

# 데이터베이스 시스템을 이용한 탄소강의 피로강도 및 수명분포

A Study on the Fatigue Strength and Life Distribution of Carbon Steel  
Using the Database System

김 정 규<sup>1)</sup> · 문 준 호<sup>2)</sup> · 김 도 식<sup>3)</sup>

Kim, Jung Kyu      Moon, Joon Ho      Kim, Do Sik

**요    약 :** 기계 및 구조물의 안전성과 신뢰성 평가를 위하여 금속재료의 피로강도 데이터베이스 시스템을 구축하고, 이를 이용하여 금속재료의 피로수명 분포특성을 검토하였다. 종속도를 이용하여 구성한 관계형 피로강도 데이터베이스 시스템은 일련의 데이터 관리 및 해석작업을 효율적으로 수행하였다. 또한 Robust 방법과 보상오차함수 (complementary error function)를 이용한 3-파라미터 Weibull분포의 파라미터 추정법 및 비파손률을 검토하기 위하여 제안된 새로운 기준식의 타당성을 검토하였다. 조합 분포모델을 이용하여 부하응력비와 Weibull분포의 파라미터 항으로 나타낸 피로수명 분포식은 탄소강의 P-R-N 특성을 해석함에 있어서 좋은 결과를 보였다.

**ABSTRACT :** The relational database system on fatigue strength was constructed, and the properties of fatigue life distribution were examined to analyze reliability and safety of metallic materials. Data manipulations were efficiently performed in relational fatigue strength database system using dependency diagram. Regardless of the distribution of fatigue strength, the proposed method, the Robust method and the complementary error function method using probability distribution, successfully estimated parameters of the 3-parameter Weibull distribution. The proposed criterion for estimating non-failure probability showed good results regardless of censoring time. The fatigue life distribution function described as a function of parameters of the Weibull distribution and applied stress ratio produced P-S-N characteristics reasonably.

1) 한양대학교 공과대학 기계공학부 교수

2) Post-Doctor, Carnegie Mellon University

3) 한양대학교 산업과학연구소 선임연구원

본 논문에 대한 토의를 1998년 9월 30일까지 학회로 보내  
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

**핵심 용어** : 탄소강, 피로강도, 피로수명, 관계형 데이터베이스 시스템, 3-파라미터 웨이블분포함수, 로버스트법, 보상오차함수, 피로시험 시간, 몬테카를로 시뮬레이션

**KEYWORDS** : carbon steel, fatigue strength, fatigue life, relational database system, 3-parameter Weibull distribution function, Robust method, complementary error function, censoring time, Monte Carlo simulation

## 1. 서 론

기계 및 구조물의 신뢰성 해석을 위해서는 이에 작용하는 외력의 분포와 각 요소의 피로강도 및 수명 등에 대한 정량적인 해석이 필요하다. 또한 실제 설계에 있어서 이러한 일련의 해석을 위해서는 수집된 데이터의 효율적이고 체계적인 관리가 선행되어져야 한다. 그러나 실제 설계에 있어서 재료특성 값의 데이터를 얻기 위한 시험은 시간적, 경제적 또는 기술적인 이유 때문에 제한적이었고 또한 이를 데이터들은 실험조건의 차이, 측정오차 등으로 인하여 신뢰성을 충분히 확보하지 못하고 있다. 따라서 기계 및 구조물의 안전성과 신뢰성을 향상시키기 위해서는 얻어진 데이터에 대한 데이터베이스 시스템을 구축하고 이를 이용하여 강도평가 및 피로수명 특성을 평가하는 것이 필요하다<sup>(1)(2)</sup>. 본 연구에서는 피로강도 데이터의 효율적인 이용을 위해서 관계형 구조의 피로강도 데이터베이스 시스템을 구축하여 비파손학률에 대한 평가기준을 제시하였다. 또한 제시된 비파손학률의 평가기준을 검증하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 행하였고, 데이터베이스 시스템을 이용하여 제시한 모델과 실제의 실험결과를 비교 검토하여 그 유용성을 입증하였다.

## 2. 피로강도 데이터베이스의 구성

데이터베이스 시스템은 크게 관계형 모델(relational model), 계층형 모델(hierachical

model), 네트워크형 모델(network model) 등으로 구분된다<sup>(3)</sup>. 본 연구에서는 관계형 데이터베이스 시스템을 채택하였으며, 데이터베이스의 자료구조는 종속도를 이용하여 정규화와 종속성의 관계를 설정하여 구성하였다. 시스템을 구현하기 위해 SQL(Structured Query Language)을 데이터관리 언어로 이용하였고 통계학적인 해석을 위한 일련의 과정을 프로그래밍하기 위해 파스칼언어(Pascal language)를 사용하여 전체적인 통합환경을 구축하였다. 데이터베이스 시스템에서

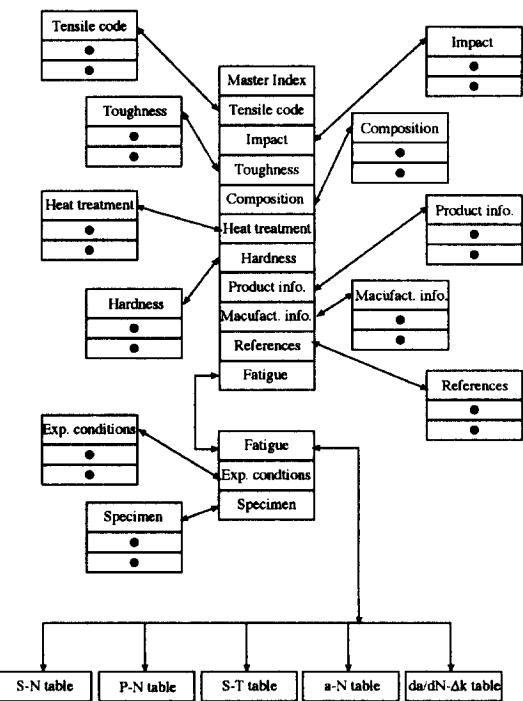


그림 1. 데이터 필드의 연관도

사용한 각각의 데이터 필드(data field)간의 연관도는 그림 1과 같다.

데이터베이스 시스템의 입력자료는 일본재료학회에서 발행한 금속재료의 피로강도 데이터북<sup>(4)</sup>이며, 해석대상의 데이터는 비교적 광범위하게 사용되고 있는 기계구조용 탄소강(SM10C~SM60C)의 것으로 하였다. 또한 해석대상 탄소강의 데이터의 구성 및 분류는 표 1과 같다.

표 1. 기계구조용 탄소강의 구성 및 분류

Group	Code name	Total number of series	
Group I	SM10C	215	smooth*
	SM12C	18	hourglass*
Group II	SM15C	101	smooth
	SM15CK	34	hourglass
	SM17C	6	
Group III	SM20C	67	smooth
	SM25C	125	hourglass
	SM30C	115	
Group IV	SM35C	201	smooth
	SM40C	16	hourglass
Group V	SM45C	132	smooth
	SM48C	29	hourglass
Group VI	SM50C	177	smooth
	SM58C	24	hourglass
	SM60C	4	

\* 시험편 형상

### 3. 피로수명 분포의 모델링

#### 3.1 Weibull 분포함수의 파라미터 추정

3-파라미터 Weibull 분포는 복잡한 분포의 모집단의 수명분포를 비교적 정확하게 표현할 수 있으나 파라미터의 추정이 용이하지 않은 단점이 있다. 따라서 본 연구에서와 같이 데이터베이스상의 상이한 조건을 가진 데이터를 정량적으로 평가하기 위해서는 데이터의 분포형태나 흘어짐의 영향을 적게 받는 파라미터 추정이 필요하다. 로버스

트법<sup>(5)</sup>에 의한 형상파라미터와 축척파라미터는 최우추정량(maximum-likelihood estimator)을 이용하는 국부중앙값 추정법(local median-estimate method)<sup>(6)</sup>으로 구하였다. 임의의 모집단들이 식(1)과 같이 1차의 선형식으로 표현 가능하면 식(2)와 같이 각각의 모집단의 값  $C_i$ 와 중앙값  $C_M$ 과의 절대편차의 합을 최소화하는 식으로 변환될 수 있다.

$$y(x; a, b) = ax + b \quad (1)$$

$$\sum_i |C_M - C_i| \quad (2)$$

식(1)의 변수  $a$ 와  $b$ 는 최우추정량을 사용하는 식(3)으로 구할 수 있다.

$$0 = \sum_i sgn(y_i - b - ax_i) \quad (3)$$

3-파라미터 Weibull 분포의 확률분포함수와 누적분포함수는 각각 식(4)와 (5)로 표현된다.

$$f(t) = \frac{\theta}{m} \left( \frac{t-t_0}{\theta} \right) \exp \left[ - \left( \frac{t-t_0}{\theta} \right)^m \right] \quad (4)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t-t_0}{\theta} \right)^m \right] \quad t_0 \leq t < \infty \quad (5)$$

여기서  $m$ 은 형상파라미터,  $\theta$ 는 축척파라미터,  $t_0$ 는 위치파라미터를 각각 나타낸다. 여기서  $t_0$ 의 추정값이 올바르다면, 식(5)를 식(1)과 같은 선형함수식으로 변환시켜  $m$ 과  $\theta$ 를 구할 수 있다. 위치파라미터를 추정하기 위하여 통계학적인 파라미터인 스피어맨(Spearman)의 선형상관계수(7)를 도입하였다. 그러나 상관계수  $r$ 은 모집단의 분포함수가 고려되지 않은 값이므로 보상오차함수(complementary error function)의 통계학적인 특성을 이용하여 상관도를 검증하였다. 이상의

추정법을 검증하기 위하여 데이터베이스 내에 저장되어 있는 SM10C 탄소강의 고용력진폭레벨의 데이터를 선정하여 검토한 결과는 그림 2와 같다. 여러 수명레벨에 걸쳐서 안정된 해석 결과를 보여

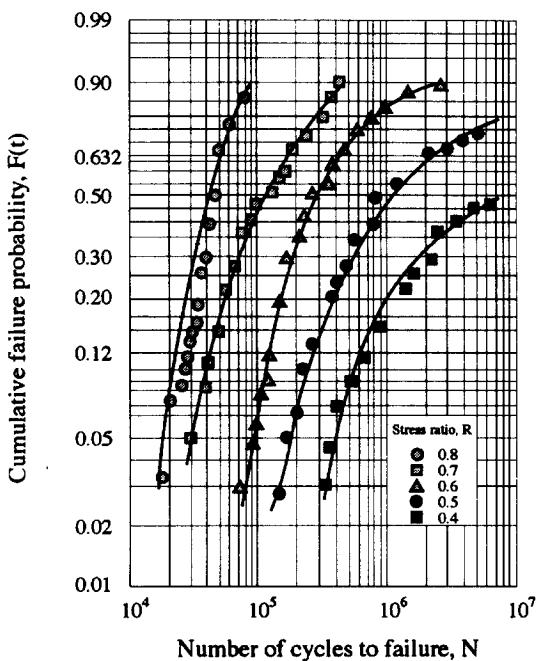


그림 2. SM10C 탄소강 테이터의 Weibull 분포

주고 있으므로 본 추정방법의 도입이 타당함을 알 수 있다.

### 3.2 비파손확률의 모델링

피로한도 균방의 저용력진폭레벨에서 자주 발생되는 비파손데이터는 비선형적인 특성으로 인하여 일반적인  $S-N$  데이터 평가법에서는 제외시켜 해석하고 있다. 그러나 피로한도 균방의 수명분포를 기준으로 하는 무한수명설계 등에서는 정확한 수명평가를 위하여 비파손확률을 다룰 수 있는 새로운 평가방법이 필요하게 된다.

피로시험을 중단한 특정시점인 센소링시간(censoring time)이 파손된 시험편의 시간강도

값과 비교하여 상당히 크면, 전체 시험편에 대한 수명확률분포함수와 누적수명분포함수는 센소링 시간 전의 파손확률분포함수  $f_c(t)$ 와 센소링시간 이후의 파손확률분포함수  $f_d(t)$ 를 조합하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f(t) = f_c(t) + f_d(t) \quad (6)$$

센소링시간 이전에 파손된 데이터의 시간강도 값이 센소링시간보다 매우 작은 값을 갖는다고 가정하고, 이때의 전체 데이터수는  $n$ , 전체 파손데이터수가  $c$ 인 경우, 비파손확률은 다음과 같이 정의된다.

$$F_c = \frac{c+1}{n+1} \quad (7)$$

그러나 식(7)은 센소링시간 이후에 파손되는 데이터의 갯수가 0이 되어야 적용이 가능하므로, 본 논문에서는 최적기준을 정하기 위해 여러 경우의 데이터를 검토한 결과 식(8)과 같은 기준식을 제시하고 이에 따라 데이터를 해석하였다.

$$t_c(0.8) < \frac{t_c}{2} \quad (8)$$

여기서  $t_c(0.8)$ 은 파손확률이 80%일 때의 시간강도 값이며,  $t_c$ 는 센소링시간을 나타낸다.

### 3.3 몬테카를로 시뮬레이션

제안된 추정법과 기준식<sup>(8)</sup>의 유용성을 검증하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션<sup>(8)</sup>을 행하였으며 검증절차를 순서도로 표시한 것이 그림 3이다. Weibull 분포의 각 파라미터는 다음의 방법으로 정규화시켜 검토하였다.

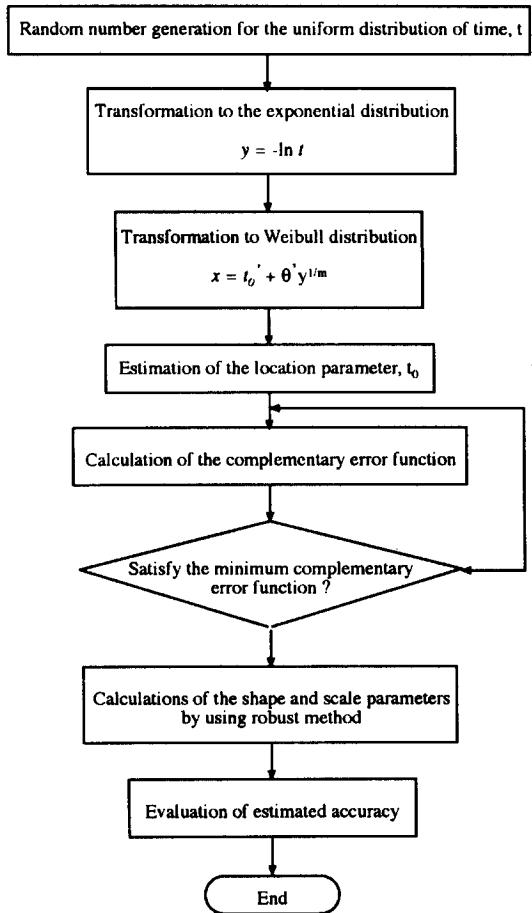


그림 3. 몬테카를로 시뮬레이션의 흐름도

$$R_m = \left( \frac{m}{m} \right), R_c = \left( \frac{\theta}{\theta} \right)^m, R_{t_0} = \left( \frac{t_0}{t_0} \right) \quad (9)$$

로버스트 방법을 이용하여 구한 각 파라미터들은 센소링시간과 무관하게 해석의 안정성을 보였으며, 그림 4는 정규분포 확률지에 나타낸 형상파라미터의 결과이다. 한편 그림 5는 식(8)을 검증하기 위해서 x축을 센소링시간으로 하고 y축을 비파손확률에 대한 예측의 정확도를 누적분포 값으로 표시한 것이다. 수정된 제안식에 의한 해석은 Sakai<sup>(9)</sup>등이 제안한 방법보다 센소링시간이 작은 경우에도 비파손확률 값에 대하여 빠른 수렴

과 정확한 추정을 할 수 있음을 보여주고 있다.

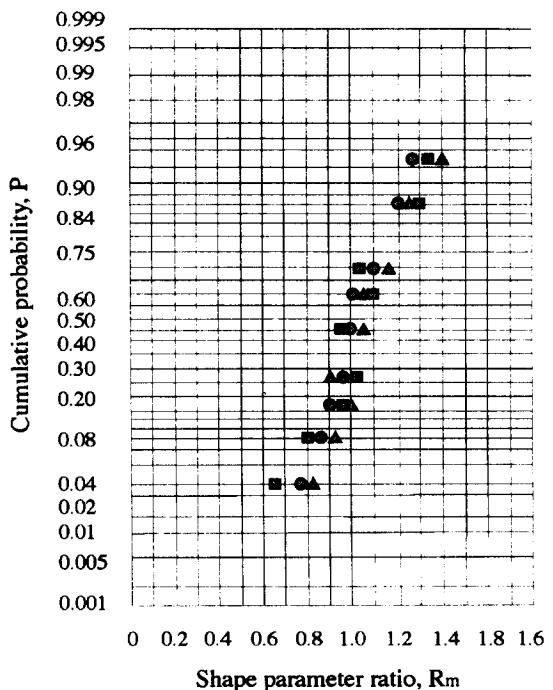


그림 4. 평가된 형상파라미터의 분포

(센소링시간 : ● 3×10<sup>7</sup>, ■ 5×10<sup>7</sup>, ▲ 7×10<sup>7</sup>)

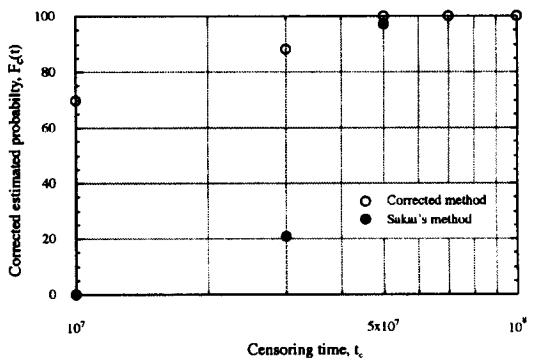


그림 5. 센소링시간과 비파손확률의 관계

#### 4. 탄소강의 피로수명분포의 검토

##### 4.1 피로수명분포 특성의 검토

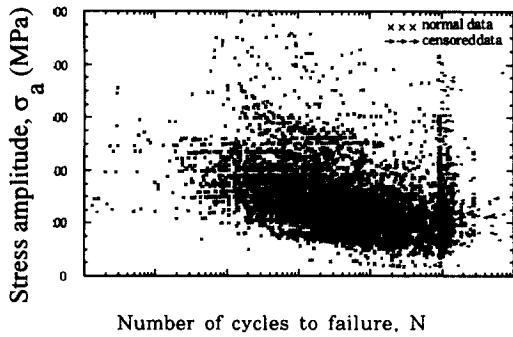


그림 6. 모든 탄소강 데이터에 대한 S-N 선도

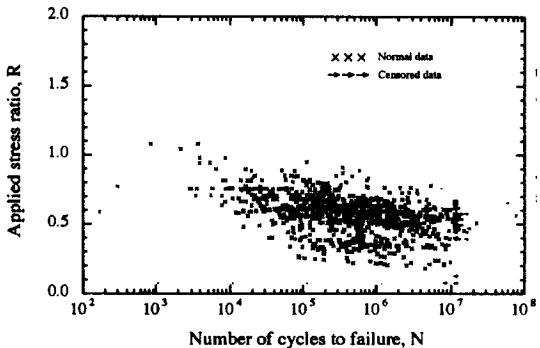


그림 9. SM20C~SM30C 탄소강 데이터에 대한 R-N 선도

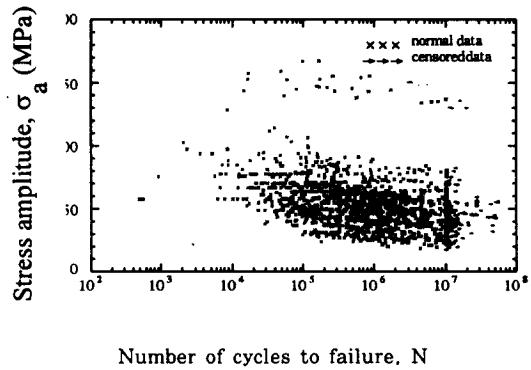


그림 7. SM20C~SM30C 탄소강 데이터에 대한 S-N 선도

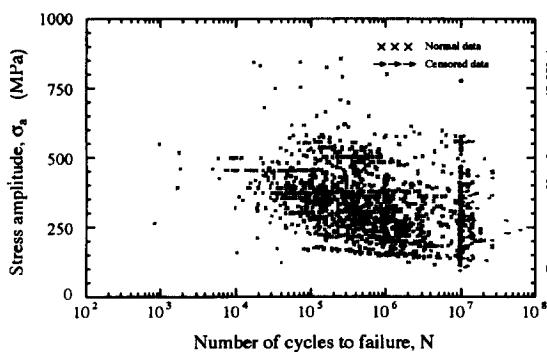


그림 8. SM50C~SM60C 탄소강 데이터에 대한 S-N 선도

그림 6은 해석대상인 기계구조용 탄소강(SM10C~SM60C)의 S-N 선도이다. 이 그림에서 탄소함유량, 시험편 형상 및 서로 다른 시험조

건 등으로 인하여 피로강도 및 파단수명은 매우 큰 폭의 흩어짐을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 평활시험편, 회전굽힘( $R=-1$ ) 그리고 상온환경에서 얻어진 데이터로 해석대상을 제한하였으며, 또한 이를 더욱 세분하고 SM20C~SM30C 및 SM50C~SM60C에 대하여 해석하였다. 그림 7 및 그림 8은 SM20C~SM30C와 SM50C~SM60C의 S-N 선도이다. 그림 6의

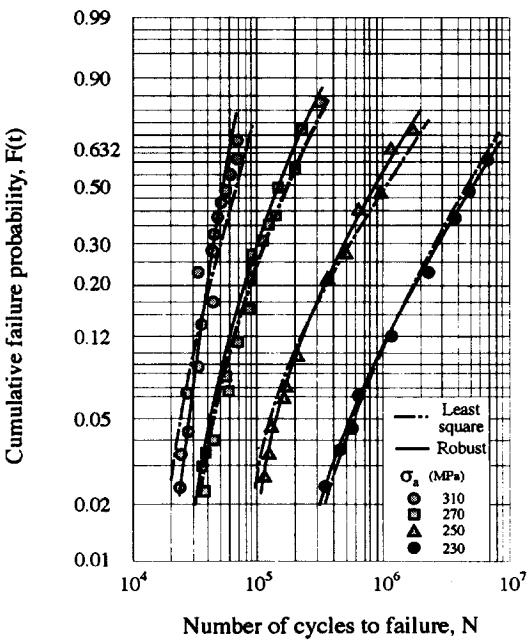


그림 10. SM20C~SM30C 탄소강 데이터에 대한 Weibull 분포

결과보다는 해석이 쉽지만 여전히 큰 흘어짐을 보이고 있어 데이터 해석에 상당한 오차가 예상된다. 따라서 해석데이터의 흘어짐을 줄이고 분포의 균일화를 위해 피로강도에 영향을 미치는 인자 중의 하나인 재료의 인장강도( $\sigma_b$ )를 정규화 계수로 고려하여 부하응력비(응력진폭/인장강도)  $R$ 로 데이터를 정규화하여 해석하였다. 그림 9는 SM20C~SM30C의 정규화된 데이터를 파손수명에 대하여 표시한 것이다. 그림 10은 누적파손률분포를 Weibull 분포확률지에 나타낸 것이다. 일반적으로 비파손률이 과대평가되는 부하응력비가 낮은 영역에서도 식(8)에 의한 조합분포함수에 의한 해석 결과는 실험치의 확률분포와 잘 일치하는 좋은 결과를 보였다.

#### 4.2 탄소강의 피로수명분포 모델

탄소강의 피로수명분포는 각각 재료구분에 따른 Weibull분포의 각 파라미터와 부하응력비와의 관계로부터 검토하였다. 형상파라미터는 그림 11에서 보는 바와 같이  $R=0.7$ 인 점을 정점으로 한

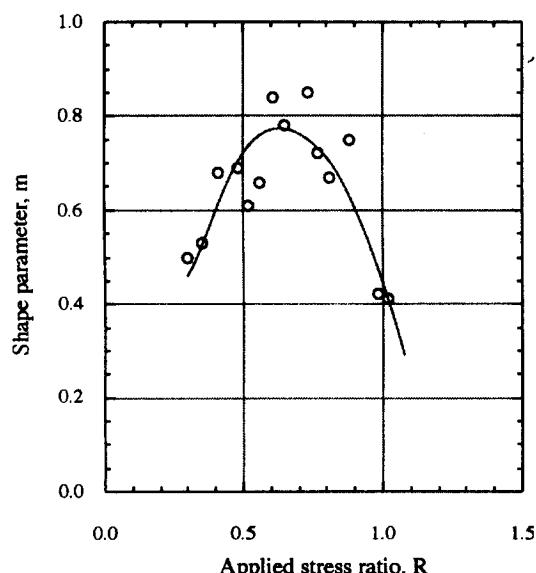


그림 11. 작용응력비와 형상파라미터의 관계

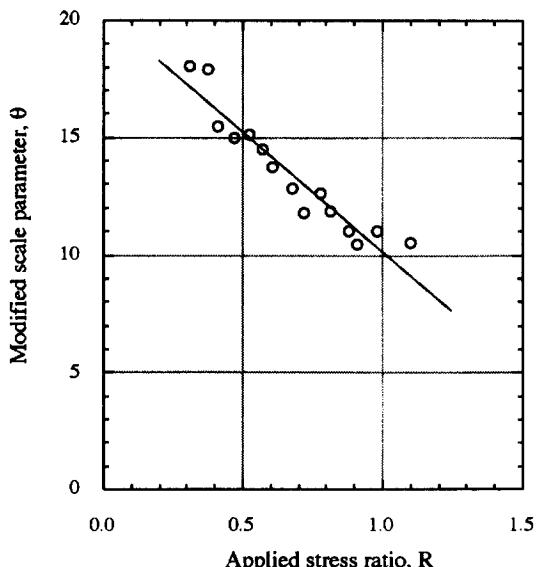


그림 12. 작용응력비와 축척파라미터의 관계

포물선 형태의 분포를 따른다. 축척파라미터와 위치파라미터는 각각 그 값의 자연대수를 취하여 해석하였으며, 이들 두 파라미터는 그림 12 및 그림 13에서와 같이  $R$ 에 대한 음(-)의 기울기를 갖는 1차 직선형태의 분포를 취하였다. 각 파라미터의 분포형태에서 아래와 같은 관계식을 유도하였다.

$$m = a_1 R^3 + b_1 R^2 + cR + d \quad (10)$$

$$\theta = e^{a_2 R + b_2}$$

$$t_o = e^{a_3 R + b_3}$$

구해진 각 파라미터의 계수로부터 피로수명분포의 일반적인 모델을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t - e^{a_2 R + b_2}}{e^{a_3 R + b_3}} \right)^{a_1 R^3 + b_1 R^2 + cR + d} \right] \quad (11)$$

구하여진 각 해석데이터 그룹의 파라미터들에 대한 계수는 표 2와 같다.

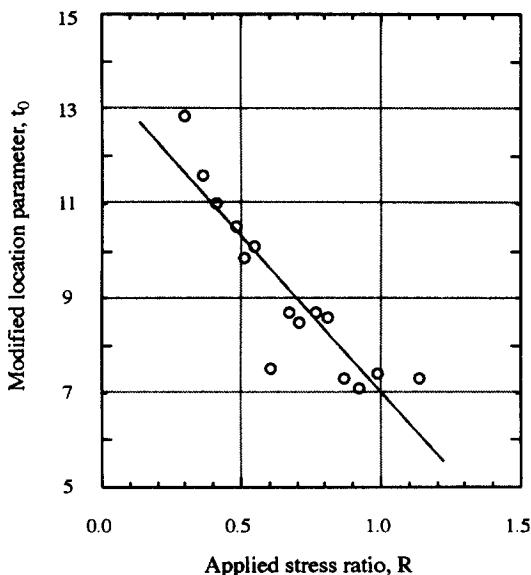


그림 13. 작용응력비와 위치파라미터의 관계

표 2. 탄소강의 피로강도에 대한 통계적 파라미터

Group	Statistical parameters				Standard deviation (%)
		a	b	c	
I	m	-3.0	3.37	-0.24	0.33
	$\theta$	-10.80	20.73		0.68
	$t_0$	-69.80	13.87		0.81
II	m	0.28	1.93	-2.53	1.36
	$\theta$	-11.26	20.67		0.81
	$t_0$	-3.15	10.42		1.84
III	m	-14.78	24.86	-13.35	2.79
	$\theta$	-8.03	18.04		0.76
	$t_0$	-3.85	11.38		0.67
IV	m	-22.08	34.79	-16.72	3.13
	$\theta$	-11.88	19.02		0.66
	$t_0$	-4.43	10.84		0.97
V	m	-7.21	23.02	-7.38	2.03
	$\theta$	-3.15	15.25		0.63
	$t_0$	-4.25	10.59		1.61
VI	m	-23.83	32.58	-13.17	2.12
	$\theta$	-16.21	20.19		0.58
	$t_0$	-5.39	11.88		0.77

재료의 일반적인 피로특성을 얻기 위해 각 부하응력비에 대한 파손률을 구하고, 각 부하응력비에서의 동일한 파손률을 연결하여  $P-R-N$  선도를 구하였다. 그림 14 및 그림 15는 SM20

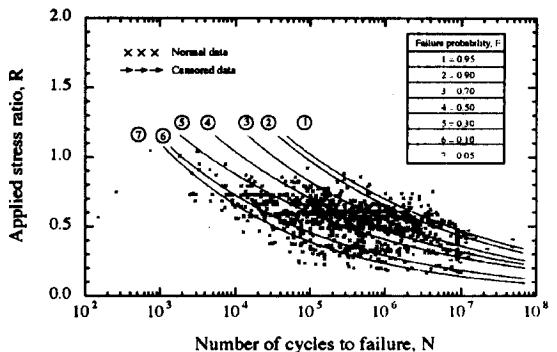


그림 14. SM20C~SM30C 탄소강 데이터에 대한  $P-R-N$  선도

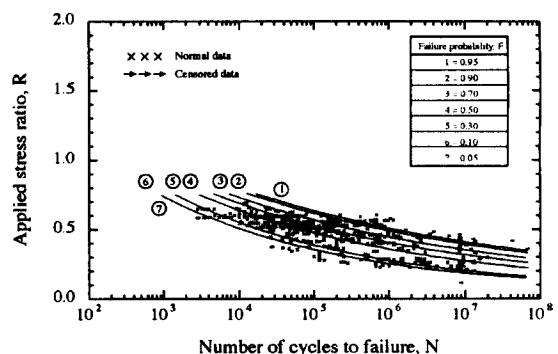


그림 15. SM50C~SM60C 탄소강 데이터에 대한  $P-R-N$  선도

C~SM30C 및 SM50C~SM60C에 대한  $P-R-N$  해석결과를 나타낸 것이다. Tanaka(10) 등의 기존의 해석에 비해 고응력레벨에서 큰 피로강도 값을 보이고 저응력레벨에서는 더 작은 피로강도 값의 특성을 나타내며, 이는 실제의 데이터와 각 파손률레벨에서 분포가 큰 차이 없이 서로 일치하는 결과를 보이고 있으므로 비파손률을 이용한  $P-R-N$ 특성의 정량적인 평가는 타당하다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

기계 및 구조물의 피로수명에 대한 안전성 및 신뢰성 평가를 위하여 금속재료의 피로강도 데이터베이스 시스템을 구축하였고, 피로수명을 평가

할 수 있는 통계학적 모델인 Weibull 분포의 파라미터 추정법 및 비파손확률의 정량적 평가기준을 제시하였다. 제시된 비파손확률의 기준을 검증하기 위해서 몬테카를로 시뮬레이션을 행하였고, 그 결과를 데이터베이스 시스템을 이용하여 실제의 실험결과와 비교 검토하여 다음 결과를 얻었다.

(1) 종속도를 이용하여 구축한 관계형 구조를 갖는 피로강도 데이터베이스 시스템은 데이터의 입력, 수정, 삭제, 검색 및 해석 등의 데이터관리를 효율적으로 수행할 수 있었다.

(2) Weibull 분포의 파라미터를 추정하기 위해 제안한 로버스트법과 보상오차함수의 확률분포를 이용한 피로수명의 해석결과는 응력비의 크기에 관계없이 피로수명을 정확하게 예측하였다.

(3) 피로수명의 분포를 파손확률 80%의 시간 강도와 센소링시간과의 관계로부터 검토한 결과 센소링시간이 작은 경우에도 정확한 추정을 할 수 있었다.

(4) 조합분포모델을 이용하여 구한 부하응력비의 항으로 표시되는 피로수명분포 식은 수명예측에 있어서 타당함을 알았다.

#### 감사의 말

본 연구결과의 일부는 한양대학교 교내 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Nishijima, S., 1981, "Statistical Fatigue Properties of Some Heat-Treated Steels for Machine Structural Use," Statistical Analysis of Fatigue Data, ASTM STP 744, pp. 75~88.

- (2) Colton, J. S., 1988, "The Design and Implementation of a Relational Property Data Base," Engineering with Computers, Vol. 4, pp. 87~94.
- (3) Date, J., 1986, An Introduction to Database System, Addison-Wesley.
- (4) Data Book, 1981, On fatigue Strength of Metallic Materials, Vol. 1~3, The Society of Materials Science, Japan.
- (5) Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., 1986, Numerical Recipes, Cambridge University Press, pp. 539~546.
- (6) Whitney, J. M., 1981, "Fatigue Characterization of Composite Materials," ASTM STP 723, pp. 133~151.
- (7) Milleer, I. and Freund, J. E., 1977, Probability and Statistics for Engineer, Prentice-Hall.
- (8) Rubinstein, R. Y., 1981, Simulation and the Monte Carlo method, John Wiley and Sons.
- (9) Sakai, T. and Tanaka, T., 1984, "Parameter Estimation of Weibull-type Fatigue Life Distribution Non-failure Probability," Proceedings of Fatigue '84, Vol. II, pp. 1125~1137.
- (10) Tanaka, T. and Iwaya, T., 1987, "Distribution Characteristic of Fracture Lives and Fatigue Strength of Ferrous Metal by the Analysis of P-N Data in the JSMS Data Base on Fatigue Strength of Metallic Materials," Statistical Research on Fatigue and Fracture, The Society of Materials Science, Japan, pp. 125~127.

(접수일자 : 1997. 12. 5.)