

## 선조질강 ESW95의 기계적 성질에 관한 연구

박지태<sup>1</sup> · 엄재근<sup>2</sup> · 김종훈<sup>3</sup> · 윤덕재<sup>4</sup> · 전만수<sup>#</sup>

### Study on Mechanical Behavior of a Pre-Heat Treated Steel of ESW95

J. T. Park, J. G. Eom, J. H. Kim, D. J. Youn, M. S. Joun

#### Abstract

We investigate the mechanical behavior of a pre-heat treated steel of ESW95, which is being used for automotive parts including tie-rods to save manufacturing cost and enhance product quality. SCM435 is also investigated to reveal the characteristics of the pre-heat treated steel tested. AFDEX/MAT is used to extract the true stress-strain curve over the large strain with higher accuracy. It has been found that ESW95 has very weak strain-hardening behavior which can be negligible compared with SCM435 and that the initial yield strength is quite high and the toughness of ESW95 reaches nearly 75% of SCM435. ESW95 is characterized by the weak strain-hardening behavior and high yield strength that can be lead to minimization of post-processing including heat treatment and straightening. ESW95 and SCM435 are also compared by applying them to ball-stud forging by computer simulation. It is expected that a great deal of change may take place in production as well as in service if the pre-heated steels are adopted.

**Key Words** : Pre-Heat Treated Steel, Tensile Test, Finite Element Simulation, Flow Stress

#### 1. 서론

공산품에 대한 국제 경쟁이 격화되고 원자재 가격이 지속적으로 상승하면서 소성가공 산업에서도 다 방면에서 혁신이 이루어지고 있다. 단조의 경우, 정형단조가 대체를 이루었다. 소재 가격의 상승으로 실수율의 최대화는 불가피한 현실적 문제이다. 단조 시뮬레이션 기술의 활용이 일반화되고 있으며, 가까운 장래에 필수화될 것으로 판단된다. 그리고 세계적인 에너지 사용 규제 움직임으로 에너지를 많이 사용하는 기계부품 제조공정에도 점진적인 변화가 불가피하다. 결론은 에너지 사용의 최소화이다. 이러한 흐름의 연장선상에서 개발된 것이 고주파유도가열 열처리된 선조질강이다[1].

삼화강봉(주)에서 개발한 이 선조질강은 일반 저탄소강을 고주파유도가열로 퀴칭-템퍼링 열처리하여 미리 강도를 부여한 강선으로서 기존 냉간압조 전의 구상화소둔 열처리 및 냉간압조 후의 퀴칭-템퍼링 열처리 공정을 동시에 생략할 수 있는 장점이 있다. 이 강선의 특징은 고강도임에도 변형경화가 무시될 정도로 작다는 점이다. 따라서 변형 후의 잔류응력이 상대적으로 작으며, 열처리를 생략할 수 있다는 장점이 있어 에너지 사용 규제의 국제적 흐름에 능동적으로 대처할 수 있는 장점이 있다.

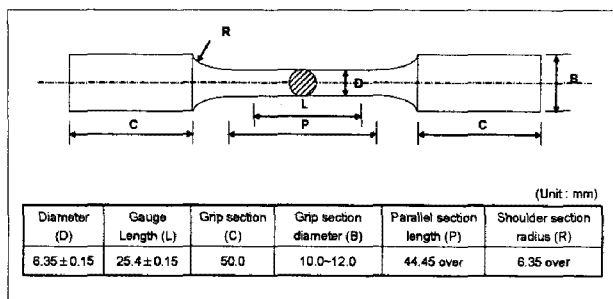
그러나 이 선조질강은 냉간단조전 구상화소둔 처리한 강선과 전혀 다른 거시적 거동특성을 갖는다. 선조질강에 관한 유동응력 등의 기계적 특성이 아직 발표된 바 없다. 본 연구에서는 전만수

1. 삼화강봉(주)  
2. (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터  
3. 태양금속공업(주)  
4. 한국생산기술연구원  
# 경상대학교 기계항공공학부/항공기부품기술연구소  
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

등[2, 3]이 개발한 인장시험 해석 및 유동응력 획득 기법을 이용하여 삼화강봉(주)에서 개발하여 국내외에서 활용되고 있는 이 선조질강 ESW95[1]의 유동응력 등 거시적 특성을 제시한다. 그리고 적용 연구로 실시한 볼스타드 제조 공정의 시뮬레이션 결과를 통하여 선조질강의 실공정 적용과 관련된 제반 기술적 문제를 검토한다.

## 2. 인장시험과 유동응력의 획득

금속재료는 일반적으로 냉간 가공 시에 변형경화의 특성을 지니고 있다. 이 변형 경화능은 변형 경화지수로 정량화되고 있다. 상온에서 일반적인 재료의 유동응력은 흔히 강도계수와 변형경화지수의 함수인 Hollomon의 수식으로 표현되고 있다. 이 Hollomon의 수식을 대부분의 단조 공정 설계자들이 단조 시뮬레이션 목적으로 사용하고 있다. 전만수 등[2]은 저탄소강의 인장시험 연구 결과를 바탕으로 Hollomon의 수식이 상온 상태의 유동응력을 표현하는데 다소 부적절하다는 결과를 발표하였으며, 이러한 문제점을 개선하는 새로운 유동응력 표현 방식과 그 획득 기법을 개발하였다[3]. 이 방법은 탄소강의 경우 1.0 이상의 고변형률에 대한 유동응력을 인장시험 결과로부터 매우 정확하게 구해 주는 장점이 있다. 압축시험 등이 0.5 내외의 변형률에 대한 유동응력을 예측해 주는 것에 비하면 매우 획기적인 방법이다.



(a) Specimen dimensions



(b) Grip

Fig. 1 Tensile test specimen

본 연구에서는 일반강 중에서 SCM435와 상용화에 성공한 선조질강 ESW95를 동일한 조건하에서 유동응력을 획득하여 상호 비교 검토한다.

인장시험의 치수는 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같으며, 시험의 신뢰성을 높이기 위하여 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 그립 부분에 나사를 내었다. 인장시험은 KIMM에서 실시하였고, 사용된 인장시험기는 Instron model 5882 이다. 인장시험은 5개의 시험편에 대하여 실시되었으며, SCM435와 ESW95의 시험 결과 중, 항복강도, 인장강도, 연신률 등을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. Table 에서 보는 바와 같이, 인장시험 결과가 시험편에 따라 큰 차이를 나타내지 않았으므로 Fig. 2에서 보는 바와 같이 대표적인 하나의 하중-변위 곡선을 선택하여 유동응력을 획득하였다. 유동응력의 획득은 AFDEX/MAT에 의하여 이루어졌다. AFDEX/MAT는 단조 시뮬레이터 AFDEX [4]의 하나의 모듈이며, 상온에서의 재료의 거동특성을 획득하는 소프트웨어이다. 이론적 배경은 참고문헌[3]으로 대신한다.

Table 1 Results of tensile test of SCM435

Specimen	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
1	384.9	488.9	35.3
2	387.9	488.8	37.1
3	386.4	488.8	37.8
4	388.5	489.7	36.0
5	381.8	488.8	36.2

Table 2 Results of tensile test of ESW95

Specimen	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
1	962.4	995.0	16.4
2	947.7	991.2	16.2
3	940.1	983.9	16.0
4	947.5	993.4	16.0
5	960.3	987.6	16.6

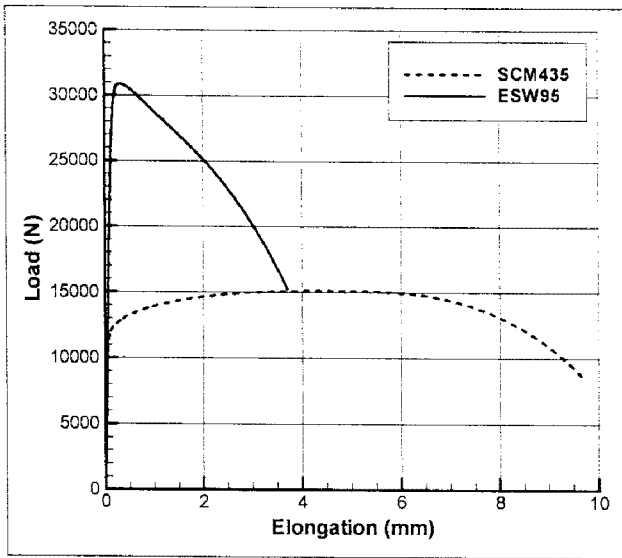


Fig. 2 Experimental load-elongation curves

Fig. 3에 획득된 진응력-진변형률 곡선을 나타내고 있다. 이 결과에서 보는 바와 같이 파단직전까지 SCM435는 변형경화가 발생하는 반면, ESW95는 0.6의 유효변형률 부근에서 유동응력이 최대가 되고 그 이후에는 연화가 발생함을 알 수 있다. 대체적으로 ESW95는 변형경화능을 보이지 않고 있다.

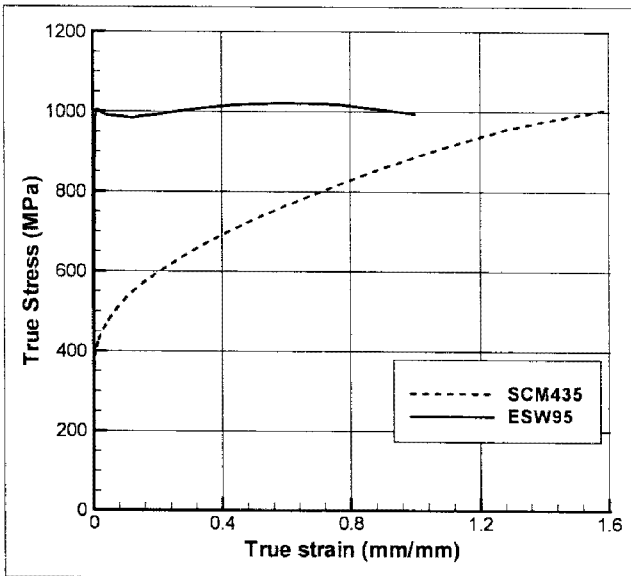


Fig. 3 True stress-strain curves

한편 획득된 진응력-진변형률의 관계의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 3의 유동응력 곡선을 이용하여 Fig. 1의 인장시편에 대한 인장시험을 시뮬레이션하여 Fig. 4에 시편의 형상 변화 결과와 Fig.

5에 하중-변위 곡선을 나타내었다. Fig. 4로부터 두 재료의 인장시험 시의 시편 변형 형상이 크게 다름을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5로부터 탄성영역을 제외한 대부분의 영역에서 인장시험의 실험과 해석 결과가 공학적으로 정확하게 일치함을 알 수 있다.

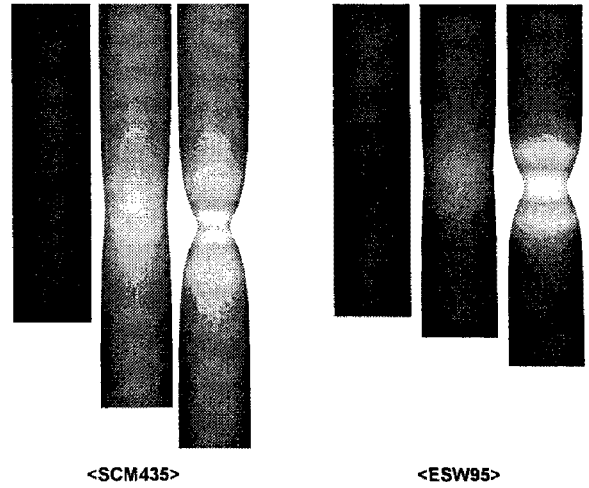


Fig. 4 Predicted deformation of the specimen

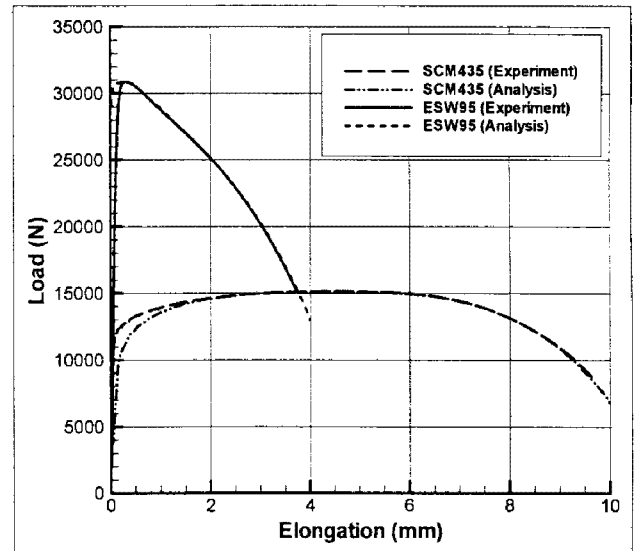


Fig. 5 Comparison of experiments with predictions of the load-elongation curves of the tensile tests

### 3. 적용 연구

본 장에서는 2장에서 인장시험에 의하여 획득된 유동응력 정보를 이용하여 볼스타드 단조 공정을 시뮬레이션하여 그 결과를 비교하였다. 공정 시뮬레이션의 결과에 영향을 비교적 많이 미치는 마찰법칙으로 Coulomb 마찰법칙을 사용하였으며,

마찰계수는 0.05로 가정하였다. 사용된 단조 시뮬레이터는 AFDEX/2D이다.

적용 대상 공정은 4단으로 구성되어 있다. Fig. 6에 공정도를 나타내었으며, Fig. 7과 Fig. 8에서 주요 결과를 비교하였다. Fig. 7은 제3단계와 제4단계에서 금형에 작용하는 접촉응력을 나타내고 있다. Fig. 8은 성형하중의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 두 재료에 대한 접촉응력과 성형하중이 크게 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

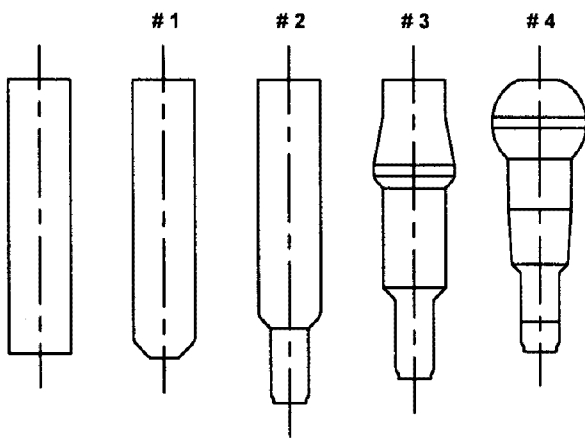


Fig. 6 Forging process of a ball-stud

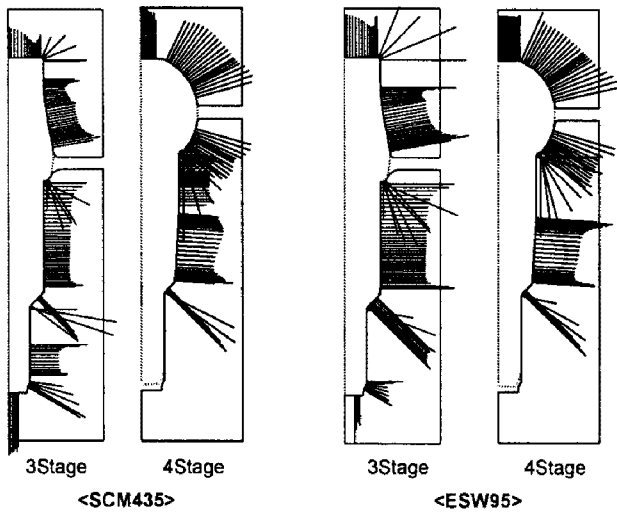


Fig. 7 Comparison of interfacial stresses exerted on the die-material interface

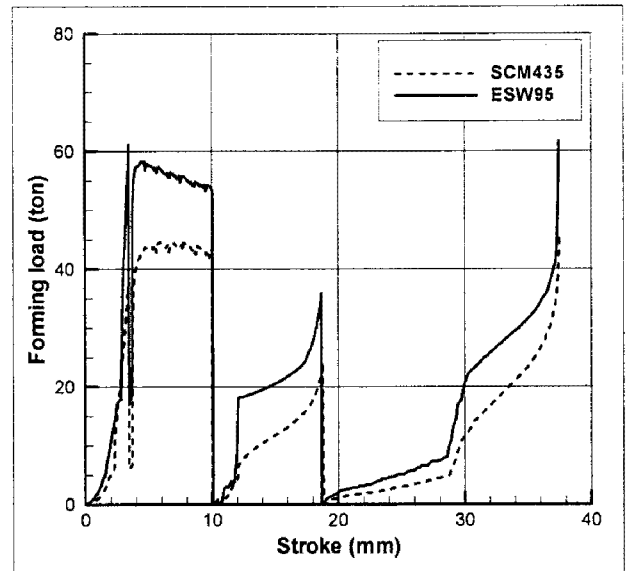


Fig. 8 Comparison of forming load-stroke curves

#### 4. 결론

고주파유동가열 열처리된 선조질강은 초기항복응력이 일반강 또는 원소재에 비하여 높은 반면, 변형경화가 거의 없는 것으로 나타났다. 기존의 볼스타드의 제조 공정에 선조질강 ESW95를 시뮬레이션을 통하여 적용해 본 결과, 하중의 증가가 크게 나타났으며, 변형 경화가 발생하지 않기 때문에 기존 공정에 비하여 공정 후미에서의 하중 증가가 상대적으로 작게 나타났다. 그러나 그 절대치는 SCM435를 사용하는 기존의 공정에 비하여 여전히 25% 정도 크게 나타났다. 이러한 단점에도 불구하고, 수요자 입장에서의 장점, 즉 후속 공정 최소화와 제조비용 절감, 고강도 재료 사용으로 인한 중량 절감 및 연비 향상, 에너지 절약의 세계적 추세, 후처리 시의 유독성 물질 사용 억제 등으로 인하여 선조질강과 같은 고기능성 소재의 사용의 증가는 지속될 것이다.

이러한 선조질강의 거시적 특성은 관련 기계 부품의 제조 공정에서 많은 변화를 초래할 것이다. 첫째, 단조 자체만 볼 때, 기존의 공정설계를 적용하기가 용이하지 않다. 따라서 공정의 최적화와 금형 재료와 금형 구조의 혁신이 불가피하다. 둘째, 전후처리 공정의 변화가 발생할 것이다. 우선 현재 성공적으로 적용되고 있는 타이로드(Tie-rod)의 제조 공정에서 보는 바와 같이 에너지의 사용과 환경의 파괴를 부르는 후처리 공정의 생략이 예상된다.

## 후 기

본 연구는 2단계 BK21사업, (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터, 공통핵심기술개발의 지원으로 실시된 연구 결과의 일부임.

## 참 고 문 헌

- [1] 안순태, 야마오카유키오, 10-2001-0056917, 09-14. 2001.
- [2] M. S. Joun, I, S, Choi, J. G. Eom, M. C. Lee, 2007, Finite element analysis of tensile testing with emphasis on necking, Computational Material Science, Vol. 41, No. 1, pp. 63-69.
- [3] 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, Mechanics of Material, in press.
- [4] <http://www.afdex.com>