

냉간 비조질강을 이용한 볼 스테드의 정형가공 공정연구

윤덕재^{1,2} · 최호준¹ · 이형욱¹ · 이근안¹ · 장병록³ · 서성렬⁴ · 최석우[#]

Net Shape Forming Process for Ball Stud Using High Strength Micro-Alloyed Cold Forging Steel

D. J. Yoon, H. J. Choi, H. W. Lee, G. A. Lee, B. L. Jang, S. L. Seo, S. Choi

(Received October 12, 2006)

Abstract

Micro-alloyed steel or heat-treatment-free used in clean technology have been replacing for conventional quenched-and-tempered structural steels since the micro-alloyed forging steel was developed in early 1970s in Germany for saving money of heat treatment, simplified process, short delivery and good productivity. In this paper, ball stud assembled in steering system for automobile was selected to compare conventional process making heat treatment with new process using high strength micro-alloyed steel without heat treatment. The conventional process for ball stud was composed of a total of 6 steps including upsetting, forward extrusion, machining, burnishing and tread rolling with heat treatment and shot blasting. As opposed to conventional process, newly proposed process for ball stud using the clean technology without heat treatment is simplified such as forward extrusion, heading, upsetting, forming having a flange shape and tread rolling. Also net shape forming process to achieve specified process not to include machined step for manufacturing the ball stud was applied to newly simplified process since micro-alloyed steel is difficult to be formed.

Key Words : Micro-Alloyed Cold Forging Steel, Net Shape Forming Process, Ball Stud, Plate Type Cross Rolling, Tread Rolling

1. 서 론

현재의 제조업 환경은 세계화 시대를 맞이하여 급변하는 환경변화 속에서 신기술 개발을 통한 고부가가치화 달성을 표방하며 치열한 기술경쟁을 예고하고 있다. 또한 기업간 기술경쟁의 심화와 함께 제조업 환경기준도 강화되어, 오염물질 배출 및 에너지 사용 최소화를 위한 친환경적인 청정 생산기술의 필요성이 점점 더 강조되고 있다. 따라서 산업전반의 분야에서 환경관련 기준 및 오염물질 배출 허용에 관련한 규제를 철저히

하고 있는 상황이다. 이러한 청정생산기술 개발의 일환으로써 소성가공분야에서는 에너지 절감과 오염물질 저감을 위하여 압출이나 단조 작업 후 열처리를 생략하는 냉간 단조용 비조질강의 확대 적용이 주목 받고 있다[1~2].

비조질강은 열처리 비용의 절감, 공정 간략화에 따른 납기단축 및 생산성 향상 등을 목적으로 1972년 독일의 Thyssen사에서 최초로 개발되었으며 1980년대 전세계적인 오일쇼크를 통하여 에너지 절감의 효용성 및 청정소재로서 인정받기 시작하면서 유럽과 일본을 중심으로 연구 및 개발

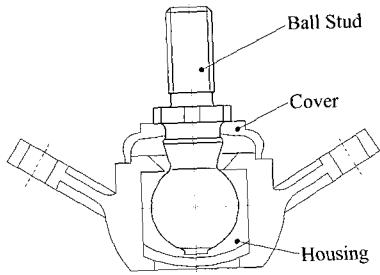
1. 한국생산기술연구원 디지털성형공정팀

2. 인하대학교 첨단정밀공학과

3. ㈜에스에이씨

4. ㈜센트랄

교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail:schoi@kitech.re.kr



(a) Partial steering system for car



(b) Typical shape

Fig. 1 Ball stud used in steering system

이 활발히 진행되고 있다[3]. 또한 국내에서도 냉간 단조와 냉간 압출용으로 사용되는 고강도 냉간 비조질강의 개발과 성형기술 및 금형기술의 개발을 조화시켜 다양한 제품개발을 가능하게 하였으며, 제품의 신뢰성을 극대화시킴으로써 환경 친화적인 비조질강의 산업화를 앞당기고 있다.

본 연구에서는 자동차의 조향장치에 들어가는 볼 스테드(Ball stud)를 대상으로 기존의 조질강 SCM435 를 대체하여 고강도 냉간 비조질강을 적용시켜 절삭가공, 열처리 공정 및 쇼트처리공정이 생략된 공정 단순화를 통해 청정소재로서의 무절삭 친환경 성형기술 개발을 시도하고자 하였다. Fig. 1 의 (a)에는 볼 스테드가 장착되어 있는 자동차용 조향장치 조립시스템을 나타내고 있으며, (b)에서는 개발대상 제품 사진을 명시하였다.

물론 볼 스테드에 비조질강을 적용함에 따라 열처리시 발생하는 제품 변형이나 균열을 사전에 방지할 수 있다. 이러한 비조질강 적용에 따른 장점과 함께 인장강도 높은 볼 스테드는 정형(Net-Shape) 성형기술을 통해 제품으로써 최종 완성된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 볼 스테드 제작공정과 친환경 소재인 비조질강의 적용에 따른 새로운 대체 성형공정을 비교하였으며 제안된 정형 성형기술을 통해 개발된 소재의 성형성 및 특성을 평가하였다. 또한 간략화된 새로운 성형 공정에 대한 3 차원 유한요소해석과 실험을 함께 수행하여 제안된 공정의 타당성을 증명하였으며, 볼 스테드 성형을 위한 모든 공정의 무절삭화를 위해 볼 스테드 목 부분에 대한 전조 압연공정

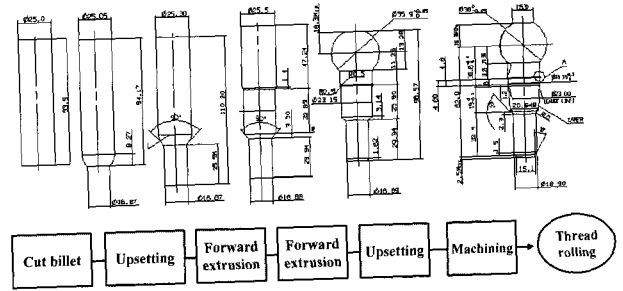


Fig. 2 Conventional process for ball stud with heat treatment

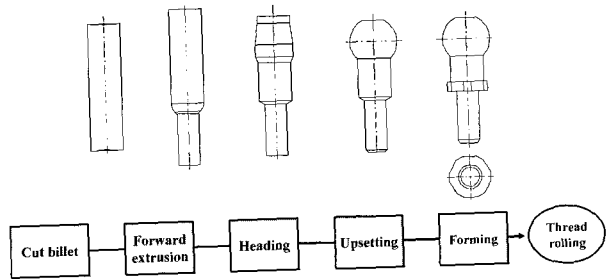


Fig. 3 Newly proposed process for ball stud with no heat treatment made by micro-alloyed steel

(Cross rolling operation)의 적용 가능성 및 성형성도 함께 분석하였다.

2. 볼 스테드 성형 공정 비교

기존의 볼 스테드 제작공정을 Fig. 2에 나타내었다. 조질강 SCM435의 원형 빌렛(Billet)을 준비한 후 업셋팅(Upsetting) 공정을 거치고 두 번의 전방 압출, 업셋팅과 절삭 및 버니싱 공정을 거쳐 최종적으로 나사전조과정을 포함한 총 6단계를 거쳐 볼 스테드 최종제품이 완성된다.

Fig. 3에서는 고강도 냉간 비조질강의 적용에 따라 열처리가 생략된 볼 스테드 제작공정을 보여 주고 있다. 물론 절삭가공, 열처리 공정 및 쇼트 처리 공정이 생략되었으며, 난성형재 성형을 위한 정형 성형기술의 적용에 따라 기존공정과 비교하여 성형공정이 간략화되었고, 볼스테드 장착을 위한 플랜지부 성형도 분리형 금형을 이용해 포머(Former)에서 함께 수행할 수 있어 비조질강 적용에 따른 원가상승 요인을 상당히 완화시킬 수 있다. 또한 볼 스테드 제작에 따른 모든 공정의 무절삭화와 높은 형상 정밀도에 기인하여 포머에서 플랜지 부위 성형이 완료된 다음 전조압

연공정(Cross rolling operation)을 통하여 볼 스테드 목 부분 성형 및 전조공정 거쳐 나사부를 갖는 최종형상이 결정된다.

3. 비조질강을 이용한 새로운 볼 스테드의 정형가공 공정 분석

3.1 개발된 비조질강의 성형성 및 특성평가
고강도 냉간 비조질강은 그 동안 꾸준히 개발되어 왔으며 그 적용성 확대를 위해 성형성 및 피로강도 등의 문제를 해결하려는 노력을 기울이고 있는 중이다. 따라서 본 논문에서는 S사에 개발한 소재인 SCHW80B와 C에 대해 특성을 분석하였다. 개발소재의 물성 특성변화를 분석하기 위하여 로터리 스웨이징(Rotary swaging) 장비를 이용하여 원소재 직경 16.0mm를 기준으로 단면감소율 17%, 20.7%, 24.5%, 29.5%로 성형실험을 수행하였다. Fig. 4에서는 단면감소율이 17%일 때 개발된 소재의 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 단면감소율 20.7%, 24.5%, 29.5% 일 때의 응력-변형률 곡선의 경향은 Fig. 4와 유사하여 기술하지 않았으며, 위의 실험을 통해 개발된 S사의 비조질강의 압출강도는 약 850MPa이상으로 나타나고 있다.

Fig. 5는 개발된 비조질강의 단면감소율에 따른 직경방향에서의 위치별 경도값 변화를 나타내고 있다. 소재의 내부보다는 표면에서 높은 값을 나타내고 있으나 그 경도값의 차이는 크지 않은 것으로 분석되며, 제품의 내외 부분에서 전체적으로 성형된 것을 알 수 있다. 물론 소재의 내외부분에서의 경도값의 차이는 대략 3-5% 차이를 보이고 있고, 또한 내외부분의 소성가공량의 불균일 분포에 따른 편차가 크지 않음에 따라 냉간 성형성에 치명적 오류를 발생시키지는 않을 것으로 판단된다.

3.2 유한요소 해석과 실험결과 비교

볼 스테드의 비조질강을 이용한 새롭고 단순화된 냉간 단조 성형공정을 Fig. 3에 나타내었으며, 이렇게 제안된 볼 스테드 정형가공 공정에 대한 3차원 유한요소 해석과 실험결과가 Fig. 6에서 비교·분석하여 보여주고 있다. 유한요소 해석과 실험을 함께 수행함으로써 형상 및 표면 결함(Shape and surface defect) 없이 비조질강 적용에 따라서 볼 스테드의 성형을 위한 새롭게 제안된 공정설

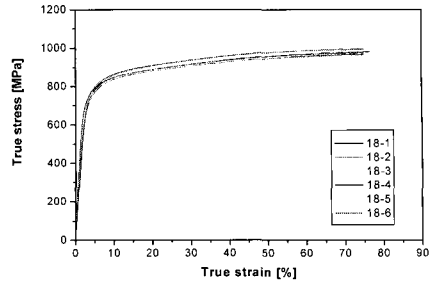


Fig. 4 Stress-strain relationship with 17% reduction in area

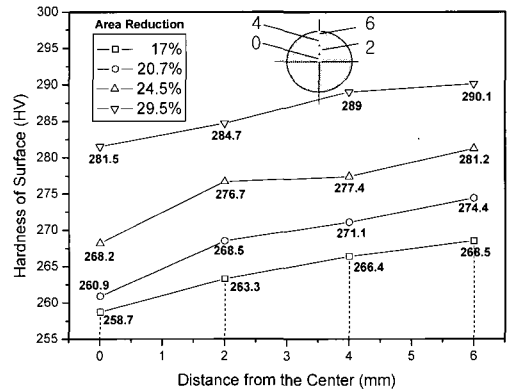
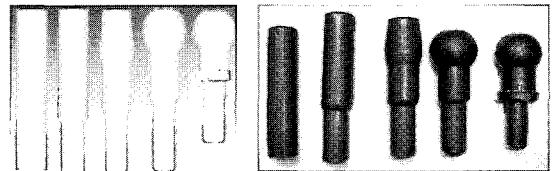


Fig. 5 Variation of Micro hardness with respect to position and reductions in area



(a) FE analysis (b) Experiment

Fig. 6 Comparison of FE analysis and experimental results

계 타당성을 증명하였다. 해석결과로써 성형하중은 제1공정인 전방압출 공정에서는 약 100톤, 제2공정인 헤딩(Heading)공정에서는 약 40톤, 제3공정인 볼을 성형하는 업셋팅 공정에서는 105톤, 제4공정인 플랜지 성형공정에서는 약 100톤 정도가 소요되고 있는 것으로 분석되어 주로 현장에서 많이 사용하는 400톤 포머 프레스의 용량을 고려하면 충분히 성형이 가능하리라 판단된다. 따라서 비조질강 적용에 따른 볼스테드의 새로운 대체 성형공정을 새로운 설비 투자 없이도 기존 생산라인을 활용할 수 있게 되어 생산원가 절감에 정형 성형기술이 많은 기여를 할 것으로 예측된다.

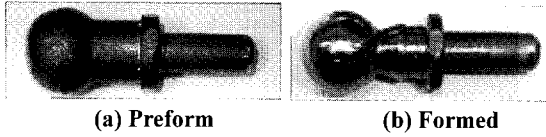


Fig. 7 Change in a neck shape of ball stud during the crossing rolling process

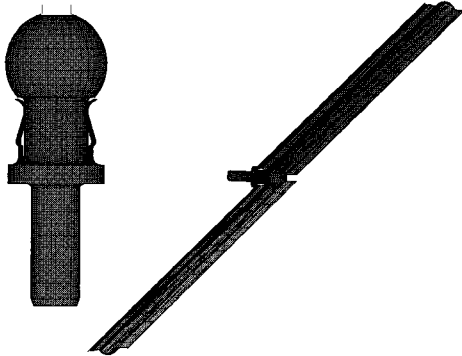


Fig. 8 FE modeling for the plate type cross rolling process

4. 전공정의 무절삭화를 위한 전조압연 및 나사전조 공정

4.1 고정밀 전조압연 공정의 적용

볼 스테드 제작공정의 무절삭화와 높은 형상 정밀도 갖는 목 부분 성형을 위하여 고정밀 냉간 전조압연공정의 적용을 검토·분석하였다. 전조압연공정은 점진성형기법 중에 하나로써 주로 원통형 형상의 소재를 성형하여 다음 공정의 예비성형체를 만들거나 완제품으로 제조하는 공정이다. 또한 금형의 형상에 따라 드럼형과 평판형으로 나누어지고 금형의 성형형태에 따라 램프형(Ramp type)과 웨지형(Wedge type)으로 나눌 수 있다. 본 제품에서의 전조압연공정은 냉간 상태에서 기성형된 원통형 부품의 강도 또는 표면경도, 피로강도를 향상시키고, 동일한 형상을 압하량만 선형적으로 증가시키는 역할을 수행하며, 램프형 금형을 이용하여 공정을 진행하였다. Fig. 7에서는 평판형 전조 압연공정(plate type cross rolling operation)의 적용에 따른 공정실험 전·후 제품성형 결과를 나타내고 있다.

4.2 전조압연 공정의 유한요소 해석

전조압연 공정의 유한요소 해석은 공정진행에

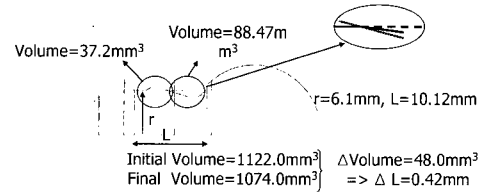


Fig. 9 Calculation of the volume in neck part of ball stud for new preform design during the cross rolling process

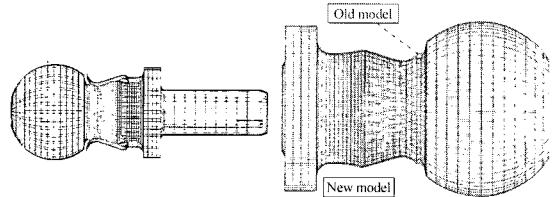


Fig.10 FE results of newly proposed preform (left) and comparison of final shapes in old and new preform(right)

따른 소재의 압축 회전 성형에 의해 소재 중심부에 홀(Hole)이 생기는 결함인 만네스만 홀(Mannesmann hole)의 발생가능성과 소재의 미끄러짐 발생에 따른 불안전 성형을 예방하기 위한 최적의 예비성형체 설계를 위하여 수행하였다[4-5]. 평판형 전조압연 공정의 유한요소해석은 LS-DYNA 3D에서 수행하였으며 해석에 사용된 절점은 18,657개, 요소는 약 16,000개로 구성되었고 Supercomputer IBM p690에서 90시간 정도 소요되었다. 해석에 사용된 소재의 물성은 예비성형을 위하여 저탄소강인 SM20C의 물성치를 사용하였다. Fig. 8은 램프형 금형 및 제품의 3차원 모델링의 예이다.

첫 번째 설계안에 대한 해석결과를 토대로 판단해 보면 볼 스테드의 목 부분 치수를 수정해야 함을 알 수 있었다. 따라서 예비성형체를 수정하기 위하여 최종형상과 초기형상간의 체적을 Fig. 9에서처럼 다시 계산하였으며 수정된 모델과 그에 따른 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 경우에도 체적의 비율로는 충분히 금형부분을 채워야 하나 볼의 머리부가 밀려서 이동할 경우 0.42mm의 이동에도 체적이 모두 소모됨을 알 수 있다. 따라서 본 형상의 예비성형체 설계에는 재료의 유동을 볼 머리부보다는 플랜지부로 유도하는 것이 설계의 중요한 요소임을 알 수 있었다. 또한 원하는 볼 스테드 목 부분의 최종형상을 얻기 위

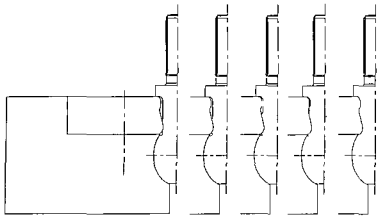


Fig. 11 Rolling procedure for neck shape of a ball stud in the cross rolling process

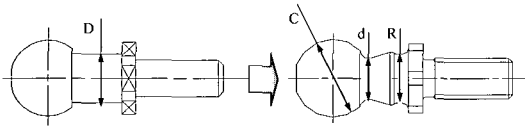


Fig. 12 Change in dimensional shape before and after the cross rolling process

해서는 구면부분과 목 부분을 함께 전조압연공정을 진행해야 할 것으로 판단된다. 또한 압하량이 클 경우 만네스만 홀(Mannesmann hole)이 생길 가능성도 해석결과를 토대로 예측되었으므로 압하량을 약 16% 정도 줄여서 실제 실험에 적용하기로 하였다.

4.3 전조압연 공정의 보정과 실험결과

Fig. 8~10의 유한요소해석 결과를 반영하여 전조압연 실험을 수행하였다. 실험에서는 금형 길이를 928mm, 금형 폭을 40mm로 제작하여 사용하였다. Fig. 11에서는 목 부분과 구면 부분을 동시에 성형시켜 최종형상을 얻는 금형이동을 순서적으로 보여주고 있다. Fig. 12에서는 실험에서 사용된 초기 및 최종형상에 따른 치수들을 대별해서 표현하였다. D는 목 부분의 초기 지름을 나타내었고 R 부분은 플랜지에 가까운 쪽의 최종 외경을, d는 목 부분의 최소 외경을 표현하고 있으며 C는 볼 부분을 나타내는 것으로 진구도라 지칭하여 사용하였다. Table 1에서는 목 부분 외경을 달리하면서 전조압연 공정 실험의 진행에 따른 최종형상의 치수값들을 측정된 결과이다. 물론 목 부분의 실험 전 외경치수(D)는 유한요소해석의 결과를 참고로 하여 결정한 것이다.

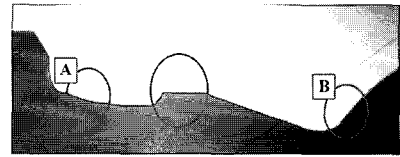
Fig. 13에서는 Table 1에서 목 부분 외경의 변화에 따라 실험 후 성형된 제품형상을 투영시킨 사진들이다. 목 부분의 외경이 Ø12.35/12.40를 가질 때는 전조압연 공정 후에 아직 채우지 못하는 형상이 있음을 확인할 수 있으며, Ø12.35는 원하는 제품 형상의 치수 상한 값보다 커져서(A, B 부분) 제대로 성형되지 않음을 알 수 있었다. 따라서 목

Table 1 Measured values on final shape surface

Before forming	After forming	
Outer diameter (D)	Measured part	Values
Ø12.35	Neck dia. (R)	11.990
	Neck dia. (d)	Ø10.05
	Sphericity (C)	Ø18.985
Ø12.40	Neck dia. (R)	11.980
	Neck dia. (d)	Ø10.07
	Sphericity (C)	Ø18.995
Ø12.45	Neck dia. (R)	11.980
	Neck dia. (d)	Ø10.1
	Sphericity (C)	Ø18.985



(a) D = Ø12.35 / Ø12.40



(b) D = Ø12.45

Fig. 13 Micrograph projecting final shape of the neck

부분의 외경이 Ø12.35-12.40의 범위에서 추가 실험을 거쳐 정확한 예비성형체의 치수를 찾아 내게 될 것이다.

4.4 나사전조(Tread rolling) 공정의 실험

전조압연공정을 거쳐 볼 스티드의 목 부분 성형이 끝나면 무절삭화를 위한 마지막 공정인 나사전조 공정을 수행하게 된다. 나사전조 공정은 랙 금형을 사용하게 되는데 장비의 효율적 사용을 위하여 전조압연공정의 금형과 동시에 장착할 수 있도록 성형장비를 설계·제작하였다. Fig. 14의 개념도처럼 전진시는 목 부분 전조압연을 수행하고 후진시는 나사전조 공정을 진행시킬 수 있도록 장치를 고안하여 실험을 진행하였다. Fig. 15에서는 전조압연과 나사전조를 함께 수행하는 실제 제작된 장치의 설계도와 금형구조를 보여주고 있다. Fig. 16에서는 나사전조공정을 수행하여 완성된 제품사진으로 볼 스티드의 제작을 위한 전공정의 무절삭화를 달성한 제품의 최종형상이다.

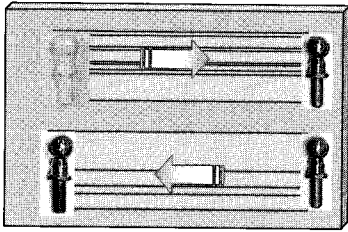
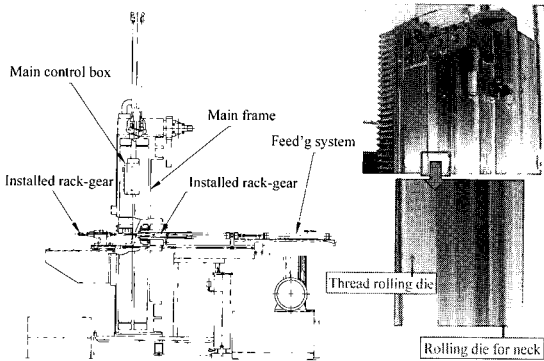


Fig.14 Concept for performing cross rolling process with thread rolling process together



(a)Machine drawing (b)Manufactured die system
Fig.15 Apparatus for two rolling processes

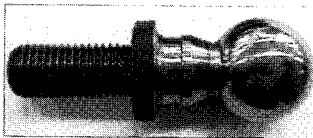


Fig.16 Final product after two rolling processes

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 조질강으로 성형되는 볼 스테드를 비조질강을 이용하여 제조함으로써 열처리 없는 청정 정형(Net-Shape) 성형공정을 제시하고 이를 세부적으로 연구하였으며 위의 연구내용을 정리하면 아래와 같다.

(1) 기존 볼 스테드의 조질강 성형공정과 새로운 비조질강의 정형 성형공정을 제시하고 이들을 비교·분석하였다.

(2) 개발된 비조질강의 기계적 특성을 평가하기 위해 압축실험을 수행하였으며 응력-변형률 선도 및 경도변화를 고찰하여 비조질강의 냉간 성형성을 검증하였다.

(3) 새롭게 제시된 비조질강의 성형공정을 3차원 유한요소해석과 실험을 통하여 정형 성형 공정설계의 타당성을 증명하였다.

(4) 볼 스테드 목 부분의 냉간 가공경화 효과에 따른 피로강도를 부여하기 위하여 평판형 전조압연 공정을 도입하고 이에 따른 최적의 예비성형체 설계를 실험과 해석을 통해 시도하였으며, 무절삭 성형공정의 달성을 위한 적용가능 공정임을 보였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 청정생산기술사업 “차세대 환경친화형 고강도 냉간 비조질강 제품 개발” 사업의 지원에 의해 가능하였으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국생산기술연구원, 2003, 차세대 환경친화형 고강도 냉간 비조질강 제품개발 기획보고서.
- [2] 이덕락, 2002, 비조질강의 개발 동향, 한국소성가공학회지, Vol. 11, No. 5, pp. 388~393.
- [3] 서동우, 이영신, 권용남, 이정환, 2004, 냉간단조용 비조질강 및 성형품의 미세조직과 기계적 특성분석, 한국소성가공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, pp. 409~412.
- [4] 윤덕재, 김인호, 최석우, 임성주, 이형욱, 2004, 냉간 전조압연 공정에서의 성형조건에 따른 재료의 물성변화분석, 한국소성가공학회 2004년도 추계학술대회논문집, pp. 319~324.
- [5] 이형욱, 윤덕재, 이근안, 이낙규, 최석우, 2004, 평판형 전조압연의 성형특성 연구, 한국소성가공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, pp. 329~332.