면과 중심부의 중간지역 그리고 중심부)에서 유동선(stream line)을 따라 변형이력을 조사하였다. 앞 절에서 개발한 접합모델을 적용시켜 번들 공정에서 약한 기계적결합 성사여부를

조사하였다. 유한요소 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS[15]를 사용하였다.

200°C에서의 Cu와 Ti의 미세 선재 번들의 직접 압출을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. 번들 표면의 피복재와 다이 사이의 마찰계수는 0.1, 모재인 Cu-Ti 미세선재 번들의 반경은 8.5mm, 피복재인 Cu의 두께는 1mm, 램속도는 1mm/sec로 설정하였다. 공정변수는 다이각도 및 압출비로 선정하였다. 각 압출비에 따라 다섯 가지의 다이 각도 10°, 20°, 30°, 40°, 50°를 고려하였다. 일반적인 격자구조는 사각형요소 약 2000개, 절점은 약 2500개 정도로 구성되었다.

4. 결과 및 분석

본 연구에서는 Ti와 Cu 시편이 각각의 위치를 유지하며 접촉부에서 1MPa 정도의 낮은 접합강도를 유지하는 기계적 접합을 일으키는 공정조건을 조사하였다. 접합여부를 판가름하는 인자는 접촉면에서의 수직압력과 접촉면에서의 인장에 따른 국부압출현상의 생성이며, 접촉부에서의 평균응력과 주인장비에 의해 예측될 수 있다.

Fig. 4는 다이 반각 30° 압출비 4에서 직접 압출시 변형구역에서의 유효응력과 평균응력분포를 보여주고, Fig. 5는 유효변형율과 주변형율 분포를 보여준다. Ti의 높은 항복응력으로 인하여 Cu와 Ti의 유효응력 차가 크게 나타나며 평균응력은 Cu와 Ti 모두 입구에서 크다는 것을 알 수 있다. 입구에서 출구로 소재가 압출됨에 따라 변형이 누적되어 주변형률과 주인장비가 커져가므로 접합에 필요한 임계압력의 크기는 작아질 것으로 예측된다.

Fig. 6에서는 다이 반각이 30°, 압출비 4일 경우에 세 가지의 유동선을 따라 국부압출에 압출하중으로 작용하는 실제의 접촉압력과 국부압출의 수행에 요구되는 임계압력과의 비를 보여주고 있다. Cu보다 강도가 높은 Ti의 전단 항복응력에 근거하여 임계 압력을 설정하여도 접촉 압력이 임계압력보다 크기 때문에 Cu에서 Ti로, Ti에서 Cu로 양방향의 접합이 이루어질 것으로 예상된다. 변형구역입구에서는 표면부, 중간부 그리고 중심부의 세 유선 모두에서 접합이 이루어지지 않으나, 변형구역 중간에서부터는 표면과 중간부에서부터 국부압출이 수행되고 이어 중앙부에서도 국부압출이 성사되는 것으로 예측되고 있다. 이와

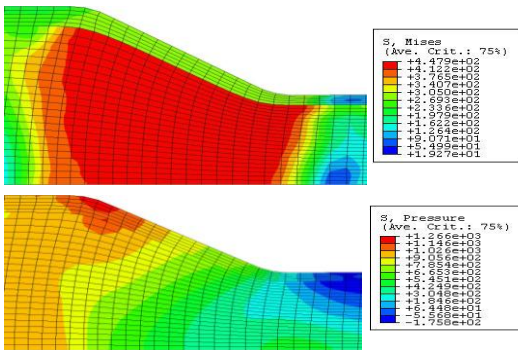


Fig. 4 Distribution of (a) Effective stress (b) Mean stress in deformation zone. (Die angle 30°, ER 4)

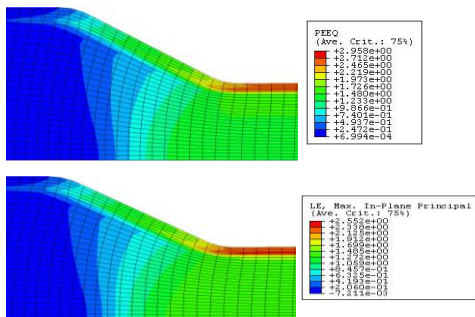


Fig. 5 Distribution of (a) Effective strain (b) Principal strain stress in deformation zone (Die angle 30°, ER 4)

같은 과정을 다이 반각이 10°, 20°, 40°, 50° 인 경우에도 되풀이하였다.

압출비가 2 인 경우에도 위의 과정을 수행하였다. 압출비가 2 인 경우에는 번들 소재의 중앙이나 표면과의 중간부에서는 국부압출이 이루어지지 않고, 표면부에서만 국부압출이 수행되는 것으로 예측되었다. Fig. 7 에서는 압출비 2 의 경우에 표면근처의 Cu-Ti 접촉부에서 접촉압력과 임계압력의 비를 여러 가지의 다이 반각에 대하여 표시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 다이 반각이 10°, 20°인 경우에는 변형구역을 벗어나기 전에 접촉압력이 임계압력보다 약간 커지나 접촉압력의 크기와 변형지속 시간을 고려할 때 접합은 이루어지지 않는 것으로 판별하였다. 그림에는 없으나 내부와 중간부의 유선에서는 접합이 이루어지지 않는 것으로 예측되었다.

앞서의 해석과 분석의 과정을 거쳐 Fig. 9 와 같은 공정지도도를 제시하였다. 여기에서 검은 점은 Cu 와 Ti 의 접촉부에서 기계적결합이 성사된 경

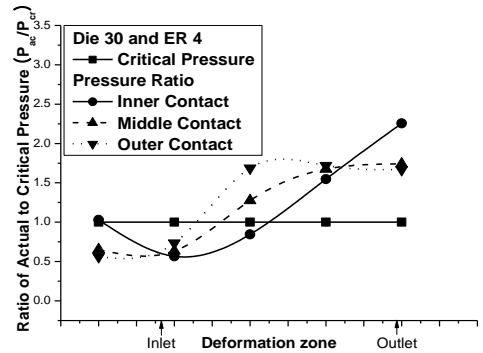


Fig. 6 Ratio of actual to critical pressure along three contact paths in deformation zone

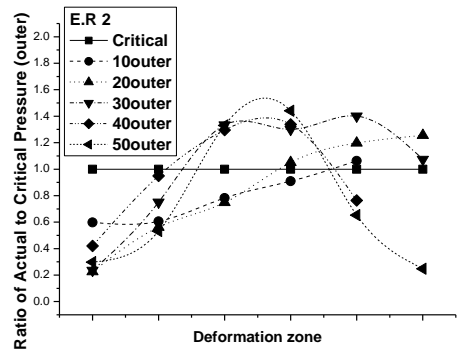


Fig. 7 Ratio of actual to critical pressure along an outer stream line (All Die angle at Extrusion Ratio 2)

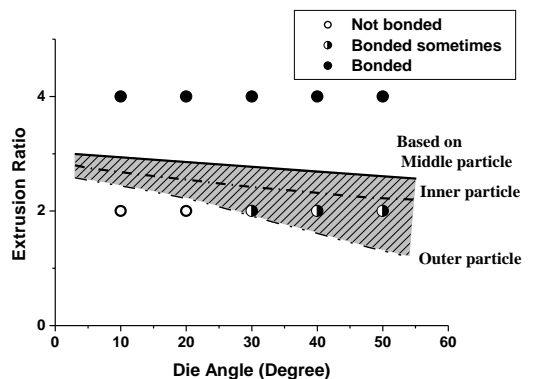


Fig. 8 A process map proposed to identify the extrusion conditions for mechanical bonding of bimetal during bundle extrusion

우이고, 흰 원은 기계적결합이 이루어지지 않은 경우를 나타내며, 접합 경계선이 내부, 중간부 및

표면근처 점의 위치에 따라 달라진다. 이와 같이 제시된 공정 지도는 Cu-clad Ti 번들압출 공정설계의 지침이 될 것으로 기대된다.

5. 결 론

다이반각과 압출비를 공정변수로 하여 Cu-Ti 미세복합선재가 적층된 번들압출공정에 대한 유한요소해석하여 접촉부의 변형이력을 추적하고 계면에서 기계적 결합에 의한 낮은 강도의 접합을 판별할 수 있는 조건을 제시하였다. 이 모사 실험을 통하여 얻은 조건과 결론은 다음과 같다.

(1) Cu-Ti 미세 이중 선재 번들 압출공정에서 Cu와 Ti 접합은 냉간 압접으로 모사될 수 있고 냉간 압접 현상은 주인장비와 접촉압력에 의하여 결정된다.

(2) 냉간 압접의 성사여부를 판단하는 접합 모델을 국부압출에서 주인장비와 임계압력의 관계로 개발하였고, 소재가 압출됨에 따라 주인장비 및 주인장비가 커지므로 접합에 필요한 임계압력의 크기는 작아진다.

(3) 낮은 강도의 기계적 결합을 얻을 수 있는 공정조건으로는 압출비가 3 정도이며 다이반각이 커지면서 압출비가 조금씩 작아지는 공정지도가 제시되었다.

후 기

이 논문은 2007 학년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어 졌음.

참 고 문 헌

- [1] S. Imamura, T. Murakami, K. Ikeda, Z. Chen, 2000, Fabrication of Three-Layer Pipes Composed of ZrO₂, and Stainless Steel by Multi-Billet Extrusion method, J. Japan. Soc. Tech. Plast., Vol. 41, pp. 131~165.
- [2] Y. M. Hwang, T. F. Hwang, 2002, An Investigation into the Plastic Deformation Behavior within a Conical Die During Composite Rod Extrusion, J. Materials Processing Tech. Vol. 121, No. 2-3, pp. 226~233.
- [3] A. K. Tayal, R. Natarajan, 1981, A Finite Element Analysis of Axisymmetric Extrusion of Composite Rods, Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 21, pp. 227~235.
- [4] B. Avitzur, R. Wu, S. Talbert, Y. T. Chou, 1982, Criterion for the Prevention of Core Fracture during Extrusion of Bimetal Rods, J. Eng. Ind., Vol. 104, pp. 293~304.
- [5] Yeo-Kwon Yun, Hee-Nam Kim and Yong-Su Kim, 2000, The Effect of Process Parameter in Direct Extrusion of Copper Clad Aluminum Composite Materials, Journal of the KIIS, Vol. 15, No. 4.
- [6] Hee-Nam Kim, Won-Young Kang, 2001, Journal of Research Institute of Industrial Technology, Vol. 20.
- [7] Hee-Nam Kim, Sung-Hoon Park, 2001, Interface Bonding of Copper Clad Aluminum Rods by the Direct Extrusion, Journal of Research Institute of Industrial Technology, Vol. 20.
- [8] Jeong-In Kim, Chung-Gil Kang and Hyok-Chon Kwon, 1999, Extrusion Process Analysis of Al/Cu Clad Composite Materials by Finite Element Method, J. Kor. Soci. Comp. Mater, Vol. 12, No. 5.
- [9] Jong-Ho Kim, Byung-Kwon Suh, Hyuk-Chon Kwon and Woo Young Yoon, 2000, Extrusion Conditions and Bonding Characterization of Al/Cu Clad Composite Material Fabricated by Indirect Extrusion, J. Kor. Inst. Met. & Mater, Vol. 38, No. 3, pp. 474~480.
- [10] Jae-Seol Lee, Hyuk-Chon Kwon and Mok-Soon Kim, 2000, A Study on the Fabrication and Properties of Ti-Cu Clad Extrudates, J. Kor. Inst. Met & Mater, Vol. 38, No. 2, pp. 388~396.
- [11] J. M. Seo, J. H. Noh, K. H. Min, B. B. Hwang, K. C. Ham, D. H. Jang, 2007, Inhomogeneous Deformation Between Construction Materials in Cu/Al and Fe/Al Co-extrusion Processes, Trans. Materials Processing, Vol. 16, No.7, pp. 530~537.
- [12] D. H. Jang, 2009, Influence of Process Parameters on the Forming Compatibility in Composite Extrusion Rods, Trans. Materials Processing, Vol. 18, No.1, pp. 80~86.
- [13] P. Kazanowski, M. E. Epler, W. Z. Misolek, 2004, Bi-metal rod Extrusion Process and Product Optimization, Mater. Sci. & Eng. A. Vol. 369, pp.170~180.
- [14] J. S. Kim, Y-S Lee, S-H Yoon, 2005, Development of a Process Map for Bundle Extrusion of Cu-Ti Bimetal Wires, Proc. of Korean Soc. for Tech. Plasticity, pp. 393~397.
- [15] ABAQUS User's Manual.