

## 컴프라이언스를 이용한 보강판재와 균열선단 구멍확장의 피로균열 진전 지연효과 규명

### The Use of Compliance to Investigate Fatigue Crack Retardation by Cover Plates and Stop Hole Expansion

한 문 식\*  
Moonsik Han

#### ABSTRACT

This paper develops the compliance approach to the problem of load sharing between a cracked plate and a cover plate used to bridge the crack. The theory is validated by using calculated stress intensity factors for the covered and uncovered cases and by using stop hole method to reduce experimentally observed growth rates to a common base. Calculations are then made on the effect of cover plate width on fatigue crack retardation in order to demonstrate the predictive capability of the technique.

주요기술용어 : Fatigue crack retardation(피로균열지연), Compliance(컴프라이언스), Cover plate(보강덮판), Stop hole method(구멍정지방법), Stress intensity factor(응력 확대계수)

#### 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.

최근들어 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 보증하기

\* 회원, 계명대학교 기계·자동차공학부

에는 극히 곤란한 점이 있다. 사실 현재의 비파괴검사기술법에 의하여 상당수의 결함이 발견되고 있고, 설계시에 고려되지 않는 응력집중이 제작후에 생겨 문제가 생기므로, 이 방법에 의한 설계는 안전성 평가 및 설계상의 중요한 과제로 대두되고 있다.<sup>1,2)</sup>

따라서 피로균열 성장과정은 구조물의 검사, 보수, 안전성 평가상으로는 극히 중요한 기본과정이고, 실 구조물 및 기기류의 수명을 예측 추정하기 위한 근본적인 해석 모델이 된다. 이에 대한 연구는 많은 진전이 이루어지고 있고, 실지 사고에 예방으로서 뿐만 아니라 수명연장에 직접적인 도움이 될 수 있는 균열진전 방지 및 지연대책 기술연구가 집중으로 이루어지고 있다.<sup>3-8)</sup>

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<sup>3-5)</sup>이 제안되고 있으나, 최근까지는 실제구조물의 활용도와 경제성이 뛰어난 보강덮판에 의한 수명연장, 즉 균열정지 및 지연방법이 보편적으로 많이 사용되고 있다.<sup>6-9)</sup>

따라서, 본 연구에서는 보강된 구조물, 즉 보강덮판과 균열진 구조물 사이 또는 기존의 균열 진전 지연효과를 더욱 증진시키기 위한 균열 선단 구멍 확장 방법이 적용된 균열진 구조물 사이의 하중 분배문제에 컴프라이언스(Compliance) 개념을 적용하였으며, 여기서 유도된 응력확대계수를 보강덮판으로 인한 균열 진전 감소효과 규명에 적용하여 실험과 더불어 유효성을 증명했고, 또한 이 기법의 예측능력을 입증하기 위하여 보강덮판쪽에 대한 피로균열 지연효과 규명에도 적용 검토하였다.

## 2. 균열진전과 컴프라이언스

길이 2a의 중앙 관통 균열을 갖는 탄성체에서 인장하중 P가 작용할 때 변위를  $\delta$  라 하면 컴프라이언스  $\lambda$  는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\delta}{P} \quad (1)$$

즉 단위하중당 변위를 나타낸다. 길이가  $L_0$ , 넓이가  $A_0$ , 탄성계수가 E 인 균열이 없는 탄성체 판의 컴프라이언스  $\lambda_0$ 는

$$\lambda_0 = \frac{L_0}{EA_0} \quad (2)$$

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

$$\lambda = \lambda_0 + \int_0^a d\lambda \quad (3)$$

에너지 해방율 G 는

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

과 같은 식으로 표시되며, 여기서 dA는 균열면적의 미소증분을 나타내며, 재료두께를 t 라고하면,

$$G = \frac{P^2}{2} \cdot \frac{d\lambda}{dA} = \frac{P^2}{2t} \cdot \frac{d\lambda}{da} \quad (5)$$

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

$$G = \frac{K^2}{E'} \quad (6)$$

여기서, K는 응력확대계수,  $E'$  는 평면응력상태에서 탄성계수 E 이고, 평면변형을 상태에서  $E/(1-\nu)^2$  이다.  $\nu$  는 Poisson's

ratio이다. 식(5)과 식(6)에서  $K$  를 구할 수 있다.

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

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 균열에 대하여 다음과 같이  $K$  의 값이 제시되었다.<sup>10)</sup>

$$K = \sigma \sqrt{a} \cdot Y \quad (8)$$

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

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

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

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

가 되고, 여기서  $d\lambda$  에 대하여 풀면

$$d\lambda = \frac{2t \cdot Y^2 \cdot a}{A^2 \cdot E} da \quad (11)$$

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

$$\lambda = \lambda_0 + \int_0^a \frac{2t \cdot a \cdot Y^2}{A^2 \cdot E} da \quad (12)$$

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

### 3. 균열진 주판과 보강덮판 사이의 컴프라이언스 이전

컴프라이언스를 이용하여 균열진 평판으로 얼마의 하중이 옮겨가는지를 알아보기 위

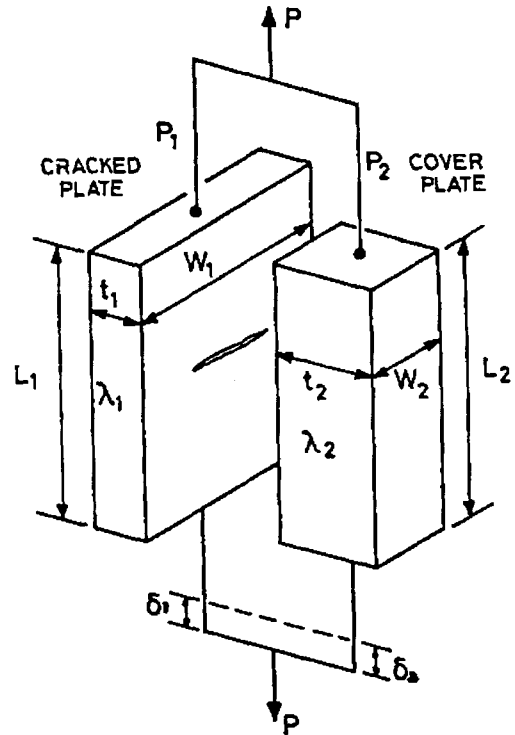


Fig. 1 Load sharing between equally extended plates of different compliance

하여 Fig.1과 같이 하중( $P$ )이 일정하게 작용하고 있을 때 균열진 평판에 걸리는 하중  $P_1$  과 보강덮판에 걸리는 하중  $P_2$  를 구하여 보면,

$$P = P_1 + P_2 \quad (13)$$

$$\lambda_1 = \frac{\delta_1}{P_1} \quad (14)$$

$$\lambda_2 = \frac{\delta_2}{P_2} \quad (15)$$

이다. 여기서,  $\lambda_1$  는 균열진 평판에 대한 컴프라이언스이고,  $\lambda_2$  는 보강덮판에 대한 컴프라이언스이며,  $\lambda_2 = L_2/A_2E$  로 구할 수

있는데 이 식에서  $A_2$  및  $L_2$  는 보강덮개의 평형부 단면적 및 길이이다. 식(14), (15)에서 하중이 작용하였을 때는  $\delta_1$  과  $\delta_2$  가 같아지므로

$$P_1\lambda_1 = P_2\lambda_2 \quad (16)$$

가 된다. 식(13)와 식(16)로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$P_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} P \quad (17)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} P \quad (18)$$

식(17)과 식(18)에서 균열진 평판 및 보강덮개의 컴프라이언스  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  의 증가와 더불어 균열진 평판 및 보강덮개의 하중이 감소함을 알 수 있다. 식(10)과 식(17)을 사용하여 보강덮개된 균열진 평판에서의 응력확대계수 폭  $\Delta K_{cr}$  를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta K_{cr} &= K_{max} - K_{min} = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot \sqrt{a} \cdot Y \\ &= \frac{P_{max} - P_{min}}{A} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \sqrt{a} \cdot Y \end{aligned} \quad (19)$$

#### 4. 실험절차

##### 4.1 개요

앞절에서 제시한 컴프라이언스 개념을 이용한 보강덮개의 응력확대계수에 대한 이론 검증 및 보강덮개로 인한 균열진전 지연현상 규명, 기존의 균열진전 지연 및 정지방법인 Crack Tip Hole(Stop Hole)에 대한 체계적인 현상 규명 및 상기 이론의 검증을 위하여 피로시험을 다음 4가지 경우에 대하여 실시하였다. 즉, 제1실험에서는 단일 보강덮개의 기본실험 및 구멍효과 규명을 위하여 선균열일 경우(주판), 선균열에 단일 보강덮개를 댄 경우, 구멍균열에 단일구멍 보강덮개

을 댄 경우를 실시하였고, 제2실험에서는 균열선단 구멍 확장 방법과 보강덮개의 연관효과 규명을 위하여 구멍균열일 경우(주판), 5% 팽창구멍 균열일 경우(주판), 10% 팽창구멍 균열일 경우(주판), 5% 팽창구멍 균열에 단일 보강덮개를 댄 경우, 10% 팽창구멍 균열에 단일 보강덮개를 댄 경우를 실시하였다.

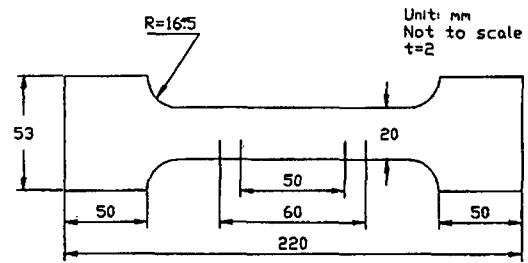


Fig. 2 Tensile test specimen

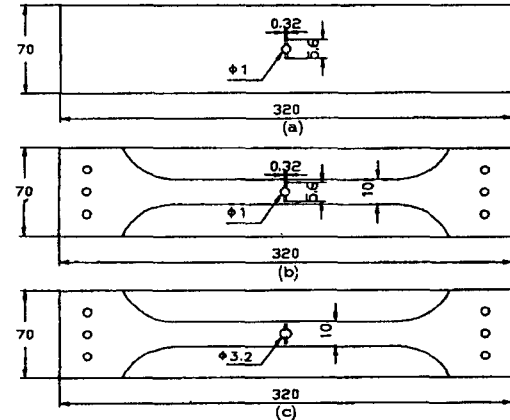


Fig. 3 The fatigue specimen of simple cover plates  
(a) No cover plate  
(b) with cover plate  
(c) with hole cover plate  
(width:10mm, hole size:3.2mm)

##### 4.2 시험편의 준비

본 실험에서는 수송기계에서 사용되어지

고 있는 포항제철의 냉간압연 일반구조용 강재 SS41을 택하였으며, 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table.1 Mechanical properties of test materials

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

먼저 모든 시험편을 압연방향에 수직방향으로 자른 후 균열을 압연방향과 같은 방향으로 가공하였다. 우선 재료의 기계적 성질을 알아보기 위하여 ASTM A370-77의 규정에 의하여 Fig.2와 같은 치수로 인장시험편을 준비하였다. 피로시험편으로는 ASTM E647-83의 CCT형 시험편 규격에 따라 형상과 치수를 결정하여 주판(Main Plate)를 제작하였다. 주판의 중앙균열은 시험편의 중앙부에 직경 2mm로 드릴링한 후 와이어(wire) 방전가공을 통하여 폭 0.5mm, 길이 5mm 중앙 크랙을 낸후 약 1.5mm 정도의 예비크랙을 내어 완성하였다. 보강덮판은 주판과 동일한 재료로 사용하여 밀링머신으로 가공한 후 폭을 변화시켜 균열이 없도록 가공하였다. 제1실험을 위하여 Fig.3과 같이 보강덮판이 없는 경우, 보강덮판의 폭이 10mm, 70mm인 경우, 선균열일때와 볼트 구멍으로부터 발생하는 균열에 대하여 실험하기 위해서 직경 1mm, 3.2mm 구멍을 포함하여 5.6mm 구멍균열된 주판과 10mm의 보강덮판에 3.2mm의 구멍을 낸 경우의 4종의 시험편을 제작하였다. 이때 주판과 보강덮판의 접합은 그립(Grip)부분을 스폿용접 하였다.

제2실험을 위하여 주판의 균열선단에 2mm의 구멍을 만들었다. 이때 드릴링한 구멍에 5%, 10% 직경을 리밍 팽창시켜 제작하였다<sup>11)</sup>. 또한 폭 10mm의 보강덮판에 Crack Tip Hole을 5%, 10% 팽창시킨 주판과 각각 한조가 되도록 한 시험편 등 4종의 시험편을 제작하였으며 Fig.4에 표시하였다.

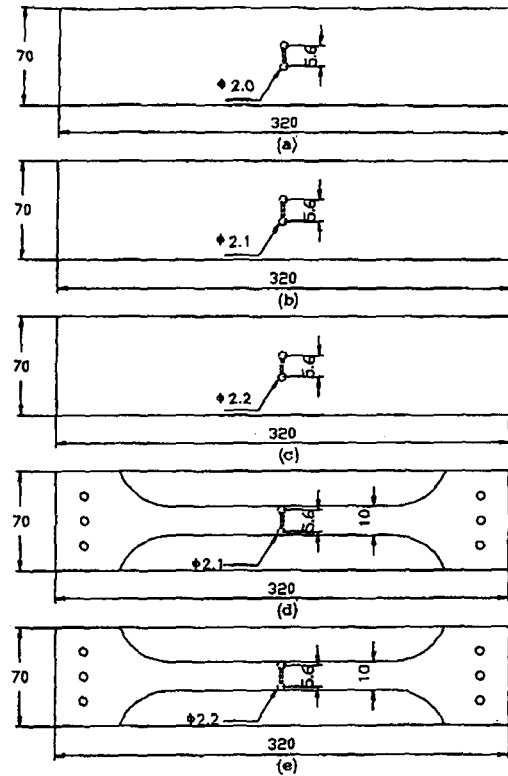


Fig. 4 Fatigue test specimen of stop hole plate with and without cover plate (width : 10mm)

- (a) 2mm stop hole plate
- (b) 5% extended stop hole cover plate
- (c) 10% extended stop hole cover plate
- (d) 5% extended stop hole
- (e) 10% extended stop hole with cover plate

#### 4.3 실험장치 및 실험방법

피로시험은 유압 Servo피로시험기(MTS co. 10ton)를 사용하였으며, 부속장비로는 Extensometer(Range : 12.5-2.5mm), 이동식 현미경(1/100mm), X-Y Recorder, Personal Computer 등을 사용하였다. 인장시험은 최

대하중 10 ton cell의 Range 50%에서 Gage Length 50mm의 변위측정장치를 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 하중반복속도는 ASTM E24에서 제안한 방법에 따라 15Hz로 하였다. 시험최대 하중은 인장강도의 45% 범위에서 예비시험을 통하여 결정하였으며, 일정하중 진폭시험( $\Delta K$  증가시험)으로 하였다. 균열길이의 측정은 약 0.3mm 정도 진전할 때마다 시험기를 정지시켜 놓은 상태에서 Travelling Microscope로 균열선단을 따라 가면서 눈금을 읽었다. 컴프라이언스를 측정하기 위해서 0.15Hz의 실험속도로 변화시켜 X-Y Recorder에 하중-하중점 변위곡선을 얻고, 그때의 하중 반복수를 기록하였다. 위의 과정을 크랙진전율( $da/dN$ )이  $10^{-3}mm/cycle$ 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 일정하게 하였는데 반복사이클수에 대한 균열길이의 관계를 Figs.5-6에 표시하였다. Figs.5-6의 실험자료로부터  $\Delta K$ 와  $da/dN$  관계를 구하고, 이를 로그-로그좌표(Log-Log Scale)로 그리면 Fig.7과 같이 된다. 이들 그림에서 보는 바와 같이  $\Delta K$ 와  $da/dN$ 는 직선관계로 나타남을 알 수 있다. 최소자승법으로 직선의 방정식을 구하여 정리하면

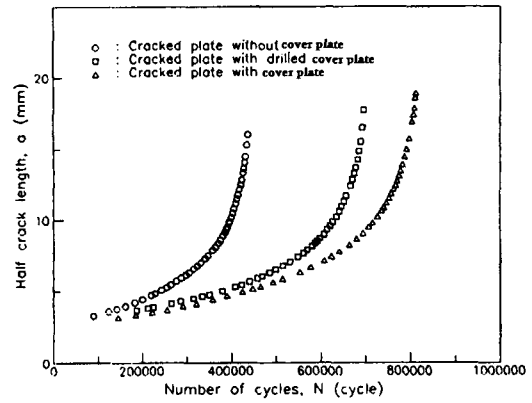


Fig. 5 Crack growth data for cracked plate with and without cover plate

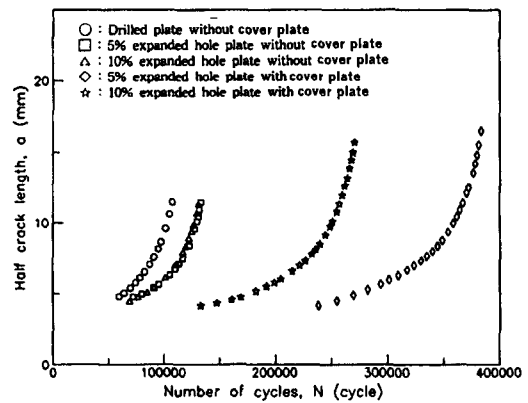


Fig. 6 Crack growth data for expanded plate with and without cover plate

$da/dN = C(\Delta K)^m$ 에서의 기울기( $m$ )와 상수( $C$ )를 구할 수 있다. 보강덮판을 대었을 때의 사이클에 대한 균열길이의 관계는 Figs.5-6였었는데,  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 식에서  $C$ 와  $m$ 은 재료의 정수이므로 앞에서 구한 이들  $C$ 와  $m$ 의 값을 사용하여 보강덮판을 대었을 때의  $\Delta K$ 를 계산할 수가 있다.

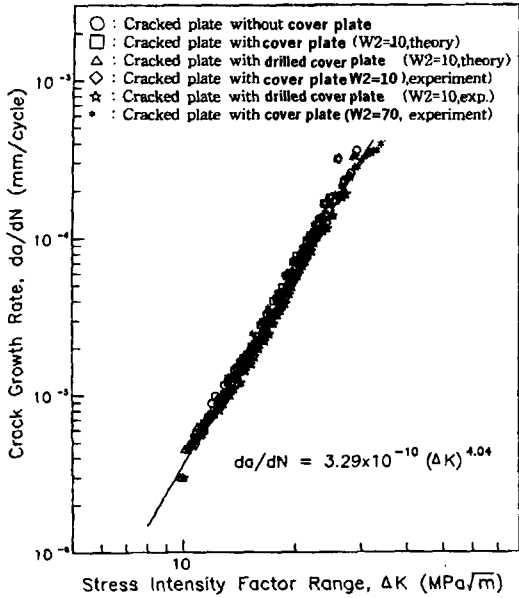


Fig. 7 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K$  of cracked plate with or without cover plate

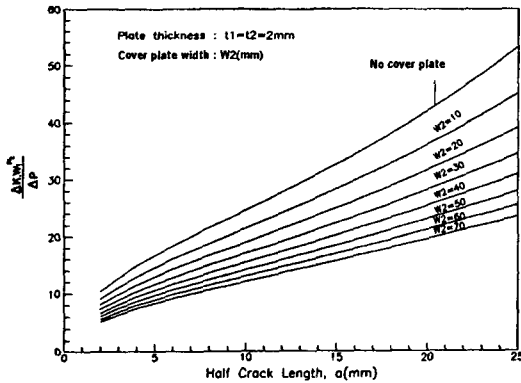


Fig. 8 The effect of the plate width on cracked plate stress intensity factor range in cover plates

### 5.2 실험결과에 대한 고찰

이상의 실험결과를 종합적으로 검토하여 보건데 반복Cycle에 따르는 선균열, 구멍이 뚫린 보강덮판을 댄 경우 즉 볼트구멍으로부터 발생한 균열, 구멍 없는 보강덮판을 댄 경

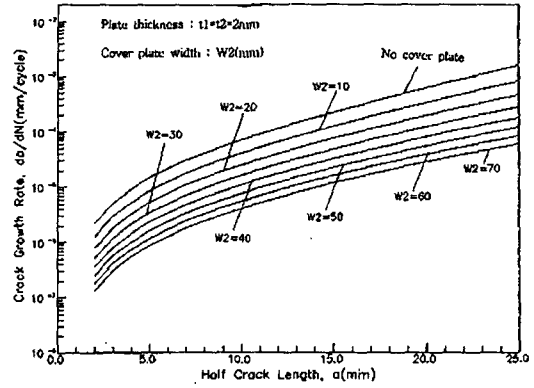


Fig. 9 Calculated effect of the cover plate width on cracked plate fatigue crack growth rates in plates

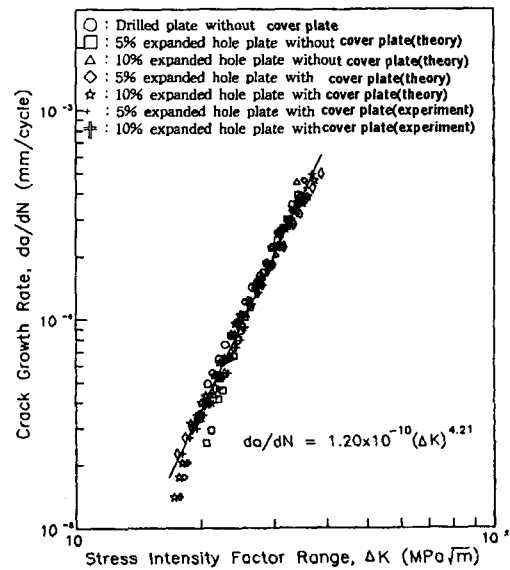


Fig. 10 Fatigue crack growth data reduced to a common stress intensity factor range in stop hold cover plate

우의 균열진전 거동을 Fig.5에서 밝힌 바와 같이 구멍이 없는 보강덮판을 댄 경우는 덮판이 없는 경우보다 균열진전율이 감소되어 수명연장율이 약 1.85배 정도이며, 구멍이 뚫린 보강덮판을 댄 경우는 약 1.6배 정도의 수명연장율을 보이고 있어 덮판의 수명연장 효

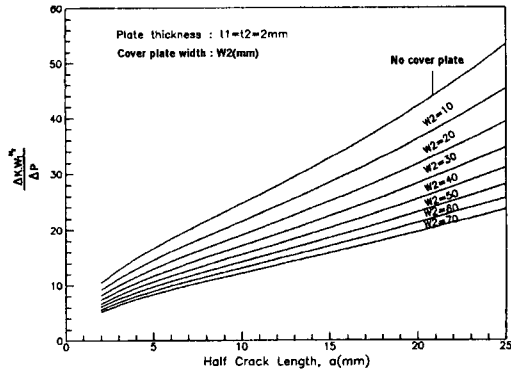


Fig. 11 Calculated effect of cover plate width on expanded hole plate stress intensity factor range

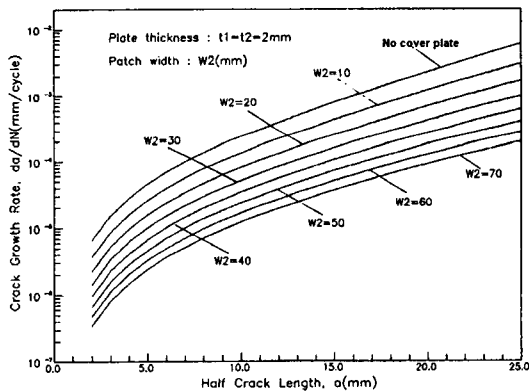


Fig. 12 Calculated effect of cover plate width on expanded hole plate fatigue crack growth rates

과와 볼트구멍부터 발생한 균열은 구멍의 영향을 다소 받음을 알 수 있다. 또한 제1실험에서 본 이론의 적합성을 검토하기 위하여 균열진전율과 응력확대 계수범위( $\Delta K$ )를 Fig.7에 표시하였다. 균열진 주판만의 경우에 대한  $\Delta K$ 는 식(8)과 (9)로부터 계산되었다. 보강덮판을 붙임으로서 균열진 판의 감소된 응력확대 계수는 식(12), 식(2), 식(17), 식(19)에 의해서 계산되어졌다. 구멍이 뚫린 보강덮판의 경우 구멍직경을 균열길이로 간주했다. 또한 실험치는 식(11)과 식(12) 대신

별도의 피로실험을 통하여 얻어진 컴프라이언스를 이용하여 응력확대 계수를 구하였다. Fig.7에서 보는 바와 같이 피로균열 안정 성장 범위안에는 실험치와 이론치가 잘 일치함을 알 수 있고, 이 결과로 컴프라이언스 기법의 유효성을 입증할 수 있다. 이들 데이터는 지수법칙

$$\frac{da}{dN} = 3.29 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.04} \quad (20)$$

의 형태로 나타낼 수 있다. 본 이론의 유효성을 바탕으로 보강덮판 형태의 변화 효과를 보기 위하여 보강덮판 폭을 여러 가지로 변화시켰을 때의 균열 반길이  $a$ 에 대한 무차원  $\Delta K$  곡선을 Fig.8에 보였다. 이 그림에서 보면, 10mm 균열길이에 대해서 보강덮판의 폭이 10, 30, 70mm인 경우 각각 원래값의 85%, 68%, 47%의 응력확대계수 폭의 값으로 감소를 나타내고 있어 보강덮판으로서 파괴강도를 조절할 수 있음을 알 수 있고, 실험식(20)에 의해서 균열 반길이에 대한 크랙진전 속도를 쉽게 구할 수 있으며, 이 결과를 Fig.9에 표시하였다. 이를 이용하여 여러 가지 폭의 보강덮판으로 보강하였을 때의 균열진전 속도를 용이하게 구할 수가 있고, 변형된 Paris식<sup>12)</sup>에 의하여 균열진 구조물 잔존수명을 구할 수 있어 균열진 평판의 잔존수명에 따라 보강덮판 치수를 결정할 수 있다.

Fig.6에 밝힌 바와 같이 Crack Tip Hole(2mm 직경)을 확장 안하고 보강덮판을 안댄 경우는 크랙 선단 구멍을 10% 확장한 경우가 약 1.2배 정도의 수명연장을 보이고 있으며 5% 확장일 경우가 약 1.3배 정도의 수명연장을 보이고 있어 오히려 구멍을 작게 확장할 경우가 수명연장 효과가 더 큼을 알 수 있다. 또한 10mm 보강덮판을 댄 경우는 10% 확장일 경우가 약 2.4배, 5% 확장일 경우가 약 3.4배의 수명연장 효과를 보이고 있다. 5% 확장이 10% 확장보다 보강덮판 수명 효과가 더 큼을 알 수 있다. 또한 제2실험에



서 본 이론의 적합성을 검토하기 위하여 균열 진전율과 응력확대 계수범위( $\Delta K$ )를 Fig.10에 표시하였다. Fig.10에 보인 바와 같이 피로균열 안정 성장 범위 안에서 실험치와 이론치가 잘 일치함을 알 수 있고, 이 결과로 컴프라이언스 기법의 유효성을 입증할 수 있다. 이들 데이터는 지수법칙

$$\frac{da}{dN} = 1.20 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.21} \quad (21)$$

의 형태로 나타낼 수 있다. 본 이론의 유효성을 바탕으로 보강덮판 형태 변화효과를 보기 위하여 보강덮판 폭을 여러 가지로 변화시켰을 때의 균열 반길이  $a$ 에 대한 무차원  $\Delta K$  곡선을 Fig.11에 보였다. 이 그림에서 보면 10mm 균열길이에서 보강덮판의 폭이 10, 30, 70mm인 경우 각각 원래값의 87%, 69%, 48%의 응력확대계수 폭의 값으로 감소를 나타내고 있어 보강덮판의 형상으로 파괴강도를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 실험 데이터 식(21)에 의해서 균열 반길이에 대한 균열 진전속도는 Fig.12에 표시하였다. 이를 이용하여 여러 가지 폭의 보강덮판으로 보강하였을 때의 크랙 진전속도를 용이하게 구할 수가 있다. 또한 변형된 Paris식에서 균열진 구조물의 잔존수명을 계산할 수 있으므로 잔존수명에 따라 보강덮판의 치수를 쉽게 결정할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 균열진 구조물의 피로잔존수명을 고려한 보강덮판 설계의 정식화를 위하여 컴프라이언스개념을 이용하여 유도된 응력확대계수는 보강덮판으로 인한 균열진전 지연효과 규명에 실험검증을 통하여 그 유효성이 충분히 입증되었다. 또한, 기존의 균열수명연장 방법인 Stop Hole Method에 있어 보다 연장효과가 뛰어난 가공방법과 컴프라이언스 개념을 이용한 보강덮판 기법과

의 상호균열 진전지연효과를 규명하여 최적수명 연장 설계방법 등을 제시하였다. 앞으로 복잡한 형상을 가진 균열진 구조물의 피로수명연장을 위하여 실구조물의 균열부위에 대한 복합하중 상태에서의 응력확대 계수 분리해석 문제, 보강덮판 주위의 하중경로 규명문제, 용접 보강덮판의 용접부 균열발생한계설정문제, 복합재료 보강덮판의 최적설계 등의 연계가 필요할 것이다.

## 참고 문헌

- 1) Uchino, "기기구조물의 피로파괴와 방지", 일본경영간부 세미나 교재.
- 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., Interscience Enterprises, Ltd, pp.238-358, 1987.
- 4) H. Vlioger, "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) J. H. Kim and S. B. Lee, "Calculation of Stress Intensity Factor using Weight Function Method for a Patched Crack with Debonding Region", Engineering Fracture Mechanics, 67, pp.303-310, 2000.
- 10) D. P. Rooke and D. J. Cartwright, Compendium of Stress Intensity Factors. H.M.S.O., London, 1996.
- 11) David Broek, The Practical Use of Fracture Mechanics, Kluwer Academic Publishers, p.313, 1988.
- 12) R. A. Smith, "Fracture Mechanics", Summary of 12 Lecture Course, Cambridge University Engineering Dept., pp.230-231, 1986.