상하 컵형인 전후방압출공정에 관한 실험적 연구

김 영득*, 한 철호**
* 금오공과대학교 대학원
** 금오공과대학교 생산기계공학과

An Experimental Study in the Forward-Backward Extrusion for the Cup-Cup shape

Young-Deak Kim*, Chul-Ho Han**
*Graduate Student, Dept. Eng. Sci. & Mechanics
*Dept. Mech. & Prod. Eng. , Kumoh National Univ. of Technology

ABSTRACT

In the simultaneous forward-backward extrusion the effects of some process variables including area reduction, stroke advance, materials(Al 2024 and commercial pure copper) on the extrusion load, plastic flow and height ratio of upper to lower extruded parts are experimentally investigated and analyzed. Grid-marking technique is employed to visualize the plastic flow. The influence of using split and original specimen on the extrusion load and height ratio is evaluated by experiments. Experimental results show that the plastic flow is oriented to the part of lower area reduction in the begining but it is usually variated during the overall process. The configurations of plastic deformation and plastic flow are dependent on the working materials and the lubricational conditions.

Key Words : Forward-Backward Extrusion, Plastic flow, Dead metal zone, Height ratio of extruded material

1. 서 론

전후방압출공정은 재료손실이 거의 없이 단일공정에 의해 완제품의 성형이 가능하

며 기계적 성질 향상 및 양호한 표면을 얻을 수 있는 이점이 있어 단 또는 공동이 있는 부품성형가공에 적합하다. 자동차 및 각종 기계부품 중에는 상.하가 컵모양의 공동으로 된 제품이 많으며 종래 기계가공이나 주물등에 의해 제조되던 이런 제품들은 전후방압출공정에 의한 성형법으로 대체되고 있다. 일반적으로 한쪽이 컵형상인 제품을 성형하는 후방압출에 대해서는 많은 이론 및 실험적 연구결과들이 발표되었으나 양쪽이 컵형상인 제품의 전후방압출에 대해서는 그 유용성에 비해 연구결과가 많지 않다. 이는 전후방압출공정에 있어서 압출되어 나오는 소재의 유동이 두방향 이상이며 이들이 상호구속되어 있는 비정상상태의 유동이어서 해석상의 어려운점이 있기 때문이다.

Kudo[1]는 냉간의 축대칭 압출 및 단조의 경우 단순이론해 및 실험결과를 제안하였으며 상·하컵형인 전후방압출 공정의 유동흐름 조절에 대한 실험과 이론연구[2]를 발표 하였다. Geiger[3]는 상하 캔형 복합압출의 유동흐름에 대한 실험적 연구를 수행한 바 있다. 최근에 Lee와 Altan[4,5]은 상·하단면감소율이 동일한 펀치조합인 경우 상하유출높이차에 따른 마찰상수와 윤활의 특성을 평가하기위해 유한요소법을 이용하여 해석하고 이를 실험과 비교한 바 있다. Wushichun등[6]은 상·하컵형인 축대칭 전후방압출에 대한 압출하중의 상계해를 제안하였다. 이외에도 본 연구 모델과는 다르나 전후방압출공정에 대해 이론해석 및 간단한 실험을 수행한 예들이 있다[7-9]. Geiger를 제외하고 대부분의 연구결과들은 압출하중의 관점에서 분석하였거나 상하컵의 크기가 같은 제한된 모형을 해석대상으로 하였으며 주로 이론결과를 입증하기 위한 확인용 실험들로서 공정설계를 위한 소성유동이나 변형양상에 대한 고려는 미흡하였다. 또한 분할시편과 온시편의 사용에 있어서 상호간에 있을 수 있는 조건 불일치로 인한 차이점등과 재질에 따른 분석결과에 대해서는 연구된 바가 없다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 상·하컵형인 전후방압출공정에 대하여 상·하부펀치의 단면감소율과 펀치진행거리 및 재질등과 같은 주요 공정변수가 압출하중, 소성유동, 비유동영역, 상하부로의 재료유출비, 변형양상등에 미치는 영향을 실험적으로 검토.분석하고자 한다. 아울러 실험결과 분석시 연관된 실험장치의 탄성변형고려법 및 분할시편 사용에 따른 오차정도에 대한 실험적 연구도 수행하고자 한다.

2. 실험장치의 구성 및 방법

2.1 실험장치의 구성

설계·제작된 실험장치는 100 ton 용량의 만능시험기(Shimadz U.E.H 100)에 설치하였으며 Fig. 2는 주요장치부의 개략도이다. 시편은 금형다이 ⑤의 내부에 장착되고, 상부펀치가 시편 상면에 근접될때까지 ①을 이동시킨 뒤 하중을 가하면 ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ 및 시편이 함께 상부로 이동하여 성형이 이루어지며 성형 후 하부의 녹아웃장치 ② ③을 상부로 이동시켜 성형제품을 추출시키는 장치로 구성되어 있다.

계측장치로는 만능시험기에 부착되어있는 하중계의 출력을 X-Y-Y 기록계(HP 7046.)의 Y축에 연결하고 펀치의 행정은 전위차계(Moog Inc.)를 시험기에 장착한뒤 변위출력을 동일 기록계의 X축에 연결시켜 압출하중의 측정과 동시에 변위가 그래프 용지에 기록되도록 하였다.

Fig. 2에서 다이 ⑤의 형상은 성형되는 상하끝부분이 약 1.0(mm)정도 모따기가 되어 있는 형상이며 사용된 펀치의 치수는 상하부 직경이 각각 15, 18, 21, 24(mm)인 4종씩으로 하고 펀치끝면은 랜드가 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 시편규격에 의하여 직경대 길이를 $\phi 30 \pm {}^{0}_{0.01} \times H40 \pm {}^{0.01}_{0.01}$(mm)로 가공하고 링압축시편은 내경, 외경, 높이비가 6:3:2가 되도록 30, 15, 10(mm)로 가공하였다.

압출시편의 치수는 윤활막을 고려하여 $\phi 30 \pm {}^{0}_{0.05}$(mm) $\times H40 \pm {}^{0.02}_{0.02}$(mm)로 가공하였다. 분할시편은 압출성형시 금속의 소성유동흐름을 가시적으로 관찰하기 위해 제작한것으로 온시편을 종축으로 2등분이 되게 기계가공하고 반쪽시편의 분할면상에 미세격자 1.0mm ×1.0mm로 포토에칭법[9]에 의해 그리딩을 한후 이를 서로 겹쳐 하나의 완전시편으로 만든 뒤 소성유동실험을 할 수 있도록 준비하였다.

2.2 실험방법

재료의 기계적성질을 평가하기 위하여 압축시험을 실시하고, 소재와 금형면 사이의 마찰상수를 구하기 위해 링 압축시험을 하였으며 설계 제작된 압출실험장치로 여러 공정조건에 따른 압출실험을 수행하였다.

(1) 압축 및 링압축시험

압축시험에 의한 재료의 유동응력은 식(1)과 같은 지수함수형으로 표현하였다.

$$\bar{\sigma} = C\,\bar{\varepsilon}^{\,n} \quad \text{---------- (1)}$$

여기서 $\bar{\sigma}$는 상당응력이고 $\bar{\varepsilon}$는 상당변형율을 의미하며 압출재에 대한 위 형태의 응력변형율 관계를 얻기위해 저속으로 상온하에서 압축시험을 수행하였다. 벌징(bulging)현상을 방지하기 위해 매 20% 높이감소율마다 테프론 테이프를 시편의 상하면에 균일하게 붙이면서 최종변형률이 약 1.0정도까지 실험하고 하중-변위곡선 실험결과로 부터 응력-변형률선도를 구한 뒤 최소자승법을 이용하여 소성계수 C와 소성가공경화지수 n값을 정했다.

시편과 금형접촉면 사이에서의 마찰상수를 측정하기 위해 링압축 시험을 수행하였다. 윤활제는 MoS_2 10% wt.에 상용그리스(KSM 2130)를 혼합하여 사용하였으며 최종변형도 약 1.0까지 압출재 종류별로 실험하고 그 결과로부터 기존의 보정곡선과 비교하여 마찰상수 m을 구하였다.

(2) 압출실험

실험소재는 Al 2024를 주로 사용하였으며 재료의 영향을 고려하기 위해 상용구리에 대해서도 실험을 병행하였다. 이러한 소재들은 압출하중의 감소와 제품표면의 향상

을 위해 MoS_2(10%. wt)분말에 상용그리스를 섞어서 윤활제로 사용하였고 실제 실험에 있어서 변형율속도의 영향을 무시할 수 있도록 하기위해 압출속도 (9.0×10^{-2} mm/sec)를 낮게 하여 수행하였다.

실험에는 온시편과 분할시편이 사용되는데 이들로 부터 얻어지는 결과들 중 소성변형유동실험을 제외하고는 압출하중 및 재료유출비등을 조사하기위해 두시편중 온시편을 취하였다. 실험은 동일조건하에서 반복실험을 하였으며 부분적으로 값의 변화가 있는 경우 평균값을 취하였다. 압출하중 및 압출재의 유출높이비는 분할시편의 경우 오차를 포함할 수 있기 때문에 온시편에 의한 실험 데이타값을 취하였고 소성변형유동형상 및 온시편과의 비교실험을 위해서는 분할시편으로 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축 및 링압축시험결과와 고찰

압축시험 및 링압축시험결과가 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 3 에서 보듯이 Al 2024 압축실험결과는 식(1)의 형태로 양호하게 함수화되지만 Cu의 경우에는 중간 이후부터 지수함수표현이 적합하지 않으며 결정된 함수형은 변형도율이 약 0.5정도까지 유용하리라 본다.

Fig. 4는 링압축시험결과를 보정선도에서 표현한 것인데 마찰상수값이 Cu와 Al 2024순으로 마찰상수가 커지고 있다. 이는 동일윤활제를 사용하더라도 재질에 따라 마찰상수값이 달라진다는 것을 의미한다. Table 1은 압축시험 및 링압축시험결과에 대한 결과값을 보여주고 있다.

3.2 압출실험 결과 및 고찰

(1) 압출하중

Fig. 5는 본 연구에서 수행한 압출된 시편들의 일부를 보여주고 있다. 압출제품의 표면상태는 대체로 양호하였고 Cu의 경우가 Al 2024의 경우보다 표면상태가 더 좋았다.

압출실험중 펀치진행거리와 압출하중을 계측하였으며 X-Y-Y 기록계의 그래프 용지에 기록된 그대로의 결과가 Fig. 6의 실선으로 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 압출종료후 하중을 제거하면 진행거리에 있어서 변화가 발생하는데 이는 실험장치 자체의 탄성회복이 원인으로 이를 보정하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 식을 사용하였다.

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

여기서 P는 압출하중이고 δ는 실험장치의 탄성변형량이며 $k)_{eq}$는 등가스프링상수로 동일시험조건하에서는 $k)_{eq}$가 동일한 것으로 처리 보정하였다.

식 (2)에 의해 실선의 지시값을 보정한 결과가 동일그림의 파선으로 나타나 있다.

그림은 초기에서부터 하중변화가 거의 없는 정상상태까지에 해당한다. 여기서 RAB와 RAF는 각각 Fig. 1의 상부부분과 하부부분 즉 후방압출부와 전방압출부의 퍼센트단면감소율을 의미하며 단면감소율(%)은 (펀치의 단면적/ 다이의 단면적) × 100으로 한다. 그림은 전방단면감소율(RAF)이 36%로 일정하고 후방단면감소율(RAB)이 변화할때 펀치진행에따라 압출하중이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 어느 펀치조합에서나 초기하중이 급격히 상승하고 점차 하중증가가 완만해지며 펀치진행이 10mm정도(펀치반경의 약 1/3정도)부터는 하중변화가 없는 정상상태에 도달하게 된다. RAB가 증가하면 하중은 전반적으로 상승하고 RAB가 RAF보다 큰 (A), (B)의 경우는 하중의 큰 변화가 없고 RAB가 RAF보다 더 작은경우는 하중변화가 큰데 즉 이것은 하중이 낮은 단면감소율의 영향을 더 받는다는것을 시사하고 있다.

전방과 후방압출부의 단면감소율변화에 따른 정상상태의 압출하중의 변화가 Fig. 7에 나타나 있다. 그림에서 상하 단면감소율중 어느 한쪽이 일정할때 반대쪽 단면감소율이 커지면 하중값은 증가하며 상부나 하부중 어느 한쪽의 단면감소율이 상당히 낮은경우(25%)는 다른쪽의 단면감소율이 변화하더라도 하중변화는 거의 없다. 이는 낮은 단면감소율쪽으로만 변형이 일어난다는것을 의미하며 앞의 Fig. 6의 결과와 일치하고 있다. 이러한 경향은 기 발표된 연구자 Wushichun[6]의 연구결과에서 보여주는 실험결과와 같은 거동현상을 보이고 있다. 전후방압출실험시 하중이 거의 일정한 정상상태를 지나 펀치를 더 진행시키면 다시 압출하중은 변하며 Fig. 8은 RAF 64%시 RAB가 변화할때 초기에서부터 최종단계까지 펀치진행거리에 따라 하중이 어떻게 변하는지 보여주고 있다.

초기하중부분에서는 압입상태로 어느 펀치 조합에서나 압출하중이 급격히 증가되어지며 정상상태하중을 지나면 마찰부위가 줄어들어 약간의 하중감소경향을 띠고 있다. 각 펀치조합 모두는 펀치진행에 있어서 약 10~13(mm)정도면 정상상태하중에 진입 되는것을 알 수 있다. 펀치가 더욱 진행하여 상하펀치사이의 간격이 펀치와 벽사이의 틈새와 거의 같아지면 하중이 급격히 재증가하는 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 재증가하는 후기비정상상태로 하중관점에서 구분 할 수가 있다.

(2) 압출제품의 기하학적 양상

압출된 높이는 최종제품의 치수를 결정하는 중요한 요소가 되며 이를 검토하기위해 단면감소율과 펀치진행거리 및 재질에 따른 상하부 유출높이를 계측한 결과가 Fig. 9와 Fig. 10에 나타나 있다. 압출후 상하로 유출된 재료부의 높이는 깊이측정기로 여러 포인트를 반복측정 후 평균값을 취하였다.

Fig. 9는 임의 상하단면감소율에 대해 정상상태까지 펀치를 진전시켰을때 상하부로 압출된 유출 높이비(H_2/H_1)를 비교하여 보여주고 있다. 여기서 H_1은 하부로, H_2는 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 변하고 있다. 이는 높은 단면감소율에서는 심한 소성변형으로 펀치진행에 따른 소성유동이 민감하며 상하부가 경쟁을 하고 있기 때문으로 사료된다. 상하부가 동일단면감소율인 (B)의 경우 높이비(H_2/H_1)는 1.4~1.6 정도이고 상부로의 압출된 높이가 하부보다 커진다는 것을 알 수 있는데 이러한 현상은 기 발표된 연구자 Lee 와 Altan[4~5]의 결과와 동일한 경향을 보이고 있다. 이것은 상대속도의 영향으로 앞의 Fig. 1과 같은 속도장에서는 상하단면감소율이 같을 경우 후방압출쪽으로 압출된 소재높이가 높아지게 된다는 것을 나타내고 있다.

Fig. 10은 재질이 다를경우 하중이 변하지 않는 정상상태의 초기에서 후기비정상 상태까지 펀치진행에 따른 상·하부로의 압출된 높이비를 보여주고 있다. 그림중 위 두 곡선(A)은 RAB가 RAF보다 작은 경우이고 아래 두 곡선(B)은 반대로 RAB가 RAF보다 큰 경우로 Al과 Cu 공히 단면감소율(RA)이 작은쪽으로 압출된 높이가 크다는 것을 알 수 있다. 펀치진행에 따라 Cu는 높이비의 변화가 거의 없으나 Al 2024는 Cu보다 변화가 심하며 압출된 높이들이 달라진다. 이것은 두 재료의 경화특성의 차와 마찰상수의 차에 기인한 것으로 동일금형과 동일윤활제를 사용하더라도 재질에 따라 압출된 양상이 다르다는 것을 시사한다.

(3) 소성유동

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 전후방압출과 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. 11은 분할시편과 온시편의 경우 동일 실험조건에서 Al 2024로 펀치진행거리에 대한 하중을 계측한 결과이며 분할시편과 온시편의 하중차는 작았으며 분할시편이 온시편보다 약 3% 정도 큰 하중이 소요된다. Fig. 12는 분할 및 온시편에 있어서 후기비정상 상태까지 펀치진행에 따른 압출된 소재높이비를 비교한 것이다. 여기서보면 높이비의 차가 평균 약 10% 내외가 됨을 알 수 있다. 이러한 현상들은 분할면에서의 구속조건이 실제 온시편과 다르며 시험편의 가공오차등에 기인한 것으로 보인다. Fig. 11과 Fig. 12의 실험결과로부터 분할시편 사용시 압출하중보다는 압출된 양상에 있어서의 변화가 더 큼을 알 수 있으며 분할시편의 경우 위에 언급한 정도의 오차를 감안하여 실험결과를 분석하는 것이 바람직하다.

Fig. 13은 RAB가 25%로 고정되고 RAF가 달라지면 거의 일정한 펀치진행상태인 경우에 소성변형양상이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 펀치경이 작은 상부쪽에는 비유동영역이 비교적 뚜렷하게 나타나고 그 형상은 곡선양상을 띠며 RAF가 증가함에 따라 비유동영역의 크기가 작아지는 경향을 띠고 있다. 특히 하부가 상부보다 단면감소율이 상당히 큰 (c)의 경우 하부부분은 거의 소성변형을 하지 않고 상부로만 변형이 진행되고 있는데 즉 이경우는 단순 후방압출[11]의 유동에 가깝다는 것을 의미한다. 또한 상하가 동일한 단면감소율조합인 (a)의 경우에 있어서 상부로의 재료유출 길이가 더 큼을 알 수 있는데 이는 앞의 Fig.9의 (B)를 가시적으로 관찰한

경우에 해당한다.

소성변형의 양상과 유동은 펀치가 진행함에 따라 변하며 Fig. 14는 RAB=49%이고 RAF=64%인 경우 공정의 진행에 따른 격자변형상태를 실험한 결과이다. 소성변형은 단면감소율이 작은 상부로 편중되고 있으며 그쪽 펀치하부에 비유동영역이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이처럼 상하 단면감소율이 비교적 높고 단면감소율의 차가 큰 경우 상하로 압출된 높이의 차가 크기 때문에 만약 압출된 제품의 높이를 일정하게 맞추기 위해서는 별도의 구속이 필요함을 시사한다.

Fig. 15는 RAB=49(%), RAF=36(%)이고 MoS_2 10% 중량비 그리스와 혼합된 윤활제를 사용한 경우 재질이 다른 Al 2024와 Cu에 대해 펀치진행에 따라 소성변형이 어떻게 변하는지를 비교하여 보여주고 있다. 두 재료 공히 변형은 단면감소율이 낮은쪽으로 편중되며 펀치가 진행됨에따라 소성유동양상이 변하고 있다. 동일펀치진행위치에서 재료에 따라 부분적인 유동양상과 소재의 압출된 높이가 차이가 생기며 이것은 재료의 변형경화특성차와 동일윤활제를 사용하더라도 앞에서 이미 언급한데로 마찰상수가 다르기 때문으로 사료된다.

펀치가 진행하여 상하 펀치면 사이의 간격이 펀치와 금형벽면사이의 간격정도로 좁아지면 Fig. 16에서 처럼 상하펀치 구석에서 소성유동이 불안정해져서 제품의 내면 또는 외면에 균열이 발생하게 되며 이 위치까지가 실제 공업적으로 상하컵형 제품의 전후방압출공정에 의한 성형시 한계두께가 될 것으로 보인다.

4. 결 론

본 논문에서는 상·하컵형인 축대칭 전후방압출공정에 대해 실험장치를 설계제작하여 공정변수의 영향을 실험적으로 검토한 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) 비유동영역은 단면감소율의 영향을 받으며 일반적으로 곡면양상을 띠고 있다.
(3) 상부와 하부중 어느 한쪽이 높은 단면감소율인 경우 소성유동은 낮은 단면감소율쪽으로 단순 후방압출한 유동과 유사하다.
(4) 상하펀치가 동일한 경우 압출된 소재높이는 후방압출부가 커진다.
(5) 펀치진행에 따라 압출하중 및 소성변형의 양상이 달라지고, 따라서 압출된 높이비도 변하며 Al 2024이 Cu보다 그 변화가 민감하다.
(6) 상하펀치면 사이의 간격이 벽두께 보다 낮아지면 균열등의 결함이 발생한다.
(7) 분할시편 사용시는 하중에 의한 오차보다는 압출된 소재의 높이비에 의한 오차가 크 며 하중의 경우 약 3%, 소재높이비의 평균오차는 약 10% 내외이다.
(8) 동일금형과 동일윤활제를 사용하더라도 재료에 따라 소성유동 및 변형양상이 달라지며 동일윤활제 사용시도 마찰상수는 변한다.

5. 참고문헌

1. H. Kudo, "Some Analytical and Experimental Studies of Axi-symmetric Cold Forging and Extrusion, I, II", Int. J. Mech. Sci, I : Vol. 2, (1960), pp. 102~127, II : Vol. 3, (1961), pp. 91~117.
2. H. H. Lin, K. Kawakami, H. Kudo(1), "Metal Flow Control in Cold Simultaneous Forward/Backward Extrusion", Annals of CIRP, Vol. 37, (1988), pp. 231~234.
3. Geiger, R., 1976, "Metal Flow in Combined Can Extrusion", (in German), Berichteaus dem Institute für Umformtechnik der Universiät Stuttgart Nr.36, Verlag Girade, Essen, Germany.
4. Joon. Y. Lee and Taylan Altan, "Evaluation of lubrication and friction in cold forging using a double backward -extrusion process", J. of Mater. Proce. Tech. Vol. 33, (1992), pp. 95~108.
5. J. Y. Lee, T. Altan, "Factors Affecting the Double Cup Extrusion Test for Evaluation of Friction in Cold and Warm Forging", Annals of the CIRP, Vol. 42 , (1993), pp. 347~351.
6. Wushichun & Limiaoquan, "A study of Cup-Cup Axisymmetric Combined Extrusion by the Upper-Bound Approach", J. Mech. Work. Tech.., I : Upper-Bound Solutions for Deformation Force, Vol. 18, (1989), pp. 63~84, II: Prediction of Defects, Vol. 19, (1989), pp. 129~149.
7. B. Avitzur, W. C. Hahn, Jr., M. Mori, "Analysis of Combined Backward-Forward Extrusion", Trans. of the ASME, (May 1976), pp. 438~445.
8. A. K. Tayal, "Analysis of Combined Backward-Forward Extrusion by the Finite Element Method", Int. Conf. on Nume. Methods in Industrial Forming Process Swan Sea, U. K, (July 1982), pp. 247~255.
9. D. Y. Yang, J. H. Kim, C. K. Lim, "An Arbitrarily Inclined Triangular UBET Element and its Application to Combined Forging", Trans. ASME, Vol. 107, (1985), pp. 134~140.
10. 배덕한, "소성가공에 있어서 변형가시화법에 대한 연구", KAIST 석사학위논문, (1984), pp. 23.~24.
11. 한철호, "상계해법에 의한 축대칭 후방압출의 소성변형해석", 대한기계학회지, 제 13권 제 3호, (1989), pp. 330~336.

Table 1 Experimental results.

재료 구분	압축시험		링압축 시험
	C [Mpa]	n	m
Al 2024	367	0.135	0.13
Copper	435	0.381	0.11

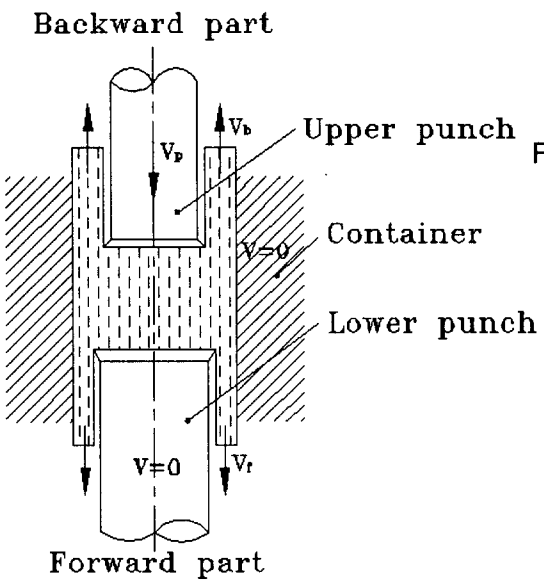

Fig. 1 Schematic process.

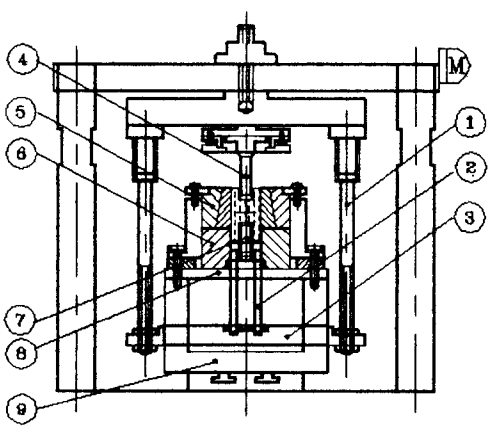

Fig. 2 Experimental setup.
(①:Knockout guide, ②:Knockout pin, ③:Knockout pin plate, ④:Upper punch, ⑤:Upper die, ⑥:Lower die, ⑦:Lower punch, ⑧:plate ⑨:Block die).

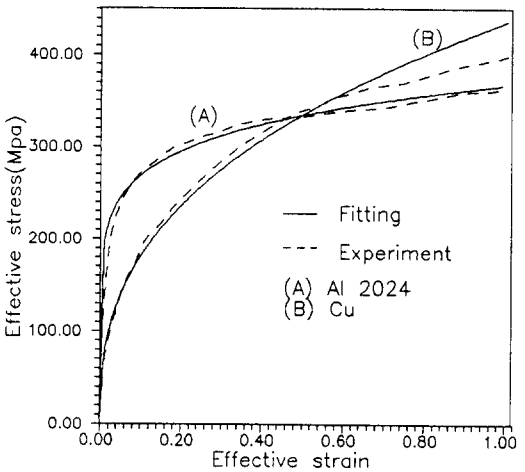

Fig. 3 Effective stress-strain curves in compression test (Al 2024, Cu).

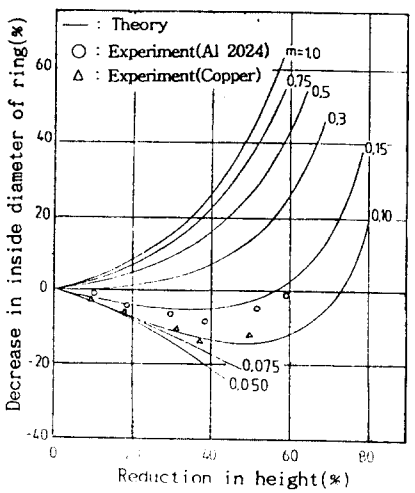

Fig. 4 Ring compression test for several materials (MoS_2 10% wt. + grease lubricant).

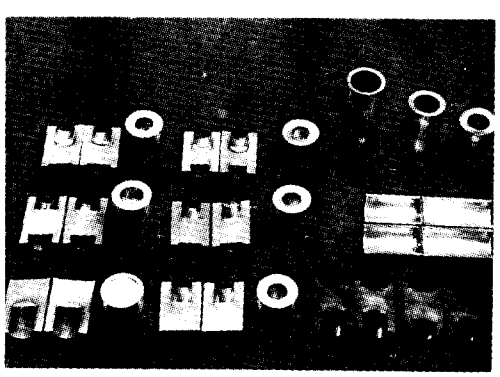

Fig. 5 Extruded specimens.

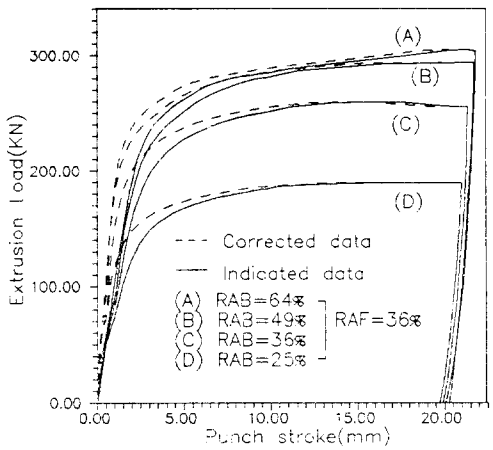

Fig. 6 Comparision of extrusion load between indicated data(——) and corrected data(----) [Al 2024].

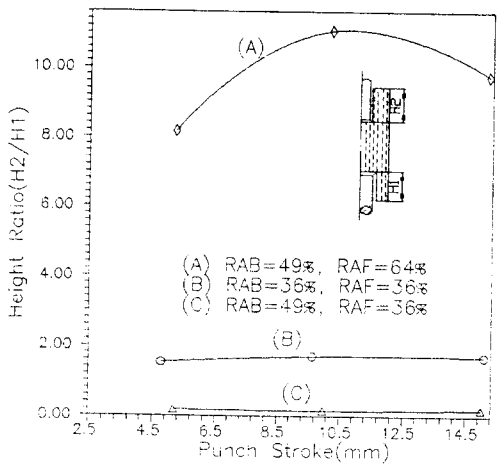

Fig. 9 Effect of punch stroke on the height ratio (Al 2024).

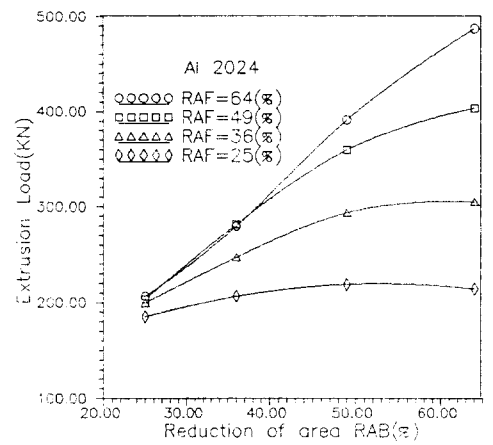

Fig. 7 Extrusion load according to the reduction of area in steady state.

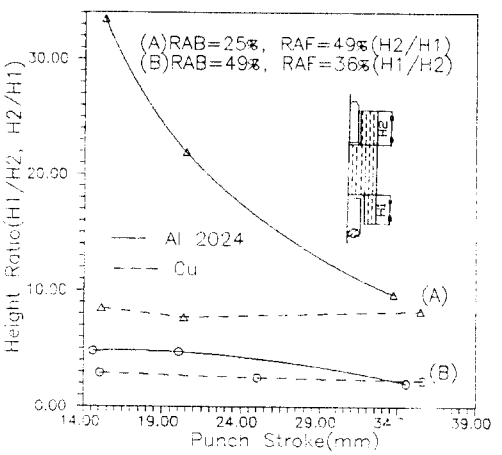

Fig. 10 Comparision of height ratio between Al 2024 and Cu.

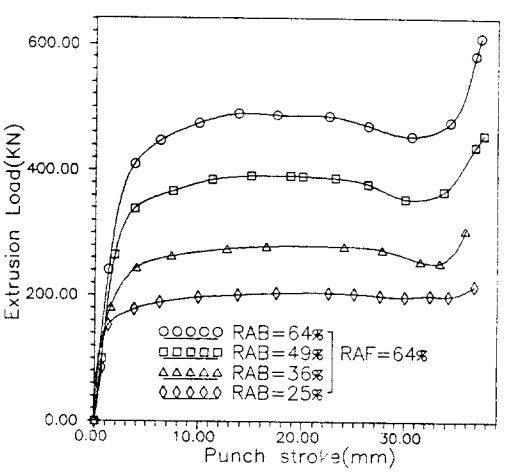

Fig. 8 Extrusion load with punch advance until final stage (Al 2024).

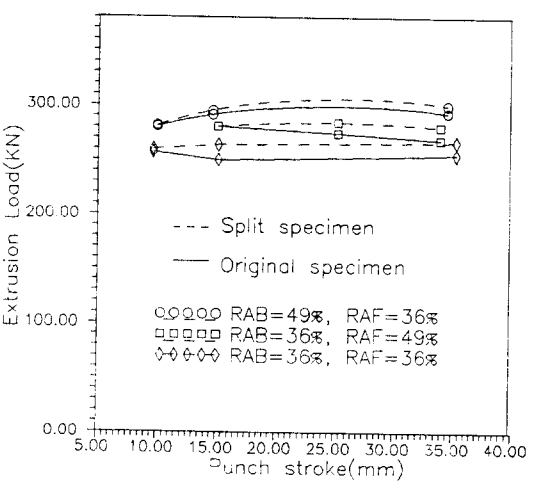

Fig. 11 Comparision of loads between original and split specimen(Al 2024).

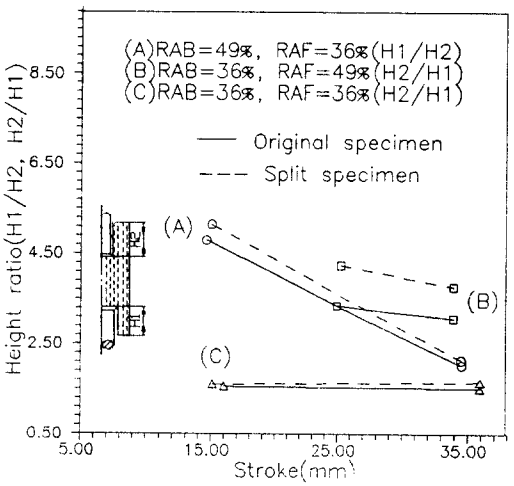

Fig. 12 Comparision of height ratios between original and split specimen (Al 2024).

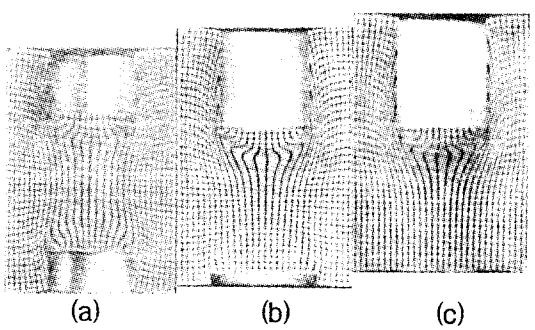

Fig. 13 Plastic flow patterns for several area reductions (Al 2024, RAB=25%).
(a). RAF=25%, ST=14.40(mm).
(b). RAF=36%, ST=15.00(mm).
(c). RAF=64%, ST=14.90(mm).

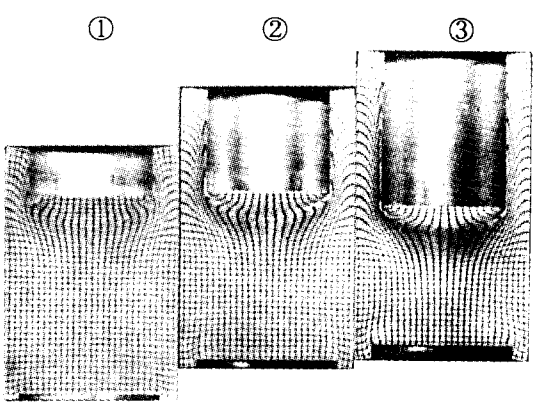

Fig. 14 Deformed patterns for punch stroke (Al 2024, RAB=49%, RAF=64%).
① : ST=5.20(mm), ② :ST=10.2(mm).
③ : ST=15.2(mm).

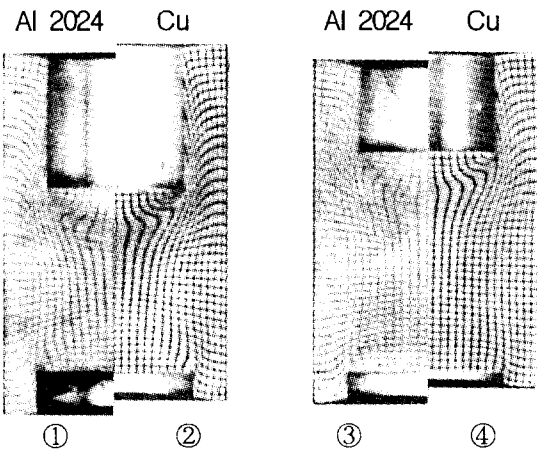

Fig. 15 Comparision of deformed patterns between Al 2024 and Cu (RAB=49%, RAF=36%).
① : ST=9.980(mm), ② : ST=10.25(mm),
③ : ST=15.00(mm), ④ : ST=15.05(mm).

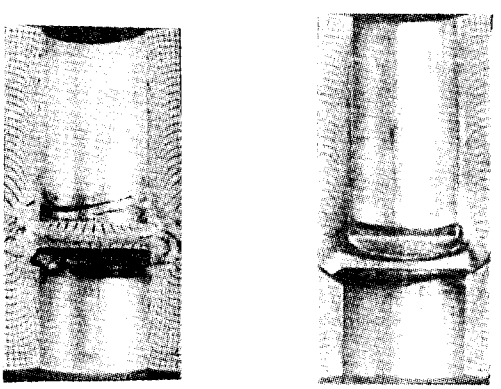

Fig. 16 Defects in the final stage (Al 2024).
(a). RAB=36%, RAF=36%, ST=35.90(mm).
(b). RAB=49%, RAF=36%, ST=34.50(mm).