

# 침탄질화처리재의 피로수명평가 The Fatigue Life Evaluation of Gas Nitro-Carburizing Material

송 삼홍 (고려대 기계공학과), 이 상훈\*(고려대 대학원)

S.H Song(Korea Univ. The Dept. of Mechanical Engineering), S.H. Lee\*(Korea Univ. Graduate School)

**Keyword :** Fatigue Strength (피로강도), Inclusion(개재물), Scanning Electronic Microscopic(주사전자현미경), Nitro-Carbonitriding Treatment(침탄질화처리), Residual Stress(잔류응력)

**Abstract :** The gas nitro-carburizing treatment with the merits of carburizing and nitriding treatment is recently applied to transmission gears, the shafts of an engine oil pump and steering shafts. For all that, the researches of the gas nitro-carburizing treatment are short of the fatigue behavior and the evaluation of fatigue life. In this paper, it is examined for the effect of inclusions and hole defects with fatigue limit and the evaluation of the fatigue strength according to the hardness and residual stress with the specimen of a nitro-carburizing treatment.

## 1. 서 론

표면경화는 일반적으로 기계부품의 표면손상에 대비해 마모저항을 높게하는 경우와 피로강도를 높이는 경우에 많이 이용된다. 하지만 기계제작 현장에서 사용되는 표면경화의 종류는 매우 다양하고, 각기 피로특성에 차이가 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 가스침탄질화법(Gas Nitro-Carburizing Heat Treatment)은 광휘열처리에 사용되고 있는 로를 이용하여, 침탄성 가스에 암모니아 가스(NH<sub>3</sub>)를 첨가하여 강의 표면에 탄소와 질소를 침입시킨 후, 열처리에 의해 표면만을 경화시키는 방법이다. 이로 인해 기계부품의 표면에 높은 경도를 얻고, 압축 잔류응력의 형성으로 피로수명의 향상을 이룰 수 있어 널리 쓰이고 있다. 경도의 증가는 피로수명에 영향을 끼치게 된다는 경험적 사실은 Garwood<sup>(1)</sup>의 실험결과에 의해 다음과 같은 식으로 제시되었다.

$$\sigma_{wo} \cong 1.6Hv \pm 0.1Hv, \quad (Hv \leq 400) \quad \text{-----}(1)$$

여기서  $\sigma_{wo}$ 와 Hv의 단위는 각기 [Mpa], [Kgf/mm<sup>2</sup>]이다. 그러나 Hv $\geq$ 400 이상의 고경도재료에서 피로한도와와의 비례적인 증가 관계는 없어지게 되고, 피로한도의 편차도 매우 커지게 된다는 경향에 대한 보고가 있다<sup>(1)(2)(3)</sup>. 즉 저경도의 일반적인 탄소강에서의 피로크랙반생은 시험편의 표면에서 시작되지만, 고경도강에서 피로크랙의 발생은 주로 표면 혹은 표면적하의 비급속계재물을 기점으로 발생하고 있음이 확인되고<sup>(4)(5)</sup>, 이것이 피로한도와 경도의 증가에 따른 비례관계에 크게 영향을 크게 미친다는 것으로 알려져 있다. 한편, 잔류응력이 피로한도에 영향을 미치는 것은 과기부터 알려져 있고 연구결과도 많이 보고되어 왔으나<sup>(6)(7)</sup>, 침탄질화 표면처리의 과정에서 수반된 잔류응력은 표면의 경도증가와 상호관계를 가지게 된다. 이와 같은 표면경화재에서 경도의 증가와 잔류응력이 상

호 관계를 가지게 되므로, 정량적인 피로강도 및 수명평가 해석에 어려운 점이 있게된다. 따라서 본 연구에서는 우선 침탄질화 표면경화재의 경도에 증가에 따른 피로한도의 영향을 미치는 인자 및 결함과 피로한도의 상호관계에 대한 조사를 통해, 피로강도 해석을 정량적으로 검토하였다. 그리고 잔류응력장을 고려해서 침탄질화 표면경화재의 피로강도 해석에 대한 검토를 하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험재료 및 시험편

본 연구의 시험편은 KS D 3711에 규정된 Cr-Mo 강으로 지름 16mm의 SCM415를 사용하였다. 시험재료의 화학적 성분은 Table 1.과 같으며, 기계적 성분은 Table 2.에 나타내었다.

Table 1. The chemical composition of material

Chemical Composition (Wt %)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.18	0.22	0.68	0.01	0.014	1.0	0.17

Table 2. The mechanical properties of material

	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
NTS*	307.5	536.9	20.97	275
NCTS**	755.4	1044.8	2.1	

\* : Non-heated Treatment Specimen

\*\* : Nitro-Carburizing Treatment Specimen

시험편은 Fig. 1과 같이 기계가공 한 후 연마지 #1000까지 1차연마를 하였다. 연마가공 후 원공결함이 없는 평화재 시험편과 소형탄상 드릴링머머신을 이용해 Fig. 2와 같

은 치수로 시험편에 원공결함을 가공하여 준비하였다.  
Unit : mm

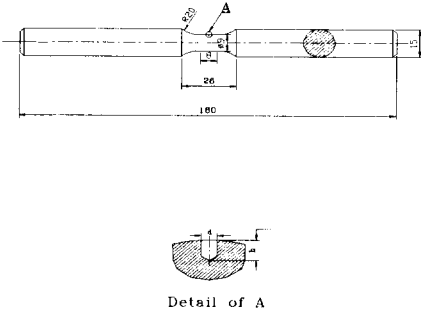


Fig. 1 Fatigue Test Specimen

표면처리는 침탄질화처리로 하였으며, 침탄질화처리의 온도는 840°C로서 3 시간 동안을 유지하였다. 그리고 침탄질화처리재는 잔류오스테나이트의 감소 및 마르텐사이트화 처리를 위해 뜨임처리(Tempering)를 하는 데, 처리온도는 180°C로서 2 시간을 유지하였다.

	Non-heated	Carbonitrided
d=0.2 h=0.4		
d=0.5 h=0.4		
d=0.8 h=0.4		
d=1.0 h=0.4		

Fig. 2 The Configuration of Micro Holes

## 2.2 시험기 및 실험방법

침탄질화처리에 의해 표면이 경화되므로, 표면부와 심부 사이는 경도구배(Hardness Gradient)를 가지게 되므로 마이크로 비커스경도기를 사용하여 경도를 측정하였다. 경도측정시 하중은 500g, 하중유지시간은 30sec로 일정하게 하였다. 또한 표면경화에 의해 깊이방향에 따라 발생하는 잔류응력은 X-ray diffraction 측정기를 이용하여 측정하였다. 측정시 시험편을 표면에서부터 심부방향으로 약 0.1~0.2mm씩 진행언마로 재기하녀, 잔류응력의 분포를 구하였다. 실험에 사용된 시험기는 최대굽힘 모멘트 98N·m, 회전수 3400rpm인 Ono 식 회전굽힘피로시험기를 사용하였고, 응력비(R)는 -1 이다.

## 3. 실험결과 및 해석

### 3.1 표면처리재의 정도, 잔류응력분포 및 미세조직

침탄질화 표면경화재의 정도분포는 표면에서 580Hv 이고, 최대경도치는 표면에서 약 0.19mm 되는 곳에서 784Hv로 측정되었다. 이후로 경도는 차츰 감소하는 경향을 보이며, 약 0.75mm 이하의 깊이에서는 313Hv의 일정한 분포를 나타냈다. 또한 원재의 경도치 275Hv에 비해 처리재의 심부는 약간의 경도증가를 보이고 있으나, 표면층에서는 2.1~2.8 배까지 경도치가 증가하였음을 알 수 있었다. 침탄질화처리재의 경우도 침탄표면경화처리와 같이 표면에서의 경도의 저하를 나타내고 있으며, 언용등<sup>(8)</sup>은 침탄질화처리시 표면 부근에서 생성되는 ε-탄질화물에 의해 최외층의 경도가 저하한다고 보고하였다. 본 실험에서도 Photo 1(a) 금속조직시험에서 최외층의 조직은 침탄질화층의 금속조직과는 다른 것을 나타내고 있어 이를 확인 할 수 있었다. 침탄질화 경화층의 금속조직 사진은 Photo 1(b)의 사진에서와 같이 하얗게 보이는 잔류오스테나이트(Retained Austenite)와 검은 침상형태의 마르텐사이트(Martensite)조직의 혼합된 양상으로 나타내었다.

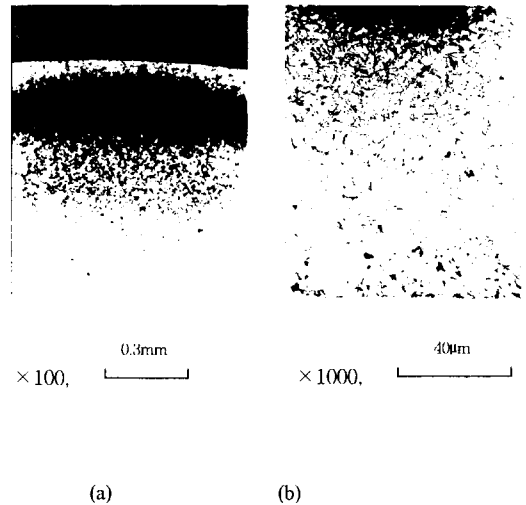


Photo 1. The Micro structure of the material

또한 표면경화시 발생하는 잔류응력의 분포는 Fig. 3에 표시하였으며, 측정결과 표면에서 -200Mpa의 압축잔류응력을 그리고 표면에서 0.6mm 위치에 -300Mpa의 최대잔류응력치를 보이고 있다. 즉 피로균열이 발생할 수 있는 표면 및 표면직하의 잔류응력 상태는 압축응력장을 가지고 있음을 나타내고 있다.

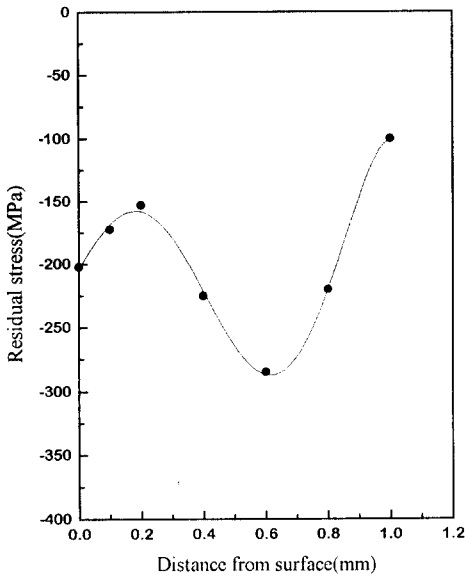


Fig. 3. Axial Residual Stress Distribution

### 3.2 표면처리에 의한 경도변화와 피로한도

회전굽힘 피로시험을 통해 S-N 선도를 Fig. 4에 표시하였고, 이 때 원공결함의 지름에 따라 원재와 침탄질화처리재의 피로한도를 구하여 Table 3에 나타내었다. 여기서 평활재의 경우, 원재의 경도가 275Hv 시 피로한도는 270 MPa 표면경화재는 740MPa로 나타나 약 2.7 배의 증가를 보이고, 원공결함의 크기에 따른 피로한도의 증가율도 2.8~2.5 배로 거의 균일하게 나타났다.

Table 3. The Fatigue Limit with the Change of Drilled Hole Diameters unit: MPa

Drilled Hole Dia.(mm)	0	0.2	0.5	0.8	1.0
Fatigue Limit of NTS	270	205	191	185	180
Fatigue Limit of NCTS	740	570	505	490	465

금속재료의 피로한도는 일반적으로 경도의 상승에 따라 증가하므로, 어느 정도의 경도까지는 평활재의 피로한도와 마이크로 비커스경도 사이의 관계는 식(1)과 같은 경험식으로 정리할 수 있다. 그러나 경도가 어느 이상으로 증가시( $Hv \geq 400$ ) 피로한도는 반드시 경도에 비례적으로 증가하지 못하고 최대값을 기점으로 감소하는 경향을 보이게 된다.

본 실험에서도 표면경화재의 경우 표면부위의 경도증가에 따른 피로한도의 증가 범위는 다소 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 주목해야 하는 사실은 Murakami 등<sup>(9)</sup>이 마

아징강(Maraging steel)을 시효처리(aging treatment)한 경화재의 실험결과와 같은 피로한도의 범위를 보이고 있다. 즉 평활재의 경우 피로파괴의 기점이 표면 및 표면적하에서 시작된다는 사실에서 표면 부위의 경도가 피로한도와 매우 높은 관계를 갖는다는 점을 의미하고 있다. 그리고 표면경화재의 실험결과를 검토하면 주로 표면적하의 비금속개재물에서 피로기점으로 작용한 것으로 나타났다. 또한 침탄질화표면처리는 시험편의 표면에서 중심방향으로 경도구배(Hardness Gradient)를 가지게 되는 데, 이 때 비금속개재물이 발생하는 위치와 경도구배와의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 비금속개재물의 발생위치는 고경도를 갖는 유효경화층(표면에서 약 0.5 mm)이 아니라, 경도가 일정한 분포(약 313Hv)를 형성하는 저경도부위에 존재한다. 그리고 비금속개재물을 중심으로 형성된 Fisheye는 피로기점으로 작용하는 것은 명백하지만, 피로한도의 증가는 유효경화층의 경도증가와 관계있는 것으로 판단된다.

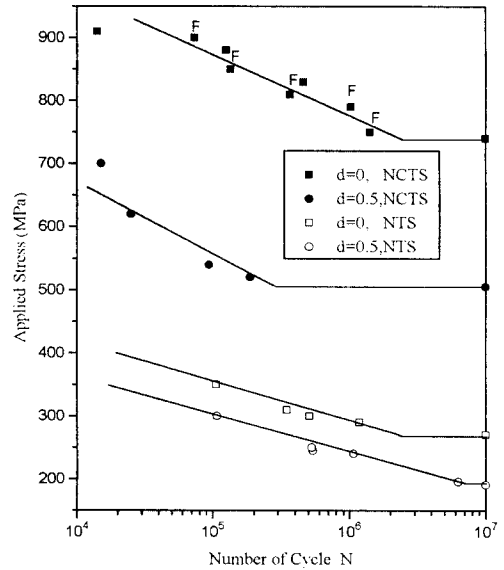


Fig. 4. S-N Diagram

### 3-3. 피로수명에 영향을 미치는 결함 및 개재물의 영향

강의 청정도와 피로강도의 관계에 대한 과거의 많은 연구결과들<sup>(10)-(12)</sup>에서는 개재물 및 결함이 피로한도를 감소시키는 요인으로 고려하였다. 이 때 재료내의 모든 개재물이 어느정도 피로강도를 감소시키는 인자로 작용한다고 고려하였으나, Uhrus<sup>(13)</sup>는 단지 재료내에 있는 지름 30 $\mu$ m 이상의 산화개재물이 피로수명에 영향을 미친다고 하였다. 본 침탄질화 표면경화재의 실험에서 피로수명은 앞에서 언급한 표면적하의 개재물에서 피로기점이 되고 이것은

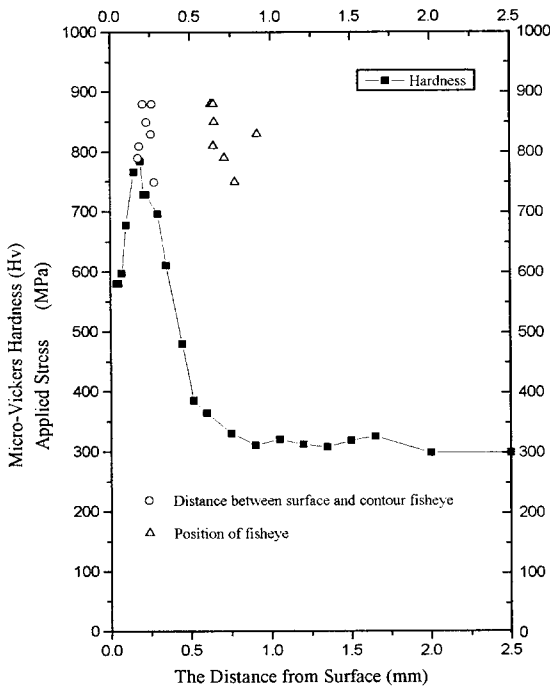


Fig. 5. The Hardness Distribution and the Position of Fisheye

Photo 2.에서와 같은 Fisheye 의 형태로 나타났다. 또한 개재물의 크기에 따른 피로수명과의 관계를 Fig. 6 에 나타내었다. 여기에서 개재물의 크기가 클수록 피로수명이 감소하는 경향을 나타내고 있어, 표면경화재의 경우도 완전경화재의 경향과 동일한 결과를 나타내고 있다. 또한 Fisheye 중심의 개재물에 대해 SEM 을 이용해 분석한 개재물의 성분은  $Al_2O_3$  계통의 비금속개재물이며, 그 모양은 거의 원형 및 모서리진 육각형 형태로 다양하였다. 그리고 1000 배 이상의 고배율을 통해 개재물과 모재사이의 부착 형태를 조사하면, 개재물들이 모재와 완전히 부착(Adhesion)된 것이 아니라, 그 사이에 공간(Void)을 가지고 있다는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 인공결함이 없는 칩탄질화경화재의 피로수명은 표면적하의 비금속개재물과 매우 밀접한 관계가 있고, 이것은 비금속개재물에서의 응력집중계수 및 응력분포와 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 비금속개재물의 모양은 원형 및 타원형의 형상뿐만 아니라, 큰 응력집중을 유발하는 모서리진 육각형의 형태로 이루어져 단순히 응력집중계수 등으로 표면경화재의 피로수명을 평가하는 것은 수정되어야 한다고 판단된다. 그리고 파단면의 Fisheye 중심의 비금속개재물과 모재사이에 존재하는 공간은 비금속개재물을 크랙으로 고려하여 피로수명해석에 파괴역학적인 관점을 도입할 수 있는 점을 의미한다고 생각한다.

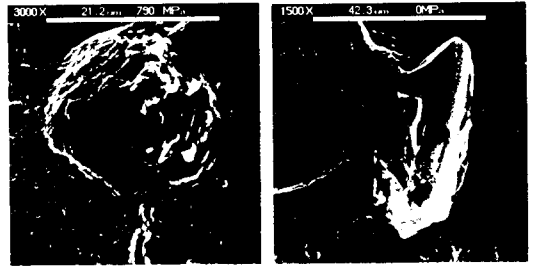


Photo 2. The Various Shapes of Inclusion in the Fisheye

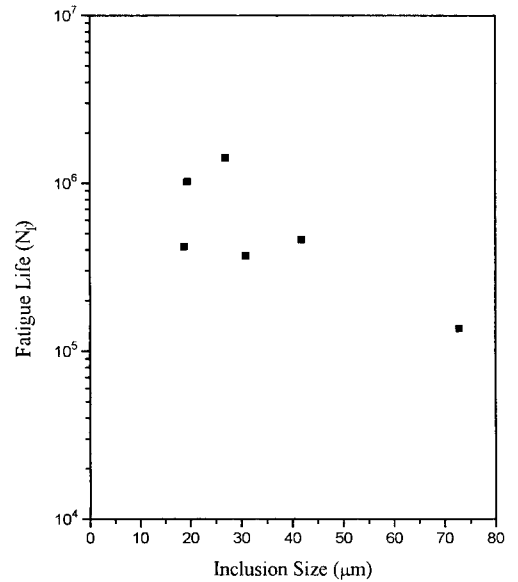


Fig. 6. The Correlation between Inclusions and the Fatigue Life

### 3.4 표면처리재의 미소원공결함과 피로한도

앞절에서 인공결함이 없는 칩탄질화표면처리재의 비금속개재물의 크기가 피로강도에 영향을 미친다는 것과 존재하는 비금속개재물의 형상이 다양해 단순한 형상으로 고려한 응력집중계수를 적용하여 피로강도를 평가하는 것은 실제의 경우와 차이가 있음을 알 수 있었다. 그러나 실제 재료의 비금속개재물의 형상 및 크기를 조절하여 실험을 행하는 것에는 어려움이 많아, 인공결함을 이용하여 결함재에 피로강도 평가를 수행하였다. 즉 재료의 피로한도와 임계미소원공의 크기에 대한 연구결과<sup>(15)</sup>에 의하면, 저경도( $Hv \leq 400$ ) 재료인 S45C 와 S10C 의 임계미소원공과 정류균열이 각각  $50\mu m \cdot 35\mu m$ ,  $70\mu m \cdot 100\mu m$  으로 보고되었고, S45C 를 단금질과 뜨임처리에 의해 경도를  $Hv=650, 520$  로 높은 재료의 정류균열의 크기는  $20\mu m$  로 보고하였다<sup>(15)</sup>.

본 실험에서는 Fig. 7에 나타난 것과 같이 약 25 $\mu$ m 정도의 입계미소원공값의 범위에 있어, 저경도재료 보다는 고경도재료의 특성을 나타내고 있다. 따라서 침탄질화표면처리재에서 피로한도에 영향을 미치지 않는 미소원공결함의 지름이 매우 작음을 알 수 있으며, 피로한도에 미치는 원공결함의 영향은 원재에 비해 더욱 민감함을 알 수 있다.

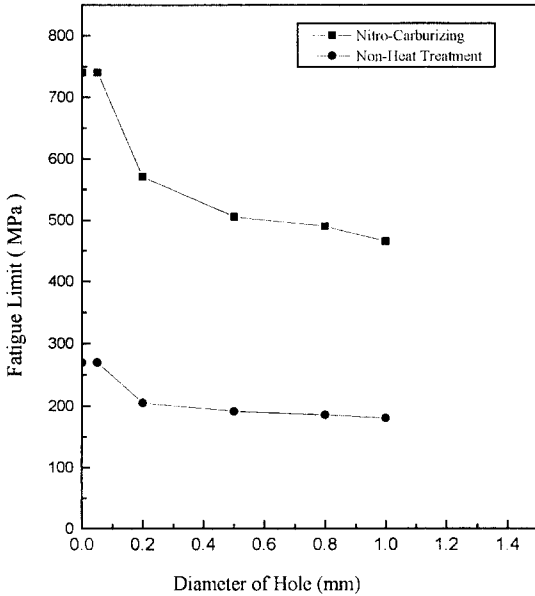


Fig. 7. The Effect of Small Drilled Hole on Fatigue Strength

### 3.5 피로한도의 정량적인 평가

침탄질화 표면경화재의 피로강도의 정량적인 평가를 위하여 먼저 정성적인 주요한 인자를 검토할 필요가 있는데, 본 실험결과 재료내의 비금속계재물의 크기와 표면부위의 경도가 침탄질화재의 피로강도에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편, Murakami 등<sup>(16)</sup>은 완전경화된 고강도강의 피로한도가 계재물의 형상·크기등과 경도에 의해 영향을 받는 데 착안하여, 이것을 일괄적으로 정리하여 다음과 같은 피로한도평가식을 제안하였다.

▶ 표면에 위치한 계재물 :

$$\sigma_w = 1.43(Hv + 120) / (\sqrt{area})^0 \quad \text{-----}(2)$$

▶ 내부에 위치한 계재물 :

$$\sigma_w = 1.56(Hv + 120) / (\sqrt{area})^1 \quad \text{-----}(3)$$

여기서,  $\sigma_w$  : 피로한도 [MPa], Hv: 비커스경도 [Kgf/mm<sup>2</sup>], area: 계재물의 면적 [ $\mu$ m]<sup>2</sup>로 표시된다.

본 실험에서 원공결함이 없고 표면경화처리한 시험편의 경우에 대하여 위의 식을 이용하여 구한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 때 표면경화처리재는 표면에서 심부방향으로 경도구배를 가지게 되므로 이를 고려해야한다. 여기서 ■는 경도구배에서 최대경도값을 고려하여 구한 결과이고, ●는 경도구배에서 표면의 경도값을 고려하여 구한 결과이다. 또한 □는 Duckworth 등<sup>(17)</sup>의 실험 및 해석결과를 본 실험의 결과와 함께 비교하기 위해 나타내었다. 실험 결과의 해석시 비금속계재물이 모두 재료의 내부에 위치하므로 식(3)을 이용하였다. 해석결과 시험편의 표면경도를 고려하여 구한 결과인 ●는 예측치와 실제 비금속계재물에 작용하는 과당응력과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 하지만 시험편의 경도구배중 최대경도치를 고려하여 구한 결과인 ■는 다소 예측치의 과대평가되는 경향을 보이고 있어, 예측치로 사용하기는 다소 안정성이 부족하다고 생각된다. 따라서 침탄질화표면경화재의 피로강도해석에서 최대경도보다는 표면경도치를 고려해 사용하는 것이 다소 안정적인 결과를 나타낸다.

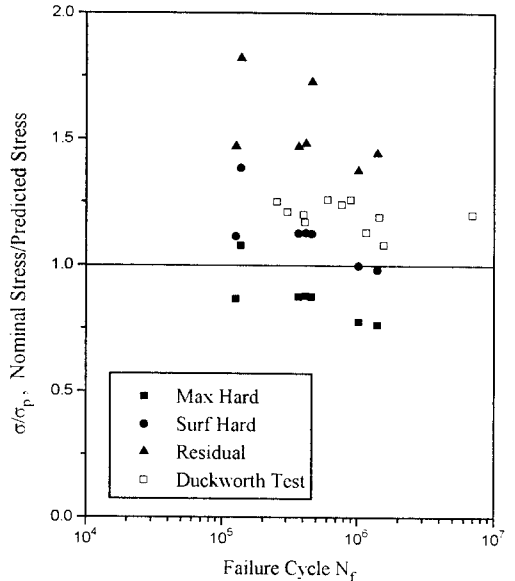


Fig. 8 The Fatigue Strength Evaluation with the Predicted Equation

### 3.6 잔류응력을 고려한 정량적 피로강도평가

침탄질화표면경화시 시험편은 표면부위의 경화와 함께 잔류응력이 수반되는 데, 이러한 잔류응력은 재료의 피로수명에 영향을 미치게 된다. 본 실험에서도 시험편의 표면부위는 압축잔류응력장이 존재하므로, 경도와 함께 이를 고려하여 해석을 하였다. 이때 식(3)에 잔류응력을 평균응력효과로서 고려하여 확장된 예측식<sup>(18)</sup>으로 다음과 같다.

▶ 잔류응력을 고려하고 내부에 위치한 개재물 :

$$\sigma_w = 1.56(Hv + 120) / (\sqrt{area})^{\frac{1}{5}} \times [(1 - R) / 2]^{\alpha} \text{ -----(4)}$$

여기서, R: 응력비  $[(\sigma_{res} - \sigma_a) / (\sigma_{res} + \sigma_a)]$ ,  $\alpha = 0.226 + Hv \times 10^{-4}$  로 표시된다.

식(4)를 이용하여 구한결과는 Fig. 8 에서 ▲표시로 나타내었다. 이 때 경도는 비금속개재물이 위치한 곳의 경도치를 사용하여 피로강도 예측치를 구하였다. 이 결과에서는 예측치가 다소 과소평가되는 경향을 나타내고 있다. 잔류응력을 고려해 해석을 시도하였으나, 아직 이에 대한 연구는 더욱 이루어져야한다.

#### 4. 결 론

Cr-Mo 강을 침탄질화 표면경화처리에 의해 회전굽힘피로 시험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 표면경화재의 피로한도는 원공결함 지름의 크기에 관계없이 원재의 피로한도에 비해 약 2.5~2.8 배의 증가를 나타낸다.
- 2) Fisheye 중심의 비금속개재물이 원공결함이 없는 표면경화재의 피로기점이며, 개재물의 성분은  $Al_2O_3$  개봉이다. 그리고 비금속개재물은 유효경화층보다 더욱 경도가 낮은 곳에 위치한다.
- 3) 표면경화재에 대한 피로강도의 정량적인 평가에 있어 표면경도치를 고려하는 것이 실제의 실험결과와 동등한 수준이며, 잔류응력을 고려한 경우에는 다소 예측치가 과소평가되는 경향을 나타낸다.

#### 후 기

본 연구에 많은 도움을 주신 한화기계(주) 연구소의 박창남박사님과 최인혁씨에게 감사함을 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Garwood M.F., Gensamer M., Zurburg H.H., Burwell J.T., Erickson M.A. and La Que F.L., "Interpretation of Tests and Correlation with Service", ASM, 1961, pp.1
2. 中尺, 本間, 金屬の疲勞強度, 養賢堂, 1982, pp.25
3. Firth P.H., "Fatigue Tests on Rolled Alloy Steels Made in Electric and Open-Hearth Furnaces", J Iron Steel Inst., Vol.180, 1955, pp.26
4. Nisitani, H., Ogata, T. and Endo M., "Differences of the Fatigue

- Processes of 0.45% C Steel Quenched and Tempered at Various Tempering Temperatures", Trans. JSME, Vol.50, No.453, 1984, pp.1104
5. T. Yokobori, M. Nambu, "Fatigue Fracture of Vacuum-Melted Ball Bearing Steel", Proc. 1st Int. Conf. Frac., Vol. 2, 1966, pp.1529
6. 米谷茂, 殘留應力の發生と對策, 養賢堂, 1975, pp.248
7. 日本材料學會篇, 金屬材料の疲勞設計便覽, 養賢堂, 1978, pp.80
8. 湧島延雄外 3 人, 表面熱處理, 日刊工業新聞社, 1970, pp.80
9. Y. Murakami, M. Abe and T. Kiyota, "Effect of Small Defects and Inclusions on Fatigue Strength of Maraging Steel", Trans. JSME, Vol. 53, No.429, 1986, pp.1482-1491
10. Ineson E., Clayton-Cave J. and Taylor R.J., "Variation in Fatigue Properties over Individual Casts of Steel - Part II", J. Iron Steel Inst., Vol.190, 1958, pp.277
11. M. Ueno, T. Mitsuhashi and Y. Nakano, "Studies on Ball Bearing Steels II (Effects of Some Metallurgical Factors on Life of Ball Bearing Steels)", J. Iron Steel Inst. Jpn, Vol.41, No.10, 1955, pp.1102
12. de Kazinczy, F., "Effect of Small Defects on the Fatigue Properties of Medium-Strength Cast Steel", J. Iron Steel Inst., Vol. 208, 1970, pp.851
13. Uhrus, L.O., "Through Hardening Steels for Ball Bearings Effect of Inclusion on Endurance", Iron Steel Inst. Sp. Rep. 77, 1963, pp.104
14. 村上敬宜, 遠藤正浩, "S45C 焼なまし材のねじり疲勞に及ぼす人工微小缺陷の影響", 日本機械學會論文集, 第 47 卷, 第 415 號, 1981, pp.249-256
15. Murakami, Y. and Endo, T., "The Effect of Small Defects on the Fatigue Strength of Metals", Int. J. Fatigue, Vol.2, 1980, pp.23
16. Murakami, Y., "Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions on the Fatigue Strength of Metals", JSME Int. J., Vol.32, No.2, 1989, pp.169-180
17. Duckworth, W. E. and Ineson, E., "The Effects of Externally Introduced Alumina Particles on the Fatigue Life of En24 Steel", Iron Steel Inst., Sp. Rep., Vol.77, 1963, pp.87
18. Murakami, Y., etc, "Quantitative Evaluation of the Factors Influencing Fatigue Strength of Spring Steel", Trans. JSME, Vol.57, No.542, 1991, pp.2305-2313