

Cu/Al 및 Fe/Al 층상복합재료 압출공정에서 구성재료의 불균일 변형

서정민¹, 노정훈¹, 민경호¹, 황병복¹, 함경춘², 장동환[#]

Inhomogeneous Deformation Between Construction Materials in the Cu/Al and Fe/Al Co-extrusion Processes

J. M. Seo, J. H. Noh, K. H. Min, B. B. Hwang, K. C. Ham, D. H. Jang

(Received July 9, 2007)

Abstract

This paper is concerned with the analysis of plastic deformation of bimetal co-extrusion process. Two sets of material combination have been adopted for analysis, i.e. combinations of Cu/Al and Fe/Al. In the first set of material combination, the selected materials are AA 1100 aluminum alloy as hard material and CDA 110 as soft one. This type of material selection is to examine the effect of hard core and soft sleeve and vice versa on the deformation pattern in terms of plastic zone and velocity discontinuity along the contact surface between construction materials. Four different cases of co-extrusion process in terms of material combination and interference bonding were simulated to investigate the effect of material arrangement between core and sleeve, and of bonding on the plastic zones and velocity discontinuity. In the other set of material combination, model materials used as core and sleeve were AA 1100 and AISI 1010, which are relatively soft and hard, respectively. Process parameters except diameter ratio of core to sleeve material such as semi-die angle, reduction in area in global sense and die corner radius have been set constant throughout the simulation to concentrate our effort on the analysis of influence of diameter ratio on deformation behavior such as deformation zone, surface expansion, exit velocity discontinuity between composite materials, and extrusion forces.

Key Words : Co-extrusion Process, Velocity Discontinuity, Conical Die, Composite Rods, Finite Element Method

1. 서론

복합재료봉은 고전도도, 내식성, 고강도, 내마모성 등과 같은 여러 가지 기계적 특성을 동시에 갖는 경우가 많기 때문에 다양한 산업 분야에 폭넓게 사용되어 왔다. 최근 들어 이러한 층상복합재료 봉에 대한 산업전반의 수요가 늘어나면서 제조방법에 대한 관심이 매우 커졌다[1~2]. 따라서 복합재료를 이용하여 요구되는 기계적 강도와 더

불어 원하는 열적, 전기적, 화학적 성능을 가진 층상복합재료 봉 또는 관을 제조할 수 만 있다면 여러 산업 분야에 그 응용 분야를 점차 넓혀갈 수가 있다. 복합재료의 압출 또는 인발공정의 변형형태에 대한 이론적인 연구가 문제를 단순화하기 위한 여러 가지 가정을 포함하기는 하지만 그러한 연구 결과가 실질적인 설계 수치로서 응용될 수도 있다[3]. 일반적으로 복합재료 봉(이종금속 봉)은 두 가지 이상의 서로 다른 성분의 금속

1. 인하대학교 기계공학부

2. 인하공업전문대학 기계설계과

교신저자: 인하공업전문대학 기계설계과,

E-mail: dhjang@inhac.ac.kr

재료로 만들어지며 보통 내측(core)과 다른 재료로서 내측을 피복하고 있는 외측(sleeve)으로 구성되어 있다[4]. 여러 가지 분석방법 중에서 일반적으로 압출공정을 효율적으로 분석하기 위하여 상해해법[5]과 수치적 방법으로 유한요소법[6] 등이 많이 사용되었다. 또한 복합재료 붕괴 판의 인발 및 압출 공정에 대한 여러 가지 해석적 또는 실험적 연구결과가 여러 문헌에 소개되어 있다[7~10].

일반적으로 단일 소재를 압출할 경우에도 대변형이 발생하여 소재 내에 극심한 비균일 변형(inhomogeneous deformation)을 수반한다. 특히, 이종 금속으로 구성된 복합재료를 압출할 때 소성 변형의 구조는 단일 금속을 압출할 때 보다는 상대적으로 매우 복잡한 변형양상을 보인다. 일반적으로 유동특성이 다른 두 가지 이상의 재료로 구성된 복합재료를 압출할 때 변형형태는 여러 가지 공정 변수에 의하여 영향을 받는다. 이러한 소성유동에 영향을 미치는 공정변수들에는 이종 재료인 내측과 외측 경계 면의 접촉 및 마찰상태, 구성 재료의 부피비, 두 재료의 유동응력비, 압출금형의 형상적 특징 등이 있다[11].

본 논문에서는 Cu/Al 과 Fe/Al 등 두 가지 층상 복합재료를 이용하여 원추형 금형(conical die)이 적용된 정상상태의 압출 공정을 마찰접촉문제를 기반[12]으로 상용프로그램인 DEFORM-2D™[13]를 이용하여 모의실험 하였다. 상대적으로 연한 재료와 경한 재료를 서로 바꿔가며 내측과 외측으로 적용함으로써 층상 복합재료 구성이 변형형태의 미치는 영향을 분석하였다. Cu/Al 재료 구성에서는 층상복합재료의 초기 빌렛을 서로 다른 간섭량(interference tolerance)을 가지고 내측을 외측에 압입하여 구성 재료 간의 접합상태가 변형형태에 미치는 영향을 분석하였다. Fe/Al 재료 구성에서는 구성 재료간의 체적비를 다르게 하여 체적비가 변형형태에 끼치는 영향을 분석하였다. 해석의 초점은 두 구성 재료의 압출 균일성을 파악하는데 두었으며, 이러한 관점에서 소성변형영역, 두 재료의 출구속도 불연속, 경계면의 표면확장, 압출 후의 소재 두께의 변화 등을 분석 정리하였다.

2. Al/Cu 층상복합재료 붕

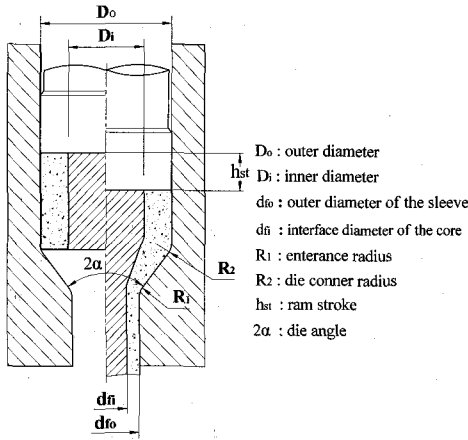
2.1 해석조건

첫 번째 이종금속에 의한 복합재료 붕괴의 압출

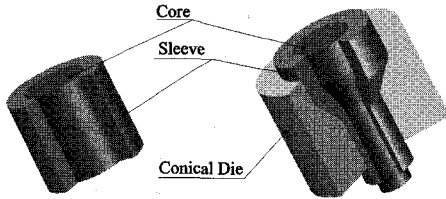
공정 모의실험을 위한 재료구성으로 상대적으로 연한 재료인 AA 1100 알루미늄합금과 경한 재료인 CDA 110 동합금을 적용하였다. 종실축 형태의 내측 소재를 중공축 형태의 외측 소재에 각각 억지와 중간 끼워 맞춤을 함으로서 압접에 의하여 접합된 초기 빌렛을 준비하였다. 이때 끼워 맞춤 간극은 각각 0.023mm(강한 접합)와 0.012mm(약한 접합)로 설정하였다. 이러한 방법으로 초기 빌렛을 준비함으로써 층상 복합재료 압출공정에서 접합상태에 따른 성형 특성을 분석하였다. 일반적으로 전기적 응용재료로 사용되는 버스 바(bus-bar)에는 내측 재료로 알루미늄이 사용되고 외측 재료로 동이 사용되지만 본 논문에서는 내측 또는 외측 재료의 특성이 변형에 미치는 영향을 알아보기 위하여 두 재료를 각각 내/외측으로 사용하였다. 이러한 방법으로 억지와 중간 끼워 맞춤에 의한 초기 빌렛과 내측 및 외측 재료를 서로 변형한 재료의 구성으로 설계된 4 가지 경우의 모의실험을 수행하였다. 전체적인 압출비와 단면감소율은 각각 3 또는 0.66 으로 하였으며 Table 1 에 압출금형의 형상적 특징을 포함한 모든 공정 조건들과 모델 재료의 유동특성식이 정리되어 있다.

Table 1 Process parameters used in simulation

Parameters	Values
Diameter of billet	Ø12.0 mm (core)
	Ø24.0 mm (sleeve)
Friction factor (m)	0.1
Die angle (2 α)	100°
Entrance radius (R ₁)	1.5
Die corner radius (R ₂)	1.5
Extrusion ratio	3 (global)
Reduction in area	0.66 (global)
Inlet volume ratio	Sleeve volume /
	Core volume = 3
Interference	+0.023 mm (tight)
	+0.012 mm (weak)
Material property	$\bar{\sigma} = 173.62\epsilon^{-0.304}$ (AA 1100)
	$\bar{\sigma} = 451.41\epsilon^{-0.328}$ (CDA 110)



(a) The design parameter of composite rods



(b) Billet and final product

Fig. 1 Schematic diagram of composite rods in the extrusion process

Fig. 1(a), (b)는 유한요소해석에 사용된 금형과 이종금속에 대한 설계변수들을 압출공정 전/후에 대해 각각 도식적으로 나타낸 것이다.

2.2 해석결과

Fig. 2는 4가지 서로 다른 공정조건에 대한 압출공정의 모의실험 결과를 내/외측 재료의 소성변형영역을 중심으로 정리한 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 끼워 맞춤에 의한 접합상태나 내/외측 재료구성에 상관 없이 내측 재료에서 더 넓은 소성변형영역을 보여 준다. 하지만 그림을 자세히 살펴보면 내측이 상대적으로 연한 재료로 구성된 AA 1100을 사용하여 역시 끼워 맞춤으로 준비된 빌렛을 압출할 때 내/외측 모두에서 다른 경우보다 약간 더 넓은 소성변형영역을 볼 수 있다. 그러나 모의실험에 적용된 공정조건에서는 내/외측의 구성방법과 무관하게 전체적으로 소성변형영역은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 서로 다른 끼워 맞춤에 의한 영향도 뚜렷하게 의미 있는 경향의 차이를 보이지 않는다. 중간 끼워 맞

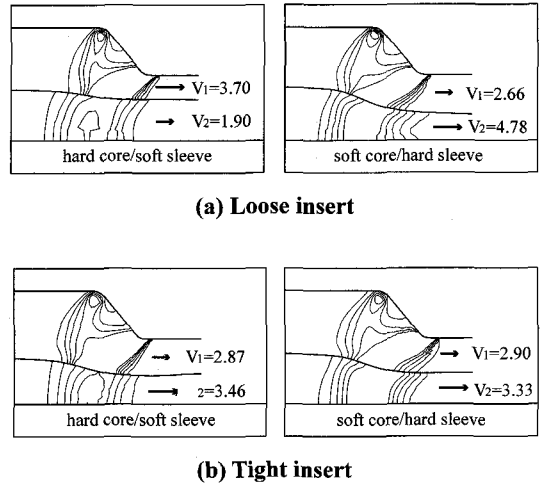


Fig. 2 Velocities discontinuities between construction materials and effective strain rate distributions

춤에서 내측 재료를 AA 1100으로 하였을 때 쉽게 예측할 수 있듯이 내측의 압출량 또는 압출비가 상대적으로 크게 나타남을 볼 수 있다. 하지만 이러한 경향은 역시 끼워 맞춤을 적용한 빌렛을 압출하였을 시는 반대가 되어 경한 내측일 때(Cu core)가 연한 내측(Al core)인 경우보다 압출이 약간 더 많이 일어났음을 알 수 있다. 그림의 분포선은 변형율속도를 등간격으로 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있듯이 소재가 압출금형을 통과하면서 보이는 변형형태는 재료구성에 상관없이 내측의 소재가 압출금형 입구부터 출구까지 비교적 완만하면서도 일정한 비율로 변형이 진행되는 것을 알 수 있다. 그러나 내측 재료가 상대적으로 연한 AA 1100일 경우 끼워 맞춤에 상관 없이 변형이 입구 및 출구 쪽에 약간 더 집중되어 발생함을 알 수 있다. 외측 소재 또한 재료의 구성이나 끼워 맞춤에서의 간섭량과 무관하게 모두 유사한 변형 형태를 보여준다. 그러나 금형의 입구에서 보다는 상대적으로 출구 쪽 다이코너 부근에서 매우 급격한 변형이 일어남을 알 수 있다.

또한 그림에서 알 수 있듯이 개별 소재의 출구속도를 이용하여 층상복합재료를 압출할 때 일어나는 각각의 구성 재료간의 압출 불균형(extrusion inhomogeneity)의 정도를 나타내었다. 초기에 전체적인 압출비를 3으로 설정하였기 때문에 개별 구성 재료의 압출비가 모두 3이라면 완전한 균일 압출이 이루어 졌다고 볼 수 있다. 유동속도 측면에서는 금형 입구에서의 속도는 1.0 이기 때문에

출구 속도가 3.0 이라면 균일한 압출이 된다. 중간 끼워 맞춤의 연한 내측(Al core)에서 가장 심하게 압출이 되어 압출비가 4.78 로 나타났다. 그림에서 중간 끼워 맞춤의 경우 경한 내측(Cu core)을 사용한 복합재료 구성에서 내측의 압출이 외측과 비교하여 현저하게 낮음을 알 수 있다. 이와는 반대로 연한 내측(Al core)을 적용하였을 경우에는 이러한 경향이 반대가 되어 내측의 압출이 상대적으로 원활하게 많이 진행되는 것을 알 수 있다. 역시 끼워 맞춤의 경우 중간 끼워 맞춤에 비하여 구성 재료간의 압출의 균일성(homogeneity)이 많이 개선된 것을 볼 수 있다. 그러나, 연한 내측(Al core)을 적용하였을 경우에 경한 내측(Cu core)보다 구성 소재 간 출구속도가 보다 더 일치함을 알 수 있다. 전체적인 경향은 끼워 맞춤의 정도가 층상재료의 구성 보다는 균일한 압출에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 이중 재료로 구성된 층상복합재료를 압출하면 압출속도 불일치에 의하여 구성 재료간의 압출비가 다르게 되어 국부적으로 불균일한 압출이 발생한다. 그림에서 변형율속도의 크기는 압출비와 비례하여 커지는 것을 알 수 있다. Table 2 에서는 모의실험에서 나타난 압출 불균형의 결과를 개개의 구성 재료별로 국부적인 압출비와 압출 후의 소재의 두께에 대해 정리하였다.

3. Al/Fe 층상복합재료 봉

3.1 해석조건

본 논문에서 두 번째 이중금속에 의한 복합재료 봉의 압출공정 모의실험을 위한 재료구성으로 상대적으로 연한 재료인 AA 1100 알루미늄합금과 앞서 적용된 동 합금 보다 상대적으로 경강인

AISI 1010 강이 사용되었다. Fig. 1 에 사용된 압출 금형과 동일한 형상의 초기 빌렛은 내측과 외측을 비교적 중간 간섭량의 경우인 0.012mm(약한 접합)의 간극으로 내측을 외측에 압입하여 적용하였다. 내측 및 외측 경계 면에서의 마찰 조건은 전단마찰상수를 사용하여 마찰인자 값을 0.1 로 적용하여 모의실험을 수행하였다. 내측 및 외측의 직경비가 변형형태에 미치는 영향을 알아보기 위하여 3 가지 다른 직경비를 설정하였으며, 각각의 직경비를 가지고 내측과 외측의 소재를 변경하여 적용함으로써 모두 6 가지의 경우에 대해 모의실험 하였다. 초기 빌렛의 외경은 항상 24mm 로 일정하게 적용하였으며, 다만 내측의 외경과 외측의 내경을 변화시키면서 모의실험을 수행하였다. 압출 후의 Al/Cu 복합재료의 직경은 13.86mm 로 전체적인 단면감소율은 66% 이다. 이러한 구성 재료의 유동응력식을[8] 포함한 압출금형 각 부분의 형상적 특징이 Table 3 에 정리되어 있다. Table 4 는 모의실험에 적용된 층상 복합재료의 내측과 외측의 재원을 정리하였다. 표에서 나타난 바와 같이 두께 1(Thick 1), 두께 2(Thick 2), 두께 3(Thick 3) 등으로 세 가지 다른 두께 비를 갖는 초기 빌렛을 적용하였다.

3.2 해석결과

Fig. 3 은 서로 다른 내/외측의 직경 비에 대하여 내측 및 외측 소재를 서로 변경하였을 경우를 포함한 모든 경우의 모의실험의 압출하중 선도를 나타낸다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 상대적으로 연한 재료, 즉 AA 1100 내측인 경우에 압출하중이 전반적으로 크게 나타났다. 또한 직경 6mm 의 AA 1100 코어를 적용하였을 때를 제외하고는 전체적으로 층상 복합재료의 빌렛을 구성할 때 상대적으로 경한 재료인 AISI 1010 강의 상대적

Table 2 Expected extrusion ratios and thicknesses

		Extrusion ratio		Thickness	
		Core	Sleeve	Core	Sleeve
Loose	Hard core/soft sleeve	1.90	3.70	4.35	2.57
	Soft core/hard sleeve	4.87	2.66	2.74	4.18
Tight	Hard core/soft sleeve	3.46	2.87	3.22	3.70
	Soft core/hard sleeve	3.33	2.90	3.28	3.64

Table 3 Process conditions and material parameters

Parameters	Values
Outer diameter(D _O)	Φ24.0mm
Friction factor (m)	0.1
Die angle (2α)	80°
Entrance radius (R ₁)	1.5mm
Die corner radius (R ₂)	1.5mm
Outer diameter of the sleeve	Φ 13.86mm
Interference	+0.012 mm (weak)
Material property	$\bar{\sigma} = 715.3\epsilon^{-0.22}$ (AISI 1010)
	$\bar{\sigma} = 173.62\epsilon^{-0.304}$ (AA 1100)

Table 4 Design parameters used in simulation

Parameters	Values	
Reduction in Area	0.66 (Global)	
Core Diameters	Ø 6 mm (Thick 1)	
	Ø 12 mm (Thick 2)	
	Ø 18 mm (Thick 3)	
Material arrangements	Soft Core	AA 1100(Core)
		AISI 1010 (Sleeve)
	Hard Core	AISI 1010 (Core)
		AA 1100(Sleeve)

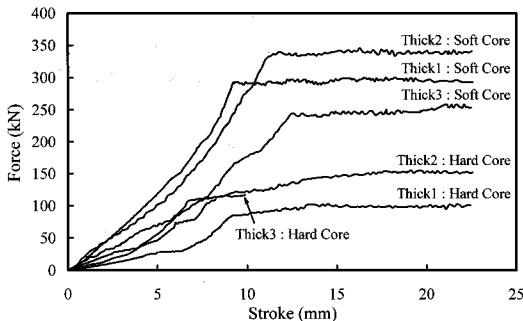


Fig. 3 Load-stroke relationships

직경이 증가함에 따라 압출하중도 증가하는 경향을 보인다. 직경 18mm의 AISI 1010 강을 내측으로 사용한 경우, 즉 Thick 3의 경우, 외측 소재인 AA 1100 알루미늄 합금이 비정상상태에서 원추형

금형을 통과하지 못하고 절단되어 모의실험을 중단하였다. AISI 1010 강을 내측으로 사용하였을 때는 비정상 상태에서 정상상태의 압출로 전이가 점차적으로 완만하게 이루어지나 AA 1100을 내측으로 사용했을 때는 전이가 급격하고 빠르게 이루어지는 것을 알 수 있다.

3.2.1 표면확장

소재가 압출 다이를 완전히 통과한 후 정상상태에서 내측의 외면과 외측의 내면 및 외면의 표면확장(surface expansion)을 측정하여 Table 5에 나타냈다. 여기서 표면확장은 표면적의 변화량을 원래의 표면적으로 나누어 준 수치를 말한다. 내측의 외면과 외측의 내면은 서로 맞닿은 면으로서 두 면의 표면확장이 같을 때 두 구성재료가 균일하게 압출이 되는 것을 의미하며, 이와는 반대로 표면확장이 서로 상이하다면 그 차이 만큼 불균일하게 압출이 진행된 것을 의미한다. 따라서 이러한 표면확장의 차이는 두 구성재료의 출구속도 불연속과 직접적인 관련이 있다. 표에서 쉽게 알 수 있듯이 직경 6mm의 AISI 1010 강을 내측으로 사용할 때 세군데 표면의 표면확장이 거의 비슷하며 비교적 가장 균일하게 압출이 진행되었음을 알 수 있고, 특히 서로 접하고 있는 내측 외면과 외측 내면의 표면확장의 차이는 3% 이내로 예측되었다. 직경 12mm의 AISI 1010 강을 내측으로 사용할 때 접촉면의 표면확장 차이가 가장 크게 나타나 구성재료간 불균일 압출이 가장 심한 것을 알 수 있다. 가장 흥미로운 점은 직경 18mm의 AA 1100을 내측으로 사용했을 경우에는 외측인 AISI 1010의 내면의 표면적 압출 후 약 15% 정도 감소하는 것을 볼 수 있다.

3.2.2 유동형태

Fig. 4는 구성재료의 소성변형영역, 출구속도, 유효변형율속도 분포를 나타낸다. 일반적으로 소성변형영역을 분석하는 것은 국부적인 소성변형을 예측하는데 중요하다. 그러나 본 논문에서 해석 대상인 6가지 경우의 모의실험 결과는 직경 18mm AISI 1010 강을 내측으로 적용했을 때 외측이 극심한 국부적인 변형으로 정상적인 압출이 이루어 지지 못한 것을 제외하고는 대체로 유사한 형태의 소성변형영역을 나타낸다. 그림에서 판단할 수 있듯이 압출이 성공적으로 수행된 5가지의 모의실험의 결과에서 전반적으로 연한 소재

Table 5 Surface expansion on the hard and soft core surfaces

		Surface Expansion of Hard core			Surface Expansion of Soft core		
		Ø6	Ø12	Ø18	Ø6	Ø12	Ø18
Outer surface of core		0.75	0.23	N.A.	1.10	0.98	1.28
Sleeve	Inner surface	0.71	2.61	N.A.	0.40	0.42	-0.15
	Outer surface	0.73	1.57	N.A.	0.70	0.61	0.12

▨ AISI 1010

▨ AA 1100

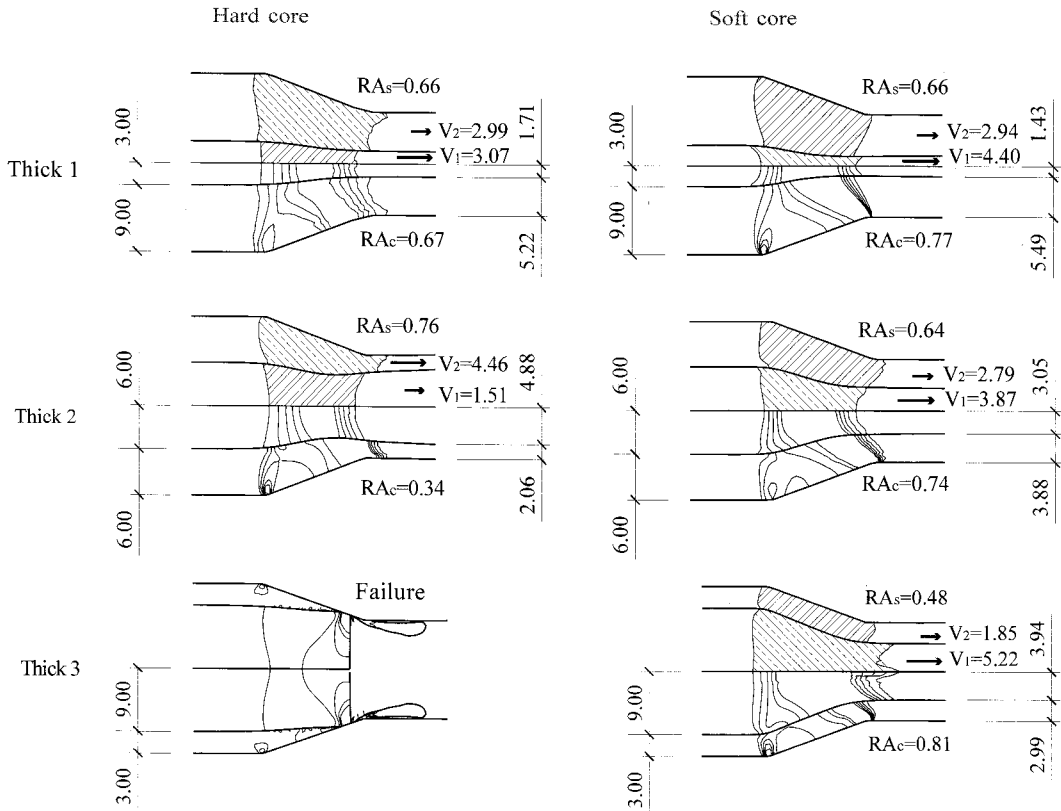


Fig. 4 Deformation patterns, exit flow velocities and effective strain rate distributions

(AA 1100)가 경한 소재(AISI 1010) 보다 상대적으로 넓은 변형영역을 보여준다. 하지만 변형영역의 형태는 각각의 재료 구성에 따라 서로 다른 경향을 보인다. 이러한 구성 재료 간의 경계에서 변형 영역의 불일치 또는 불연속이 결국 출구에서의 각 구성 재료의 축방향 속도에 대한 불연속으로 나타난다. 그림에서 재료 구성에 무관하게 두 재료 간의 경계를 따라 변형영역의 불일치가 감소하면 출구에서의 속도 불연속성도 동일하게 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 이러한 경우에 상

대적으로 균일한 압출이 이루어진다. 직경 6mm의 AISI 1010 강을 내측으로 적용하였을 때 상대적으로 가장 균일한 압출이 이루어진 것을 볼 수 있으며, 이때 구성 재료간 출구 속도의 차는 약 3% 미만이다. 그림에서 유효변형률속도 분포를 살펴보면, 재료구성 및 체적비와 무관하게 외측 재료는 변형이 급형의 출구코너 부근에서 집중되어 발생하는 것을 볼 수 있으며, 내측 재료는 급형의 입구부터 출구까지 비교적 고르게 변형이 발생함을 알 수 있다. 여러 가지 이중재료로 구성

Table 6 Predicted RAs and half thickness

		Reduction Area		Thickness	
		Core	Sleeve	Core	Sleeve
Hard core/Soft sleeve	Thick 1	0.675	0.665	1.71	5.22
	Thick 2	0.338	0.775	4.88	2.06
	Thick 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Soft Core/Hard Sleeve	Thick 1	0.772	0.659	1.43	5.49
	Thick 2	0.741	0.641	3.05	3.88
	Thick 3	0.808	0.484	3.94	2.99

된 층상복합재료를 압출할 때 소성변형영역에 영향을 미치는 인자로 구성재료의 부피비, 빌렛 구성재료의 배치 또는 정렬방법, 구성재료 각각의 유동응력 및 금형형상 등을 고려할 수 있다. 이러한 인자들 중에서 가장 크게 영향을 미치는 것으로 구성재료의 초기 정렬방법이 가장 큰 요인의 하나로 생각할 수 있다. 결론적으로 경한 내측과 연한 외측으로 구성된 층상복합재료를 압출할 때 상대적으로 가장 작은 변형영역을 나타내는 것으로 판단된다. Table 6은 압출후의 각 구성재료에 대한 단면감소율과 반경 또는 두께가 정리되어 있다.

4. 결론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 두 가지 이중금속에 의한 층상복합재료 봉의 압출공정을 모의실험을 통하여 해석하였다. 첫 번째 이중금속에 의한 복합재료로의 구성재료는 Al/Cu(AA 1100/CDA 110)로서 내측을 외측에 압입할 때 간섭량에 의한 접합상태 및 재료의 층상 구성에 따른 변형형태의 경향을 살펴보았다. 또 다른 구성재료는 Al/Fe(AA 1100/AISI 1010)로서 주로 내측과 외측의 직경비, 즉 구성재료 간의 체적비가 변형형태에 미치는 영향을 알아보았다. 본 논문의 결과를 Al/Cu 층상복합재료에 대하여 먼저 정리하면 다음과 같다.

(1) 소성변형영역은 끼워 맞춤에 의한 간섭량이나 내측-외측의 소재구성과 무관하게 내측에서 더 넓은 소성변형영역이 나타난다.

(2) 층상재료의 구성 보다 끼워맞춤량이 균일한 압출에 미치는 영향이 매우 크다.

Al/Fe 층상복합재료에 대한 결과는 다음과 같다.

(3) 연한 재료(AA 1100)를 내측에 적용한 경우에 압출하중이 크게 나타났으며 상대적으로 경한 재료인 AISI 1010 강의 상대적 직경이 증가함에 따라 압출하중도 증가하는 경향을 보인다

(4) 내측과 외측의 각 경계면에서의 표면확장측면에서 직경 6mm 의 AISI 1010 강을 내측으로 적용할 때 비교적 가장 균일하게 압출이 진행되었으며 직경 12mm 인 경우는 구성재료간 압출의 불균일성이 가장 크게 나타났다.

후 기

본 논문은 2004년 한국학술진흥재단 “선도연구 자지원사업”의 지원에 의하여 연구 되었음(KRF-2004-041-D00056).

참 고 문 헌

- [1] 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 Technology, Vol. 121, No. 2-3, pp. 226~233.
- [2] S. Imamura, T. Murakami, K. Ikeda, Z. Chen, 2000, Fabrication of Three-Layer. Pipes Composed of ZrO. 2. and Stainless Steel by Multi-Billet Extrusion Method, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 41, pp. 161~165.
- [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. Avizur, 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] D. Y. Yang, Y. G. Kim, C. M. Lee, 1991, An upper bound solution for axisymmetric extrusion of composite rods through curved die. Int. J. Mech. Vol. 31, No. 4, pp. 565~575.
- [6] Hwang Beong-Bok, 1999, A Process Sequence Design on the Forming Process of Disk - Brake Piston. Met. and Mat. Int., Vol. 5, No. 1, pp. 85~92 .
- [7] C. S. Hartley, 1973, Int. J. Mech. Sci., Vol. 15, p. 651.
- [8] R. Prakash, B. L. Juneja, 1977, J. Engr. Prod., Vol. 1, p. 143.
- [9] H. T. Chai, D. H. Sansome, 1974, 15th. Int., MTDR Conf. (Birmingham), p. 545.
- [10] B. Avitzur, J. M. Story, W. C. Hahn, 1976, Effect of receiver pressure on the observed flow pattern in the Hydrostatic Extrusion of Bimetal Rods, ASME J. Engr. For Indus., Vol. 98, No. 3, pp. 909~913.
- [11] R. Sliwa, 1997, Plastic zones in the extrusion of metal composites, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 67, No. 1-3, pp. 29~35.
- [12] D. H. Jang, B. B. Hwang, 2003, Rigid Plastic FE Modeling of Frictional Contact Problems based on a Penalty Method, Trans. of Mat. Processing, Vol. 12, No. 1, pp. 34~42.
- [13] SFTC, 2004, DEFORM-2D User's Manual in Version 8.0, U.S.A