

# 동적무기력계수에 의한 고장력강의 동적·충격강도 특성 평가

## The Estimation of Dynamic/Impact Strength Characteristics of High Tensile Steel by Dynamic Lethargy Coefficient

송준혁\*\*, 박정민\*\*, 채희창\*, 강희용\*, 양성모\*  
JoonHyuck Song, JungMin Park, HeeChang Chae, HeeYong Kang, SungMo Yang

### ABSTRACT

The purpose of this paper is presented a rational method of predicting dynamic/impact tensile strength of high tensile steel materials widely used for structural material of automobiles. It is known that the ultimate strength is related with the loading speed and the Lethargy Coefficient from the tensile test. The Dynamic Lethargy Coefficient is proportional to the disorientation of the molecular structure and indicates the magnitude of defects resulting from the probability of breaking the bonds responsible for its strength. The coefficient is obtained from the simple tensile test such as failure time and stresses at fracture. These factors not only affect the static strength but also have a great influence on the dynamic/impact characteristics of the joint and the adjacent structures. This strength is used to analyze the failure life prediction of mechanical system by virtue of its material fracture. The impact tensile test is performed to evaluate the life parameters due to loading speed with the proposed method. Also the evaluation of the dynamic/impact effect on the material tensile strength characteristics is compared with the result of Campbell-Cooper equation to verify the proposed method.

주요기술용어 : Dynamic lethargy coefficient(동적무기력계수), Tensile test(인장시험), Dynamic/Impact tensile strength(동적/충격 인장강도), High tensile steel(고장력강), Loading speed(하중속도)

### Nomenclature

$\tau$  : life, *sec*  
 $\tau_o$  : life coefficient, *sec*  
 $U_o$  : bonding energy, *kJ/mole*  
 $k$  : boltzmann constant, *kJ/mole · K*  
 $T$  : temperature, *K*  
 $m$  : dynamic lethargy coefficient, *kJ/mole · mm<sup>2</sup>/N*  
 $m'$  : modified dynamic lethargy coefficient for impact condition, *kJ/mole · mm<sup>2</sup>/N*

$\tau_u$  : failure time, *sec*  
 $\sigma_u$  : ultimate strength, *MPa*  
 $\dot{\epsilon}$  : strain rate, *sec<sup>-1</sup>*  
 $\dot{\sigma}$  : loading speed, *mm/sec*

### Subscripts

$f$  : high speed tensile  
 $s$  : low speed tensile

### 1. 서론

일반적으로 자동차나 기계구조물의 재료는

\* 회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

\*\* 회원, 전북대학교 대학원

급격한 외부 충격을 받을 때 견딜 수 있는 충분한 강도와 강성을 가져야 한다. 그러나 위와 같은 목적을 만족시키기 위해 차체가 과대설계 되어진다면 불필요한 원가상승, 연비저하 등의 역효과를 가져올 수 있다. 따라서 차체 구조 설계는 하중조건뿐만 아니라 경제성 등의 여러 가지 조건을 만족시켜야 한다.

본 연구에서는 자동차에 많이 사용되는 고장력 박판재를 이용하여 충돌시 인장강도 특성에 영향을 미치는 하중속도 효과를 논하였다. 지금까지 각종재료의 인장강도 특성에 미치는 하중속도의 영향을 규명하기 위한 연구로는 Campbell & Cooper<sup>1)</sup> 등의 연구가 있으며, 일반 강구조물에 사용되고 있는 고장력강재를 대상으로는 Shi & Meuleman,<sup>2)</sup> Cowper 등,<sup>3)</sup> 백점기 등<sup>4)</sup>의 연구가 있다. 이상의 연구들은 지금까지 개발되어 온 대부분의 재료 이론들은 실제로 설계가 이루어질 때 재료 자체가 포함할 수 있는 불균질성을 배제하고 전혀 결함이 없고 균질한 재료라는 가정을 전제로 하고 있다.

그러나 실제의 구조물들은 원천적으로 미세 공동이나 미세균열 등을 가지고 있거나, 하중이 가해지게 되면 이러한 미세결합들이 부가되게 마련이다. 재료가 하중을 받고 내부적인 손상이 진전되어 마침내 파단에까지 이르게 되는 과정을 이론적으로 설명하기 위해 순수 재료역학적인 측면에서 연구들이 이루어져 왔으나 이를 실제 구조물에 직접 적용하기에는 사실상 어렵다. 특히, 기하학적 구조에 따라 하중에 대한 동적특성이 달라지는 기계구조물들의 피로수명을 평가하는 연구에 일률적으로 적용하기에는 무리가 따르며, 재료내부의 산재된 결함의 무기력계수를 이용하여 부재의 인장강도 특성을 평가는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 보다 간편하고 짧은 시간에 고장력강의 하중속도 변화에 따른 인장강도 변화에 의한 구조물의 수명을 예측하는 방법에 관한 연구로 동적무기력계수의 개념을 도입하고, 백점기 등<sup>4)</sup>의 실험에서의 데이터와 비교하였으며,

동적무기력계수를 적용한 인장강도의 특성을 비교하여 구조물의 피로수명을 규정하기 위한 기초자료로 쓰기 위함이다.<sup>5,6)</sup>

## 2. 이론적 배경

### 2.1 무기력계수

Zhurkov<sup>7)</sup>는 일정온도에 있는 부재가 일정한 인장응력을 받고 있는 상태에서 반실험식의 피로수명을 다음과 같이 표현하였다.

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

통계역학적인 관점에서 Zhurkov의 식은, 정적응력 작용시 부재의 파단에너지가 결합에너지보다 크거나 같을 확률을 표현한 것이다.

본 연구에서는 정적평가 실험으로부터 동적수명평가식을 유도하고, 동적응력을 받는 고장력강의 특성을 평가하기 위해 동적무기력계수 개념을 도입한다.

정적 수명평가식인 식(1)을 응력과 온도에 대한 시간( $t$ )의 동적함수로 변환은 다음과 같은 과정으로 한다.

원자의 열진동으로 인하여 발생하는 결합에너지는  $e^{-\frac{U_0}{kT}}$  이고, 임의 하중  $F$ 를 받는 부재 내부에서 안전한 격자점으로부터 한 개의 원자를 제거하는 데 작용하는 재료의 에너지는  $e^{-\frac{F}{kT}}$  이다. 여기에서 시간  $dt$  사이에 원자의 열진동회수는  $dt/\tau_0$ 로 쓸 수 있으므로, 시간  $dt$  동안에 열진동에 의해서 한 개의 원자가 격자의 위치로부터 제거되는 확률은 다음 식과 같다.

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

즉, 이들 확률을 모두 합하여 1이 되면 격자상의 안정한 위치로부터 제거되어 파손이 일어남을 뜻하므로, 이때까지 걸리는 시간이 바로 그 부재의 수명인 것이다.

식(2)에 따라 Zhurkov의 정적 수명 평가식은

식(3)과 같이 동적 수명 평가식으로 변환된다.

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{e^{\left(\frac{U_0 - F(t)}{kT(t)}\right)}} = 1 \quad (3)$$

식(3)으로부터 부재가 내포하는 각종 결함에 의존하는 무기력계수는 다음의 과정에 의해 계산된다. 무기력계수의 값은 각각의 재료들마다 물성치가 다르기 때문에 달리 계산된다.

$$F(t) = m\sigma(t)$$

$$\sigma(t) = (\hat{\sigma} + \bar{\sigma} \cos \omega t)$$

$$T(t) = const.$$

일 때, 임의의 부재를 단순인장시험을 통해 인장과 단시의 하중속도를 일정히 하여 얻은 극한강도 ( $\sigma_u$ )와 파괴가 일어날 때까지의 하중시간 ( $\tau_u$ )을 이용해 무기력계수  $m$ 를 산출한다.<sup>8,9)</sup> 식(3)에서 상한  $\tau$ 가  $\tau_u$ 일 때, 파단이 일어나므로 다음과 같이 파단시의 수명식으로 표현된다.

$$\int_0^{\tau_u} \frac{dt}{e^{\left(\frac{U_0 - m\sigma t}{kT}\right)}} = 1$$

여기서,  $\sigma_u = \sigma\tau_u$ 이다. 적분을 풀면,

$$e^{\frac{m\sigma_u}{kT}} = 1 + \frac{m\sigma_u}{kT} \frac{\tau_u}{\tau_u} e^{\frac{U_0}{kT}} \quad (4)$$

식(4)는 무기력계수  $m$ 에 대하여 초월방정식이므로, Perturbation method를 이용하여 무기력계수에 대한 식을 구한다.<sup>5)</sup>

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

$$\eta = \frac{\ln\left(\frac{\tau_u}{\tau_o}\right)}{\frac{U_0}{kT}} \left( 1 - \frac{\ln\left[\frac{U_0}{kT} - \ln\left(\frac{\tau_u}{\tau_o}\right)\right]}{\ln\left(\frac{\tau_u}{\tau_o}\right)\left[1 - \frac{U_0}{kT} - \ln\left(\frac{\tau_u}{\tau_o}\right)\right]} \right) \quad (5)$$

식(5)에서 무기력계수  $m$ 을 고찰해 보면 결함 에너지, 인장강도, 하중속도 그리고 파단시간의 함수로 이뤄져 있다. 따라서 단순인장시험에 의한 완전파단까지의 시간과 재료의 인장강도만으로 부재의 동적무기력계수를 산출할 수 있다.

## 2.2 동적무기력계수에 의한 동적·충격강도의 특성방정식

재료의 동적 최종인장응력에 관한 변형률속도 효과를 고려한 간이계산식으로 Campbell & Cooper<sup>1)</sup>는 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{\sigma_{TD}}{\sigma_T} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_T$  : 최종인장응력

$\sigma_{TD}$  : 동적 최종인장응력

$\dot{\epsilon}$  : 변형률 속도

여기에서  $D$ 와  $q$ 는 동적 인장 시험의 결과로부터 얻어지는 실험상수로서 고장력강의 경우  $D=6844(sec^{-1})$ ,  $q=3.91$ 이다. 극한강도와 하중속도의 동적무기력계수 의존성을 구하기 위하여 식(4)를 변형하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \ln\left[1 + \frac{\sigma_u}{kT} \left(\frac{\tau_o}{\tau_u}\right) e^{\frac{U_0}{kT}}\right] \\ &= \frac{U_0}{m} + \frac{kT}{m} \ln \frac{m\tau_o\sigma}{kT} \end{aligned} \quad (7)$$

또는

$$\sigma_u = \frac{kT}{m} \left[ \frac{U_0}{kT} + \ln \frac{m\tau_o}{kT} + \ln \dot{\sigma} \right] \quad (8)$$

고속인장하중의 경우의 인장강도 값을  $\sigma_{us}$ 라 하고 저속인장하중의 경우의 인장강도 값을  $\sigma_{us}$ 라 하면, 그때의 무기력계수를 각각  $m'_f$ ,  $m_s$ 라 할 때,  $\sigma_{us}$ 와  $\sigma_{us}$ 의 비는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\sigma_{us}}{\sigma_{us}} = \frac{\left\{ \frac{U_0}{kT} + \ln \frac{m_f\tau_o}{kT} + \ln \dot{\sigma}_f \right\}}{\left\{ \frac{U_0}{kT} + \ln \frac{m_s\tau_o}{kT} + \ln \dot{\sigma}_s \right\}} \quad (9)$$

식(9)에서 무기력계수는 결함에너지를 인장강도로 나눈 값에서  $\eta$ 만큼 감해지고,  $\eta$ 가 극한강도, 파단시간, 하중속도 등으로 결정되므로 하중속도가 매우 큰 충격의 경우에 대해 다음 식(10)과 같이 충격에 대한 동적무기력계수를 가정한다.

$$m' = m - n\dot{\sigma} \quad (10)$$

여기서, 하중계수  $n$ 는 실험결과와의 비교에 의한 보정계수이다.

식(10)에 의한 동적무기력계수를 고려한 인장강도의 특성식을 식(9)에 대입하여 구하면 동·충격강도 특성 평가식은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_{us}} = \frac{\left\{ \frac{U_o}{kT} + \ln \frac{m'_f \tau_o}{kT} + \ln \dot{\sigma}_f \right\}}{\left\{ \frac{U_o}{kT} + \ln \frac{m'_s \tau_o}{kT} + \ln \dot{\sigma}_s \right\}} \quad (11)$$

### 3. 고찰

본 절에서는 단순인장시험으로부터 고장력강의 동적무기력계수를 산출하고, 이를 이용하여 고장력강의 동적·충격강도 특성을 평가하고 검증하는 과정에 대하여 기술한다.

본 연구에서는 실제 자동차 차체 재료인 고장력강재의 시험편인 두께 0.71mm KS-5호 인장시험편으로 인장시험을 실시하고, Table 1의 백점기의 실험데이터중 변형률속도가 1~10<sup>4</sup> 범위인 동적/충격 하중의 데이터를 이용하여 비교하였다.<sup>4)</sup>

실험은 상온에서 하중속도 0.2mm/sec로 실시하였으며, 자세한 실험조건 및 재료 상수는 Table 2와 같다.

식(10)의 동적무기력계수와 식(11)의 하중속도 변화에 대한 고장력강의 동적·충격강도 특성 평가식을 적용하여 자동차 차체 재료로 사용되고 있는 고장력강 박판재를 대상으로 하중속도를 변화시켜가면서 실험을 수행한 자료를 이용하여 재료의 인장강도특성에 미치는 하중속

Table 1 Result of uniaxial tension<sup>4)</sup>

Specimen no.	Cross-head speed (mm/sec)	Strain rate (sec <sup>-1</sup> )	Yield stress (MPa)	Ultimate tensile stress (MPa)
HT-100	100	2	342.0	410.6
HT-300	300	6	350.0	429.4
HT-600	600	12	390.0	467.9
HT-950	950	19	425.0	537.6

Table 2 Description of experiment conditions and material properties

Bindind energy	418.4kJ/moleK
Life coefficient	10 <sup>-14</sup> sec
Boltzman constant	1.987 × 10 <sup>-3</sup> kJ/moleK
Plastic deformation energy	6.02 × 10 <sup>-1</sup> kJ/moleK
Temperature	300K
Ferquency	15Hz
Thickness	0.71mm
Tensile stress	472.36MPa
Alternating stress	183.26MPa
Mean stress	262.64MPa

도의 영향을 분석하였다. 이것을 바탕으로 실제의 실험과 동적무기력계수를 고려한 고장력강의 실험 데이터와 비교하였다. 백점기 등<sup>4)</sup>에 의해 수행되었던 결과와 Campbell & Cooper<sup>1)</sup>식과 동적무기력계수를 고려한 인장강도의 특성을 비교하였다.

Fig. 1에서와 같이 Campbell & Cooper<sup>1)</sup>의 식은 하중속도에만 크게 의존하므로 하중속도가 커질수록 오차가 더 커지기 마련이다. 하지만, 동적무기력계수는 각 시험편의 내부재질상태 및 기하학적 형상에 따른 재료상수를 단순인장시험으로 즉각 반영할 수 있으므로, 실험 데이터에 보다 근접한 결과를 산출한 것으로 판단된다.

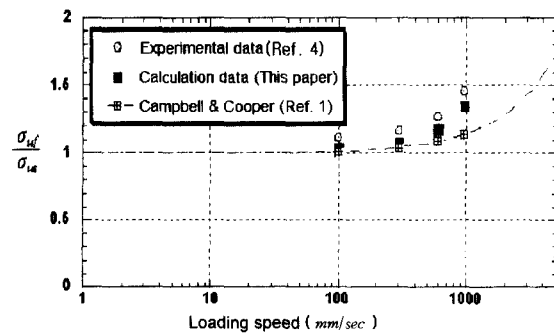


Fig. 1 Ultimate strength of high tensile steel with increase loading speed

#### 4. 결론

고장력강의 하중속도의 변화에 대한 구조물의 동적·충격강도 특성을 보다 간편하고 짧은 시간에 예측하는 방법에 관한 연구로 동적무기력계수의 개념을 도입하여 연구한 결론은 다음과 같다.

1) 고장력강의 동적충격에 대한 인장강도의 특성을 단순인장시험에 의한 동적무기력계수의 개념을 도입하여 결합에너지, 하중속도로 평가할 수 있는 계산식을 제시하였다.

2) 차량의 초기 설계시, 하중속도변화에 따른 재료의 인장강도 특성을 평가하는데 용이하게 이용될 수 있다. 특히, 설계변경시 재료의 변경 및 구조물의 기하학적 변경에 따른 인장강도특성의 상대비교에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) J. D. Campbell, R. H. Cooper, "Yield and Flow of Low-Carbon Steel at Medium Strain Rates," Proc. Conf. Physical Basis of Yield and Fracture, Int. of Physical Soc., pp.77-87, 1966.
- 2) M. F. Shi, D. J. Meuleman, "Strain Rate Sensitivity of Automotive Steels," SAE 920245, pp.

- 159-168, 1992.
- 3) G. R. Cowper, P. S. Symonds, "Strain-Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams," Technical Report, No. 28, Brown University, 1957.
- 4) 백점기, 정장영, 백영민, "자동차용 고장력강 박판재의 동적/충격 인장강도에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제7권 제2호, pp.268-278, 1999.
- 5) S. M. Yang, H. Y. Kang, S. J. Kwon, H. S. Kim, J. H. Song, "Failure Life Prediction by Simple Tension Test under Dynamic Load," pp.407-413, ICF9, 1997.
- 6) 양성모, 강희용, 송준혁, 권석진, "동적 인장하중시 무기력상수에 의한 수명 예측," 한국정밀공학회, 제14권 제7호, pp.91-98, 1997.
- 7) S. N. Zhurkov, "Kinetic Concept of the Strength of Solids," Int. J. Fracture Mechanics, Vol.1, pp.311-323, 1965.
- 8) S. M. Yang, H. Y. Kang, S. J. Kwon, J. H. Song, J. M. Park, "Determination of Fatigue Life by Simple Tensile Test in Bolted Joints," pp.1333-1338, IFC99, 1999.
- 9) 양성모, 강희용, 송준혁, 박정민, "체결력에 따른 볼트결합 구조물의 응력집중 계수평가," pp.269-273, 한국공작기계 춘계학술대회, 1998.
- 10) 이병호, "A General Theory on the Fatigue-Creep Life," pp.377-402, 1983.