

섬유강화 적층 복합재 차체 구조물의 파손평가 연구

A Study on the Evaluation of the Failure for Carbody Structures made of Laminated Fiber-Reinforced Composite Materials

신광복* 한성호**
Shin, Kwang-Bok, Hahn, Seong-Ho

ABSTRACT

In order to evaluate the strength of carbody structures of railway rolling stock made of laminated fiber-reinforced composite materials, total laminate approach was introduced. Structural analyses were conducted to check the basic design of the hybrid composite carbody structure of the Korean Tilting Train eXpress(TTX) with the service speed of 180km/h. The mechanical tests were also conducted to obtain strengths of composite laminates. The results shown that all stress components of composite carbody structures were inside of failure envelopes and total laminate approach was recommended to predict the failure of composite carbody structures at the stage of the basic design.

1. 서론

차체의 중량은 차량의 운행비, 선로보수비 등의 유지보수비에 큰 영향을 주며, 중량이 크면 차량의 수용가능 부하도 감소하게 된다. 따라서, 가능한 같은 기능과 강도의 차체라면 중량이 낮은 차체가 경제적인 측면에서 선호되고 있다. 이런 요구조건을 만족시킬 수 있는 복합재 차체(composite carbody structure)는 1990년대 이후 유럽에서 상용화를 위하여 활발히 연구개발을 추진 중에 있으며 일부 제작되어 시운전 중인 차량도 많이 있다. 복합재료는 일반 금속재료에 비해 비강도, 비강성이 높고 알루미늄 차체에 비해 제작공정 수를 줄일 수 있어 제3세대 철도 차량의 차체 재료로서 각광받고 있다. 복합재료 차체는 경량화 측면에서 알루미늄 차체에 비해 최대 20~30% 정도의 차체 무게를 감소시킬 수 있으므로 차체 경량화가 중요한 경전철이나 틸팅차량 차체에 응용이 날로 증가하고 있는 추세이다[1]. 국내에서도 180km/h급의 한국형 틸팅열차(TTX)의 차체 재료로서 복합재료를 선정하여 연구개발 중에 있으며 Fig. 1은 한국형 틸팅열차의 차체 제작을 위한 개념도를 나타내고 있다.

복합재료가 철도차량에 응용되기 시작한 초창기에는 외력이 크게 작용하지 않는 2차 부재(secondary structure)등에 적용되었다. 그러나, 최근 경량화의 중요성으로 인해 차체에 적용되면서 외력 등의 하중을 크게 받는 1차 부재(primary structure)에 사용되는 빈도가 증가하고 있는 실정이다. 따라서, 복합재 차체 개발 시 적절한 규격에 따라 하중시험을 수행하여 구조적 안정성을 제작 전에 평가해야 한다. 강재, 스테인레스강 그리고 알루미늄 차체의 경우 JIS, UIC 등의 철도규격에 의거하여 수직, 압축 및 비틀림 시험 등을 수행하여 구조적 안정성을 평가하는 기준이 마련되어 있지만 복합재 차체의 경우 작용하중에 의한 파손 모드가 복잡하여 기존의 철도차량 시험 규정을 적용하기 위해서는 파손기준 등의 수정이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 철도차량의 기본설계단계에서 전체 적층판 접

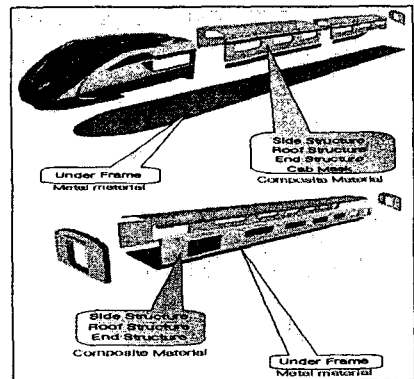


Fig. 1 Manufacturing concept for carbody structures of TTX.

* 한국철도기술연구원 기촌철도기술개발사업단 선임연구원, 정희원(shin955@krii.re.kr)
** 한국철도기술연구원 기촌철도기술개발사업단 선임연구원, 정희원(shhan@krii.re.kr)

근방법(total laminate approach)을 적용하여 섬유강화 적층 복합재 차체 구조물의 파손을 쉽고 빠르게 평가하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 재료선택에 따른 파손평가방법

2.1 등방성 재료에 대한 파손기준식

강재, 스테인레스강 그리고 알루미늄과 같은 등방성 금속재 구조물의 파손특성은 일차원 혹은 이차원적인 균열형태를 갖는다. 즉, 등방성 재료(isotropic material)의 모든 파손이론은 구조물 내의 주응력(σ_1 , σ_2 그리고 σ_3)에 의해 이루어진다. Table 1은 대표적인 등방성 재료의 파손이론을 나타낸 것으로 등방성재료로 제작된 구조물에 대한 파손이론은 연성재료(ductile material)와 취성재료(brittle material)에 의해 구분되어지고 파손의 구분은 항복응력(σ_y , yield stress)과 극한응력(σ_u , ultimate stress)에 의해 판별된다.

연성인 금속재로 제작되는 철도차량 차체의 경우 JIS, UIC 등의 규정에 의하여 하중시험을 수행한 후 발생되는 최대응력이 항복응력이하일 때 구조적으로 안전하다고 판단하고 있다. 따라서, 강재, 스테인레스강 그리고 알루미늄 차체의 경우 하중시험 또는 구조해석을 통해 최대응력 값만 구하면 구조물의 안정성 유무를 쉽게 판단할 수 있게 된다.

Table 1 Failure criteria for isotropic materials

Criterion	Features
Tresca (Maximum Shear Stress) $\max(\sigma_1 - \sigma_2 , \sigma_2 - \sigma_3 , \sigma_3 - \sigma_1) = \sigma_y$	Ductile materials only
Von Mises-Hencky (Max. distorted energy) $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_y^2$	
Maximum Normal Stress $\max(\sigma_1 , \sigma_2 , \sigma_3) = \sigma_u$	Brittle materials only
St. Venant(Maximum Principa strain) $\max(\epsilon_1 , \epsilon_2 , \epsilon_3) = \epsilon_u$	

2.2 섬유강화 복합재료에 대한 파손기준식

복합재료(composite material)는 강화섬유의 섬유방향 기계적 물성치가 섬유수직방향 물성치에 비해 매우 크므로 역학적으로 이방성(anisotropy)을 가진다. 이러한 이방성 특성을 이용하여 원하는 방향의 물성을 증가시켜 구조물의 최적화된 설계를 할 수 있는 특성이 있다. 그러나, 일반 기계 구조물에 많이 사용되는 금속재 구조물의 파손특성은 일차원 혹은 이차원적인 균열형태를 갖지만 복합재료의 파손특성은 매우 복잡한 파손경향을 보인다. 복합재 구조의 파손은 Fig. 2에서 보듯이 모재균열(matrix cracking), 층과 층 사이가 분리되는 층간분리(delamination), 섬유파손(fiber breakage) 그리고 섬유와 모재의 계면파손(fiber-matrix debonding) 등으로 구분되며 이와 같은 파손모드는 복합재 구조물 내부에 혼합된 다차원적인 파손형태로 나타난다[2]. 그러므로, 복합재 구조물을 실제 1차 부재(primary structure)에 적용하기 위해서는 높은 신뢰성과 안정성을 확보해야 하며, 이를 위해서는 복합재 구조물의 파손 특성을 이해하여 구조물에 적용하여야 한다.

복합재 구조물의 초기 파손모드는 주로 기계적 특성이 보강재인 강화섬유에 비해 취약한 모재의 파손으로 이러한 파손모드는 모재 균열이나 층간분리가 발생하고 복합재 구조의 최종 파손형태는 섬유파손으로 나타난다. 그러므로, 복합재 구조물 설계 시 파손의 기준을 모재균열, 층간분리 또는 섬유파손 중에 어느 것으로 잡느냐에 따라 손상허용설계(damage tolerance design)가 결정되게 된다. 섬유강화 복합재 적층판의 파손을 예측하기 위해서는 일반적으로 크게 Table 2와 같이 4가지 분류의 접근방법이 사용된다.

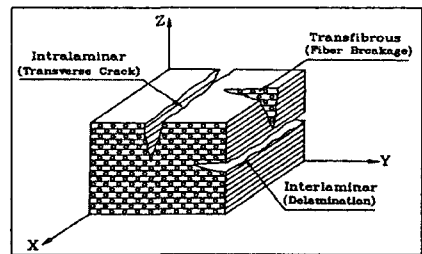


Fig. 2 Damage modes of laminated composites.

Table 2 Failure criteria of laminated composites

Approach Method	Criterion	Features
Ply by ply Approach	Limit Criteria	1)Each layer is considered to be homogeneous and orthotropic 2)Lamination theory is used to obtain the stresses and strains in each layer
	Interaction Criteria	
	Tensor Polynomial Criteria	
Total laminate approach	Direct Laminate Criteria	1)Lamination theory is not needed 2)Requires the laminate strength

2.2.1 한계기준식(Limit Criteria)

이 접근방법에서 복합재 구조물의 파손은 응력(또는 변형률)이 그 값의 한계에 도달할 때 일어난다고 규정한다. 응력성분간의 상호작용(interaction)은 대부분 고려되지 않고 다른 값을 갖는 인장과 압축 강도를 허용한다. 이 접근방법에서는 파손의 시작(onset to failure)과 파손모드(failure mode)를 예측할 수 있다. 한계기준식 분류에 해당하는 대표적인 파손기준식은 maximum stress criterion, maximum strain criterion [5] 등이 있으며 한계기준식들의 특징은 해석 시 단순함을 도입하여 빠른 설계 점검에 사용할 수 있다는 것이다. 이 외에 Stowell-Liu criterion, Kelly-Davies criterion 그리고 maximum shear stress criterion 등이 한계기준식 분류에 해당된다[3].

2.2.2 상호작용 기준식(Interaction Criteria)

이 접근방법은 기본적으로 곡선-맞춤 기술(curve-fitting technology)을 이용하고 있어 완전한 이론적 기초는 부족하다. 파손은 응력의 2차식(quadratic formula)을 만족할 때 발생한다고 하였으며 파손의 시작만을 예측할 수 있으며 파손모드는 예측할 수 없고 상호작용변수(interaction term)를 구하기 위해 이축 시험(biaxial test)을 해야 하는 경우도 있다. 상호작용 기준식 분류에 해당하는 대표적인 파손기준식들은 Hill criterion[4], Azzi-Tsai criterion[5], Norris criterion[6] 그리고 Hoffman criterion[7] 등이 있다.

2.2.3 텐서다항식 기준식 (Tensor Polynomial Criteria)

이 접근방법은 상호작용 기준식(interaction criteria)과 마찬가지로 곡선-맞춤 기술을 사용하지만 보다 일반화되어 있어 다소 수학적으로 어려움이 있다. 텐서다항식 기준식에서는 파손모드는 예측할 수 없고 단지 파손의 시작만을 예측할 수 있다. 그러나, 인장과 압축강도에 대해 서로 다른 값을 가지는 것을 고려하였다. 상호작용 항(interaction term)의 평가는 이축시험을 수행해야 하는 어려움이 있다. 대표적인 텐서다항식 기준식에는 Tsai-Wu criterion[8], Ashkenazi criterion, Gol'denblat-Kopnov criterion 등이 있다.

2.2.4 직접적인 적층판 기준식 (Direct Laminate Criteria)

앞에서 설명된 한계기준식, 상호작용 기준식 그리고 텐서다항식 기준식은 복합재료의 일방향 적층판에 적용할 수 있다. 이것은 각 플라이(ply)의 파손을 점검하기 위해서는 각 층(layer)에 발생하는 응력을 첫 번째로 얻어야 가능하다는 것이다. 그러나, 직접적인 적층판 기준식은 기본적으로 전체 적층판(whole laminate)에 직접 적용할 수 있다는 점이 다르다. 이러한 직접적인 적층판 기준식은 적층판 이론(laminate theory)과 구성성분 가정(constitutive assumption)을 내포하지 않고 파손모드는 예측할 수 없다. 이축시험은 상호작용 항을 평가하기 위해 요구된다. 이 접근방법의 가장 커다란 단점은 적층판의 강도를 매번 새로운 설계 시 시험으로 결정해야 한다는 것이다. 대표적인 직접적인 적층판 기준식에는 Puppo-Evensen criterion[9], Guess-Gerstle criterion[10] 등이 있다.

1) Puppo-Evensen Criterion

Puppo-Evensen 파손기준식에서 적층판은 균질이면서 이방성이라 가정하고 있으며 직교이방성일 필요는 없다. 식(1)은 평면응력상태에서의 Puppo-Evensen 파손기준식을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \text{for } \gamma \leq 1, \quad F_{\text{Puppo-Evensen}} &= \left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 - \gamma \left(\frac{X}{Y}\right) \left(\frac{\sigma_x}{X}\right) \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right) \\
 &\quad + \gamma \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 = 1 \\
 &\quad \gamma \left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 - \gamma \left(\frac{X}{Y}\right) \left(\frac{\sigma_x}{X}\right) \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right) \\
 &\quad + \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 = 1
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, 상호작용 계수(interaction factor) γ 는 식(2)와 같이 주어진다.

$$\gamma = \frac{3S^2}{XY} \quad (2)$$

식(1)에서 사용된 강도 X, Y 그리고 S는 일반좌표계(general coordinate system)와 관련되어 있으며 σ_x , σ_y 그리고 τ_{xy} 는 일반좌표계에서 적층판의 응력성분을 나타낸다.

Puppo-Evensen 기준식은 층(layer)내의 응력을 분석하는 적층판 이론이 요구되지 않지만 강도 X, Y 그리고 S등을 일반좌표계에 대해 시험을 통해 구해야 한다.

2) Guess-Gerstle Criterion

Guess와 Gerstle은 2개의 적층판 파손기준식을 사용하였다. 첫 번째는 복합재 적층판에 직접적으로 적용하는 maximum stress criterion이며 두 번째는 응력성분간에 상호작용을 포함하기 위해 적층판에 직접적으로 다시 적용할 수 있는 기준식을 사용하였다. 이것은 Norris의 파손기준식과 유사하며 전단 하중의 부재로 그들의 파손기준식은 식(3)과 같이 된다.

$$F_{\text{Guess-Gerstle}} = \left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_x}{X} \frac{\sigma_y}{Y} + \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

3. 한국형 틸팅차량 차체구조물의 기본설계 검증

앞의 파손기준식들에서 보듯이 등방성 재료의 경우 파손이론식은 어렵기 않게 구조물에 적용할 수 있다. 그러나, 복합재료의 경우 파손경향이 복잡한 만큼 파손기준식도 다양하고 구조물에 적용하기도 쉽다. 따라서, 설계단계, 적용대상, 운행

Table 3 Proposed failure criterion for the composite carbody

Stage	Proposed Failure Criterion	Reasons
Preliminary Design	Total laminate approach	Simple to check the design.
Detailed Design	Total laminate approach & Ply by ply approach	1) To know the onset of failure and failure modes. 2) To know the first ply failure 3) To verify the design before manufacturing
Manufacturing	Test	-

조건 그리고 재료 등에 따라 적절한 파손기준식을 선택하여 적용해야 할 것이다. 본 연구에서는 Table 3과 같이 설계단계별로 파손기준식을 적용하여 복합재 차체 구조물의 구조 안정성을 검증하는 방법을 제시하고 대상으로는 현재 연구 개발중인 180km/h급의 한국형 틸팅열차(TTX)의 기본설계를 택하였다.

3.1 선택 재료 및 물성

복합재 차체 구조물에 대한 파손평가를 위하여 180km/h 급의 한국형 틸팅열차(TTX) 차체 구조물을 대상으로 선정하였다. Fig. 3은 한국형 틸팅열차 3차원 CATIA 모델을 나타내고 있다. 기본설계 단계에서 틸팅차체의 재료로서 알루미늄 6005-T6과 HFG CU-125NS 그래파이트/에폭시 복합 재료를 고려하였다. HFG CU-125NS 그래파이트/에폭시에 대한 일방향 물성 시험은 ASTM기준에 따라 수행하였다. 각 시험당 6개의 시편을 사용하였으며 오토클레이브 성형으로 제작하였다. 복합재료의 물성치 시험은 폐회로 써보 유압재료 시험기인 Instron 1350을 사용하였고 변형도 증폭기는 스트레인 게이지 컨디션너 2100 시스템을 사용하였다. Table 4는 HFG CU-125NS 그래파이트/에폭시 복합재료에 대한 일방향 물성(장성, 강도) 결과를 나타내고 있으며 TP는 인장물성(Tensile Property), CP는 압축물성(Compressive Property)를 의미한다.

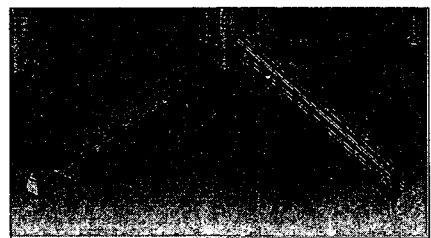


Fig. 3 3D basic drawing for TTX.

Table 4 Mechanical properties of HFG CU-125NS graphite/epoxy

Type	Stiffness (MPa)	Strength (GPa)
Longitudinal TP	147.45	1834.90
Transverse TP	9.24	38.12
Longitudinal CP	134.95	1165.27
Transverse CP	5.07	42.11
Shear Property (12 plane)	6.51	82.43

3.2 알루미늄 차체에 대한 파손 평가

알루미늄으로 차체를 제작할 경우 JIS E 7105에 따라 수직하중 및 비틀림 하중 하에서 구조해석을 수행하여 기본설계에 대한 구조안정성을 평가해야 한다. 해석은 ANSYS70을 이용하였고 지붕, 사이드프레임, 엔드 프레임, 언더프레임 등은 셸요소(shell 63), 티-슬롯(T-slot)은 빔요소(beam 188)를 사용하였다. Table 5는 해석에 사용된 알루미늄 6005A-T6의 물성치를 나타내고 있다. 이때, 한국형 킬팅열차의 경우 수직하중은 46.68톤, 비틀림하중은 4톤·m의 외력이 가해진다. Fig. 4는 수직하중 하에서 한국형 킬팅열차 동력차에 대한 최대응력 분포를 나타낸다. 결과에서 보듯이 알루미늄 차체에 대한 최대응력은 세 번째와 네 번째 창문 사이의 아랫부분에서 91.9MPa 정도로 항복응력 207MPa에 비해 1/3에 해당되므로 구조적 안정성은 확보되었음을 알 수 있다. 비틀림 하중 하에서도 최대응력이 79.3MPa로 항복응력에 비해 매우 낮았다. 이때, 알루미늄 동력차 차체의 무게는 7.54톤이었으며 Table 6은 알루미늄 차체에 대한 파손평가기준치와 결과를 종합적으로 나타낸 것이다.

Table 5 Material properties of aluminum 6005A-T6

Materials	Stiffness (GPa)		Poisson's ratio (ν)	Density (kg/mm ³)
	E=69	G=26	0.33	2.7×10 ⁻⁹
Al 6005A-T6	E=69	G=26	0.33	2.7×10 ⁻⁹

Table 6 Results of the structural analysis for aluminum carbody structure

	Limit value	Present value	State
Max. stress (MPa)	< 207 (yield stress)	86.24 (under vertical loading)	Safe
		73.46 (under twist loading)	Safe
Deflection (mm)	< 15.90	14.16 (under vertical loading)	Safe
Weight (ton)	-	7.88	-

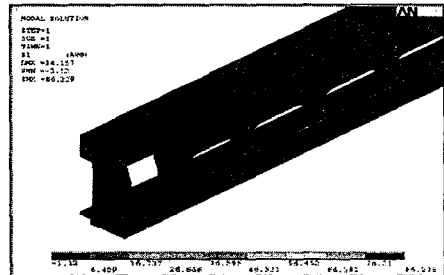


Fig. 4 Maximum stress under vertical load. (Aluminum carbody structure)

3.3 복합재 차체에 대한 파손 평가

3.3.1 하이브리드 복합재 차체 구조해석

복합재 차체의 경우도 JIS E 7105에 따라 수직하중 및 비틀림 하중 하에서 구조해석을 수행하였다. 복합재 차체의 경우, 적층판은 $[0_n/\pm 45_{2n}/90_n]_s$ 로 구성하였으며 적층판 물성은 일방향 물성측정결과를 토대로 적층판 공학상수 (laminare engineering constants)를 사용하였다. 이때, 복합재 차체 구조는 언더프레임은 중공 압출재 알루미늄 6005-T6, 나머지 부위(지붕, 사이드프레임, 엔드프레임 등)는 적층 복합재를 적용하는 하이브리드 복합재 차체(hybrid composite carbody) 구조로 하였다. 해석에 사용된 적층 복합재 차체의 물성은 Table 7과 같고 Fig. 5은 수직하중 하에서 하이브리드 복합재 차체의 응력분포 결과를 나타내고 있다. Table 8은 하이브리드 복합재 차체에 대한 파손평가기준치와 결과를 종합적으로 나타낸 것이다. 언더프레임(알루미늄)의 최대응력은 모든 경우 항복응력 이하를 유지하므로 구조적 안정성을 확인할 수 있다. 그러나, 복합재 차체의 경우에는 복합재료의 파손경향이 일차원 혹은 이차원이 아니므로 파손평가는 알루미늄과 달리 단순히 최대응력만으로는 평가할 수 없다. 따라서, 층간 접근방법(ply by ply approach) 또는 전체 적층판 접근방법(total laminate approach)을 사용하여 평가해야 한다. 본 논문에서

Table 7 Material properties of HFG-CU125NS laminate

Materials	Applied part	Laminate	Stiffness (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/mm ³)
HFG-CU125NS	Roof, sideframe, endframe	$[0_n/\pm 45_{2n}/90_n]_s$	$E_1=E_2=57.61$ $G_{12}=G_{13}=22.21$	$\nu_{12}=\nu_{13}=0.297$	1.6×10^{-9}

Table 8 Results of the structural analysis for hybrid composite carbody structure

	Type	Limit value	Present value	State
Max. stress (MPa)	underframe (aluminum)	< 207	59.68 (under vertical loading) 73.39 (under twist loading)	Safe
	Other parts (composite)	Suitable criterion	75.23 (under vertical loading) 68.56 (under twist loading)	Must to check using eq(1) or (3)
Deflection (mm)	-	< 15.90	15.11 (under vertical loading)	Safe
Weight (ton)	-	-	6.25	20% ↓

서는 다음 절에 전체 적층판 접근방법을 이용하여 복합재 차체 구조물의 파손을 평가하였다.

하이브리드 복합재 차체와 알루미늄 차체의 해석 결과를 비교하면, 하이브리드 차체의 최대응력은 알루미늄 차체에 비해 다소 줄어드는 경향을 보이고 있으나 반면 언더프레임의 처짐은 증가하고 있다. 그러나, 현재 처짐량이 안전한 범위에 있고 하이브리드 차체가 알루미늄 차체에 비해 약 20%의 무게 절감 효과를 가지므로 차체 경량화 및 구조안정성 측면에서 하이브리드 복합재 차체가 매우 유리함을 알 수 있다.

3.3.2 적층판 강도 측정 시험

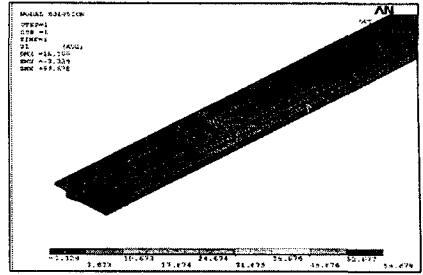
식(1) 또는 식(3)의 전체 적층판 접근방법을 이용하여 복합재 차체 구조물의 파손 평가를 위해서는 적층판에 대한 물성 측정 시험하여 기본적인 데이터를 확보해야 한다. 본 연구에서는 적층판 강도 측정을 위해 HFG CU-125NS 그래파이트/에폭시 적층판을 오토클레이브 성형 후 시편을 제작하였다. 시편갯수는 시험당 6개였고 사용된 적층판의 구성은 $[0_3/\pm 45_6/90_3]_s$ 로 두께는 3.0mm이다. 적층판 두께를 3.0mm로 제작하여 강도를 측정 한 이유는 복합재 차체의 가장 높은 응력이 발생하는 부위와 기본골조의 두께가 3.0mm로 설계되었기 때문이다. Table 9는 HFG CU-125NS 그래파이트/에폭시 적층판에 대한 강도 측정 결과를 나타내고 있으며 Fig. 6은 복합재 적층판에 대한 강도시험 후 파손된 시편의 형상을 나타내고 있다. 적층판에 대한 강성(laminate stiffness)는 $E_{11}=E_{22}=57.69\text{GPa}$, $G_{12}=G_{13}=22.42\text{GPa}$ 로 해석에 사용된 적층판 공학상수(Table7)와 거의 일치함을 알 수 있다.

Table 9 Strengths for HFG CU-125NS graphite/epoxy laminates

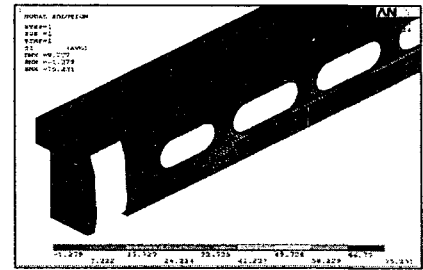
Laminate	Type	Strength(MPa)
$[0_3/\pm 45_6/90_3]_s$	X=Y	795.48
	S	128.92

3.3.3 전체 적층판 접근방법에 의한 파손평가

식(1)의 Puppog-Evensen 파손기준식 또는 식(3)의 Guess-Gerstle 파손기준식을 적용하기 위해서 필요한 변수(X, Y, S)는 앞 절의 적층판 강도 시험을 통해 얻었다. 따라서, 파손 평가를 할 대상 구조물의 응력성분(σ_x , σ_y 그리고 τ_{xy})만 구하면 손쉽게 구조안정성을 판단할 수 있게 된다. 복합재 차체의 경우 식(1) 또는 식(3)을 적용하기 위해서는 구조해석을 통한 노달 응력(nodal stress)이 요구된다. 그러나, 철도차량의 차체 구조해석 시 사용되는 노드의 수는 100,000개 이상이므로 모든 노드에서 파손 평가를 수행하는 것은 시간 낭비일 뿐만 아니라 불필요한 작업이 된다. 따라서, 전체 구조에 대한 응력해석을 수행한 후 응력이 집중되는 부위에서 파손 평가를 하는 것이 효율적이다. 복합재 킬팅차체의 경우 Fig. 5(b)에서 보듯이 세 번째와 네 번째 창문사이의 아랫부분에서 응력집중 현상이 발생하므로 그 부근을 중심으로 일부 노드에 대해서만 파손평가를 수행하면 된다. 선택부위에서 노달 응력성분을 식(1)과 식(3)에 대입한 후 파손지수(failure index)를 구하면, 가장 높게 발생하는 파손지수 값은 Table 10과 같다. 이때, 계산에 사용된 노달 응력성분은 셸 요소 두께방향으로 3개(top/middle/bottom)에서 취하였다. 비틀림 하중의 경우, 발생하는 응력값이 수직하중에 비해 작기 때문에 파손평가를 수행할 필요는 없다. Table 10의 결



(a) Aluminum part(underframe)



(b) Composite part

Fig. 5 Maximum stress under vertical load. (Hybrid composite carbody structure)



Fig. 6 Failure mode of HFG CU-125NS laminate under longitudinal loading.

Table 10 Failure indexes for composite carbody under vertical loading

Criterion	Standard	Value of failure index	State
Puppog-Evensen	< 1	0.0096	Safe
Guess-Gerstle	< 1	0.0089	Safe

과에서 확인할 수 있듯이 현재 한국형 틸팅열차의 하이브리드 복합재 차체는 구조적으로 매우 안전한 상태임을 확인할 수 있다.

파손지수(failure index)를 구하지 않고 쉽게 파손 유무를 판단할 수 있는 또 다른 방법은 파손영역을 도식(failure envelope)으로 표현하는 것이다. Puppo-Evensen과 Guess-Gerstle의 파손기준식에 대한 파손영역은 식(1)과 식(3)을 이용하여 표현하면, Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 보듯이 구조해석 등의 방법을 이용하여 적층판의 응력성분을 알아내면 그 값이 안전한 영역에 있는 지 파손영역에 있는 지 알 수 있는 것이다. Fig. 7의 결과에서 다시 확인할 수 있듯이 한국형 틸팅열차의 복합재 차체 구조물에 발생하는 응력성분은 모두 안전한 영역에 분포하고 있다.

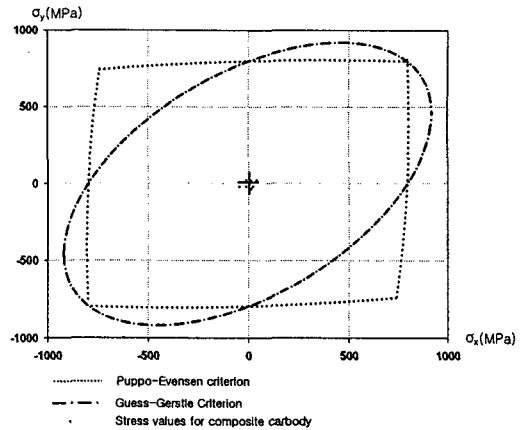


Fig. 7 Failure envelopes for total laminate approach.

본 연구에서 제안한 전체 적층판 접근방법은 복합재 적층판의 강도만 알면 손쉽게 복합재 구조물의 파손을 예측할 수 있는 장점을 가지고 있어 복합재 차체의 기본설계 검증을 위하여 매우 유용하다고 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 180km/h급 한국형 틸팅열차의 하이브리드 복합재 차체 구조물에 대한 파손평가방법을 연구하였다. 강재, 스테인레스강 그리고 알루미늄 차체와 같이 등방재료를 사용할 경우, 파손평가는 항복응력을 기준으로 삼아 쉽게 판단할 수 있지만 복합재의 경우에는 판단형태가 다양한 만큼 많은 파손기준식들이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 복합재 차체의 파손평가를 설계단계별로 적용하는 방법을 제안하였으며 기본설계 단계에서 전체 적층판 접근방법을 한국형 틸팅열차의 하이브리드 복합재 차체 파손평가에 적용함으로써 쉽고 빠르게 구조안정성을 평가하는 방법을 제시하였다. 이에 다음과 결론을 얻었다.

- i) 알루미늄 차체와 하이브리드 복합재 차체에 대해 각각 구조해석을 수행하여 기본설계에 대한 구조안정성을 평가하였으며 강성 및 강도 설계 측면에서 모두 안전함을 확인하였다.
- ii) 복합재 차체의 기본설계 단계에서 파손예측을 전체 적층판 접근방법을 적용함으로써 파손예측을 수행하였다. 전체 적층판 접근방법은 기본설계단계에서 복합재 구조물에 대해 적층판 강도시험만을 수행하면 쉽고 빠르게 설계 검증을 할 수 있음을 증명하였다.
- iii) 전체 적층판 접근방법은 상세설계 단계에서도 설계보완을 위해 사용할 수 있으며 층간의 접근방법과 함께 사용하면 보다 향상된 파손예측을 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) Abaqus User's Conference, Maastricht, Netherlands, May 30-June 1, 2001, pp. 1-16.
- 2) S. G. Lim and C. S. Hong, "Effect of Transverse Cracks on the Thermomechanical Properties of Cross-Ply Laminated Composites," Composites Science and Technologies, Vol. 34, 1989, pp. 145-162.
- 3) S. W. Tsai and H. T. Hahn, "Introduction to Composite Materials", Technomic Publishing Co., 1980.
- 4) R. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University Press, 1950.
- 5) V. D. Azzi and S. W. Tsai, "Anisotropic Strength of Composites", Experimental Mechanics, Vol. 5, 1965, pp. 283-288.

- 6) K. B. Shin, C. G. Kim, C. S. Hong and H. H. Lee, "Prediction of Failure Thermal Cycles in Graphite/Epoxy Composite Materials under Simulated Low Earth Orbit Environments", Composite Part B : Engineering, Vol. 31, No. 3, 2000, pp. 223-235.
- 7) O. Hoffman, "The Brittle Strength of Orthotropic Materials", Journal of Composite Materials, Vol. 1, 1967, pp. 200-206.
- 8) S. W. Tsai and E. M. Wu, "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials", Journal of Composite Materials, Vol. 5, 1971, pp. 58-80.
- 9) A. H. Puppo and H. A. Evensen, "Strength of Anisotropic Materials under Combined Stresses", AIAA Journal, Vol. 10, 1972, pp. 468-474.
- 10) T. R. Guess and F. P. Gerstle, "Deformation and Fracture of Resin Matrix Composites in Combined Stress States", Journal of Composite Materials, Vol. 11, 1977, pp. 146-163.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.