

## SCM415 침탄질화 처리재의 통계학적 피로거동에 대한 연구

### The Statistical study on the fatigue behavior of Nitro-Carburized SCM415 steel

송 삼 흥(고려대 기계공학과), 이 상 훈\*, 최 병 호(고려대 대학원), 임 세 혁(현대자동차)  
 S. H. Song(Korea Univ. Dept. of Mechanical Engineering), S. H. Lee(Korea Univ. Graduate School),  
 B. H. Choi(Korea Univ. Graduate School), S. H. Lim(Hyundai Motors Company)

**Keywords** : Nitro-carburized treatment(침탄질화처리), Weibull distribution(와이블 분포), Reliability function(신뢰도 함수), Crack propagation rate(균열전파속도), Coefficient of variation(변동계수)

**Abstract** : In this research, The statistical characteristics of non-heated and nitro-carburized specimens are investigated under two stress levels ( $1.15\sigma_w \leq \sigma_a \leq 1.25\sigma_w$ ). Seven specimens of each stress level are tested by rotary bending fatigue machine. The cycles about each crack length and crack propagation rate are used as statistical variable of weibull distribution. By using concept of reliability function, reliable S-N formula of Nitro-Carburized specimen are gotten.

### 1. 서론

피로수명의 추정은 강도의 추정에 비해 어려워 현재까지는 수명의 추정을 실험에 의존하는 경우가 많다. 하지만 이러한 피로 데이터는 일반적으로 상당히 큰 산포(scatter)를 갖는다. 따라서 각종 재료에 대한 데이터에 확률분포특성을 적용한 연구가 다수 행하여져 왔다. 後藤眞宏<sup>(1)(2)</sup>은 S20C 어닐링재의 미시적 균열 전파거동에 대한 확률 특성을 3부분의 응력 수준에서 조사한 연구와 S45C 조질재(調質材)의 균열발생과 전파거동에 관한 연구를 발표하였다. 그리고 佐々木茂美<sup>(3)</sup>등은 Ni-Cr-Mo-V강에 대한 표면 피로균열의 발생 및 전파의 산포를 평활재와 노치재에 대해 통계적 해석을 행하여 어느 경우에도 와이블 분포(Weibull Distribution)를 적용할 수 있음을 발표하였다. 하지만 피로수명의 향상을 이룰 수 있는 침탄질화재에 관한 연구는 주로 수명, 표면균열의 발생, 전파의 특성에 대한 연구에 치중되어 있으며 통계적으로 해석한 연구는 상당히 부족하다. 침탄질화처리는 내마모성의 증가와 피로 수명의 향상을 목적으로 하는 표면경화법중의 하나로 표면의 경화로 인하여 재료는 취성의 특성을 나타내기 때문에 피로 수명과 균열의 발생에 많은 산포를 나타내게 된다. 또 균열전파거동을 관찰하면 침탄질화 처리재가 원재에 비해 매우 빠른 균열 전파 속도를 보이기 때문<sup>(4)</sup>에 원재와는 다른 확률특성을 가질 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 SCM415 Cr-Mo강과 이것을 침탄질화처리 한 재료에 대해 각 균열길이에 대한 반복수(N)와 균열전파속도(da/dN)를 확률변수로 하여 통계적 정리를 시도하고, 그 통계량을 비교한다. 먼저 균열이 전파함에 따른 반복수의 산포를 와이블확률분포함수로써 정리하고 그 산포의 정도를 변동계수(Coefficient of Variation) CV( $=s/\mu$ , s: 표준편차)를 사용하여 정량화 하고자 한다. 또한 얻어진 분포함수를 이용하여 신뢰도 함수를 구하고 각 신뢰도에 대한 S-N관계

식을 구한다. 그리고 균열전파속도에 대한 균열전파속도의 확률특성을 조사해 보았다.

### 2. 실험방법

#### 2.1. 실험 재료 및 시험편 형상

본 연구에 사용한 시험편은 침탄 처리용으로 많이 쓰이는 Cr-Mo강인 SCM415로, 화학적 성분은 Table 1과 같으며 시험편은 Fig. 1과 같이 기계가공 하였다. 또한 시험편을 연마지로 #1500까지 연마한 후 미소 원공결합(미소원공의 지름(d) 0.5mm, 깊이(h) 0.4mm)을 가공하여 침탄질화열처리를 수행하였다. 침탄질화시의 온도는 840°C로 3시간 동안을 일정하게 유지하였다. 원재와 침탄질화 처리재의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

가공후 원재와 침탄질화 처리재는 각각 연마지로 #2000으로 연마하고, 전해연마후 산화알루미늄(입자크기 : 3 $\mu$ m)로 다듬질하여 표면스크래치의 영향을 최소화하여 균열관찰을 용이하게 하였다.

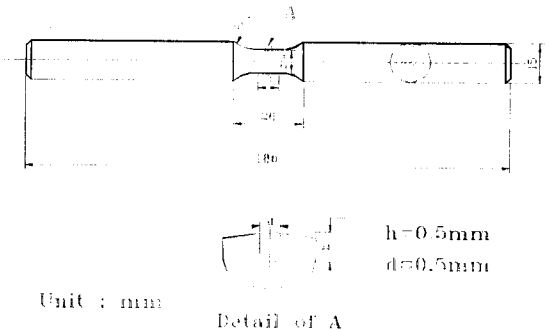


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen

Table 1. The chemical composition of material

Composition (Weight %)						
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
NCTS**	1044.8	755.4	2.1	2.33	

\* : Non-heated Test Specimen

\*\* : Nitro-Carburized Test Specimen

## 2.2 시험기와 실험방법

본 실험에는 시험기로 최대 굽힘 모멘트 98N-m, 회전수 3400rpm인 회전 굽힘 피로 시험기를 사용하였다.

또한 본 실험에서의 응력비(R)는 -1이고 하중형태는 정현파형이다. 그리고 적용응력의 선택은 피로한도 근처 및 하향복점을 넘는 영역을 제외한 유한 수명 영역( $1.15\sigma_w \leq \sigma \leq 1.25\sigma_w$ ,  $\sigma_w$ : 피로 한도)의 미시적 균열의 거동에 관한 확률 특성을 조사하기 위하여 각각 2개의 응력 수준을 정하였다. Table 3.은 침탄질화처리재와 원재의 각 응력수준을 표시한다. 이때 피로한도의 125%인 응력을 고응력, 115%의 응력을 저응력이라 하였다.

Table 3. Applied Stress Level

	High Stress	Low Stress	Fatigue Limit
NTS	240 MPa	220 MPa	191 MPa
NCTS	630 MPa	580 MPa	505 MPa
Ratio( $\sigma_h/\sigma_l$ )	1.25	1.15	

## 3. 실험결과 및 해석

### 3.1 S-N선도와 a-N곡선의 분포특성

Fig. 2는 원재와 침탄질화처리재의 S-N 곡선을 표시한다. 어느 응력에서도 산포가 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 침탄질화처리재의 경우 피로수명의 산포가 크기 때문에 두 적용응력에서 공통으로 존재하는 수명영역이 크게 되므로 이러한 분포의 특성을 명확히 할 필요가 있다.

Fig. 3의(a)와 (b)는 원재와 침탄질화처리재의 각 적용응력에 대한 균열전파곡선을 나타낸다. 침탄질화처리재의 경우 어느 응력에서나 산포를 가지며 특히 피로한도에 가까울수록 크게 나타낸다. 원재의 경우도 같은 경향을 나타낸다. 하지만 산포의 정도는 침탄질화처리재에 비해 그다지 크지 않다.

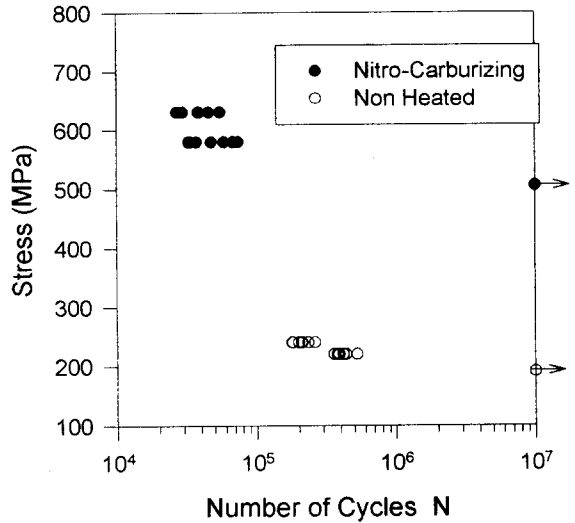


Fig. 2 Fatigue data scatter for constant stress level plotted S-N data

이와 같은 피로수명의 산포의 해석은 일반적으로 대수 정규분포와 와이블분포(Weibull distribution)를 적용하고 있다. 본 연구에서는 와이블분포를 이용하여 정리하고 분석된 통계량에 대해 검토한다.

와이블분포<sup>(5)</sup>의 함수 식은 다음과 같다.

$$F(x) = 1 - \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x - \gamma}{\eta} \right)^m \right] \text{-----}(1)$$

여기서 m, η, γ는 각각 형상모수, 척도모수 및 위치모수이다. 이들 모수의 추정은 상관계수법<sup>(6)</sup>으로 구한다.

### 3.2 균열의 발생 및 전파거동

원공지름을 포함한 균열길이의 초기 1.0mm에 대한 수명을  $N_{1.0}$ 이라 한다. 또한 균열이 노치의 영향을 벗어난 길이 1.5mm에 도달하였을 때의 수명을  $N_{1.5}$ 이라 하고 파단에 이를 때를  $N_f$ 라 하여 각각의 반복수를 구한 뒤 와이블 확률지에 나타내었다. 여기서  $\square$ 는 원재의 데이터를 나타내며,  $\bullet$   $\blacksquare$   $\blacktriangle$ 는 침탄질화처리재의 데이터를 나타낸다.

Fig. 4는 원재와 침탄질화처리재의 저응력에 대한 반복수를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 원재의 경우는 3모수 와이블분포로 정리할 수 있다. 하지만 침탄질화처리재의 경우는 어느 반복수에서나 와이블확률지에 직선으로 나타나는 2모수 와이블 분포로 정리할 수 있다.

Fig. 5는 원재와 침탄질화처리재의 고응력에서의 반복수를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 어떤 경우에도 3모수 와이블 분포로 정리할 수 있으며, 특히 침탄질화처리재의 파단수명은 2모수 와이블로 정리되는 경향이 있다.

같은 재료에서 원재에서는 어느 응력에서나 3모수 와이블 분포를 따르고 있는 반면 침탄질화처리재는 저응력에서의 반복수와 파단수명은 2모수 와이블 분포로 정리됨을 알 수 있다. 또 같은 적용응력비에서는 원재나 침탄질화처리재 어느 것이나 파단에 가까워질수록 2모수 와이블분포를 따른다. 이러한 경향을 침탄질화처리재에서 더

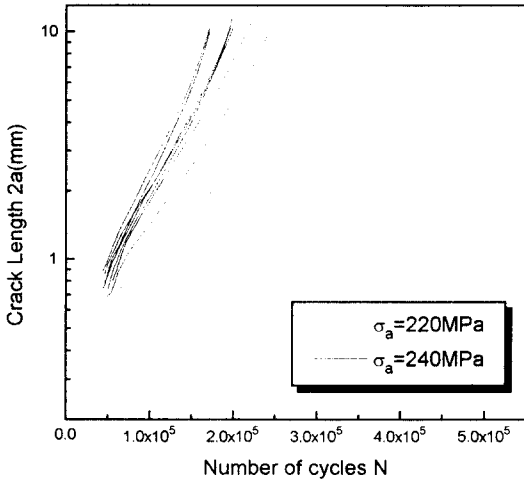


Fig. 3(a) Scatter of a-N curve for NTS

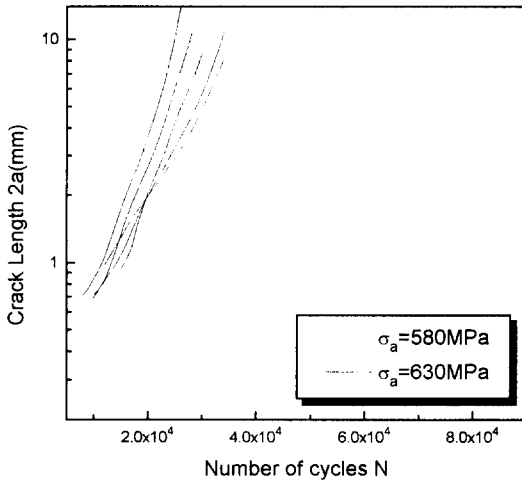


Fig. 3(b) Scatter of a-N curve for NCTS

속 뚜렷이 나타난다.

Table 4에 각각의 경우에 대한 형상모수  $m$ , 척도모수  $\eta$ , 위치모수  $\gamma$ , 변동계수  $CV(=s/\mu, s:표준편차)$ 와 회귀선과의 상관계수  $R$ 을 구하여 나타내었다.

위의 계수들 중에서 변동계수  $CV$ (Coefficient of Variation)는 서로 다른 분포의 산포도를 비교할 경우 시 매우 유용한 계수이다. 따라서 각 반복수에서 산포의 용력의존성을 명확히 하기 위하여 원재와 침탄질화처리재의  $CV$ 를 Fig. 6(a)에 나타내었다. 원재의 경우 적용응력이 높아질수록  $N_{1.0}$ 과  $N_{1.5}$ 의  $CV$ 값은 감소하고  $N_f$ 의  $CV$ 값은 일정한 값( $CV=0.12$ )을 가진다. 반면 침탄질화처리재의 경우는  $N_{1.0}$ 과  $N_{1.5}$ 의  $CV$ 값은 감소하지만  $N_f$ 의  $CV$ 값은 원재와는 달리 감소함을 알 수 있다. 이것은 파단수명에 있어서 원재는 응력에 상관없이 일정한 값을 갖는 반면 침탄질화처리재는 응력이 높아질수록 파단수명의 산포가 줄어들고 있다는 것을 의미한다. 또한 어떤 응력하에서도 침탄질화처리재의  $CV$ 가 원재보다 크다는 것을 알 수 있다.

Table 4. Statistical parameters of Non-heated specimen and nitro-carburized specimen

$\sigma$ (MPa)	a(mm)	m	$\eta$	$\gamma$	CV	R
NTS (580)	1.0	1.4120	42856	78204	0.1946	0.9726
	1.5	0.6353	24938	137488	0.1540	0.9819
	Failure	1.0819	68908	351846	0.1241	0.9836
NTS (630)	1.0	1.3005	12129	48258	0.1142	0.9986
	1.5	1.5482	19713	66174	0.1224	0.9776
	Failure	1.2692	47783	170080	0.1255	0.9773
NCTS (220)	1.0	2.8802	37136	0	0.2942	
	1.5	2.7647	47515	0	0.3097	
	Failure	3.0437	72727	0	0.2850	
NCTS (240)	1.0	1.0260	4633	10986	0.2292	0.9976
	1.5	1.2499	5633	13332	0.2013	0.9819
	Failure	2.6408	19464	18648	0.1636	0.9886

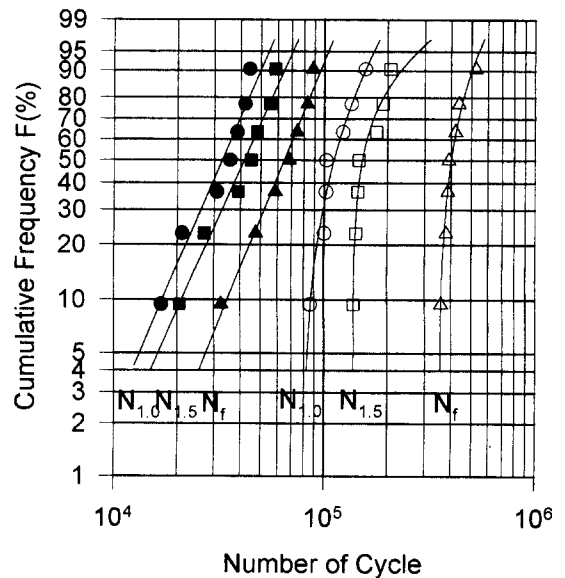


Fig. 4 Weibull Plot of Number of cycles about each crack length at  $1.15\sigma_w$

Fig. 7은 변동계수  $CV$ 의 균열길이 의존성을 나타낸 것이다. 원재의 경우 저응력에서  $CV$ 는 균열길이가 증가함에 따라 감소하고 고응력에서는 일정한 값( $CV=0.11\sim 0.12$ )을 갖는다. 반면 침탄질화처리재는 저응력에서는 일정한 값 ( $CV=0.29\sim 0.31$ )을 갖고 고응력에서는 감소함을 알 수 있다.

### 3.3 신뢰도를 고려한 침탄질화처리재에서의 S-N 선도 고찰

피로수명을 해석하는 데에 파단확률을 사용하는 것보다는 어느 시간까지 파단되지 않을 확률을 나타내는 것이 보다 편리하다. 따라서 신뢰도 함수(Reliability Function)를 다음과 같이 정의한다.

$$Re(x) = 1 - F(x) \quad (2)$$

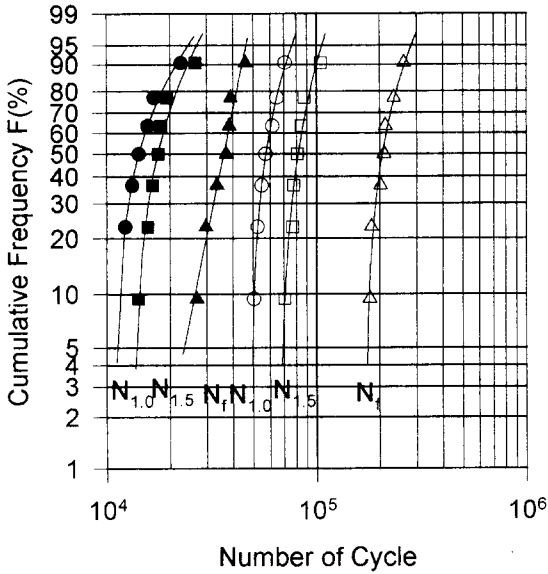


Fig. 5 Weibull Plot of Number of cycles about each crack length at  $1.25 \sigma_w$

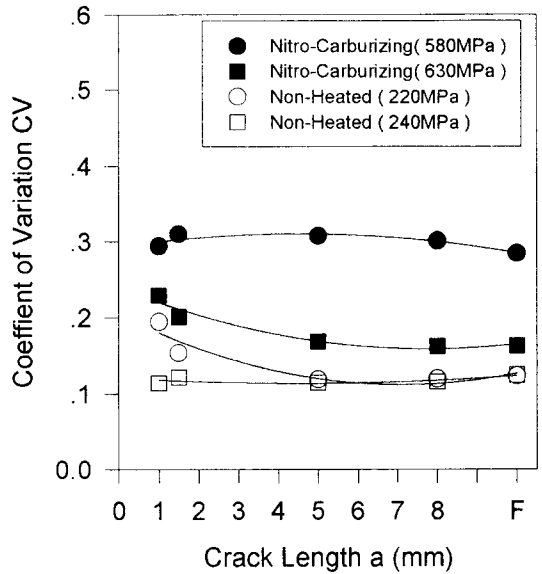


Fig. 7 Relation between CV and crack length

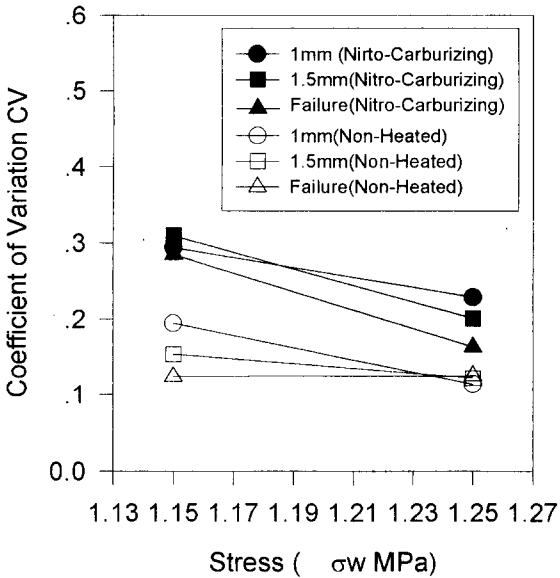


Fig. 6 Relation between CV and stress ratio

여기서  $x$ 는 확률변수이고  $F(x)$ 는 누적도수확률이다. 이것을 와이불 분포함수 식에 대입하여 수명에 대해 정리하면 다음과 같이 된다.

$$N = \text{Exp} \left[ \ln \eta + \frac{1}{m} \ln \ln \left( \frac{1}{Re} \right) \right] \text{ -----(3)}$$

이 식에 각각의 응력에 대한 신뢰도 5%, 50%, 95%일 때의 반복수를 구하여 Fig. 1에 대한 S-N선도에 그리면 Fig. 8과 같은 S-N선도를 얻을 수 있다.

S-N선도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = a + b \log \Lambda \text{ -----(4)}$$

따라서 각각의 신뢰도 5%, 50%, 95%에서 a, b의 값을

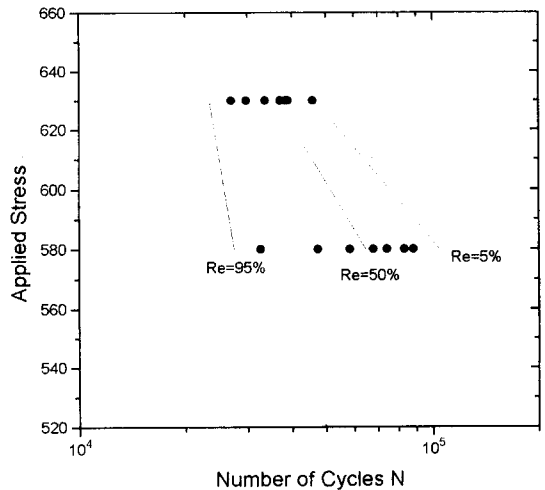


Fig. 8 Reliability plotted on S-N diagram for NCTS

구하여 S-N의 관계를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} S &= 1289.980 - 141.480 \log N \quad (\text{신뢰도 5\%}) \\ S &= 1536.455 - 198.872 \log N \quad (\text{신뢰도 50\%}) \text{ -----(5)} \\ S &= 3750.192 - 741.350 \log N \quad (\text{신뢰도 95\%}) \end{aligned}$$

### 3.4 균열전파속도의 확률특성

이 절에서는 피로 균열이 노치의 효과를 벗어난 범위로 판단되는 피로균열길이 1.5mm에서 부터의 피로 균열 전파속도에 대해 검토한다. Fig. 9와 10은 원재와 침탄질 화처리재의 각 적용응력에서의 균열전파속도를 와이불확률지에 나타낸 것이다. 어떤 경우에도 3모수 와이불분포로 정리할 수 있으며 특히 원재의 저응력에서의 균열전파속도와 침탄질화처리재의 고응력의 균열초기 전파속도

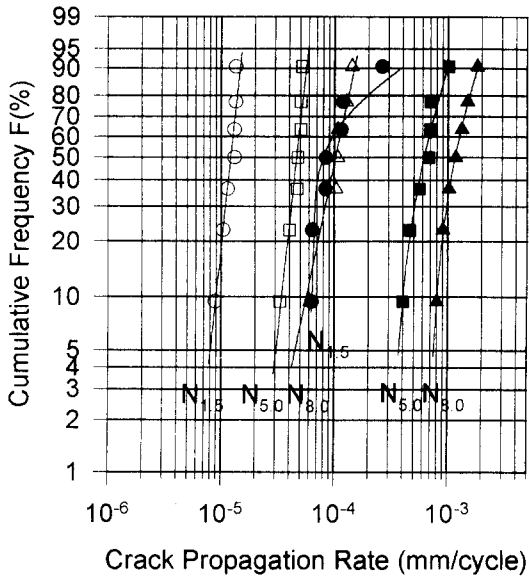


Fig. 9 Weibull plot of crack propagation rate about each crack length at  $1.15 \sigma_w$

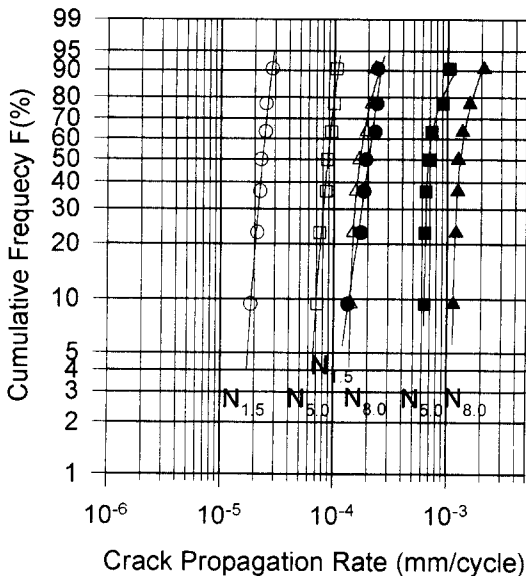


Fig. 10 Weibull plot of crack propagation rate about each crack length at  $1.15 \sigma_w$

는 2모수 와이불분포로 정리된다. Table 5는 각각의 경우에 대한 통계량을 나타낸다.

Fig. 10은 균열길이에 대한 균열전파속도의 변동계수 CV를 나타낸다. 원재의 경우는 균열전파속도의 CV가 파단에 가까워 질수록 커짐을 알 수 있다. 이것은 파단에 가까워질수록 균열전파속도가 불안정해 진다는 것을 의미한다. 반면 침탄질화처리재 저응력의 경우는 균열초기의 전파속도의 CV가 파단부근보다 큼을 알 수 있다. 이것은 균열의 발생이 표면층의 높은 경도와 잔류응력에 관계되기 때문으로 생각된다. 이런 경향도 응력이 높아지면 사라진다.

Table 5. Statistical parameters of Nitro-carburized specimen

$\sigma$ (MPa)	a	m	$\eta$ $\times 10^{-4}$	$\gamma$ $\times 10^{-4}$	CV	R
1.5	0.4068	0.4123	0.6292	0.5721	0.9654	
NCTS (580)	5.0	1.4693	3.7784	3.2205	0.2879	0.9825
	8.0	1.3781	6.1671	6.8274	0.2683	0.9994
NCTS (630)	1.5	4.8375	2.1716	0	0.1889	
	5.0	0.5030	1.0491	6.2944	0.1971	0.9940
	8.0	0.7628	2.8091	11.234	0.2207	0.9874

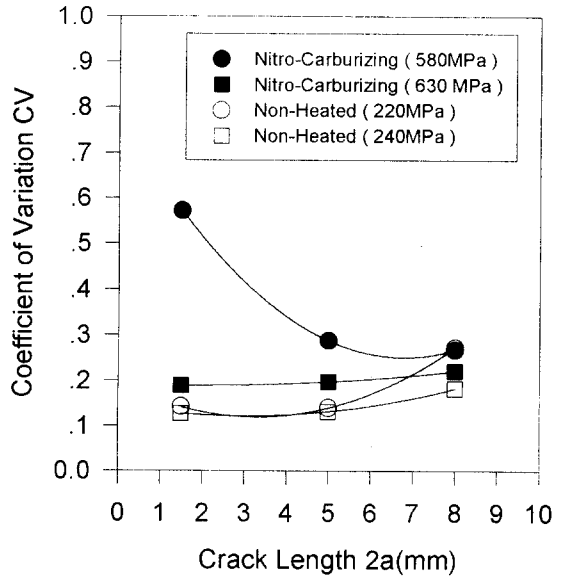


Fig. 11 Relation between CV of crack propagation rate and crack length

#### 4. 결론

원재와 침탄질화처리재를 각각  $1.15\sigma_w \leq \sigma_a \leq 1.25\sigma_w$ 의 응력 범위에서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 원재의 피로수명의 산포는 응력의 영향을 적게 받으나 침탄질화처리재의 피로수명의 산포는 피로한도에 가까워질수록 커진다.
- 2) 각 균열 길이에 대한 반복수는 와이불 분포(weibull distribution)로 정리될 수 있으며 특히 침탄질화처리재의 파단수명은 2모수 와이불분포로 정리할 수 있다.
- 3) 각각 5%, 50%, 95%의 신뢰도에서 침탄질화처리재의 S-N관계식을 구하면 다음과 같다.

$$S = 1289.980 - 141.480 \log N \quad (\text{신뢰도 } 5\%)$$

$$S = 1536.455 - 198.872 \log N \quad (\text{신뢰도 } 50\%)$$

$$S = 3750.192 - 741.350 \log N \quad (\text{신뢰도 } 95\%)$$

- 4) 각 균열길이에 대한 균열전파속도는 어느 경우에도 와이불분포로 정리될 수 있으며 원재 저응력에서의 균열 전파속도는 2모수 와이불 분포로 정리할 수 있다.

#### 5. 참고문헌

<참고문헌 생략>