

비조질강 온간단조를 위한 공정검토

박종수*·강정대*·이영선*·이정환*

Study of Warm Forging Process for Non-Heat-Treated Steel

J.S.Park*, J.D.Kang*, Y.S.Lee*, J.H.Lee*

Key Words: Non-Heat-Treated Steel(비조질강), Warm Forging(온간단조), Flow Stress(유동응력)
Controlled Cooling Rate(제어냉각속도), Hardness(경도), Tensile Property(인장성질)

Abstract

As a part of efforts to examine feasibility of warm forging near-net-shape process for non-heat-treated steel to replace quenched and tempered S45C steel, the optimized process condition has been determined to be 820°C for heating, 10/sec for strain rate of forging and approximately 250MPa for flow stress from observed results such as the A_3 transformation temperature of about 790°C, the fully dynamic recrystallized behavior between 800°C and 850°C when compressed up to 63% engineering strain at 10/sec strain rate, and the high temperature microstructural stability. Also, controlled cooling rate of 6.3°C/sec by water-spraying at a rate of 0.10cc/sec-cm² for 60seconds followed by air-cooling right after forging process has been considered in this study as a feasible approach based on examination of the microstructure of mixed α -ferrite and pearlite, the hardness and tensile properties meeting specification, and the reduced total cooling time to room temperature. Successive works would be carried out for the impact strength, machinability, and forgeability at this process in the near future.

1. 서론

기계구조용강에서 풀림, 뜨임(Q/T)처리와 같은 조질처리를 생략하여도 조질처리된 강과 동일한 재질이 되도록 미소합금원소(V, Ti, Nb, B 등)들을 첨가하여 제조된 강을 비조질강이라하며, 열간단조용, 냉간단조용, 직접절삭용등으로 구별된다. 이러한 종류의 강에서는 열처리공정 생략에 의한 에너지 감소 및 납기단축의 장점이 기대된다. 열간단조용 비조질강에서의 탄질화물은 1000°C 또는 1150°C에서 고용되므로 단조가열온도는 1200°C~1250°C를 추천하고 있으며, γ -austenite 상에 고용되어있던 미소합금원소들은 냉각도중에 α -ferrite 상 또는 pearlite내 ferrite 상에 탄질화물

로 석출되므로 급랭의 경우에는 기계가공성이 좋지 않고, 서냉시에는 석출물과시효 및 강도가 감소되기 때문에 적정냉각속도는 50~80°C/min으로 보고되어져있다.^{1), 2), 3)} 본 실험에서는 500g 정도의 자동차용 부품을 제조하기 위하여 열간단조용 비조질강을 γ 상 하부영역의 온도범위인 800°C에서 900°C사이에서의 온간단조 가능성을 검토하고자 하였으며, 현재 고려중인 공정흐름은 소재절단, 가열, 프레스단조, 제어냉각, 기계가공, 조립으로 구성되어 있다. 따라서 비조질강 온간단조를 위한 가열온도, 변형속도, 유동응력, 제어냉각속도 및 냉각속도에 따른 미세조직, 경도, 인장성질 등을 실험 조사하였다.

* 한국기계연구원, 재료공정연구부

Table 1 Chemical composition of non-heat-treated steel(w/o)

Element	C	Si	Mn	P	S	V	Ti	Mo	N ₂	Fe
Wt. %	0.40	0.60	1.00	0.005 이하	0.05	0.10	0.02	0.03	0.01	Rem

2. 실험방법

2.1 성분 및 A₃온도 측정

γ -austenite 영역에서의 온간단조를 위한 가열 온도를 결정하기 위하여, 화학성분이 Table 1.과 같은 직경 48mm 봉 형상의 S45C 대체용 열간 비조질강의 A₃온도를 다음과 같이 확인하였다. 30 mmL×20mmL×20mmT의 소형시편을 750℃와 900℃ 사이 여러 온도에서 전기로에서 30분간 가열한 다음 수냉한 후 광학현미경 조직 검사에 의한 α -ferrite상 및 변태된 γ -austenite상의 가열온도에 따른 분율변화를 측정하여 A₃점을 측정하였으며, 또한 가열온도에 따른 경도변화에서 구한 A₃점을 분율변화로부터 구한 결과와 비교하였다.

2.2 온간단조유동응력 측정

위에서 구한 A₃온도 이상의 γ -austenite 하부 영역온도에서 온간단조 변형속도 및 변형율에 따른 열간 비조질강의 유동응력을 구하기 위하여, 직경8mm×높이12mm의 압축시편을 가열온도 800℃, 850℃, 900℃ 및 변형속도 0.1/sec, 1.0/sec, 10/sec에서 약 63% 공칭변형율까지 유도가열로를 장착한 Thermecmaster에서 고온진공압축시험하였으며, 압축 후에는 액체질소가스를 노내로 분사시켜 시편을 냉각시켜주었다.

2.3 냉각속도 및 기계적 성질 측정

온간단조 직후에 시편의 냉각속도를 제어하기 위하여 크기 67mmL×48mmW×20mmT(중량 500g)의 시편을 800℃에서 2.5시간동안 전기로 내에서 가열한 후 Table 2.와 같은 냉각조건하에서 상온까지 냉각하였으며, 각 냉각조건에서의 냉각속도는 시편 정중앙 위치에서 열전대를 이용하여 측정하였다. 이때 온간단조 후 금형에서 빼낸 직후의 부품온도를 800℃(금형온도 260℃)로 가정하였다. 또한, 경도 및 상온인장성질을 측정하기 위하여 67mmL×48mmW×20mmT의 시편을 830℃에서 2시간 동안 전기로 내에서 가열한 후 표2에 언급된 수냉을 제외한 냉각조건하에서 상온까지 냉각시켰다. 인장시편 크기는 직경6.25mm×gage length 25mm이었으며, crosshead 속도는 2.50mm/min을 적용하였다. 또한 냉간 sizing에서의 성형하중을 계산할 경우에 참조하기 위한 상온에서의 유동응력을 인장시험결과로부터 구하였다. 이때의 변형속도는 $1.5 \pm 0.2 \times 10^{-3}$ /sec에 해당되었다.

3. 결과분석 및 고찰

3.1 A₃온도 측정 결과

시편을 여러 가열온도에서 30분간 가열한 후 수냉하였을 때, 가열온도에 따른 α -ferrite상 및

Table 2 Summary of cooling conditions.

(Size ; 67mmL×48mmW×20mmT, Weight ; 500g, Heating condition ; 800℃-2.5hr)

Cooling condition	Summary
Air-cooling	Natural cooling in air to room temperature.
Fan-cooling	Air-flow cooling by using an industrial fan to room temperature.
Water-spray/A.C. (1mm dia. hole-60sec)	Water-spray cooling for 60sec through 1mm dia. holes* under atmosphere pressure, followed by air-cooling to room temperature.
Water-spray/A.C. (2mm dia. hole-10sec)	Water-spray cooling for 10sec through 2mm dia. holes* under atmosphere pressure, followed by air-cooling to room temperature.
Water-quenching	Water-quenching to room temperature.

* Each hole is located by a continuous equilateral triangle arrangement at every 10mm distance.

Table 3 Result for volume fraction of α -ferrite phase and transformed γ -austenite phase, hardness, and equiaxed grain or particle size after water-quenched from various heating temperatures.

Heating temperature(°C)		As-received	750	775	800	825	850	900
α phase volume fraction		0.53	0.30	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
γ phase volume fraction		0.47	0.70	0.86	1.00	1.00	1.00	1.00
Hardness(HB)		198	360	480	492	487	456	412
Equiaxed grain or particle size(μm)	α -ferrite	7.3	5.2	2.6	-	-	-	-
	Transformed- γ	7.9	6.8	7.7	11.3	12.3	13.3	13.9

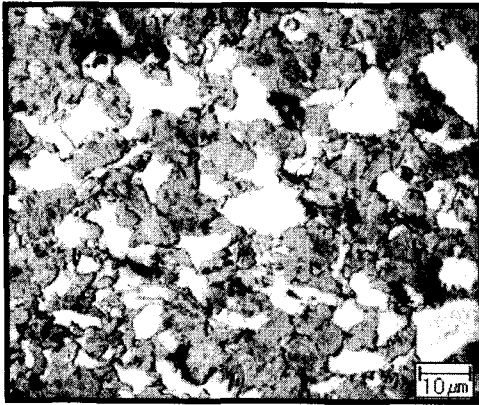


Fig. 1 Microstructure water-quenched from 775°C

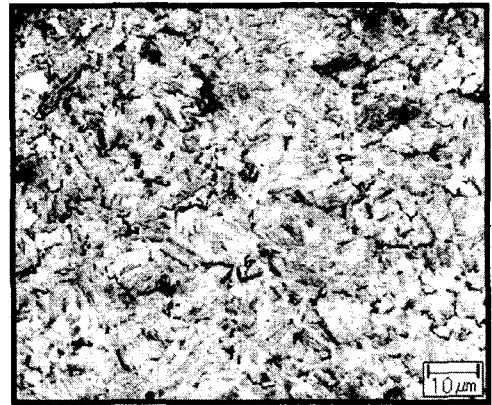


Fig. 2 Microstructure water-quenched from 800°C

변태된 γ -austenite상의 분율, 경도 및 결정립의 변화를 Table 3에 나타내었다. 이때의 대표적 미세조직을 Fig. 1(775°C-30분/수냉)과 Fig. 2(800°C-30분/수냉)에서 보여주고 있다. Fig. 1에서는 α -ferrite상(밝은부분)과 변태된 γ -austenite상(어두운부분)으로 구성된 2상조직을 나타내고 있으며 Fig. 2에서는 변태된 γ -austenite상만으로 된 단상조직으로 되어있다. 따라서 A_3 온도에서 2상영역(α 상+ γ 상)이 단상영역(γ 상)으로 변하기 때문에, 가열온도가 증가함에 따라 α -ferrite상의 분율은 점진적으로 감소하다가 A_3 점 이상에서는 γ -austenite상만이 존재하게 되므로 분율변화로부터 측정된 A_3 점은 약790°C에 해당되었다. 경도는 2상영역(α 상+ γ 상)에서는 온도가 증가함에 따라 증가하다가 A_3 점이상의 단상영역(γ 상)에서 감소하는 이유는 2상(α 상+ γ 상)영역에서는 온도가 증가함에 따라 연질의 α 상 분율이 감소하기 때문

이며, 단상(γ 상)영역에서는 온도가 높을수록 고온에서의 γ -austenite 결정립이 커지고 상온에서의 잔류 γ -austenite 양이 증가하며 또한 미소합금 원소들의 탄질화물(V(C, N), Ti(C, N))의 가열온도에서의 거동과 밀접한 관계가 있는 것으로 사료되었다. 측정경도 변화로부터 구한 A_3 온도는 약790°C 근처이었으며, 이는 분율변화로부터 측정된 A_3 점과 아주 유사하였다. 따라서, 미세조직의 고온안정성(결정입자 및 탄질화물 분산입자)과 시편표면층에서의 산화 또는 탈탄반응을 고려할 경우, 온간단조 가열조건은 790°C(A_3 온도)이상의 γ -austenite하부영역온도에서 단시간 가열이 유리할 것으로 사료되었다.

3.2 유동응력 측정결과

온간단조를 위한 A_3 온도 이상의 γ -austenite 하부영역온도인 800°C, 850°C, 900°C에서 변형속도

0.1/sec, 1.0/sec, 10/sec로 축방향으로 측정된 유동응력 결과를 Table 4.에 나타내었으며, 본 실험 조건에서의 유동응력 측정결과는 예측된 바와 같이 온도가 높을수록, 변형속도가 느릴수록 약 270MPa로부터 약 110MPa 범위 내에서 감소하였으며, 이 결과는 일반 microalloy강의 문헌값⁴⁾과 유사하였다. 기계식 프레스에서의 변형속도는 개략적으로 10/sec에 해당되므로, 변형속도 10/sec하에서의 유동응력은 800℃~900℃ 가열온도에서 200~270MPa 범위로 측정되었다. 또한 약63% 공칭변형률까지 압축된 시편의 미세조직을 조사한 결과, 가열온도 800℃에서 변형속도 10/sec인 시편에서만 완전한 동적재결정 현상에 의한 미세조직이 관찰되었으며, 기타 다른 조건에서는 부분적 동적재결정 조직을 나타내었다. 이때 가열온도 800℃, 변형속도 10/sec에서의 유동응력은 약270MPa이었다.

Table 4 Summary of flow stress-true strain relation

Strain rate (/sec)	Temperature (°C)	Flow stress(MPa)		
		True strain		
		0.6	0.8	1.0
0.1	850	-	135.9	148.7
	900	108.6	110.2	120.2
1.0	850	-	180.7	189.9
	900	147.7	150.0	161.4
10	800	266.0	258.5	-
	850	228.1	224.3	-
	900	196.1	193.2	-

3.3 냉각속도 및 기계적성질 측정결과

비조질강의 기계적성질 및 기계가공성 최적화를 위한 미세조직제어와 냉각공정 길이 최소화를 위한 작업성을 고려할 때 비조질강의 최적미세조직은 Ar'변태에 의한 α -ferrite와 γ -austenite가 냉각도중 변태한 pearlite의 혼합물(이때 분율은 각각 약 0.5)¹⁾이므로, 즉 냉각도중 Ar''변태에 의한 martensite 조직은 정도가 높아 바람직하지 않으므로 냉각도중에 Ar'변태가 관찰되지 않는 냉각조건에서만 냉각속도를 측정하였으며, 단시간 분수에 의한 냉각방법은 냉각작업공간 최소화를 통한 공간 활용도를 높이기 위한 가능성을 확인하기 위하여 시도되었다. 냉각속도 측정은 800℃~600℃사이에서 또는 시편냉각도중 Ar'변태에 의한 발열반응이 연속냉각곡선에 나타날 경우에는 800℃에서 그 직상온도까지의 평균값을 택하였으며, 각각의 냉각조건하에서의 냉각속도 측정결과 및 분수냉각시 분수속도 및 분수량 측정결과를 Table 5.에 나타내었다. 이때 수냉에서의 냉각속도는 분수냉각에서의 측정결과와 비교하기 위하여 측정되었다.

냉각속도에 따른 측정경도 및 축방향에서의 인장성질이 요약된 Table 6.에서 보여주는 바와 같이 냉각속도가 냉각방법에 따라 1.2℃/sec로부터 11.1℃/sec로 증가함에 따라 경도 및 강도는 증가하였으나 연신율은 감소하였다. 미세조직 검사결과, 상기 냉각속도 범위 내에서는 공통적으로 α -ferrite와 γ -austenite가 냉각도중 변태된 pearlite의 혼합물을 보여주었으며 각각의 상의

Table 5 Summary of cooling rate at various cooling conditions.

(Size ; 67mmL×48mmW×20mmT, Weight ; 500g, Heating condition ; 800℃-2.5hr)

Cooling condition	Ar' temp. (°C)	Ar'' temp. (°C)	Cooling rate (°C/sec)	Water-spray rate (cc/sec-cm ²)	Amount of sprayed water
Air-cooling	~650℃	N/O*	1.2	-	-
Fan-cooling	~638℃	N/O	1.8	-	-
Water-spray/A.C. (1mm dia. hole - 60sec)	N/O	N/O	6.3	0.10	197cc/60sec-시편
Water-spray/A.C. (2mm dia. hole - 10sec)	N/O	N/O	11.1	0.65	210cc/10sec-시편
Water-quenching	N/O	100℃	66.7	-	

* Not observed at the cooling curve.

Table 6 Result of hardness and tensile property at various cooling rates

Cooling condition	Cooling rate (°C/sec)	HB	Tensile property			
			YS(MPa)	UTS(MPa)	El(%)	R.A.(%)
As-received	-	198	-	-	-	-
Air-cooling	1.2	185	483	714	31.0	58.2
Fan-cooling	1.8	202	531	736	30.6	58.4
Water-spray/A.C. (1mm dia. hole - 60sec)	6.3	232	552	781	26.8	58.8
Water-spray/A.C. (2mm dia. hole - 10sec)	11.1	247	687	863	25.5	63.3
Specification	-	200~269	441Min.	735Min.	20Min.	45Min.

분율은 약 0.5로 구성되어있었고 단지 냉각속도가 증가함에 따라 pearlite조직이 미세하여짐을 보여주었다. 대표적 미세조직을 Fig. 3에 나타내었다. 전 시편표면에서 약 0.1mm깊이의 탈탄층이 확인되었으며 탈탄층에서의 α -ferrite분율은 탄소함량 감소에 따라 약 0.75정도로 증가하였고, 특히 분수 냉각시편의 표면층에서는 바람직하지 않은 martensite조직이 전혀 관찰되지 아니하였다. 따라서 상기 냉각방법에 의한 냉각속도 제어는 기계적성질, 기계가공성 및 기타 작업성을 고려할 때 매우 합리적인 것으로 사료되었다. 상온에서의 유동응력을 인장시험 결과로부터 구한 결과를 Fig. 4에 $1.5 \pm 0.2 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 변형속도에서 냉각속도에 따라 도시하였다. 약 5% 공칭변화율 만큼 냉각sizing할 경우 유동응력은 냉각속도에 따라 약 660MPa에서 840MPa범위 내에 있었고, 이는 변형속도 10/sec일 때 800°C에서의 유동응력에 대하여 약2.5에서 3배에 해당되었다.

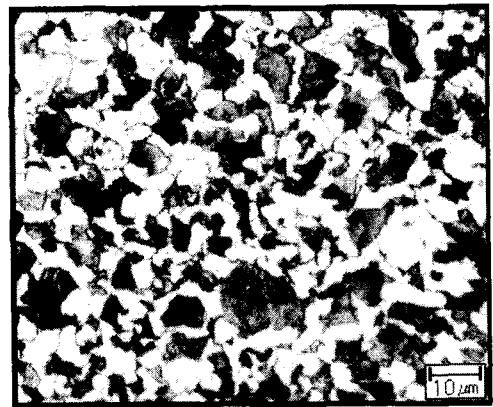


Fig. 3 Typical microstructure at a cooling rate of 11.1°C/sec(when water-sprayed for 10sec through 2mm dia-hole and then air-cooled)

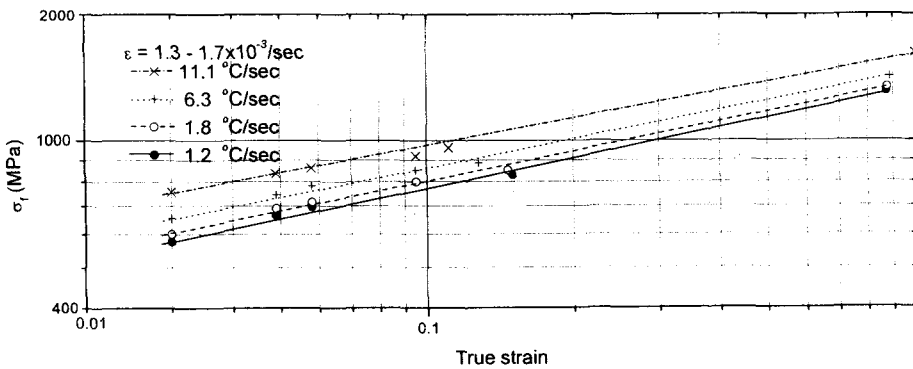


Fig. 4 Room-temperature flow stress at various cooling rates.

4. 결 론

(1) 가열온도에 따른 분율변화 및 경도변화로부터 측정된 A_3 온도는 약 790°C 이었고 미세조직의 고온 안정성 및 시편표면층 열화를 고려할 때 가능한 낮은 온도에서 단 시간 가열이 유리한 것으로 사료되었다. 또한 63% 압축공칭변형을까지의 유동응력 측정을 위한 압축시편에서의 완전동적재결정 조건은 가열온도 800°C 에서 변형속도 $10/\text{sec}$ 였으며, 이때의 유동응력은 약 270MPa 로 측정되었다. 따라서, 온간단조를 위한 가열온도는 약 820°C , 변형속도는 $10/\text{sec}$ 가 적절한 것으로 사료되나, 향후 이 조건에서의 성형성 및 탄질화물 석출거동에 대한 검증이 요구된다. 이 조건하에서의 유동응력은 약 250MPa 정도이었으며, 소재가열방법은 유도가열로 방식이 추천된다.

(2) 온간단조 후 제어냉각은 기계적성질, 기계가공성 및 총 냉각시간을 고려할 때, 1mm dia. hole에서 60초간 분수냉각방식이 최선으로 사료되었다. 이 경우의 미세조직은 α -ferrite 와 pearlite의 혼합물이며, 각상의 분율은 각각 약 0.50이었고 결정입자 크기는 각각 약 $7.5\mu\text{m}$ 정도였다. 또한, 이 조건에서의 기계적성질은 경도 HB232, 항복강도 552MPa , 인장강도 781MPa , 연신율 27%, 단면적 감소율 59%로써 규격조건을 만족시켜주었으나, 향후 이 조건에서의 충격시험 및 기계가공성 검증이 요구된다. 상기조건인 인장시험 결과로부터 구한 상온유동응력은 변형속도 $1.6 \times 10^3/\text{sec}$, 5% 공칭변형율에서 약 740MPa 이었다.

참고문헌

- (1) 이덕락, 1993, "비조질강 제조기술", 월간주단조와 열처리, Vol.11, pp. 133~141.
- (2) 이원식, 1993, "비조질강의 특성과 요소기술", 월간주단조와 열처리, Vol.6, pp. 138~143.
- (3) 왕성도, "열간단조용 비조질강 적용기술", 비조질강, 부산대학교 미세소성연구실 발행.
- (4) DEFORM, "Users Manual", V7.0, SFTC