

다균열 간섭, 합체, 성장이론을 고려한 십자형 필렛용접 이음부의 피로균열진전수명 평가

한정우[†]·한승호*·신병천*·임 전**·김재훈**

Fatigue Life Estimation of Cruciform Welded Joint Considering Interaction, Coalescence and Growth of Multi-crack

Jeongwoo Han, Seungho Han, Byungchoen Shin, Jeon Rim and Jaehoon Kim

Key Words: Fatigue Life(피로수명), Multiple Surface Crack(복수 표면균열), Mutual Interaction(상호 간섭), Coalescence(합체), Cruciform Welded Joint(십자형 필렛용접 이음부)

Abstract

Fatigue life of welded joints are governed by the propagation of multiple collinear surface cracks distributed randomly along weld bead. These cracks propagate in mutual interaction and coalescence of them. To estimate the fatigue life, the influences of above two mechanisms on the fatigue life should be taken into account. These two mechanisms appear through the stress intensity factors disturbed mutually. However, it is difficult to calculate the stress intensity factors of multiple surface cracks located in vicinity of weld toe. The stress intensity factors are calculated normally by using the Mk -factors, but such Mk -factors are very rare in literature. In this study, the Mk -factors were obtained from a parametric study on crack length and depth, in which a finite element method is used. A fatigue test for a cruciform welded joint was conducted. The fatigue life of the tested specimen was estimated through present method with the informations obtained from the test, e.g. the number, size and locations of the cracks. The estimated and measured fatigue life showed a good agreement.

1. 서론

플랜트 설비, 교량 및 수송기계 등과 같은 대형 용접구조물의 경우, 이미 설계 수명에 육박하였거나 또는 사용조건이 더욱 가혹해져 주요부재의 피로파손 사례가 보고 되고 있다. 대부분의 피로파손은 용접비드 선단에 발생하는 복수 표면균열에서 시작된다. 이는 균열간의 간섭, 합체 및

성장 기구⁽¹⁻³⁾를 통해, 부재의 두께 방향으로 진전하고 부재를 관통하면서 구조성능을 급격히 저하시킨다. 복수 표면균열은 용접비드 선단의 기하학적인 불연속부에서 발생한다. 공학적으로 측정이 용이한 표면균열 깊이 0.3~0.4mm를 기준으로 부재를 관통 할 때까지의 수명은 외부하중 조건에 따라 차이는 있지만, 전체 피로수명의 6~70% 이상을 차지한다.^(4,5) 이러한 이유로 대형 용접구조물의 수명평가를 위해 피로균열진전수명 평가에 대한 연구가 요구되고 있다.

용접부에 발생하는 표면균열은 비드 선단을 따라 불규칙하게 분포하며, 또한 발생한 균열의 크기 및 형상비도 다양한 양상을 띠고 있다. 지금까지 복수 표면균열의 연구는 주로 단면형상이 일정한 평활재에 대한 것⁽²⁻⁴⁾으로 국한되어 있어,

† 한국기계연구원 구조연구부

E-mail : jwhan@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7432 FAX : (042)868-7418

* 한국기계연구원 구조연구부

** 충남대학교 기계설계공학과

실제 용접구조와 같이 복잡한 형상을 갖는 경우 이의 실용적인 적용에 어려움이 따랐다. 따라서, 용접구조물의 복수 표면균열 진전수명을 평가하기 위하여 균열의 간섭, 합체 및 성장 기구를 고려하는 것은 물론, 균열발생 부위에 응력집중을 야기시키는 부가구조(Attachment) 및 용접비드(Weld bead)에 의한 표면균열 선단의 국부적인 응력확대계수 상승분 *Mk-factor*^(6,7)를 고려해야 한다.

본 연구에서는 복수 표면균열의 간섭, 합체 및 성장 기구와 *Mk-factor*를 고려하여 용접 구조상 세 중 대표적인 십자형 필렛용접 이음부를 선정하여, 실제 용접비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 크기 및 분포를 고려한 피로균열진전수명을 평가하였다.

2. 복수 표면균열의 피로균열진전 평가

2.1 단일 표면균열에 대한 응력확대계수

단면형상이 일정한 평활재의 3차원 표면균열에 대한 응력확대계수의 해는 Newman-Raju식⁽⁸⁾이 가장 광범위하게 활용되고 있으며, 이후 종전에 적용범위(0 ≤ *a/c* ≤ 1)를 0 ≤ *a/c* ≤ 2로 확장한 식(1)과 같은 Fett식⁽⁹⁾이 적용되고 있다.

$$K_I = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F_{Fett}(a/t, a/c, c/b, \phi) \quad (1)$$

여기서, *a* = 균열깊이, *c* = 균열깊이의 1/2
t = 두께, *b* = 폭의 1/2, ϕ = 균열면각
 σ_t = 축하중 응력성분

2.2 간섭을 고려한 복수 표면균열의 응력확대계수

3차원 복수 표면균열의 간섭조건은 Murakami⁽¹⁰⁾와 Nemat-Nasser⁽¹¹⁾에 의하여 제안된 체적력법이 가장 일반적이다. 그러나, 계산방법이 매우 복잡하고 일관된 해를 주고 있지 못하는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 Murakami와 Nemat-Nasser가 제안한 간섭조건을 주 간섭조건으로 하고, 2차원 관통균열에 대한 간섭이론을 3차원 표면균열의 간섭으로 보정한 방법인 Yuuki-Yoshida의 수정식⁽¹²⁾을 적용하여, 간섭을 받는 복수 표면균열의 응력확대계수를 구하였다.

$$K_I = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \{1 + r_m(F_{2D} - 1)\} F_{Fett} \quad (2)$$

여기서, *r_m* = 2차원 균열의 3차원 효과에 대한 보정계수(실험상수)

$$F_{2D} = K_{I,multi}/K_{I,single} \text{ (2차원 복수 관통 균열에 대한 간섭계수)}$$

*K_{I,multi}*는 Fig. 1과 같이 인장응력을 받는 무한 판에 일직선에 놓인 두개의 인접균열 선단에 작용하는 응력집중계수를 의미하며, 이는 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$K_{I,B} = \sigma \sqrt{\frac{\pi(b-d)}{2(a-b)(b-c)}} \cdot \{(a-b) - (a-c) \cdot (1 - \frac{E(k)}{K(k)})\} \quad (3)$$

$$K_{I,C} = \sigma \sqrt{\frac{\pi(a-c)}{2(b-c)(c-d)}} \cdot \{(c-d) - (b-d) \cdot (1 - \frac{E(k)}{K(k)})\} \quad (4)$$

여기서, $k = \sqrt{\frac{(a-b) \cdot (c-d)}{(a-c) \cdot (b-d)}}$
E(k), *K(k)* = 1, 2 종 완전타원적분

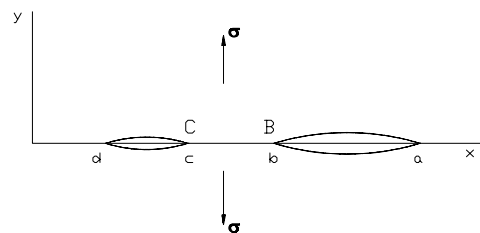


Fig. 1 Interaction of adjacent two crack

2.3 복수 표면균열의 합체조건

복수균열이 각기 성장하여 인접균열 간 간격이 어느 일정 크기에 도달되면 서로 합체가 일어난다. ASME⁽¹³⁾ 및 BSI Code⁽¹⁴⁾에서는 균열의 합체조건을 인접균열 간의 간격 δ_0 로 결정하고 있다. 본 연구에서는 균열선단 표면점 간 연결조건, 즉 $\delta_0 = 0$ 을 만족하였을 때 복수 표면균열의 합체조건으로 적용하였다. 균열의 합체가 순간적으로 이루어진다는 가정하에 합체 이후의 균열을 재정

의 하였다. 이 때 균열깊이 a 는 두 균열 중 더 큰 것으로 선택 하였으며, 균열길이 $2c$ 는 두 균열길이의 합으로 하였다.

2.4 복수 표면균열의 피로물성치 평가

복수 표면균열의 간섭 및 합체조건의 적용을 위하여 단일 표면균열의 $da, dc/dN - \Delta K_a, \Delta K_c$ 관계와 식(2)의 간섭계수 r_m 을 실험적으로 구해야 한다. 이를 위하여, Table 1과 같은 일반 용접구조용 강재로 널리 사용되고 있는 SM490B을 이용하여 피로시험을 실시하였다. 피로시험에 사용된 시험편은 평활재로서 40x80x10mm(너비×평행부 길이×두께)의 크기를 갖으며, 시편 중앙부에 방전가공을 통해 반원형 노치를 도입하였다. 피로시험은 MTS사의 25ton 용량 유압가력기를 이용하였다. 정현파형의 일정 진폭하중을 시험편에 가하였고, 이때 응력비 $R(=P_{min}/P_{max})$ 은 0.1로 고정하였으며, 하중 주파수는 10Hz로 하였다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM490B

Chemical Composition (wt%)							
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.155	1.304	0.0166	0.0104	0.423	0.032	0.038	0.018
Mechanical Properties			UTS (MPa)		el. (%)		
σ_y (MPa)		514		29			

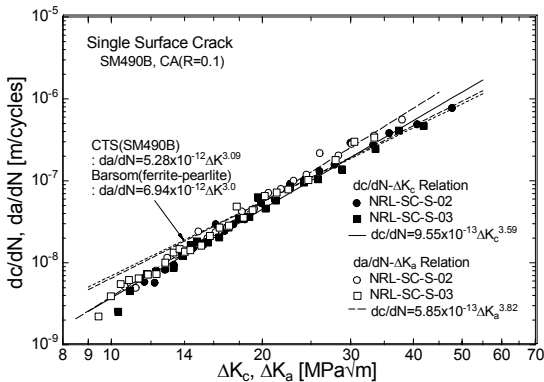


Fig. 2 $da, dc/dN - \Delta K_a, \Delta K_c$ curves of SM490B in case of single surface crack

Fig. 2는 단일 표면균열에 대한 피로실험 결과

이며, $da, dc/dN - \Delta K_a, \Delta K_c$ 관계는 Paris식의 형태로 표현하였고 각각의 실험상수는 그림 중에 나타내었다. 내부균열의 형상을 측정하기 위하여 피로시험 도중 주기적으로 비치마크법이 도입되었고, 시험완료 후 파면해석을 통하여 이를 정량화 하였다.

간섭계수 r_m 은 복수 표면균열 피로실험 자료와 단일 표면균열 피로실험 결과를 바탕으로 복수 표면균열의 간섭, 합체 이론을 적용한 피로수명 예측자료 간의 비교를 통해 구해진다. 피로시험은 표면균열의 개수(2~5개), 크기 및 위치가 서로 다른 10종의 시험편을 준비하여 실시되었고, 이에 대하여 복수 균열의 합체시점 및 최종 파단 피로수명을 예측하였다. Fig. 3은 표면균열의 개수가 3개인 시험편에서 채취한 파면과 이를 예측한 해석자료를 비교한 결과의 예이다. 이를 통해 실험결과와 해석치의 오차가 최소로 되는 간섭계수 r_m 은 0.2로 얻어진다.

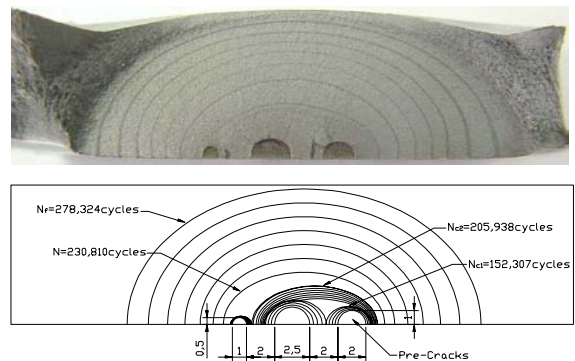


Fig. 3 Comparison of experimental and expected fatigue crack propagation for the multi-surface cracks

3. 십자형 필렛용접 이음부의 피로균열 진전수명 평가

3.1 Mk -factor 도입을 통한 응력확대계수 산정

용접구조물은 부가구조(Attachment) 및 용접비드(Weld bead)에 의하여 응력집중이 크게 발생하며, 비드 선단에 발생한 균열에도 영향을 주어 국부적으로 응력확대계수를 변화시킨다. 이 경우 응력집중계수와 마찬가지로 Mk -factor^(6,7)(Weld toe magnification factor)를 도입하여, 용접부 부가구조 및 용접비드로 야기될 수 있는 응력확대계수 변

화가 정량적으로 표현될 수 있다. Mk -factor는 용접 부가구조가 없는 평활시편에 대하여 부가구조가 있는 시편의 응력확대계수비로 다음 식과 같이 정의된다.

$$Mk = \frac{K_{I, \text{plate with attachment}}}{K_{I, \text{same plate with no attachment}}} \quad (5)$$

따라서, 용접구조물 비드 선단에 발생한 복수 표면균열의 응력확대계수는 평활재에서 얻어진 식(2)의 수정을 통해 아래 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$K_I = Mk \sigma_t \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F_{Yuuiki - Yoshida} F_{Fett} \quad (6)$$

3.2 Mk -factor 계산식의 도출

용접구조물에서 균열발생이 예상되는 용접이음부의 형상이 결정되면, Mk -factor는 부가구조, 용접비드 및 표면균열의 형상에 의존하므로 파라미터 연구를 통하여 Mk -factor 계산식을 도출해야 한다. T-joint⁽⁷⁾와 Butt-joint⁽¹⁵⁾에 대한 2차원 및 3차원에 대한 Mk -factor 계산식은 제시되고 있으나, 본 연구에 사용된 십자형 필렛용접 이음부에 대한 계산식은 아직까지 발표되지 않았다. 십자형 필렛용접 이음부의 형상은 Fig. 4와 같다. 용접비드 선단의 기하학적 형상은 대표적으로 노치반경 ρ 및 플랭크 각 θ 로 표현할 수 있고, 실리콘 플라스틱을 이용하는 비파괴측정법을 적용하여 이를 계측할 수 있다. 시험편의 상세치수, 제작공정 및 계측자료는 저자 등의 논문⁽¹⁶⁾에 상세히 언급되어 있다.

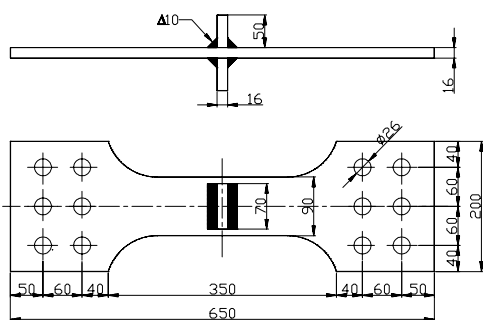
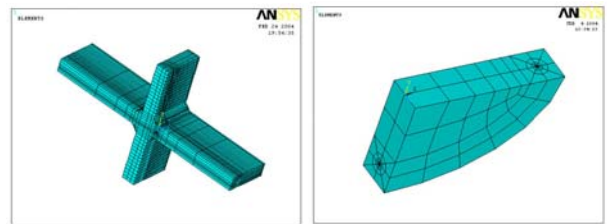
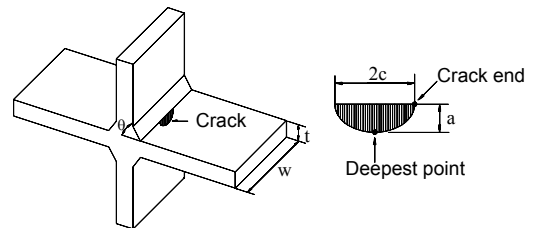


Fig. 4 Configuration of cruciform welded joint

Mk -factor의 반복계산을 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 균열선단을 따라 특이요소를 생성시킨 3차원 solid 요소를 이용하였고, 용접이음부 형상의 좌우대칭을 고려하여 Fig. 5(a)와 같이 1/2만을 모델링하였다. 3차원 표면균열의 Mk -factor는 Fig. 5(b)와 같이 균열 끝단(Crack end)과 최심점(Deepest point)에서 얻어진다. 반복계산의 범위는 용접이음부 두께에 대한 균열깊이비 a/t 의 경우 0.01~0.7이고, 균열형상비 a/c 범위는 0.2~1.0이다. 이 범위 내에서 자동적으로 균열이 모델링이 되도록 프로그램을 작성하였다. 이때 용접비드의 플랭크 각 θ 는 확률이 50%인 42.5°으로 하였고, 노치반경 ρ 는 Mk -factor에 매우 적은 영향을 주므로⁽⁷⁾, 용접루트반경을 고려하지 않았다.



(a) Modeling by using ANSYS



(b) Configuration of semi-elliptical surface crack

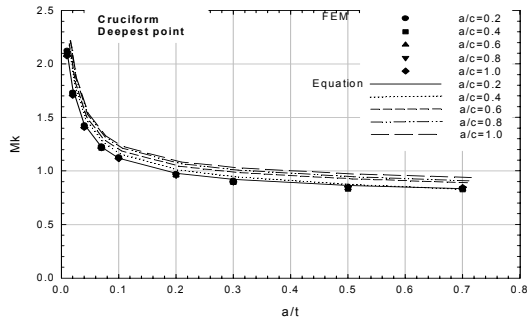
Fig. 5 Modeling and schematic diagram of semi-elliptical surface crack

Fig. 6은 균열 끝단과 최심점에 대한 Mk -factor 계산결과이다. a/t 가 작을수록 부가구조 및 용접비드의 영향이 크게 나타나 Mk -factor는 균열 끝단 및 최심점의 경우 모두 크게 증가한다. a/c 에 대한 Mk -factor의 영향은 최심점의 경우 거의 찾아보기 힘들다. 이에 대하여, 끝단의 경우 a/c 가 0.2와 0.4사이에서 Mk -factor가 큰 변화를 보이나, a/c 가 0.6 이상에서는 이 변화가 사라진다.

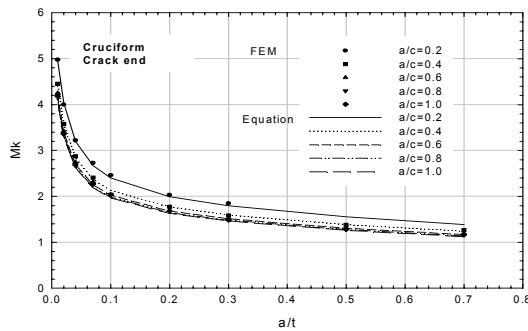
Mk -factor 계산식은 Fig. 6의 계산결과를 피팅(fitting)하여 구할 수 있다. 이때 적용된 함수식은

식(7)과 같으며, 피팅계수 A~G는 Table 2와 같다.

$$Mk = \{A + B \cdot e^{-C \cdot (a/c)}\} \cdot \left\{ \frac{D + E \cdot (a/t)}{1 + F \cdot (a/t) + G \cdot (a/t)^2} \right\} \quad (7)$$



(a) *Mk*-factor at deepest point



(b) *Mk*-factor at crack end

Fig. 6 *Mk*-factor at deepest point and crack end for cruciform welded joint

Table 2 Fitting factors of *Mk*-equation for cruciform welded joint

Fitting Coeff.	Cruciform	
	Crack end	Deepest point
A	4.1604	2.0513
B	2.3039	0.0917
C	-5.1875	-1.3577
D	1.4521	2.8483
E	27.3836	49.0783
F	72.3167	60.0267
G	45.1885	4.8892

3.3 십자형 필렛용접 이음부의 수명평가

십자형 필렛용접 이음부 비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 크기 및 분포를 얻기 위하여 피로시험을 실시하였다. MTS사의 100ton 용량 유압

가력기를 사용하여 정현파형의 일정진폭하중을 시험편에 가하였고, 이때 응력비 *R* 및 하중 주파수는 각각 0.1, 10Hz로 하였다. 피로시험 중 염료 투입법을 실시하였고, 실험 종료 후 파면분석을 통하여 염료투입 시점에서의 복수 표면균열의 크기와 위치를 측정하였다. 얻어진 피로시험 결과를 Table 3에 정리하였다. 염료투입 시점 *N_D*는 시험편 파단수명 *N_T*에 대하여 20~70%에 해당하며, 이때 관측된 균열수는 1~15개로 시험편 간에 차이가 심하였으며, 균열길이 *a* 및 균열길이 *2c*는 각각 0.14~5.45mm 및 0.51~10.03mm로 측정되었다.

Table 3 Fatigue test results for cruciform welded joint

Specimen	$\Delta\sigma$ (MPa)	No. of Crack	$N_T - N_D \left(\frac{N_T - N_D}{N_T} \right)^*$
#1	150	2	982634 (0.58)
#2	220	3	268387 (0.64)
#3	275	2	93591 (0.73)
#4	175	6	120720 (0.29)
#5	140	6	490147 (0.41)
#6	190	15	208967 (0.58)
#7	200	6	183284 (0.65)
#8	120	1	1798317 (0.50)

* *N_T*=total fatigue life

N_D=fatigue life when performing dye penetration

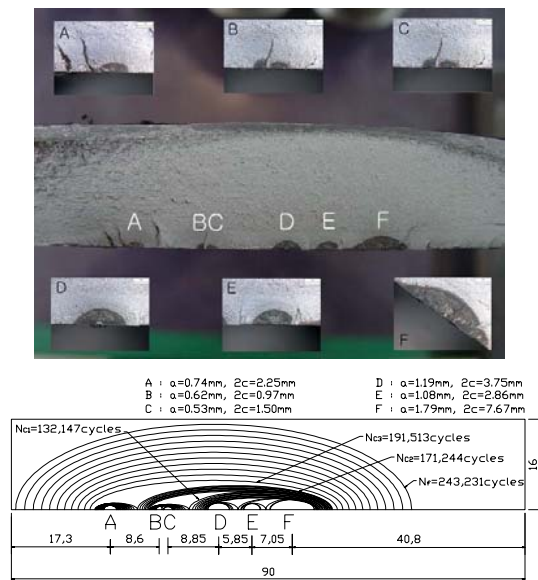


Fig. 7 Fractography and simulation of crack propagation for the specimen #5

Fig. 7은 Specimen #5에 대한 관측된 복수 표면 균열 모습 및 식(6)을 적용하여 피로균열진전을 모사한 예이다. 관측된 6개의 표면균열의 크기 및 위치를 측정하고, 이 자료로부터 $N_T - N_D$ 를 추정할 수 있었다. Fig. 8은 모든 시험편에 대하여 추정된 피로수명 $N_T - N_D$ 를 Table 3의 실험결과와 비교한 결과이다. 추정된 피로수명이 실험치를 과소평가 하여 다소간 안전측의 결과를 보인다.

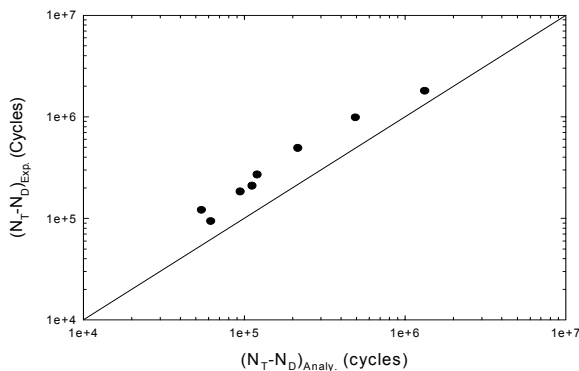


Fig. 8 Comparison of crack propagation life for cruciform welded joint

6. 결론

본 연구는 복수 표면균열의 간섭, 합체 및 성장 기구와 Mk -factor를 고려하여 십자형 필렛용접 이음부의 피로균열진전수명 평가법 개발이 목적이다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 복수 표면균열의 응력확대계수는 Yuuki-Yoshida의 수정식으로 구하였으며, 간섭계수 r_m 은 실험적으로 0.2로 얻어졌다.

(2) 십자형 필렛용접 이음부의 부가구조 및 용접비드 형상을 고려한 파라미터 연구를 통해 Mk -factor 계산식을 도출하였다.

(3) 실험적으로 얻어진 십자형 필렛용접 이음부 비드 선단에 발생한 복수 표면균열의 크기 및 분포로부터 피로수명을 예측하였으며, 이 결과가 실험치를 잘 모사하는 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구내용은 과학기술부 국가지정연구실과제인 “대형용접구조물의 피로수명예측기술개발”의

일부로 연구수행에 지원을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, J., Choi, Y. and Kim, Y., 1993, *Transactions of KSME, Vol.17, No.5*, pp. 1668-1677
- (2) Suh, C., Hwang, N. and Park, M., 1994, *Transactions of KSME, Vol.18, No.3*, pp. 716-728
- (3) Kim, J., Lee, J. and Hong, C., 1996, *Transactions of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol.33, No.4*, pp. 75-86
- (4) Yamada, K., Makino, T., Baba, C. and Kikuchi Y., 1980, *Journal of JSCE, Vol.303*, pp. 31-41
- (5) Yamada, K., Makino, T. and Kikuchi Y., 1979, *Journal of JSCE, Vol.292*, pp. 1-12
- (6) Madox, S., 1975, *International Journal of Fracture, Vol.11, No.2* pp. 221-243
- (7) Bowness, D and Lee, M., 2000, *International Journal of Fatigue, Vol.22*, pp. 369-387
- (8) Newman, J. and Raju, I., 1981, *Engineering Fracture Mechanics, Vol.15, No.1-2*, pp. 185-192
- (9) Fett, T., 1987, *International Journal of Fracture, Vol.33*, pp. R47-R50
- (10) Murakami, Y. and Nisitani, H., 1981, *JSME Ser. A, Vol.50*, pp. 295-303
- (11) Nemat-Nasser, S., 1982, *Engng. Frac. Mech., Vol.16*, pp. 373-386
- (12) Yuuki, R. and Yoshida, T., 1986, *Journal of High Pressure Institute, Vol.24, No.3*, pp. 115-123
- (13) ASME, 1989, *Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI*
- (14) British Standard Institute, 1980, PD 6493
- (15) BS 7608:1993, *British Standard*
- (16) Han, J., Han, S., Shin, B. and Kim, J., 2003, *Proceedings of the KSME 2003 Fall Annual Meeting*, pp. 1103-1108