

〈논 문〉 SAE NO. 98370014

## S45C강의 고주파 열처리 표면경화재 피로한도 예측에 관한 연구

### The Study on Estimation of Fatigue Limit in Induction Surface Hardened S45C Steel

이 수 진\*, 전 형 용\*, 성 낙 원\*\*  
S. J. Lee, H. Y. Jeon, N. W. Sung

#### ABSTRACT

The effects of small hole defect size and effective case depth(ECD) on the four point bending fatigue limit of induction surface hardened S45C steel were investigated. the fatigue limit evaluation of hardened materials is very difficult because of relations of the hardness gradient and residual stress. In this study, it was possible to characterize fatigue limit and fatigue life of induction surface hardened S45C steel in terms of the hole defect size and effective case depth(ECD) and quantitative evaluation of the fatigue limit with hole defects use Murakami's evaluation method and the range of evaluated values is a good accuracy compared with results.

주요기술용어 : Indction Surface Hardened(표면경화재), Fatigue Limit(피로한도), Hole Defect Size(원공결함크기), Surface Hardness(표면경도)

#### 1. 서 론

대형 철골 구조물의 파손 또는 파괴 사고는 약 80%~90% 정도가 피로에 의하여 발생되고 있으며 이러한 사고의 파괴 원인을 조사해 보면, 대부분 구멍, Notch, 균열, 내부 결함이나 Scratch와 같이 단면형상이 급변하는 부분에서 발생하는 균열에 기인되고 있다. 이러한 대표적 예가 1995년 수도 서울에서 일어났던 성수 대교의 붕괴 사고이다.<sup>1)~3)</sup>

최근 구조물 강도계산 방법이 발달됨에 따라 구조물의 경량화설계와 경제적인 여건을 고려한 최적설계를 추구하고 있다. 이러한 추세는 자연스럽게 재료에 대한 고강도화를 요구하고 있어 재료 사용조건이 가혹해짐에 따라 피로파괴에 대한 문제점을 고려해야만 된다. 이에 대한 대책으로 급힘 반복하중을 받는 구조물이나 차축, 용수철, 금형, 항공기 부품과 같은 중요 부재에서는 소재 표면을 표면경화하면 표면근방의 조직이나 재료 특성이 변화되어 표면층 직하에 압축잔류응력을 발생되므로 내마모성 및 피로수명이 향상될 뿐만 아니라 소재의 표면은 고강도화를 이루고 내부는

\* 동아대학교 기계공학과

\*\* 정희원, 동아대학교 기계공학과

연질인 모재의 특성을 그대로 유지하는 경제적 소재가 되어 고강도화 및 고인성화의 목적을 동시에 달성할 수 있다.<sup>5)</sup> 그 방법으로 다양한 열처리 방법을 사용하고 있으나 그 중에 비교적 경제적이고 사용이 간단하며, 정량적인 열처리가 가능한 고주파 열처리가 많이 사용되고 있다.<sup>6)</sup>

일반적으로 현장 기술자들은 탄성학을 기초로 하는 재료역학적 방법으로 구조물에서 발생하는 응력이나 변형률을 산출하고 평가하여 설계하고 있으며, 노치(Notch)나 구멍이 존재하는 경우에는 정확한 이론 근거없이 경험적 안전율을 적용하고 있는 실정이다.<sup>4)</sup> 이러한 현실속에서 경량설계로 요구되는 고강도 재료는 제품의 제조, 제작, 설치 및 사용 중에 발생하는 미소결함이나 표면 혹은 표면적하의 비금속 개재물을 기점으로 피로균열이 성장하게 되며, 특히 이러한 현상은 저 및 중강도강의 경우보다 고강도강에서 피로강도 저하에 민감하게 작용하므로 안전한 구조물 설계를 위해서는 고강도강의 피로강도예측에 대한 평가 및 원인규명의 필요성이 더욱 요구된다.<sup>5), 7)</sup>

설계변수로 수십 $\mu\text{m}$ 에 달하는 미소결함이나 재료내부에 존재하는 개재물 영향에 대한 피로강도를 정량적으로 평가하기에는 매우 어렵고 복잡하다. 그러나 피로강도 저하에 영향을 미치는 미소균열이나 미소결함, 개재물에 대한 연구가 川田, 渡, 西岡, 成田 등에 의하여 꾸준히 연구가 진행되고 있다.<sup>8)</sup>

피로파괴에 중대한 영향을 끼치는 미소결함 및 미소균열이나 개재물을 가지는 부재의 피로한도를 정량적으로 평가할 수 있다면, 설계단계에서 구조물의 갑작스런 파손 및 파괴를 미리 방지할 수 있을 것이다. 이를 위하여 간편하고 실질적인 평가방법이 요구되어 지고있다.<sup>11)</sup>

현장 기술자나 설계자들은 반드시 설계 변수로 미소균열 및 미소결함이나 개재물에 의한 피로강도에 미치는 영향의 중요성을 인식하고 그것에 관하여 정확한 검토가 있어야 한다.<sup>1), 3), 8), 9)</sup>

따라서 본 연구에서는 S45C강 시험편에 인공 결함을 도입하여 고주파 표면경화 처리한 후, 최대 주응력이 작용하는 수직방향에서 투영한 결함

형상면적 (*area*)의 평방근  $\sqrt{\text{area}}$ 와 비커스 경도값(Hv)에 대한 상관관계를 파라메타로 이용하여 피로강도에 영향을 미칠 수 있는 인공결함크기 및 인공결함의 거리에 따른 간섭효과와 유효경화층에 따른 피로한도 예측에 관하여 연구하였다.<sup>9), 11), 12)</sup>

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 시험편, 재료 및 실험장치

본 실험에 사용한 재료는 일반적으로 철구조물 및 기계부품으로 널리 사용되는 국산 일반기계구조용 탄소강S45C 냉간압연강재를 환봉으로 가공하였다. 이 시험편의 화학적 성분과 형상을 Table 1과 Fig.1에 각각 나타내었다.

본 시험편은 직경 7mm인 환봉이며 잔류응력 제거 및 냉간가공으로 인한 소성변형으로 발생하는 취성저하를 개선하기 위하여 850 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1hr동안 노냉한 후에, 드릴가공 및 고주파 표면경화처리의 균일성을 위해서 #100에서 #1,500까지의 에머리페이퍼(Emery Paper)를 이용하여 경면을 연마한 후, 0.3 $\mu\text{m}$ 의 알루미늄파우더를 이용하여 최종경면을 연마하였다.

### 2.2 열처리

본 실험에 사용된 고주파 표면경화기 열처리

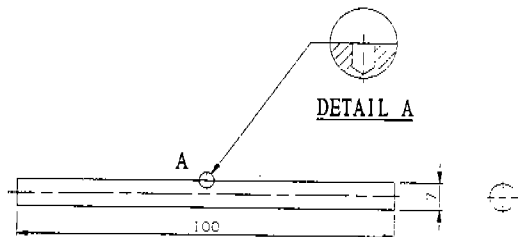


Fig.1 Shape and Dimensions of Specimen

Table 1 Chemical Composition of S45C

(wt.%)							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.45	0.25	0.73	0.012	0.01	0.025	0.02	0.02

Table 2 Experimental Condition for Progressive High-Frequency Case Hardened

Electric Power	60kW	Number of Revolution	90rpm
Frequency	100kHz	Volume of Quenchant	90 l /min
Quenchant	U-CON 4%	Diameter of Induction Coil	20mm
Quenchant Temperature	25°C	Travel Speed	37mm/s

장치는 전동발열기(MG식) 열처리 장치이며 이를 이용하여 이동식 고주파 표면 경화(Progressive High-Frequency Induction Case Hardening) 처리방법으로 가공하였으며 구체적 작업방식과 조건은 Table 2와 같다. 고주파 표면경화층 깊이(Effective Case Depth : 이하 ECD라 함)는 0.4, 0.6, 1.0mm 3종류로 분류하여 열처리하였다. 고주파 표면경화처리된 강의 표면에서 쉽게 발생될 수 있는 담금질균열과 시효균열과 같은 현상을 제거하기 위하여 180°C에서 1hr동안 유지하였으며 열처리한 후에 고주파 표면경화한 강의 피로한도에 미치는 표면산화층을 제거하기 위해서 #800~#1,500까지 에머리 페이퍼(Emery Paper)로 표면산화층을 제거하고 0.3 $\mu$ m 알루미늄나파우더를 이용하여 폴리싱하여 시험편을 최대한으로 줄였다.

### 2.3 실험방법

실험에 사용한 시험기는 용량이 5ton인 전기 유압식 서어보식 피로시험기(SHIMADZU)이며 4점굽힘으로 미소결함위치를 하중방향으로 정하여 실제부재가 힘을 받도록 하였고, 시험편은 11Hz속도로 반복하중을 부과하여 실험을 수행하였다. 일반적으로 표면경화재의 피로한도곡선을  $1.5 \times 10^6$ 사이클에서 수평부가 대부분 나타나므로  $1.5 \times 10^6$ 사이클에서 발생하는 응력을 피로한도로 간주하고있으며, 고경도재나 표면경화재의 피로한도곡선은  $10^7$ 사이클에서 수평부가 나타나는 경우도 있지만 대부분 취성적이어서  $1 \times 10^5$

에서 대부분 피로파괴가 진행된다.<sup>23)</sup>

또한 정류균열을 관찰을 위해서 에머리 페이퍼 #100~#1,500으로 표면산화층을 제거하고 마지막으로 0.3 $\mu$ m의 알루미늄나파우더로 이용하여 폴리싱하여 이를 최종피로 시험편으로 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 경도분포, 조직 및 잔류응력

Fig.2에서 경도측정은 마이크로 비커스 경도 시험기를 사용하여 하중 300g에서 하중시간은 30sec로 하고 ECD는 JIS G 0559-1977(KS D 0027-1982)에 따라 H,450되는 표면까지 수직층으로 하였다. 표면경도는 ECD(0.4, 1mm)에 관계없이 2종류 모두와 약 H,700이었고, 비경화층인 중심부 경도는 약 H,190으로 소재와 동일한 값을 보이고 열영향을 받지 않음을 알 수가 있다.<sup>12)</sup>

Fig.2에서와 같이 경도값이 서서히 떨어지다가 급격히 감소하여 모재와 비슷한 경도를 나타내고 있으며 원공재와 비원공재의 표면경도는 동일하지만 노치영향으로 인해서 비원공재가 전체적으로 원공재에 비해서 약간 경도값이 떨어지고 있음을 알 수가 있다.

이와 같은 경도 분포를 보면 다른 논문에서 서술되는 것처럼 탄소강은 담금질 전의 재료의 조직이 큰영향을 미치며, 0.4~0.5%탄소강에서는

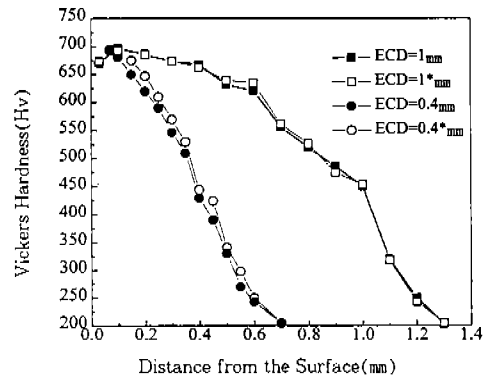
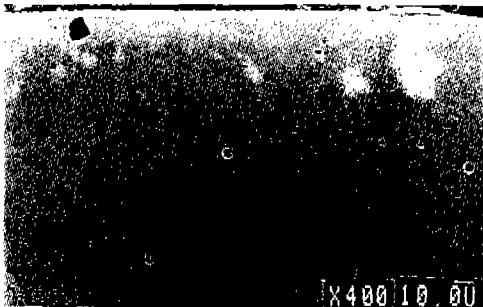


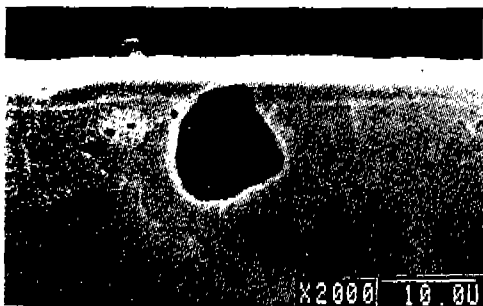
Fig.2 The Hardness Gradient Distribution from the Surface

조직에 의한 경도 상승이 뚜렷하게 볼 수가 있고, 주철과 같이 흑연 확산이 늦은 것은 최고표면경도가 표면보다는 내부에 나타나기 쉽지만, 탄소강은 약간의(30~50 $\mu$ m)내부에서 최고경도를 얻어짐을 알 수가 있다.<sup>6)</sup> 노치재에 대한 최대 표면경화층 깊이(ECD)는 1.0mm로 하게 되었고 0.4, 0.6, 1.0mm로 표면경화층을 하게 된 것은 인공결합이 표면경화층내에 있을때와 경계부 및 경계부에 가깝게 있을 경우에 대한 것을 고려하여 표면경화를 한 것이다.

Fig.3(a)에서 고주파 표면경화재의 내부에 존재하고 있는 개재물의 분포를 전자현미경(SEM)으로 현상한 사진이다. 문헌에서 말하는 파단기점이 되는 개재물의 형상 및 크기와 위치를 볼 수가 있었다. (b)는 경화층내에 존재하여 파단기점이 되는 표면근방의 개재물이며 이러한 개재물은 파단에 직접적인 원인이 된다.



(a) Distribution of Inclusion



(b) Inclusion in the Upper Surface

Fig.3 Photographs of Inclusions Obtained Near Induction Surface of the Hardened S45C

이러한 영향으로 S-N곡선에 피로한도가 많은 분산을 보이는 것은 비금속 개재물의 크기에 따라 시험편이 각각 다른 피로한도를 갖기 때문이라고 생각되며 또한 이것이 예측식의 오차를 크게하는 인자라는 것을 알 수 있었다.<sup>12), 15), 19)</sup> 따라서 재료내부에 존재하는 개재물의 최대크기가 13 $\mu$ m이었으므로 이 값을 Murakami 예측식에 대입하여 계산했을때 그 오차가 10% 이내로 접근됨을 알 수가 있었다.<sup>22)~24)</sup>

Fig.4은 시험편의 중앙부 횡단면의 반경방향에 대한 경화비(시험편 반지름에 대한 ECD의 비: ECD/R)와 전해연마한 잔류응력의 관계를 나타내고 있다.<sup>12)</sup>

경화비가 34%에 해당되는 ECD 1,000 $\mu$ m의 경우에 굽힘 시험편의 축방향 잔류응력이 직경방향에 따라서 어떻게 변화되는 가를 나타내고 있으며, X-선 회절시험으로 측정된 최대잔류응력은 시험편 표면에 발생되며 대략 -40kgf/mm<sup>2</sup>의 값을 나타내고 있으나 유효 경화층깊이에 도달하면 거의 0에 가까워짐을 알 수가 있다. 또한 직경방향에 따라서 잔류응력과 경도분포가 비슷한 경향을 가지므로 경도 측정값을 이용해도 잔류응력의 영향에 대한 예측을 할 수가 있다고 볼 수 있다. 따라서 Murakami가 제안한 경도에 따른 예측식의 상관관계를 생각하면 식(1), (2)으로부터 고주파 표면경화재의 피로한도를 예측할 수가 있다.

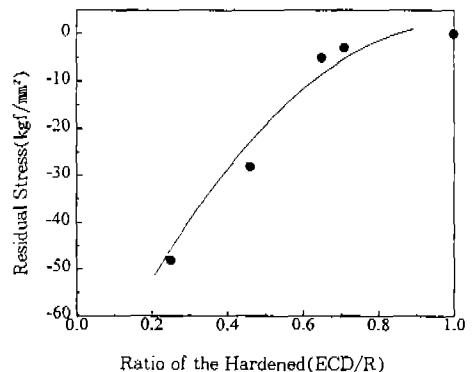


Fig.4 Relation between Residual Stress and Ratio of the Hardened Surface

### 3.2 평활재의 피로강도에 미치는 고주파 표면경화의 영향

Fig.5는 표면경화재와 모재 시험편의 평활재에 대한 피로한도곡선을 나타낸 것으로 표면경화재가 모재보다는 피로한도가 약 1.8배정도 향상되었음을 알 수가 있다.<sup>12),14)</sup> 고주파 표면경화재의 경우에는 인장강도가 높아지고 피로한도가 상승했지만 급속파단으로 인해서 산포가 심한 현상을 나타내고 있다. 그 이유는 피로한도에 영향을 끼치는 미소결함이나 개재물이 재료내에 존재하는 경우에는 이것들의 크기에 따라서 피로강도가 좌우되기 때문이라고 생각되며 이러한 결함감소에 대해서는 야금학적 제어가 어렵고, 제어가 가능하다고 할지라도 경비 절감이나 실용적인 측면에서 바람직하다고 볼 수 없을 것이다.

이것에 대하여村上은 결함이나 개재물 치수를 정확하게 평가하는 것이 경제적인 측면이나 안전을 과대로 인한 재료 손실 등을 최소화할 수 있다고 주장하였으며 이것들의 크기를 정확하게 평가하기 위해서는 최대 주응력방향에서 투영한 결함 크기면적(area)를 측정해야 하며 이면적의 평방근  $\sqrt{area}$ 가 피로강도를 좌우하는 가장 중요한 기하학적 인자가 된다고 밝히고 있다.<sup>7)~9)</sup>

따라서 본 논문은 시험편이나 부재의 피로강도는 재질경도나 최대 개재물 치수에 의해서 거의 결정되는  $\sqrt{area}$ 의 최대값  $\sqrt{area_{max}}$ 을 결정하는 것이 필요하다고 판단되어 현미경으로 실험한

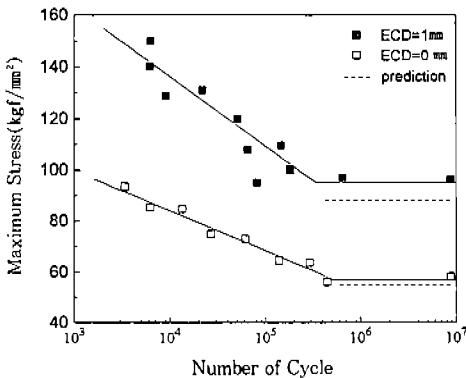


Fig.5 S-N Curves for Matrix Materials and Hardened S45C

재료의 조직관찰을 통하여 개재물 치수를 확인하고, 본 실험값과 예측값을 비교하여 Fig.5에 실제 값을 점선으로 나타내었으며 예측식은 Murakami가 제안한 것을 이용하였다.

Fig.5에서 고주파강이 약간 과대 평가되고 있음을 알 수가 있다. 이러한 결과는 상술한 식이 개재물이나 미소결함에 존재하지 않거나 존재하더라도 피로한도에 끼치는 영향이 매우 적다는 가정을 기초로 하여 만들어진 식이기 때문에 본래 식의 예측값보다 낮게 평가되고 있다.

Fig.4에서 나타낸 바와 같이 압축잔류응력이 표면에 충분히 작용하고 있음에도 불구하고 본래 식의 예측값에 도달하지 못한 다는 것은 재료내부에 존재하는 개재물이나 미소결함에 큰 영향을 받은 결과라고 생각된다.<sup>9),14),24)</sup> 이러한 개재물의 기지조직과 접촉상태가 불량한 개재물이 지속적인 반복하중을 받으면 계면에 틈이 벌어지고 비트(Bit)를 형성하여 응력집중효과로 비트의 테두리에서 균열이 발생된다. 따라서 본실험에서 정확하게 연구가 이루어지지 않은 것은 시험편에 개재물이 포함되어 이 개재물에 의하여 파단이 이루어진 것으로 생각을 할 수가 있기 때문이다.<sup>9),14),17),23)</sup>

### 3.3 원공결함재의 피로강도에 미치는 드릴구멍깊이의 영향

Fig.6은 원공결함인 드릴구멍깊이에 따른 최대 응력값과 파단 반복수와 관계를 각각 나타낸

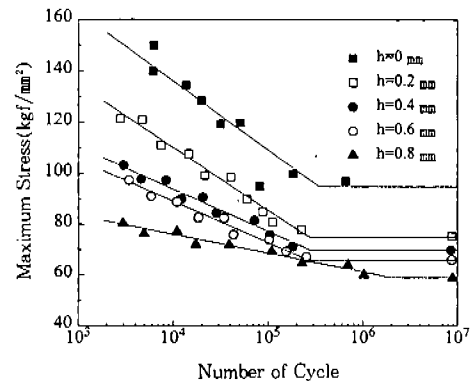


Fig.6 S-N Curves for the Specimens with Various Hole Depth

것이다. 드릴구멍의 깊이가 유효 경화층 깊이에 가까워질수록 피로한도값은 급격히 떨어지고 있음을 볼 수가 있다. 이러한 원인은 결함이나 개재물이 삽입된 형상 변화부에서는 일반적으로 응력집중현상이 발생될 뿐만 아니라 균열발생 한계 응력이 저하되어 결국에는 파단기점으로 진전되기 때문이라고 판단된다. 이와 같은 미소결함이 피로강도저하에 영향을 끼치는 현상을 노치효과라고 한다. 피로에 의한 노치효과는 오래 전부터 연구되어진 문제로 정확하게 이해하기 위해서는 미소결함이나 노치등의 길이나 형상에 대하여 응력집중과의 상관관계를 정확하게 파악할 필요가 있다. 따라서 Yamada등이 상사형 미소결합 형상에 따른 피로 실험을 수행한 결과 이러한 100  $\mu\text{m}$ 이하의 작은 결함이 처음부터 재료내에 존재하여 이 결함으로부터 발생하는 균열은 슬립(Slip)대나 입계에서 발생되어, 이것이 인접한 결정입계내로 전파되는 정류균열과 동일하게 정류되어지므로 드릴직경이 작을수록 피로한도는 상승하며 입계드릴구멍크기이하에서는 피로한도가 포화되어 평활재의 피로한도에 도달한다고 주장하고 있다.

따라서 본 실험에 사용된 S45C강 쿨칭재의 경우 정류균열이 20 $\mu\text{m}$ ~50 $\mu\text{m}$  정도이므로 피로한도를 저하시킬 정도의 강도저하가 발생되지 않

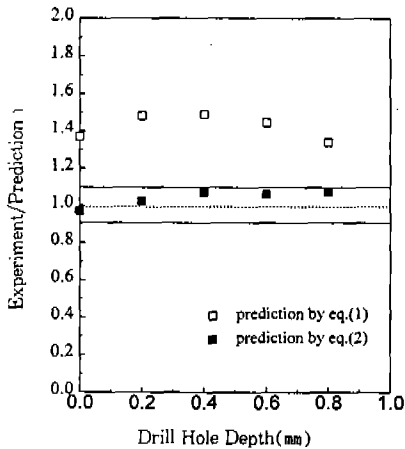


Fig.7 Relation between Prediction and Experiment of Fatigue Limits under the Condition of Various Hole Depth

기 위해서는 적어도 50 $\mu\text{m}$ 이하의 드릴 직경이어야 한다고 생각된다.<sup>20~4)</sup> 본 연구와 Yamada등의 연구결과를 종합해 보면 피로한도는 표면상의 균열길이와 균열깊이의 영향이 동시에 작용하여 나타난 결과라고 판단된다. Fig.7은 식(1)을 기초로 하여 예측한 피로한도값을 나타낸 것이다. 피로한도의 실험값과 예측값사이에는 대략적으로 1.3~1.5배정도의 값차이를 보이고 있으므로  $\sqrt{\text{area}}$  파라미터를 이용한 피로한도 예측식의 수정은 불가피하다고 생각된다.<sup>17), 22), 23)</sup>

Furukaw등이 행한 고주파 표면경화재의 경우의 재료경도(HV)보다는 압축잔류응력에 따른 변화가 매우 크므로 피로한도 예측식에서 경도값의 항을 수정하는 것보다는 잔류응력에 따른 수정식의 첨가가 필요하다고 생각되어 수정피로한도예측식을 제안하였다.<sup>25)</sup>

다음의 식(1)은 Murakami<sup>22)</sup>가 제안한 경도에 따른 피로한도 예측식이며 식(2)는 잔류응력을 고려한 수정식이다.

$$\sigma_w = 1.43 \times (H_v + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \quad (1)$$

$$\sigma_w = 1.43 \times (H_v + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \{ (1-R)/2 \}^\alpha \quad (2)$$

$$R = (\sigma_{res} + \sigma_m - \sigma_w') / (\sigma_{res} + \sigma_m + \sigma_w')$$

$$\alpha = 0.226 + H_v \times 10^{-4}$$

여기서 응력비(R)는  $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ 이며 파라미터의 단위는  $\sigma_w$ (Mpa): 피로강도,  $\sqrt{\text{area}}$  ( $\mu\text{m}$ ): 원공결합재의 면적,  $H_v$ ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ): 비커스 경도값이다.

여기서  $\sigma_{res}$ 는 앞에서 축방향의 표면잔류응력값으로 경화비 34%인 경우에 -40Mpa이고  $\sigma_w'$ 가 미지수이기 때문에 응력비(R)도 미지수가 된다. 따라서 파단된 응력진폭중에  $1 \times 10^4$ 일 때의 응력진폭  $\sigma_s$ 를  $\sigma_w'$ 의 근사적 값으로 R에 대입하면 새로운  $\sigma_w$ 가 계산되어지고 전 단계에서 가정한  $\sigma_w'$ 와는 다르다.

또한 전단계의  $\sigma_w'$ (첫단계의 경우  $\sigma_w' = \sigma_s$ )와  $\sigma_w$ 의 평균을 다음 단계의  $\sigma_w'$ 로서 식(2)의 R에 대입하면 새로운  $\sigma_w$ 가 된다. Fig.7은 기존의 예

측 방법인 식(1)을 이용한 결과와 상술의 식(2)를 이용한 결과를 서로 비교한 것이다. □는 잔류응력을 고려하지 않은 기존방식이며 30~40% 정도가 과소 평가되고있으며 ■은 잔류응력을 고려한 결과로 피로한도 예측에 10% 이내로 매우 정확하게 평가되고 있다. 따라서 표면 경화재의 피로한도를 예측할 경우에 잔류응력에 관한 사항이 고려되어야 한다고 생각된다.<sup>4), 19), 22)</sup>

### 3.4 피로강도에 미치는 유효경화층깊이에 대한 영향

Fig.8은 유효 고주파 경화층 깊이에 따른 직경

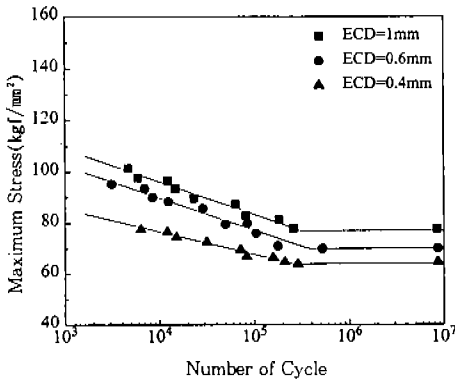


Fig.8 S-N Curves for the Various Effective case Depth(ECD)

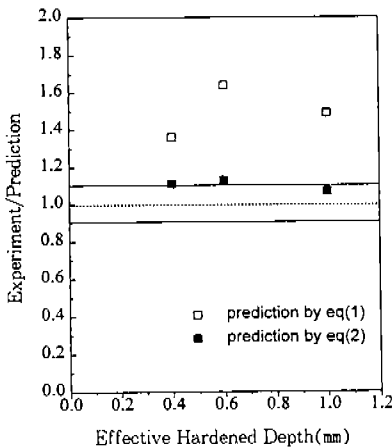


Fig.9 Relation between Prediction and Experiment of Fatigue Limits under the Condition of Various Effective Depth (ECD)

200 $\mu$ m, 깊이 400 $\mu$ m 원공결합재의 최대 응력값과 파단 반복수와의 관계를 나타내고 있다. 유효 경화층깊이에 비례하여 피로한도값은 상승하고 있을 뿐만 아니라 유효 경화층 깊이가 드릴깊이보다 충분히 클 경우에는 피로한도가 포화되는 경향을 나타내고 있다.<sup>5), 6), 12)</sup>

이러한 결과는 드릴구멍의 각부위에서 응력집중을 가장 많이 받는 선단부분이 마르텐사이트의 고강도강으로 둘러 쌓여 균열발생 한계응력에 대한 부하응력이 작아졌기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 압축잔류응력이 원공결합재의 피로한도에 영향을 최소화하기 위해서는 압축잔류응력장이 드릴구멍선단을 둘러싸야 할 것으로 생각된다. 그러나 평활재에 비하면 피로한도가 많이 감소되는 현상을 보이고 있으므로 실질적인 피로한도향상을 위해서는 피로한도에 영향을 주는 인자들을 제거해야만 한다.<sup>22), 23)</sup>

Fig.9는 유효경화층깊이에 따른 피로한도 예측결과를 나타낸 것이며 기존의 방식보다는 본 연구에서 제안하는 방식으로 예측한 피로한도가 훨씬 더 실험값에 접근하고 있음을 알 수가 있다. 이러한 결과는 기존 방식 식(1)은 부하응력에 의한 것이고 식(2)는 잔류응력효과를 고려한 실제 응력비이기 때문인 것으로 생각이 된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 S45C강에 인공드릴결합을 도입하여 최대 주응력 방향에서 투영한 결합형상면적(area)의 평방근  $\sqrt{area}$  와 비커스 경도값을 파라메타로 하여 미소결합크기와 유효경화층 깊이에 따른 피로한도를 예측하기 위하여 4점 굽힘 피로시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평활재의 경우, 고주파 표면경화재가 모재에 비하여 피로강도는 향상되었지만 산포가 심한 이유는 Fig.3과 같이 재료 내부에 존재하는 개재물(최대크기 13 $\mu$ m)이나 미소결합의 원인으로 발생하는 현상이라고 생각되므로 비교적 정확한 피로한도를 예측하기 위해서는 정량적인 결합크기가 밝

혀져야 한다고 생각된다.

- 2)  $\sqrt{area}$ 는 피로강도를 추정하는 유효한 파라메타이며 원공결합재의 피로한도는 잔류응력을 고려한 수정 예측식으로 평가를 할 때 10% 이내 오차범위에 들어감을 알 수가 있었다. 따라서 표면경화재의 피로한도를 예측할 경우 잔류응력이 예측식에 반영되어야 한다고 판단된다.
- 3) 고주파 열처리로 표면경화된 재료는 마르텐 사이트 급속 조직으로 변화되어 고강도화를 이루므로 유효 경화층 깊이가 증가함에 따라 피로한도는 증가하지만 결함이 유효경화층내에 있을 경우에는 현저한 피로강도 증가를 기대할 수 없다. 따라서 피로한도에 끼치는 영향을 최소화하기 위하여 압축잔유응력장이 결합전단을 돌려 싸야한다고 판단된다.

## 후 기

이 연구논문은 동아대학교 학술 연구비 지원에 의해 연구된 논문임.

## 참 고 문 헌

- 1.村上, 金屬疲勞, 微小缺陷と介在物の影響, 養賢堂, pp. 54~72, 1993.
- 2.村上, 河野, 遠藤, 疲勞強度に及ぼす人工微小缺陷の影響(第1報 S10Cおよび S45C焼なまし材の疲勞強度に及ぼす直徑40 $\mu$ m~200 $\mu$ mの微小穴の影響) 材料, 第44卷 第388號, pp. 4003~4009, 1983.
- 3.村上, 河野, 遠藤, 疲勞強度に及ぼす人工微小缺陷の影響(第2報 S45C焼入れ材, 焼入れ焼もどし材の疲勞強度に及ぼす直徑40 $\mu$ m~200 $\mu$ mの微小穴の影響) 材料, 第45卷 第400號, pp. 1479~1485, 1979.
- 4.村上, 河野, 遠藤, 疲勞強度に及ぼす人工微小缺陷の影響, 材料, 第29卷 第325號, pp. 988~992, 1980.
- 5.吉川, 小沼, 細具, 高周波表面硬化したS45C

鋼の回轉曲げ疲勞限度に及ぶ深部さ及び切欠形状の鐵と鋼, 第72年 第1號, pp. 62~69, 1986.

6. 산업연구원 Vol. 4, No. 3, B-5, 고주파 담금질, 1988.
- 7.村上, 松田, 微小き裂からき裂が發生するための限界應力, 日本機械學會論文集, 第53卷 第489號, pp. 871~877, 1987.
- 8.村上, 清水, 疲勞強度に及ぼす介在物, 微小缺陷, 微小き裂の影響, 日本機械學會論文集, 第54卷 第499號, pp. 413~425, 1988.
- 9.村上, 疲勞強度に及ぼす微小缺陷や非金屬介在物の影響とその定量的評價法, 鐵と鋼, 第75年 第8號, pp. 1267~1277, 1989.
10. Toriyama, Murakami, The  $\sqrt{area}$  Parameter Model for Evaluation of Effects of Various Artificial Small Defects and Mutual Interaction of Small Defects on Fatigue Limits, J. Soc. Mat. Sci., Japan, Vol. 42, No. 481, pp. 1160~1166, 1983.
11. Kodama, Konuma, Murakami, Quantitative Evaluation of Nonmetallic Inclusions on Fatigue Strength of High Strength of High Strength Steel, JSME, Vol. 54, No. 500, pp. 688~696, 1988.
12. 吉川, 小沼, 鈴木, 若林, 高周波表面硬化した鋼の疲勞強度に及ぼすゆるい切欠の効果, 材料, 第37卷 第413號, pp. 178~184, 1988.
13. 송삼홍, 이상훈, 원공결합을 갖는 표면경화재의 정량적 피로강도 평가 대한연구 대한기계학회 '95년도 추계학술대회논문집(1), pp. 180~184, 1995.
14. 上村, 村上, 2次元的最大介在物寸法推定法の問題点數値シミュレーションによる評價, 日本機械學會論文集, 第56卷 第521號, pp. 162~167, 1990.
15. 高強度鋼の疲勞強度に及ぼす介在物の影響の定量的評價法 日本機械學會論文集, 第54卷 第500, pp. 688~695, 1987.
16. 介在物寸法の統計的評價とそれに基づく高



- 硬鋼の疲労限度の豫測 日本機械學會論文集, 第55巻 510, pp. 213~221, 1989.
17. 村上, 遠藤, 疲労限度に及ぼす微小缺陷の影響の評価法, 日本機械學會論文集, 第49巻 第438號, pp. 127~136, 1983.
  18. 村上, 遠藤, 微小き裂の下限界應力擴大係數幅 $\Delta K$ に及ぼす硬さとき裂形状の影響, 材料 第35巻 第395號, pp. 911~917, 1986
  19. 村上, 宇宿, 介在物寸法の 統計的評價とそれに基づく高硬さ鋼の疲労限度の豫測, 日本機械學會論文集, 第55巻 第510號, pp. 213~221, 1983.
  20. Y.Murakami and S.Nemat-Nasser. Growth and Interacting Surface Flaws of Arbitrary Shape, Eng. Fract. Vol. 17, No. 3, pp. 193~210, 1983.
  21. Y.Murakami and S.Nemat-Nasser. Interacting Dissimilar Semi-elliptical Surface Flaws under Tension and Bending, Eng. Fract. Vol. 16, No. 3, pp. 373~386, 1982.
  22. 各種人工缺陷および微小缺陷の相互干涉か疲労限度にす及ぼす影響の $\sqrt{area}$  ハ°メータ モデル による評價 재료 Vol. 42, No. 481, pp. 1160~1166.
  23. 焼入れ焼もとした高硬度鋼の疲労特性と硬さの関係 材料, 第38巻 第433號, pp. 1128~1132, 1988.
  24. 村上, 宇宿, 介在物寸法の統計的評價とそれに基づく高硬さ鋼の疲労限度の豫測, 日本機械學會論文集 第55巻 510號, pp. 213~221, 1989.
  25. 村上敬宣・上村裕二郎・夏目喜孝・宮川進 : 微小缺陷または介在物を含む高強度鋼の疲労強度に及ぼす平均應力の影響, 日本機械學會論文集A, 56-525, pp. 1074-1081, 1990.