

컵-컵형 축대칭 복합압출에 관한 실험적연구

김 영득*, 한 철호**

* 금오공대 기계설계과 대학원, ** 금오공대 생산기계공학과

An Experimental Study for the CUP-CUP Axisymmetric Combined Extrusion

Young-Deak Kim*, Chul-Ho Han**

* Dept. Eng. Sci. & Mech. ** Dept. Mech. Prod. Eng. , KNUT.

ABSTRACT

Effect of some process variables including area reduction, stroke advance, materials on the extrusion load, plastic flow and height ratio of upper to lower extruded parts in the cup-cup axisymmetric extrusion were experimentally investigated and analyzed. Deformed pattern is visualized by grid-marking technique using half-cut billets splitted. The influence of using split specimen and original specimen on the extrusion load and height ratio is examined by experiment.

Key Words : Extrusion load(압출하중), Plastic flow(소성유동), Dead metal zone(비유동영역), Height ratio of extruded material(압출재의 유출높이비).

1. 서 론

복합압출에 의한 성형가공은 비교적 재료손실이 거의 없고 단일공정으로 완제품을 얻을 수 있다는 점에서 매우 중요하고도 유용한 공정법이라 할 수 있다. 단순 전방압출과 후방압출에 대해서는 많은 이론 및 실험적 연구결과들이 발표되었으나 복합압출에 대해서는 그 유용성에 비해 연구결과가 많지않다. 이는 복합압출공정에서는 압출되어 나오는 소재의 소성유동이 두방향 이상이며 이들이 상호 구속되어 있고 비정상상태의 유동이어서 해석상의 어려움이 있기 때문이다. 상하 컵형상인 컵-컵형 제품은 자동차 및 각종 기계부품으로 사용되고 있으며 복합압출공정을 통해 제조되는 주요 공정중의 하나이다.

60년대초 Kudo^[1]는 냉간의 축대칭 압출 및 단조의 경우 단순이론해 및 실험결과를 제안하였으며 최근 컵-컵형 복합압출 공정의 유동흐름 조절에 대한 연구^[2]를 발표한 바 있다. Wushicun 등^[3]은 컵-컵형 축대칭 복합압출에 대한 압출하중의 상계해를 제안하였다. 그러나 이러한 연구결과들은 주로 압출하중의 관점에서 분석하였으며 소성유동이나 변형양상에 대한 고려는 미흡하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 컵-컵형 복합압출공정에 대하여 상하부펀치의 단면감소율과 펀치진행거리 및 재질에 대해 압출하중, 소성유동, 상하부로의 재료유출비와 비유동역 등 변형양상에 미치는 영향을 실험적으로 분석검토하며 실험결과 분석시 연관된 실험장치의 탄성변형고려법 및 분할시편 사용에 의한 오차정도에 대한 실험적 연구를 수행하고자 한다.

2. 실험장치구성 및 방법

2.1 실험 장치 구성

Fig. 2는 실험을 위해 제작된 금형장치를 100 ton 용량의 만능시험기(Shimadzu UEH 100)에 장착하였을때의 사진이다. 시편이 Fig. 2의 금형다이 ⑤의 내부에 장착되고, 상부 펀치가 시편 상면에 근접될때까지 ①을 이동시킨 뒤 하중을 가하면 ⑤⑥⑦ 및 시편이 함께 상부로 이동하여 성형이 이루어지며 이어서 하부의 녹아웃핀 ③을 상부로 이동시켜 성형제품을 추출시키는 장치로 구성되어 있다.

계측장치로는 만능시험기에 부착되어있는 하중계의 출력을 X-Y-Y 기록계(HP 7046)의 Y축에 연결하고 펀치의 행정은 시험기에 장착된 전위차계(potentiometer, Moog Inc.)의 출력을 기록계의 X축에 연결시켜 압출하중의 측정과 동시에 변위가 그래프 용지에 기록되도록 하였다. 사용된 펀치의 치수는 상하부 직경이 각각 15, 18, 21, 24(mm)인 4종씩으로 하고 펀치는 탠드가 없는 형상으로 설계제작 하였다. 실험을 위해 사용된 소재들은 원재료의 잔류응력 및 조직을 풀어주고자 전기로(BLUE M 51828)를 이용하여 Al 2024에 대해 350°C에서 6시간 풀림처리하였고 동은 670 °C에서 5시간 풀림하였다. 압축시험편은 ASTM 시편규격^[4]에 의하여 직경대 길이를 $\phi 30 \pm 0.01 \times H40(mm)$ 로 가공하고 링압축시편은 내경,외경,높이비가 6:3:2가 되도록 30, 15, 10(mm)로 가공하였다.

시편의 치수는 $\phi 30 \pm 0.05(mm) \times H40 \pm 0.02(mm)$ 로 가공하였다. 분할시편은 압출성형시 금속의 소성유동흐름을 가지적으로 관찰해보기위해 제작한것으로 이는 먼저 온시편을 가지고 종축을 중심으로 2등분이 되게 기계가공하고 반쪽시편의 분할면상에 미세격자 1.0mm × 1.0mm로 포토에칭법^[5]하여 그리딩을 한후 이를 서로 겹쳐 하나의 완전시편으로 만든뒤 소성유동실험을 할 수 있도록 준비하였다.

2.2 실험 방법

압축 및 링압축시험

보통 성형가공에 있어서 냉간가공에 있어서는 변형율속도가 크지 않으면 다음과 같은 지수함수형의 유동응력 표현식을 사용 하였다.

$$\bar{\sigma} = C \bar{\epsilon}^n \text{ ----- (1)}$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 상당응력이고 $\bar{\epsilon}$ 는 상당변형율을 의미하며 압출재에 대한 위형태의 응력변형율관계를 얻기위해 본 실험은 저속으로 상온하에서 압축실험을 수행하였다. 압축시험은 최종변형도가 약 1.0정도까지 매 20% 높이감소율마다 벌징현상을 방지하기위해 테프론 테이프를 시편의 상하면에 균일하게 붙이면서 실험하였고 이로부터 하중-변위곡선 실험데이터를 얻어 응력-변형율선도를 구한뒤 최소자승법을 이용하여 소성계수 C와 소성가공경화지수 n값을 구했다.

시편과 금형접촉면 사이에서의 마찰상수를 측정하기위해 링압축 시험을 수행하였다. 윤활제는 (MoS₂+10% wt)로 하여 압출재 종류별로 실험하고 그 결과로부터 기존의 보정곡선과 비교하여 마찰상수 m을 구하였다.

압출실험

실험시편은 Al 2024를 주 실험대상으로 하였고 구리에 대해서도 실험을 수행하였다. 이러한 소재들은 압출하중의 감소와 제품표면의 향상을 위해 MoS₂(10% wt)분말에 상용그리스(KSM 2130)를 섞어서 윤활제로 사용하였고 실제 실험에 있어서 변형율속도의 영향을 무시할 수 있도록 하기위해 압출속도(9.16 × 10⁻² mm/sec)를 낮게 하여 수행하였다.

실험에는 온시편과 분할시편이 사용되는데 이들로부터 얻어지는 결과들 중 소성변형유

동실험을 제외하고는 압출하중 및 재료유출비등을 조사하기 위해 두시편중 은시편을 취하였다. 실험은 동일조건에서 반복실험을 하였으며 부분적으로 값의 변화가 있는 경우 평균값을 취하였다. 압출하중 및 압출재의 유출높이비는 분할시편의 경우 오차를 포함할 수 있기 때문에 은시편에 의한 실험 데이터값을 취하였고 소성변형유동형상 실험은 분할시편으로 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축 및 링압축시험결과와 고찰

재료의 유동응력과 마찰상수를 얻기위한 압축시험 및 링압축시험결과가 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 Al 2024와 Pb의 압축실험결과는 식(1)의 형태로 양호하게 함수화되지만 Cu의 경우에는 중간 이후부터 지수함수표현이 적합하지 않으며 결정된 함수형은 변형도율이 약 0.5정도까지 유용하리라 본다. Fig. 4는 링압축시험 결과를 보정선도에서 표현한 것인데 Pb가 가장 마찰상수가 작고 Cu와 Al 2024순으로 마찰상수가 커지고 있다. 이는 동일윤활제 사용시도 재질에 따라 마찰상수값이 달라진다는 것을 의미한다. Table 1은 압축시험 및 링압축시험결과에 대한 결과값을 보여주고 있다.

3.2 압출실험 결과 및 고찰

압출하중

Fig. 5는 본 연구에서 수행한 압출된 시편들의 일부를 보여주고 있다. 압출제품의 표면상태는 Cu의 경우가 대단히 양호하였고 Al 2024의 경우보다 표면상태가 양호하였다. 압출실험중 펀치진행거리와 압출하중을 계측하였으며 X-Y-Y 기록계에 기록된 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와같이 압출종료후 하중을 제거하면 진행거리에 있어서 변화가 생기는데 이는 실험장치 자체의 탄성회복이 원인으로 이를 보정하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$P = k)_{eq} \cdot \delta \text{ ----- (2)}$$

여기서 P 는 압출하중이고 δ 는 실험장치의 탄성변형량이며 $k)_{eq}$ 는 등가스프링상수로 동일시험조건에서는 $k)_{eq}$ 가 동일한 것으로 처리 보정하였다. 따라서 실 진행거리는 기록된 값에서 탄성변형량값을 뺀값으로 결정된다.

식(2)에의해 Fig. 6을 보정한 실험결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 그림은 초기에서부터 하중변화가 거의 없는 정상상태까지에 해당하며 하부단면감소율(RAF)이 36%로 일정하고 상부단면감소율(RAB)이 변화할때 펀치진행에 따라 압출하중이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 어느 펀치조합에서나 초기하중이 급격히 상승하고 점차 하중증가가 완만해지며 펀치진행이 10mm(펀치반경의 약 1/3정도)부터는 하중변화가 없는 정상상태에 도달하게 된다. 상부단면감소율이 증가하면 하중은 전반적으로 상승하고 있으며 상부단면감소율이 하부보다 큰 (A), (B)의 경우는 하중의 큰 변화가 없고 상부단면감소율이 더 작은 경우는 하중변화가 큰데 즉 이것은 하중이 낮은 단면감소율의 영향을 더 받는다는 것을 시사하고 있다.

상하부의 단면감소율변화에 따른 정상상태의 압출하중의 변화가 Fig. 8에 나타나 있다. 그림에서 상하 단면감소율중 어느 한쪽이 일정할때 반대쪽 단면 감소율이 커지면 하중값은 증가하며 상부나 하부중 어느 한쪽의 단면감소율이 상당히 낮은 경우(25%)는 다른 쪽의 단면감소율이 변화하더라도 하중변화는 거의 없다. 이는 낮은 단면감소율쪽에서만 변형이 일어난다는 것을 의미하며 앞의 Fig. 7의 결과와 일치하고 있다.

복합압출실험시 하중이 거의 일정한 정상상태를 지나 펀치를 더 진행시키면 다시 압출 하중은 변하며 Fig. 9는 RAF 64%시 RAB가 변화하면 펀치진행거리에 따라 하중이 어떻게 변하는지 보여주고 있다. 초기하중부분에서는 압입상태로 압출하중이 급격히 증가되어지며 정상상태하중을 지나면 마찰부위가 줄어들어 약간의 하중감소경향을 띠고 있다.

펀치가 더욱 진행하여 상하펀치사이의 간격이 펀치와 벽사이의 틈새와 거의 같아지면 하중이 급격히 증가하는 현상을 관찰 할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 하중의 펀치진행거리에 대한 변화는 초기 하중이 증가하는 초기비정상상태와 일정하중이 유지되는 정상상태 그리고 최종단계의 하중이 부분 감소후 증가하는 후기비정상상태로 하중관점에서 구분할 수가 있다.

압출제품의 기하학적 양상

압출된 높이는 최종제품의 치수를 결정하는 중요한 요소가되며 이를 검토하기위해 Fig. 10과 Fig. 11에 단면감소율과 펀치진행거리 및 재질에 따른 상하부 유출높이를 계속하였다. 압출후 상하로 유출된 재료부의 끝이 시편안으로 비스듬한 경사모양을 하는데 압출된 이러한 높이는 깊이측정기로 여러 포인트를 반복측정후 평균값을 취하였다.

Fig. 10은 임의 상하단면감소율에 대해 정상상태까지 펀치를 진전시켰을때 상하부로 압출된 유출 높이비(H_2/H_1)를 비교하여 보여주고 있다. 여기서 H_1 은 하부로, H_2 는 상부로 빠져나온 소재높이를 의미한다. 상부가 하부보다 낮은 단면감소율의 경우(A)는 상부쪽으로, 반대로 상부가 하부보다 높은 단면감소율에서는 하부쪽으로 유출된 높이가 크며 이것은 소재유동이 단면감소율이 작은쪽으로 일어남을 의미하고 있다. 상하가 비교적 낮은 단면감소율인 (B), (C)의경우는 펀치가 초기부터 정상상태까지 진행하여도 높이비는 큰 차이가 없으나 상하부가 높은 단면감소율인 (A)와 같은 경우 펀치진행에 따라 높이비가 계속 변화하고 있다. 이는 높은 단면감소율에서는 심한 소성변형으로 펀치진행에 따른 소성유동이 민감하며 상하부가 경쟁을 하고 있기 때문으로 사료된다. 상하부가 동일단면 감소율인 (B)의 경우 높이비(H_2/H_1)는 1.4정도이고 상부로의 압출된 높이가 하부보다 커진다는 것을 알 수 있다 이것은 상대속도의 영향으로 앞의 Fig. 1과 같은 속도장에서는 상하단면감소율이 같을 경우 후방압출쪽으로 압출된 소재높이가 높아지게 된다는 것을 나타내고 있다.

Fig. 11은 재질이 다를경우 하중이 변하지 않는 정상상태의 초기에서 후기비정상상태까지 펀치진행에 따른 상하부로의 압출된 높이비를 보여주고 있다. 그림중 위 두 곡선은 RAB가 RAF보다 작은 경우이고 아래 두 곡선은 반대로 RAB가 RAF보다 큰 경우로 Al 과 Cu 공히 단면감소율(RA)이 작은쪽으로 압출된 높이가 크다는 것을 알 수 있으며 펀치진행에 따라 Cu는 높이비의 변화가 거의 없으나 Al 2024는 Cu보다 변화가 심하며 압출된 높이들이 달라진다. 이것은 두 재료의 경화특성의 차와 마찰상수의 차에 기인한 것으로 동일급형과 동일윤활제를 사용하더라도 재질에 따라 압출된 양상이 다르다는 것을 시사한다.

3.3 소성유동실험 결과 및 고찰

소재의 소성유동을 가시화하기 위하여 분할시편을 제작하여 한면에 격자를 새기고 두쪽을 합하여 실험하는 경우가 많으나 실제 온시편과 반쪽의 합에 의한 유동은 엄밀하게 같다고 할 수 없다. 특히 복합압출과 같이 압출되어 나오는 소재의 방향이 둘 이상인 경우는 그 영향이 클 수 있기 때문에 본 연구에서는 유동가시화 실험에 앞서 분할시편과 온시편의 하중 및 압출된 높이에 대한 실험결과치를 비교하였다. Fig. 12는 분할시편과 온시편의 경우 동일 실험조건에서 Al 2024로 펀치진행거리에 대한 하중을 측정한 결과이며 분할시편과 온시편의 하중차는 작았으며 분할시편이 온시편보다 약 3% 정도 큰 하중

이 소요된다. Fig. 13은 분할 및 온시편에 있어서 펀치진행에 따른 압출된 소재높이비를 비교한 것이다. 여기서보면 높이비의 차가 약 10% 내외가 됨을 알 수 있다. 이러한 현상들은 분할면에서의 구속조건이 실제 온시편과 다르며 시험편의 가공오차등에 기인한 것으로 보인다. Fig. 12와 Fig. 13의 실험결과로 부터 분할시편 사용시 압출하중보다는 압출된 양상에 있어서의 변화가 더 큼을 알 수 있으며 분할시편의 경우 위에 언급한 정도의 오차를 감안하여 실험결과를 분석하는 것이 바람직 하겠다.

Fig. 14는 상부단면감소율 RAB가 25%로 고정되고 하부단면감소율 RAF가 달라지면 거의 일정한 펀치진행상태에서 소성변형양상이 어떻게 변하는지를 보여주고 있다. 하부가 상부보다 단면감소율이 상당히 큰 (C)의 경우 하부부분은 거의 소성변형을 하지 않고 상부로부터 변형이 진행되고 있다. 즉 이경우는 단순 후방압출⁶⁾의 유동에 가깝다는 것을 의미한다. 펀치경이 작은 상부쪽에는 비유동영역이 비교적 뚜렷하게 나타나고 그 형상은 곡선양상을 띠고 있다.

Fig. 15는 RAB=49(%), RAF=36(%)이고 MoS₂ 10% 증량비 그리스와 혼합된 윤활제를 사용한 경우 재질이 다른 Al 2024와 Cu에 대해 펀치진행에 따라 소성변형이 어떻게 변하는지 보여주고 있다. 두 재료 공히 변형은 단면감소율이 낮은쪽으로 편중되며 펀치가 진행됨에 따라 소성유동양상이 변하고 있다. 동일 펀치진행위치에서 재료에 따라 부분적인 유동양상과 소재의 압출된 높이가 차이가 생기며 이것은 재료의 변형경화특성차와 동일윤활제를 사용하더라도 앞에서 이미 언급한대로 마찰상수가 다르기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 컵-컵형 축대칭 복합압출공정에 대해 실험장치를 설계제작하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단면감소율은 압출하중 및 소성유동과 변형양상에 큰 영향을 미치는 요소로 상하 단면감소율이 다른 경우 단면감소율이 작은쪽이 변형이 쉽기 때문에 그 쪽으로 소성유동 및 변형이 편중되고 압출하중도 작은 단면감소율의 영향이 크다.
2. 펀치진행에 따라 압출하중 및 소성변형의 양상이 달라지고, 따라서 압출된 높이비도 그에 따라 변하며 Al 2024가 Cu보다 그 변화가 민감하다.
3. 동일금형과 동일 윤활제를 사용하더라도 재료에 따라 소성유동 및 변형양상이 달라지며 동일윤활제 사용시도 마찰상수는 변한다.
4. 분할시편 사용시는 하중에 의한 오차보다는 압출된 소재의 높이에 의한 오차가 크다.
5. 비유동영역은 단면감소율에 영향을 받으며 일반적으로 곡면양상이다.
6. 상하부중 어느 한쪽이 높은 단면감소율인 경우 소성유동은 낮은 단면감소율 쪽으로 단순 후방압출한 유동과 유사하다.
7. 상하펀치가 동일한 경우 압출된 소재높이는 후방압출부가 커진다.

참 고 문 헌

1. H. Kudo, Int. J. Mech. Sci, Vol. 2, I : pp. 102-127, Vol. 3 II : pp. 91-117.(1960).
2. H. H. Lin, K. Kawakami, H. Kudo(1), CIRP annals , Vol. 37, pp. 231-234(1988).
3. Wushicun & Limiaoquan, J. Mech. Work. Tech, 18, I : pp. 63-84, 19, II : pp. 129-149(1989)
4. 염영하, "재료시험법", 동명사, 서울. 청진동, pp. 91-94.(1990).
5. 배덕한, KAIST 석사학위논문, 1984, pp. 23.
6. 한철호, 대한기계학회지, 제 13권 제 3호, pp. 330-336(1989).

Table.1 Experimental results.

재 구	료 분	압 축 시 험		링압축 시험
		C(Kg/mm ²)	n	m
Al 2024		37.4	0.135	0.13
Copper		44.4	0.381	0.11
Pb		2.89	0.249	0.09

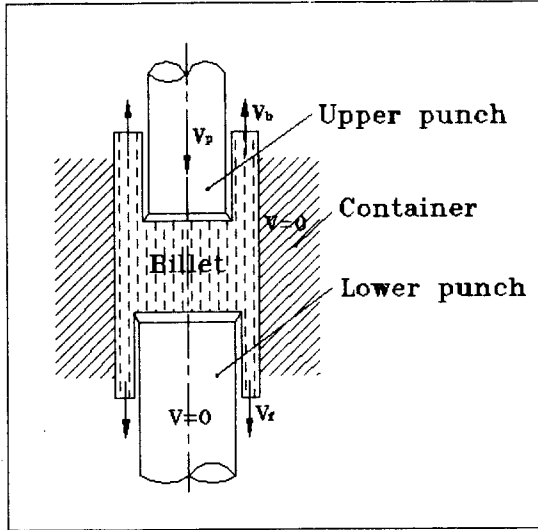


Fig. 1 Schematic process.

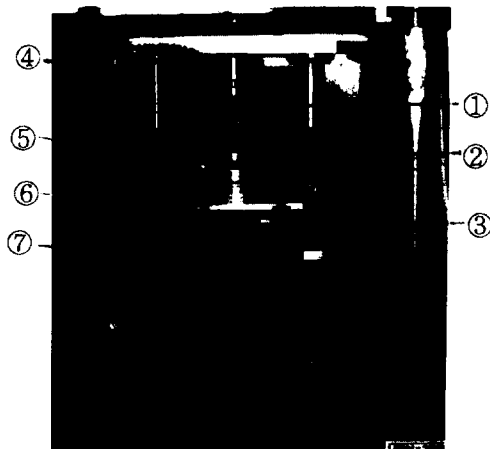


Fig. 2 Experimental setup.
 (①:Upper punch ②:Knock out guide
 ③:Knock out pin ④:Potentiometers
 ⑤:Die ⑥:Plate ⑦:Die block).

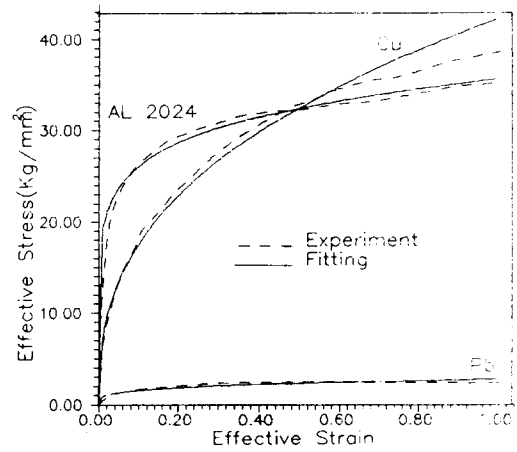


Fig. 3 Stress-strain curves in compression test (Al 2024, Cu, Pb)

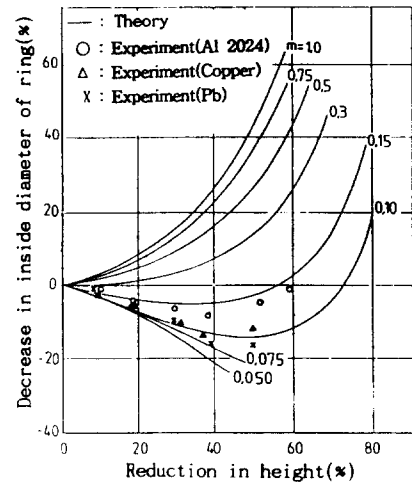


Fig. 4 Ring compression test for several materials(MoS₂. 10% wt+grease lubricant).

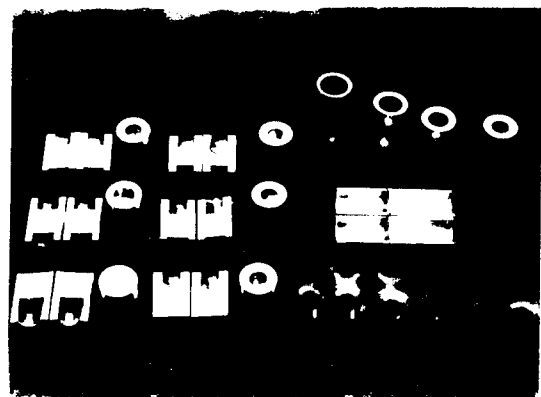


Fig. 5 Extruded specimens.

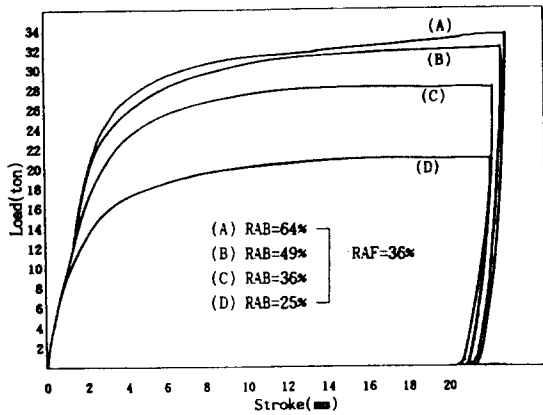


Fig. 6 Extrusion load with punch advance(indicated data).

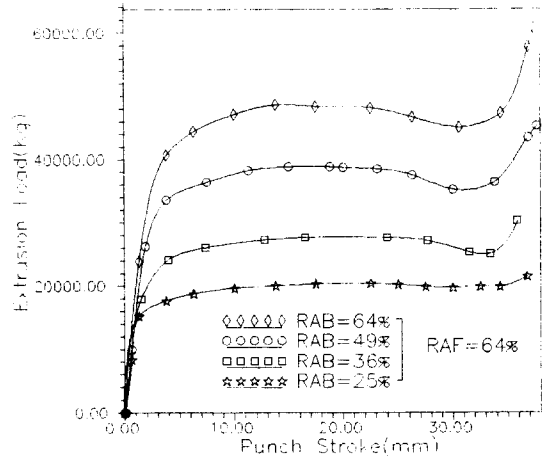


Fig. 9 Extrusion load with punch advance until final stage(Al 2024).

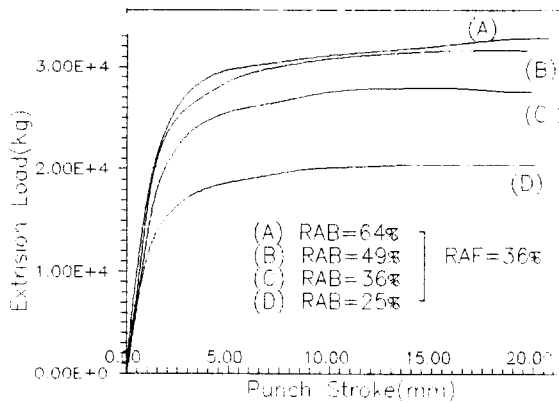


Fig. 7 Extrusion load with strokes in the early stage(Al2024, corrected data).

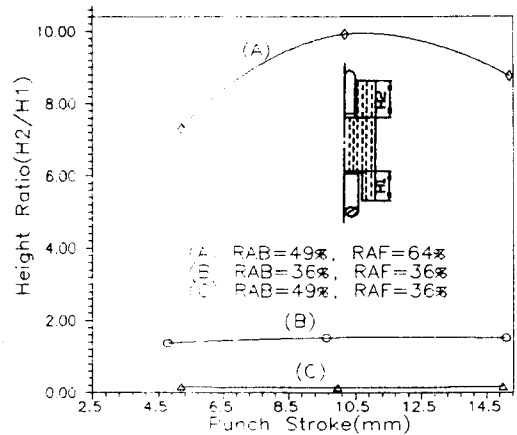


Fig. 10 Effect of punch stroke on the height ratio(Al 2024).

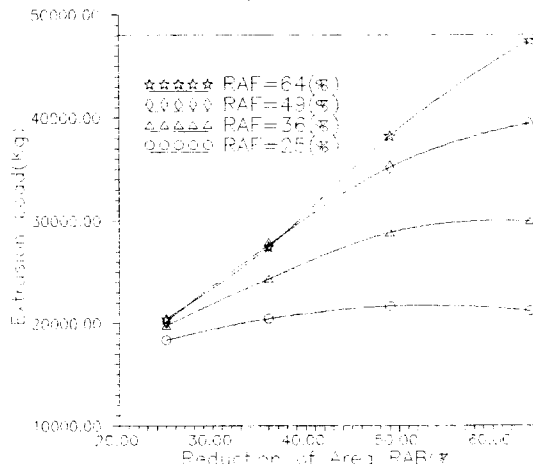


Fig. 8 Extrusion load according to the reduction of area in steady state(Al 2024).

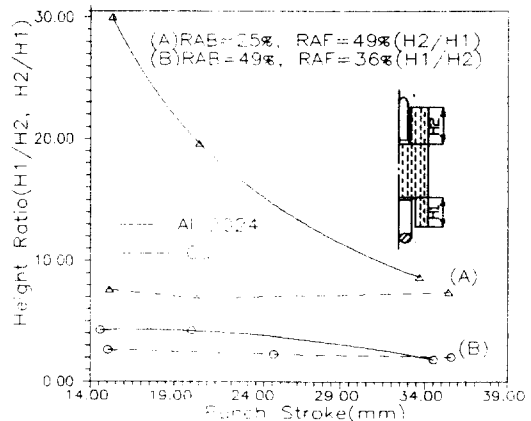


Fig. 11 Comparison of height ratio between Al 2024 and Cu.

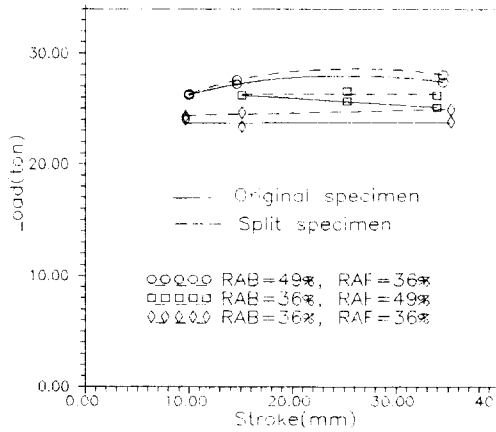


Fig. 12 Comparison of load between original and split specimen (Al 2024).

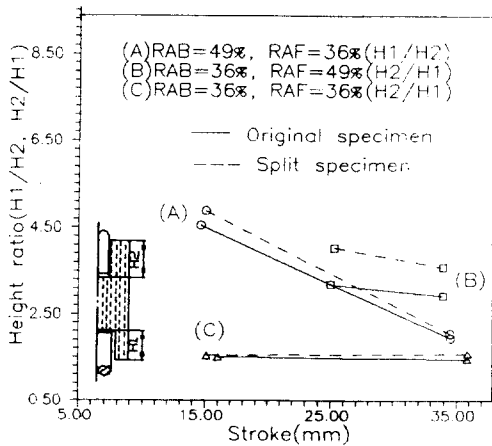


Fig. 13 Comparison of height ratio between original and split specimen (Al 2024).

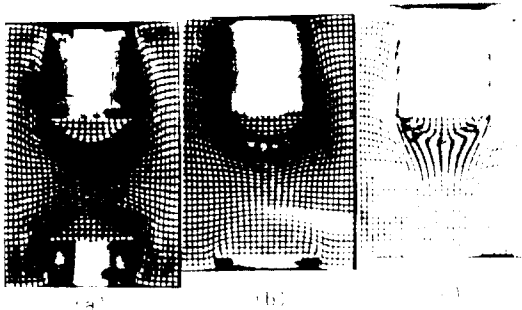


Fig. 14 Plastic flow pattern for several area reductions (Al 2024).

- (a). RAB=25%, RAF=25%, ST=18.45(mm).
- (b). RAB=25%, RAF=36%, ST=15.00(mm).
- (c). RAB=25%, RAF=64%, ST=14.90(mm).

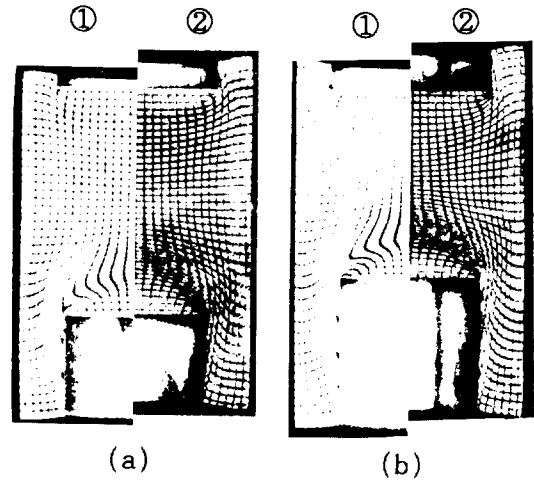


Fig. 15 Comparison of deformed pattern between Al 2024 and Cu (RAB=49%, RAF=36%).

- (a). ① : ST= 9.98(mm), Al 2024.
- ② : ST=10.25(mm), Cu.
- (b). ① : ST=15.00(mm), Al 2024.
- ② : ST=15.05(mm), Cu.