

## 구조용 중탄소강 SM45C의 열처리에 따른 기계적 성질변화

전 상 조\* · 이 임 균\*\* · 김 송 희\*\*\*

### Heat treatment effect on Mechanical property in SM45C(AISI1045) steel

Sang-Jo Jun\* · Im -Kyun Lee\*\* · Song-Hee Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

The aim of this study is to find out the relationships between the microstructures of SM45C(AISI1045) steel and fatigue crack propagation behaviour. Three microstructures such as (i) as received (fully annealed), (ii) water quenched and tempered, and (iii) oil quenched and tempered were used for fundamental mechanical testing and fatigue crack propagation test. The microstructures of (ii) and (iii) showed superior in tensile strength to (i).

Resistance against fatigue crack propagation was higher in structure (i), while tensile properties were better in structures(ii) and(iii).

It is believed due to that the enhancement of roughness of fracture surface observed in structure (i) increases  $\Delta K_{th}$  and lowers fatigue crack growth rate.

However it does not necessarily mean the quenched and tempered structures (ii) and (iii) are undesirable for the engineering component because fatigue limit in low cycle test appears usually higher in the microstructures of higher strength.

#### I. 서 론

기계 구조용 탄소강은 압연 또는 단조상태 그대로 혹은 Annealing 또는 Normalizing을 행하여 사용되는 것이 일반적이는데 SM28C 이상으로 되면 Quenching 효과가 있게 되므로 강도와 인

성을 필요로 하는 기계 부품에서는 Quenching, Tempering을 행하여 사용된다.

구조용 중탄소강은 냉간 가공성이나 용접성은 좋지 못하나 Quenching, Tempering에 의하여 강도와 인성을 증대시킬 수 있어서, 높은 기계적 성질을 요구하는 비교적 중요한 기계구조부

\* 강원대학교 공과대학 재료공학과 대학원생

\*\* 강원지방 공업시험소장

\*\*\* 강원대학교 공과대학 재료공학과 조교수

\* Graduate Student, Dep't of Materials Engineering, Kangweon National University

\*\* Kangweon Regional Industrial Test Center

\*\*\* Assistant Professor, Dep't of Materials Engineering, Kangweon National University

품, 즉 차축이나 냉동기의 Crank Shaft 등에 주로 사용한다.<sup>1,2)</sup>

그리고 화염소입, 고주파소입과 같은 표면경화를 실시하여 피로 강도를 향상시켜 마모에 강한 기계부품, 즉 gears나 축(Shaft)으로 사용 가능하므로 용도가 광범위하며 실제로 사용량도 많다.

본 연구에 사용된 SM45C는 냉동기의 Crank Shaft에 사용되는 것으로 Brinell Hardness,  $H_B$ 가 228~286 정도가 요구된다.<sup>3)</sup> 그러나 열처리를 하지 않은 상태(as received structure)의 경도값은 요구 수준에 못미치는  $H_B$  190 정도이어서, 요구수준으로의 경도향상은 물론 강도와 인성이 요구되는 적당한 열처리가 요구된다.

열처리를 하지 않은 시편과 적당한 열처리를 행한 시편의 미세조직을 금속현미경으로 비교 관찰을 하였고, Brinell Hardness 시험기로 경도 시험을 하였다. 또한 만능시험기로 인장시험을 하였고, 피로시험기로 피로 균열전파시험을 행하여, 인장과 피로시험에서 얻어진 파단면을 SEM (Scanning Electron Microscope)으로 비교 관찰을 하였다.

본 연구는 현재 우리나라 냉동기 제조업체에서 Crank Shaft로 사용하는 SM45C의 조직과 Quench and Tempered 조직의 피로 및 기계적 성질을 비교하는데 연구의 목적이 있다고 볼 수 있다.

## II. 실험 방법

본 실험에 사용된 기계구조용 중탄소강 SM45C의 화학적 조성은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Chemical composition of SM45C steel.

composition	C	Si	Mn	P	S	Fe
wt %	0.44	0.22	0.77	0.013	0.013	balance

금속현미경에 의한 미세조직 관찰은 size 20φ × 20mm의 시편 표면을 emery paper #320 부터 #1200까지 grinding한 후 polishing machine 으

로 polishing을 하여, etchant 5% Nital로 수 초 동안 etching하여 관찰하였다.<sup>4)</sup>

열처리 과정은 각종 시험용 시편, 즉 경도·인장·피로시험편을 용체화처리(816°C, 1hr) 후 Tempering(550°C, 1hr)을 행하였다. 용체화처리 온도에서의 냉각은 Water Quenching과 Oil Quenching을 행하였고, Tempering 온도에서의 냉각은 steel의 내부와 외부와의 온도차이에 의한 내부잔류응력을 없애기 위하여 Air Cooling을 행하였다.<sup>5)</sup>

경도시험은 size 20φ × 20mm의 시편표면을 emery paper #1200까지 grinding한 후 Brinell Hardness 시험기로 한 시편당 세번의 시험을 행하여 평균압흔 자국 지름(d)를 구하여 다음식으로 경도값을 산출하였다(KSB 0805).

$$H_B = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$P = \text{하중 (3,000kgf)}$$

$$D = \text{압입자의 지름 (10mm)}$$

$$d = \text{압입자에 의해 생긴 자국의 평균지름 (mm)}$$

인장시험은 4호 시험편(KSB0801)을 만능시험기에서 시험을 행하고 다음 식에 의하여 인장강도( $\sigma$ )와 연신률( $e_f$ ) 및 단면수축률( $q_f$ )을 구하였다.(KSB 0802).

$$\sigma = F/A_0 \text{ (Kgf/mm}^2\text{)}$$

$$F = \text{시험편이 파단될 때 까지의 최대하중(Kgf)}$$

$$A_0 = \text{시험편의 초기단면적 (mm}^2\text{)}$$

$$e_f (\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

$$L_0 = \text{시험편의 초기 표점거리 (50mm)}$$

$$L_f = \text{시험편이 파단된 후의 표점거리 (mm)}$$

$$q_f (\%) = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

$$(A_f = \text{시험편이 파단된 후의 단면적 (mm}^2\text{)})$$

피로시험은 그림 1에 나타냈듯이 C-R방위의 Compact Type (CT)시편을 Servopulser Fatigue Testing Machine에서 load Ratio,  $R = K_{min}/K_{max} = P_{min}/P_{max} = 0.05$ , frequency.

10Hz로 피로균열전파시험 (fatigue crack propagation testing)을 행하여 crack growth rate( $da/dN$ )에 Stress intensity factor range ( $\Delta K$ )의 관계를 도시하였다.

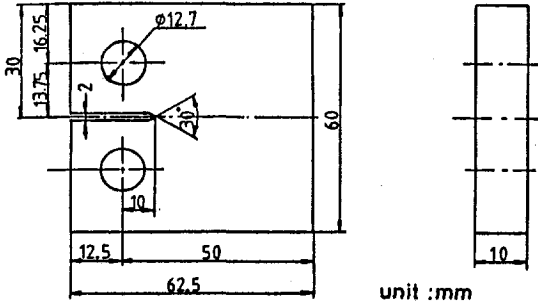


Fig.1- Geometry of compact-tension specimen for fatigue crack propagation tests.

### III. 실험결과 및 고찰

경도의 향상과 강도와 인성을 부여하기 위하여 행한 열처리 후 얻어진 미세조직의 금속현미경사진과 열처리를 하지 않은 상태의 미세조직사진은 Fig.2 와 3, 4에서 보여진다.

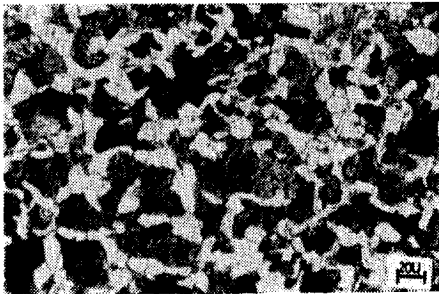


Fig.2- Micrograph of as received SM45C steel.

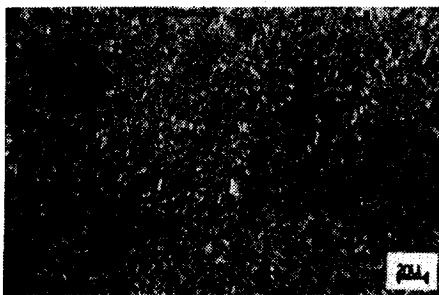


Fig.3- Micrograph of SM45C steel, Water quenched and subsequently tempered structure.



Fig.4- Micrograph of Oil quenched and subsequently tempered SM45C steel. (white region indicates ferrite formed along the prior Austenite grain boundaries.)

위 세경우의 미세조직을 비교해 보면 Fig.2는 annealing된 것으로 조직은 pearlite(dark gray)와 ferrite(light)로 구성되어 있다. 이러한 ferrite-pearlite steel의 강도와 인성은 pearlite 함량이 많을수록, 그리고 interlamellar spacing이 감소할수록 증가한다.

Fig.3에서의 조직은 Water Quenching에 의해 생긴 Martensite가 Tempering에 의해 약간 변형된 Tempered martensite로, 여기서는 free ferrite를 거의 볼 수가 없다.

그리고 Fig.4는 Oil Quenching에 의한 냉각 속도의 지연으로 인해 prior austenite grain boundary에 형성된 ferrite(light)와 내부에는 Tempered martensite(dark gray)가 형성되어진 것을 볼 수가 있다.

Water Quenching을 하거나 Oil Quenching을 한 후 Tempering을 한 시편들의 Brinell Hardness,  $H_B$ 는 열처리 하지 않은 시편의 Brinell Hardness,  $H_B$  190 보다 훨씬 증가한  $H_B$  293과  $H_B$  232를 각각 나타내었다.

이와 같이 열처리에 의해서 경도가 커진 이유는 dislocation density의 증가 및 결정의 미세화, 급냉으로 인한 내부응력, 탄소원자에 의한 Fe 격자의 강화와 같은 여러 인자들의 조합 때문이라고 볼 수 있다.

열처리에 의해서 원하는 수준 ( $H_B$  226~286)

이상의 경도값을 가지는 것은 Tempering 온도를 조절함으로써 보정할 수 있다. 일반적으로 Tempering 온도가 증가할 수록 인장강도와 항복점, 경도는 감소하나 연신율, 단면수축율 및 충격

값은 증가한다.<sup>2)</sup>

다른 열처리 조건에 따른 세개의 인장시편에 대한 인장시험 후 얻어진 인장강도와 연신율, 단면수축율은 Table 2에서 보여진다.

**Table 2. Comparison of tensile strength, ductility and reduction area amongst non-heat treated, water quenched + tempered, and oil-quenched and tempered structures.**

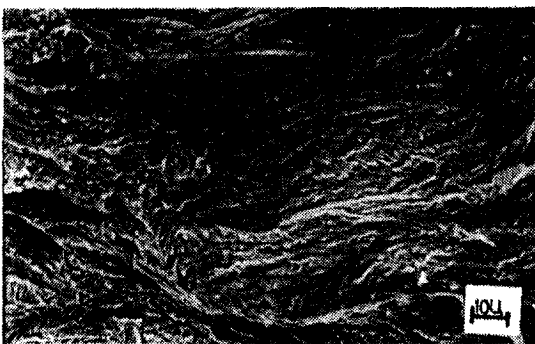
	tensile strength	Elongation (%)	Reduction in area (%)
specimen as received	71.78 (Kgf/mm <sup>2</sup> )	24.4 %	51 %
water quenched and tempered specimen	93.22	18.32	57.75
Oil quenched and tempered specimen	81.85	25.12	57.19

열처리에 의하여 인장강도와 단면 수축율은 증가 하였으나 연신율은 독자적인 값을 가지는 것을 알 수가 있다. 인장강도가 증가하는 이유는 열처리에 의한 grain size의 감소에 기인되는 것으로 볼 수 있다. 즉 Hall-Petch Equation,  $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$ 에 의하여 grain size(d)의 감소는 항복강도( $\sigma_y$ )의 증가를 야기시키게 된다.<sup>7)</sup>

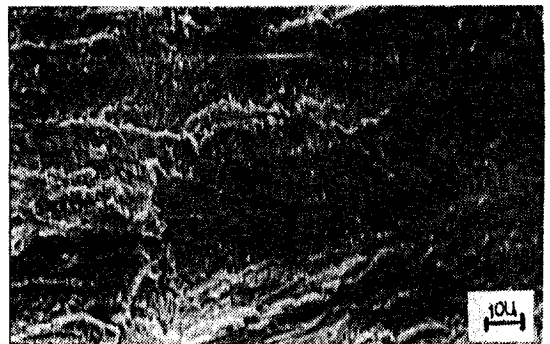
금속이 소성변형될 수 있는 정도를 연성(Ductility)이라고 하는데, 금속의 연성을 정량적으로 나타내기 위한 척도로 연신율( $e_f$ )과 단면수축율( $q_f$ )이 사용된다.

금속의 연성을 비교할 때 큰  $q_f$ 를 갖는 재료가 큰  $e_f$ 를 갖는 것이 보통이지만 예외가 있다. Necking이 일어난 후에는 변형이 Neck에 집중되기 때문에  $e_f$ 는  $L_0$ 에 크게 좌우된다.  $L_0$ 가 작을수록 큰  $e_f$ 가 얻어진다. 그래서 일정한 규격시편의 경우라도 재료에 따라 Neck의 모양이 다를 수 있으므로  $q_f$ 가 크다고 해서 반드시  $e_f$ 가 커진다고 할 수는 없다.<sup>8)</sup>

각종 열처리 조건에 대한 CT시편들의 파괴 균열전파시험 후 얻어진 파단면의 SEM사진은 Fig.5, Fig.6, Fig.7에 나타나 있다.

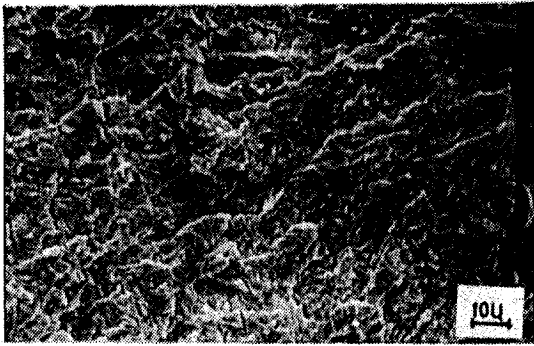


a)

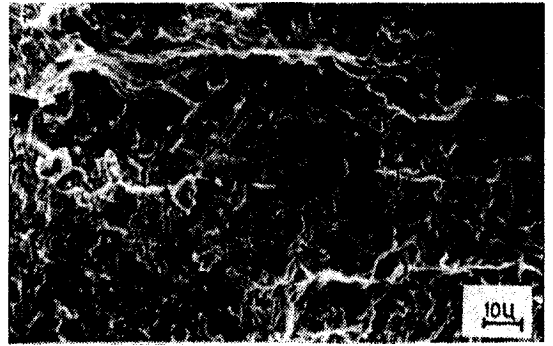


b)

**Fig.5 - Fractography of as received SM45C steel. (a; near threshold. b; medium level of  $\Delta K$ .)**

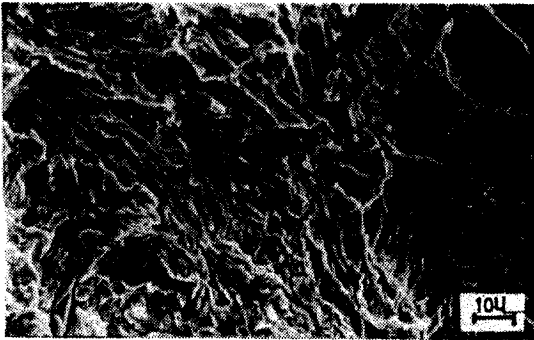


a)

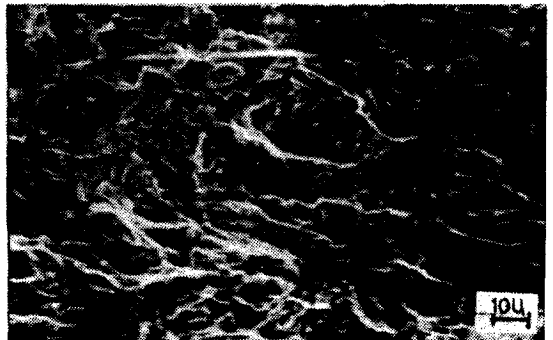


b)

Fig. 6 - Fractography of water quenched and subsequently tempered SM45 C steel.  
( a ; near threshold. b ; medium level of  $\Delta K$  . )



a)



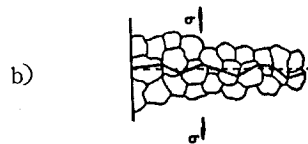
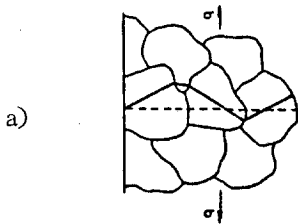
b)

Fig. 7 - Fractography of Oil quenched and subsequently tempered SM45 C steel.  
( a ; near threshold. b ; medium level  $\Delta K$  . )

grain size가 클때의 crack path는 crack profile 및 파면조사에서 보여주듯이 grain size가 작은 조직에서 보다, 더 심한 roughness를 갖는 균열을 유발시켰음을 나타내었다(Fig. 5, 6, 7). 이러한凹凸 때문에 crack growth

rate는 grain size가 클수록 작게 되었다고 사료된다.

또한 carbon steel에서 일정한 load ratio(R)에 대한  $\Delta K_{th}$  값은 일반적으로 grain size가 작을수록 높은값을 갖는다. 이러한 관계들을 Fig.8에 도식적으로 나타나 있다.<sup>9)</sup>



— CRACK PATH

Fig. 8 = Schematic representation of the fatigue crack path in (a) a coarse-grained, and (b) a fine-grained microstructure.<sup>9)</sup>

다음은 피로균열전파시험에서 얻어진 결과 값으로 crack growth rate( $da/dN$ )대 stress intensity factor range ( $\Delta K$ )에 대한 곡선을 Fig.9에 나타내었다.

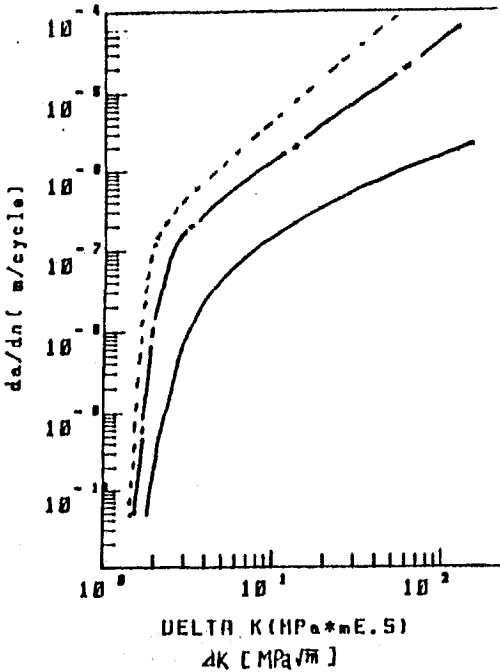


Fig.9-Fatigue crack growth rate data for SM45C steel.

- : specimen of non-heat treated SM45C steel.
- - -: specimen of water quenched and subsequently tempered SM45C steel.
- .....: specimen of Oil quenched and subsequently tempered SM45C steel.

Fig 9에서 보면 grain size가 큰 열처리하지 않은 상태(as received)의 CT시편이 더 높은  $\Delta K_{th}$  값을 나타내고 시험이 행하여진 전응력 확대계수범위에서 더 낮은 crack growth rate를 가지는 것을 볼 수가 있다. 이는 조대한 grain으로 인한 fracture surface roughness가 높아서 더 좋은 fatigue crack propagation resistance를 보였고, grain size가 크므로 해서 더 큰  $\Delta K_{th}$  값을 가지게 된 것으로 볼 수가 있다.

#### IV. 결 론

냉동기의 crank shaft에 쓰이는 구조용중탄소강 SM45C (AISI 1045)에 대한 열처리, 즉 Quenching and Tempering에 의해 미세구조가 coarse-grained structure로 부터 fine-grained structure로 바뀌었다. 이러한 현상으로 인하여 경도는  $H_B 190$ 에서  $H_B 293$ 과  $H_B 232$ 로 향상되었고, 인장강도도  $71.78 \text{ kgf/mm}^2$ 에서  $93.22 \text{ kgf/mm}^2$  및  $81.85 \text{ kgf/mm}^2$ 으로 향상되었다. 그러나 피로균열전파 저항성에 대해서는 열처리에 의한 fine-grained structure가 덜 심한 fatigue fracture surface roughness를 나타내었기 때문에 열처리의 효과를 얻지 못하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 김수영, 김정규, 오근호, 기계재료, 문운당, pp. 131-132. 1986.
2. 양훈영, 김수영, 금속재료학, 문운당, p.185, pp. 201-202. 1985.
3. 한국종합특수강주식회사, 특수강, 한국종합특수강주식회사, pp. 47-50. 1978.
4. 대한금속학회, 금속공학실험, 반도출판사, pp. 252-267. 1984.
5. American Society for Metals, Heat treating, cleaning and finishing, American Society for Metals Vol. 2, pp. 36-46. 1964.
6. 대한금속학회, 강의열처리, 대한금속학회, pp. 135-169. 1985.
7. Richard. w. Hertzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 2nd Ed. pp. 98-99. 1983.
8. 이동녕, 금속강도학, 문운당, pp. 61-66. 1983.
9. Y. Nakai, K. Tanaka, and T. Nakanishi Eng. Frac. Mech., 1981, Vol. 15, pp. 291-302.