대한기계학회논문집 A권, 제34권 제10호, pp. 1543~1548, 2010

<응용논문> DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.10.1543 ISSN 1226-4873

유한요소해석을 이용한 알루미늄분말단조 피스톤 성형해석에 관한 연구§

김호윤* · 박철우*† · 김현일* · 박경서* · 김영호** · 조호성***
* 한국과학기술정보연구원, ** 부산대학교 기계공학부, *** 부산대학교 정밀기계대학원

A Study of the FEM Forming Analysis of the Al Power Forging Piston

Ho Yoon Kim*, Chul Woo Park*†, Hyun Il Kim*, Kyung Seo Park*, Young Ho Kim** and Ho Sung Joe***
* Korea Institute of Science and Technology Information Supercomputer Center
** School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.,
*** Dept. Of Mechanical Engineering at Pusan National Univ.

(Received May 13, 2010 ; Revised July 20, 2010 ; Accepted July 26, 2010)

Key Words : Powder Forging(분말단조), Piston(피스톤), Finite Element Analysis(유한요소해석), DEFORM/3D

초록: 분말단조 공정은 정형의 자동차부품을 제작하는데 널리 이용되고 있다. 분말야금이란 금속 원료 분말을 사용하여 원하는 제품의 형태로 성형을 한 다음 적정온도에서 소결하여 필요한 금속 제품을 제조하는 기술을 말한다. 본 연구에서는 자동차 엔진의 경량화를 위한 피스톤 제작에 관한 것이다. 분말단조로 제작 되어진 엔진 피스톤의 특성을 유한요소해석을 통해서 알아보겠다. 유한요소해석은 DEFORM/3D 를 이용해서 성형성을 평가하도록 하겠다. 성형온도, 구배각도, 마찰계수의 변화에 따른 피스톤의 성형성을 알아보겠다.

Abstract: Powder metallurgy processes are used to form Net-Shape products and have been widely used in the production of automobile parts to improve its manufacture productivity. Powder-forging technology is being developed rapidly because of its economic merits and because of the possibility of reducing the weight of automobile parts by replacing steel parts with aluminum ones, in particular while manufacturing automotive parts. In the powder-forging process, the products manufactured by powder metallurgy are forged in order to remove any pores inside them. Powder-forging technology can help expand the applications of powder metallurgy; this is possible because powder-forging technology enables the minimization of flashes, reduction of the number of stages, and possible grain refinement. At present, powder forging is widely used for manufacturing primary mechanical parts as in combination with the technology of powder forging of aluminum alloy pistons.

1. 서 론

분말야금에 의한 성형공정은 임의의 형상으로 냉간 성형 후 소결 과정이나 분말단조 등의 공정을 거쳐 부품을 생산하게 된다.(1) 자동차의 연비 개선 대책은 엔진, 구동 계의 효율향상, 주행저항 절감, 경량화 등이 있으나 엔진 효율 향상은 기술적으로 거의 한계에 도달하여 대폭적인 효율 향상은 어려운 실정이다.(2) 분말야금이란 금속 원료 분말을 사용하여 원하는 제품의 형태로 성형을 한 다음 적정온도에서 소결하여 필요한 금속 제품을 제조하는 기술을 말한다. 분말야금법의 최대 장점은 원료 분말을 금형내에서 압축에 의해서 최종제품의 형태(Net shape)가 갖추어지므로 기계가공을 대폭 줄일 수 있는 이점이 있다.(3,4)

본 연구에서는 자동차 엔진의 경량화를 위한 피스톤 제작에 관한 것이다. 일반적인 주조성형이 아닌 분말 야금기술을 이용해서 피스톤을 제작해 보겠다. 분말단조로 제작되어 진 엔진 피스톤의 특성을 유한요소해석을 통해서 알아보겠다. 분말단조법을 이용해서 2 행정 사이클에 사용되는 피스톤을 제작 할 것이며, 유한요소해석은 DEFORM /3D 를 이용해서 성형성을 평가하도록 하겠다. 성형온도, 구배각도, 마찰계수의 변화에 따른 피스톤의 성형성을 알아보겠다.

2. 분말단조공정

2.1 분말단조의 항복조건

압분체 성형 이후 분말단조의 성형공정을 해석하기 위한 모델로 균일한 재료의 연속체모델

§ 이 논문은 2010 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임.
† Corresponding Author, p016535@empas.com
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

(homogeneous continuum)을 적용하는 것이다. 분말금속은 단조공정 시 재료의 항복상태를 가장 잘 설명할 수 있는 적절한 항복함수를 검증하고 유동법칙에 의하여 구성방정식을 구성한 후 이를 이산화하여 유한요소해석 프로그램을 구현한다.[5] 분말단조금속은 압축 성형의 유한요소해석에 관한 일반적인 식들의 요약은 다음과 같다.[6,7] 분말금속의 압축성형에 대한 항복함수 $f(\sigma_{ij})$ 의 응력텐서(stress tensor)에 의하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$f = \frac{\alpha}{2}\sigma'_{ij}\sigma'_{ij} + [1-\frac{\alpha}{3}](\sigma'_{ij}\delta'_{ij} + p)^2 - \sigma_{ij}^2 = 0$$

$$\sigma_R = \frac{1}{2}[(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 +] + (\sigma_m / f)^2 \quad (1)$$

여기서,

$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$: 편차응력텐서

δ_{ij} : Kornecker delta

σ_R : 겉보기 유효응력

α 와 p : 물질상수

$\sigma_m = \frac{\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33}}{3}$: 정수압성분의 응력

수식 (2)는 유동법칙(flow rule)을 나타내고 있다.

$$\varepsilon'_{ij} = \lambda'_{ij}\frac{\varphi f}{\varphi \sigma_{ij}} \quad (2)$$

여기서, λ'_{ij} : 비례상수로서 식 (3)과 같다.

$$\lambda'_{ij} = \frac{\varepsilon'_v p/3 + \sigma_R \varepsilon_R}{2\sigma_R} \quad (3)$$

여기서,

$\varepsilon'_v = \varepsilon'_x + \varepsilon'_y + \varepsilon'_z$: 체적 변형률속도

ε_R : 겉보기 유효 변형률속도

변형률속도 텐서 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_R = (\frac{2}{\alpha}\varepsilon'_{ij}\varepsilon'_{ij} + \frac{1}{3(3-\alpha)})(\varepsilon'_{ij}\delta_{ij})^2)^{1/2} - \frac{p\varepsilon'_{ij}\delta_{ij}}{3\sigma_R} \quad (4)$$

여기서,

$\varepsilon'_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_v\delta_{ij}$: 편차변형률 텐서

ε_R : 겉보기 유효 변형률 속도

평형식을 변분원리(variational principle)을 도입하여 표현하면 다음과 같다.

$$\int_v \sigma_{ij}\delta\,\varepsilon'_{ij}dV - \int_{S_F} F_i\delta_{ui}dS_F - \int_{S_C} t_i\,\delta_{ui}dS_C = 0 \quad (5)$$

여기서,

δ_{ui} : 가상속도(virtual velocity)에 대한 변분

$\delta\varepsilon'_{ij}$: δ_{ui} 로 부터 유도되는 변형률 속도에 대한 변분

F_i (힘 경계조건) : 경계면 S_F 에서 작용

u_i (속도 경계조건) : S_u 에서 작용

t_i (마찰력) : 물체 - 금형 경계면 S_C 에 작용

전체 경계 면에서는 다음과 같이 작용한다.

$$S = S_F + S_U + S_C \quad (6)$$

2.2 분말단조의 제작공정

2.2.1 혼합(Mixing)

압분체 예비성형체(preform)형상을 제작하기 위한 초기 단계로서 주원료와 첨가물의 배합을 목적으로 V-cone 를 이용해서 혼합을 하게 된다. 혼합의 방법에 따라서 제품의 품질 균질화에 매우 중요한 공정이다.

2.2.2 압분체(Compaction)

혼합된 분말을 금형에 투입 시켜 높은 압력으로 가압을 하여 예비성형체 형상을 만드는 공정이다. Die 부분에 재료를 투입하고 상펀치와 하펀치로 가압을 하게 된다. 성형순서는 분말충전, 압축, 압출, 취출 과정을 통해서 압분체가 만들어지게 된다. 알루미늄 합금분말 Alumix 123 (Al-4.5, Cu-0.5, Mg-0.7, Si)를 사용하였다. 본 분말은 또한 1.5%의 윤활제를 함유하고 있다. 알루미늄 압분체는 2~5 ton/cm^2 이면 정상적인 성형이 가능하며 이 범위에서 약 92~95%의 성형밀도를 얻을 수 있다.[8]

2.2.3 소결(Sintering)

성형된 제품의 입자들을 높은 열(녹는점 이하

Table 1 Sintering conditions

Process condition	Dewaxing	Sintering	Cooling
Temperature [℃]	400	590	150
Holding Time [min]	25~30	25	30
Atmosphere	N_2		

온도)과 환원분위기에서 금속입자들을 결합(bonding) 시키는 공정이다. 윤활제등은 제거되어 짐과 동시에 형상을 유지하고 합금분말의 확산 및 제품을 단단하게 만드는 중요한 공정이다. 본 연구에서 적용한 소결 조건들이 Table 1 에 나타나 있다. 제품의 소결 과정은 크게 예열, 본열, 냉각의 3 단계로 이루어진다.[8]

2.2.4 단조(Forging)

소결품의 밀도를 증가시키는 목적으로 높은 성형 압력으로 가압하는 과정으로 제품의 밀도가 증가함에 따라 강도 또한 증가하며, 정형(Net shape) 부품에 좋은 효과를 얻을 수 있다. Fig. 1 은 최종 제품의 도면을 나타내고 있다. 축대칭 제품이기에 단조해석은 절반만을 수행합니다.

3. 유한요소해석

Doraivelu[9]에 의한 항복조건은 다음의 형태로 표현 될 수 있다.

$$F = AJ_2 + BJ_1^2 = Y_R^2 = \delta Y_0^2 \qquad (7)$$

여기서, A, B, δ 는 상대밀도의 함수로 표현되는 재료상수이다. J_1 은 응력텐서의 1 차 불변량이고, J_2 는 편차응력텐서의 2 차 불변량이다. Y_R 은 분말재료의 항복응력이고 Y_0 는 단순압축시의 분말재 료의 항복응력이다. (7) 의 수식을 더 간단하게 정리한 수식이 (8)이다. 재료상수 A, B 와 Shima[10]에 의해 제안된 δ 를 소성 푸아송 비의 함수로 표현하고 $n = 2$ 라 가정하면 항복함수의 수식 (8)로 표현할 수 있다.

$$(2+2v)J_2 + \frac{1-2v}{3}J_1^2 = Y_R^2 = \frac{8.15v^{2.5}}{2.44-1.41v^{0.5}}Y_0^2 \qquad (8)$$

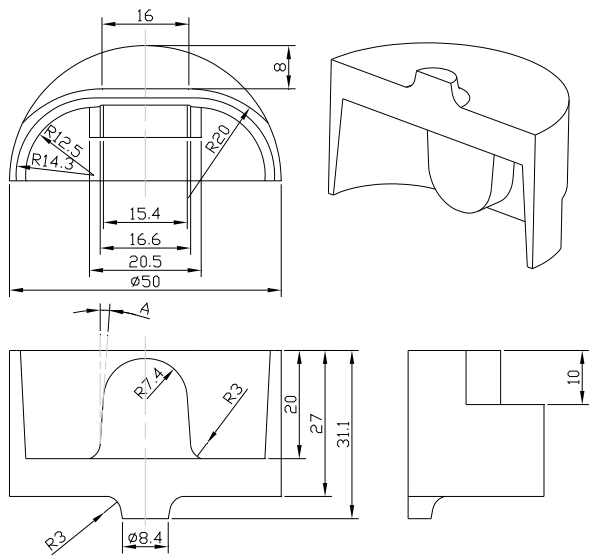
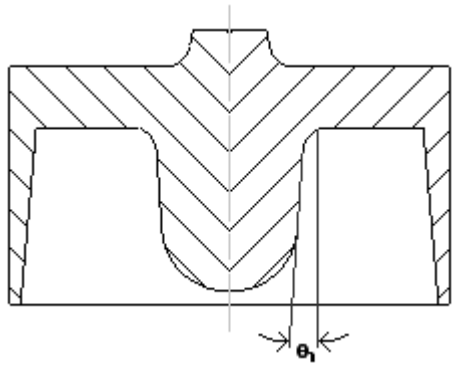


Fig. 1 Drawing of final product design

Table 2 Data for numerical simulation

Heat Capacity[N/mm²•℃], ρc	**2.9036**
Heat Conductivity[N/s•℃], χ	**155**
Convection Coefficient [N/s • mm • ℃], h_c	**0.02**
Eemissivity, ε_r	**0.7**
Heat Transfer Coefficient [N/s • mm • ℃], $h_{w/d}$	**11.97**
Initial Temperature[℃], T_0	**420**
Dies Temperature[℃], T_1	**250**
Environment[℃], T_{est}	**20**
Die velocity[mm/s]	**40**



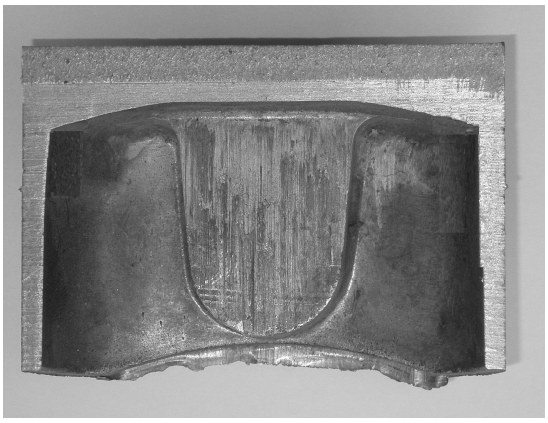
	Preform temp. [℃]	θ_1 [deg]	Friction [shear]
Case 1	**420**	**4**	**0.3**
Case 2	**420**	**5**	**0.3**
Case 3	**420**	**6**	**0.3**
Case 4	**450**	**5**	**0.3**
Case 5	**480**	**5**	**0.3**
Case 6	**420**	**5**	**0.7**
Case 7	**420**	**5**	**1.0**

Fig. 2 Several shapes affecting to solidification and forgeability

Table 3 The mechanical properties and strength of powder forged piston according to forging condition

Preform temp. (℃)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	HRB (avg.)
420	630	8.0	77.5
450	580	7.2	75.8
480	600	7.0	74.2

(a) Preform product



(b) Finally forged product

Fig. 3 Preform and forged piston

수식 (9)는 상대밀도 0.896 일 때의 분말금속의 유동 응력식을 표현하고 있다.[3]

$$\bar{\sigma} = 12.773\,\dot{\varepsilon}^{0.1218} \qquad (9)$$

Table 2 는 분말단조 해석조건을 나타내고 있다. Fig. 2 는 형상별 해석의 조건을 나타내고 있다. 축대칭 해석이 가능한 제품이기에 절반만을 해석하기로 한다. Fig. 2 는 제품의 구배 각도에 따른 해석의 종류를 나타내고 있다.

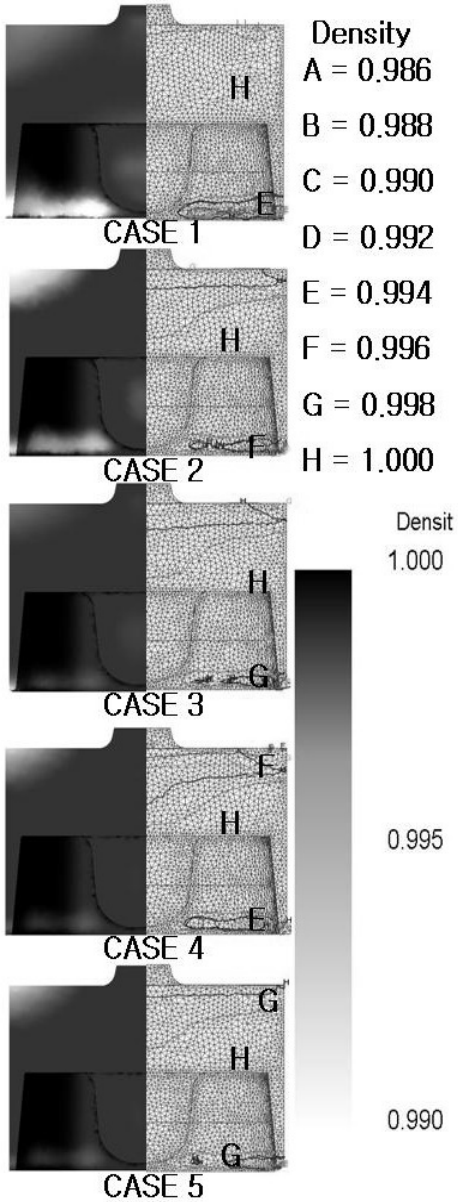


Fig. 4 Density distribution of powder forging(Case 1, Case 2, Case 3, Case 4, Case 5)

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

Table 3 은 예비 성형체의 온도에 따라 평가된 인장강도 값 및 경도 값이 나타나 있다. 금형의 성형온도는 250℃ 이며, 예비성형체의 성형온도는 Table 3 과 같다. 단조 이후의 제품의 기계적 특성을 알아보았다. 인장강도와 경도 값은 예비성형체의 온도가 낮을 수 록 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있다.[8] Fig. 3 은 예비성형체의 형상과 분말

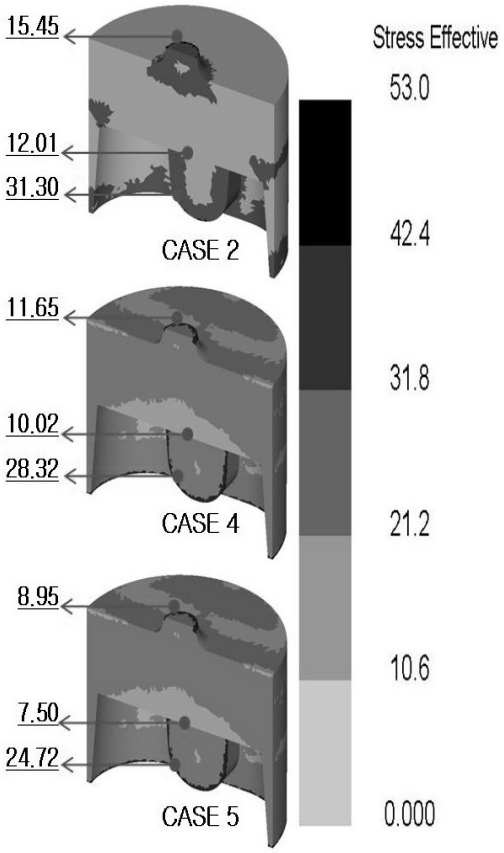


Fig. 5 Effective stress distribution of powder forging (Case 2, Case 4 and Case 5)[MPa]

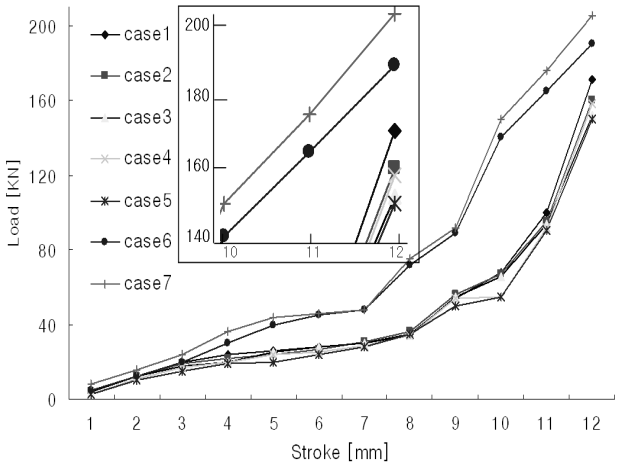


Fig. 6 Result of FEM Simulation for the stroke

단조 이후의 형상을 나타내고 있다. 예비성형체의 크기는 100 × 20mm 이다. 일반적 피스톤은 Al 7075 계열의 재질을 이용하며, 주조를 이용해서 제작되고 있다. 열처리 전의 Al 7075 는 인장강도 276 [MPa], 항복강도 145 [MPa]로 알려져 있다. 열처리 후의 Al 7075 는 인장강도 520 [MPa], 항복강도 475 [MPa]로 알려져 있다.[13] 인장 및 경도시험에 사용된 시편들은 모두 T6 열처리를 행하였다. 인장시편 형상은 KS 규격 14(A) 시편규격에 따랐다. 인장 시험편은 피스톤 헤드부의 중심을 가로질러 채취하였다. 본 실험에서 제작 된 피스톤은 주조피스톤에 비해서 인장강도가 높게 나타나고 있다.

4.2 해석결과

Fig. 4 는 상대밀도 분포를 나타내고 있다. Θ_1(Case 1, Case 2 and Case 3) 이 증가 할 수 록 응력의 분포가 감소하고 있다. 이것은 Θ_1 이 증가함에 따라 알루미늄 피스톤의 성형성이 좋아지고 있다. 초기 소결 제품의 상대밀도는 0.896 이지만, 분말단조 이후에 0.986 ~ 1.00 로 상승하였다. 전체적으로 피스톤의 아랫부분에서 밀도의 진밀도가 낮게 나타나고 있다. 피스톤의 아랫부분이 상대적으로 밀도가 낮은 것은 변형영역을 가지고 있기 때문이다. 제품 성형 온도(Case 2, Case 4 and Case 5)가 높을수록 상대밀도가 높게 나타나고 있다. 온도가 높을수록 압분체 제조과정에서 사용되는 결합제가 더 잘 반응하는 것으로 알 수 있다. Fig. 5 은 응력 분포를 나타내고 있다. 온도가 높을 수록 제품의 응력분포가 낮게 나타난다. 예비성형체의 성형온도가 높을수록 제품의 응력분포가 낮게 분포한다. 전체적으로 피스톤의 윗부분에서 응력분포가 낮게 (Case 2 = 15.45 MPa, Case 4 = 11.65 MPa, Case 5 = 8.95 MPa) 발생하고 있다. Fig. 6 은 각 공정별 성형하중을 나타내고 있다. 마찰계수의 증가(Case 1, Case 6 and Case 7)에 따른 제품의 성형하중이 증가하고 있다. Θ_1(Case 1, Case 2 and Case 3) 이 증가할 수 록 성형하중은 감소하고 있다. Θ_1 은 펀치 금형의 구배각도로서 제품의 유동패턴과 성형하중에 많은 비중을 차지하고 있다. 마찰력(Case 1, Case 6 and Case 7)이 증가 할 수 록 성형하중은 증가하고 있다. Case 3 의 경우가 가장 작은 성형하중을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기초적 실험과 소결에 의한 분말단조 피스톤을 제작해 보았다. FEM 시뮬레이션에 의한 소결체의 변형거동 특성을 해석해 보았다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 실험을 통하여 알루미늄 분말단조 피스톤의

기계적 특성을 알아보았다. 주조에 의해 제작 되어 진 피스톤에 비해서 인장강도가 높게 나타나고 있다.

(2) FEM 시뮬레이션을 이용하여 피스톤의 전체에서 진밀화을 알아 볼 수 있었다. 분말단조 이후에 0.986 ~ 1.00 로 상승하였다.

(3) FEM 시뮬레이션에서 마찰계수가 증가 할수록 성형하중의 크기는 증가하는 것을 알 수 있었다.

(4) FEM 시뮬레이션에서 금형 구배각도(Θ_1)가 증가 할수록 성형하중은 감소하고 있었다.

참고문헌

(1) Kim, J. S. and Kim, K. T., 1998, "Densification Behavior of Mixed Metal Powders under Cold Compaction," *Trans. Of the KSME A*, Vol. 22, No. 8, pp. 1553~1565.

(2) Hur, M. D., Jang, G. B. and Kang, S. S., 1999, "A Study on the strength and Fatigue Behavior of Automobile Powder Material," *Trans. Of the KSME A*, Vol. 23, No. 2, pp. 230~237.

(3) Park, J. J., 1993, "A Yield Function for Sintered Porous Metals," *Trans. Of the KSME A*, Vol. 17, No. 5, pp. 115~1122.

(4) Cho, J. R., Joo, Y. S. and Kim, Y. H., 2000, "Characteristic Analysis of Powder Forging Processes for Engine Pistons by Finite Element Analysis," *Trans. Of the KSME A*, Vol. 24, No. 8, pp. 2042~2049.

(5) Jang, D. H. and Hwang, B. B., 1998, "Friction Effect on the Powdered Metal Compaction," *J. of the Korean Society for Technology of Plasticity*, Vol. 7, No. 2, pp. 114~126.

(6) Hwang, B. B. and Kobayashi, S., 1990, "Deformation Characterization of Powdered Metals in Compaction," *Int. J. Mach. Tools Manufacture*, Vol. 31, No. 1 pp. 123~127.

(7) Hwang, B. B. and Kobayashi, S., 1994, "Application of the Finite Element Method to Powdered Metal Compaction Process of Multilevel Flanged Parts," *Int. J. Mach. Tools Manufacture*, Vol. 34, No. 3, pp. 424~426.

(8) Park, J. O., Park, C. W. and Kim, Y. H., 2001, "A Study on the Powder Forging of Aluminum Alloy Pistons," *Int. J. of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.3 No.4, pp. 69~74.

(9) Doraivelu, S. M., Gegel, H. L., Gunasekera, J. S., Malas, J. C., Morgan, J. T. and Thomas, J. F., 2001, "A New Yield Function for Compressible P/M Materials," Private Communication.

(10) Shima, S. and Oyan, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci*., Vol. 18, pp. 285~291.

(11) Altan, T., 2005, Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications, *The Materials Information Society*, ASM, USA.

(12) Duggirala, R. and Shivpuri, R., 1992, "Effects of Processing Parameters in P/M Steel Forging on Part Properties," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.1, pp. 505~516.

(13) Jang, H. S., 1997, *The Handbook of Advanced Aluminum Technology*, Han Lim Won Publishing Co. Ltd, KOREA, pp. 671~825.