

복합소재 풍력발전 타워 연구개발 (I)

-미시 역학적 접근 중심으로-

Development of Wind towers Made of Composite Materials (I)

-Micromechanics Approach-



이상열(Sang-Youl Lee) 이사

| 안동대학교 토목공학과 교수 | lsy@anu.ac.kr

지호선(Hyo-Seon Ji) 부회장

| 대원대학교 철도건설공학과 교수 | hsjj@mail.daewon.ac.kr

손병직(Byeong-Jik Son) 이사

| 건양대학교 건설시스템공학과 교수 | strustar@konyang.ac.kr

강영종(Young-Jong Kang) 부회장

| 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 | yjkang@korea.ac.kr

1. 개요

풍력발전은 미래형 청정에너지 공급 산업으로 부상하면서 전세계적으로 활발한 적용이 이루어지고 있다. 국내에서도 해상 및 육상에 풍력단지 개발하는 다양한 시도가 진행 중에 있다. 특히, 국내외적으로 풍력에 의한 발전용량을 증가시키기 위하여 대형 풍력발전기의 연구개발을 진행하고 있으나, 대부분 터빈 및 블레이드 분야에 대해서만 집중이 되어 있다. 또한, 유럽 및 미국과 같은 선진국에서 기술을 독점하고 있으나 최근 자국 내 시장 독점에 의해 중국의 기술력이 향상되고 있으며, 국내에서도 대형 중공업사에서 풍력발전에 관심을 가지고 독자 터빈을 개발하고 있다. 그러나 대형 터빈을 지탱하는 타워구조는 상대적으로 다양한 개발이 미진한 상황이다. 특히, 태풍이나 지진 등의 극한 하중이 작용하는 경우 기존의 제조수준의 타워구조로는 취약할 수 밖에 없다. 따라서, 향후의 타워구조는 단순제조가 아

닌 다양한 외부환경에서도 지지할 수 있는 건설개념의 신형식 타워가 개발되어 적용될 필요가 있다. 이러한 목적으로 국토교통부 건설교통기술촉진연구사업으로 2012년부터 2017년까지 “10MW급 강재 및 3MW급 복합 합성구조 풍력발전타워 설계기술 개발”이라는 과제명으로 연구단이 발족되어 현재 2년 차 연구가 진행되고 있다. 본 기사에서는 연구단 세부과제 중 3세부 “신형식 복합 합성구조 풍력발전 타워 개발” 과제에 대한 1차년도 연구진행 상황을 소개하고자 한다. 3세부는 크게 강합성 및 복합소재 타워 개발로 나누어 수행하고 있으며, 복합소재 타워는 기존의 강재타워를 대체하거나 보완할 수 있는 신개념으로서 국내외적으로 개발사례가 미미하다. 따라서 본 연구개발을 통하여 복합소재의 건설분야 적용에 대한 기초연구 및 실용화에 대한 긍정적 계기가 될 것으로 기대된다. 본 연구과제는 지난 7월말 까지 8개월간의 1차년도 연구를 마무리하고 2차년도 연구가 막 시작되었으며, 본 기사에서는 연구내용

중 마이크로 역학접근 방법에 의한 이론적 접근방법을 중심으로 기술하도록 한다. 향후 개발의 진행에 따라 복합소재 풍력타워 개발의 다양한 연구결과를 연재하여 소개할 예정이다.

2. 마이크로 역학적 접근

비교적 고가인 복합소재의 건설분야에 대한 효율적인 적용을 위해서는 복합소재를 구성하는 재료의 상호관계를 미시역학적으로 규명하는 것이 필요하다. 복합소재는 모재(Matrix)와 화이버(Fiber)의 조합으로 구성되며, 이 재료들의 적절한 상호 조합은 거시역학적으로 강성 및 강도에 크게 영향을 주게 된다. 그림 1은 미시역학부터 출발된 복합소재 구조의 해석 및 설계에 대한 개념을 보여준다.

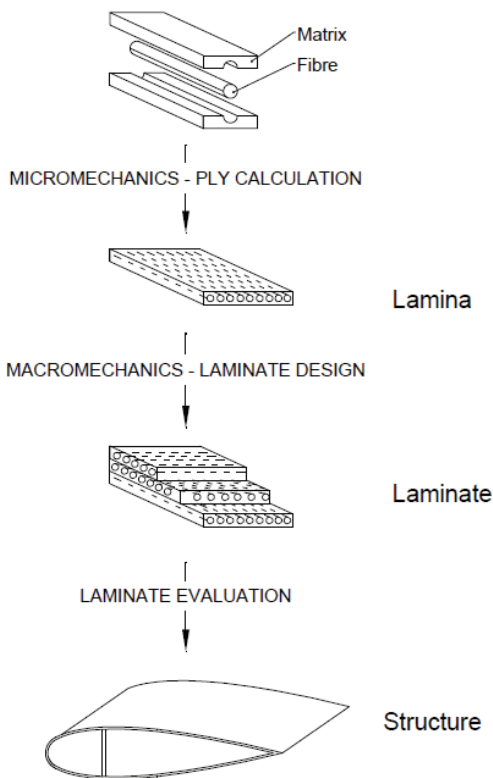


그림 1. 미시역학으로 출발한 복합재료의 해석 및 설계 기본 개념

복합소재의 미시역학적인 목적은 화이버와 모재의 각각의 물성과 상대적인 비율로부터 조합된 재료의 물성, 강성 및 강도 등을 추정하는 것이다. 특히, 모재에 함침되는 화이버의 비율은 조합된 재료의 탄성계수 등에 중요한 영향을 미친다. 또한 고가의 화이버를 효율적으로 함침한다면 복합소재의 경제성을 확보하는 데 크게 기여할 수 있을 것이다. 복합소재의 미시역학적인 접근 방법의 목적은 각 구성되는 재료들의 탄성 물성에 의해서 복합소재의 탄성계수, 강성 또는 강도를 결정하는 것이다. 예를 들면, 복합소재의 탄성 물성치는 화이버와 모재의 물성치와 화이버와 모재의 상대적인 체적비율로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ij} = C_{ij}(E_f, \nu_f, V_f, E_m, \nu_m, V_m) \tag{1}$$

여기서, E_f, E_m 은 등방성 화이버 및 모재의 탄성계수, ν_f, ν_m 는 등방성 화이버 및 모재의 프와송비, 그리고 V_f, V_m 은 전체 복합소재의 체적에 대한 화이버 및 모재 체적의 비율을 각각 의미한다. 재료역학적 접근 방법에서 가장 중요한 가정 사항은 그림 2와 같이 일방향 화이버 보강 복합소재의 화이버 방향으로의 변형률은 모재에서의 화이버의 변형률과 같다는 것이다. 변형률이 같지 않다는 것은 화이버와 모재사이에 균열이 발생하였음을 의미한다. 이러한 가정에 의하여, 1방향 탄성계수 E_1 은 혼합법칙(rule of mixtures)에 의하여 선형적 관계로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \tag{2}$$

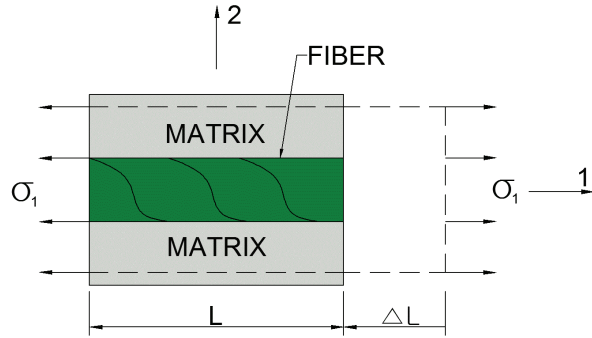


그림 2. 미시역학적으로 1-방향 하중이 작용하는 경우

프아송비 v_{12} 도 유사한 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad (3)$$

한편, 2방향 탄성계수 E_2 와 전단탄성 계수 G_{12} 는 다음과 같은 비선형적 관계이며, 화이버보다는 모재에 지배적인 특성을 보인다.

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m}, \quad G_{12} = \frac{G_f G_m}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (4)$$

식 (4)는 화이버가 모재에 일정한 간격으로 정렬되어 있다는 가정 하에 유도된 것이다. 그러나 실제로는 화이버는 모재에서 불규칙하게 정렬되어 있다. 이러한 불규칙성을 고려하여 화이버 함침 비율에 따라 비선형 관계를 보이는 E_2 와 G_{12} 의 값은 탄성론적 관점으로 정확해를 통하여 다음과 같이 산정할 수 있다 (Jones, 1998).

$$E_2 = 2[1 - v_f + (v_f - v_m) V_m] \\ [(1 - \xi) \frac{\lambda_f (2\lambda_m + G_m) - G_m (\lambda_f - \lambda_m) V_m}{(2\lambda_m + G_m) + 2(\lambda_f - \lambda_m) V_m}$$

$$+ \xi \frac{\lambda_f (2\lambda_m + G_f) + G_f (\lambda_m - \lambda_f) V_m}{(2\lambda_f + G_f) - 2(\lambda_m - \lambda_f) V_m}] \quad (5)$$

$$G_{12} = (1 - \xi) G_m \frac{2G_f - (G_m - G_m) V_m}{2G_m + (G_m - G_m) V_m} \\ + \xi G_f \frac{(G_f + G_m) - (G_f - G_m) V_m}{(G_f + G_m) + (G_f - G_m) V_m} \quad (6)$$

여기서, $\lambda_f = \frac{E_f}{2(1 - v_f)}$, $G_f = \frac{E_f}{2(1 + v_f)}$,

$\lambda_m = \frac{E_m}{2(1 - v_m)}$, $G_m = \frac{E_m}{2(1 + v_m)}$ 이며, ξ 는 그림

3과 같은 화이버 정렬상태에 따라 결정된다.

그러나 식 (5)와 (6)은 수식이 다소 복잡하여 적용하기에 다소 난해하다. 따라서 Halpin and Tsai (1969)는 사용하기 적합한 다음과 같은 근사식을 제안하였다.

$$\frac{\Phi(E_2, G_{12}, v_{12})}{\Phi_m(E_m, G_m, v_m)} = \frac{1 + \beta \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (7)$$

여기서, Φ 및 Φ_m 은 복합소재의 재료 물성 및 연관된 모재의 물성을 각각 의미하며, E_2 , G_{12} , 및 v_{12} 를 대입하여 각각 계산할 수 있다. 또한, 식(2)에서 η 와 β 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\eta = \frac{(\Phi_f(E_f, G_f, v_f) / \Phi_m(E_m, G_m, v_m)) - 1}{(\Phi_f(E_f, G_f, v_f) / \Phi_m(E_m, G_m, v_m)) + \beta}, \\ \beta_{E_2} = 2 \frac{b}{a}, \quad \log \beta_{G_{12}} = 1.73 \log \frac{a}{b} \quad (8)$$

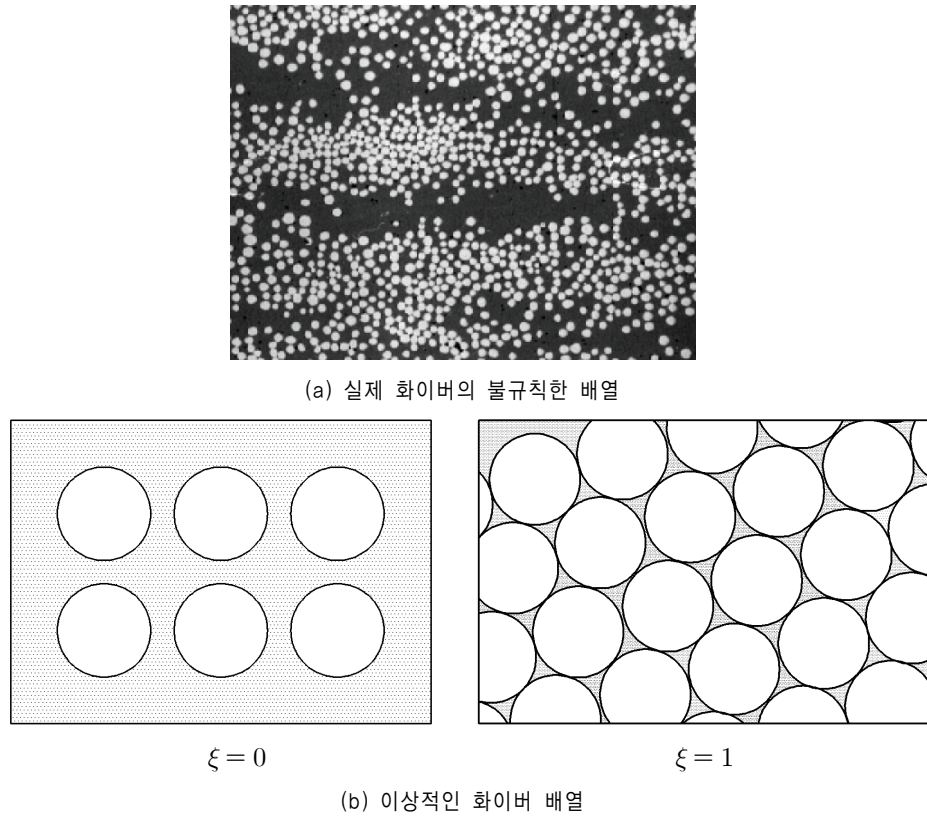


그림 3. 실제 화이버 배열 및 이상적 배열에 대한 계수변화

Hewitt and Malherbe (1970)은 V_f 가 0.5 이상이고, 사각형 배열을 갖는 원형 화이버 배열의 경우에는 식 (8)은 실제값보다 작은 값을 갖는다는 것을 밝히고 β 에 대하여 보정된 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\beta = 1 + 40 V_f^{10} \tag{9}$$

본 연구에서는 E_1 및 ν_{12} 은 일반적으로 혼합법칙에 대하여 실제 실험결과와 비교하여 정확한 결과를 보이는 것으로 알려져 있으므로 식 (2)와 (3)을 적용하는 것으로 결정하였다. 한편, E_2 및 G_{12} 는 혼합법칙을 만족하지 않고, 식 (5)와 (6)의 정확해는 실용적으로 적용하기에는 복잡하므로 정확해에 의한 비선형 관계를 만족하면서 실용적으로 적용하기 편

리한 식 (7) 및 (9)을 적용하기로 잠정결론을 내리고 향후 수행되는 실제 실험결과와 비교분석할 예정이다. 그림 4는 화이버함침비율 변화에 따른 탄성계수의 변화 비교를 보여준다.

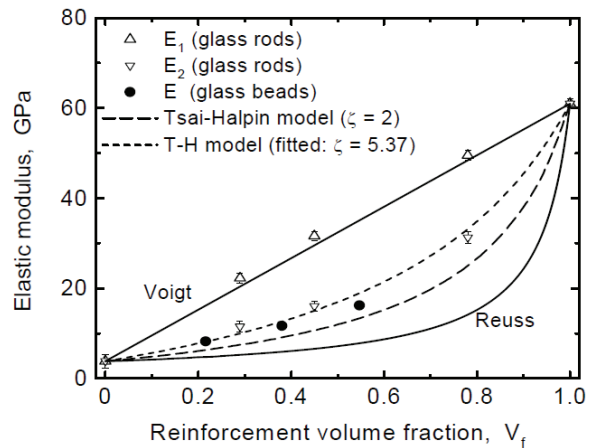


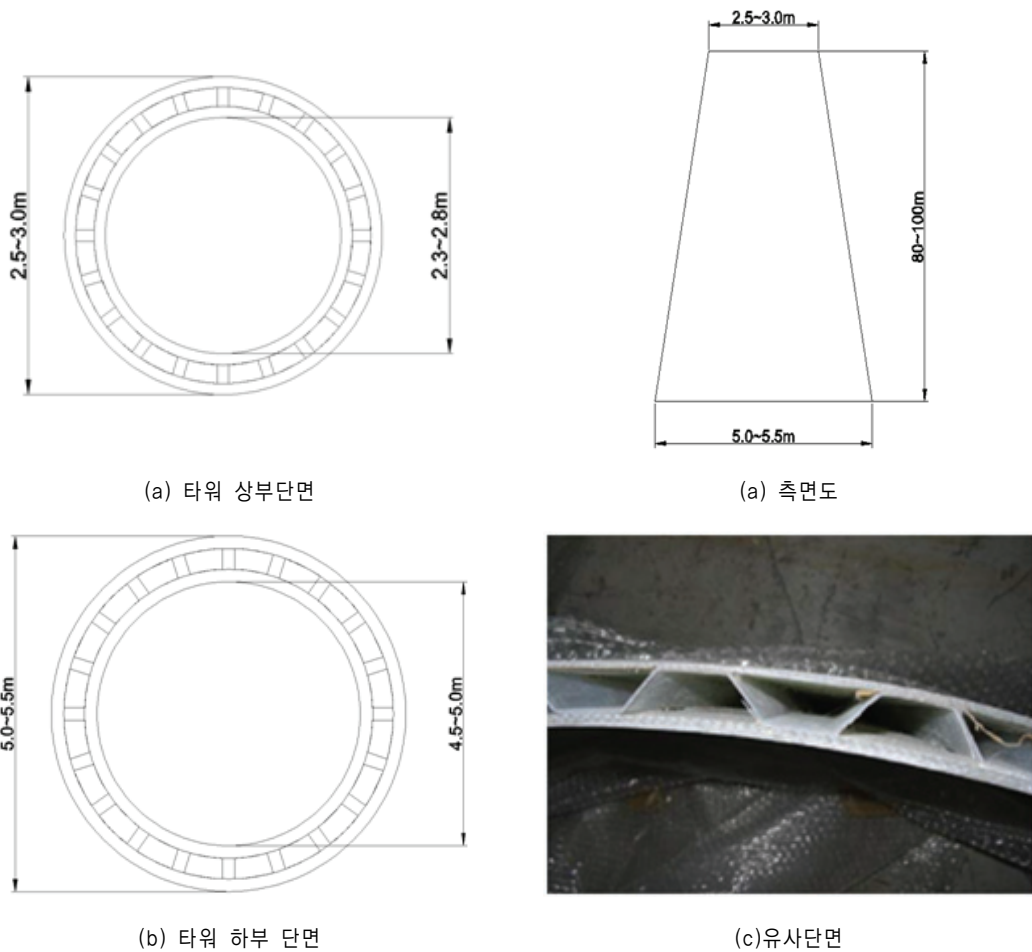
그림 4. 화이버 함침비율에 따른 탄성변화

3. 샌드위치 풍력타워 단면

그림 5는 본 연구에서 제안한 복합소재 풍력타워의 단면을 보여준다. 연구단 3세부 과제의 최종목표는 3.0MW이상의 대형 타워구조 개발이나, 복합소재의 경우는 아직 국내외적으로 개발 및 적용사례가 미미하고 재료 최적화에 대한 기초연구가 보완되어야 할 필요가 있어 1.5~2.0MW 급의 풍력발전을 목표로 개발을 추진하여 향후 3.0MW 급이상으로 확장할 계획이다. 제안한 복합소재 풍력타워는 기본적으로 GFRP를 사용하며, 튜브형태의 단면을 가지면서

샌드위치 타입으로 구성하였다. 향후 최적화 해석(그림 6참조) 및 실제 모형 실험을 통하여 기존 강재 대비 경제성이 확보된 최종 상세형식을 결정할 예정이다.

그림 7은 복합소재 타워의 고유진동 해석을 보여준다. 풍력발전기는 블레이드의 진동과 타워의 고유진동이 경우에 따라 일치되어 공진현상이 발생할 가능성이 있다. 복합소재의 경우 단면의 형상을 변경하지 않고, 동일한 단면에서 적층배열의 변화만으로 고유진동을 제어할 수 있는 장점을 갖는다.



(a) 타워 상부단면

(a) 측면도

(b) 타워 하부 단면

(c) 유사단면

그림 5. 복합소재 풍력타워 단면 (안)

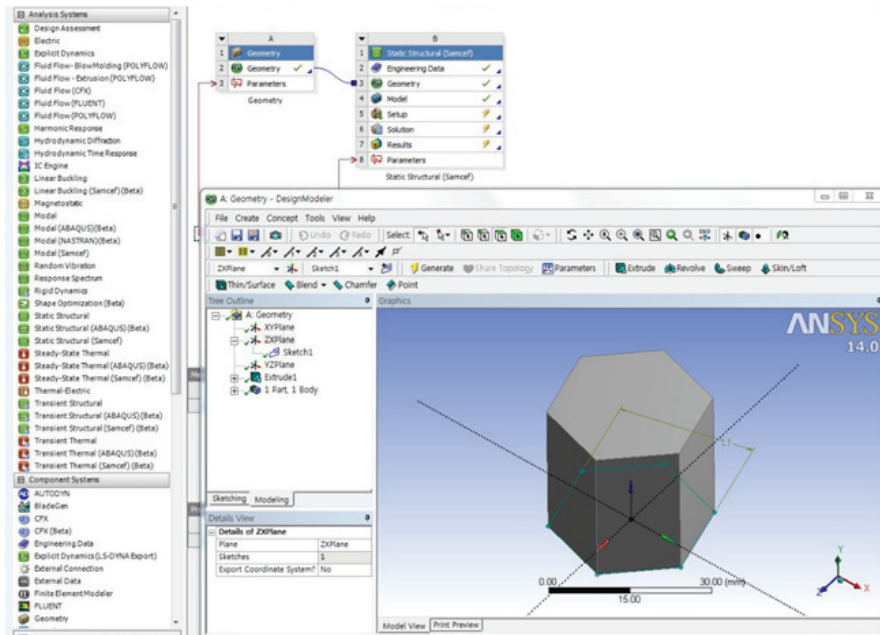


그림 6. ANSYS를 적용한 최적화 해석 예

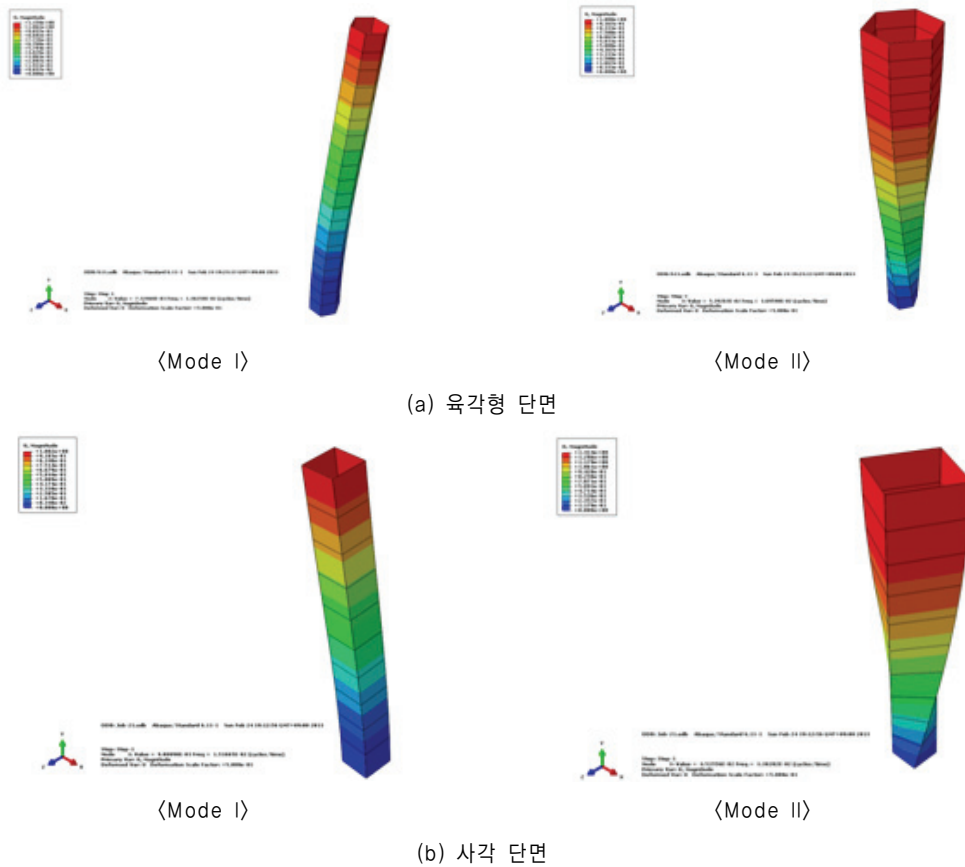


그림 7. 복합소재 타워의 고유진동해석 예 (ABAQUS)

4. 결 론

본 기사는 현재 진행중인 복합소재 풍력타워의 초기 개발 현황을 마이크로 역학의 이론적 배경을 중심으로 소개하였다. 국내의 복합신소재 산업은 최근 획기적으로 발전하고 있으며, 건설 분야에서 요구하는 각종 구조적 성능을 부합할 수 있는 시스템을 갖추고 있다. 이러한 관점에서 본 연구단 과제를 통하여 복합신소재를 풍력타워구조에 적용하고자 하는 시도는 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 다만, 기존 강재에 비하여 원자재가 고가인 복합소재를 경제성을 확보하여 적용할 수 있는 최적화 설계기술이 필요하다. 또한, 복합소재 풍력타워에 적합한 제조 공정 및 시공에 대한 체계적인 정립이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Halpin, J. C., and Tsai, S. W. (1969). "Effects of environmental factors on composite materials." *AFML-TR-67-423*.
2. Hewitt, R. L., and Malherbe, M. C. (1970). "An approximation for the longitudinal shear modulus of continuous fiber composites." *Journal of Composite Materials*, pp. 280-282.
3. Jones, R. M. (1998) *Mechanics of composite materials*. Taylor & Francis, PA.
4. Zuo, Z. H., Huang X., Rong, J. H., and Xie Y. M. (2013). "Multi-scale design of composite materials and structures for maximum natural frequencies." *Materials and Design*, Vol. 51 pp. 1023-1034.