

복합압출재료봉의 공정변수가 성형 적합성에 미치는 영향

장동환[#]

Influence of Process Parameters on the Forming Compatibility in Composite Extrusion Rods

D. H. Jang

(Received January 6, 2009)

Abstract

This paper presents the plastic inhomogeneous deformation behavior of bimetal composite rods during the axisymmetric and steady-state extrusion process through a conical die. The rigid-plastic FE model considering frictional contact problem was used to analyze the co-extrusion process with material combinations of Cu/Al. Different cases of initial geometry shape for composite material were simulated under different conditions of co-extrusion process, which includes the interference and frictional conditions. From the simulation results, the sleeve cladding rate at the core/sleeve interface was recorded as a distribution of diameter ratio and interference conditions, which will be useful for the investigations of the bonding process during co-extrusion process. In addition, the results of the co-extrusion, connected with the results of the variations of diameter rate and average contact pressure, demonstrate a good agreement and present the possibility of describing the parameters of the plastic zones in non-uniform deformation of these type of composite materials.

Key Words : Co-extrusion Process, Composite Rods, Sleeve Cladding Rate, Conical Die, Finite Element Method

1. 서 론

최근에 전기, 전자 및 통신분야의 지속적인 발전과 함께 다층 복합재료에 대한 생산방법이 폭넓게 연구되어지고 있다[1~2]. 여기서 다층 복합재료는 두 가지 서로 다른 금속재료 성분이 층상구조로 구성되어 있는 소재를 말하며 우수한 기계적 특성과 산업전반에 걸쳐 폭넓은 적용성으로 인하여 그 수요가 점차 증대되고 있다[3]. 이중소재로 구성된 압출공정은 소재를 압출과 동시에 금속표면에 기계적 접합이 이루어지게 하면서 각각의 이중소재에 대한 기계적 특성을 최대화 할 수 있는 장점이 있다[4]. 그러나 이러한 복합재료를 이용한 압출성형공정에서는 두 재료의 서로

다른 유동응력에 의해 압출공정중 단면비가 변하게 되어 소재유동이나 성형 메카니즘은 단일금속에 의한 압출공정에 비해 상대적으로 복잡하다[5].

일반적으로 Al/Cu 층상 복합재료 봉은 내재(core)인 Al 을 외재(sleeve)인 Cu 가 피복한 형태로 되어 있는 소재를 말하며 정수압 프레스를 이용하여 일본 Hitachi 사에서 처음으로 생산한 이후로 전기·전자용 버스바(bus-bar)로 주로 사용되고 있다. 이러한 Al-Cu 층상 복합재료로 되어 있는 버스바는 기존의 순수한 Cu 로 제조된 버스바에 비해 거의 동일한 전도체 성질을 갖고 있으면서도 비용절감과 중량 감소의 효과를 갖고 있다[3,6].

현재까지 복합재료를 이용한 압출공정에 대해 다양한 수치해석적 또는 실험적 연구가 진행되어

[#] 교신저자: 인하공업전문대학 기계설계과,
E-mail: dhjang@inhac.ac.kr

왔다. Osakada[7]등은 상해해법의 해석적 방법을 이용하여 단면 감소비에 따른 내재의 파손에 대해 연구하였으며 Story[8]등은 최대균일 유동과 연계하여 최적화된 초기 이중소재의 직경비를 제안하였다. 또한 Tayal 와 Natarajan[9]등은 유한요소법을 이용한 수치적 측면에서 계면접합의 기하학적인 거동뿐만 아니라 응력과 변형을 속도분포에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 Seo[10] 등이 제안한 해석모델을 참조하여 원추형 금형(conical die)이 적용된 Cu/Al 층상복합재료의 압출공정에 대해 상용프로그램인 DEFORM-2D™[11]를 이용하여 모의실험 하였다. 유한요소해석을 위하여 초기 복합재료의 직경비와 끼워맞춤 조건 등을 주요 설계변수로 설정하였으며 외재의 피복률, 단면 직경비 변화, 평균 접촉압력을 통하여 압출공정 후의 성형 적합성에 초점을 두고 비교/분석하였다.

2. 유한요소해석 모델링

2.1 해석조건

수치해석적 방법은 공정분석을 위한 가장 경제적인 방법이면서 다른 분석방법과 비교하여 상대적으로 다양한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히 복합재료에 의한 압출공정에서 이러한 수치해석적인 모의실험을 수행하는 목적은 형상적인 적합성이나 적용하는 이중소재에 대한 유동특성 등을 검증하는데 있다[12].

Fig. 1 은 유한요소해석에 사용된 복합재료의 초기 빌렛과 압출성형후 최종 성형품의 3 차원 형상에 대한 개념도로서 각각의 소재를 축대칭 강소성 변형체로 설정하고 모의실험을 수행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 내재인 알루미늄 합금과 외재인 구리로 되어있는 복합재료를 원추형 금형(conical die)를 이용하여 압출성형 하였다. 적용된 소재는 상용화된 제품[13]을 참조하여 내재인 알루미늄 합금과 외재인 동합금은 각각 AA 1100 과 CDA 110 으로 적용하였다. 마찰접촉문제를 기반으로 끼워맞춤 조건을 위해 중심축의 내측소재를 증공축의 외재에 각각의 공차조건에 따라 압입성형하였다. 이러한 예비성형된 초기 빌렛들을 모든 경우에 대해 높이 감소율 90%로 동일하게 압출성형하였다.

강소성 유한요소법에 의한 모의실험을 수행하기 위하여 각각의 내재와 외재의 유동응력과 유

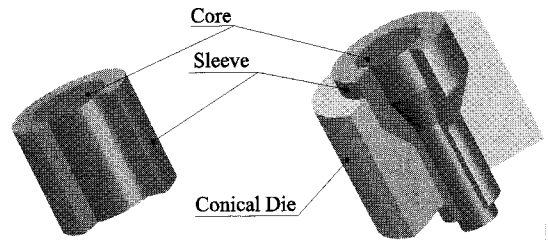


Fig. 1 Schematics diagram of initial billet(left) and final product(right) for composite rod extrusion

효변형률의 관계는 Hollomo-Ludwin 의 멱정리(power law)[3]에 따라 다음 식과 같다.

$$\bar{\sigma}_{Al} = 173.62 \bar{\epsilon}^{0.304} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_{Cu} = 451.41 \bar{\epsilon}^{0.328} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

마찰조건은 마찰인자(friction factor)를 사용하였으며 내재와 외재의 모든 접촉 경계면에서는 0.1로 동일하게 설정하였고 외재와 금형벽면사이의 마찰조건은 각각 0.1 과 0.15 의 두 가지 조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 2 는 원추형 금형을 이용한 복합재료의 압출공정에서 나타날 수 있는 대표적인 7 가지 성형 형태를 나타낸 그림이다[14]. 본 논문에서는 Fig. 2(c) 에 나타난 것처럼 압출성형 후에 복합소재의 직경비를 초기 소재의 직경비에 대해 비교함으로써 압출 균일성을 분석하는 것을 목적으로 한다. 또한 내재에 대한 외재의 피복률(sleeve cladding rate)과 평균접촉압력을 이용하여 설계변수에 따른 성형적합성을 비교하였다.

2.2 설계변수

복합재료에 의한 압출공정의 소성유동에 영향을 미치는 공정변수들에는 이중 재료인 내·외재 경계 면의 접촉 및 마찰상태, 구성 재료의 체적비, 두 재료의 유동응력비, 초기 빌렛의 접합상태, 압출금형의 형상적 특징 등이 있다[15]. 이러한 공정변수들 중에서 외재가 내재를 이상적으로 피복하기 위해서는 초기 성형하고자 하는 빌렛의 직경비(체적비)에 대한 정확한 계산이 선행되어야 한다[2]. 또한 단일 소재에 대한 압출공정과 비교하여 이중소재간의 초기 접합상태는 압출성형 후에 제품의 기계적 접합강도를 결정하는 중요한 조건이다[4]. 따라서 본 논문에서는 압출성형 후 제품

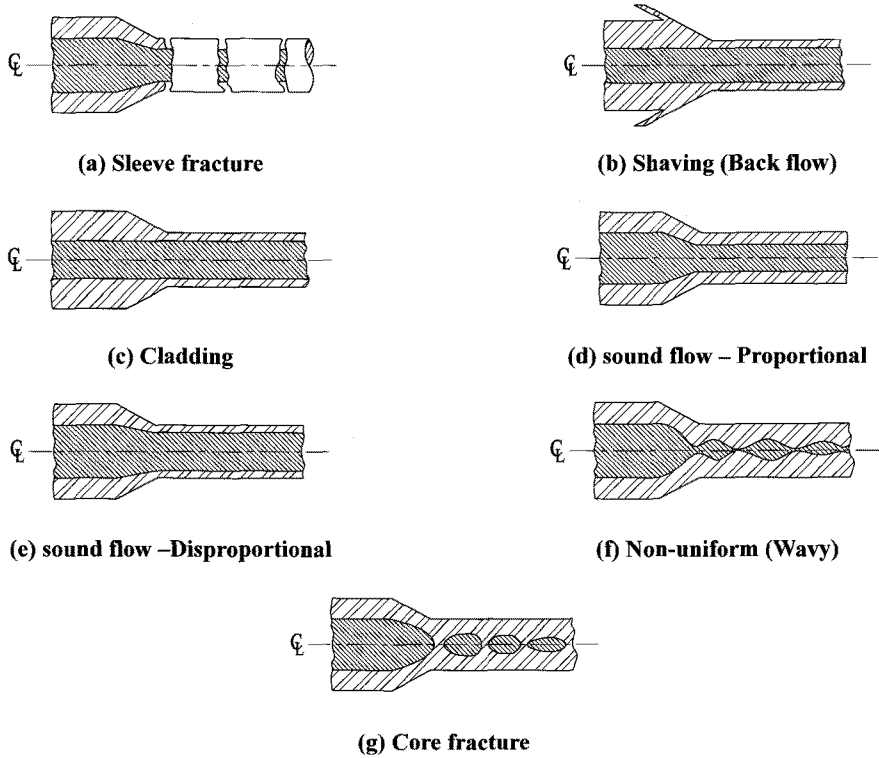


Fig. 2 Type of flow behavior observed during the co-extrusion of bi-metal rod and wire[14]

의 형상적 적합성과 계면접합에 대한 강도를 판단하기 위하여 초기 빌렛에 대한 직경비와 끼워맞춤 접합상태를 주요 설계변수로 설정하였다.

Fig. 3 은 유한요소해석에 사용된 금형과 복합 재료에 대한 설계변수들을 압출공정 전·후로 각각 나누어 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 성형전 외재의 직경 D_o 는 설정된 다이반각으로 되어 있는 원추형 금형의 홈을 지나 단면감소에 의해 d_o 로 최종적으로 성형된다. 본 논문에서는 압출성형 후 압출비를 일정 하기 위하여 외재의 직경은 모든 경우에 대해 24mm 로 성형되게 금형을 설계하였다. 초기 빌렛에 대한 직경비는 각각 0.4, 0.5, 0.6 을 적용하였으며 끼워맞춤 간극은 강한 접합(0.023mm), 중간 접합(0.012mm), 약한 접합(0.001mm)조건으로 설정하였다. 전체적으로 외재와 금형 벽면의 두 가지 마찰조건을 포함하여 총 18 가지 경우에 대해 공정조건을 달리하여 모의실험을 수행하였다.

Table 1 은 압출금형의 형상적 특징을 포함하여 해석에 사용된 모든 공정조건과 설계변수들을 나타낸 것이다.

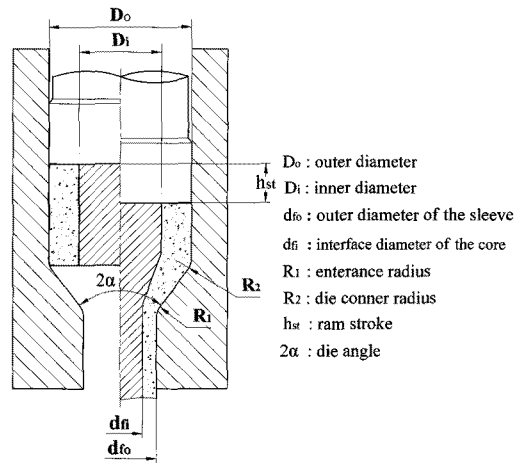


Fig. 3 The design of parameters of composite rods before and after the extrusion process

3. 유한요소해석 결과

3.1 유동형태

일반적으로 이중금속 재료를 이용한 복합재료

Table 1 Process parameters used in simulation

Parameters	Values
Diameter of billet (mm)	(core) \varnothing 9.6, \varnothing 12, \varnothing 14.4
	(sleeve) \varnothing 24
Initial composite rod height (h_0)	50mm
Semi-die angle (2α)	50°
Entrance radius (R_1)	2.5mm
Die corner radius (R_2)	2.5mm
Ram stroke (l_{st})	45mm
Extrusion ratio (ER)	3 (global)
Reduction in area (RA)	0.66 (global)
Diameter ratio (DR)	0.4, 0.5, 0.6
Interference tolerance	(Loose) + 0.001mm
	(Weak) + 0.012mm
	(Tight) + 0.023mm
Friction factor (m)	0.1, 0.15

의 압출공정에서는 각각 서로 다른 유동응력으로 인하여 소성변형 영역에서 소재의 유동이 비례적인 경향을 나타내지 못한다. 다시 말해서 내재와 외재의 상대적인 유동응력비에 의한 인장력의 차이로 인하여 균일한 신장을 하지 못한다[16].

Fig. 4는 내·외재의 직경비가 0.5이고 외재와 금형벽면의 마찰조건이 0.1 이면서 중간 접합조건일 경우에 행정거리에 따른 변형형태와 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 일반적인 압출공정과 마찬가지로 압출공정 초기에 소재가 금형의 내부를 완전히 채울 때까지 압축성형되는 과도상태(transient state)와 마찰저항이 감소하여 하중이 일정하게 유지되는 정상상태(steady state)로 구분하여 나타내었다. 그림으로부터 압출공정이 진행됨에 따라 외재인 Cu에 비해 상대적으로 연강의 성질을 갖고 있는 내재인 Al의 유동이 원활하게 일어나고 있다. 이러한 상대적인 압출된 소재의 유동차이는 대부분 정상상태에서 발생하고 이후 압출공정이 계속 진행되어도 이러한 차이는 거의 일정함을 알 수 있다. 다시 말해서 전체적인 압출된 형상은 초기 정상상태에서 결정되며 이후에 공정이 계속 진행되어도 형상적인 변화 없이 대부분 압출방향으로 길이만 증가한다. 전체적인 유

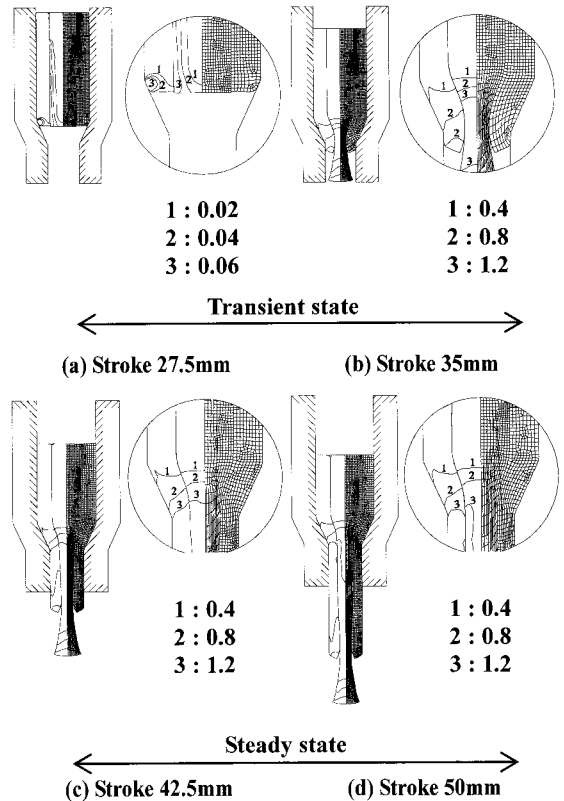


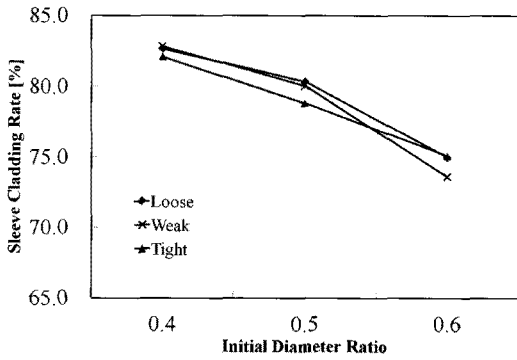
Fig. 4 Deformation patterns and distributions of effective strain at each stroke(weak interference condition and DR=0.5)

효변형율은 원추형 금형에 의해 직접적인 접촉으로 소성변형이 발생하는 외재에서 상대적으로 크게 나타났으며 공정이 진행되어도 유효변형율의 크기와 분포는 거의 일정한 경향을 보이고 있다.

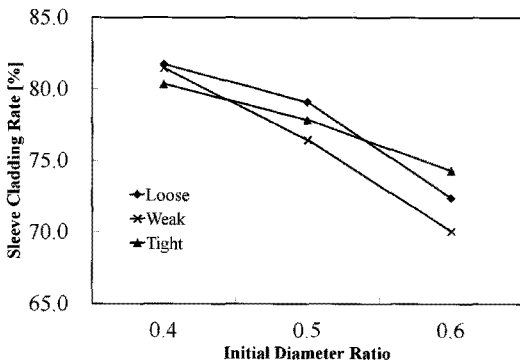
3.2 외재 피복율

일반적으로 이중소재로 구성된 복합재료봉이 압출공정에 의해 외재가 내재를 완전히 피복하여 성형하기는 불가능하다[2]. 따라서 상용적으로 제품화하기 위해서는 불완전하게 피복된 봉의 끝단을 별도의 기계적 절단에 의한 가공작업 후에 사용한다[13]. 본 논문에서는 해석결과를 바탕으로 압출성형이 완료된 후에 이러한 내재에 대한 외재의 피복율을 정리하였다. 이때 내재와 외재의 경계면이 박리된 영역을 제외하고 내재의 축방향 단면을 기준으로 외재가 완전히 피복된 영역만을 계산하였다.

Fig. 5(a), (b)는 각각 마찰조건을 다르게 했을 때



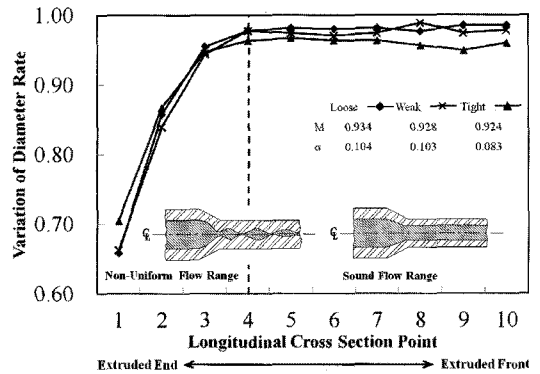
(a) $m = 0.1$



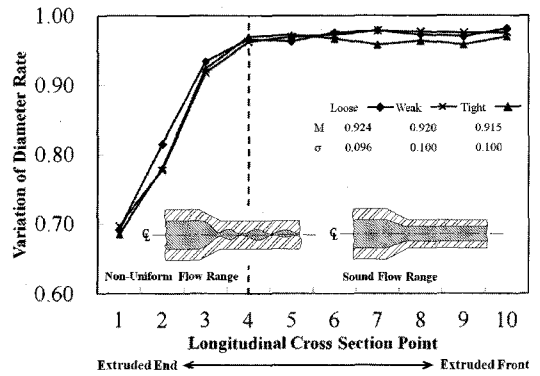
(b) $m = 0.15$

Fig. 5 Distributions of the sleeve cladding rate for diameter ratio at each interference conditions

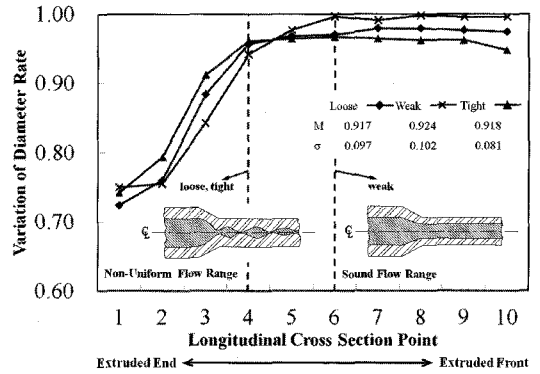
초기 빌렛의 직경비에 대해 접합조건에 따른 외재의 피복율을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 직경비와 마찰값이 증가할수록 외재 피복율은 감소하는 경향을 보인다. 외재와 금형벽면의 마찰값이 0.1 인 경우(Fig. 5(a))에는 각각의 접합조건에 따른 외재 피복율의 차이는 거의 나타나지 않지만 마찰값이 0.15 인 경우(Fig. 5(b))는 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 이유는 외재와 금형벽면 사이의 마찰이 증가하면서 내·외재의 경계면 보다는 체적이 큰 외재에서 금형과 외재의 접촉면을 따라 상대적인 내부 비균일 유동이 많이 발생한 것으로 판단된다. 그림에서 또 하나의 주안점으로 강한 접합조건일 경우에는 마찰값과 무관하게 다른 접합조건과 비교하여 직경비에 따른 외재 피복율이 거의 선형적이면서 완만한 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 내·외재의 경계면에서 성형중에 발생하는 반경방향의 상대적으로 큰 접촉압력이 이종소재의 상대적인 유



(a) DR = 0.4



(b) DR = 0.5



(c) DR = 0.6

Fig. 6 Variations of the diameter rate for interference conditions and initial diameter ratio at longitudinal cross section

동응력비에 따른 축방향의 인장력을 상쇄한 것으로 판단된다.

3.3 단면 직경비 변화율

앞서 언급했듯이 복합재료에 대한 압출공정에서 가장 이상적인 경우는 초기 이종소재의 직경

Table 2 Average contact pressure along the sleeve / core interface

Friction Interference condition	DR (Diameter ratio)					
	0.4		0.5		0.6	
	0.1	0.15	0.1	0.15	0.1	0.15
	Pressure(MPa)					
Loose	276.5	275.6	278.5	290.6	290.4	359.1
Weak	341.3	322.1	260.2	311.6	375.3	384.1
Tight	273.0	289.9	344.9	358.4	137.2	117.2

비에 대해 성형이 완료된 후에도 비례적으로 이러한 직경비가 유지되는 것이다. 해석결과 이러한 단면 직경의 변화는 마찰값에 의한 영향이 거의 없었기 때문에 접합조건과 초기 빌렛의 직경비만 고려하여 비교하였다. Fig. 6(a)~(c)는 각각 마찰값이 0.1 인 경우에 압출공정이 완료된 후에 접합조건에 따라 압출성형후의 단면 직경비 변화율에 대한 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 외재가 내재를 피복한 영역만을 대상으로 10 개의 구간으로 분할하여 압출 선단에서부터 순차적으로 초기 직경비에 대한 상대적인 비로서 표기하였다. 또한 직경비 변화가 급격히 변화하는 구간과 평탄화된 구간을 구분하여 각각 균일 유동 영역(sound flow range)과 비균일 유동영역(non-uniform flow range)로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 대부분의 끼워맞춤 조건에서 압출성형 초기에 비균일 유동이 발생하고 이후에 공정이 진행되면서 점차적으로 균일 유동을 하는 경향을 보인다. 그러나 초기 빌렛의 직경비가 0.6 인 경우(Fig. 6(c))에는 중간 접합조건에서 상대적으로 다른 경우와 비교하여 비균일 유동 구간이 크게 나타났다. 이러한 이유는 내·외재 경계면의 기계적 접합강도가 중간정도에서 유동성이 떨어지는 외재의 체적비가 작음으로 인하여 축방향과 반경방향의 유동응력에 대한 방향성 차이가 명확하게 나타나지 않은 것으로 판단된다. 단면 직경비의 변화율에 대한 평균값(M)을 계산한 결과 대부분 약한 접합조건인 경우에 가장 크게 나타났으며 표준편차(σ)는 강한 접합조건인 경우에 가장 작게 나타났다.

3.4 내·외재 층상 평균 접촉압력

이종소재의 접합면에 대한 내부식성과 열전도성 측면에서 초기 이종소재에 대한 접합강도가 압출성형이 완료된 후에도 유지되는 것이 중요하다[4]. Table 2는 모든 공정조건에 대해 압출공정이

완료된 후에 피복된 내·외재 경계면에서 계산된 평균 접촉압력을 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 각각의 접합조건에 대해 마찰값과 무관하게 평균 접촉압력의 크기 변화는 동일한 경향을 나타내었다. 또한 대부분 마찰값이 큰 경우에 상대적으로 평균 접촉압력이 크게 나타났다. 약한 접합인 경우에는 직경비가 증가함에 따라서 평균 접촉압력도 동시에 증가하는 경향을 보인다. 그러나, 중간 접합과 강한 접합조건에서는 직경비 0.5를 기준으로 각각 최소값과 최대값을 나타내었다. 가장 평균 접촉압력이 큰 경우는 중간 접합조건에서 직경비가 0.6 이고 마찰값이 0.15 일 때 384.1 MPa로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 마찰접촉문제를 바탕으로 유한요소법을 이용하여 Cu/Al 층상복합재료가 적용된 압출공정에 대하여 수치해석을 수행하였다. 압출성형공정에서 초기 압입된 빌렛의 직경비와 끼워맞춤 접합조건 등을 주요설계변수로 설정하여 압출성형된 제품의 형상을 분석하고 적합성을 평가하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 내재에 대한 외재의 피복율 변화는 강한 접합조건일 때 다른 공정변수의 영향에 상대적으로 가장 둔감한 것으로 나타났다.

(2) 압출공정후 초기 빌렛 직경비에 대한 단면 직경비의 변화율을 분석한 결과 공정변수에 따라 변화하는 경향은 거의 동일하며 압출성형 초기에 비균일 유동이 주로 발생한다.

(3) 초기 빌렛의 직경비가 0.6 이면서 중간 접합조건인 경우 상대적인 유동속도 방향성 차이로 비균일 유동이 가장 크게 나타났다.

(4) 압출공정이 완료된 후에 기계적 접합강도를 나타내는 평균 접촉압력은 마찰값과 무관하게

모든 공정조건에서 동일한 경향을 보이며 강한 접합조건에서 직경비가 0.6 일 경우 가장 강건한 체결력을 나타내었다.

후 기

본 논문은 2007 년도 인하공업전문대학 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] W. Szulc, M. Pietrzyk, H. Dyja, J. W. Pilarczyk, 1994, Theoretical and experimental analysis of drawing of steel rods covered with copper, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 45, pp. 401~406.
- [2] S. Berski, H. Dyja, A. Maranda, J. Nowaczewski, G. Banaszek, 2006, Analysis of quality of bimetallic rod after extrusion process. *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, pp. 582~586.
- [3] B. Avitzur, 1983, *Handbook of metal-forming processes*, John Wiley & Sons LTD, U.S.A.
- [4] M. E. Epler, W. Z. Misiolek, 2006, Novel billet for co-extrusion of ferrous material tubes, *Mater. Sci. & Eng. A*, Vol. 429, pp. 43~49.
- [5] Y. M. Hwang, T. F. Hwang, 2002, An investigation in to the plastic deformation behavior within a conical die composite rod extrusion, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 121, pp. 226~233.
- [6] C. G. Kang, Y. J. Jung, H. C. Kwon, 2002, Finite element simulation of die design for hot extrusion process of Al/Cu clad composite and its experimental investigation, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 124, pp. 49~56.
- [7] K. Osakada, M. Limb, P. B. Mellor, 1973, Hydrostatic extrusion of composite rods with hard cores, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 15, No. 4, pp. 291~307.
- [8] J. M. Story, B. Avitzur, W. C. Hahn, 1976, The effect of receiver pressure on the observed flow pattern in hydrostatic extrusion of bimetal rods, *J. Eng. Ind. Trans.*, ASME 98, Vol. 8, pp. 909~913.
- [9] A. K. Tayal, R. Natarajan, 1991, A finite element analysis of axisymmetric extrusion of composite rods, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 21, pp. 227~235.
- [10] 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 the Cu/Al and Fe/Al co-extrusion processes, *KSTP*, Vol. 16. No. 7, pp. 530~537.
- [11] SFTC, 2004, *DEFROM-2D Ver. 8.0 Users Manual* (Scientific Forming Technologies Corporation Inc., U.S.A.).
- [12] H. Dyja, S. Mroz, A. Milenin, 2004, Theoretical and experimental analysis of the rolling process of bimetallic rods Cu-steel and Cu-Al, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 153-154, pp. 100~107.
- [13] CommScope BiMetals Co., 2004, *Technical Catalog*, CommScope, U.S.A.
- [14] M. H. Apperley, C. C. Sorrell, A. Crosky, 2000, The co-extrusion of metal-sheathed high-temperature superconductors, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 102, pp. 193~202.
- [15] P. Kazanowski, M. E. Epler, W. Z. Misiolek, 2004, Bi-metal rod extrusion-process and product optimization, *Mater. Sci. & Eng. A*, Vol. 369, pp. 170~180.
- [16] R. Sliwa, 1997, Plastic zones in the extrusion of metal composites, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 67, pp. 29~35.