

공기 저항력 저감을 위한 복합재 페어링 구조 설계 및 해석 연구

이용규¹ · 박현범^{1,†}¹군산대학교 기계공학부

A Study on Structural Design and Analysis of Composite Fairing to Reduce Air Resistance

Yonggyu Lee¹, Hyunbum Park^{1,†}¹School of Mechanical Engineering, Kunsan National University

Abstract

This study aimed to design a 3D fairing shape to reduce the air resistance of commercial vehicles. Rankine Half Body was applied to design the fairing shape, and the design was verified through aerodynamic analysis. Aerodynamic loads were calculated considering the speed conditions of commercial vehicles and gust conditions to ensure the structural safety of the fairing. A glass fibre/epoxy composite material was used to design a fairing structure that satisfied the safety factor 3. The structural safety of the lightest fairing was confirmed through structural analysis.

초 록

페어링은 상용차가 주행 시 전면부에서 발생하는 유동박리의 저항을 제어하여 상용차 공기 저항력을 감소시키는 장치이다. 본 연구에서는 랭킨 반체 이론을 적용하여 3D페어링 형상을 설계하고 공력 해석을 통해 설계 결과를 검증하였다. 그리고 페어링의 구조적 안전성을 위해 상용차 과속조건과 돌풍 조건을 함께 고려하여 공력하중을 도출하였다. 이러한 공력 해석 결과를 기반으로 유리섬유/에폭시 복합재료를 적용하여 안전계수 3을 만족하는 페어링 구조 설계를 수행하였다. 최종 본 연구에서 가장 경량화된 페어링의 구조 해석을 수행하여 구조 안전성이 확인되었다.

Key Words : Cab Roof Fairing(캡 루프 페어링), Commercial Vehicle(상용차), Structural Design(구조 설계), Structural Analysis(구조 해석), Sandwich Structure(샌드위치 구조)

1. 서 론

항공우주 분야에서 공력 설계 결과의 검증을 위해 다양한 이론을 적용하여 설계된 결과를 전산유체해석 기법을 활용하여 성능 평가를 수행한다. 본 연구에서는 이러한 항공우주 분야에 적용되는 전산유체역학 해석 기법을 육상 운송체인 상용차에 적용하는 연구를 수행하였다. 상용차는 상업적 용도를 위해 사용되는

영업용 차량을 지칭하는 용어로서 육상화물운송의 중요한 수단으로 국내뿐만 아니라 세계적으로 널리 활용되고 있다. 국토교통부에 따르면 우리나라는 2019년 기준으로 약 155,000대 이상의 상용차가 등록 및 운행되고 있고, 상용차 등록의 증가율은 전년 대비6%에 달함을 확인할 수 있었다[1]. 현대 육상 물류 운송에서 상용차는 매우 중요한 운송 수단이나 내연기관을 사용하는 상용차의 증가는 NOx 및 이산화탄소 문제를 증가시켰다. 2020년 초부터 COVID-19가 전 세계에 본격적으로 확산되며 직접 거래보다 온라인 등의 간접 거래의 비중이 커졌으며 이로 인해 물류 운송은 이전 에 비해 크게 증가하였다. 국내의 차량은 대부분 수입

Received: Oct. 20, 2022 Revised: Nov. 27, 2022 Accepted: Nov. 29, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-63-469-4729, E-mail: swordship@kunsan.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

유류에너지에 의존하고 있기 때문에 이러한 물류 운송 증가는 유류 에너지 수입 비용의 증가를 초래하였다. 그렇기 때문에 상용차의 연비는 상용차 운용의 경제적인 측면에서 매우 중요하며 본 연구를 통해 연비를 개선할 수 있다면 상용차의 운용비용과 환경 문제 개선에 기여할 수 있다고 판단된다.

최근 차량의 구동 방식은 내연기관 구동 방식에서 전기 구동 방식으로 변화하고 있으나 구동 방식의 효율과 별개로 차량 외부 형상으로 인한 항력 발생은 차량의 연비에 매우 큰 영향을 미친다. 상용차는 구조적으로 후방의 컨테이너와 화물을 적재해야하기 때문에 차량의 주행 방향으로부터 공기 역학적 저항력을 피할 수 없다. 이러한 항력의 개선에 의한 연비 증가를 위해 캡 루프 페어링, 보드 테일, 사이드스커트, 겹 페어링 등 다양한 기술들이 연구되고 있다.

국외의 경우, Richard M. Wood는 트랙터 트레일러에 겹 페어링, 보드 테일을 장착하여 항력 계수 15% 이상 감소를 확인하였다[2]. Pereira 등은 트랙터 트레일러에 캡 루프 페어링을 설치하여 연비가 2.9% 향상을 확인하였다[3]. 국내의 경우, 김철호는 트랙터-트레일러에 CRF(Cab Roof Fairing)를 장착하여 13.5% 항력 감소 효과를 확인하였다[4]. 김정재 등은 상용차에 bio-inspired CRF를 장착한 경우 19.5% 항력 감소 효과를 확인하였다[5]. 이의재 등은 상용차에 CRF, 사이드 스커트, 보드 테일을 함께 장착하여 최대 36.8% 항력 감소 효과를 확인하였다[6]. 최해천 등은 트랙터-트레일러에 대해 다양한 위치에서의 유동 흐름을 통해 경사 표면의 측면 가장자리로부터의 와류와 상부 표면으로부터의 대규모 분리 및 겹 및 차체 하부 흐름 등을 확인하였다[7].

구조적인 측면에서 구조 안전성을 확인하기 위해서는 일반 운행 조건이 아닌 가장 열악한 조건에서 확인하여야 한다. 따라서 캡 루프 페어링을 장착한 상용차는 주행 시 돌풍과 과속 조건을 고려하여 페어링에 구조적 안전성을 확인하여야 한다. 국내의 연구 동향을 분석한 결과 페어링의 전반적인 구조적 안전성에 대한 연구는 일부 수행되었으나 기존 구조 대비 경량화에 대한 연구는 미흡한 것으로 분석되었다. 국외의 경우, Libove. C는 가변 두께 샌드위치 구조물을 통해 무게 경량화와 강성을 확인하였다[8]. 국내의 경우, 박철민

등은 샌드위치 구조물의 형상들을 보 이론과 평판 이론의 해석방법을 도입하여 최적 설계를 수행하였고 높은 강성과 무게 경량화를 확인하였다[9].

본 연구에서는 국내의 물류 유통을 위해 육상 운송체로 많이 사용되는 3.5Ton급 상용차 대상으로 차량 지붕에 설치되는 Cab Roof Fairing의 공력 및 구조 설계를 수행하여 구조적 안정성을 확보하고 무게 경량화를 목적으로 연구를 수행하였다.

2. 설계 개요

2.1 적용대상

국내에서 운행되는 차량의 항력 감소 연구를 확인한 결과, 개인목적으로 사용되는 승용차, 승합차 등에 대한 연구가 대부분 수행되고 있다. 국내의 COVID-19와 사람들의 디지털 문화의 확산은 시장에 가서 물건을 구매하는 직접거래보다 온라인으로 구매하는 간접 거래를 증가하게 만들었다. 이러한 이유로, 운송 업체들은 운송 효율 증가를 위해 직접 택배 운송 시스템(HUB)등을 만들어 운용하고 있다. 이러한 운송 시스템에 의해 도심에서 운용하기에 상대적으로 효율적인 소/중형 상용차들의 사용이 크게 증가하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 소/중형 상용차에서 3.5Ton급 상용차 대상으로 연구를 수행하였다. 연구 적용 대상으로 3.5Ton급 상용차에서 실제 설계 및 해석을 수행하기 위해 Fig. 1과 같이 국내 'H'사 6.6 냉동 마이티를 세부 적용 모델로 선정하였다. Table 1은 연구 적용 대상의 차량 제원이다[10]. 본 연구에서 페어링은 랭킨반체이론을 적용하고 차량의 캡 루프 사이즈에 제한을 두고 설계를 수행하였다. Fig. 2는 제원을 통해 모델링한 상용차의 형상이다.

Table 1 The Vehicle Specification[10]

Overall Length (a)		6,765 [mm]
Overall Width (b)		2,230 [mm]
Overall Height (c)		3,180 [mm]
Container Size	Length (d)	5,100 [mm]
	Width (e)	2,280 [mm]
	Height (h)	2,200 [mm]
Wheel Base		3,850 [mm]
Cap Roof Area Size	Length (j)	1,350 [mm]
	Width (i)	1,850 [mm]
	Height (c-j)	870 [mm]



Fig. 1 Might Wide 6.6 Frozen Tower Car from ‘H’

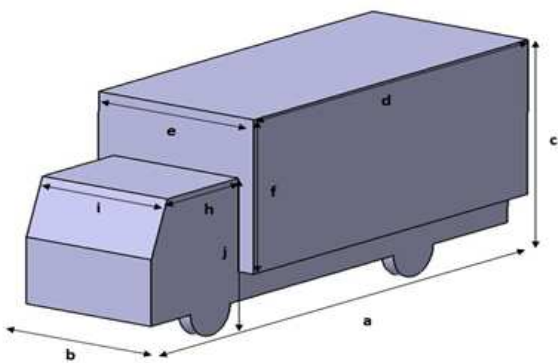


Fig. 2 3D View of Target Structure

2.2 구조 하중 조건

본 연구에서는 구조 설계를 위하여 하중 조건을 분석하였으며 대표적인 하중 조건 2가지를 선정하여 Table 2와 같이 정리하였다. 구조 설계에는 하중 조건 중 가장 극한 조건인 Load Case.2를 설계 요구 조건으로 구조 설계를 수행하였으며 이는 상용차가 130km/h로 과속할 때와 국내 돌풍 조건인 72km/h가 조합되어 202km/h의 상대 속도 조건이다[11].

Table 2 Load Case for Structural Design

Load Case	Case I	Case II
Gust Condition	With Gust	With Gust
Wind Speed	72 [km/h]	72 [km/h]
Vehicle Speed	90 [km/h]	130 [km/h]
Total Speed	162 [km/h]	202 [km/h]

2.3 설계/해석 방법 및 절차

본 연구에서는 설계의 편의성을 위하여 곡선인 페어링을 평판으로 가정하여 구조 설계를 수행하였다. 평판으로 가정된 페어링의 구조 설계 결과는 평판으로 가정된 페어링의 구조해석 결과와 비교하여 설계 절차의 신뢰성을 확보하였다. 평판으로 가정하여 설계된 구조 형상 및 적층 방안을 공력 설계 결과인 실제 곡선 판에 적용하여 하중조건 2가지에 대한 구조해석을 수행하여 최종 구조 안전성을 확인하였다. 페어링의 구조 설계는 일정 두께 복합재료 적층방식, 가변 두께 복합재료 적층 방식, 일정 두께 샌드위치 구조 방식, 가변두께 샌드위치 구조방식으로 수행하였으며 구조 안전성이 확보되며 중량 요구조건을 만족하는 설계 결과로 최종 설계를 확정하였다. Fig. 3은 이러한 설계 절차를 보여준다.

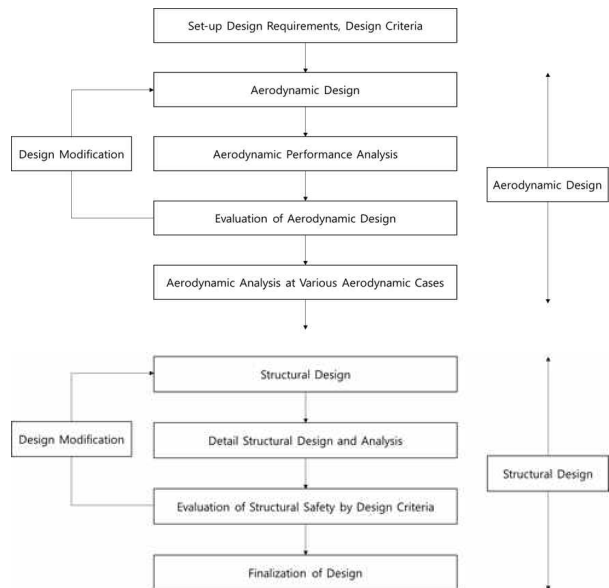


Fig. 3 Flow of Aerodynamic and Structural Design

3. 구조 설계

3.1 페어링 구조 설계

본 연구에서의 페어링은 비교적 가격이 저렴한 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) Woven Fabric을 적용한 Laminate 및 Sandwich를 적용하여 구조 설계를 수행하였으며, 복합재료 특성을 고려하여 압축 강도를 기준으로 안전 계수 3을 만족하는 페어링 구조물 두께 및 적층 방안을 도출 하였다. 주요 구조 설계 하중은 Load Case. 2로 이때의 조건은 특장차가 과속할 때를 고려하여 130km/h와 국내 돌풍 조건인 72km/h 를 합산한 202km/h의 속도로 정하였으며, 위와 같은 하중 조건을 공력 해석을 수행하여 공력 하중을 도출 하였다. Fig. 4는 3D 공력 해석으로 얻은 페어링의 압력분포이고, 컨테이너 상단 페어링에서 최대 압력을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 페어링의 구조 안정성을 위해 최대 하중을 고려해야 되므로, 최대 압력 값인 3,519Pa의 분포하중으로 수행하였다.

구조 설계의 편의성을 위하여 페어링은 평판으로 가정 하였으며 이후 설계 결과는 평판 페어링의 해석 결과와 비교하여 설계 결과의 신뢰성을 확보 하였다. 구조물의 경량화를 위하여 Laminate 및 Sandwich로 설계를 하여 구조 안전성 및 무게를 비교하였다. 평판 페어링의 구조 설계 결과인 구조물의 두께와 적층 방안은 곡선인 공력 설계 결과 페어링에 적용하여 구조 해석을 통해 구조 안전성을 확인하였다.

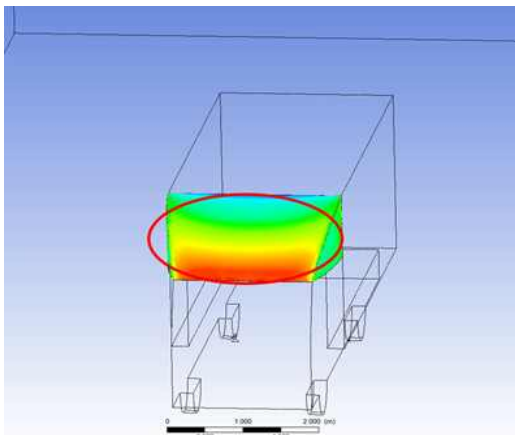


Fig. 4 Fairing Pressure Distribution

3.2 일정 두께의 복합재료 적층방식

페어링은 상용차 탑승자석 부분이 페어링을 지지하게 된다. 구조적 안전성을 위해 최대 하중을 고려하였고 공력 해석 결과인 최대압력 값인 3,519Pa로 수행하였다. 페어링 하단부분에서는 페어링 전면부를 기준으로 하여 접선면에 수직인 방향으로 양의 압력이 발생하고, 상단부분에서는 접선면에서 수직인 방향으로 음의 압력이 발생하게 되는데, 양압에 비해 음압이 크므로 구조 설계 시 음압의 최대 값인 3,519Pa의 분포하중으로 구조 설계를 수행하였다. 페어링의 재료는 GFRP Woven Fabric을 사용하였고 압축 응력에 안전 계수 3을 만족하는 구조물의 두께를 아래의 식을 활용하여 도출하였다[12].

$$F = P \times A \quad (1)$$

식 (1)에서 F는 하중 값, P는 공력해석결과인 최대 압력 값, A는 페어링 전면부에 투영 면적이다.

$$w = F/a \quad (2)$$

식 (2)에서 w는 분포 하중, a는 페어링 상단부재의 길이이다.

$$M_{\max} = \frac{1}{8} w a^2 \quad (3)$$

식 (3)에서 M_{\max} 은 페어링 상단 부재의 굽힘 모멘트이다.

$$S_{\min} = \frac{M_{\max}}{\sigma_{all}} \quad (4)$$

식 (4)에서 S_{\min} 는 허용단면계수, σ_{all} 는 허용응력이다.

$$S_{\min} = \frac{1}{6} b t^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 b는 페어링 곡면길이이고, t는 페어링 두께이다.

Fig. 5는 단순지지보에 균일분포하중이 걸리는 형상이다. 일정 두께의 복합재료 적층방식단계에서는 페어링 상단 부분을 Fig. 5와 같이 모사하여 구조 설계를 수행하였다. Table 3은 일정 두께의 복합재료 적층방식단계에서 필요한 구조설계 제원 값이다. 설계 결과 두께는 12.2mm이고 무게는 125kg이며 이는 Table 4에 표시하였다.

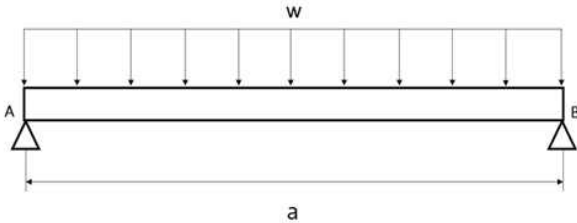


Fig. 5 Application of Uniformly Distributed Load to Simply Supported Beam

Table 3 Structural Design Specification for Simple Thickness

Item	Symbol	Value
Fairing Length	a	2,300 [mm]
Fairing Side Length	b	1,650 [mm]
Pressure	P	3,519 [Pa]
Area	A	3.795 [m ²]

Table 4 Structural Design Result of Simple Thickness

Uniformly Distributed Load	w	5,322.9 [N/m]
Moment	M	3,519.7 [N*m]
Compressive Strength	σ_c	184.6 [N/mm ²]
Safety of Factor	F.S	3
Allowable Stress	σ_{all}	61.53 [N/mm ²]
Allowable Section Modulus	S_{min}	57,201 [mm ³]
Thickness	t	12.2 [mm]
Total mass	m	125 [kg]

3.3 가변 두께의 복합재료 적층방식

본 연구에서 페어링의 목표 중량은 선행 연구된 페어링 무게 대비 10%감소이다. 선행 연구된 페어링의 무게는 23kg이다. 일정 두께의 복합재료 적층방식단계에서는 페어링의 총 중량이 125kg으로 경량화를 위하

여 페어링 전면부를 세로방향으로 총 10등분하여 분할된 면 마다의 국부 최대 하중을 고려해 각 섹션의 구조 설계를 수행하였다. Fig. 6은 페어링 전면부를 10등분한 형상을 나타낸다.

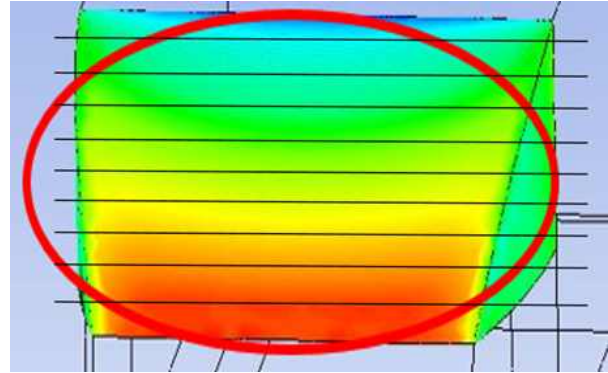


Fig. 6 Fairing Pressure Distribution Divided into Ten Equal Parts

Table 5는 페어링을 10등분 하였을 때 각각의 최대 하중을 고려하여 ply 수(두께) 값이다. 본 연구에 적용된 GFRP 두께는 1ply가 0.25mm이므로 Table 5에서 나온 각 섹션의 설계 두께 값을 정확하게 배수화 할 수 없으므로 설계 두께 이상을 만족하는 Ply수를 도출하였다. 가변 두께 복합재료 적층방식 단계에서도 앞선 연구한 단계와 같이 (12)~(16)식을 통하여 구한 값으로 페어링 두께를 구할 수 있다. 안전 계수 값은 기존 설정 값 3이상을 만족한다. 이때의 전체 페어링의 무게는 82.3kg이며 이는 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Laminate and Mass of Variable Thickness

Section [m]	Thickness [mm]	Laminate [Ply]	Safety Factor [F.S]	Mass [kg]
0~0.16	12.2	49	3.017	16.2
~0.32	9.2	37	3.041	9.71
~0.48	8.2	33	3.011	7.59
~0.64	7.5	30	3.183	6.44
~0.80	7.5	30	3.164	6.18
~0.96	7.3	30	3.145	5.88
~1.12	7.3	30	3.126	5.79
~1.28	7	28	3.207	5.51
~1.44	7.4	30	3.073	5.80
~1.60	6.2	25	3.043	13.3
Total Mass				82.3

3.4 일정 두께 샌드위치 적층방식

경량화를 위하여 샌드위치 구조를 적용하여 설계를 개선하였다. Face Skin은 단순 평판 설계와 동일한 GFRP를 적용하였고, Core는 Polyurethane Foam을 사용하였다. 선정된 이유는 페어링 실제 제작 시 제작성 측면을 고려하여 Polyurethane Foam으로 선정하였다. 샌드위치 구조물 두께에 대한 GFRP와 Polyurethane Foam의 물성치는 Table 6과 같다 [13]. 샌드위치 구조 안전성 평가는 설계 시 GFRP 물성치와 Polyurethane 물성치를 활용하는데 두개의 항복 응력 값에 안전 계수 3을 고려한다. 본 연구에서는 허용 응력을 기준으로 설계시 GFRP와 Polyurethane 허용 응력은 안전 계수 값 3 이상으로 충분히 안전하다는 것을 확인하였다. Fig. 7은 샌드위치 구조물 형상이다.

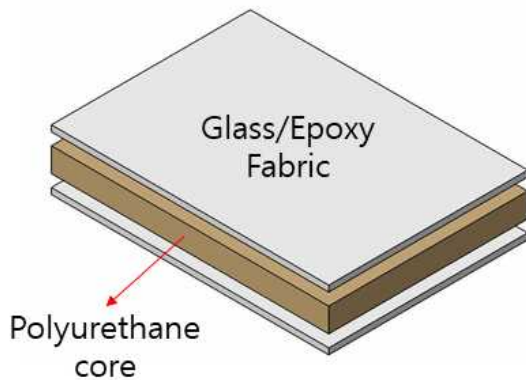


Fig. 7 Sandwich Structure Shape

Table 6 Mechanical Properties of Materials Used in The Present Fairing Design[13]

Item	Face Skin	Core
Sign	Glass/Epoxy Fabric	Polyurethane
E_1	10500 [N/mm ²]	60.86 [N/mm ²]
E_2	10500 [N/mm ²]	59.86 [N/mm ²]
G_{12}	1450 [N/mm ²]	19.18 [N/mm ²]
ν	0.27	0.2
X_t	283.9 [N/mm ²]	2.63 [N/mm ²]
X_c	184.6 [N/mm ²]	1.41 [N/mm ²]
Y_t	283.9 [N/mm ²]	2.49 [N/mm ²]
Y_c	184.6 [N/mm ²]	1.41 [N/mm ²]
S	15.0	0.71
S	1.705	0.1197
1Ply	0.25 [mm]	19.78 [mm]
Density	1800 [kg/m ³]	50 [kg/m ³]

샌드위치 구조물을 접목시킨 페어링 두께에 대한 이론식은 식 (1)~(3)에서 모멘트 값을 구한 후 다음 식을 통해 결정된다.

$$I_1 = \frac{b}{12}(h^3 - h_c^3) \quad (6)$$

식 (6)에서 I_1 은 유리섬유의 관성 모멘트, b 는 페어링 상단 길이, h 는 샌드위치 구조물의 높이, h_c 는 폼의 높이이다.

$$I_2 = \frac{b}{12}h_c^3 \quad (7)$$

식 (7)에서 I_2 는 폴리우레탄의 관성 모멘트이다.

$$(\sigma_1)_{\max} = \pm \frac{M(h/2)E_1}{E_1I_1 + E_2I_2} \quad (8)$$

식 (8)에서 σ_1 은 안전 계수 3을 고려한 유리섬유 압축강도이다. 압축 강도로 선정된 이유는 유리섬유는 인장보다 압축에 취약하기 때문이다. E_1 은 유리섬유의 탄성계수, E_2 는 폴리우레탄폼의 탄성계수이다.

$$(\sigma_2)_{\max} = \pm \frac{M(h_c/2)E_2}{E_1I_1 + E_2I_2} \quad (9)$$

식 (9)에서 σ_2 는 안전 계수 3을 고려한 폴리우레탄 압축강도이다.

식 (6)~(9)을 통해 GFRP와 폼의 두께, 무게가 도출되는데, 안전률 3이상을 만족하는 Skin의 Ply 수에 폼의 두께를 도출 하였으며, 이때 Skin의 Ply 수는 1~24개를 적용하였다. Fig. 8은 안전률 3이상을 만족하는 각 스킨 Ply에 따른 전체 무게를 나타낸다. 유리섬유 Ply가 증가할수록 페어링 두께는 감소하고, 무게는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 GFRP의 밀도가 Polyurethane의 밀도보다 36배 크기 때문이다. 본 연구에서는 페어링의 목표 중량 값이 선행 제품 무게보다 10% 감량이기 때문에 GFRP 5ply로 수행하였다. 이러한 이유는 5ply일 때 두께 감소율이 점차 낮아지며 본 연구에서 원하고자 하는 페어링

무게 값을 확인할 수 있기 때문이다. GFRP 5ply로 페어링 구조 설계 시 페어링의 총 무게는 30.563kg으로 확인할 수 있었다.

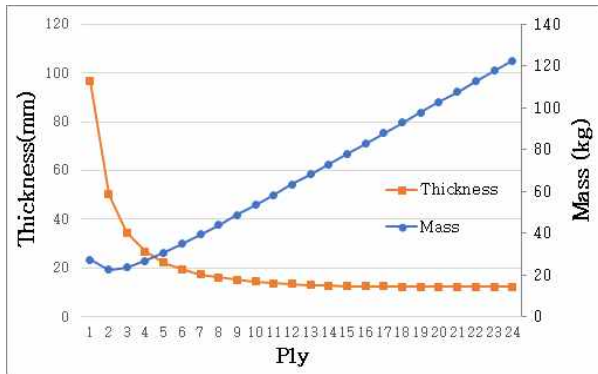


Fig. 8 Graph Showing The Combined Thickness and Mass of Glass Fiber and Foam

3.5 가변 두께 샌드위치 적층방식 I, II

일정 두께 샌드위치 구조 단계에서의 페어링 전면부 부재와 사이드 삼각형 부재를 더한 총 무게는 30.563kg이다. 좀 더 높은 경량화를 위하여 샌드위치 구조물에 가변 두께의 복합재료 적층방식 단계를 접목 시켜 무게 경량화를 수행하였다. 첫 번째 가변 두께 샌드위치 적층방식 I에서는 하중을 페어링 전면부를 세로방향으로 총 10등분하여 분할된 면 각각의 최대 하중이다. 이때 GFRP 두께는 5ply로 고정을 하여 하중이 감소함에 따라 폼의 두께도 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이때의 페어링의 총무게는 27.93kg이다. 첫 번째 가변 두께 샌드위치 적층방식과 일정 두께 샌드위치 적층 방식을 비교 시 무게는 약 10% 차이가 난다는 것을 확인할 수 있었다.

두 번째 가변 두께 샌드위치 적층 방식에서는 하중을 페어링 전면부를 세로방향으로 총 10등분하여 분할된 면 각각의 최대 하중이다. 이때 GFRP 두께에 변화를 줬으며, 하중이 급격히 감소하는 구간을 설정하여 GFRP 두께와 폼의 두께도 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 최종 설계방법에서 페어링의 총 무게 값은 20.534kg으로 확인할 수 있었다. 무게는 Fig. 8과 비교 시 약 30% 경량화를 확인할 수 있었다. Fig. 9와 Fig. 10은 가변 두께 샌드위치 적층방식 I, II 의 두께와 무게를 그래프로 나타낸 그림이다.

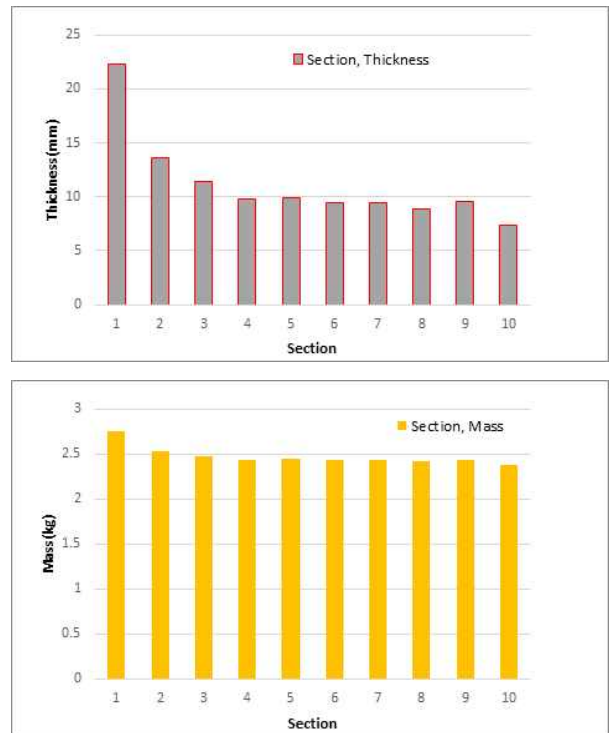


Fig. 9 Thickness and Mass of Variable Sandwich I Graph

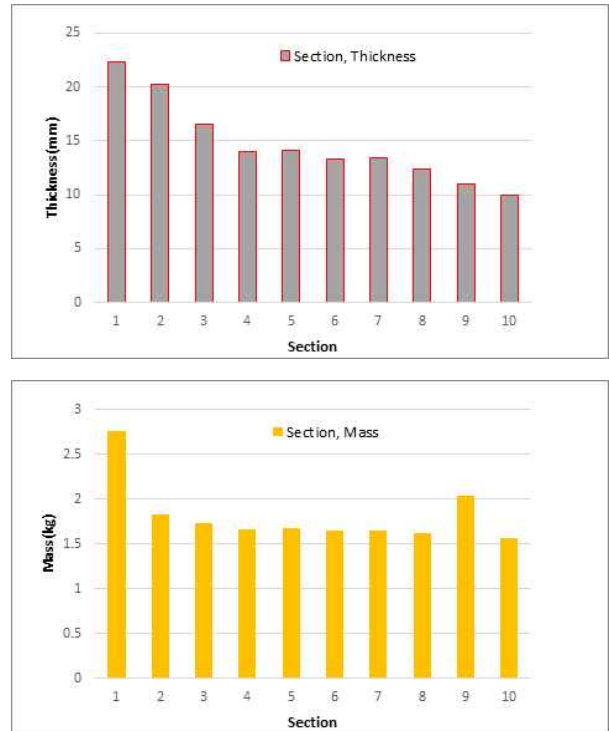


Fig. 10 Thickness and Mass of Variable Sandwich II Graph

4. 구조 해석

4.1 평판 해석

본 연구에서는 페어링 구조 설계 시 페어링 전면부를 균일 분포 하중이 작용하는 단순지지보로 모사하였기 때문에 페어링 치수에 맞게 평판을 모델링하였다. 앞 절 샌드위치 구조 설계 단계에서의 설계 이론을 평판에 적용하여 평판의 Face Skin은 GFRP 1.25mm (5Ply), Polyurethane Foam 19.78mm을 확인하였다. 구조설계 시 압축 강도 184.6MPa에 안전 계수 3을 고려했기 때문에, ANSYS 프로그램을 활용하여 구조 해석 시 평판에서의 유리 섬유 허용 응력 값은 61.53MPa로 예상되었다[14]. Fig. 11은 평판에 대한 샌드위치 구조물 적층 시 Face Skin의 구조해석 결과이다. 구조 해석 결과 Face Skin은 평판에서 최대 응력 값은 60.129MPa, 안전 계수 값은 3.07로 확인하였다. Fig. 12는 평판에 대한 샌드위치 구조물 적층 시 Foam의 구조해석 결과이다. 구조 해석 결과 Foam은 평판에서 최대 응력 값은 0.441MPa이며, 설계 시 GFRP를 기준으로 수행하였기 때문에 GFRP는 설계 이론과 해석 값에 대한 오차는 약 2.3% 값으로 확인할 수 있었다. 그러므로 페어링 해석 시 구조적 안전성을 확인하였으며 본 연구에서는 페어링 구조 설계 절차의 신뢰성을 검증하였다.

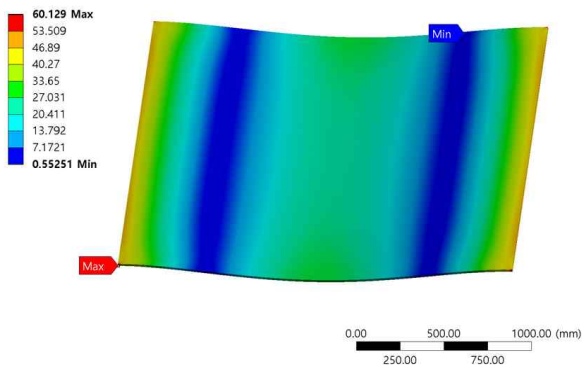


Fig. 11 Structural Analysis(Face Skin) of Plate

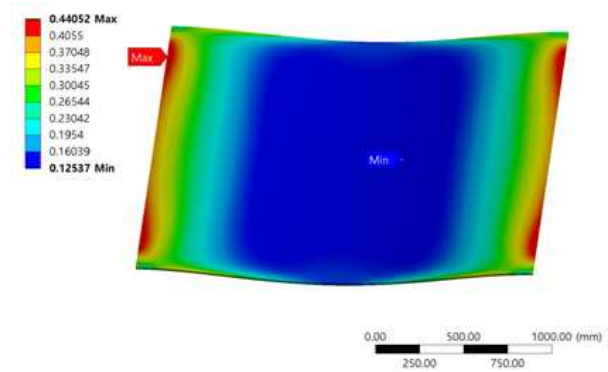


Fig. 12 Structural Analysis(Foam) of Plate

4.2 페어링 해석(일정 두께 샌드위치 적층)

Fig. 13은 샌드위치 구조물에 Load Case. 1을 활용한 페어링 구조 해석 결과이다. Face Skin에서 최대응력은 페어링 상단부분에서 발생한다는 것을 확인하였다. 이 때 응력 값은 38.451MPa로 결과가 확인되었다. 허용 응력 값이 61.533MPa이므로, GFRP의 안전 계수는 4.8로 확인하였다. Load Case. 1을 활용하여 구조해석 시 페어링은 구조적으로 안전하다는 것으로 확인하였다.

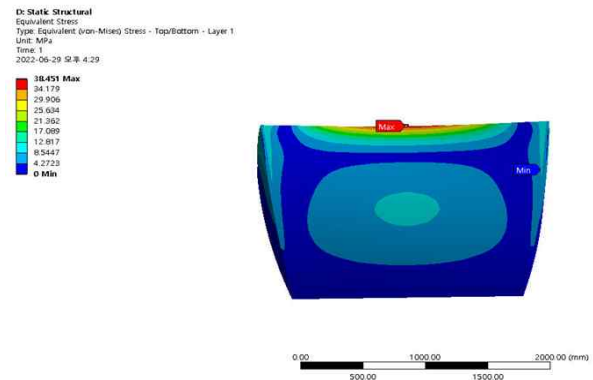


Fig. 13 Analysis of Fairing Structure with Load Case.1 (Face Skin)

4.3 페어링 해석(가변 두께 샌드위치 II 적층)

Fig. 14는 가변 두께 샌드위치 적층 방식 II를 적용한 페어링에 Load Case. 2를 활용하여 페어링을 구조 해석한 결과이다. Face Skin에서 최대 응력은 페어링 상단부분에서 발생한다는 것을 확인하였다. 이 때 응력 해석 결과는 60.68MPa로 확인되었다. 안전 계수 3을 적용한 허용 응력 값이 61.533MPa이므로, GFRP

의 안전 계수는 3.04로 확인하였다. 최대 하중 조건인 Load Case. 2를 활용하여 구조해석 시 페어링은 구조적으로 안전하다는 것으로 확인하였다.

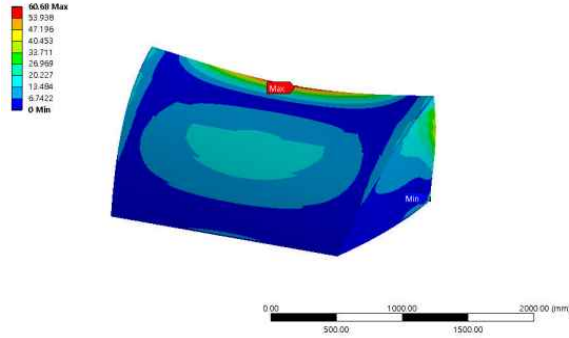


Fig. 14 Analysis of Fairing Structure with Load Case. 2 (Face Skin)

5. 결 론

본 연구에서는 페어링을 장착한 3.5Ton 상용차의 구조 설계 및 해석을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 상용차의 최고 운행 속도(130km/h)와 돌풍조건(72km/h)인 Load Case. 2 조건을 페어링의 최대 하중 조건으로 설정하였다.
2. 가변 두께 샌드위치Ⅱ 설계 방법을 적용하여 목표 요구 무게보다 10%이상 경량화하였다. 총 무게는 20.534kg으로 검토되었다.
3. 최종 구조 설계가 확정된 페어링의 구조 해석 결과 안전계수 3.04로 도출되었으며, 최대 하중 조건에서 안전한 것으로 확인하였다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원과 2018년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2018R1D1A1B07043553)을 받아 수행된 연구임(P0012769, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)

References

- [1] C. H. Kim, "An effect of Roof-Fairing and Deflector system on the Reduction of Aerodynamic Drag of a Heavy-Duty Truck", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 14. No. 2, pp 194-201, 2002.
- [2] Wood. R. M. "A discussion of a heavy truck advanced aerodynamic trailer system." *Proc. of the 9th Int. Symp. Heavy Veh. Weights Dimens*, University Park, PA, 2006.
- [3] Pereira, C. A. "Drag reduction optimization of a day cab roof fairing-design and validation. *SAE Technical Paper*, 2015.
- [4] C. H. Kim, "A Study on the Characteristics of Reducing Air Resistance of Loop Faring and Deflect for Large Trucks.", *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 14(2), 194-201, 2006.
- [5] J. J. Kim, S. S. Lee, M. K. Kim, D. H. You, S. J. Lee, "Salient drag reduction of a heavy vehicle using modified cab-roof fairings." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 164, pp. 138-151, 2017.
- [6] E. J. Lee, B. G. Hwang, J. J. Kim, S. J. Lee, "Wind tunnel study on drag reduction of 5 ton truck using additive devices", *Journal of The Korean Society of Visualization*, 13(1), 9-14, 2015.
- [7] H. C. Choi, J. G. Lee, H. M. Park, "Aerodynamic of heavy vehicles" *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol 46, pp441-468, 2014.
- [8] Libove, C. and Lu, C.H., 1988, "Beam Like Bending of Variable-Thickness Sandwich Plates" *AIAA* 24 Jul 1988.
- [9] C. M. Park, K. J. Park, W. I. Lee, "Optimal Design of the Shape of Variable Sandwich Structures." *Journal of the Korean Society of Mechanics*, 17.9 2162-2171, 1993.
- [10] HyundaiMotor, "3.5Ton Mighty" ,www-truckbus.hyundai.com, 2022.

-
- [11]E. H. Jo, "Analysis of gusts for thunderstorms in Honam area." *Joseon Natural Science Papers*, 2(2), 101-130, 2009.
- [12]James, M. "Mechanics of Materials", THOMSON Learning, 2001.
- [13]J. H. Bang, "A Study on the Design and Analysis of High-Efficiency and Light-weight Design of Small Wind Power Generation Systems", Chosun University Ph.D. dissertation, 2004.
- [14]ANSYS, ANSYS User's Manual Version 17.2, ANSYS Inc, 2016.