

유한요소법을 이용한 파괴 역학적 방법의 신뢰성설계기술에 관한 연구

백승엽¹, 이봉구^{2*}

¹영진전문대학 컴퓨터응용기계계열, ²영남이공대학교 기계계열

A Study on Reliability Design of Fracture Mechanics Method Using FEM

Seung-Yeb Baik¹, Bong-Gu Lee^{2*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Yeungjin College

²Division of Mechanical Engineering, Yeungnam University College

요약 스테인리스 강판은 동적기계구조물을 제작하기 위한 구조용 재료로 널리 사용된다. 또한 이들을 일체화 시키는 방법으로 가스용접을 많이 사용하게 되는데 가스용접에는 다양한 종류에 의해 구조물을 일체화 시킨다. 따라서 부재와 부재를 연결하는 용접부에 대한 응력분포 및 피로강도평가는 구조물의 건전성 및 수명을 연구하는데 매우 중요한 요소가 된다. 그래서 본 연구에서는 피로시험에 의해서 얻어지는 $\Delta P-N_f$ 관계를 유한요소해석법에 의해서 최대주응력으로 $\Delta \sigma-N_f$ 관계로 나타내어 피로설계기준을 정하였고, 이 결과를 이용해서 확률론적 통계해석기법을 적용해서 가속식을 추정하여 임의의 목표수명을 예측할 수 있는 신뢰성설계기술기법을 제시하고자 하였다.

Abstract Stainless steel sheets are widely used as the structural material for dynamic machine structures, These kinds structures used stainless steel sheets are commonly fabricated by using the gas welding, For fatigue design of gas welded joints such as various type joint. It is necessary to obtain design information on stress distribution at the weldment as well as fatigue strength of gas welded joints. Thus in this paper, $\Delta P-N_f$ curves were obtained by fatigue tests. and, $\Delta P-N_f$ curves were rearranged in the $\Delta \sigma-N_f$ relation with the hot spot stresses at the gas welded joints. Using these results, the accelerated life test(ALT) is conducted. From the experiment results, an life prediction model is derived and factors are estimated. So it is intended to obtain the useful information for the fatigue lifetime of welded joints and data analysis by statistic reliability method, to save time and cost, and to develop optimum accelerated life prediction plans.

Keywords : Fatigue Design Criterion, Accelerated Life Test, Life Prediction, Reliability

1. 서론

동적기계구조물의 접합기술인 용접부에 대한 신뢰성 확보는 전체구조물의 건전성과 내구성에 직접적인 영향을 미치므로, 구조물 설계 시 요구되는 여러 조건들을 만족시킬 수 있도록 설계되어야한다. 특히 철도차량이나

자동차와 같은 동적하중을 직접적으로 받는 박판 구조물 설계에 있어서는 무엇보다도 판재와 판재를 일체화시키는 과정에서 발생하는 금속학적, 역학적 현상 외에도 용접이음부의 기하학적 인자들이 파괴·역학적 피로강도에 미치는 영향에 대한 정보를 확보하는 것이 매우 중요하다. 따라서 박판구조 이음재의 피로파괴(fatigue

*Corresponding Author : Bong-Gu Lee(Yeungnam University College)

Tel: +82-10-9035-8344 email: positive@ync.ac.kr

Received April 10, 2015

Revised June 12, 2015

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

fracture)에 대한 강도(strength) 및 수명평가(life prediction)는 합리적인 피로설계기준(fatigue design criterion)을 정하는데 필수적이다. 그래서 실제 피로파괴 시험을 수행하여 얻어진 $\Delta P-N_f$ 관계를 이용하여 평가하는 방법이 가장 일반적이었고 많이 활용되어왔다[1-3]. 그러나 피로파괴 데이터를 장시간 획득하는 과정에서는 여러 가지 제어할 수 없는 변동인자들에 의해 피로파괴 데이터가 영향을 받기 때문에 시험데이터의 신뢰도가 떨어지는 것이 사실이다. 또한, 박판이음재의 재질 및 접합 형태가 달라질 때마다, 각각의 경우에 대해 새로운 피로 파괴시험이 요구되므로 많은 시간과 비용이 소요된다. 또한 신뢰성기술에 대한 기존 연구 분야에서는 피로수명 평가를 위한 와이블 분포함수의 모수를 평가함에 있어서 여러 가지 모수 추정 법을 비교 평가한 결과, 상관관계 수법이 3모수 와이블 분포함수를 평가하는데 가장 적절하다고 평가하였다.[4] 이와 같이 피로설계 기술개발의 가장 어려운

부분 중의 하나는 피로와 관련해서 여러 가지 유용한 전문지식이 사용되고 있지만 피로현상이 매우 복잡하여 각 지식의 적용범위가 명확하지 않기 때문에 기술개발에 필요한 지식베이스를 구성하기가 의외로 어렵다. 따라서 이러한 여러 조건을 충족시키기 위해서는 실제 시험을 통하여 획득한 일부 피로데이터를 통계적으로 평가하여 파괴 경향성 해석을 하는 것이 보다 효과적인 것이다.

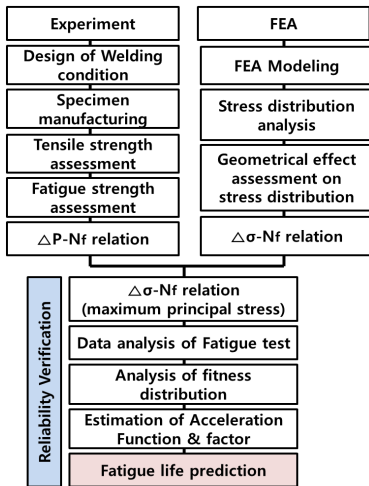


Fig. 1. Flow of fatigue life evaluation

본 연구에서는 설계의 신뢰도를 높이기 위해 동일한 시험환경조건에서 획득한 피로파괴데이터를 유한요소해

석을 이용하여 파괴 메커니즘(fracture mechanism)을 추정하고 피로파괴 데이터를 통계적으로 분석하여 수명모델(life model)을 추정함으로써 피로설계기준에 대한 신뢰성설계기술을 개발하고자 하였다. 본 연구의 전체적 흐름은 Fig. 1과 같다.

2. 유한요소해석 및 피로강도평가

2.1 유한요소해석(FEM Analysis)

동적기계구조물 제작에 있어서 대표적인 접합방법인 플러그 및 링 용접 이음재에 대한 응력분포에 대한 유한요소해석을 Fig. 2(a), (b)와 같이 모사시험(simulation model)을 제작하였다. 용접접합부에 인장하중이 작용하면 용접과정에서 발생된 잔류응력과 외력에 의한 응력조합에 의해서 용접부 주변에는 열응력에 의한 복잡한 응력분포를 나타낸다. 따라서 용접 이음재에 대한 응력분포와 변형을 해석하는 것은 용접부의 피로균열 발생 기구를 분석하는데 매우 중요하다.

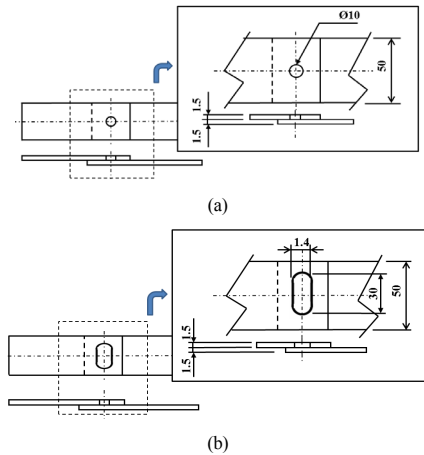


Fig. 2. typical specimens
(a) Plug welded joints(length; 200mm)
(b) Ring welded joints(length; 200mm)

2.1.1 해석모델(Analysis Model)

유한요소해석 모델에 사용된 재료는 동적기계구조물에 사용되고 차량자체재료로 많이 사용되고 있는 STS301L 재료를 대상으로 했으며, 재료의 물리적 성질과 화학적 조성은 Table 1에 제시된 데이터로 적용하였다. Fig. 3은 해석모델의 경계조건을 나타낸 것이다. 해석모델의 구성에서 용접금속(weld metal)과 열영향부

(HAZ)는 용접과정에서 용가재(filler metal)와 입 열(heat input)의 영향에 의해 모재와는 다른 성질을 갖는다. 따라서 용접부에 대한 탄성계수(Young's modulus) 등의 기계적 성질은 실제적으로 모재와 달리해야 타당하나, 용접급속의 기계적 성질을 정량적으로 직접 측정하기가 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 모재에 비해 경도(hardness)와 강도 등의 기계적 성질이 상대적으로 크다는 사실을 전체로 용접급속의 기계적 성질을 모재보다 크게 설정하였다. 해석에 사용된 요소(element)는 3차원 육면체 요소로 하였고 형상별 요소 및 절점 수는 플러그 용접은 320,450, 링 용접은 381,280이다. 모델링 및 탄소성 해석은 상용프로그램인 I-DEAS 1 Inx, ABAQUS 6.7을 사용하였다.

Table 1. Chemical composition and Mechanical properties of materials

Chemical composition of materials(Wt%)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.05	1.0	2.0	0.07	0.03	7	15	0.1
Mechanical properties of materials							
Material	Symbol	Yield S. (MPa)	Tensile S. (MPa)	Elongation (%)			
STS301L	≥ LT	≥ 217.6	≥ 521.5	≥ 46			
	≥ DLT	≥ 346	≥ 645.4	≥ 35			
	≥ ST	≥ 431.2	≥ 732.6	≥ 31			
	≥ HT	≥ 673.2	≥ 957	≥ 17			

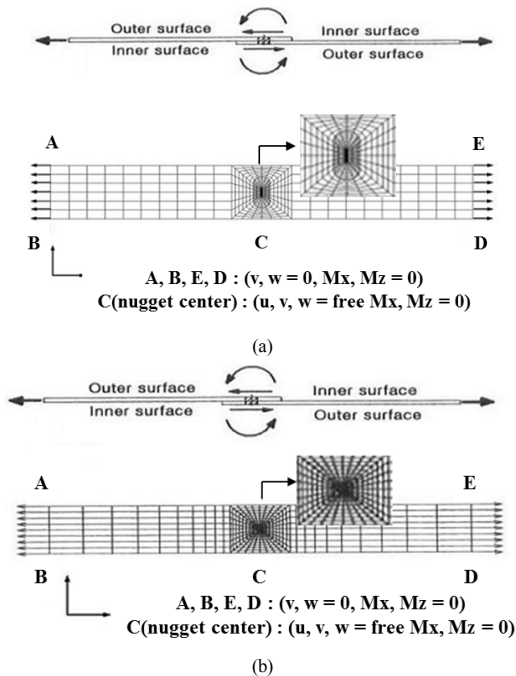


Fig. 3. 3D FEA model for stress analysis
(a) Plug-type (b) Ring-type

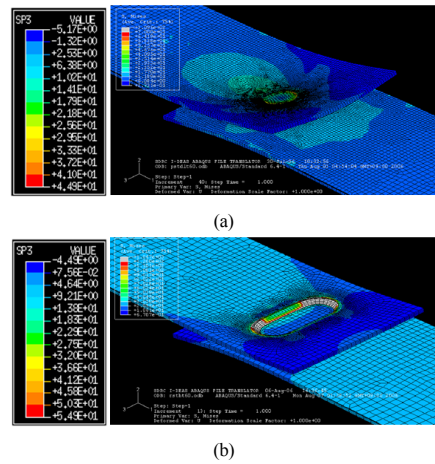


Fig. 4. Stress distribution of typical specimens
(a) Plug-type welded joints(ST(1.5)+HT(1.8))
(b) Ring-type welded joints(ST(1.5)+HT(1.8))

2.1.2 해석결과

Fig. 4는 STS301L의 ST(1.5)+HT(1.8)의 형태로 (a)플러그 용접과 (b)링 용접한 이음재에 인장하중을 가했을 때 용접부주변의 응력분포해석 결과를 나타낸 것이다. 인장하중에 의해 발생하는 최대주응력은 Fig. 4와 같이 용접 토우(weld toe)와 열영향부 경계에서 발생함을 알 수 있으며 실제 피로파괴 시험결과 같은 부분에서 응력집중현상이 발생되어 파단이 일어남을 확인할 수 있었다.

2.2 피로강도평가

2.2.1 시험편 및 실험장치

피로파괴 시험을 하기 위한 시험편은 Fig. 2와 같은 형상과 크기로 Table 2와 같이 동종재(similar material) 및 이종재(dissimilar material)로 이루어진 시험편으로 Table 3과 같은 용접조건(welding condition)으로 제작하였다. 사용된 피로파괴시험장치는 서보 유압식 피로시험기(MTS, 용량, 10ton)를 사용하였고 시험편을 고정시키는 면압식 지그(Jig)는 자체 설계·제작하였다.

Table 2. Combination of the various specimens

Welded Joint type	Body(T)+Joint(T)
Plug - type1	ST(1.0)+ST(1.5)
Plug - type2	ST(1.5)+HT(1.8)
Plug - type3	ST(2.0)+DLT(1.5)
Ring - type1	ST(1.0)+ST(1.5)
Ring - type2	ST(1.5)+HT(1.8)
Ring - type3	ST(2.0)+DLT(2.5)

(T) ; Thickness

Table 3. Welding condition of Specimens

Materials/Welding		STS301L/Semi-Auto Robot
Welding Condition		
1)	Pass	1 Pass
2)	Current (A)	100-120
3)	Voltage range (V)	15-17
4)	Travel speed(cm/min)	10-12
5)	GAS(%)	Ar 98
6)	Flow rate(l/min)	18-20
7)	Filler metal)	AWS ER 308L

2.2.2 시험조건 및 방법

하주의 반복속도를 25Hz, 부하형태는 하중비(load ratio; $R=P_{min}/P_{max}$)가 0인 정현파(sine wave)로 하였다. 무한수명의 한계피로한도(low fatigue limit)를 구하기 위해서 Table 2와 같은 형태로 제작된 시험편을 최대인장강도(maximum tensile strength)의 70%에서 10%씩 하중을 감소시키면서, JIS Z 2273 및 JIS Z 3103에 의거 피로파괴시험을 수행하였고, 무한수명의 피로한도 (fatigue limit)를 구하기 위해서는 10^7 cycles까지 시험을 수행하였다.

2.2.3 시험결과

Fig. 5는 제시된 종류별 시험편의 피로강도를 $\Delta\sigma-N_f$ 선도로 나타낸 것이다. 이것은 시험편의 기하학적 조건들에 대한 피로강도를 정량적으로 비교할 수 있지만, 데이터의 분산 폭이 크기가 $\Delta P_{lim(plug/ring)}=1,500\sim 5,500N$ 으로 너무 크기 때문에 피로강도에 영향을 미치는 여러 인자들을 종합적으로 고려할 수 있는 설계조건(design condition)을 만족하는 설계기준을 설정하기는 어려움이 있다. 따라서 피로균열의 발생과 파단이 주로 응력집중이 되는 위치(hot spot point)에서 일어남을 2.1절 응력분포해석결과 확인할 수 있었기 때문에 Fig. 5의 결과를 최대주응력으로 재정립한 결과 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 6의 데이터 분산 폭은 $\Delta P-N_f$ 선도의 데이터 분산 폭보다 전체적으로 감소하는 결과를 나타냈다. 이것은 시험편의 파단을 야기하는 역학적, 기하학적 인자들을 종합적으로 고려한 피로설계기준은 하중범위보다 피로균열을 직접적으로 관여하는 최대주응력으로 설정하는 것이 보다 더 경제적이고 합리적인 설계기준을 의미하는 것이다.

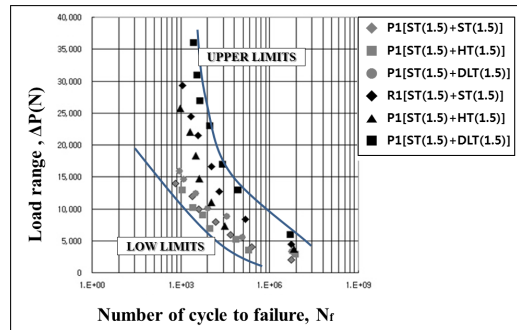


Fig. 5. $\Delta P-N_f$ relation of the various welded joints specimens

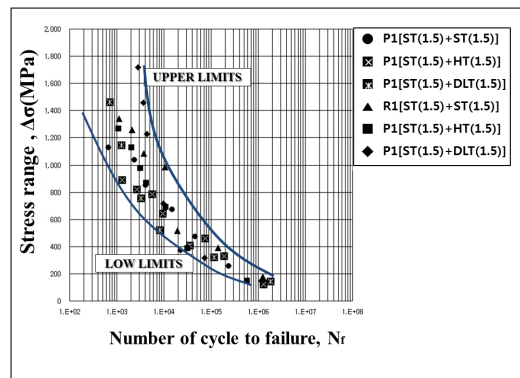


Fig. 6. $\Delta\sigma-N_f$ relation of the various welded joints specimens

3. 수명예측

3.1 적합도 검증

적합도 검증은 획득된 수명데이터를 통계적으로 어떤 수명분포에 적합시킬 수 있는지에 대한 검증이다[5]. 검증기준은 A-D 통계량 또는 P값(P value)으로 한다. A-D 통계량은 확률지에 도시한 타점한 점과 이들의 경험적 누적분포함수와 이론적 분포함수의 차이를 측정된 값으로, 분포의 끝 부분에 큰 가중치를 가지도록 하여 직선과 도시한 점과의 제곱거리(weighted squared distance)를 구한 값이다. 통계적 분포모형 4가지 중에서 가장 작은 A-D 통계량 값이 가장 적합한 분포모형을 의미한다[6]. Table 5에 제시된 데이터는 대표적인 시험편의 피로수명 데이터에 대한 A-D 값을 나타낸 것이다.

Table 4. Result of A-D value for specimens

Specimens type	Model	A-D	Shape P.	Failure type
Plug type joint				
ST(1.0)+ST(1.5)	Weibull	2.238	3.24	IFR
ST(1.0)+HT(1.8)	Weibull	2.214	12.43	IFR
ST(1.0)+DLT(1.5)	Weibull	2.267	6.38	IFR
Ring type joint				
ST(1.0)+ST(1.5)	Weibull	2.189	10.73	IFR
ST(1.0)+HT(1.8)	Weibull	2.125	8.38	IFR
ST(1.0)+DLT(2.5)	Weibull	2.132	4.90	IFR

Table 5. Acceleration function and R-square value of specimens

specimens	Acceleration Function	R-square
Plug type		
ST(1.0)+ST(1.5)	$y=4E+11X^{-3.5601}$	98.45%
ST(1.0)+HT(1.8)	$y=2E+11X^{-4.3141}$	99.35%
ST(1.0)+DLT(1.5)	$y=4E+11X^{-3.9327}$	98.45%
Ring type		
ST(1.0)+ST(1.5)	$y=4E+11X^{-3.5384}$	99.15%
ST(1.0)+HT(1.8)	$y=4E+11X^{-2.5389}$	99.15%
ST(1.0)+DLT(2.5)	$y=4E+11X^{-2.8245}$	98.25%

3.2 가속계수(AF; Acceleration Factor)

피로파괴 수명데이터의 모수통계량 분석이 가능함을 검증하기위해 가속계수를 추정하여 가속성 분석을 한다. 두 가속조건 하에서 수명데이터(life data)를 확률지에 타점했을 경우, 각 조건에 적합한 직선이 서로 평행하면 두 조건 사이에 가속성이 성립(P value≥0.05)한다고 판단 한다[7]. 통계적 분포모형 중 와이블(Weibull)분포는 두 직선의 형상모수(Shape parameter)가 같을 경우이고 대수정규(log normal base e)분포는 척도모수(scale parameter)가 같은 경우에 가속성이 성립된다. 가속계수는 예를 들어 임의의 두 스트레스 조건1 과 2사이에 가속성이 성립하면, 두 조건에서의 수명 t_1, t_2 는 가속계수와 식(1)의 관계를 만든다.

$$t_1 = (AF) \cdot t_2 \tag{1}$$

식(1)은 두 수명분포의 모든 경우에 성립하며, 대표적인 수명분포 모형인 와이블 분포와 대수정규분포의 가속계수는 식(2), 식(3)에서 구할 수 있다.

$$\text{와이블 분포 : } AF = t_1/t_2 = \eta_1/\eta_2 \tag{2}$$

$$\text{대수정규분포 : } AF = \exp(\eta_1)/\exp(\eta_2) \tag{3}$$

Table 4와 Fig. 7, 8은 대표적인 시험편의 와이블 분포에 대한 가속성 검증 결과를 예시한 것이다. 가속된 최대인장하중과 수명과의 관계가 95% 신뢰도, 유의수준 5%에서 모두 평행하게 분석(P value≥0.05)됨으로써 모두 가속성이 성립하는 것으로 판단되었다.

3.3 가속모형

가속모형은 수명과 스트레스의 관계를 수학적으로 표현한 물리·화학적 모형이다[8]. 수명분포의 모수들을 스트레스 변수들의 함수로 표현하는 것으로 수명시험의 자료 분석 시 매우 중요하다. Fig. 7, 8에서 나타나는 가속성(acceleration) 성립의 의미는 사용조건과 가속조건에서의 회귀선의 기울기가 같게 되는 것으로 물리적 통계해석이 가능함을 의미한다.

본 연구에서는 물리적 해석을 위해서 식(1)의 역 누승 모형(inverse power model)을 적용하였다. Table 5는 수명-스트레스 관계의 역 누승 모형을 이용한 플러그와 링 용접 이음재의 가속수명 추정 식을 나타낸 것이다. 가속조건은 무한수명에 해당하는 10^7 Cycles의 피로한도조건을 정상상태로 놓았을 경우 최대인장강도의 70%, 50%, 30%를 가속조건으로 가정하였으며, 통계적 해석 및 데이터 분석에 사용된 프로그램은 MINITAB 14.0을 사용하였다.

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

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

식(4)의 양변에 대수를 취하면, 식(5)와 같이 $\ln \tau(v)$ 와 $\ln V$ 가 선형적으로 표현되는 대수 선형 관계식이 될 수 있다.

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

3.4 수명예측

가속모형에 의해 추정된 가속식 Table 5를 이용하여 플러그와 링 용접 이음재의 피로수명을 계산하여 Fig. 9, 10과 같이 그래프로 표시하였다. 실제 피로시험 데이터와 임의의 모교 수명예측에 대한 정합성이 잘 일치됨을 확인할 수 있었다.

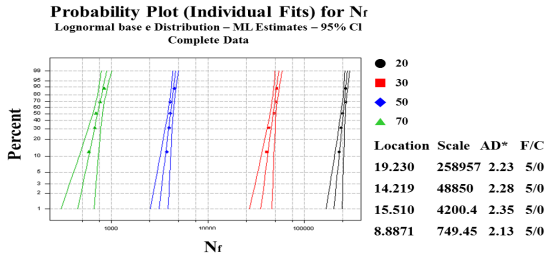


Fig. 7. Acceleration verification of Plug-type joints

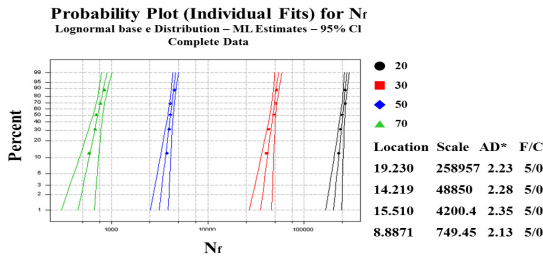


Fig. 8. Acceleration verification of Ring-type joints

4. 수명예측 신뢰도 평가

피로한도기준을 정하는 무한수명을 10^7 cycles이라고 가정했을 때, 실제 피로파괴 시험결과와 가속성이 검증된 가속식을 이용한 수명예측 데이터를 비교한 결과 플러그 용접은 유의수준 5% 신뢰수준 95%에서 ST(1.0)+ST(1.5)시편이 파괴되지 않을 확률은 90%, ST(1.5)+HT(1.8)은 92%, ST(2.0)+DLT(1.5)은 89%로 분석되었으며 링 용접은 ST(1.0)+ST(1.5) 시편이 파단하지 않을 확률은 89%, ST(1.0)+HT(1.8)은 86%, ST(2.0)+DLT(2.5)은 91%로 분석되었다.

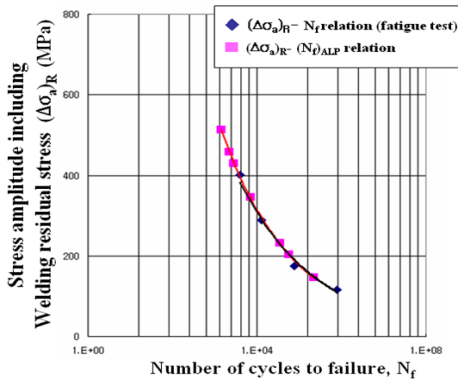


Fig. 9. Comparison of $\Delta\sigma-N_f$ and $\Delta\sigma-(N_f)_{ALP}$ for the plug type welded joints

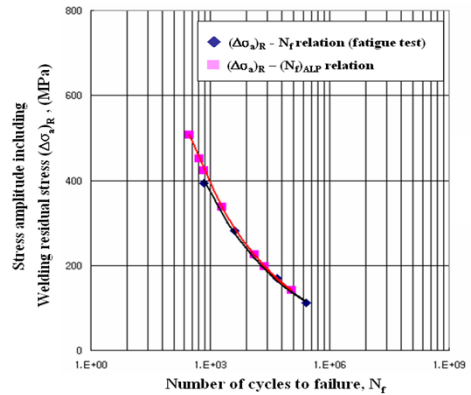


Fig. 10. Comparison of $\Delta\sigma-N_f$ and $\Delta\sigma-(N_f)_{ALP}$ for the ring type welded joints

5. 결론

본 연구에서는 설계기준을 결정하는데 필요한 피로데이터 도출과정에서 발생할 수 있는 변동성을 최소화하기 위해서, 확률론적 접근방법인 가속수명 예측기법을 이용하여 $\Delta\sigma_a-N_f$ 관계와 수명예측 데이터 $\Delta\sigma_a-(N_f)_{ALP}$ 와의 관계를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수명예측을 위한 적합분포모델은 플러그 및 링 용접 이음재 모두 와이블 분포로 분석되었다.
- 2) 와이블 분포함수의 형상모수와 대수 정규분포 함수의 척도모수에 의한 적합분포모델은 수명을 예측하는데 중요한 요소로 작용되는 것으로 판단된다.
- 3) 확률론적 통계해석방법을 이용한 수명예측 기법은 고 하중 단 수명 영역에서 임의의 특정 목표수명을 예측하는 것으로 피로 설계기준을 설정하는데 보다 효과적인 설계가 가능할 것으로 기대된다.

References

[1] J. H. Shin, "Fatigue Strength Evaluation of SM490A Welded joints for Bogie Frame", Master's Thesis, Sungkyunkwan University. pp. 12-14, 2003.

[2] D. H. Bae, "Fracture Mechanical Fatigue Design for Spot-welded one-Lap joint of SUS301L Subjected to Tensile Shear Load", KSAE, Vol. 13, No 5, pp. 42-50, 1991.

- [3] S. Y. Baek, "A study on the Fatigue Design Method for Gas Welded STS301L joint Using a Probabilistic Statistics Technique", Doctor's Thesis, Sungkyunkwan University, pp. 47-59, 2009.
- [4] T. Sakai, "Estimation of Three Parameter of Weibull Distribution in Relation to Parameter Estimation of Fatigue Life Distribution," Japanese Material, Vol. 29, No. 316, pp. 17-23, 1979.
DOI: <http://doi.org/10.2472/jsms.29.17>
- [5] M. Shaked, "Non-parametric estimation and Goodness-of-Fit testing of hypotheses for distributions in Accelerated Life Testing", IEEE Transactions on Reliability, R-31-1, pp. 69-74, 1982.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TR.1982.5221234>
- [6] M. Liao, "How to used the new table of Anderson-Darling critical values for Goodness- of-Fit test for the parameter Weibull distribution", Symposium on Reliability and Maintainability, Vol. 28, pp. 191-194, 1998.
- [7] J. F. Lawless, W.&S. John, "Statistical models and Methods for Lifetime data analysis", Wiley Interscience, pp. 95-103, 1982.
- [8] W. Nelson, "Accelerated Testing", John Wiley & Sons, New York, pp. 110-118, 1990.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470316795>

이 봉 구(Bong-Gu Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 2003년 7월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2009년 3월 ~ 2012년 2월 : 대림대학교 기계설계 교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계계열 교수

<관심분야>

초정밀 가공, CAD/CAM, 복합가공

백 승 엽(Seung-Yeb Baik)

[정회원]



- 2002년 2월 : 성균관대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 성균관대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 7월 ~ 2011년 10월 : 삼성테크윈 책임연구원
- 2011년 3월 ~ 2013년 2월 : 대림대학교 기계설계 교수
- 2013년 3월 ~ 현재 : 영진전문대 컴퓨터응용기계계열 교수

<관심분야>

신뢰성설계, 수명예측, 금형분야