



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

섬유강화복합재 무인잠수정의 최적설계에

관한 연구

A Study on the Optimum Design of Autonomous Underwater

Vehicle by Fiber-reinforced Composites

指導教授 金 允 海



2008 年 12 月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

裴 成 烈

本 論 文 을 裴 成 烈 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 : 工 學 博 士 文 慶 萬 (印)

委 員 : 工 學 博 士 李 成 烈 (印)

委 員 : 工 學 博 士 金 允 海 (印)



2008 年 12 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

材 料 工 學 科

裴 成 烈

<목차>

Abstract.....	- 1 -
1. 서론.....	- 2 -
2. 설계 프로세스.....	- 7 -
3. 재료의 선정	- 8 -
3.1 재료 선정의 기준	- 8 -
3.2 금속 재료.....	- 9 -
3.3 섬유강화복합재료	- 12 -
3.3.1 섬유강화복합재료의 특징.....	- 12 -
3.3.2 항공산업에서의 섬유강화 복합재료	- 14 -
3.3.3 섬유강화 복합재료의 경제성	- 17 -
4. 공정의 선정	- 20 -
4.1 공정 선정의 기준	- 20 -
4.2 Hand Lay-up.....	- 20 -
4.3 진공백 성형(Vacuum Bag Molding)	- 21 -
4.4 VaRTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding).....	- 24 -
5. 시험편 제작 및 물성치 산정	- 25 -
5.1 시험편 제작.....	- 25 -
5.2 물성치 산정.....	- 28 -
6. CFD 유동 해석을 통한 최적 선체 모델의 선정	- 31 -
7. 무인 잠수정 설계 및 해석.....	- 34 -
7.1 무인 잠수정의 선체 설계	- 34 -

7.2	각 재료 및 공정별 무게 비교	- 35 -
7.3	각 재료 및 공정별 기계적 특성 비교	- 36 -
7.4	재료별 특성비교.....	- 39 -
8.	흡습에 의한 영향 고찰	- 41 -
8.1	시험 조건.....	- 42 -
8.2	시험 결과.....	- 45 -
9.	성형 방식에 관한 고찰	- 47 -
10.	결론.....	- 52 -
	참고 문헌.....	- 54 -



Abstract

This research investigated to find out the possibilities of applying FRPs to the AUVs. In this study, two kinds of metal materials, which is one of the popularly used materials for manufacturing AUVs, and 6 kinds of FRP materials were considered. Material properties of FRPs were derived by tensile strength tests and chemical analysis. Moreover, various types of AUVs were designed by 8 kinds of materials properties. From structural analysis, we can find out that the weights of AUV by CFRP-Autoclave could be reduced by 60% in comparison with the weights of AUV by Al 7075-T6. Also, 40% weight reduction could be expected compared to the AUV by Ti-6Al-4V. Moreover, two types of AUVs, which were designed by CFRP-Autoclave and CFRP-VaRTM, have sufficient mechanical properties comparing with prior metal AUV models. Lastly, manufacturing processes for two types of AUV models were designed, and environmental safety were clearly confirmed by the result of moisture absorption test.

In this result, we could conclude that the AUVs of CFRP-Autoclave and CFRP-VaRTM have various merits and potentialities as one of the AUV models, and two types of models were manufactured by applying the materials and manufacturing processes near future.

1. 서론

21 세기의 해상 무기 체계는 기존의 유인 시스템에서 은밀성이 보장되며 전술적·전략적으로 다목적 임무 수행이 가능한 무인 시스템으로 변모하고 있다. 이에 미국, 영국, 일본 등과 같은 해양 선진국에서는 1970 년대 초반부터 원격 조정 무인 잠수정(Remotely Operated Vehicle, ROV)의 개발에 착수하였으며, 1980 년대 이후에는 기존의 ROV 에 비해 동력/신호선이 없이 자체 동력을 이용한 운항이 가능한 무인 잠수정(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)의 개발이 활발하게 이루어 지고 있다.^[1] 무인 잠수정은 초기에 상륙 작전 지원, 해저 수색, 지뢰 탐지 및 제거 등의 군사적인 목적으로 개발이 이루어 졌으나, 최근에는 인간에 의해 탐사가 어려운 극지 및 심해 등과 같은 지역에 대해서 탐사, 관측 등의 용도로도 사용이 확대되고 있다. 따라서 무인 잠수정은 군사용 및 해양 개발 시스템으로서 향후 그 역할과 중요성은 더욱 높아질 것이며, 삼면이 바다인 우리나라는 해양 과학 기술의 집결체라고 할 수 있는 무인 잠수정 개발에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 필요가 있다.

무인 잠수정은 심해의 혹독한 압력 조건에서 임무를 수행하여야 하기 때문에 수중에서 높은 강도를 발휘할 수 있는 압력 선체의 개발은 무인 잠수정 개발에 필요한 핵심적인 기술 중 하나라고 할 수 있다. 하지만 단순히 압력 선체의 강도를 향상시키기 위한 목적으로 두꺼운 철강 재료를 사용한다면 선체의 무게가 증가하여 잠수정의 임무

수행에 필요한 장비의 탑재가 제한되며, 선체의 수 환경에서의 부식에 의한 물성 저하도 우려되므로 무인 잠수정의 잠수 능력을 향상시키기 위해서는 무게 비 강도 및 강성이 높고 부식에도 강한 재료의 선정과, 그 재료를 이용한 압력 선체의 최적 설계가 필수적이라고 할 수 있다.^[2]

무인 잠수정의 압력 선체를 제작하기 위해서 기존에는 Al 합금과 Ti 합금과 같은 소재가 사용되어 왔다. 하지만 그 선체의 재료로서 비강도, 비강성이 높으며, 내부식성 및 비자성의 특성을 가지는 이유로 항공, 우주 산업계에서 사용되고 있는 섬유강화복합재료(Fiber Reinforced Plastics, FRP)의 도입은 구조 해석의 난해함과 그 성형 기술의 부족으로 어려움을 겪었다고 할 수 있다. 특히 국내에서는 2000 년부터 AUV 에 관한 연구가 지속되고 있고, AUV 의 압력 선체의 제작에 FRP 가 적용된 사례가 있으나, 압력 선체의 제작에 있어서 Hand Lay-up 방식을 도입하였으므로 제조 공정에서의 기포 발생과 FRP 내부의 섬유 함침율의 저하가 발생하였을 것이라고 판단되며, 그에 따른 구조 해석과 실제의 물성간의 오차가 발생하였을 가능성이 크다고 생각된다. 따라서 본 연구를 통해서 무인 잠수정의 압력 선체의 성형에 기존의 Hand Lay-up 방식이 아닌, 첨단 복합재료 성형 공법인 VaRTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)과 오토클레이브에 의한 진공백 성형 방식을 도입하여 무인 잠수정 선체 제작에 있어서 신뢰성 및 재현성이 높은 재료 및 공정을 찾고, FRP 압력 선체 설계에 있어서의 설계 Guide Line 을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 기존의 Al 합금과 Ti 합금을 기준 시험편으로서 제시하고, FRP 의 강화 재료(탄소섬유, 유리섬유) 및 제조 공정(Hand Lay-up, VaRTM, 오토클레이브 성형)에 따라서 6 가지의 시험편을 제조 후, 인장 시험을 통해서 물성 데이터를 도출하였다. 또한 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 무인 잠수정의 선체를 설계하고, CFD 유동 해석을 통해서 무인 잠수정의 최적 선형을 도출하기 위한 접근을 하였다. 마지막으로 인장 시험을 통해 도출한 각 시험편의 물성을 적용하여 구조 해석을 수행하였으며, 이를 통해서 무인 잠수정의 압력 선체의 소재로서 신뢰성 및 재현성이 우수한 재료 및 제조 공정을 도출하고자 하였다. 본 연구를 통해서 무인 잠수정의 선체를 설계함에 있어서 재료 및 공정의 최적화를 통한 설계의 최적화를 도모하였다.

본 연구에서 설계한 무인 잠수정에 대한 이해를 돕고자 Fig. 1 에는 무인 항공기, 무인 잠수정, 자율 항해 선박을 포함한 해군의 미래형 작전 체계를 나타내었고, Fig. 2 에는 잠수정의 분류를 나타내었다.



Fig. 1. Future navy operation system



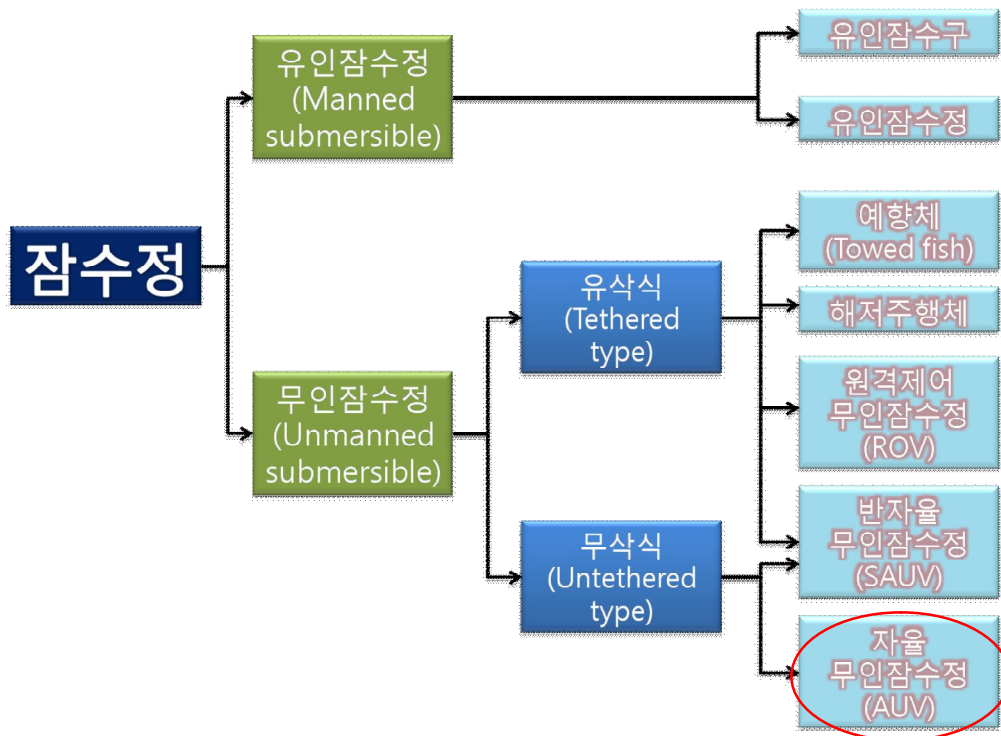


Fig. 2. Classification of submarine



2. 설계 프로세스

본 연구의 목적은 고성능의 무인 잠수정 개발을 위해 다양한 재료 및 공정을 검토하여 무인 잠수정의 최적 재료 및 공정을 설계하는 것이다. 특히, 재료 선정 과정에서 기존의 무인 잠수정 선체의 재료로 사용되었던 재료를 기준으로 하여 재료 및 공정별 섬유강화복합재료의 가능성을 분석하는 것이라고 할 수 있다.

무인 잠수정의 설계를 위한 프로세스는 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

- (1) 검토 재료 및 공정의 선정
- (2) 재료의 물성치 산정
- (3) 무인 잠수정 선체 설계
- (4) 구조 해석 및 해석 결과 검토
- (5) 최적 재료 및 공정의 선정
- (6) 공정 설계
- (7) 기타



본 연구는 이와 같은 7 개의 과정을 통해서 무인 잠수정의 최적 재료를 도출하였고, 그 최적 재료에 맞는 공정을 설계하는 방식으로 진행하였다. 그리고 최적 설계를 위한 방안에 대해서 고찰하고, 이를 통해서 AUV의 설계 Guide Line 을 제시 하고자 하였다.

3. 재료의 선정

3.1 재료 선정의 기준

본 연구에서 설계한 무인 잠수정의 임무 수행 시에 예상되는 외부 환경 조건을 Table 1에 나타내었다. Table 1에 제시한 바와 같이 무인 잠수정은 해수의 다양한 온도 환경에서 임무 수행을 하며, 최대 300m 깊이까지 잠수하는 외부 환경 조건을 가지게 된다. 따라서 무인 잠수정의 재료는 수 환경에서 부식에 강하고, 심해의 고압을 견딜 수 있는 특성이 요구된다. 그리고 더 많은 장비의 탑재와 잠수정 작업 성능의 향상을 위해서 선체의 경량화가 필수적이다. 이와 같은 조건을 만족하는 재료로서 현재 Al 합금과 Ti 합금이 무인 잠수정의 재료로서 주로 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Al 합금과 Ti 합금을 기준 시험편으로서 제시하였다.

본 연구에서는 무인 잠수정의 재료로서 FRP의 적용 가능성을 검토하였다. FRP는 무게비 강도 및 강성이 Al, Ti 합금보다 높으며, 부식에도 강한 재료이다.^[1] 또한, 최근에는 흡습에 의한 물성 저하를 방지하기 위한 목적으로 수분의 침투가 거의 없는 수지가 개발된 상태이다. 따라서 본 연구에서는 재료 및 성형 공정에 따른 6가지 종류의 FRP 소재를 무인 잠수정의 재료로서 검토하였다.

Table 1. Working condition of AUV

Particular working condition	
Environment	Sea water
Temperature	4~18°C
Depth range	300m

3.2 금속 재료

무인 잠수정이 해수 환경에서 임무를 수행하는 것을 고려하여, 무인 잠수정의 재료로서 가벼우면서 기계적 특성, 내식성이 우수한 재료를 검토하였다. Table 2에 탄소강, 합금강, 스테인리스강에 대한 기계적 특성을 나타내었다. 표를 통해서 알루미늄 합금과 티타늄 합금이 탄소강, 니켈 합금 및 스테인리스강보다 비중이 월등히 낮고, 이로 인해 비강성 및 비강도가 높음을 확인할 수 있다.

또한 알루미늄 합금과 티타늄 합금은 내식성을 가지는 재료로서 금속 재료 중에서 해수 환경에서의 부식에 가장 강한 저항성을 가질 것으로 예상된다. 이와 같은 이유로 금속 재료로서 알루미늄 합금과 티타늄 합금을 선정하였다. 두 가지 재료에 대한 구체적인 특성을 Table 3, 4에 나타내었다.

Table 2. Mechanical properties of various metal materials.^[3]

Materials	Specific gravity	Young's Modulus (GPa)	Tensile Strength (GPa)	Yield Strength (GPa)	Specific modulus (10m)	Specific Strength (10m3)
SAE 1010 (탄소강, 냉간가공)	7.87	207	365	303	2.68	4.72
AISI 4340 (합금강, 담금질 후 풀림)	7.87	207	1722	1515	2.68	22.3
Al 6061-T6	2.70	68.9	310	275	2.60	11.7
Al 7178-T6	2.70	68.9	606	537	2.60	22.9
Ti-6Al-4V	4.43	110	1171	1068	2.53	26.9
17-7 PH 스테인리스강	7.87	196	1619	1515	2.54	21.0

Table 3. Material characteristics of Aluminum

Characteristics of Aluminum and their alloy	
Merits	<ul style="list-style-type: none"> ● Very low weights (Specific gravity: 2.7) ● High specific strength ● Easy to plastics working ● High corrosion resistance ● High thermal conductivity (3 times higher than Fe) ● No effect in magnetic fields ● Strong in low temperature environments ● Easy to recycle
Applications	<ul style="list-style-type: none"> ● Aerospace & airplane ● High function materials (Magnetic disk, Engine cover, OA machine) ● Structural materials (Car, Electronic equipment)
Demerits	<ul style="list-style-type: none"> ● Generation of hazardous waste in recycle process ● Replacement to polymer materials in car, electronic equipment industries ● High cost comparing other metals

Table 4. Material characteristics of Titanium

Characteristics of Aluminum and their alloy	
Merits	<ul style="list-style-type: none"> ● Low weights (Specific gravity: 4.5) ● High specific strength ● No effect in magnetic fields ● Strong in low temperature environments ● High corrosion resistance
Applications	<ul style="list-style-type: none"> ● Aerospace & airplane ● High function materials (Artificial bone, Root of tooth) ● Car components ● Building materials
Demerits	<ul style="list-style-type: none"> ● Complexities of manufacturing processes ● High cost comparing other metals

3.3 섬유강화복합재료

3.3.1 섬유강화복합재료의 특징

복합재료는 두 가지 이상의 성질이 서로 다른 물질을 거시적 (Macroscopic)으로 혼합시켜서 각 구성 재료보다 우수한 성질을 가지는 하나의 새로운 재료를 만든 것을 말한다.^[4] 복합재료의 구성은 외부 환경으로 재료를 보호하고, 형상을 유지시켜 주는 기지재와 재료의 강도와 강성을 향상 시켜 주는 강화재로 되어 있다. 복합재료는 일반적으로 미립자(particulate) 강화 복합재료, 적층(laminar) 복합재

료, 플레이크(flake) 복합재료, 골격형(skeletal) 복합재료로 나뉠 수 있다. 이 중에서 적층 복합재료의 한 형태인 섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Plastics; FRP)는 다른 복합 재료에 비해 비강도 및 비강성이 높고, 좋은 피로 특성을 가지는 이유로 경량화가 요구되는 항공·우주산업과 자동차 산업에서 핵심적인 재료로서 사용되고 있다. 아래에 섬유강화 복합재료의 특징에 대해서 요약하였다.

- (1) 비강도, 비강성이 높다.
- (2) 내부식성, 내피로성이 우수하고, 이와 같은 이유로 인해 금속 구조물에 비해 수리 비용이 적게 든다.
- (3) 강성이 크고, 질량이 낮으므로 고유 진동수가 높다. (외부 진동에 영향을 받지 않는다, Table. 5 참고)
- (4) 열팽창 계수가 낮으므로 다양한 온도 환경에서 동시에 사용하는 구조재로서 사용이 가능하다.
- (5) 이방성(Anisotropic) 재료이므로 설계 요구에 맞는 맞춤형 재료의 설계가 가능하다. (강도가 요구되는 방향으로 섬유를 배열하여 재료의 낭비를 막을 수 있다.)
- (6) 취성파괴에 취약하다.
- (7) 기지는 온도, 압력, 수분 등의 외부 환경에 많은 영향을 받는다.
- (8) 재료의 손상 및 파괴 기구가 복잡하며, 불규칙한 파괴 양상으로

인해 재료의 표준화가 금속에 비해 다소 부족하다.

Table 5. The comparison of damping factors between steel materials and FRP materials^[3]

Materials	Fiber directions	Young's modulus (GPa)	Damping factor
Mild steel	-	207	0.0017
6060 Al alloy	-	68.9	0.0009
E glass/Epoxy Composite	0°	39.3	0.0070
Boron/Epoxy Composite	0°	220	0.0067
Carbon/Epoxy Composite	0°	207	0.0157
	22.5°	35	0.0164
	90°	6.9	0.0319
	[0/22.5/45/90] _s	69	0.0201

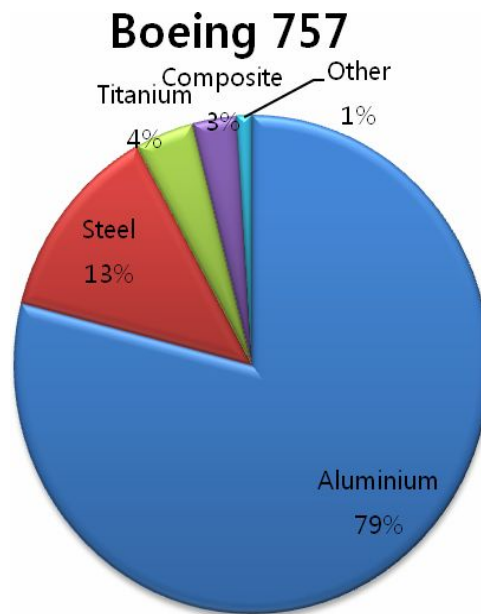
3.3.2 항공산업에서의 섬유강화 복합재료

“경량화, 고성능화, 안정성의 확보”를 요구하는 항공기의 재료로서 섬유강화 복합재료는 필수적인 재료라고 할 수 있다. 초기의 섬유강화 복합재료는 기지재로서 불포화 폴리에스테르가 사용되었고, 최

근에는 고내열성의 열가소성수지를 매트릭스로 사용하여, 가공 및 취급이 용이하고, 대량생산이 가능한 재료를 개발하기 위한 연구가 지속되고 있다.

Fig. 3 에 보잉사에서 공개하고 있는 자료를 바탕으로 Boeing 757 기종과 Boeing 787 기종 제작에 사용된 재료의 구성 비율을 표로 나타내었다. Boeing 787 기종은 2007 년에 출시된 기종으로서 약 20 년 전의 Boeing 757 기종에 비해 금속의 비중은 확연히 줄어들고, 섬유강화 복합재료의 비중은 3% 에서 50%로 상승한 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 4 에서 확인할 수 있는 민항기 재료의 경우도 섬유강화 복합재료의 사용 비율이 꾸준히 증가하여, 2002 년에는 약 30%까지 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다.





Boeing 787

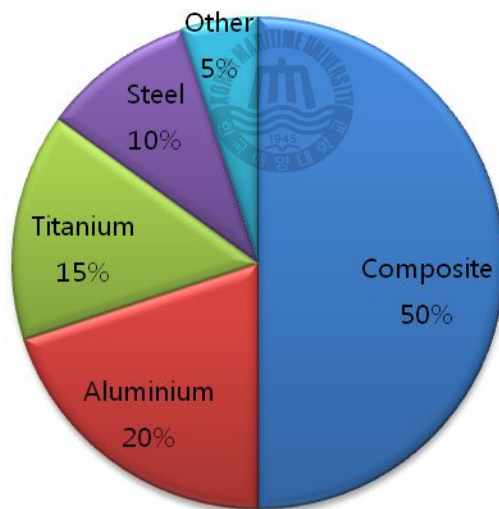


Fig. 3. Comparison of aircraft materials between Boeing 757 and Boeing 787

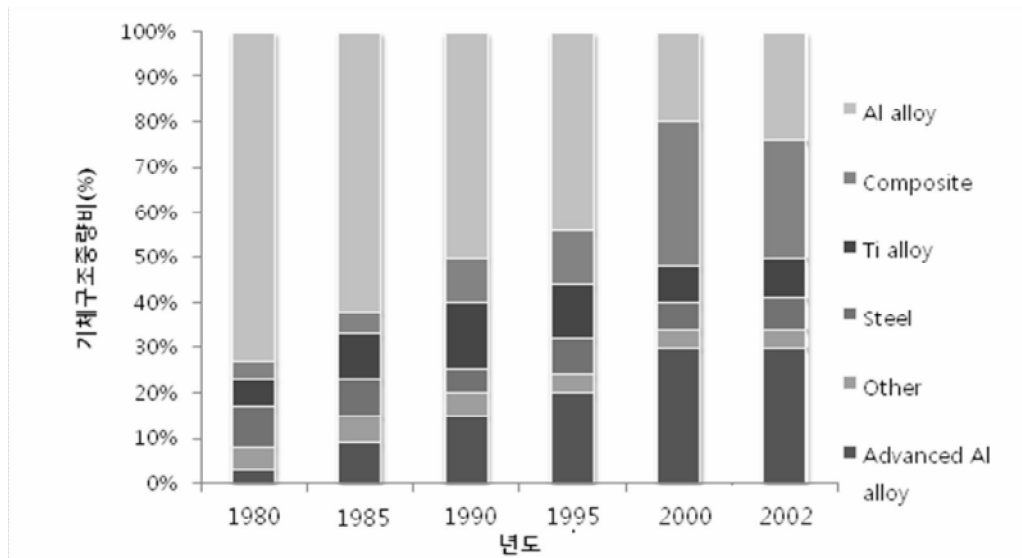


Fig. 4. Material changes of commercial planes^[5]

3.3.3 섬유강화 복합재료의 경제성

섬유강화 복합재료의 가격 수준은 일반적으로 금속 재료에 비해 크게 비싼 편이다. 하지만 Fig. 3, 4 에서 확인할 수 있는 바와 같이 항공기에서의 섬유강화 복합재료의 사용은 지속적으로 확대되고 있는 추세다. 따라서 본 절에서는 항공기용 재료로서 섬유강화 복합재료를 사용할 경우의 항속 거리 증가와 탑승 인원의 증가에 대해서 직접 분석해 봄으로써 섬유강화 복합재료의 경제성에 대해서 확인해 보고자 한다.

먼저, 속도 및 탑재량 등과 함께 항공기의 성능을 나타내는 중요한 항목 중 하나인 항속 거리(Range of aircraft)의 측면에서 섬유강화 복합재료의 경제성을 분석해 보겠다. 항속 거리 계산식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$\frac{L}{D} \times \frac{V}{SFC} \times \ln \frac{W_0}{W_f} \quad (1)$$

여기서, L/D=양력-항력의 비

SFC=비 연료 소모율(Specific Fuel Consumption)

V=항공기의 속도

W₀=이륙시의 전체 무게

W_f=착륙시의 전체 무게 (연료 0)

그리고 보잉사의 4 가지 기종에 대해서 알루미늄 재료를 복합재료로 대체하였을 경우의 절감 무게, 최고 이륙 무게, 최고 착륙 무게를 Table 6 에 나타내었다. 식(1)에 Table 6 의 제원을 적용하여 섬유강화 복합재료의 사용으로 인해 증가된 항속 거리를 계산하였고, 그 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 또한, 짐을 포함한 승객 한 명의 무게를 100kg 으로 가정을 하고, 재료의 대체로 인하여 추가적으로 탑승 가능한 인원의 수도 함께 나타내었다. Fig. 5 를 통해서 섬유강화 복합재료가 50% 사용된 B787-8 기종은 10% 이상의 항속 거리 증가와 45 명의 추가 승객 탑승을 기대할 수 있으며, 그 외 3 종류의 기종은 5% 내외의 항속 거리의 증가와 5 명 내외의 추가 승객 탑승을 기대할 수 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해서 항공기용 재료로서의 섬유강화 복합재료는 금속 재료에 비해 크게 비싼 가격을 충분히 상쇄할 수 있을 만큼 경쟁력이 있는 재료라고 판단할 수 있다. 또한, 섬유강화 복합재료는 금속 재료에 비해 수리에 소요되는 비용이 거의 들지 않으므로 경제성이 우수한 재료라고 할 수 있다.

Table 6. Material changes of commercial planes^[5]

Airplane type	Total composite weight(kg)	Weight saving(kg)	Max. take-off weight(kg)	Max. landing weight(kg)
B737-300	681	272	51,256	46,901
B757-300	1,516	676	112,128	92,170
B767-300	1,535	636	141,974	123,468
B787-8	50,600	4,536	199,127	150,230

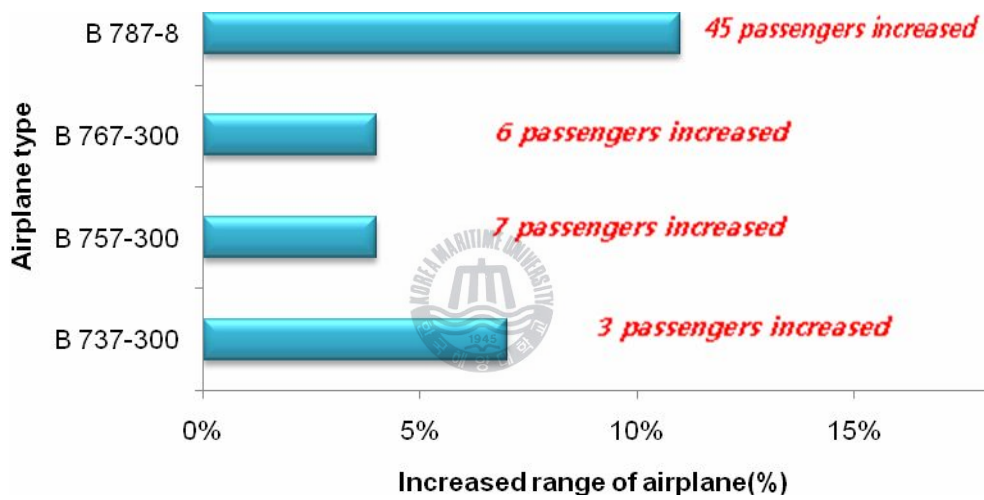


Fig. 5. Increased range of airplane by composite materials

4. 공정의 선정

4.1 공정 선정의 기준

섬유강화 복합재료의 성형에 사용되는 대표적인 공정은 핸드레이업, 진공백 성형, RTM, 필라멘트 와인딩, 펄투루전, 압축성형 등이다. 이 중에서 펄투루전과 압축성형은 원통형의 AUV 선체를 제작하는 공정으로는 적합하지가 않고, 필라멘트 와인딩 공정은 현실적으로 실험실 수준에서 제작하기에 어려운 공정이기 때문에 본 연구의 공정에서 제외되었다. 본 연구에서는 위 3 가지 공정을 제외한 핸드레이업, 진공백 성형, RTM 공정을 검토하였으며, RTM 공정 중에서 대형이며 생산 대수가 적은 제품의 성형에 적합한 VaRTM 공정을 채택하였다.

4.2 Hand Lay-up

핸드레이업 공정은 복합재료 성형의 가장 오래된 방법이며, 또한 기본적인 방식이다. 이 공정은 강화재를 몰드 위에 한 장씩 적층시키고, 기지재인 수지를 브러쉬(brush)나 롤러(roller)를 이용하여 1 장씩 함침시키는 방식이다.

핸드레이업 공정은 수 작업으로 진행되기 때문에 초기 시설 투자 비용이 들지 않는 장점이 있지만, 성형 공정에서 발생하는 기포 등에 의한 결함 발생이 많고, 작업 시간도 다른 복합 재료 성형 공정에 비해서 긴 단점이 있다. Fig. 6 에 핸드레이업 공정에 대해 나타내었다.

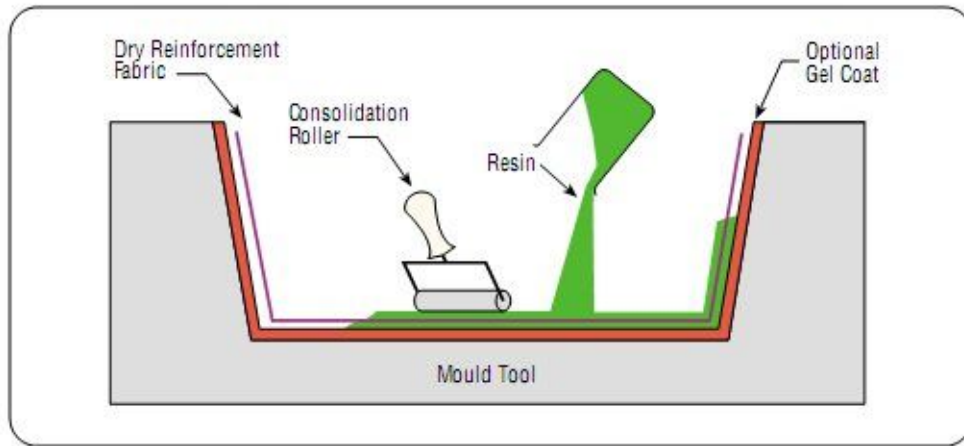


Fig. 6. Schematic of Hand Lay-up process

4.3 진공백 성형(Vacuum Bag Molding)

진공백 성형은 탄소섬유, 유리섬유 등과 같은 강화재에 프리프레그 (prepreg)를 사용하여 복합재료를 성형하는 공정이다. 프리프레그는 에폭시 수지 등의 기지재가 일부 경화된(B-staged) 상태로 혼합되어 있는 재료이며, 경화 후의 강화 섬유와 에폭시 수지의 무게비는 6:4가 일반적이다. 또한 이는 항공·우주 산업의 표준으로 되어 있다.(경화 전의 그 무게비는 5:5 이지만 경화 과정에서 에폭시 수지의 약 10%가 빠져 나온다.)

진공백 성형 공정은 핸드레이업 공정에 비해 생산성과 작업성이 우수한 공정이다. 특히, 이 공정은 수지 및 섬유에 의한 현장의 오염이 적고, 작업 시간이 짧은 것이 특징이다. Fig. 7 에 진공백 성형 공정에 대해서 나타내었고, Table 7 에 핸드레이업 공정과 진공백 공정의 작업 시간에 대해 비교하여 표로 나타내었다.

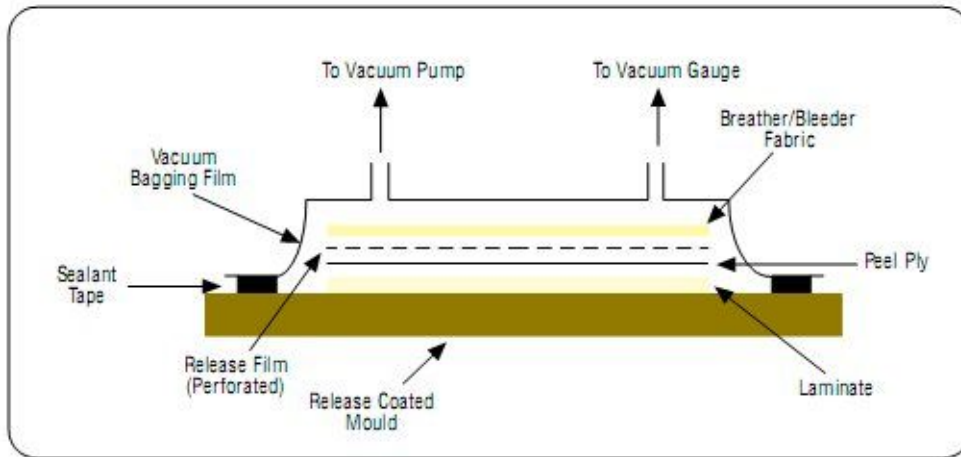


Fig. 7. Schematic of Vacuum bag molding process



Table 7. Increased range of airplane by composite materials

Process	Vacuum Bag Molding		Hand Lay-up Molding	
	Work time	Work time × Work people	Work time	Work time × Work people
Coating release solvent	5 min./ a worker	5 min.	5 min./ a worker	5 min.
Cutting Reinforcement fibers	8 min./ a worker	8 min.	10 min./ a worker	10 min.
Molding preparation	5 min./ a worker	5 min.	7 min./ 2 workers	14 min.
Lay-up Deforming, Resin impregnation	20 min./ 2 workers	40 min.	45 min./ 2 workers	90 min.
Releasing, After treatment	5 min./ 2 workers	10 min.	5 min./ 2 workers	10 min.
Total	-	68 min.	-	129 min.

4.4 VaRTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)

VaRTM 성형 공정은 RTM 의 변형된 공정으로서 한쪽 면의 금형에 강화 섬유를 적층 시키고, 진공 상태에서 수지를 신속하게 함침시켜 복합재료 구조물을 성형하는 공정이다. 이 공정은 한쪽 단에 걸린 진공압으로 인하여 진공백 내부의 기포가 배출되고, 대기압이 진공백면에 수직으로 작용하므로 성형품 내부의 기공이 적고, 섬유 함유율이 높은 장점이 있다.

VaRTM 공정은 오토클레이브 장비를 사용하여야 하는 진공백 성형 공정에 비해 성형 비용이 적게 들고, 공정이 단순하다. 또한, 핸드레이업 공정에 비해서 섬유 함유율이 높으며, 내부 결함의 발생 가능성이 적은 공정이다. VaRTM 공정에 대하여 Fig. 8 에 나타내었다.

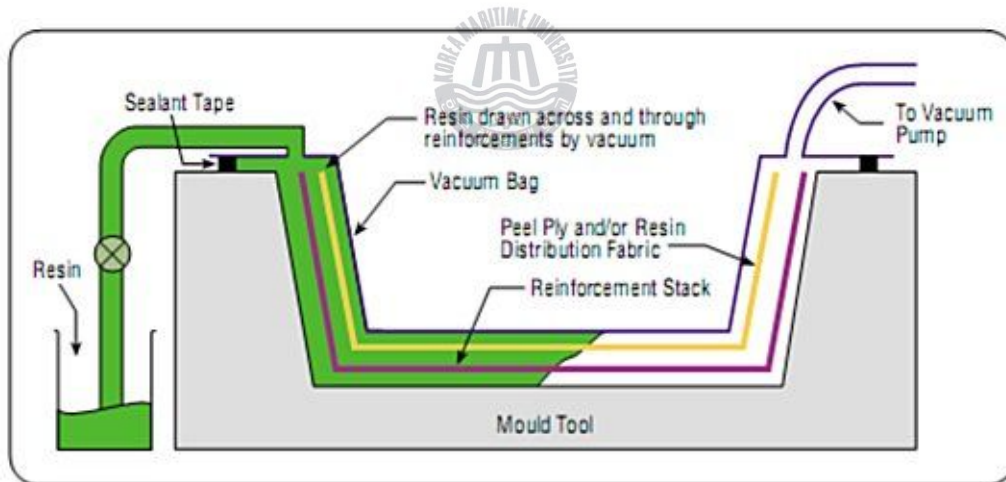


Fig. 8. Schematic of VaRTM process

5. 시험편 제작 및 물성치 산정

5.1 시험편 제작

본 연구의 FRP 시험편은 그 재료 및 제조 공정에 따라서 6 가지 종류가 제작이 되었다. 재료는 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics), GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)의 두 종류가 사용되었으며, 두 종류의 재료에 대하여 Hand Lay-up, VaRTM, 진공백 성형 공정을 적용하여 총 6 종류의 시험편을 제작하였다.(Fig. 9~11) 각 시험편의 성형 조건에 대하여 Table 8 에 나타내었고, 진공백 성형 공정에서 적용된 경화 사이클을 Fig. 12 에 나타내었다.

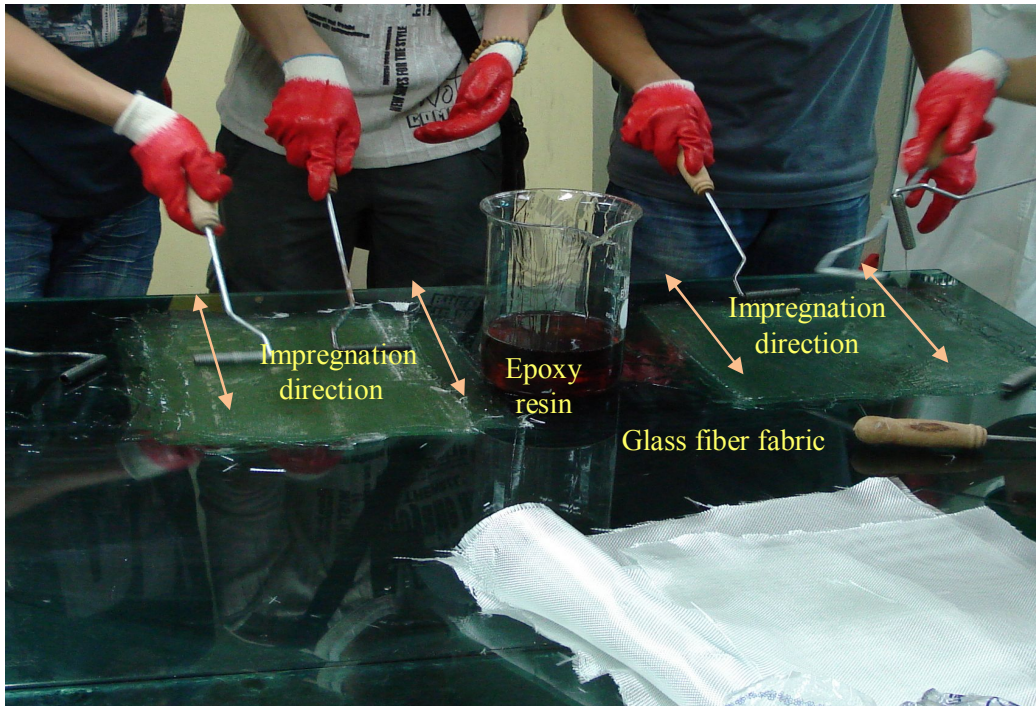


Fig. 9. Specimen manufacturing process of hand lay-up process

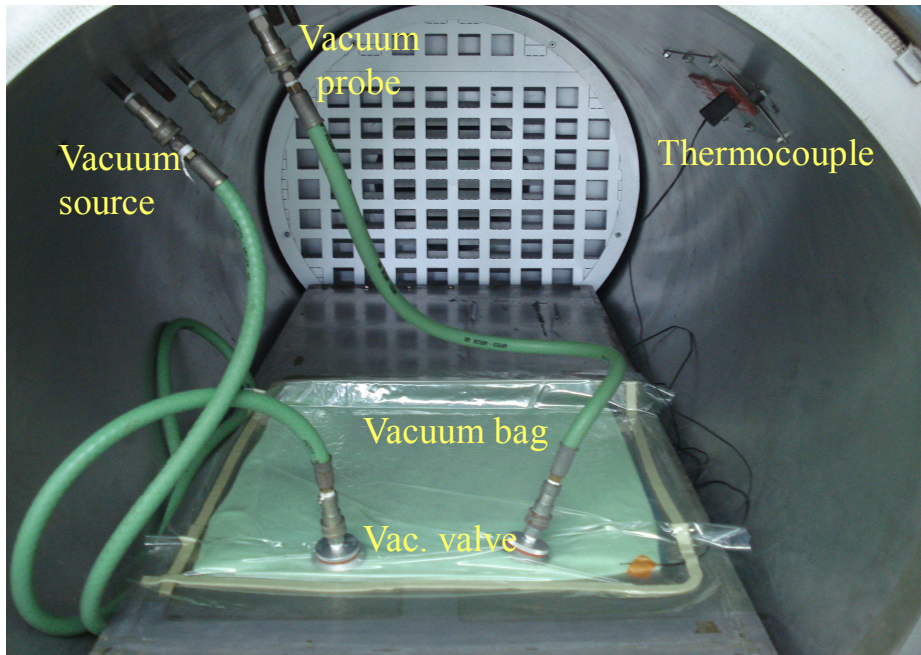


Fig. 10. Specimen manufacturing process of vacuum bag molding process

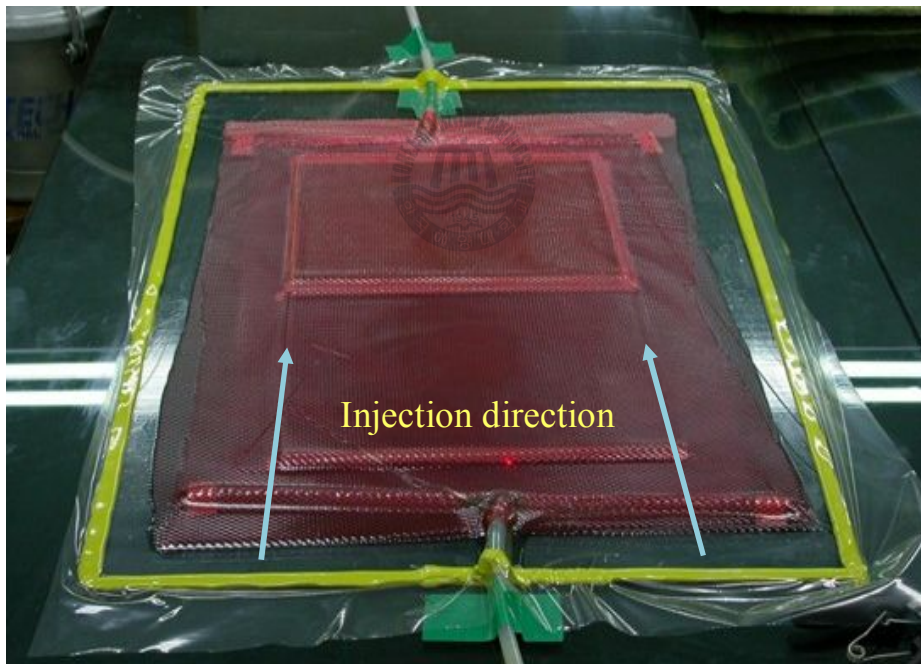
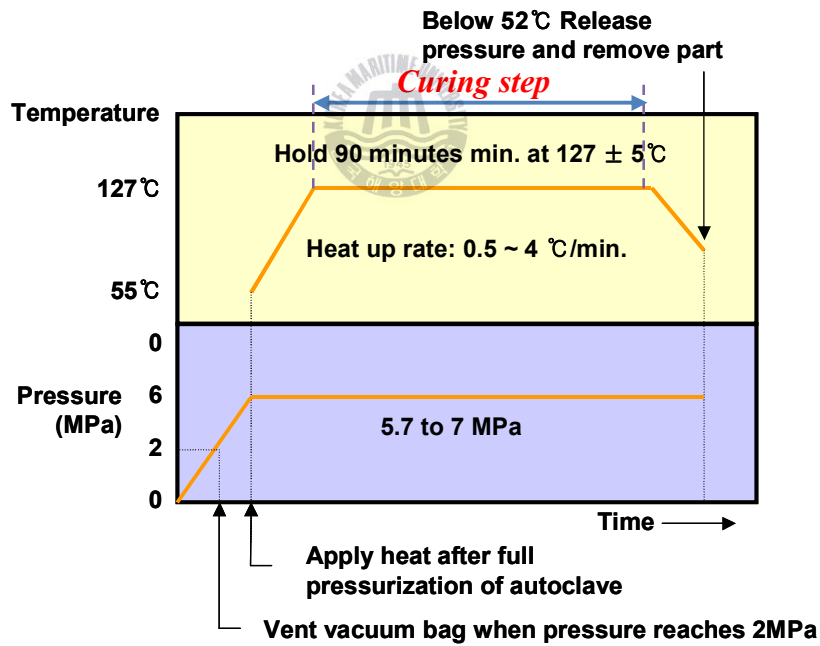


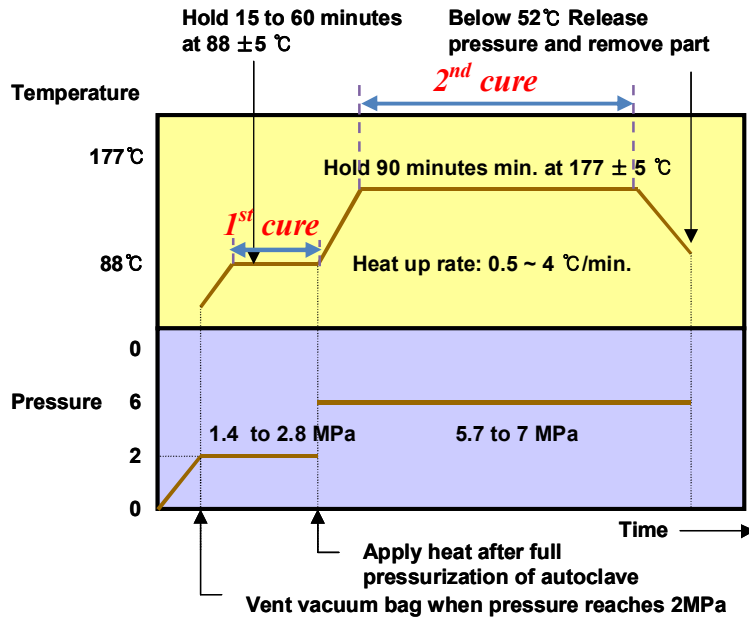
Fig. 11. Specimen manufacturing process of VaRTM process

Table 8. Curing condition of FRP specimens

Specimen name	Curing Temp. (°C)	Curing Time (Min.)
CFRP- Autoclave	179	125
GFRP- Autoclave	125	125
CFRP- VaRTM	90	180
GFRP- VaRTM	90	180
CFRP- Hand Lay-up	25	1440
GFRP- Hand Lay-up	25	1440



(a) Curing cycle of 127°C curing prepreg



(b) Curing cycle of 177°C curing prepreg

Fig. 12. Curing cycle at vacuum bag molding process

5.2 물성 치 산정

시험편의 인장 시험 및 특성 평가를 통해서 6 가지 시험편의 물성을 도출할 수 있었다. 인장 시험은 한 시험편 종류별 6 개를 제작하여 시험하였으며, 이 중 최대치와 최소치를 뺀 4 개 값에 대한 평균값으로 산정되었다. 기준 시험편으로 사용이 된 알루미늄 합금 소재와 티타늄 합금 소재의 기계적 성질을 Table 9 에 나타내었으며, 인장 시험과 섬유 및 수지 함침율 분석을 통해 도출한 FRP 시험편의 물성 치를 Table 10 에 나타내었다. Table 10 에서 Hand Lay-up 공정을 통해서 제조된 시험편의 경우에 그 섬유 함침율이 다른 공정에

의해 제조된 시험편에 비해 약 10%정도 낮은 것을 확인할 수 있다. FRP 재료에서 강화재인 섬유 함침율의 저하는 그 재료의 인장 강도와 탄성율과 같은 기계적 특성의 저하를 발생시킨다.^[6] 이와 같은 이유로 Hand Lay-up 공정을 통해 제조된 FRP 는 다른 공정을 통해 제조된 FRP 에 비해 인장 강도 및 탄성 율이 낮은 것을 확인할 수 있다(Table 10). 따라서 이전 연구를 통해 개발된 Hand Lay-up 방식의 무인 잠수정은 시뮬레이션을 통한 구조 해석치와 실제 내압시험을 통한 실험치의 차이가 크게 발생하였을 가능성이 있다고 생각된다. 또한, 성형 과정에서 발생한 기포로 인하여 무인 잠수정 선체의 기계적 성질의 저하가 나타났을 것으로 예상된다.



Table 9. Mechanical properties of metal specimens^[7]

Specimen name	E (GPa)	ν	S	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)
Al 7075-T6	72	0.33	2.8	503	900
Ti-6Al-4V	113	0.31	4.43	480	550

Table 10. Fiber/Resin Contents & Mechanical properties of FRP specimens

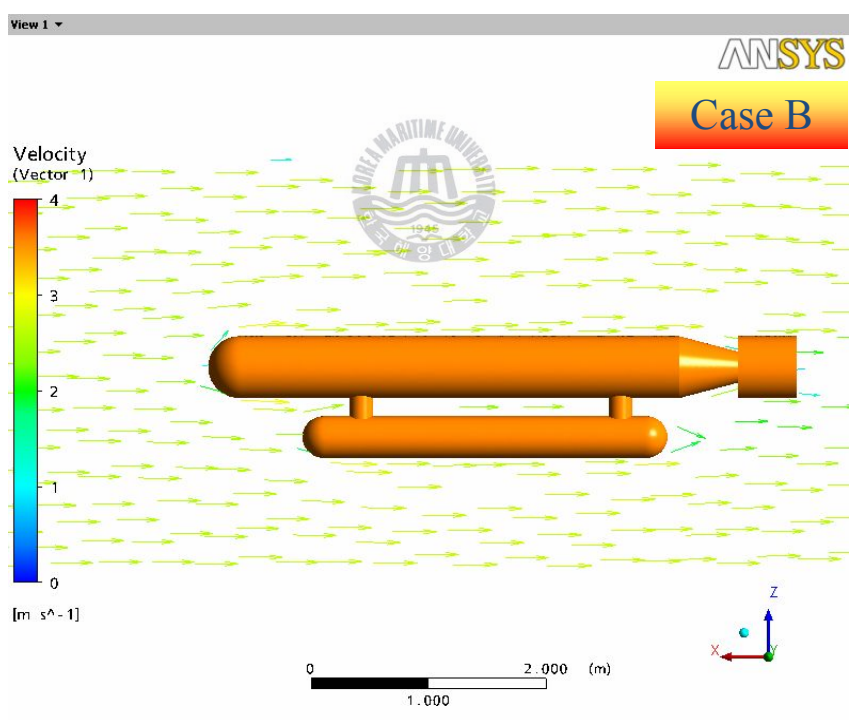
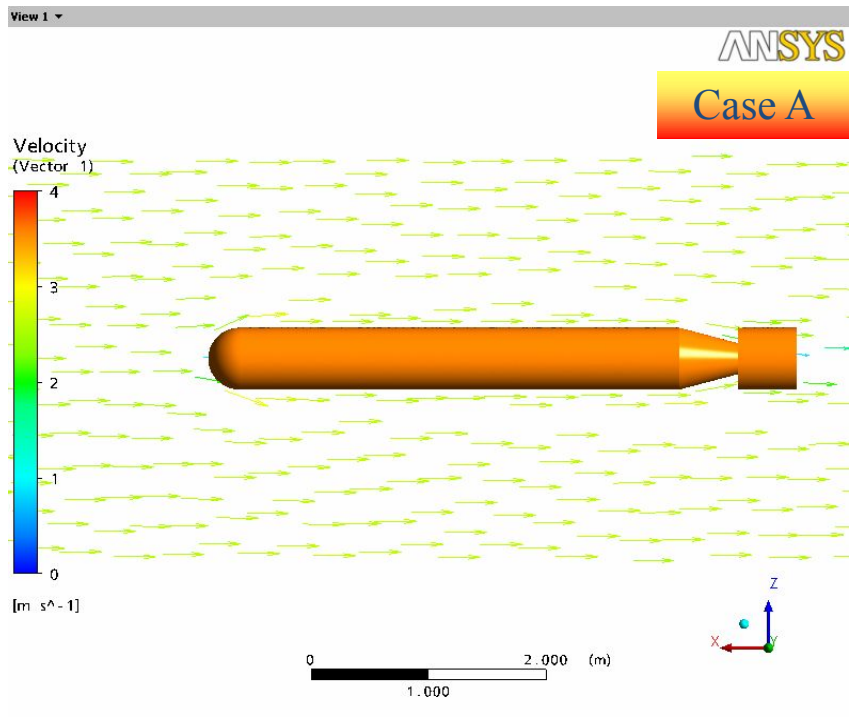
Specimen name	Fiber content (%)	Resin content (%)	E (GPa)	σ_u (MPa)
CFRP-Autoclave	58	42	57	605
GFRP-Autoclave	63	37	21	409
CFRP-VaRTM	58	42	56	331
GFRP-VaRTM	64	36	25	270
CFRP-Hand Lay-up	49	51	35	295
GFRP-Hand Lay-up	53	47	20	240

6. CFD 유동 해석을 통한 최적 선체 모델의 선정

무인 잠수정의 최적 선체 모델을 도출하기 위해서 A, B, C 3 가지 종류의 무인 잠수정 선체를 설계하였고, CFD 유동 해석을 통하여 이 세 가지 무인 잠수정 모델의 외부 유동을 분석하였다. 물의 속도는 무인 잠수정의 예상 선속인 2.6m/s 를 적용하였으며, 지배 방정식은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stocks) 방정식이 적용되었다.

Fig. 13 에 Al 7075-T6 재료 물성이 적용된 3 가지 선체 모델의 외부 유동을 보여 주고 있다. 그림을 통해서 3 가지 모델의 무인 잠수정 주변에는 와류의 발생 및 유동의 불균일성이 나타나지 않았음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 이 중에서 Case A 를 무인 잠수정의 선체 모델로 최종 선정하였다. 그 이유는 복합 재료의 경우 용접 및 접착이 어렵고, 접착부에 대한 표준화된 해석 방법이 없는 실정이므로 Case B, C 에 대한 정확한 해석을 하기에 현실적으로 어렵다는 판단에서 였다. 또한, 구조 해석 후에 수행 할 무인 잠수정 선체의 실제 압력 테스트도 고려하여 비교적 형상이 단순한 모델인 Case A 를 선정하였다.



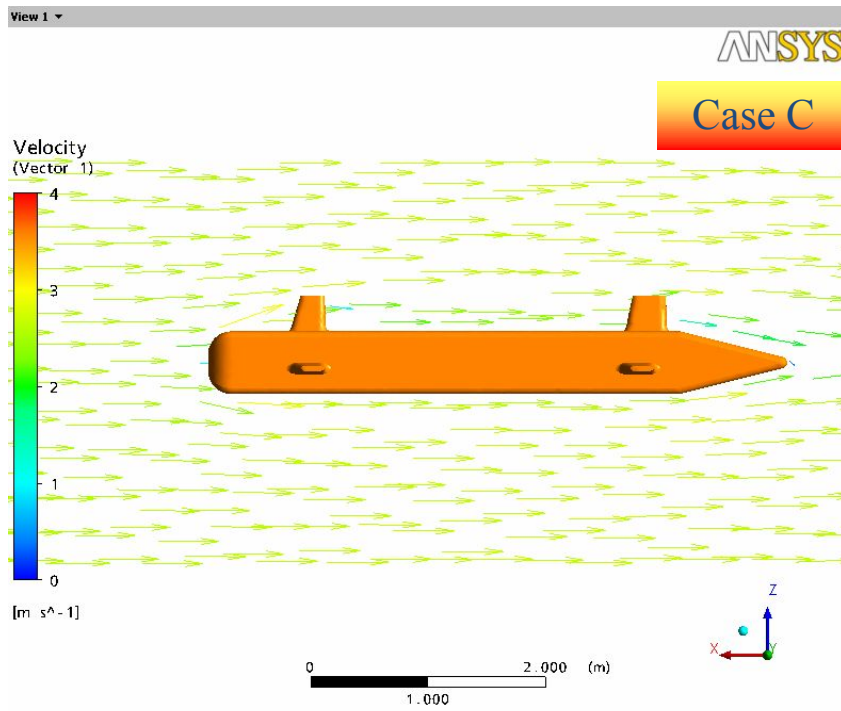


Fig. 13. CFD analysis for different types of models (Case A, B, C)



7. 무인 잠수정 설계 및 해석

7.1 무인 잠수정의 선체 설계

상용 구조 해석 프로그램인 CATIA 를 사용하여 무인잠수정의 선체를 설계하였다. 그 선체의 설계에는 6941 개의 절점과 3449 개의 요소가 사용되었으며, 직경이 1740mm, 지름이 234mm, 두께가 10mm 인 AUV 압력 선체를 설계하였다. 동일한 치수를 적용하여 Table 9, 10 에 제시된 총 8 가지의 재료가 모두 설계되었으며, Fig. 14 Al 7075-T6 재료 물성을 적용하여 설계한 무인 잠수정 선체를 나타내었다.

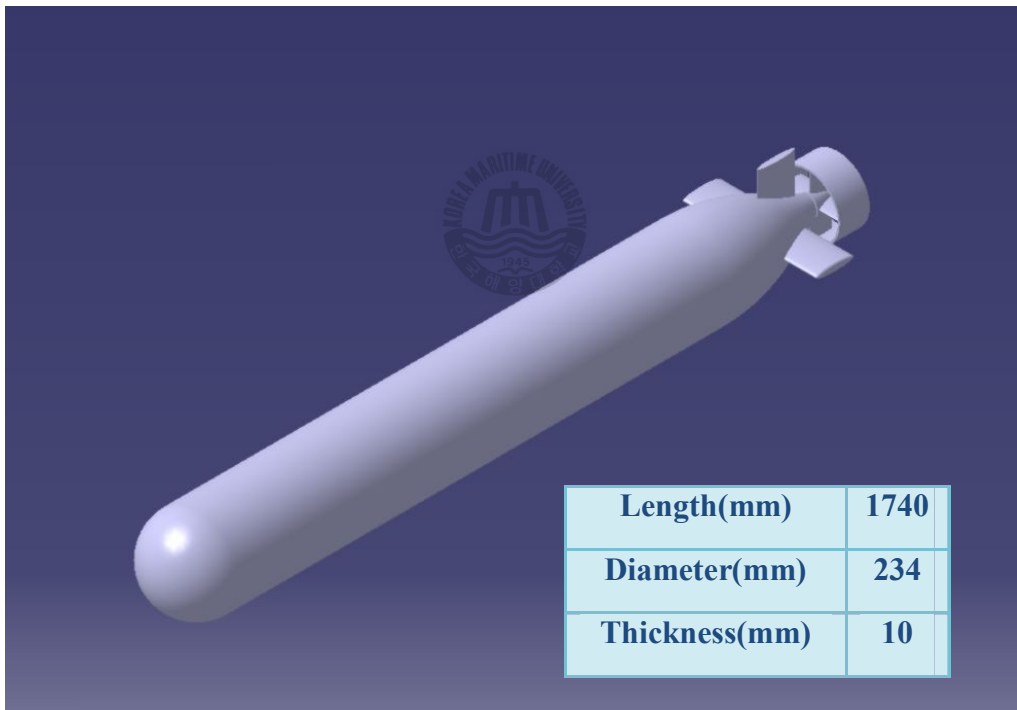


Fig. 14. Design model of AUV pressure vessel

7.2 각 재료 및 공정별 무게 비교

CATIA 시뮬레이션을 통해서 3.1 에 제시한 잠수정 선체에 재료 및 공정에 따른 8 가지 재료 무게를 산출하였고, 이를 Table 12 에 나타내었다. 분석을 통하여 CFRP 의 경우는 기존의 알루미늄 합금에 비해 60%이상의 무게 절감이 되는 것으로 나타났으며, 티타늄 합금에 비해 40% 이상의 무게 절감이 되는 것으로 나타났다. 또한 GFRP 역시 기존 재료에 비해서 상당한 무게 절감을 기대할 수 있는 것을 알 수 있다. 따라서 FRP 재료를 사용하여 무인 잠수정을 제작할 경우에 기존 재료에 의한 잠수정에 비해 약 2 배의 임무수행 장비의 추가 탑재를 기대할 수 있다.



Table 12. Weights of various types of AUV pressure vessels

Specimen name	Weights of pressure vessel (Kg)
Al7075-T6	100
Ti-6Al-4V	63
CFRP- Autoclave	34
GFRP- Autoclave	32
CFRP- VaRTM	36
GFRP- VaRTM	41
CFRP- Hand Lay-up	41
GFRP- Hand Lay-up	47

7.3 각 재료 및 공정별 기계적 특성 비교

Fig. 14 를 통해 설계한 잠수정 선체에 재료 및 공정에 따른 8 가지 재료의 물성을 적용하여 각각의 선체에 대한 구조해석을 수행하였다. 해석조건은 Fig. 15 에 제시한 바와 같이 한쪽 단을 구속하고 300m 수심의 하중에 해당하는 3MP 의 분포하중을 가하는 방식을 적용하였다. 해석을 통하여 8 가지 무인 잠수정의 최대 변형량을 도출할 수

있었으며, 이를 Table 13 에 제시하였다. 이를 통해서 CFRP-Autoclave 무인 잠수정과 CFRP-VaRTM 무인 잠수정은 기존의 알루미늄, 티타늄 합금의 무인 잠수정과 기계적 특성이 크게 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Table12 를 통하여 확인한 무게 절감 효과를 함께 고려한다면, CFRP 재료를 사용하여 오토클레이브 진공백 성형 혹은 VaRTM 성형으로 제조한 무인 잠수정은 기존 금속 재료를 통해 제조한 무인 잠수정에 비해서 상당한 재료적인 이점을 가지며, 무인 잠수정의 재료 및 공정으로서 가능성이 크다고 판단된다.

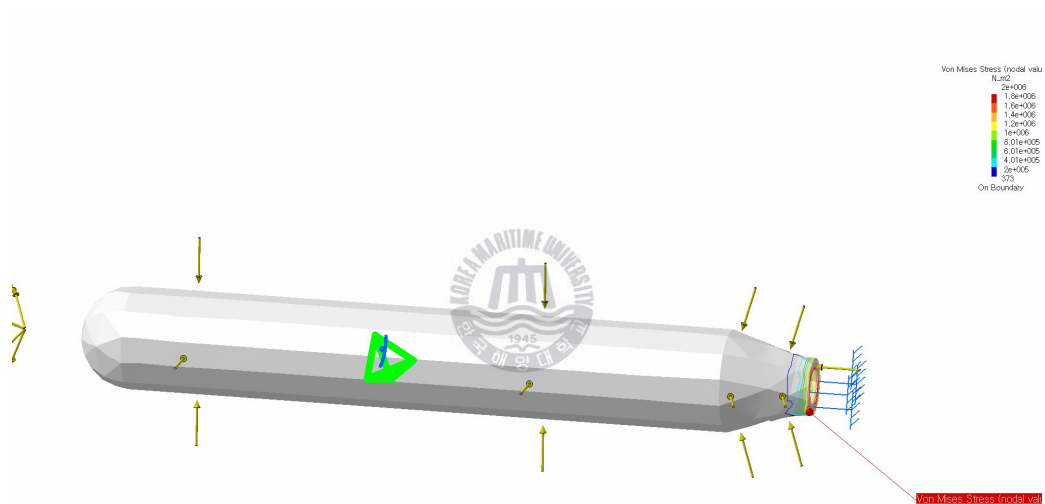
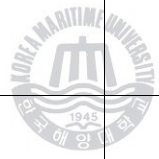


Fig. 15. Structural analysis condition of AUV

Table 13. Mechanical properties of various types of AUV pressure vessels

Specimen name	Max. displacement (mm)
Al7075-T6	0.142
Ti-6Al-4V	0.089
CFRP- Autoclave	0.168
GFRP- Autoclave	0.457
CFRP- VaRTM	0.224
GFRP- VaRTM	0.501
CFRP- Hand Lay-up	0.358
GFRP- Hand Lay-up	0.626



7. 4 재료별 특성비교

3 장을 통해 나타낸 금속과 FRP 재료의 재료적인 특성과 설계 및 구조해석을 통해 나타난 결과를 종합하여 알루미늄합금, 티타늄합금, 섬유강화복합재료의 재료적인 특성을 비교하였고, 이를 Table 14 에 나타내었다. 구조해석 결과를 통해 확인한 바와 같이 진공백 성형 공정과 VaRTM 공정이 적용된 FRP 재료는 금속 중에서 비강도 및 비강성이 우수한 소재인 알루미늄과 티타늄 합금에 비해 비강도, 비강성이 우수한 재료이다. 또한 FRP 는 금속에 비해 수리가 적고, 수치 안정성을 가지는 재료이다. 하지만 이 재료는 수분 등의 외부 환경에 약하고, 가격 경쟁력이 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 여기서, 가격 경쟁력 부분은 무인잠수정이 군사용, 해저탐사용 등의 최고 성능을 발휘해야 하는 임무 목적상 그 재료 적용의 이유가 된다고 할 수 있다. 하지만 수분 등의 외부 환경에 약한 섬유강화복합재료의 특성은 수중에서 임무를 수행하는 무인잠수정의 재료로서 치명적인 약점이 될 수 있고, 반드시 그에 대한 재료적인 안정성에 대한 검증이 필요하다 할 수 있다. 이에 대해서는 8.2 절에서 자세히 고찰하고자 한다.

Table 14. Comparison of material characteristics

Material type Characteristics	Al alloy	Ti alloy	FRP
Specific strength	Good	Good	Excellent
Specific stiffness	Good	Good	Excellent
Maintenance	Many	Many	Seldom
Dimension stability	Bad	Good	Excellent
Anti-corrosion	Good	Good	Excellent
Water resistance	Good	Good	Bad
Cost	Cheap	Cheaper than FRP	Expensive

8. 흡습에 의한 영향 고찰

섬유강화복합재료는 온도, 수분, 자외선, 염분 등의 환경 인자에 장시간 노출되면 그 기계적 특성, 열적 특성, 물리적 특성이 저하된다.^{[7],[8]} 이와 같은 이유로 항공기 산업 등에 사용되고 있는 ‘섬유강화복합재료의 수분에 의한 물성저하 및 그 매커니즘’에 관한 연구가 수십 년 동안 지속되고 있으며, 현재까지 밝혀진 내용은 흡습은 섬유강화복합재료의 수지부에서 대부분의 발생하며, 고분자의 사슬과 사슬 사이에 침투한 물 분자가 고분자의 운동성 및 유연성을 부여함으로써 분자간의 결합력을 떨어뜨리는 역할을 한다는 것이다. 그 흡습 매커니즘에 대한 모식도를 Fig. 16에 나타내었다. 여기서 Step 1은 수분이 섬유강화복합재료의 수지부에 침투하여 그 재료의 물성저하가 발생한다는 이론이다. 그리고 Step 2와 Step 3는 확산에 의해 섬유강화복합재료의 실란부와 섬유 사이의 계면에 침투한 물 분자가 그 재료의 팽윤현상 및 물성저하를 야기할 것이라는 이론이다.

무인 잠수정은 위에서 언급한 환경 인자 중에서 온도, 수분, 염분 등의 인자에 크게 영향을 받을 수 있는 구조물이므로 그 재료로서 섬유강화복합재료를 도입하기 이전에 이 조건들에 대한 재료적인 안전성이 반드시 검증되어야 한다. 따라서 본 장에서는 무인잠수정의 재료로서 선택한 CFRP를 담수/해수의 환경에 노출시킨 후, 저온/상온/고온의 환경에서 인장시험을 하여 무인 잠수정이 임무 중에 직접적으로 영향을 받을 환경인자들에 대한 안전성을 검토하였다.

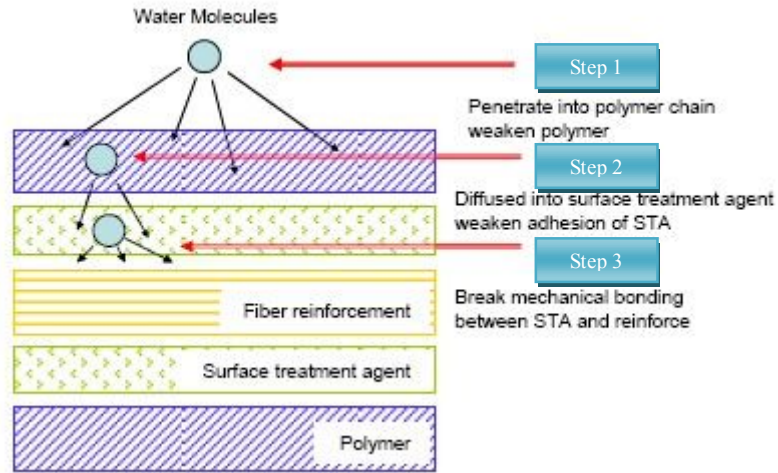


Fig. 16. The process of moisture absorption in the FRP

8.1 시험 조건

무인 잠수정의 재료로서 선정된 CFRP 프리프레그를 177°C 의 오토클레이브 장비에서 경화시켜 시험편을 제작하였다. 또한 한 종류의 시험편은 수중에서의 다양한 온도 조건에서의 흡습의 영향을 확인하기 위해서 시험편 가운데에 홈을 만들고, 가혹한 조건을 부여하였다.

본 시험에서는 각 조건당 6 개의 인장시험편이 사용되었으며, 모든 시험편을 80°C 의 조건에서 100 일간 침지 후 인장시험 하였다. 시험편의 종류에 대해서 Table 15, 16 에 나타내었으며, Fig. 17 에 시험에 사용된 시험편을 보여주고 있다. 또한 Fig. 18 과 19 에 본 시험에 사용된 water bath 와 UTM 장비를 보여주고 있다.

Table 15. The specification of test specimens

	Curing Temp.(°C)	Reinforcement	Matrix	Lay-up Pattern
NHT Specimens	177	Carbon fiber	Epoxy	$[(\pm 45), (0/90)]_{2S}$
OHT Specimens	177	Carbon fiber	Epoxy	$[(\pm 45), (0/90)]_{2S}$

Table 16. The types & the number of test specimens

	The number of tensile specimens							
	RTD	FW	SW	FW-H/T	SW-H/T	C/D	C/FW	C/SW
NHT	6	6	6	6	6	-	-	-
OHT	6	6	6	6	6	6	6	6

RTD: Test at room temp. & dried Specimen,

FW: Immersion in the distilled water for 3 months (approximately 1% of water rates),

SW: Immersion in the salt water for 3 months (approximately 1% of water rates),

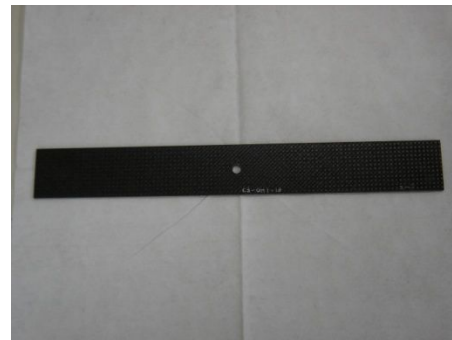
FW-H/T: Tensile test at 82°C environment after immersion by distilled water,

SW-H/T: Tensile test at 82°C environment after immersion by salt water,

C/D: Tensile test at -54°C environment after drying,

C/FW: Tensile test at -54°C environment after immersion by distilled water,

C/SW: Tensile test at -54°C environment after immersion by salt water



(a) NHT(Non-hole Tensile) specimen

(b) OHT(Open-hole Tensile) specimen

Fig. 17. CFRP test specimens



(a) Salt water bath



(b) Distilled water bath

Fig. 18. Water bath where CFRP test specimens were immersed

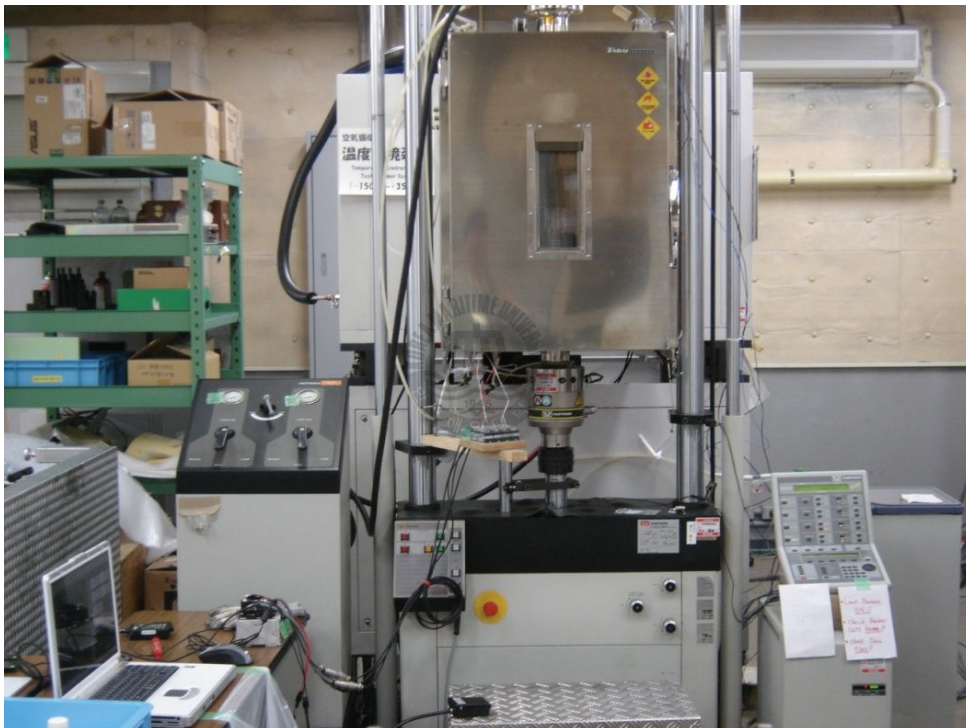


Fig. 19. UTM equipment with environmental test chamber

8.2 시험 결과

NHT 시험편을 다양한 조건(상온 건조, 담수/해수 흡습, 담수/해수 흡습 후 고온시험)에서 인장 시험하였고, 그 결과를 Fig. 20 에 나타내었다. 이를 통해서 담수/해수 조건에서의 흡습에 의해서는 거의 인장 강도의 저하가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, 흡습 후 고온 인장 시험의 경우에는 담수, 해수의 인장강도 저하는 각각 15%, 13%로서 어느 정도의 인장 강도의 저하가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

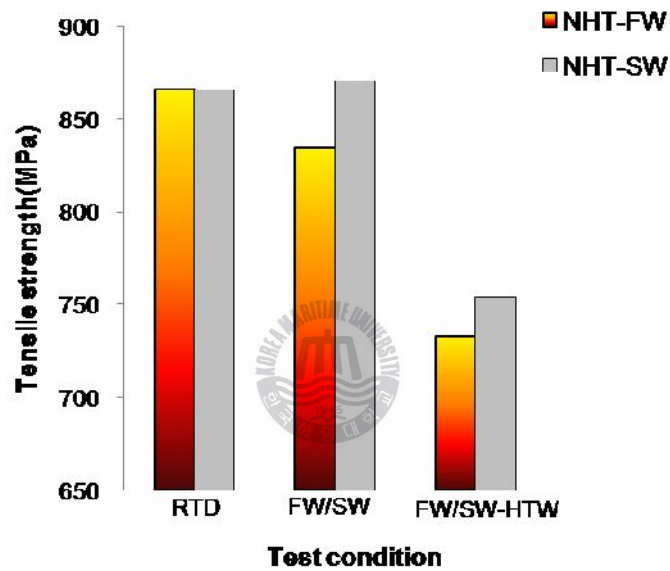


Fig. 20. Tensile strength of NHT specimens at various temperatures

Fig. 21 에 OHT 시험편의 담수/해수 흡습 후 저온(-54°C), 상온, 고온(82°C)에서의 인장시험 결과를 나타내었다. 이 결과도 NHT

시험편의 결과와 동일하게 고온에서는 인장 강도의 감소가 어느 정도 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 흡습에 의해 물 분자가 고분자 수지에 침투된 상태에서 또 다른 하나의 환경 인자인 높은 온도가 수지의 유연성을 부여함으로써 수지와 계면의 결합력 약화를 불러오기 때문인 것으로 판단된다.

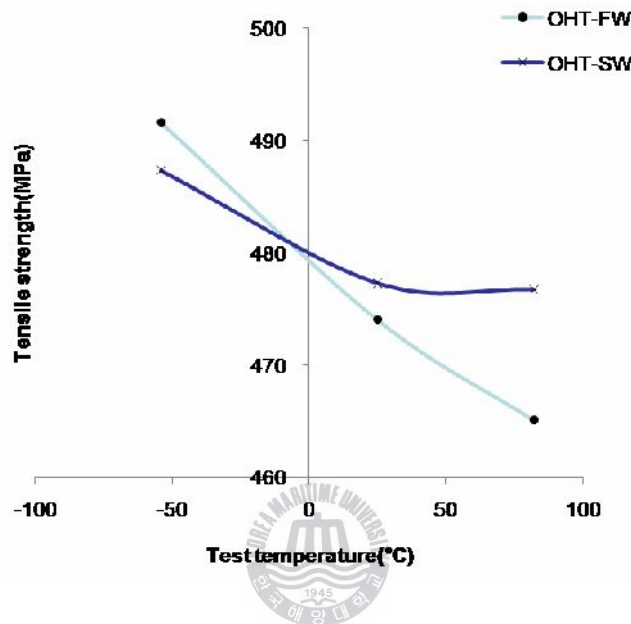


Fig. 21. Tensile strength of OHT specimens at various temperatures

무인 잠수정의 재료로 선정된 CFRP 에 대해서 저온/상온/고온의 환경에서 흡습 시험을 수행하였고, 그 물성저하 거동을 관찰한 결과 흡습에 의한 물성 저하는 크게 관찰되지 않았다. 따라서 본 재료는 무인 잠수정의 재료로서 수중 임무 시의 흡습에 의한 영향에서 안전한 재료라고 생각된다.

9. 성형 방식에 관한 고찰

7 장의 설계 및 구조해석을 통해서 CFRP-Autoclave, CFRP-VaRTM 무인 잠수정은 기존 재료에 의한 무인 잠수정보다 경량성이 우수하고, 기존 재료에 의한 무인 잠수정에 상응하는 기계적 특성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 본 절에서는 이 두 가지 복합재 무인 잠수정의 공정 설계를 하고자 한다.

먼저, Hand Lay-up 공정을 적용하여 복합재 무인잠수정을 성형할 몰드를 제작한다. 몰드 제작 공정은 Fig. 22 와 같다.



Fig. 22. Mold manufacturing process by hand lay-up process

제작된 몰드에 오토클레이브 진공백 성형 공정과 VaRTM 성형 공

정을 적용하여 복합재 무인 잠수정을 제작한다.

첫 번째 공정인 Autoclave 성형에 의한 복합재 무인잠수정 성형 공정은 Fig. 23 과 같이 몰드에 설계된 두께(10mm)에 맞는 수의 탄소-에폭시 프리프레그를 적층하고, 이를 진공백 상태에서 오토클레이브 장비를 통해 경화하는 공정으로 설계하였다. Fig. 24 에 오토클레이브 장비에 들어갈 진공백 상태의 구조물의 모식도를 나타내었으며, 이를 통해서 프리프레그와 기타 부자재의 적층 방법 및 순서를 확인할 수 있다.

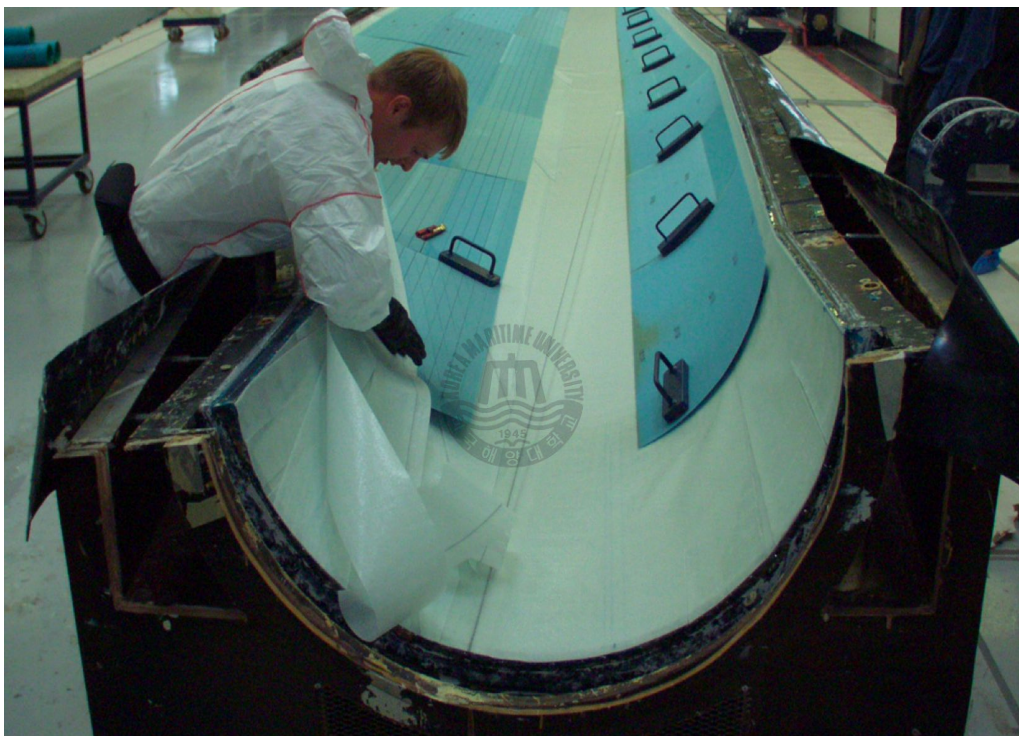


Fig. 23. Lay-up process of vacuum bag molding process by prepreg materials

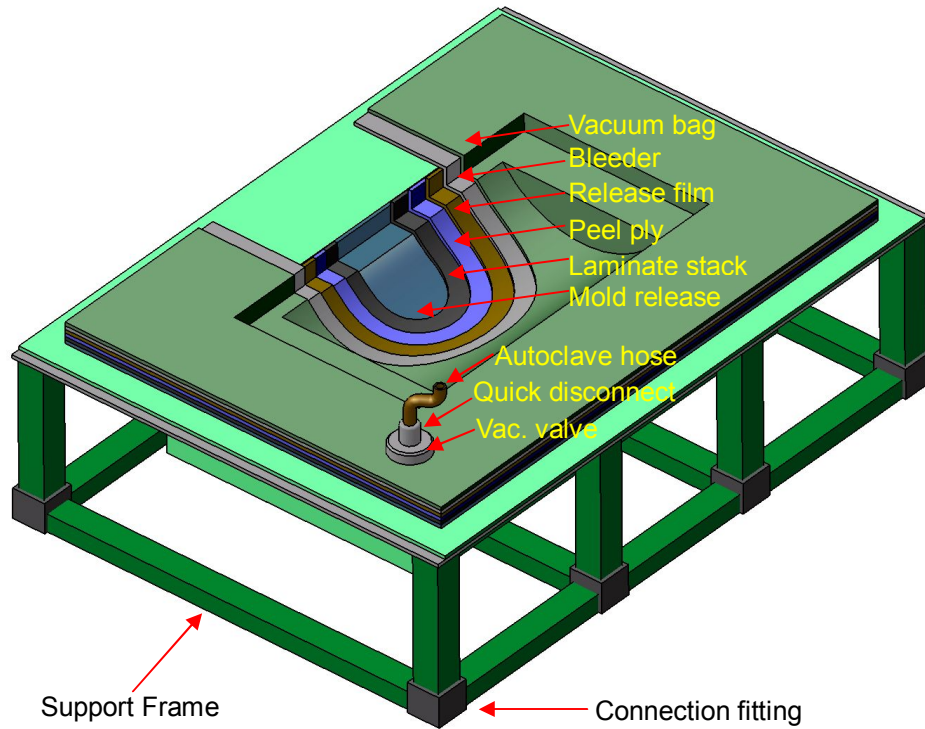


Fig. 24. Schematic of vacuum bag set-up before autoclave curing process

두 번째 공정인 VaRTM 공정에 의한 복합재 무인잠수정 성형 공정은 Fig. 25 와 같이 몰드에 설계된 두께에 맞는 탄소섬유 fabric 을 적층하고, 이를 진공백 상태에서 인퓨전(infusion) 방식으로 수지를 흘려주어 경화하는 공정으로 설계하였다. Fig. 26 에 섬유와 기타 부자재가 적층된 진공백에 수지를 함침시키는 공정의 모식도를 나타내었다.



Fig. 25. Lay-up process of VaRTM process

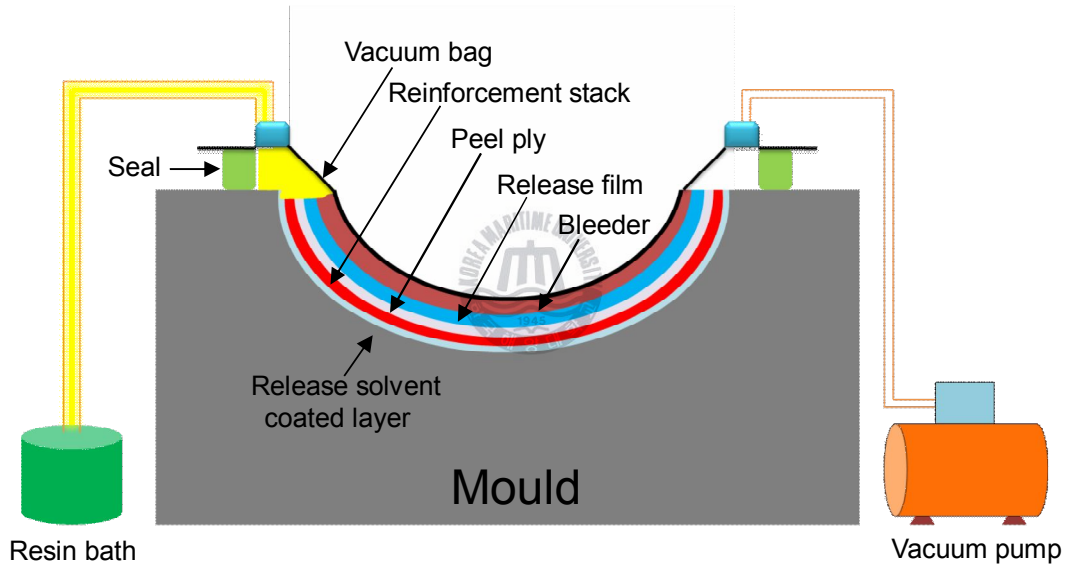


Fig. 26. Schematic of VaRTM process for manufacturing AUV

위에 기술한 오토클레이브 진공백 성형 공정과 VaRTM 성형 공정을 적용하여 두 쌍의 상·하부 선체를 제작한다. 제작된 상·하부 선체에 대해서 그라인더 등으로 표면 가공을 하고, 에폭시 계열의 접착

본드를 사용하여 상·하부 선체를 결합한다. 마지막으로 무인 잠수정 선체가 수분 등의 외부 환경에 대한 저항성을 가지게 하기 위하여 페인트, 에폭시 겔코트, PU 페인트의 차례로 선체에 대한 표면처리를 하여 선체 제작을 완료한다. 선체 본딩과 그 표면 처리에 대한 모식도를 Fig. 27에 나타내었다.

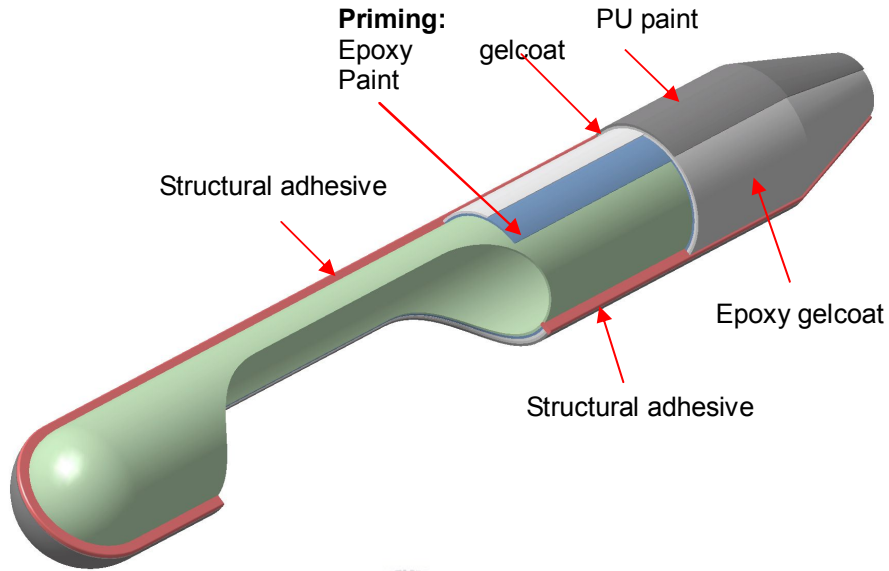


Fig. 27. Schematic of bonded & surface treated AUV

복합재 무인 잠수정은 지금까지 기술한 두 가지 공정설계를 바탕으로 제작할 계획이다. 실제 제작에서는 압력이 집중되는 부분의 굴곡 강성 등을 보완하기 위해서 스파(spar) 및 스파웹(spar web)구조물을 삽입하는 방법, 유리-에폭시를 함께 적층하여 하이브리드 복합재료화 하는 방법, 알루미늄 허니컴 혹은 폴리우레탄 폼을 이용하여 샌드위치 구조를 만드는 방법 등을 고려하고 있다.

10. 결론

본 연구에서는 기존 무인 잠수정의 재료로서 사용되고 있는 티타늄합금 및 알루미늄 합금을 FRP 로 대체하였을 시의 효과에 대해 알아보기 위한 접근을 시도하였고, 시험편을 통한 물성 테스트와 상용 구조 해석 프로그램을 이용한 설계 및 구조 해석을 통해 무인 잠수정의 재료로서 FRP 재료의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 무게 절감의 측면에서는 오토클레이브를 통해 성형한 CFRP 의 경우에 기존의 알루미늄 합금과 티타늄 합금에 비하여 각각 60%, 40% 이상의 무게 절감 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 무인 잠수정의 재료를 FRP 로 대체 시에 더 많은 장비 탑재와 선체의 선속 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 8 개의 재료에 대해서 설계 후 구조 해석을 수행한 결과, VaRTM 공정-CFRP 재료, 오토클레이브 공정-CFRP 재료의 무인 잠수정의 경우 기존의 알루미늄 합금과 티타늄 합금에 의해 제작된 무인 잠수정에 필적하는 기계적 특성을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 핸드 레이업 공정은 성형 공정에서 발생하는 재료 내부의 기포와 섬유 함침율의 저하로 인해 오토클레이브 성형 및 VaRTM 성형에 비해 기계적 성질이 좋지 못한 것을 알 수 있었다. 따라서 핸드레이업 성형 공정은 무인 잠수정의 제조 공정으로는 적합하지 않은 것으로

로 판단된다.

(4) 무인 잠수정의 재료로 선정된 CFRP 에 대해서 저온/상온/고온의 환경에서 흡습 시험을 수행하였고, 그 물성저하 거동을 관찰한 결과 흡습에 의한 물성 저하는 크게 관찰되지 않았다. 따라서 본 재료는 무인 잠수정의 재료로서 수중 임무 시의 흡습에 의한 영향에서 안전한 재료라고 생각된다.

향후 본 연구를 통해 가능성을 확인할 수 있었던 CFRP 재료-오토클레이브 성형 공정, CFRP 재료-VaRTM 성형 공정을 적용하여 무인 잠수정의 선체를 제작할 것이다. 그리고 제작된 무인 잠수정에 대해 압력 테스트를 수행하여 이를 시뮬레이션에 의한 구조 해석 결과와 비교, 검토할 계획이다.



참고 문헌

- (1) 윤산호, 미해군의 무인잠수정(UUV) 개발동향 고찰, 군사논단
- (2) Jung, T. H., Lee, J. M., Hong, S. W., Kim, J. B., An, J. W., 2004, "A Study on the Results of the Pressure Vessel Design, Structure Analysis, and Pressure Test of the Semi-Autonomous Underwater Vehicle (SAUV)", *KSOE*, Vol. 18, No. 4, pp. 52~58
- (3) 이대길, 복합재료, 시그마프레스, pp. 6~7
- (4) 김윤해, 한중원 공저, 복합재료학, 효성출판사
- (5) 강기주 저, 기계재료학, 북스힐, pp. 18
- (6) Kim, Y. H., Eum, S. H, Choi, B. K., Kim, J. C., Kwon. S. C. and Dutta, 2004, "A Study on the Dimensional Stability of Interior Composite Panel Made by Vacuum Bagging", *Key Engineering Materials*, Pt2, pp. 1493~1498.
- (7) 김윤해, 김국진, 한중원, 조영대, 배성열, 문경만, 김동훈, “ 섬유강화복합재료의 전단강도에 미치는 흡습의 영향” , Vol. 21, No. 2, 복합재료학회지, pp. 1-7, 2008. 4
- (8) 김윤해, 김국진, 한중원, 조영대, 배성열, 문경만, “ 복합재료의 수분에 의한 열화 및 회복 메커니즘에 관한 연구, 복합재료학회지, Vol. 21, No. 2, pp. 8 ~ 14, 2008. 4

- (9) Jung, T. H., No I. S, Lee, P. M., Lee, J. M., Lim, Y. G., 2005, "Design Optimization of Pressure Vessel of Small Autonomous Underwater Vehicle", *KSOE*, Vol. 19, No. 1, pp. 95~99
- (10) Tanguy M., Mariusz P., Bernard G., Pierre C., 2002., "Optimal laminations of thin underwater composite cylindrical vessels", *Composite Structures*, Vol. 58, pp. 529~537
- (11) Jun, B. H., Jin, Y. P., Lee, P. M., Lee, F. Y., Oh, J. H., 2007, "Development and tank test of an autonomous underwater vehicle ISiMi", *KSOE*, Vol. 21, No. 2, pp. 529~537
- (12) Ed, P. T., 1998, "CRAG Test Methods for the Measurement of the Engineering Properties of Fiber Reinforced Plastics", *Defence Evaluation and Research Agency(UK)*, Technical Report, 88012
- (13) Kwon, S. C., Dutta, P. K., Kim, Y. H., Lopez-Anido, R., 2003, "Comparison of the Fatigue Behaviors of FRP Bridge Decks and Reinforced Concrete Conventional Decks Under Extreme Environmental Conditions", *KSME International*, Vol. 17, No. 1, pp. 1~10
- (14) Lee, J. S., Wom, J. C., 2005, "Optimal Design of Stiffened Laminated Composite Cylindrical Panelwith Various Types of



Stiffeners", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 10~15



본 논문과 관련된 논문 발표/투고

1. 국내 전문 학술지

- 1) 배성열, 김국진, 김윤해, 한중원, 우병훈, 문경만, “ 섬유강화복합재료의 수분에 의한 물성 변화” , 한국해양공학회 2007 년도 춘계학술대회 논문집
- 2) 김윤해, 배성열, 김국진, 한중원, 우병훈, 문경만, “ 라미네이트 복합재료의 환경열화 특성” , 대한기계학회 부산지부 2007 년도 춘계학술대회 논문집
- 3) 김윤해, 김동훈, 배성열, 김국진, 한중원, “ 라미네이트 복합재료의 미세조직 및 파단면 거동과 수분 환경에서 물성저하와의 상호연관성” , 대한기계학회 부산지부 2007 년도 추계학술대회 논문집
- 4) 김윤해, 배성열, 문경만, 김동훈, 김국진, 한중원, “ 라미네이트 복합재료의 미세조직 및 파단면 거동과 수분 환경에서 물성저하와의 상호연관성” , 한국해양공학회 2007 년도 추계학술대회 논문집
- 6) 김윤해, 김국진, 한중원, 조영대, 배성열, 문경만, 2008. 4, “ 복합재료의 수분에 의한 열화 및 회복 메커니즘에 관한 연구, 복합재료학회지, Vol. 21, No. 2, pp. 8 ~ 14
- 7) 김윤해, 김국진, 한중원, 조영대, 배성열, 문경만, 김동훈, 2008. 4, “ 섬유강화복합재료의 전단강도에 미치는 흡습의 영향” , Vol. 21, No. 2, 복합재료학회지, pp. 1-7,
- 8) 김윤해, 배성열, 조영대, 2008. 6, “ 첨단소재와 공법을 응용한 무인잠수정의 최적설계에 관한 연구” , 대한기계학회 2008 년도 춘계학술대회 논문집, pp. 134 ~ 138

- 9) 김윤해, 배성열, 조영대, 2008. 6, “첨단소재와 공법을 응용한 무인잠수정의 최적설계에 관한 연구”, 대한기계학회 2008년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집
- 10) 김윤해, 배성열, 조영대, 2008. 11, “FRP에 의한 무인잠수정의 설계와 구조해석”, 대한기계학회 특별호

2. 국외 전문 학술지

- 1) Joong-Won Han, Kook-Jin Kim, Oct.24 ~ 26, 2007, “A Study of the Degradation of Advanced Composite Materials in Hot/ Wet Environments”, 8th International Symposium on Aerospace Technology Samcheonpo Seaworld Hotel, Korea
- 2) Yun-Hae Kim, Sung-Youl Bae, Kyung-Man Moon, Kook-Jin Kim, Joong-Won Han, November 1, 2007, “Degradation & Recovery Behaviors of FRP in the Moisture Environments”, 6th Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials, Korea
- 3) Sung-Youl Bae, Yun-Hae Kim, Kook-Jin Kim, Joong-Won Han and Kyung-Man Moon, , 2007. 10, “Environmental Degradation Behaviors of Glass/ Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites”, 5th International Conference on Physical & Numerical Simulation, China
- 4) Sung-Youl Bae, Yun-Hae Kim, Kook-Jin Kim, Joong-Won Han and Kyung-Man Moon, August 2008, “Environmental Degradation Behaviors of Glass/ Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites”, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Vol. 5, No. 8, pp. 1758-1762(5)
- 5) Y. H. Kim, J. W. Han, K. M. Moon, K. J. Kim, S. Y. Bae, Y. D. Jo, 2008. 7, “A Study on the Degradation Mechanisms of Honeycomb Structure by Moisture Absorption”, ISOPE 2008 Proceeding