

침탄질화 처리된 SCM415재의 피로거동에 대한 통계적 연구

송삼홍*, 이상훈**, 임세혁**

A Statistical Study on the Fatigue Behaviors of Nitro-Carburized SCM415

Sam-Hong Song*, Sang-Hoon Lee**, Se-Hyuck Lim**

ABSTRACT

Due to their high strength and good wear resistance, nitro-carburizing materials have been used for many machine components. However, the nitro-carburizing materials are found to have one disadvantage ; that is, their strength and fatigue life show larger scatter than those of non-heated metals. In this paper, therefore, the statistical characteristics of non-heated and nitro-carburized specimens for SCM415 are investigated under two different of stress levels $1.15\sigma_0 \leq \sigma_a \leq 1.25\sigma_0$. Seven specimens at each stress level are tested by using rotating bending fatigue tester. The relation between a crack length and fatigue cycles can be arranged for Weibull distribution, and S-N curve using 95% reliability function is obtained for nitro-carburized specimen.

Key Words: Nitro-carburized treatment(침탄질화 처리), Fatigue life(피로수명), Weibull distribution(와이블분포), Statistical parameter(통계변수), Coefficient of variation(변동계수), Crack propagation(균열전파), Reliability function(신뢰도 함수)

1. 서 론

큰 산포를 갖는 금속재료의 피로강도와 수명으로 인해 통계를 이용한 피로특성의 해석이 기계부품의 신뢰성 설계를 위해서 요구되고 있다. 피로시험의 결과를 통계적으로 해석한 Weibull⁽¹⁾의 연구 이후로 많은 연구자들^{(2),(3)}은 피로균열의 전파수명을 예측하기 위해 와이블분포(Weibull distribution)가 유용함을 보고하였다. S20C 어닐링재를 이용한 회전굽힘 피로시험에서 後藤眞宏등⁽⁴⁾은 균열전파수명의 산포가 상당히 크지만 균열전파속도는 균열길이에 비례한다는 결과를 얻었다. 여기서 피로

균열 전파법칙의 상수는 와이블분포에 의해 정리되고, 전파수명의 관계식을 구하였다. 佐々木茂美등⁽⁵⁾은 Ni-Cr-Mo-V강에 대한 표면 피로균열의 발생 및 전파의 산포를 평활재와 노치재에 대해 통계적 해석을 행하여 어느 경우에도 와이블분포를 적용할 수 있음을 보고하였다. 이상과 같은 연구결과들은 작용하는 응력의 수준에 관계없이 피로균열의 전파수명이 와이블분포에 의해 예측될 수 있음을 나타낸다. 그러나 기존의 연구에서 작용응력의 수준은 200MPa 부근이고, 재료는 연성재의 경우로 한정되어 있기 때문에 기존의 피로균열 전파수명의 관계식은 고강도재료의 경우에 적용할 수 없다. 이 때 고강도재의 일종

* 고려대학교 기계공학과
** 고려대학교 대학원

인 침탄질화 처리재의 경우 송등⁽⁷⁾은 피로균열의 발생은 개재물에서 시작되고, 표면 부위의 경화에 의해 피로균열의 전파가 매우 빠르다는 결과를 보고하였다. 즉 표면의 경화로 인하여 취성의 특성을 나타내는 침탄질화 처리재에서 피로수명과 균열의 전파거동은 연강재에 비해 큰 산포를 갖게된다고 예상할 수 있다. 그러나 경도가 높은 재료의 피로균열의 거동에 대한 통계학적인 접근은 실험상 피로균열의 관찰의 어려움으로 인해 드문 실정이다.

따라서 본 연구는 SCM415강과 이것을 침탄질화 처리한 재료에 대해 각 균열길이에 대한 피로반복수(N)를 확률변수로 하여 통계적으로 검토하고, 그 통계량을 비교하였다. 여기서 말하는 통계적이란 용어의 뜻은, 연구자가 취급한 범위 내에서의 자료를 근거로 취급한 것으로 협의의 통계 의미를 갖는다. 먼저 균열의 전파와 반복수의 관계에 대한 산포는 와이블 확률분포 함수로서 정리하고, 그 산포의 정도는 변동계수(Coefficient of variation = s/μ , s : 표준편차, μ : 평균)를 사용하여 고찰하였다. 또한 얻어진 분포함수를 이용하여 침탄질화 처리재의 피로수명에 대한 신뢰도함수가 제안되고, 이것을 고려하여 정량화된 S-N 관계식을 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 재료 및 시험편 형상

본 연구에 사용한 시험편은 표면경화 처리용으로 많이 쓰이는 Cr-Mo강인 SCM415이다. 화학적 성분은 Table 1과 같으며, 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 기계 가공하였다. 또한 시험편은 연마지로 #1500까지 연마하였고, 시험편의 평활한 부위에 미소 원공결함(미소원공의 지름 $d=0.5\text{mm}$, 깊이 $h=0.4\text{mm}$)을 가공하였다. 원공결함의 가공이 완료된 시험편에 대해 침탄질화 열처리를 수행하였다. 침탄질화시의 온도는 840°C 로 3시간 동안을 일정하게 유지하였다. 원재와 침탄질화 처리재의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

가공후 원재와 침탄질화 처리재는 각각 연마지 #2000까지 연마하고, 마지막으로 산화알루미늄(입자크기: $3\mu\text{m}$)로 표면을 다듬질하였다. 이것은 피로수명에 미치는 표면 거칠기의 영향을 최소화하고, 피로균열의 관찰을 용이하게 한다.

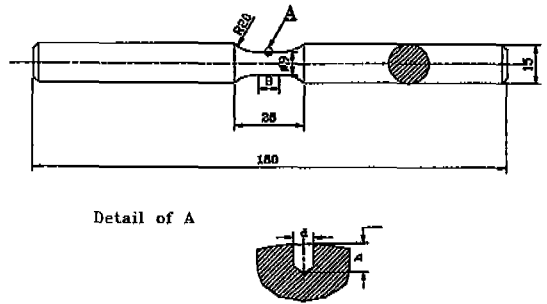
2.2 시험기기와 실험방법

본 실험에 사용한 시험기는 최대 굽힘모멘트 98N-m,

Table 1 The chemical composition of SCM415

composition (weight %)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.18	0.22	0.68	0.01	0.014	1.0	0.17

Unit : mm



Detail of A

Fig. 1 Configuration of test specimen

Table 2 The mechanical properties of test materials

Mech. Properties	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Micro-Vickers hardness (Hv)
Specimen					
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

회전수 3400rpm인 Ono식 회전굽힘 피로시험기이다. 또한 본 실험에서의 응력비(R)는 -1 이고, 하중형태는 정현파형이다. 그리고 적용응력은 피로한도 부근과 하향 복점을 넘는 영역을 제외한 유한 수명영역 ($1.15\sigma_w \leq \sigma_a \leq 1.25\sigma_w$, σ_w : 피로한도)을 고려하여 2개의 응력수준으로 선정하였다. Table 3은 원재와 침탄질화 처리재에 작용하는 응력수준을 표시한다. 적용응력은 피로한도 보다 25% 높은 응력을 고응력, 15% 높은 응력을 저응력으로 결정하였다.

Table 3 Applied stress level

Stress level	High stress (1)	Low stress (1)	Fatigue limit from test (2)
Specimen			
NTS	240 MPa	220 MPa	191 MPa
NCTS	630 MPa	580 MPa	505 MPa
Ratio (1)/(2), (σ_a/σ_w)	1.25	1.15	

3. 실험결과 및 해석

3.1 S-N선도와 a-N곡선의 분포특성

Fig. 2는 원재와 침탄질화 처리재의 S-N 곡선을 표시한다. 작용하는 응력수준에 관계없이 시험편의 파단수명은 큰 산포를 갖는다. 특히 침탄질화 처리재의 경우 고응력과 저응력의 범위 모두에서 파단수명의 산포는 원재에 비해 크기 때문에 확률적 분포의 특성에 대한 고찰을 통해 피로수명의 예측이 필요하다.

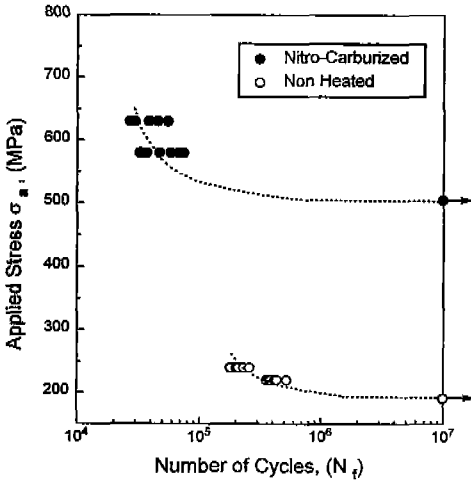


Fig. 2 S-N curve for SCM415 and nitro-carburized specimens

Fig. 3은 적용응력 $\sigma_a = 220\text{MPa}$, 240MPa 인 경우에서 원재의 피로균열 전파곡선들을 나타낸다. 저응력과 고응력 수준에서 전파특성은 모두 큰 산포를 가지며, 특히 피로한도에 가까운 저응력의 범위에서 산포는 더욱 크게 나타난다. Fig. 4는 적용응력 $\sigma_a = 580\text{MPa}$, 630MPa 인 경우 침탄질화 처리재의 피로균열 전파곡선들을 나타낸다. 침탄질화 처리재의 경우도 원재의 경우와 같이 전파곡선의 산포가 관찰되고, 피로한도에 가까운 저응력의 범위에서 산포의 정도는 원재에 비해 더욱 크게 나타난다. 이러한 현상은 작용하는 응력이 높은 범위에서 피로균열의 전파는 작용응력에 의해 지배되지만, 작용하는 응력이 낮은 범위에서 피로균열의 전파는 작용응력 이외에 금속조직과 같은 인자에 민감하게 반응해 더욱 큰 산포를 갖는 것으로 생각된다.

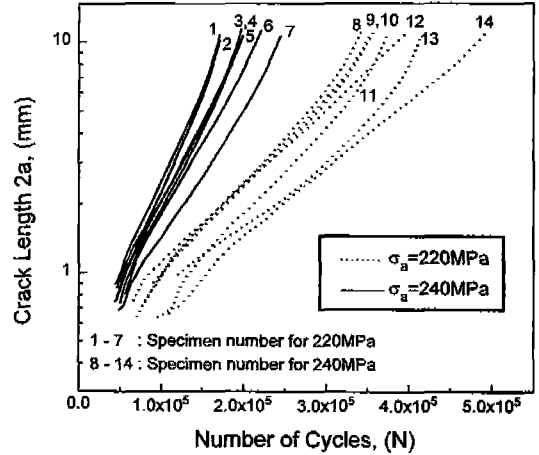


Fig. 3 a-N curve for non-heated specimens

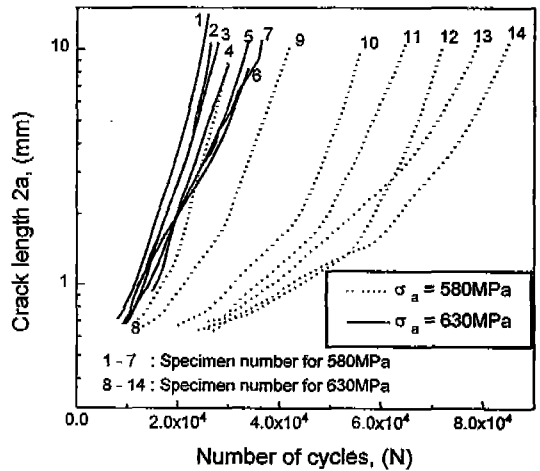


Fig. 4 a-N curve for nitro-carburized specimens

한편 피로수명의 산포에 대한 해석방법은 대수정규분포(Lognormal distribution)와 와이분포를 적용하고 있다. 본 연구에서는 와이분포를 이용하여 산포의 분포를 수치로 정리하고, 분석된 통계량에 대해 검토한다.

와이분포의 함수식⁽⁹⁾은 다음과 같다.

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

여기서, m, η 와 γ 는 각각 형상모수(Shape parameter), 척도모수(Scale parameter) 및 위치모수(Location parameter)이다. 3개의 모수들은 상관계수

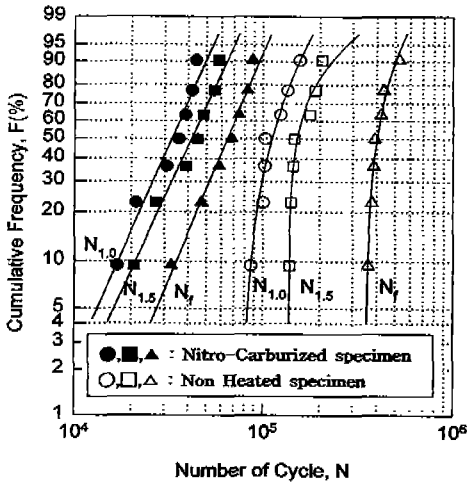
최대의 원리를 이용하여 위치모수가 결정된 후, 최소자승법에 의해 다른 2개의 모수를 추정하는 상관계수법⁽⁶⁾으로 구하였다.

3.2 피로균열의 발생 및 전파거동의 확률 특성

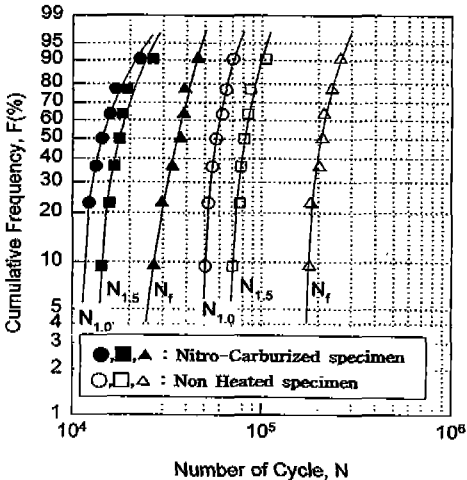
원공지름을 포함한 피로균열의 길이가 1.0mm인 경우 피로반복수는 $N_{1,0}$ 이라고 정하였다. 그리고 노치의 영향에서 벗어나 피로균열이 안정적으로 성장하는 범위인 1.5 mm에 도달하였을 때의 피로반복수는 $N_{1,5}$, 파단에 이를 때의 피로반복수는 N_f 라 하였다. 이 때 Fig. 5 (a)와 (b)는 실험편 7개에 대해 각각의 반복수를 구한 뒤 피

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

σ_s (MPa)	a(mm)	m	η	γ	CV	R
SCM415 (220)	1.0	1.4120	42856	78204	0.1946	0.9726
	1.5	0.6353	24938	137488	0.1540	0.9819
	Failure	1.0819	68808	351846	0.1241	0.9836
SCM415 (240)	1.0	1.3005	12129	48258	0.1142	0.9886
	1.5	1.5482	19713	66174	0.1224	0.9776
	Failure	1.2692	47783	170080	0.1255	0.9773
Nitro-carburizing (580)	1.0	2.8802	37136	0	0.2942	0.9750
	1.5	2.7647	47515	0	0.3097	0.9830
	Failure	3.0437	72727	0	0.2850	0.9901
Nitro-carburizing (630)	1.0	1.0260	4633	10986	0.2292	0.9976
	1.5	1.2499	5633	13332	0.2013	0.9819
	Failure	5.9487	38436	0	0.1636	0.9848



(a) Applied stress $\sigma_a = 1.15\sigma_w$



(b) Applied stress $\sigma_a = 1.25\sigma_w$

Fig. 5 Weibull plot of stress levels for each fatigue cycles

로균열의 길이에 대한 피로수명을 와이블분포로 나타낸 선도이다. 여기서 원, 사각, 삼각형의 표시로 나타낸 것은 원재에 대한 실험결과를 말하며, 검은 원, 사각, 삼각형의 표시는 침탄질화 처리재의 실험결과를 나타낸다. Fig. 5 (a)는 저응력 조건에서 원재와 침탄질화 처리재에 대해 피로반복수를 와이블확률로 나타낸 것이다. 원재의 경우 피로반복수는 3모수 와이블분포로 정리할 수 있다. 하지만 침탄질화 처리재의 경우 피로반복수는 직선으로서 2모수 와이블분포로 정리된다. Fig. 5 (b)는 고응력 조건에서 원재와 침탄질화 처리재에 대해 피로반복수를 와이블확률로 나타낸 것이다. 어떤 경우에도 피로반복수는 3모수 와이블분포로 정리되지만, 침탄질화 처리재의 파단수명 N_f 는 2모수 와이블분포로 정리된다. 작용응력에 관계없이 원재에서 피로반복수는 3모수 와이블분포의 특징을 갖지만, 침탄질화 처리재에서 피로반복수와 파단수명은 저응력에서 2모수 와이블분포로 정리됨을 알 수 있다. 또한 같은 작용 응력비에서 침탄질화 처리재의 피로반복수는 파단에 가까워질수록 2모수 와이블분포를 따르는 경향이 더욱 뚜렷이 나타난다.

각각의 경우에 대해 형상모수 m, 척도모수 η , 위치모수 γ , 변동계수 $CV (=s/\mu, s: \text{표준편차})$ 와 최귀선과의 상관계수 R의 값을 Table 4에 나타내었다.

위의 계수들 중에서 변동계수 CV(Coefficient of variation)는 산포의 정도를 비교할 경우 매우 유용한 인자이다. Fig. 6은 피로반복수에 따른 산포의 응력의존성을 검토하기 위해 원재와 침탄질화 처리재의 CV와 응력비의 관계를 나타낸 선도이다. 원재의 경우 작용응력이 높아질수록 피로반복수 $N_{1,0}$ 과 $N_{1,5}$ 의 CV값은 감소하고, N_f 의 CV값은 0.12로 일정한 분포를 가진다. 그러나 침탄질화 처리재의 경우는 $N_{1,0}$ 과 $N_{1,5}$ 의 CV값은 감소하지

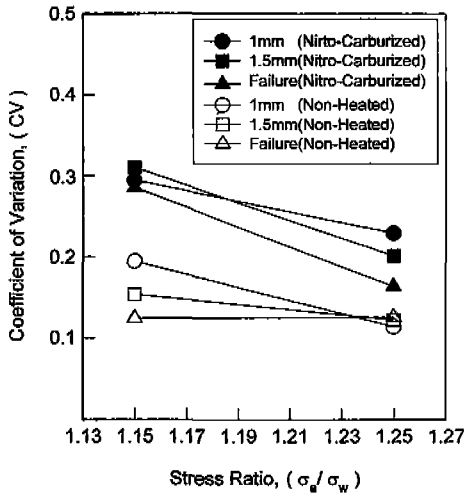


Fig. 6 The distribution of coefficient of variation for stress ratio

만, N_f 의 CV값은 원재와는 달리 감소함을 알 수 있다. 즉 원재의 파단수명은 응력에 관계없이 일정한 산포를 갖는 반면, 침탄질화 처리재의 경우 파단수명의 산포는 응력이 높아질수록 감소한다는 것을 의미한다. 또한 저·고응력의 범위에서 모두 침탄질화 처리재의 CV가 원재보다 크게 나타나, 실험에서 얻은 결과와 통계를 이용한 해석이 일치함을 나타내고 있다.

Fig. 7은 균열길이나 변동계수 CV의 관계를 나타낸 것이다. 원재의 경우 저응력에서 CV는 균열길이가 증가함에 따라 감소하고, 고응력에서는 0.11~0.12로 일정하다. 침탄질화 처리재의 경우 저응력에서 CV는 균열길이

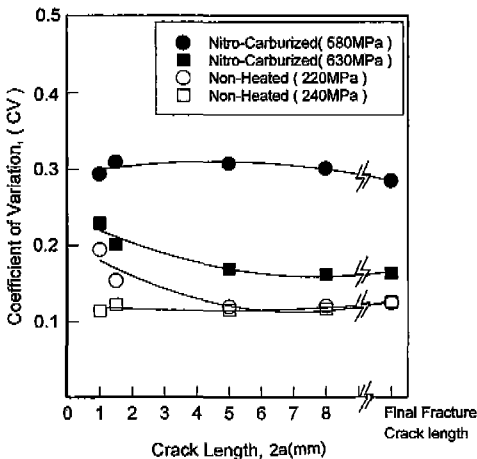


Fig. 7 The distribution of coefficient of variation for crack length

에 관계없이 0.29~0.31로 일정하고, 고응력에서 감소함을 알 수 있다.

3.3 신뢰도를 고려한 침탄질화 처리재의 S-N선도 고찰
침탄질화 처리재의 파단수명이 2모수 와이블분포로 정리된다는 결과는 확률특성을 이용한 피로수명의 예측을 가능하게 한다. 이 때 피로수명의 평가는 파단될 확률을 사용하는 것보다 어느 시간까지 파단되지 않을 확률인 신뢰도함수(Reliability function)를 사용하는 것이 편리하다. 신뢰도함수는 다음과 같은 관계로 표시된다.

$$Re(x) = 1 - F(x) \tag{2}$$

여기서 x 는 확률변수이고, $F(x)$ 는 누적도수확률이다. 이것을 와이블 분포함수식에 대입하여 정리하면 피로수명식은 다음과 같이 된다.

$$N = Exp[\ln \eta + \frac{1}{m} \ln \ln (\frac{1}{Re})] \tag{3}$$

각각의 응력에 대한 신뢰도 5%, 50%, 95%일 때의 피로반복수는 식(3)에서 구하여, Fig. 2의 S-N선도에 표시한다. Fig. 8은 해석의 결과를 나타낸 선도이다. 이때 응력과 피로반복수의 관계는 선형적이므로, 피로강도와 수명은 다음과 같은 관계로 표시될 수 있다.

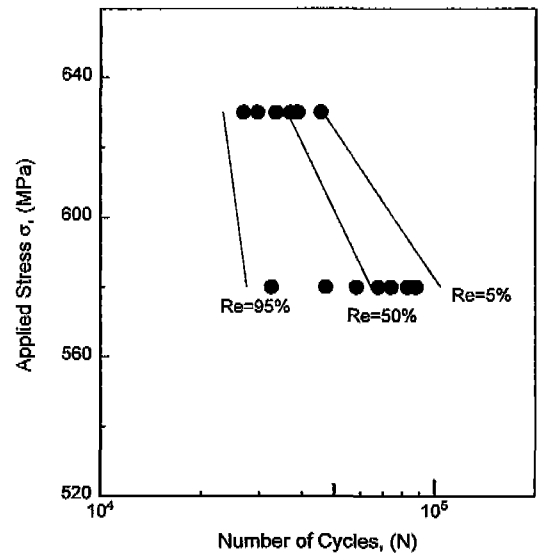


Fig. 8 Comparison for test data and estimating curve according to value of reliability

$$\sigma = a + b \log N \quad (4)$$

여기서 σ 는 피로강도(MPa)이고, N은 피로반복수이다. a와 b는 신뢰도의 범위에 의해 결정되는 상수이다.

따라서 각각의 신뢰도 5%, 50%, 95%에서 a, b의 값이 결정되므로, 각기 신뢰도 범위의 S-N 관계식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_5 &= 1290 - 142 \log N \text{ (신뢰도 5\%)} \\ \sigma_{50} &= 1537 - 199 \log N \text{ (신뢰도 50\%)} \\ \sigma_{95} &= 3750 - 714 \log N \text{ (신뢰도 95\%)} \end{aligned} \quad (5)$$

즉 신뢰도 95%에서 630MPa의 응력에 대응하는 침탄 질화 처리재의 피로수명은 식(5)로 부터 23327 반복수임을 예측할 수 있다.

4. 결 론

$1.15\sigma_w \leq \sigma_a \leq 1.25\sigma_w$ 의 응력범위에서 SCM415 원재와 침탄질화 처리재에 대한 실험과 해석에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 동일한 원공결합에서 침탄질화 처리재의 피로수명은 원재에 비해 비교적 큰 산포를 나타내며, 피로수명의 산포범위는 피로한도에 가까워질수록 커진다.

2) 여러가지 균열 길이에 대한 피로반복수는 와이블분포(weibull distribution)로 정리될 수 있으며, 특히 침탄질화 처리재의 파단수명은 2모수 와이블분포로 정리할 수 있다.

3) 각각 5%, 50%, 95%의 신뢰도에서 침탄질화 처리재의 S-N 관계식은 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \sigma_5 &= 1290 - 142 \log N \text{ (신뢰도 5\%)} \\ \sigma_{50} &= 1537 - 199 \log N \text{ (신뢰도 50\%)} \\ \sigma_{95} &= 3750 - 714 \log N \text{ (신뢰도 95\%)} \end{aligned}$$

5. 참 고 문 헌

1. Weibull. W., "Fatigue Testing and Analysis of Results", Pergamon Press, NY, 1961.
2. Little, R.E., "Manual on Statistical Planning and Analysis of Fatigue Experiments" ASTM STP 588, American Society for Testing and Materials, pp. 46-60, 1975.
3. S. Nishijima, "Statistical Fatigue Properties of Some Heat-Treated Steels for Machine Structural Use", ASTM STP 744, pp. 75-88, 1979.
4. 後藤眞宏, 福島茂, 西谷弘信, "微視的き裂の挙動に基づくS20C焼なま材の確率疲労特性の検討", 日本機械學會論文集, 第58巻, 第552號, pp. 53-60, 1992.
5. 後藤眞宏, 福島茂, 西谷弘信, "S45C調質材のき裂發生と傳ば舉動に関する確率疲労特性", 日本機械學會論文集, 第57巻, 第537號, pp. 30-36, 1991.
6. 佐々木茂美, 越智保雄, 石井明, "Ni-Cr-Mo-V鋼における表面疲労き裂の發生,傳ば壽命のばらつき特性", 日本機械學會論文集, 第55巻, 第509號, pp. 22-27, 1989.
7. 송삼홍, 이상훈, "침탄질화 열처리에 의한 미소 원공결합재의 피로거동", 대한기계학회 '94 춘계학술대회 논문집, pp. 115-119, 1994.
8. Kececioglu, Reliability and Life Testing Handbook, Prentice Hall, Vol 1, pp. 373-463, 1993.
9. 酒井達雄, 田中道七, 3母數ワイブル分布の母數推定について, 日本材料工學會, pp. 17-23, 1985.