

제어냉각 장치를 이용한 엔진피스톤 열간단조 공정에 관한 연구

이상익¹ · 최동환¹ · 이정환[#]

Hot Forging of an Engine Piston using Control Cooling

S. I. Lee, D. H. Choi, J. H. Lee

(Received August 4, 2015 / Revised September 11, 2015 / Accepted September 17, 2015)

Abstract

The piston engine is an essential component in automobiles. Since the piston is used in a high temperature and high pressure environment, the piston needs to be manufactured to achieve high strength and high durability. In addition, cost reduction is also an important consideration. In conventional forging, an additional heat treatment after hot forging is necessary to ensure proper mechanical properties for heavy-duty engine pistons. The newly developed manufacturing method lowers production costs by saving manufacturing time and reduces energy consumption. The current paper describes the hot forging of an engine piston made from 38MnSiVS5 micro-alloyed steel using controlled cooling. The finite element analysis was used to check for possible problems and suitable press capacity. Hot forging experiments were then conducted on a 2500tons crank press to evaluate feasibility of the proposed material and process. To check the mechanical properties after hot forging, the forged specimens were tensile tested, and the microstructures were examined in order to compare the results with the conventionally forged material. The skirt region of the as-forged 38MnSiVS5 piston showed better material properties compared to the conventional material. In addition, the total production time was reduced by about 80% as compared to conventional forging.

Key Words : Control Cooling , Hot Forging, Piston, Mechanical Properties, Finite Elements Method(FEM)

1. 서론

최근 수송기기 및 자동차 산업 발전에 따라 대기 오염 규제가 강화되고 저감시키기 위하여 자동차 엔진 부품 중 피스톤은 철계를 이용하여 주조 및 단조품의 적용에 관한 연구가 많이 이루어 졌다. 철계 단조품의 경우 기계적 특성을 향상 시키기 위하여 열처리 공정을 거치게 된다. 하지만 열처리 시 제품의 내부 조직 및 강도 특성이 불안정해 질 수 있으며 변형이 발생할 우려가 있다. 이러한 문제점

을 해결하기 위하여 열처리 생략 가능한 비조질강 개발과 적용으로 환경, 공정축소 및 제조비용을 줄일 수 있는 방안과 성형 및 금형기술에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 비조질강은 퀴칭(quenching)과 템퍼링(tempering)을 생략 할 수 있는 강으로 바나듐(V, vanadium)을 다량 첨가하여 탄질화물의 석출에 의해 강을 강화 시키는 Micro alloying 기술을 이용하게 된다. 열간단조 후 제어냉각을 통하여 일반적인 탄소강과 동등한 기계적 성질을 얻을 수 있다. 비조질강의 조직은 대부분 펄라이트(pearlite)와 페라이트

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

Corresponding Author : Korea Institute of Materials Science, E-mail: ljh1239@kims.re.kr

(ferrite)로 구성되어 있으며 현재 자동차 부품으로 크랭크샤프트(crank shaft), 커넥팅로드(connecting rod) 등에 적용되고 있다[1~8].

Heavy-duty 용 자동차 엔진 부품 피스톤의 경우 고출력을 기반으로 하기 때문에 폭발 행정 시 발생하는 높은 온도와 압력을 받게 된다. 이러한 이유로 자동차 피스톤의 경우 높은 강성과 내구성이 요구되기 때문에 제품의 강도를 향상 시키기 위하여 열처리를 통하여 특성을 향상 시키고 있다[9,10]. Heavy-duty용 디젤엔진 피스톤은 단조공법을 적용하여 크라운(crown)과 스커트(skirt)부를 제조하여 마찰용접(friction welding)을 통하여 일체형 피스톤 제작에 관한 연구가 이루어 졌다[11,12].

본 연구에서는 Heavy-duty용 엔진 피스톤의 스커트부를 친환경적인 소재를 적용하고자 한다. 기존에는 조질강 SCM440H를 이용하여 열간단조(hot forging) 후 열처리 공정을 거쳐 제조하고 있다. 하지만 열처리 생략이 가능한 비조질강 38MnSiVS5로 대체하여 친환경 성형기술을 적용하고자 한다. 비조질강의 적용에 따라 제품의 성형성과 성형하중을 예측하기 위하여 유한요소해석(FEM, finite element method)을 수행하고 비조질강의 적용가능성을 알아보기 위하여 미세조직과 기계적 특성을 비교 분석하였다.

2. 피스톤 Skirt 부의 성형공정

2.1 피스톤의 구조

Fig. 1은 Heavy-duty용 엔진 피스톤의 구조를 나타내고 있다. 피스톤의 경우 크라운부와 스커트부로 구성되어 있으며 이는 마찰용접으로 일체형 피스톤으로 제작되게 된다. 현재 적용되고 있는 엔진 피스톤의 크라운부와 스커트부의 요구특성은 항복강도(YS, yield stress)는 580MPa, 최대인장강도(UTS, ultimate tensile stress)는 850~1000MPa, 연신율(El, elongation) 10%를 요구하고 있으며 적용되고 있는 조질강 SCM440H의 스커트부의 항복강도는 629MPa, 최대인장강도는 928MPa, 연신율 13%로 나타나고 있다.

2.2 공정설계 및 성형해석

Heavy-duty 용 엔진 피스톤은 높은 기계적 특성과 내구성을 요구하고 있다. 복잡한 형상을 갖는 엔진

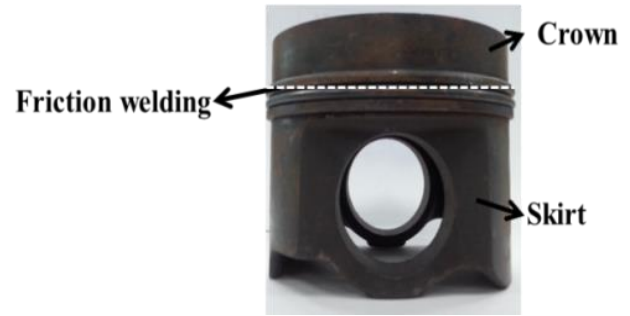


Fig. 1 Schematic diagram of piston

Table 1 Chemical composition (wt%)

(wt%)	C	Si	Mn	Cr	S	V
SCM440H	0.39	0.23	0.84	1.09	0.12	0
38MnSiVS5	0.37	0.58	1.38	0.15	0.052	0.08

피스톤의 생산성과 경제성을 향상 시키기 위하여 비조질강을 적용하여 열간단조 후 후처리 공정을 열처리 공정을 생략하고자 한다. 피스톤 스커트부를 열간단조에 적용하기 위하여 일반적으로 적용되고 있는 업세팅(upsetting), 브로커(blocker)와 피니셔(finisher) 공정으로 설계하여 수행하였다[9]. 공정설계는 프레스 용량, 금형수명과 소재의 완충 등을 고려하여 공정설계를 수행하였다. 초기 소재형상은 원기둥 형태의 빌렛(billet)으로 선정하였으며 이는 소재의 이송 및 작업자의 편의성을 고려하였다. 빌렛으로 업세팅 공정을 수행하여 직경을 확보하게 되며 브로커 공정으로 예비 성형체(pre-form)를 성형 후 최종 피니셔 공정으로 수행하게 된다. 피니셔 공정 시 성형성 향상 및 성형하중 최소화를 위하여 플랜지(flange)부가 형성되도록 하였으며 이는 트리밍(trimming)공정으로 플랜지부를 제거하여 최종제품으로 된다. Table 1에 적용된 소재의 화학성분을 나타내고 있다. 적용되고 있는 열간단조 후 열처리를 수행하고 있는 SCM440H는 조질강으로 정의하고 열처리 생략이 가능한 38MnSiVS5는 비조질강으로 정의하여 비교 분석하였다. 각 소재의 특성을 알아보기 위하여 미세조직 및 기계적 특성 분석을 수행하였다. Fig. 2는 미세조직 분석 결과를 나타내고 있다. Fig. 2(a)는 조질강의 미세조직으로 침상형태로 배이나이트(bainite)조직을 갖는 것을 알 수 있으며 강도와 취성이 높게 나타날 것으로 판단된다.

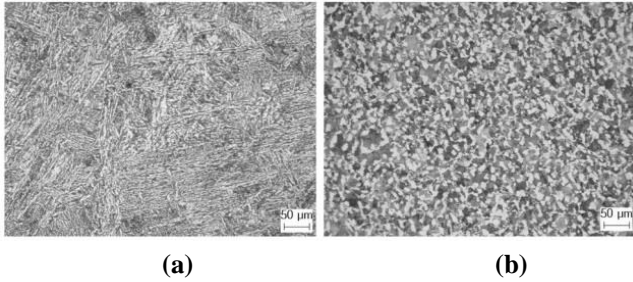


Fig. 2 Comparison of initial microstructure : (a) SCM440H ; (b) 38MnSiVS5

Fig. 2(b)는 열간단조용 비조질강으로 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)가 균일하게 분포되어 연신율이 높을 것으로 나타난다. 미세조직 분석 후 기계적 특성 분석을 위해 상온 인장시험을 수행하였다. 인장 시험시편은 ASTM-E8M규격에 따라 기계가공 후 준정적(quasi-static, 0.001/sec)으로 실시하였다. Fig. 3은 조질강과 비조질강의 상온 인장시험 결과를 나타내고 있다. 조질강의 항복강도 564MPa, 최대인장강도는 755MPa와 연신율은 11.6%로 나타났으며 비조질강의 항복강도는 594MPa, 최대인장강도는 857MPa와 연신율은 24%로 나타났다. Fig. 4은 조질강과 비조질강의 열간단조 및 열처리 공정 사이클을 나타내고 있다. SCM440H 소재를 적용한 피스톤 열간단조품은 기계적 특성 향상을 위한 열처리 조건은 880°C에서 용체화(heat treatment)처리 70분간 수행 후 620°C에서 템퍼링(tempering)으로 90분 동안 수행하게 된다(Fig. 4(a)). 하지만 비조질강을 이용하여 단조 후 열처리 공정 없이 제어냉각장치를 이용하여 공랭(air cooling)을 10분간 수행하여 560°C로 냉각 후 20분간 유지하여 열처리 공정 없이 단조 후 연속적으로 냉각 시간과 온도를 조절하여 생산성 및 경제성을 향상 시키고자 한다(Fig. 4(b)). Heavy-duty용 엔진피스톤의 스커트부 성형을 위한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통하여 유효 소성변형률(effective strain) 분포, 단조결함(defect) 및 성형하중을 예측하여 프레스를 선정하고자 한다.

유한요소해석의 신뢰성을 높이기 위하여 대체 적용 소재인 비조질강을 이용하였으며 실제 열간단조와 동일한 조건과 최대한 유사한 시험결과를 얻기 위하여 Gleeble3800 시험장비를 이용하여 고온압축 시험을 실시하였다. 압축시편 사이즈는 직경 10mm, 높이 15mm(D10L15)로 원기둥 시편을 이용하였다.

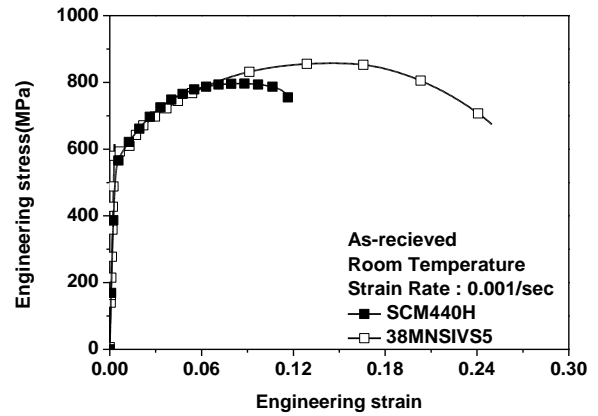


Fig. 3 Tensile test of as-rolled

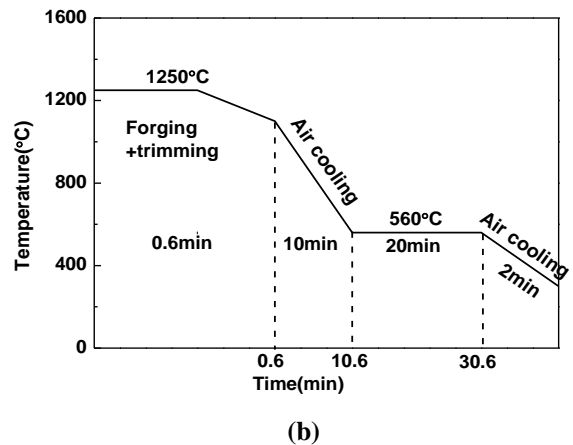
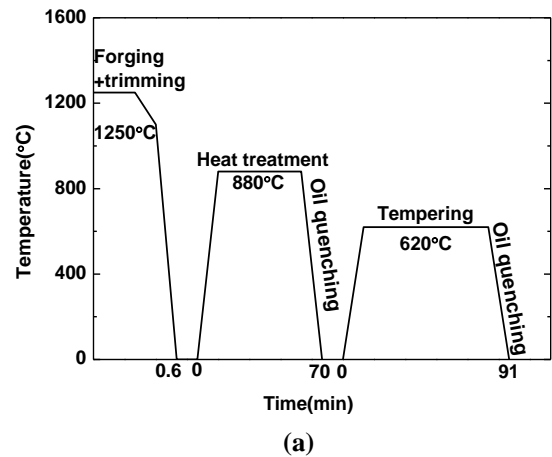


Fig. 4 Comparison of process sequence in piston skirt: (a) hot forging with heat treatment cycle; (b) hot forging with control cooling cycle

성형온도는 열간단조 시 소재의 이송 시 목표온도에서 떨어지는 점을 감안하여 온도조건은 1000°C와 1200°C로 선정하였으며 소재의 높이와 프레스 속도를

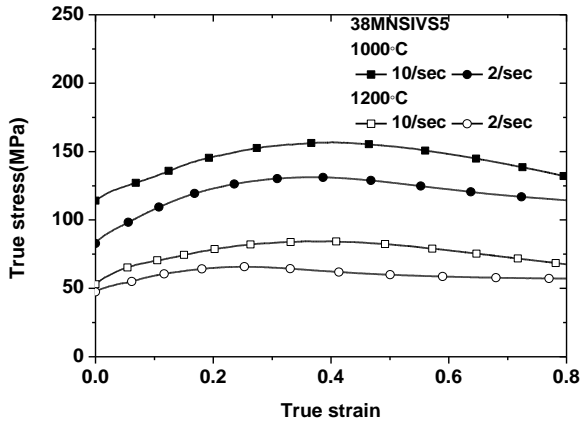


Fig. 5 True strain-stress curve for FEM

Table 2 Hot forging conditions for piston skirt

Simulation program	Deform-3D
Material	38MnSiVS5
Specimen size(mm)	∅ 70×L178.8
Temperature(°C)	1000, 1200
Strain rate(/s)	2, 10
Die temperature	200°C
Number of meshes(ea)	60000
Friction coefficient	0.3

고려하여 변형률속도 조건은 2, 10/sec으로 진행하였다. Fig. 5는 성형해석에 사용된 고온압축시험 결과를 나타내고 있다. 모든 시험 조건에서 유동곡선은 소성변형이 진행됨에 따라 최대압축응력에 도달한 뒤 연화가 일어나게 된다. 하지만 온도가 낮을 수록 변형률속도 변화에 따른 압축응력의 편차가 큰 것을 알 수 있으며 온도가 높을수록 압축응력은 변형률속도 영향에 크게 받지 않는 것을 알 수 있다. 시험 온도가 낮고 변형률속도 빠를수록 압축응력은 증가하는 것을 알 수 있다. Table 2는 열간단조 성형해석 조건을 나타내고 있다. 소성가공용 소프트웨어인 Deform-3D를 이용 하였으며 소재 사이즈는 직경 70mm, 높이 178.8mm(∅ 70L178.8)으로 원기둥 형태로 이용하였다. 해석물성은 앞서 획득한 고온압축시험 결과를 이용하였으며 실제 열간단조 시 적용될 금형온도와 동일한 200°C로 성형해석을 수행하였다. 성형 시 금형온도를 가열하기 위하여 가스토티(Gas torch)를 이용하고 있으며 온도를 높이면 좋으나

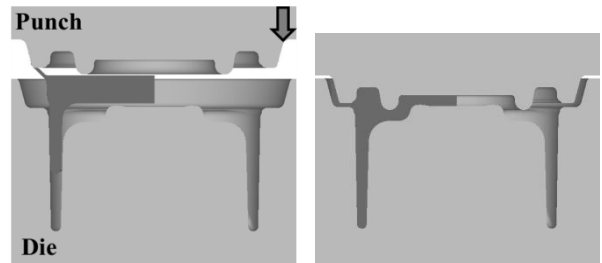
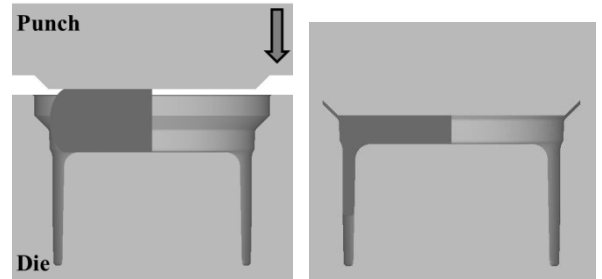
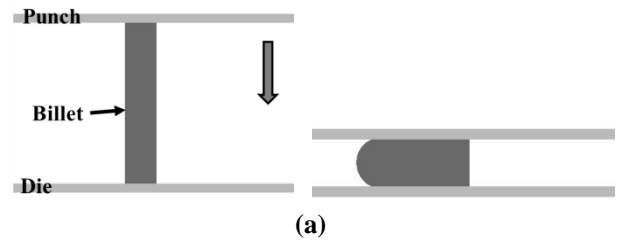


Fig. 6 Simulation results for piston skirt: (a) upsetting; (b) blocker; (c) finisher

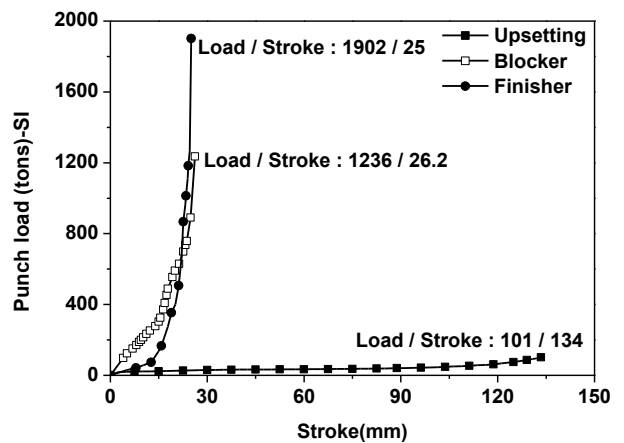


Fig. 7 Punch reaction force in the hot forging tests

금형 사이즈와 여러 변수 등으로 금형가열의 어려움이 있다. 소재와 금형 간의 진단마찰계수는 0.3으로 적용하였다. 성형해석 시 제품형상이 대칭인 점,

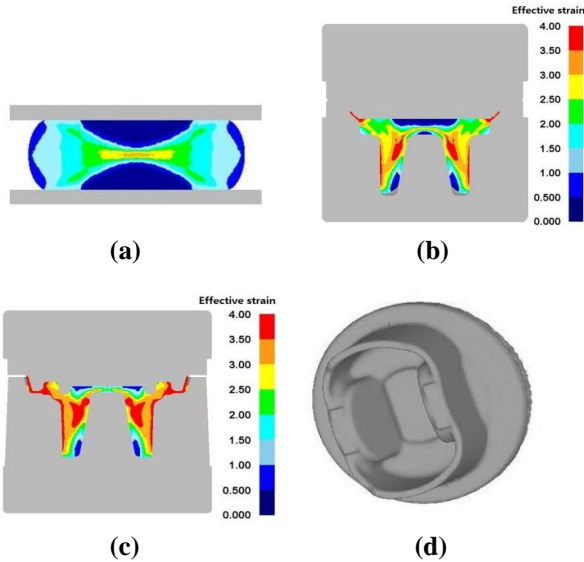


Fig. 8 Simulation results for piston skirt : (a) upsetting ; (b) blocker; (c) finisher; (d) final product

시간과 편의성을 고려하여 1/4모델로 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6는 성형공정 별 유한요소해석 결과를 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 업세팅 공정의 성형해석 결과이며 직경 70mm를 갖는 빌렛을 금형의 직경 145mm를 갖는 디스크 형태로 성형하기 위하여 펀치 스트로크(stroke)는 약 134mm에서 직경 144mm를 확보할 수 있었으며 성형하중은 약 101tons으로 예측되었다. Fig. 6(b)는 브로커 공정을 통하여 성형체의 성형이 이루어지게 되며 스트로크는 26.24mm에서 성형하중은 약 1236tons으로 예측되었다. Fig. 6(c)는 피니셔 공정으로 스트로크는 25mm에서 성형이 완료됨을 알 수 있었으며 성형 하중은 약 1902tons으로 예측되었다. Fig. 7은 각 공정 별 성형하중을 나타내고 있다. 성형하중은 1/4모델로 수행한 결과를 제품성형의 전체 하중을 알아보기 위하여 4배를 하였으며 피니셔 공정에서 높은 하중으로 2300tons이상 프레스에서 성형가능 할 것으로 나타났다. Fig. 8은 각 공정 별 유효 소성변형률 분포를 나타내고 있다. 유효 소성변형률 분포는 최종 피니셔 공정에서 4정도 나타나는 것을 알 수 있으며 브로커와 피니셔 공정 시 전방으로 압출되는 부위에 금형과 직접적인 마찰로 높은 소성변형률이 부과되는 것을 확인할 수 있다.

2.3 열간단조 시험

Table 3은 열간단조 시험조건을 나타내고 있다. 조

Table 3 Hot-forging conditions for piston

Alloy	SCM440H, 38MnSiVS5
Specimen size(mm)	∅ 70 ×L178.8
Temperature(°C)	1250±5
Die temperature(°C)	200±5
Punch speed	100mm/sec
Press	2500ton crank press

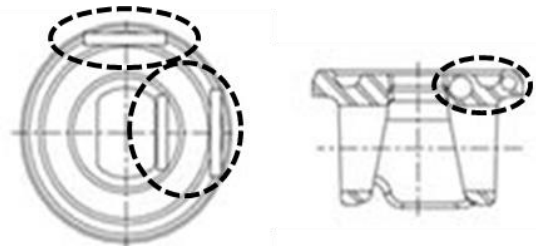


Fig. 9 Sample position for tensile and microstructure tests from skirt

질강과 비조질강을 적용하였으며 소재 사이즈는 직경 70mm, 높이 178.8mm(D70L178.8)의 원기둥 형태의 소재를 적용하였다. 소재온도는 전기로를 통하여 1250°C까지 가열 하였으며 금형온도는 가스토치를 이용하여 200°C까지 가열하고 열간단조를 수행하였다. 펀치속도는 100mm/sec이며 2500ton Crank press를 이용하였다. 조질강과 비조질강의 미세조직과 기계적 특성을 비교 분석 하였다. 미세조직 및 기계적 특성 분석을 위하여 동일한 위치에서 시편을 채취 하였다(Fig. 9). 미세조직 분석을 위한 에칭액(etchant)은 나이탈(nital 4%)를 이용하였으며 인장시험은 ASTM-E8M 규격으로 기계가공하여 준정적(quasi-static, 0.001/sec)으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

성형해석 결과를 바탕으로 2500ton 크랭크 프레스를 선정하여 열간단조를 수행하였으며 단조 후 컨베이어 라인을 이용하여 제어냉각장치로 이동하여 스커트부 제작을 수행하였다. Fig. 10은 스커트부의 비조질강 열간단조품과 유한요소해석 결과 형상을 나타내고 있다. 제어냉각장치를 이용한 비조질강 단조품의 경우 단조 결합 없이 성형이 완료된 것을 알 수 있으며 성형해석 결과와 유사한 것으로 나타났다. Fig. 11은 조질강과 비조질강의 단조품에 대한

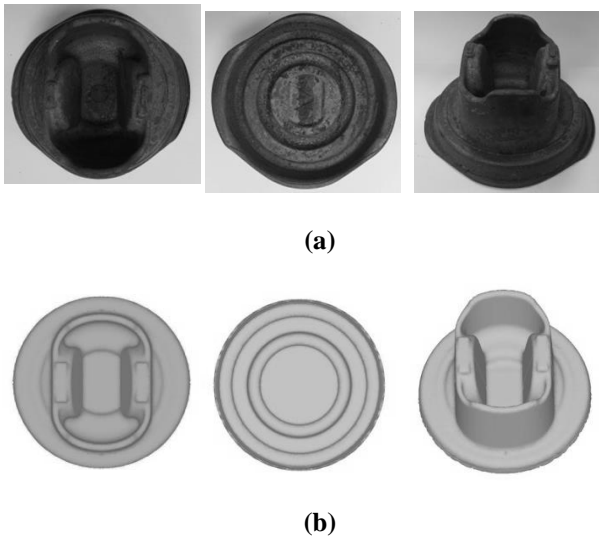


Fig.10 Comparison of deformed piston skirt: (a) experiment; (b) FE analysis

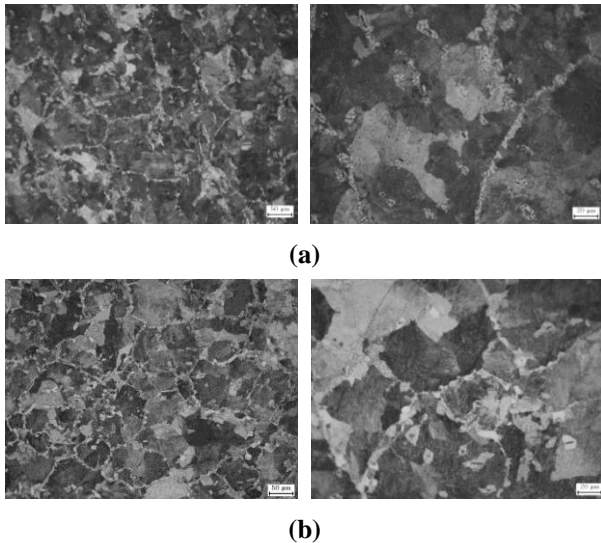


Fig.11 Comparison of micro structure: (a) existing skirt; (b) control cooling skirt

미세조직 분석 결과를 나타내고 있다. 미세조직에서 알 수 있듯이 조질강과 비조질강의 경우 펄라이트, 페라이트와 시멘타이트를 구성하고 있으며 비조질강 단조품의 경우 단조 후 제어냉각장치를 통하여 결정립 사이즈가 조질강에 비하여 미세화되어 비교적 안정화 되어 있는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 12 은 조질강과 비조질강 단조품의 인장시험 결과를 나타내고 있다. 현재 적용되고 있는 조질강의 스킨트부는 요구되는 항복강도 보다 49MPa 정도 높게 나

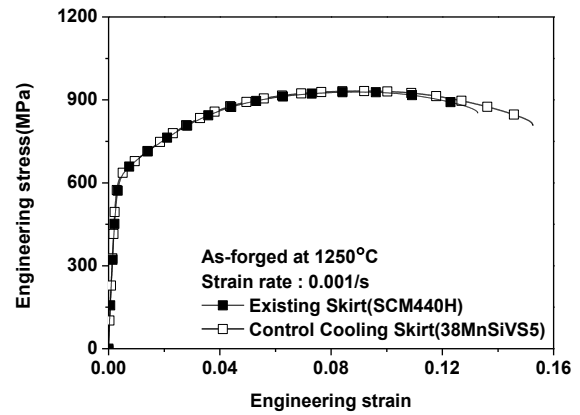


Fig.12 Comparison of existing skirt and control cooling skirt mechanical properties at room temperature

Table 4 Comparison of the mechanical properties

Mechanical properties	YS (MPa)	UTS (MPa)	EI (%)
Spec.	580	850~1000	10
Existing skirt	629	928	13
Control cooling skirt	633	932	15

타나고 최대인장강도는 요구범위를 만족하였으며 연신율은 3% 향상 된 것으로 나타났다. 대체 소재인 비조질강은 요구되는 항복강도 보다 53MPa 정도 높게 나타났으며 최대인장강도는 요구범위를 만족하고 연신율은 5% 향상 된 것을 알 수 있다. 비조질강 단조품의 경우 조질강 단조품에 비하여 강도는 4MPa, 연신율은 2% 높게 나타나는 것을 알 수 있다(Table 4). 현재 적용되고 있는 조질강보다 유사한 요구특성을 나타내고 비조질강으로 대체 적용가능성을 확인하였다. 열처리 공정 생략으로 친환경적인 열간단조 공정으로 생산성 및 경제성 향상을 이룰 수 있을 것으로 나타난다.

4. 결론

본 연구는 Heavy-duty 용 엔진피스톤의 스킨트부를 조질강(SCM440H)으로 열간단조 후 열처리를 통해 제작되고 있는 단조품을 열처리 생략이 가능한 친환경 소재인 비조질강(38MnSiV5S5)을 적용하여 열간단조를 수행하였다. 유한요소해석을 통하여 성형하중을 예측하여 성형 프레스를 선정하고 단조결합,

유효 소성변형률 분포 등을 예측하였다. 조질강을 대체하여 비조질강의 적용 가능성을 알아보기 위하여 기계적 특성을 분석한 결과 항복강도, 최대인장강도와 연신율은 요구특성을 만족하는 것으로 나타났다. 기존 사용되고 있는 조질강과 동등한 기계적 특성으로 적용이 가능할 것으로 나타난다. 결과적으로 스킵부를 비조질강으로 적용 시 생산시간 약 80% 단축할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] Y. H. Kim, W. B. Bae, H. S. Kim, H. S. Byun, 1998, An Experimental Study on the Manufacturing Technology of an Engine Piston, J. Korean. Soc. Precis. Eng., Vol. 15, No. 11, pp. 83~92.
- [2] H. Y. You, 2012, A Study on the Forming Conditions of a Forging Piston by using the Finite Element Simulation and the Taguchi Method, J. Korea. Acad. Industr. Coop. Soc., Vol. 13, No. 5 pp. 1990~1995.
- [3] S. Y. Lee H. Kim, 2012, Development of Chassis Parts Using High Toughness Micro-alloyed Steel, Transactions of KSAE, Vol. 20, No. 3, pp. 1~6.
- [4] D. L. Lee, 2002, The Current Status of the Development of Heat-Treatment-Free Steel, Trans. Mater. Process., Vol. 11, No. 5, pp. 398~393.
- [5] X. Huang, C. Liu, X. Lv, G. Liu, F. Li, 2011, Aluminum Alloy Pistons Reinforced with SiC Fabricated by Centrifugal Casting, J. Mater. Process. Tech., Vol. 211, No. 9, pp. 1540~1546.
- [6] G. Dini, M. M. Vaghefi, A. Shafyei, 2006, The Influence of Reheating Temperature and Direct-cooling Rate after Forging on Microstructure and Mechanical Properties of V-microalloyed Steel 38MnSiVS5, ISIJ Int., Vol. 46, No. 1, pp. 89~92.
- [7] N. G. Kim, S. D. Park, B. O. Kim, J. Y. An, H. J. Choi, 2006, Study of Material Properties of High Strength Microalloyed Steel for Cold Forming by Controlled Rolling and Cooling Technology, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 8, pp. 603~608.
- [8] D. J. Yoon, H. J. Choi, H. W. Lee, G. A. Lee, B. L. Jang, S. L. Seo, S. Choi, 2006, Net Shape Forming Process for Ball Stud Using High Strength Micro-Alloyed Cold Forging Steel, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 8, pp. 562~567.
- [9] J. H. Son, M. Y. Ha, S. C. Ahn, S. W. Choi, 2010, Durability Design of Composite Piston in Marine Diesel Engines, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 34, No. 5, pp. 651~657.
- [10] M. I. Najafabadi, M. Mirsalim, V. Hosseini, S. Alaviyoun, 2014, Experimental and Numerical Study of Piston Thermal Management using Piston Cooling Jet, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 28, No. 3, pp. 1079~1087.
- [11] S. H. Yeom, B. S. Lee, B. R. Rho, S. I. Hong, 2004, A Study on Forging Process about Preform of Articulated Piston for Diesel Engine, Trans. Mater. Process., Vol. 13, No. 7, pp. 635~641.
- [12] S. H. Yeom, K. O. Nam, D. S. Hwang, H. S. Kwon, S. I. Hong, 2006, A Study on the Process Development of Mono Steel Forged Piston for Diesel Engine, Trans. Korean. Soc. Automot. Eng., Vol. 14, No. 3, pp. 44~50.