한국정밀공학회지 제18권 제10호 (2001년 10월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 10, October 2001.

다중 균열 보강 판재에 관한 파괴 역학적 해석

한문식*, 이양섭*

Fracture Mechanics Analysis of Multiple Load Path Plate

Moon-Sik Han* and Yang-Sub Lee*

ABSTRACT

The compliance approach to the problem of load sharing between a cracked plate and multiple plate used to bridge the crack. The theory is validated by using calculated stress intensity factors for the multiple load path plate to reduce experimentally observed growth rate to a common base. Calculations are them made on the effect of multiple load path plate width on fatigue crack retardation in order to demonstrate the predictive capability of the technique

Key Words : Multiple load path plate(다중보강판재), Compliance(컴프라이언스), Fatigue Crack Retardation (피로균열지연), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Crack Growth Rate(균열진전율)

1. 서론

자동차, 항공기, 선박, 철도 차량 등 수송기계의 용접구조물에 있어 파괴사고의 원인은 대부분이 균열에 의한 피로파괴이며, 이로 인한 파괴사고가 발생하면 그 재해가 막대하다는 것은 주지의 사실이다. 이러한 파괴사고를 방지함은 물론이고 수명연장을 위한 노력이 끊임없이 계속되고 있으나, 아직도 각종 사고 예가 무수히 발표되고 있는 실정이다. 최근 들어 자동차, 항공기, 선박 등의 수송기계 구조물을 위시한 각종 구조물의 신뢰성은 이전보다 훨씬 향상된 것은 사실이다. 이는 과거의 각종 파괴 사고예를 해석하여 그 자료를 금후의 구조물 설계의 기초로 삼고, 또한 소재재료, 용접기술, 검사기술 및 구조역학의 비약적인 발전의 결과라고 할 수 있다. 수송기계 구조물의 강도설계는 안전성과 신뢰성 확보의 측면에서 과거에 축적된 시험공학에 입각한 설계기법으로부터 파괴역학에 기초한 Fail Safe Design 기법 및 Safe Life Design 기법등이 적용되지만, 전체 구조물에 결함이 포함되지 않은 것을 보증하기에는 극히 곤란한 점이 있다. 사실 현재의 비파괴검사 기술법에 의하여 상당수의 결함이 발견되고 있고, 설계시에 고려되지 않는 응력 집중이 제작 후에 생겨 문제가 생기므로 이 방법에 의한 설계는 안전성 평가 및 설계상의 중요한 과제로 대두되고 있다.[1-2] 따라서 피로균열 성장과정은 구조물의 검사, 보수, 안정성 평가상으로는 극히 중요한 기본과정이고, 실 구조물 및 기기류의 수명을 예측 추정하기 위한 근본적인 해석 모델이 된다.

☞ 2001년 3월 13일 접수
* 계명대학교 기계·자동차공학부

이에 대한 연구는 많은 진전이 이루어지고 있고, 실지 사고에 예방으로서 뿐만 아니고 수명연장에 직접적인 도움이 될 수 있는 균열진전 방지 및 지연대책 기술연구가 집중으로 이루어지고 있다.[3-8] 수송기계 구조물을 비롯한 대형구조물에 있어서 전파하는 취성균열의 동적해석 기술이 확립되어 있지 않은 현 단계로서는 전파해 오는 균열의 진전력을 감소시킴으로서 균열을 지연 및 정지시키는 형태, 균열 전파에 대한 저항력이 높은 재료를 배치하여 전파균열을 지연 및 정지시키는 형태, 판 두께를 감소시켜 균열진전을 지연 및 정지시키는 많은 방법들[3-5]이 제안되고 있으나, 최근까지는 실제구조물의 활용도와 경제성이 뛰어난 보강판재에 의한 수명연장, 즉 균열정지 및 지연방법이 보편적으로 많이 사용되고 있다.[6-9]

따라서, 본 연구에서는 보강된 구조물, 즉 다중판재와 균열진 구조물 사이의 하중 분배문제에 컴프라이언스(Compliance) 개념을 적용하였으며, 여기서 유도된 응력확대계수를 다중 보강판재로 인한 균열 진전 감소효과 규명에 적용하여 실험과 더불어 유효성을 증명했고, 또한 이 기법의 예측능력을 입증하기 위하여 보강판재 폭에 대한 피로균열 지연효과 규명에도 적용 검토하였다.

2. 균열진전과 컴프라이언스

길이 2a의 중앙 관통 균열을 갖는 탄성체에서 인장하중 P가 작용할 때 변위를 δ 라 하면 컴프라이언스 λ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\delta}{P} \tag{1}$$

즉 단위하중당 변위를 나타낸다. 길이가 L_o , 넓이가 A_0 , 탄성계수가 E 인 균열이 없는 탄성체 판의 컴프라이언스 λ_o는,

$$\lambda_o = \frac{L_o}{E A_0} \tag{2}$$

탄성체에서 균열길이가 a 만큼 진전된다면 강성은 감소하고 컴프라이언스 λ 는 증가하여 식 (3) 과 같다.

$$\lambda = \lambda_o + \int_0^a \frac{\partial \lambda}{\partial a} da \tag{3}$$

에너지 해방율 $\mathcal{G}$ 는

$$\mathcal{G} = \frac{du}{dA} = \frac{d}{dA}\left(\frac{P\delta}{2}\right) = \frac{P^2}{2} \cdot \frac{d\lambda}{dA} \tag{4}$$

과 같은 식으로 표시되며, 여기서 du, dA는 변형율 에너지(strain energy),균열면적의 미소증분을 나타내며, 재료두께를 t라고 하면,

$$\mathcal{G} = \frac{P^2}{2} \cdot \frac{d\lambda}{dA} = \frac{P^2}{2t} \cdot \frac{d\lambda}{da} \tag{5}$$

과 같이 표시되고 균열이 da만큼 진전하였을 때 해방되는 에너지를 이 da부분의 균열을 닫는데 필요한 일량과 같다고 놓으면, 다음의 식을 얻는다.

$$\mathcal{G} = \frac{K^2}{E'} \tag{6}$$

여기서, K는 응력확대계수, E' 는 평면응력 상태에서 탄성계수 E 이고, 평면변형율 상태에서, $E/(1-\nu)^2$ 이다. ν 는 프아송의 비이다. 식(5)과 식(6)에서 K 를 구할 수 있다.

$$K = \sqrt{\frac{E' P^2 \cdot d\lambda}{2t \cdot da}} \tag{7}$$

일반적으로 임의의 균열을 갖는 부재에서의 응력확대계수 K 는 전체에너지(Total energy method)을 이용하여 식(7)에 의하여 구할 수 있다. 또한 본 시험편과 같은 중앙균열에 대하여 다음과 같이 K 의 값이 제시되었다.[10]

$$K = \sigma\sqrt{a} \cdot Y \tag{8}$$

여기서, Y 는 $F\left(\frac{a}{W}\right)$ 로 표시되는 형상계수이며 다음과 같이 주어진다.

$$Y = 1.77\left[1 - 0.1\left(\frac{2a}{W}\right) + \left(\frac{2a}{W}\right)^2\right] \tag{9}$$

이때 시험편 폭은 W 이며, 전체에너지법에 의한 K 값과 식 (8)을 등치하면,

$$K=\sqrt{\frac{E'P^2\cdot d\lambda}{2t\cdot da}}=\sigma\sqrt{a}\cdot Y \tag{10}$$

가 되고, 여기서 $d\lambda$ 에 대하여 풀면

$$d\lambda=\frac{2t\cdot Y^2\cdot a}{A^2\cdot E'}da \tag{11}$$

와 같이 된다. 위의 식(3)은 식(11)을 대입하면 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$\lambda=\lambda_0+\int_0^a\frac{2t\cdot a\cdot Y^2}{A^2\cdot E'}da \tag{12}$$

평면응력의 경우 식 (12)에서 $E'=E$ 가 된다. 따라서 식(12)에 의해서 균열진 평판에서의 컴프라이언스를 평가할 수 있다.

3. 균열진 평판과 보강판재 사이의 컴프라이언스 이전

컴프라이언스를 이용하여 균열진 평판으로 얼마의 하중이 옮아가는지를 알아보기 위하여 Fig.1 과 같이 하중(P)이 일정하게 작용하고 있을 때 균열진 평판에 걸리는 하중 P_1 과 보강판재에 걸리는 하중 P_2 를 구하여 보면,

$$P=P_1+P_2 \tag{13}$$

$$\lambda_1=\frac{\delta_1}{P_1} \tag{14}$$

$$\lambda_2=\frac{\delta_2}{P_2} \tag{15}$$

이다. 여기서, λ_1 는 균열진 평판에 대한 컴프라이언스이고, λ_2 는 보강판재에 대한 컴프라이언스이며, $\lambda_2=L_2/A_2E$ 로 구할 수 있는데 이 식에서 A_2 및 L_2 는 보강판재의 평형부 단면적 및 길이이다. 식(15)에서 하중이 작용하였을 때는 δ_1 과 δ_2 가 같아지므로,

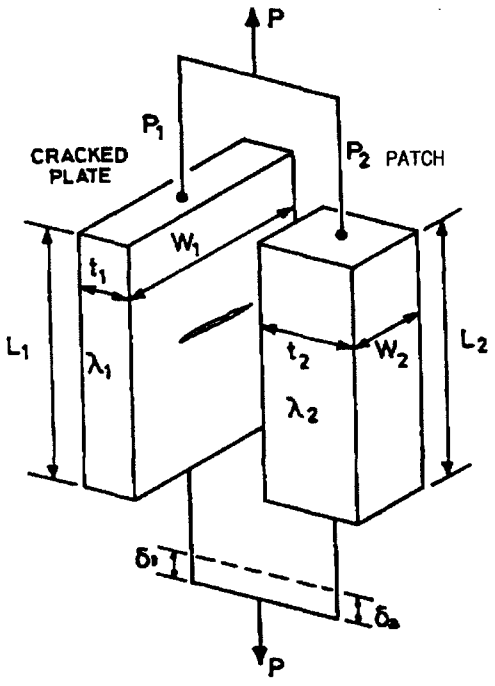

Fig. 1 Load sharing between equally extended plates of different compliance

$$P_1\lambda_1=P_2\lambda_2 \tag{16}$$

가 된다. 식(13)와 식(16)로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$P_1=\frac{\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2}P \tag{17}$$

$$P_2=\frac{\lambda_1}{\lambda_1+\lambda_2}P \tag{18}$$

식(17)과 식(18)에서 균열진 평판 및 보강판재의 컴프라이언스 λ_1 , λ_2 의 증가와 더불어 균열진 평판 및 보강판재의 하중이 감소함을 알 수 있다. 식(10)과 식(17)을 사용하여 보강덮판된 균열진 평판

에서의 응력확대계수 폭 ΔK를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot \sqrt{a} \cdot Y$$

$$= \frac{P_{max} - P_{min}}{A} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \sqrt{a} \cdot Y \qquad (19)$$

$$\left(\frac{P}{p_i}\right)_j = \lambda_i \cdot \sum_{i=1}^{i+1} \cdot \frac{1}{\lambda_k} \qquad (20)$$

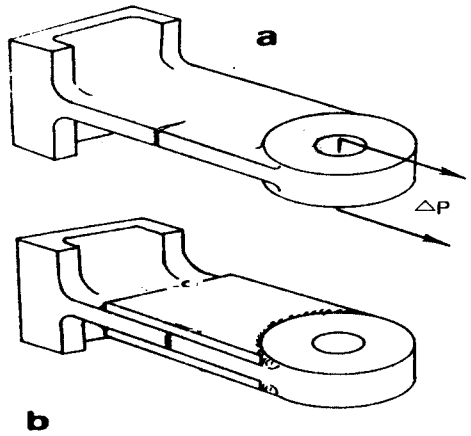

Fig. 2 Schematic of structural member with edge crack
(a) Fluctuating load
(b) Reinforced by multi-patches

또한 균열진 판의 수명연장을 위하여 Fig. 2와 같이 다중 보강 판재를 겹쳐 사용할 경우 덮판 수에 따라 균열 부위 평판의 하중이 감소되어 균열진전 효과가 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서도 같은 경우이므로 하중분포 관계는 식(20)과 같다. 여기서 i는 주판과 보강판재의 하중이전 수, j는 보강판재의 수이다. 균열진 판과 보강판재의 하중 관계를 이용하여 식(17)이후의 절차에 따라 여러 개의 보강판재가 겹칠 경우의 응력확대계수 범위를 구했다.

4. 실험절차

4.1 시험편의 준비

본 실험에서는 포항제철의 냉간압연 일반구조용 강재 SS41을 택하였으며, 기계적 성질은 Table 1과 같다. 먼저 모든 시험편을 압연방향에 수직방향으로 자른 후 균열을 압연방향과 같은 방향으로 가공하였다. 우선 재료의 기계적 성질을 알아보기 위하여 ASTM A370-77의 규정에 의하여 Fig. 3과 같은 치수로 인장 시험편을 준비하였다. 피로 시험편으로서는 ASTM E647-83의 CCT형 시험편 규격에 따라 형상과 치수를 결정하여 주판 (Main Plate)를 제작하였다. 주판의 중앙균열은 시험판의 중앙부에 직경 2mm로 드릴링한 후 와이어(wire) 방전가공을 통하여 폭 0.5mm, 길이 5mm 중앙 크랙을 낸후 약 1.5mm 정도의 예비크랙을 내어 완성하였다. 보강판재는 주판과 동일한 재료로 사용하여 밀링머신으로 가공한 후 폭을 변화시켜 균열이 없도록 가공하였다. 본 연구의 실험을 위하여 Fig. 4 같이 보강판재의 폭이 10, 20, 30mm 인 보강판재(Patch)를 제작하여 주판과 폭이 10mm인 보강판재가 한조가 된 Single 보강판재 시험편, 주판과 폭이 20mm, 10mm 보강판재가 한조가 된 Double 보강판재 시험편, 주판과 폭이 30mm, 20mm, 10mm 보강판재가 한조가 된 3중 보강판재 시험편 등 3종의 시험편을 제작하

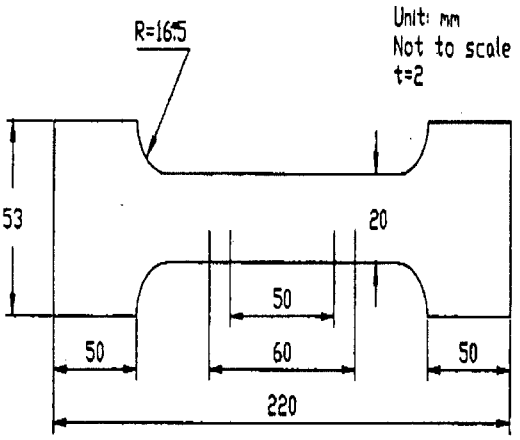

Fig. 3 Tensile test specimen

였다. 이때 주판과 보강판재와의 접합은 그림 부분을 레이저(Lazer)용접하였다.

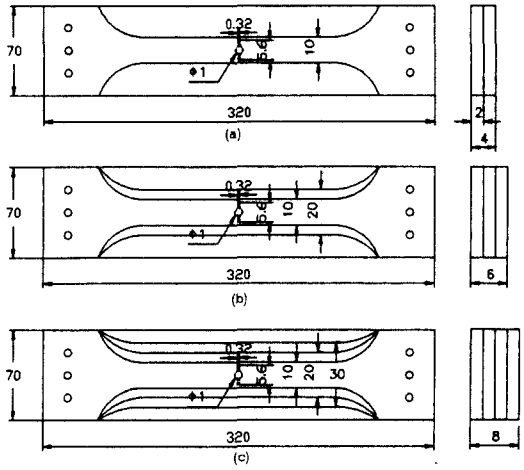

Fig. 4 Fatigue test specimen of multi-patches
(a) single patch
(b) double patches
(c) triple patches

Table 1 Mechanical properties of test materials

yield strength	tensile strength	elastic modulus
184.3MPa	277.8MPa	197.113GPa

4.2 실험장치 및 실험방법

피로시험은 유압 Servo 피로 시험기(MTS co.10ton)를 사용하였으며 부속장비로는 Extensometor (Range : 12.5-2.5mm), 이동식 현미경 (1/100mm) , X-Y Recorder, Personal Computer 등을 사용하였다. 인장시험은 최대하중 10 ton cell의 Range 50%에서 Gage-Length 50mm의 변위측정장치 (Extensometer)를 부착하여 Stroke Control 방식으로 실험속도를 0.5mm/min로 시험하여 X-Y Recorder에 하중-변위곡선을 얻었다. 여기에서 인장강도, 항복강도, 탄성계수를 산출하였다. 피로실험은 하중제어 방식으로 응력비 0.2에서 실시하였으며, 파형은 정현파(Sine Wave)로 하였다. 또한 하중반복수는 ASTM E24에서 제안한 방법에 따라 15Hz로 하였다. 시험최대 하중은 인장강도의 45% 범위에서 예비시험을 통하여 결정하였으며, 일정하중진폭시험 (ΔK 증가시험)으로 하였다.

균열길이의 측정은 약 0.3mm 정도 진전할 때마다 시험기를 정치시켜 놓은 상태에서 Travelling Microscope로 균열선단을 따라 가면서 눈금을 읽었다. 컴프라이언스를 측정하기 위해서 0.15Hz의 실험속도로 변화시켜 X-Y Recorder에 하중-하중점 변위곡선을 얻고, 그때 하중 반복수를 기록하였다. 위의 과정을 크랙 진전율 (da/dN)가 $10^{-3} mm/cycle$ 에 이를 때까지 반복수행하여 실험을 하였다. 실험에서 얻은 값은 컴퓨터에 입력하여 본 과제를 위하여 프로그램으로 분석하여 그 결과를 이론치와 비교하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 실험결과

각각의 실험에 있어서 반복하중의 진폭은 일 정하게 하였는데 반복사이클수에 대한 균열길이의 관계를 Fig. 5에 표시하였다. Fig. 5의 실험자료로부터 ΔK 와 da/dN 관계를 구하고, 이를 로그-로그좌표(Log-Log Scale)로 그리면 Fig. 6과 같이 된다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 ΔK 와 da/dN 는 직선관계로 나타남을 알 수 있다. 최소자승법으로 직선의 방정식을 구하면 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에서의 기울기(m)와 상수(C)를 구할 수 있다. 보강판재를 대었을 때의 사이클에 대한 균열길이의 관계는 Fig. 5였었는데 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 식에서 C 와 m 은 재료의 정수이므로 앞에서 구한 이들 C 와 m 의 값을 사용하여 보강판재를 대었을 때의 ΔK 를 계산할 수가 있다.

5.2 실험결과에 대한 고찰

가능한 한 주판과 거의 같은 형상의 보강판재를 부착할 경우 균열진 판의 수명을 연장시키기 위하여, 즉 균열진판에 걸리는 하중을 최대로 분산시키기 위하여 겹층으로 보강할 경우, 본 이론 적용여부를 종합적으로 검토하기 위하여 반복 사이클수에 따른 균열진전 거동을 Fig. 5에 보였다.

균열길이가 18mm까지 진전되었을 경우 단일 보강판재의 경우보다 수명연장율이 이중 보강판재를 할 경우 1.48배, 3중 보강판재를 할 경우 6.67배 정도를 보이고 있다. 이는 보강판재층이 많아질수록 하중분산효과가 커져 수명효과 큼을 알 수 있다. 또한 실험에서 본 이론의 적합성을 검토하기 위해 균열진전율과 응력확대계수 범위(△K)관계를 Fig. 6에 표시하였다. 여기서 보강판재 수에 따르는

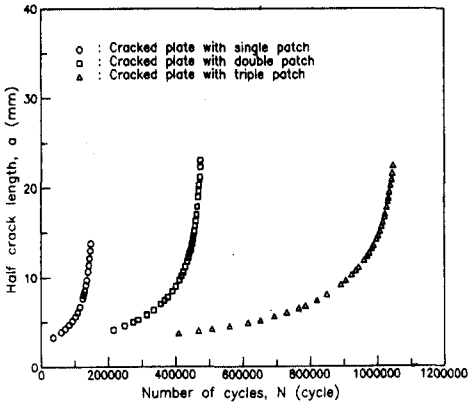

Fig. 5 Crack growth data for cracked plate with multi-patches

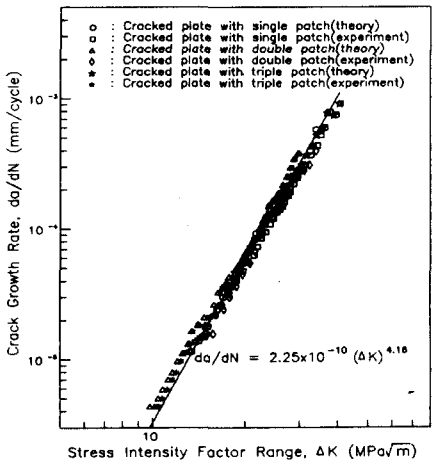

Fig. 6 Fatigue crack growth data reduced to a common stress intensity factor range in multi-patches

균열진 주판에서의 응력확대계수 폭은 식(20)의 하중관계식에 의해서 계산되었다. 또한 실험치는 별도의 피로시험에서 얻어진 컴프라이언스를 이용, 식 (19)에 의해서 보강덮판된 균열진 평판에서의 응력 확대계수 폭 $\triangle K$를 구하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 주어진 안정구역 범위 안에는 실험치와 이론치가 잘 일치함을 알 수 있고 이 결과로 보강판재와 균열진 주판과의 길이가 유사한 경우에 본 컴프라이언스 기법의 유효성을 잘 입증하고 있다. 이들 Data는 지수법칙, 형태로 나타날 수 있다.

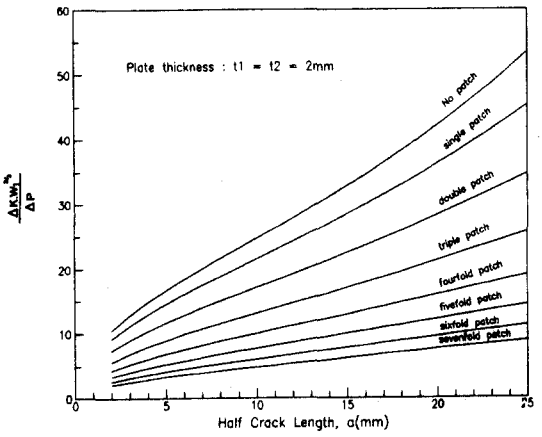

Fig. 7 Calculated effects of the multi-patch number on cracked plate stress intensity factor range

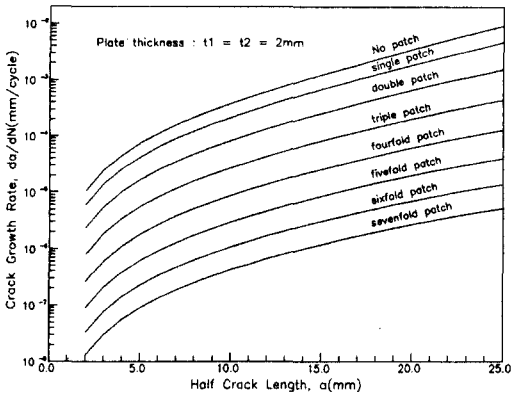

Fig. 8 Calculated effects of the multi - patch number on cracked plate fatigue crack growth rates

$$\frac{da}{dN} = 2.25 \times 10^{-10} \ (\triangle K)^{4.16} \qquad (21)$$

본 이론의 유효성에 따라 보강판재 수 변화효과를 보기 위하여 보강판재 수 를 변화 시켰을 때의 균

열 반길이 a에 대한 무차 원 △K 곡선을 Fig. 7에 보였다. 이 그림에서 보 면 10mm 균열 길이에서 단일 보강판재, 2중 보강판재, 3중 보강판재일 경우 각각 원래값의 87%, 67%, 52%의 응력확대계수 폭의 값으로 감소를 나타내 고 있다. 이는 보강판재 수에 따라 파괴강도를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 실험 Data의 식(21)에 의해서 균열 반길이 a에 대한 균열 진전 속도를 Fig. 8에 표시하였다. 이를 이용하여 여러개의 보강판재로 보강하였을 때 균열 진전 속도를 용이하게 구할 수 있으며, 여기에서 잔존 수명이 계산될 수 있으므로, 구조물의 잔존 수명에 따라 보강판재수 및 치수를 결정할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 다중 균열 보강 판재에 관한 파괴역학적 해석을 검토하여 보았으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 균열진 구조물의 피로잔존수명을 고려한 다중보강판재 설계의 정식화를 위하여, 컴프라이언스 개념을 이용하여 유도된 응력확대계수는 다중보강판재로 인한 균열진전 지연효과 규명에 실험검증을 통하여 그 유효성이 충분히 입증되었다.

2. 컴프라이언스개념을 이용한 다중 균열 보강판재 기법을 균열 진전 지연효과 등의 규명을 통하여 최적 수명 연장 설계 방법에 활용 가능토록 제시하였다.

3. 앞으로 복잡한 형상을 가진 균열진 구조물의 피로수명연장을 위하여 실구조물의 균열부위에 대한 복합하중 상태에서의 응력확대 계수 분리해석 문제, 보강판재 주위의 하중경로 규명문제, 용접 보강판재의 용접부 균열발생 한계설정문제, 복합재료 보강판재의 최적설계 등의 연계가 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해 자동차 부품 기술 개발 센타의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 송삼홍, 주동호, 양윤진, "3중 점용접재의 균열단 열림각(CTOA)을 이용한 피로 균열거동," 한국 정밀 공학회지, 제18권, 제5호, pp. 74-83, 2001.
2. ASME, Bolier and Pressure Vessel Code, Sec.XI, Addenda, 1973.
3. D.Broek, "Fracture control by periodic inspection with fixed cumulative probability of crack detections," Structural failure, product liability and technical insurance, Rossmanith Ed. pp. 238-358, Interscience Enterprises, Ltd, 1987.
4. H. Vlieger, "Residual strength of cracked stiffened panels," Eng. Fract. Mech. 5, pp. 447-478, 1973.
5. H. P Van Leeuwen et al.., "The repair of fatigue cracks in low alloy steel sheet," National Aerospace Institute. Amsterdam. Rep NLR TR-70029, 1970.
6. R. C. Allan, J. Bird and J. D. Clarke, "Use of adhesives in repair of cracks in ship structures," Mater. Sci. Technol. 4, pp. 853-859, 1988.
7. R. Chandra and A. Subramanian, "Stress-intensity factors in plates with a partially patched central crack," Expl Mech. 29, pp. 1-5, 1989.
8. D. Rhodes, "Fracture mechanics of multiple load path structure," Theoret. Appl. Fract. Mech. 5, pp. 97-100, 1986.
9. 이억섭, 한민구, 한문식, "원자로 압력 용기강의 동적 응력 확대 계수와 동적 균열 전파속도," 한국정밀공학회지, 제15권, 제11호, pp. 251-257, 1998.
10. D. P. Rooke and D. J. Cartwright, Compendium of Stress Intensity Factors. H.M.S.O., London, 1996.
11. Smith, R. A., "Fracture Mechanics," Summary of 12 lecture course, Cambridge University Engineering Dept., pp. 230-231, 1986.