

고주파 표면경화재의 내부개재물의 분포와 피로강도에 관한 연구

송삼홍* · 최병호**

A Study on the Distribution of Internal Inclusions and the Fatigue Strength of Induction Surface Hardened Steel

Sam-Hong Song* and Byoung-Ho Choi**

Key Words: Induction Surface Hardening(고주파표면경화), Fish-eye(어안), Fatigue strength(피로강도), Internal Defects(내부결함), Fatigue Crack Initiation(피로균열발생)

Abstract

Induction surface hardening is widely used to enhance local strength and hardness. However, most research is only to have a focus on fatigue life and fatigue behavior is not so much studied. So, in this study, Cr-Mo steel alloy(SCM440) was used to show the effect of residual stress and micro hole on the fatigue strength for base metal and induction surface hardened specimen. In addition, the fatigue characteristic between surface hardened and fully hardened steel is somewhat different. It is caused by hardness distribution, residual stress and inclusions etc.. Crack origins are generally micro inclusions for the high strength steel. So, the distribution of inclusions is analyzed statistically.

1. 서론

공업적으로 흔히 사용되는 표면 경화법에는 물리적 표면 경화법(고주파 표면 열처리, 화염경화, 방전경화, 숏피닝 등)과 화학적 표면 경화법(침탄, 질화등)이 있다. 그 중에서도 고주파 표면 열처리는 원하는 부분의 경도를 효과적으로 향상시키고 압축잔류응력을 발생시키며 변형이 작고, 비용이 적다는 특징을 가지고 있다.

고주파 표면 열처리는 피로강도를 향상시키는 데 매우 유익하다. 고주파 표면 열처리와 피로강도와의 관련성에 있어서 피로강도의 향상은 근본적으로 급열 급냉에 따르는 재질의 강인화에 기인한다. 특히 송⁽¹⁾은 고주파 표면 열처리에 의한 완전 마르텐사이트 조직에 있어서 미시조직과 피로

거동을 고찰하고, 재료가 갖는 경도값이 비교적 낮은 조직에 있어서는 피로강도는 결정립과 밀접한 관계가 있고 최적피로한도를 표시하는데도 최적 결정립도의 존재를 지적하고 있다. 그러나 표면경화재의 경우에는 표면경화가공으로 인하여 발생하는 조직의 재결정과정에서 재료가 갖고 있는 결함의 존재가 보다 두드러지게 나타나게 된다. 따라서 표면경화재의 경우에는 일반 강재를 이용하는 것에 비하여 피로특성의 예측이 곤란하게 된다. 中村 등⁽²⁾은 이러한 결함으로 인하여 발생하는 피로강도의 변화를 몇가지 모델을 설정하여 해석하였다. Melender 등⁽³⁾은 FEM 모델을 이용하여 개재물과 발생균열에 따라 4가지 모델을 가정하고 이를 이용하여 균열의 진전에 대하여 검토하였다. 黒島 등⁽⁴⁾은 개재물의 치수와 개재물의 분포관계에 대하여 비교하였다. 따라서 이러한 결함에 대하여 정량적인 예측을 실시하는 것은 매우 중요하다고 생각된다. 하지만 분포되어 있는 결함의 정량적인 예측이 실험을 통하여 사

* 고려대학교 기계공학과

** 고려대학교 대학원

용시간에 따라 위험부위로 선정된 부분에 대하여 실시되면 보다 실용적이고 유연한 적용이 가능할 것이다.

따라서 본 연구에서는 고주파 표면경화처리한 Cr-Mo 합금강재(SCM440)에 대하여 피로실험을 실시하고 그 피로실험결과와 시험편에 분포된 결함과의 관계를 비교한다. 그리고 이 관계를 이용하여 피로한도 예측의 적용여부를 고찰하여 보았다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 시험편 재료로는 축재, 기어 등의 재료로 쓰이는 기계구조용 Cr-Mo합금강인 KS D 3711에 규정된 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 (H _v)
556.8	664.3	215

시험편은 치수가공을 하기 전에 재료의 사전응력제거와 조직의 균일화를 위하여 전기로에서 850℃로 1시간 동안 어니일링처리한 후 Fig. 1과 같이 가공하고 연마지로 #100부터 #2000까지 표면연마를 실시하였다.

시험편의 크랙발생의 재현성을 위하여 설치한 원공결함은 원재와 고주파 표면경화재의 경우 깊이가 0.5mm로 하고 지름을 0.2, 0.3, 0.5, 1.0mm로 변화시켜가며 가공하였다. 반면에 표면경화재와의 비교를 위하여 사용한 전경화재의 경우에는 평활재와 지름 0.5mm인 원공을 가공하여 사용하였다. 위와 같이 가공된 원재에 표면 열처리로 고주파 경화를 실시하였다. 본 연구에 사용된 시

편의 이름은 원재의 경우 BM, 표면 경화재의 경우 경화깊이에 따라 H6, H1, 그리고 전경화재의 경우에는 FH라고 하였다. 그리고 각 시험편에 가공된 미소원공지름에 따라 SS(평활재), 02, 03, 05, 10을 시험편이름에 덧붙여 사용하였다.

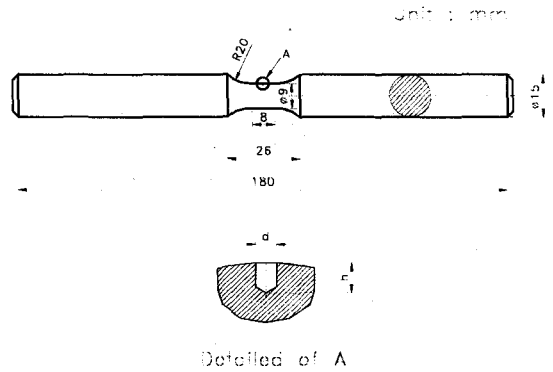


Fig. 1 Geometry of specimen

실험에 사용된 시험기는 최대급힘 모우멘트 98N-m인 Shimadzu사의 Ono식 회전 굽힘 피로시험기를 사용하였고, 이 때 사용한 회전수는 3000rpm이며 응력비(R)는 -1이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고주파 경화에 의한 표면경화재와 전경화재의 경도 및 잔류응력의 분포

어니일링 처리한 원재의 경도값은 H_v 215로 측정되었다. 그리고 Fig. 2는 고주파 열처리한 시험편 단면의 경도값을 나타낸다. 먼저 H6, H1의 표면경화재의 경우에는 표면에서 경도값이 H_v 560이고 표면 바로 밑 0.1mm깊이에서 최대값 H_v 570를 나타낸다. 이와 같이 경도값이 표면이 아닌 표면 직하에서 최대값을 가지는 것은 냉각 중에 불완전 담금질층이 발생되기 때문이다. 그리고 심부로 갈수록 경도값이 완만한 감소를 하는 것은 비마르텐사이트조직이 발생하기 때문이다. 반면에 FH 전경화 시험편의 경우에는 심부까지 경도값은 거의 일정하며 그 값은 약 H_v 560정도가 된다. 그림에서 점선으로 표시한 부분은 원재의 경도를 나타낸다.

KS D 0027에 따르면 유효 경화층 깊이(ECD)는 본 실험재의 경우에 H_v 400까지의 거리이다. 따

라서 본 실험에서 사용한 H6재의 유효경화층(ECD)의 깊이는 1.6mm이며 전경화층의 깊이는 2.4mm이다. 그리고 경화비(시험편 반경에 대한 ECD의 비)는 0.35로 나타났다. H1재의 경우에는 유효경화층 깊이는 1.1mm이며 전경화층은 2.0mm이며 경화비는 0.24이다. 물론 전경화의 경우에는 시험편의 경화비는 1이 된다.

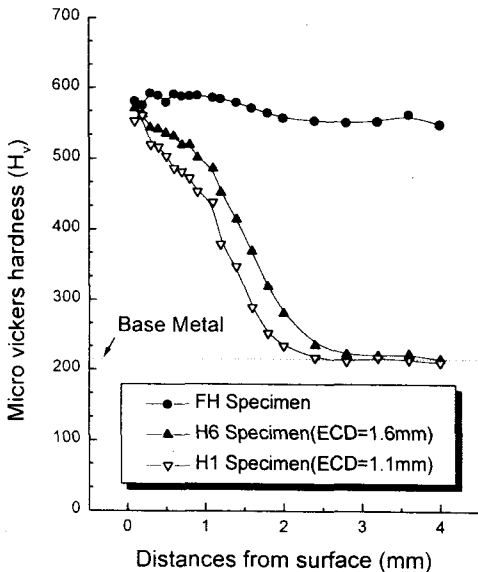


Fig. 2 The distribution of hardness in transverse section

또한 금속 내부에 존재하는 잔류응력은 기계적 가공 등의 직접적인 소성변형 이외에도 질화나 침탄, 침탄 질화, 그리고 상변태를 수반하는 열처리 과정에서 금속 격자의 국부적인 영구적 탄성 팽창이나 수축에 의해서도 발생한다.

고주파 표면 열처리한 시험편의 잔류 응력 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 평활재 시험편으로 시험편의 축방향 잔류응력을 측정하였다. 우선 H6재와 H1재는 각각 표면에서 측정된 잔류응력값은 -383.4, -451.1MPa이고 표면에서 약 0.3mm까지 증가한 후 내부로 갈수록 완만하게 감소함을 알 수 있다. 반면에 전경화재는 표면에서 -322.8MPa를 나타내며 완만하게 감소하는 표면경화재와는 달리 상당히 빠르게 잔류응력값이 감소하는 경향을 보인다. 이는 심부와 표면부의 수축량 변화의 차이가 적으므로 인해 발생하는 현상으로 생각된다.

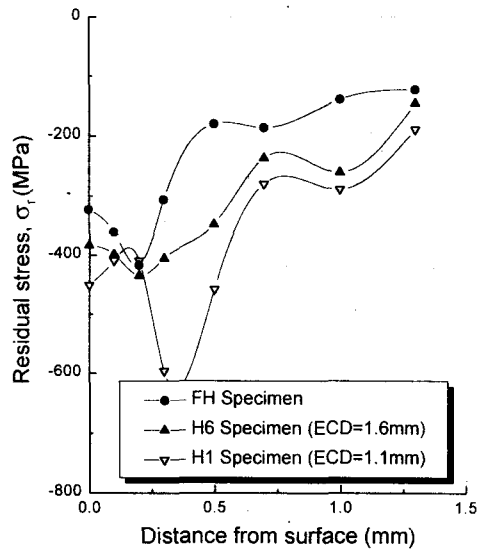


Fig. 3 The distribution of residual stress in transverse section

두 경화재의 경우에 잔류응력분포와 경도분포를 비교하면 경도 표면경화재의 경우 0.1mm에서 최대치를 보이며 이후 완만한 경사를 보이며 감소하였고, 잔류응력은 두 경우 모두 0.2mm내외에서 최대치를 보이며 이후 형태는 약간 다르지만 계속 감소하는 경향을 나타낸다.

3-2. 고주파 경화에 의한 표면경화재와 전경화재의 피로특성

피로한도의 결정은 평활재와 미소 원공 결함재의 경우에 시험편이 10^7 cycle 이후에도 파단 되지 않는 응력을 피로한도로 채택하였다. Fig. 4에 원재의 S-N곡선을 나타내고, Fig. 5에는 고주파 경화에 의한 표면경화재와 전경화재의 S-N곡선을 나타내었다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 H6재의 피로한도는 원재의 피로한도에 비해 각각 평활재에서 2.09배, 원공 지름이 0.2mm인 경우 2.52배, 0.3mm인 경우 2.55배, 0.5mm인 경우 2.61배, 1.0mm인 경우 2.69배로 나타났다. 그리고 H1재와 FH재의 경우에는 각각 원재에 비하여 평활재의 경우에는 1.93, 2.70배 증가를 보이며, 반면 0.5mm노치재의 경우에는 2.67, 2.45배 증가하였다.

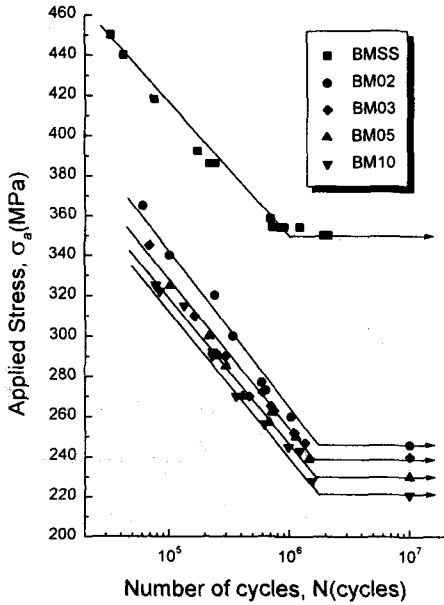


Fig. 4 S-N Diagram of base metal

그리고 HI재와 FH재의 경우에는 각각 원재에 비하여 평활재의 경우에는 1.93, 2.70배 증가를 보이며, 반면 0.5mm노치재의 경우에는 2.67, 2.45배 증가하였다. 관찰된 고주파 열처리재의 피로강도 향상의 주원인이 바로 표면층의 높은 경도와 압축 잔류 응력장이다. 그리고 이렇게 노치재와 평활재의 피로한도의 증가가 달라지는 것은 내부에서 발생한 균열로 인한 파괴가 평활재의 경우 피로한도를 결정하기 때문이다. 즉, Fig. 5에 나타난 것처럼 고주파 표면 열처리된 평활시험편(HISS, H6SS, FHSS)의 경우에는 S-N의 양상이 다른 경우들과는 달리 2단으로 나타남을 알 수 있다. 즉, 수명이 짧은 경우(Short-life)에는 크랙이 표면에서 발생하는 양상을 보이는 반면에 수명이 길어짐(Long-life)에 따라 크랙의 발생지점은 내부에서 개재물에 의해 피로크랙이 발생되었다. 이 경우 파면을 살펴보면 은백색의 어안(Fish-eye)을 관찰할 수 있다.

3.3 내부균열발생지점에서 관찰된 어안

앞에서 설명한 것처럼 2단으로 S-N이 나타나게 되는 원인은 은백색의 어안이 피로균열의 발생지점으로 작용하기 때문이다. 이러한 어안은 피로

균열의 발생위치가 시험편의 표면에서 내부로 이동하는 것을 보여준다.

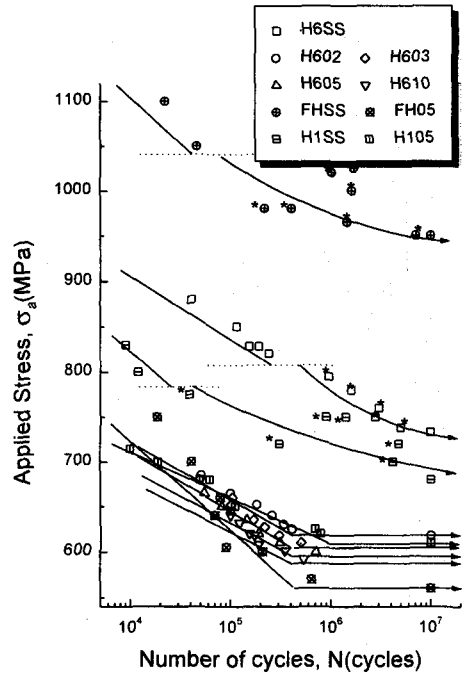
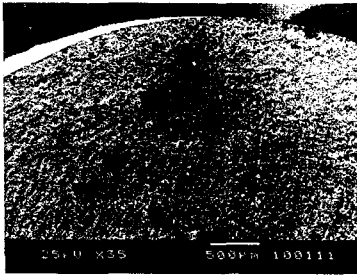


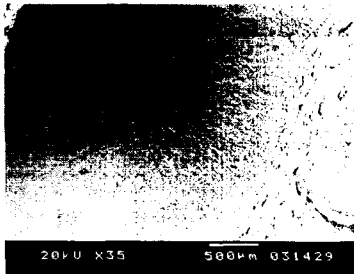
Fig. 5 S-N Diagram of induction surface hardened SCM440

그러나 이러한 어안은 고경도재의 경우에 발생하는 예상되는 피로강도의 저하를 유발한다. Fig. 6에는 파단된 시험편의 내부에서 관찰된 파단면과 어안의 사진들을 나타내었다. Fig. 6 (a), (b)는 파단면의 사진으로 (a)의 경우는 진경화된 FH재의 파면으로 개재물의 중심에서 상당부분 매끈한 피로파면이 발생한 후 거친 피로파면으로 전이되는 (b)의 HI재와는 다르게 전체적으로 매끈한 피로파면을 갖고 있음을 알 수 있다. 그리고 (c)와 (d)는 각각 FH와 HI재에서 관찰된 어안을 나타낸다. 이러한 어안은 EDX분석결과 Al, Ca 등의 산화물인 것으로 나타났다.

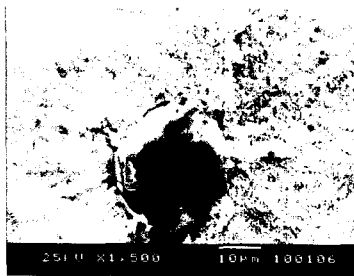
Fig. 7에는 이러한 어안의 $\sqrt{\text{area}}$ 와 파단수명과의 관계를 나타내었다. 많은 편차를 보이고는 있지만 전체적으로 파단수명이 길어질수록 그 크기는 점차 작아짐을 알 수 있다. 이것은 피로한도에 가까워질수록 보다 작은 결함이 균열발생원으로 작용한다는 것을 의미한다.



a) Fractography, FHSS, $N_f=1.69 \times 10^6$ cycles



(b) Fractography, H1SS, $N_f=1.39 \times 10^6$ cycles



(c) Crack origin, FHSS, $N_f=1.69 \times 10^6$ cycles



(b) Crack origin, H1SS, $N_f=1.39 \times 10^6$ cycles

Fig. 6 Some fractographies of fish-eye

Fig. 8에는 표면에서부터 발생한 어안중심의 균열 발생점과 \sqrt{area} 와의 관계를 나타내었다. 그 위

치는 고경도재의 경우에 발생지점이 상당히 낮은 지점부터 깊은 곳으로 분포가 되어있으나 표면경화재인 H1, H6재의 경우에는 그 위치가 상대적으로 적은 영역에서 분포됨을 볼 수 있다. 그리고 그 위치는 측정된 전경화층 부근으로 이는 전경화층 부근의 결함이 낮은 정도와 함께 균열의 발생지점으로 작용하였기 때문으로 생각된다. 따라서 이 각 지점에 대한 결함의 분포에 대하여 검토가 필요하다고 생각된다.

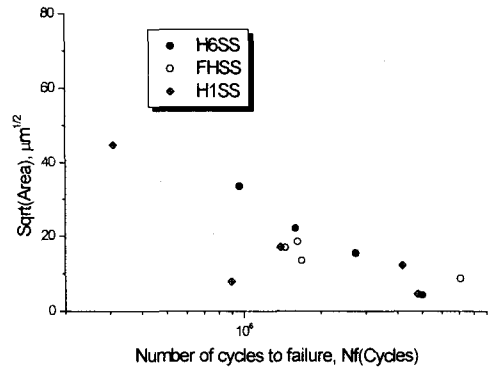


Fig. 7 Relationship between number of cycles to failure and \sqrt{area}

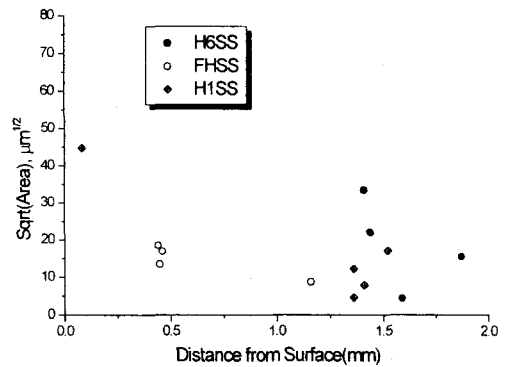


Fig. 8 Relationship between distance from surface and \sqrt{area}

Murakami⁽⁵⁾ 등은 이러한 결함에 대하여 극한확률분포를 이용하여 최대결함을 예측하였으나 이 방법은 많은 부분을 촬영하여 그 최대값만을 취하는 방법이므로 실용상 적용이 상당히 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 보다 간단한 방법으로

시편의 전술한 위험부위에서 좁은 영역을 취하고 확률분포를 구한 후 그때의 누적확률 99.9%인 결함크기를 최대결함크기($\sqrt{area_{maxi}}$)로 가정하였다. 그리고 이 결함을 구의 형태로 가정하여 다음과 같이 수정최대결함크기($\sqrt{area_{maxe}}$)를 구하였다.

$$\sqrt{area_{maxe}} = \frac{4}{3} \sqrt{area_{maxi}} \quad \dots (1)$$

Fig. 9는 이러한 H6재의 통계분포를 나타낸다. Table 3에는 각 시편의 수정최대결함크기를 나타내었다.

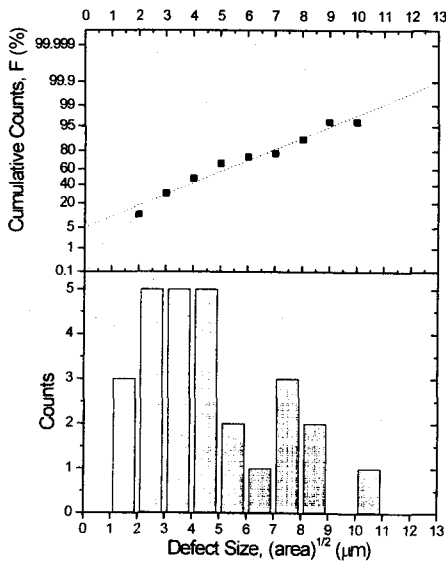


Fig. 9 Statistical distribution of defects for H6SS

Table 3 Estimated distribution of defects

Index Specimen	Inspected depth (mm)	$\sqrt{area_{maxi}}$ (μm)	$\sqrt{area_{maxe}}$ (μm)
H1SS	1.9	11.8	15.7
H6SS	2.4	12.9	17.2
FHSS	1.7(Selected)	13.9	18.5

위에서 구한 $\sqrt{area_{maxe}}$ 는 Fig. 7, 8의 10^7 cycles에서 관찰된 결함보다 약간 크며, 이와 같이 구한 $\sqrt{area_{maxe}}$ 를 이용하면 송 등이 제안한 수정 피

로강도예측식⁽⁶⁾에 적용이 가능하다.

4. 결론

- (1) 표면경도를 Hv560으로 하고 ECD를 변화시켜 잔류응력은 H6과 H1의 경우 각각 표면에서 -383.4, -451.1MPa이고 표면에서 약 0.2mm까지 증가후 내부로 갈수록 완만하게 감소하며 전경화재는 표면에서 -322.8MPa이며 표면경화재보다 빠르게 잔류응력값이 감소한다.
- (2) 피로시험결과 H6의 피로한도는 원재의 피로한도에 비해 평활재에서 2.09배, 노치재의 경우 2.52~2.69배로 나타났으며 H1과 FH재의 경우에는 H6재에 비하여 서로 다른 피로강도 증가경향을 나타내었다.
- (3) 피로한도 예측식에 적용하기 위하여 결함의 크기를 정량적으로 평가하고, 확률분포를 이용하여 수정최대결함크기($\sqrt{area_{maxe}}$)로 나타내었다.

참고문헌

- (1) 송삼홍, 1977, "피로한도에 있어서의 피로거동에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제1권 제1호, p. 2
- (2) 中村春夫 外 2人, 1990, "表面硬化材の缺陷起点の疲労壽命の解釋", 材料, 第 38卷 第 433號, pp. 1145-1150
- (3) Melander, A. and ölund, P., 1999, "Detrimental effect of nitride and aluminium oxide inclusions on fatigue life in rotating bending of bearing steels", Materials Science and Technology, Vol. 15, pp. 555-562
- (4) 黒島義人 外 2人, 1991, "シミュレーションによる疲労破壊起点の介在物材法の評價", 日本機械學會論文集A, 57卷 543號, pp. 2628-2632
- (5) Murakami, Y. and Endo, M., 1994, "Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength", Fatigue, Vol. 16, pp. 163-182
- (6) Song, S. H. and Choi, B. H., 2000, "Evaluation of the Quantitative Fatigue Strength of Case Hardened Cr-Mo Steel Alloy by Case Depth", Proceedings of SEM International Congress 2000, pp. 237-240