

낙하시험에 의한 폴리에틸렌 보트의 구조 안전성 평가

이성룡^{1*}, 강경주², 조석수²

¹강원대학교 금속재료공학과, ²강원대학교 기계설계공학과

Evaluation of Structural Safety of Polyethylene Boats by Drop Test Method

Sung-Riong Lee^{1*}, Gyung-Ju Kang², Seok-Swoo Cho²

¹Dept. of Materials and Metallurgical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

²Dept. of Mechanical Design Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

요약 강선이나 강화플라스틱 등의 선박 재료는 선박안전법에 규정된 규격재료를 사용하는 경우로서 판두께 측정시험이나 중굽힘강도시험을 통하여 제작 선체의 구조 안전성을 쉽게 확인할 수 있다. 한편, 염가의 폴리에틸렌 등과 같은 비규격재료를 선체 전장이 짧은 플레저 보트의 선체로 사용하는 경우 역학적 특성을 파악하기 쉬워 선체 설계를 수행하기에 매우 유리하고, 대량 생산 시스템을 갖추는 경우 제작 비용이 낮아 해당 제품의 가격 경쟁력을 가질 수 있다. 그러나 폴리에틸렌 선체의 경우 비규격재료를 사용함에 따라 기존의 소형선체에 대한 중굽힘강도시험을 이용하여 선체의 구조 안전성을 평가할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 플레저 보트의 낙하시험 표준절차인 플레저 보트 검사 기준과 ISO 12215-5를 기초로 폴리에틸렌 선체에 대한 낙하시험을 수행한 후 이것을 기초로 정적구조해석을 수행하여 비규격재료로 개발된 선체의 구조 안전성을 확인함으로써 플레저 보트 검사 기준과 ISO 12215-5의 낙하시험방법이 선체 구조설계에 이용될 수 있음을 보였다.

Abstract The structural safety of small craft, such as steel ships and FRP ships, can be estimated using the measurement test of the hull plate thickness or the longitudinal bending strength test. A polyethylene boat is made using inexpensive HDPE and can be mass produced. The structural safety of a polyethylene boat cannot be guaranteed because a polyethylene boat hull is not specified in the KR technical rules. The inspection procedure of sailing yachts and pleasure boats and drop test method of ISO standard 12215-5 propose the structural strength required for small crafts as the drop test height. Therefore, in this study, the drop test of a polyethylene boat hull was carried out based on the inspection procedure of a sailing yacht and pleasure boat and the drop test method of ISO standard 12215-5. The drop load was acquired by the drop acceleration of a boat hull. Structural analysis and safety of a polyethylene boat were performed by the drop load and allowable stress criteria. The calculation results of the hull plate thickness by structural design specification of ISO standard 12215-5 showed that polyethylene boat hull was more than two times thicker than a steel ship hull and the boat hull determined by the inspection procedure of sailing yacht and pleasure boat and drop test method of ISO standard 12215-5 was more than 1.2 times thicker than the boat hull determined by structural design specification of ISO standard 12215-5. Therefore, inspection procedure of sailing yachts and pleasure boats and drop test method of ISO standard 12215-5 was much more conservative than the structural design specification of ISO standard 12215-5 and could be used as the structural design method of a polyethylene boat.

Keywords : Drop Test, Inspection procedure of sailing yacht and pleasure boat, ISO standard 12215-5, Polyethylene Boat, Structural Strength.

2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음. (관리번호-201510033)

*Corresponding Author : Sung-Riong Lee(Kangwon Nat'l Univ.)

Tel: +82-10-5619-6414 email: sr0915@kangwon.ac.kr

Received March 8, 2017

Revised (1st April 21, 2017, 2nd April 28, 2017)

Accepted May 12, 2017

Published May 31, 2017

1. 서론

선박 안전법에 따르면 플레저 보트는 레저용으로 사용되는 기선과 범선으로서 비사업용은 여객선, 유선, 도선 등이 아닌 스포츠 또는 레크레이션용으로 사용되는 것이고 사업용은 선박 길이 24m미만의 선박으로서 유선 및 도선 사업법의 적용을 받는 유선을 가리킨다. 또한, 관광이나 레저용으로 사용되는 비사업용 플레저 보트는 선체 길이에 관계없이 해당 선체 재료별 구조기준을 만족해야 한다. 특히, 강선이나 강화플라스틱선등과 같이 선체 재료를 선박 안전법에 규정된 재료로 사용하는 경우 판두께 측정에 따른 강도 시험을 통하여 제작 선체의 구조 안전성을 쉽게 확인할 수 있다[1-3]. 한편, 염가 재료에 대한 연구는 전혀 진행되지 않고 있으며 단지 소형 조선산업계에서 카누나 카약 선체를 폴리에틸렌을 이용하여 제작하여 판매하고 있다[4-5]. 폴리에틸렌은 선체 전장이 짧은 플레저 보트의 경우 역학적 특성이 설계하기에 매우 유리하며[6], 선체 폐선시 오히려 높은 수익이 발생되어서 초기 구입 비용을 회수할 수 있을 뿐만 아니라 해양환경오염방지에 크게 이바지 할 수 있는 장점이 있다[7]. 조등[8]은 종굽힘강도시험을 이용하여 강화플라스틱선과 폴리에틸렌 보트에 대한 구조 안전성을 평가하여 강화플라스틱선에 비하여 폴리에틸렌 보트가 과도한 안전율을 가지고 있다고 주장하여 선박 안전법에 규정된 재료로 제작된 선체에 대하여 적용하는 종굽힘강도시험규격의 개정이 필요함을 제시하고 있다. 이러한 문제점 때문에 비규격재료 선체의 구조강도시험으로 플레저 보트 검사 기준[9]과 ISO 12215-5[10]에서 제시하고 있는 선체낙하시험규격이 현재의 국내 법규상 가장 적합하다.

따라서 본 연구에서는 플레저 보트의 낙하시험 표준 절차인 플레저 보트 검사 기준과 ISO 12215-5를 기초로 폴리에틸렌 선체에 대한 낙하시험을 수행한 후 이것을 기초로 낙하해석을 수행하여 비규격재료로 개발된 선체의 구조 안전성을 확인함으로써 플레저 보트 검사 기준과 ISO 12215-5의 낙하시험방법이 선체 구조설계에 이용될 수 있음을 보이고자 한다.

2. 폴리에틸렌 보트의 개요

Fig. 1는 보트 선형설계프로그램인 Rhino 3D 4.0을 이용하여 폴리에틸렌 플레저 보트 설계도를 나타낸 것이다. 그림에서 선체의 선체의 정면도, 평면도, 측면도, 등각도를 각각 나타내고 있다. 개발 폴리에틸렌 플레저 보트는 Urban 스타일로 세련된 도시적인 이미지를 표현한 디자인을 가지고 있으며 도시인들의 여가를 책임지는 레저보트로서의 이미지를 강조 하고 있다. 면과 면의 조화가 직선의 강한 느낌이고 Sheer Line은 선미 쪽으로 흘러가면서 점차 내려가는 라인으로 좀 더 샤프한 측면의 라인을 만들어 주고 있다[11].

Table 1은 선형 설계된 보트의 수력학적 특징을 각각 나타낸 것으로 선체 길이가 5.999m이다. 또한, 선체 폭과 깊이는 2.28m와 1.14m이다. 선박의 경우 그 목적이 동일한 경우 기본적인 유체역학적 특성이 유사한 관계로 주요 제원 간에 일정한 관계를 가지고 있다. 보트의 경우 선형이 복잡한 3차원 곡면으로 형성되어서 있으며 계획 흘수는 0.249m이다.

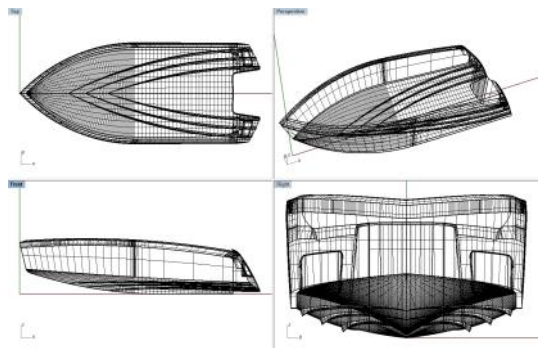


Fig. 1. Three-dimensional shape of polyethylene boat

Table 1. Hydrostatic properties of polyethylene boat

Item		
Design Speed V_s (knot)		25
Length over all LOA(m)		5.999
Breadth B(m)		2.280
Depth D(m)		1.140
Length of waterline LWL(m)		3.885
Draft	Forward TF(m)	0.249
	Aft TA(m)	0.249
Displacement Volume DISV(m ³)		1.121
Block Coefficient C_B		0.504
Prismatic Coefficient C_P		0.818
Waterplane Area Coefficient C_W		0.906
Midship Section Area Coefficient C_M		0.615

주형계수 C_p 는 중앙 단면에 의한 체적에 대한 배수 체적의 비를 나타낸 것으로 본 연구에서 선행 설계된 보트의 경우 0.818이다. 이 값은 바지 선박이 0.95이고 구축함이 0.63으로 설계 보트가 거의 바지 선박정도로 배의 길이 방향에 대하여 횡단면의 변화가 크지 않다는 것을 의미한다[12].

3. 국내·외 법규 분석

Table 2는 낙하시험을 위한 국제표준규격 ISO 12215-5와 해양수산부에서 제안하고 있는 플레저 보트 검사지침의 구조 기준을 나타낸 것이다. 국제표준규격 ISO 12215-5의 경우 선체 재료에 대한 제한이 없으나 해양수산부에서 제안하는 플레저 보트(Pleasure boat) 검사지침의 경우 FRP, 알루미늄, 폴리프로필렌에 한정되어 있다. 따라서 본 연구에서 대상으로 하는 전장 길이 6m 미만의 폴리에틸렌 실적선 선체에 대한 구조 강도를 확인하기 위해서는 플레저 보트(Pleasure boat) 검사지침 보다는 ISO 12215-5의 표준규격을 적용하여야 한다.

3.1 국제표준규격(ISO 12215-5)

ISO 12215-5에서는 6미터 미만의 단동형 선체에 대하여 낙하시험을 수행하기 위하여 낙하시험시 선체는 반드시 만재상태에 있어야 하며 여객·기관설비 등을 탑재하지 못하는 경우 이에 해당하는 중량물을 탑재하여 시험하여야 한다. 낙하시험의 높이는 Fig. 2의 선도를 통하여 산정하며, 자유낙하(Falls free into the water) 및 파랑 중(Running in wave) 선체에 작용하는 충격하중과 충격하중에 의한 선체의 크랙, 보강재의 박리/파손

(Debonding & Failure)등을 확인하여 선체의 구조강도 기준 합격여부를 판단한다. 즉, 이 규격은 제작된 선체가 선체로서의 구조 안전성을 판단하는 데 사용되는 기준으로서 적절한 선체 두께를 결정하기 위해서는 다양한 두께의 선체에 대한 낙하시험이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대표적 두께의 개발 선체에 대한 낙하시험을 실시한 후 각 축 방향의 가속도를 측정한다 뒤 이 값에 선체 만재하중을 곱하여 각 방향에 따른 선체 낙하 하중을 구한다.

3.2 플레저 보트 검사지침

플레저 보트 검사지침은 여객선·유선·도선·어선이 아닌 스포츠 또는 레크레이션용으로 사용하는 선체 길이 24미터 미만 총톤수 2톤 이상의 보트에 적용된다. 12미터 미만 강화플라스틱(FRP, Fiber Reinforced Plastic) 재질의 소형 플레저 보트의 경우 판 두께 측정에 의한 강도시험 또는 낙하시험의 적용이 가능하며, 강화 플라스틱 이외의 선체 재료를 사용하는 6미터 미만의 소형 플레저 보트는 낙하시험에 의한 강도기준을 적용하고 있다. 낙하시험 후 시험결과를 포함하여 시험일시, 시험장소, 탑재(예정) 기관의 중량, 최대승선인원 등이 기재된 시험 방안을 제출한다. 낙하시험을 위한 높이 계산은 Fig. 2 또는 다음 식 (1)에 따라 계산하며 식 (1) 계산 시 속도는 만재상태의 계획속력 또는 최고속력 계산 시 기관출력을 와트(W)로 산정한 경우는 식 (2)를 마력(PS)으로 산정한 경우 식 (3)을 통하여 속력을 계산한다.

Table 2. Rules related to drop test

	MLTM (Ministry of Land, Infrastructure and Transport)	ISO
Rule	Domestic Pleasure Boat Inspection Guideline	ISO 12215-5 : Small craft-Hull construction and scantling-Part 5
Length (L,H)	<ul style="list-style-type: none"> • FRP : LH≤12(m) • AL : LH≤6(m) • Poly : LH≤6(m) 	<ul style="list-style-type: none"> • Single skin • 2.5(m)≤LH≤6(m) • Speed≤50 Knots
Condition	<ul style="list-style-type: none"> • Falls free into the water 	<ul style="list-style-type: none"> • Falls free into the water • Running in wave
Inspection	Visual inspection (Creak, Debonding & Failure)	

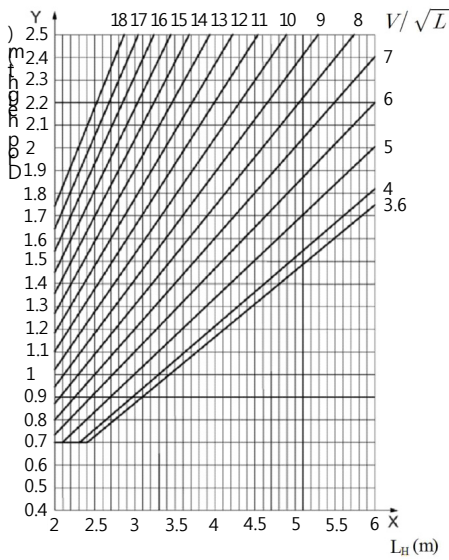


Fig. 2. Determination of drop test height

또한, 식 (1)의 결과가 2.5미터를 넘는 경우 2.5미터로, 0.7미터 미만인 경우 0.7미터로 낙하 높이를 제한한다.

$$H = 7.475 \times (V/\sqrt{L} + 16.142)^2 \times L \times 10^{-4} \text{ (m)} \quad (1)$$

단, H : 낙하높이 (m), V : 만재상태 계획속력(노트) 또는 최고속력(노트), L : 선체 전장(m), V/\sqrt{L} : 선체 속장비

또한 식 (1)의 선체의 만재상태 계획속도는 다음 식 (2) 또는 (3)으로 계산하며 식 (1)에서 $V/\sqrt{L} < 3.6$ 의 경우 V/\sqrt{L} 을 3.6으로 한다.

$$V = 0.914 \sqrt{L} (kW/\Delta)^{0.623} + 10 \quad (2)$$

$$V = 0.755 \sqrt{L} (PS/\Delta)^{0.623} + 10 \quad (3)$$

단, kW : 엔진 출력(kW), PS : 엔진 출력(PS), Δ : 선체 배수량(Ton)

4. 낙하시험 및 구조 해석

Fig. 3은 폴리에틸렌을 인장시험하기 위한 인장시험편을 나타낸 것으로 KS M 3022[13]에 규정된 형상과 치수를 이용하여 제작하였다. 인장시험편은 대림산업(주)에서 생산하는 두께 12mm인 고밀도 폴리에틸렌 시트(Daelimpoly TR-418BL)에서 취하였으며 가공시 발생하는 잔류 변형을 최소화하기 위하여 워터젯 절단기(HAMMER HEAD 510 : 3048×1549×150)를 사용하여 가공하였다.

Table 3은 Fig. 3의 인장 시험편을 이용하여 선체 재료인 고밀도 폴리에틸렌의 인장시험결과를 정리한 것으로 최대인장강도는 91MPa을 나타내고 있다.

4.1 낙하시험에 의한 가속도 측정

낙하시험은 ISO 12215-5 및 국내 규정을 만족하는 플레저 선박 낙하시험 평가시스템을 구축한 중소조선연구원의 실내 실험실에서 수행하였다. 플레저 선박의 낙하시험 평가시스템은 모션 센서(Motion sensor)와 변형률 게이지 및 가속도 센서를 이용하여 자유 낙하 시 선체의 낙하자세와 수면접촉 시 선체에 걸리는 변형률 및 슬래밍 충격력을 측정한다. 본 연구에서는 제한된 장비로 인하여 낙하시험에 따른 가속도 측정 시험만 수행하

Table 3. Mechanical properties of Daelimpoly TR-418BL

Density (kg/m ³)	Melting point (°C)	Low temperature brittle point (°C)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yielding strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Braking strength (MPa)	Elongation (%)
950	190	-110	1.1	0.42	27	27	21	810

Table 4. Light and full loads of polyethylene boat

Light load	Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Speed (knot)	Load (kg)			
					Hull	Engine	Battery	Etc.
	5.9	2.3	0.21	25	430	100	19	251
Full load	Light load (kg)			Maximum load of people on board (kg)		Fuel load (kg)		
	800			438		100		

기로 한다.

낙하 시험에 사용된 가속도 센서는 스트레인게이지 타입이며 DATA RATE는 50 KHz/ch이다. 또한 낙하시험 시 급격한 자유수면 형상변화의 관찰, 가속도, 변위, 선체와 수면과의 접촉각을 확인하기 위하여 Redlake社의 Area scan type 카메라로 초당 500회 이상의 영상을 촬영하였다.

4.2 폴리에틸렌 보트 선체의 낙하시험

ISO 12215-5의 낙하시험은 선체 전장과 속장비 및 선체 중량에 대한 규정에 따라 결정되므로 일반적으로 척에 대하여 낙하시험을 수행한다. 이하에 조등[8]이 개발한 폴리에틸렌 보트 선체에 대한 구조 안전성을 평가하기 위한 평가 절차를 나타내었다.

Table 4는 폴리에틸렌 보트 선체에 대한 낙하시험을 수행하기 위한 개발 폴리에틸렌 보트 선체의 경하 및 만재 하중을 나타낸 것으로 이 값을 기초로 낙하시험 높이와 선체적재하중을 결정하였다. 폴리에틸렌 보트 선체의 낙하 높이는 V/\sqrt{L} 와 선체 전장 L 을 각각 4.08과 5.99m를 고려하여 Fig. 2에서 구하면 1.83m이고 식 (1)에 의하여 계산된 선체 낙하 높이도 1.83m이다.

그러나 본 연구에서는 소형선체에서 발생하는 충격력을 보수적으로 구하기 위하여 Fig. 2와 식 (1)에서 제안

하고 있는 최대 낙하높이 2.5m를 본 연구 대상인 폴리에틸렌 보트의 낙하높이로 선정하였다. Table 4는 낙하시험을 위한 선체의 만재 중량을 나타낸 것으로 선체 두께가 10mm인 경우 선체 무게만의 무게는 430kg이다. 경하중량이 차이가 나는 것은 선체 두께에 따른 선체 자중이 다르기 때문이다. 개발 선체 낙하시험은 선체 두께가 10mm인 것을 기준으로 수행하며 개발 선체의 만재하중은 1,338kg이다.

Fig. 4는 선체의 가속도 측정 위치를 나타낸 것으로 가속도 센서를 선체의 무게 중심에 설치하였다. 또한, 낙하시험은 고속카메라(50Hz)를 이용하여 낙하 시에 선체와 수면과의 충격에 대한 가시화를 위해서 보트의 선측에서 10m 정도 떨어진 거리에 설치하여 촬영하였다.

Fig. 5는 폴리에틸렌 선체에 대한 실선 낙하시험을 고속 카메라로 측정한 결과이다. 낙하시험에 따른 선체 입수 깊이가 선체 계획 흘수선보다는 조금 더 크다. 선체 표면에 균열이나 박리 등과 같은 구조적 이상 징후는 보이지 않아 플래저 보트로서는 충분한 구조 안전성을 가진 것으로 평가된다.

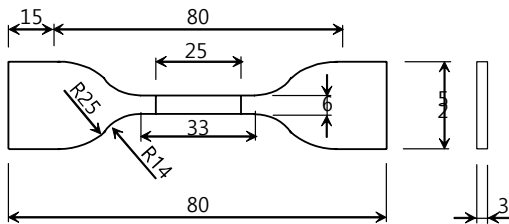


Fig. 3. Dimension of tension specimen

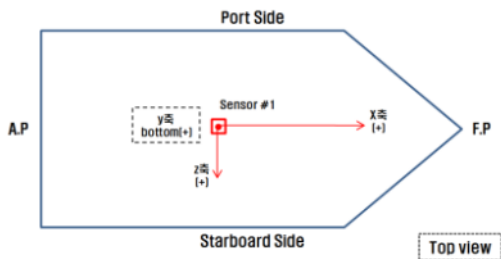
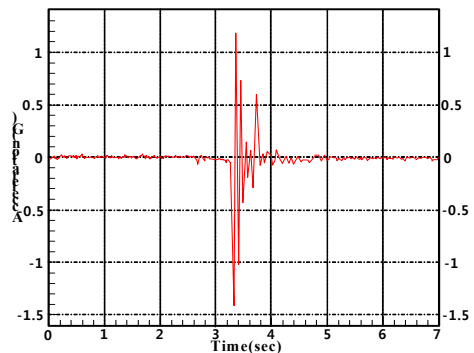


Fig. 4. Installment location of acceleration sensor



Fig. 5. Photographs of Leisure boat's drop test in RIMS's square tank



(a) X-direction

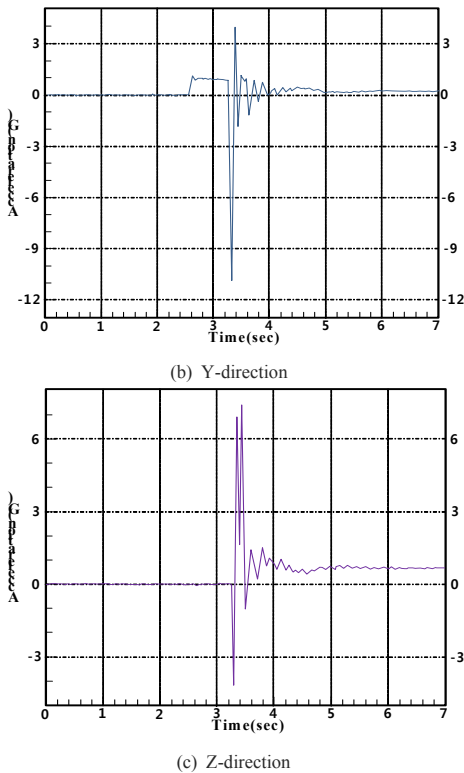


Fig. 6. Acceleration response at Location 1 (Unit: G)

Fig. 6은 선체 낙하시험에서 측정된 충격 가속도를 나타낸 것이다. 충격 가속도는 낙하 시 발생하는 다양한 진동 및 감쇄특성으로 인하여 +와 - 값을 동시에 나타내고 있다. 이상의 결과를 기초로 최대와 최소 가속도를 나타낸 것이 Table 5이다. 물리적으로 낙하순간으로 평가되는 것은 최소 가속도를 보일 때이며 Y축 방향이 가장 크게 나타나고 있으며 그 다음이 선측방향이고 가장 적은 가속도를 보이는 것은 선수방향임을 알 수 있다.

KBC 2017[14]과 EN 1317(CEN, 1998)[15] 및 AASHTO Guide(2009)[16]등의 구조설계규격에서는 건축과 차량 및 선박에서 발생하는 충격하중에 대한 구조해석방법으로 등가정하중해석에 의한 정적구조해석방법과 동하중에 의한 동적구조해석으로 제안하고 있다. 이중 구조물에 실질적으로 작용하는 동하중을 이용한 동적구조해석을 수행하는 것이 제품의 구조 신뢰성을 가장 확실하게 확보할 수 있으나 현실적으로 수행하는 데 상당한 시간과 경비가 많이 소요된다. 따라서 해당 구조체 설계현장에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 충격하중에 대한 구조해석을 등가정하중을 이용한 정적구조

해석하는 것을 주로 이용하고 있다. 즉, 각 구조물에서 발생하는 응답가속도스펙트럼을 측정하고 이 중에서 가장 큰 최대가속도를 각 구조물의 정적 질량에 곱하여 해당 구조물에 작용하는 충격하중인 등가정하중을 구한다. 이러한 등가정하중을 정적구조해석에 적용하여 적절한 구속조건을 경험적으로 부여하여 구한 최대응력이 설계 응력 아래에 있는지에 대한 검토를 통하여 해당 구조물의 안전성을 평가한다. 본 연구에서도 개발 보트 선체의 구조 신뢰성을 보수적으로 확보하기 위하여 상술의 구조설계규격에서 사용하는 방법과 동일하게 사용하기로 한다. 즉, 선체에 작용하는 충돌하중과 운동량을 계산하는 방법으로 다음 식 (4)와 식 (5)에 각각 그 방법을 나타내고 있다. 따라서 선체 충돌하중은 뉴턴의 운동 제2법칙인 가속도 법칙을 이용하여 선체만재질량과 각 방향에 따른 가속도를 곱하면 되며 선체에 부하되는 충격 운동량은 선체만재질량과 선체에 부하되는 속도 변화량으로 계산되고 본 연구의 경우 낙하시험이기 때문에 속도 변화량을 낙하 높이 h 로 나타낼 수 있다. 따라서 낙하하중에 의한 충격하중 F_i 는 각각 선체만재질량과 Table 5의 각 방향에 따른 최대가속도를 곱하여 구하였으며 낙하하중에 의한 충격량 I 는 선체만재질량과 낙하 높이 h 로 구하였다. 그 결과를 Table 6과 Fig. 7에 선체 두께에 따른 충격하중과 운동량을 각각 정리하여 나타내었다. 특히, 이러한 방법은 선체에 입력되는 운동량이 적어 소성변형이 발생되지 않는 탄성충돌해석에 매우 유효하며 선체 두께에 따른 운동량을 Fig. 7에 표시하였다. Lee등[17]이 수행한 선체 탄소성 충돌해석에서 구한 운동량 $3 \times 10^7 \text{kg}\cdot\text{m/s}$ 인 것을 고려하면 매우 낮은 운동량을 보여 본 선체의 구조해석으로 상술의 구조설계규격에서 제시하는 등가정하중을 이용한 정적구조해석을 이용하는 것에 큰 무리가 없는 것으로 생각된다.

$$F_i = m \left(\frac{dV}{dt} \right)_i = ma_i \quad (4)$$

$$I = m \Delta V = m \sqrt{2gh} \quad (5)$$

단, F_i : x, y, z 방향의 충격하중(N), V_i : x, y, z 방향의 속도(m/s), t : 낙하시간(Sec.), a_i : x, y, z 방향의 가속도(m/s²), I : 운동량 (kg·m/s), m : 선체경하질량 (kg)

4.3 폴리에틸렌 보트 선체의 낙하구조해석

Fig. 8은 낙하시험해석을 위한 유한요소모델의 경계 및 하중조건을 나타낸 것이다. 경계조건은 계획 흡수선을 기준으로 상부에 부여되며 선체 상부는 X축과 Y 및 Z축 방향으로 병진과 회전운동이 제한된다. 또한 하중조건은 계획 흡수선 하부에 부여되며 선체 하부는 종방향과 횡방향으로 양 측면에서 선체를 압축하는 방향으로 그 힘을 가하며 선체 수직 상 방향으로 가장 큰 힘을 부여하였다. 유한요소모델은 절점이 253,907개이고 요소가 122,950이고 유한요소해석은 정적 구조 해석을 수행하였다.

Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 낙하 시험 시 발생하는 응력과 총변형률을 각각 나타낸 것이다. 선체 두께에 관계없이 선체 하부 중앙부근에서 큰 총변형률과 응력이 동시에 발생되고 있다. 따라서 플래저 보트의 경우 낙하시험을 통과하려면 구조적 안전성이 가장 요구되는 선체 하부 중앙부에 상당한 단면계수가 필요함을 알 수 있다. 이상의 결과를 선체 두께에 따른 최대 응력 및 총변형률을 수치적으로 정리한 것이 Fig. 12이다.

Table 5. Measurement results of impact accelerations

Measuring positions	Measuring directions	Max. impact accelerations (G)	Min. impact accelerations (G)
Location 1	X	1.172	-1.405
	Y	3.850	-10.818
	Z	7.387	-4.332

Table 6. Load condition of drop test analysis

Hull thickness (mm)	F_{X1} (N)	F_{X2} (N)	F_{Y1} (N)	F_{Y2} (N)	F_z (N)
4	-24420	24420	-3960	3960	71280
6	-27121	27121	-4398	4398	79164
8	-29822	29822	-4836	4836	87048
10	-32486	32486	-5268	5268	94824
12	-35187	35187	-5706	5706	102708
14	-37851	37851	-6138	6138	110484

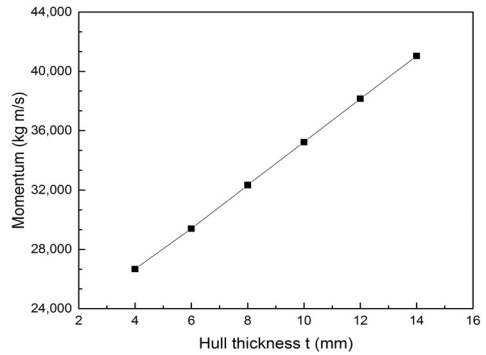


Fig. 7. Momentum of polyethylene boat hull in drop test

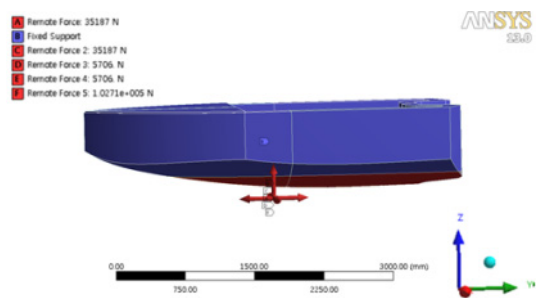
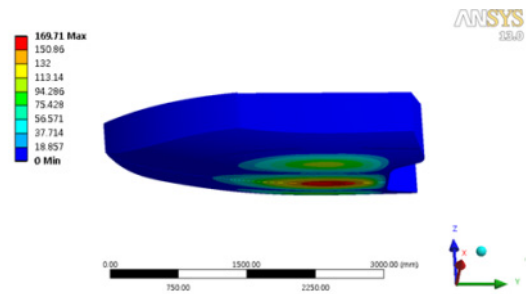
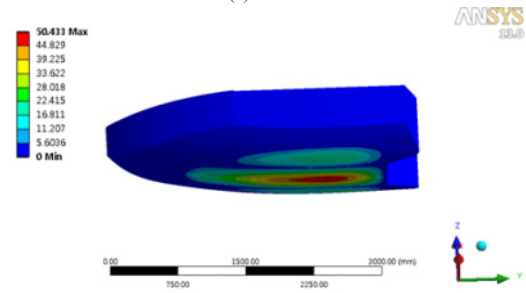


Fig. 8. Load and boundary conditions of Finite element model for drop test analysis



(a) 4mm



(b) 14mm

Fig. 9. Von-Mises stress distribution in polyethylene boat subjected to drop impact force

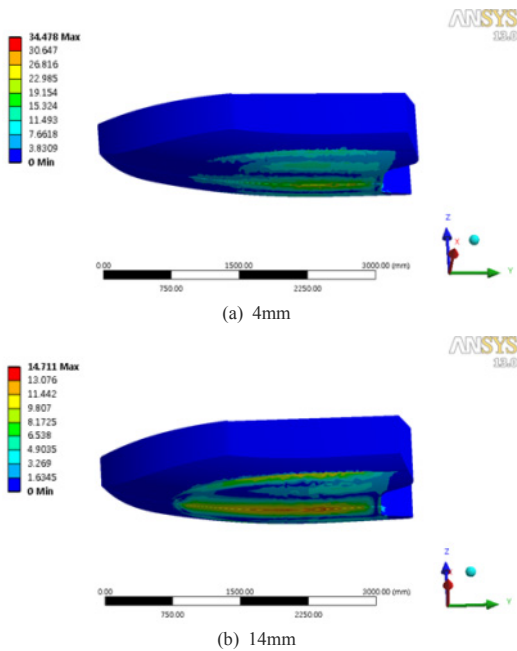


Fig. 10. Total deformation distribution in polyethylene boat subjected to drop impact force

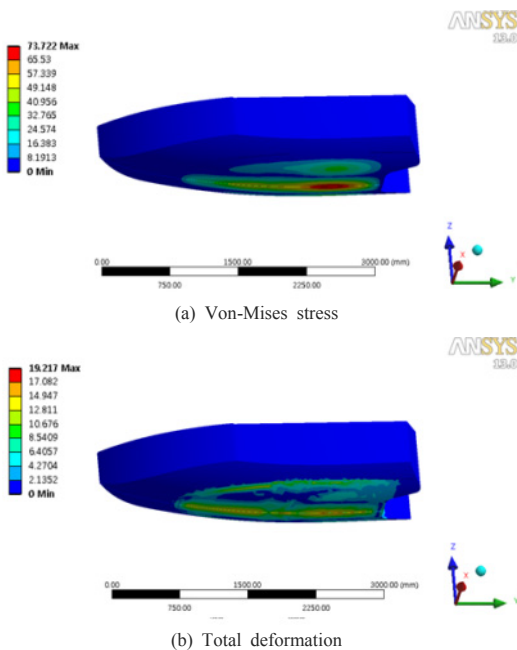


Fig. 11. Von-Mises stress and total deformation distribution in polyethylene boat subjected to drop impact force (Hull thickness 10mm)

Fig. 12 (a)에서 선체 두께가 7.4mm이하에서는 선체 낙하 시험 시 발생하는 응력이 선체의 인장응력을 초과 하게 된다. 즉, 선체 두께가 7.4mm이하의 폴리에틸렌 선체의 경우 낙하 시험 시 소성 변형 및 파손이 진행될 수 있어 구조적 안전성 관점에서 폴리에틸렌 선체는 그 두께를 7.4mm이상은 확보해야 선체로서의 최소한의 구조 성능을 입증할 수 있다.

한편, ISO 12215-5의 구조설계치수규격[18]에 의하면 선체 길이가 2.5m이상 24m이하의 레저보트 및 요트를 설계하는 경우 선체 외판 두께는 크게 선체 사용 재료에 의하여 결정되며 그 재료로는 FRP와 강 및 알루미늄으로 나눌 수 있다. 다음 식 (6)은 단일 선체 외판의 최소 두께 t 를 구하는 식이다. 여기서 선체설계응력 σ_d 는 FRP를 기준으로 최소 최종 휨 강도의 50%로 설정하고 연강과 알루미늄을 기준으로 최소 최종 인장강도의 60%로 설정하였다. 따라서 각 재료의 인장강도로 ISO 12215-5의 첨부자료 C와 F[19]에서 추천하고 있는 선체 재료들의 인장강도 평균값을 이용하면 FRP와 연강 및 알루미늄의 인장강도는 각각 206 MPa, 453MPa, 268MPa이다. 즉, FRP 선체의 설계응력은 103MPa, 강 선체의 설계응력은 272MPa, 알루미늄 선체의 설계응력은 161MPa로 설정하였다.

또한, 광등[20]에 의하면 6m미만의 폴리에틸렌 선체에 대한 선체 압력 P 는 선저압력과 선측압력 및 갑판압력으로 분류할 수 있으며 그 중에서 가장 큰 압력은 선저압력으로 14kPa로 제안하고 있으며 본 연구에서는 식 (6)의 선체 압력 P 로 이 값을 사용한다.

$$t = b \times k_c \times \sqrt{\frac{P \times k_2}{1000 \times \sigma_d}} \quad (6)$$

단, t : Minimum required thickness of plating (선체의 판두께(mm))

b : Short dimension of the panel (패널의 짧은 쪽 길이(500mm))

P : Design pressure for the panel (패널의 설계 압력(kN/m^2))

k_c : Curvature correction factor for curved plates(곡선패널의 곡률수정계수=1)

k_2 : Panel aspect ratio factor for bending strength (굽힘강도에 대한 패널 중횡비 계수=0.4)

σ_d : Design stress for hull plating
 (선체 외판에 대한 설계 응력(N/mm^2))

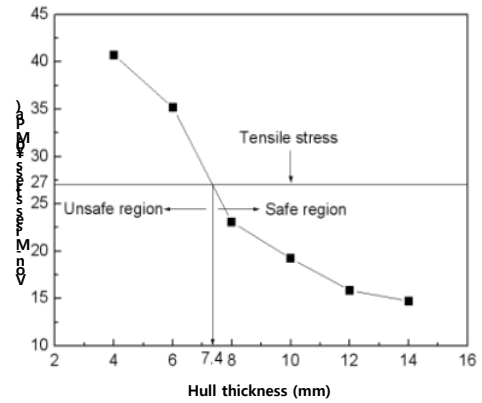
따라서 FRP와 알루미늄, 강의 선체외판 두께는 각각 3.68mm, 2.94mm, 2.27mm이다.

본 연구에서 사용하는 선체재료인 고밀도폴리에틸렌의 경우 ISO 12215-5의 구조설계치수규격의 공식적인 선체재료는 아니므로 ISO 12215-5의 구조설계치수규격을 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 조[17]에 의하여 수행된 6m미만의 폴리에틸렌 보트에 대한 구조해석결과와 ISO 12215-5의 구조설계치수규격[14]에서 제안하고 있는 선체설계응력개념을 결합하여 비규격선체재료인 고밀도 폴리에틸렌으로 제작된 선체의 두께를 결정하고자 한다. 즉, 고밀도폴리에틸렌 선체의 설계응력은 고밀도폴리에틸렌 재료의 최소 최종 인장강도의 60%인 16.2MPa이다.

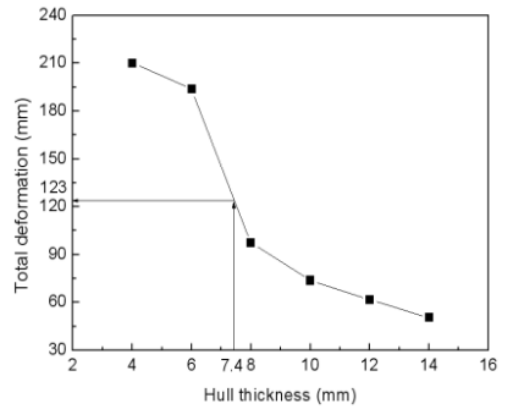
Fig. 13은 조[21]에 의하여 수행된 6m미만의 폴리에틸렌 보트에 대한 구조해석결과를 나타낸 것으로 선체하중을 소형선체의 구조설계규격인 ISO 12215-5의 설계압력을 사용하였다. 그림에서 고밀도 폴리에틸렌 선체의 설계응력 16.2MPa를 적용하면 선체 두께는 5.6mm 임을 알 수 있다.

Fig. 14는 이상의 결과를 기초로 각 선체 재료에 대한 선체 설계 두께를 나타낸 것이다. 선체 재료 두께 중 고밀도 폴리에틸렌 선체 두께가 가장 두껍고 강선 선체 두께가 가장 얇으며 그 차이는 전자의 선체 두께가 후자의 선체두께에 비하여 3배 이상이 된다.

한편, ISO 12215-5의 낙하시험규격을 이용하여 결정한 폴리에틸렌 선체 두께는 ISO 12215-5의 구조설계압력규격을 이용하여 결정한 폴리에틸렌 선체 두께 치수에 비하여 1.3배 정도 더 두껍다. 이러한 결과는 ISO 12215-5의 낙하시험규격에 의한 선체 하중이 ISO 12215-5의 구조설계압력규격에 의한 선체 하중에 비하여 더 크다는 것을 의미하며 ISO 12215-5의 낙하시험규격이 ISO 12215-5의 구조설계압력규격에 비하여 더 보수적이라는 것을 나타내고 있다.



(a) Von-Mises stress



(b) Total deformation

Fig. 12. Maximum Von-Mises stress and total deformation according to hull thickness

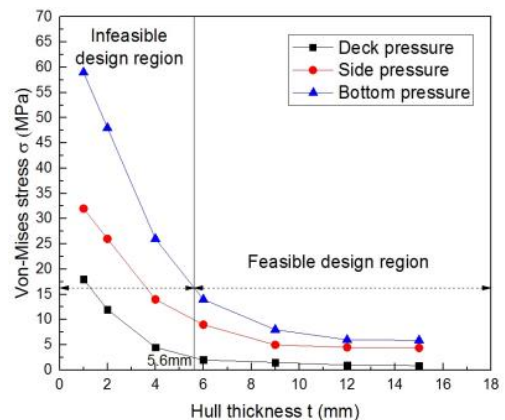


Fig. 13. Relationship between hull thickness and Von-Mises stress

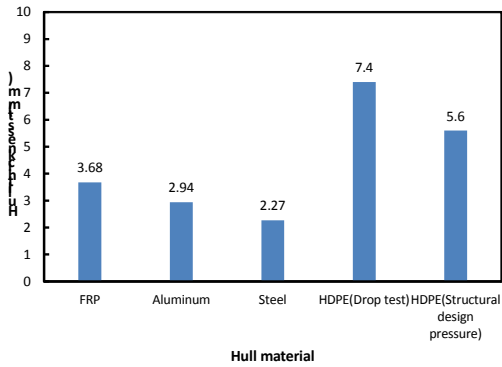


Fig. 14. Hull material and hull thickness

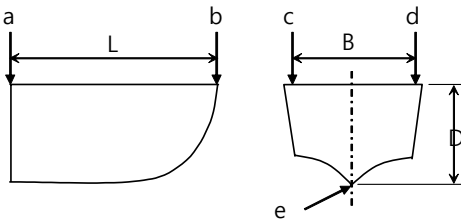


Fig. 15. Measurement of plastic deformation of polyethylene boat hull subjected to drop test load

따라서 비선체재료로 제작된 플레저 보트의 경우 ISO 12215-5의 구조설계압력규격으로 제작하게 되면 ISO12215-5의 낙하시험규격을 통과 못하게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 ISO 12215-5의 구조설계압력규격으로 제작하더라도 반드시 ISO 12215-5의 낙하시험규격도 동시에 검토해야 한다. 즉, 비선체재료로 제작되는 플레저 보트의 경우 구조설계단계부터 ISO 12215-5의 낙하시험규격을 이용하여 설계해야 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 폴리에틸렌 보트의 낙하시험에서 발생하는 선체의 소성 변형량을 계측하기 측정 위치를 나타낸 것이다. 즉, 보트 전장에서 발생하는 최대 소성 변형량을 측정하기 위하여 선체의 선미와 선수부 상부에 2개소, 폭 부분의 최대 소성 변형량을 측정하기 위하여 양현의 횡방향 2개소, 깊이의 최대 소성 변형량을 측정하기 위하여 블워크(Bulwark) 상부 1개소와 선저 최저 부분 1개소를 이용하였다. 즉, Fig.15에서 보트 전장 L은 a위치와 b 위치 사이의 거리, 보트 폭 B는 c위치와 d위치사이의 거리, 보트 깊이 D는 d위치와 e위치사이의 거리를 측정하여 구하였다. Table 7은 개발된 폴리에틸렌 보트의 낙하시험에서 구한 선체 치수의 소성 변형량을 구한 것이

다. 폴리에틸렌 보트 선체에 과도한 충격하중이 입력되었음에도 선체에서 발생하는 최대 소성 변형량은 선체 깊이가 3mm, 선체 전장이 2mm, 선체 폭이 1mm이다. 즉, 선체 깊이의 최대소성변형률은 0.2%, 선체 전장의 최대소성변형률은 0.03%, 선체 폭의 최대소성변형률은 0.05%로 선체 깊이가 가장 큰 소성 변형량을 보이고 있으나 재료의 항복응력기준이 소성변형율 0.2%가 발생하는 응력으로 정의하는 것을 이용하면[22] 선체 깊이도 거의 탄성 상태에 있는 것으로 파악되어져 전체 선체가 낙하시험 후에도 낙하전의 상태로 탄성회복 되었음을 알 수 있다.

Table 7. Plastic deformation of polyethylene boat hull subjected to drop test load

Item	Length Overall length L (m)	Breadth B (m)	Depth D (m)
Before drop test	5.9	2.2	1.1
After drop test	5.902	2.201	1.097
Plastic deformation	0.002	0.001	0.003

5. 결론

본 연구는 폴리에틸렌 보트선체에 대하여 낙하시험에 의한 폴리에틸렌 보트의 구조 안전성 평가를 수행한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전장 6m급 폴리에틸렌 보트에 대한 높이 2.5m에서의 낙하시험 후에 특별한 파손 흔적이 없으므로 보트가 낙하할 시에 구조 안전성이 확보되었다.
- 2) 폴리에틸렌 보트 선체 두께를 10mm로 설정하는 경우 실선낙하시험과 구조설계규격을 모두 통과하고 있어 선체 두께 10mm인 폴리에틸렌 보트의 구조 안전성은 매우 높다.
- 3) ISO 12215-5의 낙하시험규격에 의해 결정된 폴리에틸렌선체 설계두께는 ISO 12215-5의 구조설계압력규격에 의하여 결정된 폴리에틸렌선체 설계 두께에 비하여 1.3배정도 더 크게 결정되므로 ISO 12215-5의 낙하시험규격이 ISO 12215-5의 구조설계규격과 구조설계압력규격에 비하여 더 보수

적이다.

- 4) 비선체재료로 제작되는 플레저 보트의 경우 구조 설계단계부터 ISO 12215-5의 낙하시험규격을 이용하여 설계해야 한다.
- 5) 선체 두께 10mm의 폴리에틸렌 보트에 대한 ISO 12215-5의 낙하시험 결과 선체 전장과 폭 및 깊이 방향의 소성변형율이 0.2%가 되어져 낙하시험 후에도 낙하전의 상태로 탄성회복 되었다.

References

- [1] Nian-Zhong Chena and C. Guedes Soares, "Longitudinal strength analysis of ship hulls of composite materials under sagging moments", *Composite Structures*, vol. 77, pp. 36-44, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.06.002>
- [2] B. K. Hong, "A Study on the standard of ship hull construction for aluminium alloys fishing boats", *The Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, vol. 12, no. 1, pp. 22-88, 2000.
- [3] N. Z. Chen, C. G. Soares, "Reliability assessment for ultimate longitudinal strength of ship hulls in composite materials", *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 22, no. 4, pp. 330-342, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proengmech.2007.05.001>
- [4] B. Y. Kang, *Build Wooden canoe by Myself*, Mannam Press, pp. 103-108, 2007.
- [5] C. K. Park, M. G. Kim, S. S. Cho, "A study on manufacturing and structural design of leisure canoe", *Proceedings of the KSME(The Korean Society of Mechanical Engineers) 2010 Spring annual meeting*, pp. 403-404, 2010.
- [6] A. D. Drozdov, J. C. Christiansen, "Modelling the viscoplastic response of polyethylene in uniaxial loading-unloading tests", *Mechanics research communications*, vol. 30, pp. 431-442, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0093-6413\(03\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0093-6413(03)00040-5)
- [7] X. Q. Wang, N. Brown, "The stress and strain fields in the neighbourhood of a notch in polyethylene", *Polymer*, vol. 30, pp. 456-461, 1989.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(89\)90215-2](https://doi.org/10.1016/0032-3861(89)90215-2)
- [8] S. S. Cho "Structural design of polyethylene boat by longitudinal bending strength test method," *The Korean Society of Mechanical Engineers, 2015 spring and fall annual meeting*, pp. 141-142, 2015.
- [9] Ministry of Oceans and Fisheries (Korean), *Marine leisure ships guideline*, Ministry of Oceans and Fisheries, pp. 36-38, 2013 (Korean).
- [10] ISO 12215-5, *Small craft-Hull construction and scantlings-Part 5 : Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination*, pp. 49-51, ISO, 2008.
- [11] S. S. Cho, "A Study on Hull Form Development of Polyethylene Boat," *Journal of the Korea*

Academia-Industrial cooperation Society. vol. 14, no. 10 pp. 4726-4732, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.10.4726>

- [12] W. M. Kwak, *A study on the Hull Product Design of Polyethylene Boat*, pp. 45-48, Master thesis, Graduate School of Industry & Science, Kangwon National University, 2013.
- [13] KS, *Testing method for tensile creep of plastics*, pp. 1-13, KS, 2012.
- [14] KBC 2017, *South Korean standard for steel building structures*, MOLIT(Ministry of land, infrastructure and transport in South Korea), pp. 41-60, 2017.
- [15] EN 1317, *Road restraint systems*, CEN (the European Committee for Standardization), pp. 23-45, 2010.
- [16] Y. G. Bae, S. L. Lee, "Ship Collision Risk Assessment and Sensitivity Analysis for Sea-crossing Bridges", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 33, no. 5, pp. 1753-1763, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.5.1753>
- [17] H. J. Lee, S. H. Yun, T. H. Park, "Ship Collision Damage Analysis of Bridge Structure," *Proceedings of the KCI 2010 spring meeting*, pp. 593-594, KCI (Korea concrete institute), 2010.
- [18] ISO 12215-5, *Small craft-Hull construction and scantlings-Part 5 : Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination*, pp. 28-31, ISO, 2008.
- [19] ISO 12215-5, *Small craft-Hull construction and scantlings-Part 5 : Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination*, pp. 52-79, ISO, 2008.
- [20] W. M. Kwak, *A study on hull product design of polyethylene boat*, pp. 73-81, Master thesis, Graduate School of Industry & Science, Kangwon National University, 2013.
- [21] S. S. Cho, "Study of Structural Design of Polyethylene Pleasure Boat," *KSME(A)*, vol. 36, no. 12, pp. 1551-1561, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.3795/ksme-a.2012.36.12.1551>
- [22] N. E. Dowling, *Mechanical behavior of materials*, pp. 112-114, Prentice-Hall Inc., 1999.

이성룡(Sung-Riong Lee)

[정회원]



- 1983년 2월 : 동아대학교 대학원 금속공학과 (공학석사)
- 1990년 8월 : 동아대학교 대학원 금속공학과 (공학박사)
- 1994년 11월 ~ 1996년 9월 : (주) 세강열처리, 대표이사
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 재료금속공학과 교수

<관심분야>

화학금속학, 철강공학, 금속열역학

조 석 수(Seok-Swoo Cho)

[정회원]



- 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 1997년 8월 : 창원 문성대학교 기계과 전임강사
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 기계설계공학과 교수

<관심분야>

재료강도학, 구조최적설계

강 경 주(Gyung-Ju Kang)

[정회원]



- 1997년 2월 : 부산대학교 대학원 항공우주공학과 (공학사)
- 1999년 2월 : 부산대학교 대학원 항공우주공학과 (공학석사)
- 2005년 8월 : 부산대학교 대학원 항공우주공학과 (공학박사)

<관심분야>

소성가공, 구조설계