

인장파단시간 및 응력측정에 의한 SAPH45의 수명예측

박정민, 송준혁(전북대학교 대학원), 강희용, 양성모(전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소)

Prediction of life of SAPH45 steel with measured fracture time and strength

J. M. Park, J. H. Song, H. Y. Kang, S. M. Yang

Abstract

The failure of material structures or mechanical systems is considered as a direct or indirect result of fatigue. In the design of mechanical structure for estimating of reliability, the prediction of failure life is the most important failure mode to be considered. However, because of a complicated behavior of fatigue in mechanical structure, the analysis of fatigue is in need of much researches on life prediction.

This document presents a prediction of fatigue life of the SAPH45 steel, which is extensively for vehicle frame. The method using lethargy coefficient and stress distribution factor at prediction of fatigue life based on the consideration of the failure characteristics from the tensile test should be provided in this study.

KEYWORDS

Simple Tensile Test(단순 인장 시험), Failure Life Prediction(파단 수명 예측), Lethargy coefficient(무기력 계수), Stress Distribution Factor(응력분포 계수)

1. 서론

자동차 프레임은 주로 노면상태의 불균일성에 의한 반복되는 굽힘하중 및 비틀림하중, 그리고 가속, 감속 및 제동 등에 의한 반복되는 굽힘 및 인장하중을 받는다. 그리고 부재의 제조 때에

제조결함의 발생은 피할 수가 없다.

이러한 결함의 모든 것을 파악하여 설계하는 것은 불가능에 가까우며, 또 설계대로 제조, 사용되리라는 보증도 없다. 그러나 많은 경우 설계시에 결함이 없는 것을 원칙으로 한다. 즉 종래의 강도 설계의 입장(응력기준)에 의해 부재의 적하능력, 사용기간을 정한 후에, 파괴역학의 입장에 의해 결함평가를 하여 구조건전성을 보증하는 것이 일반적이다. [1][2]

기계 부품, 피로해석 및 수명예측기술은 각종 기계류의 신뢰성 향상 및 피로설계 기술의 중요한 요소기술이다. 기존의 많은 연구기관과 실험실에서는 각종 기계 구조물이나 기계 제품에 대하여 피로파괴 실험을 행해 왔으며, 이를 이용하여 건전성에 대해 평가해 왔다. 그러나 이러한 실험을 통한 평가는 오랜 시간과 많은 비용을 필요로 하며, 현재는 축적된 데이터베이스(database)를 가지고 시간과 경비를 절약할 수 있는 컴퓨터에 의한 시뮬레이션적인 방법이 상용화되고 있다. [3][4]

그러나, 그러한 파괴의 원인을 분석하고 대책을 세우는 데에는 시간과 비용 등의 많은 어려움이 따르게 된다. 그러므로 부재가 내포하는 각종 결함에 의존하는 부재상수이며, 그 부재의 화학조성만으로 결정되는 상수가 아니라 화학성분이 같은 부재일지라도 그 부재의 공정처리과정에 따라 설계인자들의 영향도는 다르다. 즉 그 부재의 이력에 따라 그 속에 내포하는 결함의 물질상수인 무기력 계수(Lethargy Coefficient)의 개념을 도입한다. [5][6]

따라서 본 연구에서는 자동차 프레임의 재료인 SAPH45에서의 파괴-건전성 평가에 있어서 인장 시험시의 파괴가 피로파괴와 동등하다는 것에 착안해서 간단한 인장 시험만으로 인장 파단시간

을 측정 한 후, 무기력계수를 이용한 피로 수명을 예측할 수 있는 방법을 제시한 다음, 응력분포계수와 함께 사용하여 짧은 시간과 저렴한 경비를 가지고 재료의 건전성을 평가하는 방법을 제시한다.

2. 이론적 배경

2.1 무기력계수

Zhurkov 에 의하면, 일정한 온도에 있는 부재가 일정한 인장응력을 받고 있는 상태에서 반실험식의 피로수명을 다음과 같이 표현하였다.[7]

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - m\sigma}{kT}\right) \quad (2-1)$$

따라서 dt 사이에 열진동 회수는 dt/τ_0 로 쓸 수 있으므로,

$$e^{-\frac{U_0 - m\sigma}{kT}} \frac{dt}{\tau_0} \quad (2-2)$$

즉 시간 dt 동안에 열진동에 의해서 한 개의 원자가 격자의 위치로부터 제거되는 확률이 된다. 그러므로 이들 확률을 모두 합하여 100%가 되며 확실히 격자상의 안정한 위치로부터 제거되어 파손이 일어남을 뜻한다. 이때까지 걸리는 시간이 바로 그 부재의 수명인 것이다. 이 수명을 L (life time)이라 하면 파손이 일어나는 조건은 다음과 같다.

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{e^{\frac{U_0 - m\sigma(t)}{kT}}} = 1 \quad (2-3)$$

부재가 내포하는 각종 결함에 의존하는 무기력계수의 값은 각각의 재료들마다 물성치가 틀리기 때문에 달리 계산한다. 그 구체적인 방법은 Fig. 2-1과 같이, 어떤 부재를 단순 인장시험을 해서 인장 파괴를 일으켜 가지고, 그 때의 하중 속도를 일정히 하여 얻은 극한 강도와 파괴가 일어날 때까지의 하중 시간을 가지고서 무기력계수를 산출한다.

$$\int_0^{\tau_u} \frac{dt}{\tau_0 e^{\frac{U_0 - m\sigma}{kT}}} = 1$$

$$i.e. \quad e^{\frac{m\sigma_u}{kT}} = 1 + \frac{m\sigma_u}{kT} \left(\frac{\tau_0}{\tau_u}\right) e^{\frac{U_0}{kT}} \quad (2-4)$$

먼저 다음과 같은 변수변환을 하고,

$$x \equiv \frac{m\sigma_u}{kT}, \quad a \equiv \left(\frac{\tau_0}{\tau_u}\right) e^{\frac{U_0}{kT}}$$

Perturbation Method를 적용하면 그 해는

$$x = \ln(a) + \frac{\ln \ln(a)}{1 - \frac{1}{\ln(a)}}$$

으로 얻어진다. 이를 원변수로 환원하면, 그 해는

$$\frac{m\sigma_u}{kT} = \frac{U_0}{kT} - \ln\left(\frac{\tau_0}{\tau_u}\right) + \frac{\ln\left[\frac{U_0}{kT} - \ln\left(\frac{\tau_0}{\tau_u}\right)\right]}{\left[1 - \left(\frac{U_0}{kT} - \ln\left(\frac{\tau_0}{\tau_u}\right)^{-1}\right)\right]} \quad (2-5)$$

로 된다. 이를 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$m = \frac{U_0}{\sigma_u} (1 - \eta) \quad (2-6)$$

$$\eta = \frac{\ln\left(\frac{\tau_u}{\tau_0}\right)}{\frac{U_0}{kT}} \left(1 - \frac{\ln\left[\frac{U_0}{kT} - \ln\left(\frac{\tau_u}{\tau_0}\right)\right]}{\ln\left(\frac{\tau_u}{\tau_0}\right) \left[1 - \frac{U_0}{kT} - \ln\left(\frac{\tau_u}{\tau_0}\right)\right]} \right)$$

여기서, τ_u = 파괴시간 (sec), σ_u = 극한강도

2.2 수명식

Fig. 2-2와 같이 평균응력 $\bar{\sigma}$ 로 유지하고, 그 위에 변동응력 $\hat{\sigma} \cos \omega t$ 를 부가하는 경우를 생각해 보면, 수명은 응력을 갖고 있는 분포특성과 실제수명의 90% 신뢰성을 갖을 경우의 응력분포계수(n)와 무기력계수(m)를 고려하면 다음과 같다.

$$\int_0^{N\left(\frac{2\bar{\sigma}}{\sigma_u}\right)} \frac{dt}{\tau_0 e^{\frac{U_0 - mn(\bar{\sigma} + \hat{\sigma} \cos \omega t)}{kT}}} = 1$$

$$L = N(2 \frac{\pi}{\omega}) \quad (2-7)$$

여기서, 다음과 같은 변수변환을 하면

$$\omega t \equiv x, \quad dt = dx / \omega, \quad 2\pi f = \omega$$

$$\frac{2N}{\tau_0 e^{\frac{U_0 - mn\bar{\sigma}}{kT}}} \int_0^{\pi} (e^{\frac{mn\hat{\sigma}}{kT} \cos(x)}) \frac{dx}{\omega}$$

$$= \frac{2N}{\tau_0 e^{\frac{U_0 - mn\bar{\sigma}}{kT}}} \frac{\pi}{\omega} I_0\left(\frac{mn\hat{\sigma}}{kT}\right)$$

$$= 1, \quad \text{Failure} \quad (2-8)$$

이고, 이를 적분하여 수명을 구하면 다음과 같다.

$$L = \frac{\tau_0 e^{\frac{U_0 - mn\bar{\sigma}}{kT}}}{I_0\left(\frac{mn\hat{\sigma}}{kT}\right)} \quad (2-9)$$

이로서 수명은 온도와 평균응력 $\bar{\sigma}$, 그리고 변동응력 $\hat{\sigma}$ 의 크기에 의존한다. 따라서 파손까지의 사이클 수는 같은 변수의 의존이외에 변동주파수 ν (Hz)에 의존한다. 식(2-9)에서 분모의 제1종 변형 Bessel 함수 $I_0\left(\frac{mn\hat{\sigma}}{kT}\right)$ 는 변동응력이 '0'이면, 즉 정적피로의 경우에는, $I_0(0) = 1$ 이므로, Zhurkov의 식으로 환원됨을 알 수 있다. 따라서 이 피로수명식은 정적피로나 동적피로 모두 그 수명을 표현해 주는 일반식이다.

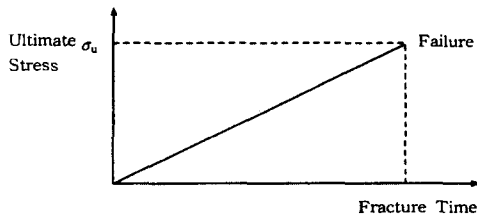


Fig. 2-1 Tensile fracture with constant loading rate failure time

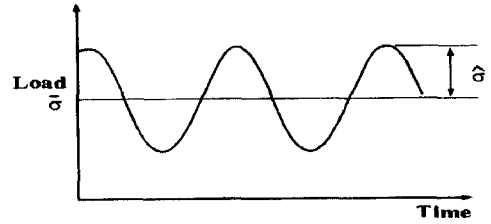


Fig. 2-2 Loading Condition

3. 실험

3.1 인장실험

자동차 프레임은 주로 노면상태의 불균일성에 의한 반복되는 굽힘하중 및 비틀림하중, 그리고 가속, 감속 및 제동 등에 의한 반복되는 굽힘 및 인장하중을 받는다. 본 연구에서는 트럭 프레임 C/MBR의 판의 두께에 따른 내구력의 변화를 보기 위하여 시편을 제작하였으며, 시편은 인장시험에서 KS 규격의 5호 시험편을 사용하였고 형상은 Fig. 3-1과 같다.

본 실험연구에 제공된 실험재료는 트럭 프레임 C/MBR에 사용되는 자동차구조용 열간압연 강판인 SAPH45강이다. KS D 3519에 의하면, 본 실험재료의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 3-1과 같다.

시편은 단순 인장에 의한 재료의 피로수명에 관한 연구를 위해 인장실험을 실시하였다. 인장시험에 사용된 실험장치는 INSTRON사 25ton 용량의 만능시험기이며, 실험장치는 Data Acquisition System으로 이루어져 있다.

본 실험에서의 실험방법 및 실험조건을 보면 다음과 같다.

- 제어방식 : 변위제어
- crosshead 속도 : 0.02 cm/s
- 실험 시간 : 파단에 이르기까지의 시간
- 판 두께 : 6mm

실험 Data는 A/D Converter System에 의해 저장된다.

Table 3-1 Chemical composition and mechanical properties of SAPH45 steel

	Chemical composition		Mechanical property		
	P	S	Tensile strength σ_t	Yield strength σ_y	Percent reduction in area
SAPH 45	0.040% max.	0.040% max.	45 Kgf/mm ²	31 Kgf/mm ²	34% min.

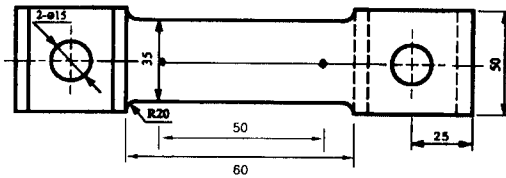


Fig. 3-1 Tensile test specimens

4. 고찰

4.1 수명식의 검증

단순 인장실험에서 시편은 150초일 때 파단이 일어남을 알 수 있었다. 이 결과를 이용하여 무기력계수와 응력분포계수(n)를 구하기 위하여 JIS DATA를 이용하여 수명식을 비교를 하였다. 응력분포계수(n)는 실제의 수명의 90% 신뢰성을 갖을 경우 계수를 구할 수 있고 JIS DATA (SAPH 45)와 수명식에 의하여 응력분포계수가 계산될 수 있다. [8]

Table 4-1은 식(2-9)과 JIS DATA와의 계산된 응력분포계수를 나타낸 것이다. 이때의 응력분포계수를 도입한 수명식과 실제 JIS DATA와의 비교를 해보면 Fig. 4-1에서 안전영역안으로 수명을 예측할 수 있다. 즉 무기력계수에 의한 본 연구의 수명식의 타당성을 입증할 수 있다.

그리고 인장실험에서 얻은 수명계산 입력 데이터를 Table 4-2와 식(2-9)의 수명식을 적용하면 응력분포계수와 무기력계수 개념에 의한 구조물

의 수명은 다음의 Fig. 4-2와 같이 변동응력들의 변화에 대한 피로수명 대한 예측을 계산한 S-N 곡선을 얻을 수 있다.

Table 4-1 Fatigue life of JIS (SAPH 45) and stress distribution factor

Alternating stress (kgf/mm ²)	18.9	17.4	16.4	15.9	15.4	14.9
Life (N)	1.036e+5	3.72e+5	4.196e+5	3.113e+5	1.263e+6	2.0625e+6
Stress distribution factor	2.2745	2.4447	2.5907	2.6551	2.7338	2.8139

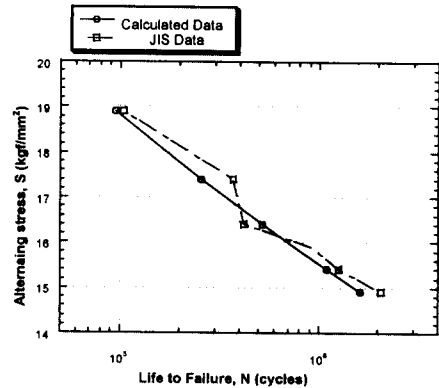


Fig. 4-1 Fatigue life of JIS experiment vs. calculation

Table 4-2 Input data for fatigue life with lethargy coefficient

Bonding Energy	100 (kcal/mol)	Tensile Strength	46 (kgf/mm ²)
Life Coefficient	10 ⁻¹³	Temperature	300 (K)
Boltzmann Const.	1.987 × 10 ⁻³ (kcal/mole K)	Frequency	25 (Hz)
Fracture time	150 sec		

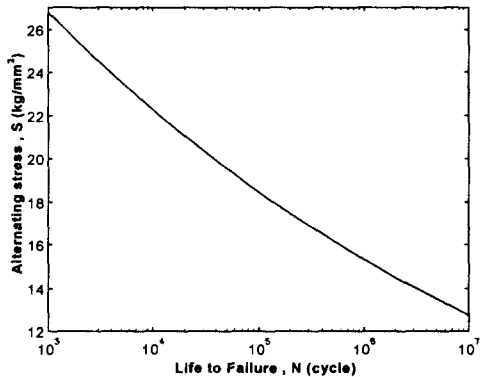


Fig. 4-2 S-N curve

5. 결론

본 연구는 차량 구조 변경시, 단기간 내에 변경에 따른 설계 파라메타를 평가하는 데 목적이 있다. 인장파단시간 및 응력측정에 의한 SAPH45의 수명예측을 하여 결론은 다음과 같이 얻었다.

1) 결합평가 파라메타인 무기력계수를 구하여 피로파괴 시험시 발생하는 곤란한 점을 극복하고 수명예측을 보다 간편하게 할 수 있도록 하였다.

2) 무기력계수는 단순 인장 시험에서 시험편이 완전 파괴될 때까지의 시간과 하중조건에 따라 정의되는 계수로서 이를 이용하여 재료의 피로수명을 S-N 곡선에서 간단하게 예측할 수 있다. 본 개념을 적용하여 짧은 시간과 저렴한 경비를 가지고 응력분포계수와 무기력계수를 계산에 의해서 SAPH45의 건전성을 평가할 수 있다.

VII. 참고 문헌

- [1] 김건영, "기계장치의 잔존 수명 예측 및 평가", 대한기계학회지, 제30권 제2호, 1990.
- [2] 失川元基, "破壊力学 理論・解析から工學的 應用まで", 培風館, 1988.
- [3] 백경운, Ralph I. Stephens, "Computational life pre-

diction methodology for mechanical system using dynamic simulation, finite element analysis, and fatigue life prediction methods.", Univ. of Iowa, 1990.

[4] V.A.Avakov, "Fatigue Reliability Functions", ASTM, vol.111, 1989.

[5] S.M. Yang, J.H. Song, H.Y. Kang, S.J. Kwon, H.S. Kim, "Failure life prediction by simple tension test under dynamic load", p.407~413, ICF9, 1997

[6] 양성모, 송준혁, 권석진, 김하수, 강희용, "동적 인장 하중시 무기력상수에 의한 수명 예측", 한국정밀공학회, 제14권, 제7호, p.91~98, 1997, 7

[7] S.N.Zhurkov, "Kinetic concept of the strength of solids", Int. J., 1965.

[8] "疲労強度 データ集", 日本材料學會,

Vol. I, CODE-SERIES 142-002, 1996