

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.4.467

STS301L 가스용접 이음재의 가속수명예측 (I)

- Fillet Type -

백 승 엽*

* 서일대학 자동차과

Accelerated Life Prediction for STS301L Gas Welded Joint (I)

- Fillet Type -

Seung yeb Baek**

* Dept. of Automobile Engineering, Seoil Univ.

(Received December 15, 2009 ; Received February 2, 2010 ; Accepted February 4, 2010)

Key Words : Gas Welded Joint(가스용접 이음부), Fatigue Strength(피로강도), Fatigue Design Criterion(피로설계기준) Accelerated Life Prediction(가속수명예측), Reliability(신뢰도)

초록: 용접이음부의 신뢰성 확보는 구조물의 건전성과 내구성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 가스용접 이음재의 피로설계기준(fatigue design criterion)을 정하기 위해서는 피로시험을 수행하여 $\Delta P-N_f$ 관계를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 피로데이터를 장시간 획득하는 과정에서 여러 가지 변동인자에 의해서 피로데이터가 영향을 받기 때문에 피로데이터의 신뢰도가 떨어진다. 또한, 이음재의 재질 및 접합형태가 달라질 때마다, 각각의 경우에 대해서 새로운 피로시험이 요구됨으로 많은 시간과 비용이 소모된다. 따라서 이러한 문제점들을 개선하고 신뢰성 있는 설계를 하기 위해서 필렛 가스용접 이음재를 적용, 반복피로시험을 통한 데이터를 통계적으로 분석하여, 다양한 가스용접 이음재의 피로수명을 예측함과 동시에 실제 피로시험데이터와 비교·분석하여 예측된 수명의 신뢰도(reliability)와 신뢰구간(confidence interval)을 추정함으로써 새로운 피로설계기준 방법을 제시하고자 하였다.

Abstract: Stainless steel sheets are widely used as the structural material for railroad cars and commercial vehicles. Structures made of stainless steel sheets are commonly fabricated by gas welding. For the fatigue design of gas welded joints such as fillet joints, it is necessary to obtain design information of the stress distribution at the weldment as well as the fatigue strength of the gas-welded joints. Further, the influence of the geometrical parameters of gas-welded joints on stress distribution and fatigue strength must be evaluated. in this study, $\Delta P-N_f$ curves were obtained by fatigue tests. and, the $\Delta P-N_f$ curves were rearranged on the basis of the $\Delta \sigma-N_f$ relation for the hot-spot stresses at the gas-welded joints. These results, were used for conducting an accelerated life test(ALT) From the experiment results, an acceleration model was derived and factors were estimated. The objective is to obtain the information required for the analysis of the fatigue lifetime of fillet welded joints and for data analysis by the statistic reliability method to save time and cost and to develop optimum accelerated life prediction plans.

- 기호설명 -

1. 서론

- E : 탄성계수 (MPa)
- FEM : 유한요소법
- ΔP : 피로하중 범위 (N)
- σ_{max} : 최대 주응력 (MPa)

철도차량, 자동차 등과 같은 박판 용접구조물의 설계에 있어서 무엇보다도 용접과정에서 발생할 수 있는 야금학적, 역학적 현상 외에도 용접 이음부의 신뢰성 확보는 구조물의 건전성과 내구성(durability)에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 따라서, 가스용접 이음재의 피로강도 및 피로이음부의 기하학적 인자들이 피로강도(fatigue strength)에 미치는 영향에 대한 정보를 확보하는

* Corresponding Author, sandos7@kornet.net

것은 매우 중요하고 필요하다. 왜냐하면, 용접 이음부의 신뢰성 확보는 구조물의 건전성과 내구성(durability)에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 따라서, 가스용접 이음재의 피로강도 및 수명평가와 피로설계기준(fatigue design criterion)을 정하기 위해서는 피로시험을 수행하여 얻어진 $\Delta P-N_f$ 관계를 이용하는 것이 일반적이다.^(1~4) 그러나 피로데이터(fatigue data)를 장시간 획득하는 과정에서 여러 가지 제어할 수 없는 변동인자, 시험환경과 조건의 변동, 재료의 표본오차(sampling error), 실험자의 숙련도 등에 의해서 피로데이터가 영향을 받기 때문에 피로데이터의 신뢰도(reliability)가 떨어지는 것이 사실이다. 또한, 이음재의 재질 및 접합 형태가 달라 질 때마다, 각각의 경우에 대해 새로운 피로시험이 요구되므로 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 문제들을 개선하고 신뢰성 있는 설계를 하기 위해서는 실제 피로시험을 통하여 획득한 피로데이터를 통계적으로 평가하고 해석하는 것이 효과적일 것이다.

따라서, 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 피로데이터의 신뢰도를 높이기 위해 반복 실험에 대한 실험계획법을 적용하여, 필렛 용접 이음재의 응력분포해석과 피로강도평가를 수행해서 동일한 시험환경 조건에서 획득한 피로데이터를 통계적으로 분석하여, 필렛 용접한 다양한 가스용접 이음재의 피로수명을 예측함과 동시에 실제 피로시험 데이터와 비교하여 예측된 수명의 신뢰도(reliability)와 신뢰구간(confidence interval)을 분석함으로써, 피로시험을 수행하지 않고도 피로수명과 피로설계기준을 예측할 수 있는 새로운 방안을 제시하고자 하였다.

2. 가스용접 이음재의 실험설계 및 피로강도 평가

2.1 실험계획법^(5,6)

실험의 특성치(characteristic value)에 대해서 영향을 미치고 있는 원인이 어떻게 관계되어 있는가를 이론적·경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 왜냐하면, 특성치에 대해 영향을 미치는 원인은 다양하기 때문이다. 즉, 시험편의 제작, 실험장치, 실험자의 숙련도 등의 차이에서 오는 데이터의 산포(scatter)가 있고, 환경조건의 변동, 표본오차(sampling error) 등에 의해서도 영향을

받기 때문이다. 실험에 있어서 측정 데이터에 산포를 준다고 생각되는 많은 원인들 중에서 실험

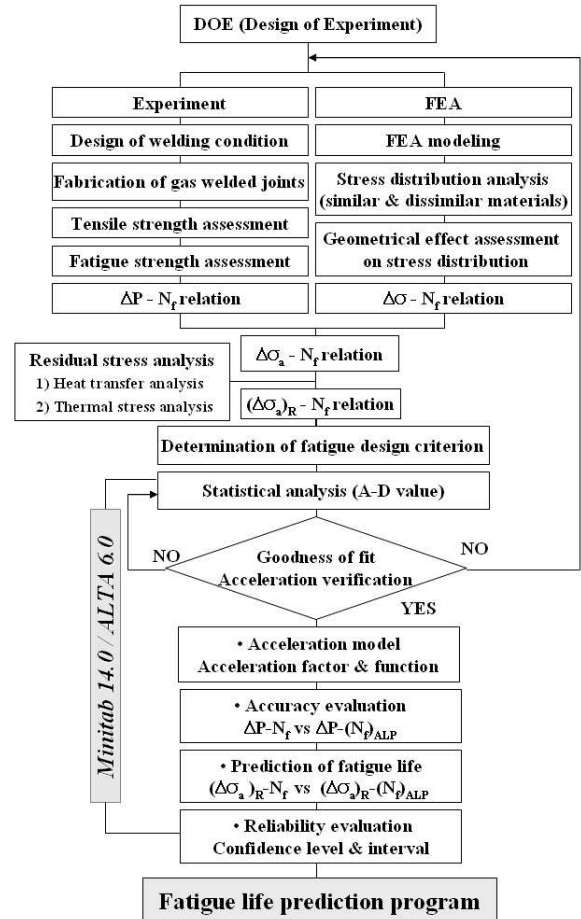
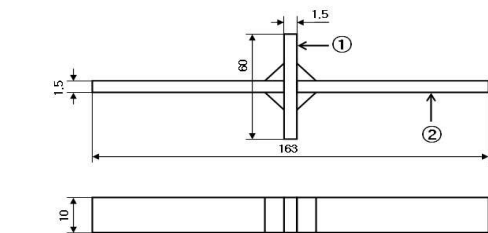
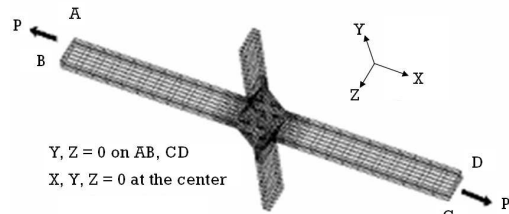


Fig. 1 Flow of fatigue life prediction and reliability evaluation



(a) Specimen



(b) 3-D FEA model of fillet gas welded joint for stress analysis

Fig. 2 Fillet-type gas welded joint

Table 1 Total experimental numbers and effect analysis in table of orthogonal array

D.O.E. (Design of Experiment)	Number of test	Effect Analysis	
Orthogonal Array	1) Factor Analysis ; 27 2) Replicate test ; 5 3) Number of total test ; 135	Main effect	0
		Second interaction	0

Table 2 Experimental design table

StdOrder	Horizontal	Factors		
		Vertical	Welding type	Stress
1	ST(1.5)	ST(1.5)	FILLET	30%
2	ST(1.5)	ST(1.5)	FILLET	50%
3	ST(1.5)	ST(1.5)	FILLET	70%
4	ST(1.5)	ST(1.5)	PLUG	30%
5	ST(1.5)	ST(1.5)	PLUG	50%
6	ST(1.5)	ST(1.5)	PLUG	70%
7	ST(1.5)	ST(1.5)	RING	30%
8	ST(1.5)	ST(1.5)	RING	50%
9	ST(1.5)	ST(1.5)	RING	70%
10	ST(1.5)	HT(1.5)	FILLET	30%
11	ST(1.5)	HT(1.5)	FILLET	50%
12	ST(1.5)	HT(1.5)	FILLET	70%
13	ST(1.5)	HT(1.5)	PLUG	30%
14	ST(1.5)	HT(1.5)	PLUG	50%
15	ST(1.5)	HT(1.5)	PLUG	70%
16	ST(1.5)	HT(1.5)	RING	30%
17	ST(1.5)	HT(1.5)	RING	50%
18	ST(1.5)	HT(1.5)	RING	70%
19	ST(1.5)	DLT(1.5)	FILLET	30%
20	ST(1.5)	DLT(1.5)	FILLET	50%
21	ST(1.5)	DLT(1.5)	FILLET	70%
22	ST(1.5)	DLT(1.5)	PLUG	30%
23	ST(1.5)	DLT(1.5)	PLUG	50%
24	ST(1.5)	DLT(1.5)	PLUG	70%
25	ST(1.5)	DLT(1.5)	RING	30%
26	ST(1.5)	DLT(1.5)	RING	50%
27	ST(1.5)	DLT(1.5)	RING	70%

Table 3 Chemical composition(%) of materials

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 4 Mechanical properties of materials

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

(DLT: Deadlite tensile, ST : Special tensile, HT : High Tensile)

과정에서 조절 가능한 원인을 인자(factor)라하고, 이들 인자의 특정한 조건을 인자의 수준(level)이라고 한다. 이러한 특성과 인자를 고려한 실험계획법(DOE ; Design of Experiment)이란, 주어진 실험에 대해 최소의 실험횟수로 최대의 정보를 얻기 위한 실험설계와 통계적 방법을 이용하여 실험 데이터를 분석하는 것이라 할 수 있다. 실험계획법에 적용되는 분산분석(ANOVA ; Analysis of Variance)은 특성치의 변동을 인자별로 분석하여 어느 인자가 큰 변동을 나타내고 있는가를 규명하는 방법으로써, 각 파라메타(Parameter)들의 최적 수준과 최적 조건을 선정하는데 주로 적용하고 있다.

2.2 실험 설계

2.2.1 인자 및 수준의 설정

본 연구에서는 Fig. 2(a)와 같이 철도차량 차체구조 제작에 있어서 가장 많이 사용하고 있는 가스용접 이음형태인 +자형 필렛이음(fillet joint)을 본 연구의 대상으로 선정하였다. 그리고 각 이음형태의 수평재(horizontal), 수직재(vertical), 수평재와 수직재를 일체화 시키는 용접방법 그리고 스트레스를 인자로 설정하고, 각 인자의 수준은 3수준으로 설정하였다. Table 1은 실험에 사용된 직교 배열표를 나타낸 것으로 분석의 정확도를 위해 2차 교호작용까지 분석한 완전 요인 실험법(full factorial design)을 적용하였다.

2.2.2 실험설계 결과

Table 2는 이음재 재질, 용접종류, 스트레스 수준을 특성치에 영향을 주는 인자로 선정하고, 각각의 인자에 3가지 수준수를 적용하여 실험 설계한 것을 나타낸 것이다. 실험방법에 있어서는 수명에 대한 최적 파라메타(optimality parameter)의 연관성을 분석하기 위해서, 3수준 완전 요인배치법(3-levels full factorial design)을 적용하였다. 따라서, 총 실험횟수는 3인자 수준의 실험 설계에 실험오차를 객관적 정량적으로 평가하기 위해 실험계획의 기본원리를 적용하여 각각 5회 반복시험을 수행하는 것으로 해서 총 135회 피로시험을 실시하였다. 피로시험의 판정기준을 파단시점으로 하였으며, 무한수명은 10⁷cycles로 하였다. 실험설계 및 확률론적 통계분석(statistical analysis)에 사용된 상용 프로그램은 Minitab 14.0을 사용하였다.

Table 5 Gas welding condition and process

Materials	STS 301L		
Welding	GMAW Semi-auto robot		
Welding condition	Welding type	Fillet	Plug/Ring
	Pass	4 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	

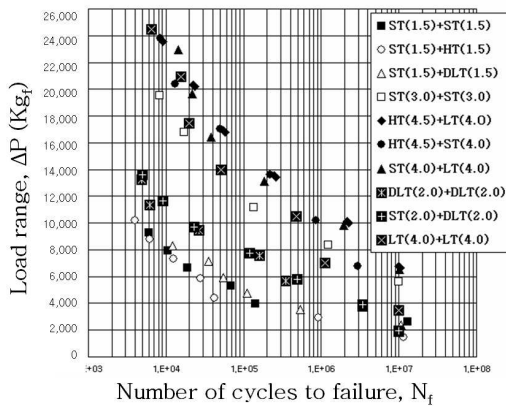


Fig. 3 $\Delta P-N_f$ relation of various fillet-type welded joints

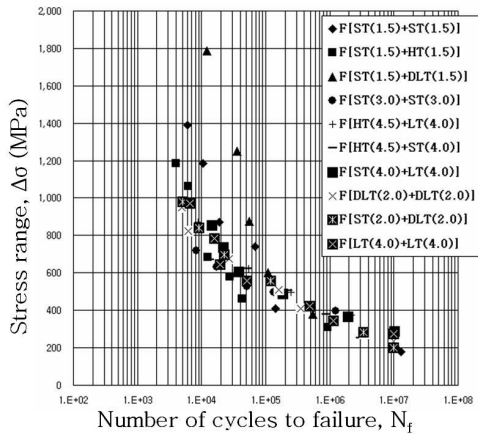
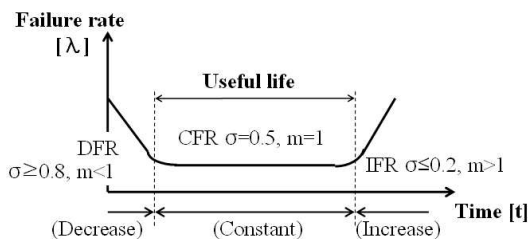


Fig. 4 $\Delta \sigma-N_f$ relation of various fillet-type welded joints



(DFR ; Decrease Failure Rate / CFR ; Constant Failure Rate / IFR ; Increase Failure Rate)

Fig. 5 Bath-tube curve

2.3 피로강도 평가

2.3.1 시험편 및 시험장치

피로시험편은 Table 3, 4의 STS 301L을 Fig. 2(a)와 같은 형상으로 동종재 및 이종재간 가스 용접한 이음재로서, Table 5와 같이 필렛 용접과 플러그 및 링 용접에 대한 용접성 평가를 통하여 도출된 최적 용접조건으로 제작하였다. 피로시험 장치는 서보 유압식 피로시험기(MTS, 용량 ; 10ton)와 면압식 지그(Jig)를 사용하였다.

2.3.2 시험조건 및 시험방법

하중 반복속도를 25Hz로 하고, 부하형태는 하중 비($R=P_{min}/P_{max}$)가 0($P_{min}=0$)인 정현파(Sine wave)로 하였다. 시험 종류별로 인장강도(tensile strength)의 70%, 50%, 30%, 20% 하중으로 JIS Z 2237 및 JIS Z 3103 에 의거 피로시험을 수행하였고, 무한수명의 피로한도(fatigue limit)를 구하기 위해서는 10^7 cycles에 이를 때까지 실험을 진행하였다.

2.3.3 시험결과 및 고찰

Fig. 3은 STS 301L의 동종재 및 이종재간 가스 용접한 필렛용접 이음재의 피로강도를 $\Delta P-N_f$ 선도로 나타낸 것이다. 각 용접이음재의 피로강도에 대한 기하학적 인자의 영향을 비교할 수는 있지만, 가스용접과정에서 야기된 용접부 용접금속의 야금학적변화와 용접잔류응력의 조합된 영향으로 데이터의 분산 폭이 이음형상, 재질 등을 종합적으로 고려한 피로설계인자를 결정하는데 지장을 줄 만큼 매우 큼($\Delta P_{lim(fillet)}=2000 \sim 7000$ N)을 알 수 있다. 따라서, 피로강도에 영향을 미치는 제 인자들을 종합적으로 고려 할 수 있는 설계조건과 특성의 목표수명을 만족하는 설계기준을 설정하기에는 어려움이 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해, 피로균열의 발생과 파단은 주로 응력이 집중되는 위치(hot spot point)에서 일어나므로 용접잔류응력과 응력집중의 조합에 의한 최대응력(hot spot stress)으로 설계기준을 설정하는 것이 보다 더 합리적일 것으로 판단되었다. 그래서 본 연구에서는 최대주응력(maximum principle stress)에 대한 응력분포해석을 목적으로 Fig. 2 (b)와 같이 시뮬레이션 모델(simulation model)을 제작하여, Fig. 3의 결과를 최대 주응력으로 Fig. 4와 같이 정리하였다. 그 결과 Fig. 3에 비해 데이터 분산 폭이 전체적으로 200~300 MPa로 감소하는 결과를 확인할 수 있었다. 이 결과로부터

가스용접 이음형태와 각 이음재의 기하학적 인자를 종합적으로 고려한 피로설계기준은 피로균열의 발생과 파단에 직접적으로 관여하는 최대응력으로 설정하는 것이 보다 더 경제적이고 합리적인 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서의 피로수명예측은 최대응력에서의 수명데이터를 확률론적 통계해석을 수행하여 수명예측을 평가하였다.

2.4 확률론적 통계해석방법

2.4.1 가속수명예측

가속수명시험은 일반적인 사용조건하의 스트레스보다 더 높은 스트레스에서 피로시험을 하여 짧은 시간에 시험편의 파괴 데이터를 얻고, 여기서 얻어진 데이터를 이용하여 재료의 실제 사용조건에서의 수명분포(life distribution)를 추론하는 시험방법으로써 데이터의 신뢰도(reliability)를 높일 수 있으며, 시험시간과 비용을 절감할 수 있다. 미리 시험시간을 정하고 그때까지의 고장 데이터를 분석하는 방법을 type I censoring 이라하며, 미리 설정한 고장 갯수에 도달할 때까지 시험을 계속하는 방법을 type II censoring 이라고 한다. 본 연구에서는 type II censoring 방법을 적용하였다.

2.4.2 해석방법

2.4.2.1 가속수명시험 모델

가속수명시험의 신뢰성 해석은 통계적인 방법을 이용한 물리적 해석을 적용한다. 통계적인 방법에는 수명 데이터의 분포 또는 그 분포의 모수들을 추정함으로써 수명관련 설계 특성 치를 얻는데 사용된다. 가속수명예측은 사용조건 보다 가혹한 하중에서 시험하여 고장발생을 가속시키고, 가속된 조건(accelerated condition)에서 획득한 수명데이터를 수명-스트레스 관계식으로 변환하여 실제 사용조건에서의 수명을 추정하는 방법이다. 이때의 수명-스트레스 관계를 추정하기 위해 알헨니우스 방정식(Arrhenius function), 아이링 방정식(Eyring function), 역 누승 함수(Inverse power function) 등의 물리적 해석방법을 적용하고, 신뢰성 해석에 사용되는 수명 데이터의 산포를 통계적으로 분석하기 위해 지수분포(Exponential distribution), 대수정규분포(Lognormal distribution), 정규분포(Normal distribution), 와이블 분포(Weibull distribution) 등을 적용한다. 통계적 모델은 수명분포의 특성을 나타내는 것으로 Fig. 5의 고장률 곡선(bath-tube curve)과 밀접한 관계를 갖는다.⁽⁷⁾ 초기 고장률이 감소하는 초기 고장기

간(DFR), 고장률이 비교적 낮고 일정한 우발고장기간(CFR), 시스템의 마모 및 노화 등으로 인한 마모고장기간(IFR)의 3가지로 구분이 되며, 본 연구에서는 재료 피로수명에 관련되어 있으므로, 시간에 따라 고장률이 증가하는 IFR로 분석되어야 한다. 고장률 곡선구간의 적합도 검증방법에는 일반적인 통계이론에서 제시하고 있는 A-D 적합도 검증을 많이 사용하며, 적합분포를 선정할 때는 후보 분포 중에서 좀 더 작은 A-D 통계량 값이 분포에 잘 맞는 적합한 통계모델이 된다.

Table 5 Result of A-D value for specimen of fillet-type gas welded joints

Welded joint type (plate thickness)		Four ways probability			
		Anderson-Darling value			
		Weibull	Lognormal	Exponential	Normal
Fillet type	ST(1.5)+ST(1.5)	2.113	2.112	3.344	2.112
	ST(1.5)+HT(1.5)	2.168	2.130	2.985	2.201
	ST(1.5)+DLT(1.5)	2.193	2.193	3.167	2.218

Table 6 Optimum distribution model and failure type for specimen of fillet-type gas welded joints

Welded joint type (plate thickness)	Fitting distribution model	A-D value	Shape/Scale parameter	Failure type	remark	
Fillet	ST(1.5)+ST(1.5)	Lognormal	2.112	0.11	IFR	Lognormal IFR : Scale p.< 0.2
	ST(1.5)+HT(1.5)	Lognormal	2.130	0.19	IFR	
	ST(1.5)+DLT(1.5)	Lognormal	2.193	0.19	IFR	

Table 7 Acceleration function and R-square value of fillet-type gas welded joints

Welding Type	Specimen	A.F. (Acceleration Function)	R-square
Fillet	ST(1.5)+ST(1.5)	$y = 3E+10X^{-3.6608}$	98.61%
	ST(1.5)+HT(1.5)	$y = 7E+10X^{-3.9371}$	97.25%
	T(1.5)+DLT(1.5)	$y = 2E+12X^{-4.4644}$	98.61%

Table 8 Comparative analysis of $\Delta\sigma-N_f$ and $\Delta\sigma-(N_f)_{ALP}$ lifetime data for fillet-type welded joints

Condition of the specimens for fillet welded joint		Percentage of maximum tensile load					Remark
Specimen	Items	70%	50%	30%	20%	10%	
ST(1.5) + ST(1.5)	Fatigue test (N_f)	6,066	18,670	141,136	12,894,680	-	
	A.L.P. (N_f)	5,279	18,094	117,402	-	-	
	A.F.	98	29	4	1	-	
	Accuracy	87%	97%	83%	-	-	89%
ST(1.5) + HT(1.5)	Fatigue test (N_f)	4,030	12,595	83,487	782,644	13,925,003	
	A.L.P. (N_f)	3,809	14,325	107,035	628,218	-	
	A.F.	2,124	565	76	15	1	
	Accuracy	95%	88%	78%	80%	-	85%
ST(1.5) + DLT(1.5)	Fatigue test (N_f)	11,414	55,375	539,925	10,781,375	-	
	A.L.P. (N_f)	11,528	52,017	508,827	-	-	
	A.F.	268	60	6	1	-	
	Accuracy	99%	94%	94%	-	-	95%

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

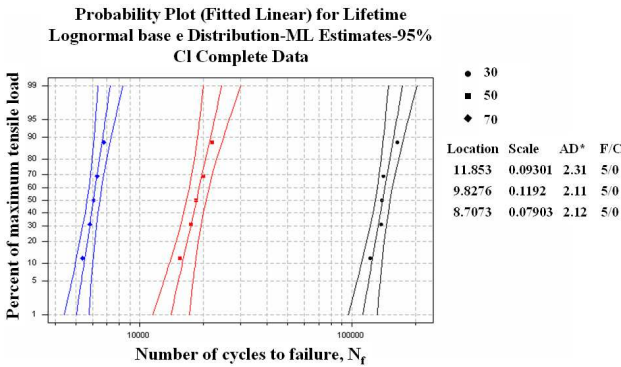


Fig. 6 Acceleration verification of fillet-type gas welded joints

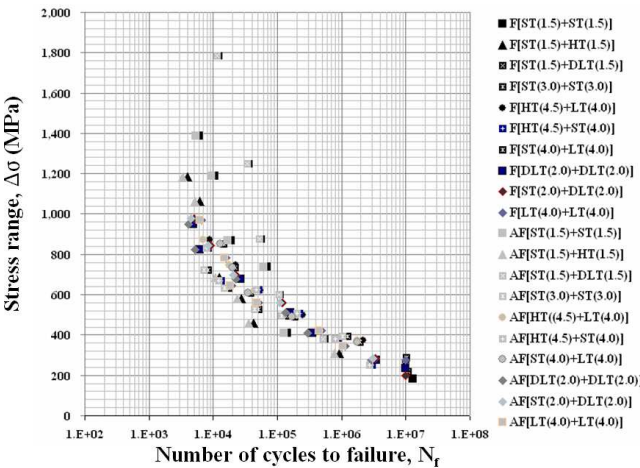


Fig. 7 Comparison of $\Delta\sigma-N_f$ and $\Delta\sigma-(N_f)_{ALT}$ for fillet-type gas welded joints

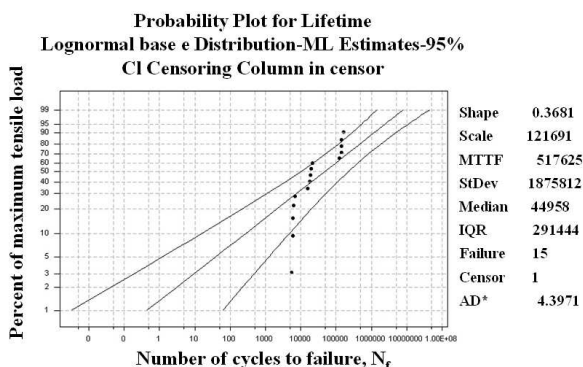


Fig. 8 Reliability estimation of fillet-type gas welded joint (ST(1.5)+ST(1.5), for example)

2.4.3 가속성과 가속모형

1) 가속성

가속성은 가속조건에서 시험한 수명 데이터간의 상관분석(correlation analysis)을 나타내는 것으로 수명 데이터를 확률지에 타점했을 경우 각 조건에서

Table 9 Percentile of fillet-type gas welded joint (for example, ST(1.5)+ST(1.5), 30% of tensile strength)

Table of Percentiles

Percent	Percentile	Standard Error	95.0% Normal CI	
			Lower	Upper
1	96103.29	15549.67	69986.20	131966.6
2	102549.7	14476.37	77763.40	135236.5
3	106540.6	13760.26	82713.79	137230.9
4	109481.5	13210.73	86422.99	138692.2
5	111830.9	12760.11	89420.72	139857.4
6	113798.4	12375.83	91953.07	140833.6
7	115498.1	12039.49	94155.57	141678.5
8	116999.2	11739.60	96111.22	142426.8
9	118346.9	11468.49	97874.73	143101.1
10	119572.4	11220.72	99484.19	143717.0
20	128214.2	9471.020	110932.5	148188.1
30	133929.6	8368.019	118493.0	151377.1
40	138478.5	7579.516	124392.0	154160.2
50	142465.0	7002.542	129380.6	156872.6
60	146210.6	6603.665	133824.0	159743.7
70	149970.4	6388.264	137958.1	163028.7
80	154073.3	6407.309	142013.3	167157.3
90	159290.8	6840.102	146433.1	173277.4
91	159954.8	6926.754	146938.8	174123.8
92	160666.7	7027.046	147467.8	175047.0
93	161438.3	7144.146	148026.0	176065.7
94	162286.4	7282.620	148622.4	177206.6
95	163236.7	7449.431	149270.0	178510.2
96	164330.8	7656.014	149990.0	180042.8
97	165644.1	7923.313	150820.5	181924.8
98	167338.1	8296.968	151841.5	184416.2
99	169895.7	8916.480	153288.5	188302.1

적합한 직선이 서로 평행하면 두 조건 사이에 가속성이 성립한다고 판단할 수 있다.⁽⁸⁾ 이것은 가속수명 시험설계에서 수명모델과 수명 데이터에 대한 모든 가정이 적합하다는 것을 의미하며, 이상점(outlier)이 모형에 부합되지 않는 데이터가 발생할 경우에는 추정한 수명과 실제 사용조건에서의 수명이 큰 차이를 나타낼 수 있기 때문에 수명-스트레스 모형에 대한 파라메타 가속성 검증은 반드시 수행하여야 한다.

2) 가속모형

가속모형은 수명과 스트레스의 관계를 수학적으로 표현한 물리적 모형이다.⁽⁹⁾ 수명분포의 모수(평균, 분위수, 표준편차)를 스트레스 변수들의 함수로 표현하는 것으로 가속수명시험의 자료 분석시 매우 중요하다. 스트레스의 물리적 변수에 따라 다음과 같이 3가지 모형을 적용할 수 있다.

- ① 아레니우스 모형 (Arrhenius model)
- ② 역 누승 모형 (Inverse power model)
- ③ 아이링 모형 (Eyring model)

본 연구에서는 기계적 부하에 따른 금속피로에 관한 가속모형이므로 역 누승 모형을 적용하였으며, 일반적인 관계식을 표현하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tau(V) = A / V^r \quad (1)$$

(A, r ; constant, $\tau(v)$; lifetime , V ; stress value)

양변에 대수를 취하면 $\ln\tau(v)$ 와 $\ln V$ 가 선형식으로 표현되는 대수선형(log-linear) 관계식이 됨을 알 수 있다.

$$\ln\tau(v) = \ln A - r \ln V = A' - r \ln V \quad (2)$$

2.4.4 해석결과

반복시험 데이터의 분산유형을 판단하기 위해 적합분포 검정을 수행하여 Table 6과 같이 각각의 분포모델에 대한 A-D 통계량 값을 비교·분석하였으며, 고장유형을 판단하기 위해 형상모수 값과 척도모수 값을 추정하였다. Table 7은 철도차량 차체구조 제작에 있어서 가장 많이 사용하고 있는 필렛 가스용접 이음재에 대한 A-D 통계량 값에 따른 적합분포와 고장유형을 나타낸 것이다. ST(1.5)+ST(1.5)와 ST(1.5)+HT(1.5) 그리고 ST(1.5)+DLT(1.5)의 형태로 필렛 용접한 이음재의 경우 모두 대수정규분포의 A-D 통계량 값이 가장 작게 분석되었다. 또한, 고장률을 분석한 결과 대수정규 분포일 경우, 모두 고장률이 증가하는 IFR로 분석되었다. 이 결과는 금속피로 시험일 경우 시간에 따라 고장률이 증가하는 것과 잘 일치하는 것으로 분석된다. 따라서, 적합분포인 대수정규분포에서의 가속식을 추론하기 위해 가속성 검증을 수행하였으며 Fig. 6은 가속성 성립에 대한 분석결과이다. 가속된 최대 인장하중과 수명과의 관계가 95% 신뢰도, 유의수준 5%에서 모두 평행하게 분석됨으로써 가속성이 성립하는 것으로 판단되었다. 가속성이 성립한다는 의미는 물리적 통계해석이 가능함을 의미하므로 금속피로에 널리 사용되고 있는 가속모형인 역 누승 모형을 적용하였다. Table 8은 역 누승 모형을 이용한 수명-스트레스 관계식을 추정하여 나타낸 것이다. Table 9는 추정된 가속식을 이

용하여 수명예측을 한 결과이다. 95% 신뢰도에서 ST(1.5)+ST(1.5)의 경우, $\Delta P=4.68 \times 10^3 N$ 이 가해졌을 때, 실제 피로시험을 통해 획득된 피로수명은 $N_f=1.41 \times 10^5$ cycles 이었고, 가속식에 의해 예측된 수명은 $N_f=1.17 \times 10^5$ cycles로 83%의 정확성을 보였다. ST(1.5)+ HT(1.5)의 경우는 $\Delta P=4.17 \times 10^3 N$ 이 가해졌을 때, 실제 피로시험을 통해 획득된 피로수명은 $N_f=7.82 \times 10^5$ cycles 이었고, 예측된 수명은 $N_f=6.28 \times 10^5$ cycles 로 80%의 정확

성을 보였다. 그리고 ST(1.5)+DLT(1.5)의 경우, $\Delta P=6.08 \times 10^3 N$ 이 가해졌을 때 실제 피로시험을 통해 획득된 피로수명은 $N_f=5.39 \times 10^5$ cycles이었고, 가속식에 의해 예측된 수명은 $N_f=5.08 \times 10^5$ cycles로 94%의 정확성을 보였다. 정확도에 대한 편차 발생은 실제 피로 데이터를 획득하는 과정에서 제어할 수 없는 인자들에 의해서 피로데이터가 영향을 받는 변동성과 유의수준 5%에서 가속식을 추정하기 위한 가속성 검증 시, 모두 통계량 값의 차이에 의해서 발생된 것으로 판단되나, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 실제 피로 시험한 수명데이터와 예측된 수명에 대한 전체적인 경향성에는 큰 차이가 나지 않음을 확인하였다.

3. 가속수명예측에 대한 신뢰도 평가

Table 10은 임의의 목표수명에 대한 신뢰도 평가와 예측된 수명의 백분위수를 나타낸 것이다. 피로 한도기준을 정하는 무한수명을 10^7 cycles 이라고 가정했을 때, 신뢰수준 95%에서 ST(1.5)+ ST(1.5)시편이 파괴되지 않을 확률은 92%, ST(1.5)+HT(1.5)은 94%, ST(1.5)+DLT(1.5)은 96%로 분석되었다. 또한, 최대 인장하중의 30%에서의 B_{10} 수명의 백분위수는 ST(1.5)+ST(1.5)의 경우 신뢰수준 95%, 표준오차 $\pm 10\%$ 에서 평균수명 119,572 cycles, 신뢰구간은 (99,484~143,717) cycles로 분석되었으며, ST(1.5)+HT(1.5)는 신뢰수준 95%, 표준오차 $\pm 10\%$ 에서 평균수명 632,160 cycles, 신뢰구간은 (500,403~798,608) cycles로 분석되었다. 그리고 ST(1.5)+DLT(1.5)의 경우는 신뢰수준 95%, 표준오차 $\pm 15\%$ 에서 평균수명 363,264 cycles, 신뢰구간은 (232,932~566,521) cycles로 분석되었다. 분석된 신뢰구간은 Table 9에 나타난 바와 같이, 실제 피로시험 데이터와 예측된 피로수명 데이터가 모두 신뢰구간 내에 존재함을 확인할 수 있었으며, 이 결과는 피로수명 데이터를 획득하는 과정에서의 불확실성과 수명예측결과에 대한 합리적인 신뢰성 척도로써의 실효성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 설계기준을 결정하는 데 필요한 피로데이터(fatigue data) 도출과정에서 발생할 수 있는 변동성을 최소화하기 위해서, 확률론적 접근방법인 가속수명 예측기법을 이용하여, 피로

데이터 $\Delta\sigma-N_f$ 관계와 가속수명예측 데이터 $\Delta\sigma_a-(N_f)_{ALT}$ 와의 관계를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가속수명 예측을 위한 통계적 최적 분포는 필렛 용접 이음재에서 대수정규분포로 분석되었으며, 실제 피로시험 데이터를 기준으로 가속수명예측의 정확도는 95% 신뢰도, 표준편차 $\pm 15\%$ 에서 ST(1.5)+ST(1.5)는 평균 89%, ST(1.5)+HT(1.5)는 85%, ST(1.5)+DLT(1.5)는 95%로 분석되었다.

(2) 예측된 수명의 정확도에 대한 편차발생은 실제 피로시험데이터 획득에 대한 다양한 변수들의 영향에 따른 변동성과 가속식 추정 시, 가속성 성립 판단에 대한 모수 통계량 값의 차이에 의해서 발생한 것으로 판단되므로, 설계자는 기율기 편차에 대한 가속성 판단은 신중히 고려해야 할 필요가 있다.

(3) 피로강도 데이터를 $\Delta\sigma-N_f$ 관계로 나타낼 때 확률론적 통계 해석방법과 가속수명 예측기법을 적용하면, 고하중 단수명 영역에서 특정 목표수명(저하중 장수명 영역)을 예측할 수 있으며, 시험을 수행하지 않는 임의의 수명을 예측하는 것이 가능할 것으로 기대되며, 설계자가 설계기준을 설정하는데 보다 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Bae, D. H. and Huh, J. B., 2005, "Evaluation of Fatigue Strength and Spot Weldability of High Strength Steel Sheet for Lightweight Automobile Body," *Key Engineering Materials* pp. 297~300.
- (2) Shin, J. H., 2003, "Fatigue Strength Evaluation of SM490A Welded Joints for Bogie Frame," *Master's Thesis of Sungkyunkwan University*, pp. 12~14.
- (3) Baek, S. Y. and Bae, D. H., 2008, "Fatigue Design for Plug/Ring Type Gas Welded Joint of STS301L Including Welding Residual Stresses," *IJAT*, Vol.9, No. 6, pp.729~734.
- (4) Kang, J. B., 2004, "Fatigue Strength of the TS-Type Spot-welded Lap Joint of STS301L," *Master's Thesis of Sungkyunkwan University*.
- (5) Hogg, R.V. and Ledolter, J., 1992, "Applied Statistics for Engineers and Physical Scientists," *New York, CIP*, pp. 264~269.
- (6) 1991 "Automatic Technology Handbook Experimental Assessment," *JSAE*, pp. 81~105.
- (7) Liao, M., 1998, "How to Use the New Table of Anderson-Darling Critical Values for Goodness-of-Fit Test for the Two-Parameter Weibull Distribution," *Symposium on Reliability and Maintainability*, Vol. 28, pp. 191~194.
- (8) Lawless, J. F. and John, W.&S., 1982, "Statistical Models and Methods for Lifetime data analysis," pp. 95~103.
- (9) Bae, D. S. and Jeon, Y. R., 1999, "Reliability Analysis," *Arche*, pp. 373~459.

(1) Bae, D. H. and Huh, J. B., 2005, "Evaluation of Fatigue Strength and Spot Weldability of High Strength Steel Sheet for Lightweight Automobile