

AZ80 압출재를 이용한 고온단조 윤활특성 분석

윤종현[#] · 이상익¹ · 전효원¹ · 이정환¹

Study on the Lubrication Characteristics at the Elevated Temperature in Hot Forging Test with Extruded AZ80 Mg Alloy

J. H. Yoon, S. I. Lee, H. W. Jeon, J. H. Lee

(Received January 23, 2013 / Revised February 28, 2013 / Accepted March 4, 2013)

Abstract

This paper demonstrates the lubricant performance in T-shape hot forging of Mg alloys. This processes induces complex plastic material flow of the initial billet such as simultaneous compression and extrusion deformations. Five lubricants with different amounts of graphite are applied to the T-shape forging at temperatures of 300 and 350 °C. As the amount of graphite in the lubricant increases, the extruded depth gradually increases, which improves hot forgeability for Mg alloys. However, the lubricant performance decreases as forging temperature increases from 300 to 350 °C. As the punch stroke increases, forgeability is considerably influenced by the lubricant. Thus, the selection of lubricants in hot forging of Mg alloys is critical when plastic deformation is severe.

Key Words : AZ80 Mg Alloy, Lubricant, Graphite, T-shape Forging

1. 서 론

세계적으로 환경오염 문제가 대두되고 있는 가운데 수송기기 및 자동차를 비롯한 연비향상과 에너지 절감을 위하여 마그네슘 합금의 개발 및 적용이 확대 되고 있다. 일반적으로 마그네슘 합금의 경우 알루미늄이나 스틸과 비교하여 상온 성형성이 매우 낮으므로 단조, 압출 등과 같은 성형 공정은 열간에서 이루어지게 된다. 열간 마그네슘 단조 공정에서 사용되는 윤활제의 경우, 소재와 금형 간의 직접적인 마찰을 줄여주고 적절한 마찰계수를 유지하여 늘려 붙음 방지, 형 마모방지와 소재와 금형 간의 열전도 속도를 줄이는 역할을 한다[1, 2]. 이러한 단조용 윤활제는 온도에 따라 물리화학적 성질이 크게 달라지게 되며 부과되는

온도 와 시간에 따라 코팅 층의 표면 조건이 다양하게 변하기 때문 시험에 어려운 점이 많다[3].

마찰시험방법에는 미끄러짐의 속도와 표면적 확대율로 비교 평가하는 방법이 있으며, Double cup extrusion(DCE, Gopal, 2001)[4], Upsetting 시험, spike 시험(Moses R.Cecil, 2003), 링 압축(Abdul, 1981)과 전후방압출(Hu Yamin et al., 2007) 등으로 진행되어 왔다[4, 5]. DCE의 경우, 금형 및 소재를 동일한 온도로 유지한 뒤, 각 윤활제 별 단조 시 하중에 따라 소재가 전·후방 압출되는 높이를 측정하여 마찰을 평가하였다[1]. 링 압축 시험의 경우 링 형상의 소재를 압축하여 소성변형에 의한 링의 치수변화를 측정하여 체적불변조건을 이용하여 마찰특성을 분석하였다[6-8].

본 논문에서는 마그네슘 합금의 열간 단조공정 중

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

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

에 발생하는 윤활제의 효과를 검증하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 그래파이트(graphite) 및 추가적인 3가지 윤활제를 제안하였으며, 이를 열간 단조 공정에 적용하여 윤활성을 평가하였다. 열간 단조에 사용된 소재는 AZ80 압출재를 이용하였으며 복합 변형 하에서 윤활제의 성능을 평가하기 위하여 단순화된 T-shape 단조를 수행하였다. 마그네슘 합금을 적용한 고온 단조성형성은 일정한 펀치 스트로크 상에서 소재가 금형의 캐비티(cavity)안으로 유동되는 높이를 측정하여 평가하였다[9].

2. 실험방법 및 조건

본 연구에서는 마그네슘 합금을 적용한 고온 단조 공정에서 윤활제의 성능 및 특성을 분석하기 위하여 T-shape 단조를 수행하였으며, 시험 원리는 Fig. 1 과 같다. 상부 펀치(punch)가 하강하여 소성 변형이 진행됨에 따라 소재의 가장자리 부분, 즉 플랜지가 형성되는 부분은 압축 및 전단 변형이 가해지며, 금형의 캐비티 안으로 유동되는 부분에서는 압출이 일어나게 된다. 극심한 국부적 변형이 집중되는 플랜지 부와 캐비티 부에서는 초기 소재의 표면적이 급격히 증가할 뿐만 아니라 소성 변형량에 따라 윤활제의 성능 차이가 확연히 나타나게 된다.

T-shape 단조 테스트에 적용된 상용 마그네슘 합금은 AZ80이며 이에 대한 화학 성분조성은 Table 1 과 같다. 윤활 평가용 시편은 초기 AZ80 압출재의 압출 방향과 평행한 방향으로 직경 15mm, 높이 15mm의 원기둥 시편으로 가공하여 사용하였다. Table 2는 그래파이트 및 기타 원소의 함유량에 따라 제시된 4종류의 윤활제를 나타내고 있으며 각 윤활제를 시편에 도포한 뒤, 열간 단조 테스트를 수행하였다. 시편에 윤활제를 균일하게 도포하기 위하여 샌드블라스트(sand blast) 처리를 수행하여 미세 표면적을 증가시킨 뒤, 각 윤활제를 코팅하였다. Fig. 2은 코팅된 윤활제의 두께분포를 비교한 그래프이며, 각 시편의 코팅 층이 5~7 μm 으로 균일하게 도포 되었음을 확인할 수 있다. 윤활제의 성능을 평가하기 위한 열간 단조 성형 테스트의 실험 과정을 정리하면 Fig. 3과 같다. 또한, 열간 단조 시 시편이 금형 내에 소착(sticking) 되는 것을 방지하기 위하여 금형 외부에는 스프레이 타입의 이황화 몰리브덴(MoS₂)을 도포하여 시험을 실시하였다.

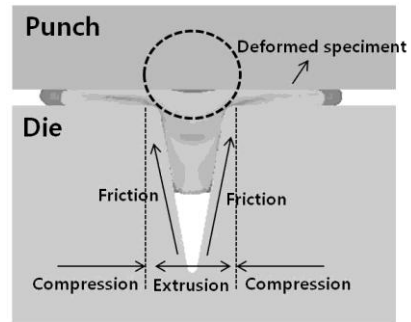


Fig. 1 The layout of T-shape forging for friction test [1, 2]

Table 1 Chemical composition of AZ80 Mg alloy (wt, %)

Al	Zn	Mn	Cu	Si	Mg
8.10	0.52	0.25	≤0.05	≤1.10	Bal

Table 2 Type of lubricants

Number	Ingredient
(1)	Graphite(50%)
(2)	Graphite(20%)+Solid content (20%)
(3)	Graphite(15~20%)+MoS ₂ (3~8) +Solid content (20~25%)
(4)	Nano-Graphite (6~10%) +Nano-Molybden(6~10%) +Dispersant (1~2%)
(5)	without lubricant

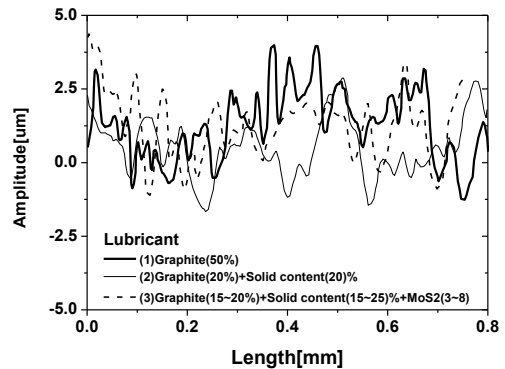


Fig. 2 Thickness distribution of the coating layer on the lubrication specimen

AZ80을 적용한 T-shape 열간 단조 테스트의 성형해석은 Deform-3D를 사용하였으며 성형온도 및 변형률속도 조건은 350°C, 0.1/sec 을 가정하였으며 전단 마찰계수는 0.25, 금형과 소재간의 열전달 및

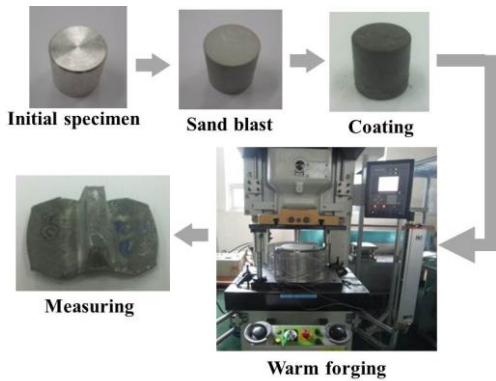


Fig. 3 Process sequence for lubrication test

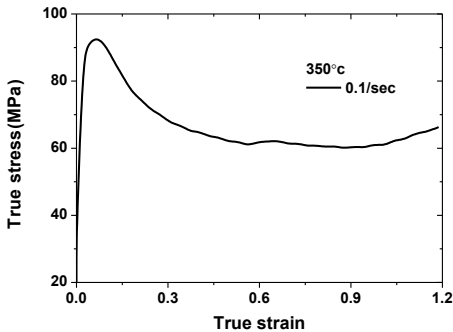


Fig. 4 Compressive flow curve for AZ80 Mg alloy

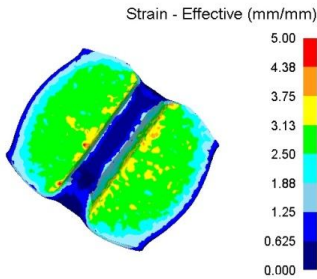


Fig. 5 Simulation result of lubrication test

손실은 고려하지 않았다. 단조 성형해석에 적용된 AZ80의 고온 물성은 직경 10mm, 높이 15mm (D10L15)의 원기둥 시편을 사용하여 성형온도 및 변형률속도 조건은 350°C, 0.1/sec 으로 Gleeble3800 시험기로부터 수행하여 얻어진 압축시험 데이터를 적용하였다(Fig. 4). Fig. 5는 펀치 스트로크(stroke) 13mm일 때의 마그네슘 시편의 변형형상과 유효 소성 변형률 분포를 나타낸다. 플랜지 부와 캐비티 부로 유동되는 소재 부에서 가장 큰 변형이 발생하고 있으며 발생하는 최대 소성 변형률은 3으로

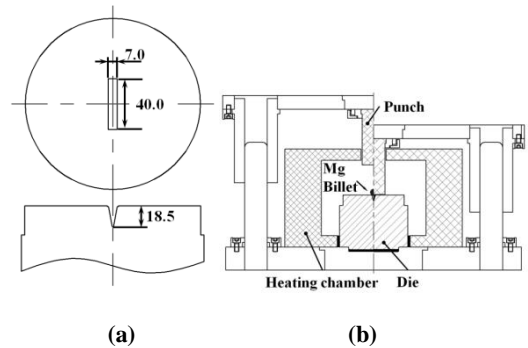


Fig. 6 Experimental equipments: (a) die; (b) die with chamber

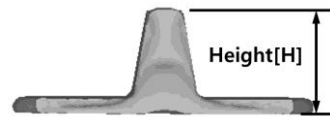


Fig. 7 Extruded height in die cavity (H)

예상된다. 적용된 성형 조건 하에서 발생하는 최대 펀치 하중은 8톤으로서 고온(350°C) 성형으로 인하여 성형하중이 다소 낮게 평가되고 있음을 알 수 있다.

윤활제 성능을 평가하기 위한 실제 단조 성형 실험은 펀치 스트로크 10 μ m까지 정밀한 제어가 가능한 80ton 서보프레스(servo press)에서 수행하였으며 성형 온도 제어를 위하여 고온 챔버를 구성하여 금형과 펀치를 Fig. 6과 같이 밀폐 시킨 뒤 성형하였다. 금형과 소재에 서모커플(thermocouple)을 삽입하여 온도 분포를 체크한 뒤, 목표 온도에도달하면 성형을 시작하였다. 목표 온도 350°C에 대하여 승온 시간은 1시간 가량 소요된다. 단조 성형조건으로는 300, 350°C를 선정하였으며 펀치 속도는 5mm/sec (\approx 0.3/sec)으로 고정하였다. 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위하여 각 윤활제에 대하여 5회에 걸쳐 반복 시험을 실시하였다. 단조 테스트 후에 윤활제에 따른 시편의 변형특성 및 단조 성형성을 정량화 하기 위하여 Fig. 7과 같이 변형 시편의 측정 변수를 설정하였다. 캐비티 안으로 소재가 유동되는 높이를 H(mm)로 정의하여 단조 성형성을 평가하는 척도로 설정하였다. 열간 단조된 시편의 형상 및 캐비티 부로의 소재 유동 깊이를 정밀하게 측정하기 위하여 비 접촉식 3차원 측정기를 이용하여 H의 크기를 측정하였다. 본 논문에서

서는 소재에 부과되는 소성 변형률의 크기에 따른 윤활제 성능을 테스트하기 위하여 두 가지 펀치 스트로크(Δh) 12, 13mm에 대하여 열간 단조 실험을 수행하였으며, 각 윤활제 별로 측정된 데이터를 바탕으로 높이(H)를 측정하여 윤활특성을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 8(a), (b)는 마그네슘 시편을 적용하여 350°C에서 열간 단조한 시편 형상을 나타내고 있으며 펀치 스트로크가 12, 13mm일 때의 최종 변형형상을 보여주고 있다. 시편 끝단에 미세한 크랙을 관찰할 수 있으며 펀치 스트로크가 증가함에 따라 플랜지부의 두께가 얇아지는 것을 확인할 수 있다.

윤활제 5종류를 적용한 마그네슘 시편들의 단조 후 높이(H) 변화를 정량적으로 비교하기 위하여 Fig. 9(a)과 같이 캐비티 부로 이동되는 소재의 높이(H)를 측정하여 도시하였다. 스트로크가 12mm일 경우 윤활제 (1) (graphite 50%)을 적용한 소재의 H가 가장 크게 측정되었으며 무윤활(5)의 경우가 가장 낮은 단조 성형성을 보이고 있다. 펀치 스트로크가 13mm일 경우 역시 윤활제 (1)로 단조 성형하였을 때, 가장 높은 성형성을 보이며 스트로크가 12mm에서 13mm로 증가함에 따라 각 윤활제에 따른 성능 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 그래파이트 함유량이 증가할수록 고온 단조 윤활 성능이 우수해진다는 것을 나타내고 있으며, 그래파이트 함유량이 가장 높은 윤활제(1)가 소재 표면에 가장 오래 남아 있다는 것을 증명해주고 있다. 실제로 단조 성형 중에 소성 변형률이 증가함에 따라 새로운 면적이 급격하게 발생되고 이 과정 중에 소재 표면에 유지되는 윤활제의 양이 윤활 성능을 크게 좌우하게 된다.

성형 온도 조건에 따른 윤활제의 성능을 분석하기 위하여 350°C 뿐만 아니라 300°C에서 단조 성형을 수행하였다. Fig. 9(b)는 윤활제 4종을 적용한 마그네슘 시편의 성형온도에 따른 높이 변화 H를 도시한 결과이다. 단조 성형온도 300°C에서 역시 윤활제 (1)의 H값이 가장 크게 측정되어 그래파이트의 윤활성능이 가장 우수한 것으로 판단된다. 성형 온도별 윤활제 성능을 분석하여 보면, 성형 온도가 높아짐에 따라 윤활제별 성능의 차이는 감소하는 것으로 관찰되었으며, 윤활제를 적용하지 않은 경우도 소재의 유동성 증가로 인하여

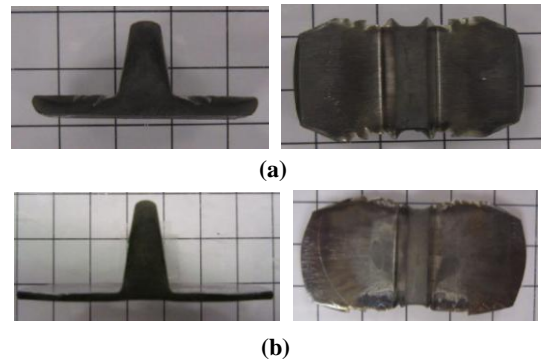


Fig. 8 Deformed specimens: (a) at the punch stroke of 12mm; (b) at punch stroke of 13mm

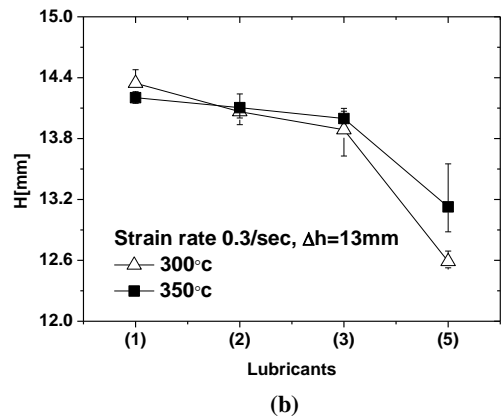
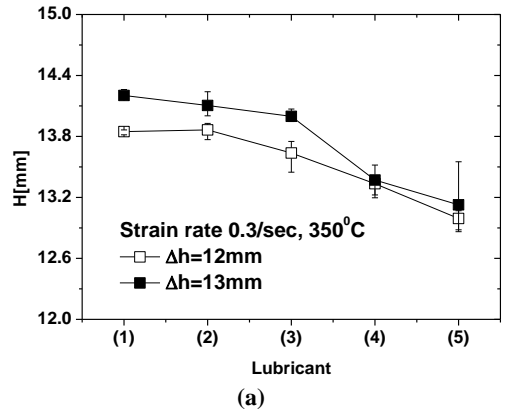


Fig. 9 Height distribution in forged Mg parts: (a) with respect to punch stroke; (b) with respect to forming temperature

H 값이 다소 증가되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 9(b)). 윤활제 (1), (2)의 경우, 성형온도가 350°C에서 300°C로 하강함에 따른 윤활 성능차이는 크지

않은 것으로 관찰되었다.

T-shape 단조 테스트를 수행하여 측정된 H 분포를 성형해석 결과와 매칭시키기 위하여 Deform-3D에 적용되고 있는 마찰계수를 조절하여 실제 실험 값과 유사한 결과를 얻고자 하였다. 일반적인 열간 단조 해석의 경우, Deform-3D 소프트웨어 상에서 마찰계수로 0.25를 추천하고 있지만 이 값을 적용할 경우 과도한 마찰력으로 인하여 실험 값보다 낮은 H를 얻게 된다. Table 3는 본 논문에서 제시된 윤활제 5종에 대한 Deform-3D 상의 마찰계수를 제시하고 있으며, 실험 결과의 경향과 같이 그라파이트의 함유량이 가장 높은 윤활제(1)의 경우 가장 낮은 마찰계수, 0.16을 나타내고 있다. Fig. 10은 계산된 마찰계수(Table 3)를 적용하여 T-shape 단조 테스트를 수행하여 예측된 단조 높이(H)와 실험 값을 비교한 그래프이며 각 윤활제에 대하여 해석 값이 높은 정확도를 보이는 것을 확인할 수 있다. Table 3의 윤활제(5)는 윤활제를 적용하지 않은 비교군으로서 실제 실험값과 해석값의 정확한 예측을 위하여 마찰계수를 0.43으로 정의하였을 때 가장 높은 해석 정확도를 보이고 있다. Fig. 11은 윤활제(1)을 적용한 실험 결과와 마찰계수 0.16을 적용하여 해석한 유한요소 해석 결과를 비교한 그림이다. 단조 높이 H 뿐만 아니라 측면과 윗면의 변형 형상이 실제 단조 형상과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만, 실제 단조 실험에서 발생하는 플랜지 부의 미세 크랙은 성형 해석 상에서 묘사되지 않고 있어 정밀한 플랜지 부 변형 형상을 예측하기는 어려운 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 상용 마그네슘합금 AZ80 압출재를 이용하여 압축과 압출 변형이 동시에 발생하는 T-shape 단조 시험을 이용하여 마그네슘 합금을 이용한 열간 단조 시 윤활제의 성능을 평가하였다. 그라파이트 함유량에 따라 윤활제 4종류를 선정하고 비교군으로서 무윤활 1종을 포함하여 총 5종에 대해서 성형 온도별 윤활특성 분석하였다. 마그네슘합금의 최적 성형온도 조건 300°C, 350°C와 소성변형량에 따른 윤활특성을 알아보기 위해 스트로크가 12mm, 13mm에 대하여 단조 시험을 수행하였다. 본 논문에서 마그네슘 합금의 고온 단조 성형성은 일정한 성형온도와 펀치 스트로크 하에서 급형의 캐비티 안으로 유동되는 소재의 높이를

Table 3 Friction coefficients for various lubricants

Lub.	Friction coefficient (m)
(1)	0.16
(2)	0.22
(3)	0.24
(4)	0.39
(5)	0.43

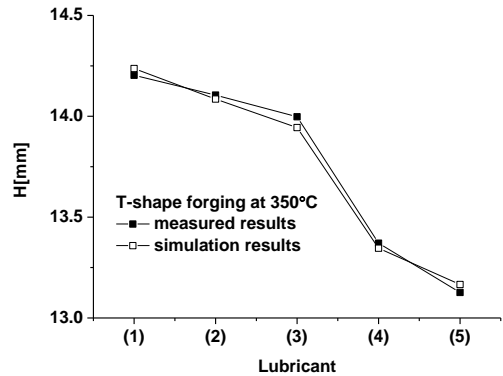


Fig.10 Comparison of height distributions between measured and simulated results in T-shape forging

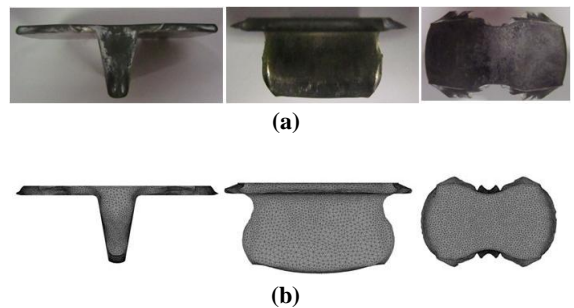


Fig.11 Comparison of deformed Mg specimen with friction coefficient of 0.16: (a) experiment; (b) FE analysis

측정하여 단조성형성을 대표하였다.

T-shape 열간 단조 실험결과, 그라파이트의 함유량이 증가함에 따라 단조 높이(H)가 증가되는 경향을 보여, 단조 성형성이 향상되고 있다고 평가되었다. 또한, 성형온도가 증가함에 따라 윤활제 성능 차이가 감소하고 있었으며 펀치 스트로크의 증가, 즉, 소성 변형량이 증가함에 따라 각 윤활제별 성능 차이가 확연히 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 마그네슘 열간 단조에서 가장 우수한 윤

활 성능을 보이는 윤활제(1)의 경우, Deform-3D 상에서 0.16의 마찰계수를 적용하였을 때 가장 높은 해석 정밀도를 보이고 있다.

참 고 문 헌

- [1] F. Fereshteh-Saniee, H. Badnava, S. M. Pezeshki-Najafabadi, 2011, Application of T-shape Friction Test for AZ31 and AZ80 Magnesium Alloys at Elevated Temperatures, *Mater. Des.*, Vol. 32, No. 6, pp. 3221~3230.
- [2] Q. Zhang, E. Felder, S. Bruschi, 2009, Evaluation of Friction Condition in Cold Forging by using T-shape, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 17, pp. 5720~5729.
- [3] Z. Keran, M. Math, P. Piljek, 2012, FEM Analyses of Friction Coefficient in open Die Coining Process of Different Grain Sizes, *J. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 1, Issue 1, pp. 1~4
- [4] R. Velu, Moses Raja Cecil, 2011, Spike and Disc orming Test for Friction Measurement in Cold Forming of Aluminium Alloys, *Indian J. Sci. Technol.*, Vol. 4, No. 6, pp. 652~656.
- [5] Y. Hu, Z. Lai, Y. Zhang, 2007, The Study of Cup-rod Combined Extrusion Processes of Magnesium Alloy(AZ61), *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 187~188, pp. 649~652.
- [6] Y. Oyachi, H. Utsunomiya, T. Sakai, T. Yoshikawa, T. Tanaka, 2012, Effects of Porous Surface Layer on Lubrication Evaluated by Ring Compression Friction Test, *ISIJ Int.*, Vol. 52, No. 5, pp. 858~862.
- [7] D. W. Kim, Y. R. Kim, G. A. Lee, H. J. Choi, D. J. Yun, Y. C. Shin, J. K. Lee, S. J. Lim., 2012, Friction Characteristics of Warm a Forging Lubricant Containing Nano Graphite Powder, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 1, pp. 13~17.
- [8] D. J. Jeong, D. J. Kim, B. M. Kim, 2001, Evaluation of Friction Shear Factor by the Lubrication Methods in Warm Forging, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 10, No. 4, pp. 319~328.
- [9] W. L. Xu, K. P. Rao., 1997, Analysis of the Deformation Characteristics of Spike-forging Process Through FE Simulations and Experiments, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 70, No. 1-3, pp. 122~128.