

국부변형률근사법을 이용한 차체 점용접부의 피로수명 예측에 관한 연구

이송인* · 권일현* · 이범준** · 유효선*
(2000년 3월 25일 접수)

A Study of Fatigue Life Prediction for Automotive Spot Weldment Using Local Strain Approach

Song-In Lee, Il-Hyun Kwun, Byum-Jun Lee and Hyo-Sun Yu

Key Words: Spot Welding(점용접), Fatigue Crack Initiation Life(피로균열개시수명), Local Strain Approach(국부변형률근사법), DC Potential Drop Method(직류전위차법)

Abstract

The fatigue crack initiation life is studied on automotive tensile-shear spot weldment made from cold rolled carbon steel(SPC) sheet by using DCPDM and local strain approach. It can be found that the fatigue crack initiation behavior in spot weldment can be definitely detected by DCPDM system. To predict the fatigue life of spot weldment, the local stresses and strains at the potential critical region are estimated by approximate method based on Neuber's rule and elastic-plastic FEM analysis. A satisfactory correlation between the predicted life obtained from Local strain approach based on Neuber's rule and experimental life can be found in spot weldment within a factor of 2.

1. 서 론

차체용 박판부재의 고온압접 방법의 하나로 점용접(spot welding)법이 많이 사용되고 있다. 그러나 직경 수 mm의 점상으로 용접되는 점용접부는 용접 시 발생하는 조직변화와 잔류응력, 응력집중 등으로 인하여 정적 인장-전단강도(static tensile-shear strength)에 큰 영향을 받게 된다.^(1,2) 특히 차체와 같이 반복적인 외력이 작용 시 피로균열의 주 발생원이 되는 점 용접부에 대한 피로강도 평가 및 수명예측은 구조물의 안전성 확보 및 수명연장에 매우 중요하다고 말할 수 있다.

최근 국내에서도 점용접부에 대한 실험적, 해석적 연구^(3~5)들이 활발히 수행되고 있어 많은 유용한 결과들이 얻어지고 있다. 본 연구는 점용접 실 구조물의 최적설계를 위한 기초자료로서 수명예측에 관한 절차나 그 결과에 대한 정보를 제공하고자 수행하였다.

일반적으로 노치나 흠을 지닌 부재의 피로균열개시수명을 예측하기 위해서는 부재의 국부적 취약영역이 겪는 변형률 조건을 노치 없는 평활 실험편에 적용시켜 피로수명을 예측하는 변형률-수명(strain-life) 방법이 이용된다.⁽⁶⁾ 이러한 변형률-수명 방법에서 기하학적 불연속부 선단에서 발생하는 국부응력과 국부변형률을 정확히 결정하는 문제는 피로수명 예측 시 매우 중요하다.

본 연구에서는 점용접부의 안전 수명 설계측면에서 피로균열의 개시거동에 주안점을 두고 차체용 재료로 널리 쓰이는 일반냉연강판(cold rolled carbon steel sheet)으로 제작된 점용접 시험편을 대상으로 피로실험을 수행하였다. 압접부 내면의

* 회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

E-mail : leesongin@hanimail.net

TEL : (063)270-2346 FAX : (063)270-2388

** 전북대학교 대학원 기계공학부

모재나 열영향부(HAZ)에서 발생하여 두께방향으로 관통 후 표면균열로 성장, 파단되는 점용접부의 균열거동 특성상 기존의 이동식현미경(travelling microscope) 등에 의하여 내부균열의 발생거동을 탐지하는 것은 곤란하다. 이에 본 연구에서는 균열진전에 따라 전기저항이 증대하여 발생하는 전위차를 이용하는 직류전위차법(DC potential drop method : DCPDM)을 이용하여 피로균열의 개시거동에 따른 수명을 평가하였다.

또한 인장-전단하중 및 굽힘으로 인한 응력집중과 소성변형에 의하여 발생하는 점용접부 너깃 선단의 국부응력(local stress)과 국부변형률(local strain)을 Neuber법칙과 탄-소성유한요소 해석을 통해 구한 후 이들을 국부변형률근사법(local strain approach)에 적용하여 점용접부의 피로균열 개시수명을 예측하였다. 이러한 예측결과는 피로 실험과 동시에 실시간적으로 DCPDM에서 평가된 시험편의 피로균열 개시수명과 비교, 고찰되어 본 예측방법의 신뢰성이 검토되었다.

2. 점용접부의 피로실험

2.1 시험편과 실험방법

본 연구에서 사용된 두께 1mm의 차체용 냉연강판의 화학적 조성과 기계적 성질을 Table 1에 수록하였으며, Table 2에는 용접조건을 나타내었다. 이 용접조건들은 5~13kA 범위의 용접전류조건에서 점용접된 시험편들을 대상으로 평가된 인장-전단강도와 너깃직경을 JIS에서 권장하는 적정값에 비교하여 얻은 최적의 용접조건이다. 점용접 시 전극은 산화 알루미늄 분산화동제 R형 돔(dome)식을 사용하였다.

피로시험편의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타내었다. 피로실험은 용량 10ton형 유압식 동적 피로 시험기를 이용하여 주파수, 10Hz, 응력비, R=0의 조건에서 하중제어(load control)방식으로 실시하였다. 점용접부 내부 피로균열의 개시거동을 평가하기 위하여 도입된 DCPDM의 시험장치와 시험편의 입출력 단자위치를 Fig. 2에 나타내었다. 이때 입력전류는 직류 전원공급기를 이용하여 5A로 하였고, 출력단자에서 얻은 전위차는 증폭과 필터링이 된 후 A/D converter를 거쳐 data acquisition system에 자동 기록되어 최종적으로 반복 cycle수에 대하여 plot 되었다.

Table 1 The chemical compositions and mechanical properties of base metal

(a) Chemical compositions (Fe bal.)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Al
0.043	0.019	0.424	0.079	0.007	0.026	0.047

(b) Mechanical properties

Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio(v)
296.84	56	194	0.3

Table 2 The spot welding conditions

Welding current (kA)	Electrode force(kg)	Squeeze time (cycle)	Welding time (cycle)	Holding time
8	250	30	15	10

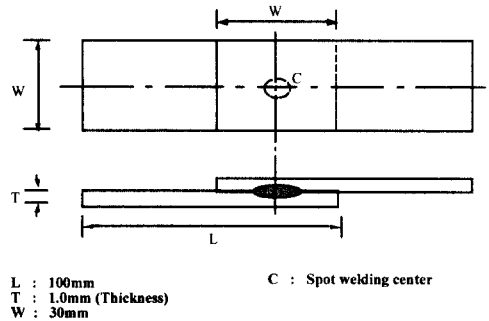


Fig. 1 The schematic diagram and dimensions of spot welded fatigue test specimen

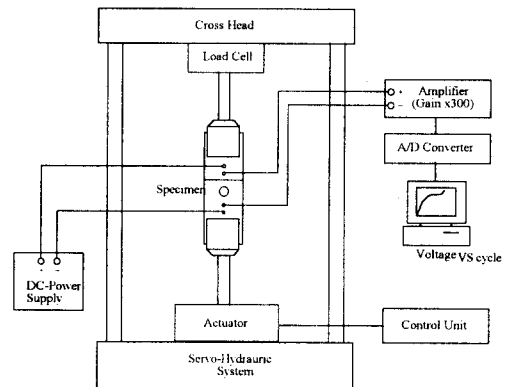


Fig. 2 Schematic diagram of fatigue test and DCPDM system

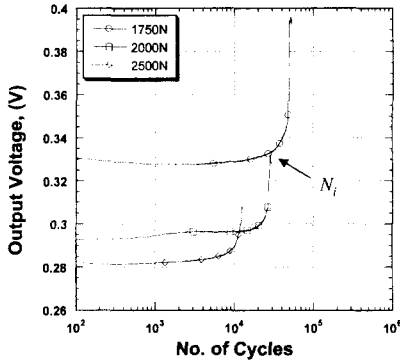


Fig. 3 DC potential drop curves with applied loads in spot weldment

2.2 피로실험

점용접 시험편에서 피로균열은 내부 접합면 선단 상·하판의 응력집중부에서 개시되어 시험편의 양 두께방향으로 관통된 후 외부 너깃둘레를 따라 전파되어 최종 파단되었다.

Fig. 3은 몇몇 하중조건에 따라 DCPDM에서 얻어진 결과로서 반복 cycle수에 따라 피로균열의 개시 및 전진거동을 나타낸 그림이다. 여기서 전위곡선상의 뚜렷한 변곡점을 관찰할 수 있으며, 이 변곡점에서의 반복 cycle수를 점용접부의 피로균열 개시수명, N_i 로 정의하였다(화살표 참조).

이 같은 피로균열의 개시거동을 확인하고자 피로실험 중 전위곡선상의 뚜렷한 변곡점이 발생될 때 시험을 중단한 후 Fig. 4와 같이 그 시험편의 횡단면을 절단하여 관찰하여 보았다. 너깃부 상하 선단부위에서 피로균열이 개시되고 있음을 볼 수 있어 DCPDM에 의하여 점용접부의 피로균열 개시거동을 효과적으로 탐지할 수 있음을 확인할 수 있다. 실험조건, 경험에 따라 차이는 있으나 일반적으로 피로균열 개시의 기준으로서 0.2~0.5mm 정도가 공학적으로 타당하다고 볼 때 Fig. 4에 나타난 0.3~0.6mm의 균열길이를 균열개시로 규정하는데 큰 무리는 없을 것으로 사료된다.

Fig. 5는 DCPDM에서 평가된 피로균열의 개시수명, N_i 와 최종 파단수명, N_f 를 함께 나타낸 그림이다. 여기서 N_i 는 발생된 균열이 진전하여 급격한 변형과 함께 파괴가 이루어지는 시점, 즉 내부 피로균열이 두께방향으로 관통된 후 점용접부 표면의 압흔 둘레의 약 1/4 크기로 성장되었을 때의 반복 cycle수로 정의하였다.



Fig. 4 Fatigue crack initiation behaviors in spot weldment

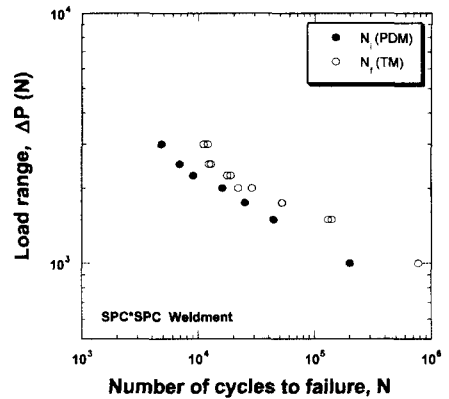


Fig. 5 The relationship between ΔP and number of cycles to failure

Table 3 The cyclic stress-strain and fatigue properties of SPC steel sheet

Type	σ'_f (MPa)	b	ϵ'_f	c	K' (MPa)	n'	K_t
CaseA	607	-0.099	0.125	-0.4	476	0.12	7.76
CaseB	641.8	-0.11	0.52	-0.6	720.4	0.18	7.76

3. 점용접부의 피로균열개시수명 예측

3.1 피로특성치 및 피로수명 예측식

점용접 재료의 반복 응력-변형률 특성값(cyclic stress-strain property)과 피로특성(fatigue property) 값들을 Table 3에 수록하였다.

여기서 σ'_f , b, ϵ'_f , c는 각각 피로강도계수 (fatigue strength coefficient), 피로강도지수(fatigue strength exponent), 피로연성계수(fatigue ductility coefficient), 피로연성지수(fatigue ductility

exponent)이며, K' , n' 은 각각 반복강도계수(cyclic strength coefficient), 반복 변형률경화지수(cyclic strain hardening exponent)이다. 이들 특성치들은 보통 시험 대상재로 제작된 실린더형의 평활 시편을 이용하여 변형률제어 저주기 피로실험(strain-controlled low cycle fatigue test)으로부터 얻어지나, 두께 1mm의 박판 시편형의 경우, 현재 피로특성치들을 얻기 위한 시험방법이 표준화되어 있지 않으며, 이 방면의 연구 및 실험데이터의 확보가 미흡한 사항이어서 직경 수 mm 점상의 미소 용접부위만의 피로특성치를 평가하거나 참고문헌에서 데이터를 얻는 것이 불가능한 실정이다. 그러나 점용접부의 피로강도에는 기하학적 형상, 압흔, 잔류응력, 재질 등의 여러 인자가 영향을 미칠 수 있으나, 후편을 제외하고 박판의 경우에는 그 강도가 기본적으로 너깃의 지름, 즉 응력집중의 정도에 크게 의존되는 것이 여러 논문^(7,8)에서 인정되고 있으며, 반복하중에 의하여 저하되는 잔류응력의 영향이나 야금학적 영향에 의한 피로강도의 저하는 상대적으로 미미한 것으로 알려지고 있다.⁽⁹⁾ 그러나 이 같은 용접부의 재질적 변화나 잔류응력의 영향을 완전히 배제할 수는 없으며 향후 피로수명에 미치는 이들의 영향이 정량적으로 검토되어야 할 것이다.

이러한 배경 하에서, 많은 시간과 경제적 부담, 제한된 영역에서 평가 절차상의 어려움이 수반되는 피로특성치의 직접 평가보다는 사용된 재료와 유사한 재료의 특성치를 발취하거나, 사용된 재료의 기계적 성질로부터 피로특성치들을 적절히 추정하여 수명을 예측하는 방법들이 이용되고 있다.⁽¹⁰⁾ 따라서 본 연구에서는 첫 번째 방법(case A)으로서 냉연강판의 재질과 거의 유사한 연강(mild steel)의 피로특성치들을 조사·발취하는 방법과, 두 번째 방법(case B)으로 재료의 인장강도, σ_U 로부터 σ_f' 과 b 를 결정하는 Mitchell⁽¹¹⁾의 방법(식 (1))과 공통경사법(method of universal slopes)에 의해 ϵ_f' 과 c 를 결정하는 Kikugawa,⁽¹²⁾ Manson⁽¹³⁾의 방법(식 (2))을 이용하여 피로특성치를 구하고 수명예측에 이용하였다. 즉,

$$\sigma_f' \cong \sigma_f \cong \sigma_U + 345(\text{MPa}), \quad b = -\frac{1}{6} \log\left(\frac{2\sigma_f}{\sigma_U}\right) \quad (1)$$

$$\epsilon_f' \cong 0.6\epsilon_f, \quad c = -0.6 \quad (2)$$

여기서, σ_f 는 진파피로강도(true fracture strength), ϵ_f 는 진파피로연성(true fracture ductility)이며 인장 실험에서 얻어진다. Table 3의 case A와 case B로 구분된 값들은 각각 이 두 방법에 의하여 얻어진 피로특성치들이며, case B에서 K' 과 n' 은 다음 식 (3)의 반복 응력-변형률 관계(cyclic stress-strain relation)와 식 (4)의 변형률-수명 관계(strain-life relation)로부터 식 (5)과 같이 얻어진다.⁽¹⁴⁾

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n'} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (4)$$

$$K' = \frac{\sigma_f'}{(\epsilon_f')^{n'}}, \quad n' = b/c \quad (5)$$

또한 피로수명 예측 시 평균응력 손상 파라미터(mean stress damage parameter)로서 폭넓게 이용되고 있는 식 (6)의 Morrow 식⁽¹⁵⁾과 식 (7)의 SWT(Smith, Watson, Topper) 식⁽¹⁶⁾이 적용되었다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{(\sigma_f' - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f (2N_f)^c \quad (6)$$

$$\sigma_{\max} \cdot \frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \cdot \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (7)$$

여기서 $\Delta\epsilon/2$ 은 변형률진폭(strain amplitude), σ_{\max} 은 최대응력(maximum stress), σ_m 은 평균응력(mean stress), N_f 는 피로수명이다.

3.2 국부응력 및 국부변형률의 평가

실제적으로 점용접부 내부 너깃부위의 국부적 특성치를 실험적으로 평가하는 것이 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 Neuber법칙과 탄-소성유한 요소해석이 이용되었다. 특히 Neuber법칙을 이용한 근사해석법이 수명예측 시 많이 적용되고 있으며 신뢰성 있는 예측결과가 얻어지고 있다.⁽¹⁴⁾ 공칭응력 범위, ΔS_N 과 공칭변형률범위, Δe 가 탄성한계내에 있다면 Neuber법칙은 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = (\Delta S_N \cdot K)^2 / E \quad (8)$$

Topper⁽¹⁸⁾ 등은 식 (8)을 반복 부하조건에 적용시키기 위하여 응력집중계수, K_t 를 피로노치계수 (fatigue notch factor), K_f 로 대체할 것을 제안하기도 하였으나, 본 연구에서는 많은 실험적 절차가 요구되고 점용접부에 적용이 곤란한 K_f 대신에 K_t 를 이용하였다. 점용접 시험편의 공칭응력과 탄-소성유한요소해석을 통해 얻어진 최대응력값을 이용하여 계산된 K_t 값을 Table 3에 수록하였다.

식 (8)의 Neuber hyperbola식과 반복 응력-변형률 곡선식, hysteresis 곡선식으로부터 국부응력, σ 와 국부변형률, ϵ , 이들 값의 범위(range), $\Delta\sigma$, $\Delta\epsilon$ 이 다음 식 (9), (10)과 같이 얻어진다.

$$\sigma \cdot \left[\frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n'} \right] = \frac{(K_t \cdot S_{Nmax} + \sigma_0)^2}{E} \quad (9)$$

$$\frac{(\Delta\sigma)^2}{2E} + \Delta\sigma \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{2K} \right)^{1/n'} = \frac{(K_t \cdot \Delta S_N)^2}{2E} \quad (10)$$

이 같은 절차로부터 얻어진 점용접 시험편의 국부응력과 국부변형률을 Table 4에 수록하였다.

Neuber법칙에서 얻어진 결과와의 비교, 검토를 통해 평가결과의 신뢰성을 확보하고자 탄-소성유한요소해석이 이루어졌다. 이때 ANSYS⁽¹⁹⁾ S/W가 이용되었으며 3차원 solid요소가 적용되었다. Meshing element의 과도한 distortion이 이루어지지 않는 조건하에서 결과의 수렴성, error의 분포 등을 고려하여 최대로 요소망을 세분하고 해석을 수행하였다. 또한 식 (3)으로부터 계산된 점용접 재료의 반복응력과 반복변형률이 Multi-linear kinematic hardening rule에 적용되었고, 재료의 반복 응력-변형률 관계는 case B에서 추정된 피로 특성치들을 이용하여 얻어졌다.

해석에 사용된 유한요소모델과 작용된 S_N 에 대한 등가응력선도(equivalent stress contour, MPa), 축방향으로 절개된 너깃부위의 등가소성변형률선도(equivalent plastic strain contour)를 Fig. 6에 함께 나타내었다. 이때 node수는 23,568개, element 수는 15,500개였다. 최대응력과 변형이 너깃의 선단부에서 발생하였으며, Fig. 4에서 관찰된 피로 균열의 개시부위와 잘 일치함을 알 수 있었다.

점용접부의 복잡한 3축 응력상태를 고려하여 내부 너깃선단부에서의 최대등가응력(maximum equivalent stress)이 최대국부응력으로 간주되었다. 국부변형률은 탄성 및 소성변형률의 합으로 계산

되었고, 국부응력과 국부변형률의 범위는 통상 반복 응력-변형률 관계의 2배로 표현되는 히스테리시스루프 관계를 이용하여 작용하중의 제하/부하단계에 따라 계산되었다. 이 같은 절차에 따라 얻어진 결과를 Table 5에 수록하였다.

먼저 Neuber법칙을 이용할 때, case A와 case B의 경우, σ_{max} 와 σ_m , $\Delta\epsilon/2$ 을 살펴보면, S_N 이 낮은 범위에서는 두 경우에서 거의 유사한 평가결과를 보이나, 49MPa 이상에서는 case B의 경우에서 σ_{max} 이나 σ_m 이 약간 높게 평가되었다.

Table 4 Local stresses and local strains obtained by using Neuber's rule

(a) Case A

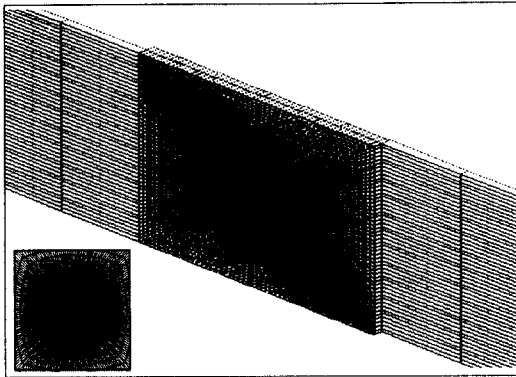
Nominal Stress, S_N (MPa)	Local strain, ϵ		Local stress, σ (MPa)	
	ϵ_{max}	$\Delta\epsilon / 2$	σ_{max}	σ_m
25.1	0.001124	0.000503	173.96	76.74
32.7	0.001679	0.000661	197.68	72.24
49.0	0.003280	0.001086	227.24	55.73
65.3	0.005377	0.001675	246.17	48.62
98.0	0.010940	0.003280	272.37	45.13

(b) Case B

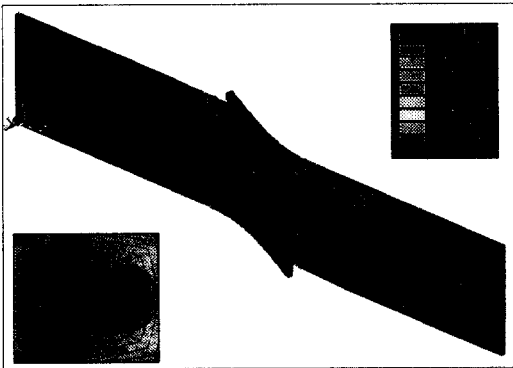
Nominal Stress, S_N (MPa)	Local strain, ϵ		Local stress, σ (MPa)	
	ϵ_{max}	$\Delta\epsilon / 2$	σ_{max}	σ_m
25.1	0.001167	0.000509	167.58	71.52
32.7	0.001704	0.000680	194.82	72.87
49.0	0.003176	0.001129	234.66	69.62
65.3	0.005038	0.001700	262.73	68.07
98.0	0.009814	0.003176	303.75	69.10

Table 5 Local stresses and local strains obtained by using elastic-plastic FEM analysis

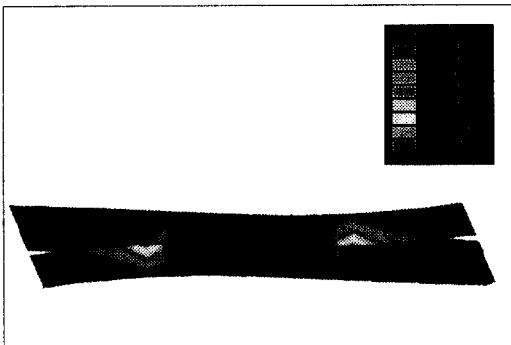
Nominal Stress, S_N (MPa)	Local strain, ϵ		Local stress, σ (MPa)	
	ϵ_{max}	$\Delta\epsilon / 2$	σ_{max}	σ_m
25.1	0.000948	0.000502	145.99	48.58
32.7	0.001391	0.000654	172.69	45.79
49.0	0.002744	0.000914	221.83	77.90
65.3	0.005265	0.001389	257.51	84.99
98.0	0.023230	0.002744	334.13	112.3



(a) Finite element model



(b) Deformed shape & equivalent stress contour



(c) Equivalent plastic strain contour in sectioned nugget region

Fig. 6 The finite element model, deformed shape and contour

한편, Table 5의 탄-소성 유한요소해석 결과는 Table 4(b)의 case B인 경우의 Neuber 법칙을 이용하여 평가된 결과와 비교할 때, 유한요소법에서 얻어진 결과가 Neuber 법칙에 의한 평가결과

보다 작게 나타난 $\Delta\epsilon/2$ 의 경우를 제외하고 나머지는 전반적으로 유한요소법에 의한 해석결과가 저응력 영역에서는 더 낮고 고응력 영역에서는 더 크게 나타났으나 그 차이는 작았다. 그러나 98MPa인 경우, 유한요소해석결과에서 과도한 국부변형률값을 보이고 있는데, 이는 K_t 를 이용하여 S_N 으로부터 국부응력과 변형률을 근사적으로 평가하는 Neuber 법칙에 비하여 유한요소해석의 경우는 너깃선단의 입체영역에서 높은 인장-전단 하중에 의한 과도한 굽힘과 같은 변형의 영향 등이 고려된 결과로 사료된다.

4. 수명예측 결과 및 고찰

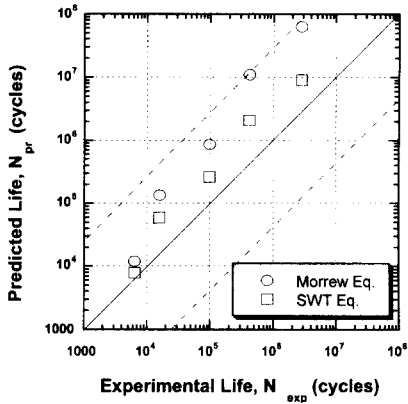
Fig. 7은 Neuber방법에서 얻어진 국부응력과 국부변형률을 이용하여 예측된 피로수명과 DCPDM 으로부터 얻어진 실험수명과의 관계를 나타낸 그림이다. Case A에 비하여 case B의 경우가 약 2.5 배의 작은 오차범위로 예측수명과 실험수명이 일치하고 있다.

특히 case A에서는 Morrow식과 SWT식 모두 실험수명보다 더 크게 수명이 예측됨으로서 비보수적(non-conservative)인 위험한 예측결과를 보이 나, case B에서 SWT식을 이용할 때, 예측수명과 실험수명은 약 2배 이내의 작은 오차범위에서 보수적(conservative)인 예측결과를 보여주고 있다.

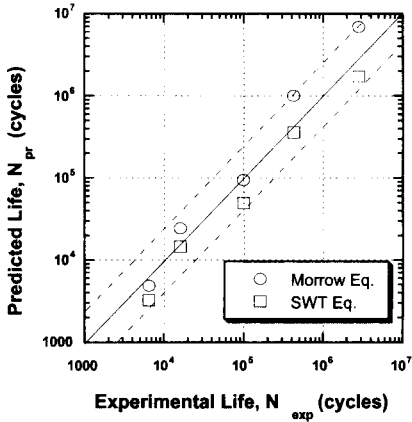
탄-소성유한요소해석에서 얻어진 국부응력과 국부변형률을 수명예측에 이용한 경우를 Fig. 8에 나타내었다. 유한요소해석 시 case B의 경우가 적용되었으므로 Neuber 법칙을 이용한 Fig. 7의 case B의 결과와 비교해 볼 때 더 큰 오차범위를 보이고 있으며, S_N 이 가장 큰 경우를 제외하고 대체적으로 비보수적인 예측결과를 보이고 있다.

이상의 수명예측결과를 살펴볼 때, Neuber법칙을 적용한 case B의 경우에서 SWT식을 이용함으로써 가장 적은 오차범위로 안전한 예측결과를 얻을 수 있었다. 점용접 재료(SPC)와 유사한 재질로 선정된 연강의 피로특성치를 이용하는 case A에 비하여 점용접 재료의 인장특성치로부터 피로특성치들을 추정하는 case B의 경우에서 대상 재료의 기계적 특성이 어느 정도 수명예측에 직접적으로 반영될 수 있었기 때문으로 사료된다.

또한 σ_m 을 도입하여 피로강도에서 응력비에



(a) Case A



(b) Case B

Fig. 7 Predicted fatigue based on Neuber's rule versus experimental life

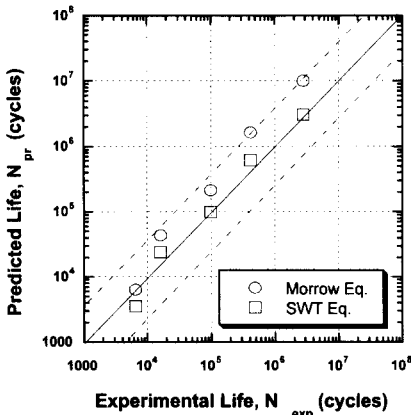


Fig. 8 Predicted based on elastic-plastic FEM analysis versus experimental life

따른 평균응력의 영향을 고려한 Morrow 식보다 SWT 식의 경우, $\Delta\epsilon/2$ 에 $\Delta\sigma/2$ 와 σ_m 의 함으로 표현되는 σ_{max} 를 수명 예측에 적용함으로써 더 향상된 수명예측 결과를 가져왔다.

한편, 본 연구에서 적용된 국부변형률근사법을 이용하면 시간적, 경제적인 측면에서 효과적으로 실제 점용접 구조물의 피로수명 예측이 가능할 것으로 사료된다. 즉, 외력에 의하여 실 구조물(차량)의 점용접 부위에 작용하는 공칭응력이 사전에 파악되고 대상재료의 피로특성치에 대한 정보가 구비되어 있다면 점용접부의 임계영역에서 발생하는 국부적인 응력과 변형률이 Neuber법칙이나 탄-소성유한요소해석에 의하여 추정되고 이 결과로부터 실 부재의 피로수명이 예측될 수 있을 것이다.

그러나 점용접 구조부재의 피로강도에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 너트의 직경 및 너트선단 내부 접합부의 미시균열, 상·하판 간의 접합간극 등에 따른 응력집중계수(피로노치계수)의 정확한 계산과, 용접으로 인한 조직변화와 잔류응력이 고려된 정확한 피로특성치들의 평가가 선행되어야 하며, 수명예측결과에 미치는 이들 영향의 기여 정도가 고려됨으로서 신뢰성 있는 수명예측이 가능하리라 보여진다.

5. 결론

차체용 냉연강판으로 제작된 단일 점용접 시험편을 대상으로 DCPDM과 국부변형률근사법을 이용하여 피로균열의 개시수명을 평가, 예측하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 점용접 시험편의 내부에서 발생하는 피로균열의 개시거동이 DCPDM에 의하여 효과적으로 탐지될 수 있었다.
- (2) Neuber법칙과 탄-소성유한요소법을 이용하여 점용접부 너트선단의 국부응력과 국부변형률이 평가되었으며 고하중영역을 제외하고 두 방법에서 거의 유사한 평가결과를 얻었다.
- (3) 점용접부 모재의 기계적 특성치로부터 추정된 피로특성치와 Neuber법칙을 통해 평가된 국부응력과 국부변형률을 SWT식에 적용하여 약 2배의 적은 오차범위로 피로균열 개시수명의 보수적인 예측이 가능하였다.
- (4) 국부변형률근사법에 의한 점용접부의 피로균

열 개시수명 예측 시 피로특성치는 예측 결과에 큰 영향을 미쳤으며, 응력집중계수(피로노치계수)의 정확한 평가, 용접에 의한 재질적 변화와 잔류응력의 고려를 통해 실기 점용접 구조물의 신뢰성 있는 피로수명 예측이 가능할 것으로 기대한다.

참고문헌

- (1) Hyo-Sun Yu, 1999, "A Study on Ultrasonic Test for Evaluation of Spot Weldability in Automotive Materials," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 11, pp. 775~782.
- (2) 서창민, 강성수, 1988, "고장력 강판과 아연 도금 강판간의 점용접 피로특성," 대한기계학회 논문집, 제12권, 제4호, pp. 747~754.
- (3) 이형일, 이태수, 김남호, 2000, "점용접 시편의 극한하중과 피로특성에 관한 실험적 고찰," 대한기계학회논문집 A, 제24권, 제1호, pp. 38~51.
- (4) 박장원, 이태수, 채수원, 2000, "점용접부 최적 설계를 위한 적응적 유한요소망의 구성," 대한기계학회논문집 A, 제24권, 제7호, pp. 1763~1770.
- (5) 손일선, 이범노, 배동호, 홍정균, 2000, "잔류응력을 고려한 점용접 이음재의 피로설계," 대한기계학회논문집 A, 제24권, 제3호, pp. 743~751.
- (6) Barsom, J. M and Rolfe, S.T., 1983, *Fracture and Fatigue Control in Structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 223~249.
- (7) Pollard, B., 1982, Fatigue Strength of Spot Welds in Titanium-bearing HSLA Steels, SAE Paper 820284.
- (8) Lawrence, F. V., 1983, "An Empirical Method for Estimating the Fatigue Resistance of Tensile-shear Spot-welds," SAE Paper 830035.
- (9) 高橋, 伊藤, 矢崎, 1971, 鐵と鋼, Vol. 57, No. 9.
- (10) 河在宣, 宋智浩, 李時中, 1988, "變動荷重下の疲勞壽命 豫測," 大韓機械學會論文集, 第 12卷, 第 4號, pp. 747~754.
- (11) Mitchell, M. R., 1954, *Fundamentals of Modern Fatigue Analysis for Design, Fatigue and Microstructure*, ASM, pp. 385~437.
- (12) Kikugawa, M., Jono, M., Kamata, T., Song, J. and Himuro, H., 1977, "Low-Cycle Fatigue under Varying Strain Conditions(Effects of the Mean Plastic Strain and the Stress Factor)," *Bulletin of the JSME*, Vol. 20, No. 140, pp. 145~152.
- (13) Manson, S. S., 1965, "Fatigue : A Complex Subject-Some Simple Approximations," *Experimental Mechanics*, Vol. 5, No. 7, pp. 193~226.
- (14) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. J., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey 07632, pp. 59~64.
- (15) Morrow, J., 1968, *Fatigue Design Handbook*, Advance in Engineering, Vol. 4, Society of Automotive Engineers Warrendale, Pa, Sec. 3.2, pp. 21~29.
- (16) Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. M., 1970, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals," *Journal of Materials*, Vol. 5, No. 4, pp. 767~778.
- (17) Neuber, H., 1961, "Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatic Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress - Strain Law," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 544~550.
- (18) Topper, T. H., Wetzell, R and Morrow, J., 1968, "Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens," *J. Materials*, Vol. 4, No. 2, pp. 200~209.
- (19) Koknke, P. E., 1997, *ANSYS Theoretical Manual*, Swanson Analysis Systems Inc., Houston, Pennsylvania.