

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 미차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리, 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락, 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명 확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

미것은 이용허락규약(Legal Code)을 미해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer 🖳





2008년 2월석사학위논문

신에너지 수송용 차량의 하이브리드 복합소재 차체에 대한 최적 제작 프로세스 연구

- 복합재 적용 차량의 경제성 평가 -

조선대학교 대학원 항 공 우 주 공 학 과

김 영 광

신에너지 수송용 차량의 하이브리드 복합소재 차체에 대한 최적 제작 프로세스 연구

- 복합재 적용 차량의 경제성 평가 -

Study on Optimum Manufacturing Processes for Hybrid Composit Structure of New Energy Transportation Vehicle

2008년 2월 25일

조선대학교 대학원

항공우주공학과

김 영 광

신에너지 수송용 차량의 하이브리드 복합소재 차체에 대한 최적 프로세스 연구

- 복합재 적용 차량의 경제성 평가 -

지도교수 공 창 덕 이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2007년 10월

조선대학교 대학원

항공우주공학과

김 영 광

목 차

	URES ····· I	
	PLES	
ABSTRACT	······································	Л
제 1 장 서 론	<u> </u>	1
제 1 절 수	·송용 차량 시스템의 연구배경 ······	3
1.1	수송용 차량 시스템의 경량화 필요성	3
제 2 절 차	·량 개발 연구동향 ······	6
2.1	국내 차량 개발 연구동향	6
2.2	국외 차량 개발 연구동향	6
제 3 절 연	!구범위	9
제 <i>2</i> 장 복합재.	료 차체 개발 현황 ····· 1	1
제 1 절 국	·내 개발 현황	1
제 2 절 국	⁻ 외 개발 현황	2
제 3 장 차체 중	· - - - 량 감소를 위한 설계 요소	8
제 1 절 경	량화 설계 시 고려사항 ······ 1	8
제 2 절 디	자인 구성 ······ 2	22
2.1	복합재료 차체 디자인 사례 2	2
2.2	설계 구성 요소 2	25
2.3	기존 차량대비 경량화 분석 ······ 2	?6
제 4 장 경량화	에 따른 비용감소 요소 ······ <i>2</i>	28
제 1 절 제	작공법에 따른 비용평가 3	0
1.1	복합재 제작공법 소개	30

				1	2 <u>b</u>	후합기	내 제조	: 공법	선정	및	제조	공정	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	·· 34
				1	<i>3</i> ર	선정된	된 복힙	개 제	작 공	법 에	따른	를 비선	· 평기	ት	•••••	•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· 40
		제	2	절	운.	용에	따른	비용	평가	•••••	•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	41
				2	1 ૧	<u>년</u> 료	절감이	따른	비용	평 7	ነ …	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	·· <i>42</i>
				2	2 f	우지ㅂ	미용(정	मो मो ई	용) 절	감 에	따른	는 비용	トヨブ	ት ····	•••••	•••••	•••••	·· 45
				2	3 ₹	환경비	비용에	따른	비용	평가	••••	•••••	•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	•••••	•••••	• • • • • • • • •	• 48
		제	3	절	경	량화	에 따	른 최종	는 비용	- 평	가 …	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	51
제	5	장	결		론	•••••	••••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	56
참	J	. 문	ځ ځ	<u> </u>	• • • • •							•••••	•••••					58

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Intercity Bus Weight History	4
Fig. 2 Irisbus North America - Civis	7
Fig. 3 LCC Concept of North American Bus Industries	10
Fig. 4 하이브리드 복합재가 적용된 TTX	11
Fig. 5 The Advanced Technology Transit Bus	12
Fig. 6 NABI CompoBUS One-Piece Composite Structure	13
Fig. 7 BOVA Magiq Coach	14
Fig. 8 D-Bus Body over Chassis Concept	15
Fig. 9 Material properties of core with thickness	18
Fig. 10 복합재 차량의 모듈화 된 기본 설계 개념도	20
Fig. 11 IMTS 복합재 적용 차량의 주요 구조 파트, 일본	22
Fig. 12 IMTS 복합재 적용 차량의 실제 제작 구조 파트, 일본	23
Fig. 13 Vacuum Infusion 공법을 위한 대형 Tool 제작과정	24
Fig. 14 Vacuum Infusion 공법을 위한 대형 Tool 및 Heat system	24
Fig. 15 초저상 버스 개발 차량	25
Fig. 16 차체의 일체형 개념 및 Inner Frame과 Under Panel	26
Fig. 17 Potential economical advantages of Composite Material	28
Fig. 18 Economical advantage of Lightweight constructions	29
Fig. 19 30m 대형 오토클레이브 제작 모습	31
Fig. 20 Vacuum Infusion에 의한 제작 공정	32
Fig. 21 RTM 공법의 개요 및 성형구조물의 예	33
Fig. 22 필라멘트 와인딩 공법에 의한 차체 제작 예	32
Fig. 23 Cross-section of the contact moulding set-up, showing the stack of	
consumables used for vacuum bagging	37
Fig. 24 Cross-section of the SCRIMP set-up	38
Fig. 25 Vacuum Infusion of a boat hull, showing the resin inlet channels used	! to

reduce	the impregnation distance	39
Fig. 26	Cross-section of the VAP set-up	39
Fig. 27	경량화에 따른 절감 연료비용 비교	42
Fig. 28	경량화에 따른 절감 유지비용(정비비 관련) 비교	46
Fig. 29	경량화에 따른 절감 환경비용 비교	49
Fig. 30	경량화에 따른 절감 최종 운용비용 비교	51
Fig. 31	오토클레이브 공법 적용에 따른 손익분기점	53
Fig. 32	Vacuum Infusion 공법 적용 시 11% 비용 절감에 대한 손익분기점	55
Fig. 33	Vacuum Infusion 공법 적용 시 20% 비용 절감에 대한 손익분기점	55

LIST OF TABLES

Table. 1 Phileas 60 Vs. Bi-modal Tram	15
Table. 2 제작 및 조립방법 선택에 의한 경량화	19
Table. 3 기존 버스차량 Vs. 복합재 차량과의 경량화 분석	27
Table. 4 Comparison of Processes	35
Table. 5 복합재 제작 공법에 따른 비용 비교	40
Table. 6 Life Cycle Costs of Intercity Buses, Canada	41
Table. 7 경량화에 따른 연료비용 절감 비교표	43
Table. 8 표준운송원가표 중 변동비 항목 - 가립회계법인	45
Table. 9 경량화에 따른 유지비용 절감 비교표	46
Table. 10 경량화에 따른 환경비용 절감 비교표	49
Table. 11 국내 경유버스 운영비용 중 환경비용 항목 - KIMM	50
Table. 12 경량화에 따른 최종 운용비용 절감 비교표	52
Table. 13 복합재 제조공법별 비용 상승부분 회수기간	54

ABSTRACT

Study on Optimum Manufacturing Processes for Hybrid Composite Structure of New Energy Transportation Vehicle

- An Economical Efficiency Assessment of Composite Carbody -

by Kim, Yeong-Gwang

Advisor: Prof. Kong, Chang-Duk, Ph. D.

Department of Aerospace Engineering,

Graduate School of Chosun University

The following result was found through this study. Although use of an all-composite structure a transportation vehicle may have higher manufacturing cost than other material structures, if a social economic framework, that both the life cycle cost including the operational phase cost and the environmental impact would be more important parameters, is considered the all-composite structure becomes clearly the best solution for economic point of view relatively to other material structures such as the metal structure or the hybrid metal-composite structure.

This study was an objectification to the interrelation equation to fuel costs, maintenance costs and pollutant emission costs about light weight composite carbody

and evaluated the break-even-point according to all-composite carbody manufacture cost rise about existing metal vehicle. And this study treated the carbody requirement performance and considered a reduction production cost according to the composite manufacture.

Finally, all-composite structure evaluated most efficient in an operation energy side.

제 1 장 서 론

복합재료는 금속재료에 비하여 매우 우수한 역학적 성능과 내구성을 나타낼 뿐만 아니라, 단위 중량에 대한 기계적 성질의 우수성과 적층각의 변화로 기계적 탄성계수의 방향성을 조절할 수 있는 장점 등으로 인하여 구조물의 고성능 및 경량화가 요구되는 항공우주분야, 철도차량 및 자동차 산업 등의 광범위한 분야에서 활용되어 기존의 철강 구조물을 대체할 수 있는 구조물의 신재료로 각광을 받고 있다. 특히 높은 신뢰도와 안전성이 요구되는 분야에서 복합재료는 사용 초기에는 2차 구조물(Secondary Structure)에 제한적으로 적용되던 것이 1차 주 구조물(Primary Structure)까지 사용범위가 점차 확대되고 있다.[1,25]

하지만 국내에서는 차량이나 선박, 항공기와 같은 운송수단 구조물에 복합재료 적용개발에 있어서 요구 성능에 대한 연구만 이루어지고 있을 뿐이다. 또한 복합재료를 적용한 실제 구조물 제작에 있어서 재료 및 장비에 따른 초기비용이 매우 높다는 점이가장 큰 단점으로 지적되고 있는데 이러한 이유는 요구성능대비 적절한 복합재 제조공법에 대한 기술 또는 이해가 부족하여 과도한 비용이 요구되는 제작방법의 적용으로경제적, 사회적 비용이 지출되고 있는 실정 때문이다. 만약, 복합재 적용 구조물에 대해 획기적으로 초기 제작비용을 낮출 수 있는 대책이 마련된다면, 복합재료의 구조물활용성은 매우 높다라고 할 수 있다. 따라서 초기 제작비용을 줄이기 위한 제작 및 재료적 관점에서의 심도 깊은 연구 검토가 지속적으로 진행되어야 할 필요가 있다.

현재까지 연구 검토된 내용을 분석해 보면, 복합재료는 초기 제작비용은 다소 높지만, 적용 이후 구조물 유지관리 비용에서 충분한 이점을 가지고 있는 것으로 분석되고 있다. 또한, 모든 구조물은 제작된 후 시간이 경과함에 따라 여러 가지 요인에 의해 수많은 문제점들이 발생하게 되며 그 대응책으로 수리를 하게 되는데, 이러한 수리를 몇번씩 되풀이하다 결국에는 교체시기를 맞게 되고 언젠가는 그 수명을 끝나게 되는 생애주기(Life Cycle)를 가지고 있는데, 구조물의 전체수명(제작 - 유지관리 - 수리 및재활용 - 폐기)동안 드는 전주기 비용(Life Cycle Cost, 이하 LCC라 한다.)의 측면에서 복합재료는 타 재료에 비해 경제적으로 매우 유리하다는 결과를 나타내고 있으며,

LCC의 분석 유형을 보면 투자비용, 장비비용, 설계비용, 제작비용, 운용(유지보수)비용, 잔여 가치 등으로 나눌 수 있다.

복합재료의 경우 유지관리 비용에서는 충분한 이점을 가지고 있는 재료로서 제작비용 외에 구조물의 수명기간 전체에 걸친 유지관리 비용까지 포함한 총괄적 비용 정보를 분석하여 접근하는 것이 반드시 이루어져야만 한다. 이같은 사실과 더불어 복합재료를 이용한 구조물에 대한 LCC분석에 대한 관심은 매우 높으나, LCC 개념이 도입된지 얼마 되지 않았으며, 주로 토목구조물을 중심으로 적용 되어왔기 때문에 운송수단구조체와 관련된 연구 자료는 많지 않은 것이 현실이다.

따라서 본 연구는 국내 환경 및 기술 수준을 고려하여 복합재료를 이용한 신에너지수송용 차량의 예를 통하여 전주기 수명 평가(Life Cycle Assessment, 이하 LCA라 한다.)와 전주기 수명 비용(LCC)에 미치는 중요한 변수를 규정하여 복합재 구조물의 전주기 비용을 산정하여 평가하고, 전주기 비용의 부분적 비용 연구방법에 대한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

제 1 절 수송용 차량 시스템의 연구배경

우리에게 필요한 대중교통수단은 운영의 유연성, 승차에 편리한 접근성, 시스템 구축 에 최소의 비용이 드는 것, 그리고 원하는 시간 또는 예정된 시간에 이용할 수 있는 정 시성을 동시에 만족시키는 시스템이다. 이와 관련하여 수송용 차량의 대표라 할 수 있 는 버스의 경우 대부분의 장점을 갖고 있는 반면 정시성에 한계가 있음을 알 수 있다. 문제는 정시성을 어떻게 극복하는가에 있으며, 이를 위하여 철도가 갖는 정시성의 운행 체계에 버스와 유사한 시스템을 적용하는 것이 효과적일 수 있다. 그러나 현재의 버스 를 그대로 적용할 경우에는 수송량, 편의성, 안전 및 정시성에 대하여 원하는 만큼의 효 과를 기대하기 어렵다. 따라서 지하철이나 경량전철처럼 안전 및 정시성을 갖는 운영체 계에 적합하고, 전용궤도와 일반도로를 모두 주행할 수 있는 바이모달 형태의 차량을 개발하여 적용할 필요가 있다. 또한 현재 운행되는 획일적인 구조와 차량외형을 다양한 도시미관과 잘 어울리도록 함으로써 타고 싶은 마음이 들도록 할 필요가 있다. 그리고 엔진의 배출물이 도심지 공해의 주된 원인이 되기 때문에 엔진의 배출물을 대폭 줄이거 나 배출물이 없는 무공해 동력원에 의하여 구동되는 차량이 필요하다. 또한 교통 약자 의 승하차가 편리하도록 차량 답면을 초저상으로 하여 정거장 높이에 맞추고 지하철과 같이 정거장에 정밀하게 정차시켜 유모차, 카트 및 휠체어가 계단 없이 유연하게 탑승 할 수 있어야 한다. 해외에서도 이와 관련된 요구사항과 유사한 차량을 개발하였으며, 최근 들어 시험운전 또는 영업운전을 시작하였다.[21,22]

1.1 수송용 차량 시스템의 경량화 필요성

대부분의 교통수단은 산업사회의 발달로 그 활용면에서 상당히 발전되어 왔고 그 쓰임새 또한 다양해졌다. 가장 일반적인 교통시스템 중 버스의 경우 승객의 요구조건 충족과 화물 수요 급증으로 인해 차체는 더욱 커져 왔으며, 차체 제조에 있어서는 비용효과성을 위한 강판이나 부식저항성이 좋은 스테인리스와 같은 중량이 무거운 소재를 사용함으로써 버스의 중량이 증가하게 되었다. 이로 인해 차체의 중량이 증가함에 따

라 그에 해당하는 동력을 공급하기 위하여 더 큰 엔진을 장착하게 되었고 이러한 특징으로 인하여 전체 차량의 중량은 결과적으로 더욱 무거운 구조물이 되었다.[3] 이와 더불어 차량의 연료소모율 또한 증가 하게 되었으며, 이로 인한 수송 산업에 의해 발생하게 되는 환경오염에 대한 관심도 또한 증가하게 되었다. 이러한 버스 중량증가 역사의 한 예로써 캐나다 Intercity 버스의 중량 변화 그래프를 Figure. 1에 제시하였다.

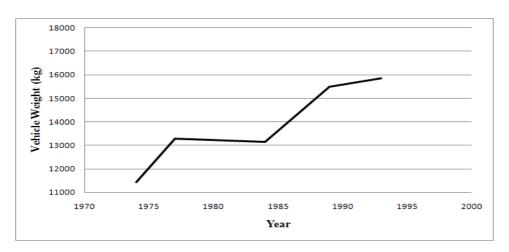


Fig. 1 Intercity Bus Weight History

앞에서 거론한 문제점들의 해결책으로 복합재료가 연구개발 되어지고 구조물에 쓰이게 되었고, 복합재료가 갖는 높은 비강성 및 비강도(high specific stiffness & strength) 특성은 기존의 금속재가 갖는 기계적 물성을 능가할 뿐만 아니라 경량화(lightweight)를 얻을 수 있어 에너지 절감과 환경 친화성이 요구되는 철도차량과 무공해 궤도 차량 시스템 등과 같은 운송 수단에 널리 사용 되어지고 있다. 또한 운송 수단에 이용되는 구조물, 특히 버스차량의 경우에는 1차 부재인 차체 구조물이 차량 전체 시스템 무게의 20~30%를 차지하기 때문에 경량화 측면에서 매우 중요한 부분이다. 차체 구조물의 경량화는 차량의 운행비, 유지보수비의 큰 영향을 주며, 특히 공해 유발을 최소화 하기 때문에 가능한 같은 기능과 강도의 차체라면, 중량이 낮은 차체의 개발이 경제적 측면에서 선호되고 있다.

철도차량의 경우, 복합재료를 적용한 차체 구조물은 기존의 금속재 차체에 비해 20~

30%의 무게 절감을 얻을 수 있으며, 무게 절감으로 인해 20년 가량의 상업 운행 동안, 최대 1.5MkWh의 에너지 절감 효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 1.5MkWh의 에너지 는 600톤의 알루미늄을 생산할 수 있는 에너지로 경제적 비용으로 환산하면 막대한 이익이 아닐 수 없다.

또한 지구 온난화의 규제 및 방지를 위한 국제 협약인 교토의정서가 2005년 2월 16일 발효되어 온실효과를 나타내는 이산화탄소를 비롯한 모두 6종류(메탄(CH4), 아산화절소(N₂O), 불화탄소(PFC), 수소화불화탄소(HFC), 불화유황(SF₆))의 감축대상 가스의법정구속력을 가진 배출감소목표를 지정하고 있으며, 2008년부터 2012년까지의 기간중에 선진국 전체의 온실가스 배출량을 1990년 수준보다 적어도 5.2% 이하로 감축할것을 목표로 하고 있다.[29] 이에 대해 우리나라는 2013~2017년에 교토의정서의 온실가스 감축 의무대상국으로 분류될 가능성이 높으므로 온실가스의 배출 저감효과가 탁월한 대중교통수단의 개발을 준비해야 한다. 따라서 온실가스 감축 노력에 동참해야하는 국제사회의 압력이 거세지고 있는 상황에서 차체의 중량을 줄이는 것은 이러한 문제들을 해결할 수 있는 접근법 중의 하나이며, 경량의 차체 구조물을 생산해 내기 위한 새로운 기술과 재료, 디자인에 따른 차체의 제작이 반드시 필요하다라 할 수 있겠다. 또한 복합소재 차체의 경량화에 대하여 국내 기반기술 여건을 고려하여, 전주기 영향평가 기술을 개발할 시 최적화된 개발 프로세스를 적용하여 개발비용 절감과 개발기간 단축을 이루고, 독자적인 전주기 비용평가 분석 기술을 통하여 기술의 우위성과 경제적 가치에 대한 객관적인 자료를 확보할 수 있을 것이다.

제 2 절 차량 개발 연구 동향

2.1 국내 차량 개발 연구 동향

국내 운행중인 차량이 대부분은 금속재 차체를 적용한 차량과 디젤 및 CNG 엔진을 사용하고 있다. 현재 현대자동차(주), 대우버스(주) 등에서 개발 및 상용화 하고 있으며모든 차체가 금속재 차체를 사용하고 있다. 따라서 연료효율성 문제와 같은 금속재 차체를 사용함으로서 유발되는 문제점과 복합재료를 사용한 경량화 측면 및 에너지 효율상승에 따라 복합재를 적용한 차체가 요구되고 있는 실정이다.

위와 같은 문제점들로 인해 건설교통부 주관 하에 2003년부터 "이용자 중심의 신교통 공간을 창조"라는 슬로건을 가지고 교통약자에게 실질적인 대중교통이용권을 부여할 수 있고, 대중교통을 활성화하여 도로의 혼잡을 완하 시킬 수 있는 고품질/저비용대중교통수단인 초저상 버스와 바이모달 트램 시스템을 개발하여 대중교통수단 표준화를 통한 상용화 보급을 목표로 연구가 진행 중인 상태이다. 먼저 차량개발을 위하여 2003년부터 2009년까지 약 290억 원의 연구개발비를 투입하고 있으며, 이에 더하여 2007년부터 2011년까지는 약 200억 원을 투입하여 바이모달 트램의 운영시스템 및 인프라 요소를 개발하고 이것을 시험선에 통합하여 시연함으로써 효과를 입증하는 실증연구도 착수계획을 가지고 있다.[20]

2.2 국외 차량 개발 연구 동향

현재 유럽을 중심으로 개발된 수송용 차량의 하나인 바이모달 시스템 차량은 버스를 기반으로 철도차량과 유사하게 개발된 차량과 철도차량을 기반으로 버스와 유사하게 개발된 차량으로 구분할 수 있다.[21]

트롤리버스로부터 철도차량 형태로 개발된 것은 네덜란드 APTS사의 Phileas 시스템과 프랑스 Irisbus사의 Civis 시스템이다. Phileas는 2량, 3량 및 4량까지를 한 편성으로 구성할 수 있으며 LPG 엔진과 배터리의 하이브리드 동력원으로 구동된다. 일반

버스 보다 축거가 길어 도로주행에 필요한 회전반경과 정거장에서의 짧은 접안길이를 확보하기 위하여 차량을 이루는 모든 차륜이 독립적으로 조향된다. 또한 차량과 전용 궤도 사이의 전자기 안내시스템에 의하여 자동운전과 반자동운전이 가능하다. Civis는 2량 고정단위로 하며 디젤엔진-발전기에 의한 휠-인 모터로 구동된다. 앞 차륜만 조향이 가능하며 전용궤도의 페인트 마커를 고속스캔한 영상정보를 따라 반자동운전이 가능하다. 아래 Figure. 2는 현재 미국의 공항에서 운행중인 Civis 버스 이다.



Fig. 2 Irisbus North America - Civis

철도차량, 특히 노면전차로부터 바이모달 형태로 개발된 것은 Bombardier사의 TVR 시스템과 Lohr사의 Translohr 시스템이다. 이것들은 모두 전차선으로부터 전력을 공급받는 시스템이며, 회차지점 또는 차고 진출입 시의 짧은 거리에서 내장된 배터리에 의하여 운전될 수 있다. 고무차륜이지만 전용궤도 중심에 설치된 안내레일을 따라 운전된다.

이와 같은 새로운 대중교통시스템은 Bus Rapid Transit-BRT, Bus Semi Rapid Transit, Busway System, Rubber-Tired Trams, Bus Based Transitway, Rubber-Tired Rapid Transit-RT2 등으로 알려져 있다.[21]

이러한 교통시스템에 적합한 복합재료가 적용 되어진 경량화 차량개발로서

Advanced Technology Transit Bus(ATTB)는 미국의 Federal Transit Administration 으로부터 개발된 차량으로 차체 구조는 샌드위치 판넬과 하이브리드 강철프레임으로 구성되었고 Vacuum-Assisted Resin Transfer Moulding(VARTM) 공법으로 제작되어 졌다.

NABI(North American Bus Industries) CompoBus는 All-composite 차체 제조 능력을 보여주면서, 그 원형(prototype)은 특허가 얻어진 SCRIMP(Seeman Composite Resin Infusion Moulding Process) 공법을 사용하면서 TPI Composite Inc.에 의해 개발되었다.

BOVA Magiq 버스는 하이브리드 재료로 구성된 디자인으로 개발된 차량으로 easy-to-assemble 구조로 샌드위치 판넬이 사용된 차체이다. 이 차량에 적용된 디자인은 버스의 양 끝단에서 쉽게 조립될 수 있도록 제작된 혁신적인 디자인이다. 조립에 있어서는 어떠한 용접 방법도 쓰이지 아니하고 볼팅(bolting)과 접착(bonding)에 의해서만 조립되어진다.

D-Bus는 Volvo에서 하이브리드 재료로 구성으로 개발되어진 차량으로 샌드위치 판 넬과 함께 알루미늄 프로파일로 제작되었으며, 조립 방법으로는 용접이나 볼트, 리벳처리가 아닌 오직 접착(bonding)방법만 쓰이고 차체 구성은 일체형으로 디자인 되어져 있다.[4]

제 3 절 연구범위

본 연구는 신에너지 수송용차량 하이브리드 복합소재 차체의 최적 제작 프로세스 연구로서 다음과 같이 연구범위를 설정하고, 차체를 중점적으로 고려하여 연구되었다.

- 1) 국외사례를 통해 기존 금속 구조 차량과 비교하여 경량화에 따른 사회적, 경제적 상관관계를 객관화 하여 평가한다.
- 2) 신에너지 수송용차량 차체를 복합재료를 사용함에 있어서 기존 운용차량대비 최적 경량화를 평가하기 위해 경제적 요소를 확인하고 소요비용을 산출한다.
- 3) 복합재료로 개발될 신에너지 수송용 차량은 설계수명을 15년으로 제작되어진다고 할 때, 국내 법규상 9년의 운용기간으로 적용함에 있어서 국내실정에 적합한 제 작공법과 운용기간에 절감되어지는 변수의 상관관계를 나타내고자 한다.

이는 Figure. 3에서와 같이 미국 NABI사의 사례처럼 복합재료의 경우 초기 구매단계에서 고비용의 단점을 가지고 있으나 복합재료의 특징인 내부식성과 경량화에 따른연료비용 절감효과, 이와 관련된 환경비용인 사회적 비용 절감 및 광범위한 디자인 영역들을 고려하여 복합재료의 우수성과 경제적인 이익에 대한 결과를 제시하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 고가의 재료인 복합재료를 사용하여 제작했을 경우 국내 환경에 적합한 차체 경량화로 인한 운용 비용과 환경 비용에서의 차이를 통하여 전주기비용(LCC)의 측면에서 복합재료는 타 재료에 비해 경제적으로 매우 유리하다는 결과를 도출하고, 복합재료 제조 공법에 따른 비교를 통하여 경제적인 측면에서의 최적 제작 프로세스를 도출한다.



Fig. 3 LCC Concept of North American Bus Industries

제 2 장 복합재료 차체 개발현황

고유가로 인한 에너지이용의 효율성을 극대화하는 방안에 대해 전 세계적으로 심도 깊은 연구가 진행되고 있으며 대체 에너지 확보에 대해 국가적인 차원에서 무한 경쟁에 돌입되었다. 또한 지구 온난화의 규제 및 방지를 위한 국제 협약인 교토의정서가 2005년 2월 16일 발효되어 온실효과를 나타내는 이산화탄소를 비롯한 모두 6종류의 감축대상 가스의 법정구속력을 가진 배출감소목표를 지정하고 있다. 2012년까지 선진국은 전체의 온실가스 배출량을 1990년 수준이하로 감축할 것을 목표로 하고 있어 앞서소개한 온실가스의 배출 저감효과가 탁월한 대중교통수단의 개발을 준비하기 위해서비강성이 우수한 복합소재를 적용한 차체를 개발하여 경량화에 따른 에너지 효율 및사회적 간접비용 절감을 위해 연구가 이루어지고 있다.

제 1 절 국내 개발 현황

국내에서 운용중인 버스의 차체는 주요구조가 철골구조로서 복합재료 적용이 이뤄지지 못했다. 다만 철도기술연구원에서 수행중인 "한국형 틸팅열차 개발사업"에서는 차체를 CF/Al core를 이용한 하이브리드 복합재료를 적용한 차체를 개발하여 2007년 6월 20일부터 호남선에서 시험운행 중에 있다.[2,23,27]



Fig. 4 하이브리드 복합재가 적용된 TTX

제 2 절 국외 개발 현황

국외의 경우 복합재료가 적용 되어진 차체 연구는 활발히 진행 중에 있으며, 여러 종류의 차량이 개발되어 운행되어지고 있고, 해당 제조공법 또한 다양하다. 다음에 국 외의 대표적인 복합재 차량 사례를 소개하겠다.[4]

7. Advanced Technology Transit Bus

Figure. 5의 Advanced Technology Transit Bus(ATTB)는 미국의 Federal Transit Administration으로부터 개발된 차량으로 1994년부터 1999년까지 5년의 기간 동안 경량화 및 연료소모율 감소를 목표로 연구 개발 되어졌다. 차체 구조는 샌드위치 판넬과하이브리드 강철프레임으로 구성되어 있으며 최종 원형(prototype)의 무게는 21,800lb (약 10ton)으로 일반적인 이전 버스 무게의 30% 감량을 보였다.

ATTB의 구조에서 복합재료가 적용된 부분은 Roof, Floor, Side structure 그리고 window로 접착(bonding)에 의해 조립되었고, Klegeceell PVC 폼과 E glass fiber로 구성된 두께 2in의 샌드위치 판넬로 구성된 복합재 구조가 Vacuum-Assisted Resin Transfer Moulding(VARTM) 공법으로 제작되어졌다.



Fig. 5 The Advanced Technology Transit Bus(ATTB)

나. NABI CompoBus

NABI(North American Bus Industries) CompoBus는 앞서 설명한 ATTB를 모방했다고 한다. 하지만 CompoBus의 큰 특징으로 전복합재(All-composite) 차체 제조 능력을 보여주면서, 그 원형(prototype)은 특허가 얻어진 SCRIMP(Seemann Composite Resin Infusion Moulding Process) 공법을 사용하면서 TPI Composite Inc.에 의해 개발되었고, 1999년 2월에 그 모습을 드러냈다.

CompoBus는 다음의 4부분으로 차체가 구성되어져 있다.

: 마루(Floor), 벽(Side structure), 선수와 미수(Front end & Rear end), 천장(Roof)

차체는 SCRIMP 공법에 의해 제작되어지는 발사코어와 유리섬유로 구성된 샌드위치판넬로 제작되었고, 이는 충격손상에 대하여 아주 쉽게 수리되어진다는 장점을 가지고있다. 또한 차체의 중량은 22,000lb(약 10ton)로 이전에 사용되어지던 차량에 비하여 7,000lb(약 3200kg)의 경량화를 보였다. 현재 NABI는 SCRIMP와 VARTM 공법을 이용하여 차체의 중량 기존대비 32% 감소를 목표로 연구진행 중 이다.





Fig. 6 NABI CompoBUS One-Piece Composite Structure

다. BOVA Magiq Bus

BOVA Magiq 버스는 하이브리드 재료로 구성된 디자인으로 개발된 차량으로 easy-to-assemble 구조로 샌드위치 판넬이 사용된 차체이다. 이 차량에 적용된 디자인

은 버스의 양 끝단에서 쉽게 조립될 수 있도록 제작된 혁신적인 디자인이다. 8구역으로 나뉘어 모듈화 구성으로 제작 되어있는 차체는 중간 부분, 정면의 차축 부분, 후방의 차축과 엔진 부분, 옆·지붕·후방·전방으로 조립 마지막 단계에 전방과 후방을 끼워 맞추는 형식이다. 조립에 있어서는 어떠한 용접 방법도 쓰이지 아니하고 볼팅 (bolting)과 접착(bonding)에 의해서만 조립되어진다는 특징을 가지고 있다.

본 차량에 적용되는 복합재료는 Alusuisse Airex vacuum bag 기술이 적용된 샌드위치 판넬이 사용되어졌고, 앞서 소개한 특별한 제조 공법과 혁신적인 디자인으로 기존의 다른 차량에 비해 전주기비용(LCC)이 1/2 수준이지만, 기존 버스에 비해 비용에 있어서 약 10~15% 비싸다는 점이 특징이다.



Fig. 7 BOVA Magiq Coach

라. D-Bus

우리가 잘 알고 있는 스웨덴의 Volvo사 에서 하이브리드 재료 구성으로 개발되어진 차량으로 샌드위치 판넬과 함께 알루미늄 프로파일로 제작되었다. 조립 방법으로는 용접이나 볼트, 리벳처리가 아닌 오직 접착(bonding)방법만 쓰이며, 차체 구성은 일체형으로 디자인 되어져 있다. 또한 일반적인 패스너(fastener)가 필요 없는 하이브리드 접착 샌드위치 판넬 사용으로 무게비 강도가 좋으며 소음, 절연, 진동 그리고 열에 대한저항성이 좋다는 특징을 가지고 있다.



Fig. 8 D-Bus Body over Chassis Concept

이외에도 복합재료가 적용된 해외 차량을 다음 표를 통하여 소개하였다. 차량 제원 중 차체의 크기, 중량 그리고 복합재 적용 구조에 대한 부분을 다음에 나열하였다.

소개된 차량 중에서도 현재 네델란드 에인트호번(Eindhoven)에서 운용 중인 Phileas 60 차량은 차체의 대부분이 부식 저항성이 뛰어난 특성을 가지고 있는 샌드위치 복합 재료가 적용된 모노코크(monocoque) 차체로 해외 다른 국가에서 상용되어지고 있는 차량에 비하여 중량에 있어서 상당히 경량화 되어있으며, 현재 국내에서 개발 중인 바이모달 차량과 상당한 유사점을 가지고 있다. 차량의 제원은 Table. 1과 같으며 국내에서 개발 중인 바이모달 차량과 비교 표시 하였다.

Table. 1 Phileas 60 Vs. Bi-modal Tram(현재 국내개발 중)

	Philea	ns 60	Bi-modal Tram		
Dimensions	Length Width Height	18.0m 2.5m 3.1m	Length Width Height	18.2m 2.5m 3.1m	
Weight	16,80	00kg	_	-	

CompoBus 45 C-LFW	RAPIO EXPRESS			
Dimensions	Length 13.7m, Width 2.6m, Height 3.2m			
Weight	12,727kg			
Construction	Unitized composite using glass-fiber reinforced, vinyl-ester resin laminate for the body-chassis shell			
NABI Model 60 – BRT	Rapīd Rapīd			
Dimensions	Length 18.3m, Width 2.6m, Height 3.1m			
Weight	19,490kg			
Construction	Electrically welded stainless steel structure, with bonded FRP sheet roof, stainless side skins and skirts			

Van Hool AG300					
Dimensions	Length 18.3m, Width 2.6m, Height 3.4m				
Weight	17,600kg				
Construction	Electrically Welded Steel/Stainless Steel, Fiberglass-Reinforced Polyester Front/Rear Aircraft Aluminum Roof				
Phileas 60					
Dimensions	Length 18.0m, Width 2.5m, Height 3.1m				
Weight	16,800kg				
Construction	Lightweight modular sandwich composite Corrosion - resistant monocoque body				

제 3 장 차체 중량 감소를 위한 설계 요소

제 1 절 경량화 설계 시 고려사항

현재 20여개국이 BRT(Bus Rapid Transit)의 운송시스템에서 초저상버스를 적용하고 있으며, 경량화 측면에서의 차량의 차체 제작방법으로 신소재 복합재를 적용하고 있다. 복합재를 사용한 차체의 경우 차체 무게 감소 부분에서 최대의 효과를 얻을 수 있으며, 강도와 강성 같은 구조체의 재료 물성치 또한 증가 하게된다. Figure. 9는 차체의 주요 구성요소에 적용되는 하니컴 패널에서 하니컴 두께에 따른 강성 및 무게에 변화를 나타 낸 것으로 두께에 따른 강성은 급상승하나 무게의 증가는 매우 미약함을 알 수 있다.

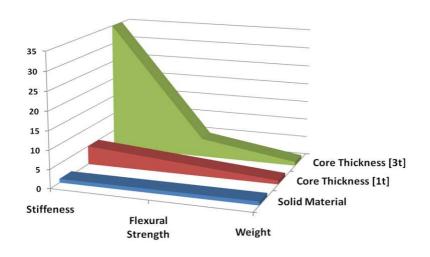


Fig. 9 Material properties of core with thickness

복합재 차체에 대한 설계 시 확보해야 할 기술 중의 하나가 접합기술이다. 복합재료는 금속재와는 달리 용접에 의한 조립이 불가능하여 설계단계에서 선택된 재료, 제작공법, 사용 환경 등을 면밀히 검토하여 접합 방법을 선정해야 한다.

접합부는 구조적으로 집중하중이 발생하여 구조적 파손이 발생하기 쉽고, 장기간 사용함에 따라 누수의 원인이 될 수 있어 개발하고자 하는 차량의 사양에 맞는 적절한 접

합 방법을 개발해야 하는데, 일반적으로 복합재 구조물의 접합기술은 다음 표에서 보는 바와 같이 다양하다.

Table. 2 제작 및 조립방법 선택에 의한 경량화

	저	작방법	조립 / 접합방법	비고
		al construction nethod	- screws of bolts - nails - rivets - sewn seams - spot welds	이종재료/부품
		construction nethod	castingforgingextrudingmachining, etc.	단일제품/단일재료
Construction method		ng construction nethod	- bonding - gluing - welding	준등방성 부품
method	Composite construction method	Fiber-reinforced composite construction method		섬유강화 적충복합재
		Sandwich construction method		면재 +심재 구조
		Hybrid construction method	- Hybrid joint	샌드위치 (섬유강화복합재 + 금속재)

차별적 제작방법(differential construction method)은 주로 이종재료와 부품들의 조립에 사용되는 방법으로 사용되는 접합방법은 볼트 체결, 리벳 체결, 스팟 체결 등과 같이 포인트 형식의 체결방식(point-type fixing)을 채택하고 있다.

일체형 제작방법(integral construction method)은 동일재료 및 단일부품 들의 조립에

사용되는 방법으로 캐스팅(casting), 포징(forging), 기계가공(machining) 등과 같은 제작 방식을 채택한다.

통합적 제작방법(integrating construction method)은 준-균질성 부품 (quasi-homogeneous component) 형태로 조립되는 방법으로 본딩(bonding), 글루잉 (gluing), 용접(welding) 등과 같은 체결방식을 사용하고 있다.

따라서 복합재 차체 개발 시 선정재료, 제작 방법, 운행 조건(설계속도, 운행 환경 등) 등을 면밀히 검토하여 적절한 접합 방법을 개발하여 접합 기술을 확보해야 한다.

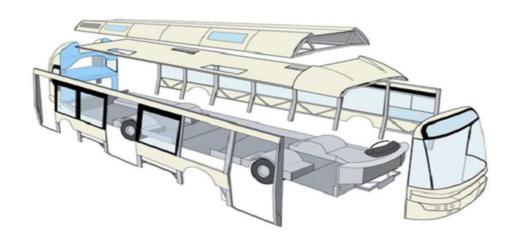


Figure. 10 복합재 차량의 모듈화 된 기본 설계 개념도

복합재 차량의 경량화는 최적설계 및 모듈화 설계, 경량 소재 사용 등의 다양한 방법 들로 인해 가능하다.

최적설계는 자동차, 항공기, 선박 그리고 일반적인 기계구조물에서도 설계 및 해석 기술의 발전으로 인해 적용되고 있는 기술이다. 경량 소재를 사용한 차량의 경량화는 가장 널리 사용되는 방법으로 대표적 경량 소재인 복합재료가 쓰이는 것이다. 반면 모듈화 설계는 차량에서 많은 적용이 되고 있지 않지만, 제작 공정의 감소 및 유지보수 효율화 등을 부가적으로 얻을 수 있어 차량 경량화를 위해 반드시 필요한 기술이다.

복합재 차량을 일체형으로 제작할 경우 유지보수 측면에서 많은 문제점이 발생하게

되는데, 대표적인 문제점으로는 일부분이 파손되어도 전체 구조물을 바꾸어야 하므로 유지보수에 대한 관리와 비용이 막대하게 소요되게 된다.

따라서 지붕(roof), 사이드 구조물, 언더프레임, 엔드 구조물 등을 분리 설계하는 모듈화 설계 기술은 차량의 경량화뿐만 아니라 유지보수의 효율성을 높일 수 있기 때문에 반드시 확보해야 하는 기술이다.

제 2 절 디자인 구성

2.1 복합재료 차체 디자인 사례

최근 일본 나고야 Aichi-EXPO2005에 선보인 복합재료 차량은 "IMTS"로 GHCRAFT社에서 "All CF Composite structured Vehicles Project, 2003 to 2004"가 수행되었다. 차체 제작에 있어서는 일체성형에 따른 Vacuum Infusion 공법에 의해 제작되었고, 새로운 성형공법도 선보였으며, 주 재료로는 약 2톤(ton)의 CF Epoxy Prepreg와 Balsa Sandwich core 등이 사용되었다. SAMPE-J에서 발표된 논문에 따르면 주요구조파트는 Figure. 11와 같이 전두부, 지붕(roof panel), 사이드 구조물(side structure), 바닥(floor panel)으로 구성 되어졌으나, 실제 제작된 차량은 상·하부 및 샤시(언더프레임)으로 구성되었다.

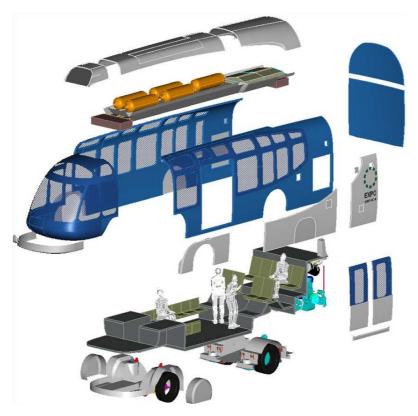


Figure. 11 IMTS 복합재 적용 차량의 주요 구조 파트, 일본

이러한 방식의 이유는 정밀해진 대형 Tool 제작과 일체형 차체의 Infusion 공법 적용시 Heat system을 적용하여 고가의 성형장비 소요 없이 고온의 Resin system을 사용할수 있게 되었기 때문이다. 4개의 주요 부분(전두부, 지붕(roof panel), 양쪽의 사이드 구조물(side structure))을 일체화함으로서 접착에 따른 구조적 손실 및 공수를 절감 할 수 있었다. 또한 Figure. 13과 Figure. 14와 같이 Tool 제작 시 각 섹션을 정밀한 레이져 측정 기법과 밀링을 사용하여 대형 툴을 제작 가능해 일체형 구조로 제작이 가능했다.



Figure. 12 IMTS 복합재 적용 차량의 실제 제작 구조 파트, 일본

Tooling & Measuring System Well Accuracy control of Tooling Large Scale Tool by Resin Infusion

Figure. 13 Vacuum Infusion 공법을 위한 대형 Tool 제작과정

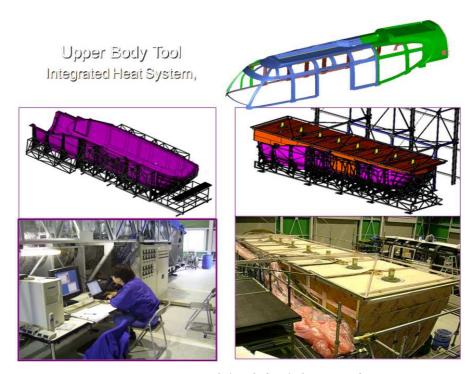


Figure. 14 Vacuum Infusion 공법을 위한 대형 Tool 및 Heat system

2.2 설계 구성 요소

본 연구 대상은 Figure. 15와 같이 외형디자인이 선정된 차량으로 주요 구조는 전두부, 지붕(roof panel), 사이드 구조물(side structure), 후미를 일체화한 구조와 샌드위치바닥체로 크게 2가지 부분으로 구성되었다.





Figure. 15 초저상 버스 개발 차량

일체화된 구조는 E-Glass Epoxy와 알루미늄 샌드위치로 구성하였으며, 실내장비 취부의 용의성과 구조의 강성 등을 위해 Inner Frame을 사용한 하이브리드 복합재 구조형식으로 채택되었다.

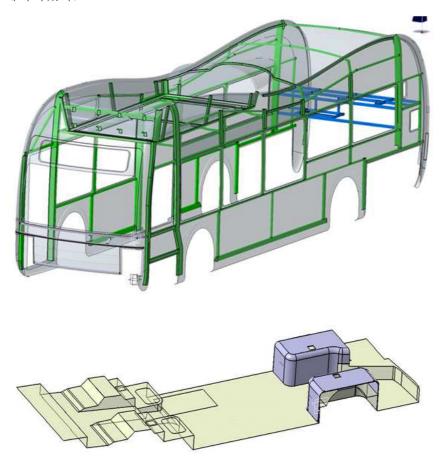


Figure. 16 차체의 일체형 개념 및 Inner Frame 과 Under Panel

2.3 기존 차량대비 경량화 분석

다음의 Table. 3은 국내에서 운용중인 저상버스의 각 부분별 복합재료 적용 시 경량화율을 나타낸 것으로 기존차량대비 경량화율 14%~16.5%에 해당하는 1.7톤(tons)~2.0톤의 무게 절감이 예상되며, 비용부분에 있어서는 13,600,000원의 비용 상승 부분을 예상해 볼 수 있다.

Table. 3 기존 버스차량 Vs. 복합재 차량과의 경량화 분석 ((주)한국화이바)

٠	-) II	V 17		중 량 비 교(kg	•)	가 격 비	교(천원)
순 번	항 목	품 목	기존버스	복합재버스	경량화	기존버스	복합재버스
		Composite Car Body	2133	1,340	-793		
		Center Frame Structure	383	300	-83		
		DashBoard Frame	38	38			
		Floor Frame	50	50			
1 Structure	Engine Compartment	71	71				
	Structure	CNG Tank Frame	235	235			
		Brackets(Center vs. Side)	10	10			
		Front/Rear Bummper	70	70			
		Side/Rear Flap	60	60			
		Structure Total	3,050	2,174	-876		28,000
		Floor Board	255	150	-105		
		Floor Covering	110	110			
		Interior Panel	200	150	-50		
		Driver's Seat Ass'y	40	40			
		Passenger Seat	450	400	-50		
		Stanchion & Grip	100	100			
		Lamps	50	50			
2	Interior	Inside Frame	100	100			
	Facility	Glass	160	160			
		방송장치	7	7			
		단열재	25	0	-25		
		Heater	12	12			
		금구류및 액세서리	40	40			
		Mirrors	10	10			
		Interior Facility Total	1,559	1,329	-230		27,500
		Front Door(전기식)	100	100			
		Mid Door (전기식)	150	150			
		Air-Conditioner System	350	350			
		CNG Tank	900	315	-585		
		Destination	46	46			
		Wiper System	30	30			
		Lights	20	20			
3	Equipment	Back Eye Camera	1	1			
		W/chair탑승장치	80	80			
		Defrofter	1	1			
		Cable Duct&harness	90	90			
		Call Buzzer 및 Memory	2	2			
		각종스위치및 잡자재	25	25			
		기타.	5	5			
		Equipments Total	1800	1,215	-585		47,900
		CNG-Engine Ass'y		_,			
		Transmission					
		Radiator&Interclool,호스					
		Steering System					
4	추진 및	Dash Board & Electric Box					
•	구동	FRT Axle Ass'y					
		Real Ass'y					
		기타,					
		1 1 1 1)		1			1

	Total	12	2,100kg		1.7ton ~ 2.0ton 절감예상	<i>185,900,000</i> 원	<i>199,500,000</i> 원
--	-------	----	---------	--	-------------------------	----------------------	----------------------

제 4 장 경량화에 따른 비용감소 요소

앞의 1, 2, 3장을 통해 연구의 필요성, 복합재료의 국내외 연구동향 및 구조체 각 부분별 복합재료 경량화율에 대해서 논하였다. 본 장에서는 복합재료 적용 시 재료비 및 제작공법 에 따라 초기 비용과 운용상의 경제적 비용의 상관관계를 분석하여 전체 운용주기에 따라 복합재료 사용 시 사회적, 경제적 우수성을 객관화 한다.

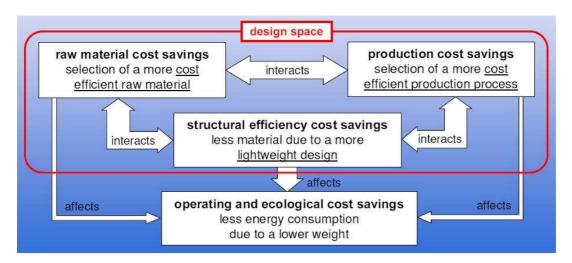


Fig. 17 Potential economical advantages of Composite Material

복합재료는 Figure. 17을 통해 알 수 있듯이 경량화에 따른 디자인과 같은 구조적인 효과는 원자재와 생산에 따른 비용 부분과 상호연관 관계를 가지고 있어서 운용비용과 환경비용에 대해 큰 영향을 끼친다. 따라서 Figure. 18의 식을 통하여 성능대비 비용은 재료비용 (Material cost), 제작비용(Production cost), 운용비용(Operating cost), 환경비용(Ecological cost)을 변수로 할 수 있다.

본 연구에서는 차체 경량화를 위해 복합재료가 쓰임으로 고려하여 재료비용은 고정변수로 하고, 제작비용과 운용비용, 그리고 환경비용의 변수의 상관관계에 따라 최적화 되어 경량화에 따른 각각의 비용 상관관계의 결과를 산출하여 그래프로 도시화 하였다.

비용 결과 산출에 대한 근거로는 국외의 캐나다 자료가 사용되어졌다. 이는 국내의 경우,

복합재료 구조물에 대한 운용비용 측면의 데이터가 전무한 실정이고, 대부분의 복합재 적용 구조물은 토목·건축과 관련된 자료로 본 연구의 운송수단 구조물과의 연관성이 미흡하다 라 판단되어서 이다.

본 연구에 사용되어진 근거자료로 캐나다 IntercityBus의 경우 복합재 적용 시 차체 중량 중 최소 9%의 경량화부터 최대 20%의 경량화 결과를 근거로 하여 비용 감소 결과를 산출하였으며[3], 국내의 복합재료 업체인 (주)한국화이바에서 제시한 14%에서 16.5%에 해당하는 경량화율을 토대로 결과를 산출하였다.

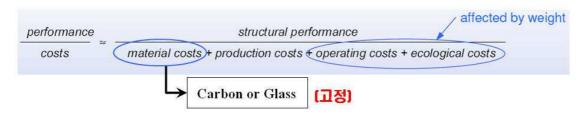


Fig. 18 Economical advantage of Lightweight constructions

제 1 절 제작공법에 따른 비용 평가

1.1 복합재 제작방법 소개

복합재료를 이용한 제품의 제작은 일반 금속재료를 이용하여 제품을 제작하는 방법과 매우 다르다. 섬유강화 복합재료의 제조방법은 주로 그 기지가 되는 물질에 따라 달라지는데 기지재료가 열경화성 수지일 경우와 열가소성 수지일 경우 또 금속이나 세라믹일 경우 각각 최고의 기계적 성질과 경제성을 얻기 위하여 전혀 다른 공정이 사용된다. 또한 복합재료는 일단 성형되면 필요에 따라 절단하거나 구멍을 뚫는 정도의 간단한 가공만을 하므로 제품의 형상에 따라 각기 다른 성형방법을 채택해야 한다. 또한 공정의다양한 선택범위는 복합소재 제조자들에게 생산 제조 비용의 효율화를 가능하게 하며특별한 제조 공정은 생산된 부품들의 형태에 따라 적절히 선택되어야 한다. 현재까지연구 개발되어 활용되고 있는 각종 복합재료의 성형법 중 대형 구조물에 적용 되어지는 공법은 다음과 같다.

- 오토클레이브(Autoclave) 성형법
- Vacuum Infusion 공법
- RTM(Resin Transfer Molding) 공법
- 필라멘트 와인딩(Filament widing) 공법

가. 오토클레이브 성형법

오토클레이브란 Figure. 19와 같이 열과 압력을 동시에 가할 수 있는 가압로인데 고품질과 대형 구조물 제작이 요구되는 항공기의 최신 복합재료 부품 중 판재 및 샌드위치구조물은 대부분이 이 성형법을 이용하여 제작된다. 오토클레이브 성형법은 그 크기가아주 크거나 복잡해서 압축성형법으로는 제작할 수 없으며 제품 생산수량이 많지 않아금형제작이 어려운 경우에 사용된다. 또한 그 공정이 복잡하고 부자재가 많이 필요하며 공정 및 제조시간이 길고 장비가 비싸다는 단점이 있지만 진공백(vacuum bag) 외부에

서는 압력을 가하면서 내부에는 진공상태를 유지시킬 수 있으므로 수지로부터 발생되는 휘발분이 제거되고 프리프레그 각 층간의 접합을 완전하게 할 수 있어서 기계적 성질이 우수한 제품을 만들 수 있는 장점이 있다. 국내의 경우 오토클레이브 성형 기술이세계적인 수준이고 대형 장비의 보유와 장비 안정화가 이루어져 국내에서 적합한 차체제작 공법이라 할 수 있겠다.[26]



Fig. 19 30m 대형 오토클레이브 제작 모습, (주)한국화이바

나. Vacuum Infusion 공법

Vacuum Infusion 공법은 전 세계적으로 선박 및 차량 제작에 있어 많은 나라에서 사용되고 있는 성형방법으로 장점은 저가의 제작방법으로 20m 이상의 대형부품을 제작할 수 있으며 복합한 구조를 제작할 수 있다는 것이 큰 특징이다. 또한, 적층판과 심재 등의 2차 성형이 필요 없고 진공과정이므로 제품내의 기공(void)을 제거하여 균일한 물성을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 몰드와 같은 부수 장비들의 비용을 고려해야하고, 섬유의 체적비가 다른 방법들에 비해 상대적으로 적고 제작 시간이 길어 상당한 양을 수작업에 의존하게 된다는 단점을 가져 해당 기술개발을 위해 많은 연구가이루어지고 있다. Vacuum Infusion과 비슷한 공정으로 SCRIMP(Seemann Composite Resin Infusion Manufacture Process)라 불리우는 Vacuum Infusion이 간소화된 방법의 공정이 있다. 실제로 Vacuum Infusion을 사용하여 제작된 차량의 경우를 살펴보면 영국의 팅팅 열차인 Virgin Rail를 비롯하여 ICT, diesil Ioc Vossloh, Magley Transpik 등

이 있다.[26]

Figure. 20은 Vacuum Infusion에 의한 철도차량 전두부 제작 공정을 보여주고 있다.

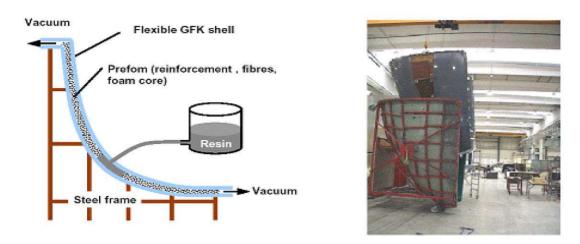


Fig. 20 Vacuum Infusion에 의한 제작 공정

다. RTM 공법

Close 몰드를 사용하는 특징을 가진 RTM 공법의 개요를 Figure. 21에 나타내었다. RTM 공법은 전체적으로 Vacuum Infusion과 비슷하지만 압력을 가해 수지를 밀어 넣는 차이점을 가지고 있는 방식이며 필요에 따라 열을 가하거나 상온에서 경화한다. 이방법은 미국과 캐나다를 중심으로 개발된 기술로서 유럽을 비롯하여 선진국에서 급속도로 확대되는 추세로서 한국에선 실용화 초기 단계이다. 저가의 설비와 장치로도 복잡한 형상의 대형 부품의 성형이 용이하며 다품종 소량 생산에 적합하다. 생산 시 UP계 켈코트나 우레탄 에폭시 수지의 코팅이 가능하고 여러 가지 보강 섬유와 각종 보강재를 사용하고 상온 및 중온(20~100℃)에서 저압을 사용하므로 생산비가 저렴하며 Vacuum Infusion 공법에 비해 성형시간이 짧으며 보강섬유 함유율을 높일 수 있다라는 장점을 가지고 있다. RTM 성형의 단점으로는 프리폼 제조기술이 중요하며, 수지의 유동성 예측 모델링을 하여 고른 수지분포가 이루어져야 하므로 이에 따른 기술개발을 꼭 필요로한다. 또한 복잡한 형상의 경우 몰드 설계 기술이 문제가 될 수 있으며 최적성형조건 설정이 선행되어야 한다.[26]

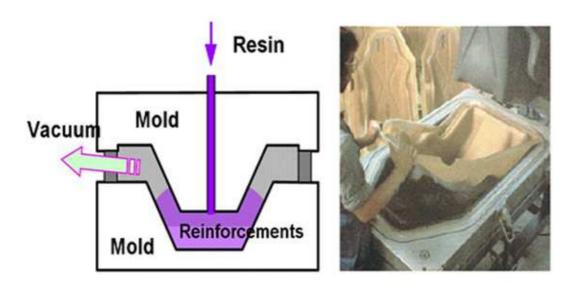


Fig. 21 RTM공법의 개요 및 성형구조물의 예

라. 필라멘트 와인딩 공법

최근에 많이 연구되어지는 방법으로는 필라멘트 와인딩 공법이 있다. 본래 필라멘트 와인딩은 파이프, 압력용기, 로켓 케이스 등과 같이 축대칭(axisymmetric) 제품을 성형하는데 많이 사용되어지는 방법이다. 하지만 유럽에서는 최근에 이러한 공법을 열차 차체와 같이 크기가 큰 제품을 제작하는데 적용하기 시작했다. 스위스의 Schindler사는 RohacellTM 라는 심재(core)에 수지가 약간 경화된 넓은 테이프 형태의 섬유를 감아 전체적으로 보았을 때 샌드위치 구조를 만드는 구조를 필라멘트 와인딩 공법을 개발하여 차체를 제작하였다. 필라멘트 와인딩 공법이 가지는 장점은 섬유 배열이 치밀하고 장력을 적절히 조절할 수 있으며 자동화가 가능하다는 장점을 가진다. 하지만 이 방법의 단점으로 수지의 경화정도, 섬유의 배열, 와인딩 속도, 맨드릴의 강성이나 표면처리에 상당히 민감하게 영향을 받으므로 주의가 요구되면 균일한 섬유의 장력, 수지의 코팅, 올바른 필라멘트의 패턴이 필요하다.[26]

Figure. 17은 스위스의 Schindler사에서 제작한 140km/h급 철도차량 차체로써 필라멘트 와인딩 공법으로 제작 되었다.

이외에도 오븐성형법, 오픈 몰드 성형법 등 대형 구조물에 쓰이는 여러 종류의 복합

재 성형법들이 있다.



Fig. 22 필라멘트 와인딩 공법에 의한 차체 제작 예

1.2 복합재 제조 공법 선정 및 성형 제조 공정

가. 복합재 제조 공법 선정

필라멘트 와인딩 기법은 전 세계적으로 연구가 많이 되고 있는 공법이다. 하지만 스위스 와그농에서 개발된 철도차량의 경우 구조물의 강성 요구조건을 만족 시키지 못하는 경우가 있었으며, 국내의 경우에는 차체 제작과 관련된 필라멘트 와인딩 성형법 기술과 장비 보유 실정이 미흡하여 본 논문의 제작 공법에 따른 비교부분에서 제외되었고, 일체형 구조물을 성형하기에 부족한 방법으로 판단되는 공법들은 제외하였다.

본 연구에서 제조 공법 비교를 위해 선정된 성형법은 두가지로 다음과 같다.

1) 오토클레이브 성형법

: 일체형 구조물을 성형하기 위한 방법으로 우리나라의 실정을 고려하여 앞서 소개한 제작 방법 중 국내 복합재료 회사인 (주)한국화이바가 세계적인 수준의 성형기술과 장비를 보유하고 있는 성형법이며, 한국형 틸팅열차 개발사업으로 오토클레이브 공법이 적용된 차체를 개발한 경험이 있으며, 현재 초저상 버스와 바이모달 트

램 차량이 본 공법으로 개발중에 있어 복합재 공법에 따른 비용평가 공법으로 선 정되었다.

2) Vacuum Infusion 성형법

: 항공기의 경우에서는 제조비용을 무시하고 오토클레이브 성형법을 최상의 공법으로 사용한다. 하지만 일반적인 기계 구조의 저비용에 대형 구조물을 만들기 위해서는 Vacuum Infusion 성형법이 유망한 기술로 학계에 보고되고 있고, 많은 수의 해외 복합재 적용 차량들이 본 성형법으로 제작되고 있다. 또한 제작 비용의 절감을 위해 항공분야에서도 점차적으로 Vacuum Infusion 공법의 적용에 대한 많은 연구가 진행 중에 있다.

따라서 소개된 두 가지 제조 공법이 본 연구의 구조물 제작 프로세스의 경제적 요소의 변수인 제작비용 평가를 위한 성형법으로 선정되었으며, 각각의 공법에 대한 장점과 단점을 Table. 4에 나타내었다.

Table. 4 Comparison of Processes

특 징 공 정	장 점	단 점
오토클레이브 성형법	일체형 대형 구조물 생산에 용이복잡한 형상을 생산할 수 있다.품질이 가장 좋다.	 비싼 원자재 비용 고가의 장비 비용 체적이 커지면 비용이 효과적이지 않다. 2차 성형 사이클이 요구된다.
Vacuum Infusion 성형법	 일체형 대형 구조물 생산에 용이 원자재의 저비용 화학적인 접합을 줄여 샌드위치 구조를 한 단계로 생산 	- 섬유 품질이 제한적이다 각 부위의 두께 검토 및 몰드 제 거 후에 기계적 물성 검토가 요구된다 제작 구조물 형상에 따른 Tool을 제작하여야 한다.

나, 성형 제조 공정

대형 복합재 구조물의 생산을 위해 오토클레이브 성형법과 Vacuum Infusion 성형법에 주안점을 두어 레이-업(lay-up) 방안과 성형 기술 방안에 대해 검토하여 각각 차이가 있는 과정에 공통된 요소는 다음에 기술하는 바와 같다.

- 복합재료의 레이-업(lay-up)을 위한 다양한 수작업
- 생산을 위한 형상과 몰드
- 각 부위의 성형과 경화를 위한 압력과 열

몰드에 섬유를 레이-업(lay-up)하는 방법은 두 가지가 있다. 1)전통적인 방법으로는 섬유를 몰드에 배열한 후 레진을 침투시키는 방법이다. 그러나 이 방법은 공정이 까다롭고 품질(섬유 체적비)이 작업자에 의해 의존되므로 이런 점을 극복하기 위해서 항공산업에서는 섬유에 미리 레진(resin)을 함침하는 2)프리프레그(prepreg) 방법이 사용되었다. 프리프레그의 유리한 점은 다음과 같다.:

- 생산 과정에서 섬유와 레진이 절감된다.
- B-stage에서 레진의 방출이 절감된다.
- 각 부위의 섬유 체적비가 일정하다.

한편 프리프레그의 원자재는 가격이 비싸고, 프리프레그 저장시에는 냉동고를 확보해야 하며, 일정기한 제한된 수명을 갖는다는 단점을 가지고 있다.

위의 두 가지 공법 이외에 보다 진보한 수적층(Hand lay-up) 공법이 고려될 수 있다. 제품의 품질을 보다 높이기 위해 최초 섬유를 몰드에 배열하고 진공을 사용하는 방법으로 프리프레그에 진공을 가하는 것과 비교될 수 있다.

다. 오토클레이브(Autoclave) 성형법

몰드에 섬유와 레진을 놓을 때 레진을 섬유에 침투시키기 전에 부분적으로 꽉 채워

야하게 할 필요가 있으며 기포를 제거 해야만 한다. 진공은 몰드위에 몰드의 가장 윗부분에 진공백(Vaccum bag)을 놓음으로써 구조물이 일체가 되게 한다. Figure. 23에 나타낸 바와 같이 진공백과 구조물 사이에 몇 가지 소모성 재료들이 사용된다.

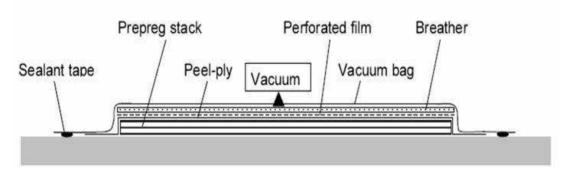


Fig. 23 Cross-section of the contact moulding set-up, showing the stack of consumables used for vacuum bagging

필 플라이(peel-ply)는 표면의 질을 높이기 위해 프리프레그 윗 부분에 사용하고, 유공필름(perforated film)은 과도한 레진의 흡수를 위해 블리더(bleeder)와 함께 가끔 필플라이의 윗 부분에 사용되어지고, 전체 몰드 면에 진공의 분포를 좋게 하기 위해 브레더(breather)를 사용한다.

또한 오토클레이브의 압력을 증가시킴으로 섬유의 결합력을 강화시켜 1% 이하의 기공률을 가진 구조물을 제작할 수 있다. 항공 산업의 복합재료 대부분은 오토클레이브로 제작되고 있으며, 일반적으로 오토클레이브는 오븐성형법 보다 4배의 비용이 든다.[2]

라. Vacuum Infusion 성형법

Vacuum Infusion 성형법은 비용의 효과적인 개선방안으로 대형 샌드위치 구조 제작을 위한 새로운 기술이다. 이는 또한 VARTM(Vacuum-Assisted Resin Transfer Moulding)과 SCRIMP(Seemann Composite Resign Infusion Moulding Process)로 알려져 있다.

VARTM 기술은 한 번에 구조물에 레진 침투를 가능하게 한다. 샌드위치 복합재 성형 시 많이 쓰이나 허니컴(Honeycomb) 코어(core) 재질은 사용할 수 없고, 폼(foam) 코어에 의해 대체된다. 종종 침투 과정을 쉽게 하기 위해 면에 채널(channel)구조를 사용하기도 한다.

가장 초기의 침투 과정의 하나로 개발된 방법은 SCRIMP(Seemann Composite Resign Infusion Moulding Process) 이다. Figure. 24에 나타낸 것과 같이 보통 몰드와 접촉시키는 방법보다 투박하여 채널구조는 Figure. 25에 보이는 바와 같이 대형 구조의 침투 거리를 절감시키기 위해 사용된다. 이러한 채널들은 보통 구멍 낸 플라스틱 튜브 형태나 나선 형태의 구조물이다.

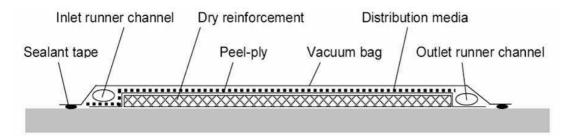


Fig. 24 Cross-section of the SCRIMP set-up

Figure. 25의 왼쪽은 초기 공정을 보여주고 있다. 어두운 부분은 이미 레진이 채워진부분이고 밝은 부분은 아직 채워지지 않은 부분으로 내부에 구성된 채널이 분명하고 정확히 레진의 채워진 정도를 알려준다. 레진은 구조물의 중앙 부위로 모이며 채널에수직으로 흡수되며, 구조물의 윗 부분 둘레에 진공이 적용된다. Figure. 25의 오른쪽그림은 침투 공정이 거의 끝난 상태이다.(사진의 구조물의 끝단만 아직 레진이 침투하지 않았음을 알 수 있다.)

공정의 신뢰성을 향상시키고 레진 주입구 채널과 레진의 출입구 사이에서 두께가 감소되는 것을 줄임으로 구조물의 질을 높이기 위해 다양한 제작 공정이 개발되어지고 있다.

예를 들면 독일의 EADS는 동일한 진공을 분포시키고 레진의 기포를 제거하는 방법

인 VAP(Vacuum-Assisted Process) 방법으로 특허를 냈다. 가스가 침투할 수 있는 막을 섬유 위에 놓고 봉한 후에 섬유 표면에 동일한 진공을 만든다. Figure. 26에 VAP 방법을 나타내었다.

VAP 공법은 레진이 침투하지 않은 부위를 최소화 시킴으로써 기공률을 SCRIMP에 의한 2~4%과 비교할 때 1% 아래의 기공률을 만들 수 있고, 제품의 치수에 대한 허용 오차를 상당히 향상 시킨 제작방법이다.[2]





Fig. 25 Vacuum Infusion of a boat hull, showing the resin inlet channels used to reduce the impregnation distance

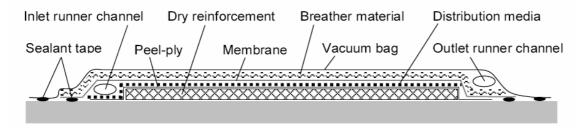


Fig. 26 Cross-section of the VAP set-up

1.3 선정된 복합재 제작 공법에 따른 비용평가

본 연구에서 제작비용 평가를 위한 변수로 제조 공법을 비교하여 평가하였고, 선정된 성형법은 앞서 제시한 오토클레이브 성형법과 Vacuum Infusion 성형법이다.

1) 오토클레이브 성형법

: 항공기의 경우 최적의 성능을 요구하기 때문에 일반적으로 제조비용이 고려되지 않아 가장 고가인 오토클레이브 성형법이 사용되어지고 있다. 본 연구의 대상체인 차체의 경우 대형 일체형 구조물로 (주)한국화이바에서 제시한 Table. 3에 자료를 근거로 오토클레이브 성형법 적용 시 차체에 대한 비용부분은 약 28,000,000원의 비용 소요를 판단하였다.[2,27]

2) Vacuum Infusion 성형법

: 현재 각국에서 저비용의 대형 구조물을 만들기 위해 본 성형기술이 연구 개발 중이며, 일본 항공우주연구원(JAXA)의 경우 Vacuum Infusion 성형법을 이용하여 일반 알루미늄 합금 구조물 보다 중량에 있어서 20%의 경량화와 기존 복합재 공법에 비해 20%의 비용 절감효과를 제시하고 있으며[8], 참고문헌[27]을 통하여 (주)한국화이바에서는 Vacuum Infusion 적용 시 오토클레이브 공법에 비하여 11%의비용 절감효과를 제시하고 있다. 따라서 본 연구대상 차체의 오토클레이브 성형법에 대한 비용 상승부분에서 Vacuum Infusion을 적용할 경우 약 3,080,000원 내지 5,600,000원의 비용을 절감할 수 있다. 비용평가 표를 Table, 5에 나타내었다.

Table. 5 복합재 제작 공법에 따른 비용 비교

오토클레이브 성형법 적용 시 비용 (현재 개발중)			
20,000,000,00	11% 비용절감	20% 비용절감	
28,000,000원	24,920,000원	22,400,000원	

제 2 절 운용에 따른 비용 평가

현재 우리나라에서 사용되어지고 있는 경유를 주 연료로 하는 시내버스의 경우 차량 1대당 연간 약 95,000km를 운행하고 연료 소비량은 최대 45,240 ℓ 정도 소비된다.[28] 버스의 설계수명은 15~25년 정도이지만 국내 차량은 여객자동차운수사업법 제75조및 시행령 제28조의 규정에 의거 전국 모든 사업용 차량에 대하여 사용년한을 9년으로 제한하고 있다. 이는 자가용 차량과는 달리 사업용 차량에 대하여는 승객에 대한서비스 향상, 안전사고예방, 대기환경오염 등 종합적인 판단을 거쳐 제한하여 운행하게 된다. 따라서 국내에서 사용되어질 수 있는 최대 연한은 9년이며 이후 차량은 폐차 되거나 제3국으로 수출되고 있는 실정이다. 이와 같은 사실로 버스의 최고수명을 9년으로 계산하였을 경우 최고 주행거리는 약 855,000km를 운행하게 되고, 연료의 경우 407,160 ℓ가 소모된다. 이와 같은 데이터를 가지고 본 연구에서는 캐나다 Intercity Bus사에서 제시한 관련 참고문헌을 바탕으로 연료 절감 및 운용, 환경에 따른 비용을 평가하였다.

Table. 6 Life Cycle Costs of Intercity Buses, Canada[3]

	Cost Variance (per year)			
Life Cycle Cost Component	9 % Savings	20 % Savings		
Operator :				
Fuel (25 %)	-4.5 %	-10.0 %		
Maintenance (25 %)	-2.3 %	-5.0 %		
Societal:				
Road Infrastructure (8 %)	-0.6 %	-1.3 %		
Pollutant Emissions (14 %)	-9.0 %	-20.0 %		
Fabrication (28 %)	0.0 %	0.0 %		
Total Cost	-3 %	-6.7 %		

2.1 연료 절감에 따른 비용 평가

캐나다의 IntercityBus 산업에 있어서 전체 버스는 연간 약 375,000,000km가 운행되며 소모연료에 대하여 70,000,000\$라는 비용이 소요된다는 보고하고 있다.[3] 이 보고서에 의하면 도시 전체의 버스 무게의 10%를 감소하였을 경우 전체 연료의 약 5%가감소하게 된다는 사실을 알리고 있다. 또한 차체 중량 감소를 위한 디자인을 고려하여 IntercityBus는 9~20%의 차체 경량화에 성공하여 4.5~10%의 연료비용 절약을 실현하였다. 이로 인하여 9%의 경량화 경우, 연간 3,150,000\$(70,000,000\$ × 4.5%)의 연료소모비용을 절감하게 되었다. 일반적으로 15년 정도의 평균 수명주기를 갖는 캐나다의 버스차량은 전주기 수명비용(LCC)에 있어서 약 47,250,000\$의 비용절감을 예상할 수 있다. 이러한 결과를 우리나라에서 현재 운행중인 경유 버스차량에 적용하여 다음과같은 결과를 도출하였다. 비용산정에 있어서는 KIMM에서 제시한 국내 경유버스의 운영비용을 적용하여 산출하였고, 이때 연료비용은 경유로 1ℓ당 1200원으로 계산하였다.

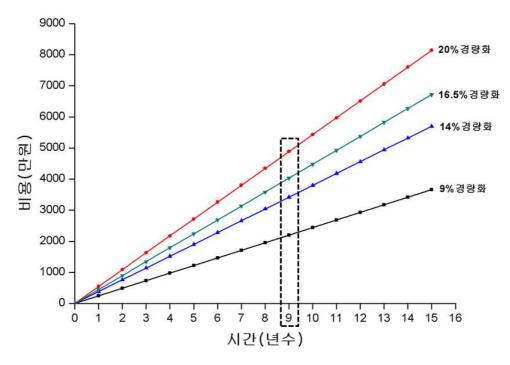


Fig. 27 경량화에 따른 절감 연료비용 비교

Table. 7 경량화에 따른 연료 절감 비교표

1.4		누적		9% 경량	화에 의한	20% 경링	후화에 의한
년 수	주행거리	연료량	연료비용	연료절감량	절감비용(원)	연료절감량	절감비용(원)
	(km)	(\(\ell \)	(원)	1.五百百万	글 유미경(전)	신파 관계 정	2713(17)
1	95,000	45,240	54,288,000	2,036 ℓ	2,443,200	4,524 ℓ	5,428,800
2	190,000	90,480	108,576,000	4,072 ℓ	4,885,920	9,048 ℓ	10,857,600
3	285,000	135,720	162,864,000	6,107 ℓ	7,328,880	13,572 ℓ	16,286,400
4	380,000	180,960	217,152,000	8,143 ℓ	9,771,840	18,096 ℓ	21,715,200
5	475,000	226,200	271,440,000	10,179 ℓ	12,214,800	22,620 l	27,144,000
6	570,000	271,440	325,728,000	12,215 ℓ	14,657,760	27,144 l	32,572,800
7	665,000	316,680	380,016,000	14,251 ℓ	17,100,720	31,668 ℓ	38,001,600
8	760,000	361,920	434,304,000	16,286 ℓ	19,543,680	36,192 ℓ	43,430,400
9	855,000	407,160	488,592,000	18,322 ℓ	21,986,640	40,716 l	48,859,200
10	950,000	452,400	542,880,000	20,358 ℓ	24,429,600	45,240 ℓ	54,288,000
11	1,045,000	497,640	597,168,000	22,394 ℓ	26,872,560	49,764 l	59,716,800
12	1,140,000	542,880	651,456,000	24,430 ℓ	29,315,520	54,288 l	65,145,600
13	1,235,000	588,120	705,744,000	26,465 ℓ	31,758,480	58,812ℓ	70,574,400
14	1,330,000	633,360	760,032,000	28,501 ℓ	34,201,440	63,336 l	76,003,200
	4 40= 000	250 200	01 4 000 000	20.527.4	00.044.400	C7 0C0 A	01 400 000
15	1,425,000	678,600	814,320,000	30,537 ℓ	36,644,400	67,860 ℓ	81,432,000
15	1,425,000		814,320,000				
년		누적		14% 경링	화에 의한		당화에 의한
	지,425,000 주행거리 (km)		814,320,000 연료비용 (원)				
년	주행거리	누적 연료량	연료비용	14% 경링	화에 의한	16.5% 경략 연료절감량	량화에 의한
년 수	주행거리 (km)	누적 연료량 (<i>l</i>)	연료비용 (원)	14% 경링 연료절감량 3,167ℓ	·화에 의한 절감비용(원)	16.5% 경 연료절감량 3,732ℓ	광화에 의한 절감비용(원)
년 수 1	주행거리 (km) 95,000	누적 연료량 (<i>l</i>) 45,240	연료비용 (원) 54,288,000	14% 경링 연료절감량 3,167ℓ 6,334ℓ	·화에 의한 절감비용(원) 3,800,400	16.5% 경 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ	량화에 의한 절감비용(원) 4,478,400
년 수 1 2	주행거리 (km) 95,000 190,000	누적 연료량 (ℓ) 45,240 90,480	연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000	14% 경링 연료절감량 3,167ℓ 6,334ℓ	화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800	16.5% 경 연료절감량 3,732ℓ 7,465ℓ 11,197ℓ	량화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000
년 수 1 2 3	주행거리 (km) 95,000 190,000 285,000	누적 연료량 (ℓ) 45,240 90,480 135,720	연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000	14% 경링 연료절감량 3,167ℓ 6,334ℓ 9,500ℓ	후화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000	16.5% 경 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ 11,197 ℓ 14,929 ℓ	당화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400
년 수 1 2 3 4 5 6	주행거리 (km) 95,000 190,000 285,000 380,000 475,000 570,000	누적 연료량 (ℓ) 45,240 90,480 135,720 180,960	연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000 217,152,000 271,440,000 325,728,000	14% 경령 연료절감량 3,167 ℓ 6,334 ℓ 9,500 ℓ 12,667 ℓ	후화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000 15,200,400 19,000,800 22,801,200	16.5% 경험 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ 11,197 ℓ 14,929 ℓ 18,662 ℓ 22,394 ℓ	량화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400 17,914,800
년 수 1 2 3 4 5 6 7	주행거리 (km) 95,000 190,000 285,000 380,000 475,000 570,000 665,000		연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000 217,152,000 271,440,000 325,728,000 380,016,000	14% 정량 연료절감량 3,167 ℓ 6,334 ℓ 9,500 ℓ 12,667 ℓ 15,834 ℓ 19,001 ℓ 22,168 ℓ	후화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000 15,200,400 19,000,800 22,801,200 26,601,600	16.5% 경험 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ 11,197 ℓ 14,929 ℓ 18,662 ℓ 22,394 ℓ 26,126 ℓ	당화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400 17,914,800 22,394,400 26,872,800 31,351,200
년 수 1 2 3 4 5 6 7 8	주행거리 (km) 95,000 190,000 285,000 380,000 475,000 570,000 665,000 760,000	・ ト 적 ・ 연 료 량 (ℓ) 45,240 90,480 135,720 180,960 226,200 271,440 316,680 361,920	연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000 217,152,000 271,440,000 325,728,000 380,016,000 434,304,000	14% 경령 연료절감량 3,167 ℓ 6,334 ℓ 9,500 ℓ 12,667 ℓ 15,834 ℓ 19,001 ℓ 22,168 ℓ 25,334 ℓ	후화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000 15,200,400 19,000,800 22,801,200 26,601,600 30,400,800	16.5% 경험 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ 11,197 ℓ 14,929 ℓ 18,662 ℓ 22,394 ℓ 26,126 ℓ 29,858 ℓ	당화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400 17,914,800 22,394,400 26,872,800 31,351,200 35,829,600
년 수 1 2 3 4 5 6 7 8	주행거리 (km) 95,000 190,000 285,000 380,000 475,000 570,000 665,000 760,000	ト적 연료량 (ℓ) 45,240 90,480 135,720 180,960 226,200 271,440 316,680 361,920 407,160	연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000 217,152,000 271,440,000 325,728,000 380,016,000 434,304,000 488,592,000	14% 정량 연료절감량 3,167 ℓ 6,334 ℓ 9,500 ℓ 12,667 ℓ 15,834 ℓ 19,001 ℓ 22,168 ℓ 25,334 ℓ 28,501 ℓ	호화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000 15,200,400 19,000,800 22,801,200 26,601,600 30,400,800 34,201,200	16.5% 경험 연료절감량 3,732 l 7,465 l 11,197 l 14,929 l 18,662 l 22,394 l 26,126 l 29,858 l 33,591 l	량화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400 17,914,800 22,394,400 26,872,800 31,351,200 35,829,600 40,309,200
년 수 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	주행거리 (km) 95,000 190,000 285,000 380,000 475,000 570,000 665,000 760,000 855,000	・ 下 적 ・ 연 료 량 (ℓ) 45,240 90,480 135,720 180,960 226,200 271,440 316,680 361,920 407,160 452,400	연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000 217,152,000 271,440,000 325,728,000 380,016,000 434,304,000 488,592,000 542,880,000	14% 경령 연료절감량 3,167 ℓ 6,334 ℓ 9,500 ℓ 12,667 ℓ 15,834 ℓ 19,001 ℓ 22,168 ℓ 25,334 ℓ 28,501 ℓ 31,668 ℓ	후화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000 15,200,400 19,000,800 22,801,200 26,601,600 30,400,800 34,201,200 38,001,600	16.5% 경험 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ 11,197 ℓ 14,929 ℓ 18,662 ℓ 22,394 ℓ 26,126 ℓ 29,858 ℓ 33,591 ℓ 37,323 ℓ	량화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400 17,914,800 22,394,400 26,872,800 31,351,200 35,829,600 40,309,200 44,787,600
년 수 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	予행거리 (km) 95,000 190,000 285,000 380,000 475,000 570,000 665,000 760,000 855,000 950,000 1,045,000	・ 下 적 ・ 연 료 량 (ℓ) 45,240 90,480 135,720 180,960 226,200 271,440 316,680 361,920 407,160 452,400 497,640	연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000 217,152,000 271,440,000 325,728,000 380,016,000 434,304,000 488,592,000 542,880,000 597,168,000	14% 정량 연료절감량 3,167 ℓ 6,334 ℓ 9,500 ℓ 12,667 ℓ 15,834 ℓ 19,001 ℓ 22,168 ℓ 25,334 ℓ 28,501 ℓ 31,668 ℓ 34,835 ℓ	후화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000 15,200,400 19,000,800 22,801,200 26,601,600 30,400,800 34,201,200 38,001,600 41,802,000	16.5% 경험 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ 11,197 ℓ 14,929 ℓ 18,662 ℓ 22,394 ℓ 26,126 ℓ 29,858 ℓ 37,323 ℓ 41,055 ℓ	량화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400 17,914,800 22,394,400 26,872,800 31,351,200 35,829,600 40,309,200 44,787,600 49,266,000
년 수 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	주행거리 (km) 95,000 190,000 285,000 380,000 475,000 570,000 665,000 760,000 950,000 1,045,000 1,140,000		연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000 217,152,000 271,440,000 325,728,000 380,016,000 434,304,000 488,592,000 542,880,000 597,168,000 651,456,000	14% 정량 연료절감량 3,167 ℓ 6,334 ℓ 9,500 ℓ 12,667 ℓ 15,834 ℓ 19,001 ℓ 22,168 ℓ 25,334 ℓ 28,501 ℓ 31,668 ℓ 34,835 ℓ 38,002 ℓ	로화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000 15,200,400 19,000,800 22,801,200 26,601,600 30,400,800 34,201,200 41,802,000 45,602,400	16.5% 경험 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ 11,197 ℓ 14,929 ℓ 18,662 ℓ 22,394 ℓ 26,126 ℓ 29,858 ℓ 37,323 ℓ 41,055 ℓ 44,788 ℓ	당화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400 17,914,800 22,394,400 26,872,800 31,351,200 35,829,600 40,309,200 44,787,600 49,266,000 53,745,600
년 수 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	予행거리 (km) 95,000 190,000 285,000 380,000 475,000 570,000 665,000 760,000 950,000 1,045,000 1,140,000 1,235,000	・ 下 적 ・ 연 료 량 (ℓ) 45,240 90,480 135,720 180,960 226,200 271,440 316,680 361,920 407,160 452,400 497,640 542,880 588,120	연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000 217,152,000 271,440,000 325,728,000 380,016,000 434,304,000 488,592,000 542,880,000 597,168,000 651,456,000 705,744,000	14% 정량 연료절감량 3,167 ℓ 6,334 ℓ 9,500 ℓ 12,667 ℓ 15,834 ℓ 19,001 ℓ 22,168 ℓ 25,334 ℓ 28,501 ℓ 31,668 ℓ 34,835 ℓ 38,002 ℓ 41,168 ℓ	후화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000 15,200,400 19,000,800 22,801,200 26,601,600 30,400,800 34,201,200 41,802,000 45,602,400 49,401,600	16.5% 경험 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ 11,197 ℓ 14,929 ℓ 18,662 ℓ 22,394 ℓ 26,126 ℓ 29,858 ℓ 37,323 ℓ 41,055 ℓ 44,788 ℓ 48,520 ℓ	량화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400 17,914,800 22,394,400 26,872,800 31,351,200 35,829,600 40,309,200 44,787,600 49,266,000 53,745,600 58,224,000
년 수 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	주행거리 (km) 95,000 190,000 285,000 380,000 475,000 570,000 665,000 760,000 950,000 1,045,000 1,140,000		연료비용 (원) 54,288,000 108,576,000 162,864,000 217,152,000 271,440,000 325,728,000 380,016,000 434,304,000 488,592,000 542,880,000 597,168,000 651,456,000	14% 정량 연료절감량 3,167 ℓ 6,334 ℓ 9,500 ℓ 12,667 ℓ 15,834 ℓ 19,001 ℓ 22,168 ℓ 25,334 ℓ 28,501 ℓ 31,668 ℓ 34,835 ℓ 38,002 ℓ 41,168 ℓ 44,335 ℓ	로화에 의한 절감비용(원) 3,800,400 7,600,800 11,400,000 15,200,400 19,000,800 22,801,200 26,601,600 30,400,800 34,201,200 41,802,000 45,602,400	16.5% 경험 연료절감량 3,732 ℓ 7,465 ℓ 11,197 ℓ 14,929 ℓ 18,662 ℓ 22,394 ℓ 26,126 ℓ 29,858 ℓ 33,591 ℓ 37,323 ℓ 41,055 ℓ 44,788 ℓ 48,520 ℓ 52,252 ℓ	당화에 의한 절감비용(원) 4,478,400 8,958,000 13,436,400 17,914,800 22,394,400 26,872,800 31,351,200 35,829,600 40,309,200 44,787,600 49,266,000 53,745,600

앞의 결과를 통해 차체의 경량화로 인한 연료 절감효과를 비용을 통해 알아보았다. 각각의 표와 그래프에 표시된 9년은 국내버스의 최종 수명주기를 고려하였을 때의 비 용절감에 대한 것을 표시한 것이다. 본 결과는 복합재료가 적용된 차체의 경우 15년의 수명주기를 갖는 국외사례가 국내 버스에 적용되었을 경우 또한 고려하여 나타내었다.

캐나다 IntercityBus사에서 제시한 복합재 적용에 대한 경량화 결과 근거를 바탕으로 본 결과를 산출하였으며, 국내의 복합재료 업체인 (주)한국화이바에서 제시한 14%, 16.5%의 경량화율을 근거로 본 결과를 산출하였다.

국내 버스 수명주기인 9년을 적용하였을 경우, 최종 연료비용 488,592,000원 중 최소 9%의 차체 경량화로 21,986,640원의 비용절감 효과를 볼 수 있으며, 최대 20%의 차체 경량화로 48,859,200원의 연료비용 절감효과가 기대된다. 이는 2007년 현재 1일 1대당 표준운송원가 587,655원(경유 버스차량의 경우) 중 연료비 144,507원(이는 Table. 6에서 제시한 캐나다 자료에서와 같이 연료비용이 전주기 비용의 25%를 차지한다는 계산과 일치함을 알 수 있다.)을 지출되어지고 있는 버스업계에는 막대한 이익을 창출할 수 있을 것으로 사료된다.

2.2 유지비용(정비비용) 절감에 따른 비용 평가

차량 유지비용에 있어서 대부분은 연료비용으로 소모된다. 하지만 타이어비, 정비비 및 보험료와 같은 기타 차량 유지비 또한 결코 무시할 수 없는 비용부분이다. 또한 상업용 차량에 있어서 본 유지비용 부분에 인건비 또한 큰 부분을 차지하게 된다. 하지만 본 논문에서는 일반적으로 버스 차량 운행에 있어서 안전운행에 필수 요소인 정비에 관련된 비용부분만을 고려하여 비용을 평가하였다.

본 유지비용 평가는 국내 차량의 유지비용중 정비비용에 관련된 비용을 평가하였다. 참고문헌의 경우 유지비용에 있어서 대부분 타이어비와 브레이크 교환에 대한 정비비용 부분만을 다루었으므로 같은 방법으로 국내의 경우에 적용하였다. 이때 타이어비와 브레이크 교환과 같은 정비비용은 '07년도 표준운송원가를 근거자료로 삼아 산출하였고, 결과는 다음의 Figure. 28과 Table. 9과 같다.

Table. 8 표준운송원가표 중 변동비 항목 - 가립회계법인

ठंठे	목	일반 경유 버스
	타이어비	2,859 원
변 동 비	정비비	12,611 원
	소계	15,470 원

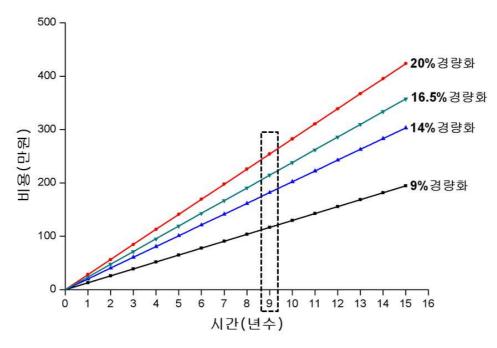


Fig. 28 경량화에 따른 절감 유지비용(정비비 관련) 비교

Table. 9 경량화에 따른 유지비용 절감 비교표

		경량화율	9%	20%	14%	16.5%
년수	누적운행거리	누적유지비용	경령	당화에 의한 절]감 유지비용((원)
	(km)	(원)				
1	95,000	5,646,550	129,871	282,328	202,146	238,284
2	190,000	11,293,100	259,741	564,655	404,293	476,569
3	285,000	16,939,650	389,612	846,983	606,439	714,853
4	380,000	22,586,200	519,483	1,129,310	808,586	953,138
5	475,000	28,232,750	649,353	1,411,638	1,010,732	1,191,422
6	570,000	33,879,300	779,224	1,693,965	1,212,879	1,429,706
7	665,000	39,525,850	909,095	1,976,293	1,415,025	1,667,991
8	760,000	45,172,400	1,038,965	2,258,620	1,617,172	1,906,275
9	855,000	50,818,950	1,168,836	2,540,948	1,819,318	2,144,560
10	950,000	56,465,500	1,298,707	2,823,275	2,021,465	2,382,844
11	1,045,000	62,112,050	1,428,577	3,105,603	2,223,611	2,621,129
12	1,140,000	67,758,600	1,558,448	3,387,930	2,425,758	2,859,413
13	1,235,000	73,405,150	1,688,318	3,670,258	2,627,904	3,097,697
14	1,330,000	79,051,700	1,818,189	3,952,585	2,830,051	3,335,982
15	1,425,000	84,698,250	1,948,060	4,234,913	3,032,197	3,574,266

경량화에 따른 유지비용을 평가한 결과는 앞의 연료비용 평가결과와 마찬가지로 국내버스의 최종 수명주기인 9년을 고려하여 표기하였고, 국외의 15년의 수명주기를 갖는 해외사례와 비교되었다. 9년을 수명주기로 하는 국내버스에 대한 평가결과 9% 경량화에 따른 절감 정비비용은 1,168,836원, 14% 경량화에 따른 절감 정비비용은 1,819,318원, 16.5% 경량화에 따른 절감 정비비용은 2,144,560원, 20%의 경량화에 따른 절감 정비비용은 2,540,948원으로 평가되었다.

본 정비비용 평가는 타이어비와 일일 정비비용에 의한 평가로 계산된 결과이다. 하지만 복합재료가 적용될 경우 구조설계에 있어 접착이나 체결에 의한 부분을 고려하여 차체가 모듈화 되거나, 일체형(monocoque)으로 제작되어질 경우 정비에 따른 비용부분은 현저히 감소되어 유지비용부분에서 본 연구결과 보다 더욱 경제적 이익을 기대해 볼 수 있을 것으로 평가된다.

2.3 환경비용 절감에 따른 비용 평가

최근 온실가스 저감이 전 세계적인 화두로 떠오르면서 탄소배출권도 덩달아 큰 관심을 받고 있다. 이러한 이유는 서론에서 소개한 지구 온난화의 규제 및 방지를 위한국제 협약인 교토의정서 발효로 선진국은 온실가스 배출량을 의무적으로 감소해야 하기 때문이다. 이에 따라 환경비용은 운용비용에 관계되는 요소로써 전주기 비용(LCC)평가에 있어서 중요한 부분이 되었을 뿐만 아니라 전주기 평가(LCA)에 있어서 아주세부적으로 다루어지고 있는 부분이다. 환경비용 요소는 대기오염물질에 대한 비용뿐만 아니라 소음 및 오ㆍ폐수, 생활 폐기물에 대한 부분까지 고려되고 있는데 본 논문에서는 차량 운행 시 가장 일반적으로 발생되는 대기오염에 관련된 탄소 배출권에 해당하는 환경비용만을 다루었다.

차체 경량화에 따른 환경비용 평가에 있어서 캐나다의 Transportation Development Centre의 Cost/Benefit Analysis of Lighter Urban Transit Buses에 따르면 10%의 차체 경량화를 통해 버스 운행 1km 당 0.0108\$의 환경오염에 따른 비용을 절감할 수 있다라고 보고하고 있다. 이 비용은 오염 물질의 양을 감소시키거나 제거하기 위한 시설물을 설치해야 하는 것에 기초를 두고 있다. 앞에서 말한 1km 당 0.0108\$를 연간 375,000,000km를 운행하는 캐나다의 전체 버스에 적용하였을 경우 대략 4,050,000\$의비용을 절약할 수 있다는 계산결과를 도출할 수 있다.

우리나라의 경우 KIMM에서 제시한 국내 경유버스의 운영비용 중 사회적 환경비용으로 버스 1대당 연간 약 12,100,000원을 지불하고 있는 실정이다. 이러한 비용을 앞서소개한 Table. 6의 경량화에 따른 유지비용 절감에 대한 비율을 적용하여 비용평가를하였고, 결과는 다음의 Figure. 29와 Table. 10과 같다.

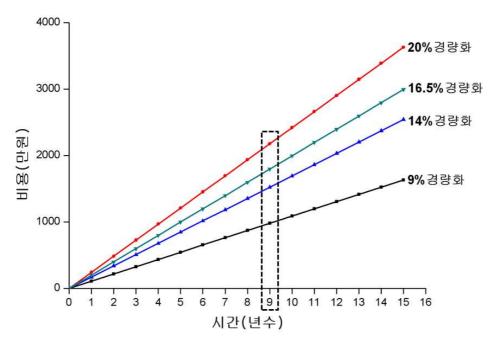


Fig. 29 경량화에 따른 환경비용 비교

Table. 10 경량화에 따른 환경비용 절감 비교표

_						
		경량화율	9%	20%	14%	16.5%
년수	누적운행거리	누적환경비용	경로	· 당화에 의한 절]감 환경비용((위)
_ '	(km)	(원)	9 ,			
1	95,000	12,100,000	1,089,000	2,420,000	1,694,000	1,996,500
2	190,000	24,200,000	2,178,000	4,840,000	3,388,000	3,993,000
3	285,000	36,300,000	3,267,000	7,260,000	5,082,000	5,989,500
4	380,000	48,400,000	4,356,000	9,680,000	6,776,000	7,986,000
5	475,000	60,500,000	5,445,000	12,100,000	8,470,000	9,982,500
6	570,000	72,600,000	6,534,000	14,520,000	10,164,000	11,979,000
7	665,000	84,700,000	7,623,000	16,940,000	11,858,000	13,975,500
8	760,000	96,800,000	8,712,000	19,360,000	13,552,000	15,972,000
9	855,000	108,900,000	9,801,000	21,780,000	15,246,000	17,968,500
10	950,000	121,000,000	10,890,000	24,200,000	16,940,000	19,965,000
11	1,045,000	133,100,000	11,979,000	26,620,000	18,634,000	21,961,500
12	1,140,000	145,200,000	13,068,000	29,040,000	20,328,000	23,958,000
13	1,235,000	157,300,000	14,157,000	31,460,000	22,022,000	25,954,500
14	1,330,000	169,400,000	15,246,000	33,880,000	23,716,000	27,951,000
15	1,425,000	181,500,000	16,335,000	36,300,000	25,410,000	29,947,500

Table. 11 국내 경유버스 운영비용 중 환경비용 항목 - KIMM

	PM (26,837 원/kg)	492
사회적 환경비용	NO _x (8,220 원/kg)	554
	HC (7,940 원/kg)	40
	CO (6,832 원/kg)	124
	Total (만원/년)	1,210

Table. 11은 환경비용 평가의 근거 자료로 참고된 표로써 국내 경유버스의 운영비용 중 환경비용 항목만을 나타낸 것이다.

참고문헌[]에 의하면 환경비용은 운영비용 부분 중 14%에 해당하며, 본 연구결과를 통해서도 17%에 해당하는 비용부분(국내의 경유버스의 경우 1년간 총 운영비용이 72,034,550으로 경유버스 1대가 연간 지불하게 되는 환경비용 1,210,000으로 계산된 결과임.)으로 많은 부분을 차지하며, 2013년부터 온실가스 배출량 감소국가로 결정될 가능성이 많은 우리나라의 경우 해당 환경비용 부분은 무시할 수 없는 부분이다.

9년간의 누적 환경비용 총 108,900,000원 중 경량화에 따른 절감비용은 9% 경량화시 약 9,801,000원, 14% 경량화시 약 15,246,000원, 16.5% 경량화시 약 17,968,500원, 20% 경량화시 21,780,000원으로 평가되었다.

제 3 절 경량화에 따른 최종 비용 평가

4가지 변수를 고려하여 경제적인 측면에서의 기존 차량 대 복합재 적용차량의 전주 기 비용에 대하여 비교 평가하였다. 즉 4가지 변수는 1) 제작공법, 2) 연료비용, 3) 정비비용, 4) 환경비용 이다.

복합재를 이용한 차체의 경량화율에 따라 앞 절에서 계산된 각각의 비용을 합산하여 최종 운용비용을 계산하였다.

먼저 운용비용과 환경비용을 계산한 결과 국내 버스 운용주기인 9년으로 계산하였을 시 기존의 차량의 경우 최종 운용비용은 약 648,310,950원으로 계산되었다. 차체에 복합재료 적용에 따른 경량화로 인해 최소 9%의 경량화 시 약 32,956,476원의 비용이 절감되었고, 최대 20% 경량화 시 약 73,180,148원의 비용이 절감되었다. 우리나라의 실정을 고려하여 (주)한국화이바의 논문에서 제시된 경량화율에 따른 절감비용은 14% 경량화 시 약 51,266,518원과 16.5% 경량화 시 약 60,422,260원 이었다.

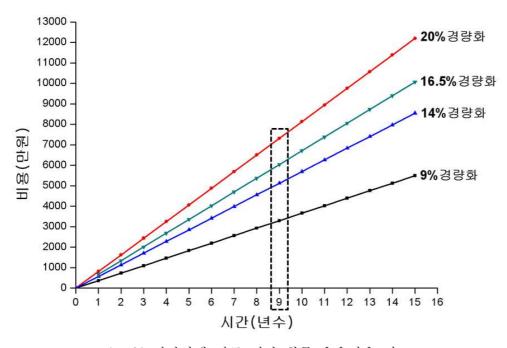


Fig. 30 경량화에 따른 절감 최종 운용비용 비교

Table. 12 경량화에 따른 최종 운용비용 절감 비교표

경량화율(%)		9%	20%	14%	16.5%		
변수 최종 연수 운영비용(원)			최종 절감 운영비용 (원)				
1	72,034,550	3,662,071	8,131,128	5,696,546	6,713,184		
2	144,069,100	7,323,661	16,262,255	11,393,093	13,427,569		
3	216,103,650	10,985,492	24,393,383	17,088,439	20,140,753		
4	288,138,200	14,647,323	32,524,510	22,784,986	26,853,938		
5	360,172,750	18,309,153	40,655,638	28,481,532	33,568,322		
6	432,207,300	21,970,984	48,786,765	34,178,079	40,281,506		
7	504,241,850	25,632,815	56,917,893	39,874,625	46,994,691		
8	576,276,400	29,294,645	65,049,020	45,569,972	53,707,875		
9	648,310,950	32,956,476	73,180,148	51,266,518	60,422,260		
10	720,345,500	36,618,307	81,311,275	56,963,065	67,135,444		
11	792,380,050	40,280,137	89,442,403	62,659,611	73,848,629		
12	864,414,600	43,941,968	97,573,530	68,356,158	80,563,013		
13	936,449,150	47,603,798	105,704,658	74,051,504	87,276,197		
14	1,008,483,700	51,265,629	113,835,785	79,748,051	93,989,382		
15	1,080,518,250	54,927,460	121,966,913	85,444,597	100,703,766		

복합재 차량 이용 시 위와 같은 이점이 있지만 서론에서 언급한 바와 같이 복합재 차량의 초기 구매 비용이 고가(복합재 적용 차량이 약 13,600,000원의 비용상승 차이를 보임. 제3장 2절에서 제시한 표에 의함.)라는 점이 버스 사업자들이 가장 꺼려하는 부분이었다. 하지만, 복합재 차량을 구입하여 운용하게 된다면 운용 비용에 대한 부분은 경량화율에 따라 최소 1.67년에서 최대 3.71년 후면 기존 차량 가격에 대한 부분이 극복되며, 이 시기가 지나게 되면 차량 대비 가격을 제외한 경제적 이익을 창출할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 국내 차량 운용주기가 9년이라는 것을 감안해 보면 해당 경제적 이익량은 별 차이가 없는 것으로 보이지만, 복합재 차량에 대한 운행주기가 국외와 같이 15년 주기 이상 혹은 복합재 철도차량과 같이 25년 정도로 보게 된다면 순이익부분은 상당할 것으로 예상된다. 그리고 본 연구에서의 결과는 물가상승률이 적용

되지 않았지만 이 부분이 적용된다면 연료비용, 정비비용 또한 인건비와 같은 전체적인 운용비용에서 많은 차이를 보이며 시간이 거듭될수록 경제적 이익은 막대할 것으로평가 되어진다.

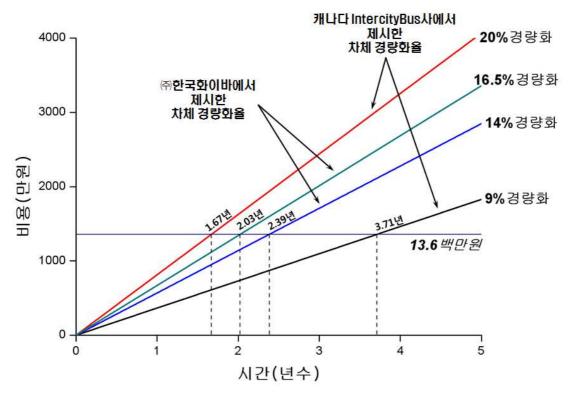


Fig. 31 오토클레이브 공법 적용에 따른 손익분기점

평가된 연료비용, 정비비용 및 환경비용은 차체 제작 시 오토클레이브 제조공법에 의한 복합재 제조공법 비용을 적용한 것으로 약 13,600,000원 비용 차이를 보임을 앞서 평가하였다. 복합재 제조공법에 따른 비용평가로 해당 비용부분을 낮출 수 있음을 제4장 2절에서 평가하였고, Vacuum Infusion 공법 적용 시 해당 비용 절감량은 일본 항공우주연구원(JAXA)의 경우 20%, (주)한국화이바의 경우 11%를 각각 참고문헌에서 제시하고 있다. 따라서, 본 연구는 차체에 초점을 맞춘 것으로 Table. 3에서의 복합재적용에 따른 차체 제작비용인 28,000,000원의 절감비용을 계산한 결과, (주)한국화이바

에서 제시한 11%의 경우 약 3,080,000원, 일본 항공우주연구원(JAXA)에서 제시한 20%의 경우 약 5,600,000원의 비용절감을 평가하였고, 이에 따라 Vacuum Infusion 공법을 적용한 경우의 손익분기점을 평가한 결과 그래프 Figure. 32와 Figure. 33과 같이 평가되었다. Table. 13은 우리나라의 실정을 고려하여 (주)한국화이바에서 제시한 Vacuum Infusion 공법에 따른 11% 비용절감에 따른 비용 상승부분 회수기간을 나타낸 표이다.

복합재 제작 공법에 있어서 기존의 오토클레이브 공법이 아닌 Vacuum Infusion 공법을 사용하게 되면 복합재 제작공법에 따른 11%에 해당하는 비용 감소로 해당 손익분기점은 기존의 오토클레이브 공법에 의한 손익분기점 시간보다 일찍 도달하게 되며, 20%의 경량화의 경우 약 4.5개월 정도, 9%의 경량화의 경우 약 10개월 정도 일찍 손익분기점에 도달하게 된다고 평가 되었다. 따라서, 9년의 최종 수명주기를 갖는 우리나라의 경유버스 경우 경량화를 위한 복합재 적용으로 비용 상승부분을 Vacuum Infusion 공법을 이용하여 줄이며, 해당 비용에 대한 손익분기점 또한 오토클레이브 공법에 비하여 현저히 줄일 수 있음을 평가하였다.

Table. 13 복합재 제조공법별 비용 상승부분 회수 기간 - 11% 제작비용절감 경우

경량화율(%)	9%	20%	14%	16.5%
오토클레이브 공법에 의한 비용 상승부분 회수기간	3.71년	1.67년	2.39년	2.03년
Vacuum Infusion 공법에 의한 비용 상승부분 회수기간	2.87년	1.29년	1.84년	1.56년

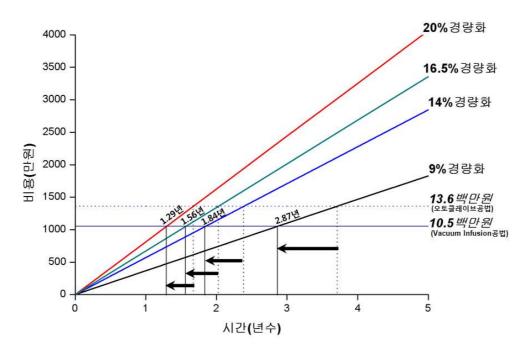


Fig. 32 Vacuum Infusion 공법 적용 시 11% 비용 절감에 대한 손익분기점

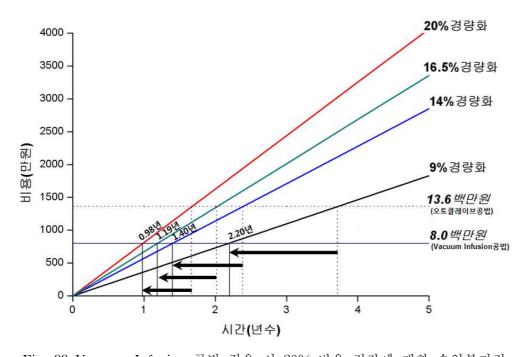


Fig. 33 Vacuum Infusion 공법 적용 시 20% 비용 절감에 대한 손익분기점

제 5 장 결 론

본 연구는 한국철도기술연구원 바이모달 수송시스템 연구단에서 수행중인 "신에너지 바이모달 저상굴절차량 개발" 사업으로 개발중인 하이브리드 복합재료 차체를 경량화에 따른 운용비(연료비), 정비비 및 환경비용의 상관관계식으로 객관화 하였다. 또한 차체의 요구 성능대비 복합재료의 제작공법에 따른 제작비용 절감도 고려하여 기존 차량대비 차체 제작 비용 상승에 따른 비용 감가삼각 주기를 객관화 하였다.

하이브리드 복합재료 차량을 구조적성능으로 기존 경유버스차량에 비하여 동등하거나 그 이상의 성능을 가진 조건으로 개발할 때 기존 경유버스 차량(철재차체)하중 12,100kg에서 하이브리드 복합재료 차체로 적용 시 1,700kg~20,000kg으로 14~16.5%를 경량화 하였다. 차체의 하중만으로 고려하여 본다면, 이는 기존저상버스 차체 3,050kg에서 2,174kg으로 약 29%를 경량화 하였다.

경량화에 따른 비용감소는 우리나라 실정을 고려하여 (주)한국화이바에서 제시한 경량화율을 적용하여, 국내법상 차량 운용주기인 9년을 적용할 경우 최소 경량화율인 14% 경량화 시 연료량 28,501 ℓ 를 절감하여 34,201,200원, 정비비용 1,819,318원, 환경비용 15,246,000원을 절감 할 수 있게 되고, 최대 경량화율인 16.5% 경량화 시 연료량 33,591 ℓ 를 절감하여 40,309,200원, 정비비용 2,144,560원, 환경비용 15,246,000원을 절감할 수 있게 된다.

복합재료를 사용함으로써 기존 경유버스(철재차량, 185,900,000원) 대비 제작비용이 7.3%(13,600,000원) 증가하였고, 경량화에 따른 비용절감으로 제작비용 회수 기간은 오토클레이브 공법을 적용하였을 시 약 2년~2.4년으로 평가되었다. 이는 국내법상 운용기간인 9년을 고려할 때, 경량화로 인한 경제적 이익을 거둘 수 있는 기간이 약 7년 정도로 짧지만 해당 부분을 복합재 제조공법에 따른 제작비용 절감으로 해소할 수 있다고 평가하였다.

일반적으로 동일한 재료를 사용하는 경우 오토클레이브 공법과 Vacuum Infusion 공법에서 강도차이는 최대 10%대로 나타나지만, 제작비용에 있어서는 설비비를 제외하더라도 최대 20% 발생된다.(전 세계적으로 Vacuum Infusion 공법에 대한 연구개발로

오토클레이브 공법에 의한 제품과의 강도를 줄이고 있는 실정이며, 구조물의 2차 부구조물에 쓰이는 Vacuum Infusion 공법에 의해 제작된 제품은 오토클레이브 공법에 의한 제품과 많이 차이를 보이지 않고 있다.) 버스 설계상 안전계수를 1.5로 적용 시공법으로 발생되어지는 구조적 성능손실을 감안하고, 공법으로 초기 제작비용 감소(20% 비용절감 고려 시)를 적용하게 되면 제작비용 회수 기간은 1.19년~1.4년으로 대폭 감소하게 된다. 또한 경량화로 인한 비용상승 부분 회수 이후 경제적 이익을 거둘수 있는 기간은 최종 수명주기 9년을 예상할 경우 약 7년9개월이며, 해당 절감 운용비용은 약 27,166,518원(14% 경량화 시) 내지 36,322,260원(16.5% 경량화 시)으로 평가되었다. 이는 2010년까지 버스 2만대, 청소차 8백대, 총 2만8백대의 차량을 교체할 계획을 가지고 있는 우리나라의 경우 약 10조원 이상의 경제적 이익을 평가해 볼 수 있는 기초자료가 될 것으로 사료된다.

이와 같은 결과로 복합재료를 이용한 차량의 중량 절감은 운용에너지를 최소화 할수 있게 하는 중요한 부분으로 알루미늄 차체가 재활용 될 수 있다는 점이 복합재 적용 차체 보다 더 유용하다는 장점을 가지고 있지만 폐기되기까지 전복합재구조 (All-composite structure) 적용 방안이 운용에너지 측면(연료비용 뿐만 아니라 이에상응하는 환경비용 포함)에서 가장 효율적임을 평가 할 수 있었고, 전복합재(All-composite) 적용 차량은 철강 구조 차량에 비해 운용비용(연료비용, 정비비용) 및사회적 환경 비용에 대한 경제적 이익의 영향이 약 5%~11.3% 향상됨을 확인하였다.

또한 본 연구는 신에너지 수송용 차량의 전복합재 구조(All-composite structure) 사용 방안에 따른 전주기 수명 비용 분석에 있어 환경적 요인에 의한 고찰에서 단순한 차량 구매 비용보다 운용상에 발생되는 경제적 운용비 영향이 더욱 중요한 요소임을 확인, 평가하였다. 즉 초기 구매비용이 고가임에도 차체 전체를 복합재로 구성한 제조 방안이 전주기 수명비용 측면에서 최적 방법이라 판단됨은 물론, Vacuum Infusion 성형법의 경우가 오토클레이브에 대해서는 최대 20%의 낮은 제작비용이 소요되고, 국내의 실정을 고려한 경우 11% 낮은 제작비용이 소요됨으로써 제작에 따른 초기비용 또한 줄일 수 있음을 확인하여 대량 생산될 차체의 제작비용 감소를 통하여 복합재 버스구매자들의 인식을 바꿀 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Florida Advanced Center for Composite Technologies (FAC2T) FAMU-FSU
 College of Engineering "Industry University Cooperative Research Center
 (IUCRC) Workshop on Affordable Composite Materials"
- 2. GECOS, LTC "Composite car bodies for the Korean Tilting Train Express Project"
- Martec Limited Prévost Car and Virtual Prototyping Technologies Inc.
 "INTERCITY BUS WEIGHT REDUCTION PROGRAM : PHASE-1",
 Transportation Development Centre Transport Canada, January 2000
- Prévost Car Inc. Martec Limited ADS Groupe Composites, "Intercity Bus Weight Reduction Program: Phase II - A Design Investigation for Lightweight Intercity Bus Roof and Floor Components", Transportation Development Centre of Transport Canada, April 2003
- 5. Rajive Dhingra, Jonathan G. Overly, Gary A. Davis, "LIFE-CYCLE ENVIRONMENTAL EVALUATION OF ALUMINUM AND COMPOSITE INTENSIVE VEHICLES", University of Tennessee Center for Clean Products and Clean Technologies, Oak Ridge National Laboratory, March 5, 1999
- 6. W.D. Brouwer, E.C.F.C. van Herpt, M. Labordus, "Vacuum injection moulding for large structural applications", Composites: Part A 34, pp. 551–558. 2003
- 7. Sujit Das, "THE COST OF AUTOMOTIVE POLYMER COMPOSITES: a REVIEW AND ASSESSMENT OF DOE'S LIGHTWEIGHT MATERIALS COMPOSITES RESEARCH", Energy Division Oak Ridge National Laboratory, January, 2001
- 8. Yosuke Nagao, Yutaka Iwahori, Yoshiyasu Hirano, Yuichro Aoki, "Low Cost Composite Wing Structure Manufacturing Technology Development Program in JAXA", International Conference on Composite Materials, 2007. Vol. 1, pp. 30–31.

- Vehicle Catalog, "A Compendium of Vehicles for Bus Rapid Transit Service", April 2003
- Hong-Taik(Thomas) Hahn, "Composites: Applications and Recent Developments", Mechanical & Aerospace Eng. Dept. UCLA
- 11. R. Heijungs, "Environmental Life Cycle Assessment of Products", B&G, October, 1992
- 12. Branko Sarh, "Lightweighting of Composite Structures For Transportation Systems", Workshop at EADS, Munich, Germany, March 14th, 2003
- 13. Frederick Stoll, Scott Campbell, Stephen Day, and Michael Sheppard, "HIGH-PERFORMANCE, LOW-COST INFUSION CORES FOR STRUCTURAL SANDWICH PANELS", From Proceedings of SAMPE 2004, May 16-20, 2004
- 14. Enrico Mangino, Enrico Indino, "The use of Composite materials in vehicle design", Design and structural simulation of composites in transportation, 2002
- 15. Annual Report and Accounts 2003, "First Decade of Progress", NABI
- 16. Peter Midgley, "Bus Rapid Transit: International Experience", pmidgley@earthlink.net, 2004
- 17. Fred Silver, "US Government Observation of Bus Rapid Transit Operations in France and the Netherlands", Director NBI WestStart-CALSTART, April 2003
- 18. Bert Arrillaga, FTA Project Manager, "Bus Rapid Transit: Vehicle Demand and Supply Analysis", U.S.Department of Transportation, September 2002
- 19. John Boesel, "BRT An Opportunity to Re-Think Transit", Clean Transportation Solutions SM
- 20. Karl Fjellstrom, "미래형 버스 BRT(2편)", 서울시정개발연구원, 2004
- 21. 윤종학, 박영곤, 목재균, "신에너지 바이모달 트램 차량 개발 현황", 한국정밀공학회, 춘계학술대회논문집, 2007, pp.827-828
- 22. 목재균, 윤희택, "신에너지 바이모달 트램 기술개발", 교통 기술과 정책, 제3권 제4호, 2006년 12월, pp38-46.

- 23. 신광복, 이상진, "철도분야에서의 신소재 복합재 응용기술", 한국복합재료학회지, Vol. 18, No. 2, 2005, pp.52-58
- 24. 이상진, 정종철, 조세현, 김정석, 서승일, "하이브리드 복합재 차체 틸팅차량에 대한 전주기 평가(LCA)연구", 한국철도학회, 추계학술대회논문집, 2005, pp.1-6
- 25. 오경원, 김영광, 공창덕, 이상진, "신에너지 이용 저상 굴절차량의 하이브리드 복합 재료 차체를 위한 전주기 수명평가 기반 연구", 한국복합재료학회, 춘계학술대회논 문집, 2007, pp.25-28
- 26. 신광복, 조세현, 이상진, "하이브리드 복합재 차체 구조물의 성형공정에 관한 연구", 한국철도학회, 추계학술대회논문집, 2004. 10, pp.13-18
- 27. 이상진, 정종철, 조세현, 김정석, 서승일, "A Study for Life Cycle Assessment(LCA) of Hybrid TTX carbody with Composites", 한국철도학회, 추계학술대회논문집, 2005. 11, pp.83-88
- 28. 강건용, "저공해 LPG 버스 기술", 한국기계연구원(KIMM)
- 29. 이준호, 김태식, "교통의정서 발효 등 환경규제 강화에 따른 중소기업의 대응 과제", 중소기업연구원

감사의 글

한해를 마무리 하는 이 시기에 학위를 잘 마무리 할 수 있게 해주신 하나님께 먼저 감사드립니다. 항상 뒤돌아 생각해 보면 짧지마는 않은 시간들로 가득한 추억들 속에 석사학위를 위한 구조역학 실험실에서의 2년의 시간을 좋은 추억의 한 조각으로 만들어 제 인생이라는 퍼즐 속의 한 부분을 만들어 주신 모든 분들께 깊은 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 본 연구를 선정해 주시고 좋은 여건에서 학위를 마칠 수 있게 도와주신 한국학 술진흥재단의 허상만 이사장님과 관계자 여러분께 감사의 인사를 올립니다. 또한 (주)한국화이바의 조용준 회장님과 본 연구에 관련하여 도와주신 (주)한국화이바 관계자 여러분께 감사의 말씀을 전합니다.

오랜 세월 학자의 길을 걸어오시며 수많은 제자들 중의 한명으로 저를 맞이하여 마지막 이 순간까지 이끌어 주시고 지도해 주신 공창덕 지도교수님께 고개 숙여 감사의 말씀을 드리며, 바쁜 와중에서도 논문 심사를 위해 시간을 내어주시고 많은 조언으로 논문을 마무리할 수 있게 도와주신 공과대학 학장이신 김택현 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 또한 학부 때부터 많은 가르침을 주시고 좋은 말씀으로 대하여 주신 김동규교수님, 우리학과의 발전과 학생들의 진로를 위해 누리사업을 진행하고 계시는 김재수교수님, 항공우주인의 자부심이 대단하시며 그 마음을 우리에게 전하시려 항상 노력하시는 이상기 교수님, 그리고 학과 모든 교수님들께 고개숙여 감사의 인사를 올립니다.

장교로써 이 나라를 지키며 힘든 학문의 길을 병행하면서 항상 선배의 마음가짐으로 물심양면으로 논문을 잘 마무리 하도록 도와준 경원이, 2년간 항상 옆에서 연구하기 좋은 여건을 만들어 주기위해 애써준 박사과정에 있는 현범이, 동기로서 친구로서 같 이 기뻐하고 힘들어하면서 좋은 것은 배가 되게 해주고 나쁜 것은 나누었던 재휘, 후 배이지만 실험실 생활을 먼저하여 힘들 일도 마다하지 않으며 연구에 있어서 선배역할 을 해주었던 승현이, 지금은 사회전선에서 열심히 생활하고 있지만 한때는 옆 짝꿍으 로 선배로서의 조언을 아끼지 않았던 주일이, 1년간 실험실 막내로 생활하면서 지금의 마무리를 할 수 있게 도와준 수현이, 이제 학문에 길에 들어선 상훈형과 영주. 2년간의 실험실 생활을 하면서 친구처럼, 형제처럼 잘 대해주신 이 모든 분들께 감사의 인사를 드립니다.

또한 전산유체실험실과 연소실험실에서 같이 공부한 동기인 상수, 홍일, 태훈. 그리고 중연이와 철희에게 감사의 인사를 전하며, 이 순간을 마지막으로 다시 시작되는 또다른 인생의 발걸음을 내딛을 때의 동기가 되어줌에 있어서 서로에게 큰 힘이 되어주는 동반자가 되었으면 하는 바램입니다. 보이지 않는 곳에서 항상 응원해주신 많은 선배님들과 후배님들께 깊은 감사의 마음을 전해드립니다.

마지막으로 모든 일에 있어서 항상 격려해주시고 믿어주심으로 한눈팔지 않게 해주 신 사랑하는 부모님과 인생의 큰 버팀목으로 이 막내동생에게 항상 큰 꿈을 꿀 수 있 도록 도와준 사랑하는 형들과 누나 그리고 매형과 형수님들께 깊은 감사의 말씀을 전합니다.

지금까지 좋은 말씀과 응원으로 이 자리에 서게 해주신 앞서 인사드린 모든 분들과 보이지 않은 곳에서 응원해주신 모든 분들께 다시 한번 깊은 감사의 인사를 드립니다. 감사합니다.

2007년 12월 1일

앞으로 더욱 힘든 인생의 시기를 맞이하러 발걸음을 옮기는 김 영 광 올림

저작물 이용 허락서			
학 과	항공우주공학과 학 번 200670	32 과 정	석사
성 명	한글: 김 영 광 한문 : 金 英 광 영문 : Kim Yeong Gwang		
주 소	전남 여수시 여서동 현대건설아파트 112-1404		
연락처	E-MAIL : aeroglory@nate.com		
논문제목	한글 : 신에너지 수송용차량의 하이브리드 복합소재 차체에 대한 최적 제작프로세스 연구 영문 : Study on Optimum Manufacturing Processes for Hybrid Composit Structure of New Energy Transportation Vehicle		

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

- 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기 억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
- 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작 물의 내용변경은 금지함.
- 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
- 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
- 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1
 개월 이내에 대학에 이를 통보함.
- 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권 리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
- 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전 송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(0) 반대()

2008 년 2 월 25 일

저작자: 김 영 광 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하