

디젤 엔진용 일체형 스틸 단조피스톤 공정 개발에 관한 연구

염 성 호^{*1)} · 남 경 오¹⁾ · 황 두 순¹⁾ · 권 혁 선²⁾ · 홍 성 인³⁾

충남대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · (주)에이디 솔루션²⁾ · 충남대학교 기계공학과³⁾

A Study on the Process Development of Mono Steel Forged Piston for Diesel Engine

SungHo Yeom^{*1)} · KyoungO Nam¹⁾ · DooSoon Hwang¹⁾ · HyukSun Kwon²⁾ · SungIn Hong³⁾

^{1,3)}Department of Mechanical Engineering, ChungNam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾AD-Solution Co., Ltd., Hanjin Officetel 1101, Bongmyung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 535-5, Korea

(Received 9 August 2005 / Accepted 30 November 2005)

Abstract : The mono steel forged piston was improved a mechanical strength of an aluminum piston and reduced the weight of a articulated piston. The mono steel forged piston was composed of forged crown part and forged skirt part and was completed by friction welding process of two forged parts. Forging process analysis and friction welding analysis was done by finite element simulation using numerical package DEFORM. The preform shape and the initial billet dimension were decided by maximum stress of the die, amount of the flash and filling of die. The upset length of friction welding variable was decided by the shape of the flash that was created by friction welding analysis. Through this research, we developed a forging process of the mono steel forged piston, and decided the design variables of friction welding.

Key words : Mono steel forged piston(일체형단조피스톤), Articulated piston(접합피스톤), Forging proces(단조공정), Friction welding(마찰용접), Preform(예비성형체)

1. 서 론

접합피스톤(Articulated piston)¹⁻³⁾은 피스톤 핀 보스(pin boss)의 파손, 피스톤 링(ring)의 들러붙음(sticking), 링 홈의 조기마모, 스커트(skirt)의 마모 등과 같은 문제가 발생된 알루미늄(Al) 피스톤의 문제점을 해결하기 위해 주철인 크라운부와 알루미늄인 스커트 부를 결합한 피스톤이다. 접합피스톤은 크라운부와 스커트부가 각각 독립적으로 제작된 후 이를 피스톤 핀에 의해 결합하는 방식으로 크라운부는 단조로 제작되고, 스커트부는 알루미늄 주조에 의해 제작된다. 이러한 결합 방식으로 인해 접합

피스톤은 피스톤 핀(piston pin)의 길이가 길어지고, 피스톤 크라운(crown)두께의 증가로 무게가 알루미늄 피스톤보다 무겁게 되고 각각 다른 생산방법의 적용으로 인한 생산비용이 증가되는 단점을 가지고 있다. 이러한 알루미늄 피스톤의 기계강도 문제와 접합피스톤의 중량 증가 문제를 해결할 대안으로서 일체형단조(mono steel forged)피스톤이 제시 되었다. 일체형단조피스톤은 주철을 사용하여 크라운부와 스커트 부를 단조로 가공하여 마찰용접에 의해 접합되기 때문에 접합피스톤과 알루미늄 피스톤의 문제점을 줄일 수 있는 피스톤이다.

본 연구에서는 일체형 단조피스톤의 제작을 위해 단조공정설계를 수행함에 있어서 피스톤 단조

*Corresponding author. E-mail: yenji@cnu.ac.kr

품의 형상가공에 적합한 단조기계의 용량 결정과 크라운부와 스커트부의 초기소재의 치수결정, 스커트부의 예비성형체 결정에 있어 유한요소 해석을 이용하여 결정하고자한다. 그리고 제작된 금형의 응력해석을 통해 금형의 파손여부 또한 확인하고자한다. 그리고 단조품의 마찰용접해석을 통해 용접변수를 결정하여 적절한 마찰 용접기를 선택할 수 있도록 하고자한다. 그리고 마찰용접에 의해 생성되는 쿨링 갤러리부의 플래시의 형상에 영향을 미치는 용접부의 길이를 마찰용접해석에 의해 결정하고자한다.

2. 연구내용 및 연구범위

일체형 단조 피스톤의 형상은 피스톤 전문 생산 업체의 연구경험과 실험결과를 바탕으로 시작품 형상을 결정하였다. 그리고 이 시작품 형상을 기본으로 절삭될 부분과 단조에 의한 성형이 가능하도록 단조품의 형상(Fig. 2)을 설계하였다. 단조품이 결정되면 단조품제작을 위한 금형이 설계 된다. 금형에 결정되면 소재를 채우기 위해 적절한 초기 소재의 치수를 결정해야 한다. 이를 위해 반복적인 유한요소해석 과정을 통해 초기 형상을 결정해야 한다. 결정된 치수에 의해 금형에 소재를 채웠더라도 금형해석에서 과도한 하중이 나타났다면 소재의 형상을 변경하여 다른 형상으로 결정하여야 한다. 이러한 단조해석과 마찰용접해석에 의해 초기형상과 단조품의 형상이 결정 되면 실제 금형을 제작하여 단조품을 생산한다. 그리고 마찰용접에 의해 피스톤을 용접하고 절삭과정을 거쳐 최종 제품을 제작한다. 그리고 실차 테스트를 거쳐 제품의 신뢰성을 평가하여 사용을 위한 생산에 들어가게 된다. 지금까지 설명한 개략적인 흐름도는 Fig. 1과 같다.

본 연구의 내용은 일체형단조피스톤의 크라운, 스커트부의 단조품 가공을 위해 결정해야 할 단조기계의 용량, 소재의 초기형상치수, 예비성형체의 결정에 대한 연구이다. 형상설계와 치수결정을 위해 범용 해석프로그램인 DEFORM을 이용하여 단조공정의 해석을 수행하였다. 마찰용접 변수인 마찰속도, 마찰압력, 업셋 압력, 업셋 길이를 결정하기 위해 DEFORM-2D를 이용하여 마찰용접 해석을 수

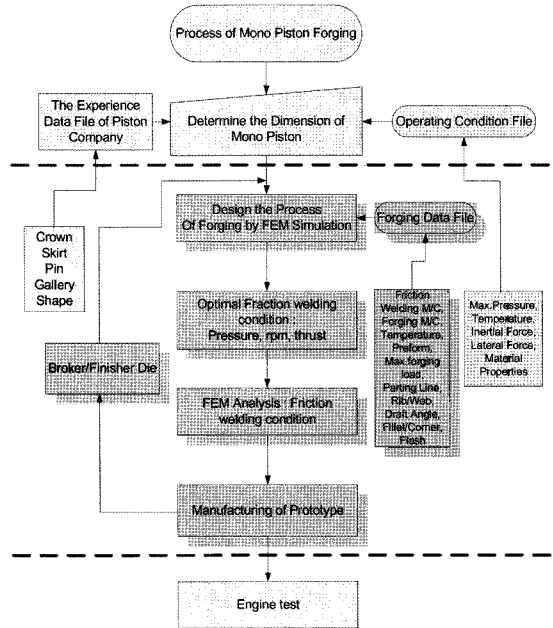


Fig. 1 Flowchart of forging process for Mono steel forged piston

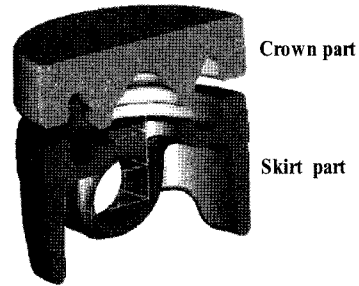


Fig. 2 Forged part of mono steel forged piston

행하였다. 마찰용접변수에 대한 설명을 차후용접해석 부분에서 설명한다.

3. 단조공정 해석

3.1 단조조건 결정

단조품의 금형에 설계에 필요한 리브 및 웨브 두께,⁴⁾ 코너반경, 드래프트 각, 플래시 두께⁵⁾에 대한 연구¹⁻³⁾는 기 연구된 바 있으며, 단조재료는 접합피스톤(Articulated piston)에 사용된 소재와 동일한 인장강도 100 kg/mm²의 열처리된 크롬몰리브덴강 SCM440을 사용하였다. 열간 온도는 가공완료 후 A₃ 변태점보다 조금 높도록 1200°C로 결정하였다.

3.2 단조공정

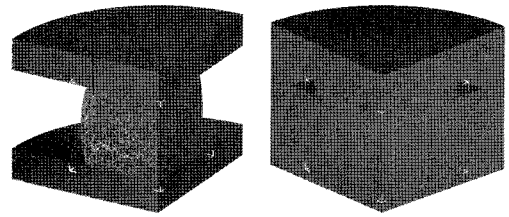
형단조에서 업셋팅과 단조공정을 거치게 된다. 업셋팅은 초기 소재의 재질을 치밀하게 하고 금속 유동선을 형성하게 하는데 목적을 가지는 필수 공정이다. 단조공정은 업셋팅된 소재를 피니셔 금형에서 성형을 완료하며, 형상이 복잡하거나 소재의 변형이 커서 한 번의 단조공정으로 제품의 성형이 불가능 할 경우 중간단계의 과정인 블로커(Blocker) 공정을 거치게 된다.

3.2.1 크라운부의 단조공정 해석

크라운부는 Fig. 3(b)처럼 하부금형이 복잡하지만 소재의 유동 변형량이 짧기 때문에 한 번의 가공으로 성형이 가능하였다. 크라운부는 블로커 공정이 불필요하기 때문에 플래시의 양을 줄이는 설계 방향으로 결정하였다. 초기 빌렛의 크기를 결정하기 위해 여러 초기형상에 대한 유한요소해석을 반복 수행하여 플래시의 양이 가정 적게 나오는 빌렛을 초기 빌렛으로 결정하였다. 단조공정은 Fig. 3(a)와 같이 가공 전 소재를 치밀하게 하고 미리 유동선을 생성하기 위해 업셋팅 작업을 수행하고, Fig. 3(b)처럼 금형에 업셋팅된 소재를 넣어 형단조를 수행한다. 이에 대한 단조해석과 금형해석을 수행하였다. 단조해석은 1/4모델로 대칭이며 금형과 소재사이의 마찰조건은 쿨롱마찰 0.7로 일정하다. 그리고 상부금형이 프레스 속도 1mm/s로 이동한다. 해석시간은 총 24시간이 소요 되었으며 소재의 물성과 기타 해석조건은 Table1에 나타내었다.

Table 1 Analysis condition

Control parameters			
Press process velocity		1mm/s	
Press capacity		1500 ton	
Billet temperature		1200°C	
Crown part	Bill dim.($\phi \times h$)	Num. node	Num. element
	70×63	21376	19685
Skirt part	Bill dim.($\phi \times h$)	Num. node	Num. element
	70×80	26435	19873
Material properties			
Billet		SCM440 (20°C ~1200°C)	
Upper & Bottom die(SKD61,H13)		Rigid	
Inter-Object			
Billet-Die shear friction coeff.		0.7	



(a) Upsetting (b) Finisher
Fig. 3 Forging process of crown part

3.2.2 스킨트부 단조해석

스킨트부는 Fig. 4(c)처럼 하부와 상부금형이 복잡하고 스킨트부의 유동폭이 협소하기 때문에 Fig. 4(b)의 블로커 공정에서 스킨트부의 협소한 부분을 채우기 위해 플래시의 생성이 필요하다 그렇지 않을 경우 피니셔 금형에 과도한 플래시가 생성되게 된다. 초기 빌렛의 크기를 결정하기 위해 크라운부의 초기 빌렛 결정 과정과 동일한 해석을 수행하여 피니셔 금형에서 소재의 충만여부를 확인 하였으며, 여러 가지 형상의 블로커 금형을 설계하여 해석을 수행하고 플래시의 양이 가정 적게 나오는 초기 빌렛으로 결정하였다. 그리고 Fig. 4와 같은 공정으로 업셋팅, 블러커, 피니셔 공정의 단조해석을 수행하였다. 금형해석은 크라운부의 해석과 동일한 방법으로 수행하였으며 해석조건은 크라운부 해석조건과 동일하고 블로커 공정만 추가하여 해석하였다.



(a) Upsetting (b) Blocker (c) Finisher
Fig. 4 Forging process of skirt part

3.2.3 단조해석 결과 및 고찰

크라운부는 하부금형이 복잡하지만 소재의 유동 변형량이 짧기 때문에 한 번의 프레스가공으로 성형이 가능하였다. 한 번의 가공으로 성형이 가능한 초기 형상의 치수를 결정하기 위해 Table 2 형상으로 반복해석을 수행하였다. 해석결과 모든 형상에

Table 2 Initial Billet for crown part of the Mono Steel Forged Piston (IBD : Initial Billet Dimension, UBD : Upsetting Billet Dimension, FV : Flash Volume)

	IBD ($\phi \times h$)	UBD ($\phi \times h$)	Vol (mm^3)	충만 여부	FV (mm^3)
Crown part	-	-	55303	-	
Billet	-	102×34	69581	Filled	14278 (21.0%)
	-	102×32	66268	Filled	10965 (16.6%)
	70×63	102×30	60745	Filled	5442 (10.9%)

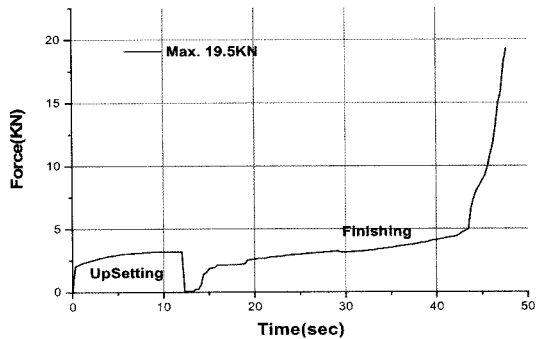
서 소재가 금형에 충만 되었지만 플래시의 양이 가장 적은 70×63($\phi \times h$)의 형상을 초기 소재의 치수로 결정하였다.

결정된 초기 소재의 형상으로 성형하였을 때 완료된 형상은 Fig. 3(b)와 같으며 단조품의 단면 발생할 수 있는 미충진이나 랩과 같은 성형과정의 결함은 나타나지 않았다. Fig. 5(a)는 업셋팅과 피니셔 과정에서 하중을 연속으로 나타내었다. 피니셔 과정에서는 플래시가 생성될 때 나타나는 하중의 급격한 상승을 확인 할 수 있는데 이는 형단조의 전형적인 하중 곡선이다. 크라운부의 단조해석결과 Fig. 5(a)에서 보듯이 19.5KN의 하중을 보였는데 이는 해석모델이 1/4형상이기 때문이며 전체형상에 대한 하중은 78KN이다. 작업기계로 선택한 프레스기계의 용량 1500KN으로 충분한 성형이 가능하다. Fig. 6(a)의 금형해석결과 금형이 받는 최대 응력은 287MPa로서 금형(H13)의 항복강도인 1.8GPa에 미치지 않기 때문에 크라운부의 단조품 설계가 유효하였음을 확인할 수 있었다.

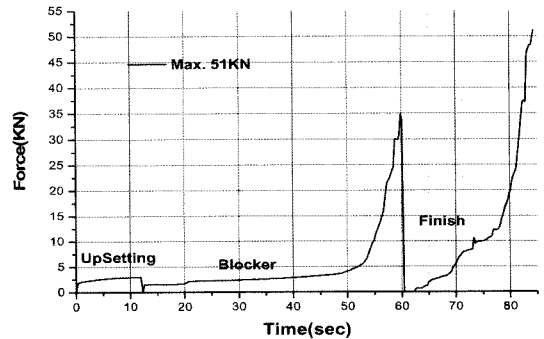
스커트부에 대한 초기형상의 치수결정은 Table 3의 여러 형상을 모델링하여 블로커, 피니셔 공정을 해석을 하였다. 해석결과 금형에 소재의 충만 여부와 플래시의 양을 고려하여 초기형상을 결정하였다. 해석결과 소재의 부피가 스커트부 보다 클 경우 블로커 공정의 여부에 관계없이 모두 금형에 충만되었다. 하지만 플래시의 양이 과다하게 나타나기 때문에 경제적인 측면에서 많은 손실을 갖게 된다. 초기 소재가 70×80($\phi \times h$)에서 블로커 공정을 거치게 되면 금형에 소재가 충만 되지만 블로커 공정을

Table 3 Initial Billet for Skirt part of the Mono Steel Forged Piston (IBD : Initial Billet Dimension, UBD : Upsetting Billet Dimension, FV : Flash Volume, BP:Blocker Process)

	IBD ($\phi \times h$)	UBD ($\phi \times h$)	Vol (mm^3)	BP	충만 여부	FV (mm^3)
Skirt Part			55830			
Billet		75×63	69581	o	Unfilled	13751 (19.7%)
	70×80	75×70	77312	x	Unfilled	
				o	Filled	21482 (27.7%)
		75×75	82835	x	Filled	27005 (32.6%)
				o	Filled	
		75×80	88312	x	Filled	32482 (36.7%)
	80×55	69115	x	Unfilled	13285 (19.2%)	



(a) Forging load of crown part



(b) Forging load of skirt part

Fig. 5 Forging load of mono steel forged piston

하지 않을 경우 미충진 됨을 확인할 수 있다. 그리고 플래시의 양도 약 27%로 과다하게 생성되었다. 금

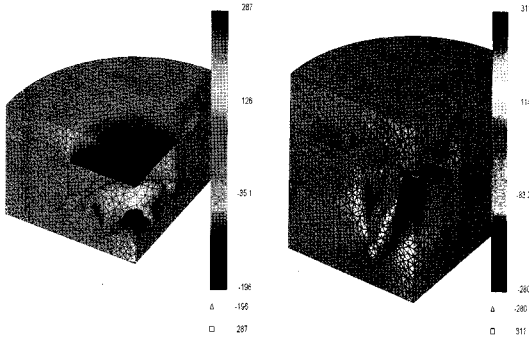


Fig. 6 Die stress analysis of mono steel forged piston

형에 소재의 충전, 플래시의 양을 고려하여 70×80 (φ×h)를 초기소재의 형상 치수로 결정하였다.

스커트부는 하부와 상부금형이 복잡하고 스커트부의 유동폭이 협소하여 금형이 많은 하중을 받을 것이라 예상하였지만 해석결과 최대 하중값이 크라운부보다 약 2.61배 정도 받는 것으로 해석되었다. 성형이 완료되었을 때의 형상은 Fig. 4(c)와 같이 성형과정 중의 결함은 나타나지 않았다. 스커트부의 단조 하중은 Fig. 5(b)에서 1/4모델로 51KN이지만 전체형상의 경우 204KN으로 선택된 프레스 기계의 용량으로 충분한 성형이 가능하다. Fig. 6(b)의 금형에서 받는 최대 응력 또한 315MPa로서 금형의 항복 강도에 미치지 않았다.

4. 마찰용접 해석

4.1 마찰용접

마찰용접이란 열 발생과 함께 소성유동으로 두 표면의 금속을 교환하기 위하여 회전하거나 움직이는 공작물끼리의 가압 접촉을 일으켜 금속을 접합하는 고상(solid state) 용접방법이다. 마찰용접은 계면 마찰에 의해 표면 오염층이 제거되기 때문에 업셋 용접에서와 같이 표면 청정도가 중요하지 않으며, 기계적 에너지가 열 에너지로 전환되는 과정이 접합면에서 일어나기 때문에 플래쉬 용접, 업셋 용접과 비교하여 가열은 계면 부위에 국한되기 때문에 열 영향부가 매우 좁다는 장점이 있다. 반면 용접 대상의 한쪽은 축대칭이어야 하고 축을 중심으로 마찰운동이 가능해야 한다는 점과 용접면의 가공 및 정렬이 균일한 마찰 및 가열을 위해 중요한 요소라는 점을 결점으로 한다.

4.2 마찰용접해석이론

DEFORM⁶⁾에서 사용되는 마찰용접해석에 관련된 식은 Kobayashi^{7,8)}에 의해 제안된 강소성 모델식 (1)을 사용한다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

where $\bar{\sigma}$: Effective stress, $\dot{\epsilon}$: Effective strain rate, $\dot{\epsilon}_v$: Volume strain rate, F: Surface traction, u : Velocity, K: penalty constant.

마찰계수는 쿨롱의 마찰계수를 사용하며 마찰 모델식은 식 (2)와 같다.

$$f_s = -\mu p \frac{u_s}{|u_s|} \cong -\mu p \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[\frac{u_s}{u_0} \right] \right) \quad (2)$$

where μ : Friction coefficient, p : Normal pressure, u_s : Sliding velocity.

마찰에 의해 발생된 열은 소재의 온도를 높이는 열전달 식에 의해 계산되며 식 (3)과 같다. 식에서 상수 k 에 의해 기계적인 에너지가 열에너지로 변환된다.

$$\int_V k T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_S q_n \delta T dS - \kappa \left(\int_V \sigma_{ij} \epsilon_{ij} \delta T dV + \int_S (f_s)_i (u_s)_i \delta T dS \right) = 0 \quad (3)$$

where k : Thermal conductivity, q_n : Heat flux across the boundary surface, ρc : Heat capacity, f_s : traction vector, u_s : Sliding velocity vector for friction work, κ : Number to convert the mechanical work into heat.

4.3 일체형피스톤 마찰용접해석

일체형 피스톤은 마찰용접에 의해 크라운부와 스커트부가 용접되어진다. 용접에 의해 피스톤의 쿨링 갤러리 부가 생성되게 되는데 마찰용접에 의해 생성된 플래시는 쿨링 갤러리 내부에 존재하게 된다. 그렇기 때문에 플래시가 쿨링 갤러리 부의 오일 유동에 영향을 미치지 않도록 업셋 길이를 결정하여야 한다.

DEFORM-2D로 마찰용접을 해석하기 위해서는

용접재료의 용융점이상의 응력과 변형을 데이터와 온도의 변화에 따른 마찰계수의 변화 데이터가 필요하다. 그리고 마찰용접변수¹⁰⁾는 마찰용접기의 공정 변수로 마찰용접기의 종류에 따라 결정해주어야 할 변수값이 다르다. 본 연구에서는 마찰용접기를 블레이크 타입으로 결정하였기 때문에 블레이크 타입의 용접변수를 결정하여 해석을 수행 하여야 한다. 마찰용접의 용접변수로서 Fig. 7과 같이 마찰속도, 마찰압력, 업셋 압력등을 시간에 따른 데이터로 입력해 주어야 한다. 마찰속도는 소재를 잡고 있는 축의 속도, 마찰압력은 마찰을 일으켜 소재를 가열시키기 위한 압력, 업셋압력은 소재가 적정온도까지 상승하면 속도를 멈추고 소재를 가압하는 압력이다.

용접재료의 용융점이상의 응력과 변형을 데이터는 DEFORM에 저장된 물성데이터를 수치해석방법인 외삽법을 이용하여 구하였다. 그리고 온도 변화에 따른 마찰계수는 A.Sluzalec⁹⁾의 실험식 (4)를 고려하여 온도변화에 따른 마찰계수를 구하였다. Fig. 8과 같다.

$$\mu(T) = A \cdot T^B \cdot e^{-C \cdot T} \quad (4)$$

where T : Temperature, A, B, C : Constants optimized by experimental.

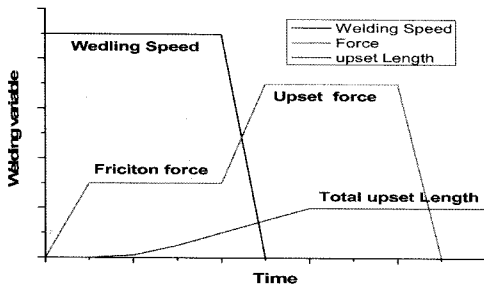


Fig. 7 Friction welding variable

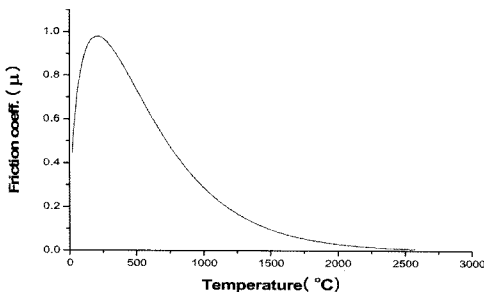


Fig. 8 Friction coefficient by temperature change

4.4 마찰용접 해석결과 및 고찰

내부에 유동부를 갖는 마찰용접에서 용접 후 발생하는 플래시는 유동에 영향이 없어야 한다. 유동부를 갖는 마찰용접에서 용접 후 발생한 플래시가 소재의 수직면에 접촉 할 경우 유동에 영향이 가장 적은 형상이다. Fig. 9는 일체형 단조피스톤의 마찰용접을 해석한 결과이다. 플래시 형상을 보면 플래시가 소재에 수직면에 접촉한 형상을 볼 수 있다. 일체형 단조피스톤의 지름과 마찰면적을 고려하여 해석을 수행한 결과 소재의 분당 회전수는 1000에서 2000사이가 적당하며, 업셋 압력은 1,112KN이 적합하였다. 그리고 Fig. 9에서 플래시가 두 용접부의 수직면에 접촉되는 형상을 고려하여 업셋의 길이를 결정하였다. 용접부의 길이가 2mm이하에서는 Fig. 8의 좌측용접부의 플래시가 수직면에 단지 않고 2.5mm 이상이 되면 용접부의 좌우측에서 플래시가 과다하게 생성되었다. 결과 2~2.5mm의 업셋 길이로 설계하여 마찰용접 할 경우 오일의 유동에 영향을 미치지 않고 피스톤의 형상에 맞는 적절한 업셋 길이라고 판단된다.

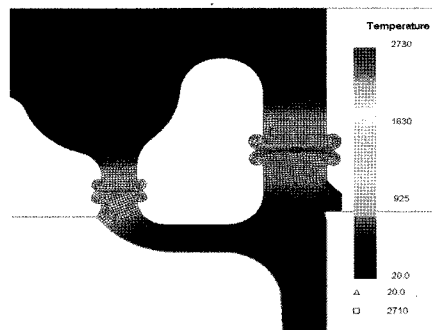


Fig. 9 Friction welding analysis

5. 결론

본 연구를 통하여 디젤엔진용 일체형 단조 피스톤의 개발 과정 중 단조공정에 결정해야할 단조기계의 용량, 초기형상의 치수, 예비성형체를 결정하였다. 그리고 마찰용접과정에서는 마찰용접변수들을 결정하였다. 디젤 엔진용 일체형단조피스톤의 단조공정 및 마찰용접 해석에 의한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 단조 해석결과 피스톤의 성형에는 크라운부는 78KN, 스커트부는 204KN의 용량으로 성형이 가능하다.
 - 2) 단조해석결과 크라운부의 초기 빌렛은 70×63mm ($\phi \times h$)이 적합하였고, 스커트부의 초기 빌렛은 70×80mm($\phi \times h$)이 적합하였다.
 - 3) 일체형 단조 피스톤의 스커트부에 대한 유한요소 해석을 수행하여 소재의 완충, 플래시의 양, 금형 응력 등을 고려하여 예비성형체를 결정하였다.
 - 4) 마찰용접 해석결과 마찰속도는 1000~2000RPM 사이가 적당하며, 마찰압력은 50KN, 업셋 압력은 1,112KN으로 해석시 적절한 플래시형상이 생성되었다.
 - 5) 마찰용접에 의해 생성되는 쿨링 젤러리부의 플래시가 오일 유동에 영향을 주지 않는 업셋 길이는 마찰용접의 해석결과 2.5~2mm가 적절하였다.
- 최근의 자동차 부품은 기존의 강도를 유지며 경량화 및 모듈화 되고 있는 추세이다. 복잡한 형상의 부품에 대해 본 논문에서 제시한 단조가공과 마찰용접기술을 이용 할 경우 제품의 제작시간 단축되며 제작비용의 절감효과 또한 크리라 판단된다.

후 기

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

References

- 1) S. H. Yeom, B. S. Lee, K. S. Shu, B. R. Rho and S. I. Hong, "Forging Process Design of Articulated Piston for Diesel Engine," KSTP Autumn Conference, pp.25-28, 2003.
- 2) S. H. Yeom, B. S. Lee, K. S. Shu, B. R. Rho and S. I. Hong, "A Study on Forging Process about Preform of Articulated Piston for Diesel Engine," Transactions of Materials Processing, Vol.13, No.7, pp.635-641, 2004.
- 3) H. C. Kim, W. Kang, B. C. Na, H. K. Lee, J. I. Lee, Y. T. Kim and K. C. Lim, "Exhaust Emission Characteristics of Diesel Engine with Articulated Steel Forged Piston," Spring Conference Proceedings, KSAE, 2003.
- 4) D. Y. Kim and J. J. Park, "Development of an Automatic Design System for Axisymmetric Hot Steel Forging," KSTP Spring Conference, pp.117-12, 1998.
- 5) K. Lange, Hand Book of Metal Forming, McGraw-Hill, New York, 1985.
- 6) SFTS, Deform 2D Version 8.1 User's Manual, Ohio, 2004.
- 7) K. Lee, A. Samant, W. T. Wu and S. Srivatsa, "Finite Element Modeling of Inertia Welding Process," Proceeding of the NUMIFORM Conference, pp.1095-1100, 2001.
- 8) Kobayashi, Oh, S. and T. Altan, Metal Forming and Finite-Element Method, Oxford University Press, London, 1989.
- 9) A. Sluzalec, "Thermal Effects in Friction Welding," International Journal of Mechanical Sciences, Vol.32, No.6, pp.467-478, 1990.
- 10) S. B. Kang, "A Study on the Friction Weldability and the Mixed Layer of W-30Cu Alloy to Cu," Ph. D. Dissertation, Chungnam National University, 2000.