

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第29卷 第2號 1992年 5月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol.29, No. 2, May 1992

## 균열진 구조물의 피로수명 연장을 위한 Patch 설계기법에 관한 연구

한문식\*

### A Study on Patch Design Technique for Fatigue Life Prolongation of Cracked Structures

by

M.S.Han\*

#### 요 약

본 논문에서는 균열 보수에 사용되는 Patch와 균열진 판 사이에 컴프라이언스 개념을 적용하여 Patch된 균열진 판의 응력확대계수를 이론유도하고, 이에 대한 실험과 균열진전 거동규명을 통하여 그 유효성을 충분히 검증하였다. 또한, 이와같은 컴프라이언스를 이용한 이론방법을 바탕으로 균열진 구조물의 잔존수명이 고려된 Patch를 간단히 설계할 수 있는 기법을 제시하였다.

#### Abstract

This paper develops the compliance approach to the problem of load sharing between a cracked plate and a patch used to bridge the crack. The theory is validated by using calculated stress intensity factors for the patched and unpatched case to reduce experimentally observed growth rates to common base. Calculations are then made on the effect of patch dimension on fatigue life technique. The optimum design of the patch considered the life expectancy and fracture strength of the cracked structure can be performed simply by using this technique.

#### 1. 서 론

선박이나 해양구조물등의 용접구조물에 있어 파괴사고의 원인은 대부분 (60-90%)이 균열에 의한 피로파괴이며 이로인한 파괴사고가 발생하면 그 재해가 막대하

다는 것은 주지의 사실이다. 이러한 파괴사고를 방지함은 물론이고 수명연장을 위한 노력이 끊임없이 계속되고 있으나, 아직도 각종 사고 예가 부수히 발표되고 있는 실정이다[1-2].

최근들어 선박이나 해양구조물을 위시한 각종 구조

발 표 : 1991년도 대한조선학회 추계연구발표회('91. 11. 16)

접수일자 : 1991년 12월 10일, 재접수일자 1992년 3월 5일

\* 정회원, 한국해사기술연구소

大韓造船學會論文集 第29卷 2號 1992年 5月

물의 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. 선박이나 해양구조물의 강도설계는 안전성과 신뢰성 확보의 측면에서 과거에 축적된 시험공학에 입각한 설계기법으로 부터 파괴역학에 기초한 Fail Safe Design 기법 및 Safe Life Design 기법이 일반선박, 해양구조물, LPG/LNG 선의 압력용기등 많은 구조물에 적용되지만 전체 구조물에 결함이 포함되지 않은 것을 보증하기에는 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 [2-3].

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 뿐만아니고 수명연장에 직접적인 도움이 될 수 있는 균열진전 방지 및 지연대책 기술연구가 집중으로 이루어지고 있다[4-5].

또한 10년내지 20년씩 사용된 이들 노후 구조물 및 기기설비는 그 수명연한이 가까와 짐에 따라 경제성 때문에 이들을 한꺼번에 전부 폐기 또는 대체 할 수 없는 문제이므로 이들의 수명연장을 위한 안전들이 최근 각국의 선급 협회에서 발표되고 있어, 이 분야에 대한 연구는 시의 적절하고 필수적인 문제로 부각되고 있다[6-7]. 그러나 선박 및 해양구조물을 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[8-10]이 제안되고 있으나 최근까지는 실제구조물의 활용도와 경제성이 뛰어난 Patch기법에 의한 수명연장, 즉 균열정지 및 지연방법이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Patch된 구조물 균열의 잔존수명과 파괴강도를 정확히 예측할 수 있고, 간단히 Patch를 설계할 수 있는 컴프라이언스(Compliance)개념을 이용한 해석방법을 제시하였다.

## 2. 균열진전과 컴프라이언스

길이  $2a$ 의 중앙 관통 균열을 갖는 탄성체에서 인장하중  $P$ 가 작용할 때 변위를  $\delta$ 라 하면, 컴프라이언스  $\lambda$ 는 다음과 같이 정의된다.

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

즉 단위하중당 변위를 나타낸다. 에너지 해방율은

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

과 같은 식으로 표시되며, 여기서  $dA$ 는 균열면적의 미소증분을 나타내며 재료두께를  $t$ 라고 하면

$$G = \frac{P^2}{2} \cdot \frac{d\lambda}{dA} = \frac{P^2}{2t} \cdot \frac{d\lambda}{da} \quad (3)$$

과 같이 표시되고 균열이  $da$ 만큼 진전하였을 때 해방되는 에너지를 이  $da$ 부분의 균열을 닫는데 필요한 일량과 같다고 놓으면, 다음의 식을 얻는다.

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (4)$$

여기서,  $K_I$ 은 모드 I에서의 응력확대계수,  $E'$ 는 평면응력 상태에서 탄성계수  $E$ 이고, 평면변형율 상태에서  $E/(1-\nu)^2$ 이다.  $\nu$ 는 Poisson's ratio이다. 식(3)과 식(4)에서  $K_I$ 을 구할 수 있다.

$$K_I = \sqrt{\frac{E'P^2 \cdot d\lambda}{2t \cdot da}} \quad (5)$$

일반적으로 어느 균열을 갖는 부재에서의 응력확대계수  $K$ 는 전체에너지 (Total Energy Method)을 이용하여 식(5)에 의하여 구할 수 있다. 또한 본 시험편과 같은 균열에 대하여 다음과 같이  $K$ 의 값이 제시되었다[11].

$$K = \sigma\sqrt{a} \cdot Y \quad (6)$$

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

$$Y = 1.77\left[1 - 0.1\left(\frac{2a}{w}\right) + \left(\frac{2a}{w}\right)^2\right] \quad (7)$$

전체에너지법에 의한 K값과 식 (6)을 등치하면

$$K_I = \sqrt{\frac{E'P^2 \cdot d\lambda}{2t \cdot da}} = \sigma_{\sqrt{a}} \cdot Y \quad (8)$$

가 되고, 여기서  $d\lambda$ 에 대하여 풀면

$$d\lambda = \frac{2t \cdot Y^2 \cdot a}{A^2 \cdot E'} da \quad (9)$$

와 같이 된다. 위의 식을 적분하면  $\lambda$ 에 대한 식을 구할 수 있다.

$$\lambda = \lambda_0 + \int \frac{2t \cdot a \cdot Y^2}{A^2 \cdot E'} da \quad (10)$$

평면응력의 경우 식 (10)에서  $E' = E$ 가 된다. 여기서  $\lambda_0$ 는 적분상수이며 초기조건으로부터 구할 수 있으며, 초기에 균열이 없는 경우에는

$$\lambda_0 = \frac{\delta}{P} = \frac{PL_0/E \cdot A}{P} = \frac{L_0}{A \cdot E} \quad (11)$$

이며, 여기서  $L_0$ 는 판의 길이,  $A$ 는 판의 단면적이다.

### 3. 균열진 주판과 Patch사이의 컴프라이언스 이전

컴프라이언스를 이용하여 균열진 평판으로 얼마의 하중이 옮겨가는지를 알아보기 위하여 Fig.1과 같이 하중 (P)이 일정하게 작용하고 있을때 균열진 평판에 걸리는 하중  $P_1$ 과 Patch에 걸리는 하중  $P_2$ 를 구하여 보면,

$$P = P_1 + P_2 \quad (12)$$

$$\lambda_1 = \frac{\delta_1}{P_1} \quad (13)$$

$$\lambda_2 = \frac{\delta_2}{P_2} \quad (14)$$

이다. 여기서,  $\lambda_1$ 는 균열진 평판에 대한 컴프라이언스이고,  $\lambda_2$ 는 Patch에 대한 컴프라이언스이며,  $\lambda_2 = L_2/A_2$  E로 구할 수 있는데 이 식에서  $A_2$  및  $L_2$ 는 Patch의 평형부 단면적 및 길이이다. 식(14)에서 하중이 작용하였을 때는  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 가 같아지므로

$$P_1\lambda_1 = P_2\lambda_2 \quad (15)$$

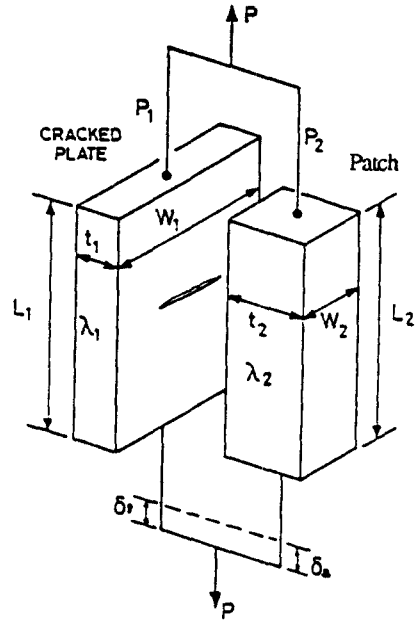


Fig. 1 Load sharing between equally extended different compliance

가 된다. 식 (12)와 식(15)로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$P_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} P \quad (16)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} P \quad (17)$$

식(10)을 보면 식(16)과 식(17)에서 균열진 평판 및 Patch의 컴프라이언스  $\lambda_1, \lambda_2$ 은 균열 반길이  $a$ 의 함수임을 알 수 있으며 따라서 균열진 평판 및 Patch에 걸리는 하중  $P_1, P_2$ 는  $\lambda_1, \lambda_2$ 의 증가와 더불어 감소함을 알 수 있다. 식(16)을 사용하여 patch된 균열진 평판에서의 응력확대계수 폭  $\Delta k$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta = k_{\max} - k_{\min} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot \sigma_{\sqrt{a}} \cdot Y \quad (18)$$

$$= \frac{P_{\max} - P_{\min}}{A} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \sigma_{\sqrt{a}} \cdot Y$$

또한 균열진 판의 수명연장을 위하여 다수의 patch를 겹쳐 사용할 경우 하중분포 관계는 식(19)와 같다.

$$\left(\frac{P}{P_i}\right)^j = \lambda_i \cdot \sum_{k=1}^{j+1} \frac{1}{\lambda_k} \quad (19)$$

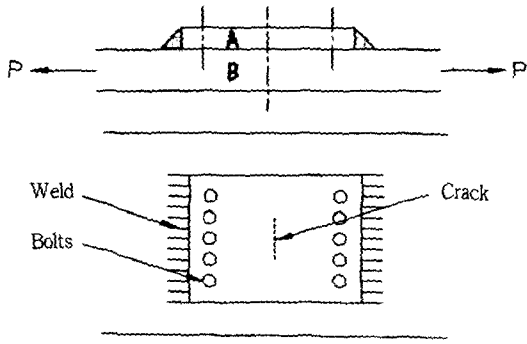


Fig. 2 Repair by welding patch or bolts

여기서,  $i$ 는 주판과 Patch의 하중이전 수,  $j$ 는 patch수이다. 균열진 판과 patch와의 하중 관계를 이용하여 식(16) 이후의 절차에 따라 여러개의 Patch가 접철 경우의 응력확대계수 범위를 구했다. 용접에 의한 Patch일 경우는 Fig.2에서 A와 B에서의 변형을  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 가 같게 되므로 즉,

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 \tag{20}$$

$$\epsilon_1 = \frac{P_1}{E_1 A_1} = \frac{P_1 \lambda_1}{L_1} \tag{21}$$

$$\epsilon_2 = \frac{P_2}{E_2 A_2} = \frac{P_2 \lambda_2}{L_2} \tag{22}$$

식(20), 식(21), 식(22)에 의해서

$$\frac{P_1 \lambda_1}{L_1} = \frac{P_2 \lambda_2}{L_2} \tag{23}$$

하중(P)가 일정하게 작용하고 있을 때, 균열진 평면에 걸리는 하중  $P_1$ 와 용접 Patch에 걸리는 하중  $P_2$ 를 구하여 보면

$$P = P_1 + P_2 \tag{24}$$

식(23)과 식(24)에 의해서

$$P_1 = \frac{L_1 \lambda_2}{L_1 \lambda_2 + L_2 \lambda_1} P \tag{25}$$

$$P_2 = \frac{L_2 \lambda_1}{L_2 \lambda_1 + L_1 \lambda_2} P \tag{26}$$

따라서 용접 patch된 균열진 판의 응력확대계수  $\Delta K_w$ 을

구하면 다음과 같다.

$$\Delta K_w = \frac{P_{max} - P_{min}}{A} \cdot \frac{L_1 \cdot \lambda_2}{L_1 \cdot \lambda_2 + L_2 \cdot \lambda_1} \cdot \sigma \sqrt{a} \cdot Y \tag{27}$$

또한 용접 patch에서는 용접부 열영향부의 취성파괴가 가장 문제가 되고 있다. 이에 대한 해결책으로 Fig.3(a)와 같은 다중용접 patch로 Fig.3(c)에서 처럼 용접부의 응력집중을 분산시키는 방법을 제시하여 앞에서와 같은 방법으로 균열진 판과 patch와의 하중분포관계를 유도하여 식(28)에 나타냈다.

$$\left(\frac{P}{P_1}\right)^j = \frac{\lambda_1}{L_1} \cdot \sum_{k=1}^{j+1} \frac{L_k}{\lambda_k} \tag{28}$$

여기서,  $i$ 는 주판과 patch의 하중 이전수,  $j$ 는 patch수이다. 균열진 주판과 Patch와의 하중관계와 식(25)에서 식(26)까지의 절차에 따라 여러개 용접 Patch가 접철 경우의 응력확대 계수 범위를 구하였다.

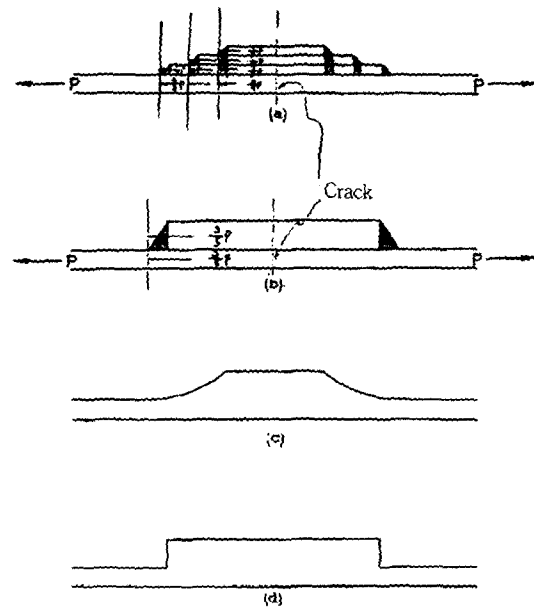


Fig. 3 Hidden stress concentration in welded zone

- (a) Improved design. (b) Poor design.
- (c) Full body equivalent of (a).
- (d) Full body equivalent of (b).

4. 실험절차

4.1 개요

Patch설계기법 개발을 위하여 앞절에서 제시한 컴프 라이언스 개념을 이용한 Patch의 응력확대계수에 대한 이론 검증 및 Patch로 인한 균열진전 지연현상규명, 기존의 균열진전 지연 및 정지방법인 Crack Tip Hole(Stop Hole) 및 용접 Patch법에 대한 체계적인 현상규명 및 문제점들을 보완하기 위하여 피로시험을 다음 4가지 경우에 대하여 실시하였다. 즉,

- (1) 제1실험 - 단일 Patch의 기본실험 및 구멍효과 규명
  - 1) 선균열일 경우(주판)
  - 2) 선균열에 단일 Patch를 댄 경우
  - 3) 구멍균열에 단일 구멍 Patch를 댄 경우
- (2) 제2실험 - 다중 Patch의 피로수명 연장효과 및 설계기법개발
  - 1) 선균열에 단일 Patch(폭 10mm)를 댄 경우
  - 2) 선균열에 이중 Patch(폭 10mm, 20mm)를 댄 경우
  - 3) 선균열에 삼중 Patch(폭 10mm, 20mm, 30mm)를 댄 경우
- (3) 제3실험 - Crack Tip Hole방법과 Patch와의 연관 효과 규명
  - 1) 구멍 균열일 경우(주판)
  - 2) 5% 팽창 구멍 균열인 경우(주판)
  - 3) 10% 팽창 구멍 균열인 경우(주판)
  - 4) 5% 팽창 구멍 균열에 단일 patch를 댄 경우
  - 5) 10% 팽창 구멍 균열에 단일 patch를 댄 경우
- (4) 제4실험 - 용접 patch의 설계기법 및 문제점 보완
  - 1) 선균열에 단일 patch(폭 10mm, 길이 80mm)를 댄 경우
  - 2) 선균열에 이중 patch(폭이 각각 10mm, 길이 80, 60mm)를 댄 경우
  - 3) 선균열에 삼중 patch(폭이 각각 10mm, 길이 80, 60, 40mm)를 댄 경우

4.2 시험편의 준비

본 실험에서의 선박건조시 주종이 되고 있는 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.4와 같은 치수로 인장시험편을 준비하였다. 피로시험편으로

Table 1 Mechanical properties of test materials

yield strength	tensile strength	elastic modulus
184.3 MPa	277.8 MPa	197,113 MPa

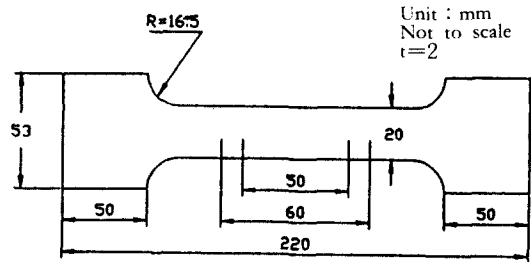


Fig. 4 Tensile test specimen

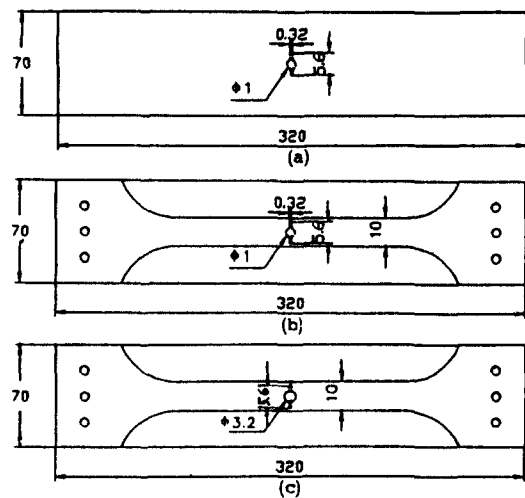


Fig. 5 The fatigue specimen of simple patches  
 (a) No patch  
 (b) with patch (width : 10, 70 mm)  
 (c) with hole patch (width : 10mm, hole size : 3.2mm)

서는 ASTM E647-83의 CCT형 시험편 규격에 따라 형상과 치수를 결정하여 주판(Main Plate)를 제작하였다. 주판의 중앙균열은 시험편의 중앙부에 직경 2mm로 드릴링한후 와이어(wire)방전가공을 통하여 폭 0.5mm, 길이 5mm 중앙 크랙을 낸후 약 1.5mm 정도의 예비크랙을 내어 완성하였다. Patch는 주판과 동일한 재료로 사용하여 밀링머신으로 가공한 후 폭을 변화시켜 균열이 없도록 가공하였다. 제1실험을 위하여 Fig.5와 같이 Patch가 없는 경우, Patch의 폭이 10mm, 70mm인 경우, 선

균열일때와 볼트 구멍으로 부터 발생하는 균열에 대하여 실험하기 위하여 직경 3.2mm 구멍을 포함하여 5.6mm 구멍균열된 주판과 10mm의 Patch에 3.2mm의 구멍을 낸 경우의 4종의 시험편을 제작하였다. 이때 주판과 Patch의 접합은 그립(Grip)부분을 스폿용접 하였다.

제2실험을 위하여 Fig.6과 같이 Patch의 폭이 10,20,30 mm인 Patch를 제작하여 주판과 폭이 10mm인 Patch가 한조가된 Single Patch 시험편, 주판과 폭이 20mm, 10mm Patch가 한조가된 Double Patch 시험편, 주판과 폭이 30 mm, 20mm, 10mm Patch가 한조가된 Triple Patch 시험편 등 3종의 시험편을 제작하였다. 이 때 주판과 Patch와의 접합은 그립 부분을 레이저(Lazer)용접하였다. 제3실험을 위하여 주판의 균열선단에 2mm의 구멍을 만들었다. 이때 드릴링한 구멍에 5%, 10% 직경을 팽창시켜 제작 하였다. 또한 폭 10mm의 Patch에 Crack Tip Hole을 5%, 10% 팽창시킨 주판과 각각 한조가 되도록 한 시험편 등 4종의 시험편을 제작하였으며 Fig.7에 표시하였다. 제4 실험을 위하여 Patch의 폭과 길이가 10×100, 10×70, 10×40[mm,mm]인 3종을 제작하여 Single Patch, Double Patch, Triple Patch를 길이방향의 양단에 Tig 용접을 하여 Fig.8과 같은 3종의 시험편을 제작하였다. 이때 용접조건은 Table 2에 표시하였다. 모든 시험편의 주판은 균열 전전의 관찰을 용이하게 하기 위하여 균열주위를 Si-C계 emery paper로 # 100-#200까지 연마하고, 최종적으로 산화크롬 분말을 이용하여 비평(buffing)함으로써 균열 길이의 측정이 용이하게 되었다.

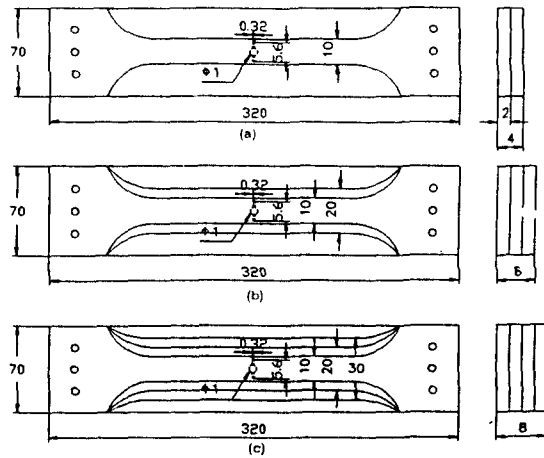


Fig. 6 Fatigue test specimen of multi-patches  
 (a) single patch  
 (b) double patches  
 (c) Triple patches

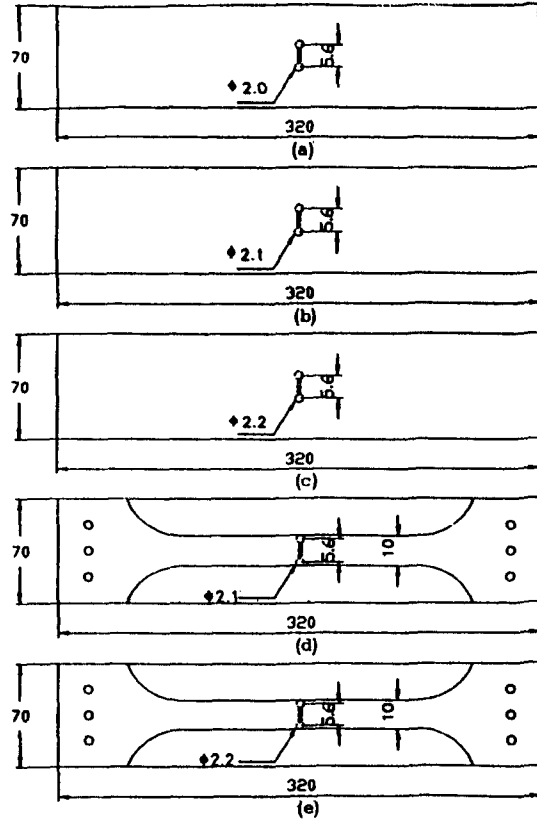


Fig. 7 Fatigue test specimen of stop hole plate with and without patch(width : 10mm)  
 (a) 2mm stop hole plate  
 (b) 5% extended stop hole plate  
 (c) 10% extended stop hole plate  
 (d) 5% extended stop hole  
 (e) 10% extended stop hole with patch with patch

Table 2 Tig welding condition of patches

patch 수	Thickness of a patch	Amphere	Voltage	Weding velocity	Ar
1	8mm	130A	15V	120cm/min	25CPA
2	4mm	80A	〃	〃	〃
3	2.67mm	70A	〃	〃	〃

4.3 실험장치 및 실험방법

피로시험은 유압 Servo피로시험기(Instron co. 50ton)를 사용하였으며, 부속장비로는 Extensometer(Range : 12.5-2.5mm), 이동식 현미경(1/100mm), X-Y Recorder,

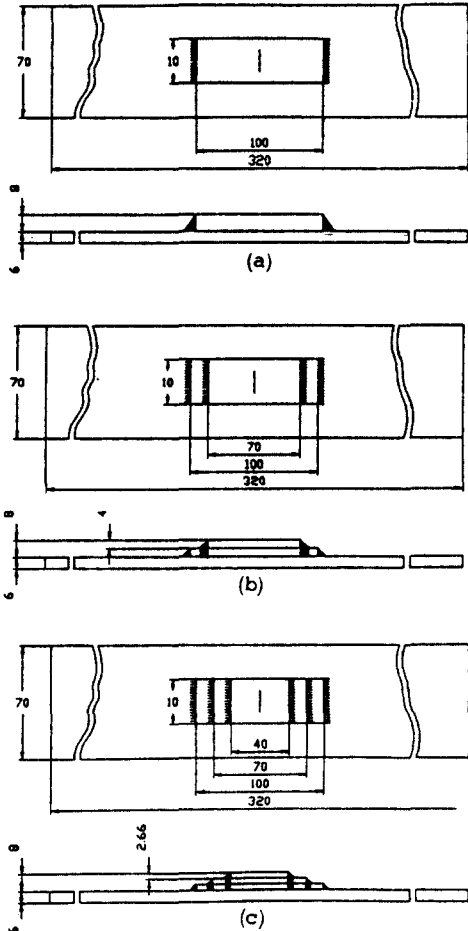


Fig. 8 Fatigue test specimen of welding patches

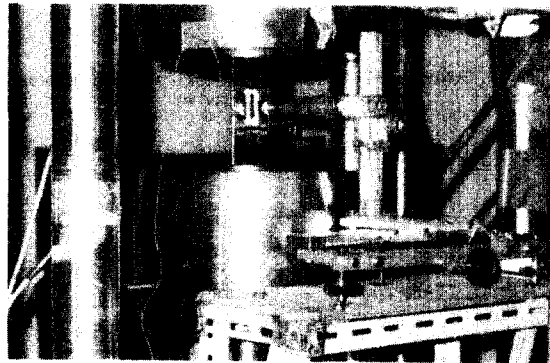
- (a) single welding patch
- (b) double welding patch
- (c) triple welding patch

Personal Computer 등을 사용하였다. 인장시험은 최대 하중 50 ton cell의 Range 10%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. 또한 응력진폭시험시 철강재료에서는 응력비가 크랙진전거동에 큰 영향을 주지 않으므로[12-13] 피로시험은 하중제어 방식으로 응력비 0.2에서 실시하였으며, 파형은 정현파(Sine Wave)로 하였다. 또한 하중반복수는 ASTM E24에서 제한한 방법에 따라 15Hz로 하였다. 시험최대 하중은 인장강도의 45%범위에서 예비시험을 통하여 결정하였

으며, 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 크랙 진전율 ( $da/dN$ )가  $10^{-3}$ 에 이를때까지 반복수행하여 실험을 하였다. 실험에서 얻은 값은 컴퓨터에 입력하여 본 과제를 위하여 프로그램으로 분석하여 그 결과를 이론치와 비교하였다. Fig.9은 본 실험장치의 모습이다.



(a)



(b)

Fig. 9 View of fatigue test

- (a) test apparatus
- (b) equipments of compliance test

## 5. 실험결과 및 고찰

### 5.1 실험결과

각각의 실험에 있어서 반복하중의 진폭은 일정하게 하였는데 반복사이클수에 대한 균열길이의 관계를 Fig.

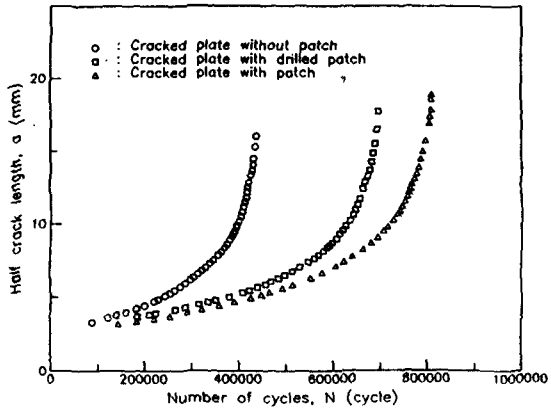


Fig. 10 Crack growth data for plate with and without patch

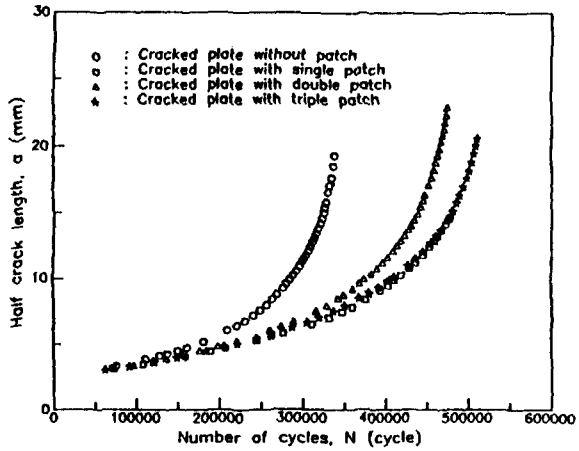


Fig. 13 Crack growth data for cracked plate with welding patch

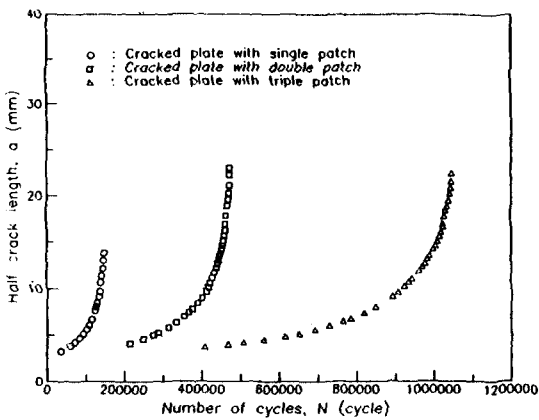


Fig. 11 Crack growth data for plate with multi-patch

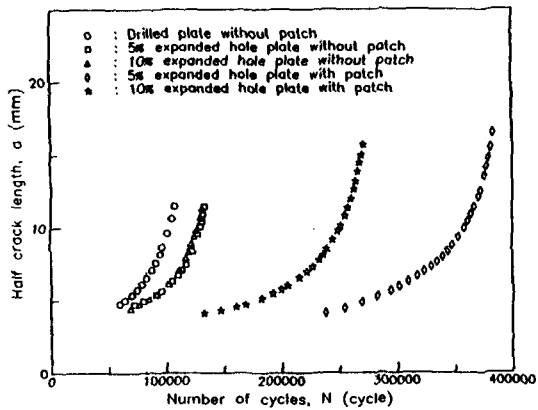


Fig. 12 Crack growth data for expanded plate with and without patch

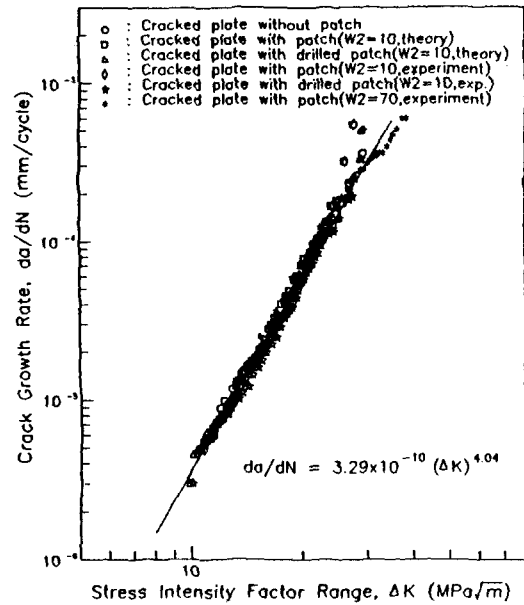


Fig. 14 Fatigue crack growth data reduced to a common stress intensity factor range in simple patch

10-13에 표시하였다. Fig.10-13의 실험자료로부터  $\Delta K$ 와  $da/dN$  (1)의 관계를 구하고, 이를 로그-로그좌표(Log-Log Seale)로 그리면 Fig.14-17과 같이 된다. 이들 그림에서 보는 바와 같이  $\Delta K$ 와  $da/dN$ 는 직선관계로 나타남을 알 수 있다. 최소자승법로 직선의 방정식을 구하면  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에서의 기울기(m)와 상수(C)를 구할



수 있다. Patch를 대었을 때의 사이클에 대한 균열길이의 관계는 Fig.10-13였었는데  $da/dN=C(\Delta K)^m$ 의 식에서 C와 m은 재료의 정수이므로 앞에서 구한 이들 C와 m의 값을 사용하여 Patch를 대었을 때의  $\Delta K$ 를 계산할 수가 있다.

5.2 실험결과에 대한 고찰

이상의 실험결과를 종합적으로 검토하여 보건대 반복Cycle에 따르는 선균열, 구멍이 뚫린 Patch를 댄 경우 즉 볼트구멍으로부터 발생한 균열, 구멍 없는 Patch를 댄 경우의 균열진전 거동을 Fig.10에서 밝힌 바와 같이 Patch를 댄 경우는 덮판이 없는 경우보다 균열진전율이 감소되어 수명연장율이 약 1.85배 정도이며, 구멍이 뚫린 Patch를 댄 경우는 약 1.6배 정도이며 수명연장율을 보이고 있어 덮판의 수명연장 효과와 볼트구멍부터 발생한 균열은 구멍의 영향을 다소 받음을 알 수 있다. 또한 제1 실험에서 본 이론의 적합성을 검토하기 위하여 균열진전율과 응력확대 계수범위( $\Delta K$ )를 Fig.14에 표시하였다. 균열진전율만의 경우에는  $\Delta K$ 는 (6)과 식(7)로부터 평가되어졌다. Patch를 붙임으로서 균열진전의 감소된 응력확대 계수는 식(10), 식(11), 식(16)에서, 균열진전 Patch는 식(10)과 식(16)에 의해서 계산되어졌다. 구멍이 뚫린 Patch의 경우 구멍직경을 균열길이로 간주했다. 또한 실험치는 식(11)와 식(10) 대신 별도의 피로실험을 통하여 얻어진 컴프라이언스를 이용하여 응력확대 계수를 구하였다. Fig.14에서 보는 바와 같이 주어진 안정구역 범위안에는 실험치와 이론치가 잘 일치함을 알 수 있고 이 결과로 컴프라이언스 기법의 유효성을 입증할 수 있다. 이들 데이터 지수법칙

$$\frac{da}{dN} = 3.29 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.04} \quad (29)$$

의 형태로 나타낼 수 있다. 본 이론의 유효성에 따라 Patch형태의 변화 효과를 보기 위하여 Patch폭을 여러가지로 변화시켰을 때의 균열 반길이 a에 대한 무차원  $\Delta K$  곡선을 Fig. 18에 보였다. 이 그림에서 보면 10mm균열 길이에서 10mm폭 Patch, 30mm 폭 Patch, 70mm 폭 Patch일 경우 각각 원래값의 85%, 68%, 47%의 응력확대 계수 폭의 값으로 감소를 나타내고 있어 Patch로서 파괴강도를 조절할 수 있음을 알 수 있고, 시험 데이터의 식(29)에 의해서 균열 반길이에 대한 크랙진전 속도를 쉽게 구할 수 있으며 이 결과를 Fig.19에 표시하였다. 이를 이용하여 여러가지 폭의 Patch로 보강하였을 때의 균열진전 속도를 용이하게 구할 수가 있고, 변형된 Paris

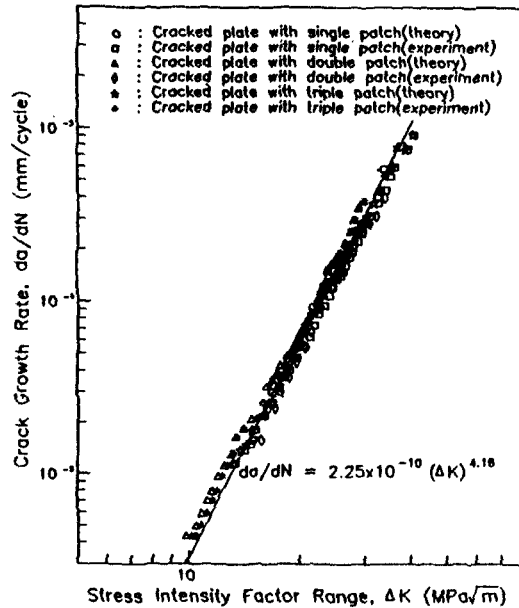


Fig. 15 Fatigue crack growth data reduced to a common stress intensity factor range in multi-patches

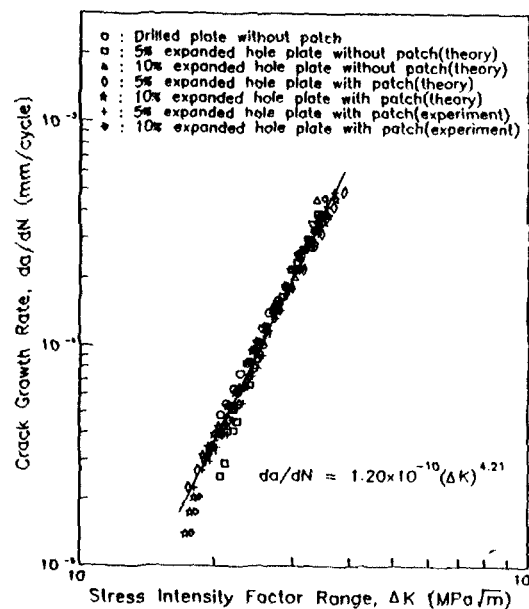


Fig. 16 Fatigue crack growth data reduced to a common stress intensity factor range in stop hold patch

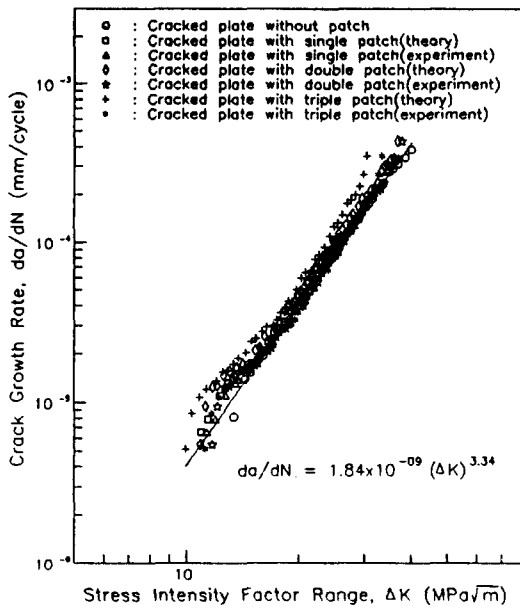


Fig. 17 Fatigue crack growth data reduced to a common stress intensity factor range in welding patches

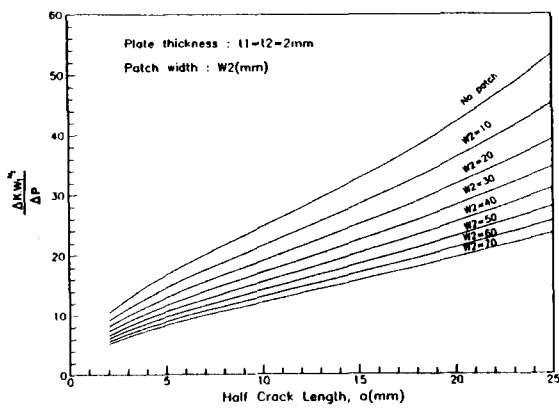


Fig. 18 Calculated effect of the plate width on cracked plate stress intensity factor range in simple patches

식[13]에 의하여 균열진 구조물 잔존수명을 구할 수 있어 균열진 평판의 잔존수명에 따라 Patch치수를 결정할 수 있다. 가능한 한 주판과 거의 같은 형상의 Patch를 부착할 경우 균열진 판의 수명을 연장시키기 위하여, 즉 균열진 판에 걸리는 하중을 최대 분산시키기 위하여 겹층으로 Patch할 경우, 본 이론 적용 여부를 종합적으로

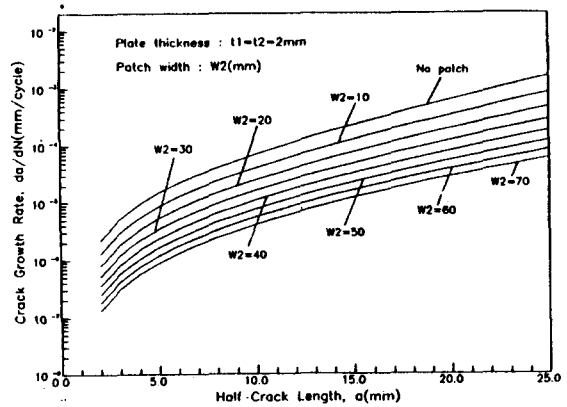


Fig. 19 Calculated effect of the patch width on cracked plate fatigue crack growth rates in simple patches

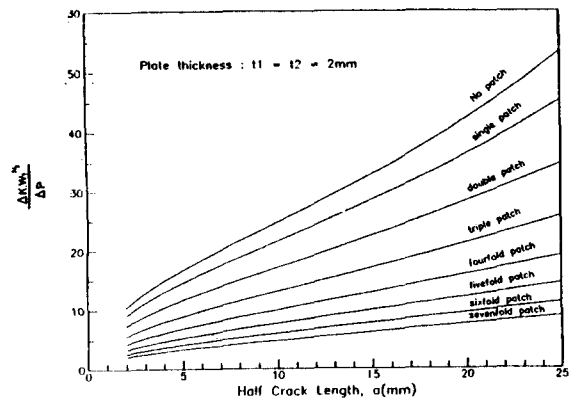


Fig. 20 Calculated effect of the multi-patch number on cracked plate stress intensity factor range

검토하기 위하여 반복 사이클수에 따른 균열진전 거동을 Fig.11에 보였다. 균열길이가 18mm까지 진전되었을 경우 단일 Patch의 경우보다 수명연장을 이 이중 Patch를 할 경우 약 1.48배, 3중 patch를 할 경우 약 6.67배 정도를 보이고 있다. 이는 Patch층이 많아질수록 하중분산효과가 커져 수명효과가 큼을 알 수 있다. 또한 제2실험에서 본 이론의 적합성을 검토하기 위해 균열진전율과 응력 확대계수 범위(ΔK) 관계를 Fig.15에 표시하였다. 여기서 Patch수에 따르는 균열진 주판안의 ΔK는 식(18)과 식(19)의 하중관계식에 의해서 계산되었다. 또한 실험치는 별도의 피로시험에서 얻어진 컴프라이언스를 이용 식(18)에 의해서 응력확대 계수를 구하였다. Fig.15에서

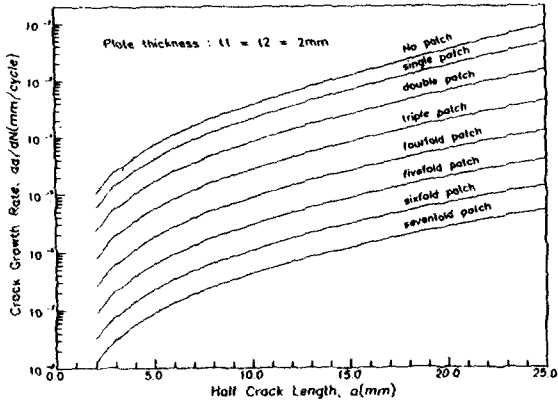


Fig. 21 Calculated effect of the multi-patch number on cracked plate fatigue crack growth rates

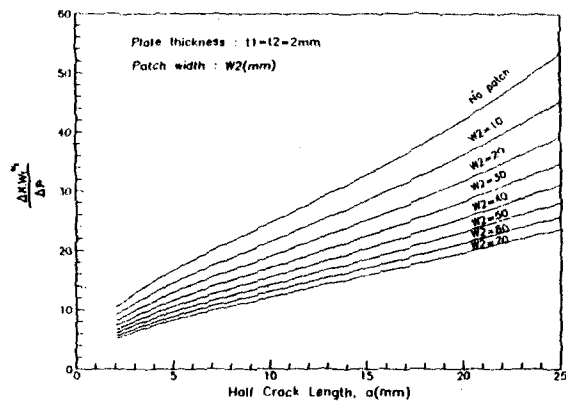


Fig. 22 Calculated effect of patch width on expanded hole plate stress intensity factor range

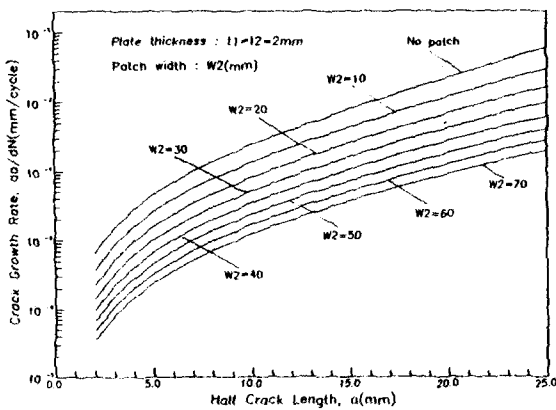


Fig. 23 Calculated effect of patch width on expanded hole plate fatigue crack growth rates

보는 바와 같이 주어진 안정구역 범위안에는 실험치와 이론치가 잘 일치함을 알 수 있고 이 결과로 Patch와 균열진 주판과의 길이가 유사한 경우에 본 컴프라이언스 기법의 유효성을 잘 입증하고 있다.

이들 Data는 지수법칙

$$\frac{da}{dN} = 2.25 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.16} \quad (30)$$

형태로 나타낼 수가 있다. 본 이론의 유효성에 따라 Patch수 변화효과를 보기 위하여 Patch수를 변화시켰을 때의 균열 반길이 a에 대한 무차원  $\Delta K$  곡선을 Fig.20에 보였다. 이 그림에서 보면 10mm 균열 길이에서 단일 Patch, 2중 Patch, 3중 Patch일 경우 각각 원래값의 87%, 67%, 52%의 응력확대계수 폭의 값으로 감소를 나타내고 있다. 이는 Patch수에 따라 파괴강도를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 실험 Data의 식(29)에 의해서 균열 반길이 a에 대한 균열 진전속도를 Fig.21에 표시하였다. 이를 이용하여 여러개의 Patch로 보강하였을 때 균열 진전속도를 용이하게 구할 수 있으며, 여기에서 잔존 수명이 변형된 Paris[14]에 의해서 계산될 수 있으며, 여기에서 잔존 수명이 변형된 Paris식[14]에 의해서 계산될 수 있으므로, 구조물의 잔존 수명에 따라 Patch수 및 치수를 결정할 수 있다. Crack Tip Hole가공법과 Patch와의 상호관성을 보기 위하여 반복 사이클 수에 대한 크랙 진전거동을 Fig.12에 보였다. Fig.12에 밝힌 바와 같이 Crack Tip Hole(2mm 직경)을 확장 안하고 Patch를 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 Patch를 댄 경우는 10% 확장일 경우가 약 2.4배, 5% 확장일 경우가 약 3.4배의 수명연장 효과를 보이고 있다. 5% 확장이 10% 확장보다 Patch 수명 효과가 더 큼을 알 수 있다. 또한 제3실험에서 본 이론의 적합성을 검토하기 위하여 균열 진전율과 응력확대 계수범위 ( $\Delta K$ )를 Fig.16에 표시하였다. Fig.16에 보인 바와 같이 주어진 안정구역 범위안에는 실험치와 이론치가 잘 일치함을 알 수 있고, 이 결과로 컴프라이언스 기법의 유효성을 확증할 수 있다.

이들 데이터는 지수법칙

$$\frac{da}{dN} = 1.20 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.21} \quad (31)$$

의 형태로 나타낼 수 있다. 본 이론의 유효성에 따라 Patch형태 변화효과를 보기 위하여 Patch폭을 여러가지로 변화시켰을 때의 균열 반길이  $a$ 에 대한 무차원  $\Delta K$  곡선을 Fig. 22에 보였다. 이 그림에서 보면 10mm 균열 길이에서 10mm 폭 Patch, 30mm 폭 Patch, 70mm 폭 Patch 일 경우 각각 원래값의 87%, 69%, 48%의 응력확대계수 폭의 값으로 감소를 나타내고 있어 Patch의 형상으로 파괴강도를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 실험 데이터식(31)에 의해서 균열 반길이에 대한 균열 진전속도는 Fig. 23에 표시하였다. 이를 이용하여 여러가지 폭의 Patch로 보강하였을 때의 크랙 진전속도를 용이하게 구할 수가 있다. 또한 변형된 Paris식[10]에서 균열진 구조물의 잔존수명을 계산할 수 있으므로 잔존수명에 따라 Patch의 치수를 결정할 수 있다. 용접 Patch에서는 균열진 평판의 잔존수명을 고려한 용접 Patch치수결정이 기존까지 문제가 되고 있는 용접 Patch의 용접부 균열 손상을 해결하기 위하여 균열진 주판의 용접부에 걸리는 하중을 최대로 분산시킬 방안으로, 겹층으로 Patch할 경우의 본 이론 적용여부를 종합적으로 검토하여 보겠다. 우선 반복 Cycle에 따른 균열 진전거동을 Fig.13보였다. 균열 길이가 18mm까지 진전되었을 경우 단위 Patch의 경우 보다 수명연장율이 이중 Patch할 경우 약 1.35배, 3중 Patch할 경우 약 1.48배 정도를 보이고 있다. 이는 Patch수에 따라 하중분산 효과가 커 수명연장 효과가 커짐을 알 수 있다. 이때 초기 부분에서 균열진전거동의 반전현상은  $\Delta P$ 에 대한 Patch의 압축효과가  $P_{min}$ 에 미쳐 발생하는 것으로 추측된다. 제4실험에서 본 이론의 적합성을 검토하기 위하여 균열 진전율과 응력확대계수 범위( $\Delta K$ )관계를 Fig.17에 표시하였다. 여기서 Patch수에 따르는 균열진 주판안의  $\Delta K$ 는 식(27)과 식(28)의 하중관계식에 의해서 계산되었다. 또한 실험치는 별도의 피로시험에서 얻어진 컴프라이언스를 이용 식(27)에 의해서 응력확대 계수를 구하였다. Fig.17에서 보는 바와 같이 주어진 안정구역 범위안에서는 실험치와 이론치가 잘 일치함을 알 수 있고 이 결과로 용접 Patch의 경우 본 컴프라이언스 기법의 유효성을 잘 입증하고 있다. 이들 데이터는 지수법칙

$$\frac{da}{dN} = 1.84 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.34} \quad (32)$$

의 형태로 나타낼 수가 있다. 본 이론의 유효성에 따라 Patch폭, 길이, 두께의 변화효과를 보기 위하여 Patch수를 변화시켰을 때의 크랙 반길이  $a$ 에 대한 무차원  $\Delta K$ 곡선을 Fig.24에 보였다. 이 그림에서 보면 10mm 균열 길이에서

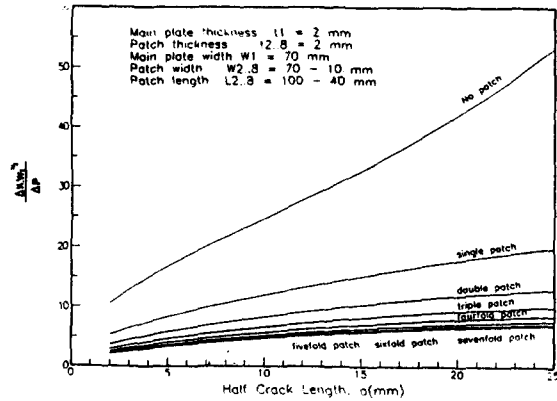


Fig. 24 Calculated effect of the welding patch number on cracked plate stress intensity factor range

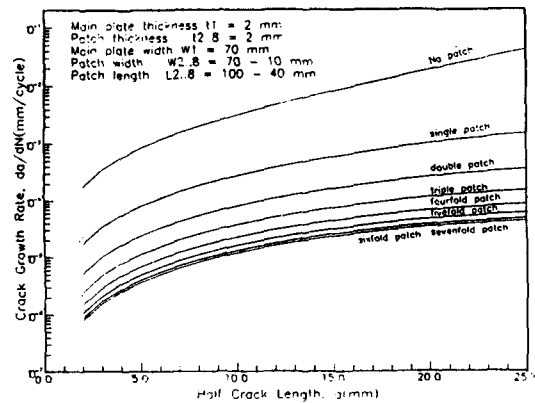


Fig. 25 Calculated effect of the welding patch number on cracked plate fatigue crack growth rates

단일 Patch, 2중 Patch, 3중 Patch일 경우 각각 원래의 값의 57.5%, 42.5%, 35% 응력확대계수 폭의 값으로 감소를 나타내고 있다. 이는 Patch크기에 따라 구조물의 파괴강도를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 실험 Data의 식(32)에 의해서 균열 반길이  $a$ 에 대한 균열 진전속도를 Fig.25에 표시하였다. 이를 이용하여 여러개의 Patch로 보강하였을 때 균열 진전속도를 용이하게 구할 수 있으며 균열진 구조물의 잔존수명에 따라 용접 Patch의 수 및 치수를 결정할 수 있다. 본 실험에서 분명하게 밝혀진 것은 용접부가 관통균열보다 더 취약하고 위험하다는 점과 이를 해결하기 위해서는 본 연구에서 밝힌 다수의 Patch겹층으로 용접하여 용접부위에 걸리는 하중을 분산시키는 방법이 효과적이라는 결과를 얻었다.

6. 결 론

본 연구에서는 컴프라이언스개념을 바탕으로 균열진 구조물의 잔존수명과 파괴강도를 예측할 수 있고, 간단히 사용할 수 있는 Patch설계 기법을 제안하였으며, 적용 예를 통하여 본 연구에서 제안한 설계기법으로 기존 Patch방법에서의 문제점들을 검토하여 균열진 구조물의 수명연장이나 사고방지 대책으로 유용하게 활용될 수 있도록 하였다. 또한, 균열진 구조물의 피로잔존수명을 고려한 Patch설계의 정식화를 위하여 컴프라이언스개념을 이용하여 유도된 응력확대계수는 실험검증을 통하여 그 유효성이 충분히 입증되었으며, 기존의 균열수명연장 방법인 Stop Hole Method에 있어 보다 연장효과가 뛰어난 가공방법과 컴프라이언스 개념을 이용한 Patch기법과의 상호균열 진전지연효과를 규명하여 최적수명 연장방법 등을 제시하였다. 앞으로 복잡한 형상을 가진 균열진 구조물의 피로수명연장을 위하여 실구조물의 균열부위에 대한 복합하중 상태에서의 응력확대계수 분리해석 문제, Patch주위의 하중경로 규명문제, 용접 Patch의 용접부 균열발생 한계설정문제, 복합재료 Patch의 최적설계등의 연계가 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 '90년도 과학기술처에서 시행한 기본연구 개발 사업의 일부이다.

참 고 문 헌

[1] Ishikawa Hidero, "선박, 해양구조물의 손상 및 대책", 일본용접학회지, Vol. 53, No.1, p.14  
 [2] Uchino, "기기구조물의 피로파괴와 방지", 일본 경영간부 세미나 교재  
 [3] ASME, Bolier and Pressure Vessel Code, Sec.XI, Ad-

denda, 1973.  
 [4] HAN, M.S., "Crack Arrest for Marine Materials", Current Maritime Technology of the Korea Institute of Machinery and Materials, No.1-2, pp. 45-58, pp.3-19,1988.  
 [5] HAN, M.S., Smith R.A. and Kim, S.C., "The Use of Compliance to investigate Fatigue Crack Retardation by cover plate", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct, Vol.13, No.6, pp.579-584, 1990.  
 [6] Bureau Veritas Marine Branch, "Ageing Ships" BV Annual Report, Jan. 1990.  
 [7] Ship Design and Equipment : 34th Session-4-8 March 1991, "Hull Cracking Study "Alarming"", IMO News, No.2, p13, 1991.  
 [8] 矢島, 川原, "선박의 취성균열사고의 해석에", 일본조선학회 용접연구위원회, 제1일 분과회 자료, 1-550-82, 1982.  
 [9] 일본구조연구협회 제193연구부회, "신제조법에 의한 50kg급 고장력강의 유효이용에 관한 연구 총회 보고서", 일본조선연구 협회 보고서, 제100호, 1985.  
 [10] 矢島, 외 5인, "TMCP(신제어 압연)형 고장력 강판의 선박, 해양구조물에서의 유효이용", 미스비시 기술보고 Vol.23, No.4, p.383, 1986.  
 [11] Rooke D.P. and Cartwright D.J., "Compendium of Stress Intensity Factors.", H. M. S. O., London, 1976.  
 [12] 西谷弘信, "총합재료강도학 강좌", 제6권, 제4장, p176, 1985.  
 [13] Ritchie R.O. and Knott, K.F., "Mechanism of Fatigue Crack Growth in low Alloy Steel", Acta., Met., 21, 5, p639, 1973.  
 [14] Smith, R. A., "Fracture Mechanics", Summary of a 12 lecture course, Cambridge University Engineering Dept., pp230-231, 1986.