

〈논 문〉

정사각형재의 평금형 압출시 공정조건의 변화에 따른 하중과 유동양상에 대한 실험적 연구

김동권* · 김영득* · 배원병** · 김영호**

(1995년 8월 18일 접수)

An Experimental Study for the Loads and Flow Patterns with the Change of Process Conditions in Flat Die Extrusion of Square-Bars

Dong Kwon Kim, Young Deak Kim, Won Byong Bae and Young Ho Kim

Abstract

It is very important to obtain the knowledge of loads and flow patterns in most processes, because these information are the fundamental data of die design and process design. The objective of present study is to investigate loads and metal flow patterns for various process conditions in flat die extrusion of square-bars from circular billets. For analyzing the metal flow patterns of the billets, photo etching is used on sections of split specimen. From this method, metal flow patterns are analyzed for various area reductions, friction factors and punch stroke through the process from initial-stage to final-stage. Experiments are carried out with hard solder billets at room temperature.

Key Words : Flat Die(평금형), Square Bars(정사각형재), Photo Etching(포토 에칭), Dead Metal Zone(비유동영역), Initial Stage(초기단계), Final Stage(최종단계)

1. 서 론

평금형을 이용한 전방압출은 자동차 및 항공기부품, 선박부품, 건설, 기계공구, 가정용품 등에 이르기까지 그 용도가 매우 광범위한 대표적인 소성 공정 중의 하나이다. 이 평금형 압출은 금형 제작이 용이하고 제품 정밀도와 표면이 우수하며 또한 한 번의 변형으로 복잡하고 다양한 형상을 쉽게 얻을 수 있는 등의 여러가지 장점을 가지고 있는 반면, 형상금형에 비해 비교적 높은 변형저항을 가지므로 주로 열간상태에서 작업이 행해지고 있다.

연구방법으로는 유한요소법^(1,2), 상계법^(3,4), 미

끄럼선장법⁽⁵⁾ 등의 해석적인 방법과 플라스틱인(plasticine)^(6,7), 납(lead) 등의 모델재료 또는 알루미늄 합금(Al-alloy)⁽⁸⁾ 등의 실제 열간 압출 재료를 이용한 실험적인 방법이 있다.

위의 연구들은 대부분 축대칭, 평면변형 등 소위 2차원 문제에 대한 연구이다. 이에 비해 형상을 가진 봉(bar) 또는 튜브(tube)제품의 평금형 전방압출은 그것의 3차원적 특징때문에 거의 없는 실정이다. Kiuchi 등⁽⁹⁾은 이형전방압출의 비정상변형을 UBET로 해석한 바 있는데, 실제에 가까운 비유동영역의 모양을 제한하여 실험과 잘 일치하였으나 초기단계의 하중과 유동과약에 그쳤다. 강연식 등⁽¹⁰⁾은 격자재구성법을 이용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였으나, 빈번한 격자재구성으로 입출력에 어려움이 있고 계산시간이 많이 들어 지루한 작

*한국중공업(주) 기술연구원

**부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

업이 되는 번거러움이 있었다. 변삼수 등⁽¹¹⁾은 정사각형재의 평균형 압출에 대하여 플라스틱을 사용하여 실험적으로 접근하였으나 역시 초기 단계의 하중과 유동 파악에 그쳐 전체 공정에 대한 하중과 유동의 분석에는 미흡하였다.

본 연구자들은 3차원 평균형 압출시 공정설계 및 금형설계의 기초 자료를 제공하기 위하여 여러가지 공정 조건이 공정에 미치는 영향에 대한 연구⁽¹²⁾를 수행하고 있다. 본 연구에서는 원형소재에서 정사각형재를 평균형 압출하는 공정에서 단면감소율, 마찰상수, 펀치진행거리 등의 공정 변수의 변화에 따른 하중과 유동 양상의 영향을 전 공정에 대하여 파악하는 데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 소재 내부의 유동을 실험적으로 확인하기 위하여 분할시편을 이용하여 그 한쪽면에 포토 에칭(photo etching)^(13,14)하는 방법으로 소재의 유동양상을 파악하였다.

2. 실험

2.1 물성시험

응력-변형률속도 관계식을 얻기 위하여 열간압축용 시험기인 Greeble 5000에서 압축시험을 행하여 다음과 같은 응력-변형률속도 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 73.063 \dot{\epsilon}^{0.0293} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

마찰상수의 영향을 파악하기 위하여 윤활과 무윤활의 두가지 마찰조건에 대한 링압축시험을 수행하였다. 본 연구의 실험에서는 윤활의 경우에 있어서는 MoS_2 분말을 그리스(Grease)에 섞어서 사용하

였으며, 윤활조건을 일정하게 유지하기 위해 MoS_2 의 양을 혼합물 전체의 중량에 대해 10%가 되게 하였다. 구해진 마찰상수의 값은 윤활시에는 0.1, 무윤활시에는 0.28이다.

2.2 실험장치 및 방법

원형 소재로부터 정사각형재의 평균형 전방압출

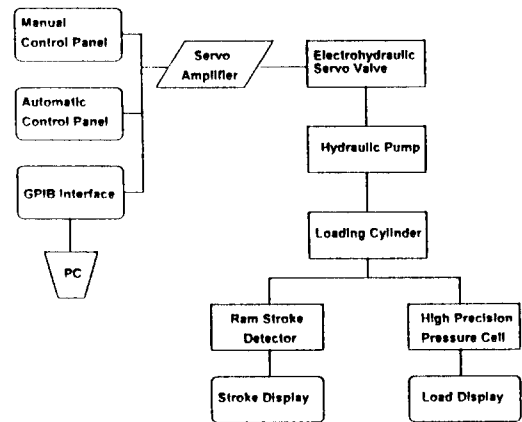


Fig. 2 Schematic flow chart of the UTM

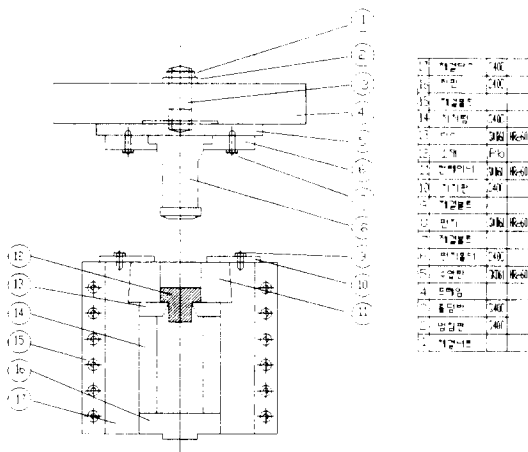


Fig. 1 Assembly drawing of the manufactured die set

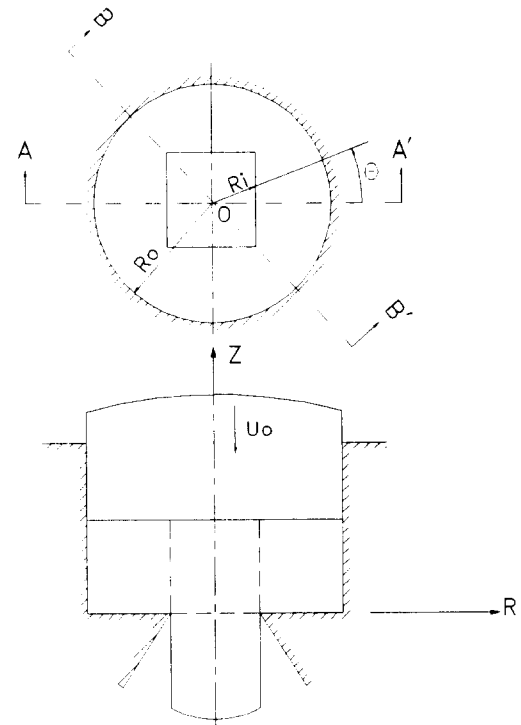


Fig. 3 A general scheme for the deformation model

정사각형재의 평균형 압출시 공정조건의 변화에 따른 하중과 유동양상에 대한 실험적 연구

의 실험을 위하여 다이 세트(die set)를 제작하였다. 단면감소율의 영향을 파악하기 위해서 단면감소율 45%와 70%인 정사각형의 하다이를 제작하여 이를 교체해 가면서 실험할 수 있도록 제작하였다. 또한, 최종단계에서의 파이핑 결함의 모양을 축대칭의 경우와 비교해 보기 위해서 원형 하다이도 동일한 단면감소율로 제작하였다. Fig. 1에 평균형 압출의 실험에 사용한 실험장치의 개략도를 보였다.

압출실험은 제작된 다이 세트를 설치한 SHI-MATZU UH-100A UTM에서 수행하였다. 본 실험에서는 GPIB Interface를 이용하여 PC에서 실험 중의 행정과 하중이 자동으로 제어되게끔하여 실제 압출실험을 수행하였다. Fig. 2는 실험에서

사용한 UTM의 구성을 간략하게 도시하였다.

사용한 시편의 크기는 $\phi 25\text{mm} \times H25\text{mm}$ 이고, 다이 랜드의 코너부 반경은 2mm이며 실험속도는 30 mm/min이다.

Fig. 3은 원형 소재로부터 정사각형재가 평균형 압출된 후의 형상을 보여 준다. Fig. 4(a)는 실험에 사용한 온시편과 분할시편을 보여주고 있고, Fig. 4(b)는 포토 에칭 후의 분할시편의 모습을 보여준다. Fig. 5는 단면감소율이 45%, 70%인 경우에 있어서 윤활과 무윤활의 경우에 있어서 압출 후의 정사각형재의 형상을 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압출하중

(1) 공정변수의 변화에 따른 압출하중의 변화

Fig. 6은 정사각형재의 평균형 압출시에 여러가지 공정변수에 따른 압출하중의 변화를 전체 행정에 대해서 그린 그림이다. 그 경향을 보면, 초기에 소재를 다이에 완전히 채울 때까지 하중이 급격히 증가하여 최고점에 달한 후 펀치가 진행함에 따라 마찰면과 전단면의 감소로 인해 하중이 서서히 감소하다가 높이감소율이 약 80%이후에 코이닝 효과(coining effect)로 인해 하중이 다시 증가한다. 이러한 경향은 단면감소율이 변화여도 거의 같은

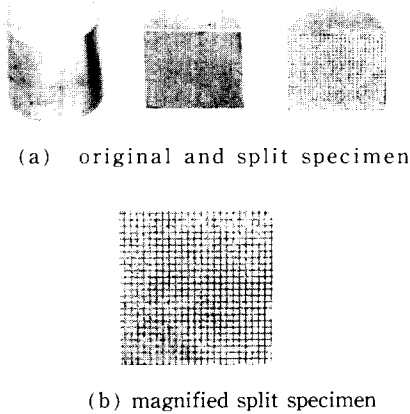


Fig. 4 The photograph of the specimen used in experiments

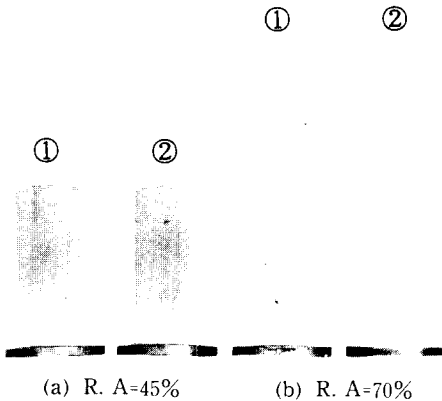


Fig. 5 The extruded square-bars for various area reductions and friction factors(① 윤활, ② 무윤활)

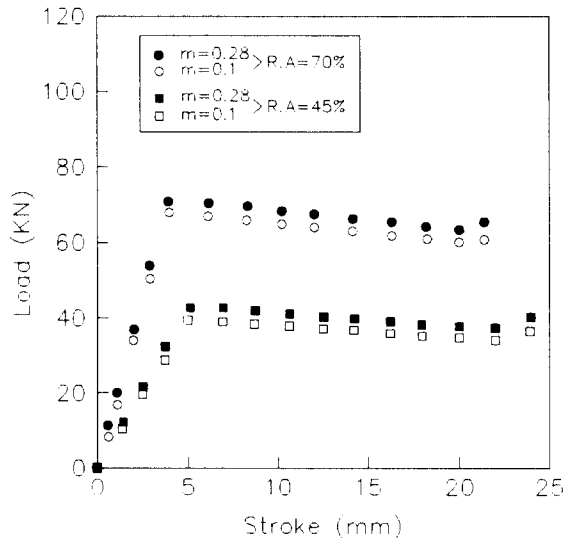


Fig. 6 Load-stroke diagram for various process conditions

거동을 보여주고 있는데 다만 단면감소율이 커지면 압출하중이 전 공정에 걸쳐 증가하게 된다. 또한, 마찰상수가 증가하여도 압출하중은 증가한다.

(2) 온시편과 분할시편의 차이

Fig. 7은 압출하중에 대한 분할시편과 온시편의

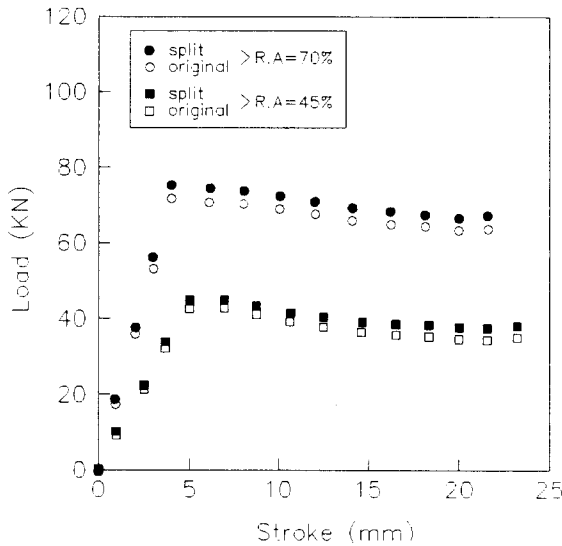


Fig. 7 Comparison of loads between original and split specimen

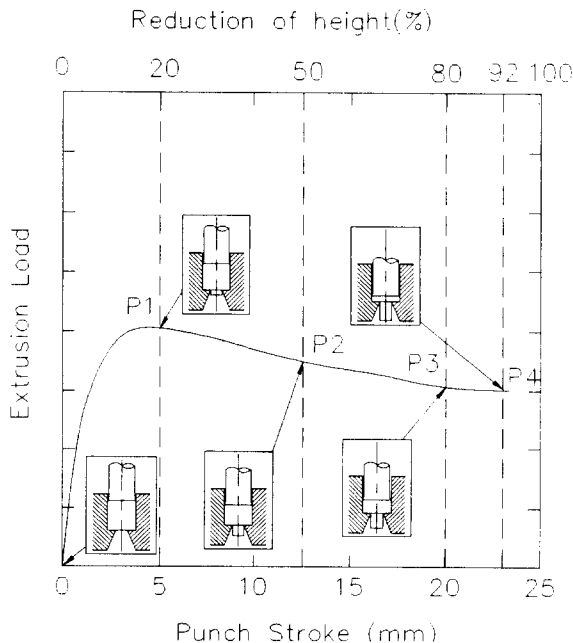


Fig. 8 Four investigated points of process in present study

영향을 보여주고 있다. 온시편에 비해서 분할시편을 사용할 경우에는 대략 4~5% 정도의 하중 증가가 발생하고 있는데 이는 온시편을 분할함에 따른 마찰면의 증가로 인하여 발생한 것으로 생각된다.

3.2 유동양상

Fig. 8은 평균형 압출시 나타나는 전형적인 하중-변위 선도에서 공정변수의 영향에 대하여 본 연구에서 관찰하고자 한 시점을 보여주고 있다. 본 실험에서는 공정의 초기(P_1), 중기(P_2), 후기(P_3)를 각각 높이감소율이 20%, 50%, 80%일 때로 보고, 또한 파이핑 결함의 형태를 자세히 관찰하기 위하여 높이감소율이 92%일 때를 말기(P_4)로 보아 전체 네 가지의 시점에 대하여 유동을 분석하고자 하였다.

(1) 펀치진행에 따른 유동양상의 변화

Fig. 9는 단면감소율이 70%이고 무윤활인 경우의 A-A'단면에서의 펀치 진행에 따른 유동의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보여지는 것처럼 P_1 에서는 소재의 대부분이 비유동영역(dead metal zone)인 상태에서 P_2 로 가면서 유동영역이 점차 증가하고 P_3 에서는 대부분 유동영역이 됨을 알 수 있다. 또한, P_3 에서 보면 펀치 바로 아랫부분에서 파이핑 결함이 나타나기 시작하고 P_4 가 되면 이 결함은 길게 성장하여 제품의 상당 부분을 못쓰게 만드는 것을 알 수 있다. 따라서, 실제 공정에서는 높이감소율이 약 80%가 되면 성형을 끝내는 것이 좋을 것으로 판단된다.

전체적인 유동양상은 소재의 바깥 부분에서는 다이와의 마찰로 인하여 유동이 지체되어 속도가 느리고 마찰이 없는 가운데 부분에서는 속도가 빠르게 나타나고 있다. 또한, 평균형 압출시에 하다이의 코너부에 나타나는 전형적인 3차 곡선 형태의 비유동영역을 관찰할 수 있는데, 이 비유동영역은 공정이 진행함에 따라서 펀치가 비유동영역에 닿아 그 크기가 점점 줄어들면서 최종적으로는 전체 영역이 소성 영역으로 됨을 알 수 있다.

결국, 평균형 압출의 해석시 속도장을 잡을 때에는 해석하고자 하는 공정이 초기 단계냐 최종 단계냐에 따라 속도장의 형태를 달리 잡아 주는 것이 타당하다고 생각된다. 예를 들어, 비유동영역이 대부분을 차지하고 있는 초기 단계에서 전체 영역을 소성변형 영역으로 가정하고 해석을 수행한다면 이는 하중을 상당히 과대 평가할 우려가 있는 것이

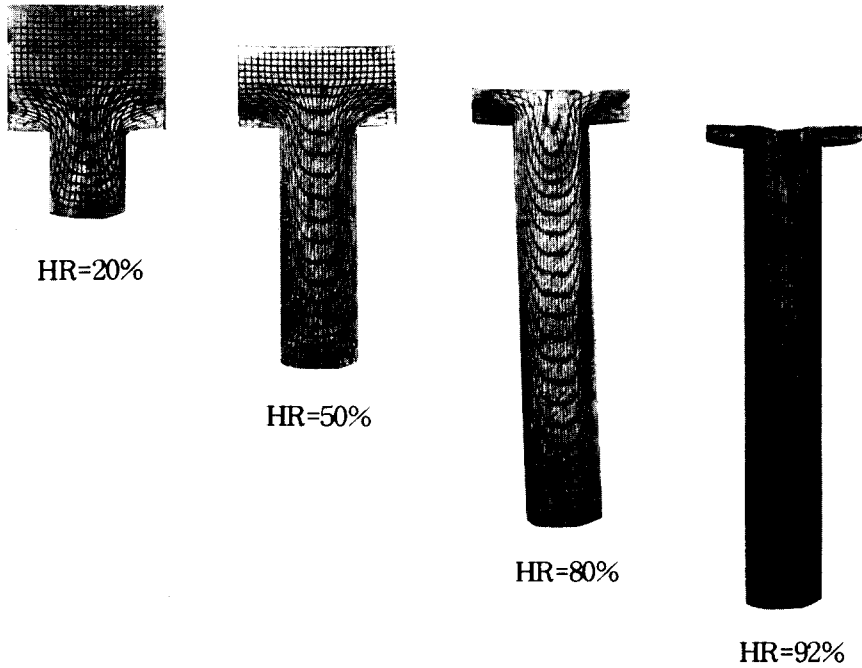


Fig. 9 Metal flow patterns for punch travel(R. A=70%, A-A'단면, 무운활)

다. 또한, 유동영역이 대부분인 최종단계에 있어서는 해석의 간편함을 위해 전체영역을 소성영역으로 가정하고 해석을 하는 것은 타당하다고 생각된다.

(2) 대칭면에 따른 유동양상의 변화

Fig. 10은 단면감소율이 70%이고 무운활인 경우에 P_2 에서 A-A'단면과 B-B'단면의 유동을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 것처럼 B-B'단면이 A-A'단면에 비해 압출된 소재의 폭이 커지게 되므로 단면감소율이 작아지는 효과와 유사한 유동을

보여준다고 할 수 있다. B-B'단면에서는 A-A'단면에 비해 유동면이 넓게 존재하고 있고, 비유동영역이 조금 낮아지고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 B-B'단면에서는 하다이의 코너부 길이가 짧아지게 되므로 마찰면이 감소하여 A-A'단면에 비해 유동을 억제하지 못하기 때문이라고 생각되어진다.

결국, 원형 소재에서 정사각형재의 평균형 압출시 발생하는 코너부 비유동영역의 형태는 Fig. 11과 같이 나타나는데, 실제로 공정을 해석할 때 비유동영역의 형상이 다이의 모양에 따라 3차원적으로 변하므로 이를 참고하여 속도장을 유도하게 되면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

(3) 단면감소율 변화에 따른 유동양상의 변화

Fig. 12는 무운활인 경우 A-A'단면의 P_3 에서 단면감소율(45%, 70%)의 변화에 따른 유동양상의 변화를 보여주는 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 단면감소율이 커지면 소재 내부의 유동이 빨라짐을 알 수 있고 출구가 좁기 때문에 동일한 체적이 압출되어도 압출 길이는 증가하게 됨을 알 수 있다. 앞에서 언급한 것처럼 하다이 코너부의 비유동영역도 단면감소율이 증가하면 커지는 경향을 보여주고 있다.

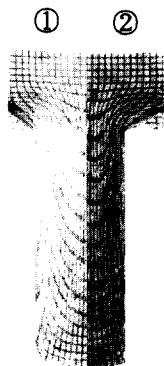


Fig. 10 Metal flow patterns for the change of symmetry plane(R. A=70%, H. R=50%, 무운활, ① A-A'단면, ② B-B'단면)

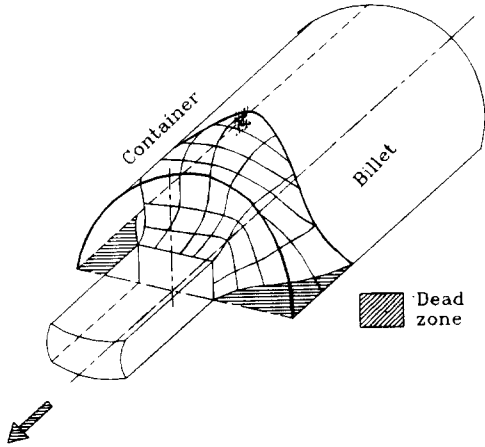


Fig. 11 The shape of dead metal zone of the square die extrusion of square-bars from circular billets

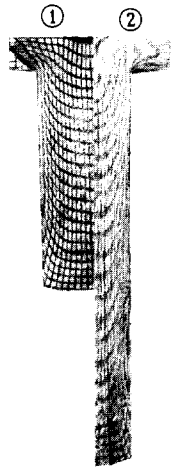


Fig. 12 Metal flow patterns for the change of area reductions (H. R=80%, 무윤활, A-A'단면, ① R. A=45%, ② R. A=70%)

(4) 마찰 조건의 변화에 따른 유동양상의 변화

Fig. 13은 P_3 에서 단면감소율이 45%일 때 A-A' 단면에서의 윤활 조건에 따른 유동양상의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보여 주는 것처럼 윤활의 경우에는 무윤활의 경우에 비해 소재와 다이 벽면 사이의 마찰저항이 적어 하다이 코너부의 비유동영역이 줄어들고 바깥면의 유동도 빨라짐을 확인할 수 있다. 결과로부터 속도장이 마찰상수의 함수가 된다는 것을 알 수 있으며 실제 공정의 해석시 이를 고려하여 속도장을 유도하면 평균형 압출시

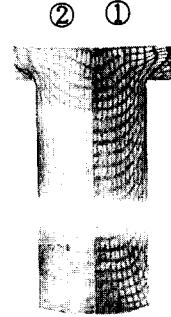


Fig. 13 Metal flow patterns for the change of friction factors (R. A=45%, H. R=80%, A-A'단면, ① 윤활, ② 무윤활)

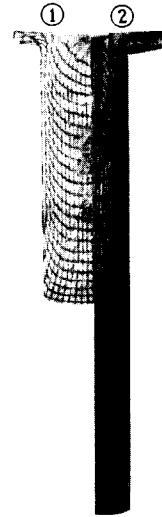


Fig. 14 Piping defects for the change of area reductions (H. R=92%, 무윤활, A-A'단면, ① R. A=45%, ② R. A=70%)

보다 실제의 유동에 가까운 속도장을 구성할 수 있다고 생각된다.

(5) 최종단계에서의 파이핑 결함

Fig. 9에서 보인 것처럼 파이핑 결함은 높이감소율이 약 80% 정도에서 발생하기 시작하여 점점 크고 깊어지는 경향을 알 수 있었다.

Fig. 14는 무윤활의 경우 P_4 에서 단면감소율이 45%와 70%일 때 A-A'단면에서 파이핑 결함을 관찰한 것인데, 이를 보면 파이핑 결함의 형태는 단면감소율이 작으면 넓고 얇게 존재하는 반면 단면감소율이 커지면 상대적으로 좁고 깊게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 단면감소율이 클수록 편치 아래부분의 유동이 빨라져 파이핑 결함이 먼저

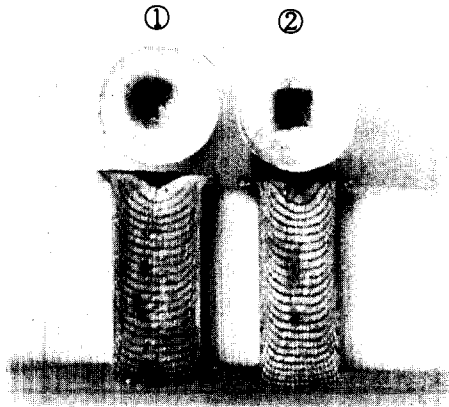


Fig. 15 Comparison of piping defects between axisymmetric and non-axisymmetric extrusions (H. R = 92%, R. A = 45%, ① round, ② square)

발생하면서 깊게 형성되어진다고 생각된다.

Fig. 15는 참고로 45%의 동일한 단면감소율에서 파이핑 결함의 형태를 원형 바제품의 압출시와 비교한 것인데 단면감소율이 같으므로 펀치 하부의 소재 유동속도가 거의 같아 파이핑 결함의 깊이는 거의 같으나 상부에서 본 파이핑 결함의 모양은 확연히 차이를 보여주고 있다.

이 결과로부터 상세해석시 속도장을 구성할 때 파이핑 결함의 모양을 참고로 하여 속도장을 유도하면 최종단계에서 파이핑 결함의 발생을 예측하고 이를 억제하는 데 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

원형 소재에서 정사각형재를 평균형 압출하는 공정에 있어서 금형 설계 및 공정 설계의 기초 자료를 제공하기 위하여 실험을 수행하였다. 온시편을 사용하여 공정변수에 따른 전 공정의 하중의 경향을 얻었고, 또한 소재 내부의 유동을 파악하기 위하여 분할 시편의 한쪽면에 포토 에칭하는 방법을 사용하여 여러가지 공정변수에 따른 유동양상을 분석하였다.

그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 정사각형재의 평균형 압출시에도 축대칭의 경우와 마찬가지로 전형적인 하중-변위 선도를 보여준다.

(2) 단면감소율과 마찰상수가 증가할수록 전 공정에 걸쳐 압출하중은 증가한다.

(3) 실제 공정해석시의 속도장은 해석 단계에 따라서 달라져야 한다.

(4) 분할시편의 하중은 마찰면의 차이로 인해 온시편보다는 조금 증가한다.

(5) 단면감소율이 증가할수록 유동이 빠르고 압출길이가 길어지며 하다이 코너부의 비유동영역이 커진다.

(6) 대칭면의 폭이 긴 쪽이 짧은 쪽에 비해 하다이 코너부의 비유동영역이 커진다.

(7) 윤활이 잘 되어진 제품일수록 하다이 코너부의 비유동영역은 감소하고 벽면의 유동도 빨라진다.

(8) 파이핑 결함은 단면감소율이 클수록 먼저 생성되고, 결함의 형태가 상대적으로 좁고 깊게 발생한다.

참고문헌

- (1) Chen, C. C., Oh, S. I. and Kobayashi, S., 1979, "Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing", Trans. ASME, J. Eng. for Ind., Vol. 101, pp. 23~35.
- (2) 강연식, 양동열, 1994, "ALE 묘사에 근거한 강-점소성 유한요소 수식화와 축대칭 평균형 압출에의 적용", 한국소성가공학회지, 제 3권 제 2호, pp. 156~166.
- (3) Chen, C. T. and Ling, F. F., 1968, "Upper-Bound Solution to Axisymmetric Extrusion Problems", Int. J. Mech. Sci., Vol. 10, pp. 863~879.
- (4) Takuda, H., Hatta, N. and Lippmann, H., 1990, "Upper Bound Approach to Plane Strain Extrusion under Non-standard Conditions", J. of the JSTP, Vol. 31, pp. 202~207.
- (5) Das, N. S. and Johnson, W., 1988, "Slip-Line Fields of Indirect Type for End Extrusion through Partly Rough Square Dies", Int. J. Mech. Sci., Vol. 30, No. 1, pp. 61~69.
- (6) Keife, H., 1993, "Extrusion through two die opening : A 2-Dimensional Upper-Bound Analysis Checked by Plasticine Experiments", J. of Materials Processing Technology, Vol. 37, pp. 189~202.
- (7) 엄태복, 한철호, 1995, "변형가시화법을 이용

- 한 열간 축대칭 평금형 압출의 실험적 해석”, 한국소성가공학회 '95 춘계 학술대회 논문집, pp. 107~113
- (8) Tokizawa, M., Takatsuji, N., Murotani, K. and Matsuki, K., 1982, “Studies on the Metal Flow and Die Shapes in Extrusion of Al-4%Mg Alloy”, J. of the JSTP, Vol. 23, No. 256, pp. 437~443
- (9) Kiuchi, M., Hoshino, M. and Iijima, S., 1988, “Simulation of Unsteady Flow in Non-axisymmetric Forward Extrusion-II”, Research Report of Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Vol. 40, No. 4, pp. 184~187.
- (10) 강연식, 양동열, 1994, “자동단위체 격자구성법을 이용한 열간 평금형 압출의 3차원 유한요소 해석”, 한국소성가공학회 '94 춘계 학술대회 논문집, pp. 64~73.
- (11) 변삼수, 한철호, 1995, “플라스티신을 이용한 정사각형재의 열간 평금형 압출공정의 실험적 연구”, 한국정밀공학회 '95 춘계 학술대회 논문집, pp. 187~191
- (12) 김동권, 조종래, 배원병, 1995, “평금형을 이용한 원형 소재에서 다각형바의 최종단계 전방압출에 관한 연구”, 한국소성가공학회지 제4권 제1호, pp. 59~68
- (13) 김종규, 1977, 후방압출공정의 해석, 석사학위논문, 한국과학기술원
- (14) 배덕한, 1984, 소성가공에 있어서 변형가시화법에 대한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원