<응용논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.2.279 ISSN 1226-4873

소형 복합재료 프로펠러를 위한 복합재료 몰드 평가§

팜탄누트* · 염 영 진*†
* 울산대학교 기계공학부

Evaluation of Composite Mold for Small Composite Propeller

Pham Thanh Nhut* and Young Jin Yum*†
* School of Mechanical Engineering, University of Ulsan,

(Received July 9, 2012 ; Revised October 15, 2012 ; Accepted October 29, 2012)

Key Words: GRPG(유리섬유/폴리에스터 겔코트), Small Propeller(소형프로펠러), Mold(몰드)

초록: 소형 복합재료 프로펠러를 제작하기 위한 기존의 알루미늄 몰드를 복합재료 몰드로 대체하기 위한 타당성 연구를 수행하였다. 소형 알루미늄 프로펠러의 세 날개는 복합재료 몰드를 만들기 위해 플러그로서 사용되었다. GRPG 복합재료 몰드와 프로펠러는 실내온도에서 압축과 진공법을 이용하여 불포화된 폴리에스테르 수지, Epovia 겔코트, 우븐과 매트 유리 섬유 등으로 만들어졌다. 표면의 경도와 거칠기, 압축과 흡입 몰드에 의한 강도와 변형은 실험에 의해 결정되었다. 결과는 ISO 484/2 규격과 몇몇의 알루미늄 합금과 비교되었다. 결과로부터 몰드의 변형은 날개 두께에 관한 공차를 만족하는 것을 알 수 있었다. GRPG 복합재료 몰드의 몇 가지 특징은 알루미늄 합금 몰드보다 좋았으며(표면의 매끈함, 중량, 작동 능력과 비용), 다른 몇 가지 특징들은 비슷하였다(분리 능력과 라이프 사이클). 결과적으로 복합재료 몰드는 소형 복합재료 선박 프로펠러를 만들기에 적합한 것을 알 수 있었다.

Abstract: The feasibility of substituting a composite mold for an aluminum mold in the fabrication of a small ship propeller was investigated. A small three-blade aluminum propeller was used as a plug for manufacturing the composite mold. A GRPG composite mold and propeller were made from an unsaturated polyester resin, Epovia gelcoat, and woven and mat glass fibers using the compression and vacuum method at room temperature. The hardness and surface roughness and the strength and deformation of the compression and suction molds were experimentally determined. The results were compared with the ISO 484/2 standard and some aluminum alloy materials. The results showed that the deformation of the mold satisfied the tolerance of the thickness of the blade. Some characteristics of the GRPG composite mold were better than those of the aluminum alloy mold (surface smoothness, weight, performance, and cost), and some characteristics were similar (detachment ability and life-cycle). Therefore, the composite mold is considered suitable for the fabrication of a small composite ship propeller.

1. 서 론

높은 비 강도, 강성, 하중과 같은 좋은 성질 때문에 복합재료는 항공, 자동차, 소형 선박의 파이프, 풍력 터빈 날개 등과 같은 많은 분야에서 사용되고 있다. 해양 분야와 관련하여 복합재료는 선체, 갑판, 칸막이 벽 그리고 배의 프레임 등에 주로 사용된다. 특히 그것들은 프로펠러와 배의 방향타 같은 다른 중요한 장비에도 적용된다.

프로펠러는 회전 운동을 추진력으로 바꿈으로써 동력을 전달하는 송풍기의 한 형태이다. 프로펠러는 선미 뒤 매우 열악한 환경에서 회전과 전진 운동을 수행하고 바닷물은 복합적인 자연환경이면서 프로펠러가 작동하는 주 환경이다.[1]

그러므로 프로펠러에 작용하는 힘들은 동수압(hydrodynamic pressure), 부유물의 충격 등이 포함되며 복합적이다. 프로펠러가 물속에서 작동할 때, 굽힘 및 비틀림 하중 외에도 표면 위의 궤식(cavitaional erosion, 潰蝕) 현상에 의해 손상이 생긴다. 따라서, 프로펠러에 요구되는 기하학적 특

§ 이 논문은 대한기계학회 2012 년도 울산지회 춘계학술대회(2012. 5. 11., 울산대) 발표논문임

† Corresponding Author, yjyum@ulsan.ac.kr

징들은 매우 복합적이다.

많은 해상용 프로펠러들은 청동이나 강철과 같은 금속물질로 만들어지고 있다. 최근 프로펠러를 금속에서 섬유강화 플라스틱 복합재료로 대체하여 사용하고 있는데 복합재료 프로펠러의 장점은 더 가볍고 내부식성이 있다는 것이다. 다른 중요한 장점은 복합재료 프로펠러의 변형이 그 성능을 개선시키기 위해 제어될 수 있다는 점이다.[2] 원하는 형상을 얻기 위하여 금속 프로펠러는 캐스팅과 밀링 방법을 이용하여 만들어지지만 복합재료 프로펠러는 오직 캐스팅법으로만 만들어진다. 대부분 복합재료 프로펠러의 캐스팅 몰드는 알루미늄 합금으로 만들어진다.[2,3](Fig. 1)

복합재료 프로펠러와 그 제조 방법과 관련된 연구가 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다. Ching-Chieh Lin 등[2]은 Toho HTA1200 탄소섬유/ACD8801 에폭시의 프리프레그로부터 금속몰드를 이용하여 프로펠러 모델을 만들었다. Jukka Tervamaki [4]는 기존의 프로펠러를 플러그로 이용한 개방형 몰드를 사용하여 양 날의 복합재료 프로펠러를 만드는 단순한 방법을 발표하였다. Amanda Jacob [5]는 수지충전공정(RTM : Resin Transfer Molding)으로 해상용 복합재료 프로펠러를 만드는 방법을 제시하였고, 이 방법의 장점을 언급하였다.

본 연구에서는 소형 복합재료 프로펠러를 제작하기 위한 기존의 알루미늄 몰드 대신 복합재료 몰드를 사용하기 위하여 소형 알루미늄 합금 프로펠러 모델을 이용하려고 한다. 이 모델로부터 복합재료 몰드를 제작하고 몰드 표면의 경도와 거칠기, 강도와 변형 그리고 몰드의 압축력을 실험으로 측정하려고 한다. 실험결과를 알루미늄과 비교하고 ISO 규격 만족 여부를 검토하여 복합재료 프로펠러 제작을 위한 복합재료 몰드의 적용 가능성을 평가하려고 한다.

2. 재료와 작업과정

2.1 재료와 프로펠러 모형

복합재료 몰드와 프로펠러를 만들기 위해 불포화 폴리에스테르 수지, Epovia gelcoat 그리고 유리섬유 (woven 360g/m^2 & mat 300g/m^2)를 준비하였다. 프로펠러 모델의 특징은 Table 1 과 같다.

Table 1 Characteristics of propeller model

Parameter	Subscript	Unit	Result
Material	Al	-	Aluminium
Number of blade	z	-	3
Diameter	D_P	mm	295.2
Pitch	P	mm	279
Area ratio	A/A_0	-	0.51

2.2 제작과정

알루미늄 프로펠러 모델에 이형제(Poliwax P600)를 도포하고 실내온도에서 압축 및 진공 방법을 이용하여 몰드를 제작하였다. 그리고 이 몰드를 사용하여 같은 조건에서 복합재료 프로펠러를 제작하였다.

2.2.1 몰드 제작과정

몰드는 다섯 개의 부분으로 나누어지고 코어 부분을 뺀 나머지 네 부분만 복합재료로 만들었다 (Fig. 2,3). 흡입몰드는 선박의 진행방향 몰드 부분이고 압축몰드는 몰드의 나머지 부분이다.

압축과 흡입 몰드를 이형제(Poliwax P600)로 닦은 후 Epovia 겔코트를 프로펠러 모델(플러그) 표면에 0.8mm 두께로 칠하였다. 이 과정을 각각 0.4mm 씩 둘로 나누어 수행하였다. 겔코트 레이어가 경화된 후 매트/우븐/매트/우븐 섬유 레이어와 폴리에스테르 수지를 차례로 전체 두께 2.4mm가 되도록 쌓았다. 바깥쪽과 안쪽 실린더 몰드는 비슷한 방법으로 PVC 플라스틱 파이프 플러그를 가지고 2.4mm(4 layers)와 3mm(5 layers)두께로 매트만으로 만들었다. 이 때 15 분 동안 진공백 공정

Fig. 1 Aluminium alloy mold of blade

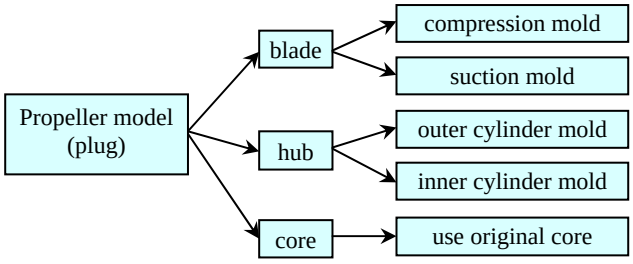

Fig. 2 Parts of composite mold

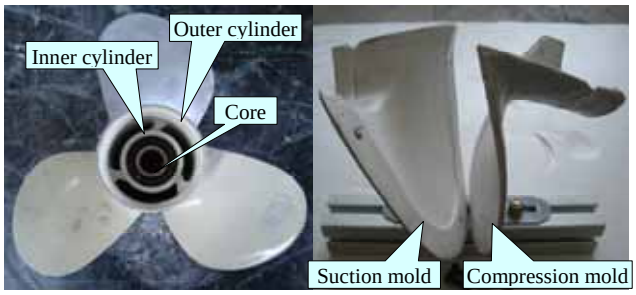

Fig. 3 Propeller model and mold product

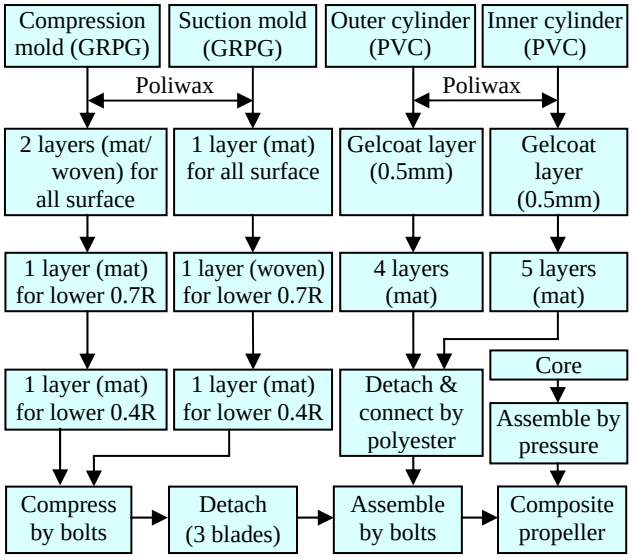

Fig. 4 Chart of manufacturing process

을 수행하였다. 몰드의 두 부분을 플러그로부터 떼어내고 둘레 부분에 세 개의 구멍을 뚫었다. 알루미늄 프로펠러와 복합재료 몰드는 Fig. 3 과 같다.

2.2.2 프로펠러 제작과정

복합재료 몰드의 이형제는 똑같이 Poliwax P600 이다. 반경방향을 따른 두께의 변화 때문에 유리섬유는 다른 반경에 대해 다르게 적용을 하였다 (overall, lower 0.7R and lower 0.4R surface). 복합재료 (GRP)프로펠러의 제조과정과 결과물은 Fig. 4 와 5 에 나와 있다.

3. 실험과 평가

3.1. 실험

표면의 경도와 거칠기, 변위(강도는 제한 공차 조건을 따름), 압축과 흡입 파트의 변형, 두 파트가 합쳐져 압축될 때의 압축력을 알기 위해 몰드를 테스트 하였다. 세 개의 시편을 만들어 테스트 하였고 평균값을 기록하였다.

Table 2 Hardness of materials

Material	Type	Unit	Result
Gelcoat composite	Glassfiber/Polyester/ Gelcoat (GRPG)	HV	97.3
Aluminium alloy	1050	HV	49.1
Aluminium alloy	6063-T5	HV	70.0

Fig. 5 Composite propeller product

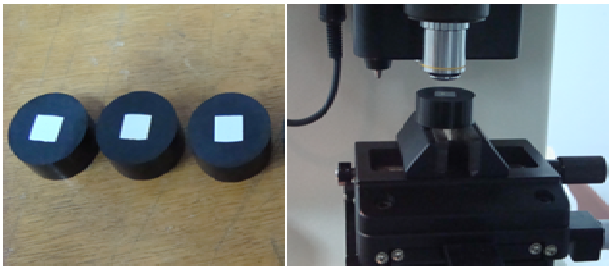

Fig. 6 Hardness specimens and testing

Fig. 7 Roughness testing

3.1.1 몰드의 표면 경도

시편은 세 가지 재료; 겔코트 복합재료, Al-1050 그리고 Al-6063-T5 와 함께 BUEHLER 장비로 만

Table 3 Roughness of materials

Material	Type	Unit	Result
Gelcoat composite	GRPG	μm	0.05
Aluminium alloy	1050	μm	0.18
Aluminium alloy	6063-T5	μm	0.20

Fig. 8 Bending and compression testing

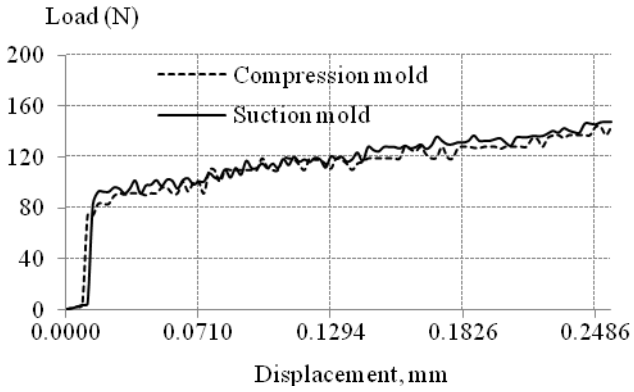

Fig. 9 Load-displacement of mold only

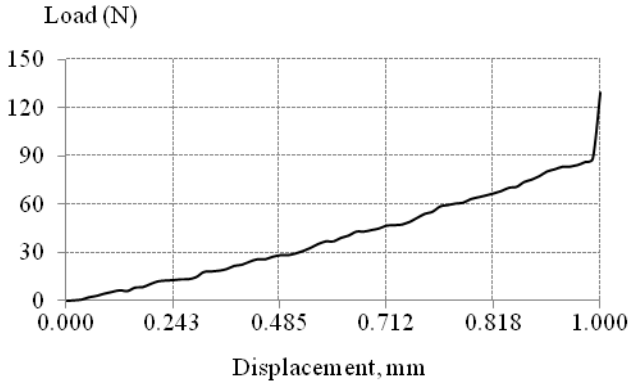

Fig. 10 Load-displacement of mold and mixture inside

들었다. 경도는 MMT-7(Fig. 6) 실험장비로 측정하였다. 실험결과는 Table 2 에 나타냈다.

3.1.2 몰드의 표면 거칠기

시편은 경도시험의 경우와 같은 재료의 평판(60x100x3mm)이다. 거칠기는 MITUTOYO SURFTEST-

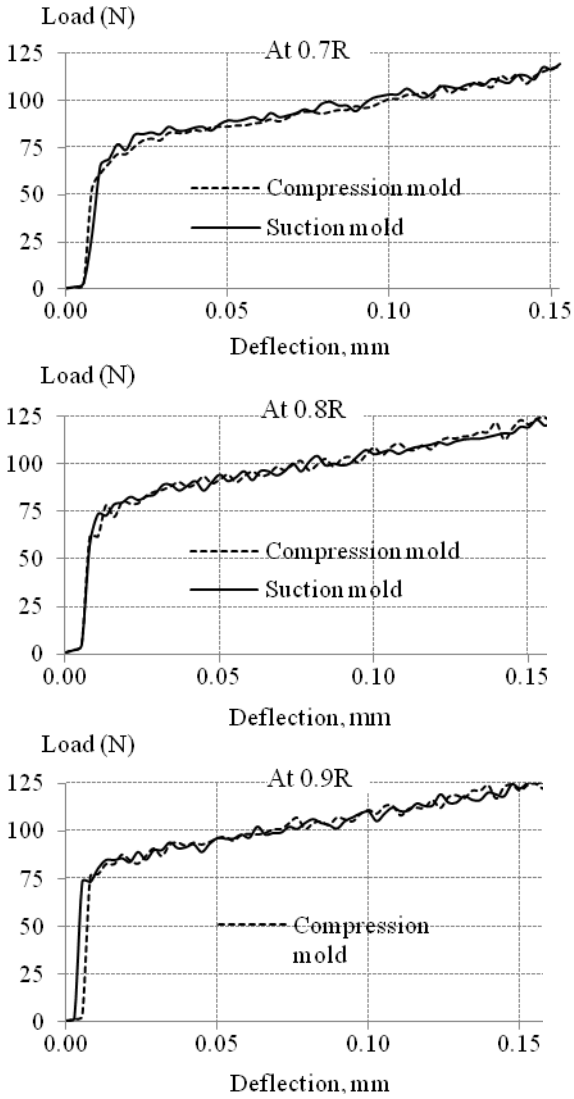

Fig. 11 Results of deflection along radius

301 장비(Fig. 7)로 측정하였다. 실험결과는 Table 3 에 나타냈다.

3.1.3 몰드의 강도

압축과 흡입 몰드는 굽힘과 변위의 관계를 알기 위해 Fig. 8 의 지지상태에서 최대처짐이 발생할 것으로 예측되는 날개중앙의 굽은 부분(0.6R, R – radius of propeller)에 압축하중을 가하였다. 그리고 나서 폴리에스테르/유리섬유 복합재료는 몰드 두 파트 사이의 1mm 틈을 가지고 몰드 안으로 채워졌다. 압축 시험은 틈이 0 이 될 때까지 수행하였고 이로부터 최대 압축력을 얻었다. 이러한 실험들은 UTM 장비로 수행되었다(Fig. 8). 실험 결과는 Fig. 9 와 10 에 나타내었다.

3.1.4 몰드의 처짐

몰드의 처짐과 ISO 국제규격의 제한규정[6]을

비교하기 위하여 날개 중심부터 끝까지 최대 두께 선을 따라 처짐을 고려하였다. 하지만 날개의 중앙(0.6R)부터 중심까지는 두께가 증가하고 공차도 증가하지만 처짐이 감소하므로 중앙부분부터 날개 끝까지만 측정하였다. 0.6R(날개 중앙)에서의 결과는 Fig. 9 에 나와 있고 0.7R~0.9R 의 결과들은 Fig. 11 에 나와 있다.

3.1.5 표면의 변형

복합재료 몰드와 날개 표면의 변형은 제조 방법(dimension error)과 재료의 성질(Epovia gelcoat 와 불포화 폴리에스테르 수지의 경화 과정에서 발생한 수축)에 의해 발생된다. 몰드의 압축 파트가 흡입 표면보다 변형이 크기 때문에 압축 파트의 변형을 검사하였다. 측정은 몰드의 압축면, 알루미늄 프로펠러, 복합재료 프로펠러에서 수행되었고 알루미늄 프로펠러를 기준 샘플로 고려하여 3 개의 선: 1 (near trailing edge), 2 (along max. thickness), 3 (near leading edge) 을 체크하였다. 데이터는 MITUTOYO microscale 로 측정하였다. 테스트 방법과 측정 위치들은 Fig. 12 와 Table 4, 5 에 나타내었다.

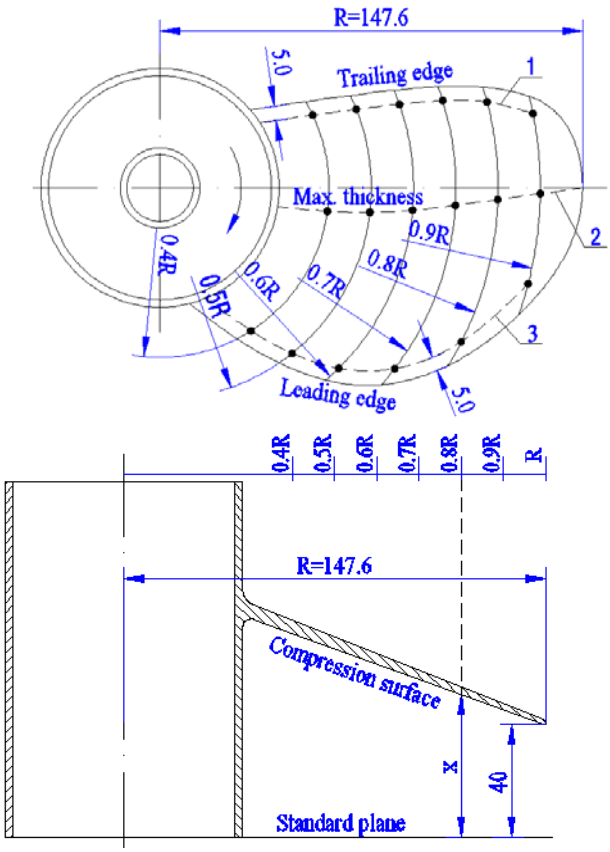

Fig. 12 Position and method of measurement

3.2 평가

실험 데이터를 처리하고 평가하여 알루미늄 몰드 또는 규범과 비교하였다.

* 표면 경도:

실험 결과로부터 GRPG 복합재료의 경도는 역시 몰드로 사용하는 알루미늄 합금 형태들보다 강하였음이 확인되었다(Al-1050 보다 거의 두 배). 즉 복합재료 몰드는 프로펠러 제작에 많은 횟수로 사용될 수 있다.

* 표면 거칠기:

Table 3 의 데이터로부터 GRPG 복합재료 몰드의 표면은 알루미늄보다 네 배 적은 0.05μm 로 매우 매끈한 것을 알 수 있다. 이것은 Epovia 겔코트 층의 성질이다. 이러한 점은 캐비테이션 현상의 영향과 프로펠러의 효율 때문에 선박 프로펠러에서 매우 중요하다.

* 굽힘 강도:

압축 제작 방법 때문에 날개의 두께 공차는 두께의 2% 미만이어야 하는 조건[6]을 만족해야 한다. Fig. 9 를 보면, 압축과 흡입 몰드의 변위는 거의 비슷하기 때문에 압축 몰드의 값이 계산에 사용되었다.

한계 변위 값[6]:

$$f_{lim} = +2\% \times t = +0.112mm$$

여기서 t 는 0.6R 에서의 값으로 5.6mm 이다.

Table 4 Coordinates of compression surface

Sample	Position (line)	Values of x, mm					
		0.4R	0.5R	0.6R	0.7R	0.8R	0.9R
Al propeller	1	38.39	39.19	39.17	38.76	39.52	41.76
	2	67.74	64.92	61.19	57.52	54.36	50.75
	3	96.54	91.47	86.81	81.9	74.42	64.01
GRPG mold	1	38.38	39.14	39.12	38.71	39.47	41.7
	2	67.74	64.9	61.16	57.48	54.32	50.71
	3	96.53	91.43	86.76	81.85	74.37	63.96

Table 5 Thickness of blade

Sample	Position (line)	Thickness of blade, mm					
		0.4R	0.5R	0.6R	0.7R	0.8R	0.9R
Al propeller	1	3.34	2.96	2.64	2.46	2.41	2.39
	2	8.97	6.94	5.61	4.75	4.23	3.84
	3	3.96	3.77	3.49	3.28	3.16	3.15
GRP propeller	1	3.31	2.93	2.62	2.45	2.40	2.39
	2	8.86	6.87	5.57	4.72	4.21	3.83
	3	3.93	3.74	3.47	3.27	3.15	3.15

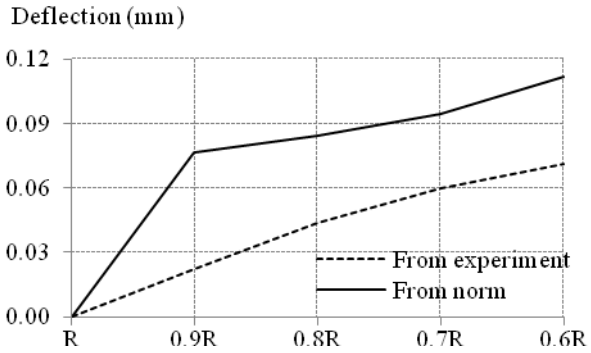

Fig. 13 Comparison of deflection

압축과 흡입 몰드의 변위가 0.6R (fexp)로 같은 한계 변위 값일 때, 세 볼트의 압축력을 얻을 수 있다(Fig. 9):

$$F_{lim} = 118/3 = 39.3N$$

반면 각 볼트에서 두 몰드 파트 사이의 최대 압축력(Fig. 10) (변위가 1mm 로 얻어질 때, 몰드의 두 파트는 접촉하는 것을 의미)은:

$$F_{max} = 88.3/3 = 29.4N$$

이 값은 F_{lim} 보다 작다. 따라서 이 복합재료 몰드를 사용하여 제작된 프로펠러는 날개 두께에 관한 공차를 만족하여 강도를 보장할 수 있게 된다.

* 몰드의 처짐:

강도 조건으로부터 0.6R 에서 F_{max} = 88.3N 이고 이 값을 Fig. 11 에 적용하여 0.7R, 0.8R, 0.9R 에서의 실험에 의한 처짐을 구하였다. 이 처짐 값들을 동일한 반경에서의 2% 두께 공차와 비교한 것이 Fig. 13 에 나와 있다. 그 결과 실험에 의한 처짐량이 공차 값보다 항상 작음을 알 수 있다. 즉 복합재료 몰드는 모든 곳에서 두께 공차 조건을 만족함을 알 수 있다.

* 표면 변형:

표면 변형은 알루미늄 프로펠러 기준 샘플과 함께 규범[6]에 의해 평가된다. Table 4 와 5 에서 변형 오차는 날개 두께를 기준으로 결정되었다. 그리고 복합재료 프로펠러(복합재료 몰드로 만든)의 날개 두께는 기준 샘플과 비교되었다. 오차와 비교의 결과는 Table 6 과 Fig. 14 와 15 에 나타냈다.

여기서 위치오차는 (GRPG Mold 위치–Al Pro.위치)/Al Pro.두께 (%)이고 두께오차는 (GRPG Pro. 두께-Al Pro.두께)/ Al Pro.두께 (%)를 뜻한다.

Table 6 Coordinate error of mold and thickness error of blade compared to Al propeller

Factor	Position (line)	Error, %					
		0.4R	0.5R	0.6R	0.7R	0.8R	0.9R
Al pro./ GRPG mold	1	0.30	1.69	1.89	2.03	2.07	2.51
	2	0.00	0.29	0.53	0.84	0.95	1.04
	3	0.25	1.06	1.43	1.52	1.58	1.59
Al/GRP propeller	1	-1.05	-1.01	-0.76	-0.61	-0.41	-0.21
	2	-1.23	-1.01	-0.71	-0.63	-0.47	-0.39
	3	-0.88	-0.80	-0.57	-0.30	-0.25	0.00

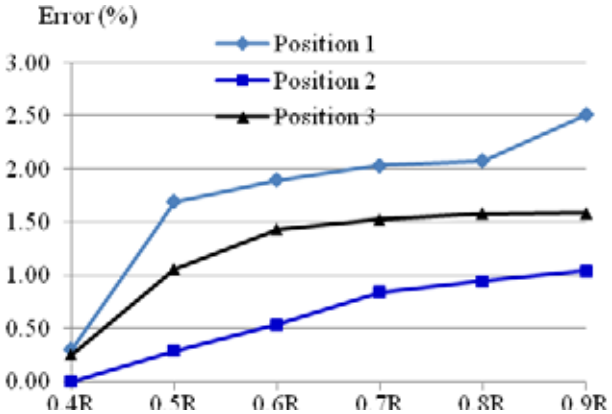

Fig. 14 Error of Al propeller/GRPG mold pair

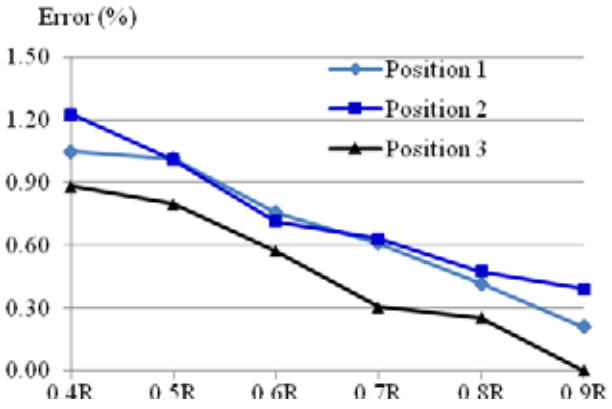

Fig. 15 Error of Al propeller/GRP propeller pair

Fig. 14 와 같이 알루미늄 프로펠러와 GRPG 몰드 사이의 치수오차는 대부분 2%보다 작은 것이 확인되었고 따라서 규범(≤ 2%)을 만족하였다. GRPG 몰드의 변형은 0.4R 근처에서 매우 낮았고 날개 끝부분에서 최대로 증가하였다. 라인 1(날개 뒷전 부근)에서는 가장 크게, 라인 2(최대 두께)에서는 가장 낮은 오차를 가진다. 몰드의 치수오차가 일정하지 않은 이유는 몰드의 변형이 위치에 따라 다르기 때문이다. Fig. 15 는 알루미늄 프로

펠러/GRP 프로펠러 쌍의 두께 오차가 무시할 만하고 (1.23% 미만), GRPG 몰드와는 거의 반대 경향을 보이고 있음을 나타낸다. 최대값은 허브 주변에서 발생하였고 날개 끝부분에서 최소값으로 감소하였다. 최대값은 최대 두께선을 따르고 position 3 에서 가장 낮았다. GRP 의 경화시 수축에 의해 GRP 프로펠러의 모든 점에서의 두께는 Al 프로펠러의 두께와 같거나 작다. 이 외에도 재료 특성, 제작 조건 등에 의해 GRPG 복합재료 몰드는 다음과 같은 장점이 있다:

- 가벼운 무게(알루미늄 몰드보다 가벼움):
  163g (흡입몰드) + 171g (압축몰드) = 334g
- 탈착이 쉬움(알루미늄 몰드와 비슷):
  복합재료 몰드에 새로운 재료(폴리에스테르 또는 gelcoat)를 입힌다면 그 재료들과 몰드 표면에서 화학반응이 일어날 수 있다. 하지만 이 문제는 두 가지 요소(매끈한 몰드 표면과 이형제)로 막을 수 있다. 그러면 프로펠러는 몰드에서 쉽게 분리가 가능하다.
- 쉬운 제작(알루미늄 몰드보다 쉬움):
  가벼운 하중의 간단한 구조이므로 압축 및 흡입 몰드의 이동성과 결합은 어렵지 않다.
- 적은 비용(알루미늄 몰드보다 적음):
  이것은 재료 성분, 제조, 라이프사이클 등 주 비용을 포함한다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형 복합재료 프로펠러를 제작하기 위한 기존의 알루미늄 몰드를 복합재료 몰드로 대체하기 위한 타당성 검토를 하였다. 소형 알루미늄 합금 프로펠러 모델을 이용하여 복합재료 몰드를 제작하고 강도, 경도, 표면의 거칠기 등 여러 가지 실험을 수행하여 기존의 알루미늄과 비교하고 ISO 규범과 비교하였다. 그 결과 GRPG 몰드는 알루미늄 합금 몰드와 비교하여 좋은 특성(경량, 탈착 용이, 용이한 제작, 저 비용)들을 가지고 있음을 알 수 있었다. 따라서 소형 복합재료 선박 프로펠러를 만들기 위해 복합재료 몰드가 충분히 사용 가능한 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

(1) Carlton, J., 2007, “Marine Propeller and Propulsion,” Second edition, *Global Head of Marine Technology and Investigation, Lloyd’s Register*.

(2) Lin, C.-C., Lee, Y.-J., Hung, C.-S., 2009, “Optimization and Experiment of Composite Marine Propellers,” *Composite Structures* 89, pp. 206~215.

(3) Molland A.F. and Turnock, S.R., 1991, “The Design and Construction of Model Ship Propeller Blades in Hybrid Composite Materials,” *Composite Manufacturing*, Vol. 2, pp. 39~47.

(4) Jukka, T., 2000, “Making a Composite Prop,” *Tervamäki Engineering*.

(5) McDermott, J., 1993, “Reinforced Plastics,” Vol. 37, Issue 12, pp. 24~26.

(6) ISO 484/2,1981, “Shipbuilding – Ship Screw Propellers – Manufacturing Tolerances,” International standard.