

층상복합재료의 직접/간접압출공정해석의 비교

A Comparison of Direct/Indirect Extrusion Process Analysis of Clad Composite Materials

김정인*, 권혁천**, 강충길***

*ATES, **한국생산기술연구원, ***부산대학교 기계공학부

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

*ATES, **Korea Institute of Industrial Technology, ***Pusan National Uni.

ABSTRACT

A clad material is a different type of the typical composites which is 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 process 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.

Key Words : Clad material (층상복합재료), Extrusion (압출), Sheath material (피복재), Core Material (심재)

1. 서론

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. 이와같은 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 절약되고, 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 Story등¹⁾은 초전도체/Al피복 층상복합재의 정수압압출에 대하여 압출압력의 영향에 대하여 연구하였다. Avitzur등²⁾은 층상복합재료의 압출에서 심재와 피복재의 반경비 및 강도의 비가 압출성에 미치는 영향을 연구하였다. Yamaguchi등³⁾은 정수압압출공정에서 층상복합재료의 채적분율 및 유동응력비에 따른 압출한계에 대하여 연구하였다. Byon등⁴⁾은 유한요소법을 이용하여 층상복합재료의 압출금형의 최적형상을 제안하였다.

Park등⁵⁾은 정수압압출법으로 Al/Cu 층상복합재료의 튜브 압출에 관하여 유한요소해석을 하였고 실험을 통하여 검증하였다. Park등⁶⁾은 정수압압출법으로 Al/Cu 층상복합재료의 봉 압출에 관하여 유한요소해석을 하였고 실험을 통하여 검증하였다.

현재까지의 이종층상복합재료의 압출에 관한 연구는 정수압압출법을 이용한 것이 대부분이었으며,

직접 및 간접압출법에 있어서 금형설계와 관련지어 해석한 결과를 실험결과와 비교검토한 예는 찾아볼 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 향후 버스바 (Bus Bar)에 이용하기 위한 Al/Cu 피복 이중복합재료의 압출공정에 필요한 공정해석을 수행하여 압출시 재료의 거동현상을 파악하였다.

2 압축실험

압출해석에 필요한 물성치를 구하기 위하여 압축실험에 사용한 소재로 압축실험을 수행하였다. 단순 압축실험은 MTS(Material Test System)에 전기로를 부착하여 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 실험 한 결과를 이용하였다.

3. 이중층상복합재료의 압출특성해석

3. 1 경계조건

직접 및 간접압출의 경우에 대하여 축대칭 유한요소해석을 행하였다. 유한요소해석은 DEFORM을 이용하였다. 빌렛과 램, 빌렛과 다이, 심재와 피복재간의 열전달계수는 $30\text{kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 로 가정하였으며⁷⁾, 변형에너지에 의한 열생성률은 0.9로 가정하였다⁷⁾.

빌렛과 다이 및 램과의 마찰상수 $m=0.3$ 으로 가정하였고^{8),9)}, 심재와 피복재간의 마찰상수 $m=1$ 로 가정하였다²⁾. 여기서 마찰상수가 1인 경우는 마찰력이 재료의 전단항복응력과 같은 경우이다. 따라서 마찰력이 두 재료의 전단항복응력 이상의 값을 가지는 경우 두 재료간의 미끄럼이 일어난다.

3. 2 해석모델

압출특성해석은 빌렛의 온도는 300°C 로 두고 피복재의 두께, 압출비, 다이와 슬리브의 온도 등을 변수로 하여 해석하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 빌렛과 다이의 형상이다.

피복재의 두께에 대한 영향을 알아보기 위하여 피복재의 두께를 4mm와 6mm로 변화를 주어 해석을 하였다. 해석에 사용된 빌렛과 다이의 치수를 Table 1에 나타내었다.

여기서 빌렛과 다이의 온도는 300°C , 마찰상수는 0.3, 피복재와 심재의 마찰상수는 1, 램속도는 20mm/sec로 두고 해석을 하였다. Fig. 2는 해석을 위한 유한요소모델을 나타낸 것이다.

Table 1 Billet and die dimensions for direct extrusion process

Billet	Sheath thickness $t(\text{mm})$	Billet height $H_1(\text{mm})$	Conic height $H_2(\text{mm})$	Sheath billet diameter $D_1(\text{mm})$	Core billet diameter $D_2(\text{mm})$	Conic diameter $d(\text{mm})$
	4	200	16	62	74	38
	6	200	16	58	74	38
Die	Sleeve diameter $\psi_1(\text{mm})$	Die outlet diameter $\psi_2(\text{mm})$	Die height $h_1(\text{mm})$	Bearing length $h_2(\text{mm})$	Die semi angle α°	
	74	40	29.4	4	30	

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.

4. 결과 및 고찰

4.1. 간접압출

Fig. 3(a)~(d)는 피복재의 두께가 4, 6mm일 때 온도분포를 나타낸 것이다. 두께 변화에 따른 온도분포는 별 차이가 없었다. 두 경우 모두 압출초기인 $\delta=15\text{mm}$ 인 경우에는 다이의 입구부근에서는 피복재의 온도가 심재의 온도보다 낮으며, 다이의 출구부근에서는 피복재의 온도가 심재의 온도보다 높음을 알 수 있다. 이는 다이와 슬리브의 온도가 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. 4(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 피복재로 사용된 알루미늄의 유효응력보다 매우 크기 때문이다. 압출초기인 $\delta=15\text{mm}$ 인 경우에는 피복재의 두께가 4mm인 경우가 6mm인 경우보다 피복재영역에서의 유효응력이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5(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 유효응력의 차이로 인해 심재의 유속이 피복재의 유속보다 크기 때문이며, 다이출구에서는 다이내부에서의 유속차이로 인해 상대적으로 변형량이 적었던 피복재부분이 급격하게 변형을 일으키기 때문이다.

Fig. 6(a)~(d)는 피복재의 두께가 4, 6mm일 때 인장응력분포를 조사하기 위하여 평균응력이 0 보다 큰 값을 가지는 분포를 나타낸 것이다. 압출재에서 피복재 부분은 출구직경의 변화와 무관하게 인장력이 작용함을 알 수 있다. 압출시 인장응력이 작용하는 부분은 결함발생가능부위로 볼 수 있다.¹⁰⁾ 이중복합재료의 압출에서 피복재에 광범위하게 인장응력이 작용하는 것은 금형과 빌렛과의 마찰로 인한 영향과 심재와 피복재간의 유효응력의 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 결함발생의 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 $m=1$, 랩속도는 20mm/sec로 두고 해석을 하였다. Fig. 7은 해석을 위한 모델이다.

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	74	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	

Fig. 8(a)~(d)는 다이출구의 직경이 40, 30mm일 때 유효변형률속도의 분포를 나타낸 것이다. 다이출구의 직경이 30mm인 경우가 40mm인 경우보다 피복재부분에서의 유효변형률속도가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9(a)~(d)는 다이출구의 직경이 40, 30mm일 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, $\delta=60\text{mm}$ 인 경우에는 다이출구의 직경이 40mm인 경우가 30mm인 경우보다 더 큰 값을 나타내고 있다. 이는 다이출구의 직경이 30mm인 경우가 40mm인 경우보다 온도상승이 크기 때문이다.

4. 2 간접압출

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.

Table 3 Billet and die dimensions for indirect 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)
		6	200	16	58	74
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	25	42.44	4	30	

Fig. 10은 해석을 위한 모델이다. 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 주기위하여 램속도를 직접압출해석의 20mm/sec 의 경우보다 2배 느린 10mm/sec 로 설정하여 압출시간이 더 길어지도록 하였다.

Fig. 11(a)~(d)는 다이와 슬리브의 온도가 250°C , 300°C 일 때 유효변형률속도의 분포를 나타낸 것이다. 심재의 경우는 유효변형률속도가 다이와 슬리브의 온도가 300°C 인 경우가 250°C 인 경우보다 높게 나타났으며, 피복재의 경우는 다이와 슬리브의 온도가 250°C 인 경우가 300°C 인 경우보다 높게 나타났다. 위의 원인은 다음과 같다. Fig. 12(a)~(d)는 다이와 슬리브의 온도가 250°C , 300°C 일 때의 인장응력분포를 조사하기 위하여 평균응력이 양의 값을 가지는 분포를 나타낸 것이다. 평균응력의 값은 다이와 슬리브의 온도가 300°C 보다 250°C 인 경우가 크게 나타났다. 또한 다이와 슬리브의 온도가 250°C 인 조건에서 압출해석을 한 경우 정상상태인 $\delta=25\text{mm}$ 일 때 심재에도 평균응력이 양의 값을 가지는 영역이 나타난다. 이 경우는 피복재 뿐만 아니라 심재부분에도 결함 발생가능성이 존재한다.

6. 결론

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

- (1) 이중충상복합재료의 압출시 피복재부분에는 100MPa 이상의 인장응력이 작용한다.
- (2) 피복재의 두께가 6mm 인 경우가 4mm 인 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 않았다.

7. 참고문헌

- 1) J. M. Story, B. Avitzur and W. C. Hahn, Jr., "The Effect of Receiver Pressure on the Observed Flow Pattern in the Hydrostatic Extrusion of Bi-Metal Rods", Journal of Engineering for Industry, pp.909-913, Aug. 1976.
- 2) B. Avitzur, R. Wu, S. Talbert and Y. T. Chou, "Criterion for the Prevention of Core Fracture During Extrusion of Bimetal Rods", Journal of Engineering for Industry, pp.293-304, Aug. 1982.
- 3) Y. Yamaguchi, M. Noguchi, T. Matsushita and M. Nishihara, "Hydrostatic Extrusion of Clad Materials", Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, vol. 15, pp. 723-729, 1974
- 4) S. M. Byon and S. M. Hwang, "Die Shape Optimal Design in Bimetal Extrusion by the Finite Element Method", Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol.119, pp.143-150, 1997.
- 5) H. J. Park, K. H. Na, N. S. Cho, Y. S. Lee and S. W. Kim, "A study of the Hydrostatic Extrusion of Copper-clad Aluminum Tube", Journal of Material Processing Technology, vol. 67, pp.24-28, 1997.
- 6) H. J. Park, K. H. Na, N. S. Cho and Y. S. Lee, "Hydrostatic Extrusion of Copper-Clad Aluminum Rod", J. of the Korean Society for Technology of Plasticity, 4-2, pp. 123-130, 1994.
- 7) "DEFORM User's Manual", Scientific Forming Technologies Co. 6-89, 1995.
- 8) T. Altan, S. I. Oh and H. L. Gegel, "Metal Forming Fundamentals and Applications", Americal Society for Metals, pp. 85-87, 1983.
- 9) M. Bakhshi-Jooybari, I. Pillingers, P. Hartley and T. A. Dean, "Finite Element Simulation and Experimental Study of Hot Closed-Die Upsetting", Int. J. Mack. Tools Manufact. vol. 36, No. 9, pp. 1021-1032, 1996.
- 10) T. Udagawa, E. Kropp and T. Altan, "Investigation of Metal Flow and Temperatures by FEM in the Extrusion fo Ti-6Al-4V Tubes", Journal of Material Processing Technology, 33, pp. 155-174, 1992.

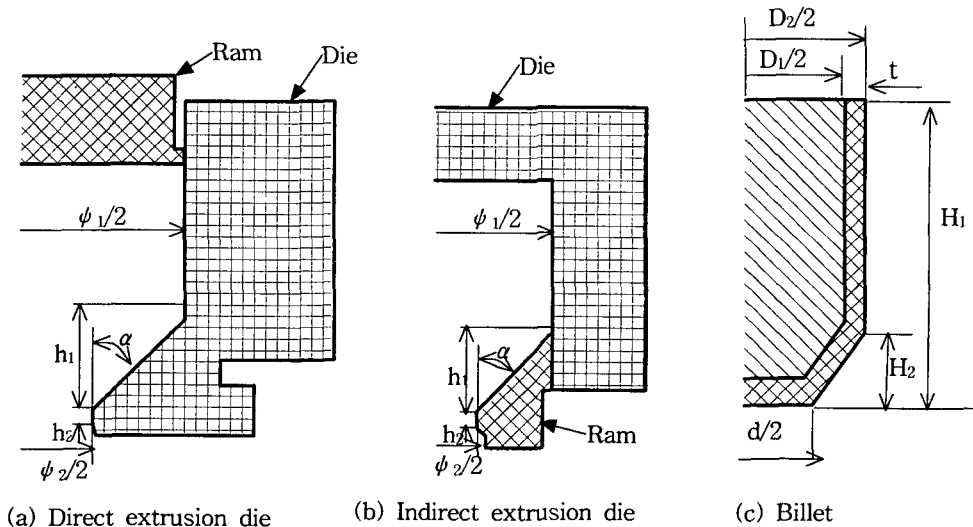


Fig1. Billet and dies used for direct extrusion of clad composite.

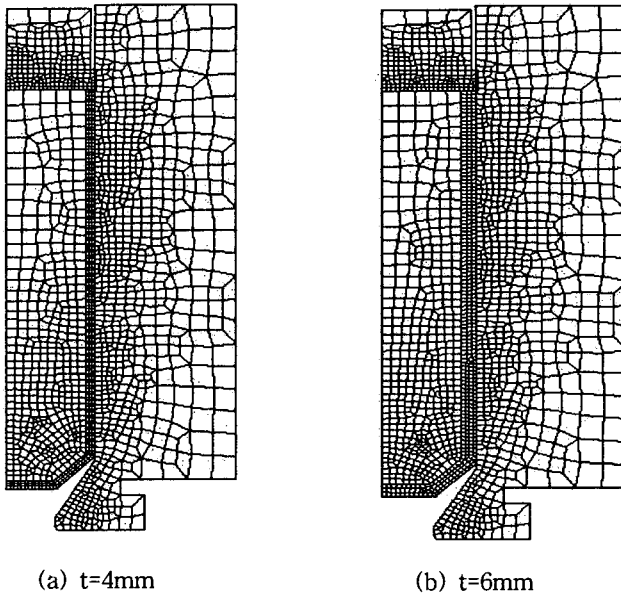


Fig. 2 Mesh discretizations for direct extrusion process analysis.

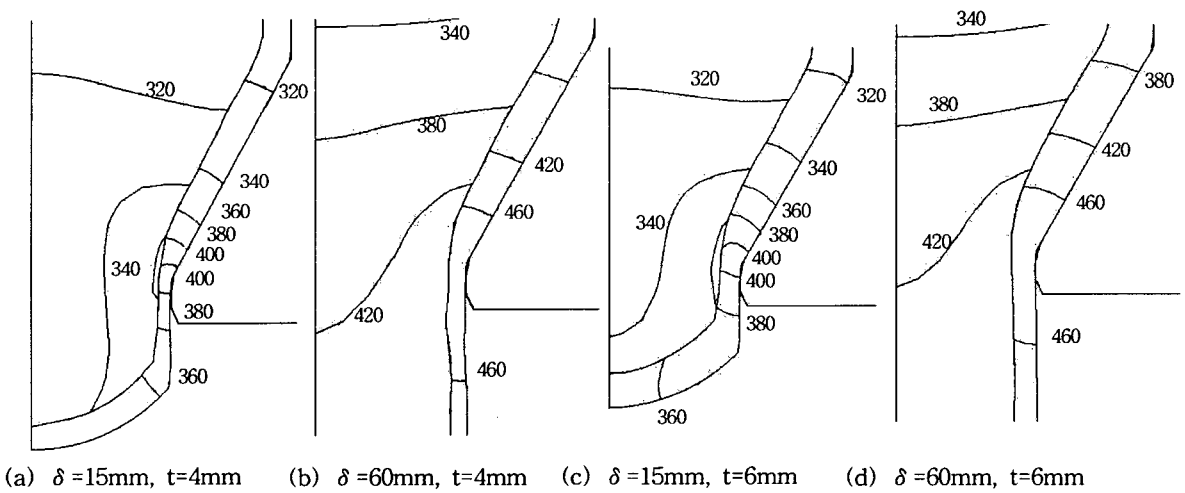
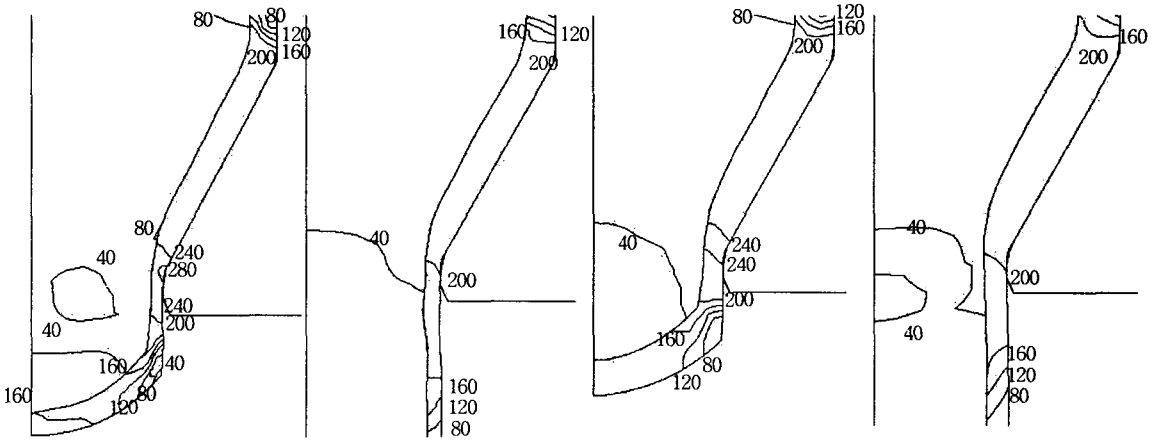
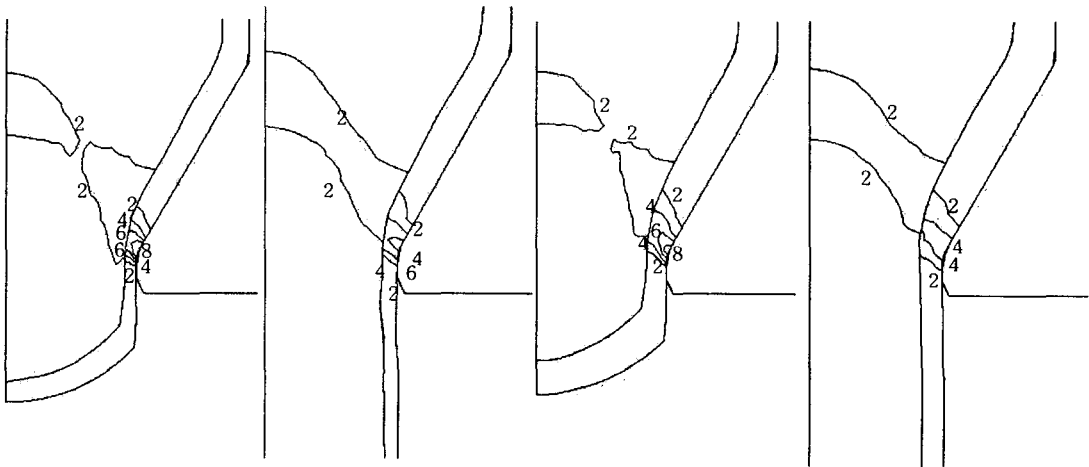


Fig. 3 Distribution of temperature according to ram displacement and sheath thickness,
 $\psi_1=74\text{mm}$ $\psi_2=40\text{mm}$, $\alpha=30^\circ$, $T_m=300^\circ\text{C}$, $T_d=250^\circ\text{C}$, $m=0.3$, $V_r=20\text{mm/sec}$
 in direct extrusion process. (unit : $^\circ\text{C}$)



(a) $\delta = 15\text{mm}$, $t = 4\text{mm}$ (b) $\delta = 60\text{mm}$, $t = 4\text{mm}$ (c) $\delta = 15\text{mm}$, $t = 6\text{mm}$ (d) $\delta = 60\text{mm}$, $t = 6\text{mm}$

Fig. 4 Distribution of effective stress according to ram displacement and sheath thickness, $\psi_1 = 74\text{mm}$ $\psi_2 = 40\text{mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $T_m = 300^\circ\text{C}$, $T_d = 250^\circ\text{C}$, $m = 0.3$, $V_r = 20\text{mm/sec}$, in direct extrusion process. (unit : MPa)



(a) $\delta = 15\text{mm}$, $t = 4\text{mm}$ (b) $\delta = 60\text{mm}$, $t = 4\text{mm}$ (c) $\delta = 15\text{mm}$, $t = 6\text{mm}$ (d) $\delta = 60\text{mm}$, $t = 6\text{mm}$

Fig. 5 Distribution of effective strain rate according to ram displacement and sheath thickness, $\psi_1 = 74\text{mm}$, $\psi_2 = 40\text{mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $T_m = 300^\circ\text{C}$, $T_d = 250^\circ\text{C}$, $m = 0.3$, $V_r = 20\text{mm/sec}$, in direct extrusion process. (unit : sec^{-1})

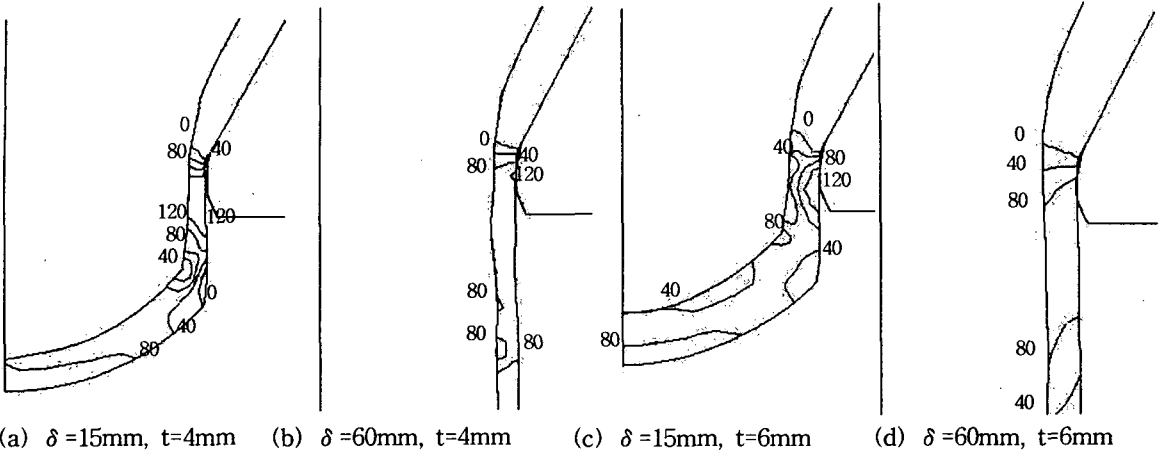


Fig. 6 Distribution of mean stress according to ram displacement and sheath thickness,
 $\psi_1 = 74\text{mm}$, $\psi_2 = 40\text{mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $T_m = 300^\circ\text{C}$, $T_d = 250^\circ\text{C}$, $m = 0.3$, $V_r = 20\text{mm/sec}$,
 in direct extrusion process. (unit : MPa)

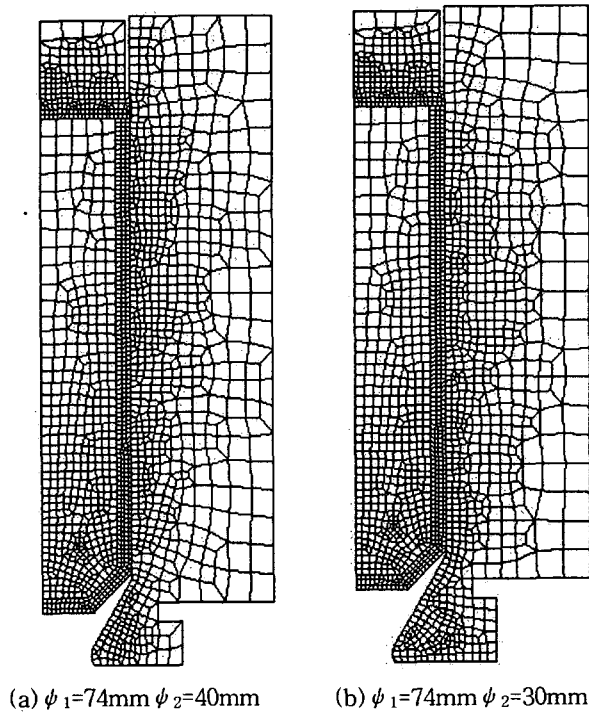
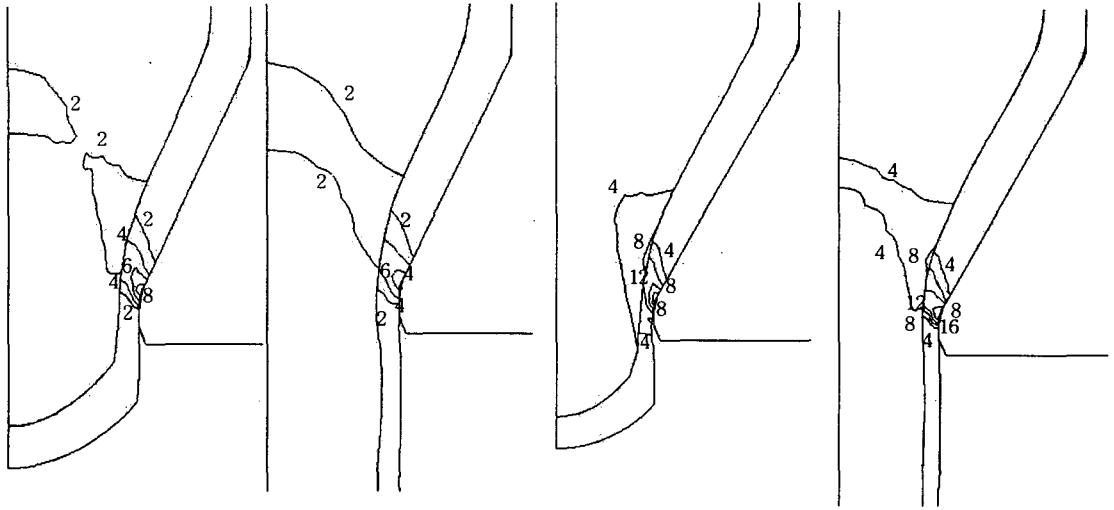
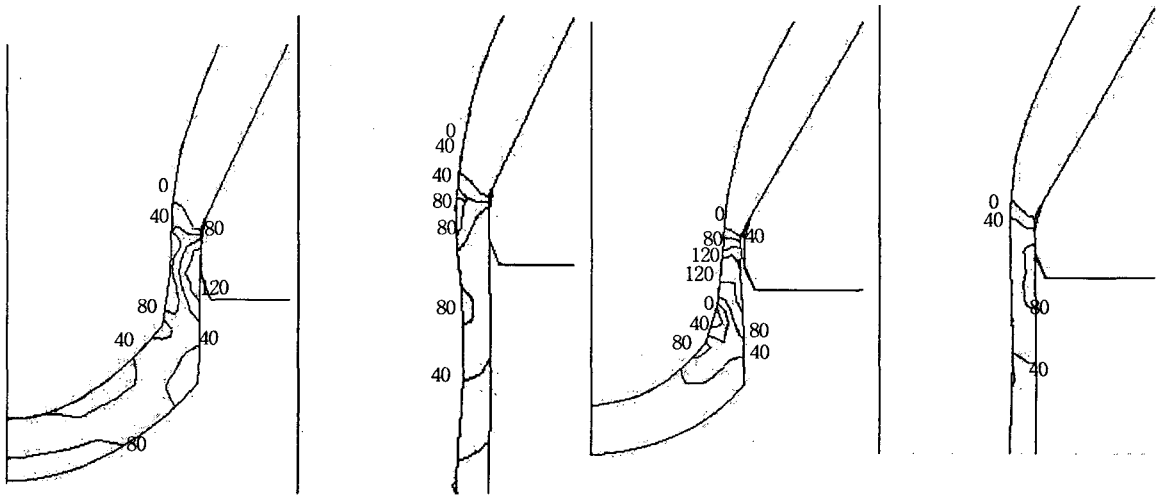


Fig.7 Mesh discretizations for direct extrusion process analysis.



(a) $\delta = 15\text{mm}$, $\psi_2 = 40\text{mm}$ (b) $\delta = 45\text{mm}$, $\psi_2 = 40\text{mm}$ (c) $\delta = 15\text{mm}$, $\psi_2 = 30\text{mm}$ (d) $\delta = 45\text{mm}$, $\psi_2 = 30\text{mm}$

Fig. 8 Distribution of effective strain rate according to ram displacement and outlet diameter, $\psi_1 = 74\text{mm}$, $t = 6\text{mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $T_m = 300^\circ\text{C}$, $T_d = 250^\circ\text{C}$, $m = 0.3$, $V_r = 20\text{mm/sec}$, in direct extrusion process. (unit : sec^{-1})



(a) $\delta = 15\text{mm}$, $\psi_2 = 40\text{mm}$ (b) $\delta = 45\text{mm}$, $\psi_2 = 40\text{mm}$ (c) $\delta = 15\text{mm}$, $\psi_2 = 30\text{mm}$ (d) $\delta = 45\text{mm}$, $\psi_2 = 30\text{mm}$

Fig. 9 Distribution of mean stress according to ram displacement and outlet diameter, $\psi_1 = 74\text{mm}$, $t = 6\text{mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $T_m = 300^\circ\text{C}$, $T_d = 250^\circ\text{C}$, $m = 0.3$, $V_r = 20\text{mm/sec}$, in direct extrusion process. (unit : MPa)

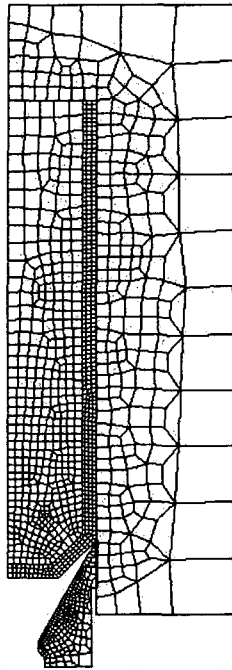
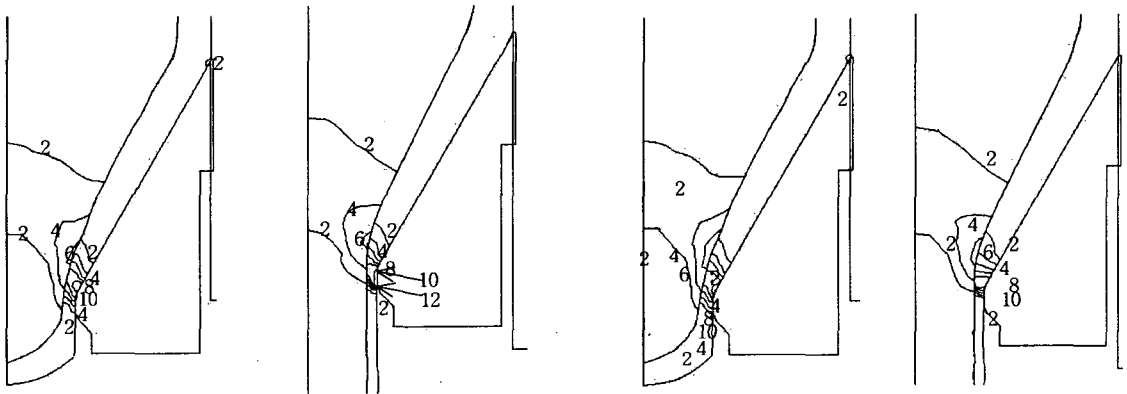
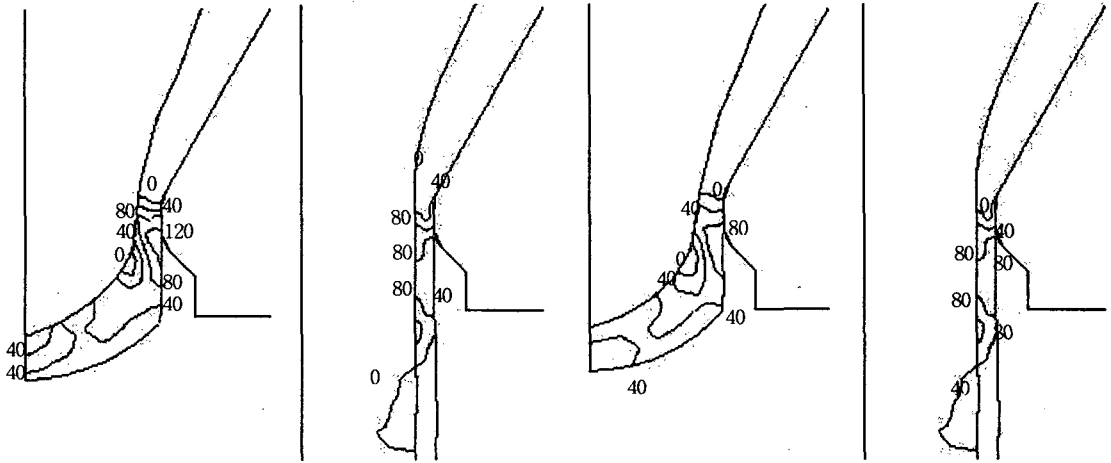


Fig. 10 Mesh discretization for indirect extrusion process analysis.



(a) $\delta = 12.5\text{mm}$, $T_{\text{die}} = 250^\circ\text{C}$ (b) $\delta = 26\text{mm}$, $T_{\text{die}} = 250^\circ\text{C}$ (c) $\delta = 12.5\text{mm}$, $T_{\text{die}} = 300^\circ\text{C}$ (d) $\delta = 26\text{mm}$, $T_{\text{die}} = 300^\circ\text{C}$

Fig. 11 Distribution of effective strain rate according to ram displacement and die temperature, $t = 6\text{mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $\psi_1 = 74\text{mm}$, $\psi_2 = 25\text{mm}$, $m = 0.3$, $V_r = 10\text{mm/sec}$, $T_m = 300^\circ\text{C}$ in indirect extrusion process. (unit : sec^{-1})



(a) $\delta = 12.5\text{mm}$, $T_{\text{die}} = 250^\circ\text{C}$ (b) $\delta = 26\text{mm}$, $T_{\text{die}} = 250^\circ\text{C}$ (c) $\delta = 15\text{mm}$, $T_{\text{die}} = 300^\circ\text{C}$ (d) $\delta = 45\text{mm}$, $T_{\text{die}} = 300^\circ\text{C}$

Fig. 12 Distribution of mean stress according to ram displacement and die temperature,
 $t = 6\text{mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $\psi_1 = 74\text{mm}$, $\psi_2 = 25\text{mm}$, $m = 0.3$, $V_r = 10\text{mm/sec}$, $T_m = 300^\circ\text{C}$
in indirect extrusion process. (unit : MPa)