

Padding plate 용접구조의 인장 정하중 이력에 의한 용접잔류응력 변화 및 피로강도에의 영향

강성원*, 김영욱**, 김화수***, 김도현****

Re-distribution of Welding Residual Stress Due to Tensile Pre-load and Its Effect on Fatigue Strength in Padding Plate Weldment

S.W. Kang*, Y.W. Kim**, W.S. Kim*** and D.H. Kim****

요 약

간조 후 수행하는 수압시험 또는 화물의 적재 등과 같은 정하중은 파랑변동하중에 비하여 선체 구조물에 상당히 큰 응력을 유발한다. 이러한 정하중이력에 의하여, 선체구조물의 응력집중으로 인해 피로강도가 문제되는 용접이음부에서는, 재료의 탄소성 거동에 의하여 초기용접잔류응력이 상당히 이완된 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 용접이음부의 피로강도를 평가할 때에는 이완된 잔류응력의 영향을 고려하는 것이 보다 합리적이다. 본 연구에서는 선체구조물의 여러 가지 용접 형태 중 Padding plate가 용접된 형태에 대하여 정하중이력($0.5\sigma_Y$, $0.85\sigma_Y$)에 의한 초기 용접잔류응력의 변화를 측정하며, 잔류응력의 변화가 피로강도에 미치는 영향을 검토한다.

※Keywords: Pre-load(정하중이력), Re-distribution of residual stress(잔류응력재분포), Stress concentration factor(응력집중계수), S-N diagram(S-N 선도)

Abstract

Static loadings on ship structure induced either by water pressure before service such as a tank test and ballasting or by cargo pressure during first laden voyage cause relatively much greater stress than dynamic loadings induced by wave. With these static pre-loadings, the initial residual stresses around welded joint, where fatigue strength is concerned (in most cases, where stress concentration occurs)

접수일자: 2001년 4월 16일, 승인일자: 2001년 9월 12일

*정회원, 부산대학교 조선해양공학과 교수(E-mail: swkang@hyowon.pusan.ac.kr)

**신아조선 설계부(E-mail: three-999@hanmail.net)

***정회원, 현대중공업 조선구조설계부, 부산대학교 조선해양공학과 박사과정(E-mail: hdwskim@hhi.co.kr)

****정회원, 현대중공업 조선구조설계부(E-mail: dhkim@hhi.co.kr)

are expected to be shaken-down in a great extent by the elasto-plastic deformation behavior of material. Therefore, it is more reasonable to assess the fatigue strength of ship structure with S-N data which have taken into account the effect of shaken-down residual stresses(re-distributed stresses) on the fatigue strength.

In this research work, the re-distribution of residual stresses by the tensile pre-loading is measured using an ordinary sectioning method for specimens of padding plate weldment. Fatigue tests are performed also to evaluate the fatigue strength of the both as-welded and pre-loaded specimens.

1. 서론

선박, 해양구조물, 교량 등의 철구조물은 여러 가지 용접이음형식의 용접이음부재로서 구성되어 있으며, 이와 같은 용접이음부재의 피로강도는 용접이음부의 형태, 야금학적 특성, 잔류응력 및 용접결함 등에 영향을 받는다(강성원 등 1996, 한문식 등 1991, Gurney 1979, Watanabe 등 1995). 특히 용접잔류응력은 용접구조물의 취성 파괴강도, 피로강도, 좌굴강도 등에 영향을 미칠 뿐 아니라 여러 가지의 용접균열이나 응력부식균열(SCC)의 원인이 된다.

기존의 선체구조설계에서는 선급의 요구기준에 의거하여, 적재화물 및 최대파랑하중을 고려한 정적강도와 일반파랑하중 등의 동하중을 고려한 피로강도를 구분하여 계산하였다. 정적강도의 경우 재료의 항복강도에 대해 대략 50~80% 범위 내에서 설계허용응력을 정하였고, 피로강도의 경우 용접잔류응력을 내재한 상태의 피로실험결과를 바탕으로 한 BS 5400 (BSI 1980) 등의 데이터를 근간으로 한 피로설계를 이용하여 왔다.

그러나 실제 선체구조에서는 건조 후 수행하는 수압시험 또는 하물의 적하/제하등과 같은 정하중에 의하여 용접이음부에 인장응력을 유발시키는 하중이력을 받을 경우에는 초기 용접잔류응력은 상당히 감소하는 것으로 알려져 있으므로 (김화수 1997, 박지선 등 1997, 이상갑 등 1999) 선체구조의 설계와 제작시 이를 고려한 피로설계선도를 사용하는 것이 타당하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 선체구조물에 사용되는 여러 가지 용접 형태 중 Padding plate가 용접된 형태에 대하여 초기 정하중의 이력에 따른 용접잔류응력의 재분포현상을 조사하였다. 그리고 초기 정하중 효과에 의한 잔류응력의 재분포가 피로강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 정하중 이력의 크기를 변화시켜서 피로시험을 실시하였다.

2. 시험편

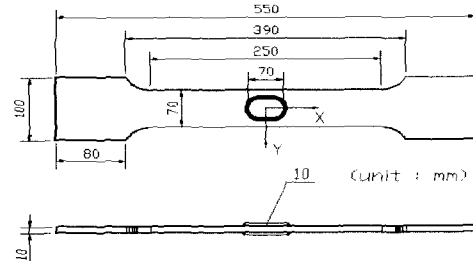


Fig.1 Shape and dimension of specimen

본 실험에 사용된 Padding plate 시험편은 선체구조용 연강(grade 'A')으로, 형상 및 치수는 Fig.1과 같다. 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1과 같고 시험편의 용접조건은 Table 2와 같다. 시험편은 통상의 선체건조품질을 반영하기 위하여 조선소의 현장작업조건과 일치하게 제작하였다. 또한 피로실험 전 각 시험편의 용접비드 형상을 측정하여, Fig.2에 나타낸 프

라크자(θ), 토우부 곡률반경(ρ)로부터 토우부 4곳의 응력집중계수 K_t 를 추정하고 K_t 와 균열발생과의 관계도 조사하였다.

Table 1 Major chemical composition(%) and mechanical properties of mild steel

C	Si	Mn	P	S	Ceq
0.13	0.1	0.51	0.008	0.003	0.25
~0.2	~0.19	~0.79	~0.025	~0.007	~0.29
Yield strength(MPa)		Tensile strength(MPa)		Elongation(%)	
Design	Actual				
235	290 ~333	427 ~ 457		26 ~ 34	

Table 2 Welding conditions

Current	Voltage	Speed	Method
220A	26V	30cm/min	FCAW

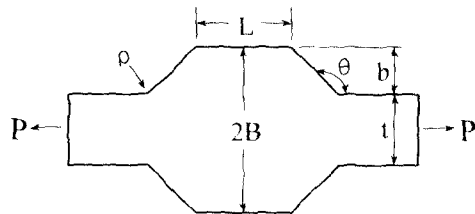


Fig. 2 Model for calculation of stress concentration factor

3. Padding plate 용접부의 용접잔류응력

3.1 용접잔류응력의 측정

일반적으로 용접구조물에는 용접열로 인하여 국부적으로 팽창 및 수축 등의 열소성변형이 생기고 높은 잔류응력이 용접부에 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 된다(김영식 1997, 佐藤邦彦 1988). 특히 용접 토우부는 용접으로 인하여 인장잔류응력이 발생하

는 경우가 많고 토우부의 기하학적인 형상에 의한 응력집중현상이 중첩되어 피로 강도를 저하시키게 된다. 따라서 토우부의 잔류응력분포상태를 파악하는 것은 용접이음부의 피로강도를 해석하는데 중요하다.

본 연구에서는 1회의 인장정하중이력을 작용한 후 잔류응력의 재분포현상을 측정하여 정하중 효과와 잔류응력 재분포현상이 피로강도에 미치는 영향을 검토하였다.

현재 잔류응력 측정에 이용되는 방법은 약 20여가지가 있으면 크게 분류하면 다음과 같다.

- Stress-relaxation techniques.
- X-ray diffraction techniques.
- Techniques by use of stress-sensitive properties.
- Cracking techniques.

본 연구에서는 이들 방법 중 용접 구조물의 잔류 응력 측정에 가장 널리 쓰이고 있는 응력이완 방법 중의 하나인 Sectioning method를 사용하였다. 용접잔류응력의 측정 순서는 다음과 같다. 먼저 게이지 길이 1mm의 2축 스트레인 게이지를 Fig. 3과 같이 시험편의 길이 방향으로 토우부에서 2mm 떨어진 지점과 그 지점에서 10mm,

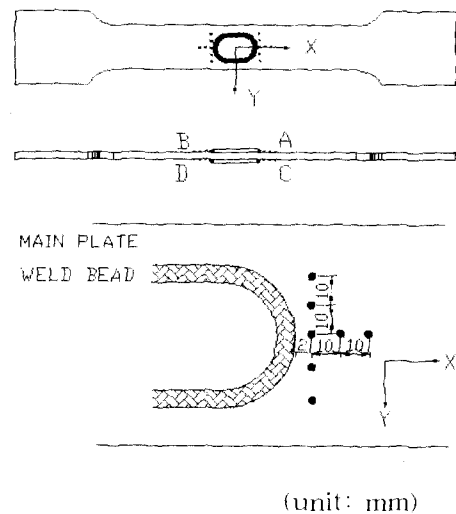


Fig. 3 Position of strain gauges

20mm떨어진 지점에 부착하고, 폭방향으로는 시험편 폭의 중심과 양쪽 폭방향으로 10mm, 20mm떨어진 지점에 부착하였다. 스트레인 게이지 주위를 절단하여 측정점 주위를 해방시켰다. 절단방법은 줄톱에 의하여 먼저 시험편의 Y방향으로 용접도우부를 절단하여 모재부분을 분리한 후 시험편의 X방향으로 스트레인게이지 사이를 절단하고 최종적으로 스트레인게이지 주위가 완전히 분리되도록 하였다. 이때 절단시 발열에 의한 영향을 줄이기 위하여 절단속도를 매우 낮추고 에어컴프레서에 의해 절단부를 냉각시키는 한편, 게이지위에 파라핀을 도포하여 게이지의 보호와 절단에 의한 열발생을 제어하였다. 절단 후의 모습은 Fig.4와 같다.

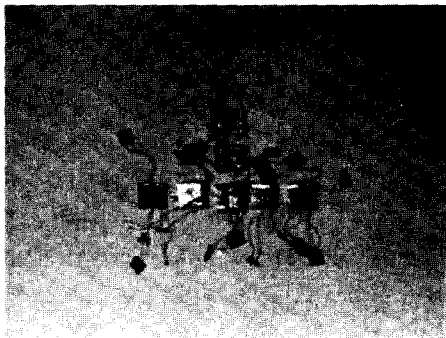


Fig.4 Photograph of particles after cut out

구속해방전후의 변형을 변화량을 측정하여 다음 식을 이용하여 잔류응력으로 환산하였다(AWS 1987, Masubuchi 1980).

$$\sigma_{res,x} = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\Delta \epsilon_x + \nu \Delta \epsilon_y)$$

$$\sigma_{res,y} = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\Delta \epsilon_y + \nu \Delta \epsilon_x)$$

여기서, $\Delta \epsilon_x$: x방향 변형을 변화량

$\Delta \epsilon_y$: y방향 변형을 변화량

ν : Poisson's ratio (= 0.3)

E : Young's modules

잔류응력의 측정 조건은 3가지로써 Table 3과

같이 as-welded 상태, 설계항복응력(연강의 경우 235MPa)의 50%를 초기 정하중이력으로 가한 상태, 그리고 설계항복응력의 85%를 초기 정하중이력으로 가한 경우로 나누어 실시하였다.

Table 3 Conditions of pre-load for measurement of residual stress

Condition	Pre - load	Pre - load pattern
1	As-welded	0
2	0.5 σ_y (117.6 MPa)	0
3	0.85 σ_y (199.9 MPa)	0

3.2 용접잔류응력 측정 결과

Fig.5는 초기 정하중 시험시의 하중부하에 따른 계측 변형을 값을 나타낸 것이다. 용접부 토우에서 2mm떨어진 곳에서는 설계항복응력의 85%를 부하시 점진적으로 소성변형이 일어나는 비선형 거동을 나타내고 있으며, 제하시에는 선형거동으로 되돌아옴을 알 수 있다. 50mm떨어진 곳에서는 하중의 부하 및 제하시에 선형거동을 나타내고 있다. 이는 용접에 의한 인장잔류응력이 존재하는 영역에 하중을 가할 경우 이에 동반한 응력과 잔류응력의 합이 재료의 항복강도를 넘어가는 영역에서는 소성변형이 일어나기 때문에 생기는 것이며, 이러한 소성 변형이 발생한 영역에서의 하중 부하후의 인장잔류응력은 상당히 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig.6에 토우부 끝단으로부터 시험편의 길이방향 용접잔류응력($\sigma_{x,res}$)분포를 나타내었다.

As-welded 시험편의 잔류응력을 측정된 결과를 보면 토우부에서 가장 큰 인장잔류응력이 존재하고 비드로부터 점차 멀어질수록 감소하는 양상을 보여주고 있다. 또한 가해지는 인장 정하중이력의 크기가 클수록 토우부에서의 잔류응력은 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 폭방향에 대한 용접잔류응력($\sigma_{x,res}$)

을 나타내었는데 길이방향의 결과와 같이 토우부 중심에서 가장 큰 인장잔류응력이 존재하고, 또한 토우부 중심에서 시험편의 폭방향으로 거리가 멀어질수록 급격하게 감소하여 압축잔류응력으로 변화하고 있다. 또한 인장 정하중이력에 의해 잔류응력이 감소하는 것을 알 수 있다.

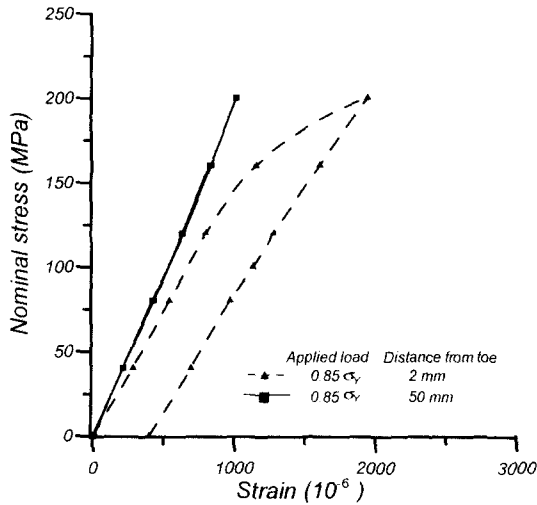


Fig.5 Stress-strain curve for loading and unloading

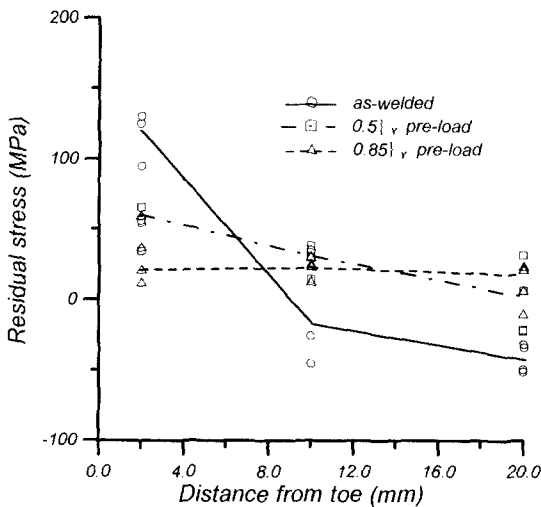


Fig.6 Longitudinal distribution of residual stresses

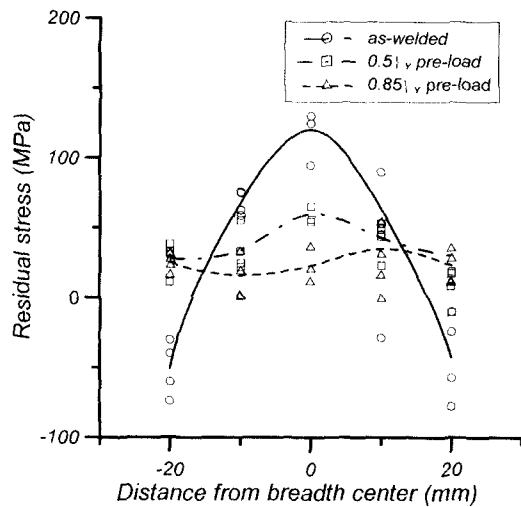


Fig.7 Transverse distribution of residual stresses

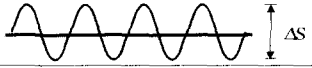
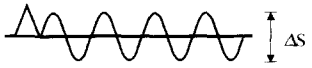
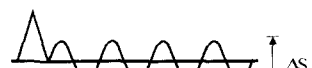
4. 피로시험

본 연구에 사용한 피로시험기는 용량 ± 20 ton의 축인장압축 유압서브 피로시험기이며 피로하중의 파형은 정현파를 채용하였고 하중반복속도는 3-10Hz의 범위내에서 시험하중의 크기에 따라 변화시켰다.

피로시험방법은 Table 4에 나타낸 바와 같이 as-welded 상태, 항복응력의 50% 인장 정하중 이력을 가한 후, 항복응력의 85% 인장 정하중 이력을 가한 후로 구분하여 실시하였고 하중제어 양진피로시험법을 채용하여 응력비 $R=-1$ 이 되도록 하였다. 본 연구에서는 각 피로시험편의 용접 비드 표면에 치과용 실리콘 고무를 이용하여 4곳의 비드 전체에 대한 형상을 본뜨고, 비드높이 및 곡률반경을 측정하여 토우부의 응력집중계수를 구하였다(강성원 등 1996). 본 실험에 채용된 시험편에서의 프랭크 각(θ), 토우부 곡률 반경(ρ) 및 응력집중계수(Kt)의 평균치는 각각 138° , 1.6mm 및 1.94였다. 또한 토우부의 응력집중현상을 실험적으로 변형률 변화량 측정을 통하여 Fig. 8에 나타내었으며 토우부에서 가까울수록 큰 응력 집중이 나타남을 알 수 있다.

피로시험 중 계속해서 이동현미경과 확대경으로 토우부를 관찰하여 피로균열의 발생위치와 전파길이를 측정하였으며, 5×10^6 회의 반복하중에서 피로 균열 발생이 관측되지 않았을 때는 피로시험을 중지하였다.

Table 4 Fatigue test conditions

Con.	Load pattern
1	Pre-load=0 
2	Pre-load=0.5σ 
3	Pre-load=0.85σ 

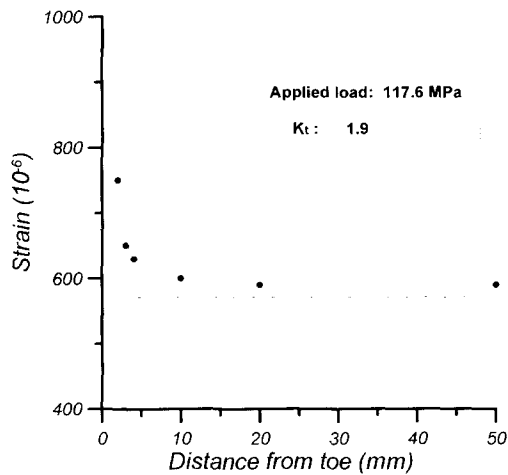


Fig. 8 Distribution of stress for longitudinal direction

5. 피로시험결과의 고찰

Fig. 9에 피로시험의 결과를 각 조건에 따라 S-N선도로 나타내었다. 본 연구에서의 파단수명 N_f 는 시험편이 완전히 파단되어 분리되었을 때의 반복수를 취하였다. 피로시험결과에 따르면, 초기 정하중 이력에 의하여 피로강도가 증가되며, 정하

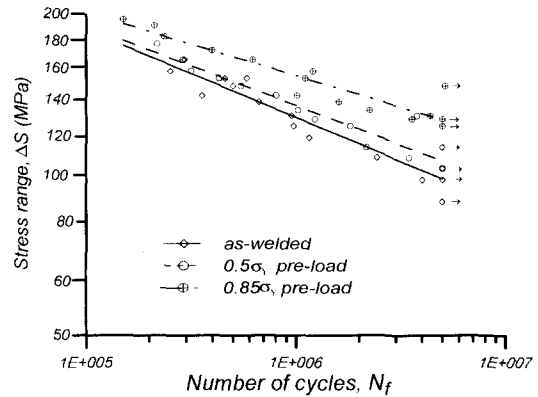


Fig. 9 Fatigue test results

중이력의 크기가 크면 클수록 피로강도는 더욱 더 증가된다. 또한, 피로강도의 증가는 낮은 변동응력범위에서 현저하다. 이는 잔류응력측정의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 초기 정하중이 클수록 용접잔류응력의 재분포로 인한 토우부에 가해지는 평균응력이 더 많이 감소시켜 토우부에 가해지는 평균응력이 as-welded 시험편에서보다 낮아져 피로강도가 향상된 것으로 생각된다.

5×10^6 회의 반복하중하에서의 피로강도를 피로 한도로 정의할 경우, as-welded 상태의 피로한도에 비하여 항복응력의 50% 초기 정하중이력을 가한 경우는 5%, 항복응력의 85% 초기 정하중이력을 가한 경우에는 30%의 피로한도가 증가 되었음을 알 수 있다.

Fig. 10는 피로 시험 중에 발생한 균열의 전파 속도의 일례를 비교한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 피로균열의 발생시기 및 진전속도 모두 as-welded 상태의 시험편에서가 항복응력의 85% 초기 정하중을 가한 시험편보다 빠른 것을 알 수 있다. 이는 잔류응력측정의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 초기 정하중 인장이력에 의해 용접부 토우에서의 인장잔류응력이 감소에 의한 영향이라 생각한다.

Fig. 11은 각 시험편에서 피로균열이 발생한 토우부의 균열 발생위치와 Fig. 3에 나타낸 A, B, C, D 4곳 토우부의 추정된 Kt값의 분포를 나타낸 것이다. 각 시험편의 토우부에서의 Kt값은

1.81~2.12의 범위에 분포하고 있으며 동일 시험편에 있어서도 용접상태에 따라 Kt값의 차이가 많은 것도 있었다. 그림에서 보는 바와 같이 피로 균열은 as-welded 경우는 71%, 항복응력의 50%초기 정하중을 가한 후 일때는 78%, 항복응력의 85%초기 정하중을 가한 후 일때는 70%가 토우부 4곳에서 Kt가 가장 높은 곳에서 발생하였다.

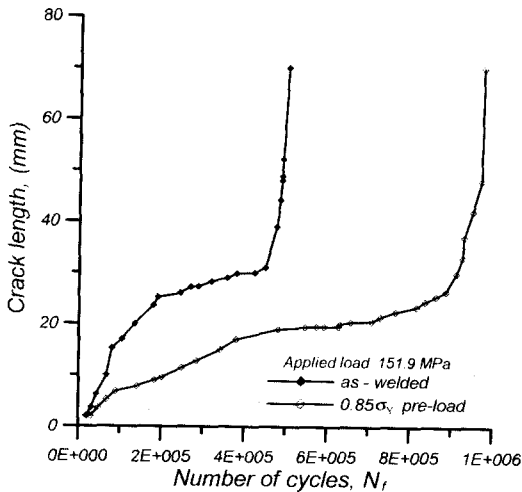


Fig.10 Fatigue crack length vs. number of cycles

6. 결론

선박 구조용 연강을 사용한 Padding plate 시험편을 이용하여 용접잔류응력을 측정하고 피로시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었으며, 실제 선체 구조의 보다 합리적인 피로강도 평가를 위해서는 다양한 용접결합구조에 대하여 화물의 정하중이력 영향을 고려한 체계적인 연구 수행이 요망된다.

- 1) Padding plate 용접이음부에서 잔류응력은 초기 인장 정하중이력에 의해 감소하였으며, 가해지는 하중이 클수록 그 감소폭이 증가하였다.
- 2) 초기 정하중이력이 클수록 피로강도는 증가하였으며, 피로강도의 증가는 낮은 변동응력범위

에서 현저하다. 이는 인장 정하중이력을 가한 후가 as-welded 상태보다 초기균열발생 및 균열성장이 느리기 때문이다.

- 3) 피로균열은 대부분의 시험편에서 응력집중 계수가 높은 곳에서 발생하였다.

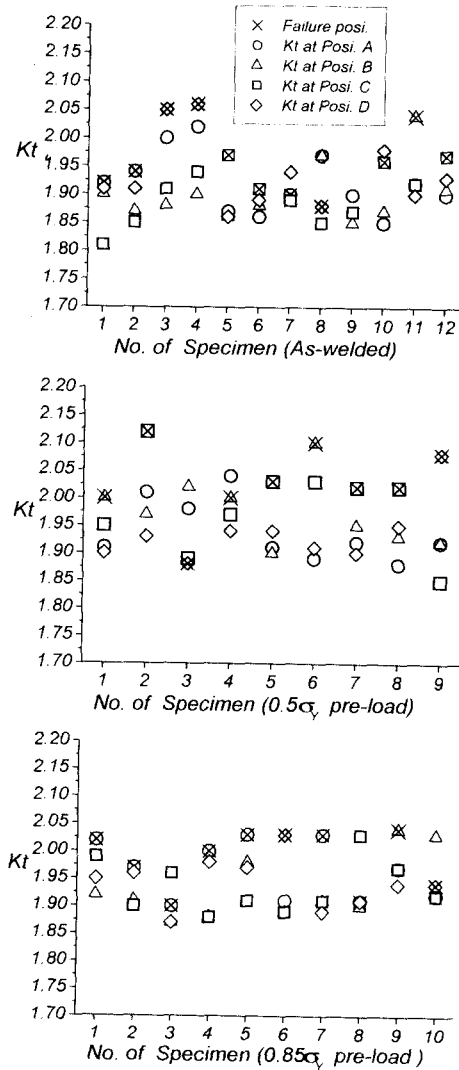


Fig.11 Distribution of Kt and failure position of specimen

후 기

본 연구는 현대중공업(주) 및 1999년도 두뇌 한국21사업 핵심분야에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강성원, 방한서, 조재형, 김동민 1996. “후관 맞대기 용접이음부에서의 S.R.이 피로강도에 미치는 영향”, 대한조선학회 1996년도 추계연구 발표회논문집, pp.377-381.
- 강성원, 하우일, 신종석, 장태원, 제정신 1996. “필렛용접이음부의 피로파괴특성에 관한 연구” 대한조선학회논문집, 제33권, 제4호, pp.133-141.
- 강성원, 하우일, 신종석, 제정신 1996. “필렛 용접이음부의 응력집중계수에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제33권, 제3호, pp.1-7.
- 김영식 1997. “용접잔류응력과 용접변형의 발생機構와 그 대책”, 대한용접학회지, 제7권 제1호, pp.29-35.
- 김화수 1997. “선박 용접구조의 잔류응력과 피로강도”, 대한용접학회지, 제15권, 제3호 pp.12-19.
- 박지선, 한명수, 한종만 1997. “MSR을 이용한 용접잔류응력의 제거와 적용성 검토”, 대한용접학회지, 제15권 제3호, pp.29-35.
- 이상갑, 이윤기, 김화수, 김도현 1999. “잔류응력의 피로수명에 미치는 영향”, 대한조선학회 1999년도 추계학술대회논문집, pp.390-393.
- 한문식, 김재동, 이호섭 1991. “유한평판 및 T-joint 필렛 용접부에 있어서 3차원 표면균열의 피로 파괴거동에 관한 실험적 연구”, 대한조선학회논문집, 제28권, 제2호, pp.275-284.
- AWS 1987. “Welding Handbook”, Volume 1, Eighth Edition, pp.231-233.
- British Standard Institution 1980. “Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10. Code of Practice for Fatigue”, BS5400.
- K. Masubuchi 1980. “Analysis of Welded Structures”, Pergamon press, pp.112-147.
- O. Watanabe, et al 1995. “Fatigue Strength of Welded Joint of High Strength Steel and Its Controlling Factor-Effects of Stress Concentration Factor and Welding Residual Stress”, Journal of Japan Welding Society, Vol. 13, No. 3, pp.438-443.
- T. R. Gurney 1979. “Fatigue of Welded Structure”, Cambridge University Press, Second Edition, pp.226-243.
- 佐藤邦彦 1988. “溶接構造要覽”, 黒木出版 pp.95-113.



〈 강 성 원 〉



〈 김 영 욱 〉



〈 김 화 수 〉



〈 김 도 현 〉