

구리-타이타늄 이중미세선재 번들압출의 공정지도 개발

김중식¹(국민대 기계설계과)· 이용신²(국민대 기계설계과)· 윤상현³(국민대 기계설계과)

Development of A Process Map for Bundle Extrusion of Cu- Ti Bimetal Wires

J. S. Kim(Graduate school. KMU), Y. S. Lee(School of MAE KMU)

S. H. Yoon(Graduate school. KMU)

Abstract

A process map has been developed, 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 : Process map(공정지도), Bundle Extrusion(번들 압출), Cu-Ti wire(구리-타이타늄선재), Finite Element Method (유한요소법)

1. 서론

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. 선재와 튜브를 압입하여 만든 이중 봉을 적층하여 여러 차례 압출 등을 거치면 이중선재의 크기는 수백 나노 미터에서 수 마이크로미터로 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. 반면에 클래드재의 압출 성형 방법에 대한 연구로는 Cu-Al 층상 복합 재료의 직접 압출 시 공정 변수의 영향[1], 층상 복합 재료 봉의 금속 유동 특성[2], 계면 접합[3], Cu-Al 층상 복합재의 간접압출 조건 도출 및 접합특성[4], Cu-Al 층상 복합재의 압출 공정 해석[5], Cu-Ti 층상 압출재의 제조 및 특성에 관한 연구[6], 등이 있다. 그러나 대부분 층상 복합재의 특성을 가지게 하기 위하여 계면에서 모재의 강도 가까이에 접근하는 접합특성을 연구하였고 약한 접합에 관한 연구는 찾아볼 수 없는 실정이다.

본 연구에서는 번들 압출의 최종단계, 수많은 Cu-Ti 미세선재가 적층된 번들을 직접 압출하는 공정을 유한요소 해석하여 계면에서 기계적 결합에 의한 낮은 강도의 접합을 판별할 수 있는 공정조건을 규명하는 공정지도를 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 냉간 압접 즉, 고체 상태에서의 접합으로 분류된다. 냉간 압접에 의한 고상 접합의 기구는 (1)접합부 표면의 팽창에 의한 미세 크랙의 발생과 (2)발생된 크랙 사이로 모재의 국부압출 (Local extrusion)로 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.

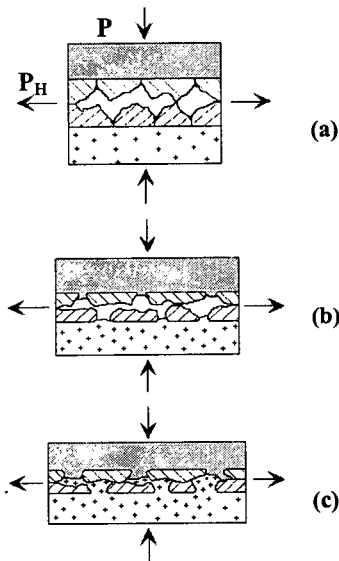


Fig. 1 Bonding mechanism in cold pressure welding: (a) original contact shape showing surface roughness, (b) local fracture by microcrack at the contact surface, (c) completion of local extrusion

소성변형에 의한 냉간압접에서 접합조건은 접합면의 확장정도와 그 면에 대한 수직압력의 관계로 볼 수 있다. 냉간압접에서 접합면의 확장에 의해 새롭게 생성된 면들의 근접과정은 미시적인 관점에서 국부압출(local extrusion)로 간주한다. 평균적으로 컨테이너의 벽면마찰이 없는 평면 압출 공정으로 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. 국부 압출에서 임계 압출압력을 구하는 방법으로 본 연구에서는 해석적인 방법으로 비교적 용이하게 구할 수 있는 미끄럼선장법(slip line field method)을 선정하였으며, 마찰이 매우 큰 평금형을 통한 간접 평면 압출 공정에서 주인장비와 임계압출압력과의 관계는 Hill⁽⁴⁾의 결과를 이용하여, Fig. 2 과 같이 나타낼 수 있다. 국부압출에 관한 상세한 설명은 참고문헌 [7, 8]에 주어진다.

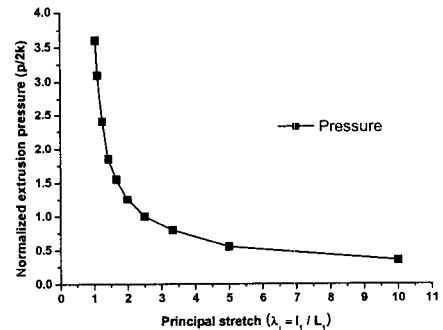


Fig. 2 Relationship between critical local pressure and principal stretch

2.2 번들 압출 해석 모델

수만 내지는 수십만 가닥의 Cu-Ti 미세 이중 선재들이 적층되어 있는 번들의 변형을 Cu 와 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 Ti 와 Cu 가 각각 19:1, 18:2, 17:3, 16:4 의 단면적 비율로 구성된 원형 봉의 압축해석을 수행하였다. Fig. 3 에서는 유한요소 해석으로 얻은 Cu-Ti 이중선재의 평균적 응력-변형을 선도를 보여

준다. Cu-Ti의 단면적 비율에 따른 응력-변형을 관계를 Cu-Ti 미세선재 변형 압출의 유한요소해석에는 변형 내의 임의의 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.

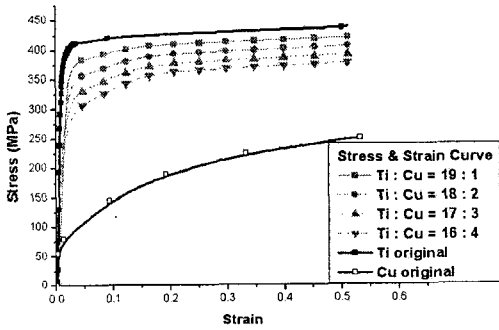


Fig. 3 Averaged stress-strain curves for compression of Cu-Ti bimetal bar.

3. 번들 압출 해석

이중 미세 선재 번들 압출의 유한요소 해석을 수행하여 Fig. 4에서와 같이 번들 단면 내의 세점에서 변형이력을 조사하였다. 앞 절에서 개발한 접합모델을 적용시켜 번들 공정에서 약한 기계적 결합 성사여부를 조사하였다. 유한요소 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS를 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 다이각도 10°, 20°, 30°, 40°, 50°를 고려하였다. 일반적인 격자구조는 사각형요소 약 2000개, 절점은 약 2500개 정도로 구성되었다.

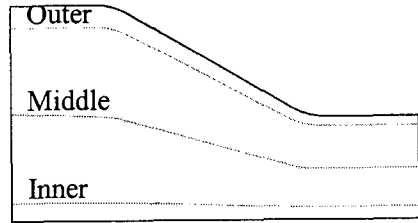


Fig. 4 Three stream line along which deformation history is traced in Bundle Extrusion.

4. 결과 및 분석

본 연구에서는 Ti와 Cu 시편이 각각의 위치를 유지하며 접촉부에서 1MPa 정도의 낮은 접합강도를 유지하는 기계적 접합을 일으키는 공정조건을 조사한다. 접합여부를 판가름하는 인자는 접촉면에서의 수직압력과 접촉면에서의 인장에 따른 국부 압출현상의 생성이다. 이러한 현상은 평균응력의 분포와 주인장비의 접촉부에서의 분포에 의해 예측될 수 있다. Cu-clad Ti 압출 공정에서는 Ti의 높은 항복응력으로 인하여 Cu와 Ti의 응력차가 크게 나타나는 것을 예측하였다. 동시에 Ti은 초은기 항복응력이 크나 변형경화가 작은 것으로 인하여 변형구역 입구에서 변형율은 충분히 커지지 않았어도 유효응력은 크게 발전된 것을 보여주었다. 평균응력도 변형구역 입구에서 크게 발전하는 것으로 예측되었다. 본 연구에서 국부 압출의 형성조건을 위한 변수는 접촉면에서의 주신장률이다. 입구에서 출구로 소재가 압출됨에 따라 주신장률이 커져가므로 접합에 필요한 임계압력의 크기는 낮아질 것으로 예측하고 있다.

Fig. 5에서는 다이 반각이 30°, 압출비 4일 경우에 세가지의 추출선을 따라 접촉 압력과 임계 압력을 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. 이와 같은 과정을 다이 반각을 변화시켜가며 되풀이하였다. Fig. 6에서는 압출비 2에서 접촉부의 접촉압력과 주신장률에 의한 임계압력의 비를 여러 가지의 다이 반각에 대하여 표시하였다. 이 과정에서 임계압력은 소재의

변형경화를 반영하도록 접촉부의 유동응력에 근거하였고, Cu 보다 강도가 높은 Ti 의 유동응력을 기준으로 설정하였다.

앞서의 과정을 압출비가 2 인 경우와 압출비가 4 인 경우에 대하여 세가지 추출선을 따라 되풀이하여 궁극에는 Fig. 7 과 같은 공정지도를 제시하였다. Fig. 7 에서 검은 점은 Cu 와 Ti 의 접촉부에서 기계적결합이 성사된 경우이고, 흰 원은 기계적결합이 이루어지지 않은 경우를 나타낸다. 이와 같이 제시된 공정 지도는 추후에 Cu-clad Ti 번들압출설계의 지침이 될 것으로 기대된다.

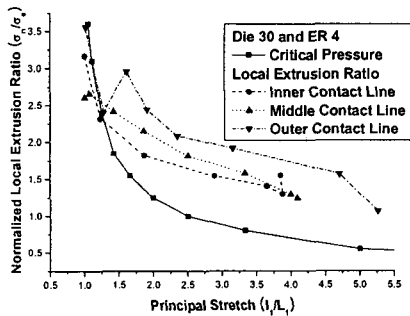


Fig. 5 Contact pressure and critical pressure along a contact profile (Die Angle 30, Extrusion Ratio 4)

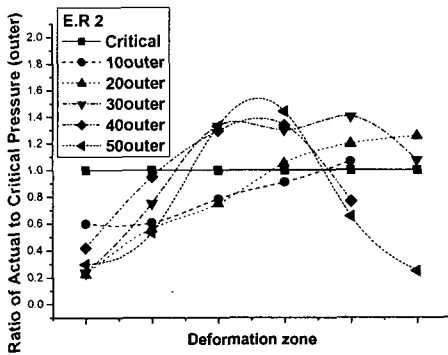


Fig. 6 Contact pressure and critical pressure along a contact profile (All Die angle at Extrusion Ratio 2)

5. 결론

압출공정의 유한요소해석과 냉간 접합모델을 이용하여 Cu-Ti 번들압출공정의 공정지도를 개발하였다. 번들압출공정에서의 접합을 냉간 압접으로 모사하였고, 냉간 압접의 성사여부를 판단하는

접합 모델을 개발하였다. 개발된 접합모델에서는 실험에서 관측되는 냉간 압접 현상을 토대로 하여 주인장비와 접촉압력을 주요인자로 선정하였으며, 접촉표면에서의 국부압출을 일으키는데 필요한 조건을 주인장비와 임계압력의 관계로 제시하였다. 압출비와 다이반각을 변화시키면서 Cu-Ti 미세 이중선재번들압출을 유한요소 해석하여 접촉부의 변형이력을 추적하고 제시한 접합모델을 적용하여 기계적결합 성사여부를 판별하고, 공정지도를 개발하였다. 이러한 공정지도는 추후에 번들 압출 공정의 설계에 이바지 할 것으로 기대된다.

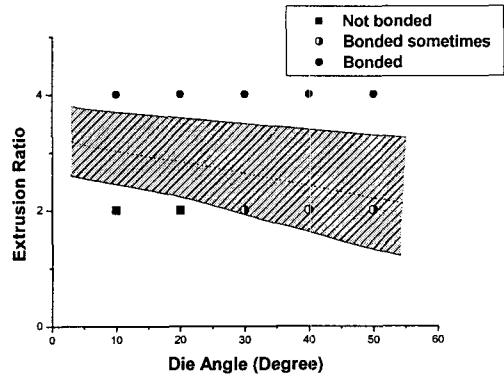


Fig. 7 A process map proposed to identify the extrusion conditions for mechanical bonding of bimetal during bundle extrusion

후 기

본 연구는 한국과학재단이 지원하고 국민대학교 자기조립소재공정연구센터(ERC)에서 주관하는 연구개발사업중에서 자기조합 및 자발형성공정에 대한 다차원 전산모사연구과제(과제번호: R11-2005-048-01004-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Yeo-Kwon Yun, Hee-Nam Kim and Yong-Su Kim; "The Effect of Process Parameter in Direct Extrusion of Copper Clad Aluminum Composite Materials"; Journal of the KIIS, Vol. 15, No. 4, 2000

- [2] Hee-Nam Kim, Won-Young Kang; Journal of Research Institute of Industrial Technology, Vol. 20, 2001
- [3] Hee-Nam Kim, Sung-Hoon Park; "Interface Bonding of Copper Clad Aluminum Rods by the Direct Extrusion"; Journal of Research Institute of Industrial Technology, Vol. 20, 2001
- [4] Jeong-In Kim, Chung-Gil Kang and Hyok -Chon Kwon; "Extrusion Process Analysis of Al/Cu Clad Composite Materials by Finite Element Method"; J.Kor.Soci.Comp.Mater, Vol. 12, No. 5, 1999
- [5] Jong-Ho Kim, Byung-Kwon Suh, Hyuk-Chon Kwon and Woo Young Yoon; "Extrusion Conditions and Bonding Characterization of Al/Cu Clad Composite Material Fabricated by Indirect Extrusion"; J. Kor. Inst. Met. & Mater, Vol. 38, No. 3; 2000
- [6] Jae-Seol Lee, Hyuk-Chon Kwon and Mok-Soon Kim; J. Kor. Inst. Met & Mater, Vol. 38, No. 2; 2000.
- [7] 박훈재, 나경환, 조남선, 이용신, *KSTP Trans.* Vol.7 No.1, (1998)
- [8] 김중식, 이용신, 심경섭, 박훈재, 한국정밀화학
 춘계학술대회, 제주, 2005년 6월 22일-23일.