

복합소재 선체 외판의 초음파 탐상을 위한 탐촉자 주파수와 수신기 음향 속력의 상관관계

이상규* · Zhiqiang Han** · 이창우*** · 오대균****†

* 목포해양대학교 대학원 석사과정, ** 목포해양대학교 대학원 박사수료,
*** 한국조선해양기재연구원 전남본부 선임연구원, **** 목포해양대학교 조선해양공학과 부교수

Correlation between Probe Frequency and Echo-Pulse Velocity for Ultrasonic Testing of a Fiber-Reinforced Plastic Hull Plate

Sang-gyu Lee* · Zhiqiang Han** · Chang-woo Lee*** · Daekyun Oh****†

* M.S. Student, Graduate School Mokpo National Maritime University
** Ph.D. Candidate, Graduate School Mokpo National Maritime University
*** Senior Researcher, Korea Marine Equipment Research Institute
**** Associate Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University

요 약 : 선체구조의 품질검사 중 가장 일반적인 방법의 하나는 비파괴검사이다. 하지만 복합소재 선체는 강화재와 수지로 구성된 여러가지 재료가 섞여 있고 또 생산환경과 작업자에 따라 FRP(Fiber-Reinforced Plastics) 제작품질에 차이가 발생할 가능성이 크기 때문에 정확한 검사평가는 쉽지 않은 일이다. 특히 FRP 선박의 경우에는 다른 구조물보다 두께가 매우 두껍고 주로 수직층 공법을 이용하기 때문에 더욱 그렇다. 초음파 탐상의 조건 중 검사체의 밀도가 매우 중요하기 때문에 본 연구에서는 FRP 선박 제작에 널리 사용되고 있는 소재와 유리섬유강화재 중량 비율로 제작된 선박의 외판을 검사체로 선정하고, Pulse-Echo 초음파 탐상기를 활용하여 GFRP(Glass Fiber-Reinforced Plastics) 선체 외판의 초음파 탐상을 위한 적정 조건을 조사하였다. 1.00 MHz, 2.25 MHz, 5.00 MHz 세 종류 탐촉자로 A-Scan을 실시하였으며 선체 외판의 두께 검사결과와 비교분석함으로써 적정 초음파 탐상 조건을 찾고자 하였다. 연구결과 탐촉자의 초음파 주파수가 높아질수록 수신자의 반사파 음향 속력을 감소시켜야 더 정도 높은 두께 측정 결과를 얻을 수 있었으며, 상대적으로 낮은 초음파 주파수 탐촉자에서 더 적은 오차가 발생함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 복합소재, FRP, 선체구조, 비파괴검사, 초음파시험

Abstract : Nondestructive testing is one of the most commonly used quality inspection methods for evaluating ship structures. However, accurate evaluation is difficult because various composite materials, such as reinforcements, resin, and fiber-reinforced plastics (FRPs), are used in hulls, and manufacturing quality differences are likely to exist owing to the fabrication environment and the skill level of workers. This possibility is especially true for FRP ships because they are significantly thicker than other structures, such as automobiles and aircraft, and are mainly manufactured using the hand lay-up method. Because the density of a material is a critical condition for ultrasonic inspection, in this study, a hull plate was selected from a vessel manufactured using e-glass fiber, which is widely used in the manufacture of FRP vessels with the weight fraction of the glass content generally considered. The most suitable ultrasonic testing conditions for the glass FRP hull plate were investigated using a pulse-echo ultrasonic gauge. A-scans were performed with three probes (1.00, 2.25, and 5.00 MHz), and the results were compared with those of the hull plate thickness measured using a Vernier caliper. It was found that when the probe frequency was higher, the echo-pulse velocity of the receiver had to be lowered to obtain accurate measurement results, whereas fewer errors occurred at a relatively low probe frequency.

Key Words : Composite material, Fiber-reinforced plastics, Ship structure, Nondestructive testing, Ultrasonic testing

* First Author : lsg93630@gmail.com, 061-240-7238

† Corresponding Author : dkoh@mmu.ac.kr, 061-240-7318

※본 논문은 2019년도 해양환경안전학회 추계학술발표회(부산)에서 저자가 발표한 자료를 기초로 하고 있습니다.

1. 서론

복합소재(Composite Materials)는 생산과 폐기하는 과정에서 환경문제 유발로 많은 지적을 받고 있지만(Yoon, 2007) 수명이 길고 비강도가 좋으며 부식에도 강하여 항공기, 자동차 뿐만 아니라 어선, 레저선박 등 소형선박의 선체 소재로도 널리 사용되고 있다(Oh, 2019).

FRP 선박의 선체구조 적층판(Laminate)을 설계할 때는 유리섬유강화재(Glass Fiber)의 중량 비율 즉 함침율(Gc, Glass Content)이 적층판의 물리적 성질을 결정하는 중요한 요소이며, 또한 구조치수 계산에도 매우 큰 영향을 미친다. FRP 선체구조 설계에 있어 이러한 관계는 ISO(International Organization for Standardization) 국제표준 뿐만 아니라 여러 선급의 FRP 구조설계 규정에서도 함침율과 적층판의 물리적 성질과 요구두께 등의 상관관계를 명시하고 있다(Oh et al., 2014).

FRP 선체구조의 경우, 강(Steel)이나 알루미늄(Aluminium) 등과 달리 강화재인 유리섬유와 수지(Resin) 등의 원자재를 조선소가 구매하여 직접 적층판을 제작하며 이때 강화재의 종류, 직물의 직조방식 그리고 수지의 종류 등과 같은 원자재의 특성과 온도 및 습도와 같은 환경적인 요인이 적층판의 생산품질에 영향을 미치게 된다(Kedari et al., 2011). 또한 진공적층성형(Vacuum Infusion), 수적층(Hand Lay-up), 스프레이업(Spray-up) 등의 제작공법 차이와 작업자의 숙련도에 따라 생산품질에 차이가 날 수 있다(Choi et al., 2013). 이러한 원자재의 특성과 작업환경 그리고 작업자의 숙련도에 따라 작거나 큰 결함(Defect)이 적층판 내에 포함될 가능성이 있으며 이러한 기포(Porosity), 빈공간(Void), 층간분리(Delamination) 등과 같은 결함은 적층판의 물리적 성능을 저하시키며(Kim et al., 2014), 결함이 많을수록 피로강도와 같은 구조적 성능 또한 저하된다고 알려진 바 있다(Abdelal, 2013). 특히 선박은 피로하중을 받는 환경에서 수십여년을 운항하기 때문에 적층판 내부의 결함 탐상은 매우 중요하다고 할 수 있다(Mouritz et al., 2000).

선체검사의 가장 기본적인 방법 중 하나는 비파괴 검사를 통한 두께측정이며, 특히 복합소재의 경우 앞서 언급하였듯이 적층판을 직접 조선소가 제작하기 때문에 이는 매우 중요한 검사항목 중 하나이다. 복합소재 구조물의 비파괴 검사(NDT, Non-destructive Testing)에는 적외선열화상검사(ITT, Infrared Thermography Testing), 방사선투과검사(RT, Radiography Testing), 초음파 탐상검사(UT, Ultrasonic Testing) 등과 같은 방법이 사용되곤 한다. 하지만 선박이라는 구조물의 특성, 즉 구조물의 규모로 인하여 비파괴 검사장비로의 이동과 검사체의 샘플링이 불가능하며, 선체구조의 특성에 따라 한쪽 면(One side)에서의 검사만이 가능해야 한다는 점을 고려하였을 때 초음파 탐

상검사 중 Pulse-Echo 초음파 탐상이 주로 사용된다(Mouritz et al., 2000). Pulse-Echo 초음파 탐상은 이동성과 휴대성이 뛰어나며 한쪽 면을 이용하여 두께 방향의 탐상이 용이하기 때문에 FRP 선체구조의 적층판 내부를 탐상하기에 가장 적합하다고 할 수 있다(Fig. 1).

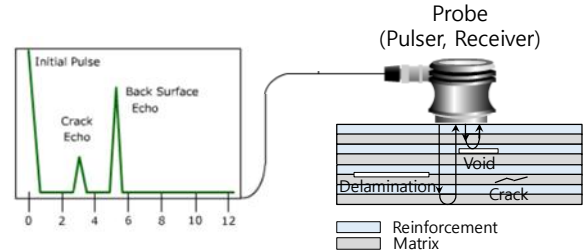


Fig. 1. Concept of Pulse-Echo Ultrasonics for Composite Laminate.

강이나 알루미늄과 같은 금속물질이 아닌 FRP와 같은 복합소재는 상대적으로 밀도가 낮고 적층판을 구성하고 있는 단일층(Single-ply) 사이의 불균일 가능성으로 인하여 정도 높은 탐상조건을 설정하는 것이 어렵다. 즉, FRP 선체구조의 경우 강화재인 유리섬유와 기지재인 수지의 양에 따른 적층판의 밀도변화가 발생하기 때문에 금속물질과 같은 단일소재 검사체(Test Specimen)보다 Pulse-Echo 초음파 탐상의 조건을 설정하는 데 어려움이 있으며, 또한 자동차와 항공기의 복합소재 적층판보다 상대적으로 두꺼운 선체구조의 두께 또한 탐상의 결과에 큰 영향을 미치는 인자로 작용한다.

본 연구에서는 실제 GFRP 선박의 두께 약 12 mm 선체 외판을 대상으로 Pulse-Echo 초음파 탐상 실험을 실시함으로써, 보다 정확한 초음파 탐상을 위한 탐촉자 주파수와 수신기 음향 속력의 상관관계를 연구하고자 한다. 이를 위하여 대상 선박의 선체 외판으로부터 GFRP 적층판을 샘플링하여 버니어 캘리퍼스(Vernier Calipers)와 초음파 탐상기로 실측하였으며 이때 탐상 결과가 검사체의 밀도에 예민한 것을 고려하여 샘플링된 검사체의 밀도를 재측정하였다. 각 검사체를 대상으로 1.00 MHz, 2.25 MHz, 5.00 MHz 세 종류 탐촉자를 이용하여 A-Scan 초음파 탐상(Han et al., 2011)을 수행하였으며 이를 통해 GFRP 선체 외판의 초음파 탐상을 위한 적정 탐상 조건을 제시하고자 하였다.

2. GFRP 생산설계 조건과 초음파 탐상 조건

Pulse-Echo 초음파 탐상은 Fig. 1과 같이 탐촉자(Probe)에서 발생한 초음파를 탐상면으로부터 검사체에 보내어 저면(Back Surface)에 도달하거나 내부에 존재하는 결함을 만나 반사

(Reflection) 및 통과(Transmission)되어 돌아오는 시간과 반사파의 음향 속력(Echo-Pulse Velocity)을 분석하여 검사체의 두께, 결함의 위치와 크기 등을 파악하는 검사 방법이다.

따라서 탐촉자에서 발생시키는 파(Pulse)와 반사파(Echo-Pulse) 사이의 송수신 조건을 적절히 설정하는 것이 매우 중요하며, 이는 검사체의 물리적 특성에 매우 종속적이다. 여기서 반사파의 음향 속력이란 초음파가 검사체 내부에서 진행하는 초음파의 속력을 말하며, 식(1)과 같이 검사체의 밀도(ρ , Density)와 탄성계수(E, Modulus of Elasticity)에 의해 결정된다(Han et al., 2011).

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

E : Modulus of Elasticity (kgf/mm^3)

ρ : Density (Kg/m^3)

탐상 과정 중 초음파가 반사 및 통과 등의 현상이 발생하는 원인은 검사체 소재의 특성인 음향 임피던스(Z, Acoustic Impedance) 차이 때문인데, 이는 초음파의 진행을 방해하는 소재의 고유한 값으로 식(2)와 같이 검사체의 밀도와 반사파의 음향 속력의 곱으로 표현된다(Han et al., 2011).

$$Z = \rho \times C \quad (2)$$

ρ : Density (Kg/m^3)

C : Echo - Pulse Velocity (m/s)

이와 같이 반사파의 음향 속력과 음향 임피던스는 모두 탐상하고자 하는 검사체의 밀도와 매우 밀접한 관계가 있으며, 금속재와 같은 단일소재의 경우는 대표되는 소재 밀도에 따라 대응되는 반사파의 음향 속력과 음향 임피던스를 같이 제안하고 있으며(ASTM E494-10, 2010; Han et al., 2011), Table 1은 이 중 일부를 정리하여 보이고 있다.

Table 1. Echo-Pulse Velocity and Acoustic Impedance in Materials

Materials	Steel	Glycerin	Air	Plastic
Density (g/cm^3)	7.85	1.26	0.0012	1.18
Echo-pulse Velocity (m/s)	5,900	2,496	330	2,670
Acoustic Impedance ($10^6 kgf/m^2s$)	46.02	2.42	4×10^{-4}	3.22

하지만 GFRP 선체구조의 경우 적층판 제작에 사용되는 직물의 단위면적당 유리섬유 양과 직물의 강화형태(Reinforcement Form) 그리고 적층수 등에 따라 적층판의 유리섬유강화재의 중량 비율 G_c 가 변화하기 때문에, 정도 높은 Pulse-Echo 초음파 탐상을 위해서는 GFRP 생산설계조건을 반드시 고려해야 하며 GFRP 선체구조의 소재 특성을 고려한 적정 탐촉자 주파수 또한 고려되어야 한다.

3. GFRP 선체 외판의 Pulse-Echo 초음파 탐상

3.1 실험방법 및 절차

본 연구에서는 GFRP 선체 외판과 같은 복합소재 적층판에 대하여 정도 높은 Pulse-Echo 초음파 탐상을 함에 있어 적정 반사파의 음향 속력을 파악하고자 하며, 이때 GFRP 선체 외판과 같은 복합소재에 적정한 탐촉자의 주파수 특성을 파악하고자 한다. 선체 외판의 두께측정을 위한 A-Scan 탐상을 탐촉자 주파수를 변경하며 측정하고 그 결과를 버니어 캘리퍼스 실측 결과와 비교함으로써 GFRP 선체 외판의 Pulse-Echo 초음파 탐상을 위한 탐촉자 주파수와 반사파의 음향 속력의 상관관계를 파악하고자 한다.

검사체는 16 m 급 GFRP 레저선박의 선측판(Fig. 2)을 대상으로 선정하였으며, 본 선박에 사용된 원자재는 레저선박 등 소형선박 선체에 널리 적용되는 유리섬유강화재 매트(CSM, Chopped Strand Mat)이며 기지재료는 열경화성수지(Polyester)가 사용되었다. 선저판과 선측판은 모두 유리섬유강화재 40%의 함침율로 제작되었으며 선측판은 CSM이 16장 사용되었고 설계두께는 11.84 mm이다. 탐상을 위한 선측판 검사체의 생산정보는 다음 절에서 상세히 다루었다.



Fig. 2. GFRP Hull Plate of 16m Power Yacht.

선측판에서 네 곳의 측위점(Fig. 3)을 선정하여 버니어 캘리퍼스로 두께 측정을 하였으며, 탐촉자의 주파수를 변화시키며 반사파의 속력이 실측한 두께와 일치할 때까지 반사파 속력에 변화를 주었다. 이때 탐촉자의 주파수 범위는 Greene(2014)가 추천하고 있는 0.50 MHz~10 MHz 범위 내에서 1.00 MHz, 2.25 MHz, 5.00 MHz 세 종류 탐촉자를 사용하였고, 반사파의 음향 속력은 ASTM E494(ASTM E494-10, 2010)에서 제시하고 있는 밀도 1.18의 플라스틱(Plastic) 두께 측정을 위한 반사파 음향 속력 2,670 m/s를 기준 반사파의 음향 속력으로 선정하여 10 m/s 씩 상승시키며 탐상을 진행하였다. Pulse-Echo 초음파 탐상기로는 미국 Dakota사의 CMX DL+을 사용하였으며 그 사양은 아래 Table 2와 같다.

Table 2. Specifications of Pulse-Echo Ultrasonic Gauge (Dakota Ultrasonics CMX DL+)

Item	Value
Thickness	0.63 mm ~ 1,219.20 mm
Resolution	0.01 mm
Display	A-Scan, B-Scan
Probe Frequency	1.00 MHz ~ 10.00 MHz
Echo-Pulse Velocity	1,372 m/s ~ 12,903 m/s

3.2 GFRP 선체 외판의 생산설계와 검사체 분석

GFRP 선측판의 생산설계를 기반으로 정리한 검사체의 소재 정보는 아래 Table 3과 같다.

Table 3. Material Design Specifications of GFRP Hull Plate

Item	Value	
Glass Fiber	Fabric Type	CSM
	Unit Weight per Area	450 g/m ²
Resin	Type	Polyester
	Specific Gravity	1.13
	Glass Content	40 %
Design Specimen	Laminate Stack	CSM × 16ply
	Thickness	11.84 mm

Fig. 3은 선측판에서 샘플링한 적층판이며 두께 측정을 위한 네 곳의 측위점(#1, #2, #3, #4)을 보이고 있다. 정확한 비중 측정과 버니어 캘리퍼스를 이용한 두께 측정을 위해 네 개의 검사체로 절단하였고 각 측위점에서 측정된 두께는 Table 4와 같이 생산설계 11.84 mm와 다소 차이가 있는 12.89 mm(평균값)로 확인되었다(Fig. 4).

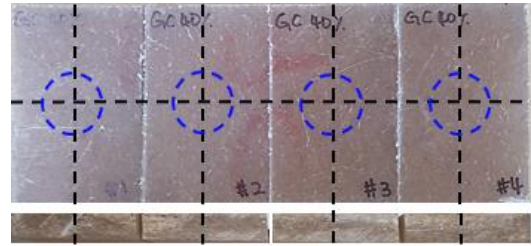


Fig. 3. Measurement Points on the GFRP Hull Plate for Ultrasonic Testing.



Fig. 4. Thickness Measurement of GFRP Test Specimens using Vernier calipers.

검사체의 유리섬유강화재 중량 비율 Gc는 Table 3에서 Gc에 해당하는 40%이며 이는 초음파 탐상 조건에서 가장 중요한 음향 임피던스와 음향 속력을 결정 짓는다. 생산설계에는 40%로 제시되어 있으나 서론에서 언급하였듯이 FRP 적층판은 제작공법이나 작업환경 등에 따라 그 차이가 크기 때문에 본 연구에서는 보다 정확한 탐촉자 주파수와 반사파 음향 속력 간의 상관관계 분석을 위하여 비중계(Fig. 5)를 이용하여 선측판 검사체 네 개의 함침율 Gc를 식(3)에 의해 재계산하였다(ASTM D792-07, 2007).



Fig. 5. Specific Gravity Measurement for GFRP Test Specimens using Hydrometer.

복합소재 선체 외판의 초음파 탐상을 위한 탐촉자 주파수와 수신기 음향 속력의 상관관계

$$G_c = \frac{A_r \times N \times 0.1}{\rho_c \times h} \quad (3)$$

A_r : Mass of one Sheet of Reinforcement/Unit Area

N : Number of Plies in the Test Specimen

ρ_c : Test Specimen Density

h : Thickness of the Test Specimen

GFRP 선층판의 Pulse-Echo 초음파 탐상을 위한 네 검사체 각 측위점에서 두께와 비중 그리고 재계산된 G_c 를 정리하면 Table 4와 같았다. 유리섬유강화재 중량 비율 G_c 역시 생산설계에서 제시된 40%와 약간의 오차를 갖는 37.40%(평균값)로 확인되었다.

Table 4. Information of Thickness, Glass Content and Specific Gravity of Test Specimen

	Thickness	Specific Gravity	G_c
Point #1	12.23mm	1.51	38.99%
Point #2	12.27mm	1.49	39.38%
Point #3	13.25mm	1.50	36.22%
Point #4	13.80mm	1.49	35.02%
Mean	12.89mm	1.50	37.40%

3.3 FRP 선체 외판의 초음파 탐상과 결과분석

16 m 급 GFRP 선체 외판의 검사체 분석결과 각 검사체 측위점에서의 두께, 밀도 그리고 유리섬유강화재 중량 비율 G_c 를 분석하였고, Pulse-Echo 초음파 탐상기를 이용하여 각 측위점에서의 A-Scan 초음파 탐상을 실시하였다.



Fig. 6. Pulse-Echo Ultrasonic Testing (2.25 MHz Probe).

앞서 정리한 실험방법에 따라 초음파 탐상을 실시하되, 우선 측위점 #1을 기준으로 세 종류 탐촉자(1.00 MHz, 2.25 MHz,

5.00 MHz)를 사용하여 음향 속력 2,670 m/s를 기준으로 검사체의 두께를 정확히 측정 가능한 반사파의 음향 속력을 측정하였다(Fig. 6). Fig. 7은 세 종류 탐촉자로부터 얻은 측위점 #1에서의 A-scan 결과를 도식화하여 보이고 있다.

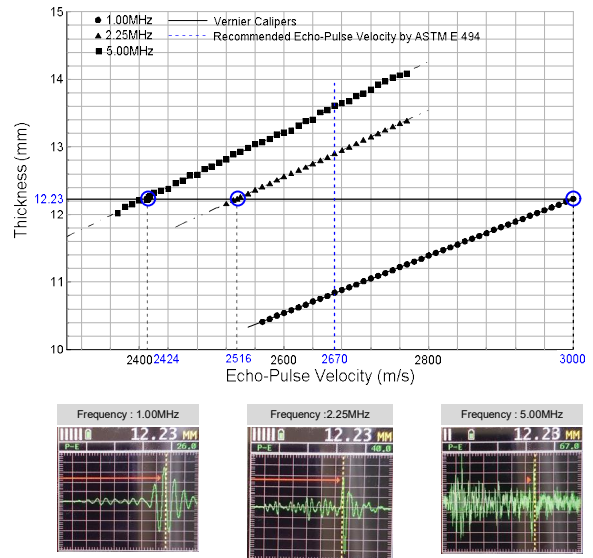


Fig. 7. Echo-Pulse Velocity Determination for Hull Plate at Point #1.

주파수 1.00 MHz 탐촉자의 경우 기준 반사파의 음향 속력 (2,670 m/s)에서 10 m/s 씩 증감시켰을 때 반사파의 음향 속력을 3,000 m/s로 설정하는 경우 버니어 캘리퍼스 측정 두께 (12.23 mm)와 일치함을 확인할 수 있었다. 주파수 2.25 MHz와 5.00 MHz 탐촉자로 교체하여 동일한 방법으로 얻은 적정 A-Scan 반사파 음향 속력은 각각 2,516 m/s와 2,424 m/s로 확인되었다. 측위점 #1에서 얻은 음향 속력으로 설정된 세 종류 탐촉자를 이용하여 측위점 #2, #3, #4에서 각각 A-Scan을 실시하였으며 그 결과는 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10과 같다.

초음파 탐상과 버니어 캘리퍼스 측정 결과를 비교한 결과 측위점 #1에서 얻은 음향 속력 기준 A-Scan 오차범위는 0.01 mm ~ 0.37 mm로 확인되었다. 오차 범위는 일반적으로 제작되는 FRP 선체구조 적층판의 단일층(Single-ply) 설계두께가 0.74 mm ($G_c = 40\%$ 기준, ISO 12215, 2008)인 것을 고려한다면 충분히 수용 가능하다고 판단된다. 단, 측위점 #4의 결과(Fig. 10) 중 1 MHz 탐촉자의 측정 결과(14.17 mm) 오차 0.37 mm는 적층판 표면의 불균일 혹은 내부 결함으로 사료되며, 아웃라이어(Outlier)로 판단되어 향후 분석에서는 제외하였다.

탐촉자의 주파수 변화와 반사파 음향 속력 사이의 관계를 분석하기 위하여 GFRP 선체 외판의 탐상 결과를 Fig. 11과 같이 종합하여 정리하였다. 측위점 #1 기준 반사파 음향 속

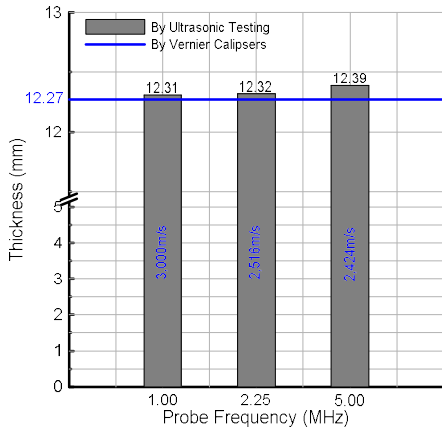


Fig. 8. A-Scan Results with Each Probe at Point #2.

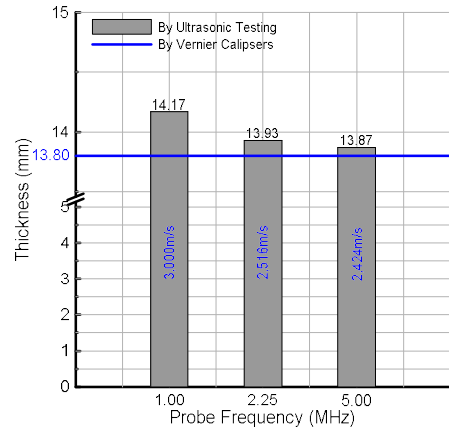


Fig. 10. A-Scan Results with Each Probe at Point #4.

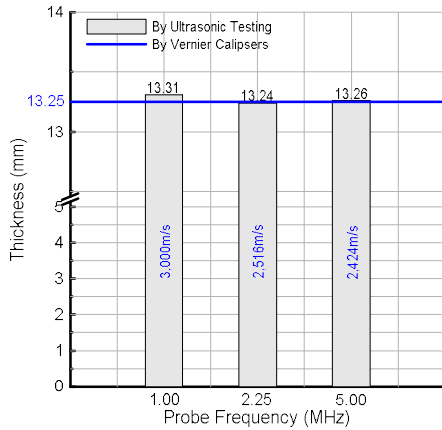


Fig. 9. A-Scan Results with Each Probe at Point #3.

력에 의한 주파수 별 각 측위점에서의 A-Scan 오차가 0.39 ~ 0.52 %로 비교적 정확한 측정결과를 얻음으로써 기준 반파사 음향 속력의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 또한 각 주파수 별 적정 반파사 음향 속도 범위(2,424 m/s ~ 3,000 m/s)는 앞서 분석한 검사체의 밀도(Table 4, $\rho = 1.5$)를 고려하여 ASTM E494에서 제시하고 있는(Table 1) 클리세린($\rho = 1.26$)과 플라스틱($\rho = 1.18$)의 반파사 음향 속도(2,496 m/s, 2,670 m/s)과 비교하였을 때 비교적 합리적인 범위에 속하고 있음을 알 수 있다. 탐촉자의 주파수가 높아지면 적정 반파사의 음향 속력은 감소하는 반비례 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 탐촉자의 파장과 파동의 속력의 관계에 따라 합리적인 결과임을 알 수 있다. 따라서 설계 함침율 40%(측정 함침율

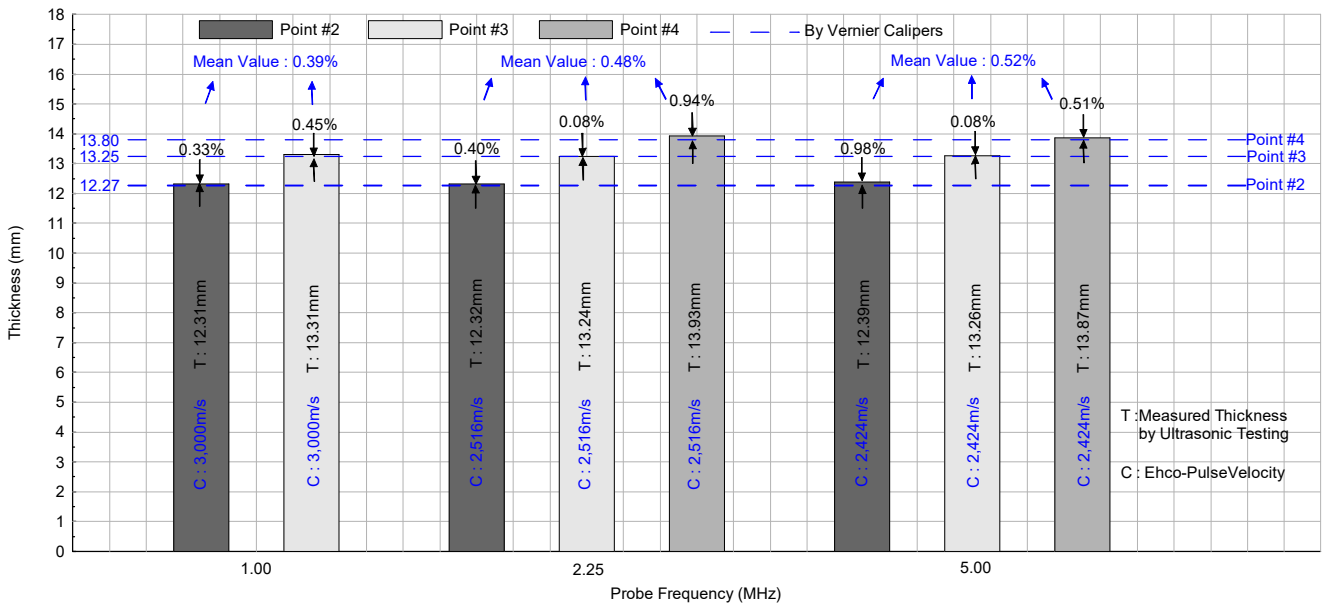


Fig. 11. Comparative Analysis of the Thickness Detection Error Rate of Each Point.

37.4%)인 GFRP 선체외관의 Pulse-Echo 초음파 탐상을 위한 적정 반사파 음향 속력은 탐촉자 주파수 별로 다음과 같이 정리할 수 있다(Table 5).

Table 5. The Most Appropriate Echo-Pulse Velocity by Each Probe

Probe Frequency	Echo-Pulse Velocity
1.00 MHz	3,000 m/s
2.25 MHz	2,516 m/s
5.00 MHz	2,424 m/s

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 GFRP 선박 선체 외관의 Pulse-Echo 초음파 탐상을 위한 적정 탐상조건을 제시하기 위하여, 탐촉자의 주파수와 수신기의 반사파 음향 속력에 변화를 주어 A-Scan 을 실시하였다.

연구결과 탐촉자의 초음파 주파수가 높아질수록 수신자의 반사파 음향 속력은 감소시켜야 정확한 측정 결과를 얻을 수 있었다. 탐촉자의 주파수 변화에 따른 측정 오차는 대동소이하였으나 1.00 MHz 일 때가 가장 작았고 그 다음 2.25 MHz, 5.00 MHz 순으로 작은 경향을 보였다. 이는 FRP보다 상대적으로 음향 임피던스가 큰 금속재에서는 고주파 초음파를 사용하고 있으며 또한 자동차, 항공기와 같은 FRP 박판의 경우도 상대적으로 고주파를 사용하고 있는 것을 고려한다면 합리적인 결과라고 할 수 있다.

각 주파수 변화에 따른 적정 반사파 음향 속력은 1.00 MHz 탐촉자에서 3,000 m/s, 2.25 MHz와 5.00 MHz의 경우 각각 2,516 m/s, 2,424 m/s로 측정되었다. 이는 FRP 선체의 유리섬유강화재 중량 비율에 따라 차이가 있겠지만, 대상 선박의 함침율 Gc가 37.04%로 일반적인 수준의 FRP 선체구조이기 때문에, 본 연구결과에 따른 탐촉자의 주파수 변화와 반사파의 음향 속력 상관관계를 활용하면 검사체와 동일한 구조인 FRP 단일적층판(Single-skin)의 Pulse-Echo 초음파 탐상에 활용 가능할 것으로 생각된다.

다만, 앞서 언급하였듯이 초음파 탐상결과는 유리섬유강화재 중량 비율과 FRP 제작품질에 따른 음향 임피던스 민감도 매우 크기 때문에 상황에 따른 탐상조건 수정과 탐상기기 교차검증 등이 필요하며, 향후 이와 관련된 추가연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1D1A3B03032051)과 산업통상자원부의 지원을 받은 연구(20006978, IoT 및 AI 기반 블록조립 공정용 디지털 트윈 기술 개발)와 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(전남씨그랜트)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Abdelal, N.(2013), Effect of Voids on Delamination Behavior under Static and Fatigue Mode I and II. Ph.D. Dissertation, University of Dayton.
- [2] ASTM D792-07(2007), Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [3] ASTM E494-10(2010), Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [4] Choi, H. K., K. W. Nam, and S. H. Aha(2013), Strength Characteristics of FRP Composite Materials for Ship Structure, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 27, No. 4, pp. 45-54.
- [5] Greene, E.(2014), Marine Composite Non-Destructive Evaluation, Ship, Ship Structure, 1, pp. 416-427.
- [6] Han, C. H., E. K. Park, and The Korean Society for Nondestructive Testing(2011), Ultrasonic Testing, pp. 33-193.
- [7] ISO 12215-5(2008), Small craft - Hull construction and scantlings, ISO.
- [8] Kedari, V., B. Farah, and K. T. Hsiao(2011), Effects of vacuum pressure, inlet pressure, and mold temperature on the void content, volume fraction of polyester/e-glass fiber composites manufactured with VARTM process, Journal of Composite Materials, Vol. 45, No. 26, pp. 2727-2742.
- [9] Kim, S. Y., C. S. Sim, C. Sturtevant, D. Kim, and H. C. Song(2014), Mechanical properties and production quality of hand-layup and vacuum infusion processed hybrid composite materials for GFRP marine structures, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 6, pp. 723-736.
- [10] Mouritz, A. P., C. Townsend, and M. Z. Shah Khan(2000), Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics, Composites Science

and Technology, Vol. 60, pp. 23-32.

- [11] Oh, D. K.(2019), Marine Composites, FRP Vessels and Eco-friendly Design, Webzine of The Society of Naval Architects of Korea, [Online] Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22066.35525>, August 2019.
- [12] Oh, D. K., D. K. Lee, G. M. Kang, C. H. Ryu, and J. K. Noh(2014), Comparative Study of Rules of ISO 12215 and International Classification Society for Structural Design of CFRP Cruise Boat, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 77-84. <http://doi.org/10.5574/KSOE.2014.28.1.077>.
- [13] Yoon, K. Y.(2007), New Practical and Eco-friendly Recycling method of FRP Boats, Journal of the Korean Society of Marine Environmental Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 181-186.

Received : 2020. 01. 14.

Revised : 2020. 01. 28.

Accepted : 2020. 04. 27.