

고주파열처리 SM53C강의 기계적 성질에 관한 연구

김황수[#], 김정현^{*}

A Study on Mechanical Property of SM53C Steel by High Frequency Induction Hardening

Hwang-Soo Kim[#], Jung-Hyun Kim^{*}

(Received 14 September 2010; received in revised form 20 October 2010; accepted 28 October 2010)

ABSTRACT

Recently, with the high performance and efficiency of machine, there have been required the multi-functions in various machine parts, such as the heat resistance, the abrasion resistance and the stress resistance as well as the strength. Fatigue crack growth tests were carried out to investigate the fatigue characteristics of high carbon steel (SM53C) experienced by high-frequency induction treatment. The Cam nose part of the Automobile's Cam shaft is strongly bumped with rocker arm or valve-lift. Therefore abnormal wear such as unfair wear and early wear occur in the surface. This abnormal wear causes a defect that bad timing open and close actions of the engine valve happen in the combustion chamber so the fuel gas will be combustion imperfect. Therefore, the cam shaft demands high hardness and wear resistance. In this study, high frequency heat treatment has been accomplished while wear test for material SM53C.

Key Words : High frequency heat treatment (고주파 열처리), Surface hardening (표면경화), Adhesive(응착마모), Debris(마모분)

1. 서 론

자동차 공업 등에서 많이 사용되는 기어, 크랭크 축, 캠, 스피들 등의 기계부품들은 충격에 잘 견디어야 한다. 그렇기 때문에 인성이 크고, 내구성이 보장되어야 하며, 특히 상대운동으로 인한 마찰, 마모에 잘 견디어야 한다. 이러한 자동차부

품에서 현재 사용 중인 재질의 신소재 개발과 재료의 고응력화에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.⁽¹⁾ 부품의 설계 시 고려되는 금속의 고강도화는 부품의 경량화를 실현시킴으로써 재료와 연료절감이란 이점을 가지고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중, 진동조건 등에 따라 차이는 있지만 금속표면이나 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에도 균열이 개시되고 서서히 안정성장하여 최종적으로 급속파괴 되는 현상이 발생된다.⁽²⁾ 이와 같이 금속에서 발생하는 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재해를 초래할 수 있으므로 현재와 같이 대형화 된

[#] 교신저자 : 한국폴리텍VII대학 컴퓨터응용기계과
E-mail : khshwang@kopo.ac.kr

^{*} 경일대학교 기계자동차학부

산업기술사회에 피로파괴 방지기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다.⁽³⁾

일반적으로 기계 구조용 강에서, 재료 자체는 연하고 인성을 갖추어야 하며, 표면이 경하고 내마모성이 뛰어나야한다. 그러한 재료를 만들기 위한 표면처리방법 중의 하나로서 고주파 열처리 방법이 있다. 1953년 항공기의 크랭크 샤프트에 대한 고주파 유도가열을 이용하여 열처리를 실용화에 성공한 이후로, 고주파 열처리가 가지는 많은 장점들로 인하여 각종 기계부품 제조에 급속히 확대되고 있다. 고주파유도가열은 요구하는 재료의 표면층만을 급속 가열, 냉각에 의해 경화되기 때문에 일반처리에 의해 얻어지는 조직보다 훨씬 미세하다. 때문에 내마모성 및 피로강도를 향상시킨다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 엔진의 고출력화에 따라 증가하는 캠 샤프트(Cam Shaft)에서의 가혹한 면압(load)으로 인해 발생하는 표면의 편마모 및 조기마모 등 비정상적 마모현상을 방지하기 위하여 SM53C 소재를 고주파 유도가열 처리하여 경화층 깊이별로 내마모성과 파괴인성의 영향에 대해서 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 재료

본 연구에서는 상용 자동차용 캠 샤프트 재료인 SM53C를 이용하였으며, Table 1은 이 재료의 화학적 조성을 나타낸 것이다.

2.2 고주파 열처리

고주파 열처리는 주파수(Hz), 사용전력(kW), 코일이송속도 등의 변수가 작용하는데 본 실험에서는 주파수, 사용전력을 동일하게 하고 소재의 경화층 깊이에 따라 코일이송속도에 따라 경화층이 결정되므로 각 재료별로 제어를 하였다. 재료의 각각에 대한 고주파 열처리 조건은 Table 2에 나타내고 있다.

2.3 인장시험

인장시험은 ASTM E8규정에 따라 수행하였으며 MTS(Model 810, 10 tonf)를 사용하여 상온에서 인장

속도(crosshead speed) 0.5 mm/min의 조건으로 행하였다. 인장시험편의 고주파 경화 깊이는 기존 캠 샤프트의 유효경화층깊이(cam nose: 4 mm, base: 2 mm)를 비례적으로 계산해 실제 사용조건을 고려하여 유효경화층 깊이를 1.1, 0.55, 0.35 mm로 고주파 경화 열처리를 하였으며, 인공결함이 표면경화층내에 있을 때와 경계부 및 경계부에 가깝게 있을 경우를 고려하여 설정하였다. Table 3은 고주파 열처리 전후에서 얻어진 재료의 기계적 성질을 나타내었으며, Fig. 1은 인장시험편의 형상과 치수를 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of specimen (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SM53C	0.55	0.22	0.63	0.017	0.027	0.02	0.02	-	0.03

Table 2 Experimental condition for progressive high frequency case hardened

Working condition	Conditions heat treatment		
	Type(A)	Type(B)	Type(C)
Electric Power(kW)	50		
Travel Speed(mm/sec)	6.2	7.0	7.3
Layer Hardened(mm)	1.1	0.55	0.35
Frequency(kHz)	200		
Quenching(°C)	850-870		
Tempering(°C)	230		

Table 3 Mechanical properties of SM53C

Material	Hardening Type	Tensile strength	Yield strength	
				Depth (mm)
SM53C	Base Specimen	0	831	447
	A	1.1	873	731
	B	0.55	833	559
	C	0.35	831	547

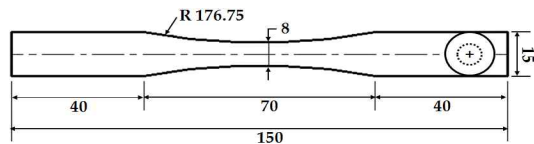


Fig. 1 Specimen shape of tensile test (unit : mm)

2.4 파괴인성시험

Fig. 2는 파괴인성 실험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타내었으며, 채취방향은 환봉에서 C-R 방향으로 하였다. 파괴인성시험은 MTS(Model 810, 10 ton)를 사용하여 상온에서 실험하였으며, ASTM E399의 규정에 따라 CT(1/2CT) 시험편으로 제작하였다. Precrack은 주파수 15 Hz, 정현파로 하였으며, 노치선단에서 2.5 mm 삽입하였다. K_{IC} 실험은 Crosshead speed 0.05 mm/min으로 경화층 깊이 1, 2 mm에 따라 각각 실험하였다. 일반적으로 자동차용 부품의 경우 경화층 깊이 기준이 1~2mm를 만족하면 되기 때문에 파괴인성시험의 경우 경화층 깊이 기준에 따라 실험하였으면 각각의 조건에 따라 5개의 시험편으로 실험을 실시하여 각각의 평균값을 나타내었다.

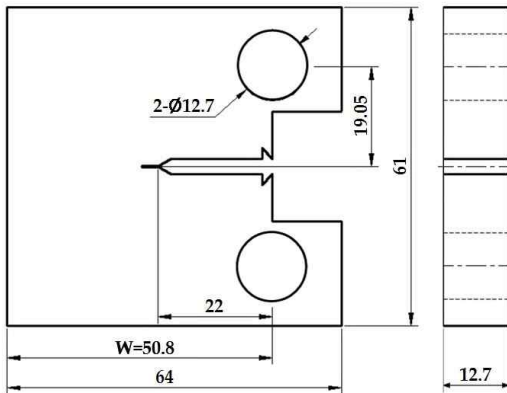


Fig. 2 Specimen shape of fracture toughness test
(unit : mm)

2.5 마모시험

마모시험은 Ball on disc형 미끄럼 마모 시험기 (PD102)를 이용하였다. Base시험편과 고주파열처리 조건에 따른 시험편의 마모특성과 하중조건에 따른 마모 특성을 비교해 보았다. 시험편은 지름 30mm 높이 10mm 의 디스크형상이며, 사용된 볼은 경도가 HV 1,000 이상인 세라믹볼(ZrO_2)을 사용하였다. 시험전 시험편의 표면은 샌드페이퍼(#400~

1500)를 이용하여 연마한 후 Al_2O_3 분말($0.3\mu m$)을 이용하여 정밀연마를 하였다. 마찰마모시험의 총 미끄럼 길이는 3 km, 회전속도는 100 rpm, 하중은 각각 50, 100, 150 N의 조건으로 하였다. 또한 무운환 상태에서 실시하였다. 마멸량은 마모트랙의 일정 거리(500m)마다 한번씩 0.1 mg 분해능을 사용하여 마모전과 마모후의 중량을 비교하여 측정함으로써 산출하였다. 그리고 이들 값을 동일한 조건에서 2-4회의 시험을 하여 각각 평균값을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고주파열처리에 의한 표면경화층의 특성

경화층 깊이에 따른 표면경도는 경화층(1.1, 0.55, 0.35 mm)에 관계없이 3종류 모두 약 HV 717이었고, 비경화층인 중심부 경도는 약 HV 200 으로 소재와 동일한 값을 보이고 열 영향을 받지 않음을 알 수가 있었다. 또한, 고주파 유도경화 처리된 SM53C의 표면경도는 각각 평균 HV 717 으로서 표면경도 HV 680 이상이어야 된다는 캠 샤프트의 제작사양의 요구조건에 만족하고 있음을 알 수 있다.

유효경화층깊이(Effective Case Depth: E.C.D.)는 다음 식으로 산출하였다.

$$ECD = d_1 + \frac{(d_2 - d_1)(\overline{H}_1 - H_S)}{\overline{H}_1 - \overline{H}_2} \quad (1)$$

여기서, H_S : 명시된 경도

$\overline{H}_1, \overline{H}_2$: d_1 과 d_2 에서 측정된 경도의 산술평균

검증하고 싶은 유효경화층깊이보다 얇은 부위(d_1)와 깊은 부위(d_2)의 수직단면 위에 경도를 측정하였으며, 이때 $d_2 - d_1$ 은 0.3 mm가 초과되지 않게 하였다. 이와 같은 결과에서 유효경화층깊이를 구하였으며, 목표로 하였던 E.C.D.가 1.1, 0.55 0.35 mm인 3종류의 시험편을 얻었다.

Fig. 3은 경화층과 비경화층의 경도분포를 확인하기 위하여 표면으로부터 깊이방향으로 0.1 mm 간격으로 나눠 측정하고 그 결과를 보여주고 있다.

고주파 열처리부의 경도값은 평균 HV717 정도의 경도값을 보이다가 각각의 고주파 열처리부와 베이스부의 경계로 해서 급격하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 고주파 경화층 깊이에 따른 경도변화는 각각 A, B, C 타입에서 1.1, 0.55, 0.35 mm까지 완만하다가 각각 1.1, 0.55, 0.35 mm부터 급격한 감소를 나타냈는데 이러한 현상은 현미경 조직으로부터 알 수 있는 바와 같이 잔존하는 초석(proeutectoid) 페라이트와 불완전 오스테나이트에서 경화되었기 때문에 마르텐사이트는 내부로 갈수록 급속히 감소하기 때문이라 생각된다.⁽⁵⁾

이와 같은 경도 분포를 보면 탄소강은 담금질 전의 재료의 조직이 큰 영향을 미치며, 0.4 ~ 0.5% 탄소강에서는 조직에 의한 경도 상승이 뚜렷하게 볼 수가 있고, 주철과 같이 흑연 확산이 늦은 것은 최고 표면경도가 표면보다는 내부에 나타나기 쉽지만, 탄소강은 약간의(30~50 μm) 내부에서 최고 경도를 얻어짐을 알 수가 있다. 최대표면경화층 깊이는 1.1 mm로 하게 되었고, 표면경화층을 0.35, 0.55 mm로 하게 된 것은 인공결함이 표면경화층내에 있을 때와 경계부 및 경계부에 가깝게 있을 경우에 대한 것을 고려하여 표면경화를 한 것이다.

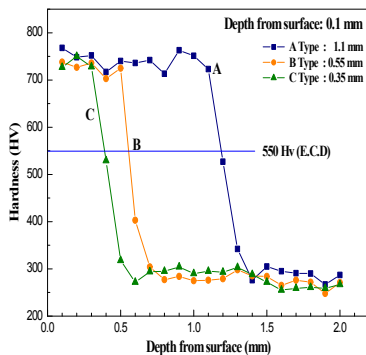


Fig. 3 Relation between hardness and depth from surface

Fig. 4는 고주파 열처리한 SM53C의 경화층과 비경화층의 깊이에 따른 조직을 나타낸 것이다. 경화층의 표면부 (a)에서는 최외표면층에서 급속 가열

에 의해 펠라이트의 Fe₃C가 완전히 오스테나이트로 변태되지 않고 미량 존재하며 급속냉각에 의해서 전면에서 걸쳐 미세한 마르텐사이트 조직으로 구성되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 마르텐사이트에 약간의 구상 탄화물(흰점) 입자가 분포된 조직을 볼 수 있다. 이는 펠라이트 결정에서 판상 Fe₃C는 냉각속도 증가와 더불어 미세화되며 냉각속도를 빠르게 하면 페라이트가 더 이상 형성되지 않고, 조직이 아주 미세한 줄무늬로 된 펠라이트 결정을 나타내는 때가 순간적으로 나타나는데 에칭된 현미경 시편에서는 조직이 없는(structureless) 조각(flake)이 각기 다르게 나타나며 급랭에서는 일부 탄소가 변태하여 격자 내에 단단히 붙어 있으며 이것은 일부가 중간 단계 또는 이미 마르텐사이트로 나타난다. 이 조직성분은 냉각속도에 따라 미세 줄무늬로 된 펠라이트가 고립되어 다소 존재하게 되는데 냉각속도가 더욱 증가하면 급랭으로 탄소가 완전히 속박용체에 유지되고 고립된 펠라이트가 점점 적어져서 마르텐사이트 조직으로만 나타난다. 경화층의 최외표면부는 이송속도가 느린 경우는 고온 가열에 의해서 마르텐사이트의 크기가 표면 직하보다 큰 경우도 있다고 알려져 있지만,⁽⁶⁻⁸⁾ 본 고주파 열처리의 경우는 코일이송속도가 매우 빨라서(6.2, 7.0, 7.3 mm/sec) 이러한 경향은 나타나지 않았다.

(b)조직은 내부로 갈수록 기지조직이 완전히 오스테나이트로 변태할 수 있는 온도와 시간이 불충분하여 오스테나이트화 과정에서 탄화물의 고용량이 감소하며, 또한 초석(proeutectoid) 페라이트(white)가 많이 분포되어 있으며 거의 분해되지 않고 그대로 존재하고 있음을 관찰할 수 있었다. 이는 급랭하면 탄소확산이 불완전한데 A₃와 A₁ 사이의 변태에서 초석 페라이트가 충분히 형성되지 않지만 내부로 갈수록 변태할 수 있는 온도와 시간이 불충분하기 때문이라 생각된다.⁽⁹⁻¹²⁾

(c, d)는 이동가열에 의한 조직변화는 거의 한계점에 달하나 약간의 열 영향을 받았음을 볼 수 있으며, 그 이상의 깊이에서는 본래의 소재의 조직인 펠라이트와 페라이트로 구성되어 있다.

(c)에서는 페라이트(white) 입자가 박힌 층상 철탄화물로 된 조개 껍질형의 부분적으로 미세한 조직 펠라이트(lamellar)를 확인 할 수 있으며, (d)는

아공석강, 페라이트와 펄라이트를 확인할 수 있다. (e)는 경화층과 비경화층의 경계를 나타내고 있다.

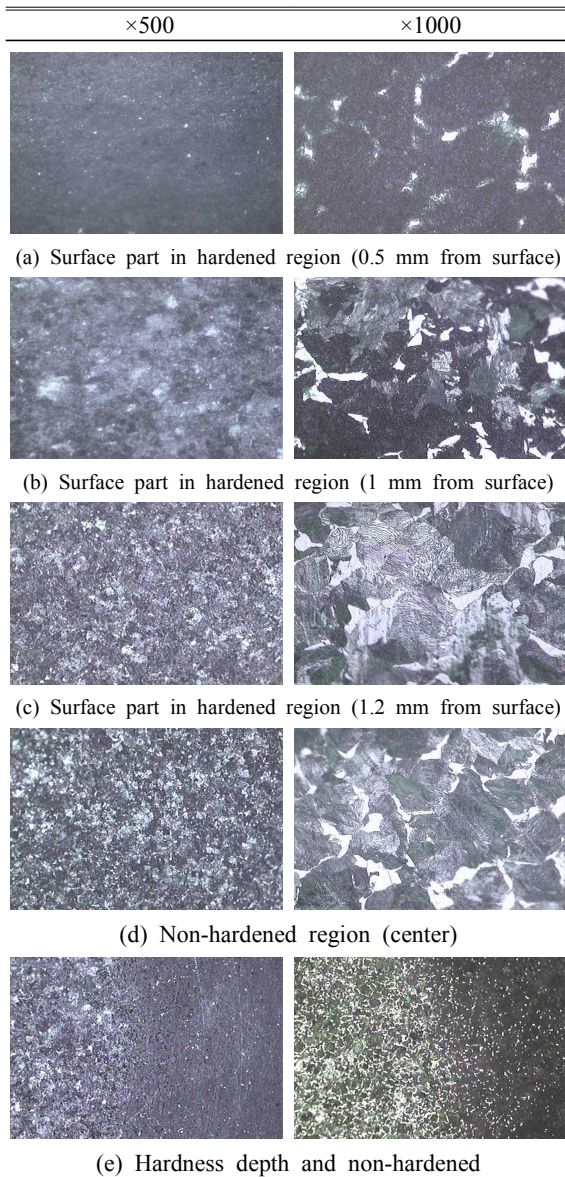


Fig. 4 Optical microstructure of SM53C hardening depth 1.1 mm

3.2 인장시험 특성

Fig. 5는 고주파 열처리 조건에 따른 인장시험 결과를 나타내고 있다. Base Metal과 비교해 볼 때 고주파 열처리한 A, B, C타입은 인장강도가 873, 833, 831 MPa로 각각 나타내고 있으며, A타입의 경우 인장강도는 873 MPa, 항복강도는 731 MPa로 가장 높은 인장·항복강도를 나타내고 있다. Base Metal과 B타입, C타입을 비교해 볼 때, 인장강도는 크게 차이가 없는 반면, 항복강도에서 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 고주파 열처리한 시험편의 경우 경화층 두께가 깊어짐에 따라 인장강도와 항복강도가 Base Metal 보다 향상됨을 알 수 있다. 인장강도가 증가하는 이유는 고주파열처리에 의한 grain size의 감소에 기인되는 것으로 볼 수 있다. 즉 Hall-Petch Equation, $\sigma_{ys} = \sigma_i + K_y d^{-0.5}$ 에 의하여 입자 크기(d)의 감소는 항복강도(σ_{ys})의 증가를 야기 시키게 된다.⁽¹³⁻¹⁴⁾ 이는 경화층 표면부의 마르텐사이트의 조직이 비경화층의 조직보다 미세하기 때문에 인장·항복강도가 Base Metal보다 향상됨을 알 수 있다. 응력-변형률 곡선에서 A, B, C 타입은 대략 취성적인 파괴 형식의 거동을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 고주파 열처리를 한 강의 취성을 줄이고, 인성을 부여하기 위하여 템퍼링(500℃, 690℃)을 수행한 후 인장시험 결과를 나타내고 있다. 템퍼링 후의 인장시험결과 전체적으로 연신율이 증가하였으나 인장강도는 다소 감소하고 있다는 것을 알 수 있었으며 템퍼링에 의한 경화층 깊이의 변화는 확인할 수 없었다.

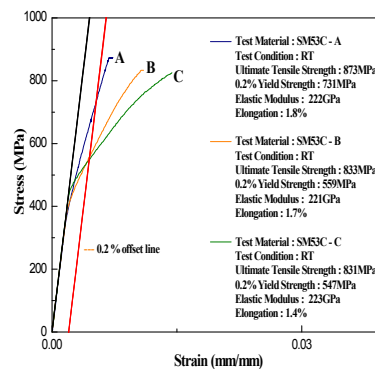


Fig. 5 Relation between stress and strain with hardness depth

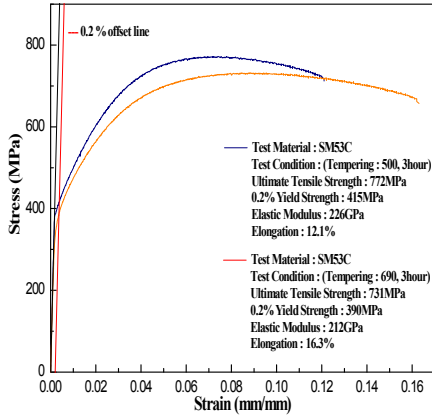


Fig. 6 Relation between stress and strain with tempering

3.3 파괴인성 특성

Fig. 7은 캡 샤프트용 SM53C 소재의 평면변형률 파괴인성 실험 결과를 나타내고 있다.

평면변형률 파괴인성치(K_{IC})는 아래 식(2)에 의해 계산되었다.

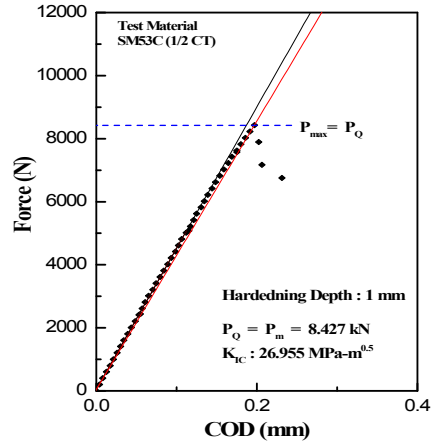
$$K_{IC} = P_Q \frac{f(a/W)}{B\sqrt{W}} \quad (2)$$

여기서, 단, $a/W = \alpha$

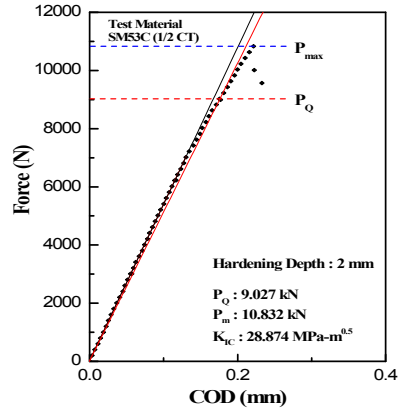
$$f(\alpha) = \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} \times (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (3)$$

P_Q : 하중 (kN) B : 시험편 두께 (mm)

W : 시험편 폭 (mm) a : 균열길이 (mm)



(a)



(b)

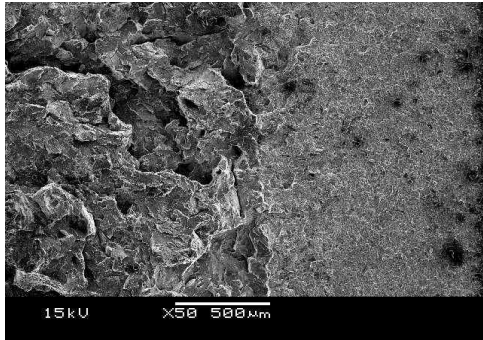
Fig. 7 Variation of force with COD of SM53C for hardening depth (a) 1 mm and (b) 2 mm

파괴인성시험은 Base Metal과 경화층 깊이 (Hardening depth) 1, 2 mm에 따라 각각 실행하였다. Fig. 8은 파단 후 SEM을 이용하여 시험편의 경화층두께가 1, 2 mm를 확인할 수 있었다. 시험결과 평면변형률 파괴인성치(K_{IC})는 ASTM E399에 규정된 하중조건과 두께 규정인 아래 식(4), (5)를 잘 만족하였다.

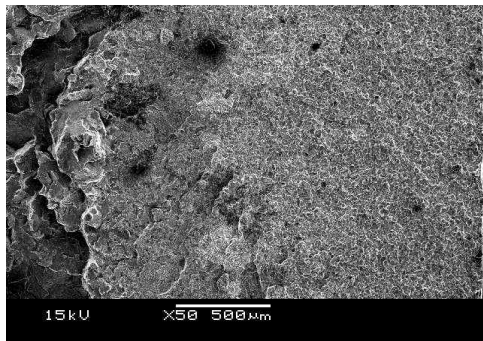
$$P_{\max}/P_{\min} < 1.10 \quad (4)$$

$$B, a < 2.5 (K_{IC}/\sigma_y)^2 \quad (5)$$

실험한 결과 SM53C 재료의 평면 변형률 파괴인성치, K_{IC} 는 경화층 깊이 1 mm인 경우 26.955 MPa·m^{0.5}으로 나타났으며, 경화층 깊이가 2 mm인 경우는 28.874 MPa·m^{0.5}으로 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 8 SEM fractograph of fracture toughness test specimen of SM53C for hardening depth (a) 1 mm and (b) 2 mm

경화층 깊이가 1, 2 mm를 비교해 볼 때, 전체적으로 P_Q , P_m , K_{IC} 값이 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 경화층 두께가 깊어짐에 따라 K_{IC} 가 커짐을 알 수 있다. Table 4는 본 연구에 사용된 재료의 파괴인성치를 나타내었다.

Table 4 Fracture toughness values of SM53C

Material	Hardness Depth (mm)	Critical load P_Q (kN)	Maximal load P_m (kN)	Fracture toughness K_{IC} (MPa·m ^{0.5})
SM53C	1	$P_Q=P_{\max}=8.427$		26.955
	2	9.027	10.832	28.874

3.4 마모 특성

하중에 따른 마모량의 변화 원인을 알아보기 위하여 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 마모 파면을 관찰해 보았다. Fig. 9는 모재의 하중 증가에 따른 파면양상을 나타내고 있다. 좌측 사진은 배율을 30배로 관찰한 것이고, 우측 사진은 1,000배로 하여 관찰한 것이다. 하중이 증가함에 따라 표면이 거칠어지며, 연삭마모처럼 보이는 파면들이 응착마모화 되어가는 것을 알 수가 있다. Fig. 10은 세 시험편의 고하중(150 N)에서의 파면을 비교한 것이다. 좌측 사진에서 보면 마모트랙이 모재보다 열처리재가 오히려 트랙의 폭이 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 상대재를 경도 HV1,000 세라믹 볼을 사용했음에도 불구하고 이 세라믹 볼이 열처리를 한 Type A, B에 의해 마모가 되면서 그 접촉면적이 넓어져 마모트랙 폭이 커졌음을 알 수 있다. 그리하여 앞 절에서 설명했듯이 접촉면적이 커짐으로써 마멸량이 많아진 것으로 생각되어진다. 또한 상대적으로 경도가 낮은 모재에서는 응착마멸형태가 많이 나타났으며 반복되는 응착과 그 응착된 마모분이 탈락한 것을 쉽게 찾아볼 수 있다. 또한 세라믹의 마모분으로 보이는 형태가 보이고 있다. 이 응착된 마모분이 모재의 질량에 영향을 줌으로써 마멸량이 모재보다 열처리재가 더 많은 것으로 나타났다. 열처리재는 둘 다 응착마모형태보다는 연삭마모형태가 많이 나타났으며 군데군데 Groove를 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 11은 모재의 마모트랙을 나타내고 있으며, 이는 모재와 열처리재와의 관계에서 모재의 상대적으로 적은 마멸량 증가에 영향을 미치는 세라믹의 응착을 보여주고 있다.

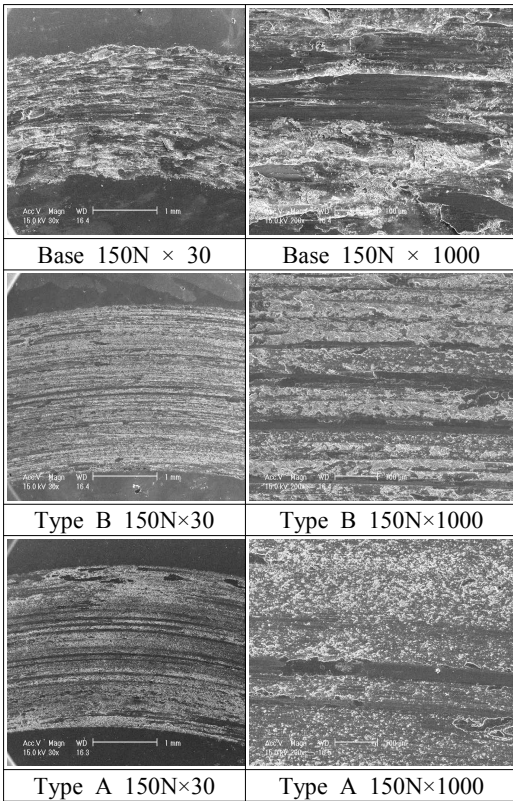


Fig. 9 SEM image of base metal

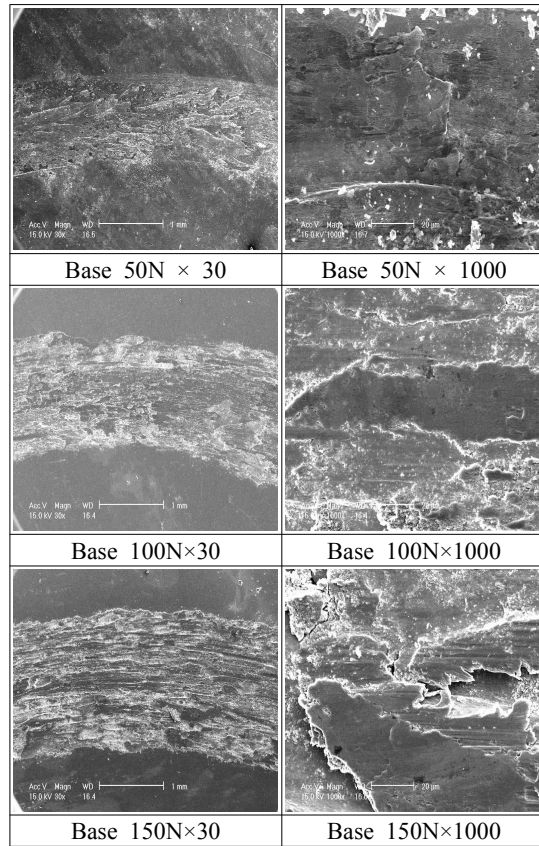


Fig. 11 SEM image of each specimen



Fig. 10 Optical microstructure of tested ceramic(x200)

4. 결론

본 연구에서는 상용자동차용 캠샤프트 재료인 SM53C에 고주파열처리를 실시한 후 경화특성, 파괴인성, 마모특성에 대해 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고주파 열처리부의 경도 값은 평균 HV 717로 나타났으나, 고주파 열처리부와 베이스부의 경계로 해서 급격하게 감소하였다. 이는 초석필라이트와 불완전 오스테나이트에서 경화되었기 때문으로 생각된다.

(2) 고주파 열처리한 시험편의 경우 경화층 두께가 깊어짐에 따라 인장강도와 항복강도가 Base

Metal보다 향상됨을 알 수 있다.

(3) 고주파열처리로 표면경화된 재료는 금속조직이 마르텐사이트로 변화되어 고강도화를 이루므로 유효경화층깊이(ECD)가 증가함에 따라 K_{IC} 값이 증가하였다. 따라서 경화층 깊이에 따른 SM53C의 조건을 찾을 수 있었다.

(4) 고하중으로 갈수록 모재보다도 열처리재가 오히려 마멸량이 증가하였는데 이는 열처리재의 경도가 향상됨으로써 상대재인 세라믹볼(ZrO_2)의 마멸량이 많아짐으로써 접촉면적의 확대와 모재에 세라믹 마모분의 응착에 의하여 모재의 상대적인 질량감소 저하가 그 원인으로 나타났다.

참고문헌

1. M.H. Kim, K.Y. Rhee, Y.N. Paik, J.S. Hong and Y.S. Ham. "Experimental investigation on the mechanical behavior of high-frequency induction-hardened mild carbon, SPS5 steel", Materials Science and Engineering: A, In Press, Corrected Proof, Available online 8 August.
2. Y. Totik1, R. Sadeler, H. Altun, M. Gavgali, "The effects of induction hardening on wear properties of AISI 4140 steel in dry sliding conditions" Materials & Design, Volume 24, Issue 1, pp. 25-30, 2003.
3. Jeong-Du Kim and Jueng-Keun Ji, "Effect of super-rapid induction quenching on fatigue fracture behavior of spherical graphite cast iron FCD500", Journal of Materials Processing Technology, Volume 176, Issues 1-3, pp. 19-23, 2006.
4. H. Kristoffersen and P. Vomacka, "Influence of process parameters for induction hardening on residual stresses", Materials & Design, Volume 22, Issue 8, pp. 637-644, 2001.
5. Sudook A. Kim and Ward L. Johnson, "Elastic constants and internal friction of martensitic steel, ferritic-pearlitic steel, and α -iron", Materials Science and Engineering: A, Volumes 452-453, pp. 633-639, 2007.
6. J.J. Shim, S.Y. Lee, "Tempering Behavior of 0.45% Carbon Steel Treated by a High Frequency Induction Hardening Technique" J. of the Korean Society for Heat Treatment Vol. 3, No.2, pp. 10~19, 1990.
7. Zheng-tong HAN, Ning-ju ZHANG, Ding GAO and Gang YANG, "Research into Grinding Hardening of Microalloyed Non-quenched and Tempered Steel", Journal of China University of Mining and Technology, Volume 17, Issue 2, pp. 238-241, 2007.
8. 김정근, 김기영, 박해웅, "금속현미경조직학", 도서출판골드, pp.189~361, 1999.
9. 조정기, 홍영환, 이수진, 지무성, "강의 열처리 도해와 조직 1. 2", 원창출판사, 막스플랑크연구소, 독일 철강연합회 재료분과위원회, 1991.
10. Hertzberg, R. W, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials," 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., pp. 152-173, 1992.
11. Kang, S. C., Kang, S. S. and Kim, B. K, "Mechanical Materials," Chungmun Publisher, pp. 56-78. 1997.
12. H. G. Kim, " A Study on the Heat Treatment Condition for Effective Manufacturing of SUS416 Steel", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.14 No.1 pp.24-29, 2005.
13. David J. Benson, Hsueh-Hung Fu, Marc Andre' Meyers, "On the effect of grain size on yield stress: extension into nanocrystalline domain", Materials Science and Engineering A, Volumes 319-321, pp. 854-861, 2001.
14. Cevdet Meriç, Enver Atik and Turgut Engez, "Experimental microhardness for AA 1030, Cu, CuSn7, CuZn30 and 6114 alloys and a correlation with the Hall - Petch relation", Materials Research Bulletin, Volume 34, Issues 12-13, pp. 2043-2052, 1999.