韓國精密工學會 '97年度 秋季學術大會論文集 pp.676~679

고주파 표면열처리된 Cr-Mo강재의 피로특성과 수명예측

Fatigue Characteristic and Life prediction of Induction Surface Hardened Cr-Mo Steel

송삼홍(고려대 공대), 최병호*(고려대 대학원)
S. H. Song(Korea Univ.), B. H. Choi*(Graduate School, Korea Univ.)

ABSTRACT

Practically, induction surface hardening is used widely to enhance the local strength of structure. In this study, Fatigue limit and its S-N characteristic for raw and induction hardened specimen of SCM440 is studied experimentally. The life prediction was considered by Juvinall's equation and its predicted result is compared with experiment.

Key Words : Induction Hardening(고주파 열처리), Fatigue Limit(피로한도), Effective Case Depth(유효경화 깊이), Fatigue Life(피로수명)

1. 서론

축재나 기어등의 기계구조물은 주기적인 피로하중 상태에 놓이는 경우가 많으며 이러한 피로하중으로 인하여 발생하는 파손을 방지하기 위하여 파손이 예상되는 부분에 고주파 표면 열처리나 침탄, 질화, 숏피닝등과 같은 표면 경화 열처리를 실시하여 국부적으로 경화시키는 방법이 많이 사용되고 있다.

그 중에서 고주파 표면 열처리는 효과적으로 국부만의 경도를 향상시키고 압축잔류응력을 발생시켜 정적강도를 증가시키며 다른 표면 처리에 비하여 변형도 적지만 다른 표면 경화법과 마찬가지로 피로강도의 변화가 일반 저강도강과는 다른 특성을 나타내어 피로강도를 예측하는 것은 상당히 어렵다. 기존의 연구자들[(1)(2)등]도 각 재료에 따라 실험적 보고를 해 오고 있으나 피로강도의 일반화나 예측에 대한 연구는 그다지 활발하게 연구되어지지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 Cr-Mo강재인 SCM440재의 원재와 표면경화재의 피로한도와 그 특징을 고찰하고 Juvinall이 제안한 피로강도 예측식을 이용하여 예측식 적용여부에 대하여 조사한다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 시험편 재료로는 축재, 기어 등의 재료로 쓰이는 기계구조용 합금강인 SCM440을 사용하였다. 본 재료의 화학적 성질과 기계적 성질을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 1. The Chemical Composition of SCM440

SCM440 (Wt%)				
C	Si	Mn	Cr	Mo
0.41	0.25	0.68	1.05	0.23

Table 2. The Mechanical Property of SCM440

Yield Stress (MPa)	Ultimate Stress (MPa)	Hardness (Hv)
556.8	664.3	215

시험편은 850℃에서 1시간 동안 어니일링처리한 후 Fig. 1과 같이 가공하고 연마지로 #100부터 #1500까지 표면연마를 하였다. 원공결함은 깊이 0.5mm, 지름 0.5mm로 가공하였다. 위와 같이 가공된 원재에 표면 열처리로 고주파 표면 경화를 실시하였다. 고주파 표면경화 열처리의 조건은 Table 3에 나타내었다.

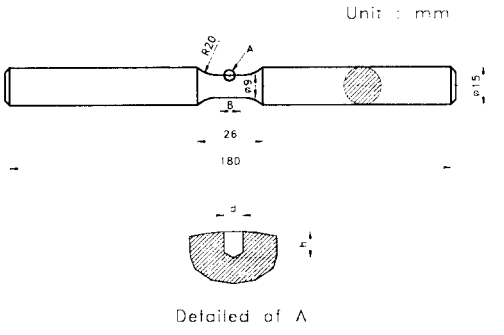


Fig. 1. Geometry of specimen

Table 3. The Condition of Induction Hardening

Power Source	Vacuum Tube
Power	50kW
Frequence	250kHz
Current	1.6A
Heating time	3sec
Coil	Single-shot Coil

실험에 사용된 시험기는 최대굽힘 모우멘트 98N-m, 회전수 3000rpm인 Ono식 회전 굽힘 피로시험기를 사용하였고, 응력비는 -1이다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 고주파 열처리된 Cr-Mo강재의 조직 및 경도의 변화

Fig. 2에는 원재의 조직사진과 열처리재의 표면, 유효경화깊이(ECD), 전경화깊이(FCD)에서의 조직사진을 나타내었다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있는 것처럼 원재의 조직은 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있으며 이는 경화재의 원재의 조직과 일치함을 알 수 있다. 하지만 Fig. 2(b)에서는 오스테나이트 조직이 관찰되는 것을 알 수 있으며 Fig. 2(c)에서는 Fe_3C의 오스테나이트 고용율이 적어지면서 Fig. 2(b)와 Fig. 2(d)의 중간형태가 되는 것을 알 수 있다.

위와 같은 조직변화는 고주파 표면열처리로 인한 가열 온도차에 의한 것으로 이러한 조직의 연속적 변화는 경도의 변화로 확인할 수 있다. Fig. 3에는 표면에서 심부로 향하여 발생하는 경도의 변화를 나타내었다.

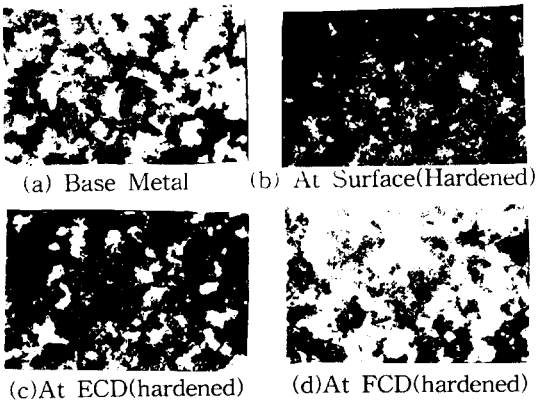


Fig. 2 Microstructure of hardened SCM440

Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 표면에서의 경도값은 Hv560을 나타내었고 표면직하에서 최대값 Hv570을 나타내었다. 어니일링 처리한 원재의 경도는 Hv215로 나타났으며 따라서 전경화층의 두께는 2.2mm이며 KS D 0027에 의한 본 표면경화재의 유효경화층 깊이는 1.4mm이다. 또한 본 재료의 경화비(시험편 반경에 대한 ECD의 비)는 0.31로 나타났다. 본 재료의 표면 열처리에 의한 잔류응력의 발생을 검토하기 위하여 X선 회절법을 사용하여 표면부의 잔류응력을 측정한 결과 -354.4MPa로 측정되었고 片川등[3]이 S45C에 대하여 측정한 실험값에 의하면 경화비 0.31에 대하여 -411.6MPa의 값이 나타난다고 보고한 바 있으며 두 측정값의 차이는 원재의 재질의 차이에 기인한다고 생각된다.

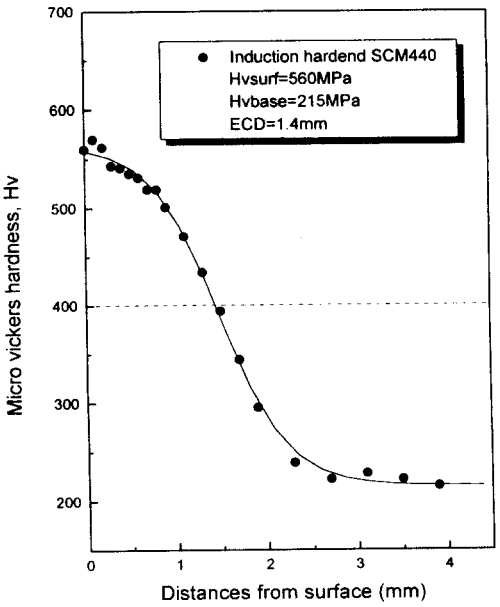


Fig. 3 The Distribution of Hardness in Transverse Section

3-2 고주파 열처리된 Cr-Mo강재의 피로거동

Fig. 4에는 SCM440원재에 대한 S-N선도를 나타내었다. 실험결과 평활 시험편의 경우 피로한도는 315.8MPa로 나타났고 원공결함재의 경우에는 246MPa로 나타났다. 또한 Fig. 5에는 고주파 표면열처리재의 S-N곡선을 나타낸다. 평활 시험편의 경우 S-N곡선의 양상이 두 가지로 나타나고 있음을

알 수 있다. 즉, 수명이 짧은 경우에는 크랙이 표면에서 발생하는 양상을 보이지만 수명이 길어짐에 따라 크랙의 발생지점이 내부가 됨을 알 수 있다.

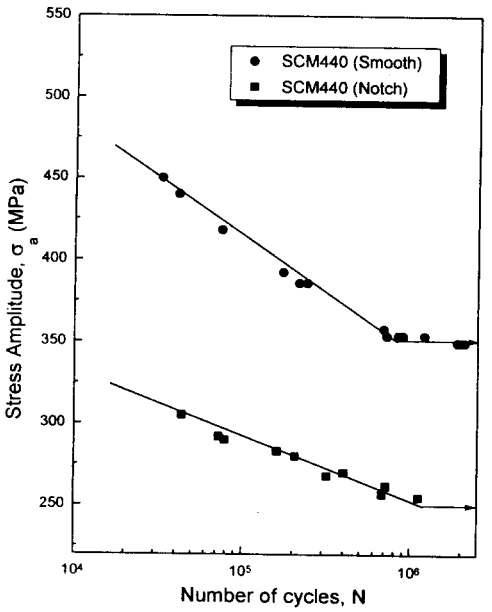


Fig. 4 S-N curve of SCM440

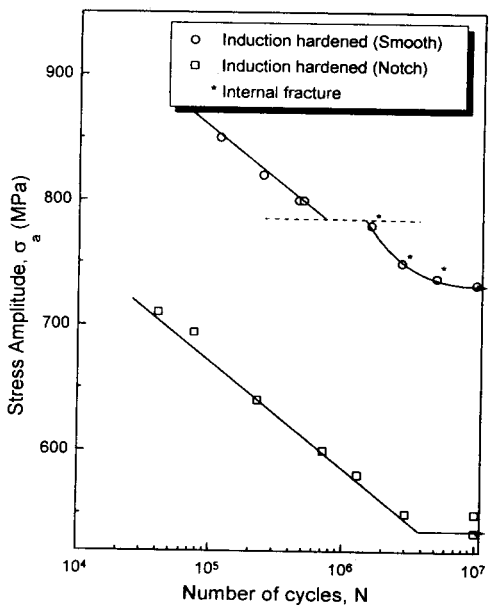
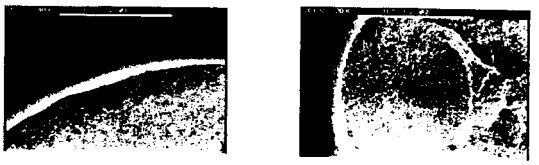


Fig. 5 S-N curve of hardened SCM440



(a) Surface fracture (b) Internal fracture

Fig. 6 Fractography of two cases by SEM

이는 전경화된 고강도강에서 나타나는 보고와 비슷한 경향[4]이며 표면 경화된 강의 경우 2단으로 S-N이 나타난다는 보고[3]와 꺽인점이 없이 일직선으로 나타난다는 보고[5]가 있는데 본 실험의 경우에는 2단으로 정리할 수 있었다. Fig. 6(a)에는 표면에서 파단이 시작된 시편의 파면 사진을 나타내었고 Fig. 6(b)에는 어안(Fish eye)에서 크랙이 발생하기 시작한 경우의 파면을 SEM으로 찍은 사진을 나타낸다. 내부에서 크랙이 발생하기 시작하는 응력과 표면에서 크랙이 발생한 응력사이에는 천이 응력부가 관찰되었고 이 지역에서는 파단되지 않는 시편도 발견되었는데 이 응력부에 대하여는 좀 더 연구해 보아야 한다고 생각된다.

표면 열처리재의 경우 평활 시험편은 10^7까지의 회전수까지의 파단되지 않는 응력을 피로강도라 하면 735MPa이고 노치재의 경우에는 535MPa로 나타났다. 이는 평활재의 경우에 2.33배, 노치재의 경우에 2.17배 피로강도가 증가하였음을 보여준다.

3.3 고주파 열처리된 Cr-Mo강재의 피로수명예측

Juvinall과 Shigley[7][8]는 피로수명을 예측을 하기 위하여 10^3에서의 피로강도로 선정된 점과 특정 반복수 N_e의 피로강도로 선정된 점을 연결하여 S-N곡선을 추정하는 식을 제안하였다. 특히 Juvinall은 Ne를 변화시켜 S-N을 추정할 수 있도록 그 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$S_{ar} = A\,N_f^{B} \tag{1}$$

여기에서,

$$B = -\frac{\log \dfrac{m'\sigma'_u K_f}{m\sigma_u K'_f}}{\log N_e - 3} \tag{2}$$

$$A = \left[\frac{\left(\dfrac{m'\sigma'_u}{K'_f}\right)^{\frac{\log N_e}{3}}}{\dfrac{m\sigma_u}{K_f}}\right]^{\frac{3}{\log N_e - 3}} \tag{3}$$

이다.

여기서 σ_u는 부재의 인장강도이고 K_f는 피로노치계수를 나타내며 K'_f는 수명에 따라 변하는 피로노치계수로 Juvinall은 이것을 K_f와 같다고 가정하였다. 또한 m, m'은 피로강도계수로 Juvinall은 m'=0.9이고, m은 다음과 같은 관계식을 갖는다고 하였다.

$$m = m_e m_t m_d m_s m_o \qquad (4)$$

여기서, m_e는 굽힘피로한도계수, m_t는 하중계수, m_d는 크기계수, m_s는 표면처리계수, m_o는 기타계수이다.

본 식을 적용할 때에 K_f는 Peterson이 제안한 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{\beta}{\rho}} \qquad (5)$$

여기에서 β는 재료상수로 본 실험에서와 같이 어니일링된 원재의 경우 0.25mm, 표면경화재의 경우에는 0.064mm가 된다. 그리고 K_t는 본 실험 d=0.5mm의 경우 2.4가 된다[8].

실험에 의한 S-N선도상 피로한도를 예측하기 위하여 N_c의 값을 원재의 경우에는 10^6으로 표면경화재의 경우에는 10^7으로 채택하였으며, 인장강도를 표면경화재의 경우 크랙이 발생하는 표면에서의 σ_u를 구하기 어려우므로 다음과 같은 식을 채용하였다[9].

$$\sigma_u = 3.54 H_B \qquad (6)$$

여기서 H_B는 브리넬경도로 본 실험에서는 마이크로비커스경도를 측정하였으므로 측정된 이 값을 환산하여 대입하면 된다. 이와 같은 식으로 계산된 값들을 정리하면 Table 4와 같이 된다.

Table 4. Calculated parameters of S-N estimation

	A	B
Hardened (Smooth)	2855	-0.0766
Hardened (Notch)	1539	-0.0766
SCM440 (Smooth)	1076	-0.0851
SCM440 (Notch)	768.7	-0.0851

Table 4와 같이 계산된 값들을 이용하여 예측된 수명과 실험에 의하여 구해진 수명을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 원재의 경우 노치재, 평활재의 경우 모두 Juvinall의 식으로 잘 예측됨을 알 수 있다. 하지만 표면처리재의 경우에는 노치재가 Juvinall식에 의하여 비교적 예측됨에 비하여 평활재의 경우에는 상당히 그 예측치가 실제의 경우와 맞지 않음을 알 수 있다. 이는 표면에서 파단되는 것을 전제로 예측식을 만들었기 때문으로 추정되며 내부에서 파괴기점이 발생하는 경우와 잔류응력의 구배, 표면 경화비등을 더 고려해서 예측식을 수정해야 할 것으로 생각된다.

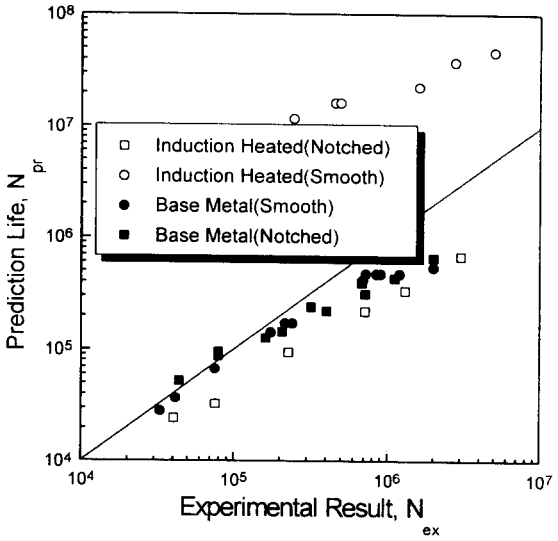


Fig. 7 Comparison of predicted and experimental life by Juvinall equation.

4. 결론

기계구조용 SCM440재에 대하여 원재와 고주파 표면경화재에 대하여 피로실험을 수행하고 피로강도를 고찰하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 피로한도가 고주파 열처리된 평활재의 경우 735MPa로 원재보다 2.33배, 노치재의 경우에는 535MPa로 원재보다 2.17배 증가하였다.

(2) 고주파 열처리재의 경우 S-N선도가 파괴기점에 따라 2단으로 구분되며 그 사이에는 천이응력부가 나타난다.

(3) 피로한도를 예측한 결과 원재의 경우와 표면 경화된 노치재의 경우에는 잘 예측되었으나 평활재의 경우에는 잔류응력구배, 표면경화비, 파괴기점등을 고려하여야 정확한 예측이 될 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

<생략>