원주방향 관통균열을 갖는 원통형 셸 구조의 패치보강 해석

Analysis of Patched Cylindrical Shells with Circumferential Through-Wall Cracks

안재석* · 김영욱** · 우광성***

Ahn, Jae-Seok · Kim, Young-Wook · Woo, Kwang-Sung

Abstract

In this study, behavior of unpatched and patched cylindrical shells with through-wall cracks has been estimated using numerical experiments, and patching effect of them has been investigated according to various patching parameters. To show credibility of numerical models considered, two ways such as h - and p -methods have been adopted. Also, domain integral method and virtual crack extension method have been considered to calculate energy release rates based on linear elastic fracture mechanics. For examples, the unpatched cylindrical shells with circumferential cracks under remote tension have firstly been analyzed to show the validity of finite element modeling with h -method or p -method, and then the results have been compared with literature values published. Next, the sensitive analysis of patch repaired problems in terms of thickness of patch and adhesive, shear modulus of adhesive, composite material type of patch, crack length, etc. has been carried out.

Keywords : circumferential through-wall crack, patch repair, equivalent domain integral method, virtual crack extension method, h -method, p -method

요 지

이 연구에서는 수치해석 실험을 통하여, 원주방향 관통균열을 갖는 원통형 셸의 패치보강 전후의 거동에 대한 평가와 다양한 변수에 따른 패치보강 효과를 분석하였다. 해석 모델의 신뢰성을 높이기 위해, h -법 및 p -법에 기초한 모델링, 두 가지 방법이 동시에 고려되었다. 또한 선형탄성파괴역학 개념에 기초하여 에너지 방출률을 산정하기 위해, 등가영역적분법 및 가상균열확장법이 고려되었다. 해석 예제로서, 먼저 연구에서 수행된 h -법 및 p -법 유한요소 모델을 검증하기 위해, 패치 보강전의 인장력을 받는 관통 균열이 있는 셸 구조물이 해석되었으며, 해석 결과값들과 여러 참고문헌 값들이 비교되었다. 그리고 패치 보강된 원통형 셸 시스템에서의 접착제 두께, 접착제 전단탄성계수, 패치 두께, 패치 재료, 균열 길이 등의 여러 설계 변수에 대한 민감도 해석이 수행되었다.

핵심용어 : 원주방향 관통균열, 패치보강, 등가영역적분법, 가상균열 확장법, h -법, p -법

1. 서 론

원통형 셸 구조물은 토목 구조물뿐만 아니라, 기계, 항공, 원자력, 화학 산업 등에서 중요한 구조물 중의 하나이다. 실제로, 가스배관, 가스탱크, 송유관 등이 원통형 셸 구조물로 이루어져 있다. 이와 같은 원통형 셸 구조물은 미세한 균열로 인하여 치명적인 손상을 일으킬 가능성이 존재한다. 일반적으로, 직선 원형파이프에서의 균열 형태는 원주방향, 종방향, 그리고 경사방향으로의 균열이 있다. 또한, 균열깊이에 따라 부분균열과 관통균열로 분류할 수 있다. Sanders 등(1982), Zahoore(1985), 그리고 Kumar 등(1984)은 이와 같은 원통형 셸 구조물의 균열 형태 및 균열 깊이에 관한 연구를 수행하였다. 기존의 연구된 결과를 바탕으로, 손상된 원

통형 셸 구조물의 정적 및 동적 특성을 반영한 구조손상의 영향을 이해하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면, 이와 같은 구조손상의 영향을 정확하게 판단함으로써, 구조물에 구조손상에 의한 파괴가 발생하지 않도록 초기에 손상을 진단할 수 있을 뿐만 아니라, 손상이 발생한 경우에는 좀 더 합리적인 손상복구 방법을 강구할 수 있기 때문이다.

한편, 여러 가지 손상복구 기법 중 최근에 가장 널리 사용되는 방법 중 하나로서, 복합재료를 이용한 접착보강기법이 있다. 이러한 접착보강기법은 균열주위에 발생하는 매우 큰 내력을 섬유복합재료로 이동시킴으로써, 보강기법 적용 전에 발생했던 내력을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 다른 방법에 비해 현장에서의 시공성이 좋고, 섬유복합재료 자체가 다른 일반적인 강재 또는 알루미늄 재료에 비하여 단위

*정회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 · 박사후연구원 (E-mail : jsahn@ynu.ac.kr)

**영남대학교 · 건설시스템공학과 · 석사과정 (E-mail : alwayswook@hanmail.net)

***정회원 · 교신저자 · 영남대학교 · 건설시스템공학과 교수 (E-mail : kswoo@yu.ac.kr)

중량이 매우 작을 뿐만 아니라, 강성이 높은 장점을 가지고 있다. 이와 같은 접착보강기법에 관한 연구는 최근까지 많이 진행되고 있다(Baker, 1984, 1988; Hart-Smith, 1985; Adams 등, 1997; Tong 등, 1999). 이와 같은 연구들은 해석 모델의 난해성으로 인해, 해석적 방법(analytical solutions) 보다는 주로 등매개변수 요소를 이용한 유한요소(Umamaheswar 등, 1999; Bouiadra 등, 2002; Chue 등, 1994; Sun 등, 1996; Naboulsi 등, 1996) 또는 경계요소법(Young 등, 1992)과 같은 수치해석 기법을 통하여 연구가 수행되었다. 또한 최근에는 비등매개변수 요소를 이용한 패치 보강된 시스템 관한 다양한 해석이 수행되었다(안재석 등, 2012a; 2012b; 우광성 등, 2008). 이와 같은 연구들은 주로 평판 시스템에 한정되어 있다. 이와 같은 패치 보강된 평판에서의 연구결과들을 곡면을 가지는 셸 구조물에 직접적으로 적용하기에는 한계가 있으며, 이와 같은 패치 보강된 셸 구조물의 거동에 관한 연구는 미미한 실정이다. Sun과 Tong은 1차 선단변형에 기초한 수정된 2차원 셸 유한요소를 가지고서, 패치 보강된 곡면셸의 파괴해석을 수행하였다(Sun 등, 2004a, 2004b; Tong 등, 2003a, 2003b, 2003c, 2003d). 이들 연구는 주로 패치 보강된 시스템에서의 균열 방향, 곡률, 비선형효과의 영향에 관해서 조사를 하였다.

이번 연구에서는 3차원 유한요소에 기초한 수치해석 실험을 통하여, 패치 보강된 셸 구조물의 거동에 대한 평가를 수행하였다. 먼저, 해석 모델의 검증을 위해서, 패치보강 전의 경우에는 현재 해석 모델 결과와 여러 참고문헌 결과를 비교 하였다. 또한, 패치 보강 후 거동에 대해서는 평가의 신뢰성을 향상시키기 위하여, 두 가지 해석 모델(h -법, p -법 해석)을 채택하였다. h -법 해석의 경우에는 요소 분할, p -법 해석의 경우에는 변위형상함수의 차수를 증가시킴으로써, 수렴된 해의 결과값을 얻었다. 이러한 수렴된 해의 결과를 가지고서, 두 모델의 결과들의 비교 및 고려된 설계변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이 연구에서는 원통형 셸에서 원주방향으로 관통균열이 발생한 경우 복합재료의 패치보강 효과는 패치보강 설계변수인 패치와 접착제의 두께, 접착제의 전단탄성계수, 패치의 재료(boron/epoxy, graphite/epoxy), 균열길이 등의 변화에 따라 분석하였다. 해석방법으로는 등가영역적분법을 이용하여 균열선단에서의 J -적분 값을 산출하여 응력확대계수(stress intensity factor; SIF)를 계산하였다. 사용한 요소는 20개의 절점을 갖는 SOLID186 요소를 사용하였다. 등가영역적분으로 구한 값의 신뢰도를 위하여 가상균열확장법(virtual crack extension method; VCEM)을 이용하여 에너지방출률 $G(=J)$ 를 구하여 응력확대계수를 산정하여 비교를 하였다. 가상균열확장법은 p -법을 이용하였고, 비교를 통해 영역적분결과와 신뢰도를 보였다. 우광성 등(2008), 안재석 등(2012a, 2012b)은 균열을 비롯한 노치 및 원공을 가지는 평판 해석을 위해 p -법 해석을 수행하였다.

2. 선형탄성파괴역학 개념에 기초한 에너지 방출률 산정

파괴역학에서 중요하게 다루어지는 파라미터 중 하나가 에너지 방출률이다. 이와 같은 에너지 방출률을 산정하기 위하여, 유한요소해석을 통한 산정 방법이 많이 이용되고 있다.

그 대표적인 몇 가지 방법에 대해 열거해보면, 변위외삽법(displacement extrapolation technique; Owen 등, 1983), 유한균열확장법(finite crack extension method; Owen 등, 1983; Doltsinis 등, 1985; Kruger 등, 1993) 또는 에너지 방출률법(energy release rate technique), 가상균열확장법(virtual crack extension technique, Parks, 1974; Hellen, 1975), 가상균열닫힘법(virtual crack closure technique; Rybicki 등, 1977), J -적분법(J -integral method; Rice, 1968), 그리고 등가영역적분법(domain integral method; Niskishkov, 1987) 등이 있다. 현재 연구에서는 셸의 두께 방향으로 위치한 지점들의 평균 에너지 방출률 값을 기준으로 다양한 설계변수에 대한 평가를 수행하였다. 이와 같은 평균 에너지 방출률 값을 산정하기 위해, 등가영역적분법 및 가상균열확장법이 고려되었다. 고려된 기법에 관한 이론적인 배경에 대해 다음과 같이 간단히 언급하고자 한다.

2.1 등가영역적분법에 의한 평균 에너지 방출률 산정

J -적분법은 Rice(1968)에 의해 처음 소개된 이후, 선형탄성 파괴역학 뿐만 아니라 탄소성파괴역학에 널리 쓰이는 방법이다. 이 방법은 균열 선단에서 발생하는 확장 에너지 또는 균열 선단에서 발생하는 내력에 의한 균열이 확장되는데 필요한 일(work)을 구하는 것이다. 물리학적 기본 개념으로 본다면, 임의의 물체에 행한 모든 일은 경로와는 무관하게 일정해야한다. 그래서 J -값을 구하기 위해 선정된 적분경로도 J -값에 대해서는 독립적이어야 한다. 그러나 유한요소해석 결과로부터 얻어진 응력값을 가지고서 J -값을 산정하는 경우, 균열 선단 주위의 신뢰성이 떨어지는 응력값들로 인해, J -값이 적분경로에 따라 달라지는 불안정한 값을 보이게 된다. 이와 같은 적분경로에 종속적인 J -값을 개선하기 위해, 균열 선단 주위에서 산출된 응력들을 평균하는 개념을 도입하였다(Niskishkov, 1987). 즉, 두 개의 적분경로의 J -값을 보간함수를 사용하여 적분경로 사이의 면적에 대해 적분하는 개념으로 변환시키는 등가영역적분법(equivalent domain integral method; EDIM)이 있다. Niskishkov 등(1987)은 2차원 8절점 등매개변수 요소에 이와 같은 등가영역적분법을 사용하였고, 신성진 등(1997)은 적분형 르장드르 형상함수를 가지는 비등매개변수 요소에 등가영역적분법을 사용하여 2차원 균열판 해석을 수행하였다.

J -값은 그림 1(a)에서와 같이 선적분 형태로 계산될 수 있으며 균열선단을 포함하여 두 균열 면에 위치한 초기점과

그림 1. J -적분값을 산정하기 위한 적분경로

끝점을 가지고 있는 선적분 경로를 고려하면 J -적분값은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{x_k} = \int_{\Gamma} Q d\Gamma; \quad k = 1, 2 \quad (1)$$

여기서, Q 는 변형률에너지와 표면력(traction force)에 의해 발생된 에너지와의 차를 나타내고, 식 (2)와 같다.

$$Q_k = \left[W_{n_k} - \sigma_{ij} \frac{du_i}{dx_k} n_j \right] \quad (2)$$

n_j 는 적분경로 Γ 에 대한 j 번째 법선방향 벡터를 나타낸다. W 는 변형에너지밀도로서 식 (3)과 같이 정의된다.

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (3)$$

여기서, σ_{ij} 는 응력, ε_{ij} 는 전체변형률을 나타낸다. 선적분 형태로 표현된 식 (1)은 발산정리를 이용하여 면적분 형태(식 (4))로 표현될 수 있다.

$$(J_{x_k})_{\text{domain}} = \int_A \left[W \frac{\partial S}{\partial x_k} - \left\{ u'_{x_k} \right\} [\sigma] \{ S' \} \right] dA \quad (4)$$

원통형 셀 구조의 경우, 면내 거동을 하는 평판구조와 다르게 두께 방향으로의 위치에 따라 J 값이 다르게 산출된다. 평균적인 J 값을 산정하기 위해, 다음과 같이 세 가지 방식이 주로 사용된다. 다음에 표현되는 식들(식 (5)~(7))은 2차 형상함수를 가지는 등매개변수 요소가 두께 방향으로 두 개 배열된 경우이다(그림 2). 첫 번째 방법으로, 각 절점에서 산출된 J 값들을 가중치에 대한 고려 없이 모두 산출평균하는 방식으로, 다음과 같이 평균 J 값을 산출할 수 있다.

$$(J)_{\text{method1}} = \frac{\sum_{i=1}^5 J_i}{5} = \frac{J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5}{5} \quad (5)$$

두 번째 방법으로, 통계학적 개념에서 극대치와 극소치를 제거하고 평균하는 방식으로, 관련된 식은 다음과 같다.

$$(J)_{\text{method2}} = \frac{\sum_{i=2}^4 J_i}{3} = \frac{J_2 + J_3 + J_4}{3} \quad (6)$$

마지막으로, Chattopadhyay 등(2005)이 제안한 방법으로, 각 요소의 중간 절점(mid-side nodes)에 해당되는 값은 고려하지 않고, 꼭지점에 해당되는 절점만을 고려하고, 두 개의 요소가 만나는 꼭지점에서는 더 큰 가중치를 부여하는 방식으로, 관련된 식은 다음과 같다.

$$(J)_{\text{method3}} = \frac{J_1 + 4J_3 + J_5}{6} \quad (7)$$

그림 2. 균열선단에서의 두께 방향으로의 J -적분값 위치

그림 3. 가상균열확장법을 위한 모델링

위의 식 (5)~(7) 중, 에너지 방출률에 관한 셀 구조물의 안정성 평가에서 가장 보수적인 결과를 나타내는 방법은 식 (6)이다(Oh, 2008). 그래서 본 연구에서는 식 (6)을 사용하여, 평균 J 값을 산출하였다. 현재 연구에서는 선형탄성파괴 역학 개념에 기초하기 때문에, 여기서 산출된 J 값은 에너지 방출률 값과 동일하다.

2.2 가상균열확장법에 의한 평균 에너지 방출률 산정

유한균열확장법(또는 에너지방출률법)은 실제 균열 확장 전후의 변형률 에너지 변화량을 가지고서, 에너지 방출률을 산정하는 방식이다. 이 방식은 요소의 종류와 상관없이 매우 간단하게 사용할 수 있는 방법이지만, 두 번 해석을 해야 하는 번거로움이 있다. 이와 같은 두 번 해석의 문제점을 개선해서, 선형탄성 문제의 경우 한 번의 해석으로 에너지 방출률을 산정하기 위해, Parks (1974)는 가상균열확장법을 제안하였다. 현재 해석에서는 그림 3과 같이 8개의 꼭지점 모드(vertex modes)를 가지는 p -유한요소(Szabo 등, 1991)에 대해서 고려하였다. 요소의 변형률에너지는 식(8)과 같다. V_i 는 체적에서 i 번째 요소를 나타내는 것이고 W 는 변형률 에너지 밀도로서, 변위함수 $\bar{U}$ 에 대한 범함수 형태를 가진다.

$$\hat{W} = \int_{V_0} \left(dV_0 \left\{ W(\bar{U}) \left| \frac{dV_i}{dV_0} \right| \right\} \right) \quad (8)$$

식 (8)을 전개하여 표현하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{1}{\delta l} \right) \left(\frac{\partial W_i}{\partial \bar{X}} \right)^T \delta \bar{X} = \int_{V_0} \left\{ \left(\frac{\partial W}{\partial l} \right) \left| \frac{dV_i}{dV_0} \right| + W \frac{\partial \left| \frac{dV_i}{dV_0} \right|}{\partial l} \right\} \quad (9)$$

$\bar{X}$ 는 절점의 좌표벡터를 나타낸다. W 는 변형률에 대한 함수이므로 식 (10)처럼 나타낼 수 있고,

$$\frac{\partial W}{\partial l} = \left(\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{mn}} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon_{mn}}{\partial l} \right) = \sigma_{mn} \left(\frac{\partial \varepsilon_{mn}}{\partial l} \right) \quad (10)$$

식 (10)을 식 (8)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \hat{W}_i}{\partial l} = \int_{V_0} dV_0 \left\{ \left| \frac{dV_i}{dV_0} \right| \sigma_{mn} \left(\frac{\partial \varepsilon_{mn}}{\partial l} \right) + W \frac{\partial \left| \frac{dV_i}{dV_0} \right|}{\partial l} \right\} \quad (11)$$

3. 유한요소 모델

3.1 원주방향 균열을 갖는 셀구조

그림 4와 같이 패치 보강전의 원주방향의 균열을 갖는 원

그림 4. 원주방향 균열이 발생한 원통형 셸 모델

그림 5. 원주형 균열을 가지는 셸의 유한요소 모델

통형 셸 구조(프아송비, $\nu = 0.3$, $R_m/t_s = 10$)가 고려된다. 해석은 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS(2007)를 사용하였다. 해석 영역은 셸 구조 거동의 대칭성을 고려하여, 1/4 모델링을 수행하였다. 해석은 h -법 유한요소해석(h -FEM) 및 p -법 유한요소해석(p -FEM)을 동시에 수행하였다. h -FEM의 경우, SOLID186(20절점) 요소가 고려되었고, p -FEM의 경우에는 SOLID147(형상함수의 차수=3~8차)이 고려되었다. 해석 모델에 대해 간단히 살펴보면, h -FEM의 경우에는 그림 5(a)와 같이, 해의 수렴성을 찾기 몇 가지 종류의 요소 세분화를 수행하였다. 그림 5(a)는 여러 세분화 모델 중의 하나의 예를 나타내고 있다. 에너지 방출률을 등가영역적 분법으로 산정하기 위해, 균열선단에 방사 형태의 요소 세분화를 수행 하였다. 한편, p -FEM의 경우, 그림 5(b)와 같이 요소망을 고정시키고, 단지 형상함수의 차수만을 증가시키는 방식으로 수렴성을 조사하였다. 단순한 모델링의 장점을 살리기 위해, 방사선 형태의 요소망을 채택해야하는 등가영역적분법을 사용하지 않고, 가상균열확장법을 사용하여 간단하게 에너지 방출률을 산정하도록 하였다. 현재 고려되는 예제의 목적은 수치해석 실험을 위한 모델의 적정성을 보이기 위한 것이다.

자유도(Number of Degrees of Freedom; NDF) 증가에 따른 무차원 응력확대계수(F)에 대하여 수렴성 조사를 수행하였다. 산출된 J -적분값은 식 (12)를 이용하여 무차원 응력확대계수로 변환하였다. 그림 6은 균열 $\theta = 45^\circ$ 인 경우, h -FEM의 수렴성 그래프를 나타내고 있다. 그림 7은 p -FEM의 경우, p -level에 증가에 따른 수렴성 결과를 나타내고 있다. 그림 7에서는 균열 크기의 변화에 따른 수렴성 양상도 함께 보이고 있으며, p -level 6차 이상에서는 균열 크기와 상관없이 값이 거의 수렴하고 있음을 알 수 있다. 표 1은 균열길이(θ) 변화에 대한 p -FEM과 h -FEM의 수렴된 결과값을 각각 나타내고 있다. 오차의 범위는 최대 3%이내로서, 두 모델의 결과의 차이는 크지 않은 것으로 보인다. 그림 8은 기

그림 6. h -FEM의 수렴성 조사

그림 7. p -FEM의 수렴성 조사

표 1. 패치보강 전 무차원 응력확대계수의 비교

	θ				
	15°	30°	45°	60°	75°
h -FEM	1.1351	1.4297	1.8321	2.3726	3.1322
p -FEM	1.1731	1.3755	1.7704	2.2998	3.0409

그림 8. 균열진전에 따른 무차원 응력확대계수의 비교

존 참고문헌 결과값(Zahoor, 1985; Sanders 등, 1982; Kumar 등, 1984)들과의 비교를 나타내고 있으며, 대체적으로 기존 참고값들과 유사하게 나타나고 있음을 보이고 있다.

$$F = \frac{\sqrt{JE}}{\sigma\sqrt{\pi a}} \quad (a: \text{균열길이}) \quad (12)$$

3.2 패치보강후 원주방향 균열을 갖는 적층 셸구조

패치 보강 후의 해석을 위해서 그림 9와 같이 인장력

그림 9. 패치 보강 후 원통형 셸 구조의 기하 형상

표 2. 패치의 재료적 성질(단위: GPa)

	E_1	E_2, E_3	G_{12}, G_{13}	G_{23}	ν_{12}, ν_{13}	ν_{23}
강재	200	200	76.9	76.9	0.3	0.3
접착제	0.965	0.965	0.366	0.366	0.32	0.32
Boron/epoxy	208	25.44	7.24	4.94	0.1677	0.035
Graphite/epoxy	172.3	10.34	4.83	3.10	0.3	0.18

그림 10. h-FEM을 이용한 보강 후 모델링

그림 11. p-FEM을 이용한 보강 후 모델링

($\sigma = 1$ MPa)을 받는 일면 패치 보강된 강재 원통형 셸 구조($R_m = 30$ mm, $t_s = 3$ mm, $l_s = 150$ mm)를 사용했다. 패치 재료는 boron/epoxy를 주로 고려하였으며, 상이한 패치재료의 영향을 고려하기 위해 graphite/epoxy에 대한 해석도 수행하였다. 재료 물성치는 표 2와 같다. 해석 영역은 이전 예제와 마찬가지로, 대칭성을 고려하여 1/4 모델링을 채택했다.

그림 12. 패치보강 전, 후의 응력확대계수 비교

그림 10과 11은 h-FEM과 p-FEM을 이용한 모델링을 각각 나타내고 있다. 현재 해석에서는 주로 h-FEM 방법을 가지 고서 셸 거동에 대한 여러 가지 현상을 규명했으며, p-FEM의 경우에는 h-FEM의 값의 신뢰성을 얻기 위해, 몇 가지 예제에 대해서 해석을 수행하여 h-FEM의 결과와 비교하였다.

한편, 패치와 접착부의 길이(l_p , l_a)는 50 mm로 고정을 하였고, 폭은 $\theta = 90^\circ$ 로 가정하였다. 먼저, 접착제의 두께 0.15 mm와 보강재의 두께 1 mm를 사용한 경우에 대해서 해석한 결과를 그림 12에 나타내었으며, 비교 값으로 p-법을 사용한 해석값과 같이 나타내었다. 그 결과, 보강 후의 값을 두 가지 방법으로 비교를 해보았을 때 약 1%의 오차를 보였다. 그림 12에서 나타난 것과 같이 응력확대계수의 감소 효과는 boron/epoxy를 사용할 경우에 최소 17%에서 최대 73%의 감소 효과를 나타내었다.

한편, 그림 12에서 θ 값이 증가함에 따라 패치보강 후의 경우 응력확대계수는 거의 일정한 값에 수렴되는 양상을 보여 주고 있다. 이러한 경향에 대해서 이미 패치보강 적층평판 문제의 경우에서도 확인 할 수 있었으며(Ting 등, 1999; Jones 등, 1999) 응력확대계수의 수렴값은 셸과 패치, 접착제의 재료적, 기하적 성질에 따라서 값이 좌우 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 접착제의 전단탄성계수, 접착제의 두께, 패치의 두께의 변화에 대해서 조사하였다. 그림 13은 boron/epoxy 패치를 사용하였을 경우에 균열선단 근처에서의 von-Mises 응력분포를 나타내고 있다. 패치보강 후, 균열선단부의 응력이 감소한다는 것을 알 수 있다.

그림 13. 패치보강 전과 후의 균열선단부에 발생한 von-Mises응력 분포

그림 14. boron/epoxy를 사용할 경우 접착제의 G_a 변화에 대한 응력확대계수

그림 15. boron/epoxy 패치보강의 경우 접착제의 두께변화에 따른 응력확대계수

그림 16. boron/epoxy 패치보강의 경우 패치두께에 대한 응력확대계수

그림 17. 패치 재료에 따른 응력확대계수

3.2.1 접착제의 전단탄성계수(G_a)의 영향

그림 14는 boron/epoxy 패치보강 시, 접착제의 전단탄성계수 변화에 대한 응력확대계수의 변화를 보여주고 있다. 그림 14에서 보이는 바와 같이, 전단탄성계수 값이 커질수록 응력확대계수 값이 작아지고 있음을 알 수 있으며, 이와 같은 결과는 패치보강기법을 적용한 경우 나타나는 현상과 일치한다(Bouiadjra, 2002). 그러나 전단탄성계수 값이 커짐에 따른 응력확대계수의 저감되는 폭은 점점 줄어들기 때문에, 접착제의 전단탄성계수의 크기에 대한 적절한 선택이 필요하다.

3.2.2 접착제의 두께(t_a)에 대한 영향

그림 15에서는 접착제의 두께의 변화에 대해서 조사하였다. 접착제 두께를 두 배씩 증가 시켰을 때, 응력확대계수가 약 14% 정도 증가하고 있는 것을 보이고 있다. 이것은 일면패치 보강의 경우, 휨효과가 추가적으로 발생하여, 응력확대계수가 증가되기 때문이며, 이와 같은 결론은 평판의 일면 패치 보강에 대해서 Turaga 등(1999)이 언급하였다. 그러나 접착제의 두께가 너무 얇은 경우, 시공상의 문제라든지 어느 정도의 필요한 강성을 가지기 어렵기 때문에, 접착제 두께에 대한 영향을 고려할 필요가 있다.

3.2.3 패치의 두께(t_p)에 대한 영향

그림 16은 패치두께에 대한 영향을 나타내고 있으며, 패치 두께가 1 mm에서 2 mm로 증가 하였을 경우 약 18%의 응력확대계수가 감소하였고, 2 mm에서 3 mm로 증가된 경

우, 약 13%의 감소를 각각 보여주고 있다. 즉, 패치의 두께가 증가할수록 균열이 생성된 셀에서 발생하는 응력이 패치로 분배되어 패치가 감당하는 응력의 비율이 커짐을 의미한다. 그래서 효과적인 패치의 사용을 위해서는 패치를 여러 겹으로 겹쳐서 사용할 필요가 있다(Bachir 등, 2002). 그러나 그림 16에 나타난 바와 같이, 패치의 두께가 커짐에 따른 응력확대계수의 저감폭이 줄어들기 때문에, 어느 일정수준에 도달하면 패치두께를 더 증가하여도 패치효과는 미미할 것이다.

3.2.4 패치재료에 따른 영향

그림 17은 패치재료에 따른 영향을 알아보기 위해서, boron/epoxy 재료와 graphite/epoxy 두 재료를 비교하였다. graphite/epoxy의 재료 물성치는 표 2에 있다. 균열길이가 작은 경우 두 재료의 응력확대계수에는 큰 차이가 없지만, 균열길이가 커짐에 따라, 강성이 더 큰 boron/epoxy의 효과가 더 크게 나타나고 있음을 보이고 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서 원주방향으로 관통균열이 발생한 셀 구조물에서 패치 보강효과에 대하여 조사하였다. 수치해석 해의 신뢰성을 위해 ANSYS에서 제공되는 h -법과 p -법을 동시에 해석하여 해의 신뢰성을 보였으며, 결과 $\pm 1\%$ 오차 범위에 수렴하였다. h -법의 경우 3차원 20절점 SOLID186 요소를 사용하였고, p -법의 경우 3차원 SOLID147요소(형상함수=3~8

차)를 사용하였다. 또한, 복합재료의 패치를 사용할 경우 각 변수에 대하여 응력확대계수의 변화에 대해서 조사하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. J-적분 값은 두께방향으로 값이 일정하지 않기 때문에 대표로 사용할 값에 대한 선택이 필요하다.
2. 복합재료의 패치를 사용할 경우 응력확대계수는 boron/epoxy의 경우 17%에서 최대 73%, graphite/epoxy의 경우 12%에서 최대 66%의 감소효과를 나타내었다. 따라서 패치의 종류에 따라 감소하는 크기는 다르기 때문에 패치의 선택이 필요하다.
3. 패치를 사용하기 위한 접착제의 전단탄성계수를 50 MPa~1200 MPa로 증가시켜서 해석한 결과 접착제의 전단탄성계수가 증가하면 응력이 패치로 전이되지 못하고 접착제에서 응력을 담당하는 비중이 커진다는 것을 알 수 있다.
4. 접착제 두께가 0.15 mm~0.6 mm 범위에서, 접착제 두께를 두 배 정도 늘린 경우에는 응력확대계수가 최대 14% 정도 증가하였다. 따라서 접착제의 두께가 증가할수록 응력전달이 용이하지 않아서 패치효과가 감소한다는 것을 알 수 있다.
5. boron/epoxy 패치의 두께를 1 mm~3 mm까지 증가시켜 해석한 결과 응력확대계수는 감소하는 경향을 보여준다. 패치의 두께가 1 mm에서 2 mm로 증가시킨 경우 최대 18%의 감소를 보였고, 2 mm에서 3 mm로 증가시킨 경우 최대 13%의 감소 효과를 보였다. 따라서 패치의 두께가 증가할수록 패치효과의 경향이 감소되고 효율적인 사용을 위해서 여러 겹으로 겹쳐서 사용하는 것에 대한 검토가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2012-0005368) 이므로, 귀 재단에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

신성진, 홍종현, 신병천, 우광성(1997) 2차원 균열판에서 등가영역적분법에 의한 p -Version 유한요소모델. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제17권 제1-2호, pp. 137-147.

안재석, 우광성(2012) 복합재료 패칭에 의한 중앙경사균열에서 2단계 확장법을 사용한 혼합모우드해석. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제32권 제1A호, pp. 11-18.

안재석, 우광성(2012) 접착 보강된 노치 균열판의 응력확대계수 산정을 위한 비등매개변수 모델 기반의 3차원 가상균열단립법. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제32권 제1A호, pp. 39-48.

우광성, 한상현, 양승호(2008) p -수렴 적응 평판이론에 의한 균열판의 패치보강후 응력확대계수 산정. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권 제5A호, pp. 649-656.

Adams, R.D., Comyn, J., and Wake, W.C. (1997) Structural adhesive joints in engineering. second ed. London: Chapman & Hall.

ANSYS (2007) Version 11, ANSYS Theory Manual, ANSYS, Inc., USA.

Bachir, B.B., Belhouari, M., and Serier, B.C. (2002) Computation of the stress intensity factors for patched cracks with bonded composite repairs in mode I and mixed mode. *Compos. Struct.*, Vol. 56, pp. 401-406.

Baker, A.A. (1984) Repair of cracked or defected metallic aircraft components with advanced fibre composites-an overview of Australian work. *Compos. Struct.*, Vol. 2, pp. 153-181.

Baker, A.A. and Jones, R. (1988) Bonded repair of aircraft structures, Dordrecht: Martinus Nijhoff.

Bouiadjra, B.B., Belhouari, M., and Serier, B. (2002) Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode. *Compos. Struct.*, Vol. 56, pp. 401-406.

Chattopadhyay, J., Tomar, A.K.S., Dutta, B.K., and Kushwaha, H.S. (2005) Elastic-plastic J and COD estimation schemes for through-wall circumferentially cracked elbow under in-plane closing moment. *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 72, pp. 2186-2217.

Chue, C.H., Chang, L.C., and Tsai, J.S. (1994) Bonded repair of a plate with inclined central crack under biaxial loading. *Compos. Struct.*, Vol. 28, pp. 39-45.

Doltsinis, S.T., Knapp, H., Streiner, P., and Wustenberg, H. (1985) PERMAS-FM, Fracture Mechanics, INTES GmbH, Stuttgart, User Manual, Publication No. 226, Rev. C.

Hart-Smith, L.J. (1985) The design of repairable advanced composite structures, Douglas Paper 7550. McDonnell Douglas, Douglas Aircraft Company.

Helen, T.K. (1975) On the method of virtual crack extensions. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 9, No. 1, pp. 187-208.

Jones, R. and Chiu, W.K. (1999) Composite repairs to crack in metallic components. *Compos. Struct.*, Vol. 44, pp.17-29.

Kruger, R., Koning M., and Schneider, T. (1993) Computation of Local Energy Release Rates Along Straight and Curved Delamination Fronts of Uni-directionally Laminated DCB- and ENF- Specimens, in Proceedings of the 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SSDM Conference, La Jolla, CA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, pp. 1332-1342.

Kumar, V. et al. (1984) *Advanced in elastic-plastic fracture mechanics*, NP-3607 Research Project 1237-1, General Electronic Company prepared for EPRI.

Naboulsi, S. and Mall, S. (1996) Modeling of a cracked metallic structure with bonded composite patch using the three layer technique. *Compos. Struct.*, Vol. 35, pp. 295-308.

Nikishkov, G.P. and Atluri, S.N. (1987) An equivalent domain integral method for computing crack tip integral parameters in non-elastic, thermal mechanical fracture. *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 26, No. 6, pp. 851-867.

Oh, C.K., Song, T.K., Kim, Y.J., Kim, J.S., and Jin, T.E. (2008) Elastic-plastic fracture mechanics analyses of circumferential through-wall cracks between elbows and pipes. *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 75, pp. 1231-1250.

Owen, D.R.J. and Fawkes, A.J. (1983) *Engineering Fracture Mechanics: Numerical Methods and Applications*, Pineridge Press Ltd., Swansea, U.K.

Parks, D.M. (1974) A stiffness derivative finite element technique for determination of elastic crack tip stress intensity factors. *Int. J. Fract.*, Vol. 10, No. 4, pp. 487-502.

Rice, J.R. (1968) A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *J. Appl. Mech.*, Vol. 35, 379-386.

Rybicki, E.F. and Kanninen, M.F. (1977) A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral. *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 9, pp. 931-938.

Sanders, J.L. and Lyell, J. (1982) Circumferential through-cracks in cylindrical shells under tension. *J. Appl. Mech.*, Vol. 49, pp.

- 103-107.
- Sun, C.T., Klug, J., and Arendt, C. (1996) Analysis of cracked plates repaired with bonded composite patches. *AIAA J.*, Vol. 34, pp. 369-374.
- Sun, X. and Tong, L. (2004a) Curvature effect on Fracture toughness of cracked cylindrical shells bonded with composite patches. *AIAA J.*, Vol. 42, pp. 2585-2591.
- Sun, X. and Tong, L. (2004b) Fracture toughness analysis of inclined crack in cylindrical shell repaired with bonded composite patch. *Compos. Struct.*, Vol. 66, pp. 639-645.
- Szabo, B. and Babuska, I. (1991) Finite element analysis. JOHN WILEY & SONS, INC.
- Ting, T., Jones, R., Chiu, W.K., Marshall, I.H., and Greer, J.M. (1999) Composites repairs to rib stiffened panels. *Compos. Struct.*, Vol. 47, pp. 737-743.
- Tong, L. and Steven, GP. (1999) Analysis and design of structural bonded joints. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Tong, L. and Sun, X. (2003a) Adhesive elements for stress analysis of bonded patch to curved thin-walled structures. *Comput. Mech.*, Vol. 30, pp. 143-154.
- Tong, L. and Sun, X. (2003b) Nonlinear stress analysis for bonded patch to curved thin-walled structures. *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 23, pp. 349-364.
- Tong, L. and Sun, X. (2003c) Optimization of ply drop-offs in bonded patch to cylindrical shell structures. *J. Compos. Mater.*, Vol. 37, pp. 1289-1314.
- Tong, L. and Sun, X. (2003d) Shape optimization of bonded patch to cylindrical shell structures. *Int. J. Num. Methods. Eng.*, Vol. 58, pp. 793-820.
- Umamaheswar, TVRS and Singh, R. (1999) Modeling of a patch repair to a thin cracked sheet. *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 62, pp. 267-289.
- Young, A., Rooke, D.P., and Cartwright, D.J. (1992) Analysis of patched and stiffened cracked panels using the boundary element method. *Int. J. Solid. Struct.*, Vol. 29, pp. 2201-2206.
- Zahoor, A. (1985) Closed form expressions for fracture mechanics analysis of cracked pipes. *J. Press. Vess.-T. ASME*, Vol. 107, pp. 203-205.
- (접수일: 2012.7.6/심사일: 2012.8.27/심사완료일: 2012.9.3)