

# 이단응력에서 침탄질화처리재의 피로거동 및 수명 해석 The Fatigue Behavior and Life Analysis of Carbornitriding SCM415 Steel under Two Level Block Loading

송삼홍(고려대 공대), 이상훈 (고려대 대학원), 심원형(고려대 대학원)  
Sam Hong Song(Korea Univ.), Sang Hoon Lee(Graduate School, Korea Univ.),  
Won Hyung Sim(Graduate School, Korea Univ.)

## ABSTRACT

Under two level block loading, the carbornitriding specimen can be expected to show different behavior from other uniform material because the properties of surface layer and inner material are different from each other. In this research, the modified Marco-Starkey cumulative theory, which considers load interaction effect, can predict the life of SCM415 carbornitriding and original notched and smooth specimen. In the low-high test of carbornitriding specimen which has long life, however, we may additionally consider the increase of life by means of the stress hardening of inner original material.

Keyword : Cumulative damage(누적 손상), Damage fraction(손상비), Cycle ratio(수명비), Load interaction effect(하중 간섭 효과), Least square method(최소 자승법), Non-linear cumulative damage theory(비선형 누적 손상법)

### 1. 서론

일반적인 구조물들은 불규칙한 하중을 받게 된다. 이렇게 불규칙한 하중 하에서 부재의 수명을 예측하기 위해 가장 일반적으로 쓰이는 방법은 Miner등<sup>(1)(2)</sup>에 의해 제안된 선형손상이론(Linear Damage Rule)이다. 이 방법은 하중이 반복됨에 따라 손상(Damage)이 누적되어 손상비(Damage Fraction)의 합이 1이 되는 순간에 파단한다는 누적손상이론(Cumulative Damage Theory)에 기초하여 손상비를 그 응력에서의 수명에 대한 응력의 반복수의 비 즉, 수명비(Cycle Ratio)로 정의한 것이다. 이것은 선형적인 방법이기 때문에 사용하기는 쉽지만 피로거동의 비선형성 때문에 그 예측결과는 정확하지 않은 단점이 있다. 그래서 보다 정확한 예측을 위해 많은 연구자들이 비선형적인 방법<sup>(3)(4)(5)(6)</sup>을 연구하여 왔다. 대표적으로 S. M. Marco와 W. L. Starkey<sup>(3)</sup>는 손상비를 수명비의 지수식으로 정의하고 각 응력마다 지수가 달라지는 이론을 제안하였다. 또 어떤 연구자들은 S-N선도나 Miner's Rule 자체를 수정<sup>(7)(8)(9)</sup>하여 선형적인 방법을 계속 사용하고자 하였다. 하지만 이러한 연구는 그 성질이 균일한 재료에 대해서만 행하여져 왔고 본 연구에서 사용한

SCM415 침탄질화처리재와 같이 표면과 내부의 물성치가 서로 다른 재료에 대해서는 거의 없으며 침탄질화처리재의 피로거동이 원재와는 다르므로 수명 평가 역시 다른 방법으로 해야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 SCM415 침탄질화처리재의 수명을 예측하기 위해 그것의 기초가 되는 이단응력 하중에서 원재와 침탄질화처리재를 사용하여 실험을 하고 그 결과에 기존의 평가방법을 적용하여 원재와 침탄질화처리재 사이의 차이를 살펴보고 그 차이의 원인을 고찰한 후 그 수명을 평가할 수 있는 방법을 검토한다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 시험 재료 및 시험편 형상

본 연구에서 사용한 재료는 침탄처리용으로 많이 쓰이는 Cr-Mo강인 SCM415로, 화학적 성분은 Table 1에 나타냈었다. 시험편은 Fig. 1과 같이 기계가공 하였으며 노치재는 시험편을 연마지로 #1000 까지 연마한 후 미소 원공결함(미소원공의 지름(d)은 0.5mm이고 깊이(h)는 0.4mm이다)을 가공하고, 평활재는 #1000까지 연마한 후, 침탄질화처리재

수행하였다. 침탄질화시의 온도는 840℃로서 3시간 동안을 유지하였다. 원재와 침탄질화처리재의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

열처리 후 시험편을 연마지로 #2000까지 연마하고, 산화알루미나(입자크기:3μm)로 다듬질하여 표면 스크래치의 영향을 최소화하여 균열관찰을 용이하게 하였다.

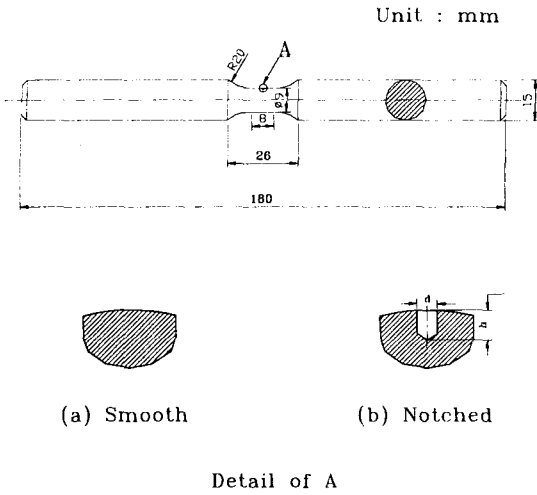


Fig. 1 The Shape of Test Specimen

Table 1. The chemical composition of material

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

	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Micro vickers Hardness (Hv)
NTS*	536.9	307.5	20.97	35.34	275
CNTS**	1044.8	755.4	2.1	2.33	

\* : Non-heated Test Specimen

\*\* : CarborNitrizing Test Specimen

## 2.2 시험 기기와 실험 방법

실험에 사용된 시험기는 최대 굽힘 모우먼트

98N-m, 회전수 3400rpm인 Ono식 회전 굽힘 피로 시험기를 사용하였고, 표면 균열의 측정은 시험편을 시험기에서 분리하지 않고 이동현미경을 사용하여, 접안 이동측미계(OSM)를 사용하여 균열길이를 직접 측정하였다.

본 실험에서의 응력비(R)는 -1이고 하중형태는 정현파형이다. 그리고 적용응력의 선택은 항복점을 넘는 영역을 제외한 유한 수명 영역( $1.15\sigma_w \leq \sigma_a \leq 1.25\sigma_w$ ,  $\sigma_w$ : 피로 한도)의 2개의 응력 수준을 택해 피로한도의 125%인 응력을 고응력( $\sigma_{High}$ ), 115%의 응력을 저응력( $\sigma_{Low}$ )이라 정하였다. 침탄질화처리재와 원재, 각각의 평활재와 노치재에 대하여 고응력에서 저응력으로, 저응력에서 고응력으로 응력을 변환시켜 실험하였다. 응력 변환 시점은 처음 응력에서의 반복횟수에 대한 수명비가 0.25, 0.5, 0.75가 되는 지점을 택하였다.

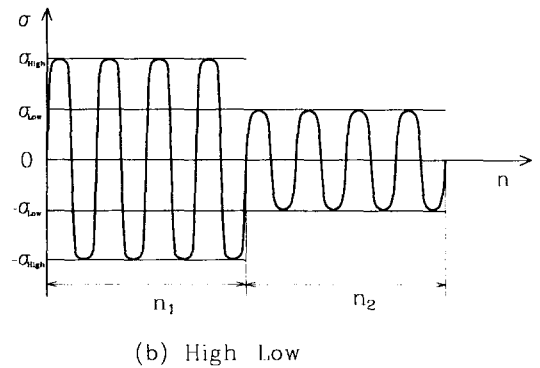
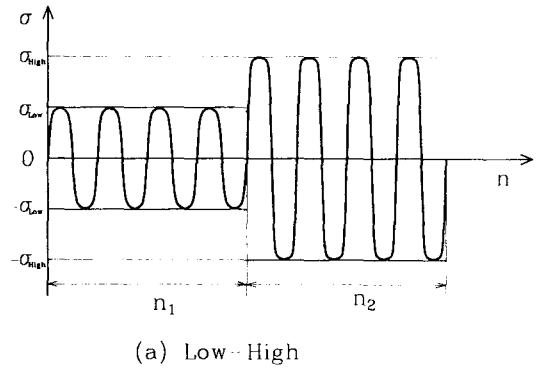


Fig. 2 Schematic diagram of loading

## 3. 실험 결과 및 해석

각 시험편의 각 응력에서의 수명을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. The endurance limit and the life of each specimen

		원 재	침탄질화 처리재
평 활 재	피로한도 $\sigma_w$ (MPa)	270	740
	수명 (Cycles)		
	$\sigma_{High}$ =1.25 $\sigma_w$	$8.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$
	$\sigma_{Low}$ =1.15 $\sigma_w$	$2.3 \times 10^9$	$1.54 \times 10^9$
노 치 재	피로한도 $\sigma_w$ (MPa)	191	505
	수명 (Cycles)		
	$\sigma_{High}$ =1.25 $\sigma_w$	$3.1 \times 10^9$	$2.4 \times 10^4$
	$\sigma_{Low}$ =1.15 $\sigma_w$	$4.8 \times 10^9$	$3.6 \times 10^4$

3.1 원재의 실험결과와 기존의 수명평가법

Fig.3, 4는 원재와 침탄질화처리재의 평활재, 노치재 각각의 이단응력 실험결과이다. 그리고, 각 선들은 여러 해석 방법에 의해 예측된 값이다. 점선은 Miner's Rule이고 실선은 Marco-Starkey의 누적손상법칙에 의한 것, 파선은 Henry<sup>(4)</sup>의 방법에 의한 것이다.

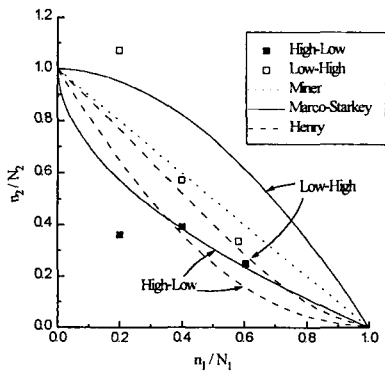


Fig. 3 Test result of original smooth specimen

그림에서 알 수 있듯이 각 방법들이 실험결과에 잘 맞지 않는다.. 특히, Marco-Starkey방법에 의한 예측의 경우, 식을 세운 뒤 실험결과를 이용하여 최소자승법(Least Square Method)으로 각각의 지수를 구한 것인데, 일반적으로 고응력-저응력의 곡선이 저응력-고응력의 곡선보다 아래쪽에 위치해야 하는

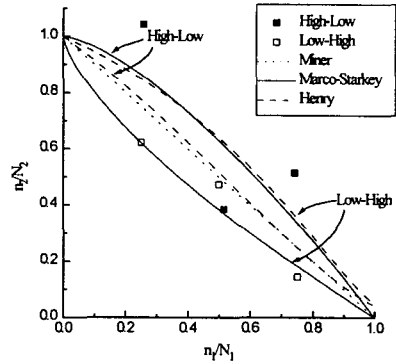
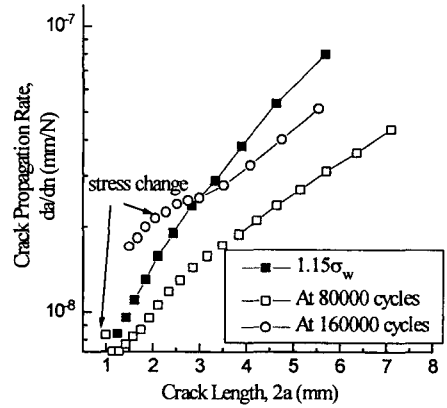
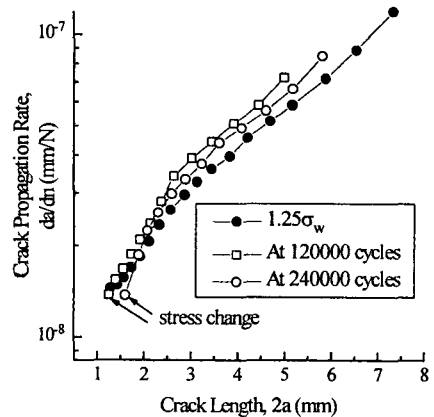


Fig. 4 Test result of original notched specimen



(a) High-Low test



(b) Low-High test

Fig. 5 da/dn-a diagram of original notched specimen

테 그림을 보면 원재의 노치 시편이 그렇지 않고 평활 시편 역시 그다지 잘 맞지 않다라는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 위 결과 중 수명비가 0.25, 0.5인 시편의 균열길이에 대한 균열전파속도선도이다. 고응력-저응력 실험에서는 응력변환후 속도가 저응력의 속도 아래로 급격히 떨어져 끝내 회복하지 못하는 거동을 보인다. 반면, 저응력-고응력 실험의 결과에서는 응력변환 후 가속이 일어나 고응력의 속도를 넘는 것을 볼 수 있다. 이것은 하중간섭효과(load interaction effect)<sup>(10)</sup>에 의한 것으로 정확한 수명을 평가하기 위해서는 이에 대한 고려가 필요하다.

### 3.2 Marco-Starkey 누적손상이론의 수정

Marco-Starkey의 이론은 균열성장의 비선형성은 잘 설명하고 있으나 불규칙 하중 하에서 크랙이 성장할 때 일어나는 하중간섭효과는 설명하지 못한다. 따라서 이 효과를 설명할 수 있도록 이론을 수정할 필요가 있다.

우선 Marco-Starkey의 이론은 이단블록하중의 경우 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{n_2}{N_2} = 1 - \left( \frac{n_1}{N_1} \right)^{\frac{p_1}{p_2}} \quad (1)$$

여기서  $n_1$ 과  $n_2$ 는 각 응력을 반복한 횟수,  $N_1$ 과  $N_2$ 는 각 응력에서의 수명이고,  $p_1$ 과  $p_2$ 는 각 응력에서의 손상의 비선형성을 나타내는 지수로 응력의 함수이다.

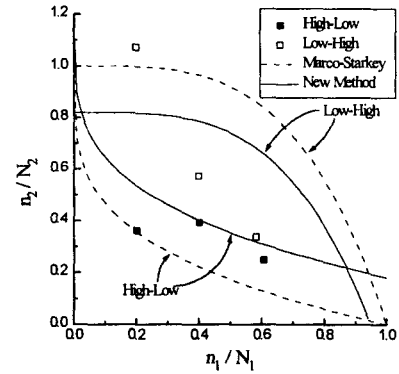
응력간섭효과의 영향이 손상비의 가감으로 나타나고 그 영향이 일정하다고 가정하면 위 식은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$\frac{n_2}{N_2} = 1 - \left( \frac{n_1}{N_1} \right)^{\frac{p_1}{p_2}} + D_{int} \quad (2)$$

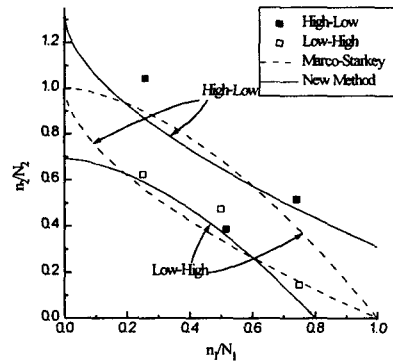
여기서  $D_{int}$ 는 두 응력의 비에 대한 함수로 두 응력이 서로 바뀌면 그 값의 부호가 바뀌는 것으로 한다. 이 식을 적용할 때, 한 가지 주의할 점은 하중간섭효과는 균열이 존재할 때에만 나타난다는 것이다. 따라서 균열발생단계에서는 그 영향이 없다.

이 식에 균열발생수명이 짧은 원재의 실험값을 적용하여 각 변수들을 구하여 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 실선은 새로운 식으로 구한 값이고 파선은 하중간섭효과를 고려하지 않은 값이다. 실험값에 상당히 접근하였음을 알 수 있다. 원재-평활재의 경우 균열발생수명이 전 수명의 20%정도<sup>(11)</sup>이므로 그 이

하에서는 하중간섭효과를 고려하지 않는다.



(a) smooth specimen



(b) notched specimen

Fig. 6 Comparison between the result and prediction by new method of original specimen

### 3.3 침탄질화처리재의 결과

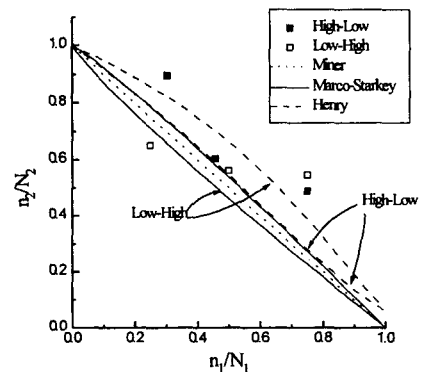
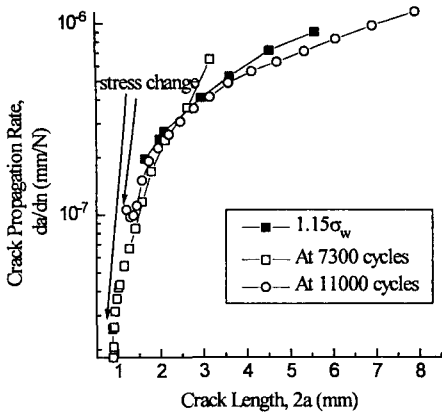
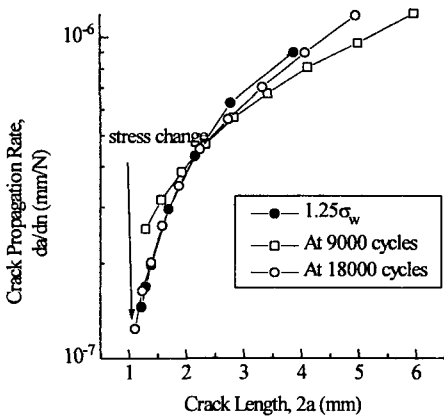


Fig. 7 test result of carbonitriding notched specimen



(a) High-Low test



(b) Low-High test

Fig. 7은 침탄질화처리재-노치재의 실험 결과를 기존의 방법에 적용시켜 본 것으로 이것 역시 잘 맞지 않는다. Fig. 8은 침탄질화처리재의 응력변환 후의 균열진전속도를 나타낸 것으로 원재와 마찬가지로의 거동을 보인다. Fig. 9는 하중간섭효과를 고려하여 수정한 Marco-Starkey의 이론에 의해 구한 값과 실험값을 비교한 것이다. 수정한 식이 실험값에 상당히 근접하는데 다만 저응력-고응력 실험값 중 마지막 값이 많이 벗어나 있다. 이는 낮은 하중이 반복되면서 경화층 아래 부분이 강화되어 응력 변환 후 마치 수명이 늘어난 것처럼 거동하기 때문으로 생각된다. 따라서 더욱 정확한 해석을 하기 위해서는 이에 대한 연구가 더 요구된다.

각 시편에 대한 수정 Marco-Starkey이론에 사용되는 상수의 값은 다음과 같다.

Table 4. The coefficients of modified Marco-Starkey theory

		D <sub>High</sub>	D <sub>Low</sub>	D <sub>int</sub>
원 재	평활재	0.24	0.88	0.18
	노치재	0.67	1.12	0.31
침탄 질화재	노치재	0.2	0.46	0.31

Fig. 8 da/dn-a diagram of carbonitriding notched specimen

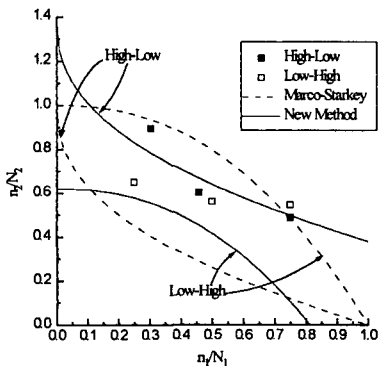


Fig. 9 Comparison between the result and prediction by new method of carbonitriding notched specimen

#### 4. 결론

본 연구에서는 불규칙한 하중 하에서 재료의 성질이 표면과 내부가 서로 다른 침탄질화처리재의 수명을 예측하기 위해 SCM 415 원재와 침탄질화처리재의 원공결합재와 평활재에 대해 이단응력실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 하중간섭효과를 고려해 Marco-Starkey누적손상 이론을 수정하였는데 이것은 기존의 것에 비해 원재의 평활재, 노치재의 실험결과에 잘 맞았다.
- (2) 침탄질화처리재는 노치재 경우 저응력-고응력의 한 값을 제외하고는 새로운 식에 잘 맞았다.
- (3) 위의 값이 벗어난 이유로 많은 반복수로 인한 경화층 안 쪽 원재의 가공경화를 들 수 있으며 정확한 결과를 위해서는 더 많은 연구가 필요하다.

참고문헌 생략