

## 점용접부에서 하중속도효과를 고려한 피로수명평가

양성모\*, 강희용<sup>+</sup>, 김홍진<sup>+</sup>, 송준혁<sup>+</sup>, 島本 聰<sup>++</sup>

(논문접수일 2002. 7. 15, 심사완료일 2002. 11. 12)

### Fatigue Life Evaluation of Spot Welding Including Loading Speed Effect

S.M. Yang\*, H.Y. Kang<sup>+</sup>, H.J. Kim<sup>+</sup>, J.H. Song<sup>+</sup>, A. Shimamoto<sup>++</sup>

#### Abstract

Evaluation of fatigue strength on the spot welded part is very important for strength design of spot welded steel structures. In this paper, we could get the life cycle of the spot welded part using the lethargy coefficient obtained through the quasi-static tensile shear test for the specimen welded by current 10kA. The reliability evaluation of the life cycle is completed by comparing the life cycle calculated under the constant loading rate with the life cycle obtained by dynamic fatigue test. And then the result calculated by the lethargy coefficient is verified through the life cycle calculated using the dynamic final tensile stress formula under the increased loading speed. This way can make save the time and cost in processing of predicting the life cycle of a structure.

**Key Words** : Lethargy Coefficient(무기력계수), Spot Welding(점용접), Quasi-static Tensile-shear Test(준정적인장시험), Loading Speed(하중속도), Fatigue Life Cycle(피로수명)

### 1. 서론

점용접은 금속박판 접촉부의 저항 발열에 의해 용접이 이루어지는 고온 압접법의 일종으로 로봇 용접에 의한 자동화, 조립공정의 경제성, 중량저감 효과 및 대량생산성이 우수하여 산업전반에 걸쳐 크게 이용되고 있다. 하지만 점용접시 발생하는 용접부의 잔류응력, 조직변화, 응력집중등

의 영향은 인장-전단강도 및 변동하중 작용시 구조물의 피로수명을 저하시키는 요인으로 작용하기 때문에 여러가지 파라미터를 고려한 용접부의 수명을 평가하기 위한 연구가 다양하게 진행되어 오고 있다<sup>1,2,3)</sup>.

배 등<sup>4)</sup>은 점용접부의 잔류응력을 수치적으로 해석하여 피로강도에 미치는 영향을 평가하였으며, 양 등<sup>5)</sup>은 열 탄소 성 유한요소해석을 통하여 점용접부의 잔류응력이 피로강도

\* 주저자, 전북대학교 기계공학부 (yangsm@moak.chonbuk.ac.kr)

주소: 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

+ 전북대학교 기계항공시스템 공학부

++ 일본사이타마공업대학 기계공학과

평가에 미치는 영향을 예측하였다. 한편, 무기력계수에 관련하여 양 등<sup>6)</sup>은 무기력계수를 이용한 동적인장하중시 피로수명을 평가하였다. 또한 충돌시 인장강도특성에 영향을 미치는 하중속도효과를 규명하기 위한 연구로는 Campbell<sup>7)</sup> 및 백 등<sup>8)</sup>의 연구가 있다.

그러나 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 어려움이 많다. 특히 기하학적 구조에 따라 하중에 대한 동적특성이 달라지는 점용접 구조물의 피로수명을 평가하는 연구에 일률적으로 적용하기에는 무리가 따르며, 재료내부에 산재된 무기력계수를 이용하여 점용접부의 하중속도효과를 고려한 기초연구는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 점용접부의 하중속도변화에 따른 피로수명을 예측하는 방법에 관한 연구로 무기력계수와 유 등<sup>9)</sup>의 실험데이터와 비교하였다. 무엇보다도 점용접 구조물에서 발생하는 점용접부의 내구성 문제들은 해결하는 기초방안을 제시하며, 피로수명 실험회수 및 개발기간 단축 측면에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

## 2. 피로수명

무기력계수( $r$ )는 부재의 이력에 따라 그 속에 내포하는 결함의 물질 상수로 정의되며, 임의의 부재를 등가 정적 인장시험시 하중 속도에 따른 극한강도( $\sigma_u$ )와 파괴가 일어날 때까지의 하중시간( $t_u$ )을 산출하여 구하면 다음과 같다<sup>10)</sup>.

$$r = \frac{U_o}{\sigma_u} (1 - \eta) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\ln(\frac{t_u}{t_o})}{\frac{U_o}{kT}} \left( 1 - \frac{\ln\left[\left(\frac{U_o}{kT} - \ln\left(\frac{t_u}{t_o}\right)\right)\right]}{\ln\left(\frac{t_u}{t_o}\right)\left[1 - \left(\frac{U_o}{kT} - \ln\left(\frac{t_u}{t_o}\right)\right)^{-1}\right]} \right)$$

등가정적인장시험을 통해서 구한  $r, \sigma_u, t_u$ 를 이용하여 수명 산출과정은 다음 식을 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\int_0^r \frac{dt}{e^{\left(\frac{U_o - F(t)}{kT(t)}\right)}} = 1 \quad (2)$$

다음과 같이 변수 변환을 하면

$$wt = x, \quad 2\pi f = w, \quad dt = dx/w$$

이고, 수명식은 다음과 같이 적분이 된다.

$$\frac{2N}{t_o e^{\frac{U_o - \gamma\hat{\sigma}}{kT}}} \int_0^\pi e^{\frac{\gamma\hat{\sigma}\cos x}{kT}} dx/w$$

$$= \frac{2N}{t_o e^{\frac{U_o - \gamma\hat{\sigma}}{kT}}} \frac{\pi}{w} I_o\left(\frac{\gamma\hat{\sigma}}{kT}\right)$$

위 식에서 이들 확률을 모두 합하여 1이 되면 파손이 일어남을 뜻하므로 이때까지의 시간을 수명으로 한다. 그러므로 수명  $L$ 은

$$L = t_o e^{\frac{U_o - \gamma\hat{\sigma}}{kT}} / I_o\left(\frac{\gamma\hat{\sigma}}{kT}\right), \quad (\text{sec})$$

이며, 여기서 *Bessel Function*  $I_o$ 는

$$I_o\left(\frac{\gamma\hat{\sigma}}{kT}\right) = e^{\frac{\gamma\hat{\sigma}}{kT}} / \sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma\hat{\sigma}}{kT}}$$

이므로,

$$L = \sqrt{2\pi} t_o \sqrt{\frac{\gamma\hat{\sigma}}{kT}} e^{\left(\frac{U_o - \gamma(\hat{\sigma} + \hat{\theta})}{kT}\right)} \quad (3)$$

이다. (3)식의 지수함수에 포함되어 있는 응력들간의 관계와 무기력계수의 식을 이용하여 다음과 같이 변환한다. 즉,  $\frac{\sigma + \hat{\theta}}{\sigma_u} = \beta$ 과  $r = \frac{U_o}{\sigma_u} (1 - \eta)$ 를 이용하여 변환하면 다음과 같다.

$$L = \sqrt{2\pi} t_o \sqrt{\frac{\gamma\hat{\sigma}}{kT}} e^{\frac{U_o - U_o(1-\eta)\beta}{kT}}$$

피로수명시험은 시간이 많이 걸리게 되므로 적은 시료를 시험하여 이 결과에 따라 수명예측이나 신뢰성을 추정하지 않으면 안되며, 시료의 크기가 적고 산포가 크다. 따라서 위 식에서  $\beta$ 는 응력들간의 관계에서 변동응력수준이 정규분포상 2-시그마 한계( $2-\sigma$ )에 있을 확률 범위안에 있어야만이 실험수명에 근접하는 이론수명을 얻을 수 있다. 하지만 본

논문에 적용된 파단, 평균 및 변동응력의 값들의 관계는 이를 만족하지 못하므로 변동응력의 변화에 따라 이 범위를 만족시키도록 하는 확률변수를 (3)식에 적용하면 수명식은 다음과 같이 정리된다.

$$L = CP^5 \sqrt{\frac{\hat{\gamma}\hat{\sigma}}{kT}} e^{\frac{U_0 - U_0(1-\gamma)\beta}{kT}} \quad (4)$$

여기서

$C$  : 상수( $\sqrt{2\pi} \times 10^{-13} / e^{4.5}$ )

$P$  : 하중변환적응계수

점용접 부품의 개발과정에서 부품의 성능을 평가하기 위하여 오늘날은 가상공학(virtual engineering) 기술이 적용되기 시작하고 있다. 즉, 부품개발단계에서 자주 요구되는 피로강도특성 평가는 전적으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다양하게 설계변경대상의 부품에 대하여 상대적으로 평

가 될 수 있다.

### 3. 고찰

본 연구에서 사용된 SPC(일반냉연강판)에 대한 화학 및 기계적성질은 Table 1 및 2와 같으며, SPC를 이용한 용접 조건과 시편의 모양은 Table 3과 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서 등가정적인장시험은 Fig. 2와 같은 방법으로 유등<sup>9)</sup>의 피로시험과 동일한 조건 및 시편으로 실시하여 Fig. 3 과 같은 결과를 얻었으며, 이때 얻어진 수치데이터에서 그래프가 최고점에 달해 하강하기 시작하는 시점을 파단응력과 파단시간으로 정하고 그 데이터를 식(1)에 대입하여 무기력계수를 구하였고 이를 식(4)에 적용하였다.

Table 4는 무기력계수와 수명을 구하는 입력데이터를 나타내고 있다. Fig. 4는 인장시험 후 시편의 형상을 나타내고

Table 1 The chemical compositions of the SPC

Elements	wt.(%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Fe
Steel								
SPC( $1 \times 10^3$ )	43	19	424	79	7	26	47	Bal.

Table 2 The mechanical properties of the SPC

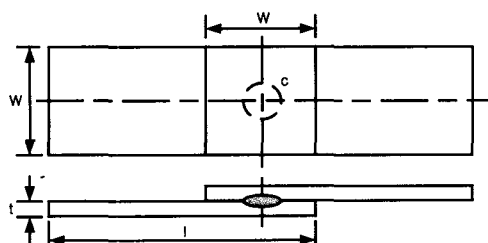
Properties	Tensile stress	Yield stress	Elongation
Steel	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)
SPC	372.4	196	40

Table 3 The welding conditions

Steel	Welding current (kA)	Electrode force (N)	Squeeze time (cycle)	Welding time (cycle)	Holding time (cycle)
SPC	10	2450	30	15	10

Table 4 Input data to obtain lethargy coefficient  $\gamma$  and number of stress cycles N

$T$	RT 300 K	$U_0$	418.4	kJ/mole
$t_o$	$10^{-13}$	$k$	$8.384 \times 10^{-3}$	kJ/mole · K
$t_u$	217.4 sec	$\sigma_u$	$0.1775 \times 10^{-9}$	MPa



$l$  : 100mm     $c$  : Spot welding center  
 $t$  : 1.0mm     $w$  : 30mm

Fig. 1 SPC specimen by spot welding

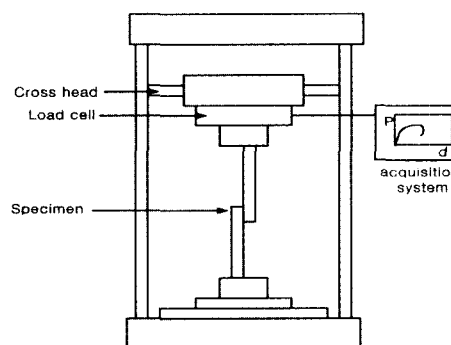


Fig. 2 The schematic diagram of quasi-static tensile shear test equipment

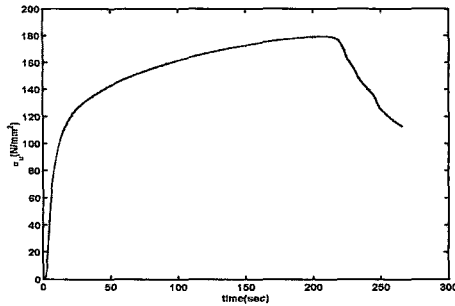


Fig. 3 The result of quasi-static tensile shear test



Fig. 4 The deformed shape of specimen quasi-static tensile shear test

있다. 본 연구의 이론 수명 평가의 기준인 유 등<sup>9)</sup>의 논문에서의 피로시험은 용량 10ton형 유압식 동적피로시험기를 이용하여 주파수 10 Hz, 응력비  $R = P_{min} / P_{max} \approx 0$ 에서 하중제어조건으로 실험을 실시하였으며, 이러한 조건을 본 연구에서도 동일하게 적용하여 수명식에 적용하였다.

Fig. 5는 10kA 인 시편에 대한 변동하중 작용시의 피로실험 수명과 본 논문에서 제시한 수명식(4)에 적용하여 예측한 수명을 나타내고 있으며 실험과 본 논문에서 예측한 파로수명이 거의 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 하중속도효과

자동차 차체와 같은 구조물은 하중속도가 변하는 동적하중을 계속적으로 받고 있기 때문에 차체 설계시 하중속도효과를 고려해야 하며 고속하중의 작용에 의한 동적효과를 등가의 정적 문제로 치환하는 근사적 접근방법으로 해결한다<sup>8)</sup>. 본 논문에서는 하중속도효과에 가장 영향을 끼치는 변형률속도를 고려하여 나타낸 Campbell의 동적 최종 인장응력의 계산식 (5)을 이용한다.

$$\frac{\sigma_{Td}}{\sigma_T} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (5)$$

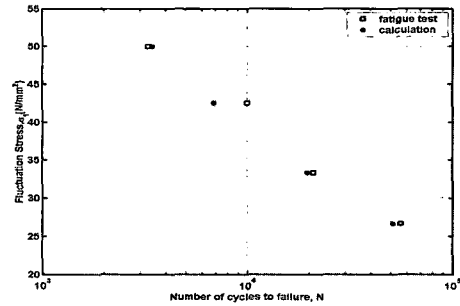


Fig. 5 The comparison of life cycle between the fatigue test and the calculation

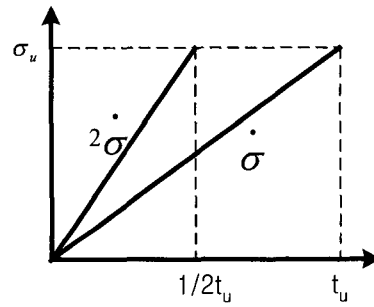


Fig. 6 The relationship between fracture time and loading speed

$\sigma_T$  = 최종인장응력

$\sigma_{Td}$  = 동적최종인장응력

식(5)에서  $D$  및  $q$ 는 동적인장시험결과로부터 결정되는 실험상수이다. 동적하중속도 효과를 고려하여 계산 수명을 검증할 필요가 있으며 식(5)에 적용하여 그 타당성을 검증한다. 즉, 시편에 대한 인장시험 결과를 본 논문에서 제시한 수명식(4)에 적용하여 수명을 계산하고 Fig. 6에 나타낸 것처럼 초기하중속도 ( $\dot{\epsilon}$ )에서 하중속도를 두배 ( $2\dot{\epsilon}$ )로 작용하였을 경우(파단응력일정, 파단시간 50% 감소)의 파단응력과 시간을 식(4)에 적용하여 수명을 계산한다.

그 다음으로 이에 대하여 동일한 조건으로 파단응력과 시간을 식(5)에 적용하여 동적 파단응력과 파단시간을 구하여 식(4)에 적용한다. Table 5는 하중속도가 두 배로 될 때의 파단응력, 시간 및 식(5)에 적용하여 구한 동적파단응력, 시간을 나타낸다. Fig. 7은 이에 대한 결과 그래프이며, 그림에서 보는 것처럼 하중 속도가 두 배로 될 경우 수명은 약 48% 감소함을 보이며 하중속도효과를 고려한 수명에도 거

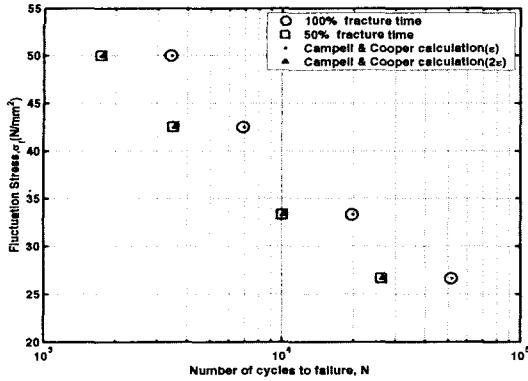


Fig. 7 Life cycle with loading speed effect compare to the result of Campell & Cooper calculation

의 일치함을 얻을 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 동적 하중이 작용시 점용접부의 피로수명을 예측함에 있어서 준정적 인장시험을 통해서 구한 무기력 계수를 이용하여 수명을 해석하였다. 하중속도효과를 고려한 수명과 실험 수명을 비교 평가하여 그 신뢰성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 피로에 의한 파단수명을 간단한 준정적 인장시험을 통해 파단시간과 파단응력을 측정, 무기력계수를 산출하여 수명을 예측할 수 있으며, 예측방법의 과정에서 시간과 비용을 절감할 수 있다.
- (2) 점용접부 초기설계시 하중속도효과 특성을 이용한 상대수명평가에 용이하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

### Nomenclature

- $t_u$  : fracture time, sec
- $t_o$  : life coefficient, sec
- $U$  : bonding energy, kJ/mole
- $k$  : boltzmann constant, kJ/mole · K
- $\hat{\sigma}$  : peak osc. stress, MPa
- $T$  : temperature, K
- $\gamma$  : lethargy coefficient, kJ/mole · mm/N
- $\sigma_u$  : ultimate strength, MPa
- $f$  : frequency, Hz
- $\sigma$  : mean stress, MPa

Table 5 The data to obtain fatigue life cycle N with the loading speed effect

$\sigma$	$t_u$	$\sigma_T$	Reduction in life (%)	Loading speed effect			
				$\epsilon$	$\sigma_{Td}$	Reduction in life (%)	$D$ $q$
$\sigma$	217.4	177.45	48.9829	$7.77 \times 10^7$	177.8578	48.6185	64883.91
$2\sigma$	108.7	177.45		$3.89 \times 10^7$	177.9578		

### 후 기

이 논문은 2001년도 전북대학교의 지원연구비에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

- (1) H.S. Yu, "A Study on Ultrasonic Test for Evaluation of Spot Weldability in Automotive Materials", KSME International Journal, Vol. 13, No.3, pp. 77 5~782, 1999.
- (2) 염동빈, 고준빈, 최병길, 이성구, 김엄기, "SPOT 용접을 이용한 알루미늄계 합금의 용접성 평가", 한국공작기계학회논문집, Vol. 11, No. 3, pp. 8~13, 2002.
- (3) 김덕중, "점용접 너깃부에서의 변형을 측정에 의한 피로균열성장 예측", 한국공작기계학회 1997년도 추계 학술대회논문집, pp. 140~145, 1226~8097, 1997.
- (4) 배동호, 손일선, "점 용접부의 용접잔류응력 해석과 피로강도평가", 한국자동차공학회 1999년도 춘계학술대회논문집, pp. 1226~8097, 1999.
- (5) Y.S. Yang, K.J. Son, S.G. Hong, S.K. Kim and K.H. Mo, "Effect of Residual Stress on Fatigue Strength in Resistance Spot Weldment", KSME International Journal, Vol. 25, No. 11, pp. 1713~1719, 2001.
- (6) S.M. Yang, H.Y. Kang, J.H. Song, S. J. Kwon and H.S. KIM, "Failure Life Prediction by Simple Tensile Test under Dynamic Load", Proceedings of the Ni- nth International Conference on Fracture, Sydney, Australia, April 1997.
- (7) J.D. Campbell and 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.

- (8) 백점기, 정상영, 백영민, “자동차용 고장력강 박판재의 동적/충격 인장강도에 관한 연구”, 한국자동차공학회 논문집, Vol. 7, No. 2, pp. 268~278, 1999.
- (9) 유효선, 이송인, 권일현, 안병국, “직류전위차법을 이용한 점용접부의 피로수명 평가”, 대한용접학회지, 제19권, 제2호, pp. 58~64, 2001.
- (10) 이병호, A General Theory on Fatigue Creep Life, Lec. at Univ Tokyo, 1982.