



# 풍동실험을 통한 방풍용 서양측백나무와 농업용방풍망의 공기역학계수 평가

## Wind Tunnel Evaluation of Aerodynamic Coefficients of *Thuja occidentalis* and Mesh Net

이소진<sup>a</sup> · 하태환<sup>a,†</sup> · 서시영<sup>a</sup> · 송호성<sup>b</sup> · 우샘이<sup>a</sup> · 장유나<sup>a</sup> · 정민웅<sup>c</sup> · 조광곤<sup>a</sup> · 한덕우<sup>a</sup> · 황옥화<sup>a</sup>

Lee, Sojin · Ha, Taehwan · Seo, Siyoung · Song, Hosung · Woo, Saemeo · Jang, Yuna · Jung, Minwoong · Jo, Gwanggon · Han, Dukwoo · Hwang, Okhwa

### ABSTRACT

Windbreak forests, which have a windproof effect against strong winds, are known to be effective in reducing the spread of odors and dust emitted from livestock farms. The effect of reducing the spread of odors and dust can be estimated through numerical models such as computational fluid dynamics, which require aerodynamic coefficients of the windbreaks for accurate prediction of their performance. In this study, we aimed to evaluate the aerodynamic coefficients,  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , and  $\alpha$ , of two windbreaks, *Thuja occidentalis* and a mesh net, through wind tunnel experiments. The aerodynamic coefficients were derived by the relation between the incoming wind speed and the pressure loss due to the windbreaks which was measured by differential pressure sensors. In order to estimate the change in the aerodynamic coefficient concerning various leaf density, the experiments were conducted repeatedly by removing the leaves gradually in various stages. The results showed that the power law regression model more suitable for coefficient evaluation compared to the Darcy-Forchheimer model.

Keywords: Aerodynamic coefficient; mesh net; windbreak tree; wind tunnel

### 1. 서론

축산업의 발전으로 가축 사육두수가 증가함에 따라 가축분뇨의 배출량도 함께 늘어났으며 2017년 기준으로 하루 평균 176,400톤이 배출되었다 (ME, 2018). 더불어 농촌 지역의 개발로 인해 축사와 주거지역이 가까워짐으로서 축산냄새로 인한 민원 역시 증가하였다. 2017년 전체 약취 민원 22,851건 중 축산냄새로 인한 민원은 6,112건 (27%)으로 보고되었다 (NIER, 2018). 축산업에서 발생하는 냄새물질은 암모니아, 아민류, 황화합물류, 휘발성 지방산류, 페놀류, 인돌류 등으로 우사, 돈사, 계사 등 축사 종류에 따라 냄새물질의 성상과 농도는 크게 달라진다 (NIER, 2017; CRI, 2018). 축산냄새로 인하여 발생하는 사회적 문제를 해소하기 위해 다양한 분야에서 저감 연구가 이루어지고 있으나 여러 물질이 혼재된 축산

냄새의 특성상 발생원에서의 저감은 상당한 비용과 노력이 필요하다.

국내 방풍림은 주로 농경지와 인가를 중심으로 강풍, 염분을 함유한 해풍, 모래의 비사 등을 막기 위해 조성 되어있으며 산, 바다와 가까운 지역이나 간척지에 주로 설치된다 (Chun, 2006). 또한 황사를 막거나 온실가스를 줄이는 등의 새로운 환경적 측면에서의 방풍림도 이용되었다. 대표적인 방풍림으로는 새만금 사업으로 조성된 간척지의 염분과 해풍을 막기 위한 방풍림이 있다 (Kim et al., 2010). 해외에서도 국내와 비슷하게 해풍이나 모래 바람을 막기 위해 방풍림을 조성하며, 축산 유래 냄새물질의 확산을 막기 위해 조성하기도 한다 (NPMC, 2007; Lin et al., 2006). 축사 주변으로 방풍림을 조성할 경우 기류의 연직 혼합을 유도함으로써 축산냄새 및 미세 먼지가 희석되는 효과가 있으며, 나뭇잎의 화학적 친화력으로 암모니아와 같은 냄새 유발 가스를 흡수하며 농장의 경관이 개선되는 효과도 지니고 있다 (Kim et al., 2000; Tyndall and Colletti, 1997).

국내 방풍림 연구로서 풍동을 이용한 수종·식재방법에 따른 방풍효과 분석, 특성 인자들을 수치화한 시뮬레이션 연구가 수행되었다 (Kim et al., 2013; Yum et al., 2011). 또한 풍동 실험을 통해 나무가 바람에 저항하는 정도를 나타내는 항력 계수 및 공기역학계수를 도출한 후, 전산유체역학을 이용하여 기류를 해석한 연구들도 있다 (Bitog et al., 2011; Bitog et al., 2012). 과수원과 같은 농업시설에서 풍속을 저감시켜 과실

<sup>a</sup> Researcher, Division of Animal Environment, National Institute of Animal Science (NIAS)

<sup>b</sup> Postdoctoral researcher, Division of Disaster Prevention Engineering, National Institute of Agricultural Sciences (NAS)

<sup>c</sup> Senior researcher, Division of Animal Environment, National Institute of Animal Science (NIAS)

† Corresponding author

Tel.: +82-63-238-7406, Fax: +82-63-238-7447

E-mail: thha54@korea.kr

Received: August 21, 2020

Revised: September 15, 2021

Accepted: September 15, 2021

의 상처나 낙과를 방지하기 위해 이용되는 방풍망에 대한 연구도 진행되었다. 풍동실험을 통해 방풍펜스의 다양한 공극률 (30, 40, 55%)에 대해서 풍속 저감 효과를 분석하고 방풍망의 적정 설치 방법에 대한 연구도 수행되었다 (You et al., 2009; Yum et al., 2007, 2011, 2013).

방풍림 및 방풍망 등 방풍시설을 이용하여 풍속저감 효과 또는 냄새확산 저감 효과를 평가하기 위해서는 실제로 현장에 설치하여 측정하거나, 수치해석 기법 등을 통해 추정하는 방법을 이용해야 한다. 현장에서 직접 측정하는 방법은 실제 효과를 분석할 수 있는 장점이 있지만, 실험 조건에 따라 방풍시설을 다시 설치해야 되는 경제적, 시간적 단점이 있다. 반면에 수치해석 기법을 이용하는 방법은 효과를 현장에서 측정할 수 없다는 단점이 있지만 방풍시설을 설치하는 경제적, 시간적 부담에서 벗어나 자유롭게 다양한 실험 조건에 대해서 분석할 수 있다는 장점이 있다. 이렇게 효과적인 수치해석 기법도 냄새확산 저감 효과 등을 예측하기 위해서는 해당 방풍시설의 공기역학 계수를 알고 있어야 하는 어려움이 있으며, 이러한 공기역학 계수는 일부 나무 및 재료에 대해서만 연구되어 있다 (Bitog et al., 2011; Kim et al., 2013).

본 연구에서는 축산 및 농업 시설에서 방풍 및 냄새 차단 효과를 위해 많이 이용되고 있는 방풍림 및 방풍망의 공기역학 계수를 도출하기 위하여 풍동실험을 통해 압력 손실량을 측정하였으며, 풍상측에서의 풍속과 압력손실 관계를 표현하는 경험적인 멱법칙 공식과 Darcy-Forchheimer식을 이용하여 공기역학 계수를 도출하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험 재료

#### 가. 서양측백나무

식재 기능에 따라서 경계식재, 경관식재, 차폐식재, 방재식재 등으로 구분되며 각 기능에 따라 요구되는 특성이 다르다. 예를 들어 경관식재의 경우 아름다운 꽃이 피거나, 수형이 단정하고 아름다운 수종이 적합하며, 차폐식재의 경우 지하가 낮고 지엽이 치밀해야 하며, 아랫가지가 말라죽지 않는 수종이 적합하다 (Ko, 2012).

축산 시설의 외곽에 식재하여 차폐 효과에 의한 경관 개선 기능 및 배출된 냄새물질의 확산 저감 목적을 위한 수종을 선정하기 위하여 경계식재 및 차폐식재의 요구 특성을 만족하고 상록수인 나무 중에서 서양측백나무를 실험대상 수종으로 선정하였다. Table 1에 실험에 사용된 서양측백나무 5 그루의 높이, 너비 및 앞면적 지수를 나타내었다. 풍동의 크기를 고려하

여 높이가 2.0 m 미만이고 폭이 1 m 미만인 나무를 선별하였다. 높이는 화분 부분을 제외하고 측정하였으며, 너비는 중심으로부터 가장 멀리 돌아난 잎 사이 거리를 측정하였다. 앞면적지수 (LAI, Leaf Area Index)와 앞면적밀도 (LAD, Leaf Area Density)는 실험 대상 나무의 앞면적비 (SLA, Specific Leaf Area)를 산출한 뒤 잎 중량과 실험나무 크기를 이용하여 계산하였다 (Baret et al., 2010; Fang et al., 2019; Gholz et al., 1975).

**Table 1** Characteristics of the tree used in the experiment

Experimental tree	Height (m)*	Width (m)	LAI	LAD ( $m^{-1}$ )
a	1.71	0.61	8.75	7.67
b	1.73	0.57	12.16	10.54
c	1.70	0.53	13.10	11.56
d	1.71	0.63	8.75	7.68
e	1.70	0.51	10.34	9.12

\* Height: pot height excluded

#### 나. 농업용방풍망

과수의 상처 및 낙과 방지 등을 위하여 설치되는 농업용방풍망을 실험 대상으로 선정하여 실험을 진행하였다. 방풍망은 폴리에틸렌 재질로 만들어졌으며 4 mm × 5 mm 크기의 메쉬 형태로 짜여 있다. 방풍망을 겹쳐서 설치하였을 때 변화되는 공기저항을 분석하기 위하여 겹 수를 3가지 (Single, Double, Triple)로 조건을 설정하여 실험을 진행하였다. 다음 Fig. 1은 실험에 이용된 방풍망의 실험조건 (겹 수)에 따른 사진이다.

### 2. 풍동 실험

Fig. 2에 풍동의 모식도를 나타내었다. 풍동은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부에 설치되어 있는 개방형 아음속 경계층 시설로 국립농업과학원의 협조를 받아 진행되었다. 해당 풍동 시설은 Eiffel type이고 풍속은 22 m · s<sup>-1</sup>까지 형성이 가능하며, 기류 안정성은 1% 이하의 성능으로 운용되었다 (Fig. 2(a)).

Fig. 2(b), Fig. 2(c)는 풍동 실험부 (test section) 및 풍동 내부에 설치된 인공구조물 (sub test section)의 모식도이다. 인공구조물은 알루미늄 프로파일과 아크릴판으로 제작하였으며, 실험부 상부, 하부를 아크릴판으로 덮어 불안정한 풍속의 흐름을 차단하였다. 특히, 풍동 영역 하부에는 유동이 불안정한 것으로 알려져 있어 화분 높이까지 아크릴판으로 공간을 구분하여 실험에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다 (Song et al.,

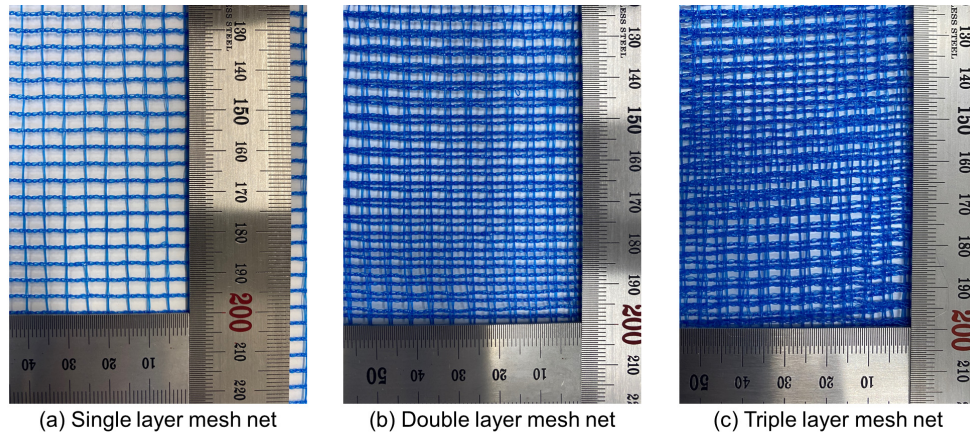


Fig. 1 The pictures of experimental agricultural mesh net

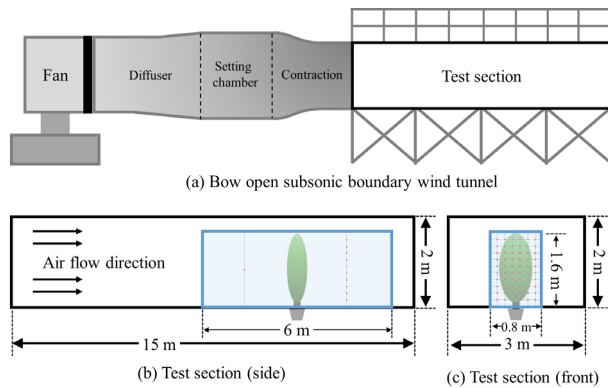


Fig. 2 Schematic diagrams of experimental wind tunnel (blue box: sub test section, red dot : locations of differential pressure sensor)

2019). 실험풍속을 측정하기 위해 열선풍속계 (KANOMAX, OMNI V probe 0965-03, USA)를 이용하였으며, 압력손실량을 측정하기 위해 차압측정계 (Pressure systems, Inc., ESP-32HD, USA)를 이용하였다. 방풍 시설을 통과한 뒤 발생하는 압력 손실에 대해서 평가하기 위하여 풍하측에 차압측정센서를 설치하였다. 평균적인 압력손실량을 측정하기 위하여 측정 영역 (0.8 m × 1.6 m)의 면적과 가용한 센서 수량을 고려하여 총 60지점 (6 × 10)에 센서를 설치하였다.

실험 풍속의 범위를 선정하기 위해 기상청의 종관관측 (ASOS, Automated Synoptic Observing System) 풍속 데이터를 이용하였다. 국내 종관관측소 95개소 중 해안, 섬 지역 33곳을

제외한 내륙지역 62개 관측소의 2018년 풍속데이터를 분석하였다. 내륙지역의 최대 풍속은 17.2 m · s<sup>-1</sup>로 분석되었으며, 상위 1% 풍속데이터를 제외한 최대 풍속 데이터 (6.4 m · s<sup>-1</sup>)를 바탕으로 실험 풍속 조건을 선정하였다 (Table 2).

풍동 터빈의 분당 회전수 (RPM)에 따라서 형성되는 풍속 측정 테스트를 진행하여 200 RPM에서 풍속이 6.36 m · s<sup>-1</sup>에 도달하는 것을 확인하고 이를 실험 최대 풍속으로 설정하였다. 실험 최소 풍속은 풍동 내 풍환경이 안정적으로 형성될 수 있는 최소 터빈 수인 50 RPM으로 설정하였으며 30 RPM 씩 터빈 회전수를 증가시키면서 실험 풍속 조건을 총 6단계로 설정하였다. 이때의 실험 풍속은 각각 1.25, 2.27, 3.34, 4.25, 5.19, 6.36 m · s<sup>-1</sup>이었다.

### 3. 공기역학계수 산출

기류가 다공성매체 (porous media)를 통과할 때 압력손실이 발생한다고 알려져 있으며, 풍속과 압력 손실량의 관계는 경험적 상수를 이용하여 유속에 대한 멱법칙 형태로 표현된 식 (1) 또는 점성 손실과 내부에너지 손실에 대해선 식 (2)와 같이 표현한 Darcy-Forchheimer 식이 있다 (Whitaker, 1996).

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \nabla S = -C_0 |v|^{C_1} \tag{1}$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \nabla S = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2\right) \tag{2}$$

Table 2 Cumulative wind speed data of automated synoptic observing system (ASOS) of the Korean Meteorological Administration

Cumulative range (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99	100
Wind speed (m · s <sup>-1</sup> )	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.7	3.7	6.4	17.2

**Table 3** Estimation of quadratic and power law equations using the measured pressure differential and wind speed for five trees.

Experimental tree	Quadratic		Power law	
	equation	R <sup>2</sup>	equation	R <sup>2</sup>
Tree a	$\Delta P = 0.5171v^2 + 0.3735v$	0.9973	$\Delta P = 0.5069v^{2.1449}$	0.9919
Tree b	$\Delta P = 0.7185v^2 + 0.4173v$	0.9969	$\Delta P = 0.7190v^{2.1189}$	0.9938
Tree c	$\Delta P = 0.7066v^2 + 0.6089v$	0.9944	$\Delta P = 0.6159v^{2.2708}$	0.9849
Tree d	$\Delta P = 0.5973v^2 + 0.4551v$	0.9965	$\Delta P = 0.5895v^{2.1492}$	0.9918
Tree e	$\Delta P = 0.4272v^2 + 0.3096v$	0.9974	$\Delta P = 0.4725v^{2.0462}$	0.9972
Total	$\Delta P = 0.4952v^2 + 0.7933v$	0.8980	$\Delta P = 0.5907v^{2.1169}$	0.9646

여기서,  $\Delta p$ 는 압력 손실량,  $\Delta x$ 는 다공성매체의 두께 (m),  $\nabla S$ 는 기류가 다공성매체를 통과하면서 발생하는 모멘텀 손실량,  $C_0$  및  $C_1$ 은 실험적으로 도출되는 경험적 상수,  $\alpha$ 은 투과율 (m),  $C_2$ 는 관성저항계수 (dimensionless),  $\mu$ 는 점성계수 (Pa · s),  $\rho$ 는 공기밀도 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $v$ 는 실험 풍속 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )을 의미한다. 기류의 대류가속도 및 확산을 무시할 수 있는 경우에는 식 (2)의 우측항을 무시하여 식 (3)과 같이 1차 다항식으로 표현이 가능하다. 반면에 풍속이 빠른 경우에는 투과율 항을 무시하고 식 (4)과 같이 2차식으로 표현이 가능하다.

$$\nabla S = -\frac{\mu}{\alpha}v \tag{3}$$

$$\nabla S = -C_2\frac{1}{2}\rho v^2 \tag{4}$$

실험 대상 방풍시설의 공기역학계수 ( $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\alpha$ )를 도출하기 위해 풍동을 이용하여 기류를 조성한 뒤 기류가 실험 대상을 통과하면서 발생하는 압력 손실량과 실험 풍속을 측정하였다. 자연 상태에서 바람은 수직성분이 포함되어 3차원적으로 형성되지만, 본 실험에서는 수직 성분이 제외된 수평성분에 대해서 실험을 진행하였다. 압력 손실량은 실험 대상의 풍상측 및 풍하측에 설치한 다점 차압계를 이용하여 측정하였으며 실험 풍속은 풍상측에 설치한 열선풍속 센서를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 압력 손실량 및 실험 풍속은 각각 100 Hz 및 10 Hz로 측정하였으며 실험 풍속 변경 직후의 불안정한 풍속 데이터는 제거한 뒤 압력 손실량과 실험 풍속 간의 회귀분석을 통해 공기역학계수 ( $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\alpha$ )를 도출하였다. 공기역학계수를 도출하는 과정에서 실험 영역 벽면에서 발생한 마찰에 의한 압력 손실량을 제외하였으며 이를 위하여 나무를 위치하지 않고 비어있는 상태에서 실험을 진행하여 벽면 마찰에 의한 압력 손실량을 측정하였다.

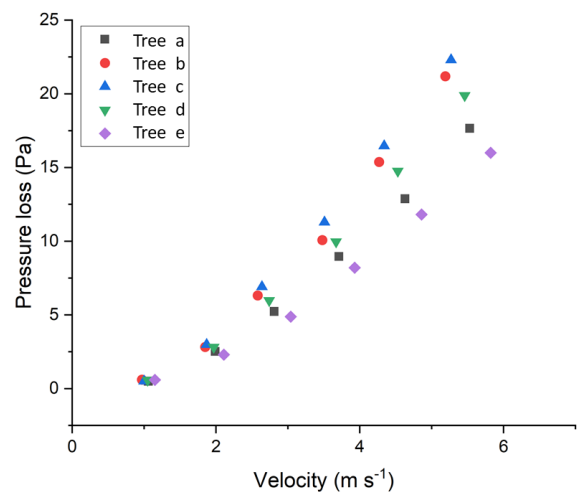
### III. 결과 및 고찰

#### 1. 풍동실험을 통한 서양측백나무 공기역학계수 도출

가. 서양측백나무 공기역학계수

실험 풍속을 증가시킴에 따라 방풍림에 의한 압력 손실량이 증가하는 경향을 Fig. 3과 같이 확인할 수 있었으며, 식 (1)의 2차 방정식과 식 (2)의 멱법칙으로 회귀 분석을 수행하여 도출된 관계식은 Table 3에 나타내었다. 각각 나무의 회귀방정식 결정계수 ( $R^2$ )는 모두 0.99 이상으로 거의 1에 근접하는 높은 값으로 분석되었다. 실험에 사용된 5그룹을 모두 종합하여 회귀 분석을 수행한 경우, 멱법칙 및 2차 방정식으로 분석하였을 때 각각 0.96 및 0.90으로 약간 낮아졌는데, 이는 밀도가 상이한 나무를 실험에 이용하면서 발생한 실험 편차로 판단된다.

실험 대상 방풍림의 공기역학계수는 회귀 분석을 통해 도출된 상기 2차 방정식 및 멱법칙 공식의 계수를 이용하여 산출하였다. 공기역학계수 산출에 필요한 점성계수 및 공기 밀도는 실험기간 동안 측정된 풍동 내부 온도 (25.3°C)를 이용하여 보정하였으며, 각각  $1.845 \times 10^{-5}$  Pa · s 및  $1.183 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 로 계산되



**Fig. 3** Graph of relationship between Pressure loss and wind speed for each tree

었다. 이를 이용하여 산출된 공기역학계수는 Table 4에 나타내었다. 멱법칙 공식을 이용하여 도출된 경험적 공기역학계수 ( $C_0$ ,  $C_1$ )의 편차를 살펴보면 실험 대상 5그루의 데이터를 종합하여 도출된 계수와 각각 나무의 계수와의 편차가  $C_0$ 과  $C_1$ 에 대해서 각각 3.1~28.4% 및 0.1~7.3%로 분석되었다. 반면에 2차 방정식을 통해 도출된  $C_2$ 와  $\alpha$ 는 각각 11.8~45.1% 및 40.1~186.4%로 분석되어 멱법칙 공식보다 편차가 크게 도출되었다.

나. 잎밀도 변화에 따른 공기역학계수 변화

실험대상 나무의 잎밀도 변화에 따른 공기역학계수 변화를 분석하기 위하여 가지치기를 통해 잎밀도를 Fig. 4와 같이 총 4단계로 조정하였다. 잎을 제거하지 않은 초기상태 (Initial)에

서 모든 잎을 제거한 상태 (Step 3)까지 단계별로 잎밀도를 조정하여 앞선 실험과 동일한 조건으로 압력 손실량 측정 실험을 진행하였다. 각 실험 조건에 따른 잎면적지수 (LAI) 및 잎면적밀도 (LAD)는 Table 5에 나타내었다.

잎을 제거하지 않은 초기상태 실험 데이터와 동일하게 잎을 제거한 3가지 조건 (Step 1, Step 2, Step 3)에 대해서도 실험 풍속이 증가함에 따라서 압력 손실량이 지수적으로 증가하는 경향이 도출되었다 (Fig. 5). 잎밀도가 감소할수록 압력 손실량이 감소하는 경향이 모든 실험대상 나무에서 도출되었다. 또한, 실험 대상 방풍림의 잎제거 단계별 공기역학계수를 도출하기 위하여 식 (1)과 식 (2)의 형태인 2차 방정식 및 멱법칙 공식 형태로 회귀 분석을 수행하였으며 Table 6에 나타내었다. 이렇게 도출된 회귀방정식을 식 (1) 및 식 (2)에 대입하여 공기역학계수 ( $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\alpha$ )를 산출하였다 (Table 7).

실험대상나무 모두 단계적으로 잎을 제거함에 따라 압력 손실량이 감소하는 경향이 확인되었다. 다만, 1차 가지치기를 수행한 뒤 측정된 압력 손실량과 가지치기를 수행하지 않고 측정된 압력 손실량의 실험 결과는 Fig. 7(A)에서와 같이 유사하게 도출되었다. 이는 가지치기 단계별로 촬영한 이미지를 통해 알 수 있듯이 1차 가지치기 후 잎면적 지수는 감소하였지만 측면으로 투영된 면적에 대해서는 큰 차이가 없기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4 The aerodynamic coefficient of five trees

Experimental tree	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$\alpha$
Tree a	0.3092	2.1449	0.5328	$8.099 \times 10^{-5}$
Tree b	0.4098	2.1189	0.6918	$7.757 \times 10^{-5}$
Tree c	0.3264	2.2708	0.6326	$5.717 \times 10^{-5}$
Tree d	0.3714	2.1492	0.6356	$6.435 \times 10^{-5}$
Tree e	0.2410	2.0462	0.3680	$1.169 \times 10^{-4}$
Total	0.3367	2.1169	0.4768	$4.081 \times 10^{-5}$

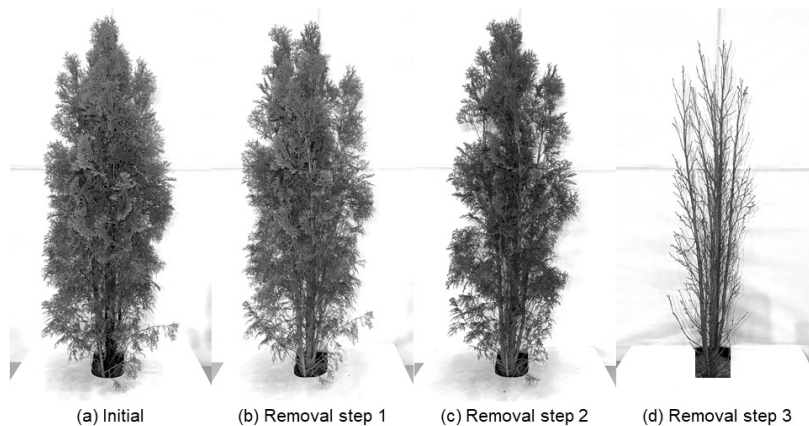


Fig. 4 Images of experimental tree by leaf removal steps

Table 5 The LAI and LAD of experimental five trees according to leaf removal steps (a: initial, b: removal step 1, c: removal step 2, d: all leave removed)

Leaf removal step	LAI / LAD				
	a	b	c	d	e
Initial	8.75 / 7.67	12.16 / 10.54	13.10 / 11.56	8.75 / 7.68	10.34 / 9.12
Step 1	7.71 / 6.76	10.46 / 9.07	9.75 / 8.60	7.22 / 6.34	8.43 / 7.44
Step 2	5.26 / 4.62	6.09 / 5.28	7.56 / 6.67	4.85 / 4.25	5.67 / 5.00
Step 3	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0



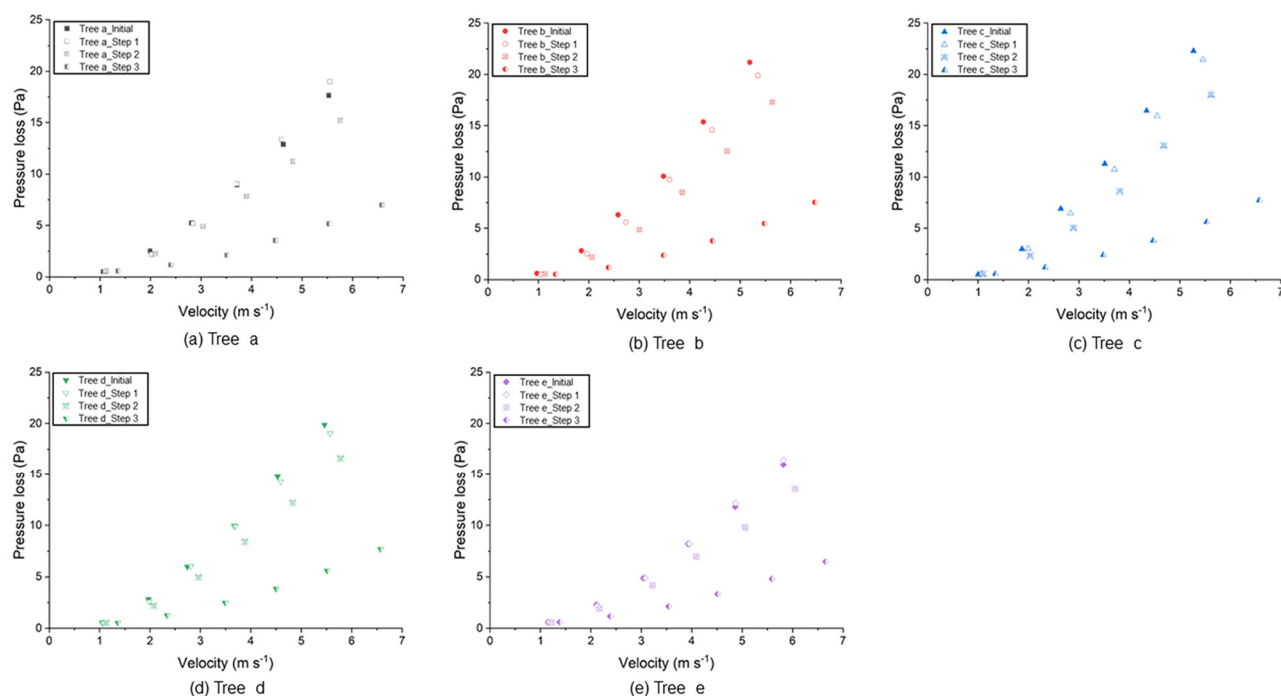


Fig. 5 Graph of relationship between pressure loss and wind speed according to the leaf removal step

Table 6 Estimation of quadratic and power law equations using the measures pressure differential and wind speed for experimental five trees by leaf removal steps

Leaf removal step		Quadratic		Power law	
		equation	R <sup>2</sup>	equation	R <sup>2</sup>
Tree a	Initial	$\Delta P = 0.5171v^2 + 0.3735v$	0.9973	$\Delta P = 0.5069v^{2.1449}$	0.9919
	Step 1	$\Delta P = 0.6183v^2 + 0.0356v$	0.9979	$\Delta P = 0.4379v^{2.2591}$	0.9962
	Step 2	$\Delta P = 0.4037v^2 + 0.3542v$	0.9976	$\Delta P = 0.4816v^{2.0174}$	0.9970
	Step 3	$\Delta P = 0.1387v^2 + 0.1554v$	0.9986	$\Delta P = 0.3115v^{1.6169}$	0.9910
Tree b	Initial	$\Delta P = 0.7185v^2 + 0.4173v$	0.9969	$\Delta P = 0.7190v^{2.1189}$	0.9938
	Step 1	$\Delta P = 0.6802v^2 + 0.1628v$	0.9968	$\Delta P = 0.5149v^{2.2538}$	0.9947
	Step 2	$\Delta P = 0.5476v^2 + 0.0149v$	0.9989	$\Delta P = 0.4557v^{2.1339}$	0.9990
	Step 3	$\Delta P = 0.1586v^2 + 0.1319v$	0.9998	$\Delta P = 0.2860v^{1.7264}$	0.9969
Tree c	Initial	$\Delta P = 0.7066v^2 + 0.6089v$	0.9944	$\Delta P = 0.6159v^{2.2708}$	0.9849
	Step 1	$\Delta P = 0.6716v^2 + 0.3417v$	0.9971	$\Delta P = 0.5796v^{2.2036}$	0.9919
	Step 2	$\Delta P = 0.5629v^2 + 0.0862v$	0.9987	$\Delta P = 0.4631v^{2.1687}$	0.9970
	Step 3	$\Delta P = 0.1537v^2 + 0.1640v$	0.9999	$\Delta P = 0.3146v^{1.6733}$	0.9966
Tree d	Initial	$\Delta P = 0.5973v^2 + 0.4551v$	0.9965	$\Delta P = 0.5895v^{2.1492}$	0.9918
	Step 1	$\Delta P = 0.5255v^2 + 0.5876v$	0.9929	$\Delta P = 0.5290v^{2.1839}$	0.9890
	Step 2	$\Delta P = 0.4831v^2 + 0.3038v$	0.9970	$\Delta P = 0.4562v^{2.1054}$	0.9958
	Step 3	$\Delta P = 0.1508v^2 + 0.1801v$	1.0000	$\Delta P = 0.3023v^{1.7030}$	0.9992
Tree e	Initial	$\Delta P = 0.4272v^2 + 0.3096v$	0.9974	$\Delta P = 0.4725v^{2.0462}$	0.9972
	Step 1	$\Delta P = 0.4661v^2 + 0.1622v$	0.9979	$\Delta P = 0.4396v^{2.0979}$	0.9983
	Step 2	$\Delta P = 0.3365v^2 + 0.2283v$	0.9978	$\Delta P = 0.3589v^{2.0092}$	0.9982
	Step 3	$\Delta P = 0.1135v^2 + 0.2199v$	0.9995	$\Delta P = 0.3280v^{1.5434}$	0.9944

Total	Initial	$\Delta P = 0.4952v^2 + 0.7933v$	0.8980	$\Delta P = 0.5907v^{2.1169}$	0.9646
	Step 1	$\Delta P = 0.5472v^2 + 0.4278v$	0.9460	$\Delta P = 0.5035v^{2.1864}$	0.9802
	Step 2	$\Delta P = 0.4237v^2 + 0.3429v$	0.9428	$\Delta P = 0.4523v^{2.0754}$	0.9846
	Step 3	$\Delta P = 0.1415v^2 + 0.1774v$	0.9841	$\Delta P = 0.3084v^{1.6518}$	0.9914

도출된 공기역학계수의 편차를 살펴보면 앞서 진행된 잎을 제거하지 않은 상태에서 도출된 공기역학계수와 마찬가지로 멱법칙 공식을 적용하였을 때 편차가 작게 도출되었다. 멱법칙 공식을 이용하여 도출된 경험적 공기역학계수 ( $C_0, C_1$ )의 편차를 살펴보면 각각 0.8~29.0% 및 0.1~7.3% 이었으며, 2차 방정식을 이용하였을 때 공기역학계수 ( $C_2, \alpha$ )의 편차는 1.0~45.13% 및 2.1~2,201.3%였다. 공기역학계수 중 공기투과성 지수( $\alpha$ )의 편차가 다른 계수들보다 크게 발생하였는데, 이는 Kim et al. (2013)에서와 같이 해당 지수가  $10^4$  단위 수준의 매우 작은 값이기 때문에 실험상의 작은 오차가 결과에

큰 차이를 가져왔기 때문이다.

## 2. 농업용방풍망 공기역학계수 도출

상용 농업용방풍망의 총 3가지 조합 (single, double, triple)에 대해서 상기 실험과 동일한 풍속 조건에 대해서 압력 손실량을 측정하였다. 나무에 의한 압력 손실량 측정 실험과 마찬가지로 실험 풍속이 증가함에 따라서 압력 손실량이 지수적으로 증가하였으며, 방풍망을 2겹 및 3겹으로 겹칠수록 압력 손실량이 증가하였다 (Fig. 6). 방풍림 실험과 마찬가지로 공기역학계수 ( $C_0, C_1, C_2, \alpha$ )를 산출하기 위하여 식 (1)의 2차 방정식과 식 (2)의 멱법칙으로 회귀 분석을 수행하였다 (Table 8). 모든 방풍망 조건에 대해서 회귀방정식 결정계수는 모두 0.99 이상으로 거의 1에 근접하는 높은 값으로 분석되었다.

Hong et al. (2015)는 공력 저항 측정기를 이용하여 방진막의 공기역학계수를 평가하였으며 방진막을 2겹, 3겹으로 겹침에 따라 계수가 증가하는 경향이 있음을 보고하였다. 본 연구에서 도출된 농업용방풍망의 공기역학계수를 살펴보면 선행 연구와 유사하게 방풍망을 1겹에서 2겹, 3겹으로 겹 수를 증가시키에 따라 공기역학계수 ( $C_0, C_2$ )가 증가하였다 (Table 9).

Table 7 The aerodynamic coefficient of each trees

Leaf removal step		$C_0$	$C_1$	$C_2$	$\alpha$
Tree a	Initial	0.3092	2.1449	0.5328	$8.099 \times 10^{-5}$
	Step 1	0.2671	2.2591	0.6371	$8.497 \times 10^{-4}$
	Step 2	0.2938	2.0174	0.4160	$8.540 \times 10^{-5}$
	Step 3	0.1900	1.6169	0.1429	$1.946 \times 10^{-4}$
Tree b	Initial	0.4098	2.1189	0.6918	$7.757 \times 10^{-5}$
	Step 1	0.2935	2.2538	0.6549	$1.988 \times 10^{-4}$
	Step 2	0.2597	2.1339	0.5273	$2.173 \times 10^{-3}$
	Step 3	0.1630	1.7264	0.1527	$2.454 \times 10^{-4}$
Tree c	Initial	0.3264	2.2708	0.6326	$5.717 \times 10^{-5}$
	Step 1	0.3072	2.2036	0.6013	$1.019 \times 10^{-4}$
	Step 2	0.2454	2.1687	0.5039	$4.039 \times 10^{-4}$
	Step 3	0.1667	1.6733	0.1376	$2.123 \times 10^{-4}$
Tree d	Initial	0.3714	2.1492	0.6356	$6.435 \times 10^{-5}$
	Step 1	0.3333	2.1839	0.5592	$4.984 \times 10^{-5}$
	Step 2	0.2874	2.1054	0.4822	$9.641 \times 10^{-4}$
	Step 3	0.1904	1.7030	0.1605	$1.626 \times 10^{-4}$
Tree e	Initial	0.2410	2.0462	0.3680	$1.169 \times 10^{-4}$
	Step 1	0.2242	2.0979	0.4015	$2.231 \times 10^{-4}$
	Step 2	0.1830	2.0092	0.2899	$1.585 \times 10^{-4}$
	Step 3	0.1673	1.5434	0.0978	$1.645 \times 10^{-4}$
Total	Initial	0.3367	2.1169	0.4768	$4.081 \times 10^{-5}$
	Step 1	0.2870	2.1864	0.5269	$7.567 \times 10^{-5}$
	Step 2	0.2578	2.0754	0.4080	$9.440 \times 10^{-5}$
	Step 3	0.1758	1.6518	0.1362	$1.825 \times 10^{-4}$

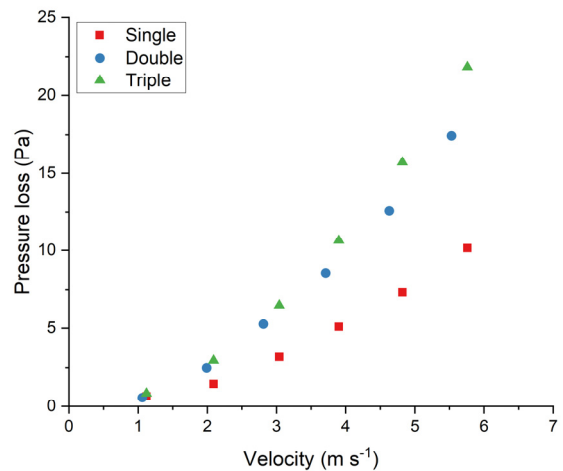


Fig. 6 Graph of relationship between Pressure loss and wind speed of mesh net according to the number of layer

**Table 8** Estimated quadric and power law equations of measured pressure differential according to experimental velocity for mesh net

Number of overlapping layer	Quadric		Power law	
	equation	R <sup>2</sup>	equation	R <sup>2</sup>
Single layer	$\Delta P = 0.2675v^2 + 0.2306v$	0.9991	$\Delta P = 0.4849v^{1.7141}$	0.9928
Double layers	$\Delta P = 0.5112v^2 + 0.3487v$	0.9984	$\Delta P = 0.5585v^{2.0595}$	0.9953
Triple layers	$\Delta P = 0.6254v^2 + 0.2215v$	0.9993	$\Delta P = 0.6851v^{1.9951}$	0.9996

**Table 9** The aerodynamic coefficient of mesh net according to the number of layers

Number of overlapping layer	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	α
Single layer	0.4849	1.7141	0.4519	7.996 × 10 <sup>-5</sup>
Double layers	0.5585	2.0595	0.8635	5.288 × 10 <sup>-5</sup>
Triple layers	0.6851	1.9951	1.0564	8.324 × 10 <sup>-5</sup>

#### IV. 결론

본 연구에서는 풍동 실험시설을 이용하여 방풍림으로 이용될 수 있는 서양측백나무와 상용 농업용방풍망의 압력 손실량을 측정하였다. 측정된 압력 손실량은 2차 방정식 및 멱법칙 공식으로 회귀 분석을 진행하여 공기역학계수 (C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, α)를 산출하였다. 2차 방정식 형태로 회귀 분석을 진행하였을 때 멱법칙 공식 형태로 분석하였을 때보다 공기역학계수간의 편차가 크게 나타났다. 이를 통해서 방풍림을 통과하는 기류의 풍속이 증가함에 따라서 발생하는 압력 손실량의 증가는 2차 방정식보다는 멱법칙을 따른다고 판단되었다.

방풍림의 앞제거 조건 및 방풍망이 겹쳐진 조건에 따른 공기역학계수의 변화를 분석한 결과, 공극이 증가함에 따라 공기역학계수 (C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>)가 감소하였으나 공기투과성 지수 (α)는 경향성이 발견되지 않았다. 이는 공기투과성 지수가 10<sup>-5</sup>~10<sup>-3</sup> 단위의 매우 작은 값이기 때문에 실험 과정에서 발생할 수 있는 작은 오차가 결과에 큰 영향을 주기 때문으로 판단되었다.

이렇게 도출된 공기역학계수는 전산유체역학 시뮬레이션의 입력조건으로 이용될 수 있으며, 수치해석을 통해 유속 저감 효과, 기류의 변화 등을 분석할 수 있다. 또한 축사에서 유래하는 냄새물질 및 미세먼지와 같은 오염물질은 기류를 타고 확산된다고 알려져 있는데 본 연구를 통해 도출된 공기역학계수를 이용한 수치해석을 통해 축산 유래 오염물질의 확산 저감 효율도 분석할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2021년도 농촌진흥청 (국립축산과학원) 연구사업 (PJ014297042021) 및 전문연구원 과정 지원사업에 의해 이루어진 것임.

#### REFERENCES

- Baret, F., de Solan, B., Lopez-Lozano, R., Ma, K., and Weiss, M. (2010). GAI estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5 zenith angle: Theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat crops, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11), 1393-1401.
- Bitog, J. P., I. B. Lee, H. S. Hwang, M. H. Shin, S. W. Hong, I. H. Seo, E. Mostafa and Z. Pang, 2011, A wind tunnel study on aerodynamic porosity and windbreak drag, *Forest Science and Technology* 7(1): 8-16. doi:10.1080/21580103.2011.559939.
- Bitog, J. P., I. B. Lee, H. S. Hwang, M. H. Shin, S. W. Hong, I. H. Seo, K. S. Kwon, E. Mostafa, and Z. Pang, 2012, Numerical simulation study of a tree windbreak, *Biosystems Engineering* 111: 40-48. doi:10.1016/j.biosystemseng.2011.10.006.
- Chungbuk Research Institute (CRI), 2018, Research service for domestic and foreign domestic animal manure treatment and use and application of odor reduction technology (in Korean).
- Chun, K. W., 2006, Research on the composition, conservation and management of coastal disaster prevention forests, Korea Forest Service.
- Fang, H., Baret, F., Plummer, S., and Schaeppman-Strub, G. (2019). An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications, *Reviews of Geophysics*, 57(3), 739-799.
- Hong, S. W., Lee, I. B., and Seo, I. H. (2015). Modelling and predicting wind velocity patterns for windbreak fence



- design, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142, 53-64.
8. Kim, D. K., M. J. Seong, and H. J. Kim, 2010, A Study on The Development of The Planning Indicator for Saemangeum Tourist Complex Responding to Climate Change, *Journal of Tourism and Leisure Research* 22(6): 139-158 (in Korean).
  9. Kim, H. J., H. S. Kim, S. H. Jeong, and S. H. Lee, 2013, Analysis on effects of protection against wind according to tree species and planting methods of the wind break forest based on the wind tunnel experiment, *Korean Institute of Forest Recreation and Welfare* 791-794 (in Korean).
  10. Kim, J. S., and Y. H. Son, 2000, Windbreak use and design, *Natural Resources Research* 8: 21-35 (in Korean).
  11. Kim, R. W., I. B. Lee, S. W. Hong, H. S. Hwang, Y. H. Son, T. W. Kim, M. Y. Kim, and I. H. Song, 2013, Measurement of aerodynamic properties of screens for windbreak fence using the apparatus for testing screens, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 145-154 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.6.145.
  12. Ko, S. H., 2012, A Study on the Improvement of Process and Criteria for Landscape Planting Design, MS thesis, Seongnam-si, Korea: Gachon university (in Korean).
  13. Lin, X. J., S. Barrington, J. Nicell, D. Choiniere, and A. Vezina, 2006, Influence of windbreak on livestock odour dispersion plume in the field, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 116(3-4): 263-272. doi:10.1016/j.agee.2006.02.014.
  14. Ministry of Environment(ME), 2018, Livestock manure treatment statistics (in Korean).
  15. National Institute of Environmental Researcher (NIER), 2017, A study on management method based on characteristics of livestock odor, *Korean Society of Odor Research and Engineering* (in Korean).
  16. National Institute of Environmental Researcher (NIER), 2018, Research for establishing the 2nd comprehensive measures to prevent odor (in Korean).
  17. Natural Plant Materials Center, 2007, Windbreak Plant Species for Odor Management around Poultry Production Facilities, Natural Resources Conservation Service.
  18. Song, H. S., S. C. Yu, Y. Y. Kim, and S. Y. Lim, 2019, Evaluation of wind load and drag coefficient of insect net in a pear orchard using wind tunnel test, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(1): 75-83 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2019.61.1.075.
  19. Tyndall, J., and J. Colletti, 2007, Mitigating swine odor with strategically designed shelterbelt systems: a review, *Agroforestry Systems* 69: 45-65. doi:10.1007/s10457-006-9017-6.
  20. Whitaker, S., 1996. The Forchheimer Equation: A Theoretical Development. *Transport in Porous Media* 25: 27-61.
  21. You, K. P., J. Y. You, and Y. M. Kim, 2009. Effect of wind fences in reducing wind velocity at fruit farms. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction* 25(2): 99-106 (in Korean).
  22. Yum, S. H., K. J. Kwon, S. H. Sung, and Y. D. Choi, 2007. The installation effect and optimal pipe sizes of an anti-wind net by computational analysis, *Journal of Biosystems Engineering* 32(6): 430-439 (in Korean). doi:10.5307/JBE.2007.32.6.430.
  23. Yum, S. H., S. H. Kang, S. H. Kim, S. B. Lee, and M. Y. Kim, 2011, Effects of an anti-wind net on wind velocity reduction by a wind tunnel test and CFD, *Journal of Biosystems Engineering* 36(5): 355-360 (in Korean). doi:10.5307/JBE.2011.36.5.355.
  24. Yum, S. H., and S. H. Kang, 2013. An experimental study on characteristics of pressure drop of screens used in horticultural facilities, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 31-35 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.6.031.
  25. Yum, S. H., S. H. Kang, S. H. Kim, S. B. Lee, and M. Y. Kim, 2011. Effects of an anti-wind net on wind velocity reduction by a wind tunnel test and CFD, *Journal of Biosystems Engineering* 36(5): 355-360 (in Korean). doi:10.5307/JBE.2011.36.5.355.