Composites Research

Vol. 26, No. 4, 207-212 (2013)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2013.26.4.207
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

SQP법을 사용한 복합재 조류력 발전용 블레이드의 스파 캡에 대한 두께 최적화

차명찬* · 김상우* · 정민수* · 이 인**† · 유승재*** · 박천진***

Thickness Optimization for Spar Cap of Composite Tidal Current Turbine Blade using SQP Method

Myung-Chan Cha*, Sang-Woo Kim*, Min-Soo Jeong*, In Lee**†,
Seung-Jae Yoo***, Cheon-Jin Park***

ABSTRACT: In this study, the thickness optimization for uni-directional (UD) glass fiber reinforced polymer (GFRP) laminates of the spar cap of composite tidal blades was performed under the tip deflection constrains. The spar cap was composed of GFRP composites and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites. The stress distributions in the blade as well as its material costs for the optimized results were additionally investigated. The optimized thickness was obtained by interacting a sequential quadratic programming (SQP) algorithm and an ABAQUS software to calculate an objective function. It was confirmed that the thickness of UD GFRP increased with a decrease of the restrained tip deflection when a thickness of UD CFRP laminates was constrained to 9 mm. The weight of the optimized spar-cap increased up to 96.2% while the maximum longitudinal tensile stress decreased up to 24.6%. The thickness of UD GFRP laminates increased with a decrease of the thickness of UD CFRP laminates when the tip deflection was constrained to 126.83 mm. The weight increased up to 40.1%, but the material cost decreased up to 16.97%. Finally, the relationships among the weight, internal tensile stress, and material costs were presented based on the optimized thicknesses of the spar cap.

초 록: 본 연구에서는 유리강화섬유폴리머(GFRP)와 탄소강화섬유폴리머(CFRP)로 적층된 조류력 블레이드의 스파 캡(Spar cap)을 대상으로 끝단 처짐의 제한에 따른 단방향(UD) GFRP의 적층 두께를 최적화 하였다. 또한 도출된 적층 두께에 따른 블레이드 내부의 응력의 변화와 블레이드의 재료비용을 확인하였다. 비선형 최적화에 뛰어난 순차 이차방정식 프로그래밍(SQP) 알고리즘을 사용하였고, 목적함수를 계산하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus/Standard와 연계하였다. UD CFRP의 적층 두께가 9 mm로 제한된 경우, 끝단 처짐이 감소함에 따라 UD GFRP의 적층 두께가 증가하였다. 즉, 최적화된 스파 캡의 무게는 최대 96.2% 증가였으며 최대 인장응력은 최대 24.6% 감소하였다. 끝단 처짐이 126.83 mm로 제한된 경우, UD CFRP의 적층 두께가 줄어듦에 따라 UD GFRP의 적층 두께가 증가하였다. 이로 인하여 무게는 최대 40.1% 증가하였지만 재료비용은 최대 16.97% 감소하였다. 본 연구에서 제시한 블레이드 스파 캡의 최적화된 두께를 바탕으로 조류력 블레이드의 무게, 내부의 최대 응력과 재료비용의 상관관계를 제시하였다.

Key Words: 조류력 발전(tidal current power), 복합재 블레이드(composite blades), 순차 이차방정식 프로그래밍(Sequential Quadratic Programming), 무게 최적화(weight optimization), 유한 요소 해석(finite element analysis)

접수: 2013년 6월 27일, 게재승인: 2013년 8월 27일

*한국과학기술원 기계항공시스템공학부 항공우주공학전공 대학원
**†한국과학기술원 기계항공시스템공학부 항공우주공학전공, Corresponding author (E-mail: inlee@kaist.ac.kr)
***현대중공업 주식회사

1. 서 론

조류력 발전은 조수간만의 차에 의해 발생하는 조류를 이용하여 에너지를 생산하는 발전으로, 조류의 유속이 충분히 빠른 해역에 적용할 수 있다. 우리나라의 경우 조류 에너지는 매우 풍부하며, 최적의 개발 입지 조건을 갖추고 있다[1]. 한편 자연적인 조류 흐름을 직접 이용한다는 점에서 조력 발전과 차이점을 둔다[2]. 조수간만의 차는 항상 존재하며, 날씨나 계절에 큰 영향을 받지 않기 때문에 기존의 친환경 신재생에너지에 비해 큰 장점을 지니고 있다.

조류력 발전용 블레이드는 일반적으로 수심이 깊고 유속이 빠른 열악한 환경에서 운용되므로 지속적인 큰 하중을 받게 된다. 2011년에 Verdant Power사가 뉴욕 East River에 설치한 조류력 발전기는 강력한 조류로 인하여 블레이드 끝단 일부가 파괴되었다[3]. 따라서 블레이드 설계 시 구조 안정성 및 신뢰성을 반드시 확보해야 한다. 이와 더불어 발전 시스템의 효율성을 높이고 설치 및 운반에 대한 소요비용을 절감하기 위하여 블레이드 구조물의 경량화도 반드시 요구된다. 이러한 요구 조건들을 충족시키기 위하여 조류력 발전용 블레이드에 대한 복합재의 적용이 늘어나고 있다. 하지만 복합재는 기존 금속재료와 비교하여 낮은 경제성으로 인해 그 쓰임이 여전히 제한적이다.

조류력 복합재 블레이드의 구조 설계 시, 복합재의 적층 배열, 각도 및 두께는 중요한 변수이다. 또한 밀도가 높은 물속에서 회전은 큰 외력을 유발하므로 큰 변형에 의한 성능 감소 및 파손이 나타나지 않도록 설계해야 한다. 이와 동시에 고비용 복합재를 적용함으로써 발생되는 경제성 감소도 반드시 극복해야한다.

따라서 본 연구에서는 유리 섬유 강화 복합재(GFRP composite)와 탄소 섬유 강화 복합재(CFRP composite)로 적층된 조류력 블레이드의 스파 캡(Spar cap)을 대상으로 끝단 처짐의 제한에 따른 단방향(UD) GFRP의 적층 두께를 최적화 하였다. 또한 블레이드의 강도와 성능 조건을 유지하면서 경량화를 달성하고자 하였다.

2. 복합재 적층 두께 결정을 위한 최적화

2.1 SQP법

SQP법(Sequential Quadratic Programming method)은 탐사방향의 결정을 위해 함수의 이차 미분정보를 이용하는 이차 도함수법이다. 이차 근사로 정의되는 부문제를 풀어서 탐색방향을 결정하고 외부 페널티 함수(Extra penalty function)를 이용하여 이동거리를 계산함으로써 최적 값에 수렴하도록 하는 기법이다. SQP법에서는 라그랑지 함수(Lagrange function)의 구배와 설계 변화량을 사용하여 라그랑지 함수의 근사 헤시안 행렬(Hessian matrix)을 구성한다[4].

SQP법은 다른 최적화 기법과 비교하여 효율적이고 신뢰성이 높으며 접근하기 쉬운 최적화 방법 중 하나이다. SQP법을 이용하여 이미 많은 연구가 수행 되었으며, Schittkowski는 구조 최적화를 위한 비선형 프로그래밍 알고리즘 중에서 SQP법이 매우 효율적이라 는 결론을 내리고 있다[5]. 따라서 많은 계산 시간이 필요한 조류력 블레이드 복합재 두께 최적화를 위하여 SQP법을 사용하였다.

SQP법에 의한 최적 설계 알고리즘은 식 (1)-(3)과 같다.

$$\text{Minimize } \frac{1}{2}d^T H_k d+\nabla f(x_k)^T d, \tag{1}$$

Subject to

$$\nabla g_i(x_k)^T d+g_i(x_k)=0 \quad (i=1,\ldots,m_e) \tag{2}$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d+g_i(x_k)\le 0 \quad (i=m_e+1,\ldots,m) \tag{3}$$

여기서 $f(x)$는 목적함수, $g(x)$는 제약조건식, H는 헤시안 행렬, d는 탐사방향 벡터 그리고 k는 반복횟수를 의미한다.

SQP법에 의한 최적설계는 다음과 같은 알고리즘으로 진행된다. 우선, 초기설계변수 x_0를 선정하고 초기 헤시안 행렬 H_0 값을 계산한다. 그리고 부문제를 계산하여 탐사방향 벡터 d를 구한 후 아래의 식 (4)로부터 새로운 설계변수 x을 계산한다.

$$x_{k+1}=x_k+a_k d_k \quad (k=1,2,\ldots,n) \tag{4}$$

여기서 a는 탐사방향으로의 이동거리를 의미한다.

계산 후 최적해로 수렴할 때까지 위의 과정을 반복 시행한다.

2.2 최적화 모델링 및 경계조건

하중을 주로 담당하는 스파 캡과 전단 웹(Shear web) 섹션으로 구성된 간소화된 최적화 모델은 Fig. 1과 같다. 정하중 해석을 통한 목적함수 계산이 필요하므로 유한요소 모델을 구성하였으며, 모델의 길이는 5.51 m이다. S4R과 S3R 쉘 요소를 사용하였고, 사용된 총 노드 수는 4335개, 총 요소 수는 4287개이다.

하중은 BEMT(Blade Element Momentum Theory)를 이용하여 유속이 4 m/s일 때의 회전 방향의 힘과 유동방향의

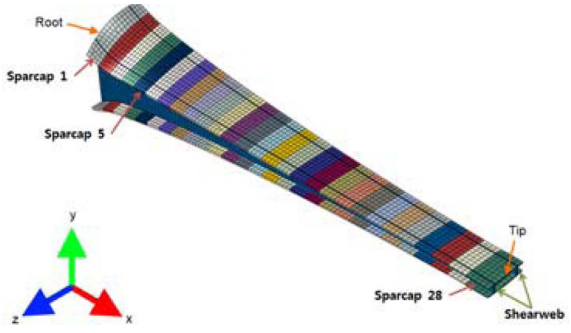

Fig.1. Configuration of spar cap model for optimization.

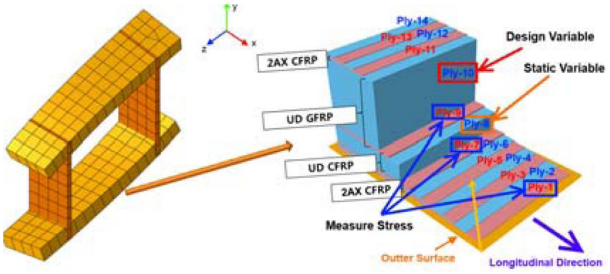

Fig. 2. Figure of laminates of spar cap section.

Table 1. Material properties and costs of composites

	UD CFRP	2AX CFRP	UD GFRP	Unit
E_1	109,200	14,980	43,379	MPa
E_2	6,500	14,980	10,304	
ν_{12}	0.280	0.750	0.238	-
G_{12}	4,280	28,160	3,452	MPa
Cost	4.50	4.50	0.42	million won/kg

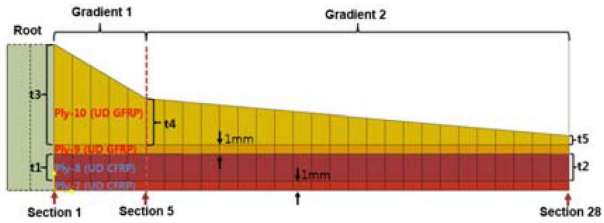

Fig. 3. Configuration of UD GFRP and UD CFRP thickness.

힘, 비틀림 방향의 모멘트를 블레이드 단면의 1/4 시위(chord) 중심선 상에 적용하였다. 경계조건으로서 루트 섹션(Root section)의 6자유도를 구속하였다.

스파 캡 섹션의 복합재 적층 형상은 Fig. 2와 같다.

스파 캡 섹션은 총 14개의 복합재로 적층되어 있다. 최외곽 층(1-6번 층)과 최내곽 층(11-14번 층)은 비틀림 변형에 강한 2축 CFRP를 적용하였으며, 안쪽으로는 길이 방향으로 섬유가 분포된 UD CFRP와 UD GFRP를 혼합 적용하였다. 이 때 사용된 복합재 물성치 및 재료비용은 Table 1과 같다.

Fig. 3은 스파 캡 섹션에서의 길이 방향의 단면 형상이다.

각 스파 캡 섹션의 UD CFRP 두께는 최적화 설계 변수로 제작 타당성과 최적화 시간 단축을 위하여 t3, t4, t5로부터 계산된 기울기 값에 의해 점진적으로 감소하는 값을 가진다. t3의 경우, 루트 섹션과의 연결을 위해 루트 섹션의 총 두께로부터 계산된 고정 값이 사용된다. UD CFRP 두께는 고정변수로서 주어진 t1, t2 값으로 결정된다.

2.3 최적화 방법

최적화를 위하여 Matlab의 최적화 모듈 fmincon을 이용하였다. fmincon 모듈은 구속된 비선형 다변수 함수의 최소값을 찾는 모듈로서 SQP를 포함한 다양한 최적화 알고리즘을 사용할 수 있다.

fmincon 모듈을 사용하여 SQP 알고리즘을 실행하면 목적함수와 제한 조건을 만족하는 최적값을 찾게 된다. 목적함수를 계산하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus/Standard와 연계하였다. 또한 Abaqus script를 이용하여 Fig. 4와 같이 Matlab과 Abaqus간의 데이터 입출력 자동화 프로그램을 구성하였다.

최적화에 사용되는 변수들은 각 섹션의 두께로 구성된 독립변수들과 이를 통해 계산된 블레이드 무게, 즉 종속변수로 구분할 수 있다. 독립변수 선정은 Fig. 2와 같이 섹션의 적층된 복합재 중 굽힘 하중을 지지하는 UD GFRP 층과 UD CFRP 층으로 결정하였다. 여기서 UD GFRP 두께는 설계 변수이고 UD CFRP 두께는 고정 변수이다. Table 1로부터 UD CFRP의 재료비용이 UD GFRP보다 약 10배 이상 크므로, 본 연구에서는 고정된 UD CFRP 두께에서 제한 조건을 만족하는 최소의 UD GFRP를 얻고자 하였다. 즉, UD CFRP 두께가 9 mm부터 1 mm까지 1 mm씩 감소하였을 경우, 제한 조건을 만족하는 동시에 블레이드 무게가 최소가 되는 UD GFRP 두께를 찾는 것이 목적이다.

한편, 제한 조건은 다음과 같다.

1) 최적화 모델 끝단 처짐이 최적화 모델 길이의 일정 비율(3%→2.3%→2.1%)로 제한하였을 때, 각각의 경우에 대한 최적화를 진행하였다.

2) 하중 인가 시 복합재 구조물이 각 복합재의 항복 강도를 넘지 않아야 한다. 최적화 모델에 적용된 복합재의 항복강도는 Table 2와 같다.

Fig. 1과 같이 스파 캡의 끝단 노드에서 y 방향으로의 최

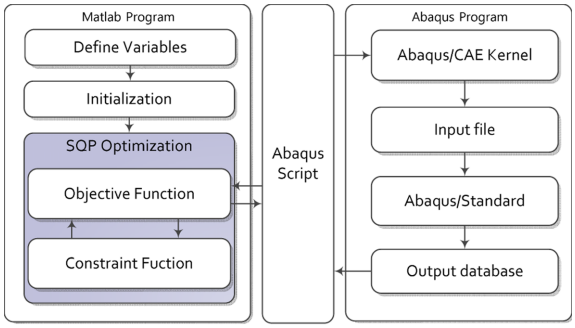

Fig. 4. Optimization flow chart.

Table 2. Yield strength of composites

	UD CFRP	2AX CFRP	UD GFRP	Unit
X^T (Tensile)	2,005	138	910	MPa
X^C (Compressive)	894	140	750	
Y^T (Tensile)	68	138	50	
Y^C (Compressive)	198	140	140	

대 처짐을 계산하였고, 각 복합재 층에서 x와 y방향으로의 최대 인장 및 압축 응력을 계산하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 기준 모델

기준 모델은 초기 설계 값으로서 그 제원은 Table 3과 같다. 기준 모델의 길이는 5.51 m이며 무게는 878.0 kg이다. UD CFRP 두께는 10 mm이며, 그 중 최적화를 위한 복합재 층(8번 층)의 두께 t1, t2는 9 mm이다. UD GFRP 두께는 응력 측정을 위한 7번 층 1 mm를 제외하고 t3, t4, t5에서 각각 76 mm, 44 mm, 21 mm이다.

기준 모델의 정하중 해석 결과는 Fig. 5, 6과 같다.

Table 3. Properties of basis model

Length (m)	UD CFRP Thicknes (mm)		UD GFRP Thicknes (mm)			Weight (kg)
	t1	t2	t3	t4	t5	
5.51	9	9	76	44	21	878.0

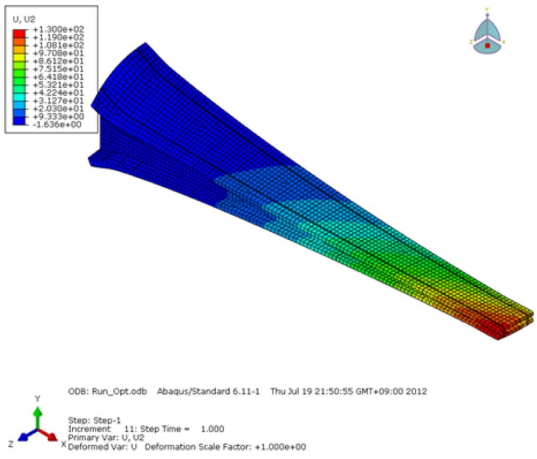

Fig. 5. Displacement (U2) contour of basis model.

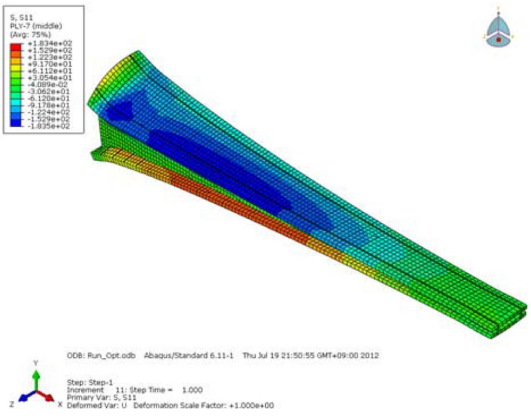

Fig. 6. Stress (S11) contour of basis model.

Fig. 5는 y방향의 변위 분포를 나타낸다. Fig. 5로부터 기준 모델의 끝단 변위는 126.84 mm 즉, 기준 모델 길이의 2.3%로 나타났다.

Fig. 6은 UD CFRP의 길이 방향 응력(S11) 분포를 나타내며, 최대 인장 응력은 2번째 스파 캡 섹션 아랫면에서 178.617 MPa로 관찰되었다.

3.2 블레이드 무게

각 끝단 처짐 제한 조건에 대하여, UD CFRP 두께에 따른 최적화된 스파 캡 무게 결과는 Fig. 7과 같다.

UD CFRP 두께가 감소할수록 무게가 증가하기 때문에 x축은 UD CFRP 두께가 감소하는 방향으로 나타내었다.

끝단 처짐이 기준 모델 길이의 3%로 제한되고 UD CFRP 두께가 9 mm인 경우, 무게는 575.3 kg으로 기준 모델 대비 34.48% 감소하였다. UD CFRP 두께가 감소할수록 무게는 증가하였으며, UD CFRP 두께가 4 mm인 경우 9 mm일 때보다 220.5 kg 증가한 795.8 kg이다.

끝단 처짐이 기준 모델의 끝단 처짐과 동일하게 제한되고 UD CFRP 두께가 9 mm인 경우, 최적화된 모델의 무게는 859.0 kg으로 기준모델 보다 2.16% 감소하였다. UD CFRP 두께가 감소함에 따라 스파 캡 무게의 증가율은 커지는 것을 알 수 있다. UD CFRP 두께가 4 mm인 경우, 무게는 1203.4 kg으로 기준 모델 대비 37.06% 증가하였다.

끝단 처짐이 기준 모델 길이의 2.1%로 제한되고 UD CFRP 두께가 9 mm에서 8 mm로 감소하였을 경우, 무게는 1128.9 kg에서 1242.7 kg으로 증가하였다. UD CFRP 두께가 7 mm 이하에서는 제한 조건 중 끝단 처짐이 기준 모델 길이의 2.1%을 초과하였기 때문에 가용해를 얻을 수 없었다.

3.3 블레이드 내부의 최대 인장 응력

각 끝단 처짐 제한 조건에 대하여, UD CFRP에 따른 스파 캡 내부의 길이방향 최대 인장 응력 결과는 Fig. 8과 같다.

스파 캡 내부에 걸리는 최대 인장 응력은 복합재 층 중 UD

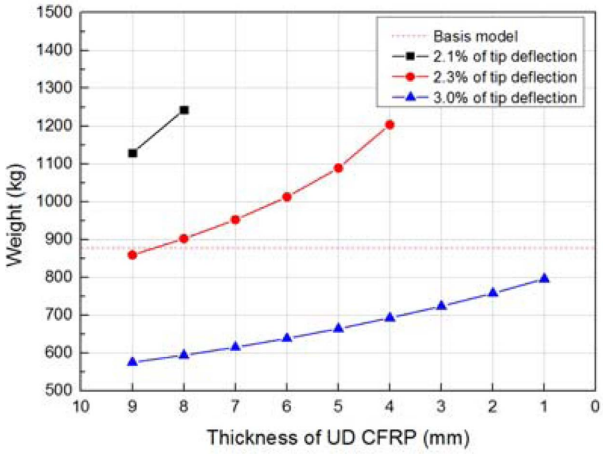

Fig. 7. Weight variation along UD CFRP thickness.

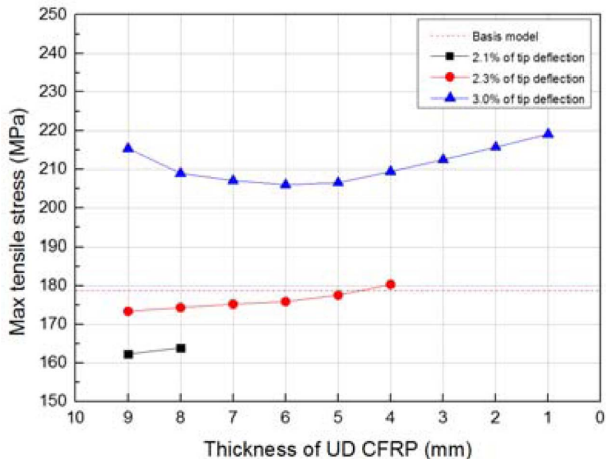

Fig. 8. Maximum tensile stress variation along UD CFRP thickness.

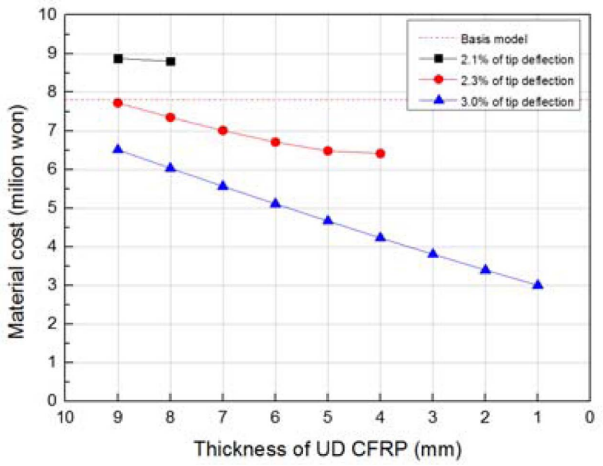

Fig. 9. Material costs variation along UD CFRP thickness.

CFRP 층에 걸리는 길이방향 응력이 가장 크기 때문에 이를 비교하였다.

끝단 처짐이 기준 모델 길이의 3.0%으로 제한되고 UD CFRP 두께가 9 mm로 고정되었을 경우, 최적화된 모델에 걸리는 길이방향 최대 인장 응력은 215.377 MPa이다. UD CFRP 두께가 9 mm에서 감소할수록 최대 인장 응력은 감소함을 보여주나 6 mm 이하부터 다시 증가함을 알 수 있다. 이는 최적화된 모델의 최대 인장 응력이 나타나는 위치가 다르기 때문에다. UD CFRP 두께가 9 mm와 8 mm일 경우, 6번째 스파 캡 섹션에서 최대 인장 응력이 발생하였다. 7 mm와 6 mm의 경우, 12번째 스파 캡에서, 5 mm 이하인 경우는 2번째 스파 캡 섹션에서 최대 인장 응력이 각각 발생하였다. UD CFRP 두께가 1 mm일 경우, 최적화된 모델의 UD CFRP층에 걸리는 길이방향 최대 인장 응력은 219.055 MPa이다.

끝단 처짐이 기준 모델 길이의 2.3%으로 제한되고 UD CFRP 두께가 9 mm일 경우, 길이방향 최대 인장 응력은 173.340 MPa로서 기준모델 대비 2.95% 감소하였다. UD CFRP 두께가 감소할수록 최대 인장 응력이 증가하였으나, 증가율은 무게에 대한 증가율 보다 낮게 나타났다. UD CFRP 두께가 4 mm일 경우, 최적화된 모델의 길이방향 최대 인장 응력은 180.326 MPa이다.

끝단 처짐이 기준 모델 길이의 2.1%로 제한되고 UD CFRP 두께가 9.0 mm일 경우, UD CFRP층에 걸리는 길이방향 최대 인장 응력은 162.3 MPa이다. UD CFRP 두께가 8.0 mm로 감소하였을 때, 최대 인장응력은 163.857 MPa로 증가함을 보였다.

3.4 재료비용

각 끝단 처짐 제한 조건에 대하여, UD CFRP에 따른 최적화된 스파 캡의 재료비용 결과는 Fig. 9와 같다.

재료비용은 블레이드에 사용되는 순수 재료비용으로서 접착제나 복합재 제작에 소모되는 비용 등은 포함되지 않았다. 재료비용의 산출은 UD CFRP와 UD GFRP의 각각의 무게를 계산한 후, Table 1로부터 kg당 재료비용을 곱하여 계산하였다.

끝단 처짐이 기준 모델 길이의 3.0%로 제한되고 UD CFRP 두께가 9 mm일 경우, 최적화된 모델의 총 재료비용은 651만원으로 기준모델에 비하여 16.58% 감소하였다. UD CFRP 두께가 감소할수록 선형적으로 재료비용이 감소하였으며, UD CFRP가 1 mm일 때 최적화된 모델의 총 재료비용은 300만원으로서, UD CFRP 두께가 9 mm의 최적화 결과에 비교하여 53.85% 감소하였다.

끝단 처짐이 기준 모델 길이의 2.3%로 제한되고 UD CFRP 두께가 9 mm일 경우, 최적화된 모델의 총 재료비용은 772만원으로 기준모델과 비교하여 1.01% 감소하였다. UD CFRP 두께가 감소할수록 재료비용은 감소하였지만 끝단 처짐이 3.0% 일 때보다 감소율은 감소하였다. UD CFRP 두께가 4 mm일 경우, 최적화된 모델의 총 재료비용은 641만원이다.

끝단 처짐이 기준 모델 길이의 2.1%으로 제한되고 UD CFRP 두께가 9 mm일 경우, 최적화된 모델의 총 재료비용은 887만원으로 기준모델에 비하여 13.76% 증가하였다. 또한 UD CFRP 두께가 8 mm일 경우, 최적화된 모델의 총 재료비용은 880만원으로 소폭 감소하였다.

4. 결 론

UD CFRP가 9 mm로 동일할 경우, 끝단 처짐 제한에 따른 최적 두께 및 그에 상응하는 무게, 최대 인장 응력 그리고 재료비용은 Table 4와 같다.

끝단 처짐이 기준 모델 길이의 3%인 경우의 무게는 575.3 kg이며, 끝단 처짐 제한 조건이 엄격해질수록 무게는 크게 증가함을 보인다. 끝단 처짐이 기준 모델 길이의 2.1%인 경우의 무게는 1128.9 kg로, 3%일 때보다 96.2% 증가한다. 최대

Table 4. UD GFRP thickness, weight, maximum tensile stress and costs at the UD CFRP thickness of 9 mm

Tip Deflection	UD GFRP Thickness (mm)			Weight (kg)	Maximum tensile stress (MPa)	Material cost (Million Won)
	t3	t4	t5			
Basis Model (2.3%)	76.00	44.00	21.00	878.0	178.6	780
3.0%	76.00	15.73	0.10	575.3	215.3	651
2.3%	76.00	54.59	3.44	859.0	173.3	772
2.1%	76.00	76.00	27.05	1128.9	162.3	887

Table 5. Weight, maximum tensile stress and costs at the constrained tip deflection of 2.3%

UD CFRP thickness (mm)	9.00	▶	4.00
Weight (kg)	859.0		1203.4
Maximum tensile stress (MPa)	173.3		180.3
Material cost (Million won)	772		641

인장 응력은 기준 모델의 경우 178.6 MPa이며, 끝단 처짐이 기준 모델의 2.3%로 동일할 때 최적화된 모델은 173.3 MPa로 2.97% 감소함을 보인다. 또한 끝단 처짐 제한 조건이 엄격해질수록 최대 인장응력은 감소함을 알 수 있으며, 끝단 처짐이 2.1%일 경우 3.0%일 경우보다 24.6% 감소함을 보였다. 재료비용은 기준 모델의 경우 780만원이며, 동일한 끝단 처짐 조건(2.3%)에서 최적화된 모델은 772만원으로 1.03% 감소하였다. 끝단 처짐이 기준모델의 2.1%일 경우, 재료비용은 3%일 경우보다 36.25% 증가하였다.

위의 결과로부터 UD CFRP 두께가 동일한 경우, 끝단 처짐이 제한 될수록 최적화된 모델의 무게와 재료비용은 증가하는 반면, 블레이드의 내부의 최대 인장 응력은 감소함을 알 수 있다.

끝단 처짐 제한이 동일한 경우, UD CFRP 두께에 따른 UD GFRP 두께, 무게 및 비용의 증감은 Table 5와 같다.

끝단 처짐 제한이 기준 모델 길이의 2.3%로 동일하고, UD CFRP 두께가 9 mm와 4 mm인 경우의 최적화 결과를 비교하였다.

UD CFRP 두께가 9 mm인 경우 무게는 859 kg이며, UD CFRP 두께가 4 mm로 감소할 경우 무게는 1203.4 kg로 9 mm와 비교하여 40.1% 증가하였다. 또한 최대 인장 응력은 4.04% 증가하며 재료비용은 16.97% 감소하였다.

위의 결과로부터 동일한 끝단 처짐 조건에서 UD CFRP 두께가 감소하면 무게와 내부 응력은 증가하지만 재료비용은 감소함을 알 수 있다. 종합하여 볼 때 설계 시 목표 성능과 무게 그리고 제작비용에 대한 절충 과정(compromising process)을 도입한다면, 본 연구에서 제시한 최적화 방법을 통해 설계 강도를 만족하는 최적의 블레이드 복합재 적층 두께를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 대한민국 지식경제부의 신재생에너지기술개발사업의 과제인 “MW급 단지용 조류발전시스템 개발”의 일환으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Cho, C.H., “Characteristics of Tidal Current Power and Technical Trend of Domestic and International Development,” *Journal of Solar Energy Society of Korea*, Vol. 6, No. 1, 2007, pp. 9-16.
2. Cho, C.H., and Lee, Y.H., “Current Status of Domestic and International Technology of Ocean Energy,” *The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 37, No. 10, 2008, pp. 14-37.
3. http://www.businessgreen.com/bg/news/1935363/yorks-east-river-promises-rising-tide-verdant-power
4. Wasiutynski, Z., “The Present State of Knowledge in the Field of Optimum Design of Structures,” *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 16, No. 5, 1963, pp. 341-350.
5. Schittkowski, “Numerical Comparison of Nonlinear Programming Algorithms for Structural Optimization,” *Structural Optimization*, Vol. 7, 1994, pp. 1-19.