

# STS301L 가스용접이음재의 가속수명예측에 관한 연구

## (1. Plug and Ring type)

백승엽<sup>†</sup> · 배동호<sup>\*</sup>

### A study on Accelerated Life Prediction of Gas Welded joint of STS301L (1. Plug and Ring type)

Seungyeb Baek, and Dongho Bae

Key Words : Fatigue strength(피로강도), Gas welding(가스용접), Acceleration Factor(가속계수),  
Acceleration model(가속모형), Accelerated Life Test(가속수명시험),

#### 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 an 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 weldment, 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,  $\Delta P-N_f$  curve were obtained by fatigue tests. Using these results, the accelerated life test (ALT) is conducted. From the experimental results, an acceleration model is 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.

#### 1. 서 론

철도차량 차체는 스테인리스 강(stainless steel)과 같은 냉간 압연한 고장력 강판을 프레스(press) 가공해서 외판과 보강재를 결합하여 제작한다. 그리고 이들을 일체화하는 수단으로 전기저항 점 용접(electric resistance spot welding)과 가스용접(gas welding)이 이용되고 있다. [1] 용접부는 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이 외력에 의한 응력

집중원(stress concentration)이 되는 것은 물론 용접 과정에서의 입열(heat input)로 인한 성분과 조직의 변화, 용접잔류응력(welding residual stress)발생 등에 의해 반복하중에 대한 피로강도(fatigue strength)가 모재(base metal)의 그것에 비해 훨씬 떨어진다. 따라서, 용접 구조물의 용접 이음부(weldment)에 대한 신뢰성(reliability) 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 용접이음부의 기하학적 인자(geometrical factors)

<sup>†</sup> 책임저자, 학생회원, 성균관대학교 대학원 기계공학부  
E-mail : baek@yurim.skku.ac.kr  
TEL : (031)290-7443 FAX : (031)290-5849

<sup>\*</sup> 성균관대학교 대학원 기계공학부

들이 피로강도에 미치는 영향에 대한 정보를 확보하는 것이 매우 중요하고 필요하다. 지금까지 박관 용접 구조물의 피로설계(fatigue design)를 위한 연구들은 피로하중 범위-피로 수명( $\Delta P-N_f$ ) 관계[2,3] 또는 응력과 피로수명( $\Delta \sigma-N_f$ ) 관계[3,4]를 이용하여 피로 설계기준(fatigue design criterion)을 평가하였지만, 설계기준을 결정하는데 필요한 피로데이터(fatigue data) 도출과정에서 발생할 수 있는 변동성에 대한 신뢰도를 높이기 위한 확률론적 해석(statistical analysis)은 미흡하며, 피로데이터를 장 시간 동안 획득하는 과정에서의 제어 할 수 없는 인자들 즉, 시험환경 조건의 변동, 재료의 표본오차(sampling error), 시험자의 숙련도 등에 의해서 피로데이터가 영향을 받기 때문에 실험자의 노력에 비해 피로데이터의 신뢰도가 떨어지는 것이 사실이다.

따라서 본 연구에서는 철도차량 차체제작에 적용되는 대표적 이음형상들을 시뮬레이션(simulation)하고 이들을 일체화하는 수단으로 플러그 용접과 링 용접의 가스용접을 이용하여, 동일한 시험환경 조건에서 시편을 5 회 반복 시험을 통해 재료의 표본오차와 시험환경의 조건변화에 따른 시험 오차를 줄이고자 하였고, 장시간 피로시험을 통한 피로 수명 데이터에 통계신뢰성 이론(Theory of the statistics reliability)을 적용한 가속수명 예측기법을 이용하여 수명 데이터  $\Delta P-N_f$  와 가속된 수명데이터  $\Delta P_{ALT}-N_f$  와의 관계를 비교 평가하여, 여러 가지 제안된 피로강도 평가법의 신뢰성을 통계적인 방법으로 검증하고자 하였다.

## 2. 확률론적 해석

### 2.1 가속수명예측[5]

가속수명시험은 일반적인 사용조건하의 스트레스보다 더 높은 스트레스에서 피로시험을 하여 짧은 시간에 시험편의 파괴 데이터를 얻고, 여기서 얻어진 데이터를 이용하여 재료의 실제 사용조건에서의 수명분포를 추론하는 시험방법으로 데이터의 신뢰도를 높일 수 있으며, 시험시간과 비용을 절감 할 수 있다. 미리 시험시간을 정하고 그때까지의 고장 데이터를 분석하는 방법을 type I censoring 이라 하며, 미리 설정한 고장 갯수에 도달 할 때까지 시험을 계속하는 방법을 type II

censoring 이라고 한다. 본 연구에서는 type II censoring 방법을 적용하였다.

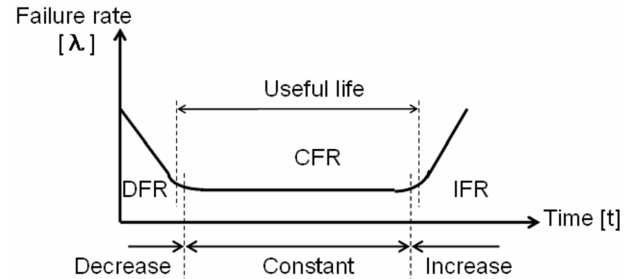


Fig 1 Bath-tube curve

### 2.2 해석 방법

#### 2.2.1 가속수명시험 모델[6]

가속수명시험의 신뢰도 해석은 물리적 해석방법과 통계적 해석방법을 적용한다. 물리적 해석방법에는 알렌니우스 방정식(Arrhenius function), 아이링 방정식(Eyring function), 역 누승 함수(Inverse power function)를 이용하고, 통계적인 방법에는 지수분포(Exponential distribution), 대수 정규분포(Lognormal distribution), 정규분포(Normal distribution), 와이블 분포(Weibull distribution) 등을 적용한다. 통계적 모델은 수명분포의 특성을 나타내는 것으로 Fig 1 의 고장율곡선(bath-tube curve)과 밀접한 관계를 갖는다. 초기 고장율이 감소하는 초기고장기간(DFR ; Decrease Failure Rate), 고장율이 비교적 낮고 일정한 우발고장기간(CFR ; Constant Failure Rate), 시스템의 마모 및 노화 등으로 인한 마모고장기간(IFR ; Increase Failure Rate)의 3 가지로 구분이 되며, 본 연구에서는 재료 피로수명에 관련되어 있으므로, 고장율 곡선구간은 IFR 로 분석되어야 한다. 고장율 곡선구간의 적합도 검정방법에는 누적 분포 함수를 이용한 A-D(Anderson-Darling) 적합도 검정방법과 K-S(Kolmogorov-Smirnor) 검정 방법을 사용하며, 연속형 자료를 몇 개의 범주로 구분하여 적용할 수 있는  $\chi^2$  검정 등이 있다. 일반적으로 A-D 적합도 검증을 많이 사용하며, A-D 통계량 값은 확률지에 도시된 점과 이들을 적합한 직선의 누적 분포함수와 이론적 분포함수의 차이를 측정하는 값으로, 분포의 끝 부분에 큰 가중치를 가지도록 하여 적합된 직선과 도시된 점과의 가중된 제공거리를 구한 값이다. 따라서, 수명자료를 대상으로 적합한 분포를 선정할 때는 후보 분포 중에서 좀더 작은 A-D 통계량 값을 가지는

분포에 잘 맞는 적합한 통계모델이 된다.

### 2.2.2 가속성과 가속모형

#### 1) 가속성[7]

가속성은 가속조건에서 시험한 수명 데이터간의 상관분석(correlation analysis)을 나타내는 것으로 수명 데이터를 확률지에 타점했을 경우 각 조건에서 적합한 직선이 서로 평행하면 두 조건 사이에 가속성이 성립한다고 판단할 수 있다. 이것은 가속수명 시험 설계에서 수명모델과 수명 데이터에 대한 모든 가정이 적합하다는 것을 의미하며, 이상점(outlier)이 모형에 부합되지 않는 데이터가 발생할 경우에는 추정된 수명과 실제사용조건에서의 수명이 큰 차이를 나타낼 수 있기 때문에 수명-스트레스 모형에 대한 파라메타 가속성 검증은 반드시 수행하여야 한다.

본 연구에서의 적합 분포는 대수정규분포와 와이블 분포로 분석되었으며, 이때의 가속성 검증방법은 대수정규분포의 경우 척도 모수  $\sigma$  (scale parameter), 와이블 분포의 경우에는 형상 모수  $m$  (shape parameter)이 같을 때 가속성이 성립하여야 한다.

#### 2) 가속모형[8]

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

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

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

$$\tau(V) = \frac{A}{V^\gamma} \quad (1)$$

(A,  $\gamma$ : 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.

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

Table 1 Result of A-D value for specimen of plug and ring gas welded joints

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

Table 2 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/Scale parameter	Failure type
Plug	ST(1.5)+ST(1.5)	Lognormal	2.126	0.12	IFR
	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

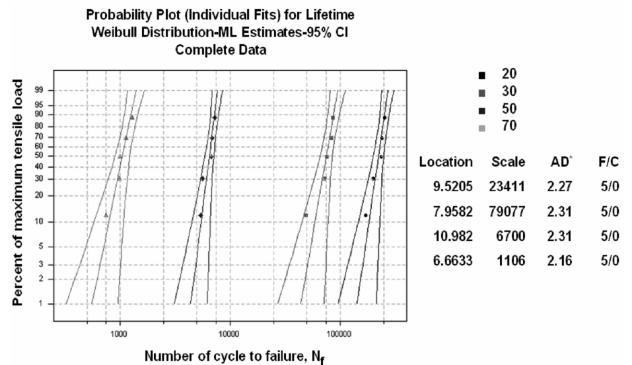


Fig 2. Acceleration verification of plug welded joints (ST(1.5)+ST(1.5))

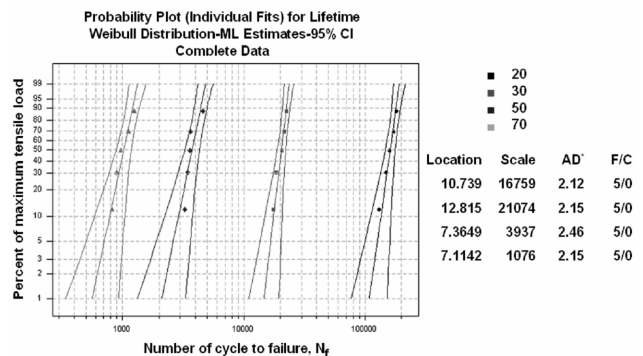


Fig 3. Acceleration verification of ring welded joints (ST(1.5)+ST(1.5))

### 2.3 확률론적 해석결과

Table 1 은 철도차량 차체구조 제작에 있어서 가장 많이 사용하고 있는 가스용접 이음재의 플러그 용접과 링 용접에 대한 A-D 값을 나타낸 것이다. 플러그 용접의 ST(1.5)+HT(1.5) 결합시편은 대수정규 분포, 플러그 용접의 ST(1.5)+HT(1.5), ST(1.5)+DLT(1.5) 결합시편과 링 용접시편은 와이블 분포가 적합분포로 분석 되었으며, 고장을 분석은 모두 IFR 로 분석되었다. 또한, 가속성 검증은 Fig 2, Fig 3 과 같이 각각의 스트레스 가속조건에서 모두 가속성이 성립하는 것으로 분석되었다. 가속모형은 기계적 부하에 따른 금속피로에 적용되는 역 누승 모형을 적용 하였으며, 플러그 용접과 링 용접의 가속식은 Table 3 과 같이 분석되었다.

가속조건은 무한수명에 해당하는  $10^7$  Cycles 의 피로한도 조건을 정상 상태로 놓았을 경우 최대 인장강도의 70%, 50%, 30%를 가속조건으로 가정 하였으며, 통계적 해석 및 데이터 분석에 사용된 상용 프로그램은 MINITAB 14.0 을 사용하였다.

Table 3 Acceleration function and R-square value of plug and ring gas welded joints

Welding Type	Specimen	A.F. (Acceleration Function)	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%

Table 4 Chemical composition (%) of material

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.03	1.00	2.00	0.04	0.03	6-8	16-18	0.2

Table 5 Mechanical properties of materials

Material	Symbol	Yield 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

### 3. 가스용접 이음재의 피로강도 평가

#### 3.1 시험편 및 시험장치

피로 시험편은 Tables 4, 5 의 STS301L 을 Fig. 4 (b)(c)와 같은 형상으로 동종재 및 이종재간 가스 용접한 이음재로써, 용접성 평가를 통하여 도출된 최적 용접조건으로 제작하였다. 피로시험 장치는 서보 유압식 피로시험기(MTS, 용량 : 10ton) 와 면압식 지그(Jig)를 사용하였다..

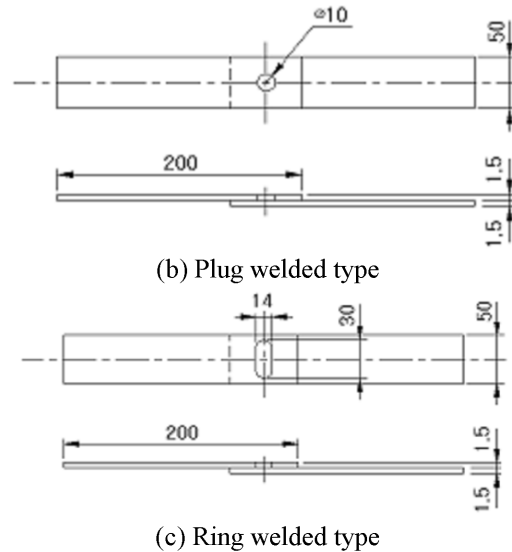


Fig. 4 Gas welded joint specimen

#### 3.2 시험조건 및 시험방법

하중 반복속도를 25Hz 로 하고, 부하형태는 하중비( $R=P_{min}/P_{max}$ )가 0( $P_{min}=0$ )인 정현파(Sine wave)로 하였다. 시편 종류별로 인장강도(tensile strength) 의 70%, 50%, 30% 20% 하중으로 JIS Z2273 및 JIS Z 3103 에 의거 피로시험을 수행하였고, 무한수명의 피로한도(fatigue limit)를 구하기 위해서는  $10^7$  Cycles 에 이를 때까지 실험을 진행 하였다.

Table 6 Maximum tensile strength of plug and ring gas welded joints

Welded joint type (plate thickness)		Max tensile strength N (Kg <sub>f</sub> )
Plug	ST(1.5)+ST(1.5)	≥ 18502(1888)
	ST(1.5)+HT(1.5)	≥ 19727(2013)
	ST(1.5)+DLT(1.5)	≥ 22706(2317)
Ring	ST(1.5)+ST(1.5)	≥ 39102(3990)
	ST(1.5)+HT(1.5)	≥ 49921(5094)
	ST(1.5)+DLT(1.5)	≥ 36691(3744)

Table 7 Comparative analysis of  $\Delta P-N_f$  and  $\Delta P_{ALT}-N_f$  lifetime data for plug welded joints

Condition of the specimens for plug welded joint		Percentage Of Maximum tensile load					Remark
Specimen	Items	70%	50%	30%	20%	10%	
ST(1.5) + ST(1.5)	Fatigue test ( $N_f$ )	709	4,074	46,965	251,761	5,417,206	
	A.L.P.( $N_f$ )	974	4,578	48,010	310,079	-	
	A.F.	7,728	1,643	157	24	1	
	Accuracy	73%	89%	98%	81%	-	85%
ST(1.5) + HT(1.5)	Fatigue test ( $N_f$ )	1,031	6,381	73,978	221,330	5,304,080	
	A.L.P.( $N_f$ )	1,401	5,866	51,598	289,845	-	
	A.F.	3,955	944	107	19	1	
	Accuracy	74%	92%	70%	76%	-	79%
ST(1.5) + DLT(1.5)	Fatigue test ( $N_f$ )	1054	3714	40292	125646	7829296	
	A.L.P.( $N_f$ )	1180	4175	28425	130284	-	
	A.F.	1490	421	62	13	1	
	Accuracy	89%	89%	71%	96%	-	85%

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

Table 8 Comparative analysis of  $\Delta P-N_f$  and  $\Delta P_{ALT}-N_f$  lifetime data for ring welded joints

Condition of the specimens for ring welded joint		Percentage Of Maximum tensile load					Remark
Specimen	Items	70%	50%	30%	20%	10%	
ST(1.5) + ST(1.5)	Fatigue test ( $N_f$ )	1,008	3,714	20,217	159,710	5,256,817	
	A.L.P.( $N_f$ )	1,098	4,128	30,811	151,917	-	
	A.F.	2,115	563	75	15	1	
	Accuracy	92%	90%	66%	95%	-	88%
ST(1.5) + HT(1.5)	Fatigue test ( $N_f$ )	1,067	3,146	11,047	40,527	4,586,969	
	A.L.P.( $N_f$ )	1,162	3,020	12,869	40,666	-	
	A.F.	250	96	23	7	1	
	Accuracy	92%	96%	86%	99%	-	89%
ST(1.5) + DLT(1.5)	Fatigue test ( $N_f$ )	2,776	6,023	26,687	87,815	5,150,684	
	A.L.P.( $N_f$ )	2,968	7,393	29,551	88,758	-	
	A.F.	250	96	23	7	1	
	Accuracy	94%	81%	90%	99%	-	86%

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

### 3.3 시험데이터 vs 가속수명 데이터 비교분석

플러그 용접과 링 가스용접 이음재의 피로시험을 수행하여 피로하중범위-피로수명( $\Delta P-N_f$  관계)를 도출하였다. 또한 수명예측을 위해 물리적·통계적 해석방법을 이용하여 확률론적 해석은 2절에서 분석된 대수정규분포, 와이블 분포, 물리적 해석방법인 가속모형을 적용하여, Table 3 과 같이 플러그, 링 용접 이음재의 가속식을 구하여 Table 7, Table 8 과 같이 가속수명을 예측하였다. 플러그 용접에서는 실제 피로시험 데이터를 기준으로 수명예측을 한 결과, 실제 데이터의 80% 정도의 신뢰도 평가가 되었으며 무한수명의 피로한도를 정상상태로 가정했을 때, 최대 인장하중의 70%에서 2,124 배 가속된 것으로 분석되었다. 링 용접은 실제 피로 시험한 데이터와 가속된 수명 데이터의 신뢰도가 평균 95% 정도 평가 되었으며, 최대인

장하중의 70%에서 가속이 268 배 가속된 것으로 분석되었다. Fig 6 과 Fig 7 의 결과는 플러그 용접과 링 용접의 실제 피로시험을 통한 피로강도를  $\Delta P-N_f$  관계와 가속계수에 의한 수명예측 데이터를 비교한  $\Delta P_{ALT}-N_f$  관계를 비교한 것으로 실제 수명 데이터와 상당히 근접한 것으로 분석되었다. 이와 같은 분석결과는 향후 고 하중 단 수명 영역에서 특정의 목표수명을 예측할 수 있는 설계 기준을 설정하는데 보다 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단한다.

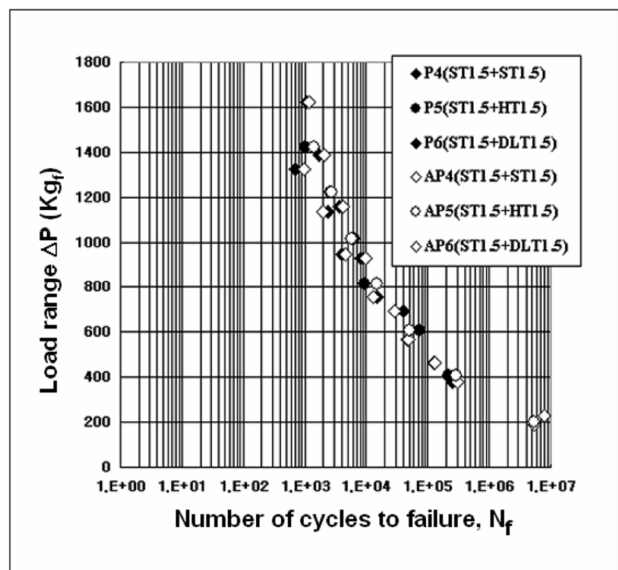


Fig 5 Comparison of  $\Delta P-N_f$  and  $\Delta P_{ALT}-N_f$  for plug welded joints

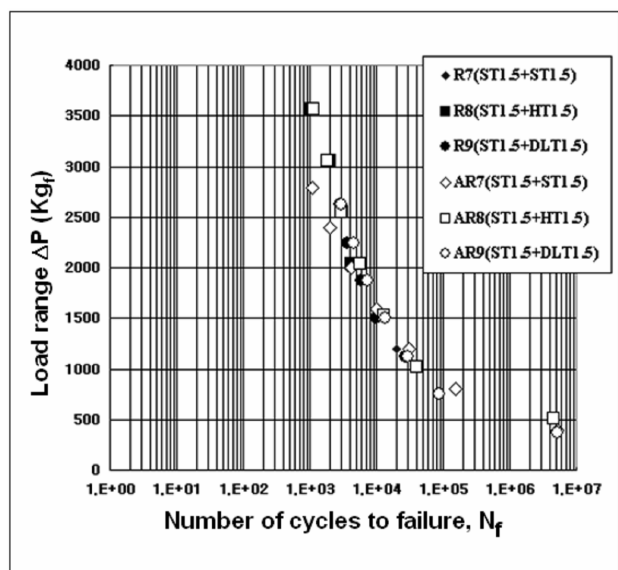


Fig 6 Comparison of  $\Delta P-N_f$  and  $\Delta P_{ALT}-N_f$  for ring welded joints

#### 4. 결론

본 연구에서는 설계기준을 결정하는데 필요한 피로데이터(fatigue data) 도출과정에서 발생할 수 있는 변동성을 최소화하기 위해서, 확률론적 접근방법인 가속수명 예측기법을 이용하여, 피로 데이터  $\angle P-N_f$  관계와 가속 수명예측 데이터  $\angle P_{ALT}-N_f$  와 의 관계를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가속수명 예측을 위한 통계적 최적 분포는 플러그 용접 이음재 ST(1.5)+ST(1.5)에서 대수정규분포, 플러그 용접의 ST(1.5)+HT(1.5), ST(1.5)+DLT(1.5)와 링 용접은 와이블 분포로 분석되었으며, 실제 피로시험 데이터를 기준으로 가속수명예측의 수명 신뢰도는 플러그 용접이 80%, 링 용접이 95% 분석되었다.
- 2) 와이블 분포함수의 형상 모수와 대수정규분포함수의 척도 모수에 의한 적합분포 모델은 비슷한 분포함수로 평가되었으나, 가속성 검증 시 모집단의 산포에 따른 기울기 편차에 따른 가속성 판단은 신중히 고려해야 할 필요가 있다.
- 3) 피로강도 데이터를  $\angle P-N_f$  관계로 나타낼 때 확률론적 통계 해석방법인 가속수명예측 기법을 적용하면, 고 하중 단 수명 영역에서 특정 목표수명을 예측할 수 있는 피로 설계 기준을 설정하는데 보다 효과적인 설계가 가능할 것으로 기대된다.

#### 5. 참고 문헌

- (1) H. T. Kang, (2005), " Fatigue damage parameter of spot welded joints under proportional loading." IJAT, 13, pp. 285~291
- (2) 裴東鎬, 1991, "引張-剪斷荷重을 받는 一點 spot 熔接 이음재의 破壞力學的 疲勞強度評價", 自動車工學會 論文集 제 13 권 5 호, pp. 42~50
- (3) D. H. Bae, J. E. Niisawa and N. Tomioka, "Theoretical analysis of stress distribution of single spot welded lap joint under tension-shear load", Transection of JSAE, No. 39, pp. 627~630, 1988.
- (4) D. H. Bae, 1990, "Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of A Strength Spot

Welded Lap Joint Subject to Tensile Shear Load," Journal of *KSME*, Vol.13, No.5,pp.42~50.

(5) Patrick D. T. and O' connor, (1992), " Practical Reliability Engineering, John Wiley & Sons, pp.95~109.

(6) Wayne Nelson, (1990) " Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans and Data Analysis" , John wiley & Sons, New York

(7) Cook, R.D. and Weisberg, S.(1982), Residuals and Influence in Regression, Chapman and Hall.

(8) Dimutri Kececioglu. D, Julie A. Jacks (1984)" The Arrhenius Eyring, Inverse Power Law Combination Model in Accelerated Life Testing" , Reliab. Eng. (GB), Vol.8, No.1, pp.1~9