

냉간단조에서 금형 열박음 영향의 정량적 분석

이추실¹, 이민철², 정동찬³, 손요현⁴, 전만수[#]

Quantitative analysis of effect of shrink fit in cold forging

Q. S. Li, M. C. Lee, D. C. Jung, Y. H. Son, M. S. Joun

Abstract

In this paper, effects of major design parameters of cold forging dies on die mechanics are quantitatively investigated with emphasis on shrink fit using a thermoelastic finite element method. A ball-stud cold forging process found in a cold forging company is selected as a test process and the effects of die insert material, shrink fit, dimension of ring, partition of die inert and clamping force on effective stress and circumferential stress are analyzed.

Key Words : 금형 구조해석(Die Structural Analysis), 보강링(Shrink Ring), 열박음(Shrink fit)

1. 서론

냉간금형은 다이인서트(die insert)와 열박음 목적의 링(shrink ring)과 체결장치로 구성되어 있다. 물론 냉간금형은 다이세트에 고정되고, 다이세트는 단조기에 고정되어 작동된다. 냉간단조의 경쟁력을 좌우하는 주요 요소가 금형의 수명이다. 냉간금형의 수명은 파괴, 마모, 소성변형 등에 의하여 좌우된다[1]. 그 중에서도 파괴에 의하여 금형이 수명을 다하는 사례가 가장 많다. 단조 중 금형의 파손은 생산성과 불량품의 양산으로 이어지는 물론이고, 인명 사고로 이어질 수 있다는 점에서 기업체에서는 이 문제를 매우 중시하고 있다.

대량 생산 목적의 금형의 경우, 금형의 파괴, 마모, 소성변형 등을 막기 위하여 다이인서트는 초경합금 등의 고강도 소재로 하고 열박음용 링은 주로 합금공구강이 사용되고 있다. 물론 초경합금은 가공이 용이하지 않고, 가격이 비싸기 때문에 가능하다면, 다이인서트도 합금공구강으로 제작되고 있다. 금형 재료는 경한 성질을 가지고 있고, 압축강도가 인장강도에 비하여 크다.

따라서 냉간단조에서 금형의 예압은 필수적이다. 대개의 경우 0.4% 내외의 금형 예압을 실시하는데, 금형 재료의 열팽창계수가 0.000012 이라고 가정하

면, 약 360℃의 열하중을 부과하는 것과 맞먹는다. 다이인서트를 예압하지 않을 경우, 재료를 통하여 전달된 금형의 면압에 의하여 원주방향 응력 성분이 인장상태가 되고, 이는 금형의 파괴로 직결될 수 있다. 이를 방지하기 위하여 다이인서트 외곽을 에워싸는 열박음용 링을 통하여 예압을 가하여 미리 원주 방향으로 압축 응력 성분이 작용하도록 함으로써 금형의 파괴를 방지하고 있다.

금형의 열박음은 매우 중요하지만, 역학적 복잡성으로 인하여 이에 관한 응용 연구가 매우 미흡하다. 물론 열박음된 금형 구조해석 기술은 다방면으로 개발되어 있다. 그럼에도 불구하고 금형의 열박음 또는 예압에 관한 실용적 연구는 흔하지 않다. 전술한 바와 같이 역학적으로 매우 복잡할 뿐만 아니라 금형의 형태가 다양하여 응용 연구를 체계화하는데 한계가 있기 때문이다.

열박음 현상 규명은 금형 구조해석과 불과분의 관계에 있으며, 열박음을 고려한 금형 구조해석에 관한 많은 연구[2-14]가 이루어졌다. 1980년대 후반 대부분의 연구는 유한요소법을 이용하였으며, 연구는 단조 시뮬레이터를 연계한 수치적 연구, 특히 응용 연구가 주류를 형성하고 있다. 기존 연구들을 조사해 보면, 기본적으로 매우 유사한 수식을 사용하지만, 접근 방법에 기인하는 결과의 정확도와 사

1. 경상대학교 기계공학과 대학원
2. 경상대학교 공학연구원
3. 태양금속공업(주)
4. 영신금속공업(주)
#. 경상대학교 기계항공공학부/항공기부품기술연구소
E-mail : msjoun@gnu.ac.kr

용의 편리성은 다소의 차이를 보이는 것으로 판단된다. 그리고 금형 단층을 대상으로 실시한 연구가 대부분이다. 실제 자동다단냉간단조의 금형은 대부분 다층 구조[9]로 되어 있다. 단조 금형의 구조해석을 위하여 Joun 등[9]이 제안한 가변벌칙기법(varying penalty method)은 수치적 안정성이 확보되어 있으며, 그 결과 선행연구에서 밝힌 바와 같이 이론해와 일치하며 금형 부품의 접촉 경계에서 작용하는 하중이 뉴턴의 제 3 법칙을 정확하게 만족하는 결과를 보였다. 본 연구에서는 볼스타드(ball-stud) 냉간단조공정 중에서 맨 마지막 냉간단조공정을 대상으로 열박음의 영향을 유한요소해석 기법을 이용하여 분석한다.

2. 시험 대상 금형

일반적으로 자동다단냉간단조는 대량생산을 목적으로 한다. 따라서 공정 및 금형 설계 시에 금형 수명이 경쟁력을 좌우하는 가장 중요한 요소로 취급된다. 금형의 수명 향상을 위하여 흔히 예압을 실시하고 있으며, 응력이 집중될 수 있는 부분은 분할을 실시한다. 금형의 수명은 여러 요소에 의하여 결정되며, 특히 금형 설계변수의 결정이 매우 어려운 문제이다. 실제 대부분의 금형 구조설계는 경험에 의하여 이루어지고 있으며, 규격품의 생산을 위한 냉간금형은 오랜 경험에 의하여 최적의 설계에 근접해 있다. 그러나 새로운 제품의 개발 및 생산을 위한 신 단조금형의 설계 시에는 수차례의 시행착오를 범하는 경우가 빈번하다.

냉간단조금형 설계의 규격화는 용이하지 않다. 그만큼 금형의 설계변수들이 금형의 성능에 미치는 영향을 일반화시켜서 분석하는 것이 어렵다. 본 연구에서는 비교적 생산량이 많아 널리 알려져 있으면서 금형설계 측면에서 다소 까다로운 볼스타드 냉간단조공정을 시험 공정으로 선택하였다. Fig. 1은 본 연구에서 적용대상으로 선정된 볼스타드 단조공정 중에서 맨 마지막 단계의 하금형의 설계도이다. 금형은 3층으로 분리되어 있고, 이것들은 앤빌(anvil) 위에 놓여서 외곽의 체결용 실린더에 의하여 체결된다. 각 층의 금형은 다이인서트와 두 개의 열박음용 링으로 구성되어 있다. 그림에 본 논문에서 분석한 설계변수들을 표시해 두었으며, 해석결과는 ○, △, □으로 표시된 점 A, B, C에서 유효응력 σ 와 원주방향의 응력 성분 σ_θ 을 중심으로 분석되었다.

본 연구에서 사용한 유한요소해석모델을 Fig. 2에 나타내었다. 유한요소해석 목적으로 사용된 금형에 관한 소재 정보는 Table 1[15, 16]과 같다. 압축링의 소재는 모두 SKD61이다. 접촉면에서 마찰계수를 0.1로 가정하였다.

Table 1 Elastic property of die materials

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
WC	696	0.24
SKD11	210	0.30
SKD61	200	0.28

3. 금형 구조해석 및 열박음 영향 분석

금형의 열박음의 영향을 분석할 목적으로 Table 2에서 보는 바와 같은 다양한 조건하에서 금형의 구조해석을 실시하였다.

열박음과 관련된 설계변수의 영향을 분석하기 위해서는 설계의 기준이 필요한데, Table 2에서 Case 4를 기준으로 삼았다. 이 경우는 내측 링과 외측 링에 0.4%의 예압을 가하고, 체결력을 0.3%의 예압을 가한 것으로 간주한 것이다. Case 4에 대한 해석결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 요약하였다. Fig. 3에서 좌편은 유효응력을 의미하고, 우편은 금형 부품의 접촉면에 작용하는 응력벡터, 즉 응력의 접선성

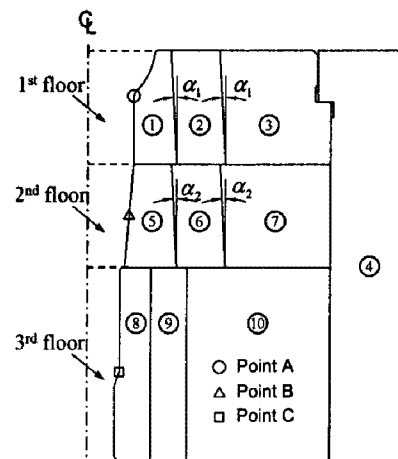


Fig. 1 Lower die design of the last process in ball-stud cold forging

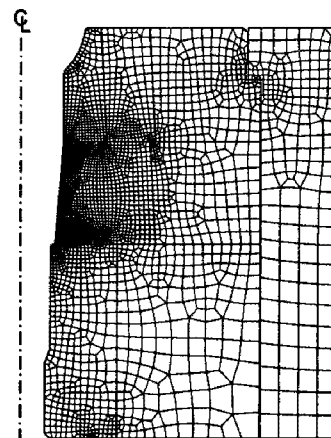


Fig. 2 Typical finite element analysis model used in this paper

분과 법선성분을 벡터로 표시한 것이다. 이 결과로부터 해석결과는 뉴턴의 제 3 법칙을 정확하게 만족하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4 에서 좌편은 대칭면에 작용하는 주응력 성분을 나타내고 있고, 우편은 원주방향의 응력성분을 나타내고 있다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 예압에 의하여 원주방향으로 압축력이 작용하게 된다. 이 점이 열박음의 근본적인 목적이다.

3.1 금형의 예압량의 영향

Fig. 5 에 Table 2 의 Case 1~5 에 대한 해석결과, 즉 예압량에 따른 Fig. 1 에서 A, B, C 점의 유효응력과 원주방향의 응력 성분의 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 예압량에 따라 원주방향의 응력 성분과 유효응력이 비슷한 패턴의 변화를 보이고 있다. 특히 두 응력 값의 절대치가 거의 같으며, 이는 원주방향의 응력 성분의 절대치가 다른 두 개의 주응력에 비하여 매우 크기 때문이다. 예를들면, 0.4%의 압축 시에 점 A 에서 주응력은 -12MPa, -133MPa, -2295MPa(원주방향의 응력)이며, 이 주응력의 유효응력은 2224MPa 이다.

한편, Case 6 은 외측 링과 내측 링이 상온 상태에서 단순접촉이 발생하도록 한 경우이며, 이에 대한 해석을 실시하여 Case 4 와 비교하였다. 해석결과로 유효응력의 분포와 원주방향의 응력 성분을 Fig. 6 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 내측 링과 외측 링 사이의 응력 불연속이 거의 발생하지 않았다. 이 결과와 Case 4 의 결과를 비교해 보면, 압축링을 분리하여 별도로 예압을 가함으로써 Fig. 1 의 점 B 에서의 유효응력과 원주방향의 압축응력이 모두 약 77% 증가하였다. 이것은 이중링을 사용한 효과를 말해주고 있다.

3.2 다이인서트의 재료의 영향

다이인서트의 재료로 주로 합금공구강인 SKD11 또는 SKH51 과 초경합금인 WC 가 사용되고 있다. 이 두 재료는 근본적으로 강도와 탄성계수 등에서 매우 큰 차이가 있다. 따라서 두 재료 간의 역학적 차이를 규명할 필요가 있다. 이를 위하여 Case 4 와 Case 7 를 비교 조사하였으며, 해석결과를 Fig. 7 에 정리하였다. 점 B 에서 Case 7 의 유효응력과 원주방향의 압축응력은 Case 4 의 약 70% 이다. 이 결과는 다이인서트의 탄성계수가 예압과 매우 밀접함을 말해 주고 있다.

3.3 링의 기울기의 영향

Fig.1 에서 보는 바와 같이 금형이 α_1 과 α_2 만큼 기울어져 있다. α_1 은 체결력의 전달 목적으로 불가피하지만, α_2 는 역학적으로 필수적인 경사가 아

니다. 따라서 α_2 의 경사가 어떤 영향을 미치는지를 조사하기 위하여, Case 4 의 결과와 Case 8 의 결과를 비교하였다. 그 결과, 경사각 α_2 가 금형의 응력에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

3.4 분리의 영향

금형의 분리의 영향을 조사하기 위하여 Case 4 에서 1 층과 2 층을 일체화시킨 Case 9 의 금형설계에 대하여 금형 구조해석을 실시하였으며, 그 결과를 Case 4 의 결과와 비교하였다. 해석결과는 Fig. 8 에서 보는 바와 같다. Fig. 8 의 해석결과와 Fig. 3 과 Fig. 4 의 Case 4 의 해석결과를 비교해 보면, 금형의 유효응력 분포가 비슷하다는 것을 알 수 있다.

3.5 압축링의 두께의 영향

압축 링의 두께 영향을 분석하기 위하여 2 층의 외측 링, 즉 Fig. 1 에서 부품 ⑦을 없애는 대신 내측 링, 즉 Fig. 1 에서 부품 ⑥의 두께에 따른 구조해석결과를 비교하였다. 이 목적으로 Case 10 의 공정설계에 대한 구조해석을 실시하였다. Fig. 9 의 결과에서 보는 바와 같이 압축링의 외경이 커짐에 따라 점 A 와 점 C 의 응력변화가 거의 없으며, 점 B 에서 응력의 크기는 외경의 증가에 따라 증가하지만 그 영향이 감소되는 경향을 보이고 있다.

Table 2 Cases investigated

Case	Material of die insert	Inner ring	Outer ring	Clamping force	Slope angle	Partition*
1	WC	0.1%	0.1%	0.3%	$\alpha_1 = 3^\circ$ $\alpha_2 = 3^\circ$	1(3),2(3), 3(3)
2	WC	0.2%	0.2%	0.3%		
3	WC	0.3%	0.3%	0.3%		
4	WC	0.4%	0.4%	0.3%		
5	WC	0.5%	0.5%	0.3%		
6	WC	0.4%	0.0%	0.3%		
7	SKD11	0.4%	0.4%	0.3%		
8	WC	0.4%	0.4%	0.3%	$\alpha_1 = 3^\circ$ $\alpha_2 = 0^\circ$	
9	WC	0.4%	0.4%	0.3%	$\alpha_1 = 2^\circ$	1(3),2(3)
10	WC	0.4%	0.4%	0.3%	$\alpha_1 = 3^\circ$	1(3),2(2), 3(3)
11	WC	0.4%	0.4%	0.1% ~0.5%	$\alpha_2 = 3^\circ$	1(3),2(3), 3(3)

* N(M)은 N-층의 금형이 다이인서트와 M-1 개의 압축링으로 구성되어 있음을 의미함.

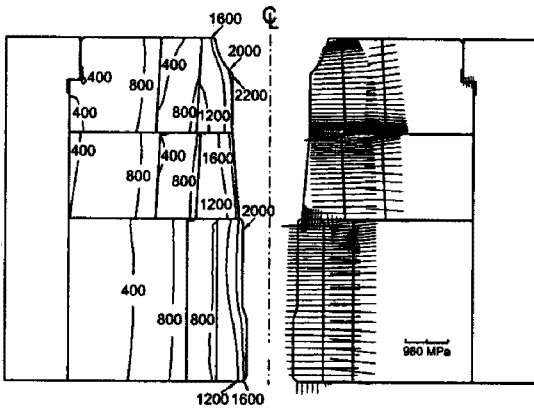


Fig. 3 Effective and interfacial stresses of Case 4

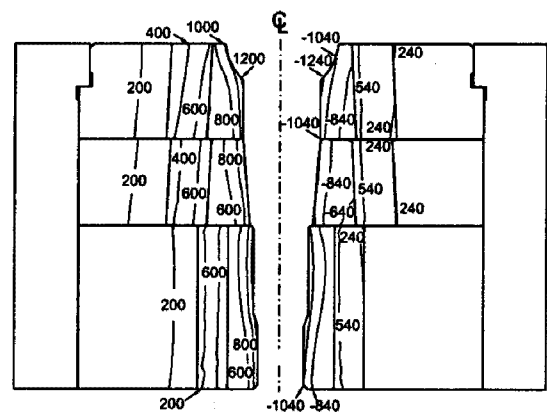


Fig. 6 Effective and circumferential stresses of Case 6

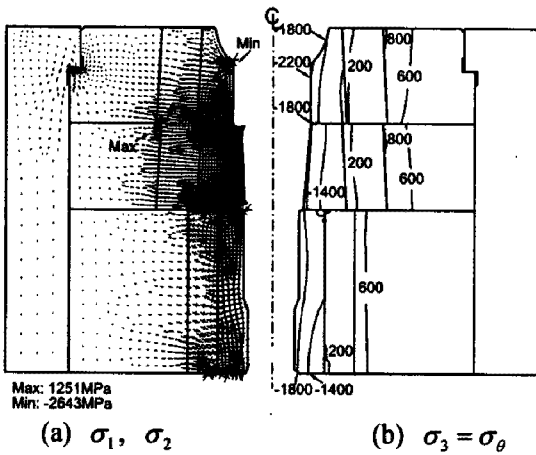


Fig. 4 Principal stresses of Case 4

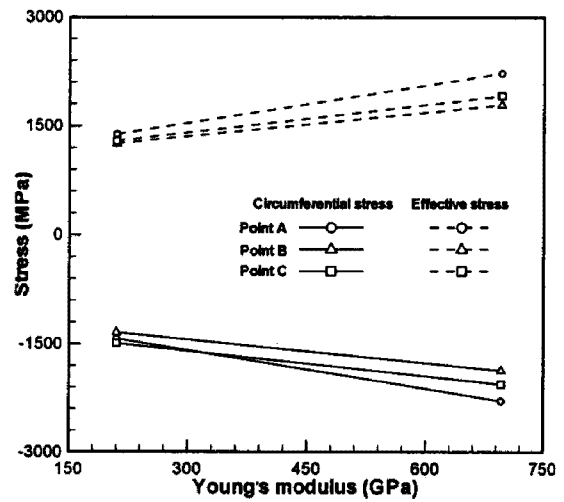


Fig. 7 Effect of Young's modulus of Case 7

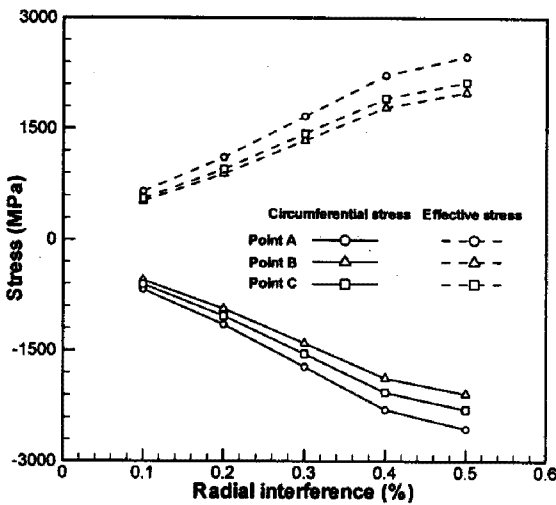


Fig. 5 Effect of the amount of shrink fit on die stress

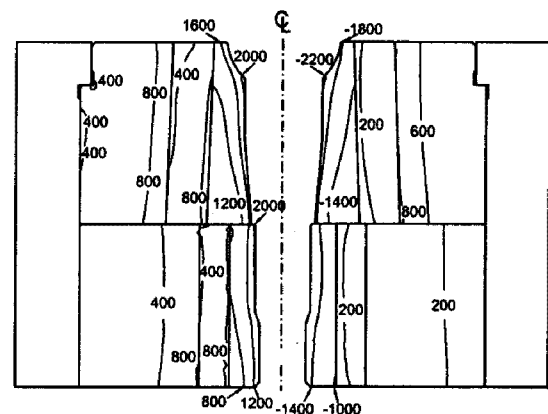


Fig. 8 Effective and circumferential stresses of Case 9

3.6 체결력의 영향

체결력의 영향을 조사하기 위하여 Fig. 1의 외곽 실린더(Fig. 1에서의 ④번 금형 부품)의 예압량, 즉 체결력의 영향을 조사하였다. 체결력은 열수축량으

로 표현하였다. 체결력의 영향 조사를 위하여 Case 11에 대한 금형 구조 해석을 실시하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 0.3%의 체결량까지 체결량의 증가에 따라 체결력이 선형적으로 증가하고

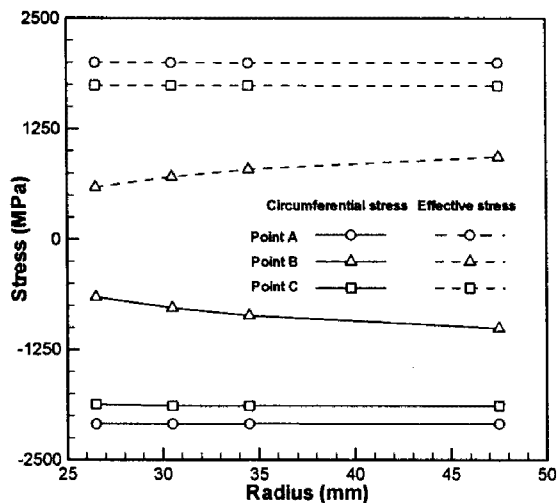


Fig. 9 Effect of ring diameter on die stress

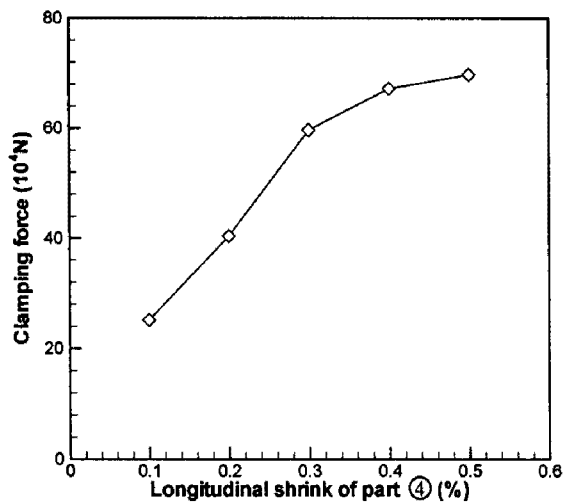


Fig. 10 Effect of longitudinal shrink on clamping force

0.3%부터 0.5%까지 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 0.3%의 체결량 이후에 발생하는 열박음 링과 다이인서트 및 외측 링과 내측 링 사이의 미끄러짐에 기인한다. 체결력에 따른 점 B의 유효응력과 원주방향 응력은 각각 1720MPa~1552MPa와 -1842MPa ~ -1745MPa 사이에 존재했으며, 체결력의 증가에 따라서 이들의 절대값이 선형적으로 줄어드는 경향을 보였다. 체결력이 약 200% 증가했음에도 응력의 변화는 약 10% 내외의 변화가 발생하였으므로 체결력의 영향은 미미하다고 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 열탄성 유한요소법과 가변별척기법에 바탕을 둔 금형 구조해석 기술을 이용하여 냉간자동단조공정에서 금형 열박음 및 이와 관련

된 주요 설계변수의 영향을 정량적으로 분석하였다. 금형의 예압량, 다이인서트의 재료, 링의 기울기, 금형의 상하 좌우 분리, 압축링의 두께, 체결력의 등이 유효응력과 원주방향의 응력 성분에 미치는 영향을 상세하게 분석하였다.

제시한 결과들은 냉간단조금형 기술자들에게 금형 역학에 관한 직관을 갖도록 하고 금형 설계의 최적화 및 문제해결 능력을 함양하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 청정기반전략기술개발사업 및 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2009-0066590).

참 고 문 헌

- [1] K. Lange, L. Cser, M. Geiger, J. A. G. Kals, 1992, CIRP, Vol. 41, No. 2, pp. 667~676.
- [2] S. Matsubara, H. Kudo, 1995, 7th Int. Congress on Cold Forging, University of Birmingham, pp. 63~69.
- [3] J. L. Frater, R. Zinolabedini, 1989, J. Mater. Shaping Technol., Vol. 7, No. 2, pp. 67~80
- [4] U. Engel, M. Hänsel, 1990, Adv. Tech. Plast., Vol. 1, pp. 355~360.
- [5] Y. Nagao, M. Knoerr, T. Altan, 1994, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 46, No. 1-2, pp. 73~85
- [6] K. F. Hoffmann, K. Lange, 1989, Trans. NAMRI of SME, Vol. 17, pp. 71~78
- [7] S. Takahashi, C. A. Brebbia, 1990, Adv. Tech. Plast., Vol. 1, pp. 203~210
- [8] M. Fu, B. Shang, 1995, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 53, No. 3-4, pp. 511~520
- [9] M. S. Joun, M. C. Lee, J. M. Park, 2002, Int. J. mach. Tools Manuf., Vol. 42, No. 11, pp. 1213~1222.
- [10] Y. Lee, J. Lee, Y. Kwon, T. Ishikawa, 2004, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 147, No. 1, pp. 102~110.
- [11] J. H. Kang, K. O. Lee, J. S. Je, S. S. Kang, 2007, J. Mater. Proc. technol., Vol. 187-188, No. 12, pp. 14~18.
- [12] O. Eyercioglu, M. A. Kutuk, N. F. Yilmaz, 2009, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 209, No. 4, pp. 2186~2194.
- [13] H. C. Lee, M. A. Saroosh, J. H. Song, Y. T. Im, 2009, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 209, No. 8, pp. 3766~3775.
- [14] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, 2008, Mechanics of Materials, Vol. 40, No. 7, pp. 586~593.
- [15] <http://www.matweb.com>
- [16] 김성현, 최환, 이종찬, 한국기계공학회지, 제 1권, 제 1호, pp. 55~62.