

고주파 표면경화된 SM53C강의 파괴인성 특성

박원조 · 전현배* · 허정원*** · 김진범***

경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소 · *경상대학교 대학원 정밀기계공학과

안산공과대학 기계설계과 · *태창기업(주) 기술연구소

(2008. 1. 7. 접수 / 2008. 2. 21. 채택)

Frature Toughness Characteristics of Surface-Hardened SM53C Steel by High Frequency Induction

Won-Jo Park · Hyun-Bae Jeon* · Chung-Weon Hur*** · Jin-Bum Kim***

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry

*Department of Mechanical and Precision Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University

**Department of Mechanical Design, Ansan College of Technology

***Taechang Enterprise Co., Ltd, Technology Research

(Received January 7, 2008 / Accepted February 21, 2008)

Abstract : The cam shaft is very important for the safety of automobiles. The cam shaft needs a surface hardening process by high frequency induction to have both strength and toughness. It is required for safety of automobile to consider how the characteristics of tensile strength and toughness are changed according to the condition of surface hardness. In this study, we prepared surface hardened SM53C which is used as cam shaft materials. We examined the tensile strengths according to the depth of surface hardening and the effect of tempering. We also investigated the fracture toughnesses according to the depth of surface hardening(1mm, 2mm).

Key Words : high frequency induction, surface hardening, tensile strength, fracture toughness

1. 서 론

산업현장에서 사용되는 공구, 기계, 자동차, 항공기 등의 부품들은 다양한 환경에서 사용되며 특히 사용 중에 안전이 확보되어야 한다. 산업화가 고도화되면서 보다 가혹한 환경에 재료가 노출되면서 재료의 파손은 막대한 손실을 초래한다.

구조물의 안전을 위해서 신소재 개발에 대한 연구를 진행하지만 이는 일정 정도의 한계성을 가지고 있기 때문에 주로 표면개질을 이용하여 안전성을 높이는 방법이 많이 사용되고 있다.

현재 자동차에 대한 고출력화, 수명연장, 경량화의 요구는 날로 증대되고 있으며 이에 따라 동력전달계의 사용환경은 점점 가혹해지는 상황이다. 이런 경향에 대응하여 자동차 구성 부품은 가혹한 사용

환경에 견딜 수 있도록 단위하중, 단위면적당의 강도, 마모 및 파괴인성을 향상시키기 위한 연구가 다양하게 진행 중이다.

자동차 엔진에서 캠샤프트는 내마모성과 인성을 필요로 하기 때문에 이를 위해 고주파표면경화열처리를 활용한다. 고주파표면 열처리하는 재료의 표면을 급속가열 냉각하여 일반 열처리에 의해 얻어지는 조직보다 훨씬 미세하고 표면에 압축잔류응력을 발생시키기 때문에 내마모성 및 내피로강도를 향상시킨다¹⁻³⁾.

캠샤프트는 구름마모(Rolling Wear)를 받게 되어 있어 완전한 구름(Rolling)에 비하여 피로수명과 피로한도가 현저히 저하하게 된다. 이러한 현상은 차량의 안전에 심각한 위협요인이 되는 것은 명확하다.

캠샤프트는 SM53C강을 소재로 사용하여 가공·제작되고 있으며 부품의 특성상 고속회전에 의한 마

* To whom correspondence should be addressed.
benhur@act.ac.kr

Table 1. Chemical compositions of specimen (wt%)

Mat.	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

모와 피로하중을 받기 때문에 부품의 안전성을 확보하기 위해서는 고주파표면 열처리 조건에 따른 재료의 파괴인성에 대한 다양한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 승용자동차용 캠샤프트 재료로 사용되는 SM53C를 고주파표면 열처리를 행하여 미세조직과 경도의 변화 및 표면 경화특성을 비교 평가하였다. 또한, 표면경화 조건에 따른 기계적 성질과 파괴인성을 비교분석함으로써 캠샤프트의 안전성 확보를 위한 기술자료를 축적하고자 하는데 목적이 있다.

2. 실험방법

2.1. 재료

본 연구에서는 사용한 소재는 상용 자동차용 캠샤프트 재료인 SM53C이며, Table 1은 이 재료의 화학적 조성을 나타낸 것이다.

2.2. 열처리

고주파 열처리는 주파수(Hz), 사용전력(kW), 코일 이송속도 등의 변수가 작용하는데 본 실험에서는 주파수, 사용전력을 동일하게 하고 코일 이송속도를 조절함으로써 소재의 경화층 깊이를 다르게 하였다. 준비한 시험편은 3종류이며, 각각에 대한 고주파 열처리 조건은 Table 2와 같다.

2.3. 인장시험

인장시험은 ASTM E8규정에 따라 수행하였으며 MTS(Model 810, 10tonf)를 사용하여 상온에서 크로스헤드 속도 0.5mm/min의 조건으로 수행하였다. 인장시험편의 고주파 경화 깊이는 기존 캠샤프트의 크기와 유효경화층 깊이(Cam nose: 4mm, Base: 2mm)와 시험편 크기를 고려하여 유효경화층 깊이를 1.10mm, 0.55mm 및 0.35mm로 고주파표면 열처리를 하였으며, 인공결함이 표면경화층 내에 있을 때와 경계부 및 경계부 근처에 있는 경우를 고려하여 수행한 것이다.

Table 3은 고주파 열처리 전후에서 얻어진 재료의 기계적 성질을 나타내었다.

Fig. 1은 경화깊이에 따른 기계적성질을 평가하기 위한 인장시험편의 형상과 치수를 나타내었다.

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)	1.10	0.55	0.35
Hardness(HV)	717-768	705-740	720-752
Frequency(kHz)	200		
Temperature(°C)	850-870		
Tempering(°C)	230		

Table 3. Mechanical properties of SM53C

Material	Type	Hardening Depth (mm)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)
SM53C	Base Metal	0	831	447
	A	1.10	873	731
	B	0.55	833	559
	C	0.35	831	547

2.4. 파괴인성시험

시험편은 환봉에서 C-R 방향으로 채취하였으며, Table 2에서 표시한 조건으로 시험편의 전후방 양면에 경화층 깊이 1mm, 2mm 표면경화한 시험편을 준비하였다.

파괴인성시험은 MTS(10tonf)를 사용하여 상온에서 수행하였으며, 시험편은 ASTM E399의 규정⁴⁾에 따라 1/2CT 시험편을 제작하였다. 프리크랙은 주파수 15Hz, 정현파로 하였으며, 노치선단에서 2.5mm 삽입하였다. K_{IC} 실험은 크로스헤드 속력은 0.05mm/min으로 수행하였다.

2.5. 미세조직 및 경도시험

미세조직 및 경도측정을 위하여 고주파 열처리를 실시한 시험편에 샌드페이퍼를 사용하여 #400 ~ #1500까지 연마한 후 0.3µm의 Al₂O₃ 분말을 이용하여 마무리 작업을 하였다.

경도측정은 마이크로비커스 경도계(Mitutoyo MVK-G1)를 이용하여 하중 500gf, 하중유지시간 10sec의 조건에서 각 열처리 부분과 모재 부분의 표면으로부터 깊이 방향으로 0.1mm 간격으로 경도를 측정하였다. 또한, 부식액(HNO₃ 5% + ethanol 95%)을 사용하여 에칭을 하였으며, 열처리부와 비열처리부를 채취하여 광학현미경으로 미세조직 및 경화층을 관찰하였다.

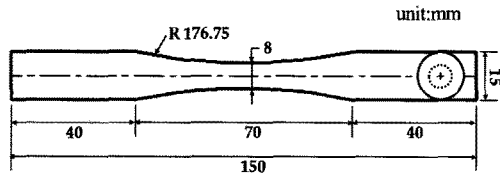


Fig. 1. Specimen shape of tensile test.

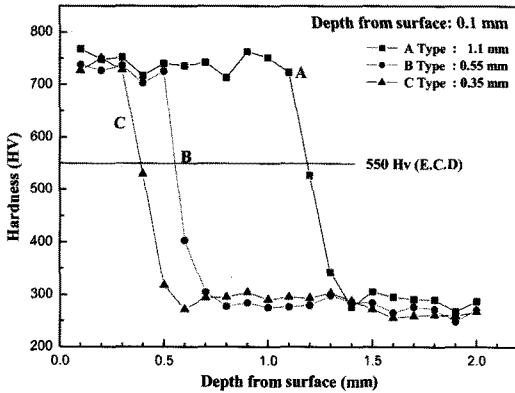


Fig. 2. Relation between hardness and depth from surface.

3. 결과 및 고찰

3.1. 표면경화층 특성

Fig. 2는 경화층과 비경화층의 경도분포를 확인하기 위하여 표면으로부터 깊이방향으로 0.1mm 간격으로 나눠 측정하고 그 결과를 보여준다.

경화층 깊이에 따른 표면경도는 경화층(1.10, 0.55, 0.35mm)에 관계없이 3종류 모두가 약 717HV이었고, 비경화층인 중심부 경도는 약 240HV으로 소재와 동일한 값을 보이고 열 영향을 받지 않음을 알 수가 있었다. 또한, 고주파 유도경화 처리된 SM53C의 표면경도는 각각 평균 717HV으로써 표면경도 680HV 이상이어야 된다는 캠샤프트의 제작사양의 요구조건에 만족함을 확인하였다. Fig. 3은 유효경화층깊이(Effective Case Depth: E.C.D.)를 산출한 식을 표시하였다.

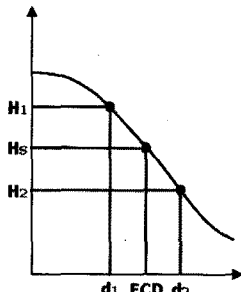


Fig. 3. Verification of effective case depth.

$$ECD = d_1 + \frac{(d_2 - d_1)(\overline{H_1} - H_s)}{\overline{H_1} - \overline{H_2}} \quad (1)$$

여기에서 H_s 는 명시된 경도, $\overline{H_1}$ 및 $\overline{H_2}$ 는 d_1 과 d_2 에서 측정된 경도의 산술평균이다.

검증하고 싶은 유효경화층 깊이보다 얇은 부위(d_1)와 깊은 부위(d_2)의 수직단면 위에 경도를 측정하였으며, 이때 $d_2 - d_1$ 은 0.3mm가 초과되지 않게 하였다. 이와 같은 결과에서 유효경화층깊이를 구하였으며, 목표로 하였던 E.C.D.가 1.10mm, 0.55mm 및 0.35mm인 3종류의 시험편을 준비하였다.

고주파 열처리부의 경도값은 평균 717HV 정도의 경도값을 보이다가 각각의 고주파 열처리부와 베이스부의 경계로 해서 급격하게 감소한다.

고주파 경화층 깊이에 따른 경도 변화는 각각 A, B, C 타입에서 표면부터 1.10, 0.55, 0.35mm까지 완만하다가 각각 1.10, 0.55 및 0.35mm부터 급격한 감소를 나타내었다. 이러한 현상은 현미경 조직으로 부터 알 수 있는 바와 같이 잔존하는 초석페라이트와 불완전 오스테나이트가 경화되어 마르텐사이트가 되고, 마르텐사이트는 내부로 갈수록 급속히 감소하기 때문이라 생각되며 본 소재에서 조직에 의한 경도 상승을 뚜렷하게 볼 수가 있다.

표면경화층 최고 깊이는 1.10mm로 하게 되었고, 표면경화층을 0.35, 0.55mm로 하게 된 것은 인공결합이 표면경화층 내에 있을 때와 경계부 및 경계부에 가깝게 있을 경우에 대한 것을 고려하여 표면경화를 한 것이다.

Fig. 4는 시편의 깊이에 따른 조직을 나타낸 것이다. 경화층의 표면부 (A)에서는 최외 표면층에서 급속 가열에 의해 페라이트의 Fe_3C 가 완전히 오스테나이트로 변태되지 않고 미량 존재하며 급속냉각에 의해서 전면이 걸쳐 미세한 마르텐사이트 조직으로 구성되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 마르텐사이트에 약간의 구상 탄화물(흰점) 입자가 분포된 조직을 볼 수 있다. 경화층의 최외표면부는 이송속도가 느린 경우는 고온가열에 의해서 마르텐사이트의 크기가 표면 직하보다 큰 경우도 있다고 알려져 있지만⁵⁾, 본 고주파 열처리의 경우는 코일이송속도가 매우 빨라서(6.2, 7.0, 7.3mm/sec) 이러한 경향은 나타나지 않았다^{6,7)}.

(B)조직은 내부로 갈수록 기저조직이 완전히 오스테나이트로 변태할 수 있는 온도와 시간이 불충분하여 오스테나이트화 과정에서 탄화물의 고용량이 감소하며, 또한 초석페라이트(White)가 많이 분

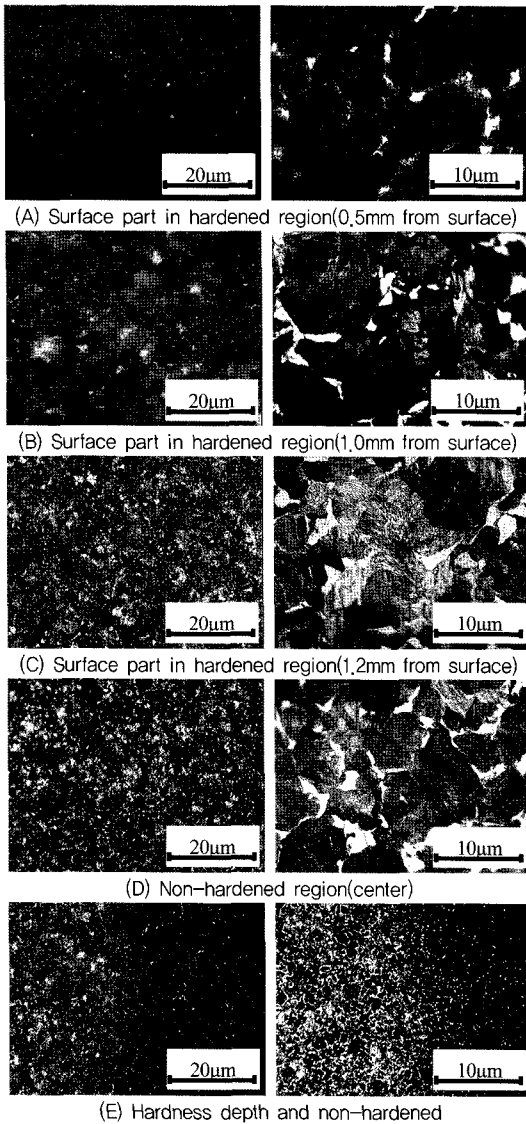


Fig. 4. Optical microstructure of SM53C with 1.10mm hardened depth.

포되어 있으며 거의 분해되지 않고 그대로 존재하고 있음을 관찰할 수 있었다.

(C, D)는 이동가열에 의한 조직변화는 거의 한계점에 달하나 약간의 열 영향을 받았음을 볼 수 있으며, 그 이상의 깊이에서는 본래의 소재의 조직인 펄라이트와 페라이트로 구성되어 있다. (C)에서는 페라이트(White)입자가 박힌 층상 철탄화물로 된 조개껍질형의 부분적으로 미세한 조직 펄라이트(Lamellar)를 확인 할 수 있으며, (D)는 아공석강, 페라이트와 펄라이트를 확인 할 수 있다³⁾.

(E)는 경화층과 비경화층의 경계를 나타내고 있다.

3.2. 인장시험

Fig. 5는 고주파 열처리 조건에 따른 인장시험 결과를 나타내고 있다. 모재와 비교해 볼 때 고주파 열처리한 A타입, B타입 및 C타입은 인장강도가 873MPa, 833MPa, 831MPa로 각각 나타내고 있으며, A타입의 경우 인장강도는 873MPa, 항복강도는 731MPa로 가장 높은 인장·항복강도를 나타내고 있다. 모재와 B타입, C타입을 비교해 볼 때, 인장강도는 크게 차이가 없는 반면, 항복강도에서 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 전체적으로 고주파 열처리한 시험편의 경우 경화층 두께가 깊어짐에 따라 인장강도와 항복강도가 모재보다 증가됨을 알 수 있다.

인장강도 증가 이유는 열처리에 의해 변한 마르텐사이트 조직과 입자크기 감소에 기인되는 것으로 볼 수 있다. Hall-Petch식 $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-0.5}$ 에 의하면 입자크기(d)의 감소는 항복강도(σ_y)를 증가시키게 된다⁸⁾. 경화층 표면부의 마르텐사이트 조직이 비경화층의 조직의 페라이트와 펄라이트 보다 미세하기 때문에 인장·항복강도가 모재보다 향상된다고 생각된다.

응력-변형을 곡선에서 A, B, C타입은 대략 취성적인 파괴 형식의 거동을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 고주파 열처리를 한 강 of 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 있다.

3.3. 파괴인성시험

Fig.7은 캡샤프트용 SM53C 소재의 평면변형을 파괴인성 실험 결과를 나타낸다.

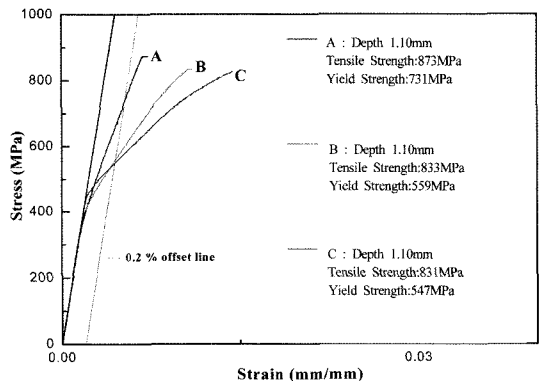


Fig. 5. Relation between stress and strain on hardened depth.

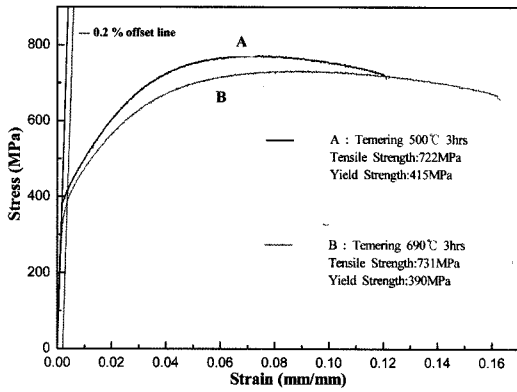


Fig. 6. Relation between stress and strain after tempering.

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

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

여기서

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

$$\alpha = a/W$$

P_Q 는 하중(kN), B 는 시험편 두께(mm), W 는 시험편 폭(mm) 그리고 a 는 균열길이(mm)를 나타낸다.

파괴인성시험은 모재와 경화층 깊이(Hardening Depth) 1mm, 2mm 시험편을 대상으로 각각 실행하였다.

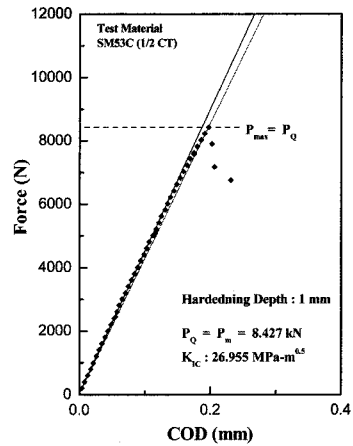
시험 결과 평면변형을 파괴인성치(K_{IC})는 ASTM E399⁴⁾에 규정된 하중조건과 두께 규정(B, a)인 아래 식 (3)과 (4)를 잘 만족하였다.

$$P_{max} / P_{min} < 1.10 \quad (3)$$

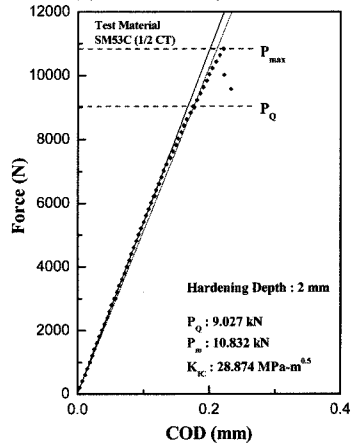
$$B, a < 2.5(K_Q / \sigma_y)^2 \quad (4)$$

실험한 결과 SM53C 재료의 평면 변형을 파괴인성치, K_{IC} 는 경화층 깊이 1mm인 경우 27.0MPa·√m으로 나타났으며, 경화층 깊이 2mm인 경우는 28.9 MPa·√m으로 나타났다.

경화층 깊이 1mm와 2mm를 비교해 볼 때, 전체적으로 P_Q, P_m, K_{IC} 값이 차이가 있음을 알 수 있다. 경화층 두께가 두꺼운 경우가 K_{IC} 가 크게 나타났다. Table 4는 본 연구에 사용된 재료의 파괴인성치를 나타내었다.



(a) hardened depth 1mm



(b) hardened depth 2mm

Fig. 7. Variation of force on COD of SM53C.

Table 4. Fracture toughness values of SM53C

Mat.	Hardness Depth (mm)	Critical Load P_Q (kN)	Maximal Load P_m (kN)	Fracture Toughness K_Q (MPa·m ^{0.5})
SM53C	1	$P_Q = P_m = 8.427$		27.0
	2	9.027	10.832	28.9

4. 결론

본 연구에서는 상용자동차용 캠샤프트 재료인 SM53C에 대한 경화층 깊이에 따른 표면경화특성을 비교 평가하기 위하여 경화조직, 경도, 인장강도 특성 및 파괴인성특성에 대해 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 고주파 열처리부의 경도값은 평균 717Hv 정도의 경도값을 보이다가 각각의 고주파 열처리부와 기저부의 경계로 해서 급격하게 감소하는 것을

알 수 있었다. 따라서 고주파 유도경화 처리된 SM 53C의 표면경도는 각각 평균 717Hv으로서 표면경도 680Hv 이상이어야 된다는 캡사프트의 제작사양의 요구조건에 만족하고 있음을 알 수 있다.

2) 경화층의 표면부에서는 급속냉각에 의해서 전면에 걸쳐서 균일하고 미세한 마르텐사이트조직으로 구성되어 있는 것을 볼 수 있으며, 약간의 잔류 오스테나이트도 잔존하고 있다.

내부로 갈수록 기저조직이 완전히 오스테나이트로 변태할 수 있는 온도와 시간이 불충분하여 오스테나이트화 과정에서 탄화물의 고용량이 감소하며, 또한 초석페라이트가 거의 분해되지 않고 그대로 존재하고 있음을 관찰할 수 있었다.

경화층과 비경화층을 경계로하여 내부로 들어갈수록 이동가열에 의한 조직변화는 거의 한계점에 달하나 약간의 열 영향을 받았음을 볼 수 있으며, 그 이상의 깊이에서는 본래의 소재의 조직인 펄라이트와 페라이트로 구성되어 있다.

3) 고주파 열처리한 시험편의 경우 경화층 두께가 깊어짐에 따라 인장강도와 항복강도가 모재보다 향상됨을 알 수 있다.

4) 고주파 열처리로 1mm 및 2mm 표면경화된 재료는 표면부가 고강도화 되기 때문에 유효경화층깊이(ECD)가 깊은 경우가 K_{IC} 값이 높게 나타났다.

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업, 경상대학교 2단계 BK사업으로 수행된 연구결과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) S. L. Semiaton and D. E. Stutz. "Induction Heat Treatment of Steel", American Society for Metals.
- 2) KIMM, "Development of Dual Frequency Phase Heat Treatment Technology", KIMM Report BSM235-1637.C, Korea, 1991.
- 3) Sudook A. Kim and Ward L. Johnson, "Elastic constants and internal friction of martensitic steel, ferritic-pearlitic steel, and a iron", Materials Science and Engineering, Vol. 452-453, pp. 633~639, 2007.
- 4) ASTM E399, "Standard test method for plane-strain fracture toughness of matallic materials".
- 5) 심재진, 한근조, "고주파표면경화 처리된 0.45% 탄소강의 템퍼링거동", 한국열처리학회지, Vol. 3, No. 2, pp. 10~19, 1990.
- 6) 김정근, 이명철, 차진상, "급속현미경조직학", 도서출판폴드, pp. 189~361, 1999.
- 7) Zheng-tong Han and 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, Vol. 17, No. 2, pp. 238~241, 2007.
- 8) Richard W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", 2nd Ed., Elsevier, New York, pp. 98~99, 1983.