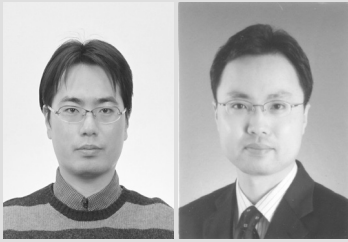


ABAQUS를 이용한 복합소재 적층구조의 층간분리 손상 모델링

Delamination Modeling of Laminated ACM Structures Using ABAQUS



노명현(Myung-Hyun Noh) 정회원 | 포항산업과학연구원 강구조연구소 | 선임연구원 | mhnoh@rist.re.kr
 이상열(Sang-Youl Lee) 이사 | 안동대학교 토목공학과 | 조교수 | lsy@andong.ac.kr

1. 서론

층간분리(Delamination)는 제조 과정에서의 각종 오류, 화재 등으로 인한 급격한 온도변화 및 과도한 압축력작용 등의 원인으로 접착된 면이 분리되는 현상을 의미한다. 층간분리(delamination) 손상은 적층된 복합소재 구조물에서 발생하는 대표적인 손상 유형 중 하나이다. 이러한 층간분리 손상은 적층판 구조물의 진동에 민감한 영향을 미치게 되며 복합소재 적용 구조물의 장/단기적 동적 특성 변화를 유발하게 된다. 특히, 교량과 같이 차량의 반복하중과 충격하중이 빈번히 발생하는 상황에서 층간 분리 손상에 따른 구조물의 동적 손상 거동의 명확한 규명이 수반되지 않는다면 복합소재의 폭넓은 활용에 한계가 따를 것이다.

과거 수십년 동안 층간분리를 갖는 적층된 복합소재 구조물은 주로 응력 및 좌굴해석에 집중되어 연구되어 왔다. 그러나 최근 층간분리 손상을 포함하는 복합소재 구조물의 동적 특성에 관한 해석의 필요성이 증대되어 다양한 연구결과가 발표되었다. 또한, 현재 층간분리 손상 추정에 대한 연구는 진

동기반 비파괴시험법을 통해 검토하는 것이 가장 합리적인 방법으로 인식되고 있어 최근 NDT 기술 등을 통해 층간분리 손상 거동을 검토한 연구가 증가하였다. 그러나 대부분의 연구는 2차원 유한요소 해석에 의한 결과로서 실제 층간 분리면에서의 국부적인 거동을 정확하게 분석하는 것은 한계가 있었다. 또한, 기존의 연구결과는 대부분 대칭 적층된 경우이며, 비대칭으로 적층된 경우에 대한 3차원적 거동을 상세 분석한 연구결과는 미미하다. 비대칭으로 적층되는 경우, 단면력-변위와의 관계식에서 면내력-모멘트 연계강성의 값이 0가 아닌 값을 갖게 되어 전체 구조물의 강성에 영향을 주게 된다.

본 기사에서는 이러한 기존의 연구의 문제점을 보완하기 위하여 층간분리를 포함한 3차원 해석이 가능하고 대칭/비대칭 적층 모델링에 제약이 없는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용한 층간분리를 갖는 적층된 복합소재 구조물의 간단한 고유진동 해석방법을 체계적으로 제시하고자 한다. 제시한 방법을 통해 복합소재 구조물의 동적 특성을 설계 실무에서도 손쉽게 검토할 수 있기를 바란다.

2. ABAQUS를 이용한 층간분리 3차원 유한요소 모델링

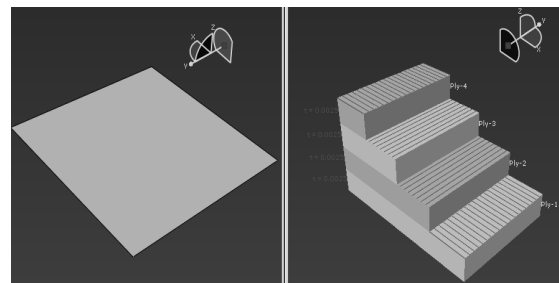
2.1 복합신소재 재료 모델링

ABAQUS CAE를 통한 복합신소재 재료에 대한 정의는 Property 모듈의 Material Manager tool을 이용하면 된다. ABAQUS CAE에 default로 제시하고 있는 복합신소재 재료 모델로는 9개의 입력성분으로 구성된 Elastic Engineering Constants 입력 모델과 Elastic Orthotropic Constants 입력 모델이 있으며, 얇은 박판 형태의 Lamina 거동 모사를 위해서는 6개 입력성분으로 구성된 Elastic Lamina 재료 모델이 사용될 수 있다. 복합신소재 재료의 손상거동은 Longitudinal 방향과 Transverse 방향으로 각각 인장, 압축, 전단 강도 성분을 입력하도록 구성된 Hashin Damage 모델을 통해 모사가 가능하다.

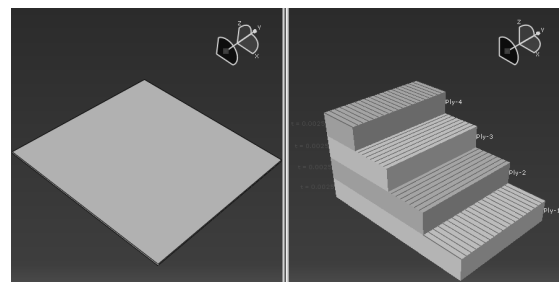
2.2 복합신소재 적층판 모델링

ABAQUS CAE를 통한 복합신소재 적층판 모델링 방법은 그림 1에 제시한 바와 같이 3가지 방법으로 분류할 수 있다. Conventional Shell Composites 모델링은 Part모듈에서 shell type의 복합신소재 적층판 형상을 모델링 한 후 Property 모듈에서 Composite Layup의 Element Type을 Conventional Shell로 설정한 뒤, Edit Composite Layup 창에서 복합신소재의 Layup을 구성하는 것이다. Continuum Shell Composites과 Solid Composites 모델링은 Part 모듈에서 Solid type의 복합신소재 적층판 형상을 모델링 한 후 Property 모듈에서 Composite Layup의 Element Type을 각각 Continuum Shell 또는 Solid로 설정한 뒤, Edit Composite Layup 창에서 복합신소재의 Layup을 구성하는 것이다. 그림 2는 Solid composite 방식을 통해 $[0 \ 90 \ 90 \ 0]$ 의 Composite Layup을 구성한 예를 나타낸 것이다. 한

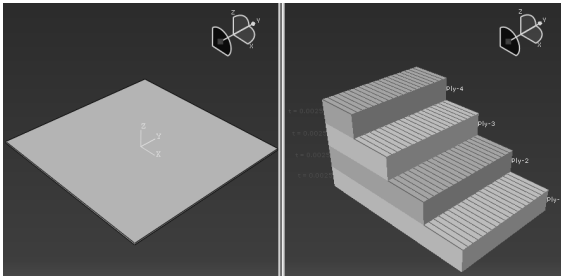
편, Composite Section을 구성하는 방법은 Property 모듈 상의 Create Section tool을 사용해서 모델링하는 방법과 Create Composite Layup tool을 사용해서 모델링하는 두 가지 방법이 있지만 본질적으로는 차이가 없다. 그림 2는 conventional shell composite의 layup을 두 가지 방법으로 구성한 예를 나타내고 있다. 그림 3은 Composites layup을 구성하는 방법에 대해서 특정 예를 통해 설명한 것이다. 그림 3(a)에서 보이는 바와 같이 하부에 ply-1의 복합신소재가 1번 좌표축의 방향으로 적층되고, ply-2는 2번 좌표축 방향 중간에 적층되고 ply-3은 기준 좌표축(Datum csys-3)의 1번 방향으로 적층된다고 가정할 때, 그림 3(b)와 같이 ply orientation을 구성할 수 있다. 그림 3(c)는 기본 전체 좌표계나 사용자가 정의한 국부 기준 좌표계를 통해 설정할 수 있음을 나타낸 것이다. VerticalTape(ply-2)과 DiagonalTape(ply-3)은 <Layup>으로 표기된 기본 전체 좌표계와 Datum csys-1로 표기된 국부 기준 좌표계를 통해서 그림 3(d)와 같은 ply orientation이 구성될 수 있다.



(a) Conventional Shell Composites

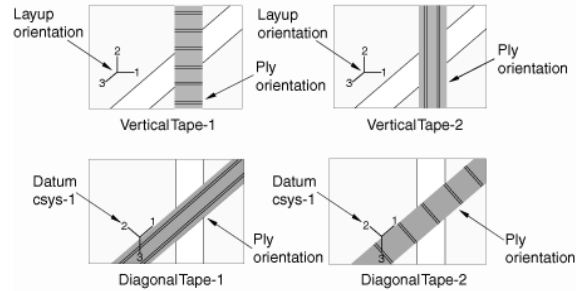


(b) Continuum Shell Composites

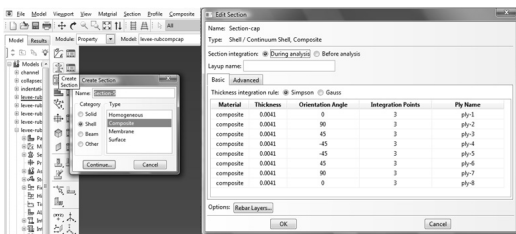


(c) Solid Composites

그림 1. ABAQUS CAE를 통한 복합신소재 모델링 방법



(c) Compoiste 적용 예2

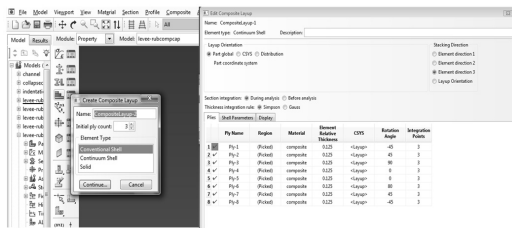


(a) Create Section tool 적용예

	Ply Name	CSYS	Rotation Angle
1	VerticalTape-1	<Layup>	0
2	VerticalTape-2	<Layup>	90
3	DiagonalTape-1	Datum csys-1.3	0
4	DiagonalTape-2	Datum csys-1.3	90

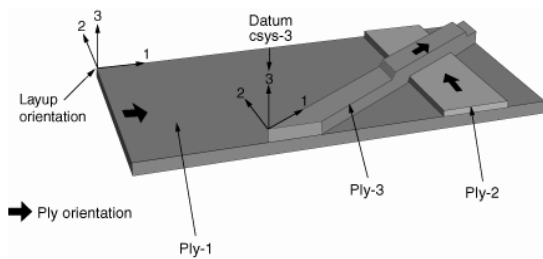
(d) Ply orientation

그림 3. Composites layup 구성 예



(b) Create Composite LayupSection tool 적용예

그림 2. Composite Layup을 정의하는 방법



(a) Compoiste 적용 예1

	Ply Name	CSYS	Rotation Angle	Integra Point
1	Ply-1	<Layup>	0	3
2	Ply-2	<Layup>	90	3
3	Ply-3	Datum csys-3.3	0	3

(b) Ply orientation

2.3 복합신소재 층간분리 모델링

복합신소재 판구조의 층간분리 모델링은 다양한 방법을 통해 구현될 수 있다. 대표적으로는 층간분리가 발생된 지점의 에너지 소산 특성을 모델링하기 위해 cohesive zone을 도입하여 구현하는 방법이 있다. 이 경우, cohesive 요소를 도입함으로써 층간 분리의 성장 및 전파 특성이 적절히 모사될 수 있게 된다. Reddy의 layer-wise 적층 이론을 층간분리 거동이 모사될 수 있도록 확장하는 방법도 있다. 이 경우, 복합신소재 판 층 사이의 분리는 접촉면의 jump 불연속 조건을 통해 모델링된다. 또한, 일부 변환과 layer-wise 쉘 유한요소를 이용하여 복합신소재 쉘 및 판구조물에서의 층간분리 거동을 모델링하는 방법도 연구된 바 있다. 이 layer-wise 요소는 각각의 층간분리 층 중립면의 변위를 전체 쉘 및 판 구조의 중립면으로 변환함으로써 전체적인 층간분리 거동을 모사할 수 있게 된다. 그러나 이러한 방법들의 대부분은 상당히 이론적이거나 수치적 코드를 직접 작성해야 하는 단점이 있어 실무 설계

자들이 사용하기에는 어려움이 있다. 이러한 점을 고려하여 본 기사에서는 층간분리가 발생된 복합신소재 적층판의 진동특성을 일반 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS로도 쉽게 검토할 수 있는 방법을 제시하도록 한다.

ABAQUS CAE를 통해 복합신소재의 층간분리면을 모델링하는 방법은 매우 간단하다. 먼저, 층간분리가 발생된 복합신소재 셸 및 판 구조물에 대해서 층간분리면을 기준으로 상부/하부 적층판으로 각각 모델링 한다. 그 다음, 층간분리가 발생한 면을 제외한 모든 면은 Interaction 모듈의 Constraint Manager의 tie type의 구속조건을 부여하여 층간분리가 발생하지 않은 부위의 모든 절점의 자유도를 공유하도록 구속한다. 이 경우, 층간분리 거동이 발생되기 시작하는 경계면은 층간분리가 발생되지 않은 적층판과 x,y,z 방향 변위 연속성 조건을 만족하게 된다. 그림 4에 층간분리 모델링 방법이 제시된다.

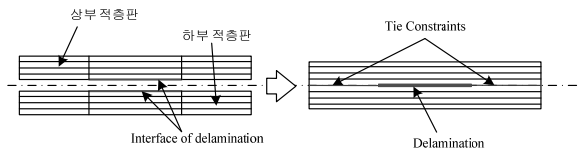


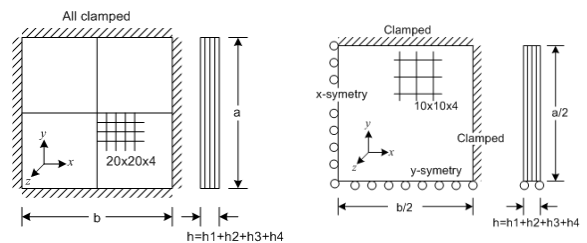
그림 4. 층간 분리 모델링 방법

3. 수치해석 예

3.1 해석모델

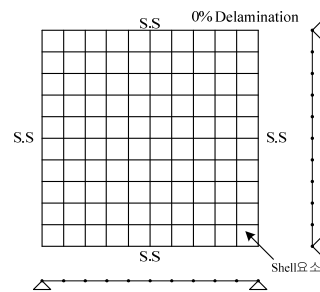
층간분리가 발생한 복합신소재의 판 구조물의 진동특성 변화를 검토하기 위하여 앞서 설명한 ABAQUS CAE를 이용하여 층간분리 복합신소재의 고유진동 해석을 수행하였다. 이 해석 결과로부터 층간분리 손상 전/후의 진동수 변화와 모드형상을 각각 검토하였고 층간분리 손상이 복합신소재 판 구조물의 진동특성에 미치는 영향이 분석되었다.

또한, ABAQUS에 의한 해석결과 값을 기존 연구 문헌에서 제시하는 값과 비교하여 앞서 설명한 모델링 방법이 타당한지 여부를 검토하였다. 본 연구에서 검토한 수치 해석 모델의 기하학적 개요가 그림 5에 제시되어 있다. 고유진동 해석에 사용된 요소 수는 Quarter model의 경우, 400(10x10x4)이고 Full model의 경우, 1,600(20x20x4)개를 사용하였다. 한편, 본 연구에서 검토한 층간분리 손상의 유형이 그림 6에 제시되어 있다. 그림에서 제시된 바와 같이 해석에는 총 2가지 모델이 사용되었다. 첫 번째 모델은 복합신소재 적층판 상면으로부터 첫 번째와 두 번째 층 사이와 두 번째와 세 번째 층의 사이에 사각형의 층간분리 손상이 발생하는 경우이고, 두 번째 모델은 복합신소재 적층판 상면으로부터 첫 번째와 두 번째 층 사이와 두 번째와 세 번째 층의 사이에 원형의 층간분리 손상이 발생하는 경우를 나타낸다.

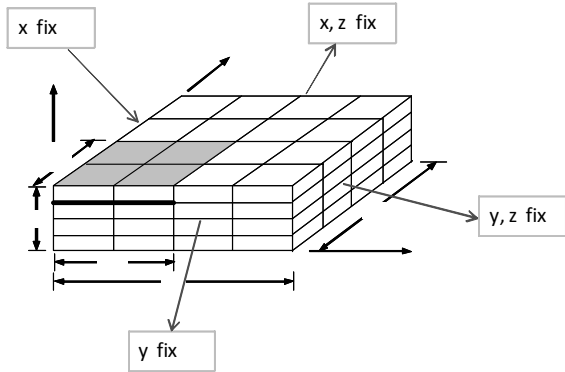


(a) Full model (b) Quarter model

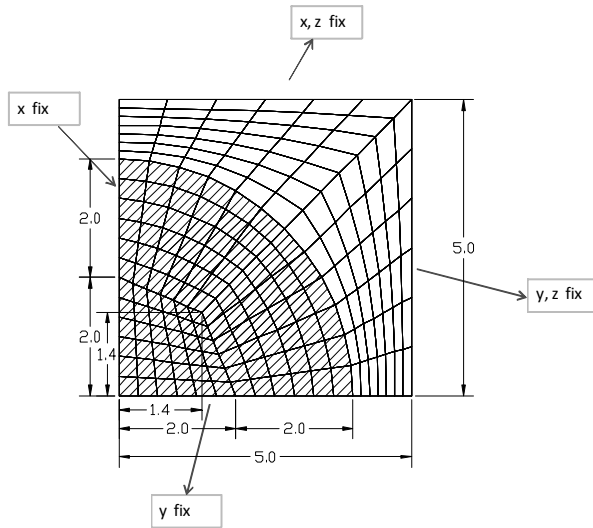
그림 5. 해석 모델의 기하학적 특성



(a) 손상이 없는 복합신소재 해석 모델 (Full Model)



(b) 직사각형의 층간분리 손상 (Quarter Model)



(c) 원형의 층간분리 손상 (Quarter model)

그림 6. 해석에 사용된 층간분리 손상의 형상

본 해석에서 검토한 복합신소재 판의 적층각도는 (0/90), (0/90/90/0)로 고려하였고, 판의 경계조건

은 단순지지로 고려하였다. 해석에 사용된 기하학적 특성과 복합신소재의 재료 특성 값이 표 1과 표 2에 제시되어 있다. 적용된 값은 모두 무차원 값으로 변환하여 적용되었다.

표 1. 해석 모델의 기하학적 특성값

Geometrical	a/b	a	b	a/h	h	h1~h4	rho
y	1.0	1.0 or 10.0	1.00 or 10.0	10.0	0.10	0.025	1

표 2. 해석에 사용된 복합신소재 재료 특성값

Material Properties	E1	E2	E3	E1/E2	G12	G13	G23	v12	v13	v23
	40.00	1.00	1.00	40.00	0.60	0.60	0.50	0.25	0.25	0.25

3.2 ABAQUS 및 기존 문헌 해석 결과비교

판의 폭/두께비(a/h) 변화에 따른 무차원 고유진동수 값에 대해서 ABAQUS 해석 값과 기존 연구 결과 값을 비교하여 표 3에 제시하였다. 표 3에서 제시된 값에서 볼 수 있듯이 ABAQUS를 통한 고유진동해석은 기존 문헌에서 제시하고 있는 값과 비교하여 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 앞서 제시한 ABAQUS CAE를 통한 복합신소재 적층판의 층간분리 손상 모델링을 적용함으로써 층간분리에 따른 고유진동수 값의 변화를 관찰하는 것도 가능할 것으로 판단된다.

표 3. 판의 폭/두께비(a/h) 변화에 따른 무차원 고유진동수($\bar{\omega} = (\omega b^2/h) \sqrt{\rho/E_1}$) 값 비교

Angle ply	Source	a/h					
		2	4	10	20	50	100
[0/90]	ABAQUS 20X20X4	4.9559	7.6996	10.3410	11.0383	11.2646	11.2994
	EAS-SOLID8 10X10B	5.1155	7.9113	10.4543	11.0963	11.3013	11.3316
	Kant-Swaminathan(2001)-1 HSDT	5.0918	7.9081	10.4319	11.0663	11.2688	11.2988
	Kant-Swaminathan(2001)-2 HSDT	5.0746	7.8904	10.4156	11.0509	11.2537	11.2837
	Reddy(1984) HSDT	5.7170	8.3546	10.5680	11.1052	11.2751	11.3002
	Senthilnathan et al.(1987) HSDT	5.7170	8.3546	10.5680	11.1052	11.2751	11.3002
	Whitney-Pagano(1970) FSDT	5.2085	8.0889	10.4610	11.0639	11.2558	11.2842

[0/90/ 90/0]	ABAQUS	20X20X4	5.3215	9.1973	15.0708	17.6369	18.6708	18.8375
	EAS-SOLID8	10X10B	5.4629	9.4127	15.0018	17.7446	18.7371	18.8949
	Kant-Swaminathan(2001)-1	HSDT	5.4033	9.2870	15.1048	17.6470	18.6720	18.8357
	Kant-Swaminathan(2001)-2	HSDT	5.3929	9.2710	15.0949	17.6434	18.6713	18.8355
	Reddy(1984)	HSDT	5.5065	9.3235	15.1073	17.6457	18.6718	18.8356
	Senthilnathan et al.(1987)	HSDT	6.0017	10.2032	15.9405	17.9938	18.7381	18.8526
	Whitney-Pagano(1970)	FSDT	5.4998	9.3949	15.1426	17.6596	18.6742	18.8362

3.3 층간분리 손상 형상에 따른 고유진동수 변화

표 4에서 제시된 바와 같이 원형에 비해 사각형 층간분리 손상이 고유진동수 변화에 더욱 민감한 것으로 나타났다. 사각형 층간분리 손상의 경우, 두 번째와 세 번째 층 사이에 층간분리 손상이 있

는 경우가 첫 번째와 두 번째 층 사이에 층간분리가 발생한 것보다 고유진동수 변화가 민감하였던데 반해 원형의 층간분리 손상의 경우, 이 현상이 반대로 나타났다. 이것은 층간분리 손상 형상과 위치가 고유진동수 변화에 복합적으로 영향을 미치고 있음을 반증하는 것이다.

표 4. 두 번째와 세 번째 층 사이에 층간분리 손상이 발생한 경우

D/a		Square Delamination		Circular Delamination	
		Nondimensional frequencies	Ratio of reduction	Nondimensional frequencies	Ratio of reduction
0		15.07085	100.00%	15.07330	100.00%
0.8	두 번째와 세 번째 층 (중심)	10.92457	72.49%	11.86133	78.69%
	첫 번째와 두 번째 층 (상단)	10.96039	72.73%	11.78788	78.20%

3.4 층간분리 손상이 포함된 모드 형상 관찰

그림 10은 층간분리 손상 위치와 형상에 따른 층간분리 면의 국부적인 모드형상을 나타낸 것이다. 모드 형상을 보면 알 수 있듯이, 층간분리 면에서의 모드 형상은 전체적 모드형상과 달리 국부적인 형상을 나타냄을 알 수 있다.

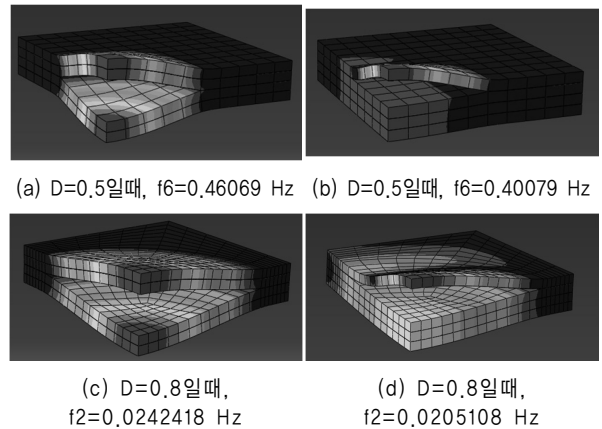


그림 7. 층간 손상 위치와 형상에 따른 국부화된 층간분리 모드형상

4. 결론

본 기사에서는 층간분리를 갖는 적층된 복합소재 구조물에 대한 고유진동 해석방법을 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 통해 수행하는 방법을 기술하였다. 제시한 방법은 복합신소재 판 및 셸 구조물에 대한 동적 특성을 검토하여 설계에 반영하고자 하는 실무 엔지니어에게 유용한 정보가 될 것으로 기대한다.

참고문헌

1. 박대용, 장석운(2010) 강화변형률 솔리드 요소를 사용한 사각형태 층간분리를 갖는 복합적층판의 탄성좌굴해석, 한국복합신소재구조학회 논문집, 제1권 제2호, pp.1-13
2. 박대용, 이상열, 장석운 (2004) ANS를 갖는 DKM 요소에 EAS를 적용한 새로운 4절점 Mindlin 평판 휨 요소, 대한토목학회논문집, 제25권 제1A호, pp. 107-115
3. 이상열, 장석운 (2004) 다양한 보강섬유의 각도 변화에 따른 손상부위를 갖는 복합재료 적층판의 강제진동, 대한토목학회 논문집, 제24권 제 5-A호, pp.931-937.
4. Andelfinger, U. and Ramm, E. (1993) EAS-elements for two-dimensional, three-dimensional, plate and shell structures and their equivalence to HR-elements, Int. J. Nume. Meth. Engng. Vol. 36, pp. 1311-1337
5. Lee SY and Park DY (2007), Buckling analysis of laminated composite plates containing delaminations using the enhanced assumed strain solid element. Int J Solids Struct, Vol.44, pp. 8006-8027
6. Lee SY and Chung DS (2010), Finite Element Delamination Model for Vibrating Composite Spherical Shell Panels with Central Cutouts, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 46, pp.247~256.