

알루미늄 합금판 저항 점용접부의 피로수명 예측

장 건 익* · 안 병 국** · 김 동 건**

*전주공업대학 기계과

**전북대학교 공과대학 신소재공학부/신소재개발연구센터

Fatigue Life Prediction for Resistance Spot Weldment of Aluminum Alloy Sheet

Keon-Yik JANG*, Byung-Guk AHN** and Dong-Keon KIM**

*Department of Mechanics, Jeonju Technical College, Chonju 560-760, Korea

**Faculty of New Materials Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

Abstract

The fatigue life is predicted on tensile-shear spot weldment made from Al-Mg alloy sheet with thickness of 0.8mm using Mitchell's method and uniform material law by Bäumel and Seeger based on local strain approach. The fatigue properties of critical HAZ region are estimated from the tensile property using simple hardness method. To predict the fatigue life of spot weldment, the local stresses and strains at the potential critical region are estimated by Neuber's rule. The predicted fatigue life based on uniform material law using HAZ's material properties provides good results within a factor of 3, conservatively.

(Received February 22, 2002)

Key Words : Resistance spot welding, Fatigue life, Local strain approach, Neuber's rule, Aluminium alloy sheet

1. 서 론

두께 3mm 이하 박판부재의 고온 압접방법의 하나로 저항 점용접법이 많이 사용되고 있다. 이러한 저항 점용접은 높은 생산성과 신뢰성, 안전성 측면에서 다른 방법에 비해 우수한 접합성능을 보이기 때문에 현재 자동차, 철도차량과 같은 각종 수송기계, 그리고 가전제품에 이르기까지 폭넓게 적용되고 있다. 특히 최근 연비향상을 위한 차체의 경량화 문제가 자동차 업계에 대두되면서 기존의 냉연강판이나 아연도금강판의 대체 재료로서 알루미늄 합금의 적용이 활발히 검토되고 있다.

알루미늄 합금은 철강에 비하여 전기저항이 1/4 정도 작고, 열전도율이 3배 정도 높기 때문에 점용접 시 용접전류를 3배 이상 높이고, 용접시간도 1/3 이상 줄여야 한다. 또한 산화막의 전기저항이 높아 전극 가압력이 커야 하고, 전극재료와 알루미늄의 저항 차이가 작아 전극오염(pick-up)이 발생하기 쉬우며, 고온에서 급격히 연화하므로 점용접 압흔부의 깊이가 큰 단점이

있다. 그러나 폭넓은 수요 때문에 국내외적으로 알루미늄 합금의 용접성과 용접변수, 용접기 등에 대한 관련 연구¹⁻³⁾가 활발히 진행되고 있으며 많은 유용한 결과들이 얻어지고 있다.

한편 직경 수 mm의 점상으로 결합되는 점용접부는 용접 시 발생하는 조직변화와 잔류응력, 특히 매우 심한 응력집중이 발생하는 취약한 구조적 특성 등으로 인하여 낮은 피로강도(fatigue strength)를 갖게 된다. 따라서 차체와 같이 동적인 외력이 반복적으로 작용할 때, 피로균열의 주된 발생원이 되는 용접부에 대한 피로강도 평가 및 수명예측은 차체 점용접 구조물의 신뢰성 확보 및 수명연장에 매우 중요하다. 그러나 현재 기존의 일반 강구조물에 대한 피로수명 예측 관련 연구에 비하여 점용접부의 수명예측에 관련된 연구는 그 중요성에도 불구하고 매우 미약한 실정이다.

대부분의 점용접 부재에서 피로균열은 너깃(nugget) 선단부 근방의 모재(base metal)나 열영향부(heat affected zone, 이하 HAZ)에서 발생하여 두께방향으로 관통 후 표면균열로 성장, 파단되는 양상을 보이게

된다. 따라서 점용접부의 피로수명은 가장 큰 응력집중이 발생하는 너깃 선단부에서의 균열발생 수명(crack initiation life)과 발생한 균열이 박판의 두께 방향으로 성장하여 박판 외표면의 너깃둘레를 따라 성장하는 균열전파 수명(crack propagation life)으로 구분될 수 있다. 균열발생 수명의 경우에는 일반적으로 잘 알려진 Basquin이나 Morrow의 수명식이 이용되고 있으며, 균열전파 수명의 경우에는 Pook⁴⁾가 제안한 점용접부의 응력확대계수를 Paris 식 등이 이용되어 수명을 예측할 수 있다.

점용접부의 피로수명 예측에 관하여는 점용접 시험의 응력집중계수(stress concentration factor)를 구한 후 Neuber 법칙에 의해 점용접부의 국부응력(local stress)과 국부변형률(local strain)을 구하여 평균응력(mean stress)을 고려한 Morrow 식에 이를 적용하여 피로수명을 예측한 결과를 보고한 Oh⁵⁾의 연구, 점용접부의 피로수명을 너깃 선단에서의 균열개시 수명과 두께방향으로의 균열전파 수명 그리고 폭방향으로의 균열성장 후 최종 파단까지의 균열전파 수명의 3단계로 구분하여 예측된 수명과 실험결과를 비교한 McMahon 등⁶⁾의 연구가 보고되고 있다. 또한 Lee 등⁷⁾은 Neuber 법칙과 탄소성 유한요소해석에 기반을 둔 국부변형률근사법(local strain approach)을 이용하여 냉연강판 점용접 시험편의 피로수명을 예측하고 직류전위차법(DC-potential drop method)을 통해 평가한 시험편의 피로균열 발생수명과 비교, 평가한 결과를 보고하였다.

점용접부의 피로수명 예측과 관련한 연구결과들을 살펴볼 때, 점용접부의 피로수명 예측결과에 큰 영향을 미치는 너깃 선단부 HAZ에서의 국부응력 및 변형률, 응력집중계수, 피로특성값(fatigue property) 등을 실험적으로 평가하는데에는 큰 어려움이 수반되므로 이론적, 해석적 방법들이 주로 적용되고 있으며 너깃선단의 임계영역에 대한 국부적인 거동에 주목하고 있음을 알 수 있다. 그러나 대부분의 연구에서 용접열에 의하여 모재와는 재질적, 기계적 거동이 다른 너깃이나 HAZ의 특성은 수명예측 시 거의 고려되지 않고 있다.

이러한 배경하에서 본 연구에서는 점용접부의 안전수명 설계측면에서 균열의 발생거동에 주목하여 자동차 본넷과 트렁크 리드 등의 내판에 적용이 검토되고 있는 5000계열의 알루미늄 합금 판재로 제작된 점용접부에 대한 피로수명을 예측하고자 한다. 이를 위하여 너깃선단의 HAZ에서 개시되는 점용접부의 피로균열 발생 특성을 고려하여 이들 취약부위에서의 미소경도(micro-

hardness)값으로부터 HAZ의 대표적인 기계적 특성을 추정하였다. 이 결과로부터 수명예측 대상부위의 피로 특성치들을 다시 추정하는 방법을 통해 용접부의 재질적 특성을 고려한 신뢰성 있는 수명예측 결과를 얻고자 하였다. 이러한 절차를 통해 얻어진 피로특성값들을 고려하여 점용접부 너깃선단의 국부응력과 국부변형률을 Neuber 법칙을 통해 구한 후 이들을 국부변형률근사법에 적용하여 점용접부의 피로수명이 예측되었다. 이러한 예측결과는 피로실험을 통해 얻어진 점용접 시험편의 피로수명과 비교, 고찰되어 본 예측방법의 신뢰성이 검토되었다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료 및 용접조건

본 연구에서 사용된 5000계열 Al-Mg계 합금판(두께 0.8mm)의 화학적 조성과 기계적 성질을 Table 1에, 점용접조건과 그에 따라 측정된 너깃직경을 Table 2에 나타내었다. 점용접 시 전극은 크롬동(99%Cu- 1%Cr) 제로서 선단경이 6mm인 DR형을 사용하였으며, 용접기는 용량 150kV의 단상 AC용접기를 이용하였다.

2.2 피로시험 및 경도특성

점용접부 피로시험편의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타

Table 1 The chemical compositions and mechanical properties of base metal

(a) Chemical compositions (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.11	0.12	0.18	4.56	0.04	0.01	0.01	bal.

(b) Mechanical properties

Tensile strength, σ_U (MPa)	Elongation e , (%)	Young's modulus, E (MPa)	Poisson's ratio, ν
275.38	26	70,560	0.3

Table 2 The spot welding conditions and nugget diameter

Welding current (kA)	Electrode force (kg)	Squeeze time (cycle)	Welding time (cycle)	Nugget diameter (mm)
22	252	4	6	5.5

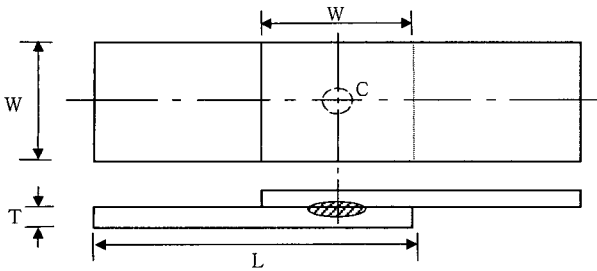


Fig. 1 The schematic diagram and dimensions of spot welded fatigue test specimen (L=100 mm, W=40mm, T=0.8mm, C=Nugget)

내었다. 피로시험은 유압식 동적 피로시험기(용량 10ton)를 이용하여 주파수 25Hz, 하중(응력)비 R=0.1의 조건에서 하중제어(load control)방식으로 실시하였다.

점용접 시험편에서 피로균열은 내부 너깃 선단 상·하판의 응력집중부에서 개시되어 시험편의 두께방향으로 관통된 후 시험편 외표면의 너깃둘레를 따라 전파되어 최종 파단되었다. 실제적으로 점용접부의 내부 압접 선단부에서 개시·전파되는 피로균열의 거동을 실험적으로 명확히 탐지하는 것은 매우 곤란하다. 따라서 Yu⁸⁾ 등은 직류전위차법을 사용하여 내부균열의 개시와 전파거동을 평가한 결과를 보고하고 있으나, 본 연구에서는 일반적인 점용접부에 대한 피로수명의 정의, 즉, JIS⁹⁾에서 규정된 바와 같이 내부 압접부 선단에서 발생된 균열이 두께방향으로 관통하여 시험편의 외부표면으로 돌출된 후 외부 압흔 지름 정도의 크기로 성장되었거나, 균열의 성장 후 급격한 변형과 함께 파단되었을 때의 하중 반복수를 피로수명으로 규정, 평가하였으며 이러한 결과들은 예측된 수명과 비교, 검토되었다.

재료의 대표적인 재료특성으로서 비교적 측정이 간단한 경도 특성으로부터 수명예측 대상부위의 기계적 특성을 추정하기 위하여 점용접 시험편의 너깃부를 포함한 HAZ 단면에 대하여 미소비커스 경도를 측정하고 그 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 이때 미소비커스 경도계를 이용하여 300g의 하중을 가한 후, 너깃 중심으로부터 모재쪽으로 시험편의 단면을 따라 일정한 간격으로 경도가 측정되었다. 모재에 비하여 용융후 응고된 너깃부의 경도가 크게 나타나는 탄소강의 경도특성에 비하여 알루미늄 합금 판재 점용접부의 경우에는 용융부(fusion zone)나 모재에 비하여 용융선(fusion line)을 포함한 HAZ의 경도값이 약간 상회하고 있다. 이때 너깃 선단부로부터 떨어진 거리(r)가 1mm 이내인 영역은 HAZ로서 피로균열의 발생부위로 예상되므로 이 부위에 대한 평균경도값은 다음 식 (1)과 같은 비커스 경도-인장강도 관계식¹⁰⁾에 적용되어 수명예측 대상부위에 대한 인장강도가 추정될 수 있다.

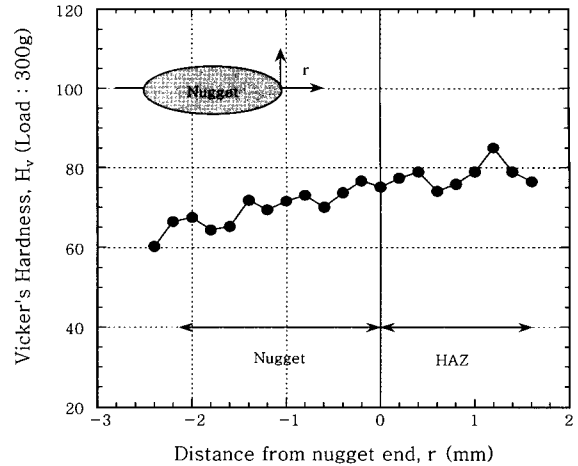


Fig. 2 Distribution of Vicker's hardness for 0.8t Al alloy sheet spot weldment

$$\sigma_U [MPa] = 2.38(1 - n) \left(\frac{12.5n}{1 - n} \right)^n H_V \quad (1)$$

여기서, σ_U 는 인장강도이고, n 은 변형경화지수로서 강과 알루미늄은 0.2~0.3 정도의 값을 갖는다¹¹⁾고 알려져 있으며, 본 연구에서는 0.2로 결정하였다. 식 (1)에 의하여 추정된 알루미늄 합금판 점용접부의 HAZ에 대한 H_V 값은 약 76.7로서 이로부터 얻어진 σ_U 값은 183.41MPa이었으며 Table 1(b)에 수록된 모재의 σ_U 값에 비하여 34%의 감소를 보였다.

3. 점용접부의 피로수명 예측

3.1 피로특성치 및 피로수명 예측식

일반적으로 피로파괴는 노치(notch)나 응력집중부와 같은 취약한 부위에서 발생되므로 이들을 내포한 구조물의 피로균열 발생수명을 예측하기 위해서는 국부 영역이 겪는 변형률 조건을 노치 없는 매끄러운 실린더형 시험편(smooth cylindrical-specimen)에 적용시키는 변형률 제어 저주기 피로시험(strain-controlled low cycle fatigue test)으로부터 피로수명을 예측하는 변형률-수명(strain-life) 방법이 주로 이용된다¹²⁾. 반복적인 하중의 영향을 받게 될 때, 재료의 응력과 변형률 응답은 저주기 피로시험에서 얻어지는 히스테리시스 곡선으로부터 식 (2)와 같은 반복 응력-변형률 관계(cyclic stress-strain relationship)식으로 나타낼 수 있다. 또한 피로수명은 탄성변형률에 의한 수명과 소성 변형률에 의한 수명의 합으로서 다음 식 (3)과 같은 변형률-수명 관계(strain-life relationship)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n'} \quad (2)$$

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

여기서,

- σ_f' = 피로강도계수(fatigue strength coefficient),
- b = 피로강도지수(fatigue strength exponent),
- ϵ_f' = 피로연성계수(fatigue ductility coefficient),
- c = 피로연성지수(fatigue ductility exponent),
- K' = 반복강도계수(cyclic strength coefficient),
- n' = 반복 변형률경화지수(cyclic strain hardening exponent).

이러한 변형률-수명 방법을 이용할 때 기하학적 불연속부 선단에서 발생하는 국부응력과 국부변형률을 정확히 결정하는 문제는 피로수명의 예측 시 매우 중요하다. 특히 점용접부의 경우, 용접 시 발생하는 저항발열로 인하여 발생하는 압접부 선단의 HAZ는 조직변화와 함께 높은 응력집중이 야기되어 피로균열이 발생하는 취약부위로서 모재와 기계적 특성과 피로특성값이 다르다. 따라서 점용접부의 피로수명 예측 시 이들 임계영역의 고유한 재질적 특성을 고려해 주어야만 신뢰성 있는 수명예측 결과를 확보할 수 있다. 그러나 주로 점용접이 적용되는 박판의 경우, 현재 변형률-수명 방법에 의한 피로수명의 예측 시 반드시 필요한 피로특성값들을 얻기 위한 시험방법이 표준화되어 있지 않아 관련 데이터의 확보가 불가능한 실정이다.

한편 점용접부의 피로강도에는 용접조건, 형상, 너짓지름, 잔류응력, 재질 등의 여러 인자가 영향을 미칠 수 있으나, 박판의 경우에 피로강도는 너짓지름과 관련된 응력집중의 크기에 크게 의존된다고 알려져 있다^{13,14)}.

따라서 본 연구에서는 대상 재료의 기계적 성질로부터 피로특성치들을 추정하여 수명을 예측하는 방법을 이용하였으며, 용접에 의한 잔류응력의 영향은 고려하지 않았다. 즉, 첫 번째 방법(method A)으로서 알루미늄 합금 모재와 HAZ의 인장강도, σ_U 로부터 σ_f' 과 b 를 결정하는 Mitchell¹⁵⁾의 방법[식 (4)]과 공통경사법(method of universal slopes)에 의해 ϵ_f' 과 c 를 결정하는 Kikugawa,¹⁶⁾ Manson¹⁷⁾의 방법[식 (5)]을 이용하여 피로특성치를 구하고 수명예측에 이용하였다.

즉,

$$\sigma_f' \cong \sigma_f \cong \sigma_U + 345(MPa), \quad b = -\frac{1}{6} \log\left(\frac{2\sigma_f}{\sigma_U}\right) \quad (4)$$

$$\epsilon_f' \cong 0.6\epsilon_f, \quad c = -0.6 \quad (5)$$

여기서, σ_f 는 진파괴강도(true fracture strength), ϵ_f 는 진파괴연성(true fracture ductility)이며 인장 시험에서 얻어진다. 그러나 ϵ_f 의 경우에는 관련 데이터의 확보가 어려우므로 본 연구에서는 SAE의 technical report¹⁸⁾에 수록된 유사재료의 특성값을 참조하여 결정하였다.

또한 K' 과 n' 은 식 (2)의 반복 응력-변형률 관계와 식 (3)의 변형률-수명 관계로부터 식 (6)과 같이 얻어진다¹⁹⁾.

$$K' = \frac{\sigma_f'}{(\epsilon_f')^{n'}}, \quad n' = b/c \quad (6)$$

이러 수명예측 대상재료의 피로특성값을 얻기 위한 두 번째 방법(method B)으로서 알루미늄과 티타늄 합금에 대하여 다음 식 (7)과 같이 Bäumel과 Seeger에 의해 제안된 Uniform material law²⁰⁾가 이용되었다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 1.67 \cdot \frac{\sigma_U}{E} (2N_f)^{-0.095} + 0.35 \cdot (2N_f)^{-0.69} \quad (7)$$

이상의 절차를 거쳐 얻어진 특성값들을 이용하여 점용접부의 피로수명이 예측되었으며, 이때 평균응력 손상 파라미터(mean stress damage parameter)로서 폭넓게 이용되고 있는 식 (8)의 Morrow 식²¹⁾과 식 (9)의 SWT(Smith, Watson, Topper) 식²²⁾이 적용되었다. 이때 method A를 통해 얻어진 특성값들은 식 (8)과 (9)에 그대로 적용될 수 있으나, method B의 경우에는 식 (7)의 우변의 첫 번째 항에서 $[1.67 \cdot \sigma_U]$ 값은 σ_f' 로, 그 외의 관련 계수 및 지수들은 각각 b, ϵ_f', c 로 간주되어 수명예측식을 구성하게 된다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{(\sigma_f' - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (8)$$

$$\sigma_{\max} \cdot \frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \cdot \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (9)$$

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

상기의 두가지 방법에 따라 추정, 결정된 모재와 HAZ의 반복 응력 변형률 특성값(cyclic stress-strain property)과

피로특성(fatigue property)값들을 Table 3에 수록하였다. 여기서 모재의 경우에는 Table 1(b)의 σ_U 로부터, HAZ의 경우에는 비커스 경도값으로부터 추정된 σ_U 로부터 주요 피로특성값들이 평가되었다.

3.2 국부응력 및 국부변형률의 평가

반복적인 하중을 받는 기계나 구조물의 피로수명은 노치나 구멍과 같은 취약부위에서의 국부적인 응력이나 변형률에 크게 영향을 받는다. 따라서 이들 구조물의 피로수명을 신뢰성 있게 예측하기 위해서는 실험적, 해석적 방법 등을 통해 임계영역의 국부응력과 국부변형률을 먼저 평가하여야 한다.

점용접부와 같은 구조적으로 취약한 구조물의 피로강도에 영향을 미치는 내부 너짓 선단부의 국부응력 및 국부변형률을 실험적인 방법으로 평가하는 것이 어렵기 때문에 본 연구에서는 Neuber 법칙을 이용한 근사적 해석법이 이용되었다. Neuber 법칙은 일반적으로 노치와 같은 불연속부에 의해 응력이 집중되어 취약해지는 구조물의 피로수명 예측 시 많이 적용되고 있으며 신뢰성 있는 예측결과가 얻어지고 있다¹⁹⁾.

일정한 진폭의 공칭응력 이력(nominal stress history)을 받고 있는 공칭응력 범위(nominal stress range), ΔS_N 과 공칭변형률 범위(nominal strain range), $\Delta \epsilon (= \Delta S_N/E)$ 가 탄성한계 내에 있다면 Neuber 법칙은 이들의 관계를 식 (10)과 같이 나타낸다²³⁾. 여기서 E 는 영 계수(Young's modulus)이다.

$$\Delta \sigma \cdot \Delta \epsilon = (\Delta S_N \cdot K_t)^2 / E \quad (10)$$

일반적으로 식 (10)을 반복적인 부하조건에 적용시키기 위하여 응력집중계수(K_t) 대신에 피로노치계수(fatigue notch factor, K_f)를 사용하는 Topper²⁴⁾ 등의 제안법이 적용되고 있으나, K_f 를 실험적으로 평가하는 데는 많은 어려움이 수반되며, 또한 Peterson²⁵⁾의 제안식을 이용할 경우에도 제안식에 포함된 노치반경(r) 항을 점용접 시험편에 대하여 명확히 정의하는 것이 곤란하므로 본 연구에서는 K_t 를 이용하였다. 부과된 일정하중에 의하여 점용접 시험편에 발생하는 공칭응력(nominal stress, S_N)과, 유한요소해석을 통해 얻어진 최대 등가응력(maximum equivalent stress, σ_{eq})값을 이용하여 계산된 K_t 값을 Table 3에 수록하였다. 여기서 공칭응력(S_N)은 점용접 시험편의 작용된 일정하중(P)을 시험편 양끝단의 단면적($W \cdot T$)으로 나누어 계산하였다. 점용접 시험편의 응력해석을 위한

Table 3 The cyclic stress-strain and fatigue properties of Al alloy sheet spot weldment

Type		σ'_f (MPa)	b	ϵ'_f	c	K' (MPa)	n'	K_t
Method A	B.M	620.38	-0.1089	0.4	-0.6	732.7	0.1816	8.05
	HAZ	528.35	-0.1268	0.4	-0.6	641.22	0.2113	
Method B	B.M	459.88	-0.095	0.35	-0.69	531.41	0.1377	8.05
	HAZ	306.29	-0.095	0.35	-0.69	353.93	0.1377	

유한요소모델을 Fig. 3에 나타내었다. 유한요소 해석 프로그램은 상용 ANSYS가 이용되었으며, 3차원 solid 요소가 적용되었다. 먼저 직경 5.5mm, 두께 0.8mm의 너짓을 포함하는 상판을 모델링한 후 volume 생성 기능을 통해 동일형상의 하판을 추출시켜 상·하판의 너짓부에 대하여 상호 일체화되어 결합되도록 하였다. 이때 절점수는 20,306개, 요소수는 6,784개였다.

식 (10)의 Neuber hyperbola 식과 식 (2)의 반복응력-변형률 곡선식으로부터 다음 식 (11)과 같이 국부응력(σ)과 국부변형률(ϵ)이 얻어지며, 식 (10)의 Neuber hyperbola 식과 식 (12)의 hysteresis 곡선식으로부터 σ 와 ϵ 의 범위 즉 $\Delta \sigma$, $\Delta \epsilon$ 이 다음 식 (13)과 같이 얻어진다.

$$\sigma \cdot \left[\frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n'} \right] = \frac{(K_t \cdot S_{Nmax})^2}{E} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (12)$$

$$\frac{(\Delta \sigma)^2}{2E} + \Delta \sigma \cdot \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{(K_t \cdot \Delta S_N)^2}{2E} \quad (13)$$

모재의 인장특성 및 경도특성으로부터 얻어진 HAZ

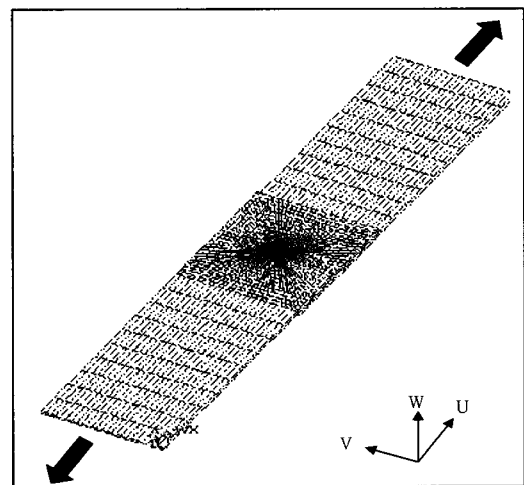


Fig. 3 3-dimensional finite element model

의 기계적 특성값과 피로특성값들을 적용하여 상기 절차에 따라 점용접부에 발생하는 국부응력과 국부변형률을 평가하고 그 결과를 Table 4와 Table 5에 수록하였다. 이러한 결과들은 피로수명 예측식인 식 (8)과 (9)에 모재 또는 HAZ의 재질적 특성을 각기 고려한 경우로 구분, 적용되어 수명예측 결과가 비교, 검토된다.

Table 4는 알루미늄 합금 판재의 모재 및 HAZ의 재질적 특성을 method A에 각각 적용시켜 평가된 점용접부의 국부응력과 국부변형률값들을 수록한 것으로, 국부변형률의 경우에는 모재보다 HAZ의 재질특성을 고려한 경우가 더 높게 나타났으나 국부응력의 경우에

는 모재의 재질특성을 이용하는 경우가 더 높게 나타났다. 이러한 경향은 Table 5의 method B를 적용시킨 경우에도 동일하게 나타났다. 또한 전반적으로 국부변형률의 경우, method A에 비하여 method B를 적용하는 경우에서 더 높게 나타났으나, 국부응력의 경우에는 method B의 경우가 더 낮았다. 본 연구에서 피로수명 예측식으로서 적용된 식 (8)과 (9)에서 볼 수 있는 바와 같이 예측결과는 국부변형률 진폭 및 국부응력 값의 크기에 크게 좌우되므로 적용방법에 따른 이들 값들의 차이는 이후의 수명예측 결과에 큰 영향을 미치게 됨을 예상할 수 있다.

Table 4 Local stresses and local strains of Al alloy sheet spot weldment from method A based on Neuber's rule

(a) Using base metal material property

Max./Min. nominal stress, S_N (MPa)	Local strain, ϵ		Local stress, σ (MPa)	
	ϵ_{max}	$\wedge \epsilon/2$	σ_{max}	σ_m
45.9/4.59	0.00734	0.00247	263.80	105.00
42.9/4.29	0.00662	0.00228	255.16	105.37
39.8/3.98	0.00593	0.00210	245.75	105.42
36.8/3.68	0.00527	0.00193	235.53	104.98
33.7/3.37	0.00465	0.00175	224.20	103.83
30.6/3.06	0.00407	0.00159	211.60	101.69
27.6/2.76	0.00353	0.00142	197.56	98.27
24.5/2.45	0.00303	0.00126	181.62	93.18
21.4/2.14	0.00258	0.00110	163.60	86.12
20.1/2.01	0.00239	0.00103	154.92	82.32

(b) Using HAZ material property

Max./Min. nominal stress, S_N (MPa)	Local strain, ϵ		Local stress, σ (MPa)	
	ϵ_{max}	$\wedge \epsilon/2$	σ_{max}	σ_m
45.9/4.59	0.00895	0.00278	216.58	75.36
42.9/4.29	0.00804	0.00254	209.92	75.06
39.8/3.98	0.00718	0.00230	202.78	74.77
36.8/3.68	0.00636	0.00208	195.19	74.44
33.7/3.37	0.00558	0.00187	186.93	74.02
30.6/3.06	0.00484	0.00167	177.93	73.41
27.6/2.76	0.00415	0.00148	168.09	72.45
24.5/2.45	0.00351	0.00130	157.05	70.90
21.4/2.14	0.00292	0.00112	144.59	68.42
20.1/2.01	0.00267	0.00105	138.50	66.89

Table 5 Local stresses and local strains of Al alloy sheet spot weldment from method B based on Neuber's rule

(a) Using base metal material property

Max./Min. nominal stress, S_N (MPa)	Local strain, ϵ		Local stress, σ (MPa)	
	ϵ_{max}	$\wedge \epsilon/2$	σ_{max}	σ_m
45.9/4.59	0.00775	0.00244	250.13	89.57
42.9/4.29	0.00693	0.00226	243.69	92.19
39.8/3.98	0.00615	0.00208	236.55	94.72
36.8/3.68	0.00543	0.00191	228.63	96.88
33.7/3.37	0.00475	0.00174	229.62	98.35
30.6/3.06	0.00412	0.00158	209.25	98.72
27.6/2.76	0.00354	0.00142	197.16	97.48
24.5/2.45	0.00302	0.00126	182.68	94.00
21.4/2.14	0.00255	0.00110	165.34	87.73
20.1/2.01	0.00236	0.00103	156.68	84.00

(b) Using HAZ material property

Max./Min. nominal stress, S_N (MPa)	Local strain, ϵ		Local stress, σ (MPa)	
	ϵ_{max}	$\wedge \epsilon/2$	σ_{max}	σ_m
45.9/4.59	0.01063	0.00289	182.20	46.26
42.9/4.29	0.00946	0.00261	178.48	47.21
39.8/3.98	0.00834	0.00234	174.45	48.44
36.8/3.68	0.00730	0.00209	170.09	49.99
33.7/3.37	0.00631	0.00186	165.27	51.94
30.6/3.06	0.00539	0.00165	159.90	54.26
27.6/2.76	0.00454	0.00146	153.85	56.86
24.5/2.45	0.00376	0.00128	146.78	59.39
21.4/2.14	0.00305	0.00111	138.33	61.24
20.1/2.01	0.00276	0.00104	133.96	61.61

4. 수명예측 결과 및 고찰

Fig. 4는 Mitchell의 방법과 공통경사법(method of universal slopes)을 기반으로 한 method A를 적용하여 Neuber 법칙으로부터 평가된 국부응력과 국부변형률로부터 예측된 점용접 시험편의 피로수명을 실험에서 얻어진 수명과 비교한 것이다. 모재의 재질특성을 고려된 경우에 비하여 실제로 피로균열이 개시되는 HAZ의 재질특성을 고려한 경우에서 양호한 수명예측 결과를 보이고 있다. 특히 HAZ의 재질특성을 고려하여 SWT 수명예측식에 적용시킨 경우에 예측수명과 실험수명은 장수명 영역의 두 데이터만을 제외하고 3배 이내의 오차범위에서 일치하고 있다. 그러나 장수명 영역의 일부 데이터만을 제외하고 대부분의 예측결과들은 실험수명보다 예측수명이 더 크게 나타남으로서 비보수적(non-conservative)인 위험한 예측결과를 보이고 있다.

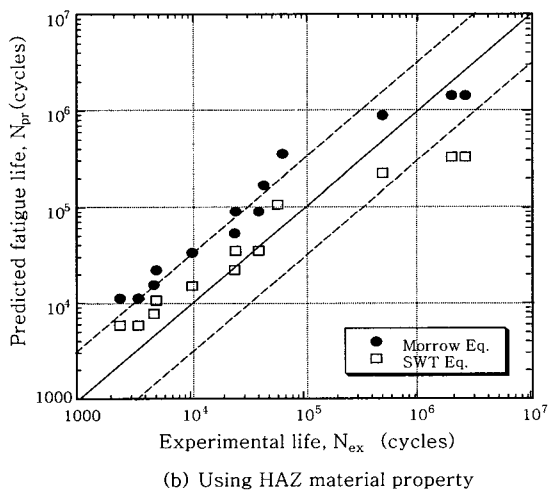
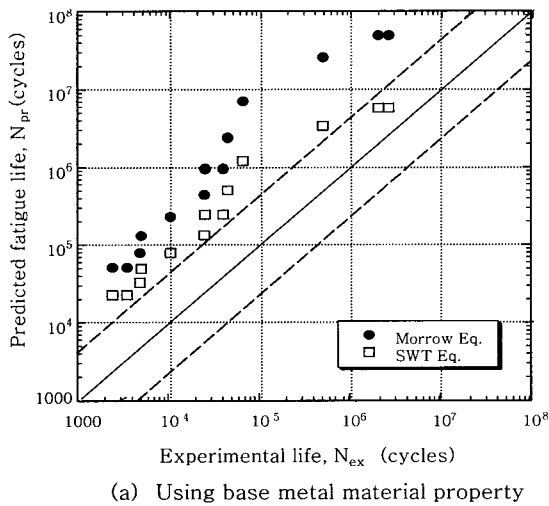


Fig. 4 Predicted fatigue life from method A versus experimental life

Fig. 5는 uniform material law를 기반으로 한 method B를 적용하여 피로수명을 예측한 경우이다. Fig. 4의 경우에서와 같이 모재의 재질특성이 고려된 경우에 비하여 HAZ의 재질특성을 고려한 경우에서 좀 더 정확하고 보수적(conservative)으로 안전한 수명예측 결과를 보이고 있다. 그러나 Fig. 5 (b)의 장수명 영역에서 상당히 과도하게 보수적인 수명예측 결과를 보인 SWT 식에 비하여 Morrow 식을 이용한 경우에 일부 데이터를 제외하고 3배 이내의 오차범위에서 안전한 수명예측 결과를 보이고 있다.

이상의 결과를 살펴볼 때, method A나 method B에서 모두가 HAZ의 재질특성으로부터 추정된 피로특성값을 적용시키는 경우에 실험수명과 예측수명은 좀더 잘 일치하고 있다. 또한 method A보다는 method B의 경우, 즉, 수명예측 대상재료와 동일한 알루미늄 합금재에 대하여 구성된 수명예측식을 이용하므로써 좀더 양호한 예측결과가 얻어지고 있다. 따라서 구조물의 안

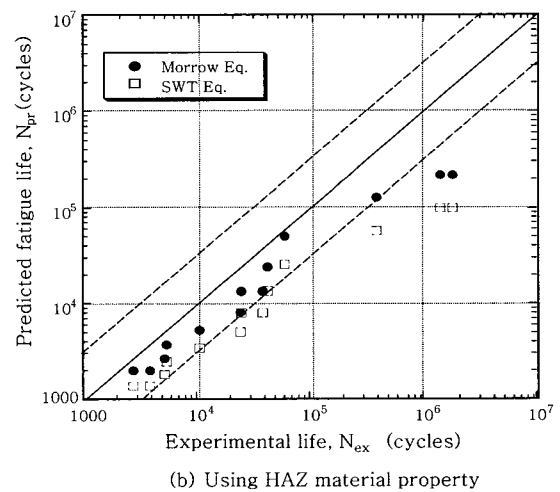
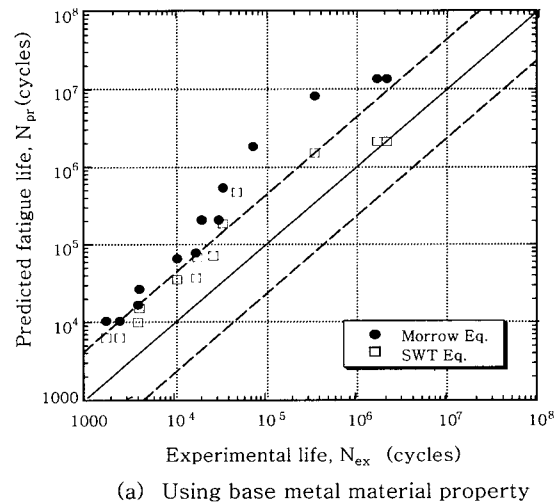


Fig. 5 Predicted fatigue life from method B versus experimental life

전수명을 염두에 둔 설계를 고려한다면 적절한 오차범위에서 보수적인 예측결과를 보인 경우로서 HAZ의 피로특성값을 uniform material law에 적용시킨 경우가 더 합리적인 방법으로 판단된다. 또한 이러한 수명예측 결과와 Table 3~5에 수록된 피로특성값과 국부변형률의 평가 결과들은 일관된 경향을 나타내고 있다. 즉, 전반적으로 동일재질에 대하여 피로특성값이 작아질수록 수명예측 결과에 큰 영향을 미치는 국부변형률값이 커지고 그로 인해 예측된 수명은 더 작아지는 결과를 나타내게 되므로서 과도한 예측결과를 보인 다른 경우에 비하여 양호한 예측결과를 보이게 되는 것으로 판단된다. 따라서 Neuber 법칙에 기반을 둔 국부변형률근사법을 사용하여 점용접부의 피로수명을 예측할 때 모재보다는 실제 피로균열이 개시, 전파되는 HAZ의 고유한 재질적 특성이 고려되어야 하며, 재료의 피로거동이 반영된 수명예측식을 이용하므로써 좀더 양호한 예측결과가 얻어질 수 있다. 그러나 본 연구에서 채택된 두께 0.8mm 박판의 경우에 Fig. 4와 5에서 보인 바와 같이 10^5 cycle 이상의 장수명 영역에 비하여 변형률의 영향이 상대적으로 클 것으로 예상되는 단수명 영역에서 더 양호한 예측결과를 보이고 있어 향후 모재의 두께에 따른 수명예측 결과의 비교와 고찰이 요구된다. 일반적으로 반복하중을 받는 점용접부에서 모재의 재질이나 두께 그리고 너짓의 크기는 피로강도에 영향을 미치는 인자로 알려져 있다. 또한 본 연구에서 적용된 Al-Mg계 합금판과 같이 마그네슘이 알루미늄 합금중에 포함된 경우, 표면의 산화피막 생성이 용이하여 용접성에 영향을 미치게 된다. 따라서 용접 전 산화피막의 제거와 같은 전처리가 필요하게 되며¹⁾ 그에 따라 피로강도도 영향을 받게 된다. 점용접 시 다양한 용접변수에 따른 이러한 구조적, 야금학적 인자와 아울러 단수명과 장수명 영역에 걸쳐 고루 양호한 예측결과를 얻을 수 있는 최적의 수명예측식, 그리고 용접부의 재질적 특성을 고려한 국부응력과 국부변형률 및 피로특성값의 정확한 평가를 통해 신뢰성 있는 수명예측 결과가 얻어질 것으로 기대한다.

5. 결 론

알루미늄 합금판으로 제작된 점용접 시험편을 대상으로 Neuber 법칙에 근거한 국부변형률근사법을 이용하여 피로수명을 예측하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모재의 인장 및 경도특성으로부터 추정된 HAZ의 재질특성을 고려하여 피로특성값이 평가되어 수명예측에 이용되었다.

2) Neuber 법칙을 이용하여 점용접부 너짓선단의

국부응력과 국부변형률이 평가되었다. 국부변형률의 경우에는 모재보다 HAZ의 재질특성을 고려한 경우가 더 높게 나타났으나 국부응력의 경우에는 모재의 재질특성을 이용하는 경우가 더 높게 나타났다.

3) HAZ의 재질특성을 uniform material law에 적용하여 정확하고 보수적(conservative)으로 안전한 수명예측 결과를 얻었다. 특히 평균응력을 고려한 Morrow 식을 이용한 경우에 장수명 영역의 일부 데이터를 제외하고 3배 이내의 오차범위에서 신뢰성 있는 수명예측 결과를 보였다.

4) 국부변형률근사법에 의한 점용접부의 피로수명 예측 시 용접부의 재질적인 특성에 따른 국부변형률의 차이는 예측 결과에 큰 영향을 미쳤으며, 장수명 영역에서 예측오차를 줄일 수 있는 적절한 수명예측식의 도입과 피로특성값의 정확한 평가를 통해 알루미늄 합금판 점용접 구조물의 신뢰성 있는 피로수명 예측이 가능할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. Y. S. Han : Resistance Spot Welding of Aluminium Alloys, Journal of KWS, 8-2(1990), 1-12(in Korean)
2. S. S. Kang : Prospect and Reality of Aluminium Alloy Resistance Welding Technology, Journal of KWS, 15-2(1997), 19-23(in Korean)
3. A. R. Krause, P. H. Thornton and R. G. Davies : Effect of Magnesium Content on the Fatigue of Spot-welded Aluminium Alloys, Proc. Conf. Recent Developments in Light Metals, Toronto, Ontario, Canada, (1996), 305-314
4. L. P. Pook : Approximate Approach to Stress Intensity Factor For Spot Welds and Similar Welds, National Engineering Laboratory Report No. 588, April, (1975)
5. H. L. Oh : Fatigue-Life Prediction for Spotwelded Using Neuber's rule, ASTM STP 761, (1982), 296-309
6. J. C. McMahon, G. A. Smoth and F. V. Lawrence : Fatigue Crack Initiation and Growth in Tensile-Shear Spot Weldments, Fatigue and Fracture Testing of Weldments, ASTM STP 1058, (1990), 47-77
7. Song In Lee, Il Hyun Kwon, Byum Jun Lee and Hyo Sun Yu : A Study on Fatigue Life Prediction for Automotive Spot Weldment Using Local Strain Approach, Transactions of the KSME, 25-2(2001), 220-227(in Korean)
8. Hyo Sun Yu, Song In Lee, Il Hyun Kwon and Byung Guk Ahn : Fatigue Life Evaluation of Spot weldment Using DCPDM, Journal of KWS, 19-1(2001), 58-64(in Korean)
9. JIS Z 3138 : Method of Fatigue Testing for Spot Welded Joint, (1994)

10. J. R. Cahoon, W. H. Broughton and A. R. Kutzak : The Determination of Yield Strength from Hardness Measurements, *Metallurgical Transactions*, 2(1971), 1979-1983
11. F. H. William and M. C. Robert : *Metal Forming-Mechanics and Metallurgy*, PTR Prentice Hall, (1993)
12. J. M. Barsom and S.T. Rolfe : *Fracture and Fatigue Control in Structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, (1983), 223-249
13. B. Pollard : Fatigue Strength of Spot Welds in Titanium-bearing HSLA Steels, SAE Paper 820284, (1982)
14. F. V. Lawrence : An Empirical Method for Estimating the Fatigue Resistance of Tensile-shear Spot-welds, SAE Paper 830035, (1983)
15. M. R. Mitchell : *Fundamentals of Modern Fatigue Analysis for Design, Fatigue and Microstructure*, ASM, (1954), 385-437
16. M. Kikugawa, M. Jono, T. Kamata, J. H. Song and H. Himuro : Low-Cycle Fatigue under Varying Strain Conditions(Effects of the Mean Plastic Strain and the Stress Factor), *Bulletin of the JSME*, 20-140(1977), 145-152
17. S. S. Manson : Fatigue : A Complex Subject-Some Simple Approximations, *Experimental Mechanics*, 5-7 (1965), 193-226
18. SAE J 1099 : *Technical Report on Fatigue Properties*, (1975)
19. J. A. Bannantine, J. J. Comer and J. J. Handrock : *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey 07632(1990), 59-64
20. A. Jr. Bäuml and T. Seeger : *Materials Data for Cyclic Loading*, Supplement 1, Elsevier Science Publications, Amsterdam, (1990)
21. J. Morrow : *Fatigue Design Handbook*, Advance in Engineering, Vol. 4, Society of Automotive Engineers Warrendale, Pa, **Sec. 3.2**(1968), 21-29
22. K. N. Smith, P. Watson and T. M. Topper : A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals, *Journal of Materials*, 5-4(1970), 767-778
23. H. Neuber : Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatic Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress - Strain Law, *Journal of Applied Mechanics*, (1961), 544-550
24. T. H. Topper, R. Wetzel and J. Morrow : Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens, *J. Materials*, 4-2(1968), 200-209
25. R. E. Peterson : Notch Sensitivity, *Metal Fatigue*, G. Sines(Ed.), McGraw-Hill Book, (1959), 293-306