

# 풍하중을 고려한 거수의 구조적 안정성 및 보강법에 관한 연구

이정준 · 강준석

서울대학교 조경 · 지역시스템공학부

## ABSTRACT

현재 시행되고 있는 수목 보강의 단점을 보완할 수 있는 새로운 보강법을 개발하기 위하여 거수의 풍하중에 의한 거동특성을 유한요소해석기법을 사용하여 파악하였다. 개발한 유한요소모델은 속리의 정이품송을 토대로 구성하였다. 새로운 보강법으로 시도된 FRP wrap으로 보강된 나무에 대한 구조해석을 풍하중하에서 수행하였다. 그 결과 FRP wrapping에 의한 명확한 구조적 안정성의 증가를 보였으며 그 효과는 지반으로부터 1.2 m높이를 중심으로 wrapping을 한 모델에서 안정성증대효과가 극대화되는 것으로 나타났다. 본 연구의 해석결과가 향후 식물 실험을 통해 타당한 것으로 입증된다면, 수목 보강기법의 새로운 가이드라인을 제공하게 될 것으로 사료된다.

**Key Words:** 노거수, 보강, 유한요소법, FRP

## 1. 서론

나무는 도시의 가로수부터 산림까지 넓은 지역에 존재하고 있으며 나무의 보호는 나무가 있는 모든 장소에 적용되는 중요한 일이다. 그런 나무 중에서도 종교, 민속, 생활을 망라하는 문화적 가치를 지닌 노거수(老巨樹)를 보호하는 것은 더욱 중요하다. 노거수들은 수령이 오래되어 약화되어 있어 보호가 더욱 필요하다. 한 사례로 천연기념물 103호로 지정된 속리 정이품송은 1993년 강풍에 가지가 부러진 바가 있다. 이런 일을 방지하기 위하여 노거수에 지주 및 줄당김 등의 구조적 보강과 외과수술 등을 시행하여 보호하려는 노력을 시행해오고 있으나, 최근 국립문화재연구소(2014)의 보고서에 의하면 적절하지 않은 구조적 보강과 외과수술 등으로 나무의 안정성을 약화시키는 사례가 다수 발견되었다.

나무를 위협하는 요소에는 여러 가지가 있으나, 물리적 파괴를 일으키는 요소들에는 강풍, 적설이 있다. 특히 강풍은 연중 발생하며 예측할 수 없는 요소이다. 따라서 이 연구에서는 강풍에 대한 반응에 초점을 맞추기로 한다.

나무와 바람의 관계는 오랜 기간 동안 다양한 방법을 통하여 연구가 진행되어 왔다. Spencer *et al.*(2015)은 나무의 기울어짐과 풍속을 실시간으로 측정하여 풍속과 기울기의 관계를 정

량적으로 확인하였다. 연구에서는 구조적 실패를 경험하는 나무에 대한 측정 결과가 쌓이면 안정적으로 나무가 있을 수 있는 기울기의 한계치를 정립할 수 있으리라 보았다.

나무가 견디는 최대 풍속인 임계풍속에 초점을 두고 HWIND(Peltola *et al.*, 1999)와 GALES(Gardiner *et al.*, 2000) 등의 모델이 만들어졌으며, 모델이 정립된 수종 외의 다른 수종에 적용하는 연구(Locatelli *et al.*, 2015)도 진행되었다. 이러한 임계 풍속 연구는 물리, 공학적 계산에 기반을 두고 진행된다. 대표적으로 Brudi 와 Van Wassenae(2002)는 나무의 non-destructive failure의 조건에 대하여 정역학적 관점에서 분석하고 당김 시험을 진행하였다. Peterson과 Claassen(2012) 또한 당김 시험을 통하여 나무에 가해지는 힘에 대한 안정성을 평가하였다. Chiba(2000)의 경우, 이론적 계산 결과를 실제 현상과 비교하는 연구를 수행하였다. K. R. James *et al.*(2006)은 이전의 연구들과 다르게 수형을 단순화하지 않고 각 가지까지 모델링한 더 복잡한 형상을 연구하였다. Yang *et al.*(2014)은 살아있는 나무에 FEM을 적용하여 뿌리부분의 파괴를 분석하고 실제 당김 시험도 진행하여 유사한 결과를 얻었다.

FEM을 뿌리부에 적용하여 실제에 가까운 결과를 얻었다면 다른 부분에 대하여도 실제에 가까운 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 또한 FEM의 다양한 확장성을 통하여 단순한

현상의 진단뿐 아니라 여러 구조보강에 대한 분석이 가능하다. 서두에 언급한 문제점을 해결하기 위해 FEM을 적용한 수목 보강의 연구를 진행하였다.

## II. 연구 방법

### 1. 이론적 배경

#### 1) 풍하중

유체의 흐름이 물체 표면에 닿으면 압력의 형태로 힘을 작용한다. 그 압력은 다음과 같이 주어진다.

$$P = \frac{C_d \rho u^2}{2} \quad \dots (1)$$

여기서  $C_d$ 는 항력계수,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $u$ 는 유체의 속력이다. 이 식을 바람과 나무의 관계에 적용했을 때, 나무는 긴 원통형 물체로 볼 수 있고, 유체는 공기이다. 따라서  $C_d$ 는 0.82이고,  $\rho$ 는 공기의 밀도인  $1.25 \text{ kg m}^{-3}$ 이 되고 이 값을 적용하면 식 (1)은 이하와 같다.

$$P = 0.5125u^2 \quad \dots (2)$$

#### 2) 유한요소법

유한요소법은 공학적 및 수리물리학적 문제를 해결하는 수치적 방법이다. 복잡한 형상, 하중, 물성치에 관한 문제는 일반적으로 엄밀한 수학적 해를 구할 수 없다. 엄밀해는 물체의 어떤 위치에서도 타당한 값이다. 엄밀해는 일반적으로 미분방정식의 해가 되는데, 복잡한 조건의 미분방정식의 해는 대개 얻을 수 없다. 그렇기 때문에 적절한 해를 얻기 위해서 수치 해석에 의존할 수밖에 없다.

유한요소법은 전체 물체를 하나의 연산으로 해를 구하는 대신, 각 유한요소에 대한 방정식을 세워 전체 물체에 대한 해를 구한다. 이 수치 해석은 물체 내의 특정한 점들을 통해 근사값을 도출해낸다.

### 2. Modeling Approach

#### 1) 기본 가정

나무 전체에 대한 해석을 실행하기 이전에 단순한 모델을 통하여 기본적인 거동 특성을 파악할 필요가 있다. 따라서 이하의 가정을 적용하여 모델을 단순화 하였다.

1. 수관부의 질량 및 풍하중의 영향은 고려하지 않는다.
2. 뿌리 부분은 땅에 완전히 고정되어 움직이지 않는다.

3. 나무와 FRP는 완전한 탄성을 갖는다.

4. 나무와 FRP wrapping 사이에는 어떠한 미끄러짐도 존재하지 않는다.

5. 나무의 재질은 완전히 균일하며 같은 특성을 지닌다.

6. 풍속은 모든 높이에서 동일하다.

#### 2) 형상

형상은 2007년 문화재청의 정밀실측 결과를 토대로 높이 10.9 m, 근원반경 0.780 m, 흉고반경 0.684 m, 상부 반경 0.444 m의 원통형으로 구성하였고, FRP wrapping은 높이는 1 m이며 나무에 밀착하도록 구성하였다.

#### 3) 물질

사용 물질은 나무와 단방향 FRP 소재이다. 소나무(*Pinus densiflora*)의 정확한 물성치가 알려져 있지 않아, 같은 속의 Red Pine(*Pinus resinosa*)의 값을 적용하였다.

단방향 FRP 소재의 물성치는 알려진 epoxy resin의 물성치와 e-glass fiber의 물성치를 이용하여 값을 도출해 내었다.

#### 4) 풍하중

풍하중을 적용할 풍속의 기준을 태풍으로 설정하고, 대한민국에서 관측된 태풍의 최대풍속을 적용하였다. 국가태풍센터의 자료에 의하면 관측된 태풍의 순간 최대 풍속은  $60 \text{ m s}^{-1}$ 였다. 이 값을 식 (2)에 적용하면 그 풍압력은 1845 Pa이 된다.

풍압력은 바람을 맞는 면에만 적용되므로 옆쪽으로 압력을 적용할 경우 일어날 수 있는 영향을 줄이기 위해, 앞쪽 120° 영역에만 압력을 적용하였다.

#### 5) 분석 방법

먼저, FRP를 통한 보강을 하지 않은 채로 분석을 하였다.

보강을 설정한 방법은 FRP wrap 중심을 0.7 m를 시작으로 0.5 m 간격으로 옮겨, 3.2 m 지점까지 이동시켰고, 추가적으로 지면에 FRP wrap의 하단이 닿도록 하여 분석하였다.

## III. 결과

### 1. 수평 변위

수관이 부러질 가능성은 나무가 얼마나 기울어져 있는지를 보면 명백히 알 수 있다. 얼마나 기울어졌는지는 수평으로 나무가 얼마나 움직였는지를 확인하면 된다.

Figure 1은 FRP wrapping 위치에 따른 최대 변위를 보여준

다. 보강되지 않은 수간에 비해 보강된 구간에는 약 0.03 mm 정도의 최대 변위의 감소가 나타난다. 또한 보강 지점에 따른 변위는 1.2 m 지점에서 가장 낮았으며 1.2 m에서 멀어질수록 증가하는 경향을 보였다.

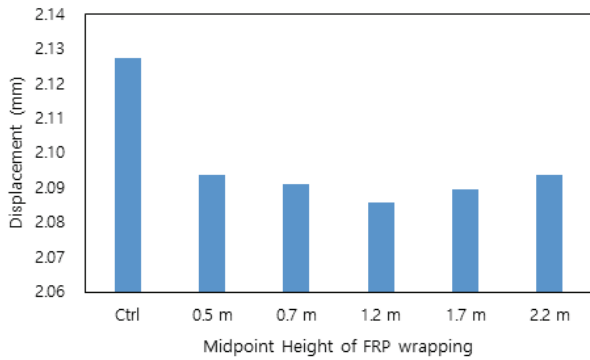


Figure 1. FRP wrapping 위치를 변인으로 한 변위 (Ctrl은 보강되지 않은 수간의 값)

## 2. 응력 분포

응력이란 물체에 내부에 작용하는 단위면적당 힘을 의미한다. 모든 물질에는 응력에 버티는 정도가 있으며 이를 넘어서면 그 물질은 원래 형상으로 되돌아오지 못하며, 하중을 견디는 능력을 상실한다. 따라서 같은 물질일 때 응력이 높으면 더 파괴가 일어날 가능성이 높다. 그렇다면 안정성을 살펴보려면 응력의 분포를 살펴보아야 한다.

보강을 하였을 때, 보강부에서 응력이 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 보강 위치를 바꾸어도 감소량은 거의 일정하며 그 값은 대략 0.03 MPa ~ 0.04 MPa 정도가 된다. 그리고 보강부의 끝단에서 약간의 응력 증가가 관찰된다.

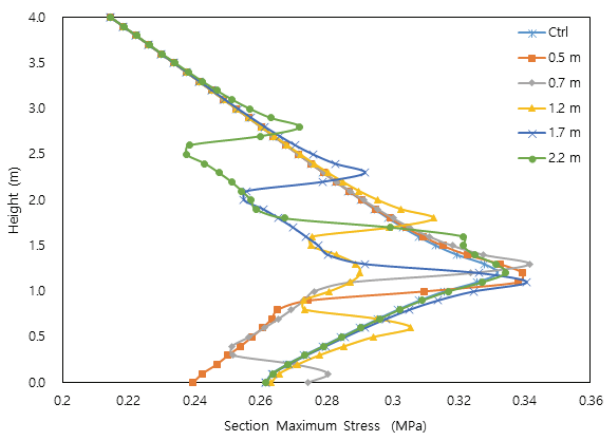


Figure 2. FRP wrapping 위치를 변인으로 한 변위 (Ctrl은 보강되지 않은 수간의 값, 범례의 값은 수간의 보강 위치이다.)

Figure 2는 같은 조건에서 높이별 최대 응력을 나타내고 있다. 4 m 이상의 응력 분포는 거의 동일하여 표기하지 않았다. 보강되지 않은 구간에서 1.2 m 높이의 응력이 최대가 된다.

보강한 수간의 전체적인 값을 보면 1.2 m 지점의 보강이 가장 낮은 최대 응력을 보였다, 또한 1.2 m 지점에 대한 보강을 제외하고는 보강되지 않았을 경우보다 높게 나타났다. 이것은 보강부 끝단에서의 응력 증가가 원인으로 보인다.

## IV. 결론

몇 가지의 가정을 적용하여 FRP wrapping이 된 수간이 변위와 응력이 감소하였는지, 어느 위치에 적용하여야 하는지에 관하여 내린 결론은 다음과 같다.

- 응력 감소는 보강한 위치에만 나타났고 오히려 그 끝단부에서는 응력이 증가하였다.
- 보강 위치의 경우 1.2 m 를 중심으로 보강하였을 때 변위가 가장 적었으며, 가장 효과적으로 응력이 감소하였다.

하지만, 이 결과는 시뮬레이션을 통한 것일 뿐이므로 실험을 통한 실증이 필요하다. 또한 다른 형태의 보강법과의 비교를 통하여 어느 정도의 효율성을 갖는지도 검증해 보아야 한다.

이 결과가 실험을 통해 증명이 된다면 새롭고 간편하게 수목을 보호할 수 있는 방법이 되리라 생각한다.

## 참고문헌

1. Brudi, E., van Wassenar, P.(2002) Trees and statics: nondestructive failure analysis. In:
2. Smiley, E. T., Coder, K. D.(Eds.), Tree Structure and Mechanics Conference Proceedings: How Trees Stand Up and Fall Down. International Society of Arboriculture, Campaign, IL, 53-69.
3. Chiba, Y.(2000) Modelling stem breakage caused by typhoons in plantation Cryptomeria japonica forests. Forest Ecology and Management 135, 123-131.
4. Gardier, B., Peltora, H., Kellomäki, S.(2000) Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. Ecological Modelling 129, 1-23.
5. James, K., Hallam, C. Spencer, C.(2013) Tree stability in winds: Measurement of root plate tilt. Biosystems Engineering 115, 324-331.
6. James, K. R., Haritos, N., Ades, P. K.(2006) Mechanical stability of trees under dynamic loads. American Journal of Botany 93, 1522-1530.
7. Kane, B.(2008) Tree failure following a windstorm in Brewster, Massachusetts, USA. Urban Forestry & Urban Greening 7, 15-23.
8. Locatelli, T., Gardiner, B., Tarantola, S. Nicoll, B., Bonnefond, J.-M., Garrigou, D., Kamimura, K., Patenaude, G.(2016) Modelling wind risk to Eucalyptus globulus (Labill.) stands. Forest Ecology and Management 365, 159-173.

9. Nishimura, T. B.(2005) Tree characteristics related to stem breakage of *Picea glehnii* and *Abies sachalinensis*. *Forest Ecology and Management* 215, 295-306.
10. Ou, Y, Zhu, D.(2015) Tensile behavior of glass fiber reinforced composite at different strain rates and temperatures. *Construction and Building Materials* 96, 648-656.
11. Peterson, C. J., Claassen, V.(2012) An evaluation of the stability of *Quercus lobata* and *Populus fremontii* on river levees assessed using static winching tests. *Forestry* 86, 201-209.
12. Petty, J. A., Swain, C.(1985) Factor influencing stem breakage of conifers in high winds. *Forestry* 58, 75-84.
13. Sellier, D., Brunet, Y., Fourcaud, T.(2008) A numerical model of tree aerodynamic response to a turbulent airflow. *Forestry* 81, 279-297.
14. USDA(2010) *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*.
15. Yang, M., D'fossez, P., Danjon, F., Fourcaud, T.(2014) Tree stability under wind: simulating uprooting and root breakage using a finite element method. *Annals of Botany* 114, 695-709.
16. 기상청 국가태풍센터(2011) 태풍백서. pp. 38.
17. 국립문화재연구소(2014) 천연기념물 (노거수) 보호시설 안정성·적정성 연구.