

## 선조질강 소재의 단조공정 측면에서의 특징

엄재근<sup>1</sup>· 이추실<sup>2</sup>· 장성민<sup>2</sup>· 안순태<sup>3</sup>· 손요현<sup>4</sup>· 현성운<sup>5</sup>· 김혁<sup>6</sup>· 윤덕재<sup>7</sup>· 전만수<sup>#</sup>

# Characteristics of Pre-Heat Treated Steel for Application to Forging

J. G. Eom, Q. S. Li, S. M. Jang, S. T. Ahn, Y. H. Son, S. W. Hyun, H. Kim, D. J. Yoon, M. S. Joun  
(Received June 23, 2009 / Revised July 27, 2009 / Accepted August 24, 2009)

### Abstract

In this paper, plastic deformation behaviors of ESW105 and SCM435 steels are revealed by simulations and experiments. ESW105 is the special pre-heat-treated steel characterized by high initial yield strength and negligible strain-hardening behavior. The flow stresses of the two steels for large stain are calculated from tensile tests. Axial and lateral compressions of cylindrical bars are tested and simulated and the deformed shapes are compared to characterize the plastic deformation behaviors of the two materials. A forward extrusion process of a cylindrical bar is also simulated to reveal the difference. It has been shown that there are pretty much difference in plastic flow between ESW105 and SCM435 which causes from the difference in strain-hardening capability, implying that the experience-oriented design rules for common commercial materials may lead to failure in process design when the new material of ESW105 is applied without consideration of its plastic deformation behavior.

**Key Words** : Strain Hardening, Cylinder Axial Compression, Cylinder Lateral Compression, Plastic Deformation Behavior, Pre-Heat-Treated Steel, Forge ability

## 1. 서 론

공산품의 사용 과정과 제조 과정에서 이산화탄소의 배출 억제는 전세계적인 추세로 자리잡아가고 있다. 따라서 에너지를 많이 사용하는 기계부품 제조공정에도 점진적인 변화가 불가피하다. 물론 환경 문제의 주범 중의 하나인 자동차의 경우, 유독성 및 환경 유해성 배출가스의 최소화와 더불어 연비 향상이 업계의 주요 현안 문제가 되고

있다. 자동차의 구조설계와 부품제조 측면에서도 환경적 고려가 불가피하다. 설계 분야에서 구조 최적화와 신소재의 적용을 통한 경량화가 필연적이며, 제조과정에서도 에너지 사용과 환경 유해성 물질 생산의 최소화는 기업의 장래를 좌우하는 환경으로 변하고 있다. 이러한 흐름으로 인하여 과거에 비하여 신소재의 응용이 매우 쉬워진 것이 사실이며, 신소재의 개발자나 응용 기술자에게는 매우 용이한 업무 환경이 만들어졌다. 고강도

1. (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터  
2. 경상대학교 대학원 기계공학과  
3. 삼화강봉㈜  
4. 영신금속공업㈜  
5. 태양금속공업㈜  
6. 현대자동차㈜  
7. 한국생산기술연구원  
# 교신저자: 경상대학교 기계항공공학부,  
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

소재의 활용도 경량화의 측면에서 많은 주목을 끌고 있다.

선조질강[1]은 고강도 소재이면서도 제조 및 응용 과정에서 에너지 사용의 최소화가 가능하고 환경 유해성 물질의 생산이 상대적으로 작기 때문에 주목을 받아 왔으며, 타이로드(Tic-rod), 볼스터드 등을 비롯한 다양한 종류의 부품에 적용이 이루어지고 있다. 선조질강은 고주파유도가열 방식으로 열처리된 소재로 경우에 따라서 단조 이후에 열처리를 생략할 수 있는 장점을 지니고 있어, 특히 열처리 중에 변형이 심한 길이가 긴 기계부품에 적합하다. 선조질강[2, 3]은 일반 급속[4, 5, 6]에 비하여 독특한 소성변형 거동특성을 보이고 있다[2, 3]. 선조질강의 초기 항복응력은 매우 큰 반면, 변형경화가 무시할 정도로 작다.

선행연구[2, 3]에서 전술한 선조질강 ESW95 및 ESW105의 변형거동 특성은 밝혀졌으나, 이러한 소성변형 거동 특성이 단조공정에 미치는 영향에 대한 연구는 실시되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 실험적 방법과 해석적 방법으로 선조질강 ESW105가 갖고 있는 소성변형 거동 특성이 단조시에 발생시키는 거시적 현상들에 관한 연구 결과를 제시하고자 한다.

## 2. 선조질강의 거동 특성

### 2.1 인장시험과 유동응력

Joun 등[7]은 인장시험으로부터 고변형률에서의 유동응력 정보를 획득하는 기법을 개발하여 선행 연구[8]에서 본 논문에서 연구 대상으로 삼고 있는 ESW105의 유동응력 정보를 획득하여 발표하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 SCM435의 유동응력 곡선과 비교하여 나타내었다. 동일한 조건에서 인장시험을 실시한 결과, 초기항복 응력은 2.8배의 차이를 보였으며, 파단 시까지 최대로 작용한 유동응력은 1.1배의 차이를 나타내었다. 따라서 선조질강 ESW105는 변형경화가 거의 발생하지 않으며, 유동응력이 변형량과는 상관없이 SCM435의 재료가 1.6 정도의 변형률로 변형경화를 받은 상태와 유사하다.

두 재료에 대하여 인장시험으로 획득한 진응력-진변형률 곡선을 진변형률 축에 정사영하였을 때 만들어지는 면적, 즉 인장시험에서 파단이 발생한 부위에 위치한 재료가 인장시험 동안 방출한 소성 변형에 따른 에너지의 양을 비교한 결과, ESW105의

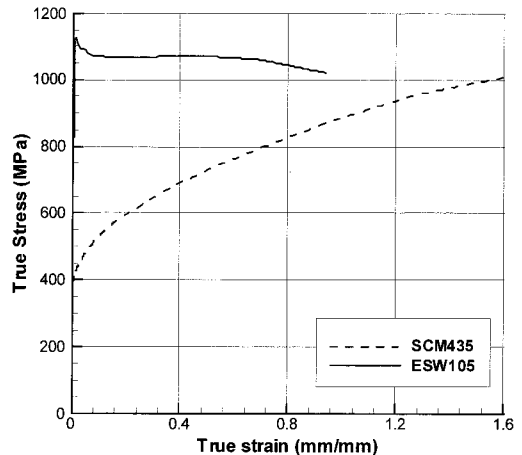


Fig. 1 Flow stress curves of ESW105 and SCM435

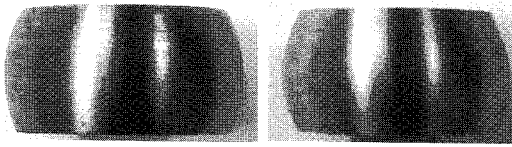
인성은 SCM435의 인성의 약 75 %에 다 다른 것으로 나타났다. 물론 인장시험에 소요된 에너지의 비율은 이보다 훨씬 작을 수밖에 없다. 선조질강은 변형경화가 발생하지 않아 네킹이 초기에 발생하므로 전체적으로 변형량이 작기 때문이다.

### 2.2 실린더의 축방향 압축시험

대부분의 단조공정은 실린더의 축방향 압축을 동반한다. 일반적으로 소재의 직경은 규격화되어 있는 반면, 제품의 직경은 천차만별이기 때문이다. 즉, 실린더 형태의 원소재의 압축을 통하여 재료의 직경을 맞추는 작업이 대부분 진행된다. 물론 실린더의 업세팅을 통하여 파단면의 표면 및 형상 품질을 개선시키는 목적으로도 업세팅이 널리 행해지고 있다.

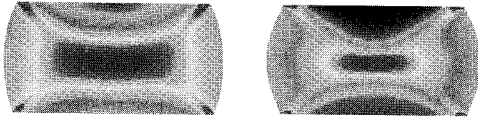
본 연구에서는 실린더 업세팅 시에 발생하는 베럴링을 실험과 시뮬레이션을 통하여 조사하였다. 실린더 형태의 시편의 직경과 높이를 각각 16mm와 24mm로 하였으며, 피막처리를 실시하지 않았다. 실험을 위하여 (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터[9]의 1000톤 기계식 프레스를 사용하였으며, 시뮬레이션 목적으로는 AFDEX 2D[10]가 사용되었다. 해석 시의 마찰조건은 실험결과와 잘 일치하는 마찰계수 0.15를 사용하였다. 이 값은 상온에서 무윤활 상태의 강과 강이 접촉할 때의 마찰계수[11]인 0.1-0.2의 사이값이며, 실험결과와 비교하여 결정되었다. 높이감소 비율이 50 %가 되도록 압축을 실시하였다.

Fig. 2 와 Fig. 3 에 각각 실험결과와 해석결과를 나타내었다. 동일한 조건으로부터 얻은 Fig. 3 의



(a) SCM435 (b) ESW105

Fig. 2 Experiments of cylinder axial compression



(a) SCM435 (b) ESW105

Fig. 3 Predictions of cylinder axial compression

해석결과로부터 ESW105의 시편이 SCM435의 시편보다 베어링 시에 중간 부위에서의 돌출량이 많다는 것을 알 수 있다. 다시말하면, SCM435 시편의 변형 형상이 상대적으로 부드럽게 나타나고 있다. 이러한 현상은 Fig. 2의 실험에서도 나타나고 있다. 이 현상을 정량적으로 분석하면, 직경이 16.0mm인 실린더의 50% 압축 시, SCM435와 ESW105 시편의 최대 직경은 각각 21.62mm와 22.15mm로 예측되었으며, 실험결과도 유사하게 나타났다.

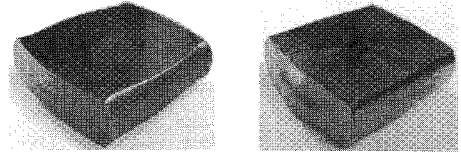
이러한 소성변형 거동 특성은 제품의 형상에 따라서 유리한 조건으로 작용할 수도 있고 불리한 조건으로 작용할 수 있을 것으로 사료된다. 쉽게 생각할 수 있는 것으로는 ESW105 재료의 단조 시에는 상대적으로 업세팅 양을 작게 할 수밖에 없는데, 모서리 부분을 채우는 공정에서는 불리한 면으로 작용할 것이다. 물론 모서리가 먼저 차면서 발생하는 버 문제가 심각한 공정에서는 ESW105가 더 유리할 수도 있다.

### 2.3 실린더의 측면방향 압축시험

실린더 형태의 측면방향 압축은 흔하지는 않지만, 실공정에서 자주 발생하고 있다. 실린더의 측면방향 압축시험은 재료의 단조성 평가를 위하여 필수적이라고 판단된다.

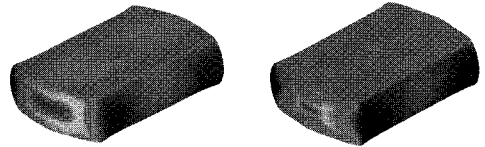
실린더의 측면방향 압축시험을 위하여 2.2 절에서의 실린더 축방향 압축시험에서 사용한 시편을 그대로 사용하였으며, 실험 조건과 해석 조건도 동일하게 하였다. 시뮬레이션 목적으로 AFDEX 3D[10]가 사용되었다. 초기 높이(직경) 기준으로 높이감소가 50%가 되도록 압축을 실시하였다.

동일한 조건으로부터 얻은 Fig. 5의 해석결과로



(a) SCM435 (b) ESW105

Fig. 4 Experiments of cylinder lateral compression



(a) SCM435 (b) ESW105

Fig. 5 Predictions of cylinder lateral compression

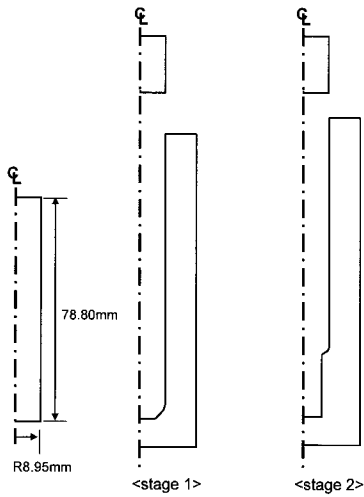
부터, 압축하는 방향으로 보았을 때와 축방향으로 보았을 때의 ESW105 시편과 SCM435 시편의 변형 형상 차이가 비교적 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 동일한 차이를 실험결과인 Fig. 4에서도 확인할 수 있다. 즉, ESW105는 길이 방향의 균일성 측면에서는 SCM435에 비하여 유리하지만, ESW105의 시편은, 축방향으로 보았을 때, 평면이었던 단면이 상대적으로 울퉁불퉁한 복잡한 곡면으로 변형되었다는 점에서 불리할 수도 있다.

### 2.4 전방압출

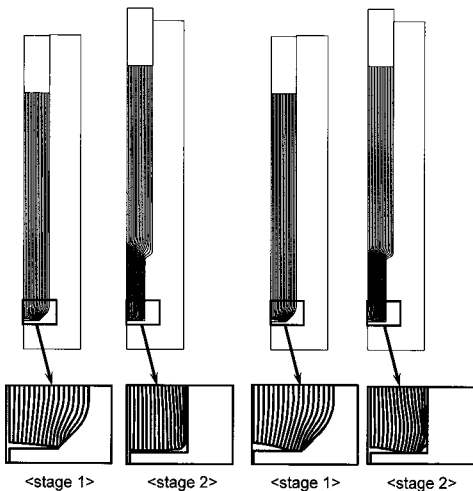
전방압출은 단조공정에서 가장 흔한 것으로 특히 자동차단조에서 축류 제품을 제작하는데 있어 필수적인 공정이다. 단면이 평면인 원통 소재를 압출할 경우, 대개 압출비가 크면 블록하게 되고, 압출비가 작으면 오목하게 변형된다. 물론 변형형상은 재료의 유동응력, 마찰상태, 압출각도 등에도 다소의 영향을 받는다.

본 논문에서는 Fig. 6의 전방압출 공정에 대하여 ESW105와 SCM435의 변형특성을 해석적으로 비교하였다. 즉, 두 재료의 유동응력 차이에 따라 발생하는 재료 단면 형상 변화를 조사하였다. 금형의 마찰조건으로 쿨롱마찰법칙을 사용하였으며, 마찰계수를 0.05로 가정하였다[12].

Fig. 7에서 두 재료에 대한 해석 결과를 비교하였다. 이 결과로부터 재료의 유동응력에 따라 세부적인 소성변형 특성에서 크게 차이가 발생함을 알 수 있다. 이러한 소성변형의 거시적 거동특성은 소성가공 공정, 특히 정밀단조 공정의 개발 과정에서 매우 중요한 요소로 작용할 수도 있다.



(a) Material (b) Punch and die  
**Fig. 6 Test forward extrusion process**



(a) SCM435 (b) ESW105  
**Fig. 7 Comparison of predicted deformed shapes between ESW105 and SCM435**

### 3. 결론

본 논문에서는 선조질강인 ESW105의 소성변형시의 거시적 거동 특성에 관한 실험적 및 해석적 연구 결과를 제시하였다. 이를 위하여 이미 냉간 단조 목적으로 널리 적용되고 있는 SCM435 소재와의 결과 비교를 실시하였다.

선조질강 ESW105은 초기항복강도 측면에서

SCM435에 비하여 2.8 배 높은 고강도 소재이지만 변형경화가 무시할 수준이다. 이로 인하여 실린더 소재의 축방향 및 측면방향 압축시험 결과에서 매우 큰 차이를 나타내었다. 축방향 압축시험 결과, 최소반경은 동일하지만, ESW105 시편의 최대 반경 측면이 다소 크게 나타났으며, SCM435 시편의 베어링 형상이 부드럽게 나타났다. 측면방향 압축시험 결과, ESW105의 길이 방향의 균일성이 상대적으로 높게 나타난 반면, 축방향으로 보았을 때, ESW105 시편의 원형 단면은 SCM435 시편에 비하여 다소 울퉁불퉁한 형상으로 변형되었다.

금형 재료의 발전이 뒷받침되지 않는다면, 재료가 고강도이면서 동시에 단조성을 지니기 위해서 변형경화능이 매우 작아야 함은 필연적이다. 본 논문에서는 기존의 상용 재료에 익숙한 기술자를 위하여 변형경화능이 작을 경우에 발생할 수 있는 소성가공 상의 문제점을 제시하였다. 제시된 결과들은 기존의 경험만으로는 고강도 저변형경화능 소재의 적용이 불가능함으로 말해주고 있다.

끝으로 본 논문은 신소재의 단조성 평가를 위한 체계적인 접근 방법과 일종의 표준화의 필요성을 시사하고 있다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- [1] S. T. Ahn, Y. Yamaoka, KR-A-0056917, 2001.
- [2] J. T. Park, J. G. Eom, J. H. Kim, D. J. Youn, M. S. Joun, 2008, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., KSTP, Kangwon, Kor., pp. 439~443.
- [3] S. M. Jang, J. G. Eom, M. C. Lee, M. S. Joun, 2008, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., KSTP, Jeju, Kor., pp. 292~296.
- [4] R. Ebrahimi, N. Pardis, 2009, Determination of strain-hardening exponent using double compression test, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 518, No. 1-2, pp. 56~60.
- [5] S. Nagarjuna, B. Gopalakrishna, M. Srinivas, 2006, On the strain hardening exponent of Cu-26Ni-17Zn

- alloy, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 429, No. 1-2, pp. 169~172.
- [6] H. J. Kleemola, M. A. Nieminen, 1974, On the strain-hardening parameters of metals, Metall. Mater. Trans., Vol. 5, No. 8, pp. 1863~1866.
- [7] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, 2008, A new method for acquiring true stress-strain curves over a large of strains using a tensile test and finite element method, Mech. Mater., Vol. 40, No. 7, pp. 586~593.
- [8] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, J. H. Park, D. J. Yoon, 2008, Tensile test based material identification program AFDEX/MAT and its application to two new pre-heated steels and a conventional Cr-Mo steel, Int. J. Mod. Phys. B, Vol. 22, No. 31-32, pp. 5768~5773.
- [9] <http://www.tic.or.kr>
- [10] <http://www.afdex.com>
- [11] S. H. Corandall, N. C. Dahl, T. J. Lardner, 1978, An Introduction to The Mechanics of Solids, 2nd ed., McGraw-Hill Companies, New York.
- [12] M. S. Joun, H. G. Moon, I. S. Choi, M. C. Lee, B. Y. Jun, 2009, Effects of friction laws on metal forming processes, Tribol. Int., Vol. 42, No. 2, pp. 311~319.