

수목 도복의 3D 충격량 산출 기법 개발[†]

Development of 3D Impulse Calculation Technique for Falling Down of Trees[†]

김채원*, 김충식**

*한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리기술학과 박사과정, **한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리기술학과 교수

Kim, Chae-Won*, Kim, Choong-Sik**

*Doctoral Course, Dept. of Graduate School of Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage

**Professor, Dept. of Graduate School of Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage

Received: June 17, 2022

Revised: August 09, 2022 (1st)
November 04, 2022 (2nd)

Accepted: November 04, 2022

3인익명 심사필

Corresponding author :

Choong-Sik Kim

Professor, Dept. of Graduate
School of Cultural Heritage,
Korea National University of
Cultural Heritage, Buyeo 33115,
Korea

Tel.: +82-41-830-7375

E-mail : kimch@nuch.ac.kr

국문초록

수목의 파손은 주변 재산과 생명에 치명적인 위협을 초래한다. 특히, 도복으로 인한 위협은 피해범위가 넓고, 충격의 강도가 높기 때문에 선제적으로 대응하는 것이 중요하다. 이에 도복 시 예상되는 잠재적 위험범위를 산정하거나 위험등급을 평가한 시도가 있었지만, 구체적인 물리량으로 위험을 정량화하지 못하였다. 또한, 수목과 피해대상의 형상을 입체적으로 반영하지 못했다는 아쉬움이 있다. 본 연구는 수목의 도복 시 발생할 수 있는 위험범위와 충격량을 정량적, 입체적으로 예측하기 위한 기법의 개발을 목적으로 하였다. 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 수목의 도복 시 발생하는 위험범위와 충격량 산출식을 정립하였다. 위험범위 산출 시 수목이 쓰러져 미끄러지는 가능성을 반영해 수고의 1.5배를 반경으로 하는 원의 내부 범위로 확대하여 계산하였다. 수목의 기울기에 따라 직립으로 생육하는 수목은 근원부를 중심으로 360° 범위, 기울어져 생육하는 수목은 기운 방향에서 180° 범위로 설정하였다. 충격량은 충돌이 발생하기 직전 수목의 나중운동량이 피해대상에 전달되는 현상을 이용해 산출하였다. 또한, 수목이 쓰러질 때 근원부를 기점으로 회전운동 하는 것을 반영해 각운동량을 산출하였으며, 이를 선운동량으로 전환하여 충격량을 계산하였다. 둘째, Rhino3D와 Grasshopper를 이용하여 위험범위, 충격량 산출 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘은 3차원 모델 제작, 산출, 조회 기능으로 구성하였다. 3차원 모델은 Rhino3D를 이용하여 지형, 건물, 수목의 형상을 입체적 모델로 제작하였고, 이를 Grasshopper에 연결하여 공간정보를 구축하였다. 산출 기능에서는 산출식을 활용하여 알고리즘을 코딩하였다. 산출 시 수고, 기울기, 중량 등 수목의 생육 정보와 인접수목, 피해대상, 분석범위 등 주변 환경을 고려하였다. 조회 기능에서는 산출 결과를 종합하여 3차원 모델에 가시화하였다. 산출값에 따라 색상으로 구분하여 위험수목과 위험구역을 효율적으로 판단하였다. 본 연구는 수목의 도복 시 발생하는 잠재적 위험범위와 충격량을 정량적으로 산출하고, 이를 가시화하여 우선관리가 필요한 대상을 효율적으로 판단하는 방법을 제시하였다. 이는 도복 발생 시, 주변 건물과 관람객의 안전을 위한 대책 수립 및 재난 예방의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 도심지와 공원, 문화재구역에서 명확한 기준 없이 진행되는 수목의 제거를 방지하는 데 기여할 것이다.

주제어: 예측, 알고리즘, 위험수목, 위험범위, 문화재 방재

ABSTRACT

This study intended to develop a technique for quantitatively and 3-dimensionally predicting the potential failure zone and impulse that may occur when trees are fall down. The main outcomes of this study are as follows. First, this study established the potential failure zone and impulse calculation formula in order to quantitatively calculate the risks generated when trees are fallen down. When estimating the potential failure zone, the calculation was performed by magnifying the height of trees by 1.5 times, reflecting the likelihood of trees falling down and slipping. With regard to the slope of a tree, the range of 360° centered on the root collar was set in the case of trees that grow upright and the range of 180° from the inclined direction was set in the case of trees that grow inclined. The angular momentum was calculated by reflecting the rotational motion from the root collar when the trees fell down, and the impulse was calculated by converting it into

[†]본 논문은 한국전통문화대학교 연구개발지원사업인 '물리 연산 엔진 기반의 3차원 천연기념물(노거수)위해 진단 시스템 개발'의 결과물임.

the linear momentum. Second, the program to calculate a potential failure zone and impulse was developed using Rhino3D and Grasshopper. This study created the 3-dimensional models of the shapes for topography, buildings, and trees using the Rhino3D, thereby connecting them to Grasshopper to construct the spatial information. The algorithm was programmed using the calculation formula in the stage of risk calculation. This calculation considered the information on the trees' growth such as the height, inclination, and weight of trees and the surrounding environment including adjacent trees, damage targets, and analysis ranges. In the stage of risk inquiry, the calculation results were visualized into a three-dimensional model by summarizing them. For instance, the risk degrees were classified into various colors to efficiently determine the dangerous trees and dangerous areas.

Keywords: Prediction, Algorithm, Hazard Tree, Potential Failure Zone, Disaster Prevention of Cultural Heritage

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

최근에는 평균기온 상승 및 강수량 증가, 계절 길이 변화와 같은 기후변화 및 극한기상의 발생이 증가하여 이에 따른 수목의 파손이 증가하고 있다(유주은과 이상석, 2013). 수목은 대기환경 개선, 경관 형성, 재해 방지 등 다양한 혜택을 제공하지만, 파손 발생 시 주변의 재산과 인명에 치명적인 위험을 가할 수 있는 양면성을 갖고 있다. 특히, 도복은 발생 시 피해범위가 넓고, 위험의 강도가 높기 때문에 사후복구가 아닌 선제적 관리방안의 마련이 절실하다.

사후적 대응조치를 벗어나 사전관리 및 예방을 위해서 「문화재보호법」이나 「산림보호법」은 수목의 정기적인 관리 및 보호를 명시하고 있으며 이에 따른 관리지침이 제정, 수행되고 있다. 하지만 주로 수목 자체의 파손만을 고려한 것으로 파손으로 인한 주변의 위험은 간과하고 있는 실정이다. 지방자치단체의 경우 수목으로 인한 위험에 대비하기 위해 「경기도 생활위험수목 처리 지원에 관한 조례」 등을 제정하여 위험수목을 제거하는 사업을 주도하고 있다. 하지만 위험수목에 대한 명확한 기준이나 평가가 부족한 상황에서 수목의 제거가 진행되고 있다(국립산림과학원, 2020). 이에 실제 위험 발생 가능성이 낮거나 피해정도가 경미하여 사전관리를 통해 피해를 경감할 수 있는 수목마저 제거될 가능성이 있기 때문에 많은 시간과 비용이 소모되고 있다. 또한 경관 및 자연환경이 훼손될 우려가 있다.

수목의 도복으로 인한 위험을 객관적으로 예측하기 위한 연구가 다수 진행되었다. USDA(2012; 2017)는 수목의 파손으로 인해 피해가 발생할 수 있는 잠재적 위험범위를 산정하고, 이를 가시화하였다. 위험범위는 수목의 수고, 기울기와 파손 부위 등을 고려하여 산정되었다. 하지만 지형과 피해대상의 형상, 인접수목 등 주변 환경의 입체적 특성을 반영하지 못하였으며, 위험범위의 면적 등 정량화된 결과를 도출하지 못하였다는 아쉬움이 있다. 국립산림과학원(2020)은 수목의 도복으로 인한 위험성을 평가할 수 있는 가이드라인을 제시하였다. 평지에 직접으로 생육하는 수목의 위험범위를 수고의 1.5배 반경을 지닌 원의 내부 범위로 산정하였다. 또한, 도복 가능성과 피해 정도, 도복의 결과를 종합하여 수목의 위험등급을 경, 중, 심, 극심의 4단계로 구분하였다. 하지만 판단의 기준이 정량적이지 않고, 모호하여 객관적으로 위험을 평가하는데 어려움이 있었다. 검토한 바와 같이 위험범위를 산정하고, 위험수목을 판단하기 위한 시도가 있었다. 하지만, 동일한 위험범위라도 수목의 기울기나 중량, 주변 환경 등에 따라 가해지는 충격의 정도는 달라지게 된다. 그렇기 때문에 구체적인 물리량을 산출하고, 이를 가시화할 수 있다면, 우선 관리가 필요한 위험수목과 구역을 효율적으로 판단하여 대응할 수 있을 것이다. 이에 본 연구는 수목의 도복 시 발생하는 잠재적 위험범위와 충격량을 정량적이고, 통합적으로 예측하는 방법을 모색하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 내용

수목이 위험을 유발하는 요인에는 상충(conflict)과 구조적 파손이 있다(국립산림과학원, 2020). 상충은 피부나 호흡기에 문제를 일으키는 꽃가루, 악취를 가진 과실, 가시가 많은 가지나 잎 등으로 인한 위험이다. 이로 인한 피해는 미미하지만, 위험의 범주에 포함된다. 구조적 파손은 가해지는 힘이 수목의 강도를 능가할 때 발생하며, 절손

(折損)과 도복(倒伏)으로 구분된다. 절손은 수간 또는 가지가 부러지는 것이고, 도복은 수목의 지상부가 넘어지는 것이다. 본 연구는 발생 시 피해가 치명적인 도복으로 인한 충격량을 예측하여 피해를 경감할 수 있는 방법을 마련하고자 하였다.

연구의 내용은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째, 관련 이론을 검토하여 도복 시 발생하는 위험범위와 충격량 산출식을 구체화하였다. 둘째, 충격량을 효율적으로 산출하고, 이를 가시화하기 위한 산출 알고리즘을 개발하였다. 충격량을 입체적으로 분석하기 위한 3차원 모델의 제작은 자유로운 곡면 모델링이 가능한 Rhino3D를 이용하였다. 산출 알고리즘은 Rhino3D의 플러그인(plugin)으로 스크립트 언어를 조직하여 알고리즘을 개발할 수 있는 Grasshopper를 이용하였다.

2. 산출식 도출

2.1 위험범위

위험범위는 수목의 도복 시 피해가 발생할 수 있는 물리적·잠재적 범위이다. 위험범위가 넓다는 것은 도복으로 인한 피해대상이 많아질 수 있다는 의미이다. 지형, 수고, 수목의 직립여부 등을 고려하여 산출된다.

『별목 표준안전 작업지침』 제4조 제2항과 국립산림과학원(2020)에 의하면 평지에서 생육하는 수목의 위험범위는 수고의 1.5배를 반경으로 하는 원(circle)의 내부 범위로 명시하고 있다. 이는 수목이 도복되면서 미끄러지는 경우를 고려한 것이다. 경사지에 생육하고 있는 수목의 경우 평지보다 미끄러지거나 굴러 내려갈 수 있는 범위가 넓어질 수 있기 때문에 위험범위에 미끄럼할증(수고의 0.5배)을 가산하여 산정되기도 한다(USDA, 2017). 하지만 산림은 초본류의 식재 및 제거와 하층의 예초, 기후와 계절에 따라 지형의 상태가 빈번하게 변화한다. 지형의 상황과 지면의 거친정도를 계측하여 미끄럼할증을 적용하는 것은 시간과 비용을 고려할 때 현실적이지 않다. 본 연구는 수목의 도복으로 인해 발생할 수 있는 물리량의 정량화 가능성을 제시한 기초적인 단계이므로 미끄럼할증을 가산하지 않았다. 대신, 수목이 쓰러져 미끄러지는 가능성을 고려하여 평지와 경사지의 위험범위를 수고의 1.5배를 반경으로 하는 원의 내부 범위로 적용하였다.

수목의 직립여부에 따라 위험범위가 다르게 산정되기 때문에 기울기는 위험범위 산출 시 중요하게 고려되어야 한다(그림 1 참조). USDA(2017)에 근거하여 직립으로 생육하는 수목은 근원부를 중심으로 360° 방위를 잠재적 위험범위로 설정하였다. 기울어져 생육하는 수목은 기운 방향에서 좌·우 90°가 되는 지점까지의 반원(half circle, 180°)을 위험범위로 설정하였다. 기울어진 수목은 무게 중심이 지제부(地際部)에서 이탈된 것으로 15° 이상 기운 수목은 도복의 위험이 있으며, 10° 이하의 경우 비교적 도복의 위험이 낮다고 판단된다(산림청, 2021). 본 연구는 직립에서 5° 이상 기운 경우 기울어진 수목으로 판단하여 도복 가능성이 높은 수목과 함께 잠재적 도복 가능성이 있는 수목의 충격량까지 예측하였다.

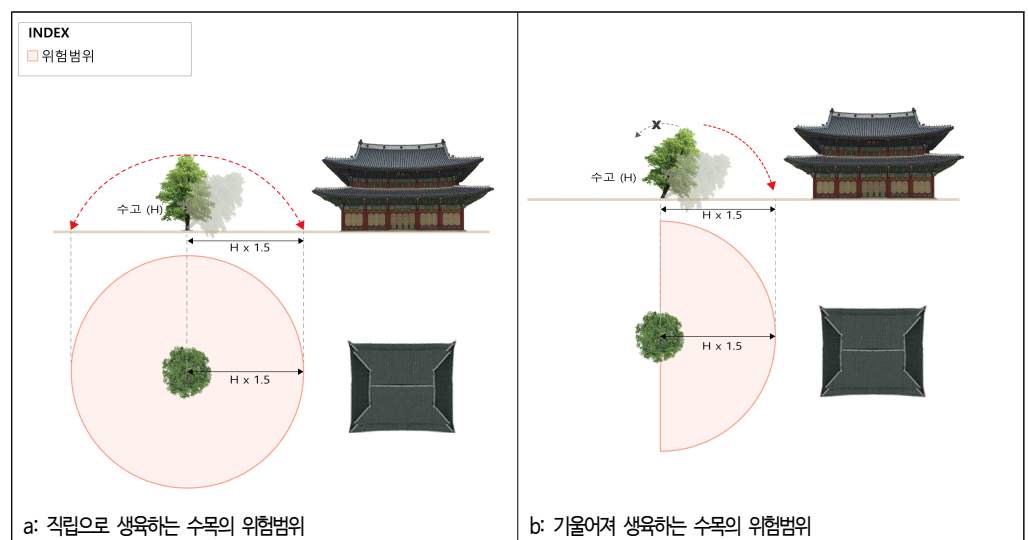


그림 1. 수목의 직립 여부에 따른 위험범위 산출 예시

2.2 충격량

2.2.1 변수설정

수목의 도복 발생 시, 위험범위와 함께 피해대상에 가해지는 구체적인 물리량의 산출이 필요하다. 본 연구는 충격량(impulse)을 산출하여 우선 관리가 필요한 위험수목과 대상을 객관적으로 판단하고자 하였다.

충격량은 선운동량의 변화량으로 정의된다. 본 연구에서는 수목의 도복 시 발생하는 충격량을 산출하기 위해 운동량 계산식($p=m \cdot v$)에 대응되는 요인을 종속변수와 독립변수로 설정하였다. 충격량을 종속변수로 설정하고, 수고, 수목의 중량, 쓰러지는 속도를 독립변수로 설정하였다(표 1 참조). 이외에도 수목의 생육상태나 기상환경은 충격량 산출에 영향을 미칠 것이다. 수고, 중량이 비슷하여도 가지와 잎의 밀도에 따라 지상부의 형태가 달라지며 이는 수목이 쓰러질 때 공기저항에 영향을 미친다. 수목의 결함과 파손을 부추기는 기상환경은 수목이 쓰러지는 속도에 영향을 미친다. 이러한 현장성을 반영하기엔 본 연구는 기초적인 이론연구로 많은 가정과 전제가 요구된다. 그러므로 산출에 영향을 주는 엽량, 수목의 결함, 외력, 공기저항을 통제변수로 설정하였다. 또한, 충격량의 산출을 단순화하기 위해 수목을 외력에 의해 크거나 형태가 변형되지 않는 강체(rigid body)로 전제하였다.

2.2.2 산출 과정

충격량(F)은 나중운동량(mv_2)에서 처음운동량(mv_1)을 뺀 선운동량의 변화량(Δp)으로 해석된다(Eq. 1 참조). 이를 수목이 쓰러지는 상황에 대입하면, 쓰러지기 전 수목의 처음운동량은 0이며, 나중운동량은 충격을 가하기 직전의 운동량이 된다. 즉, 수목의 도복 발생 시 가해지는 충격량은 충격을 가하기 직전의 나중운동량이 그대로 전달된다고 해석할 수 있다(그림 2 참조).

$$F = \Delta p = mv_2 - mv_1 \tag{Eq. 1}$$

수목은 부러지는 지점을 기점으로 회전운동을 하며 각운동량(angular momentum)을 발생시킨다. 각운동량(L_t)은 관성모멘트(I_t)와 각속도(ω)의 곱으로 계산된다. 관성모멘트(I_t)는 회전하는 물체가 회전상태를 계속 유지하려는 성질의 크기로 단위는 $kg \cdot m^2$ 이다. 물체를 구성하는 입자들의 질량과 회전축 주위의 질량 분포에 의존하기 때문에 물체의 형태와 회전축에 따라 관성모멘트가 달라진다. 쓰러지는 수목의 관성모멘트(I_t)를 산출하기 위해 축의 끝을 지나며 회전하는 막대의 관성모멘트 식을 활용하였다. 즉, 도복 시 발생하는 관성모멘트(I_t)는 수목의 중량(M)과 수고(L^2)를 곱한 값을 3으로 나눈 산정하였다(Eq. 2 참조).

$$I_t = \frac{1}{3} ML^2 \tag{Eq. 2}$$

각속도(ω)는 회전하는 물체의 각위치 변화량($d\theta$)을 단위시간(dt)으로 나눈 값으로 단위는 rad/s를 사용한다. 각

표 1. 충격량 산출을 위한 변수 설정

구분	변수 설정
독립변수	수고, 중량, 각속도, 각가속도
종속변수	충격량
통제변수	엽량, 수목의 결함, 외력(풍압 등), 공기저항

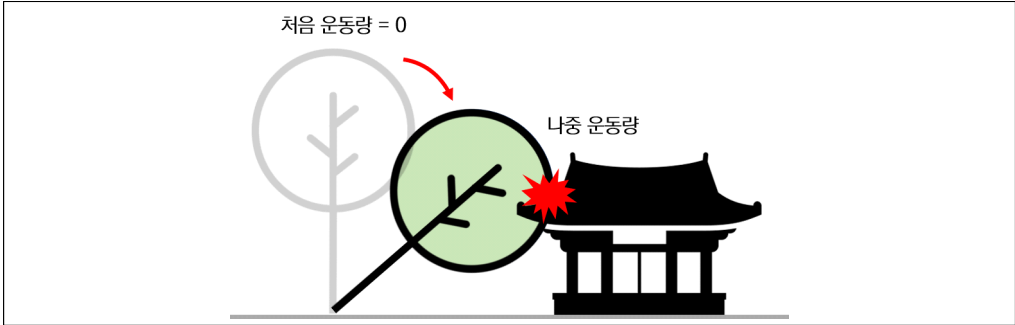


그림 2. 수목의 도복 시 발생하는 운동량

가속도(α)는 단위시간당(dt) 각속도의 변화량($d\omega$)이며, 단위는 rad/s^2 이다(Eq. 3 참조).

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{Eq. 3})$$

수목이 쓰러지며 발생하는 각속도를 산출하기 위해서는 Eq. 3과 같이 시간을 고려해야 한다. 하지만 수목이 쓰러지는 시간은 수형 및 잎의 형태, 엽량, 도복의 원인 등 다양한 요인의 영향을 받기 때문에 산출하는 것이 매우 어렵다. 따라서 시간을 제외한 고려 가능한 항목을 이용하여 각속도를 도출하기 위해 각속도와 각가속도에서 단위 시간을 대치시키면 Eq. 4의 관계가 성립된다.

$$\omega d\omega = \alpha d\theta \quad (\text{Eq. 4})$$

Eq. 4에서 각속도를 초기각속도와 충격각속도로 적분하였다(Eq. 5 참조). 초기각속도(ω_i)는 수목이 쓰러지는 시점이므로 0이며, 충격각속도(ω_f)는 수목이 도복되면서 피해대상에 충격을 가하기 직전의 각속도가 된다. 각가속도는 초기각도와 충격각도로 적분하였다. 초기각도(θ_i)는 수목이 넘어가는 시점의 기울어진 각도이며, 충격각도(θ_f)는 수목이 건물이나 지면에 충격을 가하는 시점의 기울어진 각도를 대입하였다.

$$\int_{\omega_i}^{\omega_f} \omega d\omega = \int_{\theta_i}^{\theta_f} \alpha d\theta \quad (\text{Eq. 5})$$

각가속도(α)는 토크(τ)를 산출하는 식 $\tau = r F \sin\theta = \frac{L}{2} Mg \sin\theta$ 와 $\tau = I_t \times \alpha = \frac{1}{3} ML^2 \times \alpha$ 를 대치하여 도출하였다(Eq. 6 참조).

$$\begin{aligned} \frac{L}{2} Mg \sin\theta &= \frac{1}{3} ML^2 \times \alpha \\ \alpha &= \frac{3g \sin\theta}{2L} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 6})$$

각가속도($\alpha = \frac{3g \sin\theta}{2L}$)를 Eq. 5에 대입하여 충격각속도(ω_f)를 산출하였다(Eq. 7 참조).

$$\begin{aligned} \int_{\omega_i}^{\omega_f} \omega d\omega &= \int_{\theta_i}^{\theta_f} \alpha d\theta \\ \left[\frac{1}{2} \omega^2 \right]_{\omega_i}^{\omega_f} &= \int_{\theta_i}^{\theta_f} \frac{3g \sin\theta}{2L} d\theta \\ \frac{1}{2} (\omega_f^2 - \omega_i^2) &= \frac{3g}{2L} [-\cos\theta]_{\theta_i}^{\theta_f} \\ \frac{1}{2} \omega_f^2 &= \frac{3g}{2L} (-\cos\theta_f + \cos\theta_i) \\ \omega_f^2 &= \frac{3g}{L} (\cos\theta_i - \cos\theta_f) \\ \omega_f &= \sqrt{\frac{3g}{L} (\cos\theta_i - \cos\theta_f)} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 7})$$

즉, 수목의 도복 시 발생하는 각운동량(L_t)을 산출하기 위해 관성모멘트(I_t)와 충격각속도(ω_f)를 곱하여 계산하였다(Eq. 8 참조).

$$\begin{aligned} L_t &= I_t \times \omega_f \\ L_t &= \frac{1}{3} ML^2 \times \sqrt{\frac{3g}{L} (\cos\theta_i - \cos\theta_f)} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 8})$$

충격량은 선운동량의 변화량(Δp)이기 때문에 산출된 각운동량(L_t)을 선운동량으로 전환해야 한다. 그러므로, 수목의 도복 시 발생하는 충격량(P_t =선운동량)은 각운동량(L_t)을 회전지점에서부터 충격지점까지의 거리(D)로 나누어서 산출하였다(Eq. 9 참조). 단위는 $N \cdot s$ 또는 $kg \cdot m/s$ 이다.

$$P_t = \frac{L_t}{D} \quad (\text{Eq. 9})$$

2.2.3 수목의 중량

수목이 쓰러질 때 피해대상에 가해지는 중량은 지상부의 중량으로 충격의 정도에 큰 영향을 미친다. 수목의 지상부 중량(M)은 부피($3.14 \times (\text{흉고직경}(B)/2)^2 \times \text{수고}(L)$), 수간형상계수(K), 단위중량(U), 지엽의 보합률(P)을 곱하여 산출되며 단위는 kg을 사용한다. 이때, 수간형상계수는 정의하거나 계측하기 어려운 경우 0.5를 적용한다. 단위중량은 관목 $1,300\text{kg}/\text{m}^3$, 교목 $1,200\text{kg}/\text{m}^3$ 이며, 지엽의 다과에 의한 보합률(p)은 독립수 0.1, 임목 0.2를 적용한다(대한 건설협회 조경위원회 등, 2016). 일반적으로 산림이나 조경공사에서는 수목의 지상부 중량을 산출할 때 수고를 적용한다. 하지만 도복으로 인한 충격 산출 시 충격지점은 수고와 같거나 짧게 된다. 또한, 도복되는 과정에서 충격이 여러 지점에 걸쳐 연쇄적으로 발생할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 충격량 산출을 위한 수목의 지상부 중량 계산 시 수고가 아닌 회전지점에서 충격지점까지의 거리(D)를 적용하였다(Eq. 10 참조).

$$M = 3.14 \times (B/2)^2 \times D \times K \times U \times (1 + p) \quad (\text{Eq. 10})$$

3. 산출 알고리즘 개발

위험범위와 충격량 산출 알고리즘을 개발하여 잠재적 위험수목과 구역을 입체적, 효율적으로 판단하였다. 산출 알고리즘은 3차원 모델 제작, 위험범위 및 충격량 산출, 산출 결과 종합 및 가시화로 구성하였다. 알고리즘의 코딩은 Rhino3D와 Grasshopper를 활용하였다.

3.1 3차원 모델 제작

3차원 모델의 제작을 통해 공간정보를 구축하여, 산출 및 가시화 과정에 활용하였다. 잠재적으로 위험을 가할 수 있는 수목과 피해대상이 될 수 있는 지형 및 건물의 모델을 제작하였다(그림 3 참조).

산출을 구체화하기 위해 지형과 건물 모델을 먼저 제작하였다. Rhino3D를 사용하여 지형과 건물의 표면은 Surface 형태로 형상화하였다. 지형은 수치지형도의 등고선 자료를 이용하여 제작하였으며, 건물은 실측도면의 형상을 참조하여 제작하였다. 정확하고 효율적인 산출을 위해 Surface 모델은 Grasshopper에 연결하여 균등한 격자점을 가진 mesh의 형태로 제작하였다. Mesh를 구성하는 격자점의 간격은 대상의 형상을 고려하여 조절할 수 있도록 하였다.

수목 모델은 생육 위치, 수고, 기운 방향과 정도를 고려하여 제작하였다. 수목 개체의 생육 현황을 반영하여 형상을 조절하기 쉽도록 두 개의 끝점을 가지는 line의 형태로 제작하였다. Line의 정보를 Grasshopper에 연결하여 수목과 유사한 형상으로 구현하였다. 제작된 모델은 위험범위와 충격량 산출 및 산출값을 가시화하는데 활용하였다.

3.2 위험범위 산출 알고리즘 개발

수목의 도복으로 인해 발생하는 위험범위를 산출하고, 이를 가시화하기 위해 Grasshopper를 이용하여 알고리즘을 개발하였다. 산출 알고리즘은 초기값 설정, 위험범위 산출, 조회 과정으로 구분하여 코딩하였다.

초기값 설정 단계에서는 위험범위를 산출하기 위해 지형, 건물, 수목 모델을 Grasshopper에 연결하여 대상지의 공간정보를 구축하였다. 대상지 내 산림영역, 건물이 없거나 이용빈도가 낮은 공간은 수목의 도복이 발생하여도 피해가 경미할 수 있다. 따라서 분석범위를 설정하여 피해가 치명적인 공간을 중심으로 위험범위를 산출하였다(그림 4(b) 참조). 분석범위는 대상지 내 피해대상의 점유기간과 이용빈도가 높은 공간으로 설정하였다.

위험범위는 산출 수목을 대상으로 그림 4(a) 과정을 반복 수행하여 산정하였다. 첫 번째 단계로 위험을 산출할 수목의 위치, 수고 등의 정보를 해석한 후 도복반경을 산출하였다. 도복반경은 수고의 1.5배를 반경으로 하는 원의 내부 범위로 산정하였다. 위험범위는 수목의 직립 여부에 따라 산출 결과가 달라지기 때문에 도복반경에서 수목의

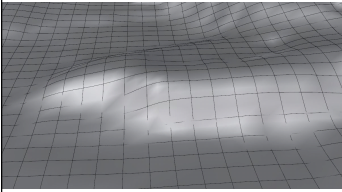
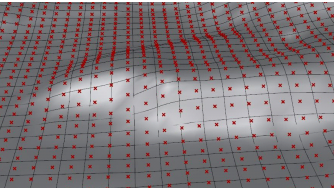
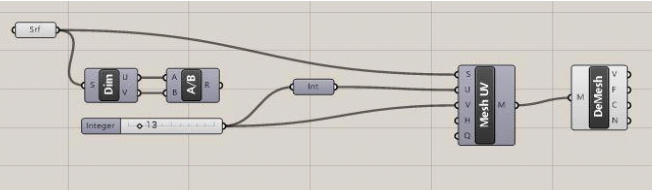
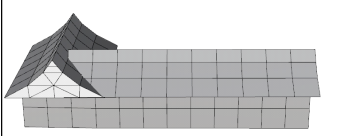
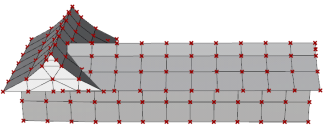
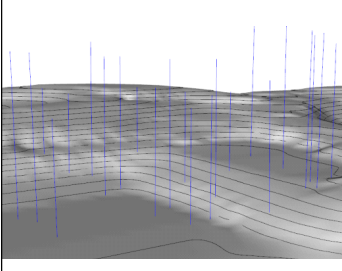
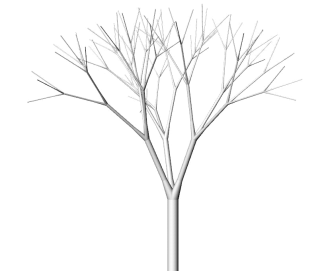
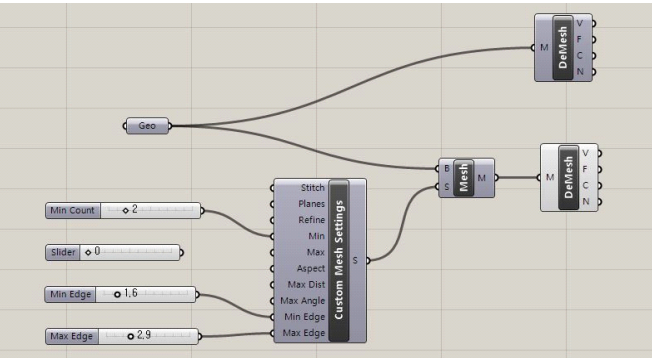


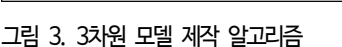

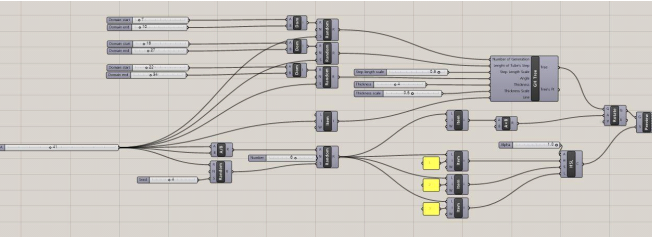
제작된 모델 예시		3차원 모델 제작 알고리즘
Surface 모델	Mesh 모델	
		
지형 모델		지형의 균등한 격자점 조절 기능
		
		
건물 모델		건물의 균등한 격자점 조절 기능
		
		
수목 모델		수목의 3차원 모델 제작 기능

그림 3. 3차원 모델 제작 알고리즘

기울기를 반영하여 범위를 재조정하였다. 직립으로 생육하는 수목은 근원부를 중심으로 360° 범위, 기울어져 생육하는 수목은 기운 방향을 기준으로 180° 이내로 위험범위(Ai)를 조정하였다. 수고와 기울기를 반영하여 산출된 위험범위(Ai) 내 전도선(L)을 생성하여 산출의 정확도를 높였다. 전도선(L)은 수목의 근원부를 기점으로 하여 1° 간격으로 수평 회전하는 방사선(ray)이다. 직립 수목의 경우 360개, 기울어진 수목은 180개의 전도선(L)이 생성된다. 위험범위(Ai) 내 산출 수목 주변에 인접수목(Sk)이 존재한다면, 도복이 완화되거나 발생하지 않는다. 그러므로 산출 수목 주변의 환경을 파악하여 위험범위를 조정할 필요가 있다. 도복이 발생하지 않는 범위는 인접수목과 접하는 전도선의 내부 범위(B)로 산정된다(그림 4(c) 참조). 즉, 실제 피해가 발생할 수 있는 범위(A)는 수고와 기울기를 고려하여 산출된 위험범위(Ai)에서 인접수목으로 인해 도복이 발생하지 않는 범위(B)를 차집합 연산하여 산출된다($A=A_i-B$). 이 과정을 인접수목의 수만큼 반복 수행하여 최종 위험범위(A)를 결정하였다(그림 5 참조).

조회 단계에서는 산출된 수목의 위험범위를 종합하여 가시화하였다. 계산된 위험범위를 면적으로 수치화하였고, 상대적인 차이를 등급으로 구분하였다. 위험범위가 넓은 수목은 적색으로, 상대적으로 좁은 수목은 보라색으로 표현하였다.

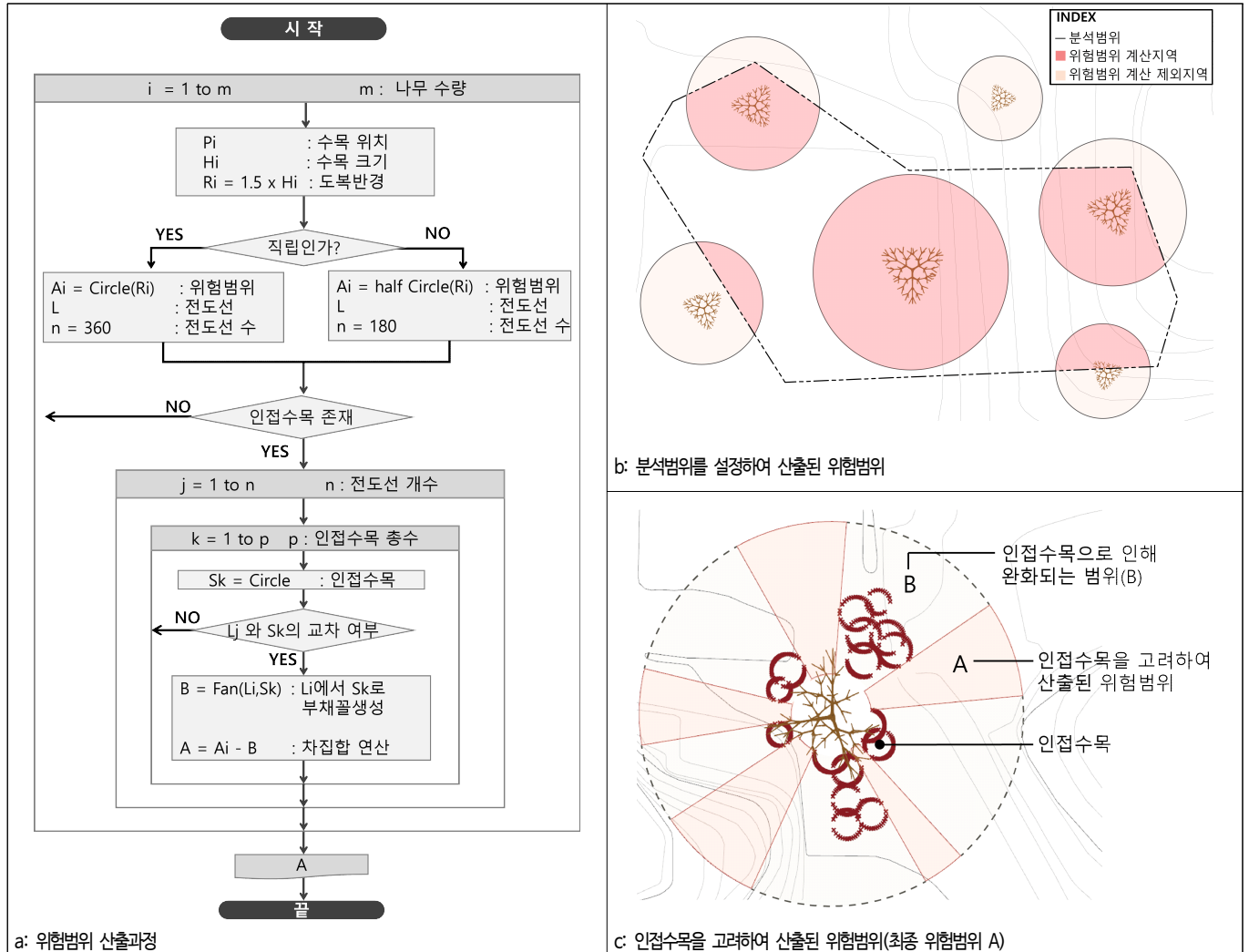


그림 4. 위험범위 산출

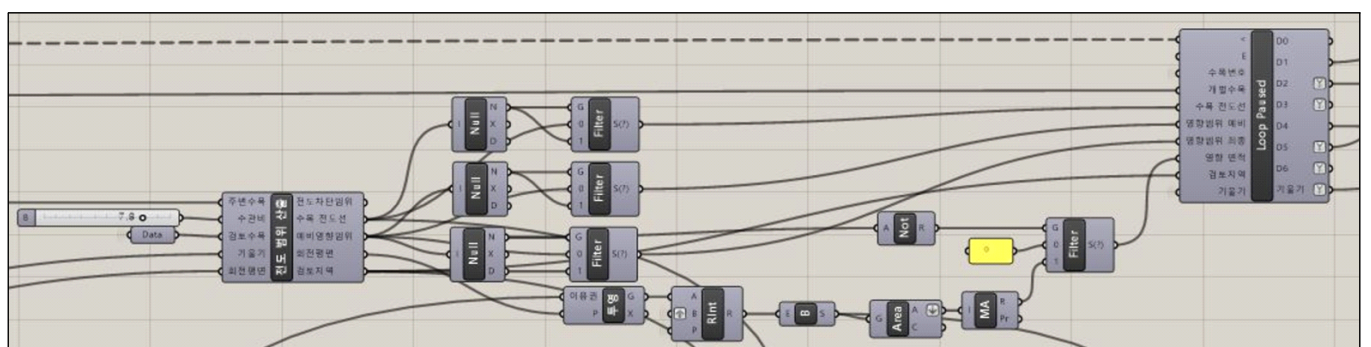


그림 5. 인접수목 및 분석범위를 고려한 위험범위 산출 알고리즘

3.3 충격량 산출 알고리즘 개발

수목의 도복 시 발생하는 충격량을 산출하기 위해 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘은 수목과 주변환경을 입체적으로 반영하여 정량적 산출이 가능하도록 코딩하였다. 초기값 설정, 충격량 산출, 조회 과정으로 구성하였다. 초기값 설정 단계에서는 대상지의 공간정보를 구축하기 위해 분석범위와 지형, 건물, 수목 모델을 Grasshopper에 연결하였다. 또한, 수목의 생육 위치, 수고, 기울기와 회전중심점(P_i), 중량, 위험범위(A)를 활용하였다. 회전중심점(P_i)은 근원부로 설정하여 수목이 쓰러져 피해대상에 충격을 가하는 모습을 반영하였다. 수목의 중량은 도복 발생 시 주요

충격부에 해당하는 지상부 중량을 산출하였다. 수목 개체의 조건을 반영하여 중량 계산을 할 수 있도록 수고, 회전지점에서 충격지점까지의 거리, 흉고직경뿐만 아니라 단위중량, 지엽의 보합률 등 입력값을 조절할 수 있도록 설정하였다. 위험범위(A)는 위험범위 산출 프로그램을 통해 도출된 값으로 이를 활용하여 충격범위를 산정하였다.

충격량은 Eq. 9를 활용하여 그림 6의 과정을 반복 수행하여 산출하였다. 산출 수목을 대상으로 건물, 지형과의 충돌 여부를 파악하고, 전도회전면(RP)을 생성하여 가장 먼저 충돌이 발생하는 지점을 도출하였다(그림 7(a) 참조). 전도회전면(RP)은 도복이 진행되는 방향에서 수직의 회전면을 1° 간격으로 발생시킨 것이다. 위험범위 내 1° 간격으로 생성한 수평의 전도선(L)을 기준으로 직립하여 생육하는 수목은 360개, 기울어져 생육하는 수목은 180개의 전도회전면(RP)을 생성하였다. 충격량은 생성된 전도회전면(RP)을 활용하여 산출하였다. 수목과 피해대상의 충돌 발생 시 수목이 피해대상을 타격한 충격좌표(i_Loc)와 충격지점의 각도를 도출하고, 충격거리(i_dist)를 산출하였다(그림 7(b) 참조). 충격거리(i_dist)는 회전중심점(P_i)과 충격좌표(i_Loc) 간의 거리이다. 이때, 수고(H)보다 충격거리(i_dist)가 짧은 경우, 수고에서 충격거리를 제외한 부분($R_i = H - i_dist$)에 대하여 n 차 충격이 발생할 수 있다. n 차 충격이 발생할 경우 충격좌표, 충격량을 계산할 수 있도록 변수에 재할당하였다(그림 7(c) 참조). 충격거리를 누적하여 수고보다 커지기 전까지 반복 산출하였다(그림 8 참조).

조회 단계에서는 산출된 충격정보(충격좌표, 충격량)를 가시화하였다(그림 9 참조). 충격량에 따라 적색은 상대적으로 많은 충격량이 발생된 지점이며, 보라색은 최저의 충격량이 발생된 지점으로 구분하였다(그림 10 참조). 산출된 충격정보를 종합하여 우선 관리가 필요한 위험수목과 구역을 객관적으로 판단하였다.

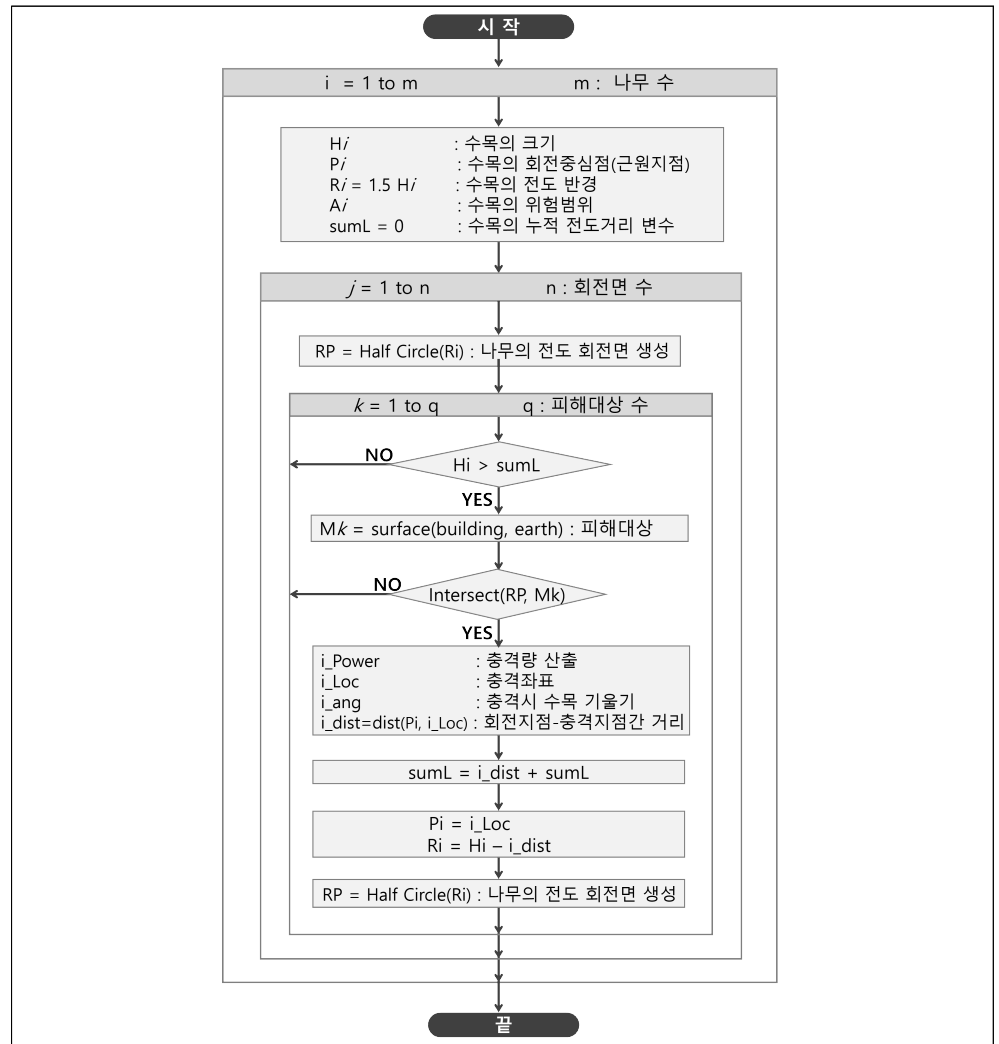


그림 6. 충격량 산출과정

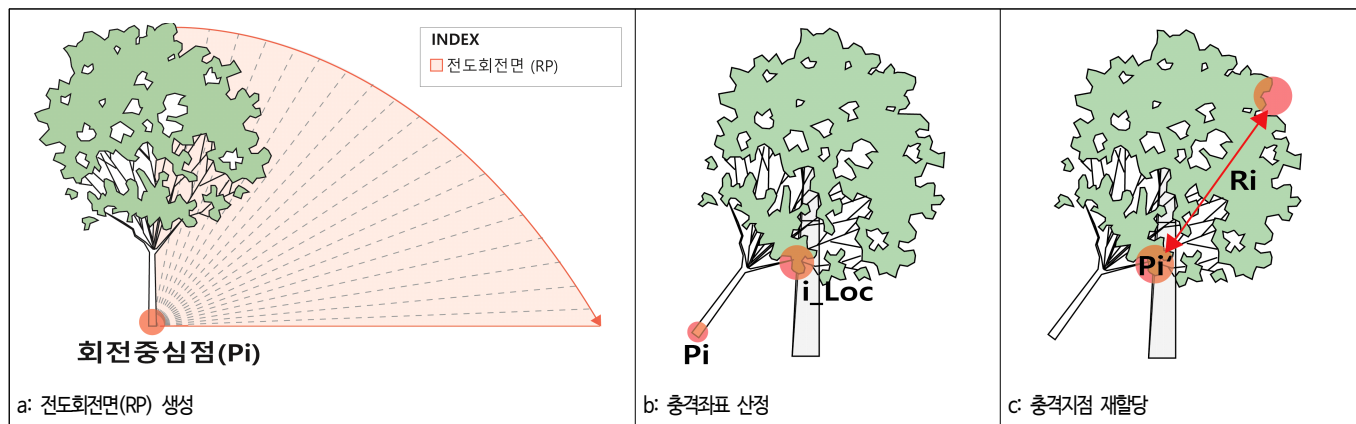


그림 7. 충격량 산출 시 변수 설정

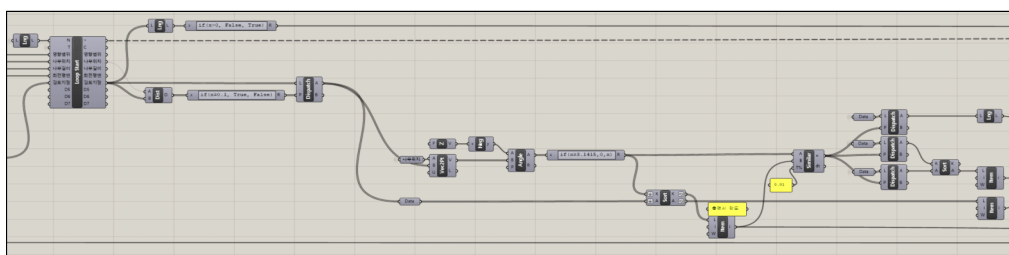


그림 8. 전도회전면(RP), 충격좌표(i_Loc) 생성 알고리즘

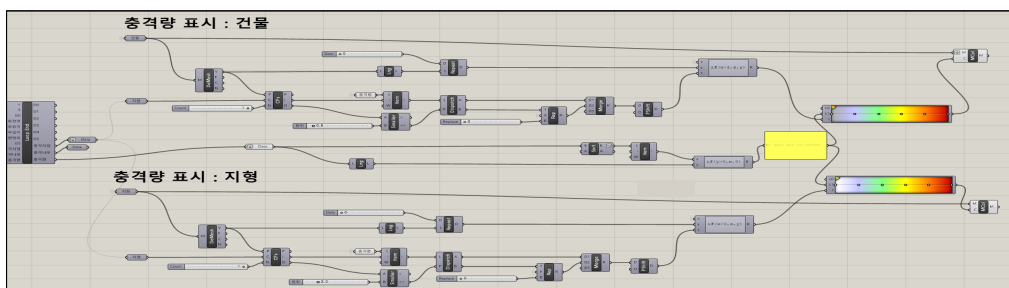


그림 9. 충격량 산출 결과 등급설정 및 가시화 알고리즘

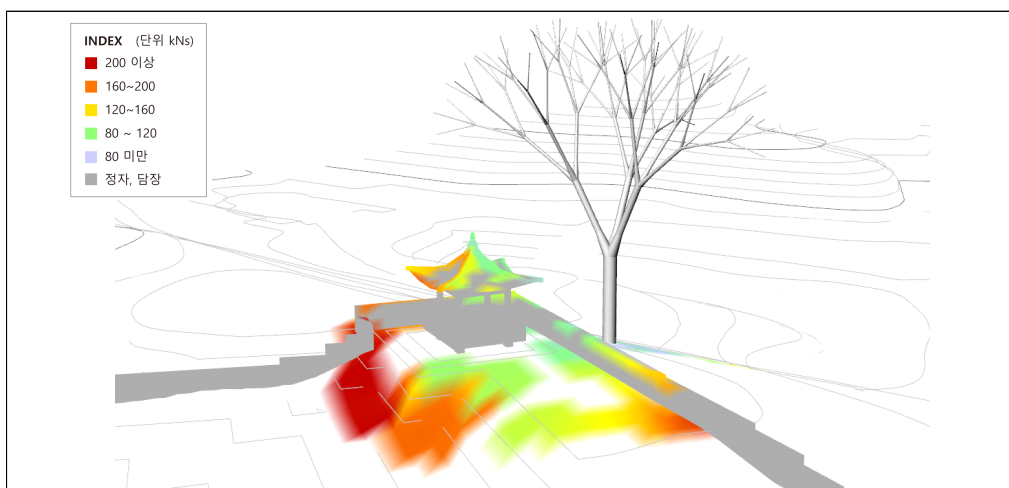


그림 10. 수목 도복 시 충격량 산출 결과

4. 결론

본 연구는 수목의 도복 시 발생하는 잠재적 위험범위와 충격량을 정량적, 효율적으로 예측하기 위해 산출식과 산출 알고리즘을 제안하였다. 도출한 결과는 다음과 같다.

첫째, 수목의 도복을 정량적으로 예측하기 위한 위험범위와 충격량 산출식을 제안하였다. 위험범위는 수고, 수목의 직립여부 등을 고려하여 산출하였다. 수목이 쓰러져 미끄러지는 가능성을 고려하여 수고의 1.5배를 반경으로 하는 원의 내부범위로 계산하였다. 이후 수목의 기울기에 따라 직립으로 생육하는 수목은 근원부를 중심으로 360° 범위, 기울어져 생육하는 수목은 기운 방향에서 180° 범위로 재설정하였다. 충격량은 수목이 쓰러져 피해대상과 충돌이 발생하기 직전 수목의 나중운동량이 피해대상에 전달되는 현상을 이용하여 산출하였다. 이때, 수목이 근원부를 기점으로 도복되는 것을 반영하여 각운동량을 산출하였으며, 이를 선운동량으로 전환하여 충격량을 도출하였다. 산출 시 수고, 수목의 중량, 쓰러지는 속도 등을 활용하였는데, 수목의 중량은 도복 발생 시 주요 충격부에 해당하는 지상부 중량을 계산하였다.

둘째, 위험범위와 충격량을 효율적입체적으로 산출하기 위한 산출 알고리즘을 개발하였다. 3차원 모델 제작, 산출, 조회 기능의 알고리즘을 코딩하였다. 3차원 모델 제작은 Rhino3D를 이용하여 지형, 건물, 수목에 대한 형상을 입체적 모델로 제작하고, 이를 Grasshopper에 연결하여 공간정보를 구축하였다. 산출 기능에서는 위험범위, 충격량 산출식을 활용하여 알고리즘을 코딩하였다. 이때, 산출 수목 주변의 인접수목을 고려하여 위험범위를 산출하고, 충격거리(i_dist)를 고려하여 n 차 충격량을 산출하는 등 주변 환경을 반영하였다. 조회 기능에서는 산출 결과를 종합하여 3차원 모델에 매핑하였다. 산출값에 따라 색상으로 구분하여 위험수목과 위험구역을 효율적으로 판단하였다.

본 연구는 수목의 도복 시 발생하는 위험범위와 충격량을 정량화하고, 공간화하였다는 점에서 의의가 있다. 본 연구를 통해 위험범위가 넓고 충격량이 많은 수목을 예측, 우선 관리하여 효율적으로 피해를 경감할 수 있을 것이다. 위험수목 주변 구역은 기상 재해 발생 시 안전을 위한 통제구역으로 설정하는 등 안전 대책 수립 및 재난 예방의 기초자료로 활용될 수 있다. 또한, 도심지와 공원, 문화재구역 수목의 무분별한 제거를 방지하는 과학적 근거자료로도 활용될 수 있을 것이다.

다만, 본 연구는 기초적인 이론연구로서 많은 전제에 의해 진행되었다. 수목을 강제로 전제하였기 때문에 탄성을 고려하지 못하였으며, 수목의 주간으로 인한 충격만을 고려하여 잎과 가지에 의한 충격의 완화를 산출하지 못하였다. 또한, 충격으로 인한 피해 정도를 피해대상의 종류나 재질을 고려하여 산정할 수 있다면, 수목 주변 건물의 보강설계나 관리지침을 제안하는데 활용할 수 있을 것이다. 현장에서 충격량을 분석하는 데 활용하기 위해서는 이러한 한계를 보완하는 후속 연구가 요구된다.

References

1. 국립산림과학원(2020) 생활권 수목의 위험성 평가 가이드 라인.
2. 김채원(2022) 문화재구역의 수목위험지도 제작 연구. 한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 석사학위논문.
3. 대한건설협회 조경위원회, 대한전문건설협회 조경식재시설물설치공사협회, 한국조경사회(2016) 조경공사 적산기준. 경기도: 한국조경신문. p. 106.
4. 산림청(2021) 비파괴 기법을 활용한 대형가로수 위험도 평가 및 진단.
5. 유주은, 이상석(2013) 자연재해로 인한 조경수목 피해 판례 및 제도분석 연구. 한국조경학회지 41(4): 77-84.
6. USDA(2012) Hazard Tree Guidelines for Forest Service Facilities and Roads in the Pacific Southwest Region.
7. USDA(2017) A Guide to Identifying, Assessing, and Managing Hazard Trees in Developed Recreational Sites of the Northern Rocky Mountains and the Intermountain West.