

論文

유한요소법을 이용한 Al/Cu 층상복합재료의 압출공정해석

김정인* · 강충길** · 권혁천***

Extrusion Process Analysis of Al/Cu Clad Composite Materials by Finite Element Method

Jeong In Kim*, Chung Gil Kang** and Hyok Chon Kwon***

ABSTRACT

A clad material is a different type of the typical composites which are composed of two or more materials joined at their interface surface. The advantage of clad material is that the combination of different materials can satisfy both the need of good mechanical properties and the other demand of user such as electrical properties instantaneously. This paper is concerned with the direct and indirect extrusion processes of copper-clad aluminum rod. Extrusion of copper-clad aluminum rod was simulated using a commercially available finite element package of DEFORM. The simulations were performed for copper-clad aluminum rod to predict the distributions of temperature, effective stress, effective strain rate and mean stress for some sheath thicknesses, die exit diameters and die temperatures.

초 록

층상복합재료란 이종재료를 적층하여 계면에서 확산에 의하여 새로운 금속조직을 제어하는 것으로 정의한다. 기계적 성질이 다른 금속이 결합하여 서로의 단점을 보완·개선함으로써 재료의 기계적 성질을 한층 더 향상시킬 뿐만 아니라, 동시에 전기적 성질도 향상시킬 수 있는 재료로 그 종류는 다양하며 용도도 광범위하다. 본 연구에서는 Al/Cu 피복이종복합재료를 직·간접압출하는데 필요한 성형 조건을 도출하기 위하여 유한요소 상용 package 인 DEFORM을 이용하여 이종복합재료의 거동해석을 수행하였다. 압출해석에 필요한 물성치를 구하기 위하여 본 연구에서 제조한 재료를 이용하여 압축실험을 수행하였으며, 압출방법, 압출온도, 피복체의 두께 등의 변화에 따른 이종복합재료의 거동을 파악하였다. 또한 해석결과를 바탕으로 이종복합재료의 열간압출실험의 결과와 비교·검토하였다.

1. 서 론

국내산업계의 기술혁신과 생활 수준의 향상에 따라

제품의 고급화에 의해서 금속재료의 형상이나 성능에 대한 기술적 요구도 매년 복잡해지고, 더욱 엄격한 특성을 요구하고 있다. 이러한 다양한 요구에 부응하기

* 부산대학교 기계공학부 대학원

** 부산대학교 기계공학부

*** 한국 생산기술연구원

위해서는 층상복합재료, 고강도 합금강, 특수금속 등의 새로운 소재의 개발이 필수적이다.

층상복합재료란 이종 재료들을 적층하여 계면에서 확산에 의하여 새로운 금속조직을 제어하는 것으로 정의한다. 기계적 성질이 다른 금속을 합쳐 서로의 단점을 보완·개선함으로써 재료의 기계적 성질을 한층 더 강화시킬 뿐만 아니라, 단일재료로서 얻을 수 없는 기계적 성질을 가질 수 있는 재료로 그 종류는 다양하며 용도도 광범위하다.

특히 전기/전자용으로 사용되고 있는 bus-bar용 동합금은 그 자체 무게가 무거워 취급하기에 매우 불편하고 가격 또한 고가이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 Al/Cu피복 이종금속 층상복합재료를 bus-bar에 이용하고 있다. 전기/전자용으로 사용되고 있는 층상복합재료는 기존의 순동에 의해 제조된 bus-bar와 같은 부품에 비하여 가격이 30-40%정도 절감되고, 무게는 최대 약 60%까지 경량화 할 수 있다. 전류는 도체의 표면을 통하여 흐르기 때문에 성능 또한 순동에 의해 제조된 bus-bar에 비하여 떨어지지 않는다.

이종 층상복합재료에 관한 연구로는 Story등[1]은 초전도체/Al피복 층상복합재의 정수압압출에 대하여 압출압력의 영향에 대하여 연구하였다. Avitzur등[2]은 층상복합재료의 압출에서 심재와 피복재의 반경비 및 강도의 비가 압출성에 미치는 영향을 연구하였다. Yamaguchi등[3]은 정수압압출공정에서 층상복합재료의 체적분율 및 유동응력비에 따른 압출 한계에 대하여 연구하였다. Byon등[4]은 유한요소법을 이용하여 층상복합재료의 압출금형의 최적형상을 제안하였다. Park등[5]은 정수압압출법으로 Al/Cu 층상복합재료의 튜브 압출에 관하여 유한요소해석을 하였고 실험을 통하여 검증하였다. Park등[6]은 정수압압출법으로 Al/Cu 층상복합재료의 봉 압출에 관하여 유한요소해

석을 하였고 실험을 통하여 검증하였다.

현재까지의 이종층상복합재료의 압출에 관한 연구는 정수압압출법을 이용한 것이 대부분이었으며, 직접 및 간접압출법에 있어서 금형설계와 관련지어 해석한 결과를 실험결과와 비교 검토한 예는 찾아볼 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 향후 버스바(Bus Bar)에 이용하기 위한 Al/Cu 피복이종복합재료를 압출하는데 필요한 성형조건을 도출하기 위하여 유한요소법에 의하여 이종복합재료의 거동해석을 수행하였다.

압출해석에 필요한 물성치를 구하기 위하여 본 연구에서 제조한 재료를 이용하여 압축실험을 수행하였다. 압출방법, 압출온도, 피복재의 두께 등의 변화에 따른 이종복합재료의 거동을 파악하였다. 또한 해석결과와 타당성이 검토되어져 이종복합재료의 압출시 소재와 다이 사이의 마찰계수의 값을 정량적으로 제안하였다.

2. 압축실험

압출해석에 필요한 물성치를 구하기 위하여 압축실험에서 구한 응력-변형률의 data를 압출해석에 이용하였다. 단순압축실험은 MTS(Material Test System)에 전기기로 부작하여 압축시편을 $\phi 10 \times 15(\text{mm})$ 로 가공하여 원하는 온도까지 상승시켜 압축실험을 하였다. 압축실험은 무산소동 및 순알루미늄 각각에 대하여 변형속도 $1, 1 \times 10^{-1}, 1 \times 10^{-2}(\text{sec}^{-1})$ 의 경우에 대하여 각각 $300^\circ\text{C}, 350^\circ\text{C}, 400^\circ\text{C}, 450^\circ\text{C}, 500^\circ\text{C}$ 로 실험하였다. Figs. 1~3은 압축실험을 통하여 얻은 순알루미늄의 응력-변형률 선도이다. 순알루미늄은 전 온도 영역에서 항복 이후에 변형률이 증가함에 따라 응력이 증가한다. Figs. 4~6은 압축실험을 통하여 얻은 무산소동의 응력-변형률 선도이다. 300°C 의 경우는 항복 이후에 변

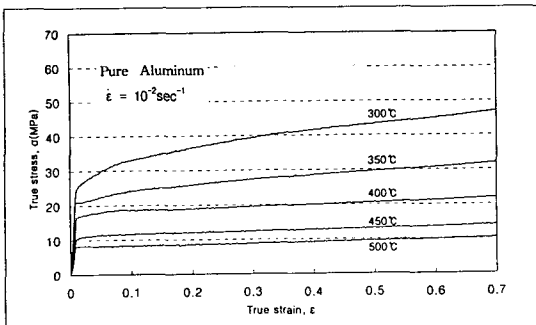


Fig. 1. The true stress-true strain curve at the strain rate 10^{-2} sec^{-1}

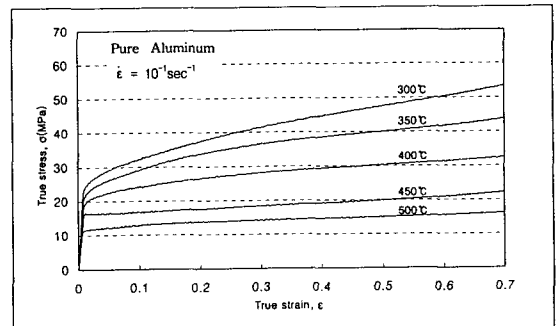


Fig. 2. The true stress-true strain curve at the strain rate 10^{-1} sec^{-1}

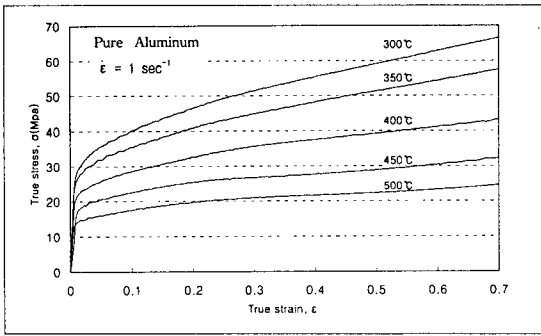


Fig. 3. The true stress-true strain curve at the strain rate 1 sec^{-1}

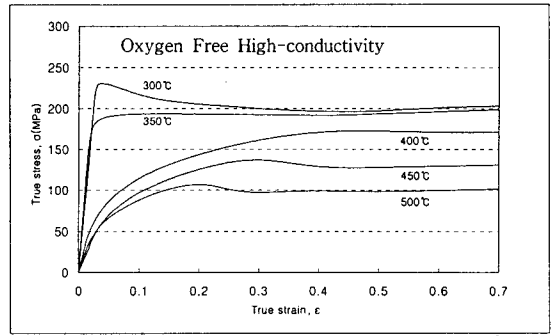


Fig. 4. The true stress-true strain curve at the strain rate 10^{-2} sec^{-1}

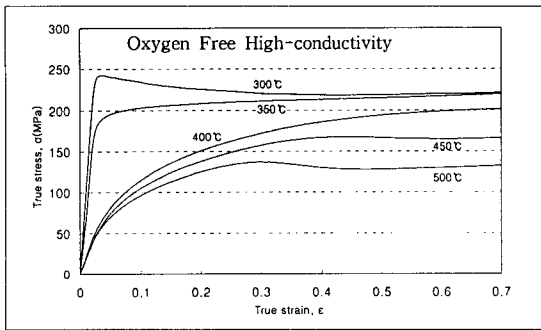


Fig. 5. The true stress-true strain curve at the strain rate 10^{-1} sec^{-1}

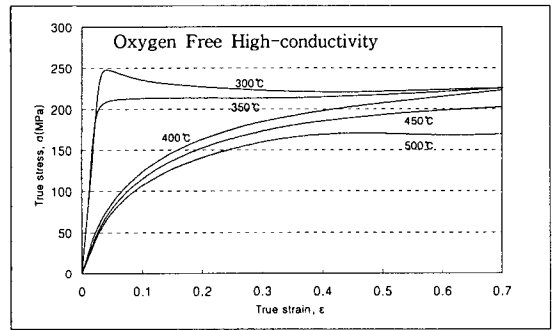


Fig. 6. The true stress-true strain curve at the strain rate 1 sec^{-1}

형률이 증가함에 따라 응력이 감소한다. 350℃의 경우는 항복 이후에 변형률의 증가에 따른 응력이 증가하나 증가량이 10MPa 이하이다. 400℃, 450℃, 500℃의 경우는 변형률의 증가에 따른 응력의 증가량이 100MPa 이상이다. Figs. 1~3에 나타난 순알루미늄의 응력-변형률선도에서 300℃의 유동응력은 약 30~65MPa이고, Figs. 4~6에 나타난 무산소동의 유동응력은 약 200~250MPa이다. 따라서 300℃에서의 유동응력은 무산소동이 알루미늄보다 약 4~7배가 더 높다. Figs. 1~3에 나타난 알루미늄의 500℃에서의 유동응력은 약 8~25MPa이고 Figs. 4~6에 나타난 무산소동의 500℃에서의 유동응력은 약 100~170MPa이다. 따라서 500℃에서의 유동응력은 무산소동이 알루미늄보다 약 7~13배가 더 높다. 이것은 온도가 높을수록 두 재료간의 유동응력의 차이가 더 심화됨을 나타낸다. 본 연구의 해석에는 순알루미늄의 물성으로서 Figs. 1~3에 나타난 응력-변형률 선도를 이용하였고, 무산소동의 물성으로서 Figs. 4~6에 나타난 응력-변형률 선도를 이용하였다.

3. 실험방법

3.1 빌렛의 설계

본 실험에서 사용한 층상복합재 제조용 압출 Billet의 구성은 Fig. 7 (c)에 나타난 바와 같이, 이들 Billet은 냉간압축에 의한 가접과 주조에 의한 방법으로 설계, 제작되었다. 냉간압축법은 20 ton급 유압 Press를 사용하여 외피재와 심재와의 계면을 가접상태로 만들었다. 가접에 의해 제작된 빌렛은 Aluminum 과의 유동응력의 차이를 줄이기 위하여 진공중에서 열처리한 Pure Copper (순도 99% 이상)와 본 실험에서 용해·주조하여 제작한 Al을 각각 외피재(sheath)와 내심재(core)로 사용하여 기계가공 하였으며, 이것을 유압 Press에 의해서 가접하였다. Senri Ikeda[7] 등의 연구에 의하면 PSB (Preperal Shear Bonding) 공정에 의해 접합도를 상당히 향상 시킬수 있다고 하였다. 따라서 본 실험에서는 Core재의 직경을 5/100mm 정도 더 크게 하여 압축하였고, 기계가공에 의한 oil을 제거하기 위하여 trichloroethylene을 사용하여 oil을 제거

하였다. 주조법에 의한 Billet의 제작은 200℃ 정도로 예열된 금형몰드에 Copper Sheath재를 삽입하고 산화막의 형성을 억제하기 위해 Al 용탕을 주입하기 직전까지 Ar gas를 불어 넣어 주었다. Cu Sheath의 두께는 각각 7t, 10t로 하여, 금형 mold size에 맞추었다. Al의 주입온도는 720℃였고, 탈가스를 충분히 행하였다.

이렇게 제작된 Billet을 압출가공용으로 적합하도록 70φ×150mm의 크기로 기계가공하여 압출시험편으로 하였다.

4. 이중층상복합재료의 압출특성해석

4.1 경계조건

직접 및 간접압출의 경우에 대하여 축대칭 유한요소 해석을 행하였다. 유한요소해석은 DEFORM을 이용하였다. 빌렛과 램, 빌렛과 다이, 심재와 피복재간의 열전달계수는 30kW/m²·℃로 가정하였으며[8], 변형에너지에 의한 열생성률은 0.9로 가정하였다[8]. 빌렛과 다이 및 램과의 마찰상수 m = 0.3으로 가정하였고[9, 10], 심재와 피복재간의 마찰상수 m = 1로 가정하였다[2]. 여기서 마찰상수가 1인 경우는 마찰력이 재료의 전단항복응력과 같은 경우이다. 따라서 마찰력이 두 재료의 전단항복응력 이상의 값을 가지는 경우 두 재료

간의 미끄럼이 일어난다.

4.2 해석모델

압출특성해석은 빌렛의 온도는 300℃로 두고 피복재의 두께, 압출비, 다이와 슬리브의 온도 등을 변수로 하여 해석하였다. Fig. 7은 해석에 사용된 빌렛과 다이의 형상이다. 피복재의 두께에 대한 영향을 알아보기 위하여 산업계에서 요구하는 향후 Bus-Bar에 사용되어질 피복재의 두께인 4mm와 6mm로 변화를 주어 해석을 하였다. 해석에 사용된 빌렛과 다이의 치수를 Table 1에 나타내었다. 여기서 빌렛과 다이의 온도는 300℃, 마찰상수는 0.3, 피복재와 심재의 마찰상수는 1, 램속도는 20mm/sec로 두고 해석을 하였다. Fig. 8

Table 1. Billet and die dimensions for direct extrusion process

Billet	Sheath thickness t(mm)	Billet height H ₁ (mm)	Conic height H ₂ (mm)	Sheath billet diameter D ₁ (mm)	Core billet diameter D ₂ (mm)	Conic diameter d(mm)
	4	200	16	62	70	38
6	200	16	58	70	38	

Die	Sleeve diameter φ ₁ (mm)	Die outlet diameter φ ₂ (mm)	Die height h ₁ (mm)	Bearing length h ₂ (mm)	Die semi angle α°
	74	40	29.4	4	30

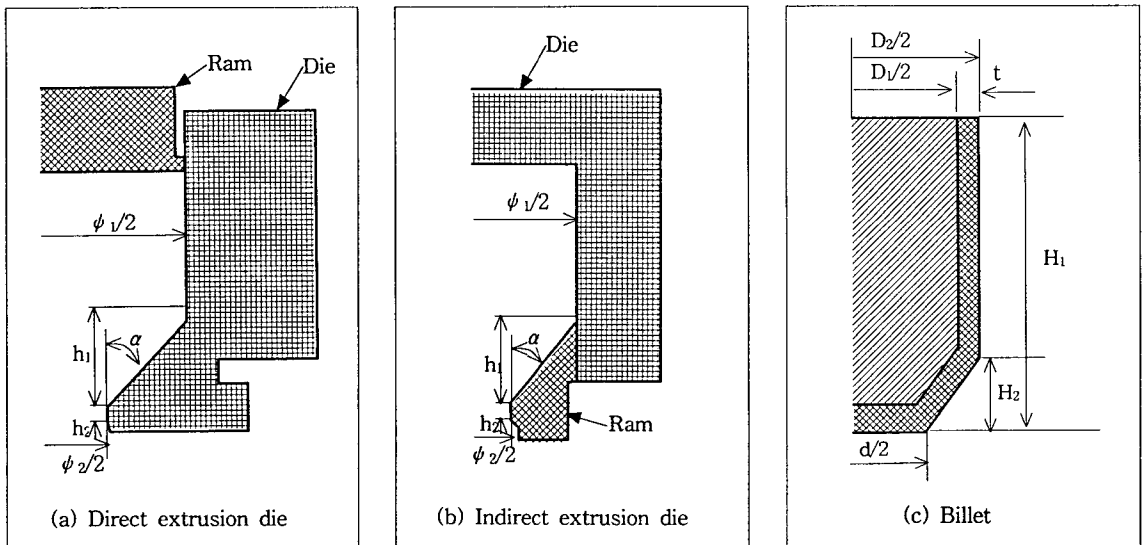


Fig. 7. Billet and dies used for direct extrusion of clad composite

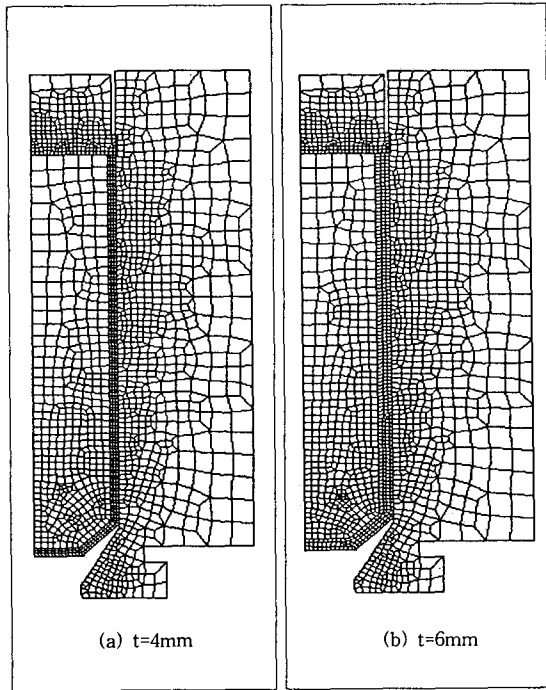


Fig. 8. Mesh discretizations for direct extrusion process analysis

은 해석을 위한 유한요소모델을 나타낸 것이다.

빌렛은 해석초기에는 심재의 절점수 437, 요소수 431로 모델링하였고, 피복재는 절점수 534, 요소수 408로 모델링하였다. 열해석을 위하여 램과 다이에 격자구성을 하였다. 직접압출해석에서 램은 절점수 237, 요소수 209로 모델링하였으며, 다이는 절점수를 838, 요소수를 759로 모델링하였다. 간접압출해석에서 램은 절점수 271, 요소수 232로 모델링하였으며, 다이는 절점수 270, 요소수 235로 모델링하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 직접압출

Fig. 9(a)~(d)는 피복재의 두께가 4, 6mm일 때 온도분포를 나타낸 것이다. 두께 변화에 따른 온도분포는 별 차이가 없었다. 두 경우 모두 압출초기인 $\delta = 15\text{mm}$ (δ : Ram displacement) 인 경우에는 다이의 입구부근에서는 피복재의 온도가 심재의 온도보다 낮으며, 다이의 출구부근에서는 피복재의 온도가 심재의 온도보다 높음을 알 수 있다. 이는 다이와 슬리브의 온

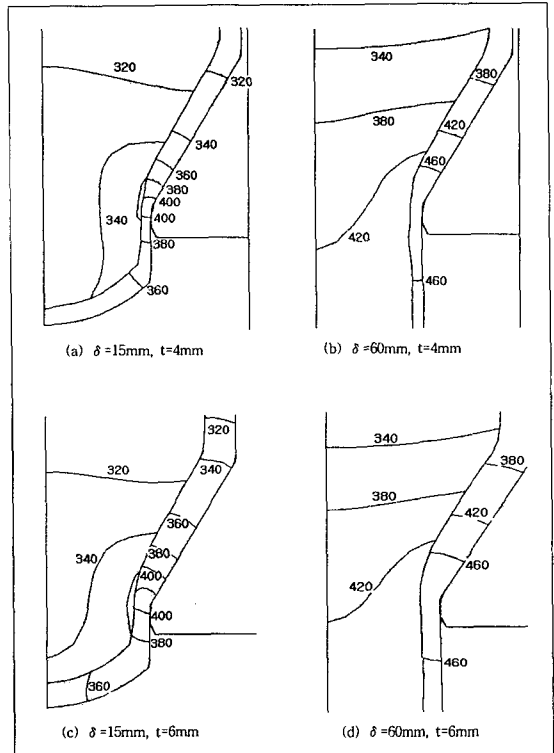


Fig. 9. Distribution of temperature according to ram displacement and sheath thickness, $\phi_1=74\text{mm}$, $\phi_2=40\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $T_m=300^\circ\text{C}$, $T_d=300^\circ\text{C}$, $m=0.3$, $V_f=20\text{mm/sec}$ in direct extrusion process.(unit: $^\circ\text{C}$)(T_m : Temperature of the materials, T_d : Temperature of the dies, δ : Ram displacement)

도가 빌렛의 온도보다 낮기 때문에 압출초기에는 빌렛과 다이의 열전달이 피복재를 통하여 일어나기 때문에 피복재의 온도가 낮으나, 압출이 진행됨에 따라 마찰 및 변형에너지로 인한 열발생이 심재보다 피복재가 더 크기 때문이다. 압출이 정상상태에 도달한 $\delta = 60\text{mm}$ 의 경우에는 다이입구와 출구 모두 피복재의 온도가 심재의 온도보다 높게 나타난다. 위의 원인은 압출이 진행되는 동안 지속적인 열발생으로 인한 열전도현상 때문에 다이 입구의 온도가 상승하기 때문이다.

Fig. 10(a)~(d)는 피복재의 두께가 4, 6mm일 때 유효응력분포를 나타낸 것이다. 여기서 피복재부분이 심재부분보다 매우 큰 유효응력분포를 알 수 있다. 이는 피복재로 사용된 구리의 유효응력이 심재로 사용된 알루미늄의 유효응력보다 매우 크기 때문이다. 압출초기인 $\delta = 15\text{mm}$ 인 경우에는 피복재의 두께가 4mm

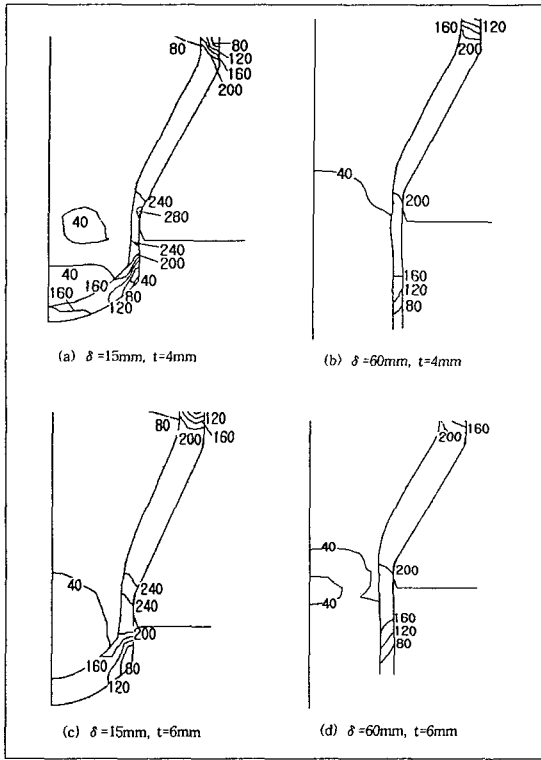


Fig. 10. Distribution of effective stress according to ram displacement and sheath thickness, $\psi_1=74\text{mm}$, $\psi_2=40\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $T_m=300^\circ\text{C}$, $T_d=300^\circ\text{C}$, $m=0.3$, $V_r=20\text{mm/sec}$, in direct extrusion process.(unit : MPa)

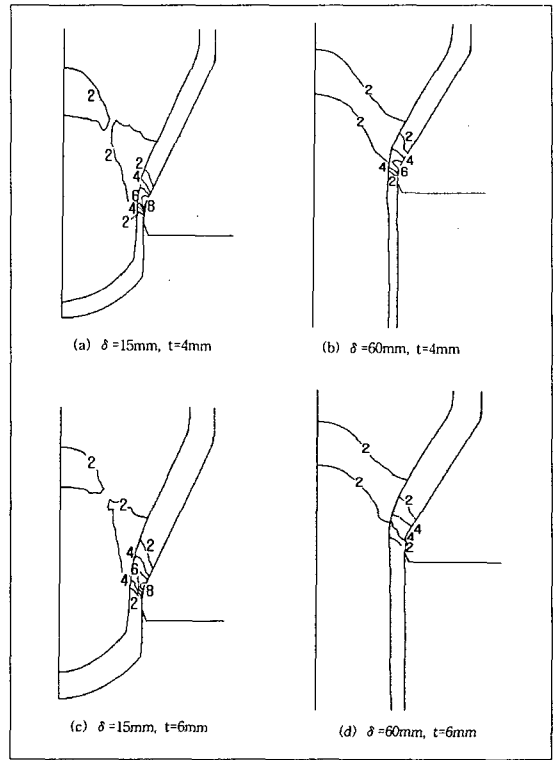


Fig. 11. Distribution of effective strain rate according to ram displacement and sheath thickness, $\psi_1=74\text{mm}$, $\psi_2=40\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $T_m=300^\circ\text{C}$, $T_d=300^\circ\text{C}$, $m=0.3$, $V_r=20\text{mm/sec}$, in direct extrusion process.(unit : sec^{-1})

인 경우가 6mm인 경우보다 피복재 영역에서의 유효응력이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 11(a)~(d)는 피복재의 두께가 4, 6mm일 때의 유효변형률속도의 분포를 나타낸 것이다. 다이의 입구에서는 심재부분의 유효변형률속도의 값이 피복재부분보다 큰 값을 가지나, 다이의 출구에서는 피복재부분의 유효변형률속도가 심재부분의 유효변형률속도보다 더 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고, 피복재의 두께가 4mm인 경우가 6mm인 경우보다 피복재부분의 유효변형률속도가 더 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 다이입구에서는 피복재와 심재의 유동응력의 차이로 인해 심재의 유속이 피복재의 유속보다 크기 때문이며, 다이출구에서는 다이내부에서의 유속차이로 인해 상대적으로 변형량이 적었던 피복재부분이 급격하게 변형을 일으키기 때문이다.

Fig. 12(a)~(d)는 피복재의 두께가 4, 6mm일 때 인장응력분포를 조사하기 위하여 평균응력이 0 보다

Table 2. Billet and die dimensions for direct extrusion process

Billet	Sheath thickness	Billet height	Conic height	Sheath billet diameter	Core billet diameter	Conic diameter
	t(mm)	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	d(mm)
	6	200	16	58	70	38
Die	Sleeve diameter	Die outlet diameter	Die height	Bearing length	Die semi angle	
	ψ_1 (mm)	ψ_2 (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	α°	
	74	40	29.4	4	30	
	74	30	38.1	4	30	

큰 값을 가지는 분포를 나타낸 것이다. 압출재에서 피복재 부분은 출구직경의 변화와 무관하게 인장력이 작용함을 알 수 있다. 압출시 인장응력이 작용하는 부분은 결합발생가능부위로 볼 수 있다.[10] 이중복합재료의 압출에서 피복재에 광범위하게 인장응력이 작용하는 것은 금형과 빌렛과의 마찰로 인한 영향과 심재와

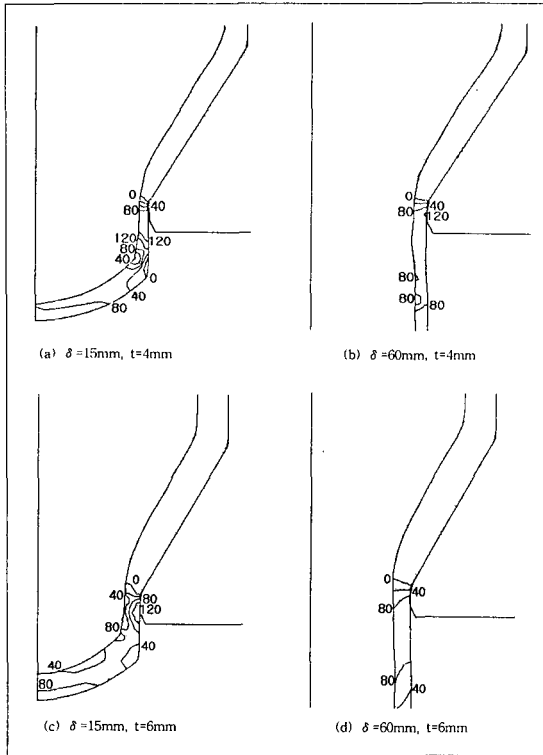


Fig. 12. Distribution of mean stress according to ram displacement and sheath thickness. $\phi_1=74\text{mm}$, $\phi_2=40\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $T_m=300^\circ\text{C}$, $T_d=300^\circ\text{C}$, $m=0.3$, $V_f=20\text{mm/sec}$, in direct extrusion process. (unit : MPa)

피복재간의 유동응력의 차이로 인해 두 재료간의 유동속도의 차이 때문이다. 그리고, 피복재의 두께가 4mm인 경우가 6mm인 경우보다 더 큰 응력 분포를 가지고 있다. 이는 피복재의 두께가 4mm인 경우가 6mm인 경우보다 더 결합발생의 가능성이 높음을 의미한다. 압출비에 대한 영향을 알아보기 위하여 다이의 출구직경을 40mm와 30mm로 변화를 주어 해석을 하였다. 해석에 사용된 빌렛과 다이의 치수를 Table 2에 나타내었다. 여기서 빌렛과 다이의 온도는 300℃, 마찰상수 $m = 0.3$, 피복재와 심재의 마찰상수 $m=1$, 램속도는 20mm/sec로 두고 해석을 하였다.

Fig. 13 (a)~(d)는 다이출구의 직경이 40, 30mm 일 때 유효변형률속도의 분포를 나타낸 것이다. 다이출구의 직경이 30mm인 경우가 40mm인 경우보다 높게 나타났다. 이는 30mm인 경우가 40mm인 경우보다 피복재부분에서의 유효변형률속도가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

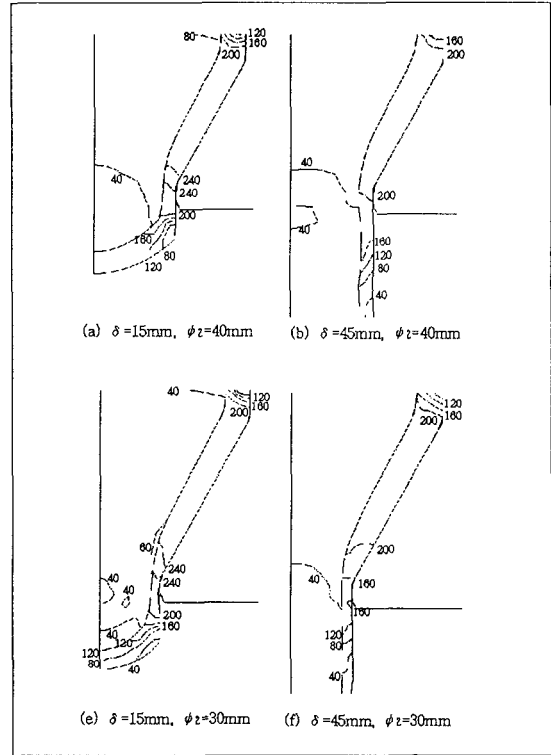


Fig. 13. Distribution of effective strain rate according to ram displacement and outlet diameter, $\phi_1=74\text{mm}$, $\phi_2=40\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $T_m=300^\circ\text{C}$, $T_d=300^\circ\text{C}$, $m=0.3$, $V_f=20\text{mm/sec}$, in direct extrusion process. (unit : sec⁻¹)

Table 3. Billet and die dimensions for indirect extrusion process

Billet	Sheath thickness	Billet height	Conic height	Sheath billet diameter	Core billet diameter	Conic diameter
	t(mm)	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	d(mm)
	6	200	16	58	70	38
Die	Sleeve diameter	Die outlet diameter	Die height	Bearing length	Die semi angle	
	ϕ_1 (mm)	ϕ_2 (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	α°	
	74	25	42.44	4	30	

Fig. 14 (a)~(d)는 다이출구의 직경이 40, 30mm 일 때 인장응력분포를 조사하기 위하여 평균응력이 0보다 큰 값을 가지는 분포를 나타낸 것이다. 압출초기인 $\delta = 15\text{mm}$ 인 경우에는 다이출구의 직경이 30mm인 경우가 40mm인 경우보다 평균응력값이 더 큰 값을 보이나, $\delta = 45\text{mm}$ 인 경우에는 다이출구의 직경이 40mm인 경우가 30mm인 경우보다 큰 값을 나타내고 있다.

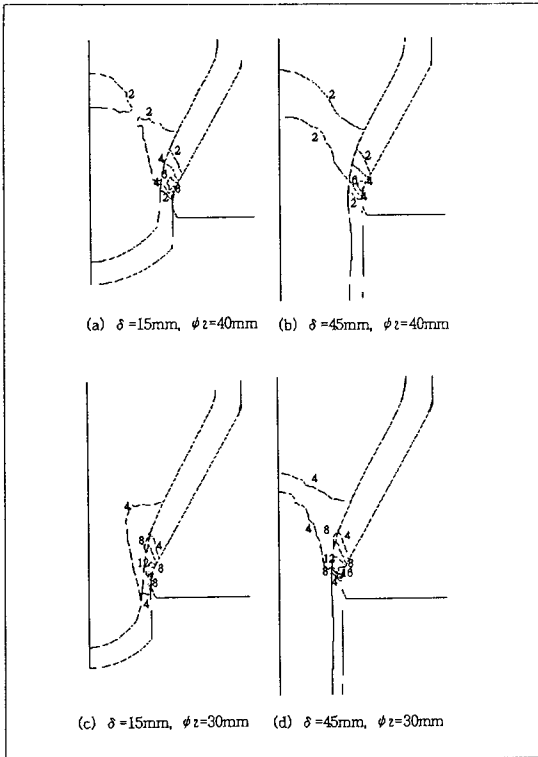


Fig. 14. Distribution of effective strain rate according to ram displacement and outlet diameter, $\phi_1=74\text{mm}$, $t=6\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $T_m=300^\circ\text{C}$, $T_d=300^\circ\text{C}$, $m=0.3$, $V_r=20\text{mm/sec}$, in direct extrusion process.(unit : sec^{-1})

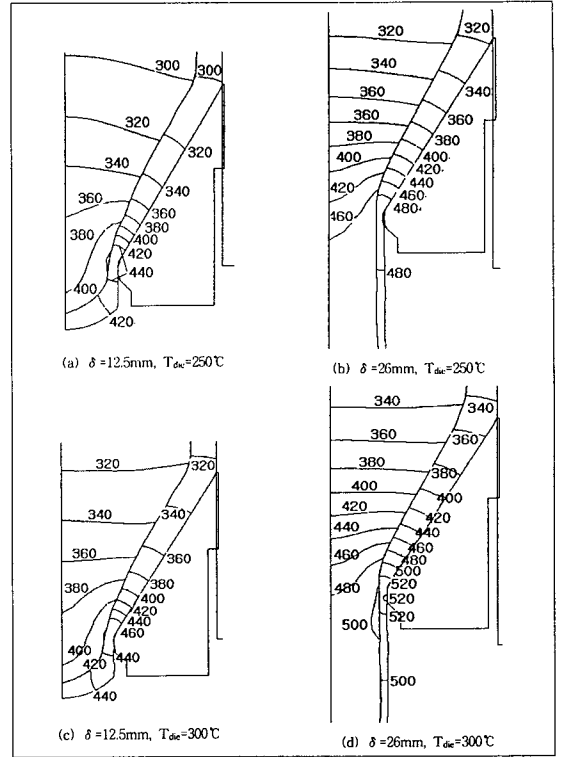


Fig. 16. Distribution of temperature according to ram displacement and die temperature, $t=6\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $\phi_1=74\text{mm}$, $\phi_2=25\text{mm}$, $m=0.3$, $V_r=10\text{mm/sec}$, $T_m=300^\circ\text{C}$, in indirect extrusion process.(unit : $^\circ\text{C}$)

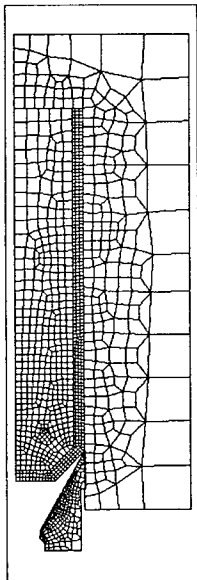


Fig. 15. Mesh discretization for indirect extrusion process analysis.

5.2 간접압출

다이의 온도에 대한 영향을 알아보기 위하여 다이와 슬리브의 온도를 250°C , 300°C 로 변화를 주어 해석을 하였다. 다이와 슬리브의 온도에 의한 영향을 보다 정확하게 판단하기 위하여 빌렛과 슬리브간의 마찰에 의한 열발생이 없는 간접압출에 대하여 해석하였으며, 온도차이에 의한 빌렛과 슬리브간의 열전달효과가 충분히 나타날 수 있는 시간을 주기 위하여 램속도를 직접압

출해석의 20mm/sec 의 경우보다 2 배 느린 10mm/sec 로 설정하여 압출시간이 더 길어지도록 하였다. 해석에 사용된 빌렛과 다이의 치수를 Table 3에 나타내었다. 여기서 빌렛의 온도는 300°C , 마찰상수 $m=0.3$, 피복재와 심재의 마찰상수 $m=1$ 로 두고 해석하였다. Fig. 15는 해석을 위한 모델이다.

Fig. 16(a)~(d)는 다이와 슬리브의 온도가 250°C , 300°C 일 때 온도분포를 나타낸 것이다. 다이와 슬리브의 온도가 300°C 인 경우 다이출구 부근에서 520°C 인 영역이 존재하나 250°C 인 경우는 다이출구 부근에서 480°C 정도이다. 이는 다이와 슬리브의 온도가 더 높기 때문에 열전달량이 작기 때문이다.

Fig. 17(a)~(d)는 다이와 슬리브의 온도가 250°C , 300°C 일 때 유효응력분포를 나타낸 것이다. 다이와 슬리브의 온도가 300°C 인 경우는 압출초기인 $\delta=12.5\text{mm}$ 일 때 다이출구에서 200MPa , 정상상태인 $\delta=26\text{mm}$ 일 때 다이출구에서 160MPa 이나, 다이와 슬

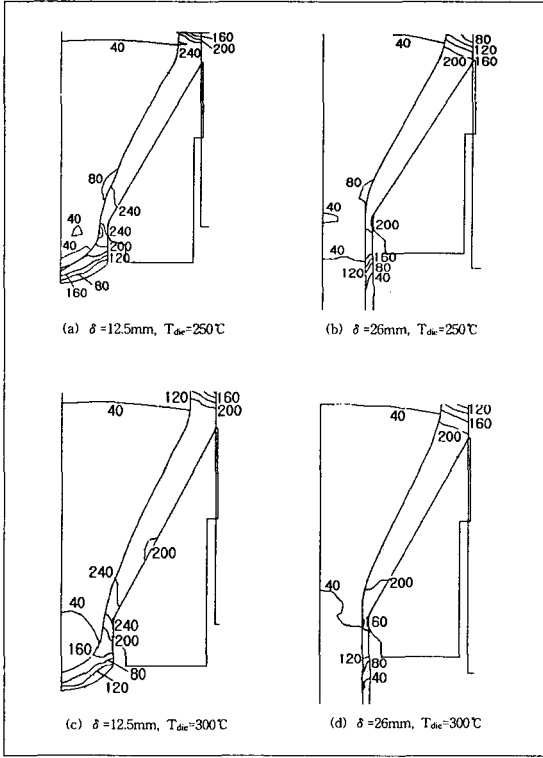


Fig. 17. Distribution of effective stress according to ram displacement and die temperature, $t=6\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $\phi_1=74\text{mm}$, $\phi_2=25\text{mm}$, $m=0.3$, $V_r=10\text{mm/sec}$, $T_m=300^\circ\text{C}$ in indirect extrusion process.(unit : MPa)

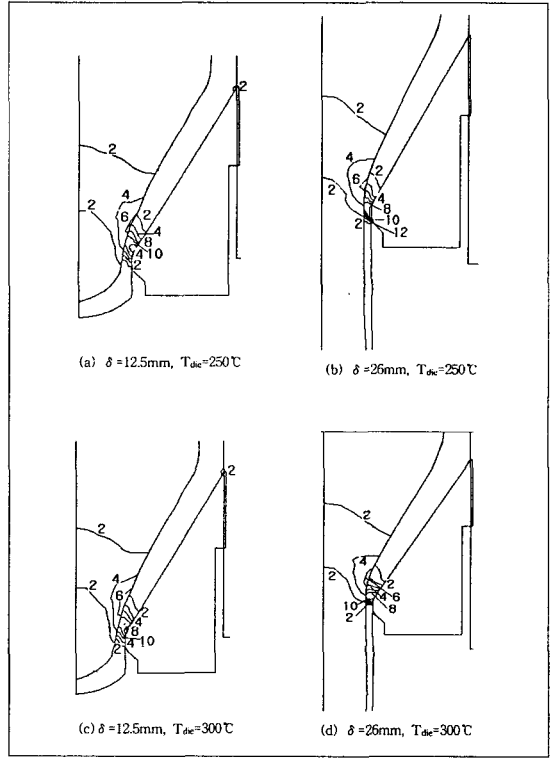


Fig. 18. Distribution of effective strain rate according to ram displacement and die temperature, $t=6\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $\phi_1=74\text{mm}$, $\phi_2=25\text{mm}$, $m=0.3$, $V_r=10\text{mm/sec}$, $T_m=300^\circ\text{C}$ in indirect extrusion process.(unit : sec^{-1})

리브의 온도가 250℃인 경우에는 다이출구의 유효응력이 압출초기에는 240MPa, 정상상태에는 200MPa로 다이와 슬리브의 온도가 300℃인 경우보다 높게 나타났다. 위의 원인은 Fig. 16(a)~(d)에 나타낸 바와 같이 다이와 슬리브의 온도가 300℃인 경우가 250℃인 경우보다 피복재부분의 온도가 더 높기 때문이다.

Fig. 18(a)~(d)는 다이와 슬리브의 온도가 250℃, 300℃일 때 유효변형률속도의 분포를 나타낸 것이다. 심재의 경우는 유효변형률속도가 다이와 슬리브의 온도가 300℃인 경우가 250℃인 경우보다 높게 나타났으며, 피복재의 경우는 다이와 슬리브의 온도가 250℃인 경우가 300℃인 경우보다 높게 나타났다. 위의 원인은 Fig. 1~6에 나타낸 바와 같이 온도가 상승 할수록 재료의 유효응력은 감소되기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 16(a)~(d)에 나타낸 바와 같이 다이와 슬리브의 온도가 300℃인 경우가 다이 출구부근에서 피복재의 온도가 심재의 온도보다 약 40℃ 더 높은 분포를

가지고, 다이와 슬리브의 온도가 250℃인 경우는 다이 출구부근에서 피복재의 온도가 심재의 온도보다 약 20℃ 더 높은 분포를 가진다. 때문에 유효응력이 더 큰 피복재의 온도가 유효응력이 더 작은 심재의 온도보다 높을수록 두 재료의 유효응력의 차이가 줄어든다. 따라서 다이와 슬리브의 온도가 300℃인 경우가 다이와 슬리브의 온도가 250℃인 경우보다 심재와 피복재간의 온도차이가 더 크기 때문에 두 재료간의 유효응력의 차이가 더 작다. 이 때문에 유효변형률속도의 차이가 더 작게 나타나는 것이다. Fig. 19(a)~(d)는 다이와 슬리브의 온도가 250℃, 300℃일 때의 인장응력분포를 조사하기위하여 평균응력이 양의 값을 가지는 분포를 나타낸 것이다. 평균응력의 값은 다이와 슬리브의 온도가 300℃보다 250℃인 경우가 크게 나타났다. 또한 다이와 슬리브의 온도가 250℃인 조건에서 압출해석을 한 경우 정상상태인 $\delta = 26\text{mm}$ 일 때 심재에도 평균응력이 양의 값을 가지는 영역이 나타난다. 이 경

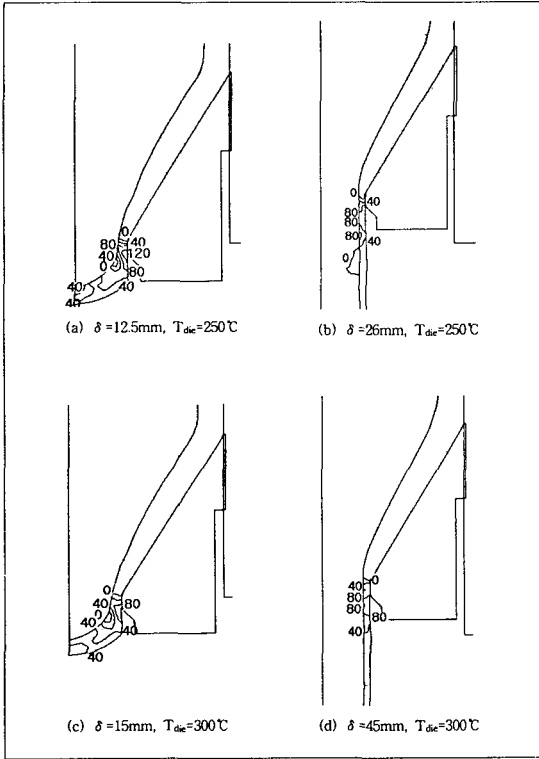


Fig. 19. Distribution of mean stress according to ram displacement and die temperature, $t=6\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $\phi_1=74\text{mm}$, $\phi_2=25\text{mm}$, $m=0.3$, $V_r=10\text{mm/sec}$, $T_m=300^\circ\text{C}$ in indirect extrusion process.(unit : MPa)

우는 피복재 뿐만 아니라 심재부분에도 결함 발생가능성이 존재한다.

6. 열간압출실험

6.1 열간압출실험

열간압출실험에는 400 ton급 수평형 열간 압출기를 사용하였다. 컨테이너 크기는 $74\phi \times 400L(\text{mm})$ 이며, 컨테이너 가열은 열선을 이용하여 임의의 온도로 제어가 가능하도록 설계하였다. 금형출구의 직경은 직접압출의 경우 30mm(압출비 : 5.4)와 40mm(압출비 : 3.06), 간접압출의 경우 25mm(압출비 : 7.84)와 28mm(압출비 : 6.25)로 실험을 하였다. 다이와 슬리브,빌렛은 300°C 로 예열하였으며, 램속도는 20mm/sec 로 설정하고 실험을 하였다. 빌렛과 금형과의 윤활제로는 Boron-Nitride Spray와 Carbon Oil을 이용하였다.

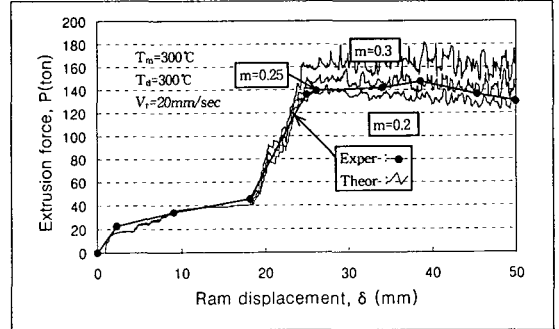


Fig. 20. The calculated results between the load and displacement, $\phi_1=74\text{mm}$, $t=6\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $V_r=10\text{mm/sec}$, $T_m=300^\circ\text{C}$, $T_d=300^\circ\text{C}$ in direct extrusion process

6.2 실험결과

Fig. 20 은 Fig. 8의 모델에서 마찰상수의 변화에 따른 압출력과 램변위의 선도를 나타낸 것이다. 압출변위 (δ)가 25mm 이후부터는 정상상태의 압출이 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 이때 압출력은 142 ton에 도달하고 있음을 알 수 있다. 해석결과와 출구직경이 40mm인 직접압출실험의 결과를 비교해보면 $m = 0.25$ 인 경우가 Carbon Oil을 윤활제로 사용하여 실험한 결과와 유사함을 알 수 있다. 정상상태에 있어서 압출의 진행과 더불어 유한요소법에 의하여 구한 압출력이 랜덤하게 변하는 이유는 해의 수렴성과 압출이 진행됨과 동시에 램의 길이가 감소함으로써 나타나는 현상으로 생각된다.

6. 결론

충상복합재료의 직접 및 간접압출공정에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 충상복합재료의 압출시 피복재부분에는 100 MPa 이상의 인장응력이 작용한다.
- (2) 피복재의 두께가 6mm인 경우가 4mm인 경우보다 압출시 결함발생가능성이 적다.
- (3) 다이출구의 직경이 큰 경우가 다이출구의 직경이 적은 경우보다 심재와 피복재간의 변형률속도의 차이가 작기 때문에 압출성이 개선되었다.
- (4) 다이와 슬리브의 온도가 빌렛의 온도보다 낮은 경우에는 유동응력의 차이를 심화시켜 이중충상복합재료의 압출성이 개선되지 않았으며, 금형과 소재 사이의 마찰계수의 값은 0.25로 예측되었다.

참고문헌

1. Story, J. M., Avitzur, B. and Hahn, W. C., Jr., "The Effect of Receiver Pressure on the Observed Flow Pattern in the Hydrostatic Extrusion of Bi-Metal Rods", J. of Eng. for Ind., Aug. 1976, pp.909-913.

2. Avitzur, B., Wu, R., Talbert, S. and Chou, Y. T., "Criterion for the Prevention of Core Fracture During Extrusion of Bimetal Rods", J. of Eng. for Ind., Aug. 1982, pp.293-304.

3. Yamaguchi, Y., Noguchi, M., Matsushita, T. and Nishihara, M., "Hydrostatic Extrusion of Clad Materials", J. of the Japan Soc. for Tech. of Plasticity, vol. 15, 1974, pp. 723-729.

4. Byon, S. M. and Hwang, S. M., "Die Shape Optimal Design in Bimetal Extrusion by the Finite Element Method", J. of Manufact. Science and Eng., vol.119, 1997 pp.143-150.

5. Park, H. J., Na, K. H., Cho, N. S., Lee, Y. S. and Kim, S. W., "A study of the Hydrostatic Extrusion of Copper-clad Aluminum Tube", J. of Mat. Proc. Tech., vol. 67, 1997, pp.24-28.

6. Park, H. J., Na, K. H., Cho, N. S. and Lee, Y. S. "Hydrostatic Extrusion of Copper-Clad Aluminum Rod", J. of the Korean Society for Tech. of Plasticity, vol.4-2, 1994, pp. 123-130.

7. Senri Ikera, Sakae Saito, "Manufacturing Process and Properties of Clad Metals by Plastic Working", J. Master. Process. Tech. vol. 45, 1994, pp. 395-400.

8. "DEFORM User's Manual", Scientific Forming Technologies Co. vol.6-89, 1995.

9. Altan, T., Oh, S. I. and Gegel, H. L., "Metal Forming Fundamentals and Applications", American Society for Metals, 1983, pp. 85-87.

10. Bakhshi-Jooybari, M., Pillingers, I., Hartley, P. and Dean, T. A., "Finite Element Simulation and Experimental Study of Hot Closed-Die Upsetting", Int. J. Mack. Tools Manufact. vol. 36, No. 9, 1996, pp. 1021-1032.

11. Udagawa, T., Kropp, E. and Altan, T., "Investigation of Metal Flow and Temperatures by FEM in the Extrusion of Ti-6Al-4V Tubes", J. of Mat. Proc. Tech., vol.33, 1992, pp. 155-174.