



강재의 고주기 피로시험 최적화를 위한 알고리즘 및 소프트웨어 개발

김광진^{1*} · 김대용²

¹책임연구원, (주)알에스피, 기업부설연구소, ²대표이사, (주)알에스피, 경영지원본부

Development of the Algorithm and Software for Optimized S-N Fatigue Test of Structural Steels

Kim, Kwang Jin^{1*}, Kim, Dae Yong²

¹Senior Researcher, R&D Center, RSP Co., Ltd., Ansan, 15434, Korea

²Chief Executive Officer, Management Support Center, RSP Co., Ltd., Ansan, 15434, Korea

Abstract - Fatigue tests are conducted for design and(or) maintenance. For fatigue strength evaluation, accurate S-N relationship is firstly determined for metallic materials used. However, many researchers are facing difficulties in deciding a series of test loads, stress level number, stress range intervals, etc. In this study, the rational algorithm and software to conduct fatigue tests was developed. For achieving this purpose, a diversity of methods of fatigue strength estimation were studied. The fatigue software automatically presents real fatigue test results. Finally, practical use of this algorithm and software was proved through verification test.

Keywords - Fatigue Test, Steel, S-N Relationship, S-N Curve Prediction, Fatigue Strength, Fatigue Software

1. 서 론

대형 강구조물의 설계 단계에서는 일반적으로 응력집중부나 연결부를 중심으로 피로에 대해 검토하여 공용기간 중 구조물을 건전하게 사용하도록 설계하게 된다^{1),2),3),4)}. 설계단계뿐만 아니라 이미 공용중인 구조물에 대해서도 유지관리를 목적으로 잔존 수명의 평가를 위해 피로를 검토하게 된다. 최근에는 사용중인 구조물로부터 재료를 확보하여 실제 피로시험을 수행한 후 사용 환경에 따른 피로강도 변화를 실험적으로 평가하는 경우도 있다^{5),6)}. 건설분야외 기계부품의 제작에 사용되는 금속재료에 대해서는 소재의 가공, 열처리 등에 따른 피로강도 변화뿐만 아니라 고온, 저

온, 염수 등과 같은 환경조건에서 소재의 피로 검토가 이루어진다. 이를 위해서 구조물 제작에 사용되는 재료가 선정되면 피로시험을 수행하게 된다.

강구조의 피로강도 평가를 위해서는 일반적으로 S-N 곡선을 이용하게 된다. 보다 정확한 피로 검토를 위해서는 재료별로 보다 정확한 S-N 관계식이나 곡선이 필요하다. 공용중인 구조물의 부식 부분, 사용 레일의 피로시험 사례와 같이 구조물의 피로 검토를 위해서는 필요에 따라서는 사용 재료에 대한 피로시험을 진행하게 된다^{5),6)}. 구조물이 사용되는 환경에서 외력의 부하 정도에는 차이가 있으며, 동일한 재료라고 하더라도 목표로 하는 피로수명의 영역에 따라서 S-N 곡선을 구하기 위한 응력범위의 수준은 달라져야 한다. 보다 적절한 S-N 관계를 구하기 위해서는 재료가 사용되는 목표 수명 영역에 시험 데이터가 고르게 분포될 수 있도록 피로시험이 수행되어야 한다.

국내·외에 금속의 피로시험을 위한 규격들이 마련되어 있으나, 이러한 규격들은 시험을 위한 시편, 시험기, 데이터 분석 등에 관한 내용으로 구성되어 있다^{7),8)}. 피로시험은 단일 부품의 내구시험과는 다르게 다수의 시편을 사용하여 일련의 피로시험을 수행하

Note.-Discussion open until December 31, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 16, 2018; revised April 10, 2018; approved on April 10, 2018.
Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-70-7841-9452 Fax. +82-31-493-2070

E-mail. kjkim@rsp.co.kr

게 된다. 이때, 목표 수명의 영역내에서 어느 정도의 응력수준에서 어떤 절차로 시험을 진행해야할지가 중요한 문제가 될 수 있다.

금속재료에 대해서는 인장강도나 경도를 이용하여 피로강도를 예측하는 연구가 진행되고 성과가 있으므로, 보다 적절한 피로 시험을 위해 이를 활용할 필요가 있다. 이와 관련된 국외 연구의 경우, 재료의 인장강도와 피로강도의 관계를 경험적, 실험적 분석으로써 특정한 피로수명에서 피로강도를 추정하는 방법이 제안되어 있다^[9]. 그리고, 금속재료의 극저주기부터 극고주기까지 피로강도를 추정하는 방법이 있으며, 재료의 경도만을 이용하여 전 피로수명 영역의 피로강도를 예측하는 방법 등이 대표적이다^{[10],[11],[12]}. 국내의 경우, 이와 같은 인장강도와 경도를 이용하여 경험적으로 피로강도를 추정하는 방법에서 더 나아가 다양한 추정법들에 대한 기존 연구결과의 정확도를 실험적으로 확인하는 연구가 진행되었다. 그리고, 피로강도를 추정하기 위한 전문가시스템을 구축하는 사례도 있다^{[13],[14]}. 이와 같이 본 연구와 관련된 국내·외 연구는 피로시험을 하지 않고 피로강도를 예측하는 방법, 피로강도 추정법과 실제 피로시험 데이터를 비교하는 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 기존 문헌으로부터 피로강도 예측 방법에 대해 조사하고, 피로시험 없이 금속재료별 S-N 곡선을 추정하는 방법에 대해 정리하였다. 그리고, 이를 활용하여 실제 피로시험 전 S-N 곡선을 추정하고, 시험조건에 따라서 재추정하여 피로시험을 위한 시험하중을 선정하는 절차를 마련하였다. 마지막으로 피로시험이 완료된 후에는 시험 데이터를 자동으로 분석하여 S-N 곡선식 산출, 그래프 출력 등이 되도록 소프트웨어로 구현하였다.

2. 피로강도의 예측

피로시험 최적화 알고리즘은 실제 금속재료의 피로시험 전에 목표 수명영역별 피로강도를 예측하고, 이 예측된 피로강도에 시험조건을 고려하여 시험하중을 산정하고 피로시험을 수행하게 된다. 따라서 소재별, 시험조건별 피로강도 추정이 선행되어야 하며, 이를 위해 다음과 같은 기존 연구결과가 이용된다. 피로강도 예측 방법은 크게 두 가지 방법으로 구분할 수 있다. 첫째는 응력을 기반으로 S-N 관계에서 목표수명에 따른 응력범위를 예측하는 방법, 두 번째로 변형률을 기반으로 ϵ -N 관계에서 목표수명에 따른 변형률 범위나 진폭을 예측하는 것이다. 본 피로시험 최적화 알고리즘과 소프트웨어 개발을 위해 이용된 방법을 다음과 같이 요약한다.

2.1 응력 기반의 S-N 곡선 예측법

다음은 재료의 인장강도와 경도를 이용하여 금속재료의 S-N 곡선을 예측하는 방법이다.

2.1.1 경험적인 피로강도 추정법

가장 대표적인 방법으로 인장강도를 이용하여 특정 피로수명일 때의 피로강도를 추정하는 방법이 있다. 일반적으로 저수명 영역은 약 10^3 사이클에서, 고수명 영역에서는 10^6 혹은 10^7 에서 금속의 종류에 따라 인장강도의 특정 수준까지를 피로강도로 본다^[9].

Fig. 1.은 인장강도를 이용하여 경험적으로 S-N 곡선을 추정하는 방법에 대한 개념도이다. 여기서, 하중 형태, 시편 상태 등에 따라 피로강도는 보정된다. 저수명 영역에서 신뢰도외에 다른 인자는 피로강도에 영향을 적게 주지만, 고수명 영역에서는 신뢰도 뿐만 아니라 하중 형태, 시편 크기, 시편 표면상태 등이 피로강도에 큰 영향을 준다.

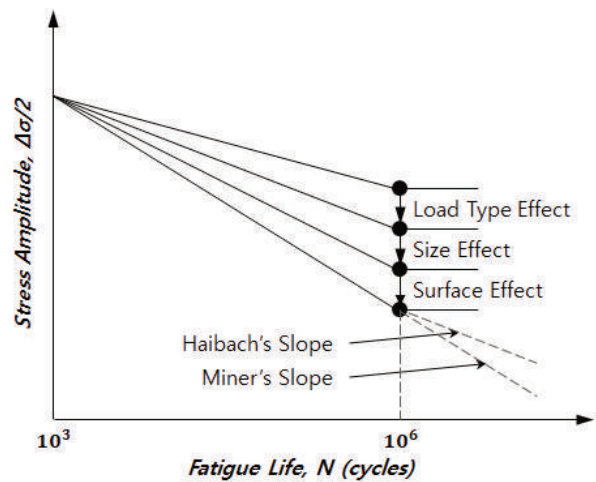


Fig. 1. Empirical Method of Fatigue Strength Estimation

Table 1은 저수명 영역에 해당하는 10^3 사이클에서 금속재료별 피로강도를 인장강도 σ_u 를 이용하여 경험적으로 구한 것이다. 그리고, Table 2에는 휨하중이 작용할 경우에 고수명 영역에서 소재별 피로강도를 인장강도를 이용하여 계산하는 방법이 요약되었으며, 축하중이 작용할 경우의 피로강도는 Table 2의 피로강도에 0.9를 곱하여 보정한다^[9].

Table 1. Empirical Fatigue Strength in Low Cycle Region

Material Type	Loading Type	Fatigue Strength (at 1,000 cycles)
All Metal	Bending	$0.9 \times \sigma_u$
All Metal	Axial	$0.75 \times \sigma_u$
Steel	Torsion	$0.72 \times \sigma_u$
Nonferrous	Torsion	$0.63 \times \sigma_u$
Cast Iron	Torsion	$1.17 \times \sigma_u$

Table 2. Empirical Fatigue Strength in High Cycle Region

Material Type	Loading Type	Fatigue Strength	Aimed Life (cycles)
Wrought Steels	Bending	$0.5 \times \sigma_u$ ($\sigma_u < 1400\text{MPa}$)	10^6
Wrought Steels	Bending	700MPa ($\sigma_u \geq 1400\text{MPa}$)	10^6
Cast iron	Bending	$0.4 \times \sigma_u$	5×10^7
Aluminum Alloys	Bending	$0.4 \times \sigma_u$ ($\sigma_u < 336\text{MPa}$)	5×10^8
Aluminum Alloys	Bending	130MPa ($\sigma_u \geq 336\text{MPa}$)	5×10^8

2.1.2 전 영역 S-N 곡선 예측 방법

강재의 경우, 인장파단에 해당하는 1/4 사이클인 극저주기부터 극고주기(GCF 영역)에 해당하는 10^9 사이클까지도 S-N 곡선을 추정하는 방법이 연구되어 있다^[10]. Fig. 2.에는 전 영역 S-N 곡선의 형상과 피로강도 추정을 위한 파라미터가 표시되어 있다. 식 (1)과 같이 피로수명 N 에서 피로강도 $\Delta\sigma/2$ 를 계산하기 위해서는 기본적으로 인장강도와 경도를 이용하여 구할 수 있다. S-N 곡선의 기울기를 표현하는 b 는 일반적으로 -0.2를 사용한다. 이 관계식을 개선하여 경도만을 이용하여 피로강도를 평가하는 추정식도 제안되고, 이를 검증한 연구가 진행되었다.^{[11],[12]}.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \left(\frac{\sigma_{GCF} - \sigma_k}{N_{GCF}^b - N_k^b} \right) (N + B)^b + \left(\frac{\sigma_k N_{GCF}^b - \sigma_{GCF} N_k^b}{N_{GCF}^b - N_k^b} \right) \quad (1)$$

여기서, σ_{GCF} : GCF 영역의 피로강도, N_{GCF} : GCF 영역에서 피로수명, B : 1st Knee Point에서 피로수명, σ_k : 2nd Knee Point에서 피로강도, N_k : 2nd Knee Point에서 피로수명

$$N_k = 10^{\left(\frac{0.155(Hv + 120) \cdot \sigma_u^{1/3} - 0.5\sigma_u}{0.007(Hv + 120) \cdot \sigma_u^{1/3}} \right)} \quad (2)$$

$$\sigma_{GCF} = \frac{\sigma_u^{1/3}}{1000} \cdot (Hv + 120)(155 - 7 \cdot \log N_{GCF}) \quad (3)$$

$$B = \left(\frac{\sigma_u - c}{a} \right)^{1/b} \quad (4)$$

여기서, $a = \left\{ \frac{\sigma_{GCF} - \sigma_k}{N_{GCF}^b - N_k^b} \right\}$, Hv : 비커스 경도

$$c = \left\{ \frac{\sigma_k N_{GCF}^b - \sigma_{GCF} N_k^b}{N_{GCF}^b - N_k^b} \right\}$$

2.2 변형률 기반의 ϵ -N 곡선 예측 방법

변형률로써 피로강도를 평가하는 경우는 일반적으로 저주기 영역에서 수행된다. 본 연구에서는 식(5)~(8)을 이용하여 저수명 영역에서의 피로강도를 구하였다. 그리고, 이렇게 구한 변형률 범위 $\Delta\epsilon$ 에 재료별 공칭 탄성계수를 곱하여 응력범위로 환산하고 피로강도로 사용하였다. 인장강도나 경도를 이용하여 목표로 하는 피로수명에서 피로강도를 계산하는 추정식은 다음과 같다^[14].

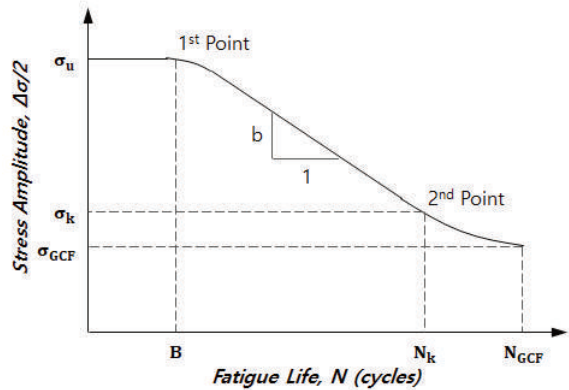


Fig. 2. Full Range S-N Curve Prediction Method

2.2.1 Medians Method

강재의 경우:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 1.5 \frac{\sigma_u}{E} (2N)^{-0.09} + 0.45 (2N)^{-0.59} \quad (5)$$

여기서, σ_u : 인장강도

E : 탄성계수

알루미늄의 경우:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 1.9 \frac{\sigma_u}{E} (2N)^{-0.11} + 0.28 (2N)^{-0.66} \quad (6)$$

2.2.2 Uniform Materials Method

알루미늄과 티타늄 합금에 대해 다음과 같은 식이 적용된다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 1.67 \frac{\sigma_u}{E} (2N)^{-0.095} + 0.35 (2N)^{-0.69} \quad (7)$$

2.2.3 Roessle-Fatemi's Method

강재에 대해 브리넬 경도(Brinell Hardness)를 이용하여 특정 피로수명에 대한 피로강도를 다음 식을 이용하여 추정할 수 있다^[15].

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{4.25HB + 225}{E} (2N)^{-0.09} + \frac{0.32(HB)^2 - 487(HB) + 191000}{E} (2N)^{-0.56} \quad (8)$$

여기서, HB : 브리넬 경도

위와 같이 피로시험 없이 피로강도를 평가할 수 있도록 많은 연구가 이루어져 왔다. 이러한 연구 성과를 활용하여 피로시험 진행시 보다 효율적이고 표준적인 방법과 절차를 마련할 수 있었다.

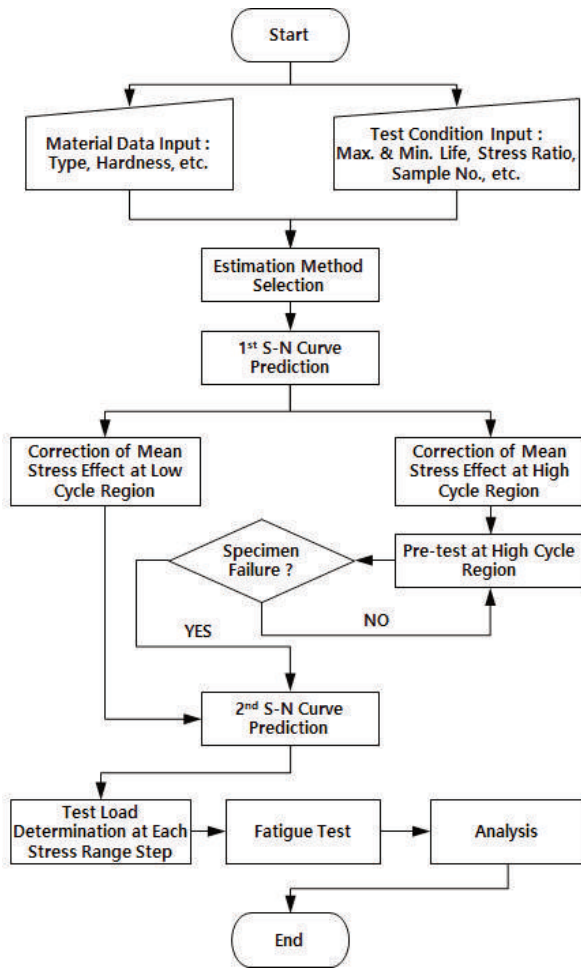


Fig. 3. Main Flowchart of Fatigue Test Algorithm Optimized

3. 피로시험 알고리즘과 소프트웨어 개발

3.1 알고리즘의 개요

Fig. 3.은 실제 피로시험 전 재료 정보와 시험조건을 입력받아 S-N 곡선을 예측한 후 시험을 수행하는 일련의 과정을 나타낸 흐름도이다.

3.2 응력범위의 결정 알고리즘

소재 정보에 따라 실제 피로시험을 진행하기 전 2장에서와 같은 이론을 바탕으로 목표하는 피로수명에서 응력범위를 예측하게 된다. 이렇게 예측된 S-N 관계로부터 시험조건에 따라 응력비 보정 및 응력범위 값의 끝자리를 조정한다.

3.2.1 S-N 관계의 예측 방법

2장의 피로강도 추정 이론을 이용하여 실제 피로시험 전 S-N 관계를 미리 예측한다. 소재별 피로강도 예측 방법을 Table 3에 정리하였다. 예측방법의 순서는 예측값의 정확도를 나타낸 것은 아니다.

Table 3. Methods of Fatigue Strength Estimation

Materials	Estimation Methods			
	1	2	3	4
Carbon & Low Alloy Steels	Full Range S-N Curve Method	Empirical Method	-	-
High Alloy Steels	Full Range S-N Curve Method	Medians Method	Roessle-Fate mi's Method	Empirical Method
Aluminum Alloys	Medians Method	Uniform Materials Method	Empirical Method	-
Titanium Alloys	Uniform Materials Method	Empirical Method	-	-

3.2.2 응력범위의 보정

(1) 평균응력의 영향에 따른 보정

위에서 결정된 S-N 관계에서 응력범위는 응력비가 -1일 때(평균응력이 0일 때)를 기준으로 추정된 값이다. 그러나 실제 피로시험에서 일반적으로 응력비는 0, 0.1 등으로 시험하는 경우가 많다. 이러한 경우, 위에서 추정된 응력범위는 목표수명에서 수정되어야 한다.

응력비 보정은 금속재료의 평균응력에 따른 특정 수명에서의 응력 진폭 혹은 범위를 선형으로 보정하는 Goodman 방법을 이용하였다. 평균응력에 따른 응력진폭 σ_a 의 계산은 다음 식을 이용한다.

$$\sigma_e = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}} \quad (9)$$

여기서, $\sigma_e : \sigma_m = 0$ 일 때, 응력 진폭

σ_u : 응력 진폭(평균응력에 따른)

σ_m : 평균응력

위 식에 따라 피로시험을 위한 수정된 최대 응력 σ_{max} 은 식 (10)과 같이 계산되고, 최소 응력 σ_{min} 과 응력 범위 $\Delta\sigma$ 은 식(11)과 (12)와 같이 계산된다.

$$\sigma_{max} = \frac{2\sigma_e \sigma_u}{\sigma_e + R \cdot \sigma_e + \sigma_u - R \cdot \sigma_u} \quad (10)$$

$$\sigma_{min} = R \cdot \sigma_{max} \quad (11)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (12)$$

여기서, 응력비 $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

(2) 응력범위의 끝자리 조정

피로시험의 종료 후 결과분석 단계에서 시험된 응력범위 값을 보다 읽기 쉽고, 분석의 능률을 높이기 위해 응력범위의 끝자리 값을 조정하였다. 피로시험을 위한 응력범위 간격 $\Delta\sigma_{step}$ 의 크기에 따라 Table 4와 같이 끝자리를 조정하였다. 이렇게 피로 시험을 위해 최종으로 수정된 응력범위 $\Delta\sigma_{test}$ 에서 최대응력은 식 (13)과 같이 다시 계산되고 시험하중 계산을 위해 사용된다.

Table 4. Correction of Stress Range

Min. Increase of Stress Range	Correction Condition
Increase by 5MPa	$\Delta\sigma_{step} \geq 17.5\text{MPa}$
Increase by 1MPa	$\Delta\sigma_{step} < 17.5\text{MPa}$

$$\sigma_{max} = \frac{\Delta\sigma_{test}}{1-R} \quad (13)$$

3.3 시험하중 결정

위 3.2절에서 결정된 응력범위를 이용하여 피로시험을 위한 하중을 계산하게 된다. 최대 하중과 최소 하중은 다음 식으로 계산된다.

$$P_{max} = \sigma_{max} \cdot A \quad (14)$$

$$P_{min} = R \cdot P_{max} \quad (15)$$

여기서, A : 시편의 단면적

3.4 피로시험 소프트웨어의 개발

위와 같은 절차와 계산식을 이용하여 금속재료의 피로시험을 위해 소프트웨어가 개발되었다(Fig. 4.). 본 소프트웨어 개발을 위해 클린코드가 적용되어 효율성을 높이고 유지보수를 용이하게 하였다¹⁶⁾.

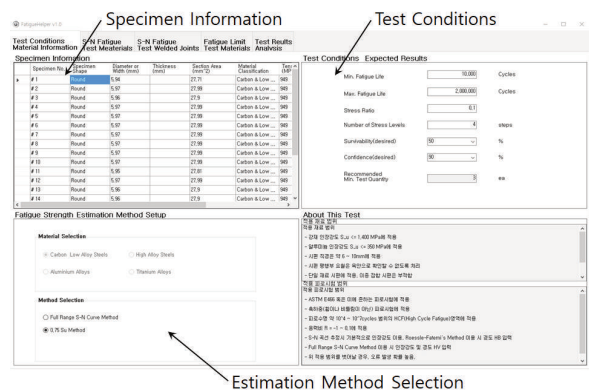


Fig. 4. Input Interface of Fatigue Test Software

4. 실증시험

4.1 시험의 준비

본 연구에서 개발된 알고리즘과 소프트웨어의 유용성을 검증하기 위해 실증시험을 실시하였다. 실증시험을 위해 금속소재를 가공하여 Fig. 5.와 같이 시편을 제작하였다. 시편은 피로시험기에 사용할 수 있도록 평행부의 공칭 직경이 6mm가 되는 원형 단면으로 제작하였다.

피로시편의 강종은 S45C로 기계부품 제작에 일반적으로 사용되는 소재이며, 그 성분을 Table 5에 정리하였다.

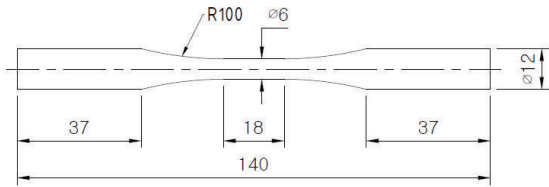
4.2 시험의 실시

4.2.1 재료의 인장시험

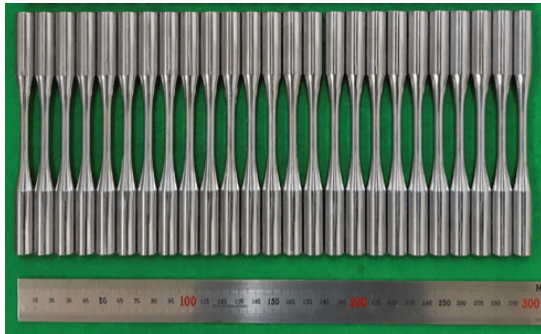
실제 피로시험을 진행하기 전 S-N 곡선의 예측을 위해 인장시험을 진행하였다. 2회의 인장시험을 통해 얻은 인장강도 평균값은 949MPa이고, 응력-변형률 곡선은 Fig. 6.과 같다.

Table 5. Chemical Components of Specimen

Steel Grade	Chemical Components (%)				
	C	Si	Mn	P	S
S45C	0.45	0.22	0.72	0.015	0.017



(a) Shape and Dimension of Test Specimen



(b) Specimens before Test

Fig. 5. Fatigue Test Specimen

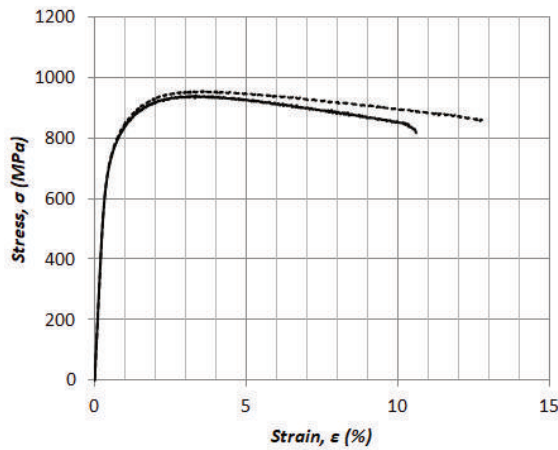


Fig. 6. Stress-Strain Curves of Tensile Tests

4.2.2 재료의 피로시험

피로시험을 위한 조건은 Table 6과 같다. 본 연구에서는 재료의 인장강도를 이용하여 피로강도를 평가하는 2.1.1항의 경험적인 피로강도 추정법을 이용하였다. 금속재료의 인장강도를 이용하여 초기 S-N 곡선이 예측된다. 이어서 평균응력 영향에 따른 보정, 고수명 영역의 예비시험, 응력범위의 끝자리 조정 후 S-N 곡선은 다

시 수정된다. Table 7에는 실제 피로시험 전 최종 결정된 수준별 응력범위가 정리되어 있다. 이렇게 결정된 응력범위를 식(14), (15)를 이용하여 시험하중으로 계산하고 피로시험을 진행하였다(Fig. 7).

Table 6. Test Conditions of Verification Test

Test Conditions	
Min. Fatigue Life	10,000 cycles
Max. Fatigue Life	2,000,000 cycles
Stress Ratio R	0.1
No. of Stress Range Levels	4
Test Temperature	Room Temperature

Table 7. Determination of Stress Range

Step Number	Stress Range $\Delta\sigma_{test}$
1 Step	670 MPa
2 Step	650 MPa
3 Step	630 MPa
4 Step	610 MPa

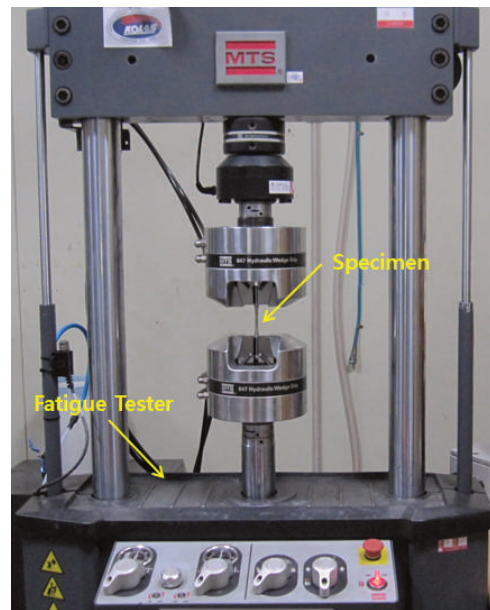


Fig. 7. Verification Test

4.3 피로시험의 결과

피로시험 후 시편은 Fig. 8.과 같다. 그리고, Fig. 9.는 Fig. 3.에서의 절차에 따라 S-N 관계의 추정 및 재추정된 곡선, 이에 따른 피로시험의 결과를 소프트웨어의 표와 그래프에 나타낸 것을 보여준다.

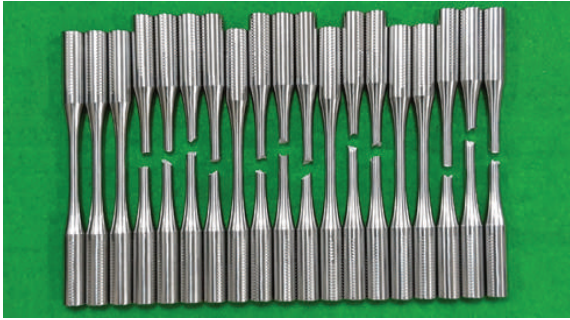


Fig. 8. Specimens after Test

피로시험이 종료된 후 자동으로 분석된 시험결과는 Fig. 10. 과 같으며, 결과분석에는 일반적인 통계적 분석 방법이 사용되었다¹⁷⁾. S-N 관계식은 식 (16)과 같다.

$$(\Delta\sigma)^m \cdot N = c \quad (16)$$

여기서, m , c 는 피로 상수이며, 소프트웨어의 자동 계산 결과, 50% 파괴확률에서 m 은 19이고, c 는 5.75×10^{59} 로 계산되었다. 이는 엑셀이나 시그마 플롯 등과 같은 통계용 상용 프로그램을 이용한 결과와 동일하다.

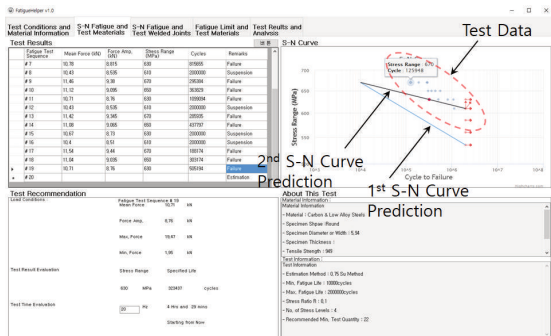


Fig. 9. S-N Curve Prediction and Test Data

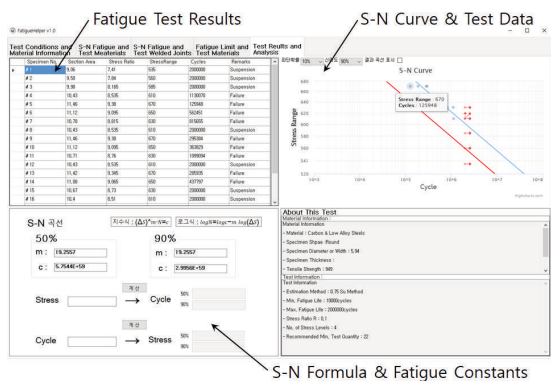


Fig. 10. Automated Analysis of Test Data

5. 결론

금속재료의 피로강도 추정에 관한 기존 연구 성과를 활용하고, 신뢰성 향상을 위한 연구의 일환으로서 피로시험 수행을 위한 알고리즘 및 소프트웨어를 개발하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 다량의 피로 시험편이 사용되는 일련의 피로시험에서 응력범위 결정을 위한 표준적인 절차를 제시하였다.
2. 본 피로시험 알고리즘과 같은 절차는 금속재료 피로시험에서 시험기관간 혹은 시험자간 비교속련도 시험에 사용할 수 있는 일반화된 프로세스를 제공한다.
3. 피로시험 알고리즘과 소프트웨어는 실제 피로시험 진행 중 일련의 시험하중 결정, 시험 종료 후 결과분석에서 시험자의 임의적인 개입을 차단하였다.
4. 실증시험을 통하여 피로시험 알고리즘과 소프트웨어의 유용성을 확인하였다.

최근 제조되는 소재의 피로시험 데이터를 이용한 피로강도 평가법 개선, 이를 산업에 활용하는 노력이 지속되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 및 연구성과실용화진흥원 2017년 연구개발서비스혁신역량강화사업의 지원을 받아 수행하였음. [2017K000118]

참고문헌(References)

- [1] 대한토목학회(2008) 도로교설계기준 해설 기문당, pp.143-152. Korea Society of Civil Engineers (2008) *Commentary for Highway Bridge Design Standard*, Kimoonang, Korea, pp. 143-152 (in Korean).
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (2012) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (6th Ed.), USA.
- [3] Hobbacher, A.F. (2007) *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*, IIW Doc. XIII-2151-07/XV-1254-07, International Institute of Welding, France.
- [4] 일본강구조협회(2000) 강구조물의 피로설계지침-동해설(鋼構造物の疲労設計指針-同解説), 과학기술. Japanese Society of Steel Construction (2000) *Fatigue De-*

- sign Recommendations for Steel Structures*, Gwahakgisul Korea (in Japanese, Translated into Korean).
- [5] 문재민, 정영수, 전제형, 안진희, 김인태(2017) 대기환경하에서 장기간 사용된 부식강재의 실험적 피로거동평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제29권, 제3호, pp.193-204. Mun, J.M., Jeong, Y.S., Jeon, J.H., Ahn, J.H., and Kim, I.T. (2017) Experimentally Evaluating Fatigue Behavior of Corroded Steels Exposed in Atmospheric Environments, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.3, pp.193-204 (in Korean).
- [6] 강성원, 임형준, 박용걸(2017) 궤도형식별 사용레일의 피로수명 평가, 한국철도학회논문집, 한국철도학회, 제20권, 제5호, pp.649-657. Kang, S.W., Lim, H.-J., and Park, Y.-G. (2017) Fatigue Life Evaluation for Used Rail on Track Types, *Journal of the Korean Society for Railway*, KSR, Vol.20, No.5, pp.649-657 (in Korean).
- [7] 국가기술표준원(2002) 금속재료-축하중 피로 시험(KS B ISO 1099: 2002). Korean Agency for Technology and Standards (2002) *Metals - Axial Load Fatigue Testing* (KS B ISO1099: 2002), Korea (in Korean).
- [8] American Society for Testing Materials (2015) *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials* (ASTM E466 - 15), USA.
- [9] Lee, Y.-L., Pan, J., Hathaway, R., and Barkey, M. (2004) *Fatigue Testing and Analysis*, Butterworth-Heinemann, UK, pp.126-140.
- [10] Bandara, C.S., Siriwardane, S.C., Dissanayake, U.I., and Dissanayake, R. (2015) Developing a Full Range S-N Curve and Estimating Cumulative Fatigue Damage of Steel Elements, *Computational Materials Science*, Elsevier, Vol. 96(Part A), pp.96-101.
- [11] Bandara, C.S., Siriwardane, S.C., Dissanayake, U.I., and Dissanayake, R. (2016) Full Range S-N Curves for Fatigue Life Evaluation of Steels Using Hardness Measurements, *International Journal of Fatigue*, Elsevier, Vol.82(Part 2), pp.325-331.
- [12] Strzelecki, P., and Tomaszewski, T. (2017) Analytical Models of the S-N Curve Based on the Hardness of the Material, *Procedia Structural Integrity (Proceedings of 2nd International Conference on Structural Integrity)*, Vol. 5, pp.832-839.
- [13] 전우수, 송지호(2003) 금속재료의 피로특성 추정을 위한 전문가 시스템, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 대한기계학회, pp.195-200. Jeon, W.-S., and Song, J.-H. (2003) An Expert System for Estimation of Fatigue Properties of Metallic Materials Using Simple Tensile Data, *Proceedings of Annual Spring Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers*, KSME, pp.195-200 (in Korean).
- [14] 이광수, 송지호(2006) 경도로부터 재료의 피로특성 예측방법, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 대한기계학회, pp.7-12. Lee, K.-S., and Song, J.-H. (2006) Estimation Methods for Strain-Life Fatigue Properties from Hardness, *Proceedings of Annual Autumn Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers*, KSME, pp.7-12 (in Korean).
- [15] Roessle, M.L., and Fatemi, A. (2000) Strain-Controlled Fatigue Properties of Steels and Some Simple Approximations, *International Journal of Fatigue*, Elsevier, Vol. 22, No.6, pp.495-511.
- [16] 정인용, 박상건, 손현승, 김광진(2017) 금속재료 피로시험의 최적설계 소프트웨어의 클린코드 적용 사례, 한국소프트웨어 공학학회, 한국정보과학회, 제20권, 제1호, pp.318-322. Jung, I.Y., Park, S.G., Son, H.S., and Kim, K.-J. (2017) A Case Study of Clean Code for Optimal Design Software of Metal Material Fatigue Test, *Proceeding of Korea Conference on Software Engineering*, Korean Institute of Information Scientists and Engineers, Vol.20, No.1, pp.318-322 (in Korean).
- [17] 국가기술표준원(2004) 금속재료의 피로 시험- 데이터의 통계적 분석 방법(KS B ISO12107: 2004). Korean Agency for Technology and Standards (2002) *Metallic Materials - Fatigue Testing - Statistical Planning and Analysis of Data* (KS B ISO12107: 2004), Korea (in Korean).

요 약 : 강구조물은 일반적으로 설계 단계뿐만 아니라 유지관리 단계에서도 피로 검토를 한다. 이러한 피로 검토를 위해서는 S-N 곡선을 이용하므로 구조물의 보다 정확한 피로 평가를 위해서는 소재의 S-N 관계 평가가 잘 이루어져야 한다. 금속재료의 피로시험을 위한 규격이 국내·외에 마련되어 있으나, 다량의 시편을 이용하여 수행되는 일련의 피로시험에서 어느 정도의 응력 수준으로 시험해야 할지 결정하는 것은 시험자의 판단에만 의존한다. 본 연구는 금속재료의 피로시험을 일관된 절차에 따라 진행할 수 있도록 알고리즘을 개발하였다. 연구의 목적 달성을 위해 기존 문헌을 조사하여 피로강도 예측 방법에 대해 검토하고, 이 예측 방법을 이용하여 실제 피로시험 전 S-N 곡선을 추정하여 시험하중을 선정하도록 절차를 개발하고 소프트웨어로 구현하였다. 마지막으로 실증시험을 수행하여 소프트웨어의 유용성을 확인하였다.

핵심용어 : 피로시험, 강재, S-N 관계, S-N 곡선 추정, 피로강도, 피로 소프트웨어