

## 유한요소해석을 통한 비조질강 성형 특성 분석

권용남<sup>#</sup>· 김상우<sup>1</sup>· 이영선<sup>1</sup>· 이정환<sup>1</sup>

### A Study on Forging Characteristic of Non-Heat Treated Micro-Alloyed Steel Using Finite Element Analysis

Yong-Nam Kwon, S. W. Kim, Y. S. Lee, J. H. Lee

(Received October 12, 2006)

#### Abstract

Micro-alloyed steels(MA steels) for cold forging was developed to replace the usual quenched and tempered steel. MA steels have several advantages over the conventional quenched and tempered carbon steels. First of all, energy consumption could be lowered due to the elimination of spheroidizing annealing and quenching/tempering heat treatment. Also, bending during quenching could be avoided when MA steels are applied for manufacturing of long fastener parts. However, larger amount of load is exerted on the dies compared than in the case of conventional mild steels, which might lead to the earlier fracture of dies, when MA forging steels are applied in forging practice. Therefore, die life could be a critical factor to determine whether MA forging steels could be widely applied in cold forging practice. In the present study, authors have investigated the forging characteristics of non-heat treated micro-alloyed steel by using a series of experimental and numerical analyses. Firstly, microstructural features and its effect on the deformation behavior have been studied. Numerical analysis has been done on the forging of guide rod pin to investigate for the optimization of forging process and die stress prediction.

**Key Words** : Micro-Alloying Forging Steel, Die Stress Analysis, Cold Forging

#### 1. 서 론

비조질강은 자동차 구동시스템 및 회전 부품으로 사용되고 있는 조질강(quenching and tempering steel)을 효과적으로 대체할 수 있는 소재이다. 조질강의 경우 냉간 단조시 유동응력을 낮추기 위한 Fig. 1에 표시한 바와 같이 구상화열처리(spheroidizing treatment)와 단조 후 단조품의 기계적 성질을 제어하기 위해 담금질(quenching) 및 뜨임(tempering) 처리가 필요하다. 하지만 비조질강의 냉간단조시에는 구상화 열처리 및 담금질/뜨임 처리를 생략할 수 있기 때문에 에너지 사용량을 혁

신적으로 절감할 수 있다. 또한, 비조질강을 이용한 냉간단조품은 열처리시 발생하는 뒤틀림을 방지할 수 있는 장점을 가지고 있어 길이가 긴 볼트류들에 적용할 경우 큰 장점을 발휘할 수 있다. 냉간단조용 비조질강이 적용되는 부품으로는 볼트, tie rod, ball stud 등이 있다.

독일에서 시작된 비조질강의 개발에 일본의 철강사들이 참여하여 다양한 비조질강들이 개발되고 있으며 최근에는 새로운 압연/냉각 설비를 이용한 제어압연/제어냉각 기술 및 새로운 합금설계를 이용하여 기존 소재에 비해 고강도, 고인성화를 달성하고자 하는 시도가 계속되고 있다. 비조

1. 한국기계연구원 소재성형연구센터  
# 교신저자: 한국기계연구원 소재성형연구센터  
E-mail: kyn1740@kmail.kimm.re.kr

질강을 이용한 볼트의 경우 80kg/mm<sup>2</sup>급 볼트까지 제조가능한 선재들이 상용화되어 있으며 최근에는 일본에서는 80kg/mm<sup>2</sup>급 이상의 볼트 제조에도 적용 가능한 강종들이 개발되고 있다.

냉간단조용 비조질강은 C, Mn 과 같은 기본적인 합금성분을 조정하고 제어압연과 제어냉각을 통하여 적정 강도 및 인성을 확보하여 구상화소둔 및 조질열처리를 생략할 수 있도록 제조된 강종이다. 최종적인 제품의 강도는 신선 또는 냉간성형을 통한 가공경화를 통하여 도달되게 된다. 따라서 부품의 설계시 가공경화량을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 비조질강의 냉간단조시 금형에 미치는 하중은 일반적으로 조질강 단조시에 비해 높은 수준으로 알려져 있으며 이로 인해 금형 수명이 떨어지는 단점을 가진다.

본 연구에서는 페라이트와 펄라이트 조직을 가지는 냉간 비조질강을 이용하여 단조 포머로 생산되는 guide rod pin 을 대상으로 냉간 비조질강의 단조 특성을 고찰하고자 하였다. 이를 위하여 사용한 소재의 기초 물성(압축, 인장, 미세조직)을 먼저 조사하였으며 이를 바탕으로 유한요소해석을 실시하여 성형 공정 및 금형 응력을 조사하였다. 본 연구에서 사용한 비조질강의 단조 특성을 고찰하기 위하여 대표적인 조질강인 S45C(AISI 1045) 및 일본 사 비조질강인 NHF540S 를 비교재로 사용하였다. 이상의 고찰을 통해 본 연구에서 사용한 비조질강의 냉간 단조 적용 가능성을 평가하였다.

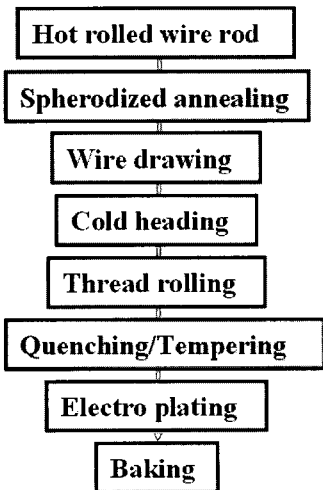


Fig. 1 Schematic comparison of cold forging steps between quenching/tempering or micro-alloyed steels

## 2. 소재 특성

### 2.1 미세조직 및 경도

본 연구에 사용한 냉간단조용 비조질강의 미세조직은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 펄라이트와 페라이트로 구성된 조직을 가진다. 페라이트 내에는 V탄화물 혹은 질화물이 분포하여 석출강화를 일으킬 것으로 판단된다. 비조질강의 물성 제어를 위해 제어 열간 압연을 실시한 후 냉간단조제품의 성형에 적합한 크기로 냉간신선을 실시하였다. Fig. 3에 냉간 신선 후 미세조직의 변화를 나타내었다. Fig. 4는 압연 및 신선량에 따른 경도의 변화를 나타낸 그림으로 직경 16mm의 압연재를 14.7mm로 냉간 신선을 실시한 후 급격히 경도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 직경 방향으로 부위별 편차는 높지 않은 수준을 보여주고 있다.

Fig. 5는 비교 소재로 사용된 조질강(S45C) 및 다른 종류의 비조질강(NHS540)의 미세조직을 보여준다. 조질강은 구상화소둔상태의 조직을 보여주고 있으며 조질강 NHS540은 약한 띠 구조를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 페라이트 내부의 구조는 Fig. 2의 개발 소재와 유사한 구조를 가지고 있는 것으로 조사되었다.

### 2.2 변형특성

Fig. 6은 압연재 및 신선재의 인장곡선을 나타내고 있다. 경도측정에서 알 수 있었듯이 냉간 신선을 실시한 이후 급격한 강도향상 및 연신율 감소가 진행됨을 알 수 있다. 압연재는 구상화된 일반 냉간 단조강과 유사한 항복연신 현상을 나타내나 신선재의 경우 동일하게 빠른 넥킹 현상을 보여주고 있다. 이러한 거동은 냉간 단조시 금형에 가해지는 응력 수준을 감소시켜 금형 수명을 향상시키는데 좋은 영향을 미칠 수 있으나 단조제품의 피로수명을 낮출 수 있다.

Fig. 7은 소재 상태에 따른 충격값을 보여주는 그림으로 신선량 증가에 따라 충격값의 감소를 확인할 수 있다. 하지만, 냉간신선을 실시한 경우에도 충격값이 100J정도로 기존에 상용화된 냉간 비조질강에 비해 충격값이 높은 수준을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 냉간 신선 초기에는 매우 큰 수준의 충격값의 감소가 발생하나 냉간신선량의 증가에 따른 감소 경향이 크지 않아 냉간 단조제품의 충격값도 상용화가 가능한 수준을 나타낼 것으로 판단된다.

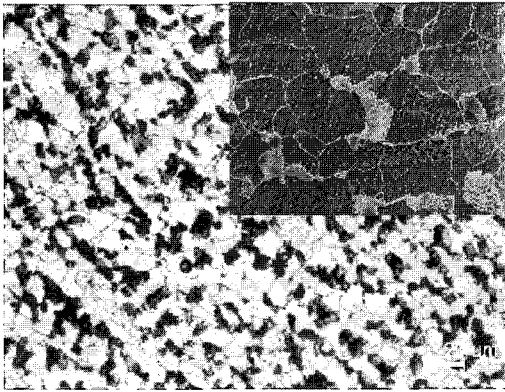


Fig. 2 Microstructure of micro-alloyed steel used in the present study composed with pearlite and ferrite phases

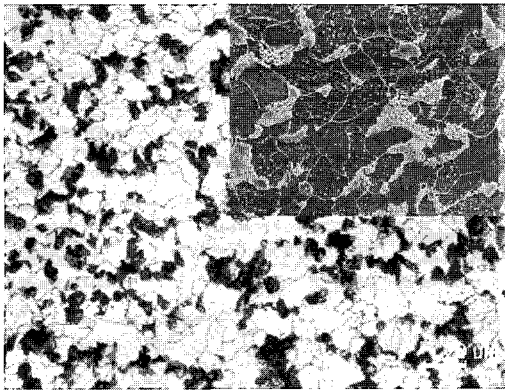


Fig. 3 Microstructure change after cold drawn to  $\phi 13\text{mm}$  for cold forging

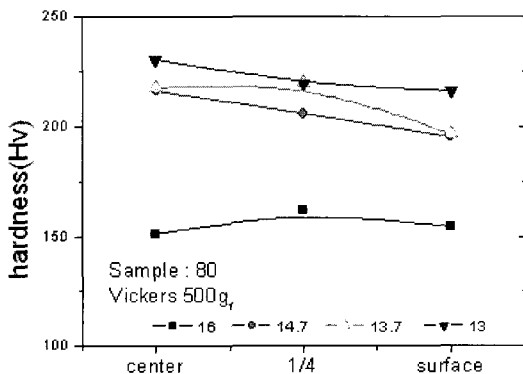
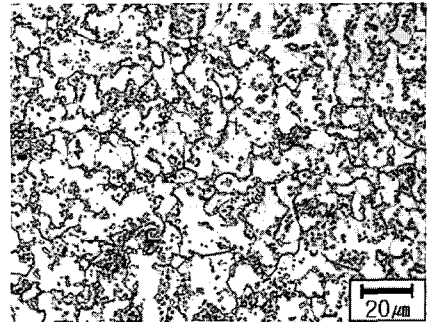
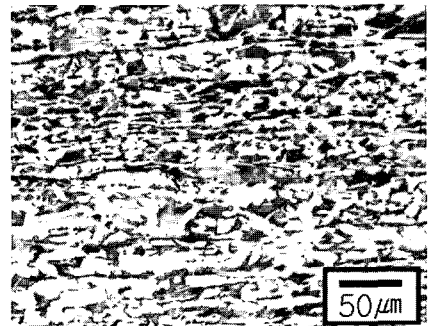


Fig. 4 Hardness evolution of micro-alloyed steel with cold drawing steps



(a)



(b)

Fig. 5 Microstructure of (a) AISI1045 steel at spheroidized condition and (b) NHS540 (commercial MA steel)

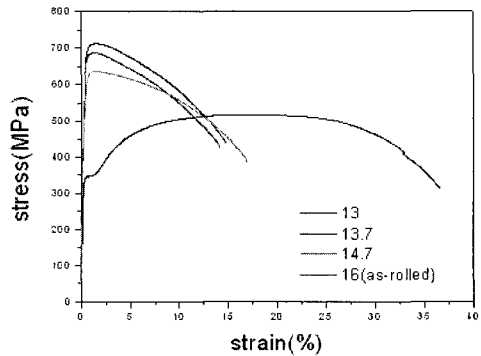


Fig. 6 Tensile curves of micro-alloyed steel with variation of cold drawing amount

Fig. 8 은 압연재 및 단면 감소율을 변화시킨 신 선재의 압축곡선을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 압연재의 낮은 항복값을 보이며 지속적인 가공경화 현상을 보이나 신선량이 증가함에 따라 항복강도가 증가하는 경향과 함께 항복점 연신 거동과 유사하게 정상상태에 가까운 유동특

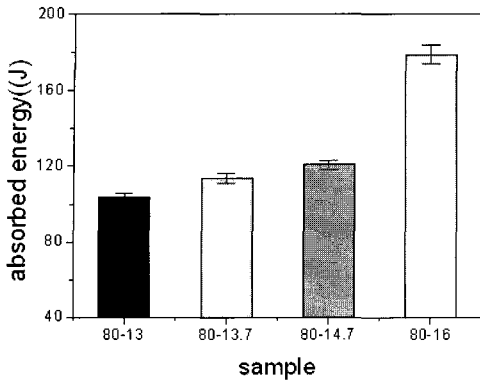


Fig. 7 Impact test result of micro-alloyed steel with variation of cold drawing amount

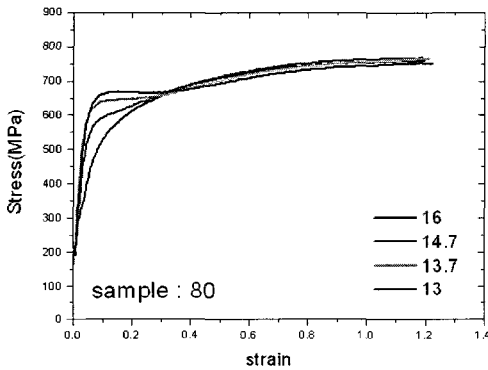
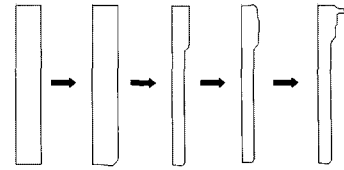


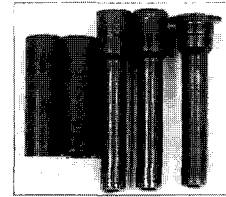
Fig. 8 Compression curves of micro-alloyed steel with variation of cold drawing amount

성이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 경향은 초기 직경 16mm의 압연재를 직경 13.7mm 이하로 신선한 경우에 현저하게 나타나고 있다. 또한, 변형량이 증가함에 따라 냉간 신선을 실시한 소재가 압연재에 비해 작은 수준이나 낮은 유동응력을 나타냄을 확인할 수 있다.

본 현상은 항복점 연신과는 달리 냉간 신선에 따른 펄라이트와 페라이트상의 분포 및 형상의 변화가 원인으로 작용하는 것으로 판단된다. 냉간 신선에 따라 펄라이트가 잘게 나누어지며 신선 방향으로 늘어지게 되어서 페라이트 내에서 발생한 전위들의 운동을 일정 변형이 진행될 동안 방해하는 것으로 추측된다. 일정량 이상의 냉간신선을 실시한 소재의 압축곡선에서 관찰된 정상 상태 변형 및 인장곡선에서 관찰된 급격한 네킹에 대해서는 다른 논문에서 보다 자세히 보고할 계획이다.



(a)



(b)

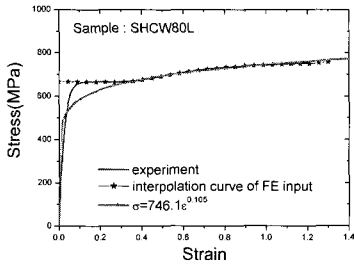
Fig. 9 (a) Forming stages for guide rod pin and (b) forged sample

### 3. 성형 공정 해석

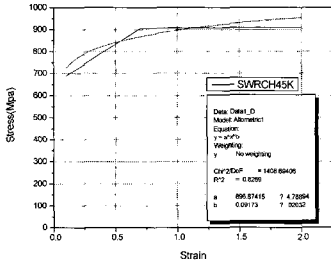
#### 3.1 성형 공정 해석

Fig. 9는 본 연구에서 사용한 단조품인 guide rod pin의 성형공정도 및 실제 단조품의 단조 과정을 보여주는 그림이다. 본 연구에서는 일반적으로 냉간 단조에 많이 적용되는 조질강(S45C) 및 해외에서 개발되어 양산에 적용되고 있는 냉간 비조질강(NHS540)의 단조 특성을 본 연구에 사용한 국내 개발 비조질강(SHCW80L)의 단조 특성과 비교하였다. 이를 위하여 Fig. 10에 나타난 바와 같이 3가지 소재의 물성을 사용하여 Fig. 9에 나타난 단조품의 성형공정해석을 실시하였다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 본 연구에 사용한 소재(SHCW80L)의 경우 냉간 신선을 직경 13mm까지 실시한 소재로 앞서 언급한 바와 같이 변형 초기에 가공경화가 발생하지 않는 특징을 가진다. 이러한 정상 상태 변형을 성형해석에 반영하여 가공경화가 진행되는 기존 소재와의 차이점을 검토하고자 하였다.

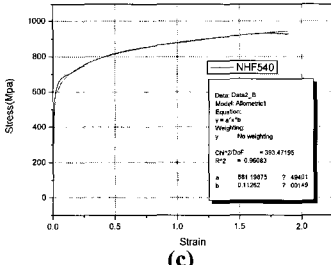
Fig. 11은 총 4개의 공정으로 구성된 단조시 필요한 하중을 계산한 결과이다. 본 연구에서 적용한 비조질강인 SHCW80L의 성형에 필요한 하중이 예상과는 달리 S45C나 NHS540에 비해 작은 수준이나 낮은 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 이상의 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 SHCW80L 소재가 변형을 0.4에 이르기까지 가공경화가 발생하지 않는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 압출이 진행되는 2번째 공정에서 지속적



(a)



(b)



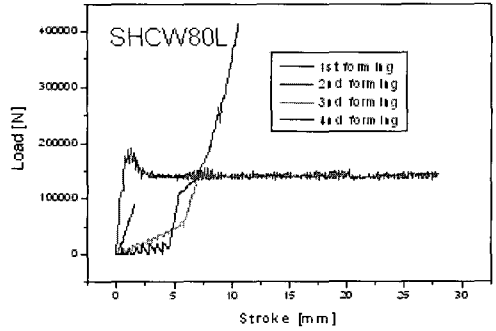
(c)

Fig.10 Input data for forging analysis (a) SHCW80L, (b) S45C and (c) NHS540

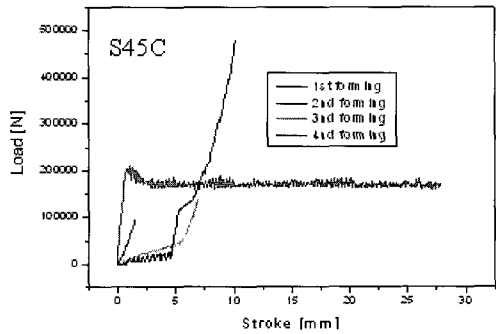
인 성형하중이 필요하며 형상을 채우기 위한 마지막 4번째 공정에서 최대 하중이 소요된다. 4번째 공정에서도 SHCW80L이 가장 낮은 성형하중을 보이는 것을 다시 확인하였다.

Fig. 12는 성형 공정 중 마지막 공정을 예로 단조품에 걸리는 유효변형을 및 유효응력을 나타낸 그림이다. SHCW80L 소재를 적용하였을 경우 S45C에 유사한 변형을 분포를 얻을 수 있었다. 이에 비해 NHS540은 가장 불균일한 변형을 분포를 나타냄을 확인할 수 있었다. 하지만, 가장 높은 변형이 집중되는 단조품의 상단 헤드부에 불균일한 변형의 분포 및 헤드 중심부에서는 낮은 변형율로 인해 가공경화가 발생하지 않으며 이에 따라 물성의 편차가 예상된다.

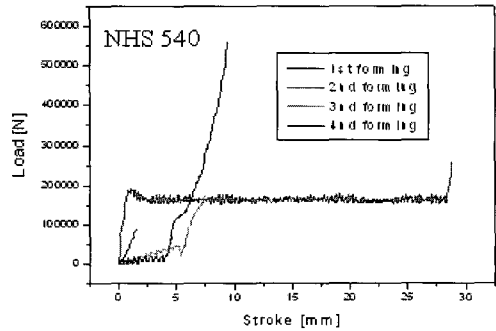
SHCW80L을 이용한 단조품의 경도분포를 Fig.



(a)



(b)



(c)

Fig.11 Press force calculation for each forging steps with the use of (a) SHCW80L, (b) S45C and (c) NHS540

13에 나타내었다. 해석 결과에서 예상할 수 있었던 것과 같이 변형량의 차이에 따라 경도의 차가 발생함을 확인할 수 있었다. 특히, 변형량이 작은 구역인 헤드 중심부에서는 원소재 수준의 경도가 측정되었다. 비조질강의 단조품의 경우 가능한 한 부품 전체에 걸쳐 유사한 변형량을 유도할 수 있는 설계가 필요하다.

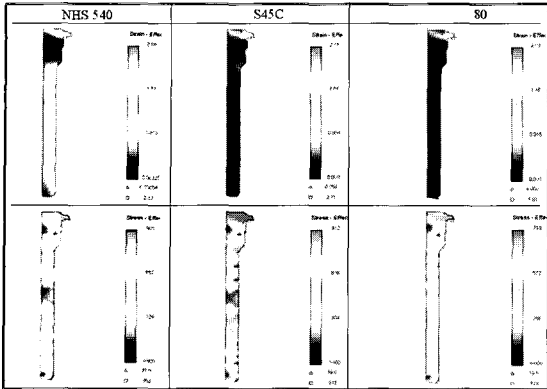


Fig.12 Effective strain and stress distribution of forged guide rod pin samples after the 4<sup>th</sup> stages

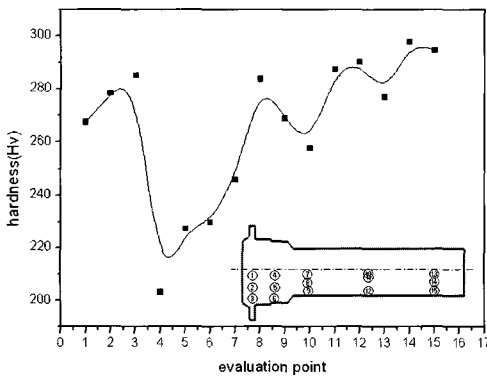


Fig.13 Effective strain and stress distribution of forged guide rod pin samples after the 4<sup>th</sup> stages

### 3.2 금형 응력 해석

Fig. 14는 Fig. 12의 성형해석을 실시한 후 금형의 파손에 주 역할을 하는 주응력을 표시한 그림이다. 실제로 4개 공정 중 마지막 공정에서 가장 높은 금형응력이 걸리는 것을 관찰할 수 있었다. S45C와 NHS540의 경우 최대점에서 1800MPa 정도의 인장응력이 관찰되는 것에 반해 80소재의 경우 약 1400MPa으로 낮은 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 SHCW80L 소재의 압축곡선에 확인할 수 있는 변형초기의 낮은 응력에 기인하는 것으로 판단된다.

일반적으로 비조질강은 가공경도에 의한 높은 강도로 인해 금형수명이 일반적인 조질강에 비해 낮아지는 것으로 알려져 있다. 하지만, 본 연구에

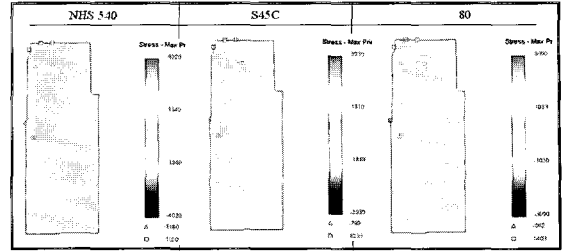


Fig.14 Die stress calculation of forged guide rod pin samples after the 4<sup>th</sup> stages

서 사용한 소재의 경우 기존 조질강 이상의 금형수명을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 새롭게 개발된 냉간단조용 비조질강의 물성을 평가하였으며 이를 기초로 guide rod pin의 성형 공정 및 금형응력 해석을 실시하였다. 새롭게 개발된 비조질강 SHCW80L은 조질 열처리 소재인 S45C나 상용화된 비조질강에 비해 낮은 가공경화 거동을 통해 부품 전체에 걸쳐 보다 균일한 물성을 얻을 수 있었다. 또한, 비조질강을 이용한 공정의 문제점인 낮은 금형수명을 높일 수 있을 가능성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 청정기술개발사업의 연구비 지원이 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Engineer, B. Huchtemann, 1996, Proc. of Int. Symp. on Microalloying Forging Steels, TMS, Colorado, 61.
- [2] M. Katsumata, 1985, 104th and 105th Nishiyama Memorial Lecture, ISIJ, Tokyo, 173.
- [3] D. K. Matlock, G. Krauss, J. G. Speer, 2001, J. of Mat. Proc. Tech., 117, 324.
- [4] M. J. Balart, C. L. Davis, M. Strangwood, 2002, Mat. Sci. Eng., A328, 48.
- [5] F. Penalba, M. Carsi, C. Garcia De Andres, F. Zapirain, M. P. De Andres, 1992, ISIJ Int., 32, 232.
- [6] T. Ishikawa, N. Yukawa, Y. Yoshida, H. Kim, Y. Tozawa, 2000, Annals of the CIRP, 49(2000), 169.