침엽수림 상부의 단일층 풍속 관측으로부터의 영면변위 추정에 관하여

유재일¹ · 홍진규² · 권효정¹ · 임종환³ · 김 준^{1,4*}

¹연세대학교 생물기상연구실/지구환경연구소, 대기과학과,

²국가수리과학연구소, ³국립산림과학원 산림보전부,

⁴동경대학교 GCOE 지속가능한 도시재생센터/산업과학연구소

(2009년 12월 9일 접수; 2010년 3월 26일 수정; 2010년 3월 25일 수락)

On Estimation of Zero Plane Displacement from Single-Level Wind Measurement above a Coniferous Forest

Jaeill Yoo¹, Jinkyu Hong², Hyojung Kwon¹, Jong-Hwan Lim³ and Joon Kim^{1,4*}

¹Biometeorological Laboratory / Global Environment Laboratory, Department of Atmospheric sciences, Yonsei University, 262 Sungsan-ro Seodaemun-gu Seoul 120-749, Korea

²National Institute for Mathematical Sciences, 628 Daeduk-Boulevard Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea

³Division of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute, 57 Hoegiro Dongdeamun-gu, Seoul 130-712, Korea

⁴Global Center of Excellence for Sustainable Urban Regeneration & Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

(Received December 9, 2009; Revised March 26, 2010; Accepted March 25, 2010)

ABSTRACT

Zero plane displacement (d) is the elevated height of the apparent momentum sink exerted by the vegetation on the air. For a vegetative canopy, d depends on the roughness structure of a plant canopy such as leaf area index, canopy height and canopy density, and thus is critical for the analysis of canopy turbulence and the calculation of surface scalar fluxes. In this research note, we estimated d at the Gwangneung coniferous forest by employing two independent methods of Rotach (1994) and Martano (2000), which require only a single-level eddy-covariance measurement. In general, these two methods provided comparable estimates of d/h_c (where h_c is the canopy height, i.e., ~23m), which ranged from 0.51 to 0.97 depending on wind directions. These estimates of d/h_c were within the ranges (i.e., 0.64~0.94) reported from other forests in the literature but were sensitive to the forms of the nondimensional functions for atmospheric stability. Our finding indicates that one should be careful in interpretation of zero plane displacement estimated from a single-level eddy covariance measurement that is conducted within the roughness sublayer.

Key words : Zero plane displacement, KoFlux, Coniferous forest, Logarithmic wind profile, Similarity theory

I. 서 론

지표면의 영향을 직접 받아 난류에 의한 운동량, 에너지 및 물질 교환이 가장 활발하게 일어나는 지표층에서는 풍속의 연직 분포가 지면에 가까워질수록 풍속이 대수적으로 감소하는 연직 구조를 가지며, 이때 거친 지면에 의해 풍속이 흡수되어 0이 되는 기준면을

영면변위(zero plane displacement, d)라고 한다(Arya, 2001). 영면변위는 대기-지표간 운동량, 열 및 물질 교환의 모수화(parameterization)뿐 아니라 대기 안정도($(Z-d)/L$, 여기서 Z 는 관측 높이, L 은 Obukhov 길이)의 계산과 군락난류 분석에 반드시 필요한 중요한 변수이다(예를 들어, Lloyd *et al.*, 1991; Katul *et al.*, 1995; Takagi *et al.*, 2003).

* Corresponding Author : Joon Kim(joon-kim@yonsei.ac.kr)

일반적으로 지표층의 풍속은 Monin-Obukhov 상사 이론(similarity theory)에 따라 대기가 중립 상태인 경우에 식 (1)과 같이 주어지며, 영면변위는 일반적으로 이 식을 이용하여 중립조건하에서 여러 층에서 관측된 연직 풍속 프로파일로부터 수치계산을 반복수행하여 계산한다(Molion and Moore, 1983; de Bruin and Moore, 1985; Wiernga, 1993).

$$U(Z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{Z-d}{z_0}\right) \quad (1)$$

여기서 u_* 는 마찰속도, k 는 von Karman 상수, Z 는 지면으로부터의 관측 높이, z_0 는 거칠기 길이이다. 이때 식(1)은 d 뿐만 아니라 z_0 의 함수이기 때문에 여러 층에서 풍속을 관측할 수 없는 경우에는 회귀방법으로 영면변위를 산출할 수 없다는 점에 주목해야 한다. 그러나 실질적으로, 관측지 조건에 따라 항상 여러 층에서 풍속을 관측할 수는 없기 때문에 단일층에서 관측한 풍속자료로부터 영면변위를 산출하는 방법들이 제안되어 왔다(예, Shaw and Pereira, 1982; Raupach, 1994; Rotach, 1994; de Bruin and Verhoef, 1997; Martano, 2000). 예를 들어, Rotach(1994)은 Monin-Obukhov 상사이론을 바탕으로 산출한 기온에 대한 상사함수와 관측자료로부터 얻은 상사함수 사이의 평균제곱근(root-mean-square, RMS)을 계산하여 영면변위를 산출하였다. De Bruin and Verhoef (1997)는 연직 풍속의 표준편차와 현열 플럭스의 상사관계를 이용하여 타이가-관목(Taiga-bush)에서 영면변위를 산출하였다. Martano(2000)는 식 (1)에 안정도 보정함수(Ψ)를 도입한 후 수학적 해를 구하여 단일층의 평균풍속만으로부터 영면변위를 산출하는 방법을 제안하였다.

이 연구에서는 복잡 지형에 위치한 광릉 침엽수림에서 2009년 5월 1일부터 10일까지 관측된 단일층 풍속자료를 사용하여 Rotach(1994)와 Martano(2000)가 제시한 방법을 이용하여 영면변위를 추정하고 두 결과를 비교하였다. 또한 위 두 방법을 사용할 때 고려해야 할 문제점들에 대한 논의와 더불어 영면변위 계산에 사용된 프로그램 코드를 부록에 수록하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 관측지 및 관측장비

관측지는 KoFlux 관측사이트(<http://koflux.org>)의 하나인 경기도 포천에 위치한 광릉 침엽수림(KoFlux

Fig. 1. Gwangneung coniferous forest site and the measurement tower.

Site Code: GCK, 북위 37°45', 동경 127°9')으로, 해발고도는 약 210m이다(Moon *et al.*, 2005). 침엽수림은 메인타워가 위치한 활엽수림으로부터 동쪽으로 약 1.2km에 위치하고 있다(Moon *et al.*, 2005). 에디공분산 관측장비는 침엽수림 내에 설치된 40m 관측 타워에 설치되어있다(Fig. 1). 우점종은 전나무(*Abies holophylla*)로서 평균 높이는 약 23m이다. 하부 식생은 층층나무(*Cornus controversa*)와 뽕나무(*Morus alba*)이나, 하부 식생이 차지하는 임목의 기저면적은 무시할만하다(Lim, 2006). 관측기간은 2009년 5월 1일부터 10일까지이며, 이 기간의 식생면적지수(plant area index, *PAI*)는 약 6.5이었다. 산림마루의 낙엽층은 상대적으로 매우 얇으며, 토양은 주로 모래참흙인 사양토(sandy loam)로 구성되어 있다(Kim *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007).

높이 40m에서의 풍속, 풍향 및 기온은 3차원 초음파 풍향풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)를 사용하여 10Hz로 집록기(CR5000, Campbell Scientific Inc., USA)에 저장하였다. 본 연구에서는 2009년 5월 1일부터 10일까지 관측된 풍속, 풍향, 기온자료를 사용하였다. 관측지의 남북 방향에는 비탈이 위치하고 있으나, 동서방향으로 거의 평지(경사각 5° 이하)에 가까운 복잡지형에 위치하여 방향별로 군락의 거칠기가 달랐기 때문에 풍향을 30° 간격으로 나누어 각각의 영면변위를 추정하였다.

2.2. 영면변위 추정 방법

단일층 풍속자료로부터 영면변위를 추정하기 위해 본 연구에서는 Rotach(1994)(이하 ‘Rotach방법’)과 Martano(2000)(이하 ‘Martano방법’)을 사용하였다. Rotach방법은 Monin-Obukhov 상사이론에 근거하여 다른 모수에 비해 상대적으로 상사이론을 잘 따르는 온도를 이용하여 영면변위를 산출한다. 일정 높이에서 관측된 기온과 풍속으로부터 온도의 규모 모수(scaling parameter), θ_* 를 산출하여 온도에 대한 상사함수($\phi_{\theta obs}$; ‘obs’는 관측자료를 의미)를 계산한다.

$$\phi_{\theta obs} = \frac{\sigma_\theta}{\theta_*} \quad (2)$$

여기서 σ_θ 와 u_* 는 각각 기온의 표준편차와 마찰 속도이며, θ_* 는 아래와 같이 정의한다.

$$\theta_* = \frac{w'\theta'}{u_*} \quad (3)$$

여기서 w 는 연직 풍속, ‘-’는 시간 평균, ‘-’는 평균 값으로부터의 편차를 나타낸다. 이때 대기가 비중립일 때의 효과에 대하여 Tilman(1972)은 대기가 불안정할 때($(Z-d)/L < -0.2$), ϕ_θ 와 대기안정도 모수, $(Z-d)/L$ 의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$\phi_{\theta calc} = -C_1 \left(C_2 - \frac{Z-d}{L} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

여기서 C_1 과 C_2 는 상수로서 각각 0.95(Wyngaard *et al.*, 1971)와 0.05945(Beljaars *et al.*, 1983)를 사용하였으며 $\phi_{\theta obs}$ 와 구분하기 위해 $\phi_{\theta calc}$ 로 표시하였다. 본 연구에서는 Rotach 방법에 따라 대기가 불안정한 $-10 \leq (Z-d)/L \leq 0$ 인 경우의 자료만을 사용하여 지표(0m)에서 군락 높이(~23m)까지 영면변위를 변화시키면서 식 (4)에서 온도에 대한 상사이론 함수를 계산한 후, 계산값과 관측값 사이의 RMS가 최소가 되는 지점의 값을 영면변위의 값으로 선택하였다.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\phi_{\theta obs} - \phi_{\theta calc})^2} \quad (5)$$

Martano방법에서는 Rotach방법과 다르게 온도 대신에 풍속과 대기 안정도 효과를 적분된 형태로 사용한다. 즉, 대기가 중립인 경우에 유효한 식 (1)은 대기가 비중립상태에 있을 때 Monin-Obukhov상사이론에 따라 안정도 교정함수(Ψ)를 도입하여 다음과 같이 확장할 수 있다.

$$U(Z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{Z-d}{z_0} \right) - \Psi \left(\frac{Z-d}{L}, \frac{z_0}{L} \right) \right] \quad (6)$$

서론에서 언급한 바와 같이 식 (6)은 두 개의 미지수(d 와 z_0)를 포함하고 있기 때문에, 일반적으로 서로 다른 높이에서의 관측값을 이용한 반복 계산이 필요하다. 하지만 Martano(2000)는 단일층의 관측값만으로 영면변위를 계산하는 방법을 고안하였다. 먼저 최소제곱법을 이용하여 지표층에서 이미 알려진 안정도 교정 함수와의 차이를 최소화시키는 영면변위와 거칠기 길이를 다음과 같이 계산한다.

$$\left\langle \left[\frac{kU}{u_*} - \ln \left(\frac{Z-d}{z_0} \right) + \Psi \right]^2 \right\rangle = \min(z_0, d) \quad (7)$$

여기서 연산자 $\langle \rangle$ 는 $(1/N) \sum_i^N$ 로 정의되며, $\min(z_0, d)$ 는 오른쪽 항을 최소가 되도록 하는 두 변수(z_0 와 d)를 의미한다. 차원을 줄이기 위해 미지수항인 $p = \ln[(Z-d)/z_0]$ 와 나머지 항, $S = kU/u_* + \Psi$ 로 구분하면 $S-p$ 의 기대값은 0이고(즉, $\langle S-p \rangle = 0$), p 는 관측자료와 무관하므로 $\langle p \rangle = p$ 가 성립한다. 이를 이용하여 식 (7)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \langle [S-p - \langle S-p \rangle]^2 \rangle &= \langle [S-p - \langle S \rangle + \langle p \rangle]^2 \rangle \\ &= \langle [S - \langle S \rangle]^2 \rangle = \sigma_S^2 \end{aligned} \quad (8)$$

즉, 식 (8)에 의하면, 식 (7)은 결국 S 의 분산의 최소값을 구하는 문제로 귀결된다. 따라서 Martano방법은 최종적으로 영면변위를 지표(0m)부터 군락 높이(~23m)까지 변화시키면서 S 의 분산이 최소값을 가질 때 영면변위를 추정한다. 한편 Martano방법에서는 Sozzi *et al.*(1998)이 제시한 Ψ 를 사용하였다.

$$\Psi \left(\frac{Z-d}{L} \right) = \begin{cases} \ln \left[\left(\frac{1+x^2}{2} \right) \left(\frac{1+x}{2} \right)^2 \right] - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} & ((Z-d)/L < 0) \\ 0 & ((Z-d)/L = 0) \\ -a_2 \left[1 - \exp \left(-a_3 \frac{z}{L} \right) \right] & ((Z-d)/L > 0) \end{cases} \quad (9)$$

여기서 x 는 $[1 - a_1((Z-d)/L)]^{1/4}$ 로 정의되며, 세 상수 a_1 , a_2 , a_3 는 Sozzi *et al.*(1998)에 제시된 16, 17, 0.29를 각각 사용하였다.

III. 결과 및 논의

3.1. 풍속 및 풍향의 변동

관측기간동안 평균 풍속은 $1.37(\pm 0.83) \text{ m s}^{-1}$ 이었으며, 마찰속도의 평균은 $0.27(\pm 0.23) \text{ m s}^{-1}$ 이었다. 관측된 풍속 자료중 서쪽($240^\circ \sim 300^\circ$)에서 불어온 바람이

Fig. 2. Wind characteristics: (a) diurnal patterns of mean horizontal wind speed and friction velocity, (b) frequency distribution of wind direction, (c) mean friction velocity for different wind directions, and (d) drag coefficient under neutral conditions for different wind directions. The drag coefficients for 0-30°, 30-60° and 330-360° under neutral conditions were not available during the study period.

60% 이상을 차지했으며(Fig. 2(b)), 풍향별로 평균한 마찰속도는 $0.2 \sim 0.4 \text{ m s}^{-1}$ 의 범위를 보였다(Fig. 2(c)). 항력계수(drag coefficient; u_*^2/U^2)는 지면의 거칠기를 나타내는 표면 응력의 척도로서(Stull, 1988), 중립 조건일 때, 주풍향(270~300°)에서 최소값, 300~330°에서 최대값을 보였다. 대체로 계곡 방향(동서방향)으로 작은 값을 보였으며, 비탈이 위치한 남북방향으로는 큰 값을 보였다. 즉, 비균질한 복잡지형에 위치한 침엽수림에서 항력계수는 풍향별로 차이를 보임을 확인할 수 있었다(Fig. 2(d)).

3.2. Rotach방법에 의한 영면변위 추정

Fig. 3은 각 풍향별로 영면변위를 변화시키면서 식 (2.4)의 RMS를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 표시되지 않은 풍향에서의 값은 RMS의 최소값이 영면변위의 경계값(지표 혹은 군락 높이)에서 나타난 경우이다. 산출된 영면변위는 15.67~22.24m로서 군락 높이의 약 67~97% 범위에 있었다. 일반적으로, 영면변위는 군락의 평균 높이의 70~80%이고(Arya, 2001), 침엽수림의 경우 영면변위가 군락 높이의 64~94%임을 보고한 선행 연구 결과를 고려할 때(Wiernga, 1993), 본 연

Fig. 3. Variation of the root-mean-square (RMS) in difference between the measured (ϕ_{obs}) and calculated (ϕ_{tak}) similarity function for the estimation of zero plane displacement for different wind directions.

구의 영면변위 값은 신뢰할 만한 범위 내에 있으나, 210~240°와 330~360°를 제외하고 대체로 기존 연구에서 보고된 값보다 다소 큰 값을 보였다.

한편, Rotach방법에 사용된 대기 안정도 함수가 영면변위 추정에 미치는 영향을 확인하기 위하여, Tilman(1972)이 제시한 함수(이하 ‘T함수’) 대신 Kaimal and Finnigan(1994)이 제시한 아래의 함수(이하 ‘KF함수’)를 사용하여 영면변위를 추정하였다.

$$\phi_{\theta} = 2(1 + 9.5[(Z-d)/L])^{-1/3} \quad (-2 \leq (Z-d)/L \leq 0) \quad (10)$$

Fig. 4에 나타난 바와 같이, KF함수를 사용한

Rotach방법은 330~360°를 제외한 나머지 풍향에서 최소값을 보이지 않아 영면변위를 산출할 수 없었다. 이는 단일층 풍속으로부터 영면변위 산출이 안정도 함수의 형태에 따라 민감하게 반응함을 시사한다. 그러나 KF함수와 T함수가 모두 유효한 안정도 범위에서 두 함수의 차이는 거의 없으므로, 영면변위 산출에 서로 다른 결과를 나타내는 것은 대기가 매우 불안정한 조건($(Z-d)/L < -2$)의 자료에서 기인하는 것으로 사료된다.

3.3. Martano방법에 의한 영면변위 추정

Fig. 5는 영면변위를 변화시키면서 S 의 표준편차를 계산한 결과로서, 표시되지 않은 풍향은 d 의 경계값(지표 혹은 군락 높이)에서 S 의 표준편차의 최소값이 발생한 경우이다. 산출된 영면변위는 13.62~21.37m였으며, 군락 높이의 약 51~93%를 차지하였다. Martano방법으로 산출한 영면변위의 신뢰도를 확인하기 위해 Martano방법으로 계산된 영면변위와 거칠기 길이를 식 (6)에 대입하여 계산된 평균풍속과 실제 관측한 평균풍속을 풍향별로 비교하였다(Fig. 6). 330~360°(Fig. 6(e))를 제외한 나머지 영면변위 추정값을 이용하여 산출한 평균풍속은 관측한 평균풍속과 비교적 잘 일치하였다. 그러나 자료의 수가 적어 유의미한 통계적인 분석을 위해서는 좀더 장기간의 자료를 이용한 분석이 필요하다.

Fig. 4. Comparison of the root-mean-square (RMS) obtained by using the similarity functions of Tilman (1972) and Kaimal and Finnigan (1994) for the estimation of zero plane displacement for different wind directions: (a) 180-210°, (b) 210-240°, (c) 240-270°, (d) 270-300°, (e) 300-330°, and (f) 330-360°.

Fig. 5. Comparison of the standard deviation of $S(\sigma_s)$ for the estimation of zero plane displacement for different wind directions.

3.4. Rotach방법과 Martano방법간의 비교

Table 1과 Fig. 7은 두 방법으로부터 추정된 영면변위를 풍향별로 정리한 것이다. 두 방법 모두 산출값을 낸 풍향은 270~300°, 300~330°, 330~360° 세 풍향이었다. 이 중 두 방향(270~300°와 330~360°)의 영면변위는 0.6m이내의 작은 차이를 보인 반면, 300~330°의 영면변위는 5m 이상의 차이를 보였다. 풍향 300~330°에서 다른 두 방향에 비해 큰 차이를 보인 것은 영면변위를 산출하기 위해 사용된 두 방법에서

유효한 불안정 조건의 범위가 서로 다른데서 기인한 것으로 사료된다. Rotach방법에서 사용한 상사함수의 유효범위는 불안정한 조건만 포함하지만, Martano방법은 불안정부터 안정한 조건까지 포함하기 때문에 관측된 자료에 따라 선택되는 자료의 수가 각각 다르다. 본 연구의 경우, Rotach방법과 Martano방법은 각각 5개와 13개의 자료가 선택되었다. 그러나 통계적으로 유의한 결론을 위해서는 장기간의 자료를 이용한 분석이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

IV. 토 론

앞서 제시된 두 방법으로부터 산출한 영면변위의 추정값대비 군락 높이의 비(d/h_c)는 각각 0.67~0.97, 0.51~0.93으로, 문헌에 제시된 범위내에 있으나, 숲에 대하여 널리 쓰이는 군락높이의 2/3정도의 값보다는 큰 값이다(Arya, 2001). 비교적 큰 값을 보이는 원인으로 본 연구의 관측 조건이 두 방법의 전제 조건을 만족하지 않을 가능성을 꼽을 수 있다. 이 연구에 사용된 두 방법은 모두 Monin-Obuhkov 상사이론에 가정한다. 본 연구의 관측높이(40m)는 거칠기아중

Fig. 6. Comparison of horizontal wind speed between the observed and the calculated from equation (5) using the estimated zero plane displacement by Martano (2000) for different wind directions: (a) 0-30°, (b) 30-60°, (c) 270-300°, (d) 300-330°, and (e) 330-360°.

Table 1. Estimates of zero plane displacement by Rotach (1994) and Martano (2000)

Wind Direction	Frequency	Rotach (1994)		Martano (2000)		
		Estimates	Points	Estimates	Points	Criteria (L)
0-30	5	- ¹⁾	-	13.62(0.59)	2	<-50, >10
30-60	4	-	-	21.37 (0.93)	4	<-25, >5
60-90	31	-	-	-	-	-
90-120	20	-	-	-	-	-
120-150	33	-	-	-	-	-
150-180	21	-	-	-	-	-
180-210	20	21.95 (0.95) ²⁾	3	-	-	-
210-240	18	15.67 (0.68)	6	-	-	-
240-270	78	22.24 (0.97)	6	-	-	-
270-300	225	21.53 (0.93)	35	20.93 (0.91)	10	<-50, >20
300-330	20	19.47 (0.85)	5	13.87 (0.60)	13	<-50, >10
330-360	6	17.30 (0.75)	2	17.42 (0.76)	5	<-25, >5

¹⁾ '-' indicates no estimates smaller than the canopy height (~23m).

²⁾ The number in the parentheses is the ratio of zero plane displacement estimates to canopy height.

Fig. 7. Comparison of the estimates of d/h_c for different wind directions by Rotach (1994) and Martano (2000) in the Gwangneung coniferous forest in May 2009.

(roughness sublayer)에 위치하여(Kaimal and Finnigan, 1994), 실제 대기안정도 함수와 본 연구에서 사용된 대기안정도 함수가 다를 수 있다(Kaimal and Finnigan, 1994; Foken, 2006). 즉, 관측높이가 거칠기 이층에 존재할 경우 본 연구에 사용된 상사이론 함수의 계수가 제시된 값과 다른 값을 사용해야 함을 의미한다. 영면변위 추정에 대한 상사함수의 민감도를 알아보고자 풍향 300~330°에 대하여 온도에 대한 상사함수(ϕ_θ)를 변화시키면서 영면변위를 추정하였다(Fig. 8(a)). 상사함수를 Rotach방법에서 사용된 상사함수의 1.1배, 1.0배, 0.9배로 변화시켜 산출한 영면변위는 각각 9.35m, 19.47m, 23m였다. 이는 Rotach방법에서 사용된 상사함수가 거칠기이층에서 다른 함수로 정의된다

Fig. 8. (a) RMS in difference between the measured (ϕ_{obs}) and calculated (ϕ_{calc}) similarity function obtained by varying the magnitude (from 0.9 to 1.1) of the similarity function of Rotach (1994) for the wind direction of 270-330°; (b) the standard deviation of $S(\sigma_s)$ obtained by varying the magnitude (from 0.9 to 1.1) of stability correction function of Martano (2000) for the wind direction of 330-360°.

면, 영면변위 산출값이 변화될 수 있음을 의미한다. Martano방법에서도 안정도 교정함수(Ψ)를 사용된 교정함수의 1.1배에서 0.9배까지 변경시키면서 영면변위를 산출했을 때, 19.85m에서 13.75m까지 변화였다(Fig. 8(b)). 이러한 결과는 Martano방법에서도 안정도 교정함수가 거칠기이층에서 다른 함수로 정의될 경우 이에 따라 산출된 영면변위의 값이 마찬가지로 달라질 수 있음을 의미한다. 결국 거칠기이층에서 상사함수나 안정도 교정함수가 알려지지 않은 경우 단일층 풍속으로부터의 영면변위 추정은 영면변위뿐 아니라 상사함수, 안정도 보정함수의 계수를 포함한 다차원 방정식의 풀이로 귀결된다. 대안으로 영면변위 및 각종 계수들을 미지수로 놓고 비선형회귀를 통해 영면변위 산출을 제한해볼 수 있다. 이 방법을 본 연구에서 같은 자료를 사용하여 시도해 보았으나, 어느 풍향에서 대해서도 비선형회귀를 통한 합리적인 영면변위의 추정값은 산출되지 않았다(결과는 미제시).

V. 결론 및 요약

복잡지형에 위치한 광릉 침엽수림에서 상사이론에 근거한 두 가지 다른 방법을 사용하여 단일층 풍속자료로부터 영면변위를 추정하였다. 산출된 영면변위는 풍향에 따라 다르게 나타났으며, 두 방법이 각각 군락 높이의 67~97%와 51~93%의 범위를 보였다. 270~300°의 풍향을 제외하면, 두 방법으로 산출된 영면변위는 큰 차이를 보이지 않았다. 사용한 방법에 따라 영면변위의 차이가 나타나는 주된 요인은 대기 안정도에 따른 자료의 선택으로 자료수가 달라지기 때문으로 보인다. 또한 두 방법 모두 Monin-Obukhov상사이론을 기본 가정으로 하기 때문에 관측높이가 거칠기이층에 위치할 경우 상사이론이 성립하지 않아 영면변위 추정값의 불확실성이 컸다. 이러한 결과는 거칠기이층에서의 상사함수나 안정도 교정함수가 알려지지 않은 경우 영면 변위 추정 방법에 대한 이론적 연구가 필요함을 시사한다. 결론적으로, Martano방법과 Rotach 방법은 모두 다층에서 풍속 관측이 어려운 산림생태계나 도시생태계에서 적용할 경우, 단일층 풍속자료만으로부터 영면변위를 산출할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 그 관측 높이가 군락 높이의 적어도 2~3배 이상 되는 관성아층(inertial sublayer)에서 관측되지 않을 경우에는 매우 주의깊은 적용과 해석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 수자원의 지속적 확보 기술 개발 사업단의 HydroKorea II 개발 (과제번호: 1-8-3)과 국립산림과학원의 '지구환경변화에 대응한 장기생태연구'의 지원을 받아 수행되었습니다.

적 요

영면변위(d)는 거친 식생군락에 의해 운동량이 모두 흡수되어 군락 내의 대수적 풍속 프로파일의 0이 되는 높이를 말한다. 군락의 표면 거칠기의 구조를 나타내는 영면변위는 군락난류의 분석과 지표 스칼라 플럭스의 계산에 매우 중요하다. 본 단보에서는 Monin-Obukhov 상사이론에 기반을 두고 단일층에서 관측된 평균수평풍속 자료를 사용하는 두 가지 다른 방법을 사용하여 광릉침엽수림에서 d 값을 추정하였다. 관측지의 비균질성과 복잡성을 고려해서, 표면거칠기와 바람체계가 d 에 미칠 수 있는 영향을 살펴보기 위해, 자료를 매 30° 간격의 풍향별로 나누었다. 전반적으로 두 방법을 사용한 결과는 서로 비슷했는데, d/h_c (여기서 h_c 는 군락의 높이로서 약 ~23m)는 풍향에 따라 0.51~0.97의 범위를 보였다. 이러한 d/h_c 의 값의 범위는 문헌에 보고되어 있는 범위(0.64~0.94)와 크게 다르지 않았으나, 다소 높은 쪽에 분포되어 있었다. 이러한 원인의 하나로는 관측이 두 방법의 전제인 Monin-Obukhov 상사이론이 성립하지 않는 거칠기이층에서 이루어졌기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 관측높이가 거칠기 이층에 존재할 경우에는 단일층 풍속으로부터 영면변위를 추정하는 방법을 적용하고 그 결과를 해석하는 데에 세심한 주의가 필요하다.

REFERENCES

- Arya, S. P 2001: *Introduction to micrometeorology*. Academic Press, London, UK, 188-203.
- Beljaars, A. C. M., P. Schotanus, and F. T. M. Nieuwstadt, 1983: Surface layer similarity under nonuniform fetch conditions. *Journal of Applied Meteorology* **22**(10), 1800-1810.
- de Bruin, H. A. R., and C. J. Moore, 1985: Zero-plane displacement and roughness length for tall vegetation, derived from a simple mass conservation hypothesis. *Boundary-Layer Meteorology* **31**(1), 39-49.
- Foken, T., 2006: 50 Years of the Monin-Obukhov similarity

- theory. *Boundary-Layer Meteorology* **119**(3), 431-447.
- Kaimal, J. C. and J. J. Finnigan, 1994: *Atmospheric Boundary Layer Flows*. Oxford University Press, New York, 15-21 pp.
- Katul, G., S. M. Goltz, C.-I. Hsieh, Y. Cheng, F. Mowry, and J. Sigmon, 1995: Estimation of surface heat and momentum fluxes using the flux-variance method above uniform and non-uniform terrain. *Boundary-Layer Meteorology* **74**(3), 237-260.
- Kim, J., D. Lee, J. Hong, S. Kang, S.-J. Kim, S.-K. Moon, J.-H. Lim, Y. Son, J. Lee, S. Kim, N. Woo, K. Kim, B. Lee, B.-L. Lee, and S. Kim, 2006: HydroKorea and CarboKorea: cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea. *Ecological Research* **21**(6), 881-889.
- Lee, D., J. Kim, S.-J. Kim, S.-K. Moon, J. Lee, J.-H. Lim, Y. Son, S. Kang, S. Kim, K. Kim, N. Woo, B. Lee, and S. Kim, 2007: Lessons from cross-scale studies of water and carbon cycles in the Gwangneung forest catchment in a complex landscape of monsoon Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**(2), 149-160.
- Lim, J.-H., 2006: Ecological measurement and analysis. Development of HydroKorea - Sustainable Water Resources Research Program, 300 pp.
- Lloyd, C. R., A. D. Culf, A. J. Dolman, and J. H. C. Gash, 1991: Estimates of sensible heat flux from observations of temperature fluctuations. *Boundary-Layer Meteorology* **57**(4), 311-322.
- Molion, L. C. B., and C. J. Moore, 1983: Estimating the zero-plane displacement for tall vegetation using a mass conservation method. *Boundary-Layer Meteorology* **26**(2), 115-125.
- Moon, S.-K., S.-H. Park, J. Hong, and J. Kim, 2005: Spatial Characteristics of Gwangneung Forest Site Based on High Resolution Satellite Images and DEM. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(1), 115-123.
- Raupach, M. R. 1994: Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-Layer Meteorology* **71**, 211-216.
- Shaw, R. H., and A. R. Pereira, 1982: Aerodynamic Roughness of a Plant Canopy - a Numerical Experiment. *Agricultural Meteorology* **26**, 51-65.
- Sozzi, R., M. Favaron, and T. Georgiadis, 1998: Method for Estimation of Surface Roughness and Similarity Function of Wind Speed Vertical Profile. *Journal of Applied Meteorology* **37**(5), 461-469.
- Stull, R. B. 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 262-263 pp.
- Takagi, K., A. Miyata, Y. Harazono, N. Ota, M. Komine, and M. Yoshimoto, 2003: An alternative approach to determining zero-plane displacement, and its application to a lotus paddy field. *Agricultural and Forest Meteorology* **115**(3-4), 173-181.
- Tillman, J. E., 1972: The indirect determination of stability, heat and momentum fluxes in the atmospheric boundary layer from simple scalar variables during dry unstable conditions. *Journal of Applied Meteorology* **11**(5), 783-792.
- Wiernga, J., 1993: Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorology* **63**(4), 323-363.
- Wyngaard, J. C., O. R. Cote, and Y. Izumi, 1971: Local free convection, similarity, and the budgets of shear stress and heat flux. *Journal of the Atmospheric Sciences* **28**(7), 1171-1182.

부록 A. Rotach 방법을 위한 VBA 코드

```

Sub Rotach_VBA()
'Description =====
'builder: Jaeill Yoo(jiyoo@yonsei.ac.kr)
'VBA for MS Excel 2003.
'the last update:2009.10. 9
'Before run this code, data should be in active worksheet.
'Data format
'
'      A      B      C      D      E      F
'1  Phi_obs    L      d      RMS    count
'2  1.33      -55.21      0.00    0.2236    2
'3  1.22      -71.78      0.01    0.2235    2
'4  ...      ...      ...      ...      ...
'=====

'Declare the variables=====
Dim aa, bb, cc, dd
Dim d_min, d_max, d_interval
Dim canopy_H, measure_H
Dim phi_obs, phi_calc_R
Dim Stability
Dim temp_R, count_R, RMS_R, RMS_min_R, Row_No, dd_min_R
Dim Neutral
'=====

'Constants=====
canopy_H = 23      'canopy height(m)
measure_H = 40     'measurement height(m)
d_min = 0          'minimum of d
d_max = 23         'maximum of d
d_interval = 0.01  'interval for estimates
Neutral = 0
'=====

Row_No = 0
aa = 2
'labe of result table.=====

```

부록 A. continued

```

ActiveSheet.Cells(Row_No + 1, 4) = "d"
ActiveSheet.Cells(Row_No + 1, 5) = "RMS"
ActiveSheet.Cells(Row_No + 1, 6) = "count"
'=====

For dd = d_min To d_max Step d_interval
    temp_R = 0
    count_R = 0
    For bb = 2 To 10000
        'exit the loop at the end of data
        If IsEmpty(ActiveSheet.Cells(bb, 1)) Then Exit For
        'read the data from the active worksheet
        phi_obs = ActiveSheet.Cells(bb, 1)
        L = ActiveSheet.Cells(bb, 2)

        'calculating phi
        If L = 0 Then
            Stability = 99999          'cannot calculate (Z-d)/L
        Else
            Stability = (measure_H - dd) / L
            phi_calc_R = phi_R(Stability, Neutral)
            If (phi_obs < 3) And (Stability <= 0 And Stability >= -10) Then
                If Not (phi_calc_R = 99999) Then
                    temp_R = temp_R + (phi_obs - phi_calc_R) ^ 2
                    count_R = count_R + 1
                End If
            End If
        End If
    Next bb

    'calculating root mean square
    If count_R = 0 Then
        RMS_R = 99999
    Else
        RMS_R = Sqr(temp_R / count_R)
    End If

```

부록 A. continued

```
'Determining the minimum RMS
```

```
If Row_No = 1 Then
```

```
    RMS_min_R = RMS_R
```

```
    dd_min_R = dd
```

```
Else
```

```
    If RMS_R < RMS_min_R And RMS_R <> 99999 Then
```

```
        RMS_min_R = RMS_R
```

```
        dd_min_R = dd
```

```
    End If
```

```
End If
```

```
'print the result
```

```
ActiveSheet.Cells(Row_No + 2, 4) = dd
```

```
ActiveSheet.Cells(Row_No + 2, 5) = RMS_R
```

```
ActiveSheet.Cells(Row_No + 2, 6) = count_R
```

```
Row_No = Row_No + 1
```

```
Next dd
```

```
'Result message
```

```
MsgBox ("It's done!!" + Chr(13) + "RMS_min(R) is " + Format(RMS_min_R) + " at " + _
```

```
    Format(dd_min_R) + "m" + Chr(13) + "RMS_min(K) is " + _
```

```
    Format(RMS_min_K) + " at " + Format(dd_min_K) + "m")
```

```
End Sub
```

```
Function phi_R(Stability, Neutral)
```

```
Dim c1, c2, c3
```

```
c1 = 0.95          'Wyngaard et al, 1971
```

```
c3 = -2.5          'Beljaars et al., 1983
```

```
c2 = -(c1 / c3) ^ 3      'Tilman, 1972
```

```
If Stability = 99999 Then
```

```
    phi_R = 99999
```

```
Else
```

```
    If Stability <= Neutral Then
```

```
        phi_R = c1 * (c2 - Stability) ^ (-1 / 3)
```

```
    Else
```

```
        phi_R = 99999
```

부록 A. continued

End If

End If

End Function

부록 B. Martano 방법을 위한 VBA 코드

```

Sub Martano_VBA()

'Description =====
'builder: Jaeill Yoo(jiyoo@yonsei.ac.kr)
'VBA for MS Excel 2003.
'the last update : 2009.10. 9
'Before run this code, data should be in active worksheet.
'Data format
'
'      A          B          C          D          E          F          G
'      u*          U          L          WindDir      Wind Direction  Frequency  d
'1      0.149      0.661      120          288
'2      0.133      0.568      -198         284
'3      0.141      0.952      -54          281
'4      ...        ...        ...          ...

'=====

Dim aa, bb, cc, dd, ii, jj, Row_No
Dim Data_U(), Data_u_star(), Data_L(), Data()
Dim RN, Max_iteration
Dim a1, a2, a3, stability
Dim SS, yy(), YY_med
Dim temp, count, temp_sq, Std_SS, Ave_SS
Dim Measure_H, ZeroPlane, Roughness, Canopy_H, Interval, Roughness_Prev
Dim Std_SS_Min, ZeroPlane_Est, Roughness_Est
Dim Karman
Dim WindDir, WindDir_Interval, Result_Row
Dim Error_Flag, Result_Row_d, WindDir_temp, RoughP

'Parameters=====

Max_iteration = 100          'maximum Number of iteration
Measure_H = 40               'measurement height(m )
Karman = 0.4                 'von Karman constant
Canopy_H = 23                'canopy height(m)
Interval = 0.01              'd interval(m)

```

부록 B. continued

```

WindDir_Interval = 30          'wind direction interval
Result_Row = 1
a1 = 16                       'Initial value for Psi: Sozzi et al, 1998
a2 = 17                       'Initial value for Psi: Sozzi et al, 1998
a3 = 0.29                     'Initial value for Psi: Sozzi et al, 1998
'=====

For WindDir = 330 To 339 Step WindDir_Interval
    Result_Row_d = 1

    'collecting data according to wind direction and reading the data
    RN = 0
    For aa = 1 To 10000
        WindDir_temp = ActiveSheet.Cells(aa + 2, 4)
        If IsEmpty(WindDir_temp) Then Exit For
        If WindDir_temp >= WindDir And WindDir_temp < WindDir + WindDir_Interval Then
            RN = RN + 1
        End If
    Next aa
    ReDim yy(RN)
    ReDim Data(3, RN)

    bb = 0
    For aa = 1 To 10000
        WindDir_temp = ActiveSheet.Cells(aa + 2, 4)
        If IsEmpty(WindDir_temp) Then Exit For
        If WindDir_temp >= WindDir And WindDir_temp < WindDir + WindDir_Interval Then
            bb = bb + 1
            Data(1, bb) = ActiveSheet.Cells(aa + 2, 1)      'u*
            Data(2, bb) = ActiveSheet.Cells(aa + 2, 2)      'U
            Data(3, bb) = ActiveSheet.Cells(aa + 2, 3)      'L
        End If
    Next aa

    Roughness_Prev = 0
    Row_No = 3

```

부록 B. continued

```

'Estimation of zeroplane displacement=====
For ZeroPlane = 0 To Canopy_H Step Interval
    'Temporary code
    ActiveSheet.Cells(1, 1) = WindDir
    ActiveSheet.Cells(1, 2) = ZeroPlane
    ActiveSheet.Cells(1, 3) = Roughness
    ActiveSheet.Cells(1, 4) = count

    For bb = 1 To Max_iteration
        'temporary variables
        temp = 0
        temp_sq = 0
        temp_exp = 0
        count = 0
        SS = 0
        Ave_SS = 0
        Std_SS = 0

        'Calculation Std of SS
        For aa = 1 To RN
            stability = (Measure_H - ZeroPlane) / Data(3, aa)    '(z-d)/L
            If bb = 1 Then
                RoughP = 0.1 * Canopy_H / Data(3, aa)    'initial z0=0.1H
            Else
                RoughP = Roughness / Data(3, aa)    'z0/L
            End If

            If stability > -2 And stability < 10 And _
                (Data(3, aa) < -25 Or Data(3, aa) > 5) Then
                SS = Karman * Data(2, aa) / Data(1, aa) + _
                    Psi(stability, a1, a2, a3) - Psi(RoughP, a1, a2, a3)
                temp = temp + SS
                temp_sq = temp_sq + SS * SS
                count = count + 1
            End If
        Next aa
    
```


부록 B. continued

```

If count = 0 Then
    Std_SS = -99999
    GoTo Exit_Line_1
Else
    Ave_SS = temp / count
    Std_SS = Sqr(temp_sq / (count - 1) - Ave_SS * Ave_SS)
    Roughness_Prev = Roughness
    Roughness = (Measure_H - ZeroPlane) * Exp(-Ave_SS)
End If

If Abs(Roughness_Prev - Roughness) < 0.001 And bb > 2 Then
    GoTo Exit_Line_1
End If
Next bb

```

Exit_Line_1:

```

'determining estimates of roughness and zero plane displacement for the next iteration
If ZeroPlane = 0 Then
    Std_SS_Min = Std_SS
    ZeroPlane_Est = 0
Elseif Std_SS_Min > Std_SS Then
    Std_SS_Min = Std_SS
    ZeroPlane_Est = ZeroPlane
    Roughness_Est = Roughness
End If

Next ZeroPlane

```

Exit_Line_2:

```

If Result_Row = 1 Then
    ActiveSheet.Cells(Result_Row, 5) = "Wind Direction"
    ActiveSheet.Cells(Result_Row, 6) = "Frequency"
    ActiveSheet.Cells(Result_Row, 7) = "d"
    ActiveSheet.Cells(Result_Row, 8) = "z0"
    Result_Row = Result_Row + 1
End If

```

부록 B. continued

```

ActiveSheet.Cells(Result_Row, 5) = _
    Format(WindDir) + "-" + Format(WindDir + WindDir_Interval)
ActiveSheet.Cells(Result_Row, 6) = RN
ActiveSheet.Cells(Result_Row, 7) = ZeroPlane_Est
ActiveSheet.Cells(Result_Row, 8) = Roughness_Est
Result_Row = Result_Row + 1
Next WindDir
MsgBox ("It's done")
End Sub

'Psi Function
Function Psi(stability, a1, a2, a3)
    Dim xx
    Dim pi
    pi = 3.141592654
    On Error GoTo ErrorHandler2    'error handler

    If stability < 0 Then
        xx = (1 - a1 * stability) ^ (1 / 4)
        Psi = Log((1 + xx ^ 2) / 2 * ((1 + xx) / 2) ^ 2) - 2 * Atn(xx) + pi / 2
    ElseIf stability > 0 Then
        Psi = -a2 * (1 - Exp(-a3 * stability))
    Else
        Psi = 0
    End If
    Exit Function

ErrorHandler2:
    Psi = 99999
    Exit Function
End Function

```