

냉간 단조용 비조질강의 성형성과 기계적성질 연구

이영선* · 이정환* · 이상용*

(1998년 6월 16일 접수)

The Study on the Mechanical Properties and Formability of Non-Heat-Treated Cold Forging Steels

Y. S. Lee, J. H. Lee and S. Y. Lee

Abstract

Elimination of the heat treatment process is very important in automation of metal forming, since controlling heat treatment by computer has many difficulties and it has bottle neck problem. Non-heat-treated steels, materials which are not in need of heat treatment, have been developed for cold forging. However, to apply non-heat-treated steel to structural parts, it is necessary to prove reliability of mechanical properties. In order to define the reliability of mechanical properties, we have investigated microstructure, hardness, the tensile strength, compressive strength and tensile fatigue strength for both steels. Considering the results of high cycle fatigue test for both specimen, the characteristics of non-heat-treated steel are decided on the yield strength. It has same tendency for heat-treated steel. Therefore non-heat-treated steel which has the appropriate yield strength may be applied in cold forging.

Key Words : Heat-Treated Steel, Non-Heat-Treated Steel, Formability, Flow Stress, Tensile Test, Compression Test, Fatigue Test, AISI4135, LH85, Baking

1. 서론

철강 단조품을 이용하는 부품들의 제조 공정에 있어서 자동화를 통한 제조원가 감축을 위해 추진되는 노력들 가운데 에너지 절감 효과 및 자동화 라인에 필수적인 요소는 단조 후의 열처리(Q/T)공정의 제거에 있다. 따라서, 단조 후 열처리를 생략할 수 있는 비조질강 및 단조공정 개발에 대한 많은 연구들이 수행되어 국내에서도 열간단조품의 경우는 크랭크샤프트, 휠 허브 등 인성이 요구되지 않는

부품을 중심으로 많이 적용되고 있으며, 자동차용 커넥팅 로드를 비롯하여 너클 등에 적용되는 비조질강의 제품이 개발된바 있다.⁽¹⁾ 또한, 냉간단조용 비조질강에 대한 개발 역시 많은 연구가 이루어져 일본의 경우는 神戸製鋼(KNCH계)과 山陽特殊製鋼(SMn계), 新日本製鐵(NHF계), 住友金屬(SUC계), 大同特殊鋼(MC계) 등에서 개발이 완료되어 적용이 이루어지고 있다.⁽²⁾ 국내에서도 볼트류의 경우는 개발이 이루어진바 있으나, 관련시장의 미성숙 및 품질에 대한 신뢰성 결여로 양산은 이루어지지 않고

* 한국기계연구원 소성가공연구팀

있다.

본 연구에서는 기존 사용되고 있는 조질강과 비조질강의 소성변형실험을 통하여 성형성 평가를 수행하고 기계적성질을 비교분석하므로써 비조질강의 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 특히, 단조소재의 변형능, 변형저항 등 변형거동을 정량적으로 해석함과 동시에 재료의 기계적성질의 산포를 줄여서 안정된 성형조건을 제시하고, 비조질강 개발시 일반적인 고강도 추구에 따라 잃게되는 성형성 저하를 방지하여 금형의 수명향상과 안정화를 꾀하여 잦은 금형 교체로 인한 시간 소모와 생산라인 가동의 중단 때문에 발생하는 무인 자동화라인의 효율 저하를 방지하고자 하였다.

2. 실험 내용

냉간단조용 비조질강은 조질강과는 달리 냉간단조 후 기계적 성질을 얻기 위한 열처리(Q/T)공정을 거치지 않고 제품으로 제조된다. 또한, 비조질강은 조질강과는 달리 단조시 성형성 향상을 위해 필요한 구상화 소둔공정을 거치지 않으므로 공정단축 측면에서는 유리하지만 단조에 소요되는 하중이 상대적으로 높아지며 금형 수명의 감소를 초래할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 비조질강의 성형성을 분석하여 조질강과 비교하므로써 제조공정의 생산성을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하고 냉간단조시 소재 내부에 잔류하는 응력이 제품의 기계적특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 가공도와 열처리 변화에 따른 소재 특성을 분석하였다.

2.1 조질강과 비조질강의 제조공정 비교

비조질강을 이용하는 제품은 제조공정 단축에 따른 원가절감을 꾀할 수 있다. Fig. 1은 조질 강을 사용하는 제조공정과 비조질강을 이용하는 제조공정을 비교한 것으로 원소재의 구상화 소둔 열처리공정, 소입(Quenching), 소려(Tempering) 등의 공정을 생략할 수 있다.

2.2 냉간단조 소재의 종류 및 특징

본 연구에서 사용한 조질강은 AISI4135, 비조질강은 외국산 비조질 고장력 소재중 大同特殊鋼에서 제조된 선재를 彩田製線에서 항온변태처리 후 Drawing한 것으로 일반적으로 가장 많이 사용되는 비조질강 소재인 LH85를 이용하여 비교·분석하였다.

조질강인 AISI4135와 비조질강인 LH85소재의 화학조

성은 Table 1과 같다. AISI4135소재는 높은 경화능과 피로저항, 내마모성과 내충격성을 갖는 Cr-Mo으로 충격강도가 높고 피로강도 대 인장강도(Fatigue Strength/Tensile Strength)비가 높은 소재로서 볼트, 축, 기어 등에 사용되는 대표적 구조용강이다. 반면에 LH85소재는 AISI4135소재에 상당하는 강도와 기계적성질을 가지는 비조질강으로, Table 1에 나타나 있는 바와 같이 LH85소재는 AISI4135소재에 비해 냉간단조성향상을 위해 탄소함량은 적게하고 Mn함량은 변형저항과 가공경화율을 높이기 위해 크게 증가되어 있다. 일반적인 압연공정과 구상화 소둔에 의해 냉간단조용 소재로 사용되는 AISI4135와 달리 LH85소재는 냉간단조 후 열처리(Q/T) 공정을 생략하여도 소정의 기계적성질을 얻을 수 있도록 조직의 미세화를 위한 제어압연, 제어냉각의 적용에 의해 미세하고 가공성이 좋은 조직을 달성하고, 성분변동에 따른 기계적성질의 불균일을 감소시키기 위해 노외정련에 의해 화학성분이 조정된 특징을 가지고 있다.

Fig. 2는 AISI4135소재와 LH85소재의 냉간단조전 조직을 나타내고 있는데 AISI4135소재는 냉간단조시 성형성 향상을 위하여 구상화소둔 처리된 상태(구상화율 : 약 95% 이상)를 나타내며 LH85소재는 제어압연을 통하여 미세한 Ferrite-Pearlite 조직을 나타내고 있다.

AISI4135와 LH85소재의 기계적성질은 Table 2와 같다. AISI4135소재는 90 Kg/mm² 이상의 인장강도와

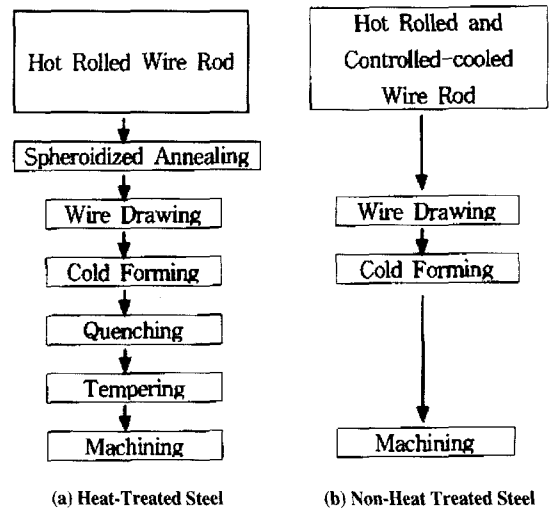


Fig. 1 Manufacturing processes in using the heat-treated and non-heat-treated steels

Table 1 Chemical compositions of AISI4135 & LH85

Type	Name		C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr
Heat-treated steel	AISI 4135	Spec.	0.33 ~ 0.38	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.85	~ 0.030	~ 0.030	0.15 ~ 0.30	0.90 ~ 1.20
		Analysis	0.36	0.21	0.68	0.014	0.026	0.16	1.01
Non-heat-treated steel	LH85	Spec.	0.19 ~ 0.25	0.10 ~ 0.35	1.35 ~ 1.65	~ 0.030	~ 0.035	-	-
		Analysis	0.22	0.24	1.48	0.016	0.036	0.028	0.008

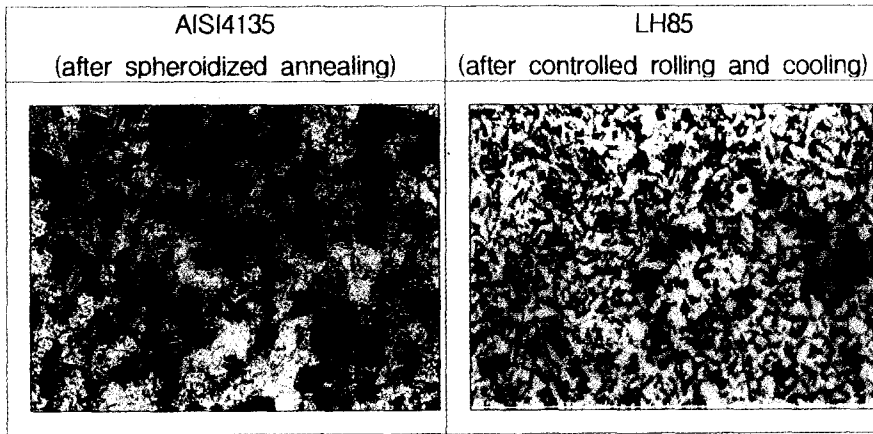


Fig. 2 Optical microstructure of AISI4135 and LH85 in wire rod

15% 이상의 연신률을 나타내며 높은 피로강도를 갖는 소재이다. LH85소재 또한 85 Kg/mm² 이상의 인장강도와 15% 이상의 연신률을 나타내며 베이킹처리 후에는 인장강도 90 Kg/mm² 이상의 우수한 특성을 갖고 있다. 현재까지 LH85소재가 적용된 대부분의 경우가 볼트류이며 볼트류들은 내식성 향상을 위해 표면에 도금처리를 하는

것이 일반적으로, 베이킹 처리는 도금처리 후에 필수적으로 적용되는 공정으로 도금 시에 발생하는 수소가 제품에 잔류되면 수소취성을 나타내므로 이를 방지하기 위해 거치는 탈수소 공정이며 베이킹처리(350℃, 30분)후 코트렐(Cottrel) 효과에 의해 강도가 증가되는 것으로 알려져 있다.

Table 2 Mechanical properties of AISI4135 and LH85

Materials	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation(%)
AISI4135 (after Q/T)	785 ~	930 ~	15 ~
LH85 (after Rolling)	775 ~	834 ~	15 ~
LH85 (after Stress Relief)	829 ~	883 ~	-
LH85 (after Baking)	848 ~	902 ~	-

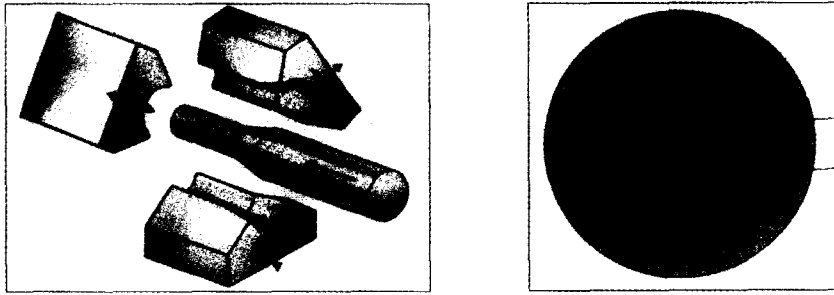


Fig. 3 Forming method and diagram of rotary swaging

Table 3 Experimental conditions of forming amount and heat treatment

Reduction of Area	AISI4135					LH85				
	0 %	17.2 %	36.0 %	64.0 %	77.0 %	0 %	34.7 %	43.8 %	60.0 %	
Heat Treatment	as Swaged	Quenching & Tempering Q : 850°C, 30min. T : 550°C, 1hr.				as Swaged	Stress Relief (190°C, 4hr.)		Baking (350°C, 30min.)	

소재제조 회사로부터 제공된 자료에 의하면 피로강도 (반복회수 106 이상 기준) 또한 AISI4135의 경우 88 N/mm²인데 반해 베이킹처리된 LH95(인장강도 95 kg/mm² 이상)소재의 경우는 240 N/mm²로서 매우 높은 특성을 나타내고 있다. 그러나, 이상의 자료들은 대부분 베이킹 처리 후에 대한 것 들이며 도금처리를 하지 않는 제품의 경우는 냉간단조 후의 기계적 성질을 가공도와 열처리 유무에 따른 변화를 정량적으로 분석하는 것이 매우 중요하다. 가공도에 따른 변화를 조사하기 위한 실험으로는 Rotary Swaging을 이용하여 소재의 단면감소율을 변화시켰으며 열처리는 응력제거와 베이킹처리를 통하여 조직, 경도, 인장특성, 피로특성 등에 대한 영향을 조사하였다. Rotary Swaging이란 소재의 외경을 감싸고 있는 두 개 이상의 다이를 사용하여 봉이나 튜브의 횡 단면을 성형시키는 가공방법으로 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 다이가 공작물의 외주를 회전하면서 축선의 직각방향으로 힘을 가하여 소재의 외경을 감소시켰다.

2.3 실험내용

조질강과 비조질강간의 가공도와 열처리 조건에 따른 기계적 성질의 변화를 조사하기 위해 수행된 실험조건은

Table 3과 같다. 조질강인 AISI4135의 경우는 Swaging을 통하여 원소재 지름 20 mm에서 18.2 mm, 16.0 mm, 12.0 mm, 9.6 mm로 단면감소율을 변화시켜 가공도에 따른 특성 변화와 열처리(Quenching : 850°C x 30분, Tempering : 550°C x 1시간) 후의 특성을 조사하였다. 또한, 비조질강인 LH85는 원소재 지름 12 mm에서 9.7 mm, 9.0 mm, 7.6 mm로 가공하여 가공도 효과와 가공 후 응력제거 열처리(190°C x 4hr)와 베이킹(350°C x 30분)등의 열처리 효과를 조사하였다.

가공도와 열처리 변화에 따른 특성분석은 조직, 경도 측정과 인장시험을 통한 항복강도, 인장강도, 연신률 등을 조사하였으며 압축시험을 통하여 인장강도와 압축강도를 각 소재 조건별로 비교 분석하였다. 피로시험에 사용된 시편은 AISI4135의 경우는 약 60%의 가공도를 준 다음 Q/T처리를 거쳐 제작하였으며 LH85소재의 경우는 44%의 가공도를 준 다음 어떤 열처리도 거치지 않고 시편을 제작하였다. 따라서, 본 피로시험의 결과로부터 얻어지는 결과는 가공에 의해 내부에 응력이 잔류되는 상태인 비조질강의 피로수명에 대한 신뢰성을 입증할 수 있는 중요한 정보이므로 구조용 부품에 대한 비조질강의 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가공도와 열처리 조건에 따른 성형성 및 기계적 성질 비교

3.1.1 경도 및 조직

Swaging에 의해 가공된 소재는 가공도가 증가함에 따라 조직이 치밀해지며 경도 또한 증가된다. Fig. 4는 가공도와 열처리에 따른 소재의 경도 변화를 나타내고 있다. AISI4135 소재의 경우 HRB 88.4의 원소재 경도는 가공도 77%의 경우 104.7 까지 증가된다. 이는 Fig. 5의 조직사진에서 알 수 있듯이 구상화된 탄화물들이 단면감소율이 증가됨에 따라 분포가 균일해지며 밀도 또한

증가되기 때문이다. 그러나, 열처리(Q/T) 후에는 원소재의 경도와 가공후의 경도가 거의 동일하게 나타나는데 이는 열처리에 의한 상변태로 인해 구상화 소둔 조직이 Quenching에 의해 고경도 취성의 Martensite 조직으로 변화되며 A_{c1} 변태점 보다 낮은 온도로 재가열하는 Tempering 공정을 거치는 동안 Tempered-Martensite 조직으로 변화되어 인성을 회복한다. 결국, 가공도의 영향보다는 열처리 조직의 영향이 지배적으로 작용되기 때문이다.

비조질강 소재인 LH85의 가공도와 열처리에 의한 경도변화는 가공된 상태에서는 AISI4135 소재와 동일한 양상을 보여 가공도가 증가함에 따라 경도 또한 증가되나 그 양은 매우 작은데 그 이유는 소둔조직인 조질 소재와는 달

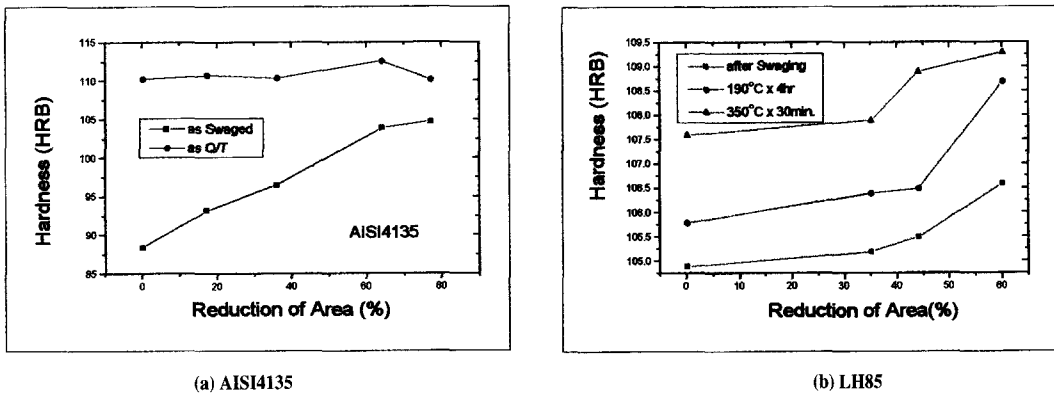


Fig. 4 Hardness of AISI4135 and LH85 according to the reduction of area and heat treatment

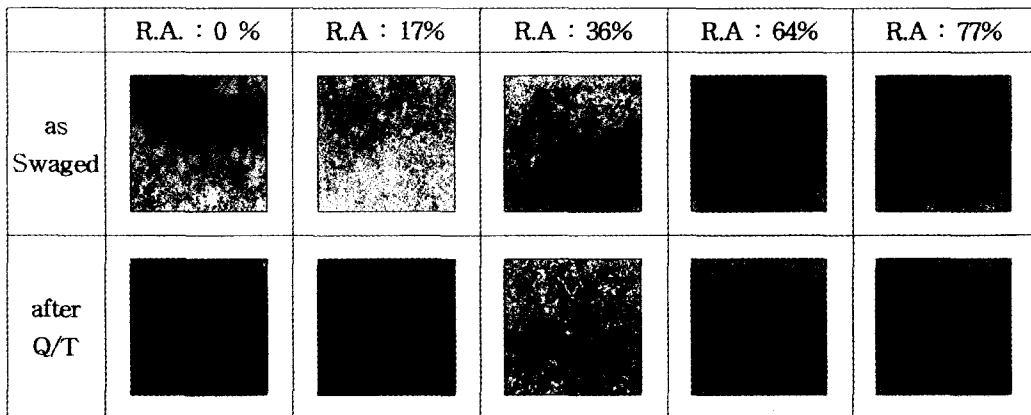


Fig. 5 Microstructure of AISI4135 according to the reduction of area and heat treatment

리 LH85 소재는 제어압연을 통해 얻어진 원소재의 Ferrite-Pearlite 조직이 매우 미세하기 때문에 가공도가 증가되어도 조직의 미세화가 많이 이루어지지 않기 때문이다. 그러나, 190℃에서 4시간 동안 처리한 응력제거 열처리나 350℃에서 30분 동안의 베이킹처리 후의 경도는 열처리전 보다 HRB 기준으로 6이상 증가되는데 이는 코트렐(Cottrell)효과에 의한 것으로 Fig. 6에 나타나 있는 바와 같이 조직의 변화는 관찰되지 않는다.

3.1.2 압축시험에 의한 유동응력

소재의 성형성에 관한 고찰을 위해 압축시험을 통하여 가공도와 열처리 변화에 따른 변화를 조사하였다. Fig. 7은 AISI4135와 LH85소재의 가공도와 열처리에 따른 유동응력을 비교한 그래프로서 열처리를 하지 않은 Swaging 상태의 유동응력의 변화는 원소재 보다 77%의 가공이 이루어진 경우가 약 20 Kg/mm² 이상 높은 것으로 나타나고 있다. 이러한 차이는 경도 증가의 원인과 동일한

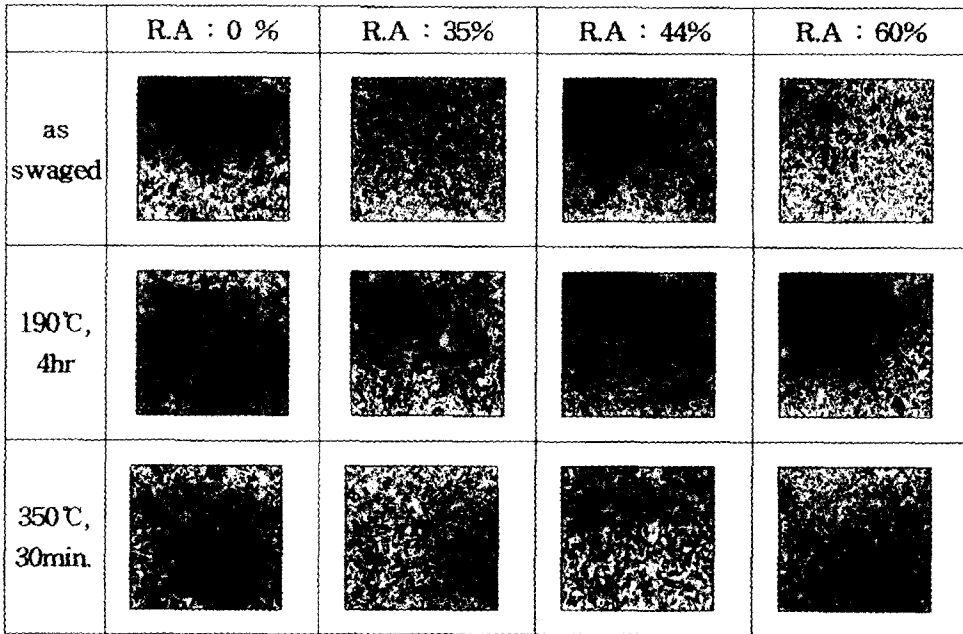


Fig. 6 Hardness of LH85 according to the reduction of area and heat treatment

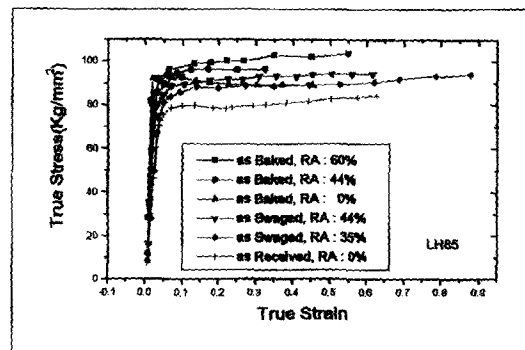
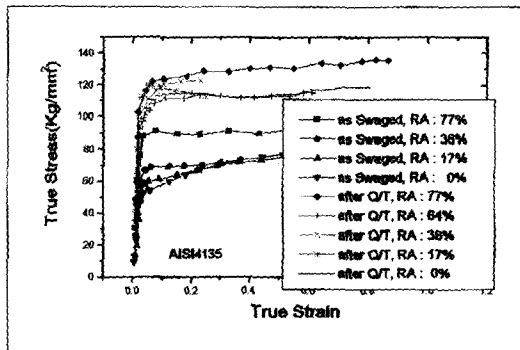


Fig. 7 Flow stress of AISI4135 and LH85 according to the reduction of area and heat treatment

Table 4 Flow stress of AISI4135 according to the reduction of area

Reduction of Area	0 %		17%		36%		77%	
	K	n	K	n	K	n	K	n
as Swaged	89.4	0.2	85.8	0.17	95.7	0.18	102.3	0.11

Table 5 Flow stress of LH85 according to the reduction of area

Reduction of Area	0 %		35%		44%		60%	
	K	n	K	n	K	n	K	n
as Swaged	102.0	0.19	104.5	0.16	105.6	0.13	108.4	0.11

Table 6 The results of tensile test of AISI4135 according to the reduction of area and heat treatment

R. A.	Heat Treatment	Yield Strength (Kg/mm ²)	Tensile Strength (Kg/mm ²)	Elongation(%)
0%	before Q/T	47.52	55.26	38.74
	after Q/T	98.31	109.60	17.09
36%	before Q/T	69.15	71.30	19.05
	after Q/T	97.46	110.16	15.51
77%	before Q/T	90.39	92.85	9.631
	after Q/T	101.50	111.80	13.69

이유에 의해 발생하는 것이며 경도 증가와 인장강도 증가에서도 동일한 결과를 나타낸다. 열처리 후의 압축시험은 Martensite 조직인 소재이므로 압축가공에 부적합하여 시험이 곤란하였으나 그 양상은 열처리전과 동일하였다. 유효응력과 변형을 관계식($\sigma = Ke^n$, K : 재료상수, n : 가공경화지수)으로 각 조건별 압축시험의 결과를 요약하면 Table 4와 같다. 재료상수는 가공도가 증가함에 따라 점차 증가되며 가공경화지수는 감소함을 알 수 있다.

Table 5는 LH85 소재의 가공도와 베이킹처리에 따른 압축시험 결과를 나타내고 있으며 AISI4135와 동일한 변화를 나타내어 가공도가 증가될수록 재료상수는 증가되고 가공경화지수는 감소되었다.

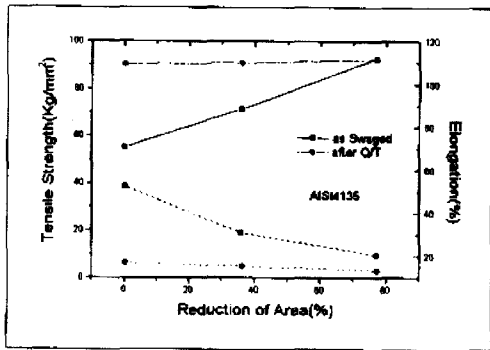
원소재의 성형성을 나타낼 수 있는 압축한계는 AISI4135와 LH85소재 모두 80% 이상에서도 표면에 크랙발생이 없는 우수한 성형성을 보였으나 유효응력은 원소재의 경우 LH85 소재가 AISI4135 보다 1.15배 정도 높게 나타나고 있다.

3.1.3 인장특성

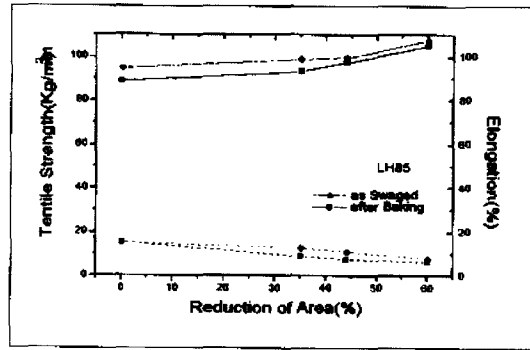
Fig. 8은 AISI4135와 LH85 소재의 인장강도와 연신률에 대한 변화를 나타내고 있다. LH85의 인장강도와 연신률은 베이킹처리 전후 모두 가공도가 증가함에 따라 인장강도는 증가되고 연신률은 감소된다. 그러나, AISI4135의 경우 Q/T후의 성질은 거의 변화가 없는데 반해 LH85소재는 베이킹전후 모두 가공도가 증가됨에 따라 인장강도는 증가되며 연신률은 감소되고 있다. 분석 기준인 가공도 34% 영역에서 LH85소재(베이킹전 상태)의 인장강도와 연신률은 각각 93.39 Kg/mm²와 9%를 나타내고 있어 인장강도 110 Kg/mm²와 연신률 15%를 나타내는 AISI4135에 비해 인장특성은 다소 떨어지고 있다. 그러나, LH85의 경우도 베이킹 처리 후에는 인장강도 100 Kg/mm², 연신률 13%로 AISI4135 소재와 거의 동일한 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 각 조건에 따른 인장특성은 Table 6과 Table 7에 나타내었다.

Table 7 The results of tensile test of LH85 according to the reduction of area and heat treatment

R.A.	Heat Treatment	Yield Strength (Kg/mm ²)	Tensile Strength (Kg/mm ²)	Elongation (%)
0%	before Baking	85.84	88.99	15.49
	after Baking	93.66	94.96	15.44
35%	before Baking	88.63	93.39	8.958
	after Baking	95.31	99.03	12.96
44%	before Baking	93.99	97.37	7.369
	after Baking	98.24	99.77	11.17
60%	before Baking	101.60	105.0	6.489
	after Baking	105.52	107.84	8.08



(a) AISI4135



(b) LH85

Fig. 8 The results of tensile test of AISI4135 and LH85 according to the reduction of area and heat treatment

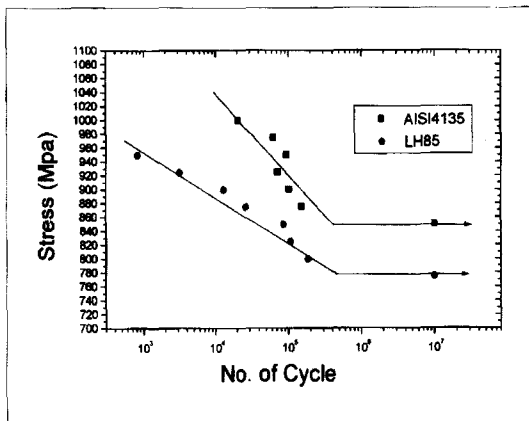


Fig. 9 Fatigue strength of AISI4135(as heat-treated) and LH85(as swaged)

3.2 냉간단조소재의 피로특성 비교

냉간 비조질강의 적용에 대한 신뢰성을 입증하는데는 소재의 피로특성이 가장 중요하다. 따라서, AISI4135와 LH85소재의 피로특성을 상대 비교하였으며 가능한한 제품과 상사시키기 위해서 가공도가 제품과 유사한 조건의 시편을 제작하여 시험을 수행하였다. Fig. 9는 Swaging 가공 후 Q/T 처리된 AISI4135 소재와 Swaging된 상태의 LH85 소재에 대한 인장피로시험 결과로 LH85소재가 AISI4135소재에 비해 약 70MPa정도 피로한도가 낮게 나타나고 있는데 이는 인장강도의 차이와 동일한 크기이며 따라서, 인장강도가 동일한 소재를 사용할 경우는 피로강도 또한 기존제품과 동일한 특성을 만족시킬 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

냉간단조 공정의 비조질강 적용은 조질강에 비하여 공정생략과 원가절감과 같은 많은 장점을 갖고 있다. 비조질강의 적용을 위해 비조질강과 조질 소재에 대하여 단조 소재로서의 성형성과 소성변형량에 따른 기계적성질의 변화를 분석을 통하여 비조질강의 적용 가능성을 한층 높였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) AISI4135소재와 LH85소재 모두 가공한계 80% 이상의 매우 우수한 성형성을 나타내었다.

(2) LH85소재의 유동응력은 AISI4135소재에 비해 약 1.15배 정도 높으며 가공경화의 크기는 유사하였다.

(3) LH85소재의 인장특성은 원소재 상태에서는 거의 유사하지만 가공도가 증가될수록 AISI4135에 비해 다소 떨어지며, 가공도인 34% 영역에서 LH85소재(베이킹전 상태)의 인장강도와 연신률은 각각 93.39 Kg/mm²와 9%를 나타내고 있어 인장강도 110 Kg/mm²와 연신률 15%를 나타내는 AISI4135에 비해 인장특성은 다소 떨어지고 있다

(4) 피로시험결과 피로 특성은 LH85소재가 AISI4135에 비해 약 70MPa정도 피로한도가 낮게 나타나고 있는데 이는 인장강도의 차이와 동일한 크기이며 따라서, 인장강도가 동일한 소재를 사용할 경우는 피로강도 또한 기존 제품과 동일한 특성을 만족시킬 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) 조원석, 조응근, 조윤성, 오승택, 1994, '자동차 열간단조 부품용 비조질강의 개발', Proc. of the eighth conference on mechanical behaviors of materials, p333.
- (2) H. Kanisawa, T.Mori, Y. Okuno, 1990, 'Development of Wire Rod with Low Flow Stress for Non-heat-treated Fastners', Wire Journal International, April, p.32~37.
- (3) Hiroshi Itojiri, Morifumi Nakamura, Yasuhiro Hosogi, 1995, 'Steel Wire Rod for High-Tensile Non-heat-treated Type Bolts', SEAIISI Quarterly, July, p.71~75.
- (4) Chester J. Van Tyne, George Krauss, David K. Matlock, 'Microalloying Forging Steels', 1996, TMS.