

금형 및 공정변수에 따른 층상복합재료의 압출성형 특성에 관한 연구

고병두[†] · 이하성
유한대학교 금형설계과

A study on the extrusion forming characteristics of construction materials with die and process parameters

Byung-Du Ko[†] · Ha-Sung Lee

Department of Tool & Mould Design, Yuhan University

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. The main design parameters influencing on deformation pattern are diameter ratio of the composite components and semi-die angle. Efforts are focused on the deformation patterns, velocity gradient, predicted forming load and the end distance through the various simulations. Simulation results indicate that there is an obvious difference of forming pattern with various diameter ratio and semi-die angle. The analysis in this paper is concentrated on the evaluation of the design parameters on the deformation pattern of composite rod.

Key Words : Co-extrusion Process, Composite Rods, Conical Die, Finite Element Method, Design Parameters

1. 서 론

최근에 층상복합재료를 이용한 성형방법이 폭넓게 연구되어지고 있으며 상대적으로 우수한 기계적 특성과 함께 용이한 이종소재의 접합에 대한 장점으로 인하여 다양한 산업분야에 적용되고 있다¹⁾. 여기서 층상복합재료는 두 가지 이상의 서로 다른 금속재료 성분이 층상구조로 구성되어 있는 소재를 말하며 보통 내재(core)와 다른 소재로 피복되어 있는 외재(sleeve)로 구성되어 있다²⁾.

일반적으로 압출성형은 공정중 극심한 변형을 수반하며 이에 따라 변형의 비균질성을 초래하고 이러한 소성변형의 불안정성은 재료거동이 서로 다른 층상복합재료인 경우에 더욱 크게 나타난다³⁾. 다시

말해서 복합재료를 이용한 압출성형공정에서는 두 재료의 서로 다른 유동응력에 의해 압출공정중 단면비가 변하게 되어 소재유동이나 성형 메커니즘은 단일금속에 의한 압출공정과 비교하여 상대적으로 복잡하다⁴⁾. 이러한 복합재료의 압출공정에 대한 복잡성으로 인하여 현재까지 다양한 수치해석적 또는 실험적 연구가 진행되어왔다. Osakada⁵⁾ 등은 상계해법의 해석적 방법을 이용하여 단면 감소비에 따른 내재의 파손에 대해 연구하였으며 Story⁶⁾ 등은 최대 균일 유동과 연계하여 최적화된 초기 이종소재의 직경비를 제안하였다. 또한 Tayal와 Natarajan⁷⁾ 등은 유한요소법을 이용한 수치적 측면에서 계면접합의 기하학적인 거동뿐만 아니라 응력과 변형률 속도분포에 대한 연구를 수행하였다.

여러 가지 층상복합재료 중에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 Al/Cu 층상 복합재료 봉은 내재(core)인 Al을 외재(sleeve)인 Cu가 피복한 형태로 되

[†] kobd9@hanmail.net

접수 : 2012. 11. 09. 채택 : 2013. 01. 25.

어 있는 소재를 말하며 정수압 프레스를 이용하여 일본 Hitachi사에서 처음으로 생산한 이후로 전기·전자용 버스바(bus-bar)로 주로 사용되고 있다. 이러한 Al-Cu 층상 복합재료로 되어 있는 버스바는 기존의 순수한 Cu로 제조된 버스바에 비해 거의 동일한 전도체 성질을 갖고 있으면서도 비용절감과 중량 감소의 효과를 갖고 있다^{4,8)}. 따라서 본 논문에서는 이러한 Al/Cu 층상 복합재료 봉을 이용하여 원추형 금형(conical die)을 적용한 압출성형공정에 대해 강소성 유한요소법에 의한 모의실험을 바탕으로 성형특성을 비교/분석하였다. 유한요소해석을 위하여 Jang^{9,10)} 등이 제안한 모델을 참조하여 상용프로그램인 DEFORM-2D^{TM1)}를 적용하였다.

2. 층상복합재료의 압출공정 개요

일반적으로 층상복합재료를 이용한 압출성형공정에서 최종 성형품의 형상과 소성영역은 여러 가지 설계변수에 따라 달라진다. 이러한 소성유동에 영향을 주는 주요 설계변수에는 층상복합재료의 내재와 외재의 부피비, 재료 강도에 따른 유동응력비, 접합경계면에서의 마찰, 금형형상, 단면 감소율 등이 있다³⁾.

Fig. 1은 본 논문에서 적용된 층상복합재료를 이용한 압출성형공정에 대해 초기 빌렛과 압출성형 후 최종 성형품의 3차원 형상에 대한 개념도이다. 그림에서 알 수 있듯이 축대칭 형상의 내재인 알루미늄과 외재인 구리로 되어있는 복합재료를 압입공정에 의해 예비성형한 후에 원추형 금형을 이용하여 압출성형 한다.

Fig. 2는 층상복합재료의 압출공정에서 금형과 소재에 대한 설계변수들을 압출공정 전·후로 각각 나누어 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 성형전 외재의 직경 D_o 는 다이반각 α 로 되어있는 원추형 금형의 홈을 지나 단면감소에 의해 직경 d_{fo} 로 최

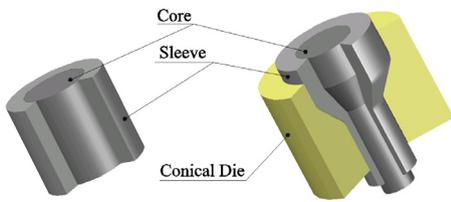


Fig. 1. Schematic diagram of initial billet(left) and final product(right) for composite rod extrusion

종 성형된다.

Fig. 3은 원추형 금형을 이용한 복합재료의 압출

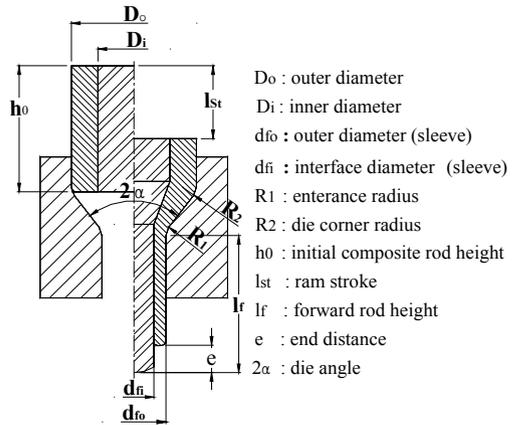


Fig. 2. The design parameters of composite rods before and after the extrusion process

공정에서 나타날 수 있는 대표적인 7가지 성형형태를 나타낸 그림이다¹²⁾. 일반적인 압출결함과 동일하게 층상복합재료에서의 압출공정에서도 외재의 표면결함(Fig. 3(a))이나 내재의 내부균열(Fig. 3(g)) 등이 나타난다. 그러나 일반 압출공정과는 다르게 내/외재 접촉경계면에서 유동에 의한 인장력 차이로 인하여 압출후에 내/외재의 직경비가 초기 소재의 직경비와 동일한 이상적인 균일유동(Fig. 3(d))과 직경비가 변화하는 비균일 유동(Fig. 3(f))현상 등이 나타난다.

3. 다이반각에 따른 성형특성

3.1. 해석조건

여러 가지 변수들 중에서 복합재료를 구성하고 있는 각각의 재료들의 부피비는 소성영역에서 속도 분포와 균열의 기준을 결정하는 주요한 요인이다. 또한 축대칭 압출공정에서 보편적으로 사용되고 있는 원추형 금형은 일반적인 평금형과 비교하여 변형되지 않은 사각 영역(dead metal zone)이 나타나지는 않지만 다이반각에 따라 소재의 유동형태가 달라진다³⁾.

본 논문에서는 내재와 외재의 부피비와 원추형 금형의 기하학적인 형상에 따른 복합재료의 소재유동을 비교하기 위하여 앞서 언급한 여러 가지 설계 변수들 중에서 금형의 다이반각(semi die angle)에

대해 성형전 층상복합재료의 직경비(diameter ratio:

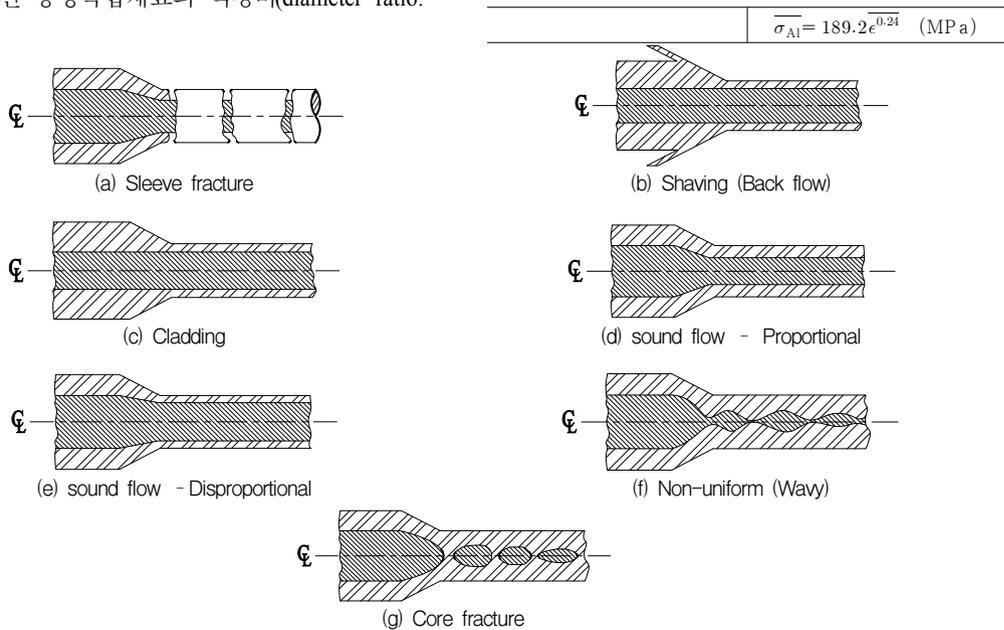


Fig. 3. Type of flow behavior observed during the co-extrusion of bi-metal rod and wire[14]

DR)에 따른 압출공정에 대한 특성을 정리하였다. Table 1은 모의실험에 사용된 금형과 층상복합재료의 주요설계변수들에 대한 값들을 나타낸 것이다. 표에 나타난 것처럼 압출 후 단면감소율을 일정하게 하기 위하여 외재의 직경은 23.236mm로 성형되게 금형을 설계하였다. 마찰조건은 마찰인자(friction factor)를 사용하였으며 소재와 금형 사이의 마찰은 문헌을 참고하여 비누윤활로 가정하고 0.1로 설정하여 해석하였다⁶⁾. 또한 압출성형 중 접합이 발생하는 구리와 알루미늄의 접촉경계면도 동일한 마찰값으로 설정하였다.

Table 1. Process parameters used in simulation

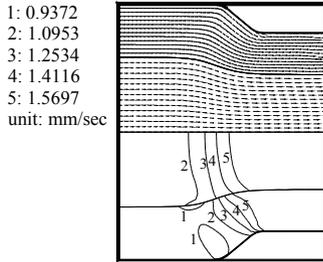
Parameters	Values
Diameter of billet (mm)	(core) $\phi 15, \phi 18, \phi 21$ (sleeve) $\phi 30$
Initial composite rod height (h0)	80mm
Semi-die angle (2α)	40°, 50°, 60°
Entrance radius (R1)	2mm
Die corner radius (R2)	2mm
Ram stroke (lst)	57.9mm
Extrusion ratio (ER)	1.67 (global)
Diameter ratio (DR)	0.5, 0.6, 0.7
Friction factor (m)	0.1
Material property	$\sigma_{Cu} = 335.2e^{0.13}$ (MPa)

3.2. 유동형태

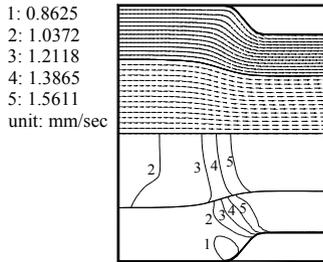
Fig. 4(a)~(c)는 각각 압출공정이 완료된 후 내·외재의 직경비와 다이반각에 따른 유효변형률 속도 및 변형된 격자의 형상을 나타낸 것이다. 그림으로부터 동일한 다이반각에 대해서는 직경비가 클수록 내·외재의 소재유동차이가 더 크게 나타나고 있다. 동일한 직경비에 대해서는 다이반각이 클수록 유동차이가 크게 나타났지만 이러한 영향이 직경비의 차이에 의한 영향보다는 작게 나타났다. 따라서 이러한 복합재료에 의한 압출성형에서는 성형품에 대한 유동형태에서는 초기 소재의 내·외재 직경비가 상대적으로 중요한 설계변수임을 알 수 있다. 전체적인 유효변형률 속도분포는 금형의 벽면을 따라 외재에서 가장 크게 나타났으며 마찰의 영향이 상대적으로 작은 내재는 대부분 중심부분에서 크게 나타났다.

Fig. 5는 내·외재의 직경비가 0.6인 경우 주요 변형영역인 원추형 금형의 모서리부근에서 다이반각에 따른 속도분포와 속도벡터를 나타낸 것이다. 그림으로부터 소재가 금형의 입구로부터 출구쪽으로 유동하면서 단면적이 감소함으로 인하여 유동속도가 점차 증가하고 있다. 또한 각각의 그림에서

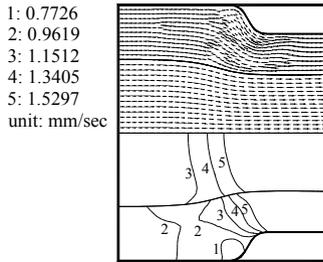
다이반각이 작을수록 속도분포가 더 조밀하고 최대 최소 속도 차이가 작음을 알 수 있다. 그러나 다이 반각이 클 수록 내·외재의 상대적인 속도 차이가 크게 나타났으며 이에 따라 비례적인 유동이 원활



$\alpha = 40^\circ$



$\alpha = 50^\circ$



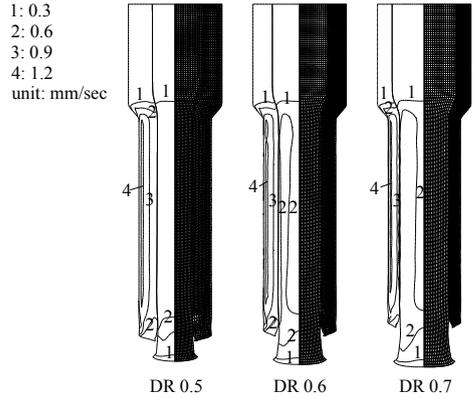
$\alpha = 60^\circ$

Fig. 5. Velocity contour and vector plots for various semi-die angle (DR=0.6)

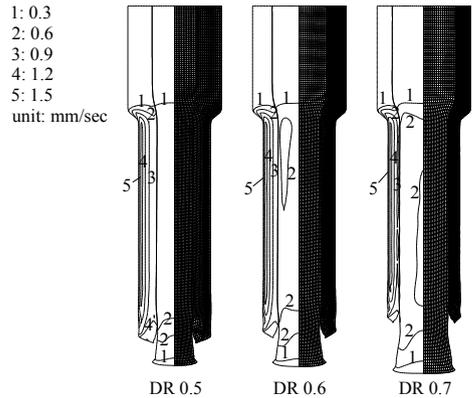
히 일어나지 못하고 있다. 특히 다이반각이 60°인 경우에는 소재의 유동방향이 급형의 모서리 부분에서 급격히 변함에 따라 외재의 속도벡터가 불균일한 경향을 보이고 있다.

3.3. 선단거리

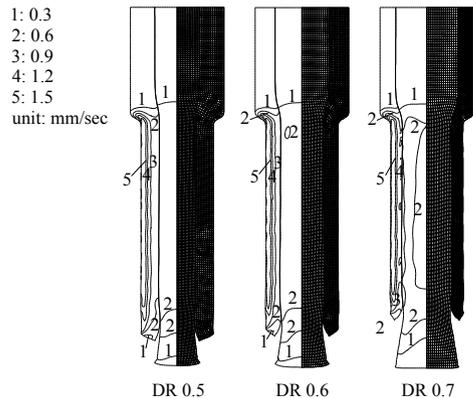
압출공정에서 속도비를 이용한 소재의 유동특성은 단일소재를 이용한 압출공정이나 외재가 내재를



(a) $\alpha=40^\circ$



(b) $\alpha=50^\circ$



(c) $\alpha=60^\circ$

Fig. 4. Deformed shape and distribution of effective strain rate for various semi-die angle

전체적으로 피복한 복합재료인 경우에 주로 이용된다. 그러나 본 논문에서 적용된 복합재료는 외재가

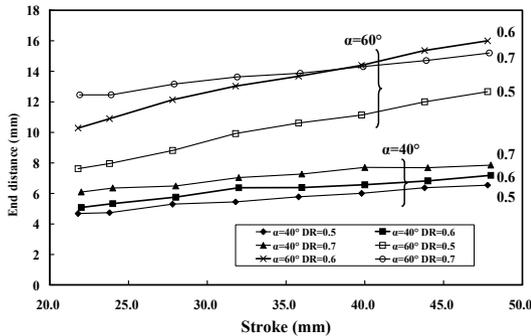


Fig. 6. The distribution of end distance with design parameters during the extrusion process

내재의 표층만 피복한 형태이기 때문에 이러한 반경비를 이용하여 소재의 비례적인 유동을 판단하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 복합재료에 의한 압출공정에 의한 성형특성을 검토하기 위하여 Fig. 2에 나타난 선단거리(end distance)를 이용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 선단거리는 압출공정이 완료된 후 내재를 기준으로 외재와 축방향에 대한 신장된 길이 차이를 말하며 이것을 이용하여 각각의 설계변수에 따른 모의 실험된 값들을 비교하였다.

Fig. 6은 다이반각 40°와 60°에 대해 압출공정이 진행됨에 따라 각각의 직경비에 따른 선단거리의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 다이반각과 직경비가 클수록 선단거리는 비례적으로 증가하고 있지만 다이반각이 40°인 경우에는 직경비에 의한 영향이 상대적으로 작게 나타났다. 전체적으로는 압출공정이 진행될수록 선단거리가 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 다이반각이 40°인 경우는 정상상태에 도달하면서 선단거리가 공정이 진행되어도 거의 일정한 반면에 다이반각이 60°인 경우에는 공정이 완료될 때까지 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 이유는 큰 다이반각으로 인하여 정상상태에 도달하여도 압출공정 중에는 축방향으로 외재의 유동이 지속적으로 억제되는 것으로 판단된다.

4. 접합상태에 따른 성형특성

4.1. 해석조건

층상복합재료의 압출공정변수들 중에서 외재가 내재를 이상적으로 피복하기 위해서는 초기 성형하

Table 2. Process parameters used in simulation

Parameters	Values
Diameter of billet (mm)	(core) $\phi 9.6$, $\phi 12$, $\phi 14.4$
	(sleeve) $\phi 24$
Initial composite rod height (h0)	50mm
Semi-die angle (2 α)	50°
Entrance radius (R1)	2.5mm
Die corner radius (R2)	2.5mm
Ram stroke (lst)	45mm
Extrusion ratio (ER)	3 (global)
Diameter ratio (DR)	0.4, 0.5, 0.6
Friction factor (m)	0.1
	(loose) +0.001mm
	(weak) +0.012mm
(tight) +0.023mm	
Material property	$\sigma_{Cu} = 451.4e^{0.33}$ (MPa)
	$\sigma_{Al} = 173.2e^{0.30}$ (MPa)

고자 하는 빌렛의 직경비(체적비)에 대한 정확한 계산이 선행되어야 한다¹³⁾. 또한 단일 소재에 대한 압출공정과 비교하여 이종소재간의 초기 접합상태는 압출성형 후에 제품의 기계적 접합강도를 결정하는 중요한 조건이다⁴⁾. 따라서 본 논문에서는 압출성형 후 제품의 형상적 적합성과 계면접합에 대한 강도를 판단하기 위하여 초기 빌렛에 대한 직경비와 끼워맞춤 접합상태를 주요 설계변수로 설정하였다.

빌렛에 대한 직경비는 각각 0.4, 0.5, 0.6을 적용하였으며 끼워맞춤 간극은 강한 접합(0.023mm), 중간 접합(0.012mm), 약한 접합(0.001mm)조건으로 설정하였다. 전체적으로 외재와 금형 벽면의 두 가지 마찰 조건을 포함하여 총 18가지 경우에 대해 공정조건을 달리하여 모의실험을 수행하였다. Table 2는 압출금형의 형상적 특징을 포함하여 해석에 사용된 모든 공정조건과 설계변수들을 나타낸 것이다.

4.2. 소성변형 영역

Fig. 7은 서로 다른 공정조건에 대한 압출공정의 모의실험 결과를 내/외측 재료의 소성변형영역을 중심으로 정리한 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 끼워맞춤에 의한 접합상태나 내/외재 구성에 상관없이 내재에서 더 넓은 소성변형영역을 보여준다. 하지만 그림을 자세히 살펴보면 내측이 상대적으로 연한 재료로 구성된 AA 1100을 사용하여 역시

끼워 맞춤으로 준비된 빌렛을 압출할 때 내/외재 모두에서 다른 경우 보다 약간 더 넓은 소성변형영역

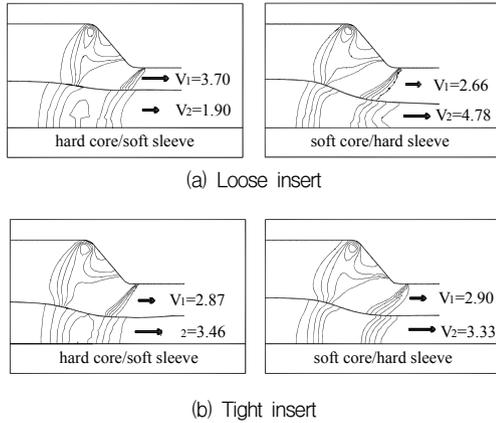


Fig. 7. Velocities discontinuities between construction materials and effective strain rate distributions

을 볼 수 있다. 그러나 모의실험에 적용된 공정조건에서는 내/외층의 구성방법과 무관하게 전체적으로 소성변형영역은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 서로 다른 끼워 맞춤에 의한 영향도 뚜렷하게 의미있는 경향의 차이를 보이지 않는다.

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 3 이라면 완전한 균일 압출이 이루어 졌다고 볼 수 있다. 유동속도측면에서는 금형 입구에서의 속도는 1.0 이기 때문에 출구 속도가 3.0 이라면 균일한 압출이 된다. 중간 끼워 맞춤의 연한 내재(Al core)에서 가장 심하게 압출이 되어 압출비가 4.78로 나타났다. 그림에서 중간 끼워 맞춤의 경우 경한 내재(Cu core)를 사용한 복합재료 구성에서 내재의 압출이 외재와 비교하여 현저하게 낮음을 알 수 있다. 이와는 반대로 연한 내재(Al core)를 적용하였을 경우에는 이러한 경향이 반대가 되어 내재의 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 내재(Al core)를 적용하였을 경우에 경한 내재(Cu core)보다 구성 소재 간 출구속도가 보다 더 일치함을 알 수 있다. 전체적인 경향은 끼워 맞

춤의 정도가 층상재료의 구성 보다는 균일한 압출에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

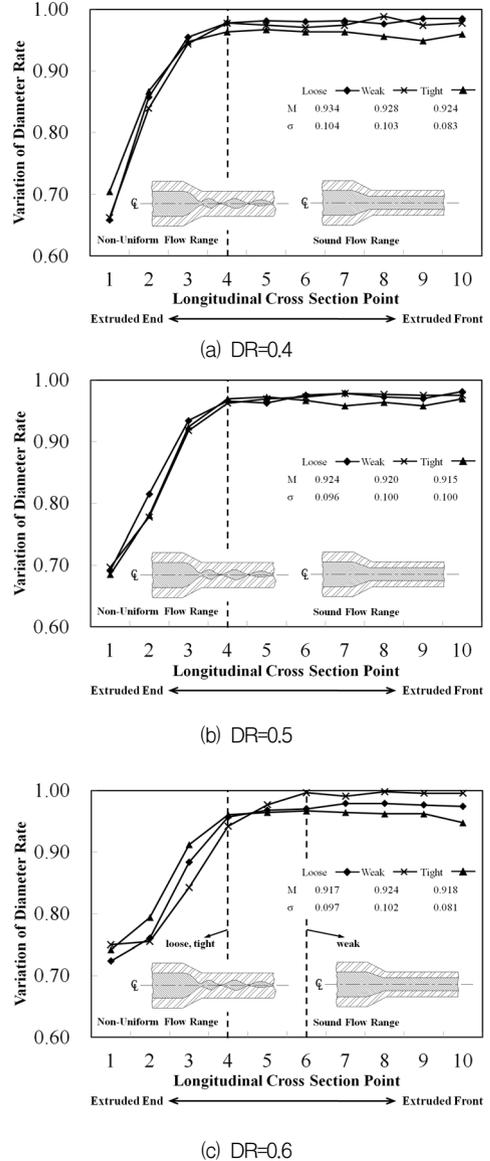


Fig. 8. Variations of the diameter rate for interference conditions and initial diameter ratio at longitudinal cross section

4.3. 단면 직경비 변화율

앞서 언급했듯이 복합재료에 대한 압출공정에서 가장 이상적인 경우는 초기 이중소재의 직경비에

대해 성형이 완료된 후에도 비례적으로 이러한 직경비가 유지되는 것이다. Fig. 8(a)~(c)는 각각 마찰값이 0.1인 경우에 압출공정이 완료된 후에 접합조건에 따라 압출성형후의 단면 직경비 변화율에 대한 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 외재가 내재를 피복한 영역만을 대상으로 10개의 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 0.6인 경우(Fig. 8(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

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 Cu/Al 층상복합재료가 적용된 압출공정에 대하여 수치해석을 수행하고 성형특성을 정리하였다. 압출성형공정에서 다양한 설계변수에 대한 금형과 공정조건에 따라 모의실험을 수행하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 내·외재의 직경비와 다이반각이 클수록 상대적인 유동속도차이가 크게 나타났지만 최종 성형품에 대한 유동형태에 대해서는 직경비에 대한 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

2) 다이반각과 직경비가 클수록 외재의 축방향 유동이 억제되고 선단거리는 비례적으로 증가하여 단면감소율이 작아지는 성형특성을 보이고 있다.

3) 소성변형영역은 끼워 맞춤에 의한 간섭량이나 내측·외측의 소재구성과 무관하게 내측에서 더 넓

은 소성변형영역이 나타난다.

4) 압출공정후 초기 빌렛 직경비에 대한 단면직경비의 변화율을 분석한 결과 공정변수에 따라 변화하는 경향은 거의 동일하며 압출성형 초기에 비균일 유동이 주로 발생한다.

참고문헌

- 1) W. Szulc, M. Pietrzyk, H. Dyja, J. W. Pilarczyk, Theoretical and experimental analysis of drawing of steel rods covered with copper, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 45, pp. 401 - 406, 1994.
- 2) B. Avizur, R. Wu, S. Talbert, Y.T. Chou, Criterion for the prevention of core fracture during extrusion of bimetal rods, *J. Eng. Ind.*, Vol. 104, pp. 293 - 304, 1982.
- 3) R. Sliwa, Plastic zones in the extrusion of metal composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 67, pp. 29-35, 1997.
- 4) Y. M. Hwang, T. F. Hwang, An investigation in to the plastic deformation behavior within a conical die composite rod extrusion, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 121, pp. 226-233, 2002
- 5) K. Osakada, M. Limb, P. B. Mellor, Hydrostatic extrusion of composite rods with hard cores, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 15, No. 4, pp. 291-307, 1973.
- 6) J. M. Story, B. Avitzur, W. C. Hahn, 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, 1976.
- 7) A. K. Tayal, R. Natarajan, A finite element analysis of axisymmetric extrusion of composite rods, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 21, pp. 227-235, 1991.
- 8) B. Aitzur, R. Wu, S. Talbert and Y. T. Chou, Criterion for the prevention of core fracture during extrusion of bimetal rods, *ASME J. Eng. Ind.*, Vol. 104, pp. 293-304, 1982.
- 9) D. H. Jang, Influence of process parameters on the forming compatibility in composite extrusion rods, *KSTP*, Vol. 18, No. 1, pp. 80-86, 2009.
- 10) J. M. Seo, J. H. Noh, K. H. Min, B. B. Hwang, K. C. Ham, D. H. Jang, Inhomogeneous deformation between construction materials in the Cu/Al and Fe/Al Co-extrusion processes, Vol. 16, No. 7, pp. 530-537, 2007.

- 11) SFTC, 2004, DEFROM-2D Ver. 8.0 Users Manual (Scientific Forming Technologies Corporation Inc., U.S.A.)
- 12) M. H. Apperley, C. C. Sorrell, A. Crosky, The co-extrusion of metal-sheathed high-temperature superconductors, J. Mater. Process. Technol., Vol. 102, pp. 193-202, 2000.
- 13) S. Berski, H. Dyja, A. Maranda, J. Nowaczewski, G. Banaszek, Analysis of quality of bimetallic rod after extrusion process. J. Mater. Process. Technol., Vol. 177, pp. 582-586, 2006.
- 14) M. E. Epler, W. Z. Misiolok, Novel billet for co-extrusion of ferrous material tubes, Mater. Sci. & Eng. A, Vol. 429, pp. 43-49, 2006.