

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.8.751>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

선박용 디젤 엔진 크랭크 스로 부품용 S34MnV강의 피로한도에 대한 신뢰도 예측

김 선 진* · 공 유 식**†

* 부경대학교 기계설계공학과, ** 부경대학교 기계공학과

Prediction of Reliability of Fatigue Limit of S34MnV Steel for Marine Diesel Engine Crank Throw Components

Seon Jin Kim* and Yu Sik Kong**†

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received March 16, 2016 ; Revised June 20, 2016 ; Accepted June 21, 2016)

Key Words: Crank Throw(크랭크 스로), Reliability(신뢰도), Fatigue Limit(피로한도), Design Fatigue Strength(설계피로강도), Staircase Method(스태어케이스법), Fatigue Testing(피로실험)

초록: 본 논문은 스테어케이스법을 사용하여 크랭크 스로 부품용 S34MnV강의 피로한도의 신뢰도를 평가하는 것이다. 크랭크 스로 부품의 소재는 S34MnV이며, 뜨임 및 풀림 열처리된 단조강이다. 본 연구에서는 설계피로강도의 신뢰도를 예측하기 위해 축 하중 일정진폭 피로시험을 수행하였다. 시험편은 평균 응력 0 MPa의 동일한 응력부하를 적용하였고, 즉 응력비는 -1로 하였다. 피로시험 결과는 Dixon-Mood 접근법으로 평가하였다. 스테어케이스법에 의해 예측된 피로강도의 평균과 표준편차는 각각 296.3 MPa 및 10.6 MPa로 나타났다. 마지막으로 어떤 임의의 파손 확률에 대한 피로강도의 신뢰도를 예측하였다. 본 연구에서 제안한 예측법은 단조강의 설계 최적화를 위한 피로강도 값을 결정할 수 있다.

Abstract: The aim of this study is to estimate the reliability of fatigue limit of the material used for crank throw components according to the staircase method. The material used for crank throw components is forged S34MnV grade steel, which is heat treated by normalizing and tempering. In this work, to predict the reliability of the design fatigue strength, axially loaded constant amplitude fatigue testing was conducted. The test specimens were loaded with an axial push/pull load with a mean stress of 0 MPa, which corresponds to a stress ratio of $R=-1$. The fatigue test results were evaluated by Dixon-Mood formulas. The values of mean fatigue strength and standard deviation predicted by the staircase method were 296.3 MPa and 10.6 MPa, respectively. Finally, the reliability of the fatigue limit in some selected probability of failure is predicted. The proposed method can be applied for the determination of fatigue strength for design optimization of the forged steel.

1. 서 론

선박용 디젤 엔진의 크랭크샤프트(crankshaft)는 선박의 가장 중요한 부품 중의 하나이다. 크랭크 샤프트는 대략 두 가지 범주로 분류할 수 있다. 즉, 2-사이클 디젤 엔진용 조립(built-up) 형 크랭크 샤프트와 4-사이클 디젤 엔진용 일체(solid) 형

크랭크샤프트이다.⁽¹⁾ 선박용 엔진의 크랭크샤프트는 중소형 엔진의 경우 일체형으로 제작이 가능하나, 대형 디젤 엔진의 경우는 치수 및 중량과 설비 조건 등으로 인해 크랭크샤프트를 구성하는 저널(journal), 웹(web), 핀(pin), 플랜지 등을 각기 따로 제작하여 열박음으로 조립하게 된다.^(2,3) 최근 선박의 대형화로 인하여 높은 출력을 요구하게 되고 또한 저속 엔진의 기술적 추세는 보다 높은 강도와 높은 신뢰성을 확보하기 위하여 조

† Corresponding Author, kongys@pknu.ac.kr

림형 크랭크샤프트를 필요로 하고 있다.⁽¹⁾ Fig. 1은 저속 2-사이클 박용 디젤 엔진의 크랭크샤프트를 나타내고 있다.⁽³⁾ 또한, 조립형 크랭크샤프트의 부품의 개념도를 Fig. 2에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 크랭크샤프트의 웹(web)부와 핀(pin)부가 일체형으로 된 것을 크랭크 스로(crank throw)라 부른다. 대형 크랭크 스로는 주로 단조 공법으로 만들어진다. S34MnV 강은 대형 박용 디젤 엔진의 크랭크샤프트 제조에 기본적인 소재로 폭넓게 사용되고 있다.

크랭크샤프트의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 크랭크 스로 부품 소재의 피로강도와 그의 정확한 평가가 매우 중요하다. 피로 현상은 반복응력에 의하여 균열의 성장에 의하여 야기되는 하나의 손상 과정이다. 피로파괴가 안전성 및 신뢰성에 깊이 관여하고 있는 경우에는 피로특성에 대한 확률·통계적 정보가 기본적으로 필요하다.⁽⁴⁾ 오늘날 피로수명 혹은 피로강도가 확률적으로 변동하는 하나의 확률변수로 취급하는 것은 일반적으로 널리 알려져 있다. 비록 잘 알려진 S-N 곡선이 재료의 피로 성질을 잘 표현한다고 하여도, 피로수명의 변동은 그것으로부터 알 수 없다. 따라서 S-N 데이터의 통계적 변동에 대한 많은 연구가 행하여져 왔다.^(5~8) 일반적으로 피로수명은 종종 Weibull 분포로 기술되고, 반면 피로한도는 대수정규분포함수로 기술되고 있다.⁽⁹⁾ 피로강도에 관한 많은 연구가 제품의 기계설계의 중요성 때문에 수행되어 왔다. 피로한도를 얻기 위하여 종종 사용되는 Staircase 법은 피로강도를 추정하는 방법 중의 하나이다.⁽⁹⁾ Staircase 법은 최초 Dixon과 Mood⁽¹⁰⁾에 의하여 통계적으로 해석되었고, 이후 Little⁽¹¹⁾에 의하여 일반화된 방법이다. 이 방법은 평균 피로강도를 정확하고 효율적으로 정량화할 수 있지만, 불행하게도 피로강도의 표준편차를 정확하게 추정하는 데는 어려움이 있다.⁽¹²⁾ 따라서 많은 연구자들이 표준편차의 신뢰도를 향상시키고 평가하는 연구를 수행하여 왔다.^(13~15) 하지만, Staircase 법은 그 편리성 때문에 오늘날 고사이클 피로(high cycle fatigue)가 문제로 되는 기계 부품의 피로한도를 결정하는 실용적 방법으로 널리 사용되고 있다. 단조강인 크랭크 스로 소재의 피로한도는 어떤 주어진 기대 피로수명(2×10^6 cycles)에서의 피로강도로 정의한다.

따라서 본 연구에서는 S34MnV 단조강으로 제

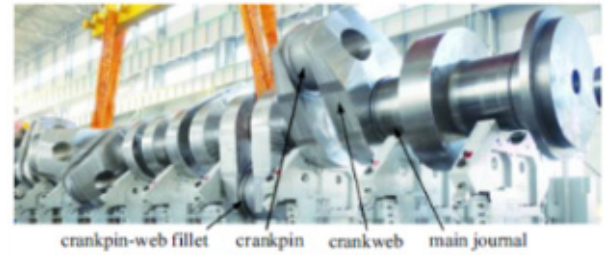


Fig. 1 Example of built-up crank shaft of low-speed 2-stroke marine diesel engine

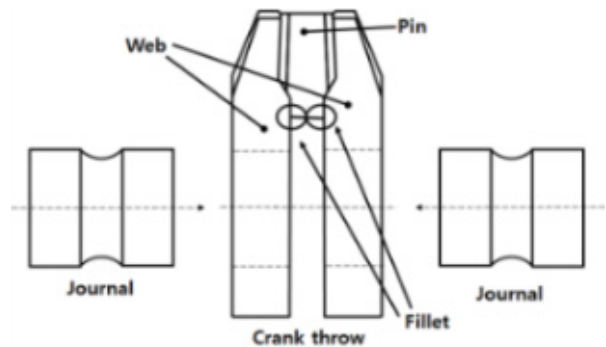


Fig. 2 Schematic illustration of built-up type crank shaft

작된 대형 선박용 디젤 엔진 크랭크 스로 부품 소재의 설계피로강도를 추정하기 위한 연구의 일환으로, Staircase 법에 의한 피로실험을 수행하여 피로한도에 대한 신뢰도를 예측하고자 한다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 Staircase법

Staircase 법은 두 가지 실험 방법이 있다. 전통적인 응력-수명(S-N) 해석법과는 대조적으로 Staircase 법은 실제 파단까지의 수명은 고려하지 않는다. 이 방법은 소위 성공과 실패(pass or fail)의 방식으로 실험이 이루어지는 방법이다. Staircase 법은 앞 절에서 언급하였듯이 최초 Dixon과 Mood에 의하여 제안되었다. Staircase 실험에서 시험편은 순차적으로 실험하는 것이다. 즉, 처음 실험 시작 응력 진폭 레벨이 매우 중요하다. 이는 예비 S-N 데이터 혹은 경험으로부터 결정되지만 일반적으로 인장강도의 40%를 취하고 있다. 본 연구에서도 인장강도의 40%를 실험 시작 응력 진폭 레벨로 설정하였다. 다음 시험편을 위한 응력 레벨은 처음 시험편이 생존하느냐 파단하느냐에 의존하여 주어진 응력 단계 크기

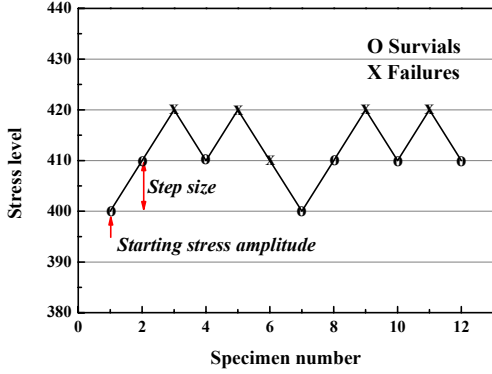


Fig. 3 Schematic illustration of staircase test data

(step size, Δs)만큼 증가 혹은 감소시켜 실험한다. 이 과정을 할당된 모든 시험편에 대해 계속하는 방법이다. 전형적으로 단계 크기 Δs 는 인접한 응력 레벨에서 항상 동일한 값을 취한다. 통상적으로 피로강도의 표준편차와 비슷한 값을 취하는 것이 보통이다. Fig. 3은 전형적인 Staircase 법의 일례를 나타내는 개념도이다. Fig. 3에서와 같이 Staircase 실험 방법은 다음의 요소가 있다.

(1) 실험에 대한 시작 응력 진폭(예로 Fig. 3에서 400 MPa)과 적절한 응력 진폭의 증분, 즉 단계 크기(Fig. 3에서 $\Delta s=10$ MPa)를 선택한다. (2) 만약 첫 번째 시험편이 피로한도에 대한 기대수명(본 연구에서는 2×10^6 cycles)까지 생존(run out)한다면, 다음 시험편은 Δs 만큼 증가시킨 응력 레벨에서 실험한다. 다른 경우, 만일 시험편이 기대수명 이전에 파괴된다면 Δs 만큼 감소시킨 응력 레벨에서 실험한다. 이와 같이 이 방법은 이전의 실험 결과에 의존한다. (3) 본 연구에서는 상기의 방법으로 12번째 시험편까지 피로 실험을 수행한다.

Staircase 법의 실험 데이터에 기초한 확률변수, 즉 피로한도의 평균과 표준편차를 결정하는 문제를 Dixon과 Mood 접근법으로 해석적으로 풀이한 결과를 아래와 같이 요약한다.

단계 크기 Δs 를 동일하게 갖는 실험 응력 진폭 레벨, $S_j, j = 0, 1, 2, \dots$ 하에서, 피로한도에 대한 정규분포의 평균치, μ 및 표준편차, σ 를 다음 식에 의하여 결정할 수 있다.

$$\mu = S_0 + \Delta s \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma = 1.62 \Delta s (F_{BA} + 0.029) \quad \text{if } F_{BA} \geq 0.3 \quad (2)$$

Table 1 Chemical compositions of S34MnV steel and crank throw component (wt.%)

Mater.	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
Ladle	0.44	0.26	1.0	0.012	0.002	0.12	0.06
Product	0.43	0.24	1.04	0.016	0.004	0.14	0.06

또는

$$\sigma = 0.53 \Delta s \quad \text{if } F_{BA} < 0.3 \quad (3)$$

$$F_{BA} = \frac{FB - A^2}{F^2} \quad (4)$$

$$A = \sum_{j=0}^{j_{\max}} j \times n_j \quad (5)$$

$$B = \sum_{j=0}^{j_{\max}} j^2 \times n_j \quad (6)$$

$$F = \sum_{j=0}^{j_{\max}} n_j \quad (7)$$

여기서 S_0 는 파괴 시험편과 생존 시험편간 덜 자주 일어나는 사건에 상응하는 최소 응력 진폭이다. 파라미터 j 는 응력 진폭 레벨을 나타내는 정수이다. n_j 는 응력 진폭 레벨 j 에서 덜 자주 일어나는 사건에서의 시험편 수이다. 식 (1)에서 플러스(+) 표시는 생존이 덜 자주 일어나는 사건(즉, 파손이 대부분인 사건)에 대하여 사용되고, 마이너스(-) 표시는 파괴가 덜 자주 일어나는 사건(즉, 생존이 대부분인 사건)에 대하여 사용된다.

2.2 실험 방법 및 절차

본 연구에서 사용한 단조강 S34MnV 강(ladle)과 크랭크 스로 부품을 제작한 후 열처리를 행한 제품(product)의 화학 성분을 Table 1에 나타낸다. 본 소재의 열처리는 880°C에서 17시간 동안 Normalizing을 행한 후에 600°C에서 17시간 동안 Tempering을 시행 후 노냉하였다.

Staircase 법에 의한 피로실험은 상온에서 정현 파형, 응력비 $R = -1$ 로 완전 양진 축하중 제어 일정 진폭 하중하에서 20 Hz로 수행하였으며, Table 2에 조건을 나타낸다. 또한 Fig. 4에 서보 유압 피로 시험기(MTS Landmark)를 나타낸다. 그리고 피로시험편의 형상과 치수를 Fig. 5에 나타낸다. 모

Table 2 Fatigue testing conditions for the test specimen according to the staircase method

Testing condition	Value
Wave form	Sinewave
Mean stress, σ_m (MPa)	0
Stress ratio, R	-1
Starting stress amplitude, $\sigma_{a,st}$ (MPa)	283
Step size, Δs (MPa)	20
Frequency(Hz)	20

Table 3 Mechanical properties of S34MnV grade steel depending on the location of specimen

Type (Location of specimen)	0.2 proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
TC11	418	708	20	45
TC21	411	706	21	46
TC12	430	714	21	47
TC22	419	705	21	46
Mean	419	708	21	46



Fig. 4 Servo-hydraulic fatigue tester (MTS 370)

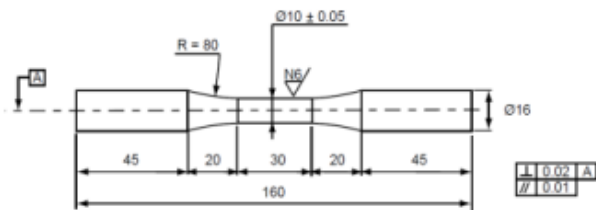


Fig. 5 Shape and dimension of the test specimen

든 실험은 ISO 1099 규정⁽¹⁶⁾에 의하여 수행하였다. 본 연구에서 수행된 피로실험 절차를 Fig. 6에 나타내며, 본 절차에 의해 피로강도의 평균과 표준편차를 구하여 신뢰도를 예측하였다. 또한 2.3%의 파괴확률에서의 설계 피로강도를 결정하여 1×10^7 cycles까지 run out 실험을 수행하여 본 소재의 피로강도를 검증하였다.

3. 결과 및 해석

3.1 인장실험

피로실험을 위한 첫 번째 시험편의 시작 응력

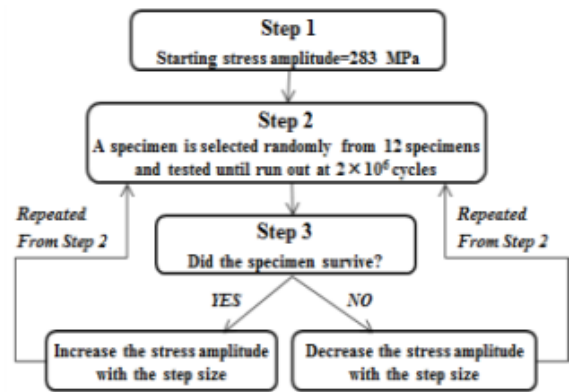


Fig. 6 Illustration of procedure of fatigue testing using staircase method

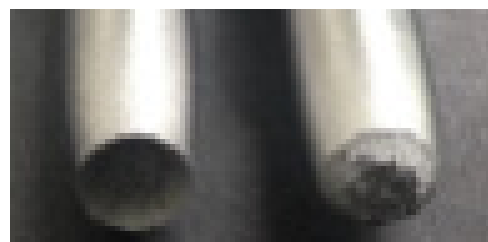


Fig. 7 Shape of tensile fracture surface

진폭 레벨을 결정하기 위해 인장실험을 수행하였다. 인장실험을 통하여 얻은 크랭크 스로 부품소재의 기계적 성질을 Table 3에 나타낸다. Table 3에서와 같이 크랭크 스로 제품인 S34MnV강의 평균 인장강도는 708 MPa, 항복강도는 419 MPa, 연신율은 21%를 얻었다. 거시적 인장 파단면은 컵 앤 콘 형상의 전형적인 연성파괴의 양상을 보였다.

Fig. 7은 인장 실험후의 시험편의 파단 양상을 나타낸 것이다. 이상의 인장 실험 결과를 이용하여, 본 연구에서의 Staircase 법에 의한 피로실험의 시작 응력 진폭을 인장강도의 40%인 283 MPa

Table 4 Parameters j and n_j by Dixon and Mood approach for the test results

Ordinal	Stress amplitude level (MPa)	j	n_j
1	283	0	5
2	303	1	1
3	323	2	0
Σ	-	-	6

Table 5 Results of fatigue test for 2×10^6 cycles

Items	Results	Remarks
Number of cycles(cycles)	2×10^6	N
Lowest stress level(MPa)	283	S_0
Stress step size(MPa)	20	Δ_s
Failure/Run Out	0.5	x(factor)
Mean fatigue strength(MPa)	296.3	μ
Standard deviation(MPa)	10.6	σ

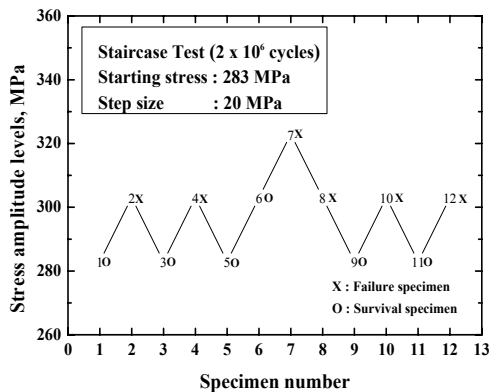


Fig. 8 Staircase test data of crank throw specimens

로 결정하였다.

3.2 피로실험

Fig. 8은 피로실험 시작 응력 진폭 283MPa로 Staircase 법에 의해 구한 피로실험 결과를 나타낸다. 그림 중에 표시한 것처럼 O시험편은 200만 사이클까지 run-out한 시험편, 즉 200만 사이클까지 생존(survival)한 시험편이다. 또한 X로 표시한 시험편은 200만 사이클 이전에 파괴(failure)된 시험편을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 생존한 시험편 수는 6개이며, 파괴된 시험편 수도 6개이다. 피로 실험의 응력 진폭 283 MPa, 303 MPa 그리고 323 MPa에 상응하는 j 와 n_j 에 대한 데이

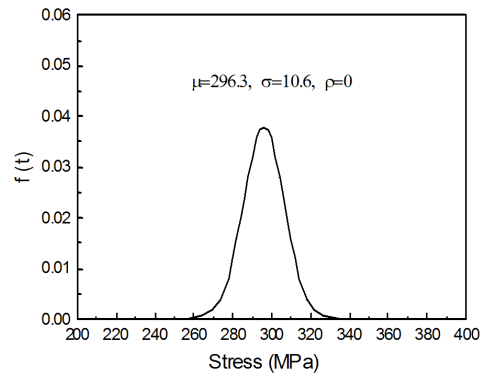


Fig. 9 Probability density function of fatigue limit of test specimens

터를 Table 4에 나타낸다.

식 (4)~(7)로부터 구한 기본 파라미터 A, B, F 그리고 F_{BA} 는 각각 1, 1, 6 그리고 0.14를 얻었다. 따라서 식 (1)과 식 (3)에 의하여 구한 평균 피로강도와 표준편차는 각각 296.3 MPa 및 10.6 MPa를 얻었다.

Staircase 법에 의하여 결정한 2×10^6 cycles에 대한 크랭크 스로 부품의 실험 결과를 Table 5에 나타낸다. 이상의 피로실험 결과를 활용하여 피로한도의 신뢰도 예측할 수 있다.

3.3 피로한도의 신뢰도 예측

앞 절의 결과로부터 크랭크 스로 부품 소재의 피로한도는 평균이 296 MPa, 표준편차가 10.6 MPa의 결과는 아래와 같이 정규분포 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

Fig. 9는 평균이 296.3MPa, 표준편차가 10.6MPa인 크랭크 스로 부품 소재의 피로한도의 확률밀도함수를 나타낸다. 하지만 이러한 통계적 파라미터는 실제로 덜 일어나는 사건에 있어서의 파손과 생존 시험편의 응력 진폭에 의해 나타나는 것을 주의할 필요가 있다.

한편 피로한도의 정규분포 $N(296.3, 10.6)$ 을 표준정규분포 $N(0, 1)$ 로 변환할 수 있다. Fig. 10과 같이 변환되었다고 하면, 임의의 파괴확률 혹은 임의의 신뢰도에서 크랭크 스로 부품 소재의 설계 피로강도를 예측하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 일례로 신뢰도가 90.0, 95.0,

Table 6 Design fatigue strength of test specimens for each reliability

Reliability R(N)	Failure probability F(N)	Design fatigue strength (MPa)
99.0	10.0	282.6
95.0	5.0	278.8
97.0	3.0	279.3
99.0	1.0	271.6
99.9	0.1	264.5

Table 7 Results of the fatigue test for 1×10^7 cycles

Test condition	Stress amplitude (MPa)	Specimen number	Results
1×10^7 cycles	275	V1	Survival
		V2	Survival
		V3	Survival

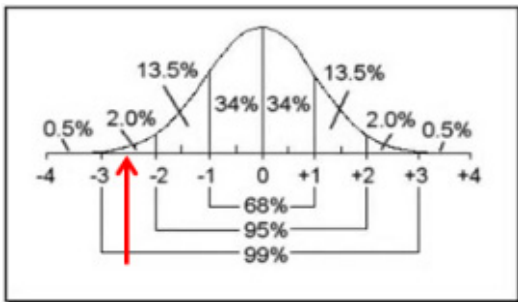


Fig. 10 Concept of failure probability or reliability

97.0, 99.0 그리고 99.9%일 때의 설계 피로강도를 계산하여 Table 6에 정리하여 나타낸다. 이상의 결과로부터 파괴확률 혹은 신뢰도에 대응한 크랭크 스로 부품 소재의 설계 피로강도 값을 확률론적으로 예측 가능함을 보였다. 일례로 B5 수명 (신뢰도 95%)의 설계 피로강도는 Table 6에서와 같이 278.8 MPa로 예측되었다.

3.4 설계 피로강도의 검증

Staircase 법에 의한 실험 데이터를 이용하여 파괴확률 2.3%(신뢰도 97.7%)에서의 설계 피로강도는 275 MPa로 결정되었다. 따라서 이것을 검증하기 위하여 1×10^7 cycles까지 3개의 시험편에 대해 피로실험을 수행하였다. 실험 결과는 Table 7과 같이 1×10^7 cycles까지 3개 시험편 모두 파단 되지 않고 생존(run-out) 되었다.

이상의 결과로부터 크랭크 스로 부품 소재의 설계 피로한도의 신뢰도 예측이 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 S34MnV 단조강으로 제작된 크랭크 스로 부품 소재에 대해 Staircase 법에 의한 피로실험을 수행하였고, 그 실험 결과에 따른 피로한도의 신뢰도를 예측하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 크랭크 스로 부품 소재의 인장강도는 708 MPa이며, 2×10^6 cycles에서 피로강도의 평균과 표준편차는 각각 296.3 및 10.6 MPa 로 나타났다.

(2) Staircase 법에 의해 설계 피로강도를 확률론적으로 예측이 가능하였으며, 일례로 신뢰도 95%의 설계 피로강도는 278.8 MPa로 예측되었다.

(3) 2.3%의 파괴확률, 즉 신뢰도 97.7%의 설계 피로강도에서 크랭크 스로 부품 소재는 1×10^7 cycles까지 3개의 시험편 모두 생존의 결과를 얻었다. 따라서 Staircase 법을 이용하여 확률적으로 크랭크 스로 부품 소재의 설계 피로강도 값을 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌
(References)

- (1) Kubo, H. and Mori, H., 2005, "Technical Developments and Recent Trends in Crankshaft Materials," *Kobelco Technology Review*, No. 26, pp. 37~42.
- (2) Kim, D. Y., Kim, Y. D., Kim, D. K. and Kim, J. C., 2003, "A Study on the Open Die Forging Preform Shape of Crank Throw for Large Ship Engines," *Proceedings of the KSTP2003 Spring Conference*, pp. 191~194.
- (3) Fonte, M., Duarte, P., Anes, V., Freitas, M. and Reis, L., 2015, "On the Assessment of Fatigue Life of Marine Diesel Engine," *Engineering Failure Analysis*, pp. xxx~xxx.
- (4) Sohn, H. J. and Kim, S. J., 2012, "Marco and Microscopic Observations of Fatigue Crack growth behavior in API 2W Gr. 50 Steel Joints," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 73~80.
- (5) Castillo, E., Fermansez, Canteli, A. and Hadi, A. S., 1999, "On Fitting a Fatigue Model to Data," *International Journal of Fatigue*, No. 21, pp. 97~106.
- (6) ASTM, 1981, "Statistical Analysis of Fatigue

- Data," *ASTM-STP*, p. 744.
- (7) Hanaki, S., Yamashita M. and Uchida, H., 2010, "On Stochastic Evaluation of S-N Data Based on Fatigue Strength Distribution," *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, No. 3, pp. 605~609.
- (8) Fouchereau, R., Celeus, G. and Pamphile, P., 2014, "Probabilistic Modeling of S-N Curves," *International Journal of Fatigue*, No. 68, pp. 217~223.
- (9) Zhai, J. M. and Li, X. Y., 2012, "A Methodology to Determine a Conditional Probability Density Distribution Surface from S-N Data," *International Journal of Fatigue*, No. 44, pp. 107~115.
- (10) Dixon, W. J. and Mood, A. M., 1948, "A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data," *Journal of Am. Stat. Assoc.* No. 43, pp. 109~126.
- (11) Little, R. E., 1975, "Statistical Design of Fatigue Experiments," John Wiley & Sons, New York.
- (12) Pollak, R., Palazotto, A. and Nicholas, T., 2006, "A Simulation-Based Investigation of the Staircase Method for Fatigue Strength Testing," *Mechanics of Materials*, No. 38, pp. 1170~1181.
- (13) Lin, S. K., Lee, Y. L. and Lu, M. W., 2001, "Evaluation of the Staircase and the Accelerated Test Methods for Fatigue Limit Distributions," *International Journal of Fatigue*, No. 23, pp. 75~83.
- (14) Rabb, B. R., 2003, "Staircase Testin-confidence and Reliability," *Transaction Engineering Science*, No. 40, pp. 447~464.
- (15) Kim, S. J., Itagaki, H. and Ishizuka, T., 2000, "Effect of Specimen Thickness on the Statistical Properties of Fatigue Crack Growth Resistance in BS4360 steel," *KSME International Journal*, Vol. 14, pp. 1041~1050.
- (16) ISO, 2006, "Metallic Materials-Fatigue Testing Axial Force-Controlled Method," p. 21.