

구리-타이타늄 이중봉 직접압출의 공정지도 개발

김중식*(국민대 기계설계과), 이용신(국민대 기계설계과)
심경섭(서울산업대 금형설계학과), 박훈재(생산기술연구원 마이크로성형팀)

Development of A Process Map for Extrusion of Cu-Ti Bimetal Bar

Joong-Sik Kim(Graduate school. KMU), Yong-Sin Lee(School of MAE KMU)
K-S Sim (Dept. of Mold & Die, SNTU), H-J Park(Microforming Lab., KITECH)

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 bar. Bonding mechanism between Cu and Ti was 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 was 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. Finite element analyses for extrusion of Cu-Ti bimetal bars were performed for various process conditions. The deformation history at the contact surface was traced and the proposed new bonding criterion was applied to predict whether the mechanical bonding at the Cu-Ti contact surface happens. Finally, a process map for the extrusion of Cu-Ti bimetal bar is suggested.

Key words : Process map(공정지도), Extrusion(압출), bimetal bar(이중봉), Local extrusion (국부 압출), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

과학 기술이 발전하고 산업이 고도화 됨에 따라 제품은 점차 소형화, 경량화로 발전하고 있다. 특히, 정보, 나노, 생명, 우주공학과 같은 첨단 산업 분야에서 중요하게 사용되어지는 제품들은 소형, 경량화가 필수적인 요소로 대두되고 있는 실정이다.

미세 선재 제조 기술은 이러한 첨단 산업분야에 절대적으로 필요한 정밀 부품 소재를 제조하는 기술이다. 이러한 미세 선재를 성형하는 방법으로는 두 가지 재료를 적층하여 이중 봉을 단선 또는 번들 클래드 압출한 후 화학 처리하는 방법을 도입하고 있다. 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 이중 봉 접합부의 깊이만큼 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], Al/Cu 층상 복합재의 간접압출 조건 도출 및 접합특성 [4], Al/Cu 층상 복합재의 압출 공정 해석 [5], Ti/Cu 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 Ti/Cu 이중봉재의 직접압출을 유한요소 해석하여 계면에서 기계적 결합에 의한

낮은 강도의 접합을 판별할 수 있는 공정조건을 규명하는 공정지도도를 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

본 연구의 기본 배경은 경계면에서 접합을 판별하는 조건을 명시하는 접합모델의 개발과 개발된 접합모델을 이중봉 직접압출의 유한요소 해석 결과에 적용하여 공정지도도를 제시하는 연구이다. 냉간 및 온간에서 이중재의 성형중에는 접합부에서의 소성일 발산에 의한 용융접합이나 확산접합보다는 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 자재의 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 확장정도과 그 면에 대한 수직압력의 관계로 볼 수 있다. 냉간압접에서 접합면의 확장에 의해 새롭게 생성된 면들의 근접과정은 미시적인 관점에서 또 다른 소성변형으로 간주될 수 있다. 이 과정에서 소성변형에 따른 접촉면상의 취성막이 접촉면의 변형경로에 따라 원주방향으로 균일하게 파괴된다고 가정하면, 이들 파괴면 사이에서 신생면의 국부압출(local extrusion)은 평균적으로 컨테이너의 벽면마찰이 없는 평면 압출공정으로 근사화 할 수 있으며, 파괴된 취성막들은 마찰이 매우 큰 금형역할을 한다. 본 저자의 과거의 연구에서는 이중재 경계면의 국부압출해석에서 필요한 신생면의 생성정도를 정량화하도록 접촉면적비를 도입하였다. 그러나 접촉면의 파괴는 취성파괴의 형태로 주인장비가 주요인자일 것으로 판단되어 본 연구에서는 주인장비의 크기에 따른 국부압출의 임계압력을 구한다. 국부 압출에서 임계압출압력을 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. 경계면에 형성된 산화막의 두께는 수 μm 에서

수 십 μm 에 불과하므로, 경계면상에서 국부평면 압출은 극히 변형량이 작은 국부적인 미세변형으로 간주할 수 있으며, 이 미세압출공정중의 가공경화는 무시하여 초기의 항복응력만을 고려한다. 한편 이중봉 압출공정에서 변형경로를 따른 접촉경계면의 가공경화를 고려하기 위해서는 이 초기항복응력을 접촉경계면을 따른 각 지점의 유동응력으로 대처하며, 이 값들은 주인장비와 더불어 유한요소해석을 이용하여 접촉경계면을 따라 구한다.

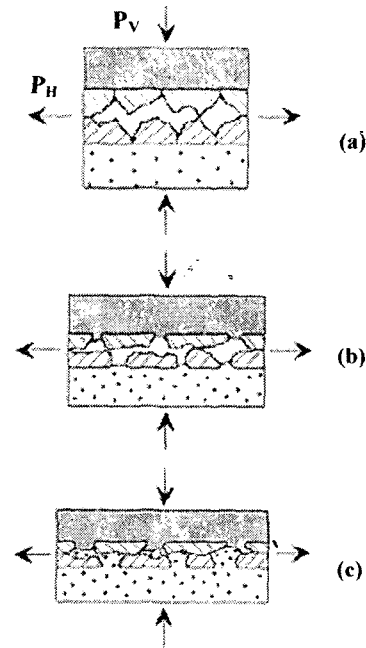


Fig. 1 Bonding mechanism in cold pressure welding: (a) original contact shape showing surface roughness, (b) local fracture by microcrack at the contact surface, (c) completion of local extrusion.

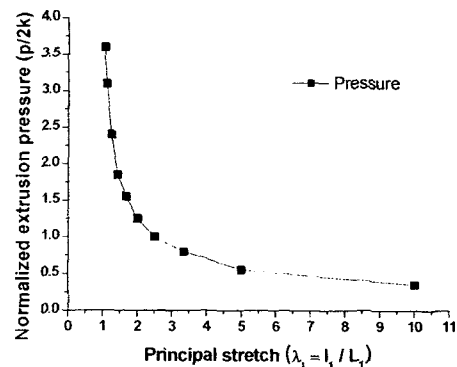


Fig. 2 Relationship between critical local pressure and principal stretch.

3. 수치해석실험

이중봉 직접압출의 유한요소 해석을 수행하여 접촉면에서의 변형이력을 조사하였다. 앞 절에서 개발한 접합모델을 적용시켜 접촉부에서 약한 기계적결합 성사여부를 조사하였다. 유한요소 해석은 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.

공정해석은 200℃에서의 구리와 타이타늄의 이중봉을 대상으로 하였다. 피복재와 다이사이의 마찰계수는 0.1, 모재 Ti의 반경은 8.5mm, 피복재인 Cu의 두께는 1mm, 램속도는 1mm/sec로 설정하였다. 공정변수는 다이각도 및 압출비로 선정하였다. 각 압출비에 따라 다이각도는 10°, 20°, 30°, 40°, 50°로 10° 간격으로 설정하였다. 해석에 사용한 격자구조는 사각형요소 약 2000개, 절점은 약 2500개 정도로 구성되었다.

4. 결과 및 분석

본 연구에서는 타이타늄과 구리 시편이 각각의 위치를 유지하며 접촉부에서 1MPa 정도의 낮은 접합강도를 유지하는 기계적 접합을 일으키는 공정조건을 조사한다. 접합여부를 판가름하는 인자는 접촉면에서의 수직압력과 접촉면에서의 인장에 따른 국부압출현상의 생성이다. 이러한 현상은 평균응력의 분포와 주인장비의 접촉부에서의 분포에 의해 예측될 수 있다. 구리-피복 타이타늄 압출 공정에서는 타이타늄의 높은 항복응력으로 인하여 구리와 타이타늄의 응력차가 크게 나타나는 것을 예측하였다. 동시에 타이타늄은 초기 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 국부압출의 형성조건을 위한 변수는 접촉면에서의 주신장률이다. 이에 변형구역을 지나면서 접촉면에서의 주인장비의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 입구에서 출구로 소재가 압출됨에 따라 주신장률이 커져 가므로 접합에 필요한 임계압력의 크기는 낮아질 것으로 예측하고 있다.

Fig. 4에서는 다이 반각이 30°, 압출비 4일 경우에 접촉 압력과 임계 압력을 보여주고 있다. 구리보다 강도가 높은 타이타늄의 전단 항복응력에 근거하여 임계 압력을 설정하여도 접촉 압력이 임계압력보다 크기 때문에 구리에서 타이타늄으로, 타이타늄에서 구리로 양방향의 접합

이 이루어질 것으로 예상된다. 이와 같은 과정을 다이 반각을 변화시켜가며 되풀이하였다. Fig.5에서는 접촉부의 접촉압력과 주신장률에 의거한 임계압력의 비를 여러 가지의 다이 반각에 대하여 표시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 다이 반각이 10도 일 경우에 변형구역 입구에서는 접촉압력이 일시적으로 임계압력보다 크므로 접합의 가능성을 암시한다. 그러나 이곳에서는 주신장률의 크기가 작아 실제로 접촉면에서 국부압출이 발생하기위한 접촉표면에서의 얇은 막의 취성과괴는 발생되지 않았을 것으로 판단된다. 다이 반각이 20도로 커진 경우에는 비교적 변형구역의 넓은 범위에서 접촉압력의 임계압력에 대한 비가 1 보다 크므로 기계적결합이 발생될 것으로 판단된다. 다이 반각이 더 커진 경우에는 모두 기계적결합이 이루어진 것으로 예측되었다. 이 과정에서 임계압력은 소재의 변형경화를 반영하도록 접촉부의 유효응력에 근거하였고, 구리보다 강도가 높은 타이타늄의 유효응력을 기준으로 설정하였다.

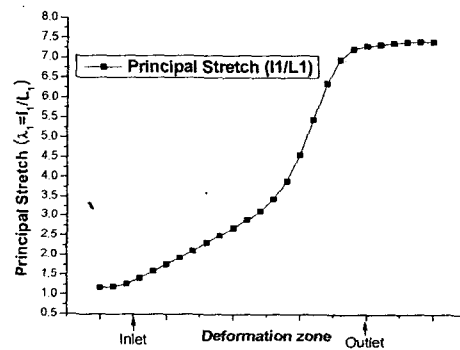


Fig. 3 Variation of principal stretch along a contact profile in the deformation zone (Die Angle 30, Extrusion Ratio 4)

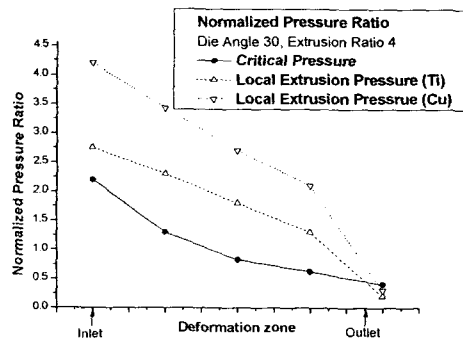


Fig. 4 Contact pressure and critical pressure along a contact profile (Die Angle 30, Extrusion Ratio 4)

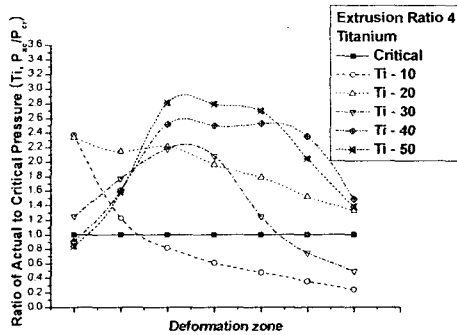


Fig. 5 Contact Pressure and Critical Pressure along a contact profile (Die Angle 30, Extrusion Ratio 4)

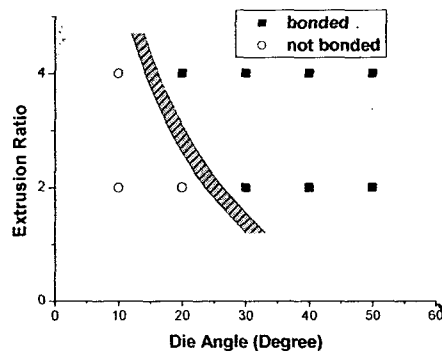


Fig. 6 A process map proposed to identify the process conditions for mechanical bonding of bimetal during container extrusion.

앞서의 과정을 압출비가 2 인 경우에 대하여 되풀이하여 궁극에는 Fig. 6과 같은 공정지도를 제시하였다. Fig. 6에서 검은 점은 구리와 타이타늄의 접촉부에서 기계적결합이 성사된 경우이고, 흰 원은 기계적결합이 이루어지지 않은 경우를 나타낸다. 이와 같이 제시된 공정 지도는 추후에 구리 피복 타이타늄 봉의 압출설계의 지침이 될 것으로 기대된다.

4. 요약

압출공정의 유한요소해석과 냉간 접합모형을 이용하여 구리-타이타늄 이중봉 압출공정의 공정지도를 개발하였다. 이중봉 압출공정에서의 접합을 냉간 압접으로 모사하였고, 냉간 압접의 성사여부를 판단하는 접합 모델을 개발하였다. 개발된 접합모형은 실험에서 관측되는 냉간 압접

모드를 바탕으로 주인장비와 접촉압력을 주요인자로 선정하였다. 접촉표면에서의 국부압출을 일으키는데 필요한 조건을 주인장비와 임계압력의 관계로 제시하였다. 압출비와 다이반각을 변화시키며 구리-타이타늄 이중봉의 직접압출을 유한요소 해석하여 접촉부의 변형이력을 추적하고 제시한 접합모형을 적용하여 기계적결합 성사여부를 판별하고, 공정지도를 개발하였다.

후기

본 연구는 한국생산기술연구원이 주관하는 차세대 연구사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

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; "Flow Characteristics of Copper Clad Aluminum Rods by the Direct Extrusion? 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-hon 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; "Study on the Fabrication and Properties of Ti-Cu Clad Extrudates ; J. Kor. Inst. Met & Mater, Vol. 38, No. 2; 2000.
7. 박훈재, 나경환, 조남선, 이용신, KSTP Trans. Vol.7 No.1, (1998)
8. ABAQUS User's Manual