

◎ 論 文

# 高周波表面硬化한 SM45C 鋼에서 有效硬化層깊이가 疲勞舉動에 미치는 영향<sup>+</sup>

吳世旭\* · 許正元\*\* · 金榮範\*\*\* · 朴元祚\*\*

(1991년 1월 11일 접수)

## A Study on Fatigue Behavior according to Effective Case Depth in Induction Case Hardened SM45C Steel

Sae-Wook Oh, Chung-Weon Huh, Young-Beum Kim, and Won-Jo Park

**Key Words :** High-Frequency Induction Hardening(高周波 담금질 硬化), Effective Case Depth(有效硬化層 깊이), Residual Stress(잔류응력), Surface Origin Type Fracture(表面起點破壞), Inner Origin Type Fracture(内部起點破壞), Plastic Restraint(塑性拘束)

### Abstract

This paper reveals the effect of the effective case depth(ECD) on the fatigue behavior of a high-frequency induction hardened SM45C in rotated bending fatigue test. In addition, the effects of fracture modes(surface origin type, inner origin type) on it are discussed.

The fatigue limit of the induction hardened steel is remarkably increased compared with that of base metal. In addition, the fatigue limit is linearly increased as the effective case depth grows deep in the region of this experiment (ECD/R ; 0.23~0.49).

The S-N curve and fracture mode in the induction case hardened steel are classified into two kinds, as a result :  $N_f < 10^5$  ; surface origin type fracture(at high stress),  $N_f > 10^5$  ; inner origin type fracture(at low stress).

In case of inner origin type fracture : as the effective case depth(ECD) gets deep, the fatigue limit is increased by the reason that the fracture origin moves toward center ; in reverse, is decreased by reason that the compressive residual stress gets low. As a result, the increasing effect of the former is much bigger than the decreasing effect of the latter, and the fatigue limit is increased as the ECD gets deep.

+ 1990년도 한국해양공학회 추계 학술대회 발표(1990년 12월)

\* 정회원, 동아대

\*\* 정회원, 동아대 대학원

\*\*\* 정회원, 기아정기

## 1. 서 론

철강부품에서는 표면은 강도가 높고 내부는靱성이 높은 것을 요구하는 경우가 많다. 이러한 요구를 충족시키기 위한 유효한 방법으로 表面硬化 처리를 하는 경우가 많으며, 그 종류는 대표적으로 浸炭硬化法(carburizing), 窒化硬化法(nitriding), 高周波담금질硬化法(induction hardening), 金屬滲透法(metallic cementation) 등이 있다.<sup>1)</sup>

表面硬化 처리법 중의 하나인 高周波담금질硬化法(high-frequency induction hardening)은 위와 같은 목적에 따라 耐摩滅性이나 耐疲勞性을 향상시키는 유효한 방법으로 기계부품에 폭넓게 사용되고 있다.<sup>2,3)</sup> 이 방법은 경화깊이를 조절하는 것과 국부의 담금질이 쉽기 때문에 각종 축, 기어, 핀 및 응력집중부가 있는 부품 등에 사용되고 있다.<sup>3-6)</sup>

高周波담금질硬化 처리는 초기에 耐摩滅性을 向上시키기 위하여 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 耐疲勞性을 향상시키기 위하여 사용되고 있다. 이 처리에 의하여 피로한도가 상승하는 원인은 1) 표면층의 재질을 개선하여 표면강도가 향상되는 효과와 2) 표면경화층에 높은 압축잔류응력이 발생됨으로써 균열발생강도가 향상되는 효과 등, 일반적으로 2가지로 알려져 있다.<sup>1-3)</sup>

高周波담금질硬化한 강은 표면으로부터 일정한 깊이 범위에서는 고경도이고, 내부는 상대적으로 연성이다. 이러한 조직적 특성때문에 피로특성은 表面硬化 조건 즉, 경화깊이, 조직, 표면경도, 잔류응력, 표면으로부터 심부의 경도분포 등에 의하여 영향을 받는다고 보고되고 있으며, 또한 위의 조건에 따라서 破壞樣式이 변하며 破壞樣式의 변화에 의해서도 피로특성은 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.<sup>7,8)</sup> 破壞樣式에는 表面起点破壞와 内部起点破壞가 있으며, 특히 두 破壞樣式의 친이현상에 대한 문제는 피로특성을 이해하는데 중요하므로 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 국내산 SM45C 기계구조용 탄소강으로써 시험편을 가공하고, 高周波담금질硬化 열처리를 하여 有效硬化層깊이를 0.8, 1.1 및 1.7 mm인 3종류의 시험편을 제작하였다. 그리고, 이의

경도분포, 조직, 경화비와 잔류응력의 관계, 피로한도곡선, 破壞樣式의 모식화 및 파면관찰 등의 실험을 통하여, 高周波담금질硬化한 강의 피로거동에 미치는 有效硬化層깊이의 영향과 破壞樣式에 관하여 고찰하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 국내산 기계구조용 탄소강 SM45C로 열간압연강이며, 직경 18mm 환봉이다. 그 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt.%)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Al
0.45	0.73	0.25	0.018	0.007	0.01	0.03	0.058

Fig.1은 위의 재료를 가공하여, 일련의 열처리 과정을 거쳐서 피로 시험에 사용한 형상과 치수를 나타낸다.

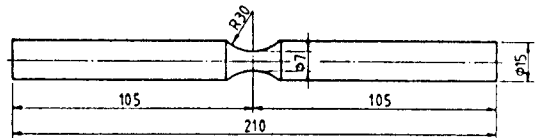


Fig. 1 Configuration and dimensions of rotating bending fatigue test specimen

### 2.2 열처리

본 실험에 사용된 시험편은 가공 중에 발생하는 잔류응력을 제거하기 위하여 650°C에서 1hr 유지한 후 공랭한 것을 소재로 하고, 高周波담금질硬化(high-frequency induction hardening) 열처리를 실시하였다.

高周波담금질硬化 열처리 장치는 SCR 眞空管式 가열장치이고, 이를 이용하여 移動 高周波담금질硬化(progressive high-frequency induction hardening) 처리방식으로 열처리하였으며, 구체적인 작업조건은 Table 2와 같다.

高周波담금질硬化層의 깊이는 Table 2에서 표시한 바와 같이 이송속도를 변화시켜 조절하였으며, 有效硬化層깊이(effective case depth; 이하 ECD

Table 2 Experimental condition for progressive high frequency induction case hardening

Electric power	200 kW	Number of revolution	240 rpm
Frequency	150 kHz	Volumn of quenchant	90 ℓ/min
Quenchant	U-CON 4%	Diameter of induction coil	23 mm
Quenchant temperature	25 °C	Travel speed	variable

라 함)를 0.8, 1.1 및 1.7mm 3종류를 목표로 하여 처리하였다. 高周波담금질硬化 처리를 한 강의 표면은 매우 취성적이기 때문에, 인성을 부여하기 위하여 180°C에서 1hr 유지한 후 공랭을 하여 뜨임 (tempering) 처리를 하였다. 위와 같은 열처리 후에 高周波담금질硬化한 강의 피로한도에 영향을 미치는 표면의 불완전 경화층(硬化層)을 제거하기 위하여, 샌드페이퍼(sand paper)로 표면을 약 0.1mm 제거한 후 버핑(buffing)과 산화알루미늄(oxide aluminum)으로 폴리싱(polishing)을 하였으며, 이를 최종피로시험편으로 하였다.

Neuber의 삼각법칙을 이용하여 시험편의 응력 집중계수( $\alpha$ )를 계산하면 1.03이며, 이것을 편의상 평활시험편으로 하였다.<sup>8)</sup>

### 2.3 실험방법

경도측정은 微小硬度試驗機(300gf, 10sec)를 이용하였다. 有效硬化層깊이를 측정하기 위하여 시험편을 횡방향으로 절단한 절단면을 가장자리에서 0.1mm 간격으로 5회 측정한 결과의 평균값을 경도값으로 결정하였으며, 有效硬化層깊이는 Hv 450 이 되는 지점에서 표면까지의 수직거리로 결정하였다.

실험에 사용된 시험편의 잔류응력의 측정은 가공잔류응력이 생기지 않도록 시험편의 표면을 전해연마로 약 0.05mm 제거한 후, X-ray 응력측정 장치를 이용하여 시험편의 측방향으로 측정하였다.

회전굽힘 피로실험은 Ono식 회전굽힘 피로시험

기를 사용하였으며, 시험기의 회전수는 3450 rpm 이고, 실험의 환경조건은 실온, 대기중이었다. 高硬度材나 表面硬化材의 피로한도곡선은  $10^7$  사이클수에서 수평부가 나타나지 않는 경우가 있고  $10^7$  사이클수 이상에서도 실험할 필요성이 제시된 경우도 있으나,<sup>7)</sup> 본 논문에서는  $10^7$  사이클수에서 피로한도를 결정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 경도분포, 조직 및 잔류응력

Fig.2는 시험편의 노치중앙부 횡회단면의 반경 방향에 대한 경도분포를 표시하고 있다. 표면경도는 ECD에 관계없이 3종류 모두 약 Hv 700이었고, 비경화층인 중심부 경도는 약 Hv 200으로 소재와 동일한 경도값을 보여, 열영향을 받지 않았음을 알 수 있었다. 위와 같은 결과에서 ECD를 구하였으며, 목표로 하였던 ECD가 0.8, 1.1, 1.7mm인 3종류의 시험편을 얻었다. Table 3은 이들의 기계적 성질을 소재 및 H<sub>r</sub>(ECD : full)재와 함께 나타낸 것이다.

Fig.3은 소재와 高周波담금질硬化한 재료의 硬化層과 非硬化層의 깊이에 따른 조직을 나타낸 것이다. 硬化層의 표면부 (a)에서는 급속냉각에 의해서 전면에 걸쳐서 균일하고 미세한 마르텐사이트 조직으로 구성되어 있는 것을 볼 수 있으며,

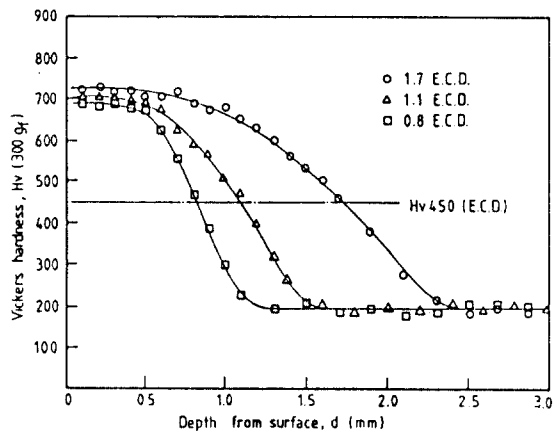
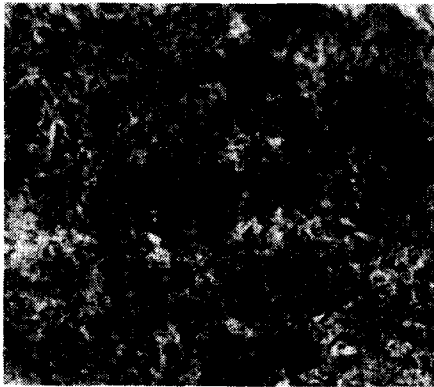


Fig. 2 Distribution of hardness in cross section for specimens

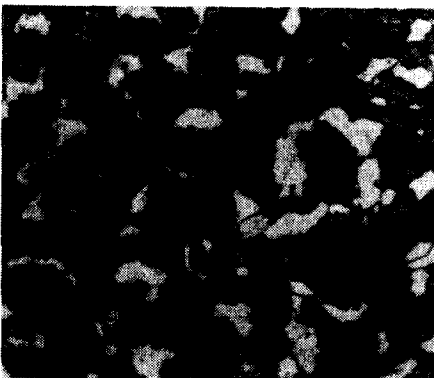
약간의 잔류 오스테나이트도 잔존하고 있는 것으로 생각된다.<sup>10-12)</sup> 硬化層의 最外 표면부는 이송속

Table 3 Mechanical properties of the base metal and the high-frequency induction case hardened materials

Item Materials	Tensile strength (MPa)	Elonga- tion (%)	Reduction of area (%)	Young's Modulus (MPa)
B	872.2	11.1	31	$2.0 \times 10^5$
H0.8	1274	—	—	$2.3 \times 10^5$
H1.1	1333	—	—	$2.3 \times 10^5$
H1.7	1539	—	—	$2.5 \times 10^5$
H <sub>f</sub>	1676	—	—	$2.8 \times 10^5$



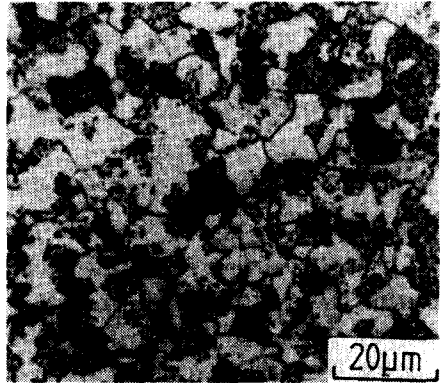
(a) surface part in hardened region(0.3mm from surface)



(b) middle part in hardened region(1.0mm from surface)



(c) inner part in hardened region(1.4mm from surface)



(d) non-hardened region(center)

Fig. 3 Optical microstructure of induction hardened SM45C steel in ECD 1.7mm

도가 느린 경우는 고온가열에 의해서 마르텐사이트의 크기가 표면 직하보다 큰 경우도 있다고 알려져 있지만,<sup>9)</sup> 본 열처리의 경우는 가열속도가 매우 빨라서(98mm/sec) 이러한 경향은 없었다. 내부로 갈수록 基地組織이 완전히 오스테나이트로 변태할 수 있는 온도와 시간이 불충분하여 오스테나이트화 과정에서 탄화물의 고용량이 감소하며, 또한 初析페라이트가 거의 분해되지 않고 그대로 존재하고 있음을 관찰할 수 있다(b,c). 여기서 특히 (c)와 같이 마르텐사이트가 페라이트를 둘러싼 M. E.F.複合組織鋼과 유사한 형태인 특이한 조직이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 硬化層과 非硬化層의

경계를 지난 중심부에서는 열영향이 전혀 없는 본래 소재의 조직인 퍼얼라이트와 페라이트로 구성되어 있다(d). 이러한 조직적 특성은 위에서 기술한 피로파면의 형태를 설명해 주는 근거가 될 것이다.

Fig.4는 시험편 중앙부의 硬化比(시험편 반지름에 대한 ECD의 비; ECD/R)와 전해연마한 표면의 잔류응력의 관계를 나타내고 있다. 표면의 압축잔류응력은 硬化比가 작을수록 증가하고 있다. 특히, 硬化比가 약 0.8 이상에서는 표면에서의 압축잔류응력은 거의 0으로 된다.

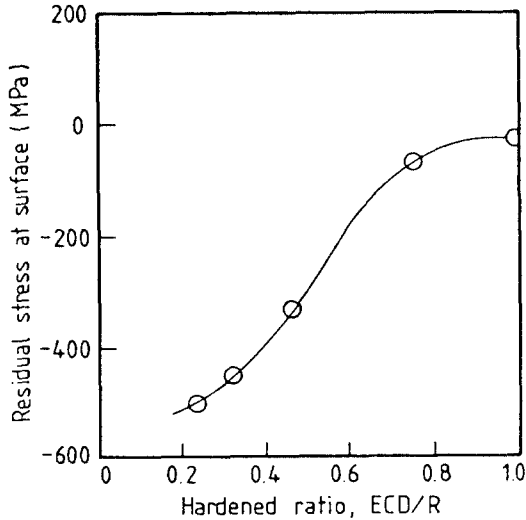


Fig. 4 Relation between residual stress at surface and hardened ratio (R; radius of specimen)

### 3.2 피로한도곡선

Fig.5는 소재와 3종류의 高周波담금질硬化에 대한 피로한도곡선을 나타낸 것이다. 高周波담금질硬化한 강 of 피로한도는 소재에 비하여 현저하게 상승한 것을 보여주고 있으며, 또한 ECD가 깊어질수록 피로한도는 역시 상승한다.

특히, 高周波담금질硬化 처리재의 경우에는  $N_f = 10^5$ 을 경계로 형태가 다른 2종류의 곡선이 나타나고 있다. 이와 같이 피로한도곡선의 變曲이 생기는 원인은 피로파면의 破壞起點의 차이 때문임을 확인하였다. 그림에서  $\boxtimes$ ,  $\otimes$ ,  $\triangle$  표시는 表面

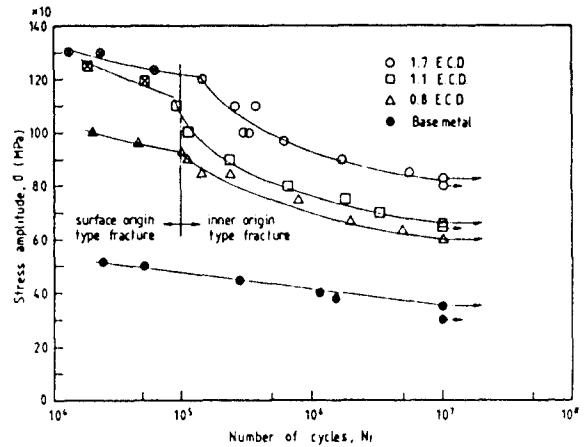


Fig. 5 S-N curves ( $\boxtimes$ ,  $\otimes$ ,  $\triangle$ ; surface origin type fracture)

起點破壞(surface origin type fracture, 이하 S형)를 표시하며, 나머지는 모두 内部起點破壞(inner origin type fracture: fish eye, 이하 F형)이다. 즉, 본 실험의 ECD 범위 내에서는 ECD에 관계없이  $N_f = 10^5$ 을 경계로  $N_f < 10^5$  범위인 고응력의 경우는 표면에서부터 균열이 발생하는 表面起點破壞를 보이며,  $N_f > 10^5$  범위인 저응력의 경우에는 내부에서부터 균열이 발생하는 内部起點破壞를 나타냄을 알 수 있었다. 또한 데이터의 산포가 있기는 하지만 表面起點破壞와 内部起點破壞는 각각 다른 피로한도곡선을 나타냄을 알 수 있다.

피로한도곡선에서 알 수 있는 바와 같이 表面硬化한 재료에서의 피로한도는 F형 破壞樣式에 따른 영향을 고려하여야 한다. 지금까지의 연구결과에서 일반적으로 破壞樣式에 영향을 미치는 인자로 고려되어지는 것은 ECD, 응력레벨, 硬化層과 非硬化層의 硬度比 등으로 알려져 있다. 즉, 응력레벨이 높고, ECD가 깊고, 硬度比가 작으면, 破壞樣式은 F형 파괴에서 S형 파괴로 천이한다는 것이 보고되고 있다.<sup>3, 8, 12)</sup> 먼저, 응력레벨의 破壞樣式에 미치는 영향을 고려하면, 본 실험에서는 파단수명이  $N_f = 10^5$  사이클수인 응력레벨을 경계로 3종류의 ECD에서 모두 破壞樣式이 변하는 천이거동을 볼 수 있다. 이러한 거동은 小沼<sup>5)</sup> 등이나 高川<sup>12)</sup> 등의 실험과 비슷한 결과이다. 硬化層과 非硬化層의 硬度比의 영향을 고려하면, 본 실험의 경우에 硬度比

(硬化層의 표면부 경도/比硬化層의 중심부의 경도; 3.5)가 크므로 3종류의 ECD에서 모두 破壞樣式이 변하는 천이거동이 나타났다. ECD의 破壞樣式에 미치는 영향을 고려하면, ECD가 일정한 값 이상이면 전 응력레벨에서 S형 파괴가 일어난다고 古川<sup>8)</sup> 등은 보고하고 있으나 본 실험의 범위에서 그러한 현상은 발견되지 않았으며, 3종류의 ECD 모두가 F형 파괴와 S형 파괴가 혼재하였다.

3.3 破壞樣式的 모식적 검토

Fig.6은 高周波담금질硬化한 시험편의 횡단면에 대한 피로한도 분포(단면의 각 위치에서 잔류응력의 영향을 고려한 값)와 굽힘모우멘트가 작용한 경우의 응력분포를 모식적으로 표시하고 있다.

먼저 ECD가 비교적 얇고, 피로한도분포가 A( $Y_1 - X_1 - X_3$ )와 같은 경우를 가정한다. 이와 같은 시험편에 굽힘모우멘트가 작용하면, 평활 시험편의 경우는 응력분포가 직선적으로 된다. 이 응력분포가 a 分布線과 같이 X점에 접하는 응력  $\sigma_x$ 에 도달하면, ECD<sub>A</sub> 깊이에서 破壞起點이 발생하여 F형 파괴가 생긴다. 계속 응력이 증가하여도 응력분포가 b 分布線 즉, 응력이  $\sigma_s$  이하에서는 ECD<sub>A</sub> 깊이에서 F형 파괴가 발생하지만, 응력이 b 分布線과 같이 Y점에 접하는 응력분포가 되는  $\sigma_s$ 에서

부터는 표면을 기점으로 破壞起點이 발생하여 S형 파괴로 천이한다. 즉, 저응력에서는 F형 파괴, 고응력에서는 S형 파괴가 일어난다.

다음은 ECD의 영향에 대하여 고찰한다. 피로한도 분포가 A인 경우에 응력분포가 a 分布線인 경우는 ECD<sub>A</sub> 깊이에서 F형 파괴가 발생하고, 이때의 공칭응력은  $\sigma_x$ 이며, 이 값은 피로한도 분포가 A인 경우의 피로한도와 일치한다. ECD가 깊게 되면, 破壞起點이 내부로 이동하고 그것에 따라 X점도 내부로 이동하게 되므로, 피로한도  $\sigma_s$ 는 ECD가 깊어질수록 상승하게 될 것이다. 결국 F형 파괴의 경우에 龜裂開始點은 최종적으로 ECD<sub>N</sub>까지 깊어지고, 피로한도는  $\sigma_s$ 까지 상승할 것이다. 그리고, ECD가 더욱 깊게 되어 피로한도 분포가 B( $Y_3 - X_2 - X_3$ )와 같이 되면, 응력이  $\sigma_s$  이하에서는 파괴되지 않고 응력이  $\sigma_s$  이상인 경우에 S형 파괴만을 보인다. 즉, ECD<sub>N</sub> 이상이 되면, F형 파괴는 발생하지 않고 S형 파괴만 발생하며, 피로한도는 ECD가 더 깊어지더라도  $\sigma_s$ 에서 더 이상 증가하지 않는다.

3.4 파면해석

Fig.7은 高周波담금질硬化한 ECD 1.7mm인 시험편의 대표적인 파단면 형태를 보여주고 있다. (a)는 S형 파괴 (b)는 F형 파괴의 전형적인 파면을 거시적으로 나타내었다. (a)는 표면에서 破壞起點이 발생하였음이 관찰되고, (b)는 내부에서 기점이 발생하여 성장한 fish-eye로부터, 破壞起點이 내부에서 발생하였음이 관찰된다. fish-eye 발생기점의 위치는 硬化層과 非硬化層의 경계부인 有效硬化層깊이(ECD)와 거의 일치함을 알 수 있었다. F형 파괴에서 이러한 fish-eye의 갯수는 단수인 경우와 복수인 경우가 있었으나, 대부분은 단수였다. (c) (d) (e)는 두 경우의 피로파면을 나타내고 있다. (c)는 S형 파괴에서 硬化層의 피로파면인 A부분을 나타내고, (d)는 F형 파괴의 非硬化層인 E부분, (e)는 硬化層의 피로파면인 F부분을 나타낸다. (c) (d) (e)는 모두 粒內軟性破壞의 형태를 보여주며, (c) (d)에서는 스트라이에이션과 유사한 擬스트라이에이션(quasi-striation)이 쉽게 관찰되지만 (e)는 관찰되지 않았다. 이것은 (c)의

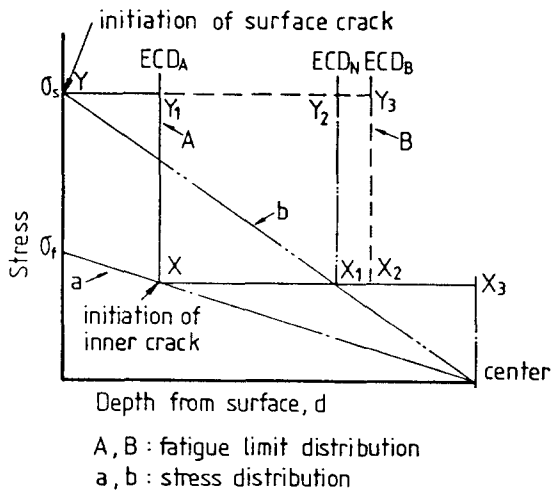
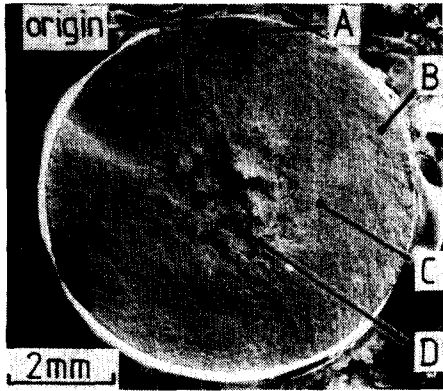
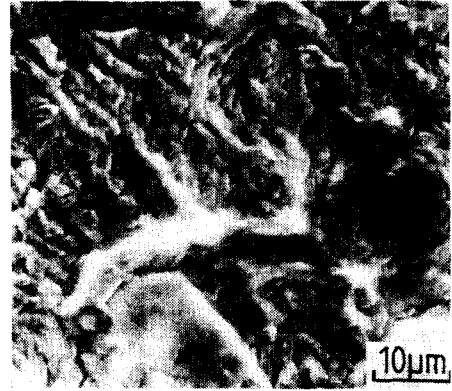


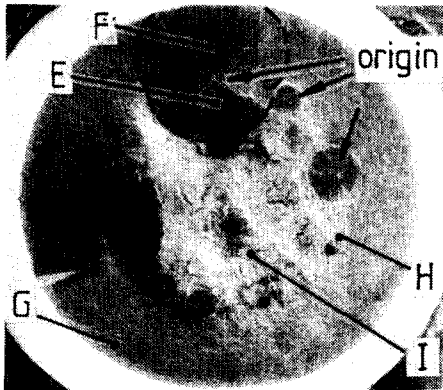
Fig. 6 Schematic illustration of rotating bending fatigue fracture



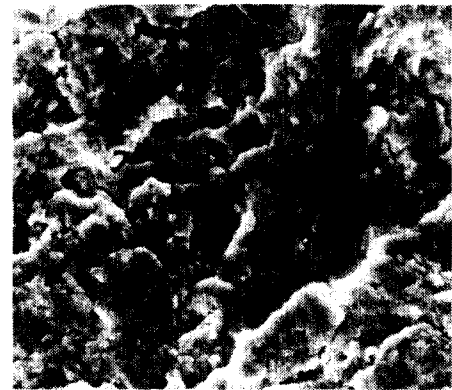
(a) surface origin type fracture (at high stress)



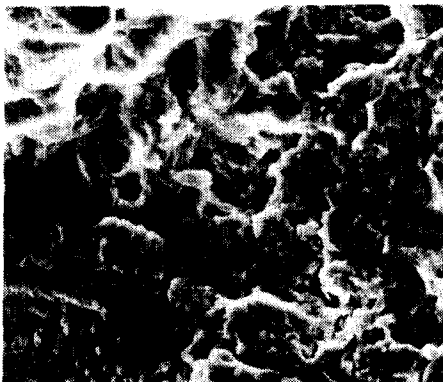
(d) E : fatigue fracture part (0.4mm from origin)



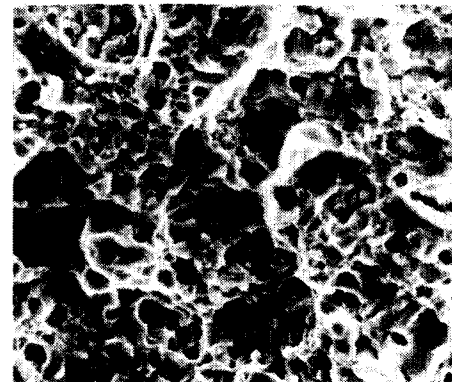
(b) inner origin(fish-eye) type fracture (at low stress)



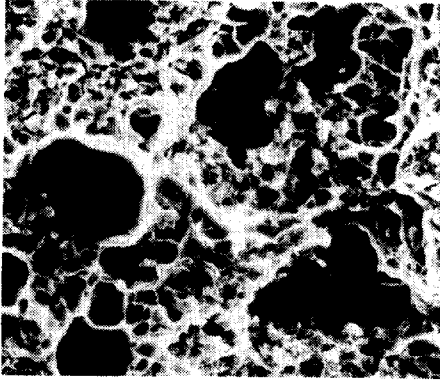
(e) F : fatigue fracture part (0.4mm from origin)



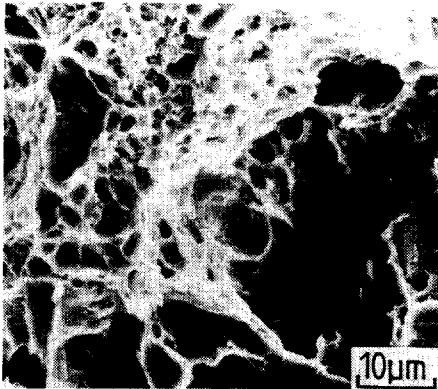
(c) A : fatigue fracture part (0.4mm from origin)



(f) B,G : final rupture part (0.3mm from surface)



(g) C,H ; final rupture part (1.5mm from surface)



(h) D,I ; final rupture part (center)

Fig. 7 Fractography of fracture surface in ECD 1.7mm

경우가 (e)의 경우보다 크랙얼림량이 많고, (d)는 상대적으로 연성이어서 스트라이에이션 형성이 용이하였기 때문인 것으로 생각된다. (f)는 두 破壞樣式의 硬化層에서 표면쪽의 금속과단부인 B,G 부분을 나타내며(Fig.3에서 (a) 부분에 해당한다), 딩플(dimple)이 보이는 粒内軟性破壞가 대부분을 차지하지만 부분적으로 劈開 파셋트가 보이는 粒内脆性破壞가 나타나고 있다. 이러한 粒内脆性破壞는 Fig.3(a)에서 볼 수 있는 잔류오스테나이트가 존재하는 부분으로 생각된다.<sup>13)</sup> (g)는 硬化層에서 내부쪽의 금속과단부인 C,H 부분을 나타내며(Fig. 3에서 (c) 부분에 해당된다), 딩플이 보이는 粒内

脆性破壞와 劈開가 보이는 粒内脆性破壞가 혼재하고 있다. 이와 같은 특이한 파면은 Fig.3(c)와 같이 M.E.F.複合組織鋼과 같은 조직적 특성에서 생긴다. 즉 페라이트부의 劈開破面은 페라이트에 대한 마르텐사이트의 塑性拘束(plastic restraint) 때문인 것으로 생각된다. 劈開破面은 ECD가 증가할수록, 동일 ECD에서는 응력레벨이 높을수록 이러한 현상은 뚜렷하게 나타나는데, 이것은 ECD와 응력레벨이 증가함에 따라 페라이트에 대한 마르텐사이트의 塑性拘束력이 상대적으로 증가하기 때문이다.<sup>14)</sup> (h)는 두 破壞樣式의 非硬化層의 금속과단부인 D,I 부분을 나타내며(Fig.3의 (d) 부분에 해당된다), 딩플과 劈開가 혼재하고 있다. 여기서 劈開破面은 ECD 0.8mm인 경우에는 전혀 발견되지 않았으며, ECD 1.1mm인 경우에는 고응력( $N_1 < 10^5$ )에서만 발견되었고, ECD 1.7mm인 경우에는 모든 시험편에서 발견되었다. 劈開破壞가 발생하는 원인은 硬化層 非硬化層에 대한 거시적인 塑性拘束의 영향인 것으로 생각된다. 응력이 높아지면 塑性拘束력이 증가하며, 또한 ECD가 증가할수록 硬化層의 단면적이 非硬化層의 단면적에 비하여 상대적으로 증가하면서, 塑性拘束력이 증가하기 때문에 응력과 ECD의 증가에 따라 劈開破壞가 쉽게 발생하는 것으로 생각된다.

파면의 전체적인 거동을 보면, S형 파괴는 F형 파괴에 비해 전체 파면에서 피로파면이 차지하는 면적이 상대적으로 작으며, S형 파괴는 시험편의 표면에서 균열이 시작되어 내부로 전파하여 파괴에 이르게 되고, F형 파괴는 硬化層과 非硬化層의 경계부인 有效硬化層깊이 (ECD)에서 균열이 시작되어 내부(非硬化層)와 표면(硬化層)의 2 방향으로 전파되어 파괴에 이른다는 것을 알 수 있다.

### 3.5 결과 검토

ECD에 따른 피로한도의 관계를 구체적으로 나타내면 Fig.8과 같다. 본 실험의 범위에서 피로한도는 ECD에 따라 선형적으로 증가하고 있다. 이와 같이 高周波담금질硬化한 강에서 피로한도의 상승은 재질개선과 표면의 압축잔류응력이라는 것은 앞에서 기술한 바와 같다.<sup>3-5)</sup> 여기서 ECD에 따라 재질개선과 압축잔류응력이 피로한도에 어떠한 영



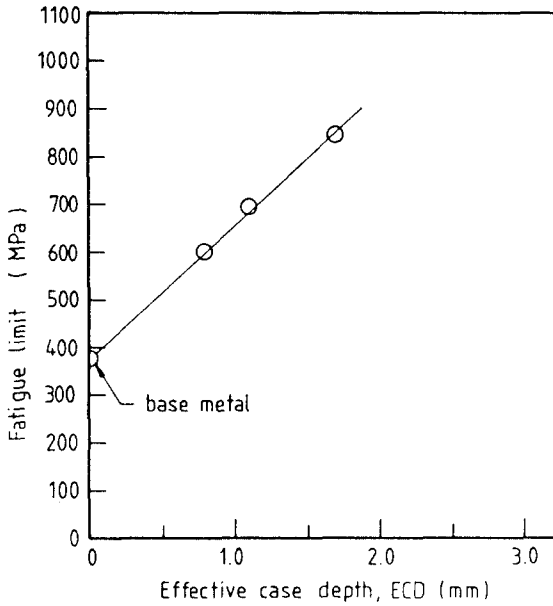


Fig. 8 Relation between fatigue limit and effective case depth

향을 미치는지를 고려하고자 한다.

먼저 압축잔류응력의 영향에 대하여 고려하면, 압축잔류응력은 피로한도를 상승시킨다고 알려져 있다.<sup>3-5)</sup> 그러나 Fig.4와 같이 ECD가 깊어질수록 표면에서의 압축잔류응력은 감소한다. 즉, ECD가 깊어질수록 상대적으로 피로한도를 감소시키는 효과를 준다. 이어서 재질개선의 영향에 대하여 고려한다. 여기서 3 종류의 ECD에 있어서 F형 파괴의 破壞起點인 硬化層과 非硬化層의 경계부에서의 피로한도는 동일하다고 가정한다. Fig.9에서와 같이, ECD가 0.8mm일 경우에 공칭응력  $\sigma_n$ 이 작용한다면, 경계부에서는  $\sigma_r$ 가 발생할 것이다. 또 ECD가 1.7mm인 경우에 동일한 공칭응력  $\sigma_n$ 이 작용한다면, 경계부에서의 응력크기는  $\sigma_r$ 이 되므로 ECD 0.8mm 경우와 비교해서 상대적으로 작아진다. 따라서 ECD가 1.7mm인 경우에 경계부에서 ECD 0.8mm와 동일한 응력  $\sigma_r$ 를 발생하도록 하기 위해서는 공칭응력을  $\sigma_n'$ 까지 증가시켜야 한다. 즉, 경계부에서의 응력크기를  $\sigma_r$ 로 동일하게 하기 위해서는, ECD가 깊어질수록 공칭응력  $\sigma_n$ 을 증가시켜야 한다. 여기서  $\sigma_r$ 를 경계부의 피로한도로 가정하면,

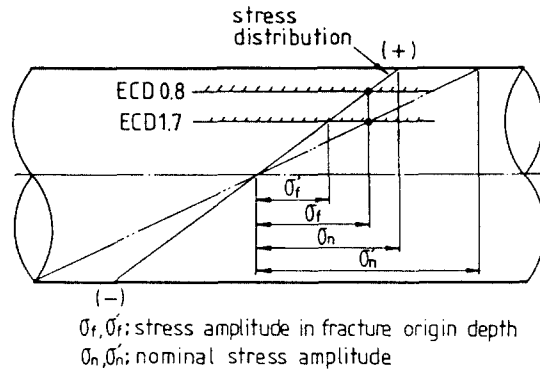


Fig. 9 Schematic illustration of stress distribution according to arbitrary nominal stress

공칭응력  $\sigma_n$ 은 각 시험편에 대한 피로한도를 의미한다. 따라서 ECD가 깊어질수록 피로한도는 상승하는 것이다.

결과적으로, ECD가 깊어지면 잔류응력의 측면에서는 압축잔류응력이 감소하기 때문에 피로한도를 상대적으로 감소시키는 효과를 주지만, 재질개선의 측면에서는 재질개선에 따라 破壞起點이 내부로 이동하기 때문에 피로한도를 상승시키는 효과를 준다. 따라서, 두 경우가 상반된 효과를 주지만 결과적으로 ECD가 깊어지면 피로한도는 상승하므로, 잔류응력에 의한 피로한도의 감소효과보다 재질개선에 의한 피로한도의 상승효과가 훨씬 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

高周波담금질硬化한 SM45C 강 의 피로실험을 실시하고, 피로거동에 영향을 미치는 有效硬化層 깊이 및 破壞樣式의 영향에 대하여 실험, 고찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 표면의 압축잔류응력은 硬化比(ECD/R)가 증가하면 감소하고, 硬化比가 0.8 이상에서는 거의 0이 된다.
- 2) S형 파괴는 시험편의 표면에서 균열이 시작되어 내부로 전파하며, F형 파괴는 硬化層과 非硬化層의 경계부 즉, 有效硬化層깊이(ECD)에서 균열이 시작되어 내부(非硬化層)와 표면

(硬化層)의 2 방향으로 전파되어 파괴에 이르게 된다. 또한 두 파괴형태에서 硬化層이 非硬化層을 塑性拘束하는 현상이 생겨 非硬化層에 劈開破面이 나타난다.

- 3) 高周波담금질硬化한 강의 피로한도는 모재의 경우보다 현저하게 상승하며, 또한 본 실험의 범위(ECD/R : 0.23~0.49)에서 有效硬化層깊이가 깊어질수록 피로한도는 선형적으로 증가한다.
- 4) 高周波담금질硬化한 강 of 피로한도곡선은  $10^6$  사이클수를 경계로 2 종류의 피로한도곡선 및 破壞樣式으로 구분된다. 즉,  $N_f < 10^6$  사이클수인 고응력의 경우는 表面起點破壞(S형),  $N_f > 10^6$  사이클수인 저응력의 경우는 内部起點破壞(F형)를 나타낸다.
- 5) 内部起點破壞인 경우 ECD가 증가함에 따라, 破壞起點이 내부로 이동하기 때문에 피로한도를 증가시키는 효과를 주지만, 반대로 압축잔류응력이 감소함으로써 피로한도를 감소시키는 효과를 준다. 여기서, 전자의 증가효과는 후자의 감소효과에 비해서 현저히 크기 때문에 ECD가 증가함에 따라 피로한도는 상승한다.

### 參 考 文 獻

- 1) 김수영, 김정규, 기계재료학, 문운당, pp.183~185, 1987
- 2) 산업 연구원, Vol.4, No.3 B-5, 고주파 담금질, 1988
- 3) 日本機械學會, 疲勞強度의設計資料, pp.87~133, 1969
- 4) 佐藤初吉, 外 2名, “高周波焼入れした中炭素鋼の疲れ強さにおよぼす残留應力の影響”, Vol. 16, pp. 267~274, 1976
- 5) 米谷茂, “残留應力”, 機械の研究, Vol.38, No.6, pp. 732~738, 1986
- 6) 松原洋一, 外 2名, “二重周波誘導加熱による齒車の高周波 焼入” 熱處理, Vol. 29, No. 2, pp. 92~99, 1989
- 7) 小沼靜代, 外 1名, “焼入れ焼もどした高硬度鋼の疲勞特性と硬さの關係”, 材料, Vol.38, No. 433, pp. 1128~1132, 1989
- 8) 古川徹, 外 2名, “高周波表面硬化したS45C鋼の回轉曲げ疲れ限度に及ぼす心部硬さ及び切欠形状の影響”, 鐵と鋼, Vol.72, pp. 62~69, 1986
- 9) 심재진, 외 1명, “고주파표면경화 처리된 0.45 % 탄소강의 템프링거동”, 한국열처리학회지, Vol.3, No.2, pp. 10~19, 1990
- 10) Krauss, G, “Principles of Treatment of Steel”, ASM, pp. 200~201, 1980
- 11) Semiatin S. L., Stutz D. E., “Induction Heat Treatment of Steel”, ASM, pp. 245~257, 1986
- 12) 古川徹 外 3名, “高周波表面硬化した鋼の疲れ限度におよぼすゆるい切欠の効果”, 材料, Vol. 37, No.413, pp. 178~184, 1988
- 13) 小寺澤良一, フラクトグラフィとその應用, 日本, 日刊工業新聞社, pp. 241~245, 1983
- 14) 김정규, “복합조직강의 파괴인성에 미치는 소성구속에 의한 내부응력의 영향”, 대한기계학회논문집, Vol.7, No.2, pp. 123~129, 1983