

유동제어에 의한 피스톤 핀의 전·후방
압출 공정 개발

부산대학교

박종남, 박태준, 김병민

(사) 한국소성가공학회

2001 년 제4회 압출 및 인발 심포지엄

유동제어에 의한 피스톤 핀의 전·후방압출 공정 개발

박종남* · 박태준* · 김병민**

Forward-Backward Extrusion Process Development of Piston-Pin by Flow Control

Jong Nam Park*, Tae Joon Park*, and Byung Min Kim**

Abstract

In cold forging of piston-pin for automobile parts, the flow defect appears by the dead metal zone. This appearance evidently happens in products with a thin piercing thickness for the dimension accuracy and the decrease of material loss. The best method that can prevent flow defect is removing dead metal zone. The purpose of this study is to investigate the material flow behavior of forward-backward extruded piston-pin through the relative velocity ratio and the stroke control of upper moving punch & container using the flow control forming technique. The finite element simulations are applied to analyse the flow defect, then the results are compared with the plasticine model material experiments. Finally, the model experiment results are in good agreement with the FE simulation ones.

Key Words : Flow control forming, Piston-pin, Flow defect, Forward-backward extrusion, Model material experiment

1. 서론

금속의 냉간성형 공정은 일반적으로 한 단계의 성형공정 보다는 두 개 이상의 예비성형 공정을 거치는 다단계 성형공정에 의해 수행된다. 또한 제품의 양호한 치수 정도, 표면조도 및 기계적 성질을 얻을 수 있으므로 자동차부품 등의 제품생산에 많이 사용하고 있다. 냉간단조 공정설계에 있어서 가장 중요한 사항은 결함이 없는 제품을 성형하기 위한 최적의 공정조건 설정이며, 부적절한 경우에는 제품의 형상, 성형조건, 소재의 성형성, 재료의 유동양상에 따른 변형이력 등에 따라 결함이 발생할 가능성이 있다. 냉간성형 공정에 있어서 대표적으로 나타날 수 있는 결함에는 불안정한 금속유동

에 의한 유동결함과 응력상태와 변형이력에 따른 연성과파괴, 금형형상 및 윤활조건 불량 등에 의한 치수정밀도 불량이 있으며, 소재내부의 중심축 선상에 파괴가 일어나는 내부결함과 소재표면의 균열이나 소재 끝 부분에 구멍이 생기는 파이핑 결함(Piping defect)과 같은 외부 결함으로 구분할 수 있다.⁽¹⁾ 이러한 결함은 제품의 수명 저하와 제품의 생산단가 상승의 원인이 되므로 초기 공정설계 단계에서 결함을 예측하고 방지하는 것이 중요하다. 양방향 컵 형상을 가지는 제품의 경우 두 번의 후방압출 공정을 행하여 제품을 성형하는 것이 일반적이나 후방압출 공정에서 재료의 유동이 한쪽으

* 부산대학교 일반대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

함(Flow defect)이 발생하게 된다. 이러한 제품의 성형 방법은 다양히 연구되어 왔다. Arentoft & Bay 등⁽²⁾은 양방향 컵 압출 공정에서 마찰실험을 통해 공구 이동에 대한 양쪽 컵의 높이에 대해 연구하였다. Osakada 등⁽³⁾은 이러한 결함을 해결하기 위하여 전·후방 압출공정에서 컨테이너의 구동을 이용한 유동제어로 소재의 전·후방부 금형내의 동시충만을 통한 압출하중 감소에 대하여 연구하였다. Nakano⁽⁴⁾는 소성유동을 제어하는 정형가공의 유용한 방법인 복동성형과 복합단조 기술이 다이캐스팅 등 다른 분야로의 공법전환이 가능케 되어 프레스 가공 분야가 확대될 것으로 전망했다. Ishinaga⁽⁵⁾는 정형의 제품생산을 위한 냉간 단조용 프레스 설계에 대하여 연구하고 정밀도 향상을 위한 프레스 주변장치에 대해 소개하였다.

복합압출에 있어서 전·후방부로의 단면감소율이 다를 경우에 재료는 단면감소율이 적은쪽으로 유동하기 쉽고, 동일한 단면감소율이라도 구동 펀치축과 고정 펀치축에서의 압출 높이는 크게 다르다. 이것은 재료와 다이내면과의 마찰등의 영향으로 소성유동이 달라지기 때문이다. 따라서 전·후방부에 재료의 유동량을 안정적으로 실현하기 위해서는 컨테이너 등을 설치하여 강제적으로 재료의 유동을 제어하는 기술이 필요하며, 이때 조기에 완전히 정지하면 공정의 종료시에 역류가 생성되어 균열등의 결함이 발생하는 수가 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 얇은 벽두께를 갖는 자동차 피스톤 핀을 대상으로 하여 제품의 성형시 발생하는 결함을 초기 공정설계 단계에서 유한요소 해석을 통하여 예측하고 유동결함을 없앨 수 있는 공정을 설계하였다. 또한 프레스 가공으로의 성형가능성을 판단하기 위한 목적으로 실험용 복동식 프레스(Double action press)를 이용한 컨테이너 구동방식을 통하여 최적의 펀치와 컨테이너의 상대속도비를 유한요소 해석 결과로부터 구하여 플라스틱인 모델실험과 비교 검토하였다.

2. 피스톤 핀의 유동제어 성형기술

고정밀도의 정형가공은 보다 복잡한 형상, 즉 얇은 벽 두께를 가지거나 또는 두께가 각 부에서 달라지는 형상 등에 있어서 전·후방 복합압출과 같은 프레스 가공이 필요하게 된다. 복합 냉간단조 성형을 포함한 유동제어 성형(Flow control forming: FCF) 기술은 재료에 소성 유동을 적극적으로 부여하여 단면형상을 변화시키므로써 가능하다. 이러한 새로운 성형공법은 재료에 소성 유동을 원활하게 하여 복잡한 단면의 형상에 대하여 성형

성을 크게 향상시킨다. 따라서 소결, 다이캐스팅, 인젝션 몰드 등의 공법을 프레스 가공으로의 전환이 가능하게 하여 고정밀도 가공의 비용 절감과 재료 손실을 줄이는 효과를 가져온다.⁽⁴⁾

본 연구의 대상 제품인 피스톤 핀은 Fig. 1과 같이 커넥팅 로드 조립체(Connecting rod assembly)에 조립되며, 피스톤이 받는 압력을 커넥팅 로드를 거쳐 크랭크축에 전달함과 동시에 피스톤을 따라 실린더 내에서 고속 왕복운동의 기능을 하며 전·후방압출 방식으로 제조되고 있다. Fig. 2는 피스톤 핀의 피어싱 전의 형상과 치수를 나타내고 있으며, 강도적인 측면에서 피어싱 위치가 중간에 있어야 되는 조건이 주요한 요구조건이다.

먼저, 성형한 제품의 한쪽 벽의 길이가 52mm이고 제품 벽의 두께가 4mm인 제품에 대해 전·후방압출 공정으로의 성형 가능성을 Aida사⁽⁷⁾의 성형 한계조건을 적용하여 검토하였다. Fig. 3에 양방향 컵 모양의 후방 압출 제품을 성형하는 한계조건을 나타내고 있으며, 이 식으로 부터 양방향 후방압출로 성형 가능함을 알수 있었다.

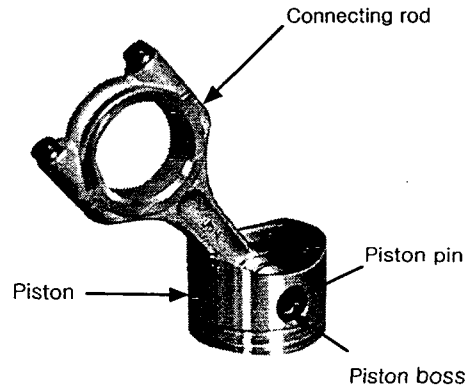


Fig. 1 Assembly of Connecting rod

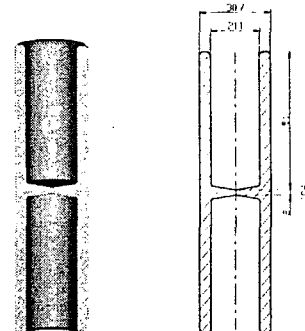


Fig. 2 Photograph and dimension of piston-pin

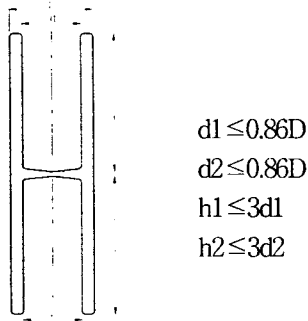


Fig. 3 The limit of forgeability in backward extrusion product

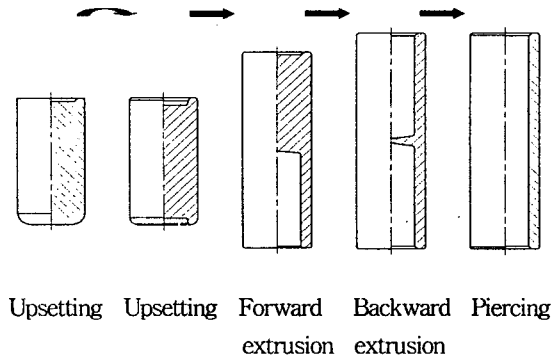


Fig. 4 Conventional forming process sequence for piston-pin

3. 피스톤 핀의 성형해석

해석과 실험을 위해 적용한 재료는 플라스틱인(주성분: $CaCO_3$, $MgCO_3$)이며, 유동응력식은 식(1)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 0.224 \bar{\epsilon}^{0.117} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

소재와 금형의 접촉면은 탈크 파우더로 윤활처리를 하여 링 압축실험 결과인 마찰상수 $m=0.1$ 로 하여 해석을 수행하였다. 피스톤 핀 성형시 나타나는 결함을 해석하기 위하여 상용 강소성 유한요소 코드인 DEFORM-2D⁽⁸⁾를 이용하였다.

Fig. 4는 피스톤 핀의 냉간 다단포미(Multi-stage former)에 의한 기존 생산공정을 보여주고 있다. 기존의 공정은 펀치의 수명과 제품의 치수정밀도 향상을 위해 절단 결함을 없애는 1, 2번째 공정에서의 업세팅 공정과 3번째 공정에서의 전방압출 또는 후방압출로 웨브를 중심으로 먼저 한쪽을 성형하고 4번째 공정에서의 후방압출로 다른 한쪽을 성형한 다음 마지막 5번째 공정에서 피어싱으로 최종제품을 성형하였다. 그러나 기존의 공정으로 제작한 부품의 중앙 웨브를 중심으로 먼저 성형된 부분에 Fig. 5와 같은 유동결함이 발생하였다.

직경이 30mm, 높이가 61mm인 원형소재를 사용하여 기존의 공정대로 성형해석을 수행하고 T. Altan⁽⁹⁾이 제안한 소재의 유동선 추적을 하였다. Fig. 6에 펀치의 행정이 진행됨에 따른 소재의 유동선과 속도분포를 나타내었다.⁽¹⁰⁾ 펀치의 스트로크가 진행되어 웨브부의 두께가 얇아짐에 따라 실 제품에서 나타난 결함부위와 동일한 위치에서 소재의 급격한 유동변화와 속도 불연속

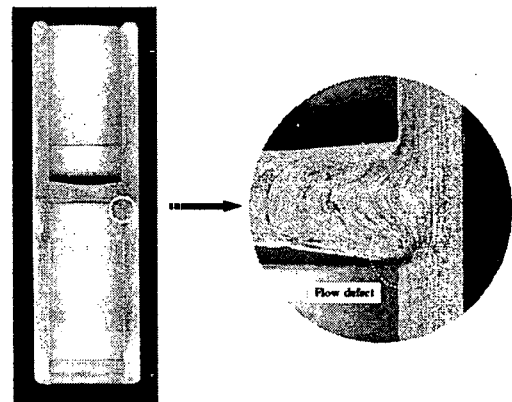


Fig. 5 The photograph of flow defect for piston-pin

을 관찰할 수 있었다. 또한 결함의 형성은 스트로크가 25mm인 단계에서 부터 반경방향의 유동선이 결함발생 부위쪽에 집중되기 시작하고, 이어서 28mm 및 29mm로 증가하면서 소재의 유동이 급격하게 변화하여 소재 내부로 유동결함이 형성되어 올라감을 볼 수 있다. 이것은 기존의 공정으로 성형시 3번째 공정에서 성형이 완료된 부분이 4번째 공정에서 비성형 영역이 되어 소재의 유동이 제한되고 웨브의 소재가 리브(Rib)부로 말려 들어가는 현상 때문에 발생된다. 이러한 결함은 제품의 강도 및 수명에 악영향을 미치므로 결함을 방지할 수 있는 공정이 필요하다. 이를 위해서는 소재유동을 정확히 파악하고 그 유동을 제어할 수 있는 방법이 요구된다. 여기서는 압출 컨테이너 구동방식을 적용하여 해석한 내용을 실험결과와 서로 비교하였다.

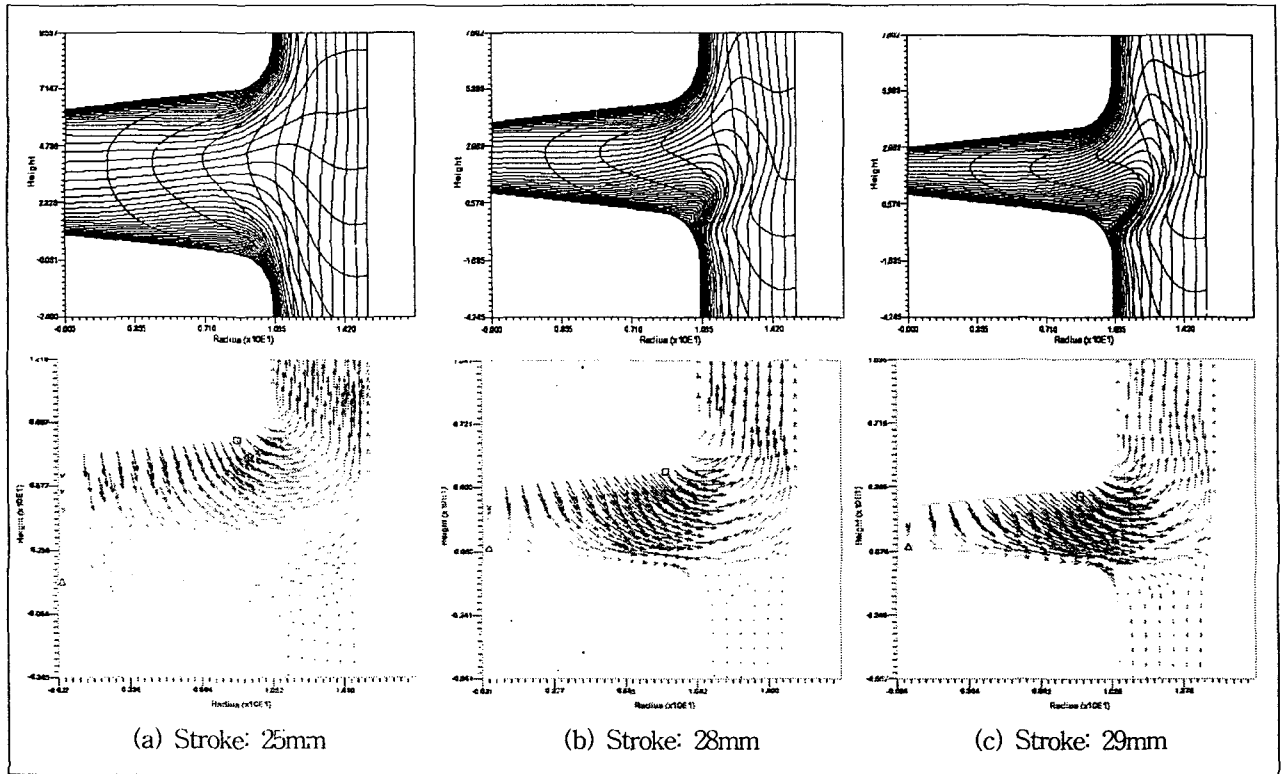


Fig. 6 Flow lines and velocity fields of web where the defect occurred

4. 유동제어 공정설계 및 실험방법

4.1 압출 컨테이너 구동설계

피스톤 핀의 경우에는 전·후방압출비가 동일하기 때문에 양방향 동시 압출시 후방압출부로 먼저 성형이 완료된다. 따라서 제품의 전·후방 압출부의 컵 높이를 같은 길이로 동시에 성형시키기 위해 Fig. 7과 같이 압출 컨테이너를 구동하는 구조를 사용하였다.

먼저 성형이 완료되는 방향과 반대 방향으로 압출 컨테이너를 구동하여 먼저 성형이 완료되는 부분의 소재 유동은 제한하고 반대로 성형이 늦게 완료되는 방향으로 소재의 유동을 원활히 하여 동시에 성형을 완료시키기 위한 구조이다. 본 연구의 대상인 피스톤 핀의 경우에는 전·후방 동시 압출시 후방압출부가 먼저 성형이 완료되기 때문에 컨테이너의 구동방향은 상부펀치의 구동방향과 동일한 전방압출 방향으로 하였다. 이 경우에 있어서 양방향으로 동시에 성형을 완료시키기 위해서 가장 중요한 변수는 펀치 및 컨테이너의 상대속도비와 소재와 압출 컨테이너 사이의 마찰이다. 펀치와 컨

테이너의 속도는 컨테이너의 속도에 대한 펀치의 속도비를 상대속도비로 식(2)와 같이 정의하고 상대속도비를 조정하여 해석을 수행하였다.

$$\frac{V_p}{V_c} = RVR(\text{Relative velocity ratio}) \quad (2)$$

where, V_p : Punch velocity
 V_c : Container velocity

본 연구에서는 소재와 금형간의 마찰상수 $m=0.1$ 에 대해 상대속도비 및 구동펀치의 스트로크만 변화시켜 해석을 수행하였다. 이때 상대속도비의 변화에 따라서 결합의 발생 유무가 결정된다. Fig. 8에 펀치 스트로크가 42.7mm에서 펀치에 대한 컨테이너의 상대속도비가 10:1, 2:1 및 1:1 일 때의 소재의 유동선 추적결과 및 압출높이의 변형양상을 나타냈다. 상대속도비가 10:1 및 1:1 인 경우에는 전·후방부 압출높이가 불균형하고 또한 압출높이가 긴 방향으로 결합이 발생하였다. 그러나 상대속도비 2:1 경우에는 전·후방부 압출높이가 균일하고 유동결합이 발생하지 않았다.

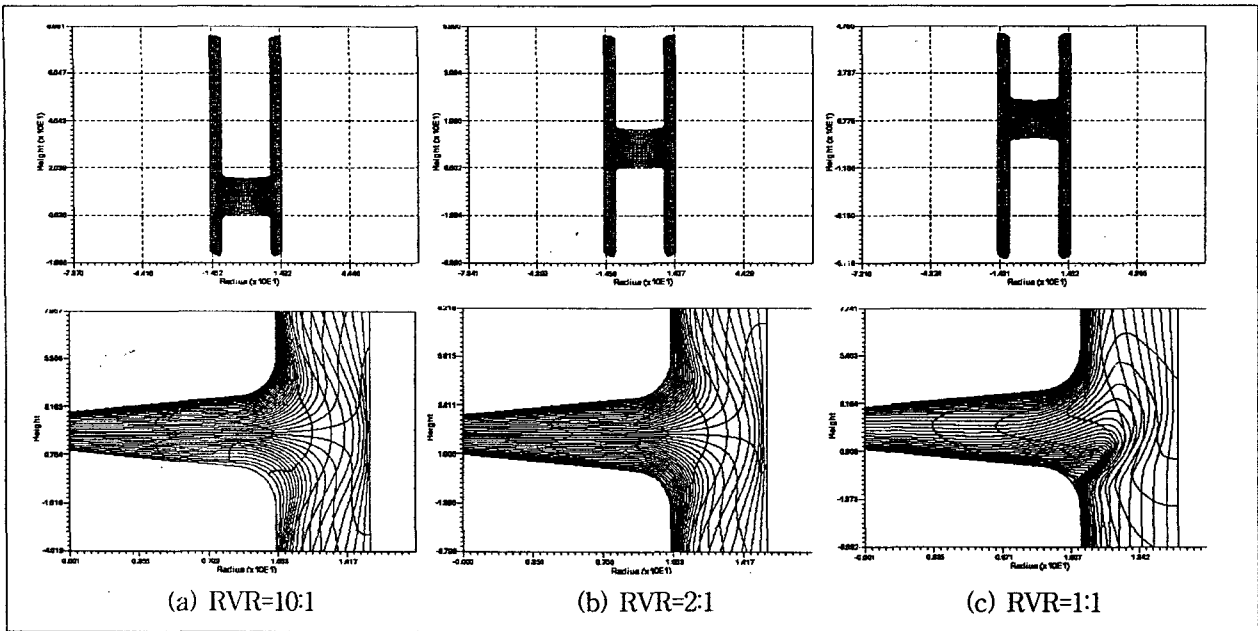


Fig. 8 Comparison of flow lines and forward-backward extrusion height according to relative velocity ratios at punch stroke 42.7mm

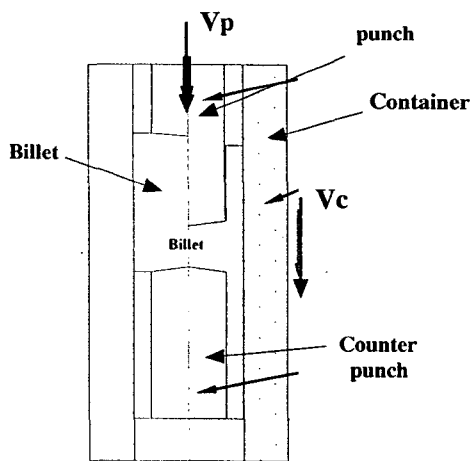


Fig. 7 Schematic draw of axially moving container die structure

4.2 모델재료 실험

4.2.1 금형 및 시편제작

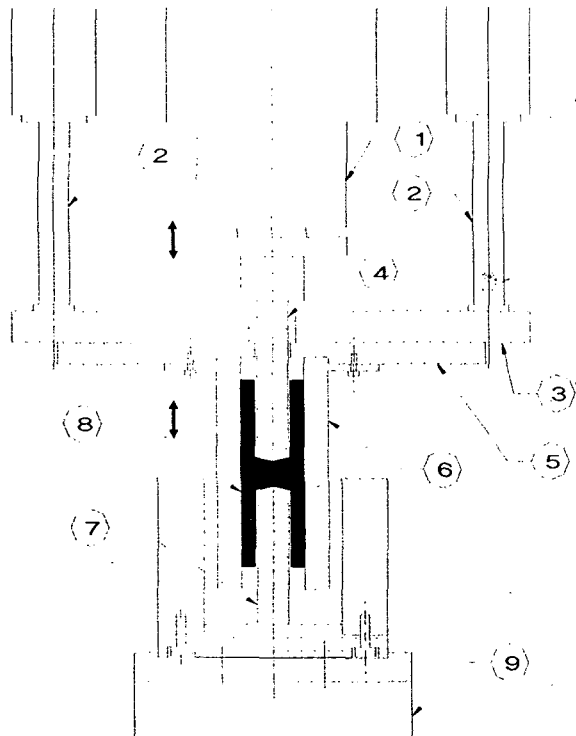
복동식 유압프레스를 이용해 피스톤 핀 제품을 실험하기 위해 제작한 프레스 및 금형의 개략적인 구조는 아래 Fig. 9와 같다. 피스톤 핀 제품은 벽 두께가 얇고 홈 깊이가 깊은 특성 때문에 적절한 금형 형상이 필요하다. 또한 모델실험에 사용되는 소재는 플라스틱인 재료

로서 이 재료는 상온에서의 유동 특성이 강과 매우 유사하여 각종 가공법의 모델재료로 널리 이용되고 있다.⁽¹¹⁾ 그러나 외부힘에 의해 쉽게 변형되므로 성형작업 후 금형으로부터 제품을 분해하기가 쉽지 않다. 따라서 금형설계시 제품분해에 따른 문제점을 해소하기 위해 컨테이너의 몸체부위를 두 부분으로 절개후 볼트로 재조립하여 사용하였다.

실험용 시편의 치수는 직경이 30mm, 높이가 61mm인 원기둥이며, 플라스틱인을 잘 혼합하여 만들었다. 특히 소재의 유동상태를 관찰하기 쉽게 네 단계로 된 적층 시편을 사용하였다. 또한 균일한 시편을 만들기 위해 시편 제작용 치구를 제작하여 이용하였다. Fig. 10은 모델실험 전·후의 시편을 나타냈다.

4.2.2 실험방법

복동식 프레스 장비는 주 구동실린더가 세 개로 구성되어 있다. 중앙에 위치한 펀치 구동용 실린더 1개와 양쪽에 위치하여 상부 베드를 수평으로 일정하게 상·하 구동시키는 2개의 실린더가 그것이다. 본 실험에서는 중앙 실린더에는 상부 구동펀치를 나사로 체결하고, 양쪽 실린더로 구동되는 상부 베드의 하부면에는 컨테이너를 장착시켰으며, 하부 베드상에는 하부 금형(고정펀치)을 나사로 체결 고정하였다. 또한 프레스 후면에 장착된 브라케트에 두 개의 리미트 스위치(Limit



5	Fixed plate	SS41	-		
4	Moving punch	SCM21	9	Dummy	AL 6061
3	Slide frame	-	8	Product	Plasticine
2	Container cylinder	-	7	Fixed punch	SCM21
1	Punch cylinder	-	6	Container	SCM21
No	Part name	Material	No	Part name	Material

Fig. 9 Schematic draw of double-action press and die set

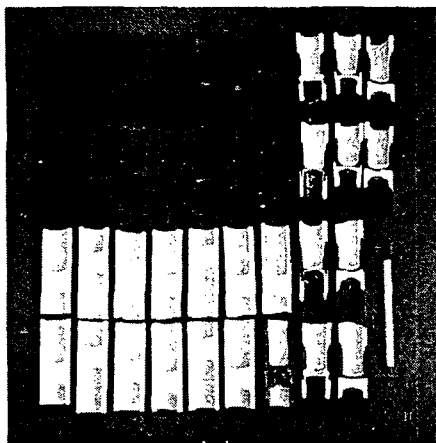


Fig. 10 Model experiment products

switch)를 부착하여 상부 펀치 및 컨테이너가 원하는 최하단 위치에 이르렀을 때 스톱퍼로 리미트 스위치를 작동시켜 자동으로 유압라인이 차단됨과 동시에 각 실린더가 정지하도록 구성하였다. 또한 본 장비에는 정전류(定電流) 컨트롤러 방식의 제품(모델명: 2FRE valve)을 유압밸브 사양으로 선택하여 토출 유량제어를 통해 정확한 속도제어가 가능토록 구성하여 실험하였다. 실험은 일정한 펀치의 스트로크에서 구동펀치와 컨테이너의 상대속도비를 변화시키면서 수행하였다. 또한 일정한 상대속도비에서 구동펀치의 스트로크량을 증가시키면서 제품의 전·후방부 압출 컵 높이와 결합상태를 관찰하였다.

5. 유한요소 해석 및 실험결과, 고찰

5.1 상대속도비 변화

구동펀치의 스트로크량이 일정한 42.7mm 조건에서 펀치에 대한 컨테이너의 상대속도비를 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1 및 10:1로 증가시켜 실험한 결과, Fig. 11과 같이 후방압출부 컵 높이 h_1 는 일정하게 증가한 반면, 전방압출부 컵 높이 h_2 는 반대로 감소하였다. 이는 속도비가 증가(펀치의 속도가 컨테이너에 비해 클 경우)함에 따라 후방압출부의 압출 길이는 커지는 반면 전방압출부는 상대적으로 작아진다. 따라서 속도비 1:1 조건에서는 컨테이너의 속도가 펀치에 비해 상대적으로 크게 작용하므로 h_2 가 h_1 보다 훨씬 크게 나타난다. 특히 Fig. 12(b)에 속도비가 2:1 경우에서 h_1 및 h_2 값이 유사하게 나타나 웨브가 중앙에 위치할 수 있는 최적의 조건임을 알 수 있었으며, 유동결합의 발생없이 소재의 유동이 전·후방부로 균일하게 분포하였다. 그러나 다른 모든 속도비에서는 웨브 입구부에서 유동결합이 발생하였다. 즉, 펀치와 컨테이너의 속도가 동일한 1:1 조건에서는 압출 높이가 긴 전방압출부 방향으로 결합이 나타났으며(Fig. 12(a)), 반대로 속도 차이가 상대적으로 큰 3:1 이상의 조건에서는 압출 높이가 긴 후방압출부 방향으로 유동결합이 발생하였다(Fig. 12(c)). 이는 Fig. 8의 유한요소해석 결과와 잘 일치한다.

또한 속도비가 4:1 인 경우에서는 실험조건의 h_2 값이 이론값에 비해 소폭으로 증가하였는데, 이는 실험시 펀치가 시편 중앙에 정확히 위치하지 못하고 편심되어 압출됨으로써 소재의 유동이 원활하게 흐르지 못해 발생된 것으로 추정된다. Fig. 13은 편심된 벽두께를 갖는 제품을 보여주고 있다

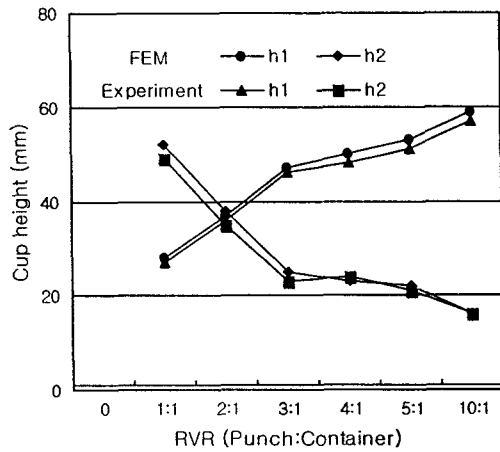
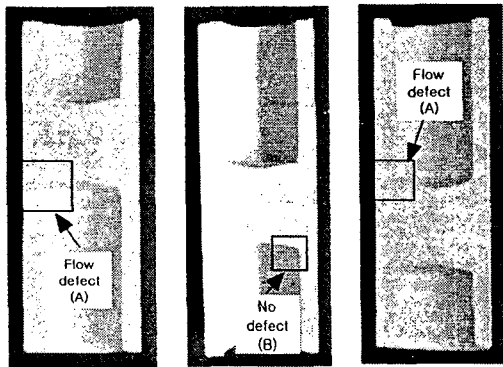


Fig. 11 Relationship between relative velocity ratio(RVR) and extruded cup height by FEM and model experiment at constant punch stroke 42.7mm



(a)RVR=1:1 (b)RVR=2:1 (c)RVR=10:1



(Flow defect (A)) (No defect (B))

Fig. 12 Comparison of flow defect and extruded cup height by RVR difference at constant punch stroke 42.7mm



Fig. 13 Different wall thickness by model experiment

5.2 스트로크량 변화

상대속도비가 일정한 2:1 인 경우에서 펀치의 스트로크량을 42, 47, 51 및 59로 증가시키면서 실험한 결과, Fig. 14와 같이 전·후방부 압출 높이 h1 및 h2 값이 일정한 분포로 증가하였으며, 웨브의 위치는 각 스트로크 단계에서 대부분 중앙에 위치하여 설계조건을 만족하였다. 또한 펀치의 스트로크량이 증가하면서 웨브부의 두께가 감소함에 따라 발생 가능한 소재의 유동결함도 발생하지 않았다. Fig. 15는 펀치의 스트로크를 59mm(웨브두께: 2mm)로 압출시 양쪽방향의 압출 컵 높이가 동일하고 유동상태가 양호한 최종제품을 보여주고 있다.

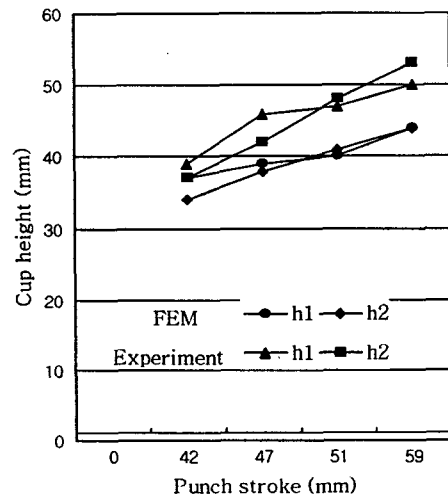


Fig. 14 Relationship between punch stroke and extruded cup height by FEM and model experiment at constant relative velocity ratio 2:1(RVR=2:1)



Fig. 15 Final product(sound metal flow) extruded by relative velocity ratio 2:1(RVR=2:1)

그러나 상대속도비가 3:1 조건에서는 펀치의 스트로크량을 각각 51mm, 56mm 및 59mm로 증가시키면서 압출 실험한 결과, Fig. 16에 후방압출부 높이 h1는 일정하게 증가한 반면, 전방압출부 높이 h2는 감소하였다. 또한 제품의 전체 압출 높이는 각각 98mm, 102mm, 104mm로 나타났다. 결합은 압출 높이가 긴 후방압출부의 웨브쪽에 유동결함이 발생하였으며, 이는 Fig. 12(c)와 동일한 결과이다.

하중은 상대속도비 2:1에서 펀치 스트로크량을 각각 30mm, 42mm, 47mm, 51mm 및 59mm로 증가시키면서 실험한 결과 Fig. 17과 같이 해석결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

다음으로 네 단계로 적층한 시편에 대해 상대속도비를 2:1 조건으로 하여 펀치의 스트로크량을 42mm, 47mm, 51mm 및 59mm로 증가시키면서 압출실험시 각 경우의 소재 유동상태는 유한요소 해석결과와 대체로 잘 일치하였으며, 그 결과는 Fig. 18에 나타났다. 두 그림에서 처럼 1단과 4단부의 소재는 내부 표면으로 모두 유동되었고, 중앙의 2단과 3단 부의 두 적층 소재는 스트로크 증가에 따라 전·후방압출부의 방향으로 유동되어 증가함을 볼 수 있다. 또한 양방향의 압출 컵 높이는 Fig. 14와 동일하게 나타나 중앙 웨브부의 유동결함은 발생하지 않았다.

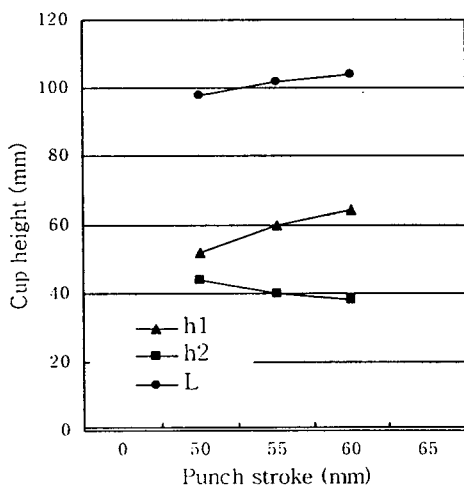


Fig. 16 Cup height extruded by model experiment at relative velocity ratio 3:1 (RVR=3:1)

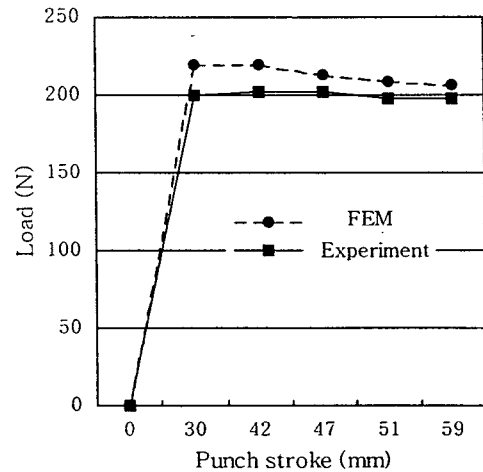
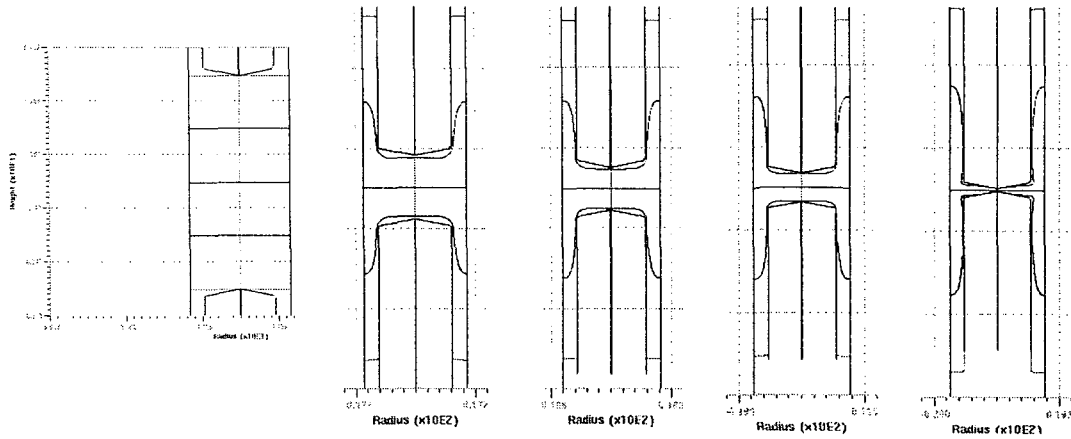


Fig. 17 Comparison of load by FEM and model experiment at relative velocity ratio 2:1 (RVR=2:1)

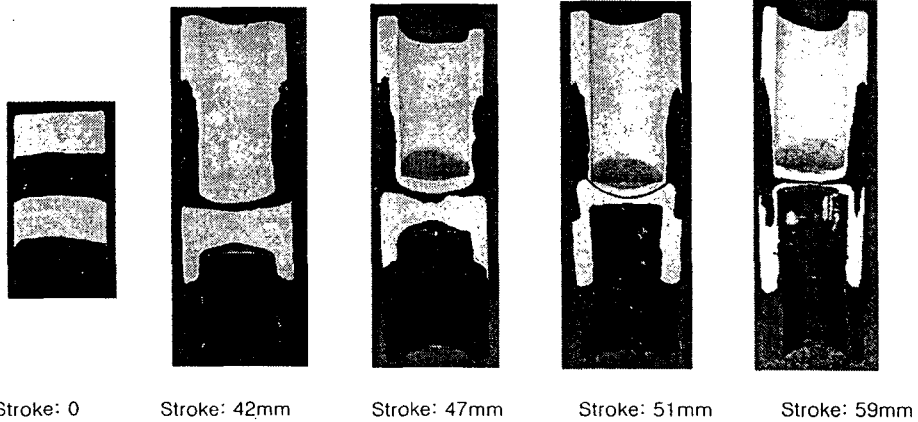
7. 결론

피스톤 핀 제품은 벽두께가 얇고 홈 깊이가 깊은 특성 때문에 웨브를 중심으로 전·후방부 압출 컵 높이가 같도록 성형하여야 한다. 기존의 포머공정에서는 각각의 전·후방압출시 불완전한 소재 유동으로 인해 웨브 가장자리에 유동결함이 발생하였다. 본 논문에서는 이러한 유동결함을 해결하기 위해서 펀치와 컨테이너를 동시에 구동하는 복동식 성형공법을 통해 소재의 유동을 제어하는 방법과 공정수를 줄일 수 있는 공정으로 설계하고 유한요소 해석과 모델재료 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서는 유동결함이 없는 자동차용 피스톤 핀을 성형하기 위하여 압출 컨테이너 구동방식의 유동제어 성형기술을 제시하였다.
- (2) 복동식 유압프레스를 이용한 피스톤 핀 제품성형 실험결과, 유동결함을 발생시키지 않는 압출 컨테이너 구동방식의 구동펀치와 컨테이너의 최적의 상대속도비는 2:1이었다.
- (3) 구동펀치와 컨테이너의 상대속도비와 스트로크에 따른 실험결과는 유한요소해석 결과와 비교적 잘 일치하였다.
- (4) 압출 컨테이너 구동방식으로 전·후방 재료유동을 제어하기 위해서는 구동펀치와 컨테이너의 최적 상대속도비를 결정해야 하고, 최적의 상대속도비가 결정되면 프레스 한 행정으로 결합없는 제품 성형이 가능하다.



(a)



(b)

Fig. 18 Comparison of metal flow in forward-backward extrusion a piston-pin:
(a) DEFORMflownet; and (b) Model experiment with layered billets

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원하에 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) T. Okamoto, T. Fukuda and H. Hagita, 1997, "Material Fracture in Cold Forging- systematic Classification of Working Methods and Types of Cracking in Cold Forging", Source Book on Cold Forming, ASTM, pp. 216~226
- (2) M. Arentoft, C. Vigso, M. Lindegren, N. Bay, "A study of the double cup extrusion process as a friction test", 5th ICTP, vol. 1, pp. 243~249
- (3) Kozo Osakada, Xin Wang and Shinji Hanami, "Forward- Backward Extrusion with Axially Driven Container", 塑性と加工, 第37卷第30号, pp. 1154~1179
- (4) T. Nakano, 1994, "Modern applications of complex forming and multi-action forming in cold forging", J. Mat. Proc. Tech., No.46, pp. 201~226
- (5) N. Ishinaga, 1997, "An advanced press design for cold forging", J. Mat. Proc. Tech., No.71, pp. 100-104
- (6) W. D. Graf & Schnombusch H. : Fertigungstechnik und Betrieb, 23, pp. 365, 535, 1973

- (7) AIDA 社, 1982, "プレスハンドブック", 第 2 版, pp. 80~121
- (8) "DEFORM user's manual V4.1", 1995, Scientific technologies corporation.
- (9) T. Altan and M. Knoerr, 1992, "Application of the 2D finite element method to simulation of cold-forging process", J. Mater. process. Technol., vol. 35, pp. 275~302
- (10) 김동진, 김병민, 이동주, "유동제어를 통한 자동차 용 피스톤-핀의 공정설계", 한국소성가공학회지, 제 10권 제2호, pp. 151-159, 2001
- (11) T. Wanheimand and J. Danckert, 1987 "Combined physical and Numerical Modeling of Metal Forming Process", Advanced Technology of Plasticity, vol. I, pp. 29~36