

디젤 엔진용 분절 피스톤의 예비성형체 단조 공정 연구

염성호* · 이병섭** · 노병래*** · 서기석**** · 홍성인#

(2004년 7월 2일 접수)

A Study on Forging Process about Preform of Articulated Piston for Diesel Engine

S. H. Yeom, B. S. Lee, B. R. Rho, K. S. Seo and S. I. Hong

Abstract

Today the specific outputs of modern supercharger DI diesel engine for passenger cars reach values exceeding 50kw/l. By development of the articulated piston, specific output of up to 70kw/l are sought. In doing so, peak cylinder pressure increases from the current 14-16MPa to 18-20MPa. The Articulated piston was composed Al cast skirt part and steel forged crown part. We have the target for the design of forging process and die of the steel forged crown part. The design parameters of the forging process of the piston were obtained by the forging industry experiences and our experimental data and analysis result of finite element simulation. Especially, the design parameter of preform in blocker die was decided by finite element simulation using numerical package DEFORM3D. And also we can verify the design parameter by conducting visio-plasticity test using plasticine material. When we compared the results of analysis and experiment, a metal flow and load curve showed good agreement. Through this research, we could design optimal preform shape of articulated piston for this supercharged DI diesel engine.

Key Words : Diesel Engine, Articulated Piston, Forging Process Design, Preform, Plasticine

1. 서 론

고출력 디젤엔진에 사용되는 분절 피스톤(Articulated piston)은 최근에 들어 실린더 내부의 압력이 18MPa 이상에도 견딜 수 있도록 요구됨에 따라 그 사용 빈도가 증가하고 있고, 미국 및 유럽에서는 이미 생산되어 사용되고 있다. 우리나라에서도 디젤엔진의 고출력화에 따라 기존에 사용된 알루미늄 피스톤이 기계적·열적 부하의 증가를 견디지 못하고 피스톤 핀 보스의 파손, 피스톤

링 및 스커트의 마모 등과 같은 문제가 발생하여 새로운 요구를 만족시키고 알루미늄 피스톤의 문제점을 해결하기 위해 분절 피스톤을 개발하게 되었다. 분절 피스톤은 크라운 부와 스커트 부가 독립적으로 제작된 후 이를 결합하는 방식이다. 일반적으로 크라운 부는 단조로 제작되고, 스커트 부는 알루미늄 주조로 제작된다. 그 중 크라운 부의 제작은 피스톤 핀이 끼워지는 부분까지 단조 성형으로 제작되는데 리브와 웨브의 두께비가 커지므로 소재의 충만을 좋게 하고 금형에 미치는

* 충남대학교 기계공학과 대학원

** 한국기초과학연구원

*** 국방과학연구소

**** 한국원자력연구소

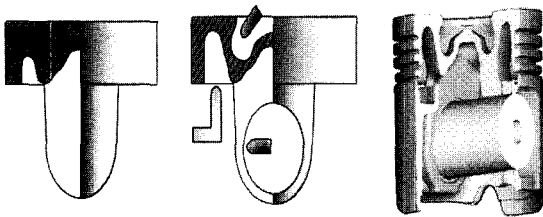
교신저자: 충남대학교 기계공학과

하중을 줄이기 위해 예비성형 과정이 필요하다.

본 연구에서는 예비성형체의 제작을 위해 단조 공정 변수를 우선, 경험적 자료를 기반으로 설정한 후 이를 유한요소 해석과 설정된 예비성형체의 재료 유동의 검토를 위해 플라스티션 (Plasticine) 실험을 병행하였다. 본 연구의 성과로 분절 피스톤 개발의 핵심 기술인 예비성형체 단조 공정에 대한 기술 정보를 확보할 수 있었다.

2. 단조 조건의 결정

분절 피스톤은 단조를 한 후 Fig. 1 에서 보여지는 바와 같이 연소실과 냉각 갤러리(Cooling gallery), 피스톤 핀(Piston pin) 구멍은 절삭하여 크라운 부를 제작하고, 주조로 제작된 스커트 부를 결합하여 최종 완성된다.



(a)Forging (b)cutting (c)assembly
Fig. 1 Manufacturing process of articulated piston

본 연구에 사용된 단조강은 국내에 기 개발된 인장강도 100kg/mm²의 열처리된 크롬몰리브덴강 SCM440을 사용하였다. 또한, 단조품의 깊이가 깊기 때문에 성형성을 향상 시키기 위해서 열간 공정을 선택하였으며, 열간 가공의 경우 소재 온도가 내려가면 변형 저항이 증가하고 피스톤 단조의 경우 성형과정에서 주 변형방향을 한쪽 방향으로 고려할 수 있기 때문에 이에 상대적으로 유리한 고속 해머를 단조기계로 선정하였다. 또한, 성형에너지를 계산하고 유한요소 상용프로그램인 DEFORM-3D⁽¹⁾을 이용 확인하여 개방형 파워 드롭 해머 250ton을 선정하였다. 일반적으로, 성형 온도는 고속 해머에 의한 단조 성형의 경우, 성형이 끝나는 시점에서 단조품의 온도가 A₃변태점보다 조금 높도록 설정하므로, 단조재료SCM440의 성형온도를 1200℃로 결정하였다.

3. 단조 공정 설계

파워 드롭 해머를 이용한 단조의 경우 일반적으로 업셋팅(Upsetting), 블록커(Blocker), 피니셔(Finisher) 공정을 통하여 성형된다. 이 중 최종 단조품의 형상과 치수를 결정하는 피니셔 공정을 잘못 설계할 경우 과도한 단조 하중, 금형 마모, 금형 파손, 미 충진(Under-fill), 유동 결합 등의 문제가 발생되고, 이에 따른 경제적 손실을 초래하게 된다. 따라서 적절한 피니셔 금형과 예비성형체를 결정하는 것이 중요하다.

3.1 피니셔 금형 설계

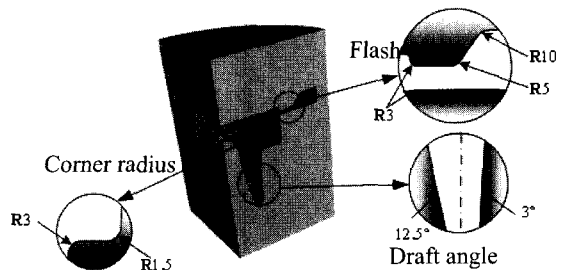


Fig. 2 Geometry of finisher die

피니셔 금형을 위하여 실무자의 경험과 문헌 자료⁽²⁾을 고찰 분석하여 Fig. 2에 나타내어진 바와 같이 필요한 변수들을 설정하여 설계하였다.

최소 리브의 두께는 리브 높이에 의해 결정되며, 보통 높이 대 두께의 비가 최대 6:1을 넘지 않는 범위 내에서 설계하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 이에 본 개발품에서는 최종 단조 제품에 근거하여 높이 46.2mm, 두께 17.5mm로 높이 대 두께의 비가 4:1로 허용 범위 내에 있도록 설계하였다. 소재의 다른 부분들을 이어주는 역할과 금형 공동부에서 소재 유동 통로 역할을 하는 웨브는 금형 분리선의 위치, 드래프트 각, 코너 및 필렛 반경, 리브의 치수, 상단 렌드부와 피스톤 링 벨트부 등을 고려하여 30.1mm로 결정하였다.

제품을 금형으로부터 쉽게 추출하기 위하여 필요한 드래프트 각은 과도할 경우 금형의 가공비용과 재료손실을 증가시키므로 단조품의 수축 방향과 단조 기계의 특성을 살려 적정한 드래프트 각의 결정이 이루어져야 한다. 파워 해머 열간 단조의 경우 단조 후 냉각함에 따라 반경 및 길이

방향으로 수축하기 때문에 안쪽의 드래프트 각이 바깥쪽 드래프트 각보다 상대적으로 크고, 단조품의 깊이가 깊도록 안쪽 12.5°, 바깥쪽 3°로 결정하였다.

코너 및 필렛부에 반경을 두는 것은 금형 공동부 내에서 금속의 유동을 용이하게 할 뿐만 아니라, 금형의 마모 및 파손을 줄이기 위해서 필요하다. 코너 반경과 필렛 반경이 크면 마찰부위에서 상대적으로 응력이 낮아지고 금형 수명이 길어지며, 너무 작으면 금속 유동이 원활하지 않아 미 충진이 발생하거나, 응력 집중에 의하여 금형 마모가 촉진되며 균열이 발생할 수 있다. 그러나, 최종 제품의 치수에 의해 반경을 크게 하는 데는 제한 사항이 따르므로, 최종 제품의 치수에 한정된 반경을 채택하였다.

일반적으로 플래시의 두께는 금형 공동부 최대 두께의 약 3%, 렌드부의 길이 대 플래시 두께는 3:1 정도로 알려져 있고, 많은 계산식 또한 제안되어 있다.⁽²⁻⁶⁾ 그 중 본 연구에서는 열간 단조에 적절하고, 예비성형체의 직경과 높이만으로 계산이 가능한 Vieregge⁽³⁾의 다음 식을 선택하여 결정하였다.

$$S = 0.017d_o + \frac{1}{\sqrt{d_o + 5}} \quad (1)$$

$$b = \frac{3S}{\sqrt{1 + \frac{2d_o}{h}}} \quad (2)$$

여기서, S는 플래시 두께, b는 플래시 폭, d_o 는 예비성형체의 외경, h는 예비성형체의 높이이다. 본 개발품에서 결정된 치수는 $S=1.6\text{mm}$, $b=2.7\text{mm}$, $d_o=89\text{mm}$, $h=80\text{mm}$ 이다.

3.2 예비성형체의 결정

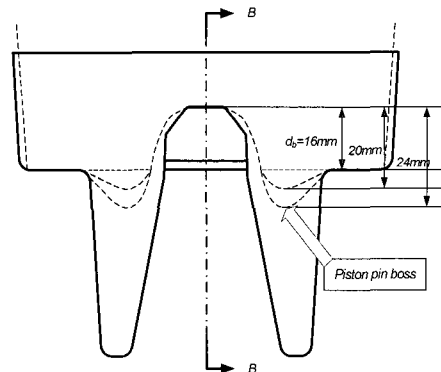
파워 해머의 피니셔 공정에서 예비성형체가 정확하지 않으면 단조 과다 하중이 발생하고 미 충진 및 겹침(lap) 결함이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 최적 예비성형체를 구하기 위해 예비성형체의 형상을 변화 시키면서 최종 금형에서 유한 요소 해석을 진행 하여 소재가 충만 되었을 때 성형 하중을 구하였다. 즉, 예비성형체의 최적 설계의 기준으로 재료의 완충, 성형하중, 기하학적

변수를 사용하였다.

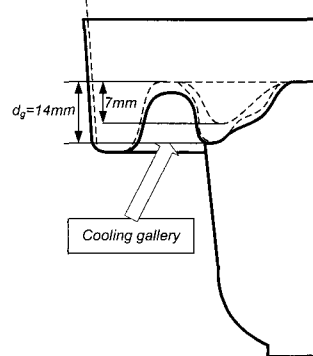
해석에 사용된 조건은 다음의 Table 1과 같으며, 유한 요소 해석은 DEFORM3D로 수행하였다.

Table 1 Analysis condition

Control parameters		
Blow efficiency	0.8	
Hammer mass (kg)	750(1/4 model)	
Billet temp. (°C)	1200	
Billet diameter (mm)	75	
Hammer energy (MN-mm)		
Upset	Preform (blocker)	Finisher
4	5.25	12.5
Material properties		
Billet	SCM440 (1200 °C)	
Upper & bottom die	Rigid	
Inter-object		
Billet-die	0.7	
Shear friction coeff.		



(a) half cutting section view



(b) B-B cutting section view

Fig. 3 Design parameter of piston forging

예비성형체 설계의 범위는 최종형상에 들어가기 전 단계에서 플래시가 생성될 경우 절삭가공 과정을 한번 더 거쳐야 하기 때문에 Fig. 3과 같이 플래시가 생성되지 않는 범위에서 설계 변수를 결정하였다. 갤러리의 깊이 d_g 는 0, 7, 14mm 이고, 핀 보스의 깊이 d_b 는 16, 20, 24mm 로 설정하여 각 변수에 대하여 해석을 수행하였다.

설계변수를 변경시키면서 해석된 성형 하중의 변화를 살펴 보기 위해서 금형 안에서 재료가 충전해지는 타격 거리인 27.5mm 까지 각 경우에 대한 하중값을 Fig. 4 에 나타내었다. 그 결과는 보스와 갤러리의 깊이가 각각 7mm, 20mm 일 경우에 소재가 충전 되는 타격 거리에서 가장 작은 하중 값을 보이고 있다.

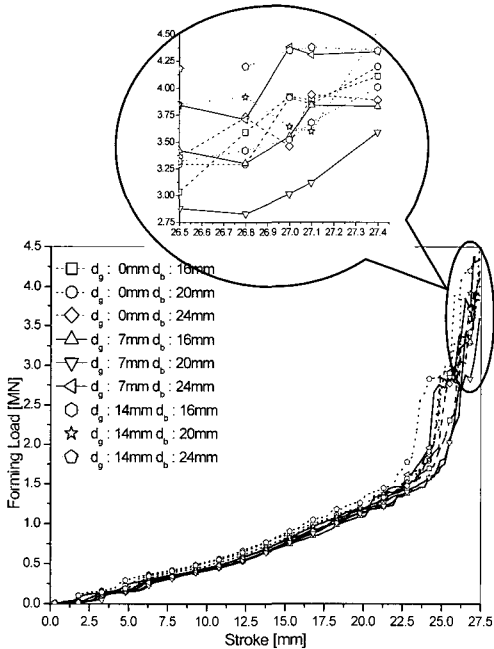


Fig. 4 Comparison of stroke-forming load curve about various finisher process

각 설계 변수에 대한 영향을 보다 자세히 살펴 보기 위해서 Fig. 5는 갤러리의 변화에 대한 하중 값을 Fig. 6은 보스의 변화에 대한 하중 값을 나타내었다. 우선, Fig. 6의 결과를 살펴보면, 갤러리가 작거나 큰 경우에 중간까지는 보스의 깊이가 커질수록 하중이 증가하고 그 이후에는 다시 하중이 감소하는 경향을 발견할 수 있다. 이는 형상에 따라 고른 재료 유동이 일어나지 않고 갤러리가 작은 경우에는 보스 쪽으로 갤러리가 큰 경우에는

갤러리 쪽으로 유동이 치우쳐 충진이 발생하기 때문이다. 이러한 경향은 Fig. 5의 결과에서도 살펴볼 수 있는데 보스가 큰 경우에는 보스 쪽으로 치우쳐 재료 유동이 일어나 갤러리가 커질수록 하중이 증가를 한다. 그러나, 보스가 크지 않는 경우는 적정 갤러리 깊이에서 최소 하중을 나타내는 것을 살펴 볼 수 있다. 따라서 보스의 깊이는 크게 하지 않는 것이 좋다는 결론과 성형하중은 먼저 충전 되는 갤러리의 깊이에 보다 더 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구를 통하여 개발된 분절 피스톤의 경우 Fig. 5와 6의 결과로부터 최소의 성형 하중을 갖는 갤러리 깊이 (d_g) 7mm, 핀 보스의 깊이(d_b) 20mm 를 본 개발품의 예비성형체 치수로 결정하였다.

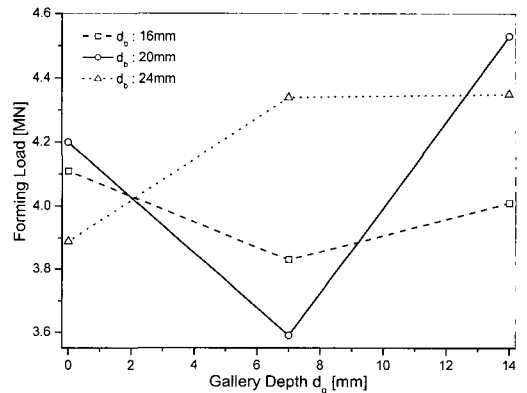


Fig. 5 Relation of forming load and pin boss depth about various gallery depth

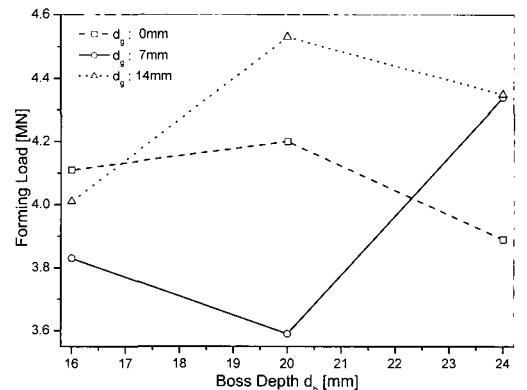


Fig. 6 Relation of forming load and gallery depth about various pin boss depth

4. 예비성형체 재료 유동 실험

4.1 플라스티션 실험

플라스티션의 거동은 열간 가공에서 재료의 거동과 유사한 형태를 나타내기 때문에 열간 재료의 모델 실험 재료로 그 동안 많이 사용되어 왔다. (7-8)

본 연구에서는 기존에 제작되어 있던 장치가 있어 이를 재 활용하는 차원에서 실험 금형의 주요치수는 81% 축소 모델로 제작하였으며, 예비성형체 금형의 실험모델과 실험조건은 Table 2 와 같다.

Table 2 Experimental condition

Billet height (Plasticine)	65 mm (5mm× 13)
Billet diameter (Plasticine)	72.5 mm
Die height	59 mm (72mm*)
Die diameter	90 mm (110mm*)
Die gallery depth (d_g)	5.7 mm (7mm*)
Die pin boss depth (d_b)	16.3mm (20mm*)
Material Tester Capacity	2.5 KN
Forming velocity	1.5 mm/min
Lubrication	Baby powder

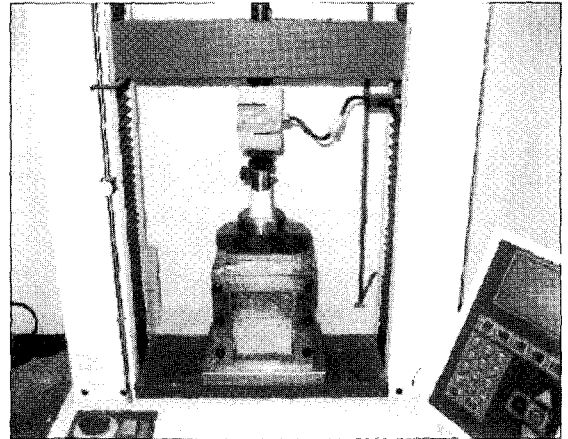
*축소전 모델 치수

플라스티션은 성형과정의 유동형태를 관찰하기 위해 두 가지 색을 사용하였다. 플라스티션의 각 층은 기포를 제거하기 과정을 거친후 5mm 의 두께로 압연하였으며 플라스티션을 하루 정도 보관 후 반원으로 절단하여 적층 하였다. 사용된 실험 금형과 실험장비는 Fig. 7 과 같다.

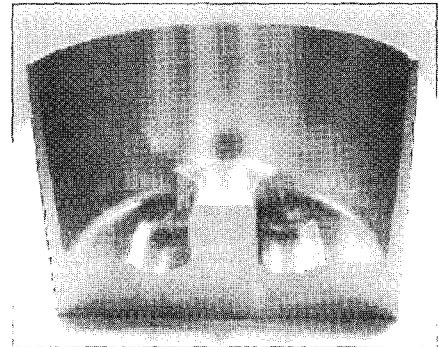
예비성형체로 성형되는 동안 재료유동을 살피기 위해서 실험은 소재가 충전되는 거리 29.7mm 에서 실시되었고, 그 중간 과정을 살피기 위해서 펀치 이동거리 14.5mm, 23mm 에서 별도의 실험을 실시하였다.

4.2 실험 결과

펀치 이동거리 14.5mm, 23mm, 29.7mm 에서의 플라스티션의 변형 모습을 Fig. 8 에 나타내었다. 펀치이동거리 14.5mm 에서 성형과정을 살펴보면 소



(a) Material Tester



(b) Preform Die

Fig.7 Experimental equipment for preforming

재의 중심 부분에서 주로 성형이 진행되어 재료 유동이 중심에 집중되고, 갤러리 부분은 성형이 시작되는 것을 관찰할 수 있다. 중심부는 최종 제품

에서 연소실이 가공되는 곳으로 가장 높은 강도가 요구된다.

그러므로 재료 유동의 집중은 좋은 특성으로 파악되며, 상대적으로 가공이 필요한 재료 중심의 상부는 재료 유동이 심하지 않으므로 후 가공에는 상대적으로 가공 경화의 영향이 적을 것으로 판단된다. 이러한 현상은 23mm, 29.7mm 로 가공이 진행되어도 유지된다. 23mm 에서는 보스 부분이 성형이 시작되는 것을 관찰할 수 있다. 이때에 아직 갤러리 부분은 완전히 충전되지 않고 있다. 이는 갤러리 부분이 먼저 성형되고 충전되어 생길 수 있는 갤러리 부분의 상대적 가공 경화 심화 현상이 설계된 예비성형체에서는 다소 감소 된다는 것을 말해주고 있다.

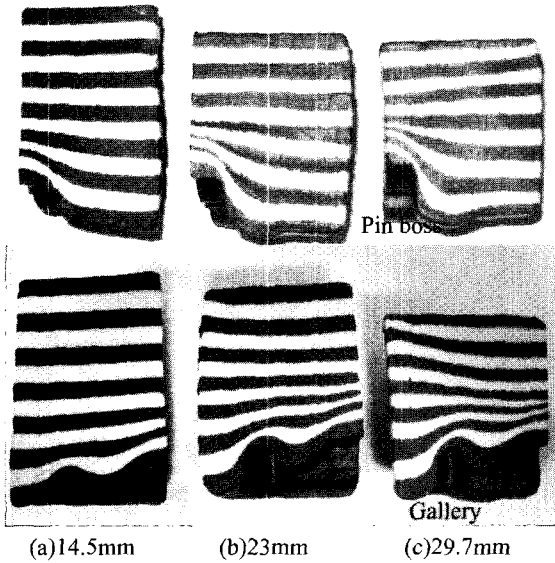


Fig. 8 Material flow shape of preforming experiment

펀치거리 29.7mm 에서 성형은 충분한 충진이 이루어지고 예비성형체가 블록커에서 완성되는 것을 볼 수 있다. 이때 충진시 플래시는 생성되지 않았으며, 예비성형체 하부가 충분히 충진되었는지 Fig. 9의 결과에서 알 수 있다.

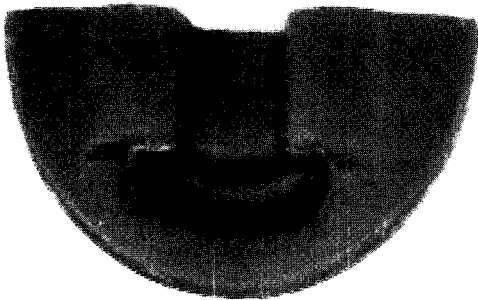


Fig. 9 Filled bottom shape of preform

4.3 실험결과와 해석결과 비교 및 분석

재료 유동에 대한 보다 유용한 정보를 얻기 위하여 실험의 결과와 비교 해석을 실시하였다. 해석은 단조전용해석 프로그램인 SuperForge 을 사용하였으며, 금형 및 소재 치수, 펀치 속도는 위에서 실시한 플라스틱 예비성형체 실험과 동일한 조건으로 설정하고, 재료는 실제 제품의 소재인

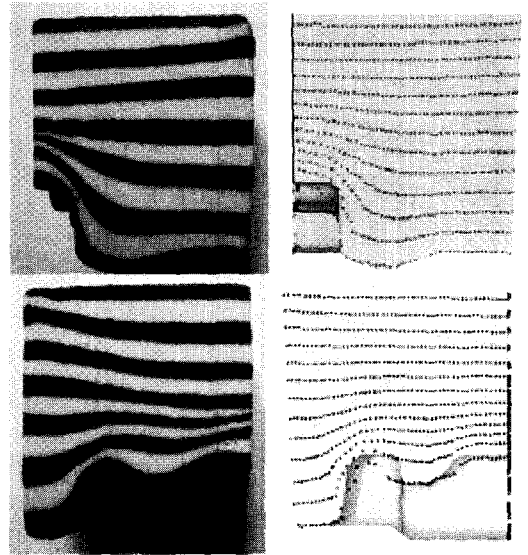
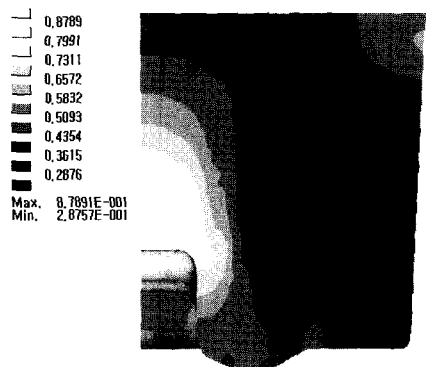
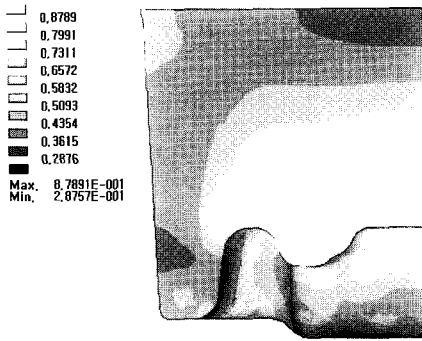


Fig. 10 Comparison of material flow pattern between experiment and analysis

SCM440, 성형온도는 1200℃로 하여 해석을 수행하였다. 해석과 실험의 재료 유동을 Fig. 10에서 비교하고 있다. 두 결과에 있어 유사함을 관찰할 수 있으며, 이를 통하여 사용된 플라스틱이 재료 유동을 나타내기에 유효함을 확인할 수 있으며, Fig. 11의 유효 변형률은 앞에서 설명한 것과 같이 중심부에서 가공경화가 크며 갤러리 부분에서는 중심부와 비교해 상대적으로 가공경화의 정도가 적게 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 보스 부분의 경우 가공경화가 덜 진행되었으므로 피니싱 공정에서 충분한 변형을 진행 시킬 수 있을 것이다.



(a) half cutting section view



(b) B-B cutting section view

Fig.11 Effective strain of preforming analysis

5. 결론

디젤 엔진용 분절 피스톤의 예비성형체 단조 공정의 연구에 의해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 업셋, 블록커, 피니셔과정을 유한요소해석하여 예비성형체를 결정하였다. 이때 설계 변수로는 소재의 완충, 성형하중, 기하학적 변수가 유용하였다.

(2) 예비성형체 설계에 있어서 기하학적 변수로는 갠러리의 깊이와 보스의 깊이가 주 변수였으며, 본 개발 대상의 경우 각각 $d_g=7\text{mm}$, $d_b=20\text{mm}$ 가 유효하였다.

(3) 최적 설계변수에 대하여 플라스티션 실험을 통하여 유동 현상을 관찰하였으며, 플라스티션 실험은 열간 파워 드롭 해머의 유동 현상 묘사에도 적절함을 확인할 수 있었다.

그러나, 본 연구를 통하여 밝혀진 설계 변수인 갠러리의 깊이와 보스의 깊이에 대한 반복 해석으로 시간 소요가 크고, 기하학적 변수의 결정에 있어 시행 착오와 직관에 의존한 바가 크므로, 추후에 연구를 진행하여 최적화 알고리즘을 개발할

필요가 있다고 생각한다. 그리고 본 연구의 결과물은 차후 일체형 단조 피스톤 개발(Mono Steel Forged Piston)에 있어 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 미래형 자동차 기술 개발 과제의 일환으로 (주)동서공업의 위탁 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- (1) Deform 3D Version 4.0 User's Manual.
- (2) 김대영, 박종진, 1998, “축대칭 열간 강단조의 피니셔 설계 시스템 개발”, 한국소성가공학회지, Vol.7, No.3, pp. 291~297.
- (3) K. Vierregge, 1970 “Design of Forging Flash Gap”, Ind.-Anz., Vol.92, pp. 1561~1564.
- (4) G. P., Teterin and I. J., Tarnovskij, 1968 “Calculation of the Flash Produced in Hammer forging of Disk-shape Parts”, Kusn.-Stamp. Proizvod., Vol.10, No.5, pp. 6~11.
- (5) W., Voelkner, 1968, “On Theoretical stress Determination in Closed-Forging with Flash”, Wissz Technische Universitat, Dresden, Vol.17, pp. 1273~1281.
- (6) K. Serope., 1991, “Manufacturing Processes for Engineering Materials”, Addison-Wesley Publishing Co.
- (7) 김현영, 김중재, 김낙수, 1993, “단조하중 감소를 위한 열간 형단조공정 해석”, 대한기계학회논문집, Vol.17, No.12, pp. 2970~2981.
- (8) R. L. Bodnar, D. C. Ronemus, B. L. Bramfitt and D. C. Shah, 1986, “Physical Modeling of Hot-Deformation Processes-Using Plasticine”, Trans. of the ISS, pp. 35~46.