

복합재 차체와 금속 언더프레임 접합부의 상세구조해석

강상국*·김수현*·이상의*·김천곤**·신광복**·이상진***

Detailed Structural Analysis of Joint Part between Composite Carbody and Metal Underframe

Sang-Guk Kang*, Soo-Hyun Kim*, Sang-Eui Lee*, Chun-Gon Kim**,
Kwang-Bok Shin**, Sang-Jin Lee***

Abstract

In development of a composite carbody tilting train, the structural safety is especially emphasized on the joint part between composite carbody and metal underframe because it is directly related to the safety of passengers. In this paper, detailed structural analysis including bending and compression was performed for the proposed designs of the joint part, so stress distribution and maximum deflection were obtained and compared to each other. Based on the results of initial designs, modified ones were suggested and the same analysis procedure as before was followed, through which we could confirm the excellence of new design.

Key Words: joint part, finite element analysis, tilting train, TTX,

1. 서 론

복합재로는 다른 금속재료에 비해 비강성, 비강도 등의 기계적 물성이 우수하기 때문에 항공 산업이나 육상 교통산업의 구조 재료로서 많이 사용되고 있다. 이미 유럽의 철도산업 선진국들은 철도 차량에 복합재를 적용하고 있으며 무게 절감과 높은 신뢰성을 확인한 바 있다.

일반적으로 복합재 구조물은 복합재 단독으로 사용되는 경우가 드물며 대부분 금속 구조물과 연결되어 사용된다. 복합재가 적용되는 틸팅 차량의 차체도 금속으로 이루어진 언더프레임과 연결되어 사용되며 이 과정에서 안전한 접합부의 설계가 필수적으로 요구된다.

복합재료와 금속을 접합하는 방법은 크게 기계적 접합과 접착제를 사용한 접합의 두 가지로 나눌 수 있다. 기계적 접합은 복합재료와 금속에 홈을 가공하여 리벳이나 볼트로 연결하는 방법으로 반복적인 조립·분해가 가능하고 접착제를 이용한 결합방법과는 달리 복합재료의 표면처리를 할 필요가 없는 장점을 가지지만 응력집중과 무게 증가의 문제점이 있다. 또한 접착제를 사용한 접합은 넓은 면적에 걸쳐서 접합부위의 하중을 고르게 분담하는 장점을 가지지만 일단 접합이 끝난 후에는 재조립이 불가능하며 온도와 습도 등의 사용 환경에 의해 강성이나 강도가 변할 우려가 있다. 현재 개발 중인 복합재 틸팅 차량에는 두가지 접합 방법이 모두 적용될 계획이다.

앞에서 언급했듯이 기계적 접합을 위해 가공한 홈 주위에는 응력집중이 심하기 때문에 파손될 가능성이 있으며 나아가 접합부위의 파손으로도 이어질 수 있다. 승객의 안전을 고려해 볼 때, 접합부의 안전은 매우 중요한 사안이므로 신중한 설계가 이루어져야 한다. 또한 차체 전체에 대한 구조 해석을 통해 전반적인 차체의 응력분포를

* KAIST 기계공학과 항공우주공학전공, 대학원

** KAIST 기계공학과 항공우주공학전공

** 한국철도기술연구원

*** (주)한국화이바 철도차량사업부

알 수 있지만 접합부와 같이 구조적으로 중요하거나 응력집중이 발생하는 부위에 대해서는 상세한 모델링을 통한 구조해석이 요구된다. 이에 본 연구에서는 (주)한국화이버에서 제공된 복합재 차체와 금속 언더프레임과의 접합부 초기 제시안들에 대해 상세구조해석을 수행하여 구조적 안전성을 비교 분석하였다. 또한 구조 해석 결과를 바탕으로 적합한 접합부 안을 제안하였으며 이에 대한 구조해석을 통해 수정된 접합부 안의 우수성을 확인할 수 있었다.

2. 초기 접합부 제시안에 대한 구조 해석

2.1 초기 접합부 제시안

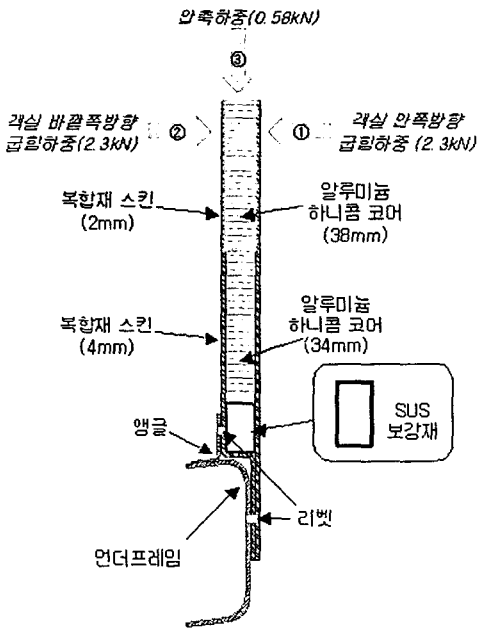


그림 1 접합부의 구성(제1안).

우선 접합부는 그림 1과 같이 복합재 차체, 금속 언더프레임, 앵글, 보강재 등으로 구성되어 있으며 리벳으로 연결된다. 초기 접합부 제시안은 (주)한국화이버로부터 총 3가지 안이 제공되었다(그림 2). 모든 안에 대해서 차체 두께는 38mm이며 여기서 복합재 스킨의 두께가 2mm, 하니콤 코어의 두께가 34mm이다. 특히 접합부가 시작되는 이전 부분부터는 굽힘에 의한 응력이 증가할 것을 고려하여 주 하중을 담당하는 복합재 스킨의 두께를 4mm로 하였으며 하니콤 코어의 두께

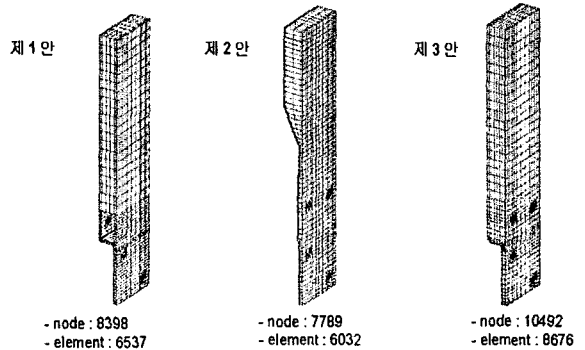


그림 2 모델링이 완료된 초기 접합부 제시안.

를 30mm로 설계되었다.

각 설계안 별로 특이한 사항은 다음과 같다. 제1안의 경우 응력완화를 위해 내부가 빈 직사각형의 금속(스테인리스스틸) 보강재가 삽입되어 있다. 제2안은 불필요한 부분을 없애 무게를 줄이고 이로 인해 발생하는 공간을 더 활용하기 위한 설계안이다. 하지만 단면적이 급격하게 변하는 구간에서 구조적 취약성이 예상되어 그림 1의 앵글(angle)부재와 복합재 스킨 사이에 금속 보강재가 삽입되어 있다. 제3안의 경우는 복합재 스킨 사이에 하니콤 코어로 채워져 있고 객실쪽 스킨과 하니콤 코어 사이에 접합부 시작부분부터 끝부분까지 금속 보강재가 삽입되어 있다.

2.2 유한요소해석을 위한 모델링과 하중/경계조건

제시된 안에 대한 유한요소해석을 수행하기 위해 상용 소프트웨어인 MSC/PATRAN을 이용하여 주어진 도면으로부터 상세모델링을 수행하였으며 구조 해석은 역시 상용 해석틀인 ABAQUS를 사용하였다. 사용한 요소는 8절점 고체요소(solid element)이며 사용한 요소와 노드의 수는 그림 2에 나타나 있다. 복합재 스킨과 하니콤 코어, 보강재는 모두 완전접착(perfect bonding)된 것으로 가정하였다. 또한 해석에서 사용한 재료의 물성치는 표 1과 같다.

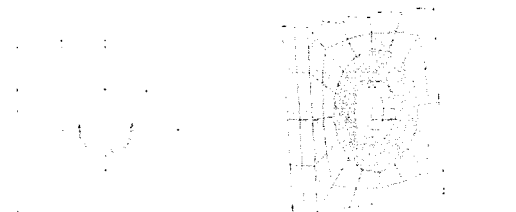
구조 해석에서 사용한 하중조건은 객실 안쪽 방향 굽힘하중(2.3kN)과 객실 바깥쪽 방향 굽힘하중(2.3kN) 그리고 압축하중(0.58kN)을 각 제시안들에 대해 각각 부가하였다(그림 1). 하중의 크기는 차체 단면의 자유체도(free body diagram)로부터 차체, 에어콘, 판토품 등기에 의한 자중과 원심력 등을 바탕으로 계산되었다.

표 1 해석에 사용된 물성치

Graphite/epoxy(직조)		Al honeycomb	
E ₁ (GPa)	55.5	E ₁ (MPa)	0.17
E ₂ (GPa)	48.3	E ₂ (MPa)	0.17
E ₃ (GPa)	10.7	E ₃ (MPa)	1480
G ₁₂ (GPa)	3.81	G ₁₂ (MPa)	150
G ₁₃ (GPa)	3.65	G ₁₃ (MPa)	253
G ₂₃ (GPa)	3.65	G ₂₃ (MPa)	170
ν ₁₂	0.099	ν ₁₂	0.996
ν ₁₃ =ν ₂₃	0.45	ν ₁₃ =ν ₂₃	0.0001

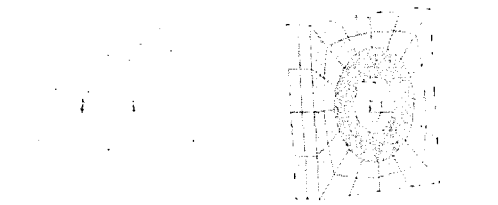
SUS 보강재	
Modulus, E(GPa)	200
Strength, S(MPa)	250
Poisson's ratio, ν	0.3
Density, ρ(kg/m ³)	7900

앞에서 언급했듯이 실제 틸팅 열차에서 접합부의 접합방법은 접착제를 이용한 접합과 리벳을 이용한 기계적 접합을 동시에 적용할 계획이지만 해석 수행 시에는 극단적인 경우를 고려하기 위해 기계적 접합만 가정하였다. 따라서 변위에 대한 경계조건은 리벳의 역할만을 고려하여 그림 3과 같이 부가하였다. 즉, 리벳 헤드부분에 맞닿는 부분의 변위를 고정하고 굽힘하중의 경우에는 홀의 안쪽 아랫면을, 압축하중의 경우에는 홀의 안쪽 윗면을 고정하였다.



- 모든 홀 아랫면의 $dy=dz=0$
- 리벳 헤드부분에 해당하는 양쪽면 $dx=0$
- 홀 윗면은 free 상태

(a) 굽힘하중의 경우



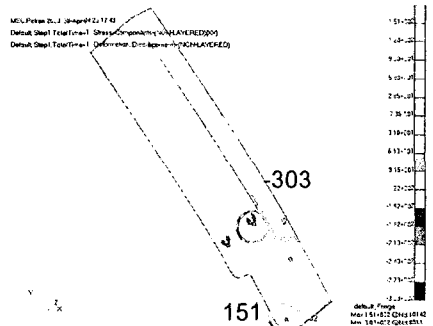
- 모든 홀 윗면의 $dy=dz=0$
- 리벳 헤드부분에 해당하는 양쪽면 $dx=0$
- 홀 아랫면은 free 상태

(b) 압축하중의 경우

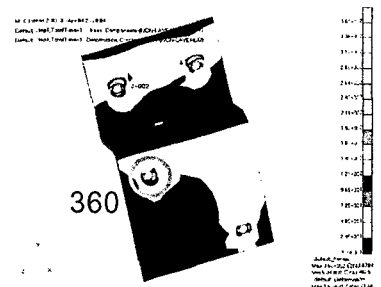
그림 3 리벳홀 주위의 변위경계조건.

2.3 유한요소해석결과

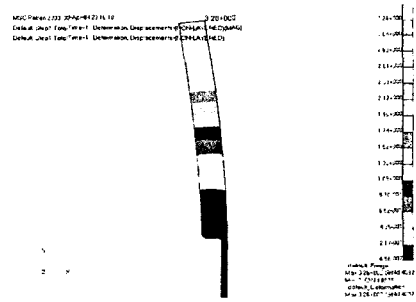
3가지 접합부 제시안에 대해 3가지 하중에 대한 유한요소해석을 수행하였다(표 2). 그림 4는 제3안의 객실 안쪽 방향 굽힘하중에 대한 해석결과이다. 복합재 스킨과 하니콤 코어와 같은 이방성 재료의 응력은 그림 4(a)와 같이 섬유 방향으로의 응력분포를 나타내었다. 또한 보강재로 사용된 금속의 응력분포는 그림 4(b)와 같이 일반적으로 많이 사용되는 von-Mises 응력으로 나타내었다. 그림 4(c)에는 전체변형형상을 10배로 확대하여 나타내었다.



(a) 복합재와 코어의 섬유방향 응력분포 (MPa)



(b) 금속 보강재의 von-Mises 응력분포 (MPa)



(c) 전체 변형형상 (mm)

그림 4 객실 안쪽방향 굽힘하중에 대한 응력분포 및 변형형상(제3안, X10).

표 2 초기 접합부 제시안의 유한요소해석결과

하중종류	응력 및 변형량	제1안	제2안	제3안
객실안쪽 방향굽힘	복합재 내	410	1430	303
	금속보강재 내	702	758	302
	최대변형량	3.5	44	3.26
객실바깥쪽 방향굽힘	복합재 내	406	1430	302
	금속보강재 내	707	753	361
	최대변형량	3.5	44	3.26
압축	복합재 내	3.45	9.8	1.6
	금속보강재 내	10.5	10.6	5.65
	최대변형량	0.028	0.71	0.029

*복합재, 금속보강재 : MPa 최대 변형량 : mm

해석결과에서 응력분포를 살펴보면 차체에 걸리는 응력은 복합재 스킨의 섬유방향 파손강도인 640MPa에 비해 수십 MPa 단위로 전체적으로 낮은 값을 보였으나 대부분의 경우에서 최대응력은 모두 리벳 홀 주위에서 발생하였다. 또한 금속보강재의 홀 주위에서도 응력집중이 심해서 항복응력인 250MPa를 초과하는 결과를 보였다.

표 2에서 제3안이 모든 경우에 대해서 가장 우수한 설계안임을 확인할 수 있다. 제2안의 경우는 최대응력과 최대변형량이 나머지 안들에 비해 매우 크게 나타났으며 따라서 상당히 불안정한 설계안임을 알 수 있다. 또한 제1안의 결과와 제3안의 결과를 비교해 볼 때, 내부가 비어 있는 금속보강재보다 하니콤 코어로 가득 차 있는 구조가 접합부에 작용하는 하중에 대해 더 효과적임을 알 수 있다. 이러한 해석 결과를 바탕으로 새롭게 수정안을 제시하였으며 이에 대해 동일한 해석 과정을 수행하였다.

3. 접합부 수정안에 대한 해석

초기안의 해석결과를 바탕으로 제3안과 제1안을 보완한 형태로 제4안과 제5안이 설계되었다(그림 5). 제3안을 보완해서 설계된 제4안에서는 금속 보강재를 객실바깥쪽 스킨의 안쪽 부분에 하나 덧대어 금속 보강재가 전체적으로 y자 형태를 가지며 코어는 모두 알루미늄 하니콤으로 채운 설계안이다. 또한 제5안은 제1안에 대한 수정안으로 금속 보강재를 언더프레임 근방의 복합재 스킨 사이에도 삽입하여 더 보강한 형태이다. 수

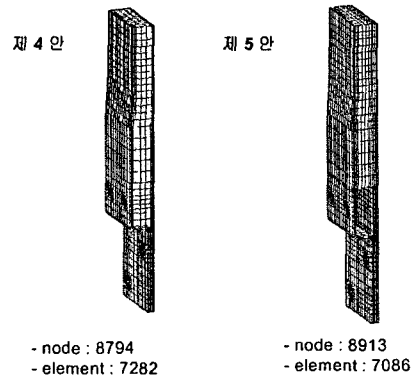
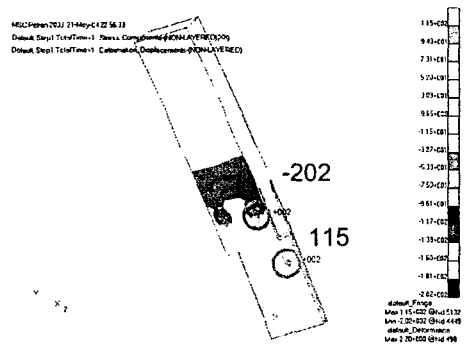
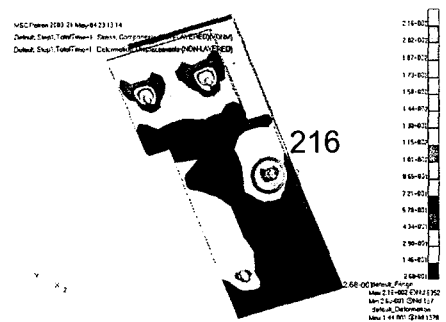


그림 5 모델링이 완료된 수정된 접합부 제시안.

정안에 대해 모델링작업을 수행하였으며 요소수와 노드수가 그림 5에 나타나 있다. 재료의 물성은 지금까지 수행된 것과 동일하게 부가하였다. 경계 및 하중 조건도 이전과 동일하게 부가하였으며 다만 압축하중의 경우는 앞서 해석결과로부터 최대응력의 크기가 매우 낮아 이 경우는 제외하였다.



(a) 복합재와 코어의 섬유방향 응력분포 (MPa)



(b) 금속 보강재의 von-Mises 응력분포 (MPa)

그림 6 객실 안쪽방향 굽힘하중에 대한 응력분포 및 변형형상(제4안, X10).

표 3 접합부 수정안의 유한요소해석결과

하중종류	응력 및 변형량	제 4 안	제 5 안
객실안쪽 방향굽힘	복합재	202	279
	금속보강재	216	461
	최대변형량	2.20	2.39
객실바깥쪽 방향굽힘	복합재	201	273
	금속보강재	216	448
	최대변형량	2.20	2.36

*복합재, 금속보강재 : MPa 최대 변형량 : mm

해석수행결과는 표 3과 같으며 제4안의 결과가 안정적임을 알 수 있다. 제4안의 해석결과를 나타낸 그림 6으로부터 금속 보강재 홀 주위에 작용하는 최대응력은 항복응력 이하임을 알 수 있으며 이 결과는 지금까지 다른 안에 대해 수행된 해석에서 보여줬던 결과와 대조적인 고무적인 것이다. 따라서 복합재 차체와 금속 보강재 모두에서 최대 응력이 낮고 최대변형이 작은 제4안의 방향으로 접합부가 설계되어야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 TTX의 복합재 차체와 금속 언더프레임 접합부의 안전한 설계 및 제작을 위해 유한요소해석을 이용하여 구조적 안전성을 미리 평가하고 적합한 접합부 안을 제안하는 것이다. 이를 위해 우선 초기 접합부 제시안에 대해 굽힘 하중과 압축하중의 경우에 대한 구조해석을 수행하여 응력분포 및 최대 변형량을 비교하였다. 또한 해석 결과를 바탕으로 접합부 수정안을 제안하였으며 이에 대한 동일한 구조해석 수행 결과 수정안의 안정성을 검증할 수 있었다.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구사업개발사업에 의해 지원되고 있으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김수현, 강상국, 이상의, 김천곤, 이상진, "복합재 텀팅열차 차체 구조물의 해석 및 설계," 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, pp.

47-50, 포항공과대학교, 2004

- (2) K.B.Shin, W.H.You, H.S.Moon, "The application of composite materials in railway vehicle system," *The Korean society for composite materials*, Vol. 15, No. 5, 2002, pp. 66-71.