

전기 업셋팅 공정의 강열접소성 유한요소해석

이민철¹, 최인수², 김홍태², 전만수[#]

Rigid-thermoviscoplastic finite element analysis of an electric upsetting process

M. C. Lee, I. S. Choi, H. T. Kim, M. S. Joun

Abstract

We simulated an electric upsetting process by the rigid-thermoviscoplastic finite element method. Several engineering assumptions were made to calculate the heat generation due to the electric resistance. The skin effect of the bar was taken into account for the heat generation. The approach was applied to simulate an artificial electric upsetting process for the exhaust valve of the ship engine.

Key Words : Electric upsetting (전기 업셋팅), Rigid-thermoviscoplastic finite element analysis(강열접소성 유한요소 해석), Exhaust valve of ship engine (선박용 배기밸브)

1. 서론

전기 업셋팅(electric upsetting) 공정은 전기 저항을 이용하여 부분적으로 가열된 봉재에 압축력을 가하여 양파와 같이 국부적으로 소재가 집중된 형상을 제작하는 특수 제조 기술이다. 이 기술로 제작되는 대표적인 부품이 NIMONIC 80A[1]의 소재를 사용한 선박용 엔진 배기밸브이다. 전기 업셋팅 공정은 전류, 업셋팅 하중 및 속도, 하형의 이송 속도 등의 영향을 받으며, 이러한 공정변수들이 일반적으로 시간의 함수이고 변형거동 특성에 민감하게 영향을 주기 때문에 최적공정설계의 난이도가 매우 높다. NIMONIC 80A의 경우, 소재의 가격이 고가이므로 시행착오적인 방법에 의존하여 공정변수를 최적화하는데는 많은 비용이 소요되므로 이에 적절히 대응할 수 있는 해석 기술이 불가피하다. 특히, 엔진 밸브는 내구성이 요구되는 주요 부품이므로 성형 중에 형성된 재료의 미세구조도 중요하며 이를

통제하는데 성형 중 온도분포는 매우 중요하므로 이에 관한 해석 기술이 절실하다. 이러한 목적으로 유한요소법이 다각도로 연구되어져 왔다.

전기 업셋팅 공정에 관한 연구를 살펴보면, 그 중요성에 비하여 연구결과가 많지 않음을 알 수 있다. 1994년도에 왕지석과 박태인 [2, 3]이 열탄소성 유한요소법을 이용하여 전기 업셋팅 공정을 해석하였다. Biba 등[4]은 전기 업셋팅 공정에 대한 연계해석을 수행하였다. 조민수 등[5]은 전기 업셋팅 공정해석 프로그램인 QFORM을 이용하여 각 공정변수들의 상관관계에 대하여 연구하였다.

반면, 전기 업셋팅 이후의 단조 공정에 관한 연구는 다수의 연구자에 의하여 행하여졌다. Kang 등[6]은 소형 밸브의 성형공정 해석 및 제품의 미세조직에 관하여 연구하였고, Kim 등[7]은 배기밸브 헤드의 제작을 위한 NIMONIC 80A의 열간단조에 관하여 연구하였다. 정호승 등[8]은 배기밸브 헤드의 제작 시에 NIMONIC 80A의 미세조직 변화에 관한 연구를 실시하였고, 박태인 등[9]은 대

1. 경상대학교 기계항공공학부 박사 후 과정
2. 경상대학교 대학원 기계공학과
교신저자: 경상대학교 기계항공공학부,
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

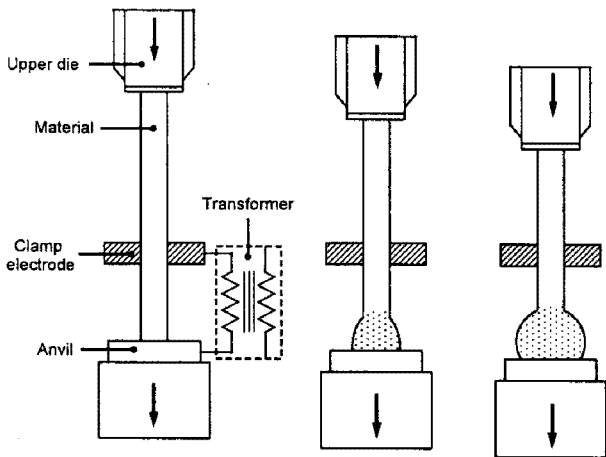


Fig. 1 Conceptual drawing of an electric upsetting process

형 디젤기관용 배기 밸브의 전기 업셋팅 기계를 개발하였다.

본 연구에서는 전기 업셋팅 공정에 대한 유한 요소해석 기법을 개발하며, 이를 이용한 배기밸브 헤드의 전기 업셋팅 및 후속 단조 공정에 관하여 연구하고자 한다.

2. 전기 업셋팅 공정의 모델링

Fig. 1 은 전기 업셋팅 공정을 개념적으로 나타내고 있다. 이 공정은 소재, 상전극 또는 클램프 전극(Clamp electrode), 업셋팅 실린더(Upsetting cylinder)에 의하여 구동되는 상금형(Upper die), 하전극(또는 앤빌, Anvil)이 부착된 하금형으로 구성되어 있다. 하금형은 전극의 역할을 동시에 수행하며, 강제 냉각 장치를 이용하여 전극의 온도를 적절한 범위 이내에 머물도록 제어한다. 상전극과 하전극 사이에는 전류의 흐름에 의하여 재료가 지닌 전기적 저항 특성으로 발열이 일어나며, 이로 인하여 상하 전극 사이의 소재의 유동응력이 급격히 감소하게 되고, 상하 금형의 상대속도 차이에 의하여 소재의 끝이 양과 형태로 변형된다. 하전극은 하금형과 함께 후퇴실린더(Escape cylinder)에 의하여 후진하도록 되어 있다.

교류전원을 사용할 경우, 표면효과(Skin effect [10])로 인하여 단면의 중심과 바깥쪽의 전류의 밀도 차이가 발생한다. 반경 R 이 표면깊이(Skin depth) d 보다 작은 봉재 또는 선재의 경우, 전류 밀도(Current density) $J(r)$ 은 다음과 같다.

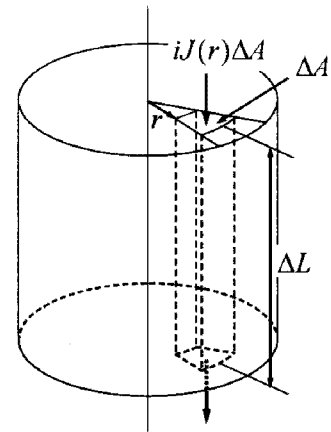


Fig. 2 Flowing electric current in the bar

$$J(r) = J_s \frac{J_0(\sqrt{-2jr/d})}{J_0(\sqrt{-2jR/d})} \quad (1)$$

여기서 J_s 는 표면에서의 전류밀도이고, 함수 J_0 는 제 1종 0차 Bessel 함수(Zeroth order Bessel function of the first kind)이다. 그리고 표면깊이는 다음 식으로 정의된다.

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 도체의 비저항(Resistivity)이며 온도의 함수이다. ω 는 전류의 각 진동수(Angular frequency of current)이고, μ 는 도체의 절대 투자율(Absolute magnetic permeability of conductor)이다.

한편, 전류밀도가 균일한 경우 Fig. 2 의 봉재에서 발생하는 전기적 동력 P 는 다음과 같다.

$$P = \rho \frac{\Delta L}{\Delta A} (J(r)i\Delta A)^2 = \rho J(r)^2 i^2 \Delta L \Delta A \quad (1)$$

여기서 i 는 전류이며, 일반성을 고려하여 전류 i 를 시간의 함수로 간주하였다. 따라서 단위 부피당 발생하는 전기적 동력 q_e 는 다음 식으로 정리된다.

$$q_e = \rho J(r)^2 i^2 \quad (2)$$

그러므로 전기적 저항에 의하여 발생하는 발열을 고려한 전도방정식은 다음과 같다.

$$(kT_{,i})_{,i} + (Q + q_e) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 V 와 경계영역 S 로 나누어지며, 경계영역 S 는 표면력이 $t_i^{(n)} = \bar{t}_i^{(n)}$ 로 주어진 경계 S_i , 속도가 $v_i = \bar{v}_i$

로 주어진 경계 S_v , 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 경계 S_c 등으로 세분화될 수 있다. 금형-소재 접촉면에서 압축력이 작용하면, 금형과 소재의 법선속도는 동일하다. 즉 S_c 에서 $v_n = \bar{v}_n$ 이다. 본 논문에서 하첨자 n 과 t 는 각각 법선성분과 접선성분을 의미한다.

소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화(Isotropic hardening) 등의 성질을 가지고 있고, von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따르며, 접촉면에서 쿨롱마찰법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 자중 및 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장 v_i 를 구하자는 것이며, 벌칙기법을 이용하여 비압축성 조건을 처리하면, 다음의 약형이 수식화된다.

$$\int_V \sigma'_{ij} \omega'_{ij} dV + \int_V K \dot{\epsilon}_{ij} \omega_{ij} dV - \sum \int_{S_i} \bar{t}_i^{(n)} \omega_i dS + \int_{S_c} \mu \sigma_n g(v_t) \omega_t dS = 0 \quad (4)$$

여기서 가중함수 ω_i 는 경계 S_v 에서 영의 값을 갖고 S_c 에서 $\omega_n = 0$ 의 조건을 만족하는 경계 임의의 함수이고, K 는 벌칙상수이며, 매우 큰 값의 양수이다.

식 (4)에서 σ_n 은 금형-소재 접촉면에서의 법선 응력이며, μ 은 마찰계수이다. 함수 $g(v_t)$ 는 접촉면에서 소재와 금형의 상대속도의 영향을 반영하는 함수이며, 접촉면에서 미끄럼이 발생하면 그 절대값이 1이 되고, 미끄럼이 발생하지 않으면 그 절대값이 1보다 작게 된다. 즉, 함수 $g(v_t)$ 는 상대속도가 마찰에 미치는 영향을 고려하는 역할, 수치적 문제점을 완화시키는 역할, 고착상태 ($v_t = \bar{v}_t$)를 만들어 줌으로써 전단응력이 이론적 한계를 못 넘게 하는 역할 등을 수행하는 함수이며, Chen과 Kobayashi [11]가 제안한 함수가 가장 널리 사용되고 있다.

식 (4)에서 편차응력텐서 σ'_{ij} 는 소성유동법칙에 의하여 다음과 같이 변형률속도 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 의 함수로 표현된다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (5)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 와 $\dot{\epsilon}$ 는 각각 유효응력과 유효변형률속도를 의미한다. 식 (4)를 유한요소법에 의하여 이산화시키면, 비선형방정식이 유도된다. 이와 관련

된 상세한 내용은 참고문헌[13]으로 대신한다. 유효응력은 일반적으로 유효변형률, 유효변형률속도, 온도 등의 함수이며, 실험식으로 주어진다. 전기업셋팅의 경우, 주 변형구간은 고온상태를 유지하므로 온도와 변형의 연계해석이 불가피하다.

식 (3)와 경계조건[13]을 고려한 전도방정식에 대한 약형은 다음과 같다.

$$\int_V \left\{ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \omega + k T_{,j} \omega_{,j} - (Q + q_e) \omega \right\} dV - \int_{S_c} \{ q_f - h_c (T - T_c) \} \omega dS + \int_{S_q} h_q (T - T_w) \omega dS + \int_{S_e} \{ \sigma \epsilon (T^4 - T_e^4) + h_e (T - T_e) \} \omega dS = 0 \quad (6)$$

여기서 n_i 는 외향단위법선벡터(Outward unit normal vector)이며, T_c , T_w , T_e 는 각각 접촉하는 물체표면의 온도, 냉각수의 온도, 주위 환경의 온도를 나타내고, h_c , h_q , h_e 는 각각 접촉면의 열전달계수, 냉각수와 대류열전달계수, 주위환경과의 대류열전달계수를 나타낸다. $\sigma \epsilon$ 은 Stefan-Boltzmann 상수와 물체의 방사율(Emissivity)의 곱이다. q_f 는 마찰에 의하여 접촉면에서 발생하는 발열율을 나타낸다[12].

냉간과 열간 공정 모두 소성열이 발생한다. 일반적으로 냉간에서의 소성열은 소재와 금형의 온도상승을 야기하나 상승된 온도로 인한 변형저항식의 변화는 매우 작다고 알려져 있다. 반면, 열간의 경우는 소성열의 발생과 소재-금형간의 열전달에 의한 온도의 변화가 소재의 변형저항식에 직접적인 영향을 주게 된다. 즉, 식 (5)에서 $\bar{\sigma}$ 는 온도의 함수이고, 온도해석 문제의 식 (6)에서 Q 는 변형률속도 또는 속도장의 함수이다. 따라서 유동해석 문제와 온도해석 문제가 연계되어 있으므로 이를 연계문제(Coupled problem)라고 한다. 연계문제를 직접 연립하여 풀거나 변수를 소거하여 푼다는 것은 사실상 불가능하다. 실제 해석 대상인 소재는 하나이지만 금형(편치 포함)은 최소한 2개이고, 금형이 2개일 경우 온도해석 문제는 3개이고 유동해석 문제는 1개이기 때문에 수치계산이 사실상 불가능하기 때문이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 온도-유동장 문제의 분리반복수렴기법[13]이 일반적으로 사용되고 있다. 온도해석 문제와 유동해석 문제를 분

리하여 독립적으로 풀되, 온도해석 시에 Q 를 구하기 위하여 유동해석 결과를 사용하고, 유동장해석시에 필요한 온도정보는 온도해석 결과를 사용한다. 온도해석 시에 유동장은 변하지 않으며, 유동장해석 시에는 온도장이 변하지 않는다. 이러한 수치해석과정을 반복하면, 유동장과 온도장의 변화가 동시에 점진적으로 감소하며, 최종적으로는 수렴해에 도달하게 된다.

3. 적용 예제

해석 기법의 타당성을 조사하기 위하여 가상의 선박용 저속엔진의 배기 밸브 제조 공정을 선정하였으며, 본 논문에서 제시된 기법을 적용하였다.

Fig. 3 은 전기저항 업셋팅 공정의 초기 상태를 나타내고 있다. 전기 업셋팅 공정의 관찰에 의하면, 통전과 함께 저항에 의하여 소재의 온도가 상승하며, 특히 초기에 소재와 하형 사이의 접촉 저항에 의한 발열이 크게 발생하며, 그로 인하여 끝부분이 국부적으로 가열되는 현상을 나타낸다. 그런데 접촉면에서의 발열현상을 정확하게 해석하는 것은 용이하지 않으므로 본 연구에서는 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 직관적으로 초기온도 분포를 설정하였다.

Fig. 3 에서 상형과 하형의 속도는 Fig. 4 에서 보는 바와 같고, 상전극의 위치는 고정되어 있으며, 하전극은 하금형과 동일하다.

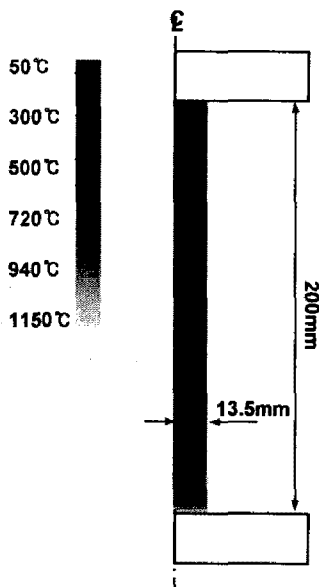


Fig. 3 Initial temperature distribution

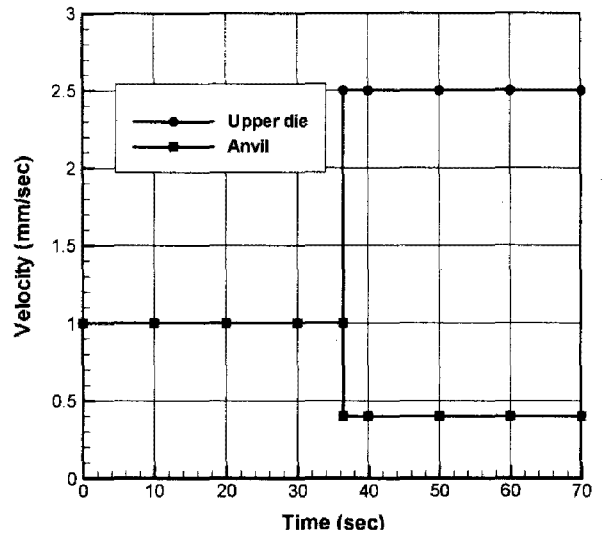


Fig. 4 Assumed velocities of dies

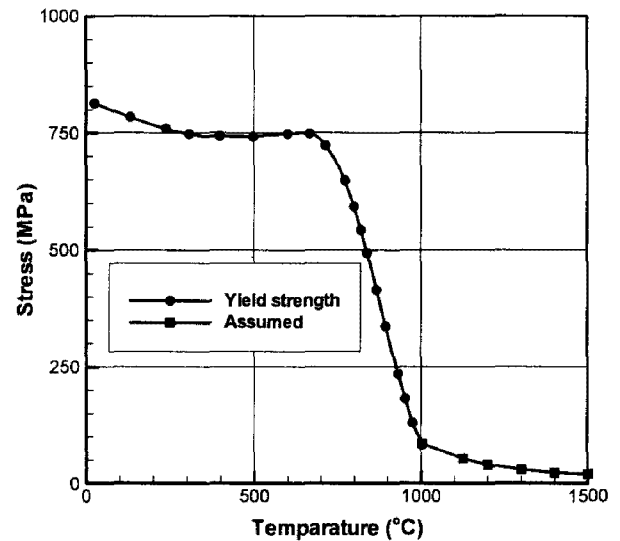


Fig. 5 Material property of NIMONIC 80A

소재의 열전도계수 및 열용량, 고유저항은 표 1[1]과 같으며, 하금형의 열전도 계수와 열용량은 표 2[14] 와 같다. 재료의 기계적 성질은 Fig. 5 에서 보는 바와 같다[1]. 재료와 금형 사이의 열전달 계수는 0.008 로 하였다[5].

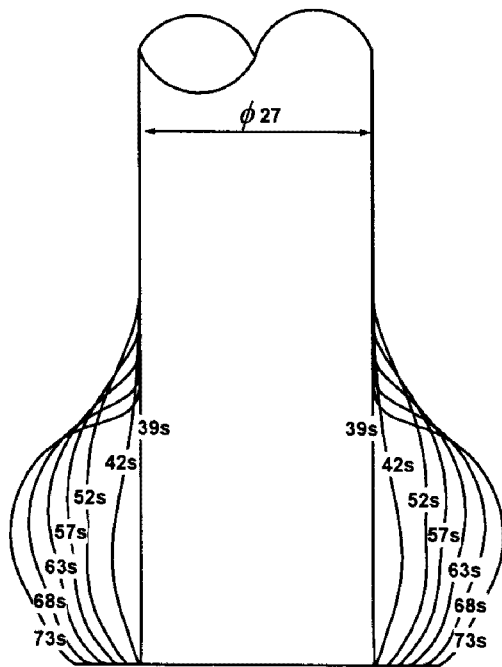
한편, 실공정에서 하형에는 강제냉각이 이루어지고 있으므로 하형의 열전도계수는 금형 소재의 열전도계수보다 10 배 크게 하였으며, 하형과 주위분위기 간의 열전달계수는 다른 부위에 비하여 100 배 크게 하였다. 소재에 흐르는 전류량은 6000A 이고, 나머지 공정조건은 참고문헌[5]을 참고 하였고, 소성가공 공정해석 프로그램인 AFDEX 2D[15]를 사용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

Table 1 Thermal properties of workpiece

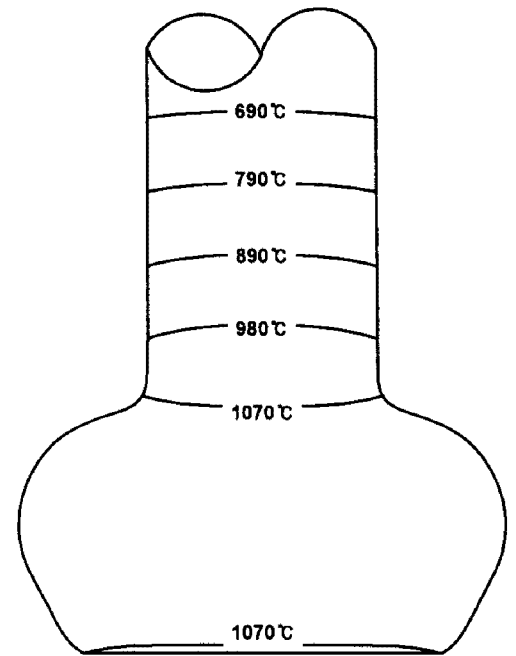
T ($^{\circ}\text{C}$)	k ($\text{W}/\text{mm}^{\circ}\text{C}$)	ρc ($\text{Wsec}/\text{mm}^{\circ}\text{C}$)	ρ (Ωmm)
20	0.0112	0.00365	1.000
100	0.0116	0.00384	1.008
200	0.0114	0.00405	1.023
300	0.0161	0.00425	1.040
400	0.0178	0.00449	1.064
500	0.0194	0.00469	1.073
700	0.0223	0.00514	1.064
800	0.0245	0.00535	1.057
900	0.0265	0.00555	1.032
1000	0.0284	0.00576	1.017

Table 2 Thermal properties of dies

T ($^{\circ}\text{C}$)	k ($\text{W}/\text{mm}^{\circ}\text{C}$)	ρc ($\text{Wsec}/\text{mm}^{\circ}\text{C}$)
200	0.0255	0.00524
800	0.0263	0.00525
900	0.0277	0.00526
1000	0.0291	0.00522
1100	0.0305	0.00522
1200	0.0319	0.00535
1300	0.0333	0.00558



(a) Shape change



(b) Distribution of temperature

Fig. 6 Analysis results of electric upsetting process

Fig. 6 은 해석 결과를 나타낸다. 최종 온도는 1170°C 이고 최종 직경은 처음 직경의 2.12 배로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 전기 업셋팅 공정의 해석 기법을 제시하였다. 강열점소성 유한요소법이 사용되

었다. 전기저항에 의한 발열계산시 전류의 표면효과를 고려하였다. 금형의 강제냉각은 가상의 열전도계수와 대류열전달계수를 사용하여 해결하였으며, 하금형과 소재의 초기 접촉에 의한 접촉부위의 온도 상승은 해석 초기 소재에 온도 분포를 주어 해결 하였다.

제시된 기법을 성공적으로 가상의 전기 업셋팅 공정 시뮬레이션에 적용하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과이며, (사)경상대 수송기계부품기술 혁신센터의 장비를 활용하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] NIMONIC alloy 80A, www.specialmetals.com
- [2] 왕지석, 박태인, 1994, 전기 업셋팅 가공시의 열탄소성 해석에 관한 연구, 한국박용기관학회, 제18권, pp. 424-430.
- [3] 왕지석, 박태인, 1994, 전기 업셋팅 가공시의 온도분포에 관한 연구, 한국박용기관학회지, 제18권, 제3호, pp. 1-9.
- [4] N. Biba, A. Lishnij, and A. Vlasov, 1998, Simulation of coupled problem of electric upsetting, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 80-81, pp. 184-187.
- [5] 조민수, 2004, 대형 디젤엔진 배기밸브의 전기 업셋팅 공정 해석에 대한 연구, 한국해양대학교 대학원.
- [6] 강범수, 최민식, 배진영, 박노광, 1996, 초내열 합금 밸브의 성형공정 설계 및 미세조직 분석, 한국소성가공학회 96추계학술대회 논문집, pp. 99-104.
- [7] D. K. Kim, D. Y. Kim, S. H. Ryu and D. J. Kim, 2001, Application of NIMONIC 80A to the forging of an exhaust valve head, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 113, pp. 148-152.
- [8] 정호승, 2005, 유한요소법을 이용한 열간 형단조 Nimonic 80A의 미세조직 변화 예측, 한국해양대학교 대학원.
- [9] 박태인, 전익효, 왕지석, 1996, 대형 디젤기관용 배기 밸브의 전기 업셋팅 성형기계 개발, 한국선박기관학회지, 제20권, 제3호, pp. 1-10.
- [10] L. R. Neymann, 1988, Skin effect in ferromagnetic bodies, in: *Theoretical Electric Engineering*, Leningrad, Nauka, (in Russian).
- [11] C. C. Chen, S. Kobayashi, 1978, Rigid-plastic FEA of ring compression, *ASME AMD*, Vol. 28, pp. 163~174.
- [12] 전만수, 이형일, 연속체역학에서 유한요소법까지, (주)피어슨 에듀케이션 코리아.
- [13] O.C. Zienkiewicz, P. C. Jain, and E. Onate, 1978, Flow of solids during forming and extrusion: some aspects of numerical solutions, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 14, pp. 15~38.
- [14] S. M. Hwang, M. S. Joun, Y. H. Kang, 1993, Finite element analysis of temperatures, metal flow, and roll pressure in hot strip rolling, *ASME J. Eng. Ind.*, Vol. 115, pp. 292~298.
- [15] AFDEX2D, <http://engine.gsnu.ac.kr/~msjoun>