

# 풍하중에 의한 가로수의 피해 유형과 발생 원인에 관한 연구

이건우\*, 이상석\*\*

\*서울시립대학교 대학원 조경학과 석사과정, \*\*서울시립대학교 조경학과 교수

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

가로수는 가로 미관 향상, 그늘 제공, 도시 내에서 발생하는 복사열을 흡수하여 기온 조절 및 도시 미기후를 조절하는 기능을 수행한다(Han and Lee, 1996). 그러나 도시에 식재되는 가로수는 식재 공간의 제한, 토양의 압축으로 인한 통기성의 저하와 수분과 영양분의 부족 등으로 인해 자연 상태의 수목에 비해서 도복<sup>1)</sup>이 발생할 가능성이 높다(Seoul Institute of Technology, 2022). 또한 지구온난화로 인한 기후변화로 외부 환경에 영향을 많이 받는 조경수목이 많은 피해를 받고 있으며(Yu and Lee, 2013), 실제로 태풍 등에 의해 가로수가 도복되거나 부러지는 사례가 증가하고 있다(Korea Forest Service, 2022).

가로수의 도복이나 부러짐에 의한 피해는 불특정 다수의 사회 구성원에게 가해질 수 있으므로, 국내외에서는 가로수의 도복 매커니즘을 이해하고 가로수로 인한 피해를 최소화하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만 실제 사례를 바탕으로 도시 내에서 가로수에 의한 피해가 발생하는 양상과 그 원인에 관해 분석한 연구는 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 가로수 피해 양상을 네 가지로 정의하고 각각의 피해 양상이 발생하는 원인을 다항 로지스틱 회귀 분석을 통해서 규명하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구의 범위와 데이터 수집 방법

피해를 입은 가로수 표본은 가로수 피해 관련 기사 검색을 통해 수집하였다. 수집한 데이터의 시간적 범위는 지역별 상세 관측 자료(AWS)가 존재하는 2017년부터 2022년으로 한정하였다. 공간적 범위는 Kim et al.(2019)이 제안한 태풍 위험지수가 높은 수도권, 동해안, 남해안 위주로 구글 검색을 통해 충분한 양의 데이터를 획득할 수 있는 곳으로 선정하였다. 선정된 대상지와 피해 수목의 수는 아래의 표 1과 같다.

표 1. 연구 대상지와 피해 수목의 개수

	서울	경기·인천	포항	대구	울산	부산	제주	계
피해 수목의 수	17	11	4	3	6	8	11	60

수집한 기사에서 피해가 발생한 가로수의 사진을 후술할 피해 유형에 따라 분류하였다. 피해가 발생한 가로수의 위치 정보는 카카오맵, 네이버 지도 및 구글 지도를 통해 수집하였고, 현장 조사를 진행하였다. 현장 조사 시 식재대 면적, 보행로의 폭, 식재 간격, 포장 유형, 연석의 규격, 이웃 나무의 흉고직경과 수고를 조사하였다. 수고와 흉고직경 등 제거된 가로수의 형상과 관련된 변수는 조사한 로드뷰 이미지와 연석의 치수를 바탕으로 CAD 프로그램인 Rhino 7과 수목의 특징을 분석하는 프로그램인 Urban Crowns를 이용하여 측정하였다.

### 2.2 가로수 피해 유형의 정의

수목에 가해지는 바람은 '돛'과 같은 역할을 하는 수관에서 주간을 거쳐 모멘트로 근분(root-soil plate)에 가해지며(Mattheck et al., 1994), 이러한 모멘트는 바람에 의한 하중인 풍하중과 모멘트 팔의 길이를 곱하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 바람에 의해 발생한 모멘트가 원인이 되어 가로수가 부러지거나 도복되는 현상을 가로수 피해로 정의하였다. 선행연구(Mayer, 1987; Tanaka and Yagisawa, 2009; Rahardjo et al., 2014)와 수집한 이미지 데이터를 바탕으로 가로수에서 발생하는 피해 유형을 가지 부러짐, 주간 부러짐, 지제부 부러짐, 흙의 전단파괴로 인한 도복, 뿌리의 부러짐과 흙의 전단파괴로 인한 도복의 5가지로 정의하였다.

가지 부러짐은 강한 비바람에 의해 수관의 목질부인 가지가 부러지거나 찢어지는 현상이며, 주간 부러짐은 수목이 도복되기 이전에 바람에 의해 발생하

1) 작물이 비나 바람 따위에 쓰러지는 일

는 모멘트가 주간의 강도를 초과하여 부러지는 현상을 의미한다. 지제부 부러짐은 토양과 지상부의 경계부인 지제부에서 부러짐이 발생하는 것이며, 그 원인은 지제부에 발생하는 부후와 공동이다. 뿌리의 부러짐과 흙의 전단파괴로 인한 도복은 바람에 의한 모멘트로 인해서 흙의 전단파괴가 발생한 이후 뿌리가 부러지면서 수목이 도복되는 것을 의미한다. 뿌리의 발달이 미비하여 뿌리에 의한 모멘트 반력이 발생하지 않을 때는 흙의 전단파괴만으로도 수목의 도복이 발생하는데, 이러한 현상을 흙의 전단파괴로 인한 도복으로 정의하였다. 각 피해 유형에 대한 사진은 아래의 표 2와 같다.

표 2. 가로수에서 발생하는 피해 유형

가지 부러짐	주간 부러짐	지제부 부러짐	뿌리의 부러짐과 흙의 전단파괴로 도복	흙의 전단파괴로 인한 도복
				

### 2.3 다항 로지스틱 회귀분석

종속변수가 2개 이상이므로 다항 로지스틱 회귀분석을 이용하여 독립변수가 가로수 피해 발생 확률에 미치는 영향을 분석하였다. 다항 로지스틱 회귀분석을 진행하기 위해서는 기준범주를 임의로 선정해야 하는데, 본 연구에서는 표본의 수가 가장 많은 뿌리의 부러짐과 흙의 전단파괴로 인한 도복을 기준범주로 선정하였다. 독립변수는 선행연구(Giachetti et al., 2021; Seoul Institute of Technology, 2022)를 참고하여 표 3과 같이 설정하였으며, 기후 요인, 가로수 형상 요인, 식재 환경 요인의 3가지 대분류로 구분하였다. 식재대 면적과 보행로 폭, 가지치기 차수는 Seoul Institute of Technology(2022)의 환경여건 조사 방법과 수목활력도 평가등급을 토대로 척도화를 진행하였다. 설정한 변수들에 대하여 다중공선성 분석을 진행하여 최종적으로 확정된 변수는 표 4와 같다.

표 3. 최초로 선정된 독립변수

대분류	독립변수
기후 요인	10분 평균 풍속(m/s), 누적 강우량(mm/hr)
가로수 형상 요인	흉고직경(cm), 수고(m), 수관 높이(m), 수관 폭(m), 엽밀도(%), 수관의 투과율(%), 수관과 수고의 비, 가지치기 차수(5점 척도)
식재 환경 요인	식재대 면적(7점 척도), 보행로의 폭(5점 척도)

표 4. 다중공선성 분석 이후 확정된 독립변수

대분류	독립변수
기후 요인	10분 평균 풍속(m/s), 누적 강우량(mm/hr)
가로수 형상 요인	수고(m), 수관 폭(m), 수관의 투과율(%)
식재 환경 요인	식재대 면적(7점 척도)

## 3. 연구 결과

다항 로지스틱 회귀분석은 Python의 통계 분석 라이브러리인 Statsmodels를 이용하여 진행하였다. 모델의 유사 R<sup>2</sup>값은 0.511이며, 유의수준 0.1에서 독립변수의 유의성을 판단하였다. 분석 결과는 표 5와 같고, 가지 부러짐을 제외한 가로수 피해 유형에 대하여 적어도 하나의 독립변수가 유의하다는 결과가 도출되었다.

주간 부러짐이 발생할 확률은 평균 풍속이 빨라질수록 기준범주에 비해 2.148배 높게 나타났으며, 수고가 높아질수록 1.917배 높게 나타났다. 수관 폭이 길어지고 수관의 투과율이 높아질수록 주간 부러짐이 발생할 확률이 기준범주에 비해 각각 0.282배, 0.721배 낮게 나타났다. 바람에 의해 가로수에 가

표 5. 다항 로지스틱 회귀분석 결과

	기준범주		뿌리의 부러짐과 흠의 전단파괴로 인한 도복			
	종속변수	주간 부러짐	지제부 부러짐	가지 부러짐	흠의 전단파괴	
독립 변수	절편		0.1553	4.1165	1.2274	4.2628
	오즈비	10분 평균 풍속(m/s)	2.147596*	0.74143	1.065569	2.29788*
		누적 강우량(mm/hr)	1.018756	0.964368*	0.996939	1.002432
		수고(m)	1.917108*	0.828387	0.702102	0.591321
		수관 폭(m)	0.28206**	0.845135	1.320425	0.311835
		수관의 투과율(%)	0.721164*	1.025701	0.945712	0.985833
		식재대 면적	1.194876	0.867395	1.005548	1.163

\* $p < 0.1$ , \*\* $p < 0.05$ , \*\*\* $p < 0.01$

해지는 모멘트는 풍속의 제곱에 비례하고 면적과 수고에 비례한다. 따라서 바람에 의해 발생하는 모멘트가 증가할수록 뿌리의 부러짐과 흠의 전단파괴로 인한 부러짐이 발생할 확률보다 주간 부러짐이 발생할 확률이 증가한다는 것을 예상할 수 있다. 더 나아가 가로수에 가해지는 모멘트에 대한 주간의 저항력이 근본의 저항력보다 높다는 것과 통상적으로 뿌리의 부러짐과 흠의 전단파괴로 인한 도복이 발생할 가능성이 높다는 것을 추정할 수 있다.

가로수에 가해지는 모멘트는 풍속과 바람이 가해지는 면적, 수고에 대한 함수이다. 수집한 표본 중 흠의 전단파괴로 인한 도복 피해를 입은 가로수의 면적과 수고는 뿌리의 부러짐과 흠의 전단파괴로 인한 도복 피해를 입은 가로수에 비해 평균적으로 작았다. 따라서 흠의 전단파괴로 인한 도복은 풍속이 빠를수록 기준범주에 비해 발생할 확률이 증가할 것이라고 예상할 수 있으며, 실제로 표 5를 보면 흠의 전단파괴로 인한 도복이 발생할 확률은 풍속이 빨라질수록 기준범주인 뿌리의 부러짐과 흠의 전단파괴로 인한 도복에 비해 2.298배 높게 나타났다.

지제부 부러짐이 발생할 확률은 누적 강우량이 많아질수록 기준범주에 비해 0.964배 낮게 나타났다. 누적 강우량 이외의 변수들은 통계적으로 유의하지 않았지만, 분석 결과로 도출된 오즈비의 경향을 통해서 바람에 의해 수목에 가해지는 모멘트가 작을수록 지제부 부러짐이 발생할 가능성이 높다고 예상할 수 있다. 이러한 결과가 도출된 이유는 지제부 부러짐이 자실체와 공동 등 구조적 결합요인에 의해 비교적 풍속이 느리고 강우가 발생하지 않는 상황에서 갑작스럽게 발생하기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다항 로지스틱 회귀분석을 이용하여 기후 요인과 가로수 형상 요인, 식재 환경 요인이 가로수의 피해 발생 확률에 미치는 영향을 규명하였다. 이러한 결과는 추후 가로수 피해 발생 예방을 위한 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 통계 분석에 이용된 표본은 검색을 통하여 확보한 것이기 때문에 실제 수목 피해 사례를 완벽히 대표한다고 할 수 없다. 둘째, 가로수 피해는 기후 요인과 가로수 형상 요인, 식재 환경 요인의 상호작용으로 인해 발생하는데, 본 연구에서는 독립변수와 종속변수 간의 1차원적인 인과관계만을 분석하였다. 따라서 이러한 한계점을 보완한 후속 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. [사진]종로에 쓰러진 가로수(2018) <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2018090317218224971>
2. 강북구, 태풍 '마이삭'으로 쓰러진 가로수 긴급 복구(2020) <http://www.igangbuk.com/news/hangieng/4661?page=10>
3. 달리던 오토바이 앞으로 쓰러진 가로수·운전자 부상 날벼락(2021) <https://www.busan.com/view/busan/view.php?code=2021050818404931740>
4. 산림청(2022) 가로수 조성·관리 매뉴얼.
5. 태풍 '링링' 강풍으로 담벼락·지붕 붕괴...전국에서 사상자 발생(2019) <https://www.vop.co.kr/A00001433499.html>
6. 태풍에 거리는 텅비고 도로도 한산...카페·영화관으로 '피신'(2019) <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2018090317218224971>
7. Coutts, M. P.(1986) Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 59(2): 173-197.
8. Giachetti, A., F. Ferrini and G. Bartoli(2021) A risk analysis procedure for urban trees subjected to wind-or rainstorm. *Urban Forestry & Urban Greening* 58: 126941.
9. Han, B. and K. Lee(1996) A study on the analysis of the physiological growth condition and improvement of street trees in Seoul, Korean *Journal of Environment and Ecology* 10(1): 39-48.

10. Kim, Y., B. Lee and T. Kim(2019) Development of a typhoon risk index (TRI) based on records of typhoon damage. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 19(7): 501-509.
11. Mattheck, C. and H. Breloer(1994) *The Body Language of Trees: A Handbook for Failure Analysis*. HMSO Publications Centre.
12. Mayer, H.(1987) Wind-induced tree sways. *Trees* 1: 195-206.
13. Rahardjo, H., F. R. Harnas, I. G. B. Indrawan, E. C. Leong, P. Y. Tan, Y. K. Fong and L. F. Ow(2014) Understanding the stability of Samanea saman trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models. *Urban Forestry & Urban Greening* 13(2): 355-364.
14. Seabold, S. and J. Perktold(2010) *Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python*. Proceedings of the 9th Python in Science Conference.
15. Seoul Institute of Technology(2022) Evaluation Method of Street Tree Vigor and Hazard in Seoul.
16. Tanaka, N. and J. Yagisawa(2009) Effects of tree characteristics and substrate condition on critical breaking moment of trees due to heavy flooding. *Landscape and Ecological Engineering* 5: 59-70.
17. Yu, J. and S. Lee(2013). A study on analyzing precedents and legal system of landscape tree damage by natural disasters. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 41(4): 77-84.