

## 다단 단조공정의 자동 시뮬레이션 중 피어싱 공정의 강점소성 유한요소해석

이석원\* · 최대영\* · 전만수\*\*

(1998년 12월 11일 접수)

### Rigid-Viscoplastic Finite Element Analysis of Piercing Process in Automatic Simulation of Multi-Stage Forging Processes

S. W. Lee, D. Y. Choi and M. S. Joun

#### Abstract

In this paper, an application-oriented approach to piercing analysis in automatic forging simulation by the rigid-viscoplastic finite element method is presented. In the presented approach, the accumulated damage is traced and the piercing instant is determined when the accumulated damage reaches the critical damage value. A method of obtaining the critical damage value by comparing the tensile test result with the analysis one is given. The presented approach is verified by experiments and applied to automatic simulation of a sequence of 6-stage forging processes.

**Key Words:** Piercing, Rigid-Viscoplastic Finite Element Method, Tensile Test, Ductile Fracture, Critical Damage, Automatic Forging Simulation

#### 1. 서 론

피어싱과 블랭킹은 전단공정으로서 금속성형의 기본공정 중의 하나이다. 대부분의 중공 단조품은 피어싱으로 제작되고 판재의 구멍은 블랭킹으로 성형되고 있다. 블랭킹 및 피어싱과 관련되는 역학적 현상은 공구형상, 전단속도, 금속재질 등을 포함하는 공정조건들에 의존한다. 블랭킹 및 피어싱 공정은 소재의 탄성 및 소성 변형과 파괴를 동반한다. 그러므로 공정의 기하학적 형태는 간단하나 역학적으로는 문제가 간단하지 않다. 이런 이유로 피어싱 및 블랭킹 공정에 관한 연구가 활발하게 진행되지 못하였다. 반면 산업계에서는 다양한 경험 공식들을 이용하여 공정설계를 실시하고 있다.<sup>(1)</sup>

단조 중 피어싱 공정은 파단을 제외하면 단조 공정과 별 차이가 없다. 소성가공 공정중 소재의 파괴 및 파단에 관한 연구는 많은 학자들에 의하여 실시되었고<sup>(2-8)</sup>, 아직 연구자들의 주요 관심사가 되고 있다. 최근들어 연성파괴 이론<sup>(9-11)</sup>을 이용한 피어싱 및 블랭킹 공정 해석에 관한 연구가 시도되고 있다. 90년대 중반에 판재의 블랭킹 공정에 관한 파괴역학적 접근이 S. H. Joeng<sup>(6)</sup>에 의하여 시도되었다. 그들은 요소제거 기법을 제안하여 손상도에 근거한 파괴 판단 방법으로 판재의 전단 변형 및 파단 과정을 강소성 유한요소법을 이용하여 해석하였다. Jeong 등이 제시한 방법과 유사한 방법이 Ceretti 등<sup>(8)</sup>과 고대철 등<sup>(12)</sup>에 의하여 절삭 공정 해석 등의 목적으로 이용되었다. 요소제거 기법에서는 해석중 요소의 손상도가 임계치에 도

\* 경상대 대학원

\*\* 경상대 기계공학과, 항공기부품기술연구소

달하면, 해당 요소를 제거함으로써 손상도가 임계치에 도달하는 통로를 추적하여 파단면을 예측하였다. 이 방법은 간단하고 기존의 단조 시뮬레이터를 그대로 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면, 비정상적인 단면을 예측하는 문제와 그 결과를 이용하여 후속 공정을 해석할 수 없는 문제를 안고 있다. 그리고 파단의 시작점과 파단의 종결 시점까지 걸리는 소요시간이 실제의 시간에 비하여 매우 크게 예측되는 것으로 조사되고 있으며, 피어싱 공정에서 국부적인 변형을 표현하기 위하여 요소망을 매우 조밀하게 해야 하는 단점도 안고 있다.

단조 중 피어싱 공정에서 야기된 소재의 전체적인 변형 형상이 후속공정에 비교적 큰 영향을 미치는 경우가 허다하다. 이런 점을 감안하여 본 논문에서는 다단 단조공정의 자동 시뮬레이션<sup>(13)</sup> 기능을 중시한 연성파괴 이론에 근거한 피어싱 공정 해석 기법을 제안하며, 실험 및 적용을 통하여 접근방법의 타당성을 입증하고자 한다.

## 2. 인장시험 및 소재 물성치의 획득

S45C 냉간단조용 봉재의 변형저항식과 임계 손상도 정보를 획득하기 위하여 인장시험을 실시하였다. ASTM E8 규격에 의거하여 표점거리를 45 mm로 하였고 시편의 직경을 9.07 mm로 하였다. 인장시험 목적으로 Zwick 1476의 장비가 사용되었으며, 속도의 영향을 무시하고 하중의 급속한 변화를 추적할 수 있도록 하기 위하여 충분히 작은 속도(0.05 mm/sec)로 실험을 실시하였다.

시험결과를 Fig. 1에 나타내었다. 네킹이 시작된 지점에서의 공칭변형률이 약 0.15이며, 연신율은 약 25 %임을 알 수 있다.

소성변형중 체적의 변화를 무시하면, 진응력  $\sigma_t$ 와 진변형률  $\epsilon_t$ 는 공칭응력  $\sigma_e$  및 공칭변형률  $\epsilon_e$ 와 다음의 관계에 있다.

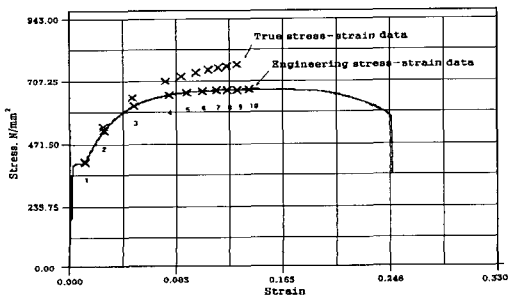


Fig. 1 Experimental results of stress-strain relations

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (1)$$

$$\sigma_t = \sigma(1 + \epsilon_e) \quad (2)$$

Fig. 1에서 진응력-진변형률의 점 테이타는 상기의 관계식으로부터 구한 것이다. 진응력-진변형률 곡선을 다음의 수식으로 표현했을 때,

$$\sigma_t = K \epsilon_t^n \quad \text{또는} \quad \bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (3)$$

변형경화지수  $n$ 은 최대공칭응력점에 대응하는 진변형률과 동일하므로  $n = 0.14$ 이다<sup>(14)</sup>. 이 조건하에서 최소자승법을 이용하여 강도계수  $K$ 를 구하면  $K = 1021 \text{ MPa}$ 이다. 따라서 인장시험에 사용된 소재의 변형저항식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 1021 \bar{\epsilon}^{0.14} \text{ MPa} \quad (4)$$

이 변형저항식을 이용하여 인장시험 공정에 관한 강소성 유한요소해석<sup>(15)</sup>을 실시하였다. 해석에 사용된 조건은 실험 조건과 동일하도록 하였고, 표점거리 45 mm에 대한 연신율이 25 %까지 되도록 인장하였다. 요소망재구성시의 상태변수의 평탄화를 막기 위하여 시뮬레이션 중 요소망재구성은 실시하지 않았다. 주요 결과를 Fig. 2와 3에 요약하였다. Fig. 2(c)에서 손상도  $\delta$ 는 다음 식에 의하여 정의된다.

$$\delta = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\langle \sigma_1 \rangle}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (5)$$

여기서 특이함수  $\langle \sigma_1 \rangle$ 는  $\sigma_1$ 이 양수이면  $\langle \sigma_1 \rangle = \sigma_1$ 이고,  $\sigma_1$ 이 음수이면  $\langle \sigma_1 \rangle = 0$ 이다. 그리고  $\bar{\epsilon}$ 와  $\bar{\sigma}$ 는 각각 유효변형률과 유효응력을 의미한다. 이 모델은 McClintock<sup>(16)</sup>가 제안한 손상도 계산 수식의 특수형태이며, Oh 등<sup>(17)</sup>에 의하여 사용된 것이다.

시편의 파단면을 측정해 본 결과, 파단면의 직경은 6.42 mm이며, 해석에서 예측한 결과는 6.43 mm이다. Fig. 3으로부터 식 (4)의 변형저항식은 인장시험시의 재료의 거시적 거동을 비교적 잘 반영하고 있다고 볼 수 있다. 한편, 파단시에 Fig. 2(c)로부터 손상도의 최대치는 중심에서 발생하며 그 값이 0.75에 이르고, 파단면에서 손상도의 최소값은 0.61이다. 비교적 큰 차이이다. 연성파괴 이론에 의하면, 개재물, 제2상입자, 미세 산화물입자에서 공동(Void)이 형성되고 변형이 증가함에 따라 이들 공동이 성장 및 병합된다. 네킹이 일어나면 공동형성은 보다 활발하게 진행되고 공동의 병합이 더욱 진전된다. 이로 인해 인장 방향에 수직한 방향으로

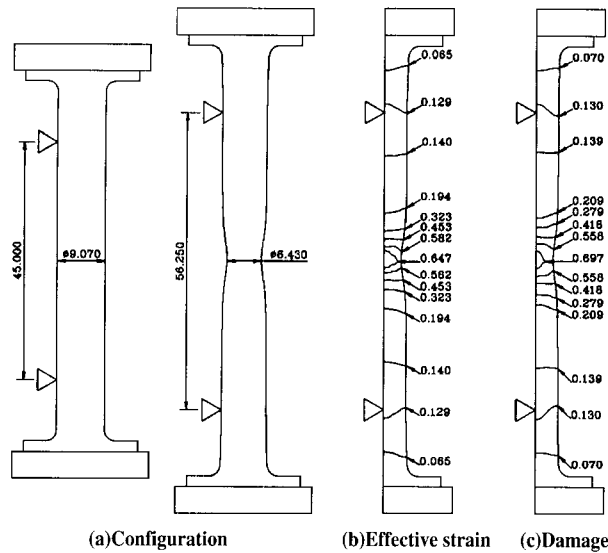


Fig. 2 Finite element analysis of a tensile test

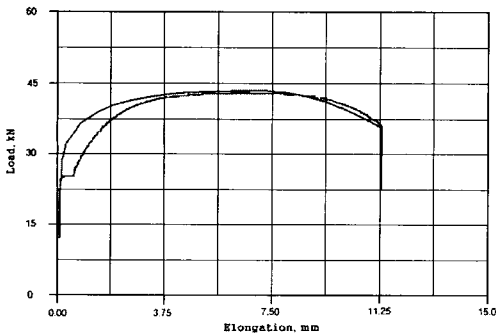


Fig. 3 Load-elongation relationship of the tensile test

균열이 성장한다.<sup>(18~20)</sup> 이 균열은 어떤 상태에 도달하면 Fig. 3에서 보는 바와 같이 급격하게 파단으로 연결됨을 알 수 있다. 이와 같은 급격한 파단은 균열선단에서의 미시적 소성변형, 국부적 손상도의 증가, 파괴 등의 과정을 통하여 발생한다.

### 3. 피어싱 공정의 해석 기법

2장에서 인장시험 및 평가 목적으로 사용된 S45C 소재를 이용하여 피어싱 공정의 특성을 실험적으로 조사하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 피어싱의 공정도이다. Fig. 5는 피어싱 공정의 실험에서 얻은 변위-하중 곡선을 나타

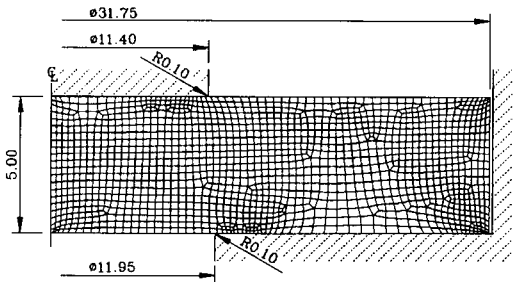


Fig. 4 Details of a test piercing process and its finite element model

내고 있다. 그리고 초기접촉에서부터 피어싱 직전까지 편치의 행정은 약 1.3 mm로 측정되었다.

Fig. 5의 실험결과로부터 인장시험과 마찬가지로 파단 직전에 하중의 감소가 급격히 발생하는 것으로 보아 재료의 초기파단과 최종파단 사이의 시간 및 스트로크는 매우 짧다는 것을 알 수 있다. 이러한 실험적 사실은 S45C에서 초기의 크랙 생성은 연성파괴 이론에 근거한 손상도의 축적에 의한 것으로 볼 수 있지만, 후속된 파단은 연속체의 강소성 유한요소법으로 예측 가능한 거시적 소성변형에 기인하는 손상도의 증가에 기인하는 것이 아님을 암시하고 있다. 즉, 파단이 시작되면 미시적 영역에서 소성변형과 파괴가 발생되며, 이 과정을 재료의 거시적 거동을 해석하기 위한 강소성 유한요소법으로 예측하

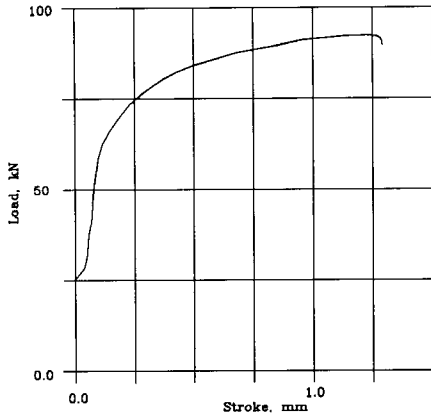


Fig. 5 Measured load-stroke curve of the piercing process

는 것은 불가능하다. 이런 이유로 Jeong<sup>(6)</sup> 등의 강소성 유한요소법 요소제거법에 의하여 예측된 완전한 하중의 감소 결과는 Fig. 5와 같은 실제의 현상을 반영 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 피어싱시 전단면상의 요소의 손상도가 임계치에 도달하면 파단 또는 분리가 발생하며, 응용의 관점에서 피어싱 급형의 두 모서리 점을 연결하는 방향으로 파단이 발생한다고 가정한다. 이러한 가정으로 피어싱 직전의 행정이 동일하다면 실제의 피어싱 단면과 예측된 단면에 의한 소재의 부피는 거의 동일하므로 응용의 관점에서 볼 때 적절하다고 사료된다.

전술한 피어싱 공정에 관하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 피어싱 공정에서 요소망재구성은 비교적 빈번히 실시되므로 이로 인한 상태변수의 평탄화는 불가피하다. 따라서 임계 손상도를 0.7로 간주하였다. 그리고 요소망재구성 중 상태변수의 평탄화를 감소시키기 위하여 다음의 순화 방법을 제안하여 사용하였다.

$$\text{Minimize } \left\{ \alpha_1 \int_{\Omega} \left( \sum_{i=1}^4 N_i^e \phi_i^e - \bar{\phi}^e \right)^2 d\Omega + \alpha_2 \left( \sum_{i=1}^4 \frac{\phi_i^e}{4} - \bar{\phi}^e \right)^2 \right\} \quad (6)$$

여기서  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는 가중상수이다.  $\phi_i^e$ 와  $\bar{\phi}^e$ 는 각각 상태변수의 절점치와 요소치를 의미하며,  $N_i^e$ 은 보간함수이다. 첫 번째 항은 일반적으로 절점치의 계산을 위하여 사용하는 것으로써 상태변수를 전체적으로 순화시킴

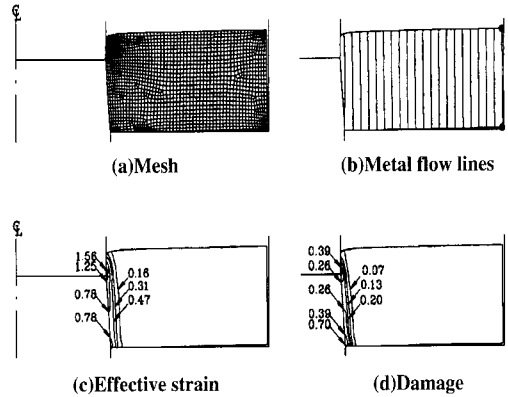


Fig. 6 Predicted results of the piercing process

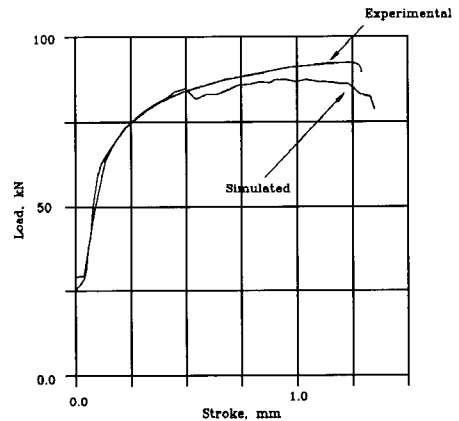


Fig. 7 Comparison of the measured load-stroke curve with the predicted one

로써 상태변수의 극대값은 작게 하고 극소값은 크게 하는 문제가 있다. 두 번째 항은 상태변수의 순화를 유발시키지 않으면서 절점치를 구하게 해 주지만 진동을 유발시킬 수 있다. 실제 계산시에  $\alpha_1 = 1.0$ ,  $\alpha_2 = 0.2$ 를 사용하였다.

이 공정에 관한 유한요소해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 해석결과로부터 파괴는 하형의 모서리점에서 시작되며, 피어싱 직전까지의 상형의 행정은 약 1.35 mm이다. 이 결과는 실험결과인 1.3 mm와 비교적 잘 일치하는 수치이다. 피어싱 공정에 대한 성형하중의 실험 및 예측 결과를 Fig. 7에서 비교하고 있다.

성형초기에는 비교적 잘 일치하고 있으나, 0.45 mm 지점부터 실험치와 예측치의 차이가 증가하는데 이는 요소망재구성에 따른 유효변형률의 순화에 의한 것으로 추정된다.

#### 4. 피어싱 공정을 내포하고 있는 6단 단조공정의 자동 시뮬레이션

등온가정하에서 6단 복합단조공정에 대한 자동 시뮬레이션을 실시하였다. 공정의 흐름도는 Fig. 8에서 보는 바와 같으며, 전반부의 3단은 열간단조이고 후반부의 3단은 냉간단조이다. 세 번째 열간단조공정과 두 번째 냉간단조 공정은 피어싱 공정이다.

열간단조공정에서 유동응력은  $\bar{\sigma} = 62 (\dot{\bar{\epsilon}})^{0.25} MPa$ 로 간주하였으며, 냉간단조공정에서 유동응력은  $\bar{\sigma} = 350(1 + \bar{\epsilon}/0.14)^{0.20} MPa$ 로 간주하였다. 펀치의 속도는 200 mm/sec 로 간주되었고, 쿨롱마찰계수를 열간에서는 0.3, 냉간에서는 0.05로 가정하였다. 열간 피어싱의 경우, 재료의 분리는 두 피어싱 금형의 모서리 점 사이의 거리가 피어싱 개시 직전거리의 10%가 되었을 때 분리가 이루어지고 냉간의 경우 손상도가 0.6에 도달했을 때 분리가 이루어지는 것으로 간주하였다.

자동 시뮬레이션 기능을 이용하여 한번의 실행으로 시뮬레이션을 완료하였다. 금속유동선이 추적되었으며, 그 결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같다.

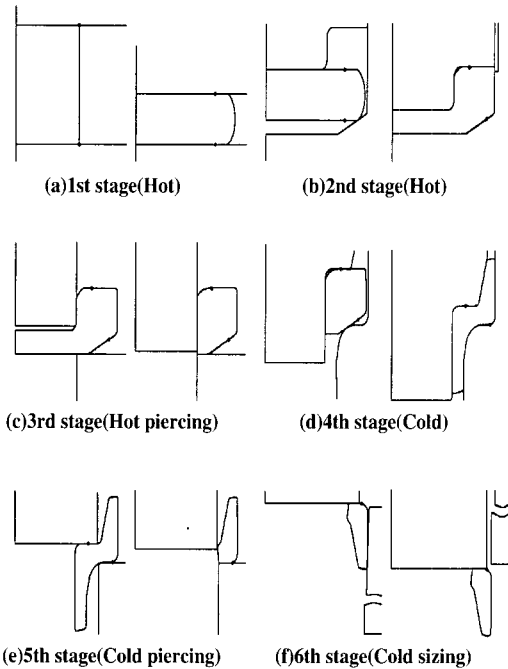


Fig. 8 Sequence of a 6 stage compound forging process

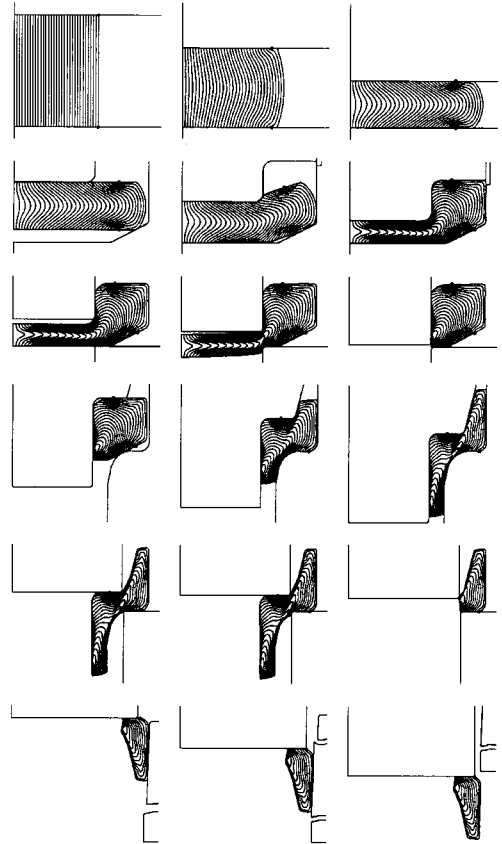


Fig. 9 Results of automatic simulation of the compound forging process

#### 5. 결론

본 연구에서는 다단 단조공정의 자동 시뮬레이션 기능을 중시하여 연성과괴 이론에 근거한 피어싱 공정 해석 기법을 제시하였다. 제안된 접근방법에서는 재료의 파단 시점을 연성과괴 이론에 바탕을 두고 계산한 손상도를 근거로 결정하였으며, 파단면은 피어싱 금형의 두 모서리 점을 연결하는 선으로 가정하였다.

제안된 접근방법은 실험용 피어싱 공정에 적용되었으며, 그 결과는 실제의 실험결과와 비교되었다. 실험결과와 예측결과를 비교한 결과, 정량적으로 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 제안된 방법은 6단 복합단조 공정의 자동 시뮬레이션에 적용됨으로써 적용성이 입증되었다.

### 참고문헌

- (1) K. Lange, 1985, The Handbook of Metal Forming, SME.
- (2) M. Murakawa, 1984, "Burr-Free Shearing", Adv. Tech. Plast. Vol. II, pp. 805~814.
- (3) N. Koga and M. Murakawa, 1996, "Application of Visioplasticity to Experimental Analysis of Shearing Phenomena", Adv. Tech. Plast., pp. 571~574.
- (4) P. B. Popat, 1989, "Finite Element Analysis of Blanking Process", J. Mech. Work. Tech., Vol. 18, pp. 269~282.
- (5) C. M. Choy and R. Balendra, 1995, "Simulation of the Effect of Tool Geometry Changes on Blanking Operations", Proc. 9th Int. Colf Forging Congress, Solihull, UK, pp. 217~222.
- (6) S. H. Jeong, J. J. Kang and S. I. Oh, 1996, "A Study on Shearing Mechanism by FEM", Proc. 5th ICTP, Vol. 2, pp. 631~634.
- (7) D. Brokken, W. A. M. Brekelmans and F. P. T. Baaijens, 1996, "Numerical Analysis of the Metal Blanking Process", Adv. Tech. Plast., pp. 665~668.
- (8) E. Ceretti, E. Taupin and T. Altan, 1997, "Simulation of Metal Flow and Fracture Applications in Orthogonal Cutting, Blanking and Cold Extrusion", Annals of the CIRP, Vol. 46, pp. 187~190.
- (9) S. E. Clift, P. Hartley, C. E. N. Sturgess and G. W. Rowe, 1990, "Fracture Prediction in Plastic Deformation Process", Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, pp. 1~17.
- (10) H. Kim, M. Yamanaka and T. Altan, 1995, "Prediction and Elimination of Ductile Fracture in Cold Forgings Using FEM Simulations", Trans. NAMRI/SME, Vol. XXIII, pp. 63~69.
- (11) A. S. Wifi, N. El-Abbasi and A. Abdel-Hamid, 1995, "A Study of Workability Criteria in Bulk Forming Processes", Materials Processing Defects(Ed. by S. K. Ghosh and M. Predeleanu), pp. 333~357.
- (12) 고대철, 김병민, 고성립, 1998, "2차원 절삭에서 공구이탈시 발생하는 버에 관한 강소성 유한요소해석", 한국정밀공학회지, 제15권, pp. 125~133.
- (13) M. S. Joun, H. K. Moon and R. Shivpuri, 1998, "Automatic Simulation of a Sequence of Hot-Former Forging Processes by a Rigid-Thermoviscoplastic Finite Element Method", ASME Trans., J. Eng. Mat. Tech., Vol. 120, pp. 291~296.
- (14) S. Kalpakjian, 1992, Manufacturing Processes for Engineering Material, Addison-Wesley Pub. Co.
- (15) AFDEX/2D 2.2, 경상대학교 MFCAE Lab., 1998.
- (16) F. A. McClintock, 1968, "A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Hole", J. Appl. Mech., Vol. 35, pp. 363~371.
- (17) S. I. Oh, C. C. Chen and S. Kobayashi, 1979, "Ductility Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing-Part 2", ASME Trans., J. Eng. Ind., Vol. 101, pp. 36~44.
- (18) A. G. Atkins, 1996, "Fracture in Forming", J. Matrl. proc. Tech, 56, pp 609-618.
- (19) Todd S. Gross and S. Lampman 1996, "Micro-mechanism of Monotonic and Cyclic Crack Growth", ASM HandBook, Vol. 19, pp. 42~60.
- (20) A. Melander, 1980, "The Influence of Work Hardening Rate on Ductile Fracture", Acta Met, Vol. 28, pp. 1799~1804.