

복합재 이탈피의 3차원 구조해석

A 3-D Structural Analysis of Composite Sabot

이 성 호*
Lee, Sung Ho

이 강 우**
Lee, Kang Woo

박 관 진*
Park, Kwan Jin

송 흥 섭*
Song, Heung-Sub

ABSTRACT

Composite sabot can increase the penetration performance of APFSDS projectile by reduction of the sabot weight. However, it has a thick-sectioned lamination and the lamination structure is different from those of the conventional composite parts. In this study, modeling technique for a thick and radially-laminated composite part has been applied in the finite element analysis of composite sabot. Four models of composite lamination for the sabot have been proposed and evaluated for their structural strength.

주요기술용어 : Composite Sabot(복합재 이탈피), Finite Element Analysis(유한요소해석), APFSDS Projectile(날개안정철갑탄)

1. 서 론

날개안정철갑탄의 이탈피는 포신 내에서 추진제의 압력을 관통자에 운동에너지의 형태로 전달하는 기능을 수행하며 탄이 포구를 벗어나는 순간 관통자로부터 분리되어 수명을 종료한다. 동일한 포구에너지에서 탄의 무게가 가벼울수록 탄속이 증가하고 이는 관통성능의 향상으로 이어지기 때문에 최근 날개안정철갑탄에 복합재 이탈피를 적용하여 탄을 경량화시키기 위한 연구가 진행되고 있으며 일부에서는 이미 무기

체계에 적용하고 있다^[1,2].

한편, 복합재 구조물의 구조해석을 위해서는 구조물을 이루고 있는 적층된 복합재 층(ply) 수준에서의 응력, 변형률 및 파손평가가 필요하다. 이를 위해 우선적으로 적용할 수 있는 방법은 복합재 구조물을 불균일한 연속체로 다루는 것으로서 여기에서는 각 층을 별개의 물질로서 모델링한다. 하지만 이 방법은 두꺼운 적층 구조물의 구조해석 시 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 또 다른 해석방법은 “smearing-unsmeared” 방법^[3]을 사용하는 것으로서 복합재 구조물을 균일한 연속체로 가정한다. 이 방법은 불균일한 연속체의 물성을 균일한 연속체의 물성으로 변환한 등가물성을 구하여(smearing) 균일한 연속체로 모

* 국방과학연구소

** 프리즘(주)

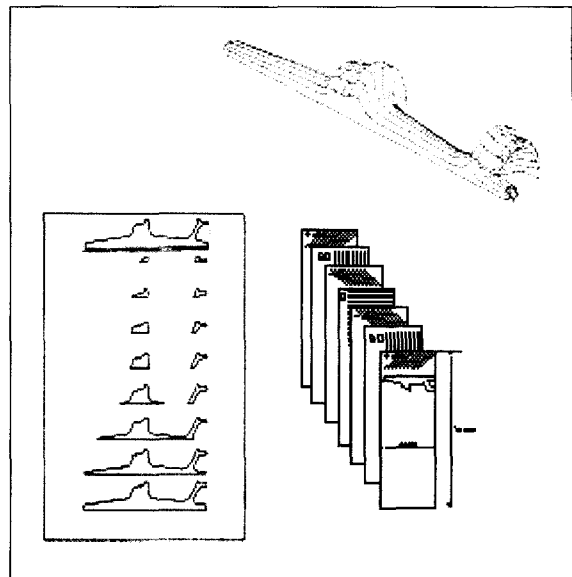
델링된 구조물의 구조해석을 수행하고 그 결과 얻어진 평균 응력과 변형률을 이용하여 구조물을 이루는 복합재 각 층에서의 국부적인 응력과 변형률을 얻는 것(unsmeared)이다. 그러나 이를 위해서는 smearing 및 unsmeared를 수행하는 별도의 프로그램을 개발해야만 한다^[4].

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 복합재 구조물을 불균일한 연속체로 모델링하는 방법을 복합재 이탈피의 구조해석에 적용하였으며 이때 복합재 이탈피를 구성하는 프리프레그의 적층 구성이 복합재 이탈피의 구조강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 네 종류의 적층 구성을 가정하였다. 한편 유한요소해석 시 요구되는 복합재 요소의 정의, 즉 각 프리프레그 층에서의 적층방향, 물성입력 등의 과정은 ANSYS에서 제공하는 APDL(ANSYS Parametric Design Language)로 작성된 입력보조 프로그램으로 자동화함으로써 유한요소 전처리(preprocessing)에 소요되는 노력을 최소화하고자 하였다.

2. 해석 방법

2.1 복합재 이탈피의 구성

그림 1은 본 연구에서의 해석대상인 복합재 이탈피의 1/3 조각을 나타낸 것이다. 하나의 서브세그먼트(subsegment)는 T700급 탄소섬유/에폭시 일방향 프리프레그(UD prepreg)를 배향이 서로 다르도록 적층하여 구성되며 이러한 서브세그먼트 9개를 일정한 형상으로 재단하여(그림 1의 왼쪽 아래) 세그먼트 1조를 만든 후, 다시 여러 조의 세그먼트를 적층하여 압축성형함으로써 이탈피 1/3 조각을 만든다^[5]. 본 연구에서



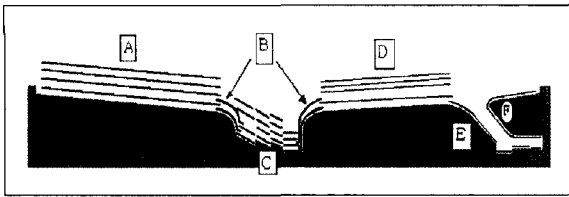
[그림 1] 복합재 이탈피의 구성

의 해석 모델은 서브세그먼트를 이루는 프리프레그 적층수에 따라 각각 모델 A(적층수 5개), 모델 B(적층수 7개)로 구분하였으며, 이를 다시 원주방향의 적층 유무에 따라 A-1, A-2, B-1, B-2(1 : 원주방향의 적층 포함, 2 : 원주방향의 적층 제외)로 세분하였다.

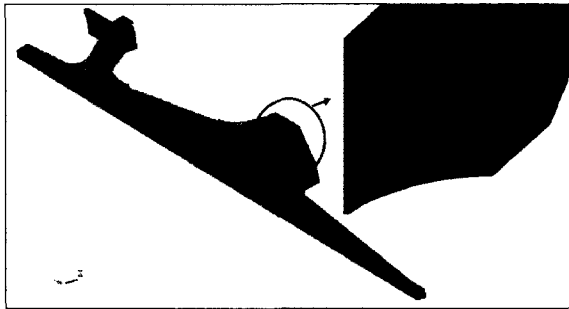
그림 2는 원주방향의 적층 방법을 나타내는 것으로서 몰드(mold)에 미리 원주방향 보강재를 놓은 후 위의 세그먼트를 적층하게 된다. 이 때 원주방향 보강재는 T300급 탄소섬유/에폭시 평직 프리프레그로서 이탈피 부위에 따라 서로 다른 적층수를 적용하였다.

2.2 해석 과정

본 해석에서는 Solid Edge(ver.9)를 이용하여 완성품 상태의 솔리드 모델을 작성하고, 이를 IGES 형태로 변환시킨 후 유한요소 생성기인 TrueGrid(ver.2.1)에서 요소를 구성하여 ANSYS(ver.5.7)에서 읽을 수 있는 형태의 외부파일로 출력하였다. TrueGrid에서 생성된 요소는 등방성 요소인 SOLID45이므로, 이를



[그림 2] 원주방향 적층 방법



[그림 3] 유한요소 모델

APDL로 작성된 입력보조 프로그램을 사용하여 복합재 요소인 SOLID46으로 바꾸었으며 이 때, 복합재의 적층방향을 표현하기 위해 요소좌표계와 적층좌표계를 함께 사용하였다.

그림 3은 유한요소해석에 사용된 모델이다. 모델의 크기를 줄이기 위하여 본 해석에서는 실제 구조물(120°)의 1/10인 1개 세그먼트(12°)만을 사용하였다. 해석에 사용된 요소 및 절점의 수는 표 1과 같으며, 등방성 물질인 관통자와 수지의 경우에는 SOLID45

[표 1] 해석에 사용된 요소와 절점의 수

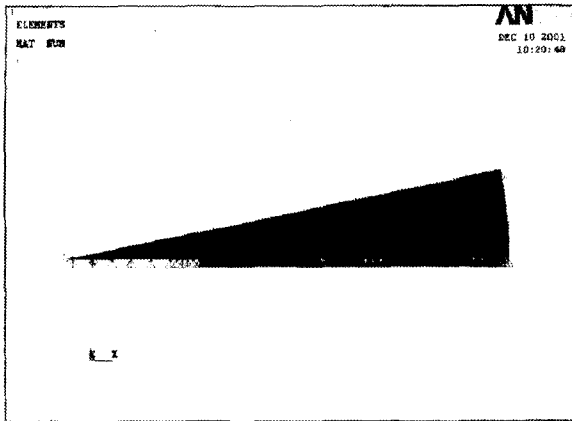
	복합재		수지	관통자	총 계
	반경 적층	원주 적층			
요소수	9,864	3,200	2,182	2,205	17,451
절점수	21,602	5,412	4,754	3,108	21,602

[표 2] 구조해석에 사용된 재료물성

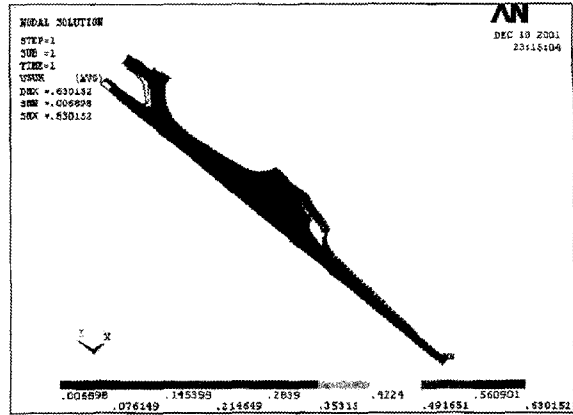
구 분	관통자	수 지	복 합 재	
			반경	원주
밀 도 (kg/mm ³)	17.7e-6	1.18e-6	1.56e-6	1.56e-6
E (kgf/mm ²)	37300	132.5	12848	6791
			982	6791
			982	982
G (kgf/mm ²)	-	-	373	373
			186.5	186.5
			373	373
인장강도 (kgf/mm ²)	-	-	228.3	-
			6.6	-
			6.6	-
압축강도 (kgf/mm ²)	-	-	135.1	-
			19.2	-
			19.2	-
전단강도 (kgf/mm ²)	-	-	4.8	-
			9.0	-
			4.8	-
ν	0.3	0.41	0.334	0.334
			0.540	0.540
			0.328	0.328

요소를, 이방성 물질인 복합재의 모델링에는 SOLID46 요소를 사용하였다.

표 2는 해석에 사용된 재료물성이다. 복합재의 물성은 일방향 섬유강화 복합재 프리프레그의 물성으로서 이는 직교이방성을 나타내므로 요소 정의 시 사용된 적층좌표계에 의해 강화섬유의 방향이 결정된다. 포아송비는 시험을 통하여 얻어진 major form을 사용하였다. 또한, 강제 운동인 비행상태에서의 강도해석을



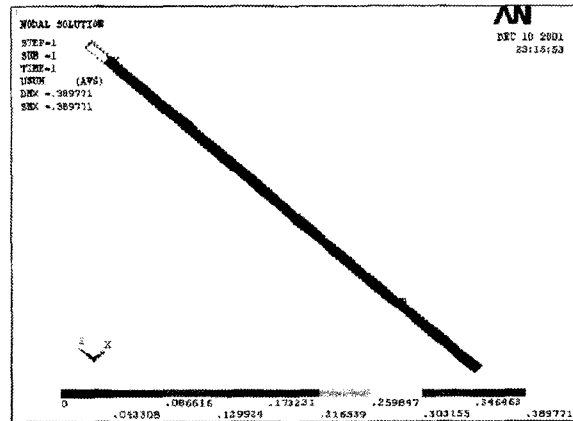
[그림 4] 해석에 사용된 구속조건



[그림 5] 모델 A-1의 변형형상(복합재)

수행하기 위해서 관성완화(inertia relief) 조건을 사용하였다.

그림 4는 해석에 적용된 구속조건을 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 모델의 크기를 줄이기 위하여 실제 구조물의 1/10인 1개 세그먼트만을 구조해석에 사용하고 그 경계면을 원주방향으로 구속하여 축대칭 해석을 수행하였다. 또한, Z축 상의 절점들을 반경방향으로 구속하였으며, 관성완화(inertia relief) 조건을 적용하기 위해 Z축 상의 임의의 한 절점을 선택하여 Z방향으로 구속하였다. 본 해석에 사용된 하중은 압력의 형태로 유한요소해석 모델에 가해지며 그 값은 30 kgf/mm^2 로 하였다.



[그림 6] 모델 A-1의 변형형상(관통자)

[표 3] 복합재와 관통자의 최대 변형량

변위 (mm)	모델 A-1	모델 A-2	모델 B-1	모델 B-2
복합재	0.63	0.75	0.53	0.50
관통자	0.37	0.39	0.30	0.28

3. 해석결과 및 검토

3.1 변위

그림 5 및 그림 6은 각각 모델 A-1의 복합재와 관통자의 변형형상을 나타낸 것이며, 각 모델에 대한 해석결과는 표 3과 같다.

전체적인 변형은 모델에 따라 큰 차이를 나타내지

않았으나 최대 변형량을 고려할 때 적층수가 5인 모델 A에 비해 적층수가 7인 모델 B의 경우가 더 유리하며, 또한 모델 B 중에도 원주방향 적층을 한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 유리함을 알 수 있다.

3.2 응 력

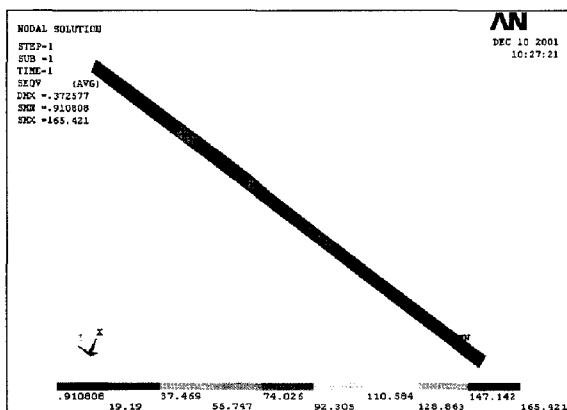
관통자, 수지, 복합재 등은 그 물성치가 서로 다르므로 후처리 시 별도로 나누어 검토하였으며, 원주방향 적층 복합재는 2차 보강재로서의 역할이 강하므로 따로 검토하지 않았다.

3.2.1 관통자

관통자는 등방성 재료인 텅스텐으로 구성되므로 응력상태는 von Mises 등가응력으로 평가하였다. 복합재와 달리 해석결과가 좌표계의 영향을 받지 않기 때문에 직교좌표계를 사용하여 처리하였다. 표 4는 관통자에 발생하는 최대 응력과 응력비를 나타낸 것으로서 응력비는 허용 인장강도에 대한 최대 응력의 비율이다. 모델 A에 비해 모델 B가 약간 유리함을 알 수 있다.

[표 4] 관통자에 발생하는 최대응력
(단위 : kgf/mm²)

	모델 A-1	모델 A-2	모델 B-1	모델 B-2
응력값	158.6	165.4	154.1	144.5
응력비	1.20	1.25	1.17	1.09



[그림 7] 관통자에서의 응력분포(모델 A-2)

그림 7은 모델 A-2의 관통자에서의 응력분포로서 최대 응력은 관통자의 중앙 부위에서 발생하며, 관성 완화(inertia relief)를 위해 구속된 자유도로 인하여 국부응력이 발생하지 않았음을 확인할 수 있다.

3.2.2 반경방향 적층 복합재

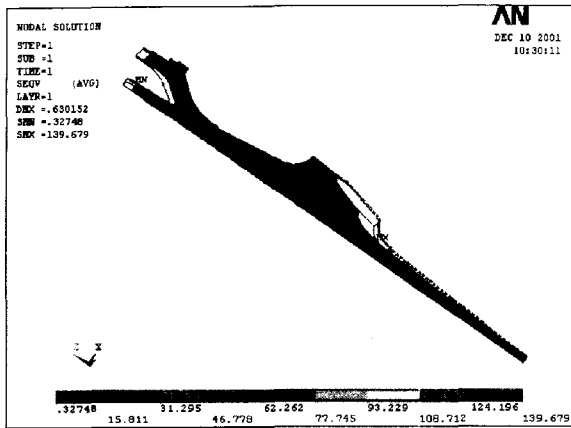
복합재는 이방성을 나타내므로 등방성 재료의 응력 평가와 같이 전체 직교좌표계를 사용하여 응력을 계산하면 전혀 다른 결과를 얻게 된다. 따라서, 계산된 응력의 평가는 복합재가 정의된 적층좌표계 하에서 수행하였다.

각 층 별로 계산된 이탈피의 최대 등가응력을 표 5에 나타내었다. 모델 B의 경우가 모델 A에 비해 유리하며, 원주방향의 적층을 추가한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 유리함을 알 수 있다. 그림 8은 모델 A-1의 첫 번째 층에 대해 계산된 등가응력을 나타낸 그림이다.

복합재를 구성하는 각 층의 응력상태를 정확하게 파악하기 위해서는 적층좌표계 상의 성분응력을 평가하여야 한다. 표 6은 모델 A-1의 경우 계산된 각 성

[표 5] 이탈피에 발생하는 최대 등가응력

Layer	최대 등가응력 (kgf/mm ²)			
	A-1	A-2	B-1	B-2
1	139.7	141.7	75.8	84.3
2	168.8	155.7	146.7	155.0
3	108.6	140.0	133.6	140.8
4	207.8	233.0	173.4	158.4
5	109.5	153.1	126.5	120.5
6	-	-	145.7	153.9
7	-	-	72.6	82.7



[그림 8] 등가응력 : 모델 A-1, 1번 층

[표 6] 모델A-1에서의 응력성분별 최대/ 최소값
(단위 : kgf/mm²)

응력성분		σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{zx}
층	분류						
1	최대	92.1	3.5	3.5	13.6	2.7	4.0
	최소	-139.6	-29.4	-27.9	-3.8	-4.1	-4.1
2	최대	157.8	3.0	3.6	6.3	3.5	2.5
	최소	-99.7	-24.8	-27.7	-10.9	-4.2	-3.8
3	최대	93.0	4.3	3.5	9.0	2.7	4.0
	최소	-106.4	-26.7	-28.5	-3.0	-4.0	-3.9
4	최대	23.7	8.8	3.5	10.8	1.6	6.3
	최소	-216.7	-19.7	-28.5	-6.2	-2.6	-5.3
5	최대	93.6	6.3	3.5	8.5	2.8	4.0
	최소	-107.3	-26.6	-30.0	-3.9	-3.9	-3.8

분별 응력을 정리한 것이며, 표 7은 각 모델에서 발생하는 성분별 응력의 최대/최소값을 정리한 것이다.

한편, 적층 복합재의 경우, 서로 인접한 층의 포아송비 차이와 전단 커플링(coupling)으로 인해 제품의 최외곽 부위나 구멍이 있는 경우 그 모서리에서 전단 응력이 발생하게 된다. 이 때 층들이 서로 분리되는 현상이 발생하기도 하는데, 이를 유발하는 응력을 층

[표 7] 각 모델에서 발생하는 최대/최소 응력
(단위 : kgf/mm²)

응력 성분	A-1	A-2	B-1	B-2	
σ_{xx}	최대	157.8	146.8	85.5	107.4
	최소	-216.7	-242.9	-179.7	-158.0
σ_{yy}	최대	8.8	11.1	4.3	6.3
	최소	-29.4	-44.0	-19.1	-20.0
σ_{zz}	최대	3.6	9.9	4.4	10.4
	최소	-30.0	-23.8	-24.9	-22.6
σ_{xy}	최대	13.6	11.5	8.9	9.5
	최소	-10.9	-23.8	-8.0	-7.2
σ_{yz}	최대	3.5	6.1	3.6	5.9
	최소	-4.2	-5.9	-4.6	-8.6
σ_{zx}	최대	6.3	6.9	4.1	4.6
	최소	-5.3	-9.6	-3.8	-5.1

간전단응력이라고 하며, 다음의 식을 사용하여 계산한다(기타 방향도 동일함).

$$\sigma_{xz}^1 = \sigma_{xz} \text{ at bottom of 'layer 1'}$$

$$\sigma_{xz}^{NL+1} = \sigma_{xz} \text{ at top of 'layer NL'}$$

$$\sigma_{xz}^j = \frac{1}{2}(\sigma_{xz} \text{ at top of 'layer } j-1' + \sigma_{xz} \text{ at bottom of 'layer } j')$$

위의 계산에 사용된 전단응력 σ_{xz} 는 적층좌표계에서 계산된 값을 요소좌표계로 변환하여 얻으며, 일반적으로 사용되는 층간전단응력은 이렇게 구해진 σ_{xz} 와 σ_{yz} 의 벡터합을 의미한다. 표 8은 각 모델에서 발생한 최대 층간전단응력을 정리한 것으로 모델 B-1의 경우가 가장 유리함을 알 수 있다. 표의 응력비는 모델 B-1에 대한 각 경우의 비이다.

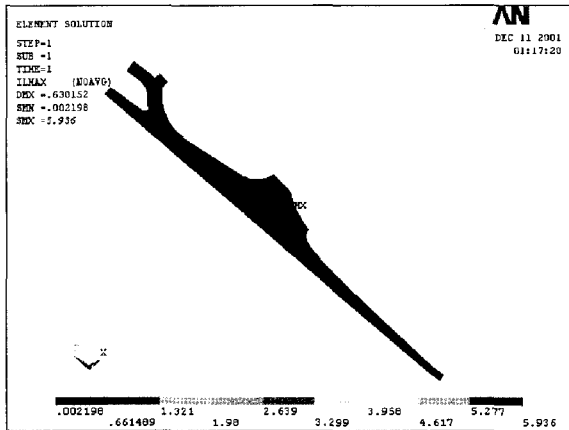
그림 9는 모델 A-1의 경우 발생한 층간전단응력을 나타낸 것이다.

[표 8] 최대 층간전단응력
(단위 : kgf/mm²)

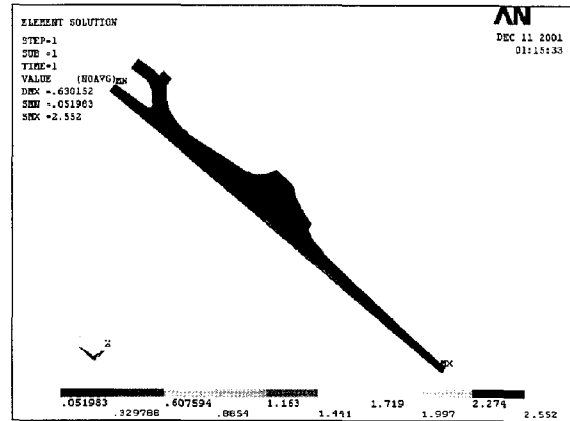
	모델 A-1	모델 A-2	모델 B-1	모델 B-2
응력 값	5.9	7.3	5.5	5.7
응력 비	1.07	1.33	1.0	1.04

[표 9] 최대응력 파손 기준에 따른 파손계수

	모델 A-1	모델 A-2	모델 B-1	모델 B-2
파손계수	2.552	2.591	1.675	1.968
상대비율	1.52	1.55	1.0	1.17



[그림 9] 층간전단응력(모델 A-1)



[그림 10] 파손계수(모델 A-1)

3.3 복합재의 파손평가

복합재에 작용하는 각 방향의 응력과 그 방향의 복합재 강도와의 비를 파손계수라 하며, 최대응력 파손 기준은 응력이 재료 강도를 초과하여 파손계수가 1.0 이상이 되면 복합재에 파손이 발생한다고 가정하는 것이다. 표 9는 최대응력 파손기준을 사용하여 모델에 따라 계산된 파손계수를 정리한 것이다. 파손계수는 복합재 이탈피를 구성하는 복합재 각 층에 대해 계산되며 표 9에는 이 층에서의 최대값을 나타내었다. 모든 경우에 있어서 복합재의 파손이 발생하는 1.0 이상의 값을 갖지만, 이들 중 모델 B-1, 즉 서브세그먼트를 7개의 층으로 구성하고, 원주방향 적층을 추가 적용한 경우가 가장 안전함을 알 수 있다. 한편 복합재 구조물의 파괴는 구조물을 구성하는 모든 복합재 층

에서 파손이 일어나야만 하는 것이기 때문에 이 과정을 정확히 파악하기 위해서는 하중을 점진적으로 증가시키면서 파손된 층을 제거하고 다시 해석을 수행하는 반복 작업이 이루어져야 한다. 그러나 본 해석에 사용된 ANSYS에서는 이 기능을 제공하지 않기 때문에 복합재 한 층에서의 파손계수가 1.0을 넘을 경우 이것이 전체 복합재 구조물의 파손을 의미하는지는 알 수 없으며 이 분야의 연구가 좀 더 필요하다.

그림 10은 모델 A-1의 경우 계산된 파손계수를 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 복합재 이탈피를 불균일 연속체로

취급하여 구조해석을 수행하였다. 복합재 이탈피는 두꺼운 적층 복합재 구조물이기 때문에 이 방법은 모델링 및 계산에 많은 시간이 소요되는 단점이 있으나 별도의 전용 프로그램을 개발할 필요없이 상용 소프트웨어를 그대로 이용할 수 있는 편리성이 있다.

서로 다른 네 종류의 적층 구성을 갖는 복합재 이탈피에 대해 구조강도를 평가하였으며, 그 결과, 서브세그먼트의 두께가 같은 경우 서브세그먼트를 이루는 프리프레그의 적층수가 7개인 경우가 적층수 5개인 경우보다 구조강도면에서 우수함을 알 수 있었으며 또한 이탈피에 원주방향 적층을 추가한 경우가 그렇지 않은 경우보다 구조강도가 우수함을 확인하였다.

이로써 복합재 이탈피 개발 시 복합재 이탈피의 적층 구성에 대한 자료를 제시할 수 있었으며 향후 이 방법의 단점인 해석 소요 시간을 줄이기 위한 모델링 방법에 대해 연구가 계속 이루어져야 할 것이다. 또한 복합재 전체 구조물의 파손 여부를 판단할 수 있는 해석기법의 개발도 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] B.P.Burns, W.H.Drysdale, C.P.R.Hoppel, and T.A.Bogetti, "The Development of Composite Sabots for Kinetic Energy Projectiles", Proc. 19th Inter. Symp. of Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001, pp.347~353.
- [2] 송홍섭, 박인서, 박관진, 김진석, "이탈피용 복합재료의 설계와 현황", 기술보고서 TEDC-511-000692, 국방과학연구소, 2000.
- [3] P.C.Chou, J.Carleone and C.M.Hsu, "Elastic Constants of Layered Media", J. Composite Mater., Vol.6, 1972, pp.80~93.
- [4] T.A.Bogetti, C.P.R.Hoppel and B.P.Burns, "LAMPAT : A Software Tool for the Analysis and Design of Thick Laminated Composite Structures", ARL-TR-890, US Army Research Lab., 1995.
- [5] 송홍섭, 박인서, 최재호, "105밀리용 복합재 이탈피의 성형에 관한 연구", 기술보고서 TEDC-511-010795, 국방과학연구소, 2001.