

국부변형률근사법을 이용한 차체 점용접부의 피로수명 예측에 관한 연구

이승인* · 나성훈** · 나의균*** · 유효선*

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

Song-In Lee, Sung-Hun Na, Eui-Gyun Na, 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 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. The local stresses and strains are estimated by elastic-plastic FEM analysis and the alternative approximate method based on Neuber's rule were applied to predict the fatigue life of spot weldment. A satisfactory correlation between the predicted life and experimental life can be found in spot weldment within a factor of 4.

1. 서론

차체용 박판부재의 고온압접 방법의 하나로 점용접(spot welding)법이 많이 사용되고 있다. 그러나 직경 수 mm의 점상으로 용접되는 점용접부는 용접시 발생하는 조직변화와 잔류응력, 응력집중 등으로 인하여 정적 인장-전단강도(static tensile-shear strength)에 큰 영향을 주게 된다⁽¹⁾. 특히 자동차 구조물이 동적 구조물이므로 반복적인 외력이 작용시 피로균열의 주 발생원인인 점 용접부에 대한 피로강도 평가 및 수명예측은 구조물의 안전성 확보 및 수명연장에 매우 중요하다고 말할 수 있다.

일반적으로 구조부재의 피로수명은 피로균열의 개시수명(fatigue crack initiation life)과 전파수명

(fatigue crack propagation life)의 합으로 구성된다. 이중 노치나 흠을 지닌 부재의 피로균열 개시수명을 예측하기 위해서는 그 부재의 국부적인 취약영역이 겪는 변형률조건을 노치 없는 평활 실린더형 시험편에 적용시켜 피로수명을 예측하는 변형률-수명(strain-life) 방법이 이용된다⁽²⁾. 이러한 변형률-수명 방법에서 기하학적 불연속부의 선단에서 발생하는 국부응력과 국부변형률을 정확히 결정하는 문제는 피로수명 평가 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 하중제어(load control) 피로실험을 수행하였다. 압접부 내면의 모재부나 열영향부(HAZ)에서 발생하여 두께방향으로 관통 후 표면균열로 성장, 파단되는 점용접부의 균열거동 특성상 기존 이동식현미경(travelling microscope)에 의한 내부균열의 발생거동 탐지가 곤란하므로 본 연구에서는 피로실험과 동시

* 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

** 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

*** 군산대학교 기계공학부

에 직류전위차법(DC potential drop method : DCPDM)을 이용하여 피로균열의 개시거동에 따른 수명을 평가하였다.

또한 인장-전단하중 및 굽힘으로 인한 응력집중과 국부적인 소성변형에 의하여 발생하는 점용접부 너갯선단의 국부응력(local stress)과 국부변형률(local strain)을 Neuber의 방법과 탄-소성유한요소 해석을 통해 구한 후 국부변형률근사법(local strain approach)에 적용하여 점용접부의 피로균열 개시수명을 예측하였다. 이러한 예측결과는 피로실험 시 DCPDM에서 평가된 시험편의 피로균열개시수명과 비교, 고찰되어 본 예측방법의 신뢰성이 검토되었다.

2. 점용접부의 피로실험

2.1 시험편과 실험방법

본 연구에서 사용된 두께 1mm의 차체용 냉연강판의 화학적조성과 기계적 성질을 Table 1에 수록하였으며, Table 2에는 용접조건을 나타내었다. 용접 시 사용된 전극은 산화알루미나 분산강화동인 R형 돔(dome)식을 사용하였다. 피로시험편의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타내었다.

피로실험은 용량 10ton형 유압식 동적 피로시험기를 이용하여 주파수, 10Hz, 응력비, $R=0$ 의 조건에서 하중제어로 실시하였다. 점용접부 내부 피로균열의 개시거동을 실시간적으로 평가하기 위하여 도입된 DCPDM의 시험장치와 시험편의 입출력 단자위치를 Fig. 2에 나타내었다. 이때 입력전류는 직류 전원공급기를 이용하여 5A로 하였고, 출력단자에서 얻은 전위차는 증폭된 후 필터링된 후 A/D converter를 거쳐 Data acquisition system에 자동 기록되어 최종적으로

Table 1 The chemical compositions and mechanical properties of base metals.

(a) Chemical composition. (Fe bal.)

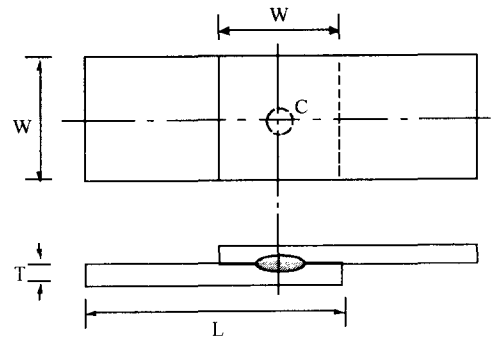
C	Si	Mn	P	S	Ni	Al
0.043	0.019	0.424	0.079	0.007	0.026	0.047

(b) Mechanical properties.

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

Table 2 The welding conditions used in this study.

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



L : 100mm
T : 1.0mm (Thickness)
W : 30mm
C : Spot welding center

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

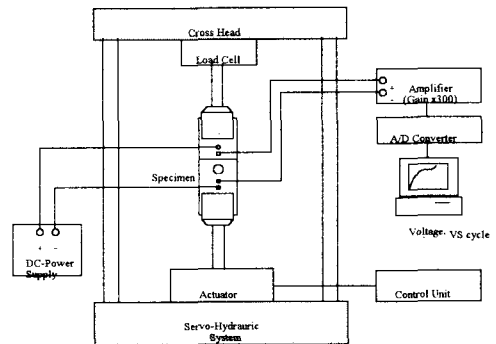


Fig. 2 Schematic diagram of fatigue test equipment and DCPDM system.

로 반복 cycle수에 대하여 plot 되었다.

2.2 피로실험 결과

Fig. 3은 8kA의 용접전류조건에서 몇몇 하중조건에 따라 DCPDM에서 얻어진 결과로서 반복 cycle수에 따라 피로균열의 개시 및 진전거동을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 전위폭선상의 뚜렷한 변곡점을 관찰할 수 있으며, 이 변곡점에서의 반복 cycle수를

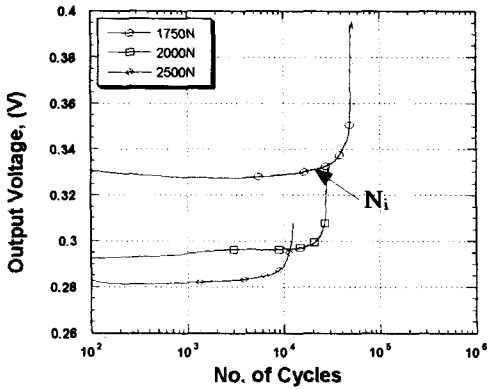


Fig. 3 DC potential drop curves with applied load in spot weldment welded in 8kA.

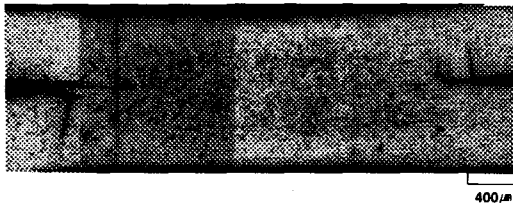


Fig. 4 Fatigue crack initiation behaviors in spot weldment.

점용접부의 피로균열 개시수명(N_i)으로 정의하였다. 이와 같은 전위곡선상의 피로균열 개시거동을 직접 확인하기 위하여 피로실험 시 전위곡선상의 뚜렷한 변곡점이 발생할 때 시험을 중단한 후 Fig. 4와 같이 그 시험편의 횡단면을 절단하여 관찰하여 보았다.

Fig. 4에서 가장 큰 응력이 발생할 것으로 예상되는 너겟부 상하 선단부위에서 피로균열이 개시되고 있음을 볼 수 있어 DCPDM에 의하여 점용접부 내부 피로균열의 개시거동을 효과적으로 탐지할 수 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5는 DCPDM에서 평가된 피로균열의 개시수명, N_i 와 피로균열이 개시 전과되어 최종 파단되었을 때의 수명 N_f 를 부하된 하중범위에 따라 함께 나타낸 그림이다. 여기서 N_f 는 내부 피로균열이 두께방향으로 관통된 후 점용접부 표면의 압흔 둘레의 약 1/4 크기로 성장되었을 때의 피로cycle수로 정의하였다.

3. 점용접부의 피로균열개시수명 예측

3.1 피로특성치 및 피로수명 예측식

점용접부의 피로수명 예측 시 필요한 시험재료의

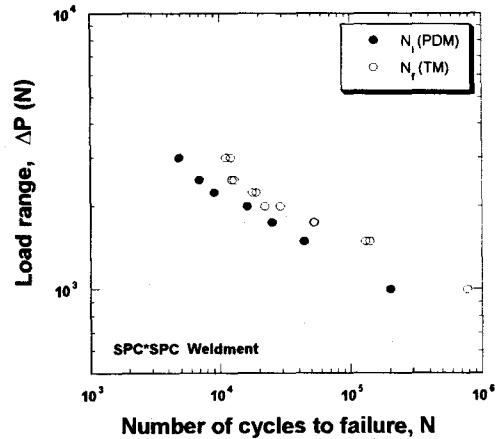


Fig. 5 The relationship between ΔP and number of cycles to failure.

Table 3 The fatigue properties of SPC sheet.

σ'_f (MPa)	b	ϵ'_f	c	K' (MPa)	n'	K_f
607	-0.099	0.125	-0.4	476	0.12	8.13

반복 응력-변형률 특성치(cyclic stress-strain property)와 피로특성치(fatigue property)들을 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 반복 강도계수(cyclic strength coefficient), 반복 변형률 경화지수(cyclic strain hardening exponent)이다. 이들 특성치들은 보통 시험대상재료로부터 채취된 실린더형의 매끈한 시험편을 이용하여 변형률제어 저주기 피로실험(strain-controlled low cycle fatigue test)을 수행하여 얻어지나, 본 연구에서 사용된 두께 1mm의 박판 형상의 시험편의 경우, 현재 피로특성치들을 얻기 위한 시험방법이 표준화되어 있지 않으며, 직경 수 mm 점상의 미소 용접부위만의 피로특성치를 평가하는 것이 불가능하므로, 본 연구에서는 냉연강판의 재질과 거의 유사한 연강(mild steel)의 피로특성치들을 조사·발췌하여 수명예측에 이용하였다. 또한 피로수명예측 시 일반적으로 많이 이용되고 있는 다음 식(1)의 Basquin-Manson 식⁽³⁾, 평균응력 손상파라미터(mean stress damage parameter)로서 폭넓게 이용되고 있는

식(2)의 Morrow 식⁽⁴⁾과 식(3)의 SWT(Smith, Watson, Topper) 식⁽⁵⁾이 수명예측에 적용되었다.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (1)$$

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

$$\sigma_{\max} \cdot \frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \cdot \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (3)$$

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

3.2 국부응력 및 국부변형률의 평가

일반적으로 공칭하중에 따른 국부응력과 국부변형률을 평가하기 위해서는 실험적인 방법과 근사해석법, 유한요소법 등이 이용된다. 이중 실험적인 방법 및 절차의 어려움과 복잡한 유한요소 해석절차 등의 요인으로 인하여 Neuber법칙을 이용한 근사해석법이 많이 쓰이고 있으며 신뢰성 있는 예측결과들이 얻어지고 있다⁽³⁾.

실제적으로 점용접부의 내부 너겟선단의 국부변형률을 실험적으로 평가한다는 것은 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 Neuber법칙을 이용한 근사해석법과 탄-소성유한요소해석을 이용하여 얻어진 결과를 기반으로 점용접부의 피로균열개시수명을 예측하였다. 공칭응력 범위, ΔS 와 공칭변형률 범위, $\Delta \epsilon$ 가 탄성한계내에 있다면 Neuber법칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁶⁾.

$$\Delta \sigma \cdot \Delta \epsilon = (\Delta S \cdot K_t)^2 / E \quad (4)$$

Topper⁽⁷⁾등은 식(4)를 반복 부하조건에 적용시키기 위하여 K_t 를 피로노치계수(fatigue notch factor), K_f 로 대체할 것을 제안하기도 하였으나, 본 연구에서는 평가 시 많은 실험적 절차를 요구하는 K_t 대신에 K_f 를 이용하였으며 탄성해석을 통해 얻어진 K_t 값을 Table 3에 수록하였다.

식 (4)의 Neuber hyperbola식과 잘 알려진 반복 응

력-변형률(cyclic stress-strain) 곡선식, hysteresis 곡선식으로부터 국부응력, σ 와 국부변형률, ϵ , 이들 값의 범위(range), $\Delta \sigma$, $\Delta \epsilon$ 이 다음 식 (5), (6)과 같이 얻어진다.

$$\sigma \cdot \left[\frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n'} \right] = \frac{(K_t \cdot S_{\max} + \sigma_0)^2}{E} \quad (5)$$

$$\frac{(\Delta \sigma)^2}{2E} + \Delta \sigma \cdot \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{(K_t \cdot \Delta S)^2}{2E} \quad (6)$$

여기서 구해진 $\Delta \sigma$ 와 $\Delta \epsilon$ 은 식 (1), (2), (3)의 피로수명예측식에 대입되어 수명이 구해지게 된다. 이 같은 절차로부터 얻어진 점용접시험편의 국부응력과 국부변형률을 Table 4에 수록하였다.

Neuber법칙에서 얻어진 결과와의 비교, 검토를 통해 평가결과의 신뢰성을 확보하고자 탄-소성유한요소해석을 통해 점용접부의 국부응력과 국부변형률이 계산되었다. 유한요소해석 시 ANSYS 프로그램이 이용되었으며 3차원 solid요소가 적용되었다. 해석에 사용된 유한요소모델과 작용하중에 의한 변형상태를 Fig. 6에 나타내었다.

점용접재료의 반복 응력-변형률 관계식으로부터 계산된 반복응력과 반복변형률이 Multi-linear kinematic hardening rule에 적용되어 유한요소해석이 수행되었다.

점용접부에서 가장 큰 응력과 변형률이 발생될 것으로 예상되는 내부 너겟선단부에서의 최대주응력(maximum principal stress)이 점용접부의 최대 국부응력으로 간주되었다. 이때 국부변형률은 탄성변형률과 소성변형률의 합으로 계산되었다. 이들 국부응력과 국부변형률의 범위는 통상 반복 응력-변형률 관계의 2배로 표현되는 히스테리시스 루프 관계를 이용하여 작용하중의 제하 및 부하단계에 따라 계산되었다. 이 같은 절차에 따라 얻어진 결과를 Table 5에 수록하였다.

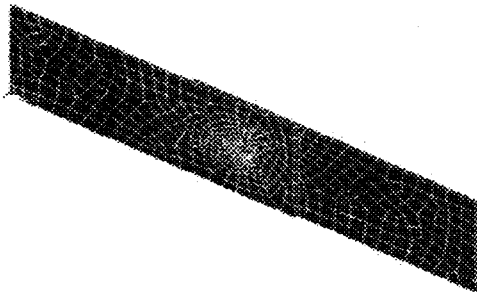
국부변형률의 경우, Neuber 법칙에 의거한 평가결과는 탄-소성유한요소해석에 얻어진 결과에 비하여 약 20~45% 가량 더 큰 평가결과를 보여주고 있다. 특히, 작용하중이 커질수록 Neuber 법칙의 적용 시 더 과도한 평가결과를 나타내고 있다. 그러나 평균응력의 크기는 탄-소성유한요소해석의 경우가 상대적으로 큰 값을 보이고 있어 이를 고려한 수명예측 시 그 결과에 많은 영향을 끼칠 것으로 예상된다.

Table 4 Local stress and local strain obtained by using Neuber's rule.

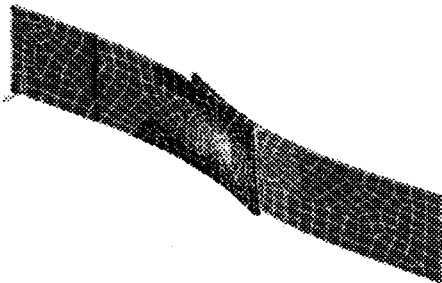
Nominal Stress, S_N (MPa)	Local strain, ϵ		Local stress, σ (MPa)	
	ϵ_{max}	$\Delta\epsilon/2$	σ_{max}	σ_m
25.1	0.0012	0.00053	178.5	76.8
32.7	0.0018	0.00069	201.4	70.5
49.0	0.0036	0.00116	230.4	54.2
65.3	0.0058	0.00181	249.2	47.9
98.0	0.0119	0.00355	275.4	45.0

Table 5 Local stress and local strain 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	0.00097	0.00058	188.5	75.7
32.7	0.00128	0.00063	243.9	121.1
49.0	0.00205	0.00094	350.7	168.4
65.3	0.00317	0.00127	431.5	189.9
98.0	0.00657	0.00201	551.1	138.4



(a) Finite element model.



(b) Deformed shape.

Fig. 6 The finite element model and deformed shape of spot welded specimen.

4. 수명예측 결과 및 고찰

Fig. 7은 Neuber방법으로부터 얻어진 국부응력과 국부변형률을 이용하여 예측된 피로균열개시수명과 DCPDM으로부터 얻어진 피로수명과의 관계를 직접 비교하여 나타낸 그림이다. Basquin-Manson 식이나 Morrow의 제안식에 비하여 SWT 식이 실험수명과 약 4배 이내의 오차범위에서 더 근접한 예측결과를 보이고 있다. 또한 Basquin-Manson 식이나 Morrow 식으로부터 얻어진 예측결과를 살펴볼 때, 작용응력의 크기가 낮은 영역에서 예측오차가 다른 영역에서 보다 훨씬 더 크음을 알 수 있으나, Morrow 식의 경우 식(2)와 같이 식(1)의 Basquin-Manson식의 탄성항에 평균응력, σ_m 을 도입함으로써, 응력비($R=0$)에 따른 피로수명에서 평균응력의 영향이 큰 저하중 영역에서의 예측오차를 줄일 수 있었으나 여전히 실험수명과는 큰 예측오차를 보이고 있다. 그러나 SWT 식의 경우에는 전 하중영역에서 실험수명과 비교하여 현저히 향상된 예측결과를 나타내고 있다. 즉, σ_{max} 를 수명예측식에 적용함으로써 가장 양호한 예측결과를 보이고 있다.

탄-소성유한요소해석을 통해 얻어진 국부응력과 국부변형률을 수명예측에 이용한 경우의 예측결과를 Fig. 8에 나타내었다. Neuber 법칙을 이용한 Fig. 7의 결과와 비교하여 약간 더 큰 오차범위를 보이고 있으나 3가지 수명예측식에 대하여 거의 유사한 형태의 예측결과를 보이고 있음을 볼 수 있다. 특히, SWT식을 이용할 경우에는 약 3배 이내의 오차 범위에서 본 연구에서 가장 양호한 예측결과를 보이고 있다.

그러나 Fig. 7과 8에서 예측된 피로수명들은 가장 높은 하중조건에서 SWT식을 적용하여 예측된 경우를 제외하고 실험수명보다 더 큰 비보수적(nonconservative)인 예측결과를 보이고 있어 이들 결과들을 기반으로 한 점용접구조물의 설계 시 더 많은 실험데이터의 확보와 아울러 수명예측방법의 개선이 요구된다.

또한 피로수명평가 대상부재의 수명예측 시 부재를 구성하는 재료의 피로특성치 및 피로노치계수(응력집중계수)는 그 결과에 매우 큰 영향을 미치므로 신뢰성 있는 수명예측을 위해서는 용접부위만을 대상으로 재질적 특성을 고려한 정확한 피로특성치의 평가가 선행되어야 하며, 이를 위한 새로운 평가방법의 개발이 필요하다.

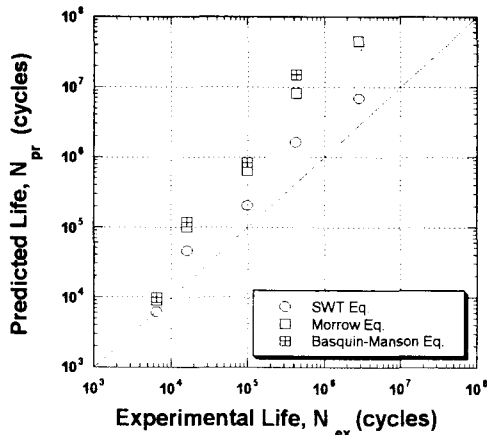


Fig. 7 Predicted fatigue crack initiation life based on Neuber's rule versus experimental life.

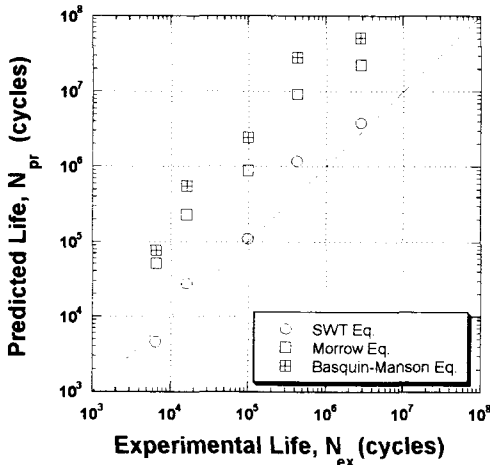


Fig. 8 Predicted fatigue crack initiation life based on elastic-plastic FEM analysis versus experimental life.

5. 결론

차체용 냉연강판으로 제작된 점용접 시험편을 대상으로 DCPDM을 이용한 실험적 방법과 Neuber 법칙 및 탄-소성유한요소법에 의한 국부응력과 국부변형률 해석결과로부터 피로균열의 개시수명을 평가, 예측하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. DCPDM에 의하여 점용접부 내부에서 발생되

는 피로균열의 개시수명을 효과적으로 평가할 수 있었다.

2. 예측된 점용접부의 피로균열 개시수명은 DCPDM에서 얻어진 실험수명과 비교하여 비보수적 (nonconservative)인 예측결과를 나타내었다.

3. Basquin-Manson 식이나 Morrow 식에 비하여 SWT 식을 이용하여 얻어진 예측수명은 약 4배 이내의 적은 오차범위에서 실험수명과 적절한 상관관계를 보였다.

4. 국부변형률근사법에 의한 피로수명 예측 시 임계영역의 용접에 의한 재질적 변화 및 피로특성치, 피로노치계수의 정확한 평가가 선행되어야 하며, 이를 통해 점용접 구조물에 대한 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) Barsom, J. M and Rolfe, S.T., 1983, Fracture and Fatigue Control in structures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 223-249.
- (3) 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.
- (4) Morrow, J., 1968, Fatigue Design Handbook, Advance in Engineering, Vol. 4, Society of Automotive Engineers Warendable, Pa, Sec. 3.2, pp.21~29.
- (5) 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.
- (6) Neuber, H., 1961, Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatic Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress - Strain Law, Journal of Applied Mechanics.
- (7) Topper, T. H., Wetzal, R and Morrow, J., 1968, "Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens", J. Materials, Vol. 4, No. 2, pp. 200~209.