

論文

전체 적층판 접근법을 이용한 섬유강화 적층 복합재 차체 구조물의
파손평가 연구신광복^{*,*}, 구동회^{*}A Study on the Evaluation of the Failure for Carbody Structures made of Laminated
Fiber-Reinforced Composite Materials Using Total Laminate ApproachKwang Bok Shin^{*,*}, Dong Hoe Koo^{*}

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 hybrid composite carbody structures 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 show that all stress components of composite carbody structures are inside of failure envelopes and total laminate approach is recommended to predict the failure of hybrid composite carbody structures at the stage of the basic design.

초 록

섬유강화 적층 복합재 차체 구조물의 강도를 평가하기 위해 전체 적층판 접근방법의 적용을 제시하였다. 180km/h급의 한국형 틸팅열차의 하이브리드 복합재 차체 기본설계를 검증하기 위해서 구조해석을 수행하였으며 또한 복합재 적층판의 강도를 구하기 위해 기계적 물성시험을 수행하였다. 결과적으로, 한국형 틸팅열차의 복합재 차체 구조물에서 발생하는 응력값들은 모두 파손영역의 안전한 범위 내에 존재하였으며 전체 적층판 접근방법은 초기 기본설계 단계에서 하이브리드 복합재 차체 구조물의 파손을 예측하는 데 매우 유용함을 증명하였다.

Key Words : 전체 적층판 접근방법(total laminate approach), 파손기준식(failure criterion), 틸팅열차(tilting train), 하이브리드 복합재 차체(hybrid composite carbody)

1. 서 론

철도차량의 차체(carbody structure)는 각종 화차, 동차, 기관차, 객차, 전동차, 경전철, 고속전철 등의 차량 기본 골격을 구성하는 골조를 총칭하며, 차량의 기능 및 안전성, 외관, 승차감, 진동 및 소음 등을 결정하는 가장 중요하고 기본적인 토대를 제공한다. 사용재질에 따라 차체의 종류

를 분류하면 크게 강재 차체, 스테인레스강 차체, 알루미늄 차체 그리고 복합재료 차체 등으로 구별할 수 있다.

강재차체는 경량화 및 유지보수성에 있어서 스테인레스강 차체나 알루미늄 차체에 비해 떨어지지만 가장 손쉽게 철도차량의 차체에 적용될 수 있는 재질로서, 현재 화차, 각종 동차, 기관차, 객차, 전동차 언더프레임의 후판부재 등에 주로 사용되고 있다. 스테인레스강 차체는 내식성, 안

*+ 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 시스템엔지니어링팀 선임연구원, 교신저자(E-mail:shin955@krii.re.kr)

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 책임연구원

전성, 차체의 경량화 가능성, 유지보수성, 외관 등이 우수하여 현재 국내에서 생산되는 객차, 동차, 전동차 등에 광범위하게 적용되고 있다. 알루미늄 차체는 초기 기본 차체 구조를 그대로 유지하고 재질만 알루미늄 계열로 한 것이었으나, 근래에는 알루미늄 압출기술의 뒷받침에 힘입어 차체의 전장에 걸쳐 압출재를 대폭 적용하여 제작공정의 단순화 및 차체의 경량화를 실현한 중공 압출재 구조의 알루미늄 차체가 적용되고 있다. 국내에서의 알루미늄 차체 개발은 표준화 전동차 및 G7 고속전철 등의 국책과제로 채택되어 1994년부터 개발이 시작되어 제작에 성공한 바 있고 광주시 전동차 및 인천 신공항 철도에 적용하고 있다[1].

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)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 철도차량의 차체 재료로서 각광받고 있다. 복합재료 차체는 경량화 측면에서 알루미늄 차체에 비해 최대 20~30 % 정도의 차체 무게를 감소시킬 수 있으므로 차체 경량화가 중요한 경량전철이나 틸팅열차(tilting train)에 응용이 날로 증가하고 있는 추세이다[2]. Fig. 1은 유럽에서 개발된 복합재 차체의 예를 보여주고 있으며 국내에서도 180 km/h급의 한국형 틸팅열차(TTX)의 차체 재료로서 복합재료를 선정하여 연구개발 중에 있다. Fig. 2는 한국형 틸팅열차의 차체 제작을 위한 개념도를 나타내고 있다.

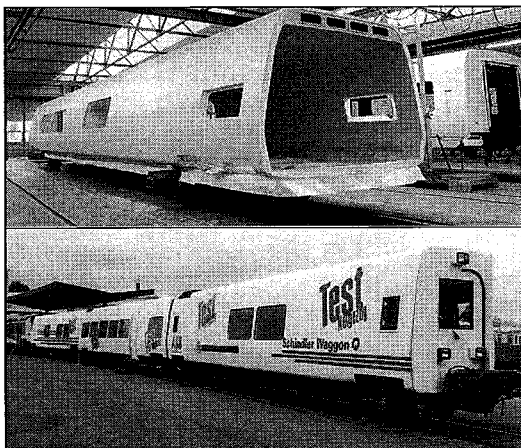


Fig. 1 Carbody structure of tilting train made of composites.

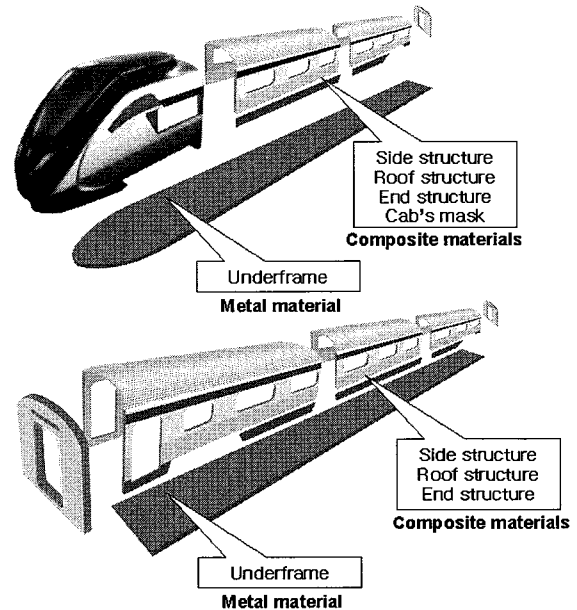


Fig. 2 Manufacturing concept for carbody structures of TTX.

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 안전성을 제작 전에 평가해야 한다. 강재, 스테인레스강 그리고 알루미늄 차체의 경우 JIS, UIC 등의 철도규격에 의거하여 수직, 압축 및 비틀림 시험 등을 수행하여 구조적 안전성을 평가하는 기준이 마련되어 있지만 복합재 차체의 경우 작용하중에 의한 파손모드가 복잡하여 기존의 철도차량 시험 규정을 적용하기 위해서는 파손기준 등의 수정이 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 철도차량의 기본설계단계에서 전체 적층판 접근법(total laminate approach)을 적용하여 섬유강화 적층 복합재 차체 구조물의 파손을 쉽고 빠르게 평가하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 재료에 따른 차체구조물의 파손평가방법

재료강도(strength of material)는 그 재료를 사용하는 구조물의 설계에 있어서 매우 중요한 물성이다. 파손은 작용하중이 재료가 수용할 수 있는 하중의 한계에 도달할 때 재료 내에서 일반적으로 발생한다. 따라서, 설계자는 차량이 극한의 운행조건 하에서도 구조적으로 파손이 일어나지

않게 설계하여야 하며 이를 위해서 설계자는 사용 재료의 파손 특성을 파악한 후 설계를 수행해야 한다. 철도차량의 차체는 강재, 스테인레스강 그리고 알루미늄과 같은 등방성 재료를 이용한 경우와 이방성 특성을 갖는 복합재료를 이용한 경우로 크게 나누어지기 때문에 제작하려는 차체의 재료가 무엇인지 결정한 후 등방성 재료와 이방성 재료에 대한 파손기준식들을 파악하여 철도차량 차체구조물에 어떻게 적용할 지를 결정하는 것이 중요한 설계인자가 된다.

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 것이다. 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 발생하는 최대응력이 항복응력 이하일 때 구조적으로 안전하다고 판단하고 있다. 따라서, 강재, 스테인레스강 그리고 알루미늄 차체의 경우 하중시험 또는 구조해석을 통해 최대응력 값만 구하면 구조물의 안전성 유무를 쉽게 판단할 수 있게 된다.

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 기

계 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 [3-4]. 그러므로, 복합재 구조물을 실제 1차 부재(primary structure)에 적용하기 위해서는 높은 신뢰성과 안전성을 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 층간분리로 발생하고 복합재 구조의 최종 파손형태는 섬유파손으로 나타난다. 그러므로, 복합재 구조물 설계 시 파손의 기준을 모재균열, 층간분리 또는 섬유파손 중에 어느 것으로 잡느냐에 따라 손상허용 설계(damage tolerance design)가 결정되게 된다. 섬유강화 복합재 적층판의 파손을 예측하기 위해서는 일반적으로 크게 Table 2와 같이 4가지 분류의 접근방법이 사용된다.

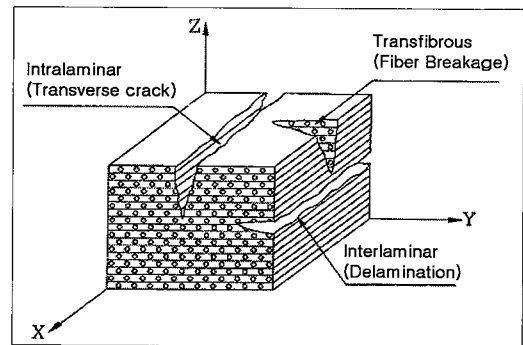


Fig. 3 Damage modes of laminated composites.

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 Principal strain) $\max\{ \epsilon_1 , \epsilon_2 , \epsilon_3 \} = \epsilon_u$	

ϵ_i ($i=1,2,3$) : 주 변형률(principal strain)

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

Table 3 The limit criteria

Criterion	Features
Maximum Stress Criterion $\sigma_1 = X_t$ or X_c $\sigma_2 = Y_t$ or Y_c $\tau_{12} = S$	1) No interaction between the stresses 2) Failure mode is determined
Maximum Strain Criterion $\epsilon_1 = \epsilon_{1t}$ or ϵ_{1c} $\epsilon_2 = \epsilon_{2t}$ or ϵ_{2c} $\gamma_{12} = \gamma_u$	1) Provides some interaction between the stresses 2) Failure mode is determined

$\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$: 주재료방향(principal material direction)내에서의 응력성분; X_t, Y_t : 섬유방향과 섬유직각방향의 인장강도; X_c, Y_c : 섬유방향과 섬유직각방향의 압축강도; S : 1-2평면내의 전단강도; $\epsilon_1, \epsilon_2, \gamma_{12}$: 주재료방향내의 변형률 성분; $\epsilon_{1t}, \epsilon_{2t}$: 섬유방향과 섬유직각방향 인장파손 변형률; $\epsilon_{1c}, \epsilon_{2c}$: 섬유방향과 섬유직각방향 압축파손 변형률; γ_u : 1-2방향 전단파손 변형률

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 파손모드를 예측할 수 있다. 한계기준식(limit criterion) 분류에 해당하는 대표적인 파손기준식은 Table 3에서 보듯이 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.

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 상호작용항(interaction term)을 구하기 위해 이축 시험(biaxial test)을 해야 하는 경우도 있다. 상호작용 기준식 분류에 해당하는 대표적인 파손기준식들은 Table 4와 같이 Hill criterion[6], Azzi-Tsai criterion[7], Norris criterion[8] 그리고 Hoffman criterion[9] 등이 있다.

이외에도 Marin criterion, Franklin criterion, Fischer criterion 그리고 Yamada-Sun criterion 등이 상호작용 기준식 분류에 해당된다.

Table 4 The interaction criteria

Criterion	Features
Hill Criterion For plane stress state, $\frac{\sigma_1^2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}\right)\sigma_1\sigma_2 + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1$	1) Failure envelope is a smooth curve, but failure mode is not determined 2) Do not consider different strengths for tensile and compressive modes
Azzi-Tsai Criterion For transversely isotropic, $\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1$	1) Simple to use 2) Recommendation for quick design check
Norris Criterion For plane stress state, $\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{XY} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1$ $\frac{\sigma_2^2}{Y^2} = 1$ $\frac{\sigma_1^2}{X^2} = 1$	1) It is more than Azzi-Tsai. 2) Proved to be good for fatigue test results
Hoffman Criterion For transversely isotropic, $\frac{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{X_c - X_t}{X_c X_t} \sigma_1 + \frac{Y_c - Y_t}{Y_c Y_t} \sigma_2 + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1$	1) Similar to Hill but accounts for different strengths in tension and compression

X : 섬유방향 인장강도; Y : 섬유직각방향 인장강도; Z : 두께방향 인장강도;
 S : 1-2방향 전단강도

2.2.3 텐서다항식 기준식(Tensor Polynomial Criteria)

Table 5 The Tensor polynomial criteria

Criterion	Features
Tsai-Wu Criterion For Plane stress state, $\left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 + \left(\frac{1}{X_t X_c}\right)\sigma_1^2 + \left(\frac{1}{Y_t Y_c}\right)\sigma_2^2 + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1$	1) Simplest of tensor polynomial but still requires biaxial test data

F_{12} : Fourth order strength tensor

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 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 Table 5와 같이 Tsai-Wu criterion[10]이 있다.

Tsai-Wu 파손기준식 외에 Ashkenazi criterion, Gol'denblat-Kopnov criterion 등이 텐서다항식 기준식 분류에 해당된다.

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(total 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[11], Guess-Gerstle criterion[12] 등이 있다.

1) Puppo-Evensen 기준식

Puppo-Evensen 파손기준식에서 적층판은 균질하면서 이방성이라 가정하고 있으며 직교이방성일 필요는 없다. 식 (1)은 $\nu \leq 1$ 이고 평면응력상태에서의 Puppo-Evensen 파손기준식을 나타낸다.

for $\gamma \leq 1$,

$$F_{\text{Puppo-Evensen}} = \left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 - \gamma \left(\frac{X}{Y}\right) \left(\frac{\sigma_x}{X}\right) \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right) + \gamma \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

$$F_{\text{Puppo-Evensen}} = \gamma \left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 - \gamma \left(\frac{X}{Y}\right) \left(\frac{\sigma_x}{X}\right) \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right) + \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 = 1$$

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

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

상호작용계수 γ 는 등방성재료인 경우 1, 직물 같은 재료(fabric-like material)인 경우 0이 된다.

Puppo-Evensen 파손기준식은 상호작용계수 γ 가 1보다 작을 경우 식 (1)과 같이 두 개의 타원식(two distinct ellipse)으로 표현되고 타원들이 교차되는 영역이 파손면(failure surface)으로 정의된다. 식 (1)에서 사용된 X , Y 그리고 S 는 적층판 축(laminate axes)에 대한 강도를 나타내며 σ_x , σ_y 그리고 τ_{xy} 는 적층판 축에 대한 응력성분을 나타낸다. $\gamma > 1$ 의 경우는 거의 없으므로 생략하였다. Puppo-Evensen 기준식은 층(layer)내의 응력을 분석하는 적층판 이론이 요구되지 않지만 강도 X , Y 그리고 S 등을 시험을 통해 구해야 한다.

2) Guess-Gerstle 기준식

Guess와 Gerstle은 2개의 적층판 파손기준식을 사용하였다. 첫 번째는 복합재 적층판에 직접적으로 적용하는 최대 응력 기준식(maximum stress criterion)이며 두 번째는 응력성분간에 상호작용을 포함하기 위해 적층판에 직접적으로 다시 적용할 수 있는 기준식을 사용하였다. 이것은 Norris의 파손기준식과 유사하며 전단하중의 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 킬팅열차 차체구조물의 파손평가

앞의 파손기준식들에서 보듯이 등방성 재료의 경우 파손이론식은 어렵지 않게 구조물에 적용할 수 있다. 그러나, 복합재료의 경우 파손경향이 복잡한 만큼 파손기준식도 다양하고 구조물에 적용하기에도 쉽지 않다. 따라서, 설계단계, 적용대상, 운행 조건 그리고 재료 등에 따라 적절한 파손기준식들을 선택하여 적용해야 할 것이다.

Table 6 Proposed failure criterion for design of 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	-

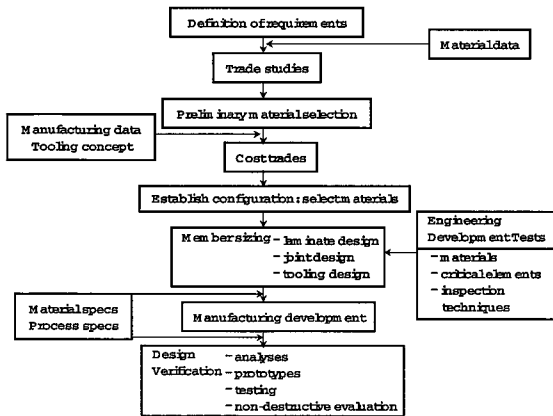


Fig. 4 Design process.

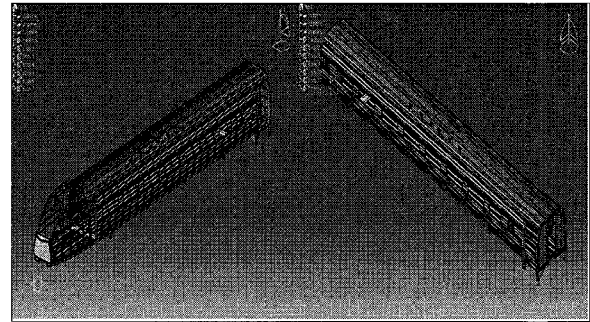
본 연구에서는 Table 6과 같이 설계단계별로 파손기준식을 적용하여 복합재 차체 구조물의 구조 안전성을 검증하는 방법을 제시하고 대상으로는 현재 연구개발 중인 180 km/h 급의 한국형 틸팅열차(TTX)의 기본설계를 택하였다.

개발대상에 따라 조금의 차이는 있지만 일반적으로 복합재 구조물의 설계는 Fig. 4와 같은 과정으로 진행된다. 기본설계(preliminary design)에서는 차체 외형, 재료, 성능의 사전평가, 비용 그리고 제작접근방법 등을 포함한 설계개념을 개발하는 데 목적을 두고 있으며 상세설계(detailed design)에서는 기본설계에서 발생된 문제점의 보완 등 대부분의 업무는 기본설계에서 수행되어졌던 업무들의 확장 또는 반복이다[13]. 따라서, 기본설계 단계는 연구개발이 실패하느냐 성공하느냐를 결정하는 가장 중요한 과정이라 할 수 있다. 기본설계에 대한 차체의 구조안전성은 해석을 수행하여 검증할 수 있으며 검증되어야 상세설계 단계로 넘어갈 수 있다. 또한, 기본설계 단계에서는 연구개발 기간의 단축을 위하여 빠르고 정확한 설계검증을 요구하게 된다. Table 6에서 제안된 복합재 차체 구조물의 구조안전성 검증 방법을 보면, 기본설계 단계에서는 차체의 외형, 재료 등의 제한된 정보만을 포함하고 있기 때문에 층 간의 접근방법(ply by ply approach)에 의한 구조물 파손검증보다는 전체적인 관점(global view)에서의 접근방법인 전체 적층판 접근방법(total laminate approach)의 적용을 제안하고 있는 것이다.

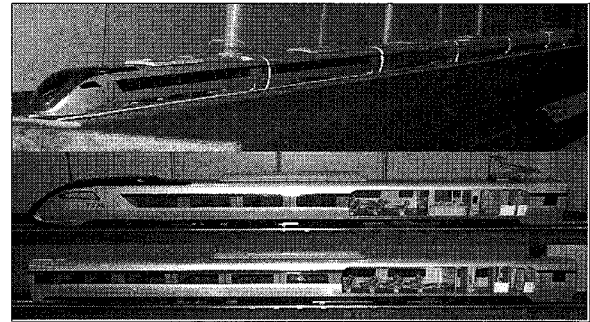
3.1 선택 재료 및 물성

복합재 차체 구조물에 대한 파손평가를 위하여 180km/h 급의 한국형 틸팅열차(TTX) 차체 구조물을 대상으로 선정하였다. Fig. 5는 한국형 틸팅열차 3차원 CATIA 모델 및 축소모형을 나타내고 있다. 기본설계 단계에서 틸팅차체의 재료로서 알루미늄 6005-T6과 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 복합재료를 고려하였다.

HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시에 대한 일방향 물성 시험은 Table 7과 같이 수행하였다. 각 시험당 6개의 시편을 사용하였으며 오토클레이브 성형으로 제작하였다. 복합재료의 물성치 시험은 폐회로 서보 유압재료 시험기인 Instron 1350을 사용하였고 변형도 증폭기는 스트레인 게이지 컨디션너 2100 시스템을 사용하였다. Table 8은 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 복합재료에 대한 일방향 물성(강성, 강도) 결과를 나타내고 있다.



(a) Basic drawing



(b) Mockup

Fig. 5 Mockup and basic drawing for TTX.

Table 7 Test methods for mechanical properties

Material	Type	ASTM
HFG CU-125NS Graphite/epoxy	Longitudinal Tensile Property	D3039M
	Transverse Tensile Property	
	Longitudinal Compressive Property	D3410M
	Transverse Compressive Property	
	Shear Property (12 plane)	D5379M

Table 8 Mechanical properties of HFG CU-125NS graphite/epoxy

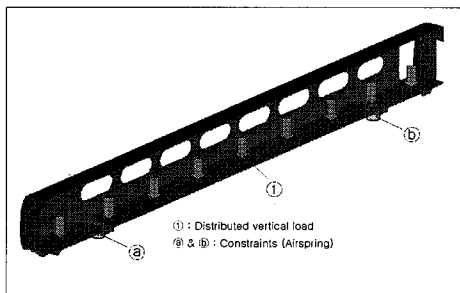
Type	Stiffness(GPa)	Strength(MPa)
Longitudinal Tensile Property	147.45	1834.90
Transverse Tensile Property	9.24	38.12
Longitudinal Compressive Property	134.95	1165.27
Transverse Compressive Property	8.97	130.02
Shear Property (12 plane)	6.51	82.43

3.2 알루미늄 차체에 대한 파손 평가

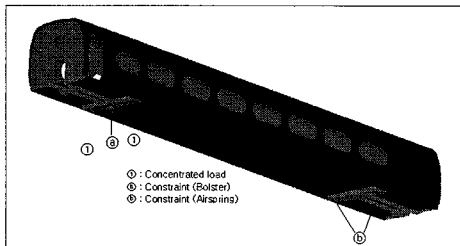
알루미늄으로 차체를 제작할 경우 JIS E 7105[14]에 따라 수직하중 및 비틀림 하중 하에서 구조해석을 수행하여 기본설계에 대한 구조안전성을 평가해야 한다. 해석은 ANSYS70을 이용하였고 지붕, 사이드프레임, 엔드 프레임, 언더프레임 등은 셸요소(shell 63), 티-슬롯(T-slot)은 빔요소(beam 188)를 사용하였다. Table 9는 해석에 사용된 알루미늄 6005A-T6의 물성치를 나타내고 있다.

Table 9 Material properties of aluminum 6005A-T6

Materials	Stiffness (GPa)	Possion's ratio (ν)	Density (kg/mm ³)
Al 6005A-T6	E=69 G G=26	0.33	2.7×10^{-6}



(a) Under vertical load



(b) Under twist

Fig. 6 Boundary and loading conditions.

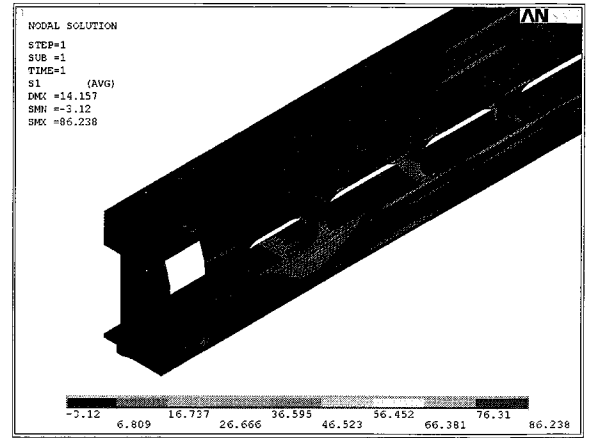


Fig. 7 Maximum stress under vertical load (Aluminum carbody).

Fig. 6은 JIS E 7105에서 규정하고 있는 해석 및 하중시험에 대한 경계조건 및 하중조건을 나타내고 있다. 수직하중은 승객과 쿼부 장비들의 중량을 고려한 것으로 “(운전 정비 중량+대차중량)에 따른 하중+최대승차인원의 질량에 따른 하중”×동적 부가하중계수-(차체중량+시험기자체 중량)에 따른 하중”으로 선정하게 되며 동적 부가하중계수는 주행 중의 상하진동가속도를 고려한 계수로 공기스프링을 사용할 경우 1.1로 정해져 있다. 한국형 틸팅차량의 경우 46.68 ton(6.53×10^5 MPa)의 수직하중이 언더프레임 상면에 가해지며 수직하중 시 경계조건은 Fig. 6(a)와 같다. 비틀림 하중은 건인, 리프팅 등에서 발생할 수 있는 하중을 고려한 것으로 4 ton-m의 비틀림 모멘트를 차체에 가하도록 규정되어 있다. 이때, 비틀림 하중은 Fig. 6(b)처럼 대차의 공기스프링 위치를 구속(2)하고 다른 쪽 대차의 볼스터 위치에 롤링(rolling)이 가능하도록 구속(3)한 후 대차 양 끝단에 집중하중(26.3 kN, 1)을 부가하여 비틀림 모멘트만이 차체에 가해지도록 한다.

Fig. 7은 수직하중 하에서 한국형 틸팅열차 동력차에 대한 최대응력 분포를 나타낸다. 일반적으로 동력차에는 가장 큰 외력이 작용하므로 평가 대상으로 선택하였다. 결과에서 보듯이 알루미늄 차체에 대한 최대응력은 세 번째와 네 번째 창문 사이의 아랫부분에서 86.24 MPa 정도로 항복응력 207 MPa에 비해 1/3에 해당되므로 구조적 안전성은 확보되었음을 알 수 있다. 비틀림 하중 하에서도 최대응력이 73.46 MPa로 항복응력에 비해 매우 낮았다. 이때, 알루미늄 동력차 차체의 무게는 7.88톤이었으며 Table 10은 알루미늄 차체에 대한 구조평가기준치와 결과를 종합적으로 나타낸 것이다. 처짐(deflection)은 언더프레임 중앙선을 따라 발생하는 최대 처짐 값을 의미한다. 언더프레임의 처짐은 Table 10에서 볼 수 있듯이 한계치 내에 존재하지만

허용여유 치수가 1.8 mm 정도로 작았다. 그러나, 한국형 텀팅열차의 경우 언더프레임의 처짐 한계치(15.97 mm)외에 추가적으로 레일상면과 대차의 하부면 사이에 100 mm이상의 여유설계를 수행하므로 한계치 내에 처짐량이 존재하면 구조안전성에 문제가 없는 것으로 보고 있다.

Table 10 Results of the structural analysis for aluminum carbody

	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)	< 15.97	14.16 (under vertical loading)	Safe
Weight (ton)	-	7.88	-

3.3 복합재 차체에 대한 파손 평가

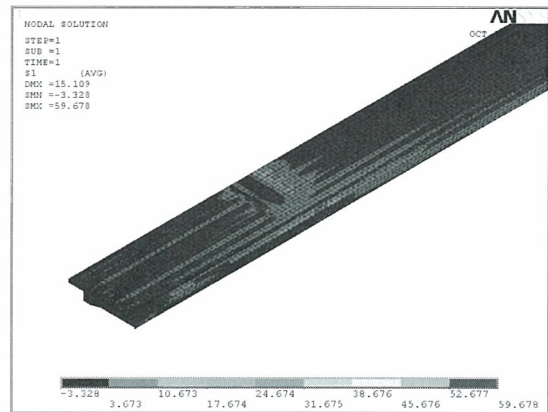
3.3.1 하이브리드 복합재 차체 구조해석

복합재 차체의 경우도 JIS E 7105에 따라 수직하중 및 비틀림 하중 하에서 구조해석을 수행하여야 한다. 복합재 차체의 경우, 적층판은 $[0_n/\pm 45_{2n}/90_n]_s$ 로 구성하였으며 적층판 물성은 일방향 물성측정결과를 토대로 적층판 공학상수 (laminate 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. 한국형 텀팅열차는 전기식 이어서 전장품이 하부구조에 취부된다. 따라서, 하부구조의 안전성을 고려하여 알루미늄을 언더프레임 구조재료로 선택하였다. 해석에 사용된 적층 복합재 차체의 물성은 Table 11과 같다. Fig. 8은 수직하중 하에서 하이브리드 복합재 차체의 응력분포 결과를 나타내고 있다.

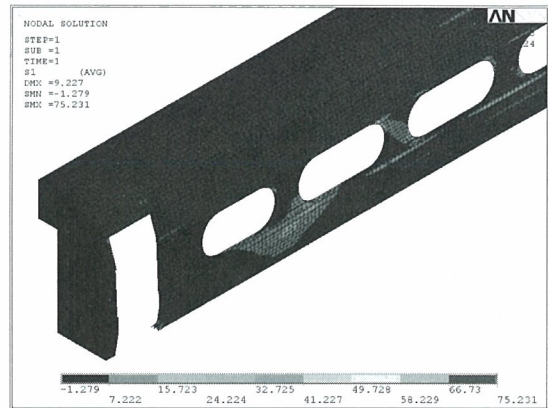
Table 11 Material properties of HFG-CU125NS laminate

Materials	Applied part	Laminate	Stiffness (GPa)	Possion's ratio	Density (kg/mm ³)
HFG-CU125NS	Roof, sideframe, endframe	$[0_n/\pm 45_{2n}/90_n]_s$	$E_1=E_2=57.61$	$V_{12}=V_{13}=0.297$	1.6×10^{-6}
			$G_{12}=G_{13}=22.21$		

n = number of ply ($n_{min}=3$)



(a) Aluminum structure(underframe)



(b) Composite structure

Fig. 8 Maximum stress under vertical load(Hybrid composite carbody).

Table 12는 하이브리드 복합재 차체에 대한 구조평가기준치와 결과를 종합적으로 나타낸 것이다. 언더프레임(알루미늄)의 최대응력은 모든 경우 항복응력의 1/3 이하를 유지하므로 구조적 안전성을 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 논문에서는 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. 앞에서 언급했듯이, 한국형 텀팅열차는 레일 상면과 대차 하부면 사이에 추가적인

로 100 mm이상의 여유설계를 수행하므로 언더프레임에 대한 안전성은 확보된 것으로 볼 수 있다. 그러나, 하이브리드 복합재 차체의 언더프레임 처짐량이 알루미늄 차체에 비해 다소 증가하는 경향을 보이므로 언더프레임의 보강설계를 통하여 충분한 강성을 확보할 필요가 있다. 결과적으로, 하이브리드 차체는 알루미늄 차체에 비해 약 20 %의 무게 절감 효과를 가지므로 차체 경량화 및 구조안전성 측면에서 하이브리드 복합재 차체가 매우 유리함을 알 수 있다.

Table 12 Results of the structural analysis for hybrid composite carbody

	Type	Limit value	Present value	State
Max. stress (MPa)	underframe (aluminum)	< 207	59.68 (under vertical loading)	Safe
			73.39 (under twist loading)	
	Other parts (composite)	Suitable criterion	75.23 (under vertical loading)	Must to check using eq(1) or (3)
			68.56 (under twist loading)	
Deflection (mm)	-	< 15.97	15.11 (under vertical loading)	Safe
Weight (ton)	-	-	6.25	20 % ↓

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 물성을 측정하여 기본적인 데이터로 확보해야 한다. 본 연구에서는 적층판 강도 측정을 위해 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 적층판을 오토클레이브 성형 후 시편을 제작하였다. 시편갯수는 시험당 6개였고 사용된 적층판의 구성은 $[0_3/\pm 45_6/90_3]_s$ 로 두께는 3.0 mm이다. 적층판 두께를 3.0 mm로 제작하여 강도를 측정할 이유는 복합재 차체의 가장 높은 응력이 발생하는 부위와 기본골조의 두께가 3.0 mm로 설계되었기 때문이다. Table 13은 HFG CU-125NS 그라파이트/에폭시 적층판에 대한 강도 측정 결과를 나타내고 있다. 적층판에 대한 강성시험 결과, HFG CU-125NS 적층판의 강성은 $E_1=E_2=57.69$ GPa, $G_{12}=G_{13}=22.42$ GPa로 해석에 사용된 이론적인 적층판의 강성값(Table 11)과 일치함을 확인하였다.

Table 13 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

X, Y, S는 적층판 축에 대한 강도

3.3.3 전체 적층판 접근방법에 의한 파손평가

식 (1)의 Puppov-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 구조안전성을 판단할 수 있게 된다. 복합재 차체의 경우 식 (1) 또는 식 (3)을 적용하기 위해서는 구조해석을 통한 절점 응력(nodal stress)이 요구된다. 그러나, 철도차량의 차체 구조해석 시 사용되는 절점의 수는 100,000개 이상이므로 모든 절점에서 파손 평가를 수행하는 것은 시간 낭비일 뿐만 아니라 불필요한 작업이 된다. 따라서, 전체 구조에 대한 응력해석을 수행한 후 응력이 집중되는 부위에서 파손평가를 하는 것이 효율적이다. 복합재 텀팅차체의 경우 Fig. 8(b)에서 보듯이 세 번째와 네 번째 창문사이의 아랫부분에서 응력집중 현상이 발생하므로 그 부근을 중심으로 일부 절점에 대해서만 파손평가를 수행하면 된다. 선택부위에서 절점 응력성분을 식(1)과 식 (3)에 대입한 후 파손지수(failure index)를 구하면, 가장 높게 발생하는 파손지수 값은 Table 14와 같다. 이때, 계산에 사용된 절점 응력성분은 쉘 요소 두께방향으로 3개(top/middle/bottom)에서 취하였다. 두 개의 파손기준식에 의해 구해진 파손지수의 차이는 상호작용계수(γ)와 전단강도에 대한 고려 유무에 기인한다. Puppov-Evensen 파손기준식은 전단, 인장 그리고 압축 강도사이의 상호작용을 고려하고 있으나 Guess-Gerstle 파손기준식은 Norris의 파손기준식을 적층판에 적용한 식으로 상호작용계수와 전단강도를 고려하지 않았다.

비틀림 하중의 경우, 발생하는 응력값이 수직하중에 비해 작기 때문에 파손평가를 수행할 필요는 없다.

Table 14 Failure indexes for composite carbody under vertical loading

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

Table 14의 결과에서 파손지수는 모두 0.01미만으로 기준치인 1에 비해 매우 작은 값이 도출되었으나 물리적 의미보다는 상대적으로 매우 안전하다는 의미이다. 즉, 현재 한국형 텀팅열차의 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 파손 영역은 식 (1)과 식 (3)을 이용하여 표현하면, Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 보듯이 구조해석 등의 방법을 이용하여 적층판의 응력성분을 알아내면 그 값이 안전한 영역에 있는지 파손영역에 있는지 알 수 있는 것이다. Fig. 9의 결과에서 다시 확인할 수 있듯이 한국형 틸팅열차의 복합재 차체 구조물에 발생하는 응력성분은 모두 안전한 영역에 분포하고 있다.

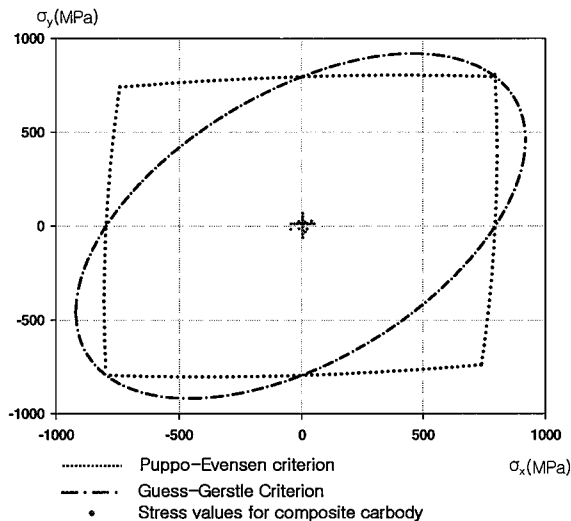


Fig. 9 Failure envelope for total laminate approach.

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. 반면, 상세설계 단계에서는 복합재 구조물의 모재 균열, 층간분리 등과 같은 1차 파손모드(first failure mode)를 정확히 알아야 하므로 적층판 이론(laminate theory)을 적용하는 층간의 접근방법(ply by ply approach)과 전체 적층판 접근방법(total laminate approach)을 함께 사용하여 보다 다양한 파손형태를 판단해야 할 것이다.

결론

본 논문에서는 180 km/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 파손형태가

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 구조안전성을 평가하는 방법을 제시하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻었다.

- i) 알루미늄 차체와 하이브리드 복합재 차체에 대해 각각 구조해석을 수행하여 기본설계에 대한 구조안전성을 평가하였으며 강성 및 강도 설계 측면에서 모두 안전함을 확인하였다. 또한, 차체 경량화 측면이 중요시되는 틸팅열차의 경우 하이브리드 복합재 차체가 유리함을 알았다.
- 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 설계 보안을 위해 사용할 수 있으며 층간의 접근방법과 함께 사용하면 보다 정확한 파손예측을 할 수 있다.

후기

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

참고문헌

- 1) 전동차 기초설명집, 철도청, 2003.
- 2) Abaqus User's Conference, Maastricht, Netherlands, May 30-June 1. 2001, pp. 1-16.
- 3) 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.
- 4) J. H. Lee and C. S. Hong, "Refined Two-Dimensional Analysis of Cross-Ply Laminates with Transverse Cracks Based on the Assumed Crack Opening Deformation," *Composites Science and Technologies*, Vol. 46, 1993, pp. 157-166.
- 5) S. W. Tsai and H. T. Hahn, *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing Co., 1980.

- 6) R. Hill, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press, 1950.
- 7) V. D. Azzi and S. W. Tsai, "Anisotropic Strength of Composites," *Experimental Mechanics*, Vol. 5, 1965, pp. 283-288.
- 8) 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," *Composites Part B : Engineering*, Vol. 31, No. 3, 2000, pp. 223-235.
- 9) O. Hoffman, "The Brittle Strength of Orthotropic Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 1, 1967, pp. 200-206.
- 10) S. W. Tsai and E. M. Wu, "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *Journal of Composites Materials*, Vol. 5, 1971, pp. 58-80.
- 11) A. H. Puppo and H. A. Evensen, "Strength of Anisotropic Materials under Combined Stresses," *AIAA Journal*, Vol. 10, 1972, pp. 468-474.
- 12) 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.
- 13) S. T. Peters, *Handbook of Composites*, Chapman & Hall, 1998.
- 14) Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock, JIS E 7105.