연 구 논 문

철도차량 차체 가스용접 이음재의 가속수명예측과 신뢰도 평가

백 승 엽*,†

*서일대학 자동차과

Reliability Assessment and Accelerated Life Prediction of Gas Welded Joint in the Rail Road Car Body (1. Plug and Ring Type)

Seung Yeb Baek*,†

*Dept. of Automotive, Seoil University, Seoul 131-702, Korea

†Corresponding author : sandos7@kornet.net

(Received November 23, 2009 ; Revised January 5, 2010 ; Accepted February 2, 2010)

Abstract

Stainless steel sheets are widely used as the structure material for the railroad cars and the commercial vehicles. These kinds structures used stainless steel sheets are commonly fabricated by using the gas welding. Gas welding is very important and useful technology in fabrication of a railroad car and vehicles structure. However fatigue strength of the gas welded joints is considerably lower than parent metal due to stress concentration at the weld, fatigue strength evaluation of gas welded joints are very important to evaluate the reliability and durability of railroad cars and to establish a criterion of long life fatigue design. In this paper, $(\Delta\sigma_a)_R$-N_f curve were obtained by fatigue tests. Using these results, the accelerated life test(ALT) was conducted. From the experimental results, an acceleration model was derived and acceleration factors are estimated. So it is intended to obtain the useful information for the fatigue lifetime of plug and ring gas welded joints and data analysis by statistic reliability method, to save time and cost, and to develop optimum accelerated life prediction plans

Key Words : Fatigue strength, Gas welding, Reliability, Fatigue life, Rail road car

1. 서 론

철도차량 차체의 용접 구조물의 용접부에 대한 신뢰성 확보는 구조물의 건전성과 내구성에 직접적인 영향을 미치므로, 용접구조물 설계 시에는 이러한 조건들을 만족시킬 수 있도록 설계되어야 할 것이다. 철도차량과 자동차와 같은 박판용접 구조물의 설계에 있어서는 무엇보다도 용접과정에서 발생하는 금속학적, 역학적 현상 외에도 용접 이음부의 기하학적 인자들이 피로강도에 미치는 영향에 대한 정보를 확보하는 것이 매우 중요하고 필요하다. 그래서 가스용접 이음재의 피로강도 및 피로수명평가와 피로설계기준을 정하기 위해서는 피로시험을 수행하여 얻어진 ΔP-N_f 관계를 이용하는 것이 일반적이다[1-4]. 그러나 피로데이터를 장시간 획득하는 과정에서 여러 가지 제어할 수 없는 변동 인자들에 의해 피로 데이터가 영향을 받기 때문에 피로데이터의 신뢰도가 떨어지는 것이 사실이다. 또한, 이음재의 재질 및 접합형태가 달라질 때마다, 각각의 경우에 대해 새로운 피로시험이 요구되므로 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 문제들을 개선하고 신뢰성 있는 설계를 위해서는 실제 피로시험을 통하여 획득한 피로데이터를 통계적으로 평가하고 해석하는 것이 효과적일 것이다. 따라서 본 연구에서는 설계의 신뢰도를 높이기 위해 동일한 시험환경 조건에서 획득한 피로데이터를 통계적으로 분석하고, 다양한 가스용접이음재의 피로수명을 예측함과 동시에 실제 피로시험 데이터와 비교하여 예측된 피로데이터의 신뢰도를 평가하였다. 또한 임의의 목

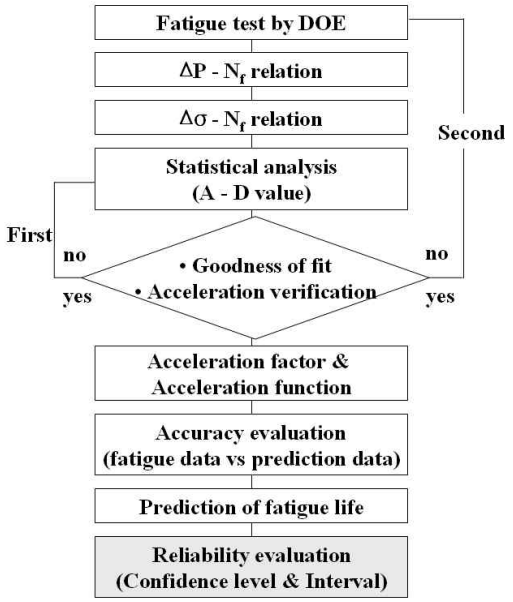


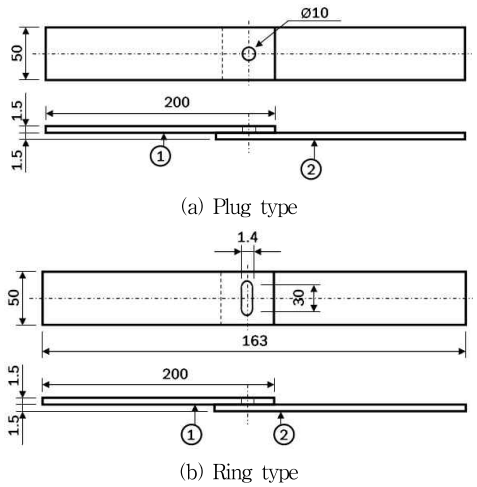
Fig. 1 Flow of fatigue life prediction and reliability evaluation

표수명을 예측하고, 예측된 수명의 신뢰도와 신뢰구간을 분석함으로써, 다양한 피로설계 방안에 대해 검토할 수 있도록 하였다. 본 연구의 전체적 흐름은 Fig. 1과 같다.

2. 가스용접이음재의 응력분포해석 및 피로강도평가

2.1 응력분포해석

용접구조물 제작에 있어서 대표적인 용접이음 형태인 플러그 및 링 용접 이음재에 대한 응력분포해석을 목적으로 Fig. 2의(a), (b)와 같이 시뮬레이션 모델



(a) Plug type

(b) Ring type

Fig. 2 Gas welded joints specimen(unit : mm)

(simulation model)을 제작하였다. 용접 이음재에 인장하중이 작용하면 용접과정에서 발생된 잔류응력과 외력에 의한 응력조합에 의해서 용접부 주변에는 용접부 특유의 복잡한 응력분포를 나타낸다. 따라서 가스용접 이음재에 대한 응력분포와 변형을 해석하는 것은 용접부의 피로균열 발생 기구를 파악하는데 매우 중요하다[5].

2.1.1 해석모델

유한요소해석 모델의 재료는 철도차량 차체재료로 사용되고 있는 STS 301L 판재이며, Table 1, 2의 재료 성질을 입력데이터로 사용하였으며, Fig. 3은 유한요소 해석을 위한 경계조건을 나타낸 것이다. 유한요소 해석 모델의 구성은 용접금속(weld metal)과 열 영향부

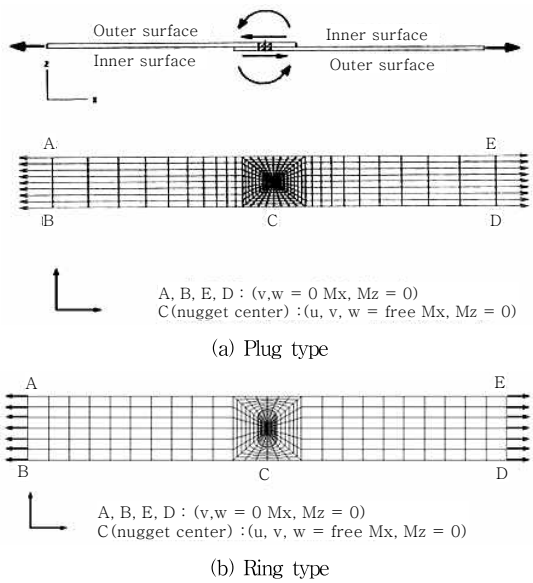
Table 1 Chemical composition of the materials(Wt, %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.03	1.0	2.0	0.04	0.03	6~8	16~18	0.2

Table 2 Mechanical properties of materials

Material	Symbol	Yeild strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
STS301L	LT	≥215.6	≥548.8	≥44
	DLT	≥343	≥686	≥39
	ST	≥411.6	≥754.6	≥34
	HT	≥686	≥931	≥19

LT : Low Tensile, DLT : Deadlite Tensile
ST : Special Tensile, HT : High Tensile



(a) Plug type

(b) Ring type

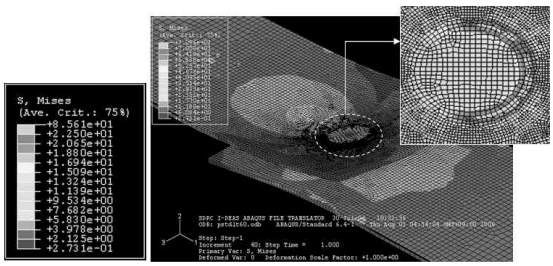
Fig. 3 3-D FEA model of plug and ring type gas welded joint for stress analysis

(heat affected zone;HAZ)는 용접과정에서 용가재(filler metal)와 입열의 영향에 의해 엄밀히 모재와는 다른 성질을 갖는다. 따라서, 용접부에 대한 탄성계수(Young's modulus)등의 기계적 성질은 실제적으로 모재와 달리해야 타당하나, 용접금속의 기계적 성질을 정량적으로 직접 측정하기 매우 어렵기 때문에, 본 연구에서는 모재에 비해 경도(hardness)와 강도(strength) 등의 기계적 성질이 상대적으로 크다는 사실을 바탕으로 용접금속의 기계적 성질을 모재보다 크게 설정하였으며, 열 영향부와 용접잔류 응력은 고려하지 않고 해석하였다.

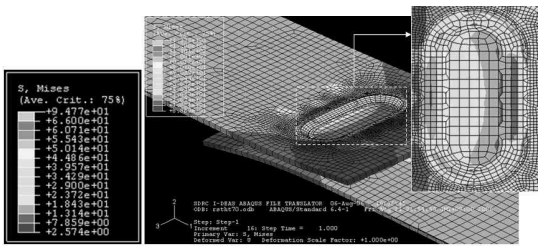
해석에 사용된 요소(element)는 3차원 육면체요소로 각 이음과 형상별 요소 및 절점 수는 플러그 용접은 315,450, 링 용접은 353,498이다. 그리고 모델링과 탄·소성 해석은 상용프로그램인 I-DEAS 11nx, ABAQUS 6.7을 사용하였다.

2.1.2 해석결과

Fig. 4는 STS 301L의 ST(1.5)+ST(1.5)의 형태로 (a)플러그, (b)링 용접한 이음재에 인장하중을 가했을 때 용접부주변의 응력분포결과를 나타낸 것이다. 인장하중에 의해 발생되는 최대 주응력은 Fig. 4와 같이 용접 토우(weld toe)와 열 영향부 경계에서 발생함을 알 수 있다. 또한, 실제 피로시험결과 이 부분에서 응력집중과 용접 잔류응력의 조합으로 파단이 일어남을 확인할 수 있었다.



(a) Plug type welded joint, ST(1.5)+ST(1.5)



(b) Ring type welded joint, ST(1.5)+ST(1.5)

Fig. 4 Stress distribution of Plug and Ring type gas welded joint

Table 3 Specimen of the various gas welded joints

Welded joint type (plate thickness)		
	① + ②	
Plug weld ① : upper plate ② : lower plate	P1	ST(1.5)+ST(1.5)
	P3	ST(1.5)+HT(1.5)
	P4	ST(1.5)+DLT(1.5)
Ring weld ① : upper plate ② : lower plate	R1	ST(1.5)+ST(1.5)
	R3	ST(1.5)+HT(1.5)
	R4	ST(1.5)+DLT(1.5)

Table 4 Plug and ring type gas welding condition

Materials	STS 301L	
Welding	GMAW Semi-auto robot	
Welding condition	Pass	1 Pass
	Current (A)	100~120
	Voltage range (V)	12~13
	Travel speed (cm/min)	8~10
	GAS (%)	Ar 98%
	Flow rate (l/min)	18~20
	Filler metal	AWS ER 308L

2.2 가스용접이음재의 피로강도평가

2.2.1 시험편 및 실험장치

피로시험편은 Fig. 2와 같은 형상과 크기로 Table 3과 같이 용접종류별 동종재(similar material) 및 이종재(dissimilar material) 가스 용접한 이음재 시편으로, Table 4와 같은 용접조건으로 제작하였다. 사용된 피로실험 장치는 서보 유압식 피로시험기(MTS, 용량 ; 10 ton)이며, 면압식 지그(Jig)는 자체 설계하여 제작하였다.

2.2.2 실험조건 및 실험방법

본 연구에서는 하중의 반복속도를 25 Hz로 하고, 부하형태는 하중비(load ratio;$R=P_{min}/P_{max}$)가 0($P_{min}=0$)인 정현파(sine wave)로 하였다. 무한수명의 한계피로한도(low fatigue limit)를 구하기 위해서 Table 3과 같은 용접 종류별 시편을 최대인장강도(maximum tensile strength)의 90%에서 10%씩 하중을 감소시키면서, JIS Z 2273 및 JIS Z 3103에 의거 피로실험을 수행하였고, 무한수명의 피로한도(fatigue limit)를 구하기 위해서는 10^7 cycles에 도달 할 때까지 실험을 진행하였다.

2.2.3 실험결과

Fig. 5는 동종재 및 이종재간 가스 용접한 플러그 및 링 용접 이음재의 피로강도를 ΔP-N_f 선도로 나타낸 것이다. 이것은 가스용접 이음재의 재질 및 이음형상 등의 피로강도를 정량적으로 비교할 수는 있지만, 앞에서 언급한 바와 같이 데이터의 분산 폭이 크기($\Delta P_{lim(plug/ring)}$= 1,500~5,500 N) 때문에 피로강도에 영향을 미치는 제 인자들을 종합적으로 고려할 수 있는 설계조건과 특정의 목표수명을 만족하는 설계기준을 설정하기는 어려움이 있다. 따라서 피로균열의 발생과 파단은 주로 응력이 집중되는 위치(hot spot point)에서 일어남을 2.1절 응력분포 해석결과 확인할 수 있었기 때문에 Fig. 5의 결과를 최대응력으로 재정립한 결과 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다.

$\Delta\sigma$-N_f 선도의 데이터 분산 폭이 ΔP-N_f 선도의 데이터 분산보다 전체적으로 감소하는 결과를 나타났다. 이것은 용접 이음재의 파단을 야기하는 역학적, 기하학적 인자들을 종합적으로 고려한 피로설계기준은 하중범위보다 피로균열을 직접적으로 관여하는 최대응력으로 설정하는 것이 보다 더 경제적이고 합리적인 설계기준을 의미하는 것이다. 그러나 가스용접은 용융용접이기 때문에 재료의 상변화에 의해서 팽창·수축에 따른 잔류응력이 발생하므로, 용접구조물의 피로강도를 평가할 때 잔류응력을 고려해야 할 필요성이 있다.

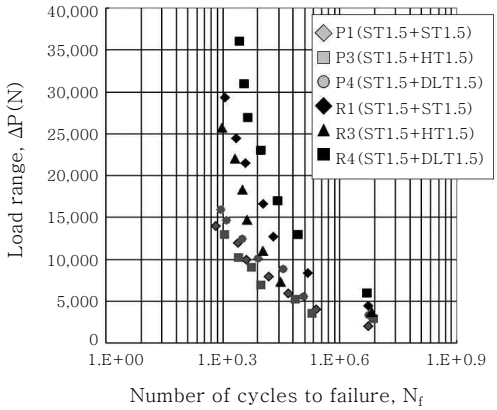


Fig. 5 ΔP-N_f relation of the plug and ring gas welded joints

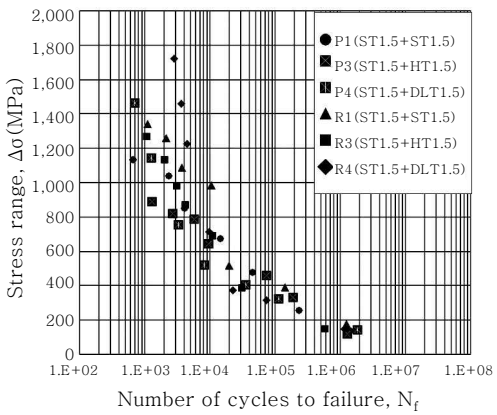


Fig. 6 Δ_σ-N_f relation of the plug and ring gas welded joints

3. 가스용접이음부의 용접 잔류응력 해석

3.1 해석모델

수치해석은 열 해석과 열응력 해석 두 부분으로 수행하였다. 플러그 및 링 타입 모두 가스용접 조건과 방법이 같기 때문에 응력분포해석을 수행한 동일한 3D FEA 모델을 사용하였다. 가스용접은 용융용접이므로 가열·냉각의 용접 열 사이클 동안 일어나는 재료의 상변화에 따른 성질변화와 대류(convection), 팽창·수축 등의 제 현상을 실제와 같이 재현하는 것이 타당하겠지만, 데이터를 확보하는 것이 실질적으로 매우 어렵기 때문에, 본 연구에서는 온도의존적인 재료성질, 탄성계수(young's modulus), 항복강도(yield strength), 열팽창 계수(thermal expansion coefficient) 그리고 열전도도(thermal conductivity) 등만을 고려하여 Fig. 7의 과정으로 비선형 유한요소해석을 하였다.

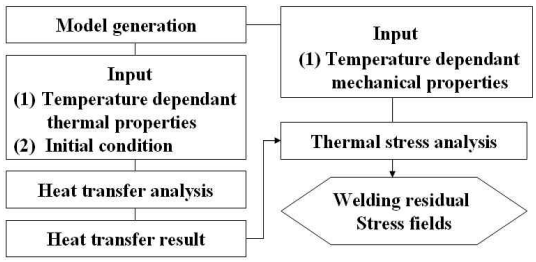


Fig. 7 Schematic diagram for the welding residual stress analysis

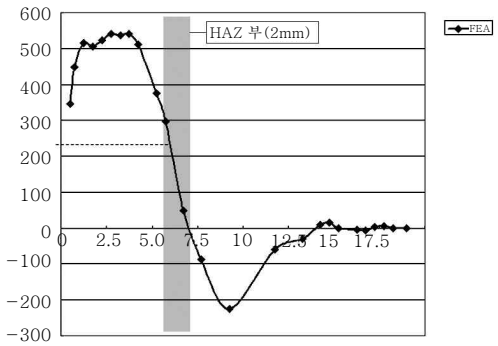


Fig. 8 Longitudinal welding residual stress distribution at the plug and ring gas welded joint

3.2 잔류응력 해석결과

Fig. 8은 잔류응력 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다. 용접비드 중심에서 +520 MPa(인장), 열영향부(HAZ)에서 +230 MPa(인장), 용접비드 중심에서 9mm 떨어진 곳에서 -210 MPa(압축)의 분포를 보였다. 수치해석결과 용접비드와 HAZ부에서 높은 인장응력이 발생하였으며, 용접비드의 중심에서 멀리 떨어진 위치에서 압축응력이 발생하였다. 이것은 용접구조물 제작과정에서 용접에 의해 발생하는 용접잔류응력은 모재의 항복강도이상의 크기를 가지는 것으로 평가된다. 이상과 같은 결과를 수정된 굿맨 식(Goodman 식)에 적용하여 재정리 한 결과 Fig. 9, Fig. 10과 같은 결과를 얻었다. 이것은 잔류응력을 고려했을 때 피로한도가 플러그 용접은 73 MPa, 링 용접은 100 MPa로 평가되었다. 이 값은 잔류응력을 고려하지 않았을 때 플러그 용접 98 MPa, 링 용접 133 MPa보다 플러그 용접은 34%, 링 용접은 33% 정도 낮은 값으로 설계자가 잔류응력을 고려하지 않을 경우 피로설계기준을 과대평가 할 수 있음을 의미한다.

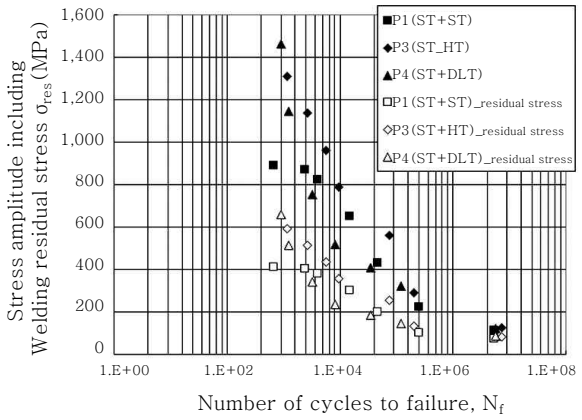


Fig. 9 $(\Delta\sigma_a)_R$-N_f relation of the plug type gas welded joints

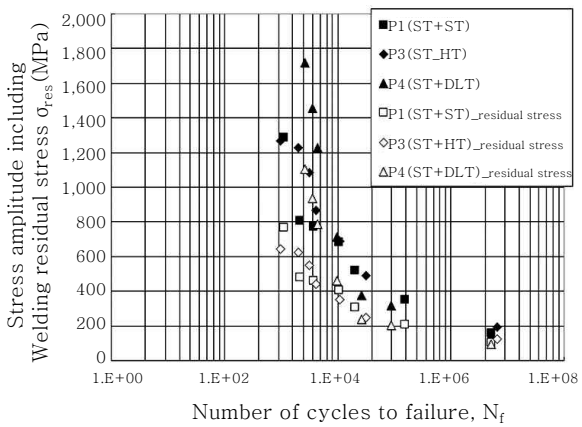


Fig. 10 $(\Delta\sigma_a)_R$-N_f relation of the ring type gas welded joints

4. 가속수명 예측방법

4.1 적합도 검증

피로수명데이터에 대한 분포모형의 적합도 검정(goodness of fit)은 두 단계로 이루어진다.

첫 번째 단계는, 획득된 수명데이터를 어떤 수명분포에 적합 시킬 수 있는지에 대한 검정이다[6]. 검증기준은 A-D(Anderson-Darling) 통계량 또는 P값(P value)으로 한다. A-D 통계량은 확률지(probability paper)에 도시한 점(point)과 이들의 직선상의 대응점, 또는 경험적 누적분포함수와 이론적 분포함수와의 차이를 측정한 값으로, 분포의 끝 부분에 큰 가중치를 가지도록 하여 직선과 도시한 점과의 제곱거리(weighted squared distance)를 구한 값이다. 4가지 분포모형 중에서 가장 작은 A-D 통계량 값을 가지는 경우가 가장 적합한 분포 모형임을 의미한다[7]. Table 5는 철도차량 차체구조의 대표적 이음 형태인 플러그 용접과 링 용접 이음재의 피로수명데이터에 대한 A-D값을 나타낸 것이다.

두 번째 단계는 Fig. 11과 같이 시간경과에 따른 유효수명과 고장률곡선(failure rate curve)과의 관계를 분석하는 것이다. 초기고장률 (decreasing failure rate ; DFR), 우발고장률 (constant failure rate ; CFR), 마모고장률 (increasing failure rate ; IFR)로 나타내기 위해 분석된 형상모수 값, 척도모수 값, 위치모수 값으로 고장유형을 검정한다.

본 연구에서는 Table 5는 A-D 분석 값, Table 6은 고장유형을 나타낸 것이다. 플러그 용접의 ST(1.5)+ST(1.5) 결합시편은 대수정규분포 또는 와이블 분포가 적합분포로 분석되었으며, 플러그용접의 ST(1.5)+HT(1.5), ST(1.5)+DLT(1.5)과 링 용접시편은 와이블(Weibull) 분포가 적합분포로 분석되었다. 고장률은 모두 IFR로 분석되었다.

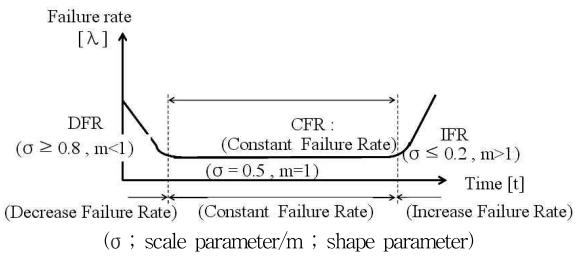


Fig. 11 Bath-tube curve

Table 5 Result of A-D value for specimen of plug and ring gas welded joints

Welded joint type (plate thickness)		Four ways probability				Failure Type
		Anderson-Darling value				
		Weibull	Lognormal	Exponential	Normal	
Plug	ST(1.5)+ST(1.5)	2.126	2.126	3.328	2.222	IFR
	ST(1.5)+HT(1.5)	2.156	2.202	3.230	2.168	IFR
	ST(1.5)+DLT(1.5)	2.133	2.154	3.106	2.143	IFR
Ring	ST(1.5)+ST(1.5)	2.119	2.150	3.240	2.136	IFR
	ST(1.5)+HT(1.5)	2.107	2.139	3.293	2.111	IFR
	ST(1.5)+DLT(1.5)	2.101	2.136	3.139	2.114	IFR

Table 6 Optimum distribution model and failure type for specimen of plug and ring gas welded joints

Welded joint type (plate thickness)		Fitting distribution model	A-D value	Shape Parameter	Failure type	remark
plug	ST(1.5)+ST(1.5)	Weibull	2.126	3.24	IFR	Weibull IFR : Shape p. >1
	ST(1.5)+HT(1.5)	Weibull	2.156	7.95	IFR	
	ST(1.5)+DLT(1.5)	Weibull	2.133	6.38	IFR	
Ring	ST(1.5)+ST(1.5)	Weibull	2.119	10.73	IFR	
	ST(1.5)+HT(1.5)	Weibull	2.107	8.27	IFR	
	ST(1.5)+DLT(1.5)	Weibull	2.101	4.90	IFR	

Table 7 Acceleration function and R-square value of plug and ring gas welded joints

Welding Type	Specimen	Acceleration	R-square
Plug	ST(1.5)+ST(1.5)	y=3E+11X-4.6007	97.25%
	ST(1.5)+HT(1.5)	y=1E+11X-4.2565	97.25%
	ST(1.5)+DLT(1.5)	y=1E+10X-3.7548	97.25%
Ring	ST(1.5)+ST(1.5)	y=2E+10X-3.9349	97.25%
	ST(1.5)+HT(1.5)	y=2E+08X-2.8376	97.25%
	ST(1.5)+DLT(1.5)	y=3E+08X-2.7124	97.25%

4.2 가속계수 및 가속성 검정

피로수명데이터의 모수통계량 분석이 가능함을 검정하기위해 플러그와 링 용접 이음재의 가속성 분석을 하였다. 두 가속조건 하에서 수명데이터를 확률지에 타점했을 경우, 각 조건에 적합한 직선이 서로 평행하면 두 조건 사이에 가속성이 성립(P value≥0.05)한다고 판단한다[8]. 와이블 분포는 두 직선의 형상모수가 같을 경우, 대수정규분포는 척도모수가 같은 경우이다. 가속계수는 예를 들어 임의의 두 스트레스 조건(stress condition) 1 과 2사이에 가속성이 성립하면, 두 조건에서의 수명 t_1, t_2는 가속계수(AF)와 식(1)의 관계를 만든다.

$$t_1 = (AF) \cdot t_2 \; (AF; Acceleration\ Factor) \qquad (1)$$

식(1)은 두 수명분포의 모든 경우의 수에도 성립 하며, 와이블 분포와 대수정규 분포의 가속계수는 식(2), 식(3)에서 구할 수 있다.

와이블 분포 : $AF = t_1/t_2 = \eta_1 / \eta_2$ (2)

대수정규분포 : $AF = \exp(\eta 1)/\exp(\eta_2)$ (3)

Fig. 12, Fig. 13, Table 8은 플러그와 링 타입 가스용접 이음재의 와이블 분포에 대한 가속성 검정결과를 예시한 것이다. 가속된 최대인장하중과 수명과의 관계가 95% 신뢰도, 유의수준 5%에서 모두 평행하게 분석((P value≥0.05)됨으로써 가속성이 성립하는 것으로 판단되었다.

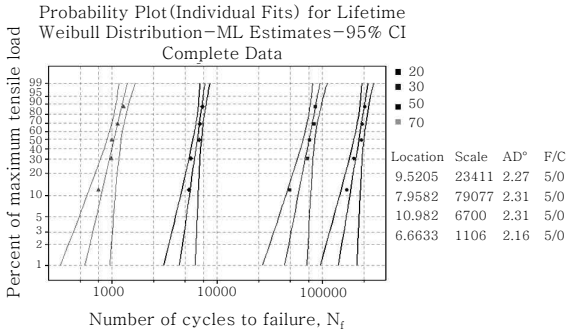


Fig. 12 Acceleration verification of plug welded joints (ST(1.5)+ST(1.5))

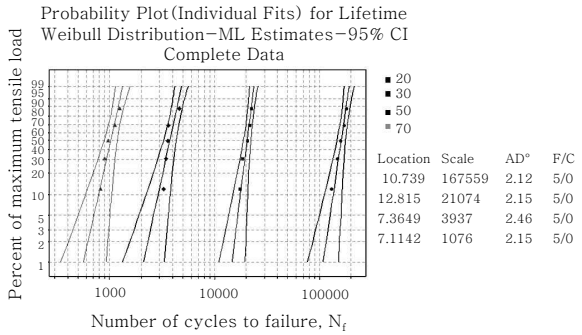


Fig. 13 Acceleration verification of ring welded joint (ST(1.5)+ST(1.5))

Table 8 P-value of Plug and Ring welded joint for acceleration verification

Fitting Distribution	Weibull	
Weld type	Plug	Ring
P-value	0.843	0.536

4.3 가속모형

가속모형은 수명과 스트레스의 관계를 수학적으로 표현한 물리·화학적 모형이다[9]. 수명분포의 모수(평균, 분위수, 표준편차)를 스트레스 변수들의 함수로 표현하는 것으로 가속수명시험의 자료 분석 시 매우 중요하다. Figs. 12, 13에서 가속성이 성립한다는 의미는 확률지위에 적합 시킨 사용조건과 가속조건에서의 회귀선의 기울기가 같게 되는 것으로 물리적 통계해석이 가능함을 의미한다.

본 연구에서는 식(1)의 역 누승 모형(inverse power model)을 적용하였다. Table 7은 수명-스트레스 관계의 역 누승 모형을 이용한 플러그와 링 용접 이음재의 가속수명 추정 식을 나타낸 것이다. 가속조건은 무한수명에 해당하는 10^7 Cycles의 피로한도 조건을 정상상태로 놓았을 경우 최대 인장강도의 70%, 50%, 30%를 가속조건으로 가정 하였으며, 통계적 해석 및 데이터 분석에 사용된 상용 프로그램은 MINITAB 14.0을 사용하였다.

$$\tau(V) = A/V^{\gamma} \tag{4}$$

(A, γ:constant, τ(v): lifetime, V:stress value)

양변에 대수를 취하면, 식(5)와 같이 lnτ(v)와 lnV 가 선형적으로 표현되는 대수선형(log-linear) 관계식이 됨을 알 수 있다.

$$\ln\tau(v) = \ln A - \gamma \ln V = A' - \gamma \ln V \tag{5}$$

4.4 가스용접 이음재의 가속수명예측

Table 7의 가속식을 이용하여 플러그 와 링 타입 가스용접 이음재의 피로수명을 예측 하였고, 결과는 Table 9과 Table 10에 정리하였다.

플러그 및 링 타입 가스용접 이음재 피로수명 예측치의 정확도가 평균 85%, 89%에 대한 편차발생은 피로시험 데이터의 분산과 유의수준 5%에서 가속성 성립 판단 시 모수통계량의 차이에 의해서 발생된 것으로 판단된다. 그러나 피로수명은 다양한 변수들의 영향을 받으므로 피로데이터에 대한 면밀한 검토 후 유의수준 5%에서 추정된 관계식에 적용하여 예측하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 가속수명 예측치에 대한 신뢰도 평가

5.1 플러그용접 이음재

피로한도기준을 정하는 무한수명을 10^7cycles이라고 가정했을 때, 신뢰수준 95%에서 ST(1.5)+ST(1.5) 시편이 파괴되지 않을 확률은 90%, ST(1.5)+HT(1.5)은 92%, ST(1.5)+DLT(1.5)은 89%로 분석되었다. 최대인장하중의 20%에서 전체용접 이음재의 10%가 파괴되는 시점(B_{10})의 수명 백분위수는 ST(1.5)+ST(1.5)의 경우 평균수명 230,358 cycles, 신뢰구간은 (206,658~256,777) cycles이며, ST(1.5)+HT(1.5)는 평균수명 184,829 cycles, 신뢰구간은 (147,545~231,533) cycles로 분석되었고, ST(1.5)+DLT(1.5)의 경우는 평균수명 113,002 cycles, 신뢰구간은 (98,938~129,067) cycles로 분석되었다.

Table 9 Comparative analysis of $(\Delta\sigma_a)_R$-N_f and $(\Delta\sigma_a)_R$-$(N_f)_{ALP}$ lifetime data for plug welded joints

Condition of the specimens for plug welded joint		Percentage of maximum tensile load							Remark
Specimen	Items	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	
ST(1.5) + ST(1.5)	Fatigue test(N_f)	709	2.393	4.074	14,783	46.965	251.761	5,717.206	
	A.L.P(N_f)	974	1,979	4,578	12,780	48,010	310,079	-	
	A.F.	7.728	3,802	1,643	589	157	24	1	
	Accmacy	73%	83%	89%	86%	98%	81%	-	85%
ST(1.5) + HT(1.5)	Fatigue test(N_f)	1,031	2,662	6,381	11,828	62,017	237,672	5,304,080	
	A.L.P.(N_f)	1,401	2,700	5,866	15,165	51,598	289.845	-	
	A.F.	3,955	2,052	944	365	107	19	1	
	Accmacy	74%	99%	92%	78%	80%	82%		84%
ST(1.5) + DLT(1.5)	Fatigue test(N_f)	1,054	1,721	3,714	8,173	34,962	125,646	7829296	
	A.L.P.(N_f)	1,180	2,106	4,175	9,651	28,425	130,284	-	
	A.F.	1,490	835	421	182	62	13	1	
	Accmacy	89%	82%	89%	85%	78%	96%	-	86%

A.L.P. : Acceleration Lifetime Prediction
A.F. : Acceleration Factor

Table 10 Comparative analysis of $(\Delta\sigma_a)_R$-N_f and $(\Delta\sigma_a)_R$-$(N_f)_{ALP}$ life time data for ring welded joints

Condition of the specimens for plug welded joint		Percentage of maximum tensile load							Remark
Specimen	Items	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	
ST(1.5) + ST(1.5)	Fatigue test(Nf)	1.008	2.140	3.714	10.646	25,217	159,710	5,256, 817	
	A.L.P(Nf)	1,098	2,015	4.128	9,933	30,811	151,917	-	
	A.F.	2,115	1,153	563	234	75	15	1	
	Accmacy	92%	94%	90%	93%	81%	96%	-	91%
ST(1.5) + HT(1.5)	Fatigue test(Nf)	1,067	2,043	3,146	4,597	11,047	40.527	4,586,969	
	A.L.P.(Nf)	1,162	1.800	3,020	5,689	12,869	40.666	-	
	A.F.	250	161	96	51	23	7	1	
	Accmacy	92%	88%	96%	80%	86%	99%	-	90%
ST(1.5) + DLT(1.5)	Fatigue test(Nf)	2,776	3,607	6,023	11,787	26,687	87,815	5,150684	
	A.L.P.(Nf)	2,968	4,509	7,393	13,542	29,551	88.758	-	
	A.F.	250	161	96	51	23	7	1	
	Accmacy	94%	80%	81%	87%	90%	99%		88%

A.L.P. : Acceleration Lifetime Prediction
A.F. : Acceleration Factor

5.2 링 용접 이음재

피로한도기준을 정하는 무한수명을 10^7cycles이라고 가정했을 때, 신뢰수준 95%에서 ST(1.5)+ST(1.5)시편이 파단하지 않을 확률은 89%, ST(1.5)+HT(1.5)은 86%, ST(1.5)+DLT(1.5)은 91%로 분석되었다. 최대인장하중의 20%에서, B_{10} 수명의 백분위수는, ST(1.5)+ST(1.5)의 경우 평균수명 135,909 cycles, 신뢰구간은 (111,958~164,983) cycles로 분석되었고, ST(1.5)+ HT(1.5)는 평균수명 32,827 cycles, 신뢰구간은 (25,725~41,889) cycles로 분석되었다. 그리고 ST(1.5)+DLT(1.5)의 경우는 평균수명 59,440 cycles, 신뢰구간은 (38,208~92,473) cycles로 분석되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 설계기준을 결정하는데 필요한 피로 데이터(fatigue data) 도출과정에서 발생할 수 있는 변동성을 최소화하기 위해서, 확률론적 접근방법인 가속수명 예측기법을 이용하여, 피로 데이터($\Delta\sigma_a)_R$-N_f관계와 가속수명예측 데이터($\Delta\sigma_a)_R$-$(N_f)_{ALP}$와 의 관계를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가속수명예측을 위한 통계적 최적분포는 플러그용접 이음재 ST(1.5)+ST(1.5)에서 와이블 분포 또는 대수정규분포, 플러그용접의 ST(1.5)+HT(1.5), ST(1.5)+DLT(1.5)와 링 용접은 와이블 분포로 분석되었으며, 실제 피로시험데이터를 기준으로 가속수명예측의 수명 신뢰도의 정확도는 플러그용접이 평균 85%, 링 용접이 평균 89% 분석이 되었다.

2) 와이블 분포함수의 형상모수와 대수정규분포함수의 척도모수에 의한 적합분포모델은 비슷한 분포함수로 평가되었으나, 가속식의 형상모수 값과 척도모수 값은 예측수명을 좌우하는 중요한 파라메타 값이므로, 가속성 검증 시 모집단의 산포에 따른 기울기 편차의 가속성 성립 판단은 신중히 고려해야 할 필요가 있다.

3) 피로강도 데이터를 ($\Delta\sigma_a)_R$-N_f 관계로 나타낼 때 확률론적 통계 해석방법인 가속수명예측기법을 적용하면, 고 하중 단 수명 영역에서 특정 목표수명을 예측할 수 있는 피로설계기준을 설정하는데 보다 효과적인 설계가 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Shin, J. H. : Fatigue Strength Evaluation of SM490A Welded Joints for Bogie Frame, Master's Thesis, Sungkyunkwan University, 2003, 12-14 (in Korean)
2. Bae, D. H. : Fracture Mechanical Fatigue Design for Spot-welded one-Lap Joint of SUS301L Subjected to Tensile Shear Load, KSAE, 13-5 (1991), 42-50 (in Korean)
3. Bae, D. H., Niisawa J. E and Tomioka, N. : Theoretical analysis of stress distribution of single spot welded lap joint under tension- shear load, Transection of JSAE, 39, 1988, 627-630
4. Bae, D. H. : Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of A Strength Spot Welded Lap Joint Subject to Tensile Shear Load, Journal of KSME, 13-5 (1990), 42~50 (in korea)
5. Kang, J. B. : Fatigue Strength of the TS- Type Spot-welded Lap Joint of STS301L, Thesis of Master, Sungkyunkwan University, 2003, 23-35(in Korean)
6. Shaked, M. and Singpruwalla, N. D. : Non-parametric estimation and Goodness-of-Fit testing of hypotheses for distributions in Accelerated Life Testing, IEEE Transactions on Reliability, R-31-1 (1982), 69-74
7. Liao, M. : How to used the new table of Anderson-Darling critical values for Goodness- of-Fit test for the two-parameter Weibull distribution, Symposium on Reliability and Maintainability, 28 (1998), 191-194
8. Lawless, J. F., John W.&S. : Statistical models and Methods for Lifetime data analysis 1982, 95-103.
9. Bae, D. S., Jeon, Y. R. : Reliability analysis Arche, 1999, 373-459