선체구조용 FRP 복합재료의 강도 특성

최한규* · 남기우** · 안석환***

*선박안전기술공단

**부경대학교 재료공학과

***부경대학교 LINC사업단

Strength Characteristics of FRP Composite Materials for Ship Structure

Han-Kyu Choi*, Ki-Woo Nam** and Seok-Hwan Ahn***

*Korea Ship Safety Technology Authority, Busan, Korea

**Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***A⁺ LINC of PKNU, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Tensile strength 인장강도, Tensile modulus 인장탄성계수, Flexural strength 굴곡강도, Flexural modulus 굴곡탄성계수, Fiber content 섬유함유량, Barcol hardness 바콜경도, Fiber reinforced plastics (FRP) 섬유강화 플라스틱, Hand lay-up method 수적충공법, Vacuum infusion method 진공적층공법

ABSTRACT: In this study, various types of composite materials and adhesives that are actually used in the shipbuilding field for small ships, leisure boats, and fishing boats were applied in the hand lay-up method and vacuum infusion method to manufacture specimens. Then the tensile strength, tensile modulus, flexural strength, and flexural modulus values of these specimens were obtained. In addition, the barcol hardness and fiber content were obtained from the specimens. The results showed that the strengths of the specimens manufactured using the vacuum infusion method were higher than those manufactured using the hand lay-up method. Moreover, the barcol hardness and fiber content were also higher in those manufactured using the vacuum infusion method. The specimens manufactured using the vacuum infusion method were thinner despite their large fiber content.

1. 서 론

FRP(Fiber reinforced plastics) 소재는 최근 특히 레저산업, 자동차 산업, 환경사업 등에서 점차 그 수요가 증가하고 있는 실정이다. FRP는 부식에 대하여 강한 저항성을 가지기 때문에 내식성이 우수하고, 가볍고, 설계 및 가공에 있어서 어떠한 형태로든 자유롭게 적용 가능하고, 또한 접착성이 좋아 타 소재와의 혼용성이 뛰어나 미국, 일본, 유럽 등에서는 선체 제작공정에 널리 사용하고 있다. 특히 복합재료가 갖는 주요 특성이 경량화에 의한 우수한 비강도와 비탄성률을 들 수 있다. 근래에 들어와서 세계적으로 레저산업이 활발하고 있다. 특히 바다에서 즐기는 레저산업의 호황과 더불어 레저용 요트 등의 수요가 증가하고 있는 추세이다. 이들 요트 및 모터보트 등 레저선박의 건조시에 경량화, 고강도화, 원자재 절감 등의 견지에서 복합재료의 사용빈도를 점차 증가시키고 있고 소형어선의 경우에도 복합소재를 이용한

선박 건조가 증가하고 있다(Ahn et al., 2010). 전보에서도 밝혔듯이 이전의 연구들에서는 소재 관련 특성 평가 등에 대한 연구는 많이 미흡한 실정(Kang et al., 2009; Moon and Koo, 1997; Park et al., 2004; Ahn et al., 2010; Jeong et al., 2004; Jeong et al., 2009)이며, 선체용으로 사용되는 복합소재에 대해 ISO 등에서 FRP 레저선박 관련 규정이 제정 및 보완되고 있다(ISO, 2000~2008; Ahn et al., 2010). FRP선의 구조기준에서는 '유리로빙', '유리축스트랜드매트'에 대한 규정과 경질플라스틱 발포체, 발사재, 목재 등의 심재의 양면에 FRP층을 밀착시킨 구조인 'FRP 샌드위치 구조'에 대한 기준만 규정되어 있다. 그러나 신소재에 대한 기준 설정이 미약하다(Ministry of land, infrastructure and transport, 2008).

전보(Ahn et al., 2010)에도 언급하였듯이 최근까지 FRP 레저선박이나 어선 등의 선체에는 FRP 수적층(Hand lay-up)공법이 주로 행하여지고 있지만 경량화, 친환경성, 외관의 미려함과 고

Received 17 August 2010, revised 29 December 2011, accepted 12 August 2013

Corresponding author Seok-Hwan Ahn: +82-51-629-7565, shahn@pknu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KST 2008.

른 성형성 등의 장점을 가진 진공적층(Vacuum infusion)공법이 점차 활성화되어지고 있다(Jeong et al., 2009). 그러나 수직층법과 진공적층법으로 만들어진 제품에 대한 특성 평가가 잘 이루어지지 않고 있어 직접적으로 이들 FRP를 이용하여 선박 등을 제조하는 회사에서는 소재 물성 등에 관련하여 선박설계 시에 여러 가지 어려움을 겪고 있다. 특히 FRP판의 양호한 적층작업을 통한 설계를 위해서는 FRP 소재의 물성치에 대한 데이터가 많이 필요하다(Song and Yum, 2010). 2007년 국내 K사에서는 진공적층방식의 쌍동선을 개발하였고, 2008년 화성 세계 요트대회 및 부산 세계 여자 요트대회 등에서 국내 A사 및 W사에서 제작한 경기용 요트가 직접 사용되기도 하였다. 이들 요트제작에는 진공적층방식의 공법이 적용되었고 초기 도입경비가 많이 들어가는 단점이 있으나 공정기간의 단축 및 재료비, 인건비 등이 절감되고 고른 두께를 얻을 수 있는 친환경적인 공법으로서 최근 그 사용이 점점 증가하고 있는 추세이다.

이에 본 연구에서는 FRP 소재의 강도 특성을 규명하고자 선박 제작현장에서 직접 사용하고 있는 유리섬유, 카본섬유, 아라미드섬유 및 카본 아라미드 섬유를 이용하여 수직층공법과 진공적층공법에 의해 시험편을 다수 제작하고 이들의 기계적 특성을 비교·검토하였다. 또한 동 제작된 시험편을 이용하여 바꿀경도와 섬유 함유량을 측정하고, 계산식 및 실제 적층에 의한 시험편의 두께를 비교한 결과를 보고한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 FRP 적층공법

섬유강화 플라스틱을 성형하는 방법에는 여러 가지가 있는데 본 연구에서는 전보에서와 같이 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 Hand lay-up method(수직층법, Fig. 1)와 최근 수요가 증가하고 있는 Vacuum infusion method(진공적층법, Fig. 2)을 적용하였다(Ahn et al., 2010).

2.2 재료 및 시험편

FRP 선체에 적용될 복합소재의 기계적 특성을 조사하기 위한 시험편을 제작하기 위하여 수직층과 진공적층 성형법을 사용하였다. 시험편 제작을 위하여 사용된 각종 복합재료는 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 제품들을 수요자 조사를 통하여 파악

Fig. 1 Hand lay-up method(Ahn et al., 2010)

Fig. 2 Vacuum infusion method(Ahn et al., 2010)

하고 본 연구의 시험편 제작용 소재로서 이용하였다. 수지류는 세원화성의 수직층용: R115, 진공적층용: 4525AP, 크레이벨리코리아의 수직층용: G-713BT, 진공적층용: RIVA2000, 국도화학의 주재: XBR-1850, 경화제: XBH-1450, 애경화학의 수직층용 FH-123의 제품을 사용하였다. 그리고 복합재료용 다축 유리섬유와 카본은 동일산자의 다축유리섬유의 수직층용 및 진공적층용으로 DB600,과 LT600, 다축카본섬유의 수직층용 및 진공적층용으로 DBT800-C06, 다축아라미드섬유의 수직층용 및 진공적층용으로 DB600-A06, 다축아라미드 카본 혼합섬유로 DB400-AC06를 각각 사용하였다. 매트섬유류는 한국화이버의 수직층용 유리섬유(MAT450)를, 로빙은 한국화이버 수직층용 유리섬유(ROVING 800)를 각각 이용하였다.

강화 플라스틱(FRP)선의 구조기준(Ministry of land, infrastructure and transport, 2008) 제9조 및 제10조에서 요구하는 건조 전 재료시험 항목인 인장강도 및 인장탄성계수, 굴곡강도 및 굴곡탄성계수를 각각 구하기 위하여 시험편을 제작하였다. 인장 시험편에 있어서는 다축유리섬유의 수직층(LT, DB, LT+DB) 및 진공적층(LT+DB) 및 유리섬유 수직층(M+R) 시험편은 KS M 3381의 A형으로 시험편을 가공 제작하였고, Fig. 3은 시험편 형상 및 치수를 나타낸다. 카본섬유의 수직층(DBT, LT) 및 진공적층(DBT, LT) 시험편, 아라미드 수직층(DB) 및 진공적층(DB) 시험편, 아라미드+카본섬유의 수직층(DB) 및 진공적층(DB) 시험편은 ASTM D 3039에서 규정하는 치수로 제작하였고 개략도를 Fig. 4에 나타낸다. Table 1은 이들 시험편의 기하학적 요건을 나타낸다. 또한 굴곡시험편에 있어서는 기준에 따라 직사각형 형상으로 만들었다. 다축유리섬유의 수직층(LT, DB, LT+DB) 및 진공적층(LT+DB) 시험편은 KS M 3382의 3점 휨(A법)에 따라 1mm<두께(h)≤5mm, 폭(나비)을 15±0.5(mm), 시험편 최소길이 16h+20(mm)이 되도록 제작하였다. 카본섬유의 수직층(DBT, LT) 및 진공적층(DBT, LT) 시험편, 아라미드 수직층(DB) 및 진공적층(DB) 시험편, 아라미드+카본섬유의 수직층(DB) 및 진공적층(DB) 시험편, 유리섬유 수직층(M+R)은 ASTM D 7264 및 ASTM D 790에서 요구하는 치수에 의해 각각 제작하였다. 각 시험편들은 수직층 및 진공적층 방식의 2종류로 제작하였다. LT는 [0°/90°], DB는 [±45°], LT+DB는 [0°/±45°/90°], DBT는 [45°/90°/-45°]의 적층 방향을 나타낸다.

진공적층 시험편 제작에 있어서는 섬유를 배치하고 난 후 마

Fig. 3 Dimensions and shape of GFRP specimen for tensile test (by KS M 3381)

Fig. 4 Dimensions and shape of CFRP, AFRP and ACFRP specimen for tensile test (by ASTM D 3039)

Table 1 CFRP, AFRP and ACFRP Tensile specimen(Fig. 4) geometry requirements (by ASTM D 3039)

Parameter	Requirement
Specimen requirements:	
Shape	Constant rectangular cross-section
Minimum length	gripping+2 times width+gage length
Specimen width	as needed
Specimen width tolerance	±1% of width
Specimen thickness	as needed
Specimen thickness tolerance	±4% of thickness
Specimen flatness	flat with light finger pressure

감작업을 위하여 Peel ply를 마지막 섬유 위에 놓고 수지의 흐름을 좋게 하기 위하여 Flow mat를 배치하였다. 수지를 강화재에 함침시키기 위한 밀봉역할을 위해 진공비닐에 주름을 주어 찢어지지 않도록 주의를 기울였으며, 진공측정기를 이용하여 진공압을 측정하였다. 수직층 시험편의 경우 불포화 에스테르 수지 및 에폭시 수지를 이용하여 풀러로 수지가 섬유에 함침되도록 수직하였다. 제작된 시험편은 커팅 후 그라인딩하고 최종 에머리 페이퍼로 마무리하였다.

2.3 실험방법

강화 플라스틱의 건조 전 재료시험으로서 인장시험은 KS M 3381(2004) 및 ASTM D 3039(2007)에 의해 실시하였다. 용량 100 ton의 UH-F100A(Shimadzu사)와 용량 5ton의 AG-5000G(Shimadzu사)를 각각 이용하였고, 실온대기 중에서 크로스헤드 변위속도 1.5mm/min으로 실시하였다. 굴곡시험은 KS M 3382(2004) 및 ASTM D 7264(2007), ASTM D 790(2007)에 의해 실시하였다. 용량 20ton의 UTM-900MH(Daekyung사)를 사용하여 크로스헤드 변위속도를 $V = \frac{h}{2t} \pm 0.2$, $t = 1\text{min}$ (h : thickness)로 하여 실시하였다. 시험으로부터 인장강도, 인장탄성계수, 3점 굴곡강도 및 3점 굴곡탄성계수를 각각 구하였다. 이때 부하지그의 지점간 거

리는 (15~17)×두께(h)로 설계하였다. 이때 3점 굴곡강도와 굴곡탄성계수는 KS M 3382(2004)에서 규정하는 다음 식에 의해 산출하였다.

· 3점 굴곡강도

$$\sigma_b = \frac{3P_b L}{2bh^2} \quad (1)$$

여기서, σ_b : 굴곡강도(MPa), P_b : 최대하중(N), L : 지점간의 거리(mm), b : 시험편 폭(mm), h : 시험편 두께(mm) 이다.

· 3점 굴곡탄성계수

$$E_b = \frac{1}{4} \frac{L^3}{bh^3} \frac{P}{\delta} \quad (2)$$

여기서, E_b : 굴곡탄성률(GPa), P/δ 하중-처짐 곡선의 직선부 경사(N/mm), L : 지점간의 거리(mm), b : 시험편 폭(mm), h : 시험편 두께(mm) 이다.

각 시험편은 종류별로 최소 5개씩 또는 그 이상을 제작하여 실험하였다. Fig. 5에는 인장시험의 한 예를 나타낸다. 또한 KS M 3387(2004)의 유리섬유 강화플라스틱의 바콜경도(Barcol hardness) 시험의 규격에 따라 바콜경도를 측정하였다. 바콜경도 시험기의 압자가 적층판 면에 수직이 되도록 눌러서 최대 지지값을 조사하였다. 이때 가해진 강압하중은 50~80N을 사용하였고 동일 시료에서 최초 측정점으로부터 3mm이상씩 떨어지도록 하여 10회 측정을 시도하고 그 평균값을 구하였다. 바콜경도기는 GYZJ 934-1을 사용하였다. 수직층법과 진공적층법에 의해 제작된 시험편의 섬유체적함유량(Fiber content)을 측정하고자 KS M ISO 1172를 적용하였다. 이때 유리섬유와 카본섬유의 경우 전기로 온도는 364~378°C로 하여 10시간 연소를 하였고, 아라미드 및 아라미드와 카본 혼합 섬유의 경우 전기로 온도는 270~277°C로 24시간 연소하여 섬유함유량을 구하였다.

Fig. 5 Tensile test

Fig. 6 Comparison to tensile strength (GF: glass fiber reinforced plastic, CF: carbon fiber reinforced plastic, AF: aramid fiber reinforced plastic, ACF: aramid+carbon fiber reinforced plastic, H: hand lay-up, V: vaccum infusion)

Fig. 7 Comparison to tensile modulus (GF: glass fiber reinforced plastic, CF: carbon fiber reinforced plastic, AF: aramid fiber reinforced plastic, ACF: aramid+carbon fiber reinforced plastic, H: hand lay-up, V: vaccum infusion)

3. 기계적 물성 평가

3.1 인장강도 및 인장탄성계수

여러 가지로 제작된 복합재료 시험편의 인장강도 및 인장탄성계수를 측정하였다. Fig. 6에는 각 시험편의 인장강도를, Fig. 7에는 인장탄성계수를 각각 나타내었다. 그림 속의 막대 그래프 최대치는 최소 5개 이상의 시험편에서 구한 평균값을 나타낸다.

다축유리섬유 수직층 LTDB시험편(SW-GF-H-LTDB)은 LT600 및 DB600을 3 ply, 총 6 layer로 크레이בל리의 수지를 이용한 것으로서 두께는 4mm이며, 평균 인장강도는 약 251.6MPa 정도, 평균 인장탄성계수는 16.1GPa 정도를 나타낸다. 다축유리섬유 진공적층 LTDB시험편(SW-GF-V-LTDB)은 LT600 및 DB600을 3 ply, 총 6 layer로 크레이בל리의 수지를 이용한 것으로서 두께는 3mm이며, 평균 인장강도는 약 327.8MPa 정도를, 평균 인장탄성계수

는 18.3GPa 정도를 나타낸다. 다축유리섬유 수직층 LTDB시험편(CV-GF-H-LTDB)은 LT600 및 DB600을 3 ply, 총 6 layer로 크레이בל리의 수지를 이용한 것으로서 두께는 4mm이며, 평균 인장강도는 약 263.2MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 20.7GPa 정도를 나타낸다. 다축유리섬유 진공적층 LTDB시험편(CV-GF-V-LTDB)은 LT600 및 DB600을 3 ply, 총 6 layer로 크레이בל리의 수지를 이용한 것으로서 두께는 3mm이며, 평균 인장강도는 약 329.8MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 20.4GPa 정도를 나타낸다. 다축유리섬유 수직층 DB시험편(CV-GF-H-DB)은 DB600을 총 6 layer로 크레이בל리의 수지를 이용하였고 두께는 5mm이며, 평균 인장강도는 300.6MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 13.7GPa 정도를 나타낸다. 다축유리섬유 수직층 LT시험편(CV-GF-H-LT)은 LT600을 총 6 layer로 크레이בל리의 수지를 이용하였고 두께는 6mm이며, 평균 인장강도는 122.3MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 8.9GPa 정도를 나타낸다. 유리섬유 수직층 MR 시험편(AK-GF-H-MR)은 M450 매트 3 ply, R800 로빙 2 ply, 총 5 layer로 에경화학 수지를 이용하였고 두께는 5.5mm이며, 평균 인장강도는 약 161MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 14.5GPa 정도를 나타낸다. 카본섬유 수직층 DBT시험편(KD-CF-H-DBT)은 카본섬유 DBT800을 5 ply로 국도화학 에폭시 수지를 이용하였고 두께는 6.3mm이며, 평균 인장강도는 약 147.7MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 16.4GPa 정도를 나타낸다. 카본섬유 진공적층 DBT시험편(KD-CF-V-DBT)은 카본섬유 DBT800을 5 ply로 국도화학 에폭시 수지를 이용하였고 두께는 5.3mm이며, 평균 인장강도는 약 197.6MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 28.8GPa 정도를 나타낸다. 이때 각각의 카본섬유 시험편의 인장강도는 시험 중 파단이 발생하기 시작한 지점의 값으로 하였다. 아라미드 수직층 DB시험편(KD-AF-H-DB)은 아라미드섬유 DB600을 5 ply로 국도화학 에폭시수지를 이용하였고 두께는 6mm이며, 평균 인장강도는 약 72.8MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 17.3GPa 정도를 나타낸다. 아라미드 진공적층 DB시험편(KD-AF-H-DB)은 아라미드섬유 DB600을 5 ply로 국도화학 에폭시수지를 이용하였고 두께는 4mm이며, 평균 인장강도는 약 90.9MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 27.5GPa 정도를 나타낸다. 이때 각각의 아라미드 시험편은 섬유수직방향으로 채취한 것이다. 카본 아라미드 혼합 수직층 DB시험편(KD-ACF-H-DB)은 카본과 아라미드 혼합섬유 DB400을 6 ply로 국도화학 에폭시수지를 이용하였고 두께는 4.5mm이며, 평균 인장강도는 약 95.5MPa 정도를, 평균 인장탄성계수는 6GPa 정도를 나타낸다. 카본 아라미드 혼합 진공적층 DB시험편(KD-ACF-V-DB)은 카본과 아라미드 혼합섬유 DB400을 6 ply로 국도화학 에폭시수지를 이용하였고 두께는 4.5mm이며, 평균 인장강도는 약 87.5MPa 정도를 나타낸다. 이때 각각의 카본 및 아라미드 혼합시험편은 섬유수직방향으로 채취한 것이다.

이와 같이 수직층 공법 및 진공적층 공법으로 제작된 여러 종류의 시험편을 인장시험한 결과 유리섬유로 만들어진 시험편의 경우에는 수직층보다 진공적층된 시험편이 더 큰 강도를 나타내었다. 카본과 아라미드 시험편의 경우에는 수직층보다 진공적층된 시험편이 더 큰 강도를 나타내었다. 이는 수직층보다는 진공적층인 경우에 섬유의 함유량이 더 높기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 진공적층 공법으로 제작된 시험편의 강도가 수직층

Fig. 8 Failure shapes after tensile test

시험편보다 더 높게 나타났기 때문에 진공적층 공법으로 선박을 제작하는 쪽이 강도가 높으므로 우선적으로는 진공적층 공법이 추장된다. 또한 시험편의 두께에 있어서 수적층의 경우보다 진공적층의 경우가 더 얇음에도 불구하고 강도가 더 크게 나타났기 때문에 진공적층 공법으로 선박을 제조할 경우 동일한 두께로 만들어진다면 강도가 더 큰 선박 제작이 가능할 것이며, 동일 강도로 제작된다면 진공적층 공법으로 만들 때 경량화할 수 있기 때문에 연비 절감에 효과적이라고 할 수 있다. 다축유리섬유의 경우 DB시험편이 LT시험편보다 두께가 더 얇음에도 불구하고 강도는 더 크게 나타났다. 이는 적층방향에 따라 강도에 차이가 나타난다는 것을 증명한다.

카본과 아라미드를 혼합한 경우에 있어서는 수적층 및 진공적층된 시험편 모두 카본 단독 시험편 보다는 강도가 다소 낮게 나타났지만 아라미드 단독 시험편 보다는 다소 크거나(수적층) 다소 낮은(진공적층) 정도를 나타내었다. 카본 및 아라미드 시험편의 경우에는 섬유수직 방향으로 시험편을 채워했기 때문에 강도가 다소 낮게 나타난 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 혼합비율, 적층방법, 섬유배열 및 방향 등을 파라미터로 하여 좀 더 상세한 검토가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 7은 각 시험편의 인장탄성계수를 나타낸다. 전술한 인장강도와 마찬가지로 진공적층한 경우에 인장탄성계수가 더 높게 나타났다. 특히 탄소섬유와 아라미드섬유를 이용한 경우에 인장탄성계수가 더 크게 나타났다. 그러나 탄소와 아라미드를 혼합한 시험편의 경우에는 오히려 인장탄성계수가 떨어지고 있는데

이는 카본 혹은 아라미드 시험편과 비슷한 두께를 가졌을 경우 각각이 차지하는 비율이 작아서 각각이 가지는 섬유함유율이 떨어지게 되어 파단이 빨리 발생했기 때문으로 사료된다.

Fig. 8에는 인장시험으로부터 얻어진 시험편의 파단된 사진을 나타낸다.

3.2 굴곡강도 및 굴곡탄성계수

굴곡강도와 굴곡탄성계수를 측정하기 위하여 KS M 3382, ASTM D 7264 및 ASTM D 790에 의해 시험편을 제작하고 평가하였다. Fig. 9는 굴곡강도를, Fig. 10은 굴곡탄성계수를 각각 나타낸다.

다축유리섬유 수적층 LTDB시험편(SW-GF-H-LTDB)의 평균 굴곡강도는 약 427.9MPa, 평균 굴곡탄성계수는 12.5GPa이다. 다축유리섬유 진공적층 LTDB시험편(SW-GF-V-LTDB)의 평균 굴곡강도는 약 554.4MPa, 평균 굴곡탄성계수는 17.3GPa이다. 다축유리섬유 수적층 LTDB시험편(CV-GF-H-LTDB)의 평균 굴곡강도는 약 415.4MPa, 평균 굴곡탄성계수는 12.3GPa 정도를 나타낸다. 다축유리섬유 진공적층 LTDB시험편(CV-GF-V-LTDB)의 평균 굴곡강도는 약 555.5MPa, 평균 굴곡탄성계수는 17.9GPa 정도를 나타낸다. 다축유리섬유 수적층 DB시험편(CV-GF-H-DB)의 평균 굴곡강도는 527.7MPa, 평균 굴곡탄성계수는 13.9GPa 정도를 나타낸다. 다축유리섬유 수적층 LT시험편(CV-GF-H-LT)의 평균 굴곡강도는 209.2MPa, 평균 굴곡탄성계수는 7.2GPa 정도를 나타낸다. 유리섬유 수적층 MR시험편(AK-GF-H-MR)의 평균 굴곡강도

는 약 235.2MPa, 평균 굴곡탄성계수는 7GPa 정도를 나타낸다. 카본섬유 수직층 DBT시험편(KD-CF-H-DBT)의 평균 굴곡강도 본섬유 진공적층 DBT시험편(KD-CF-V-DBT)의 평균 굴곡강도

는 약 209.6MPa, 평균 굴곡탄성계수는 14.1GPa 정도를 나타낸다. 이때 각각의 카본섬유 시험편의 굴곡강도는 시험 중 파단이 발생하기 시작한 지점의 값으로 하였다. 아라미드 수직층 DB시

Fig. 9 Comparison to flexural strength (GF: glass fiber reinforced plastic, CF: carbon fiber reinforced plastic, AF: aramid fiber reinforced plastic, ACF: aramid+carbon fiber reinforced plastic, H: hand lay-up, V: vaccum infusion)

Fig. 10 Comparison to flexural modulus (GF: glass fiber reinforced plastic, CF: carbon fiber reinforced plastic, AF: aramid fiber reinforced plastic, ACF: aramid+carbon fiber reinforced plastic, H: hand lay-up, V: vaccum infusion)

Fig. 11 Failure shapes after flexural test

험편(KD-AF-H-DB)의 평균 굴곡강도는 약 10.1MPa, 평균 굴곡탄성계수는 0.6GPa 정도를 나타낸다. 아라미드 진공적층 DB시험편(KD-AF-H-DB)의 평균 굴곡강도는 약 162MPa, 평균 굴곡탄성계수는 4.9GPa 정도를 나타낸다. 이때 각각의 아라미드 시험편은 섬유수직방향으로 채취한 것이다. 카본 아라미드 혼합 수적층 DB시험편(KD-ACF-H-DB)의 평균 굴곡강도는 약 123.9 MPa, 평균 굴곡탄성계수는 4.4GPa 정도를 나타낸다. 카본 아라미드 혼합 진공적층 DB시험편(KD-ACF-V-DB)의 평균 굴곡강도는 약 152.2MPa, 평균 굴곡탄성계수는 6.8GPa 정도를 나타낸다. 이때 각각의 카본 및 아라미드 혼합시험편은 섬유수직방향으로 채취한 결과이다.

각 시험편의 굴곡강도와 굴곡탄성계수를 조사한 결과 진공적층이 수적층 보다도 더 높은 값을 나타내었다. 특히 굴곡강도에 있어서는 진공적층의 [LT+DB]와 [DB]로 적층한 경우에 높은 값을 나타내었다. 이는 동일한 두께로 적층할 경우 이들 방향으로의 적층이 강도에 유리하다는 것을 나타낸다. 카본과 아라미드의 경우에는 굽힘강도가 다소 낮게 나타났으며 카본과 아라미드의 경우에는 적층방향을 달리하여 제작할 필요가 있음을 시사한다. 아라미드섬유의 경우에는 역시 굴곡강도 및 굴곡탄성계수가 낮게 나타났지만 연성이 풍부하여 카본과 혼합할 경우 강도가 다소 상승하고 있고, 연성은 어느 정도 유지를 함으로써 선박에 가해지는 충격력을 완화시켜 수명연장에 도움이 될 것으로 사료된다.

Fig. 11에는 굴곡시험으로부터 얻어진 시험편의 파단된 사진을 나타낸다.

4. 바콜경도 및 섬유 체적 함유량 특성 평가

4.1 바콜경도

제작된 선체구조용 FRP 복합재료에 대한 바콜경도(Barcol hardness)를 측정하였다. 측정에 있어서는 KS M 3387(2004)의 유리섬유 강화 플라스틱의 바콜 경도시험 방법의 규격에 따랐다. 바콜경도 측정을 위하여 70mm×70mm×1.5mm의 시험편을 제작하였다. 시험편의 평활한 평면부위에 바콜경도시험기(GYZJ934-1, Fig. 12)의 압자가 적층판 면에 수직이 되도록 눌러 그 최대값을

얻었다. 이때 가해진 강압하중은 80N으로 하였고, 동일 시험편 내에서 측점에 의해서 생긴 오목한 부분을 3mm이상 피하여 10개소 정도를 측정하였다. Table 2에는 각 시험편별 10회 측정된 바콜경도 값을 나타내었다.

Fig. 13에는 유리섬유의 진공적층과 수적층 시험편의 바콜경도를 측정된 결과를 비교하여 나타내었다. 유리섬유 진공적층인 경우 바콜경도가 64.2(HBI-A50)로 수적층일 경우의 58.0(HBI-A50)보다도 높게 나타났다. 따라서 유리섬유를 함유하여 선체구조용

Fig. 12 Barcol hardness test machine (GYZJ934-1)

Fig. 13 Comparison to barcol hardness of specimens manufactured by the hand lay-up method and vacuum infusion method (GF: glass fiber reinforced plastic, H: hand lay-up, V: vacuum infusion)

Table 2 Barcol hardness of FRP for ship structure (Unit: HBI-A50)

Measurement times Specimen No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
G1	68	66	65	59	67	64	64	69	52	57	63.1
G3	60	63	70	56	62	62	52	69	74	57	62.5
G5	66	68	60	48	39	65	68	55	57	44	57.0
G11	67	62	66	66	65	72	71	61	54	75	65.9
G7	58	58	58	50	58	60	56	56	59	56	56.9
G9	56	60	56	63	55	65	58	55	54	59	58.1
G25	51	57	56	50	52	54	57	58	58	55	54.8

Note: G1, Multi-axial glass fiber hand lay-up(LT+DB, Sewon) / G3, Multi-axial glass fiber vacuum infusion(LT+DB, Sewon) / G5, Multi-axial glass fiber hand lay-up(LT+DB, Cray Valley) / G11, Multi-axial glass fiber vacuum infusion(LT+DB, Cray Valley) / G7, Multi-axial glass fiber hand lay-up(DB, Cray Valley) / G9, Multi-axial glass fiber hand lay-up(LT, Cray Valley) / G25, glass fiber hand lay-up(M+R, Aekyung)

FRP소재를 만들 경우에는 진공적층할 경우에 더 단단하여 내마모성이 높을 것으로 예상된다.

4.2 섬유 체적 함유량

KS M ISO 1172(2002)의 유리 섬유 강화 플라스틱-프리프레그, 성형 콤파운드 및 적층판-유리 섬유 및 무기 충전재 함량의 측정-연소법의 규격에 따라 본 연구에 이용된 FRP 재료에 대한 섬유 체적 함유량을 측정하였다. 연소에 사용된 전기로 온도는 유리섬유와 카본인 경우에는 364~378°C에서 연소시간은 10시간, 아라미드와 카본 아라미드 혼합 섬유인 경우에는 270~277°C로 24시간 연소시켜 섬유 함유량을 측정하였다. 섬유 함유량은 아래 식 (3)에 의해 구하였다.

$$M = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (3)$$

여기서, M: 섬유함유량, m_1 : 건조된 용기만의 초기 질량(g), m_2 :

Table 3 Glass fiber contents of GFRP for ship structure

Specimen No.	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	M (%)
G1-1	3.051	7.636	5.476	52.9
G1-2	2.736	7.522	5.299	53.6
G1-3	24.234	26.922	25.679	53.8
G1-4	23.539	26.477	25.151	54.9
G3-1	24.640	26.346	25.770	66.2
G3-2	23.335	24.979	24.407	65.2
G3-3	1.777	5.659	4.261	64.0
G3-4	1.803	5.736	4.297	63.4
G5-1	5.301	9.735	7.817	56.7
G5-2	2.180	6.525	4.639	56.6
G5-3	24.234	26.922	25.679	53.8
G5-4	23.539	26.477	25.151	54.9
G7-1	1.904	6.623	4.581	56.7
G7-2	1.992	6.870	4.764	56.8
G9-1	1.768	6.584	4.149	49.4
G9-2	1.670	6.491	4.042	49.2
G11-1	1.965	5.985	4.565	64.7
G11-2	2.009	5.912	4.539	64.8
G11-3	24.467	26.084	25.523	65.3
G11-4	24.649	26.357	25.752	64.5
G25-1	3.480	5.257	4.192	40.1
G25-2	2.180	3.836	2.887	42.7
G25-3	24.017	26.601	24.960	36.5
G25-4	23.334	25.783	24.232	36.7

Note: G1, Multi-axial glass fiber hand lay-up(LT+DB, Sewon) / G3, Multi-axial glass fiber vacuum infusion(LT+DB, Sewon) / G5, Multi-axial glass fiber hand lay-up(LT+DB, Cray Valley) / G7, Multi-axial glass fiber hand lay-up(DB, Cray Valley) / G9, Multi-axial glass fiber hand lay-up(LT, Cray Valley) / G11, Multi-axial glass fiber vacuum infusion(LT+DB, Cray Valley) / G25, glass fiber hand lay-up(M+R, Aekyung)

건조된 시험편이 담긴 용기의 질량(g), m_3 : 연소 후 잔존물과 용기의 질량(g)이다.

식 (3)으로부터 구한 섬유 함유량을 각각 Table 3에는 유리 섬유 함유량을, Table 4에는 카본 및 아라미드 섬유 함유량을 나타내었다.

Fig. 14에는 진공적층과 수적층 시험편을 연소시켜 구한 섬유 함유량의 측정된 결과를 비교하여 나타내었다. 다축 유리섬유의 수적층 한 경우 섬유 함유량은 53%, 진공적층 한 경우의 섬유함유량은 65%로 나타났다. 카본 수적층의 섬유 함유량은 54.70%, 진공적층의 섬유 함유량은 63%를 나타내었다. 아라미드 수적층의 섬유 함유량은 53.7%, 진공적층의 경우에는 섬유 함유량이 62.2%

Table 4 Carbon fiber, aramid fiber and carbon+aramid fiber contents of each FRP for ship structure

Specimen No.	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	M (%)
C14-1	3.304	9.708	6.804	54.7
C14-2	3.506	9.474	6.770	54.7
C16-1	2.505	8.157	6.080	63.3
C16-2	1.935	7.639	5.524	62.9
A18-1	3.513	8.617	4.637	52.9
A18-2	3.198	7.957	4.223	54.5
A20-1	3.060	6.996	4.653	69.2
A20-2	2.807	6.726	4.856	69.2
AC22-1	1.247	5.260	2.876	69.1
AC22-2	3.057	6.843	4.663	69.6
AC24-1	3.883	6.607	5.178	77.4
AC24-2	3.355	6.201	4.724	76.9

Note: C14, carbon(DB, hand lay-up) / C16, carbon(DB, vacuum infusion) / A18, aramid(DB, hand lay-up) / A20, aramid (DB, vacuum infusion) / AC22, carbon+aramid(DB, hand lay-up) / AC24, carbon+aramid(DB, vacuum infusion)

Fig. 14 Comparison to fiber content of specimens manufactured by the hand lay-up method and vacuum infusion method (GF: glass fiber reinforced plastic, CF: carbon fiber reinforced plastic, AF: aramid fiber reinforced plastic, ACF: aramid+carbon fiber reinforced plastic)

Fig. 15 Comparison of specimen thickness by calculation and manufactured lamination (GF: glass fiber reinforced plastic, H: hand lay-up, V: vacuum infusion)

였다. 또한 카본 아라미드 혼합 섬유는 수적층은 69.4%, 진공적층은 77.2%의 섬유 함유량을 각각 나타내었다. 전반적으로 진공적층하여 만든 시험편의 섬유 함유량이 수적층하여 만든 시험편의 섬유 함유량보다도 7.8~12.0% 더 높게 나타났다. 이는 진공적층한 경우에 섬유의 함유량이 더 많아져 결과적으로 수적층한 경우보다도 강도면에서 더 높게 나타나는 결과와도 대체적으로 잘 일치하였다.

4.3 두께 비교

ISO 12215-5 부속서 C(2005)에 따라 유리섬유 함유량과 섬유 체적당의 무게를 이용하여 두께를 계산하고, 실제 진공적층법과 수적층법을 이용하여 제작한 시험편과의 두께를 비교하여 Fig. 15에 나타내었다. 두께 계산은 아래 식 (4)에 의해 구하였다. 계산식과 실제 수적층공법 및 진공적층공법을 이용하여 제작한 시험편과의 두께를 비교한 결과 진공적층의 경우가 수적층에 비하여 유리섬유의 함유량이 많았음에도 불구하고 상대적으로 두께가 얇은데, 이는 수적층보다 진공적층 한 경우에 수지의 소비가 적었다는 것을 나타낸다. 진공적층 한 경우에는 섬유함량이 많은데 비하여 두께가 얇고 위에서도 언급하였듯이 강도가 오히려 크게 나타남으로서 선체의 부피를 감소할 수 있는 장점이 되어 외부로부터 받게 될 저항을 감소시킬 수 있어 구조적으로 안정된다. 또한 두께가 감소됨으로서 경량화가 가능하기 때문에 대량생산에 따른 경제적 잇점도 가능하게 될 것으로 판단된다.

$$t = \frac{w}{3072} \left(\frac{2.56}{\psi} - 1.36 \right) \quad (4)$$

여기서, t : 두께(mm), w : 단위면적당 섬유질량(kgf/m²), ψ : 적층판의 섬유질량(마른 섬유질량/섬유질량+수지질량) 이다.

5. 결 론

본 연구에서는 소형선박용 혹은 어선용으로 실제 현장에서 취급하고 있는 복합소재 및 접착제를 사용하여 실제 가장 많이

적용하고 있는 수적층법(Hand lay-up method)과 진공적층법(Vacuum infusion method)을 이용하여 시험편을 제작하고 그 강도 특성을 조사하였으며 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 수적층공법에 의해 제작된 시험편 보다도 진공적층법에 의해 제작된 시험편의 인장강도, 인장탄성계수, 굴곡강도, 굴곡탄성계수가 더 높았다
- 2) 유리섬유 진공적층인 경우의 바콜경도는 64.2(HBI-A50), 수적층인 경우의 바콜경도는 58.0(HBI-A50)이었다. 따라서 유리섬유를 함유하여 선체구조용 FRP소재를 만들 경우에는 진공적층할 경우에 내마모성이 높을 것으로 예상된다.
- 3) 전반적으로 진공적층으로 제작된 시험편의 섬유 체적 함유량이 수적층으로 제작된 시험편의 섬유 함유량보다도 7.8~12.0% 정도 더 높게 나타났다. 이는 진공적층한 경우가 섬유의 함유량이 더 많아져 수적층한 경우보다도 강도 면에서 더 높게 나타났다.
- 4) 계산식과 시험편에서 구한 두께 모두 진공적층의 경우에 있어서 섬유함유량이 많음에도 불구하고 얇게 나타났다.

이상의 결과로부터 진공적층 공법을 적용한 경우 수적층공법에 비해 섬유함량이 많은데 비하여 두께가 얇지만 강도가 오히려 크게 나타났다. 이는 선체의 부피를 작게 할 수 있기 때문에 외부로부터 받게 될 저항을 감소시킬 수 있는 구조적인 장점이 되며, 또한 두께가 감소됨으로서 경량화가 가능하기 때문에 대량생산에 따른 경제적 잇점과 더불어 선박 운용에 있어서 연비 절감 등도 가능하게 될 것으로 판단된다.

References

- Ahn, S.H., Choi, H.K., Nam, K.W., 2010. Strength Evaluation for Adhesive Bonds of Adhesive with FRP Ship Body Structure, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24 (1), 146-152.
- ASTM D 3039, 2007. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- ASTM D 7264, 2007. Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- ASTM D 790, 2007. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- ISO 12215, 2000-2008.
- ISO 12215-5, 2005. Small Craft - Hull Construction and Scantlings - Part 2: Core materials for Sandwich Construction, Embedded materials.
- Jeong, J.W., Lee, B.S., Kang, B.Y., Han, G.S., Suh, S.B., 2009. Study of Laminating Strategy for FRP Hull Using Resin Infusion Simulation, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(2), 98-103.
- Jeong, U.C., Park, W.J., Jeong, S.H., 2004. Hull Form Development of a Small-Size High-Speed Coastal Leisure Boat,

- Journal of Ocean Engineering and Technology, 18(1), 80-84.
- Kang, B.Y., Son, C.S., Moon, C.K., Nam, K.W., Kim, Y.H., 2009. Development of Structural CFRP according to BMS Certification Standard, Journal of Ocean Engineering and Technology, 23(2), 92-97.
- KS M 3381, 2004. Testing Method for Tensile Properties of Glass Fiber Reinforced Plastics.
- KS M 3382, 2004. Testing Methods for Flexural Properties of Glass Fiber Reinforced Plastics.
- KS M 3387, 2004. Testing Method for Barcol Hardness of Glass Fiber Reinforced Plastics.
- KS M ISO 1172, 2002. Textile-Glass_reinforced Plastics-Prepregs, moulding Compounds and laminates-determination of the Textile-Glass and mineral-Filler Content-Calcination Methods.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2008. Construction Standards of Reinforced Plastic Ship.
- Moon, C.H., Goo, J.S., 1997. Study on the Durability of Fiber Reinforced Plastics by Moisture Absorption, Journal of Ocean Engineering and Technology, 11(2), 48-56.
- Park, J.H., Park, G.O., Kim, D.J., 2004. A Study on the Characteristics of Traditional Korean Fishing Boats for Development of a Sailing Boat, Journal of Ocean Engineering and Technology, 18(4), 52-58.
- Song, H.C., Yum, J.S., 2010. A Study of the Mechanical Properties of Fiberglass Reinforcements with Constitution of Lay-up, Manufacturing Method, and Resins, Journal of Ocean Engineering and Technology, 24(5), 75-80.