

지표면의 비균질성이 지표층의 난류수송에 미치는 영향

홍선옥¹⁾ · 이영희^{1),*} · 임윤진²⁾

¹⁾경북대학교 천문대기과학과, ²⁾국립기상연구소 응용기상연구과

(접수일: 2014년 3월 12일, 게재확정일: 2014년 6월 12일)

Influence of Surface Heterogeneity on Turbulent Transfer in the Surface Layer

Seon-Ok Hong¹⁾, Young-Hee Lee^{1),*}, and Yoon-Jin Lim²⁾

¹⁾Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea

²⁾Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Jeju, Korea

(Manuscript received 12 March 2014; accepted 12 June 2014)

Abstract Eddy covariance data have been analyzed to investigate the influence of surface heterogeneity on turbulent transfer over farmland and industrial sites near Nakdong river, Korea, where both large and small scale heterogeneities co-exist. For this purpose, basic turbulent statistics, quadrant analysis and multi-resolution decomposition have been analyzed during the daytime. Basic turbulent statistics were compared with typical turbulent statistics in the surface layer. Such comparisons were in close agreement for momentum and heat at both sites but not for water vapor at industrial site. The correlation coefficient between water vapor and vertical velocity (r_{wq}) is relatively low and skewness of water vapor (sk_q) is very low at industrial site, possibly due to limited water source. For heat at both sites and water vapor at farmland, the quadrant analysis show similar behavior to that over homogeneous site but for water vapor at industrial site, the presence of river and limited water source at industrial site seems to influence on water vapor transfer by coherent eddy motion by increasing sweep contribution and decreasing ejection contribution. Multi-resolution decomposition analysis shows that large scale heterogeneity leads to low r_{Tq} at large averaging time regardless of season at both sites and there are seasonal changes of r_{Tq} in mid-averaging times at industrial site, possibly due to seasonal change of trees and grasses near the site.

Key words: Nakdong river, surface heterogeneity, turbulent transfer

1. 서 론

지표층에서 관측된 대기난류에 관한 초기 연구는 이상적인 지표면 상에서 많이 이루어져 왔다(Monin and Obukhov, 1954; Dyer, 1974; Ohtaki, 1985; Högström, 1988). 이상적인 지표면이란 비교적 수평적으로 평평하고 균질하며, 광범위한 지면으로 복사에 불투명한

지표면을 말한다(Arya, 2001). 그러나 실제 지표면은 지형이 존재하고 수평적으로 비균질하다. 따라서 실제 지표면상의 난류의 특성을 이해하기 위해서는 비균질한 지표면상의 난류의 관측과 분석이 필요하다. 비균질한 지표면 상의 난류에 대한 연구로는 지표면의 비균질성이 상사관계와 플럭스의 수송효율에 미치는 영향을 다룬 연구들이 있다(Belijars *et al.*, 1983; Roth and Oke, 1995; Katul *et al.*, 1995; Moriwaki and Kanda, 2006; Williams *et al.*, 2007). 도시지역에서 관측된 난류 자료는 불안정한 조건에서 수증기 플럭스의 수송 효율이 열 플럭스의 수송 효율보다 작게 나타나며, 그 원인으로 도시지역의 비균질한 수증기

*Corresponding Author: Young-Hee Lee, Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea.
Phone : +82-53-950-7353, Fax : +82-53-950-6359
E-mail : young@knu.ac.kr

공급원이 제시되었으며 이외에 구름에 의해 야기되는 지면복사의 비균질, 상층의 건조 대기의 유입 등이 제시되었다(Roth and Oke, 1995; Moriwaki and Kanda, 2006).

지표면의 비균질성은 다양한 규모로 나타난다. 또한 이런 비균질성은 계절에 따라서도 변한다. 강유역의 관측지점은 강이라는 큰 규모의 수증기 공급원의 비균질성이 존재하며, 각 지면의 특성에 따라 작은 규모의 비균질성도 존재한다. 공단지의 경우 대부분 지면으로의 물의 침투가 가능하지 않은 포장된 지표면으로 구성되어 있으므로 증발산을 통한 수증기 공급원이 제한된다. 농경지의 경우 논과 과수원 등의 조각(patch) 형태로 지표면이 구성되어 있으므로 국지적으로 비균질성이 존재하고 농작물의 재배시기에 따라 수증기 공급원의 비균질성이 계절별로 변화할 수 있다. Williams *et al.* (2007)은 혼합림에서 잎이 존재하는 시기와 잎이 떨어지는 시기로 나누어 비균질성을 유발시키는 시간규모를 다중 분해 분석을 통해 조사하였는데, 그 결과 잎이 떨어지는 시기에 침엽수림은 수증기의 공급원이지만 활엽수림은 더 이상 수증기의 공급원이 아니므로 이는 혼합림에서 수증기의 비균질성을 증가시키게 되고 결과적으로 수증기와 열의 상관계수를 감소시킴을 보였다.

본 연구에서는 강 유역이라는 큰 규모의 비균질과 작은 규모의 비균질이 공존하는 농경지와 공단지에서 관측된 에디 공분산 자료를 이용하여 이러한 비균질성이 연직 난류 수송에 미치는 영향을 기본 난류 통계 특성분석, 사분원 분석 그리고 다중 분해 분석을 통해서 조사하고자 한다.

2. 연구자료

본 연구에 사용된 자료의 관측지점은 낙동강 유역의 2 개 지점(N3, N7)으로 N3 지점은 농경지에 위치해 있고, N7 지점은 공단지역에 위치해 있다(Fig. 1). 두 지점은 각각 낙동강의 서안과 동안에 위치해 있으며, 관측지점과 강과의 거리는 N3 지점이 약 700 m 정도이고 N7 지점이 약 1200 m 정도이다. N3 지점은 농경지로 논과 연 재배지로 이루어져있고 관측지점 주변에는 큰 장애물이 없고 평지에 가까운 지형이다. N7 지점은 관측 장비가 2층 건물 위에 설치되어 있고 주변에는 2~3층 높이의 건물과 아스팔트, 가로수



Fig. 1. The satellite image of study sites from the NAVER (map.naver.com). Upper panel is N3 site and lower panel is N7 site. White arrow in the center indicates the position of mast in each site.

등으로 이루어져있다. 관측지점에 대한 자세한 위치를 Table 1에 제시하였다. 관측고도(z)는 N3 지점은 8 m이고 N7 지점은 25 m인데 변위높이(d)를 10 m로 고려하여 분석높이는 15 m로 사용하였다. 두 지점의 거칠기 길이는 N3와 N7 지점의 관측자료 중 안정도가 중립인 조건의 풍속과 운동량 플럭스를 이용하여 바람의 대수연직분포법칙을 적용하여 계산하였다. 산출된 거칠기 길이는 N3 지점이 0.1 m이고, N7 지점이 0.64 m로 나타났다.

관측에 사용된 에디 공분산 시스템은 10 Hz로 관측이 가능한 고속 반응 시스템이며 u , v , w 성분과 온

Table 1. Summary of the study sites.

Site	Latitude/Longitude	Measurement height ($z-d$)	Measurement period
N3	35° 49' 51" N/128° 27' 34" E	8 m	2010.10.01~2012.04.25
N7	35° 50' 5" N/128° 29' 12" E	15 m	

Table 2. Criteria for quality control of raw data (Lee *et al.*, 2013).

Flag 1	Percentage of missing data N (%)	Change (δ) in 30 min	σ_x	Skewness (S)	Kurtosis (K)
A	$N = 0$	$\delta U \leq 1 \text{ m s}^{-1}$ $\delta T \leq 1 \text{ K}$ $\delta q \leq 0.5 \text{ g m}^{-3}$	$s_T \leq 1 \text{ K}$ $s_q \leq 1 \text{ g m}^{-3}$	$-1 < S \leq 1$	$2 < K \leq 5$
B	$0 < N \leq 1$	$1 < \delta U \leq 5 \text{ m s}^{-1}$ $1 < \delta T \leq 3 \text{ K}$ $0.5 < \delta q \leq 2 \text{ g m}^{-3}$	$s_T \leq 1 \text{ K}$ $s_q \leq 1 \text{ g m}^{-3}$	$-2 < S \leq -1$ or $1 < S \leq 2$	$1.5 < K \leq 2$ or $5 < K \leq 8$
C	$N > 1$	$\delta U > 5 \text{ m s}^{-1}$ $\delta T > 3 \text{ K}$ $\delta q > 2 \text{ g m}^{-3}$	$s_T > 1 \text{ K}$ $s_q > 1 \text{ g m}^{-3}$	$S \leq -2$ or $S > 2$	$K \leq 1.5$ or $K > 8$

도 T를 측정하는 3차원 풍향 풍속계(CSAT3, Cambell Scientific Inc., USA)와 수증기(q)와 이산화탄소(CO_2)의 밀도를 측정하는 Open-path 가스 분석기(EC150, Cambell Scientific Inc., USA)로 이루어져 있다. 두 관측지점에서는 동일한 관측기기가 사용되었다.

에디 공분산 시스템으로 관측된 자료는 기계적인 문제로 인해 비현실적인 값을 표출하거나 비정상성이 커 난류분석에 적절하지 않은 자료를 포함하고 있기 때문에 품질관리가 필요하다. 품질관리과정은 원시자료에 대한 품질관리, 이중회전 좌표변환, WPL 보정 (Webb *et al.*, 1980), 그리고 플릭스 자료에 대한 품질 관리로 구성되어 있다. 선행연구인 Lee *et al.* (2013)에서 제시한 품질관리방법을 관측지의 특성에 맞춰 수정하여 이용하였다. 원시자료에 대한 품질 관리에서 원시자료는 A, B, C 세 등급으로 분류되고 각 등급에 대한 설명은 Table 2에 제시하였다. 플릭스 자료에 대한 품질 관리는 정상성(stationarity) 검사와 잘 발달된 난류 검사로 구성되어 있다. 정상성 검사에서는 다음의 비정상성지수 RN_1 이 사용되었다.

$$RN_1 = \frac{\overline{c'w'} - \overline{c'w'_0}}{\overline{c'w'_0}}, \quad (1)$$

여기서 $\overline{c'w'}$ 은 5분 평균 플릭스를 의미하고, $\overline{c'w'_0}$ 는 30분 평균 플릭스를 의미한다. 잘 발달된 난류 여부에 대한 평가에서는 Foken and Wichura (1996)가 제안한 방법에 따라 지표층에서 알려진 상사관계를 만족하는지를 조사한다. 본 연구에서 사용한 변수는 w 의 표준편차를 마찰속도 u_* 로 정규화시킨 σ_w/u_* 이다. 해당변수의 이론값과 관측값의 상대오차는 ITC 로 다음과 같이 정의된다.

$$ITC = \left| \frac{\left(\frac{\sigma_w}{u_*}\right)_m - \left(\frac{\sigma_w}{u_*}\right)_o}{\left(\frac{\sigma_w}{u_*}\right)_m} \right|, \quad (2)$$

Table 3. Classification of the flux data quality by the steady state and well developed turbulence (Lee *et al.*, 2013).

Flag 2	RN_1 (%)	ITC (%)
1	0~30	0~30
2	0~30	30~75
3	30~75 0~75	0~75 75~250
4	others	

Table 4. Conditions for selection of 30-min files.

Measure	Condition
Flag 1 for all u, w, T, q	A
Flag 2 for $u'w', w'T', w'q'$	1
z/L	$-2 < z/L < 0$
u_* (m s^{-1})	> 0.01
LE (W m^{-2})	$ LE > 10$
H (W m^{-2})	$ H > 10$

여기서 σ_w 는 w 의 표준편차이고, u_* 는 마찰속도이다. 그리고 $(\sigma_w/u_*)_m$ 은 이론 값이며, $(\sigma_w/u_*)_o$ 는 관측 값에 해당한다.

비정상성지수와 ITC 의 값에 따라 개별 플릭스들은 네 등급으로 나누어진다(Table 3). 자세한 품질 검사 방법은 Lee *et al.* (2013)에 기술되어 있다.

본 연구에 사용된 자료는 N3 지점과 N7 지점에서 2010년 10월 1일부터 2012년 4월 25일까지 관측되었고 분석은 주간자료 중 Table 4에 제시된 조건을 만족하는 30분 자료들을 선택하여 수행하였다. 여기서 주간은 1000 LST부터 1600 LST까지로 정의하였다. 주간자료만 분석에 사용한 이유는 야간에는 난류 강도가 약하여 품질 관리 후 분석에 사용할 수 있는 자료 수가 적었고 또한 야간에는 플릭스의 발차국 영역이 상당히 넓게 나타나 난류 특성을 관측지 주변의 지면

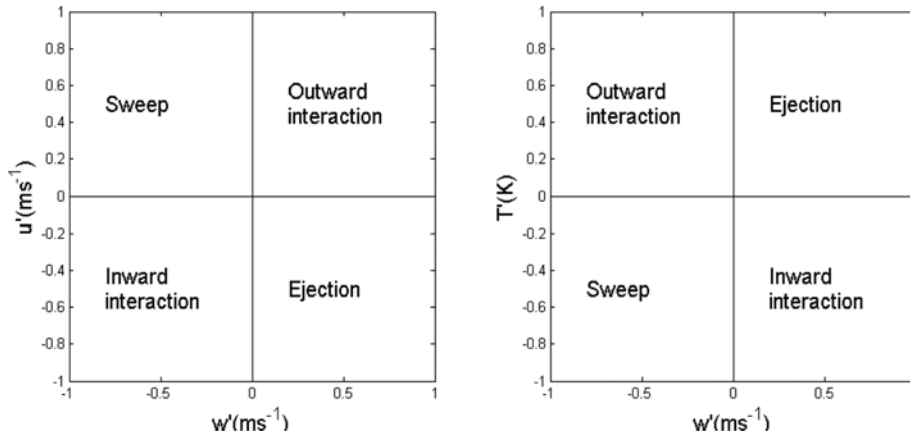


Fig. 2. Definitions of quadrants for momentum (negative) and heat flux (positive).

특성과 연관시켜 해석하기 어려운 측면이 있기 때문이다. 분석에 사용된 30분 단위의 자료의 수는 N3 지점이 1925개, N7 지점이 1719개이다.

3. 분석방법

3.1 사분원 분석

사분원 분석은 변수의 순간 연직 플럭스인 $w'c'$ 을 w' 의 부호와 c' 의 부호에 따라서 4가지 성분인 sweep, ejection, inward interaction, outward interaction 으로 분류하는 방법이다(Raupach, 1981). Sweep과 ejection의 방향은 평균 연직 플럭스의 방향과 일치하는 경우로 운동량 플럭스의 경우는 그 방향이 하향이고 양의 열 플럭스의 경우는 상향이다. Sweep과 ejection이 연직 플럭스의 주된 성분으로 본 분석에서는 sweep과 ejection의 상대적인 양을 비교하여 플럭스의 구조를 살펴보고자 한다. Figure 2는 운동량 플럭스와 느낌열 플럭스에 대한 사분원을 모식도로 나타낸 것이다.

정규화된 플럭스 기여도는 각 사분면에 대하여 다음과 같이 정의된다.

$$S(i) = \frac{\overline{w'c'_i}}{\overline{w'c'}}, \quad (3)$$

$$\overline{w'c'_i} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} w'c'_i I_i(t) dt, \quad (4)$$

여기서 $c = u, q, T$ 이며, t_p 는 평균에 사용되는 시간규모로 본 분석에서는 30분을 사용하였다. I_i 의 값은 순간 플럭스가 해당 사분원에 속할 때만 1의 값을 갖고 나머지 경우에는 0의 값을 갖는다.

$$I_i = \begin{cases} 1, & \text{if } w'c' \text{ is quadrant } i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

한국기상학회 대기 제24권 3호 (2014)

그리고 각 사분원에 대한 시간의 기여도(fraction of time)는 각 사분원 i 에 대해서 다음과 같이 주어진다.

$$D_i = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} I_i(t) dt, \quad (6)$$

Sweep과 ejection의 상대적인 기여도는 난류 수송량과 시간기여도에 따라 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta S &= S_{ejection} - S_{sweep} \\ \Delta D &= D_{ejection} - D_{sweep} \end{aligned} \quad (7)$$

ΔS 가 양의 값을 가질 때 ejection에 의한 난류 수송은 sweep보다 크음을 의미하고 ΔD 가 양의 값을 가질 때 ejection이 일어나는 시간의 기여도가 sweep이 일어나는 시간의 기여도보다 크음을 의미한다.

3.2 다중 분해 분석

다중 분해 분석은 시간규모에 따른 통계값의 스펙트럼을 산출하는 분석방법이다. 시간규모에 따른 통계값의 스펙트럼은 시간의 길이를 달리하여 시계열의 평균을 구하고, 그 평균으로 자료의 섭동값을 계산하여 구한다. 이 방법은 Howell and Mahrt (1997)에 자세히 기술되어 있다. 분석 과정을 간단히 설명하면 다음과 같다.

2^M 개의 자료로 구성되어 있는 변수 w_i 와 ϕ_i 가 있을 때 다중분해 코스펙트럼을 계산하기 위해서는 평균을 구하는 데 쓰이는 시간 규모를 변화시켜가며 평균을 계산하여야 한다. 이때 평균하는 시간규모를 2^m 개로 설정하고, 이 시간규모에 해당하는 평균값을 다음과 같이 정의한다.

$$\overline{w}_j(2^m) = \frac{1}{2^m} \sum_{i=(j-1)2^m}^{j2^m-1} w_i, \quad \overline{\phi}_j(2^m) = \frac{1}{2^m} \sum_{i=(j-1)2^m}^{j2^m-1} \phi_i, \quad (8)$$

Table 5. Summary of basic turbulent statistics at two sites. The value in parentheses is standard deviation.

Sites	Stability	r_{wv}	r_{wT}	r_{wq}	sk_T	sk_q	sk_w	sk_u	s_w/u^*	s_v/u^*
N3	Neutral	-0.27 (0.05)	0.33 (0.08)	0.37 (0.05)	0.36 (0.28)	0.35 (0.28)	0.21 (0.13)	0.14 (0.21)	2.92 (0.42)	1.24 (0.10)
	Unstable	-0.22 (0.08)	0.44 (0.07)	0.44 (0.07)	0.55 (0.23)	0.53 (0.29)	0.31 (0.16)	0.11 (0.25)	3.25 (0.70)	1.39 (0.21)
N7	Neutral	-0.33 (0.06)	0.39 (0.07)	0.27 (0.09)	0.19 (0.29)	-0.08 (0.39)	0.19 (0.12)	0.10 (0.20)	2.37 (0.30)	1.24 (0.11)
	Unstable	-0.29 (0.09)	0.47 (0.07)	0.32 (0.10)	0.39 (0.25)	0.06 (0.43)	0.31 (0.17)	0.02 (0.25)	2.43 (0.49)	1.38 (0.22)

이 2^m 의 자료의 평균을 이용하여 레이놀즈 평균을 통해 구한 변수 ϕ 의 연직 플럭스는 다음과 같다.

$$\langle w'(2^m)\phi'(2^m) \rangle = \frac{1}{2^M} \sum_{m=1}^{2^M-1} [w_i - \bar{w}_j(2^m)][\phi_i - \bar{\phi}_j(2^m)], \quad (9)$$

여기서 괄호 < >는 전체 자료길이에 대한 평균을 의미한다.

2^M 개의 자료의 평균길이에 근거한 플럭스는 다음과 같다.

$$\langle w'(2^M)\phi'(2^M) \rangle = \sum_{m=1}^M \langle w'(2^m)\phi'(2^m) \rangle - \langle w'(2^{m-1})\phi'(2^{m-1}) \rangle, \quad (10)$$

위의 식은 다음과 같이 다시 쓰여 질 수 있다.

$$\langle w'(2^M)\phi'(2^M) \rangle = \sum_{m=1}^M \langle \Delta w(2^m)\Delta\phi(2^m) \rangle, \quad (11)$$

여기서 $\langle \Delta w(2^m)\Delta\phi(2^m) \rangle$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\langle \Delta w(2^m)\Delta\phi(2^m) \rangle = \frac{1}{2^{M-m}} \sum_{j=1}^{2^{M-m}} [w_{2j}(2^{m-1}) - \bar{w}_j(2^m)] \times [\bar{\phi}_{2j}(2^{m-1}) - \bar{\phi}_j(2^m)]. \quad (12)$$

같은 방식으로 변수 ϕ 의 분산에 대한 다중 분해 스펙트럼은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\langle \Delta\phi(2^m)\Delta\phi(2^m) \rangle = \frac{1}{2^{M-m}} \sum_{j=1}^{2^{M-m}} [\bar{\phi}_{2j}(2^{m-1}) - \bar{\phi}_j(2^m)]^2. \quad (13)$$

변수 ϕ 와 연직속도에 대한 상관계수의 다중 분해 스펙트럼은 플럭스와 분산의 정의로부터 아래와 같이 계산된다.

$$r_{w\phi}(2^m) = \frac{\langle \Delta w(2^m)\Delta\phi(2^m) \rangle}{\langle \Delta w(2^m) \rangle^{0.5} \langle \Delta\phi(2^m) \rangle^{0.5}}. \quad (14)$$

4. 결 과

4.1 기본 난류 통계 분석

두 지점에서 관측된 난류의 기본 특성을 분석하기 위하여 자료를 안정도에 따라 중립, 불안정으로 분류하여 기본 통계 값들을 계산하였다. 안정도는 지표층 안정도 매개변수인 z/L 을 사용하여 분류하였고 불안정한 경우는 z/L 이 -0.1 보다 작은 경우 그리고 중립인 경우는 z/L 이 -0.1 에서 0 사이로 정의하였다. Table 5에 기본 통계 분석 결과를 제시하였다.

u 와 w 의 상관계수 r_{wv} 는 중립조건일 때 N3 지점에서는 -0.27 로 나타났으며, N7 지점에서는 -0.33 으로 나타나 균질한 지표면상의 지표층에서 보고된 -0.35 (Kaimal and Finnigan, 1994)보다 다소 작지만 비슷한 값을 나타냄을 알 수 있다. N3 지점에서 운동량 상관 계수가 상대적으로 작게 나타나는 요인을 분석하기 위해서 무차원화된 속도 표준편차 값을 계산하였다. N7 지점의 결과와 비교하면 중립조건에서 무차원화된 w 의 표준편차 σ_w/u^* 는 두 지점에서 차이를 보이지 않으나 무차원화된 u 의 표준편차 σ_u/u^* 가 N3 지점에서 더 크게 나타난다(Table 5). σ_u/u^* 는 불안정한 경우 대기 경계층의 난류의 영향을 받아 지표층에서 z/L 의 관계식을 따르지 않으나 중립조건에서 평평한 지표면상에서는 평균 2.4의 값이 보고되었다(Panofsky and Dutton, 1984). 본 분석에서 나타난 값은 N7 지점에서는 중립조건에서 2.4의 값으로 선행연구와 차이가 없으나 N3 지점에서는 중립조건에서 2.9로 큰 값으로 나타났고 불안정조건에서는 더 큰 값을 보인다. N3 지점에서 σ_u/u^* 의 값이 공단지인 N7보다 더 크게 나타난 것은 두 가지 요인을 생각할 수 있다. 한 가지는 지표면 거칠기 길이의 변화이다. 타워 주변은 작은 규모의 키가 작은 과수원과 비닐하우스들이 설치되어 있는 논으로 구성되어 있는 반면 타워가 설치된 곳은

키가 작은 초지들로 되어 있어 바람이 타워로 불어오면서 거칠기 길이가 상대적으로 큰 값으로부터 작은 값으로 변화하게 된다. 거칠기 길이가 변화하는 경우 플릭스는 바뀐 지표면에 따라 빠르게 변하는 반면 분산의 변화는 좀 더 느리게 나타난다(Panofsky and Dutton, 1984). 그러므로 거친 지표면에서 평평한 지표면으로 이동할 때 σ_w/u_* 은 증가한다. 또 다른 요인은 N7 지점은 건물 등의 거친 거칠기 성분으로 기계적 난류가 주 역할을 하는 반면 N3 지점은 거칠기 길이가 작은 농경지로 혼합층에서 형성되는 큰 에디의 영향을 직접적으로 받을 수 있다. 혼합층의 큰 에디는 운동량 플릭스에는 기여하지 않지만 속도 분산에 영향을 미쳐 σ_w/u_* 의 증가를 초래할 수 있다(Hogstrom, 1990). 불안정한 조건의 농경지 상의 지표층에서 비활성 에디(inactive eddy)의 영향은 Zhang *et al.* (2010)에서도 보고되었다.

느낌열 플릭스의 수송 효율을 나타내는 w 와 T 의 상관관계수 r_{wT} 는 지표층에서 중립일 때 0, 불안정할 때 0.5로 나타난다(Kaimal and Finnigan, 1994). 본 연구에서는 z/L 이 0보다 작은 경우들만 포함되어 있으므로 중립 조건에서도 r_{wT} 의 값이 상대적으로 높게 나타났다. 불안정한 조건에서 r_{wT} 는 두 지점 모두 0.5에 가까운 값을 보인다. 습열 플릭스의 수송 효율을 나타내는 r_{wq} 는 불안정도가 높아질수록 증가하며, 이는 열의 수송효율과 유사하다. r_{wT} 와 달리 r_{wq} 값은 N7 지점에서 N3 지점보다 0.1 이상 작게 나타나며, 이는 N7 지점의 지표면에 수증기공급원이 제한적인 데 기인한다. 수평 속도 왜도인 sk_u 는 두 지점 모두 0.1 정도의 작은 값을 보이며 연직 속도 왜도인 sk_w 는 u 의 왜도보다 더 큰 양의 값을 가지며 불안정할 때가 중립일 때 보다 더 큰 값을 보인다. sk_u 와 sk_w 는 지표층에서 0에 가까우며, 캐노피 내부에서는 큰 운동량의 간헐적 하강운동으로 u 의 왜도 sk_u 가 양의 값을 가지며 w 의 왜도인 sk_w 는 음의 값을 가진다(Raupach *et al.*, 1996). 본 관측지점의 속도왜도는 지표층의 특징을 반영하고 있고 sk_u 가 양의 값을 가지는 것은 상승하는 열기포에 의한 간헐적인 강한 상승운동에 기인한 것으로 사료된다. 온도의 왜도인 sk_T 의 값은 불안정할 때 양의 값을 갖는데, 이유는 지표층에서 열기포가 상승하면 열기포는 주변보다 높은 온도 값을 갖기 때문이다. 수증기의 왜도인 sk_q 의 결과를 보면 불안정일 때 N7 지점의 값이 0.06으로 N3 지점의 0.53보다 값이 현저히 작은 것을 볼 수 있다. 이는 N3 지점과 달리 N7 지점에서는 지면의 물 공급원이 적어 상승하는 공기가 큰 수증기량을 갖지 않고 있음을 의미한다. 정리하면 균질한 지표면 상에서 관측된 자료와 비교해서 운동량과 온도와 관련된 통계값들은 유사한 결과를 보이지만 농경지의 경우 r_{wq} 의 크기가 상

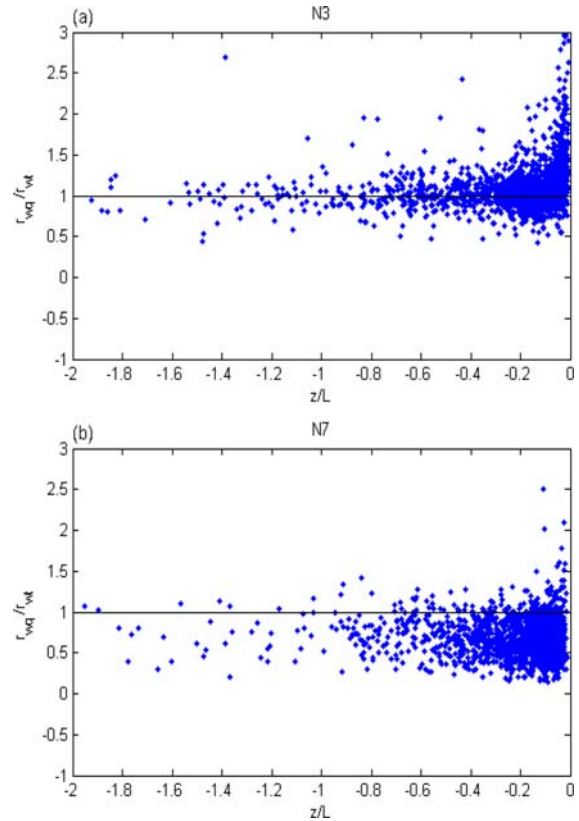


Fig. 3. Efficiencies for water vapour relative to heat transfer in terms of z/L at (a) N3 and (b) N7 sites during the daytime. The solid line indicates $r_{wq}/r_{wT} = 1$.

대적으로 작게 나타났고 공단지의 경우 공단지 지표면의 수증기 공급원의 제한으로 인해 sk_q 와 r_{wq} 가 작게 나타났다. 강 유역의 큰 규모의 비균질에 기인한 공통적으로 나타나는 난류특성은 뚜렷하지 않고 해당 지표면의 국지적 비균질 요인이 조사된 난류 통계값에 주로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4.2 열과 수증기의 난류 수송 효율 분석

지면의 특성이 다른 공단지와 농경지에서의 열과 수증기의 수송 효율의 차이를 분석하기 위해, 수증기와 열의 연직 수송 효율의 상대적인 비인 r_{wq}/r_{wT} 를 안정도 그리고 열과 수증기의 상관관계수 r_{Tq} 의 함수로 분석하였다. Figure 3은 주간의 r_{wq}/r_{wT} 와 안정도의 관계를 산포도로 나타낸 것이다. 안정도에 따른 수증기와 열의 연직 전달 효율의 비(r_{wq}/r_{wT})는 N3 지점에서는 중립조건에서 최댓값을 보이고 불안정도가 증가하면서 빠르게 1로 접근한다. 반면 N7 지점에서는 r_{wq}/r_{wT} 는 안정도에 관계없이 평균 0.7의 값을 보인다. 모닌 오브코브 상사관계가 열과 수증기 모두에 대하여 같

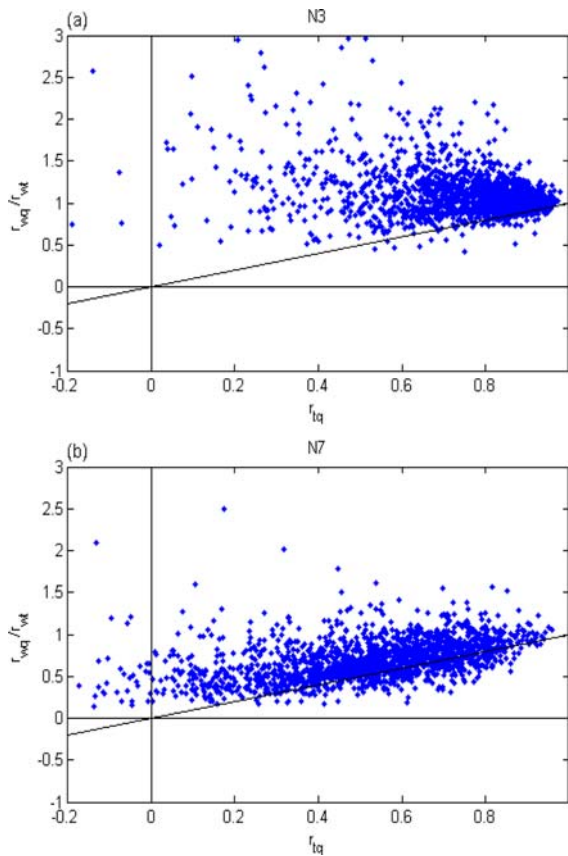


Fig. 4. Efficiencies for water vapor relative to heat transfer in terms of r_{Tq} at (a) N3 and (b) N7 sites during the daytime. The solid line indicates $r_{wq}/r_{wT} = r_{Tq}$.

게 적용된다면 r_{wq}/r_{wT} 는 안정도에 관계없이 1의 값을 가질 것이다. N3 지점에서 중립조건에 r_{wq}/r_{wT} 가 1보다 큰 값을 가지는 것은 수증기의 수송효율이 열의 수송효율보다 크다는 것을 의미하고 이러한 특성은 Katul *et al.* (1995)에서도 보고되었다. 이는 중립 조건에서 r_{wT} 는 0에 가까운 값을 갖지만 지표면에 지속적인 수증기의 공급원이 있는 경우 r_{wq} 는 0 이상의 값을 갖기 때문이다. N7 지점에서는 수증기의 수송효율이 열의 수송효율보다 작으며 이는 도시근교지역에서 관측한 Moriwaki and Kanda (2005)와 Roth and Oke (1995)의 결과와 일치한다. Moriwaki and Kanda (2005)는 도시지역에서 수증기의 연직 수송 효율이 낮게 나타나는 것은 지표면의 수증기 공급원이 상당히 적기 때문이라고 기술하였는데 이러한 이유는 공단지에서도 마찬가지로 적용된다.

Figure 4는 두 지점의 열 수송에 대한 수증기 수송의 효율 비(r_{wq}/r_{wT})와 r_{Tq} 의 관계를 나타낸 것이다.

Figure 4에서 실선은 $r_{wq}/r_{wT} = r_{Tq}$ 을 나타낸다. Katul *et al.* (1995)은 두 변수들이 선형관계를 만족하고 변수들의 표준편차와 상관계수가 0이 아닌 경우 $r_{wq}/r_{wT} = r_{Tq}$ 가 성립함을 보였다. N3 지점의 경우 r_{Tq} 가 작으면서 r_{wq}/r_{wT} 는 1보다 큰 자료들이 나타나는데 이 경우들은 지표면이 수증기 공급원으로 작용하면서 안정도는 중립인 경우들로 주로 여름철 중립조건 자료들이 많이 해당된다. 반면 N7 지점에서는 r_{wq}/r_{wT} 가 r_{Tq} 가 증가할수록 증가하는 특징을 보이며 이는 도시 지역에서 실행된 선행연구인 Roth and Oke (1995)와 Moriwaki and Kanda (2005)의 결과와 유사하다. 공단지(N7)에서 r_{wq}/r_{wT} 가 r_{Tq} 가 증가할수록 증가하는 특징을 보이는 것은 수증기의 공급원이 매우 약하므로 중립 조건에서 수증기의 수송 효율이 열의 수송 효율보다 증가하는 특성을 보이지 않고 불안정한 경우 열의 수송효율이 증가하지만 제한된 수증기 공급원으로 인해 수증기의 수송효율은 증가하지 않기 때문이다. 농경지에 비해서 공단지에서 낮은 r_{Tq} 값들이 많이 존재한다. 공단지 지역의 낮은 r_{Tq} 의 요인으로는 열과 수증기 공급원의 불일치와 구름에 의한 지면 도달 복사의 비균질 등을 제시할 수 있다. 조각 구름(Patch cloud)이 있는 경우 햇빛이 비치는 곳에서는 T 와 q 가 양의 상관관, 그늘진 곳에서는 T 와 q 가 음의 상관관 보여 T 와 q 의 상관계수인 r_{Tq} 가 낮아진다(Roth and Oke, 1995). 구름에 의한 복사 비균질 효과는 도시나 공단지에 한정된 것은 아니지만 도시나 공단지지역의 경우 구름뿐만 아니라 건물들에 의해서도 그들이 생성되어질 수 있으므로 지면 복사의 비균질을 증가시킬 수 있다.

4.3 사분원 분석

운동량과 열, 수증기 플럭스의 수송의 특성을 분석하기 위해 사분원 분석을 수행하였다. 조직화된 에디 운동(coherent eddy motion)은 하강운동인 sweep과 상승운동인 ejection으로 구성되어 있고, 이들이 지표면과 대기간의 열과 운동량 그리고 물질 교환의 대부분을 설명하고 있는 것으로 알려져 있다(Katul *et al.*, 1997a, b). Figure 5는 농경지(N3)와 공단지(N7)에 대하여 운동량과 열, 수증기 플럭스에 대한 ΔS 를 안정도의 함수로 나타낸 것이다. 농경지인 N3 지점에서 수증기와 열의 경우 불안정도가 높아질수록 ejection에 의한 플럭스의 기여도(ΔS)가 뚜렷이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 불안정해질수록 열기포의 생성이 활발해 지고, 이 열기포에 의한 상승운동으로 열과 수증기가 연직 전달된다는 것을 의미한다. 이는 균질한 자연지표면에서 관측된 ΔS 와 안정도의 관계와 유사하다(Li and Bou-Zeid, 2011). 운동량 플럭스의 경우 ΔS 가 불안정해질수록 ejection이 증가하는 경향을

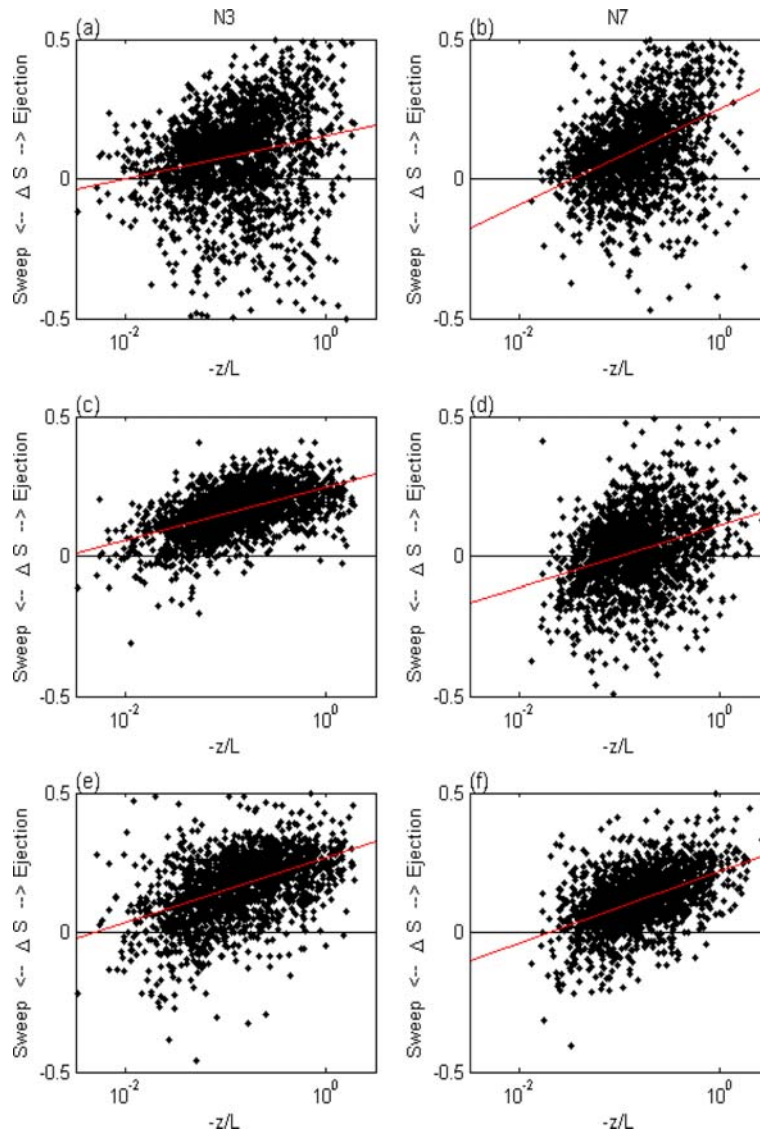


Fig. 5. The relative importance of ejection and sweep events in terms of flux contribution of (a), (b) momentum, (c), (d) water vapor, and (e), (f) heat at N3 (left) and N7 (right) sites during the daytime. The solid line indicates linear regression.

보이지만, 열과 수증기 플럭스에 비해 자료의 흩어짐이 매우 크고 sweep이 ejection보다 크게 나타나는 자료들이 상당수 존재함을 볼 수 있다. 균질한 지표면 상에서 운동량 플럭스에 대한 ΔS 와 안정도 함수의 관계에서도 자료의 흩어짐이 크게 나타났지만 본 관측 지점의 자료에서 흩어짐이 더 크게 나타났다. 이는 본 관측 지점에서 불안정할 때 sweep에 의한 운동량 플럭스가 상당부분 존재함을 의미한다. 하지만 이것이 강유역의 비균질에 기인한 것인지에 대해서는 현재의 자료만으로는 알 수 없으며 좀 더 자세한 분석이 필

요할 것으로 생각된다.

N7 지점에서 운동량과 열, 그리고 수증기 플럭스 모두 불안정도가 높아짐에 따라 ejection의 기여도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 수증기 플럭스의 경우 열 플럭스나 운동량 플럭스에 비해 ejection의 기여도가 작은 것을 볼 수 있다. De Bruin *et al.* (1993)은 지면의 수증기 공급이 약할 경우 상층의 상대적으로 따뜻하고 건조한 공기가 하강하는 sweep의 비중이 상대적으로 크게 나타난다는 것을 발견했다. N7 지점에서 어떤 조건에서 sweep에 의한 기여도가 ejection

Table 6. Seasonal frequency of $\Delta S > 0$ and $\Delta S < 0$ conditions for water vapor flux during the daytime at N7 site.

	$\Delta S > 0$	$\Delta S < 0$
Spring	334	226
Summer	205	232
Autumn	264	158
Winter	194	107

보다 더 크게 나타나는 지를 조사하기 위하여 ΔS 가 양인 경우와 음인 경우의 계절 분포를 조사하였다. ΔS

가 음인 경우는 모든 계절에서 발생하나 여름철에 상대적으로 발생 비율이 높다(Table 6). 한 가지 가능한 설명으로 공단지는 지표면으로부터 직접적인 수증기 공급원은 약하나 여름철에는 강으로부터 지속적인 수증기 공급으로 지표면 부근에 연직으로 균질한 습윤층이 상대적으로 두껍게 형성되고 겨울철에는 강의 온도의 감소로 증발량이 감소하여 지면 부근에 습윤층이 얇게 형성되는 경우를 생각할 수 있다. 이 경우 여름철에 상승운동은 수증기의 변화를 크게 초래하지 못하나 건조한 하강운동은 양의 수증기 플럭스를 유발하고 겨울철에는 상승운동이 양의 수증기 플럭스를

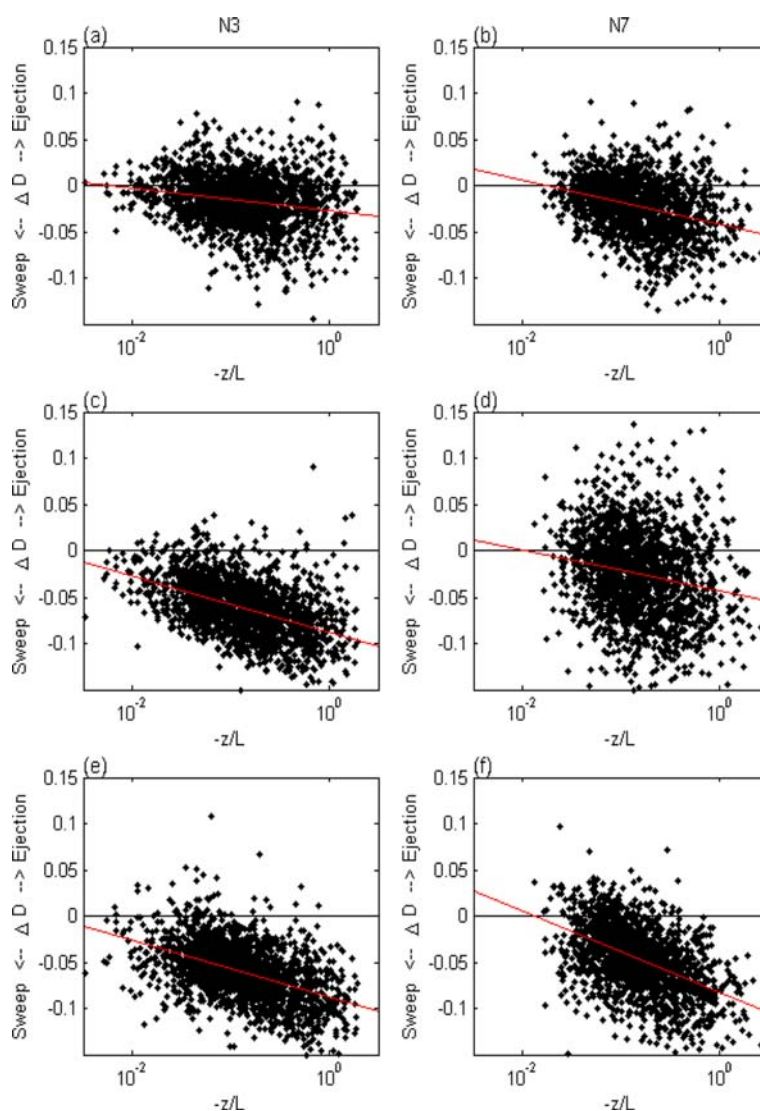


Fig. 6. The relative importance of ejection and sweep events in terms of time fraction of (a), (b) momentum, (c), (d) water vapor, and (e), (f) heat at N3 (left) and N7 (right) sites during the daytime. The solid line indicates linear regression.

유발한다. N7 지점에서 Table 5에 제시된 0에 가까운 수증기의 왜도 또한 지표면 부근에 수증기의 연직변화가 크지 않은 습윤 층이 존재한다는 것을 시사한다. 그러므로 강 유역이라는 큰 규모의 비균질은 N7 지점에 수증기를 공급하여 상대적으로 균질한 습윤 층을 지표면에 형성하게 함으로써 수증기 플럭스의 sweep과 ejection에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 반면 자체 수증기 공급원을 갖고 있는 농경지의 경우에는 균질한 지표면에서의 결과와 유사한 결과를 보여 큰 규모와 국지적인 열과 수증기의 비균질이 플럭스의 sweep과 ejection의 기여도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 사료된다. 또한 N3 지점은 강의 서편에 위치하고 있는데 이 지점의 주풍 방향은 북서풍이므로 강의 직접적인 영향은 상대적으로 적을 것으로 생각한다.

Figure 6은 농경지(N3)와 공단지(N7)에 대하여 운동량, 열, 수증기 플럭스에 대하여 ΔD 를 안정도의 함수로 나타낸 것이다. 두 지점 모두 열, 수증기에 대해 불안정해 질수록 sweep이 차지하는 시간이 ejection이 차지하는 시간보다 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 균질한 호수 상에서 관측된 Li and Bou-Zeid (2011)의 결과와 일치한다. Katul *et al.* (1997a)은 초지와 맨땅에서 스칼라 플럭스에 대한 ejection-sweep 순환을 조사하였는데 sweep이 일어나는 시간은 스칼라 변수의 왜도가 증가할수록 증가하는 반면 ejection이 일어나는 시간길이는 스칼라 변수의 왜도와 뚜렷한 관련성이 없음을 보였다. 결과적으로 왜도가 큰 변수일수록 sweep이 차지하는 시간이 ejection이 차지하는 시간보다 증가하게 된다. 온도의 왜도는 불안정할 때 두 지점 모두에서 값이 증가하고 수증기의 왜도는 N3 지점에서만 증가하였다(Table 5). ΔD 와 안정도의 관계는 Katul *et al.* (1997a)의 결과와 일치한다. 운동량 플럭스의 경우 ΔD 와 불안정도의 관계가 농경지에서 공단지보다 다소 약하게 나타난다. Li and Bou-Zeid (2011)는 운동량 플럭스의 경우 ΔD 는 불안정도가 증가할 때 처음에는 감소하다가 점차 0으로 접근하는 결과를 보고하였다. 거칠기 길이가 작은 N3 지점의 경우 비슷한 특성을 보이거나 거칠기 길이가 큰 N7 지점의 경우 스칼라의 특성과 유사한 결과를 보였다. 이는 거칠기 길이가 큰 지점에서 불안정할 때 ejection에 의한 운동량의 수송효율이 더 높음을 시사한다.

4.4 다중 분해 분석

다중분해 분석은 에디 크기별 난류 특징의 분석을 가능하게 해준다. 본 분석에서는 시간규모별 결과를 제시하였고 평균시간이 길수록 큰 에디를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 자료의 관측지점들은 강 유역에 위치하고 있어 비교적 큰 규모의 비균질성이 존재한

다는 공통점이 있다. 또한 두 관측지점은 농경지와 공단지로 둘 다 작은 규모의 비균질성을 갖고 있다. 농경지의 경우 관개시기에 따라 수증기의 공급량이 계절에 따라서 현저하게 변화하고, 공단지의 경우에도 건물과 녹지가 섞여 있어 수증기의 공급원의 비균질성이 계절적으로 변화한다. 이러한 두 관측지점의 지표면 특성이 에디 규모별 난류 수송에 미치는 영향을 분석하기 위해서 두 관측지점에 대한 다중 분해 분석을 수행하였다. 계절에 따른 지표면의 비균질성의 규모 변화효과를 분석하기 위해서 계절별로 나누어 분석을 수행하였다.

Figure 7은 주간에 두 지점의 계절별 u 와 w , w 와 T , w 와 q , 그리고 T 와 q 의 상관계수를 다중분해 분석으로 나타낸 것이다. u 와 w 의 상관계수 r_{uw} 는 극댓값이 나타나는 시간규모가 N3에서는 25.6~51.2 s이고 N7에서는 51.2~102.4 s로, N3 지점보다 N7 지점의 운동량 플럭스의 수송이 좀 더 큰 시간규모에서 효율적인 것을 알 수 있다(Table 7). 두 지점 간의 극댓값이 나타나는 시간 규모의 차이는 두 지점 간의 관측고도의 차이에 기인한 것으로 관측고도가 더 높은 N7 지점에서 운동량 수송이 더 큰 에디에 의해 효율적으로 이루어짐을 나타낸다. w 와 T 의 상관계수 r_{wT} 에서 최댓값이 나타나는 시간규모가 N3 지점에서 N7 지점보다는 좀 더 작게 나타나지만 운동량 플럭스만큼 뚜렷하지는 않다. 열 수송의 경우 혼합층에 있는 큰 에디 운동들에 의해서도 수송이 일어나므로 관측고도와 지표면과의 거리에 큰 민감성을 보이지 않는 것으로 보인다. N3 지점에서 여름철에 최댓값이 나타나는 시간 규모가 특히 작는데 이는 습윤열의 증가로 대기 불안정도가 낮아 열적 대류에 의한 열 수송이 상대적으로 약한 데 기인한 것으로 사료된다. w 와 q 의 상관계수 r_{wq} 는 모든 규모에서 N3 지점이 N7 지점보다 더 크게 나타난다. 두 지점에서 r_{wq} 의 값은 30 s보다 작은 시간 규모에서는 계절별 차이가 없지만 30 s보다 큰 시간 규모에서 계절별 차이를 보인다. N3 지점에서는 30 s보다 큰 규모 운동에 의한 수증기의 수송 효율이 여름철에 감소하는 반면 N7 지점에서는 여름철에 큰 규모에 의한 수송 효율이 더 증가하는 특성을 보인다. N3 지점에서 여름철에 큰 규모 운동에 의한 수증기 수송효율의 감소는 앞서 언급된 큰 규모에 의한 열 수송 효율의 감소와 관련되어 있다. 반면 N7 지점의 경우 공단지 자체는 제한된 수증기 공급원을 갖고 있지만 인근 지역에 존재하는 녹지와 강이 큰 규모에서 수증기의 수송 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다. 강은 항상 존재하지만 온도가 높은 여름철에 더 많은 양의 수증기를 공급하고 또한 녹지는 주로 여름철에 증산을 통해 수증기를 공급한다.

T 와 q 의 상관계수 r_{Tq} 는 두 지점 모두 시간 규모가

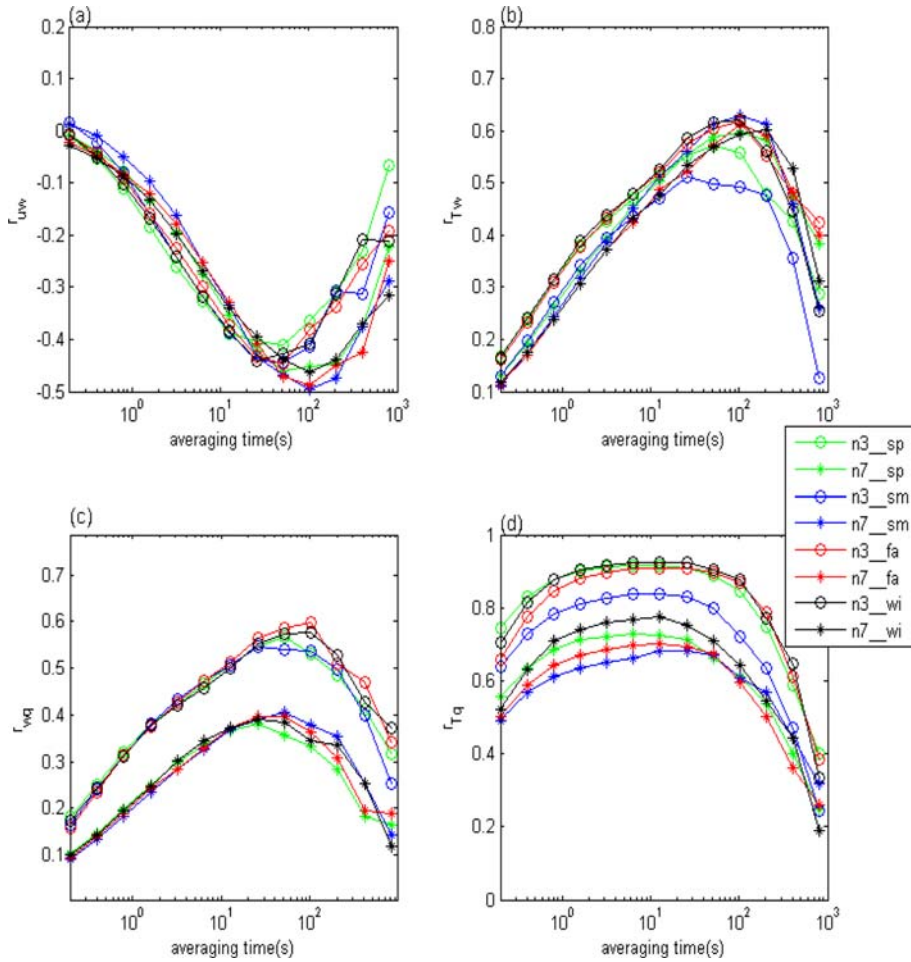


Fig. 7. The composited seasonal multi-resolution decomposition of correlation coefficient of (a) u and w , (b) w and T , (c) w and q , and (d) T and q during the daytime at two sites.

Table 7. Peak averaging time (s) of the composited seasonal multi-resolution decomposition of variables during the daytime at two sites.

	N3				N7			
	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter
r_{uw}	51.2	51.2	51.2	25.6	51.2	102.4	102.4	102.4
r_{wT}	51.2	25.6	102.4	102.4	102.4	102.4	102.4	204.8
r_{wq}	51.2	25.6	102.4	102.4	25.6	51.2	102.4	102.4
r_{Tq}	6.4	12.8	25.6	12.8	6.4	25.6	12.8	12.8

1 s 이하에서는 시간규모가 증가할수록 커지고 1 s부터 약 30 s까지는 일정한 값을 유지하다가 30 s 이상에서는 시간규모가 증가할수록 급격히 감소한다. 두 지점의 평균 풍속은 약 4 m s^{-1} 이므로 1 s에서 30 s 구간을 공간규모로 나타내면 4 m에서 120 m에 해당하는

다. r_{Tq} 의 변화는 균질한 혼합탑에서 관측한 결과인 Williams *et al.* (2007)과 비교하여 한 가지 주요한 차이를 보인다. 그 차이점은 시간규모가 증가함에 따라 열과 수증기의 상관관계 r_{Tq} 가 급격히 0에 가까워진다는 것이다. 기존의 연구 결과는 시간규모가 커져감

에 따라 1에 가까워지다가 그 값이 약간 감소하는 결과를 보였다. Williams *et al.* (2007)은 큰 시간규모에서 상관관계가 약간 감소하는 이유를 난류의 비정상성과 큰 규모의 에디의 영향이라고 제시하였다. 그러나 본 연구에서는 r_{Tq} 의 감소가 훨씬 현저하다. 그러므로 이는 균질한 혼합탑과는 달리 강 유역이라는 큰 규모의 비균질의 영향으로 사료된다. 30 s에서 1000 s 구간을 공간규모로 환산하면 약 120 m에서 4 km로 공간규모가 증가함에 따라 강이 공간 규모에 포함된다. N7 지점의 r_{Tq} 의 값은 1 s에서 30 s 구간에서 계절별로 차이가 좀 더 뚜렷한 반면 N3 지점은 모든 시간 규모에서 여름철이 다른 계절보다 r_{Tq} 의 값이 작게 나타났다. N3 지점은 여름철에 눈물로 인해 충분한 수증기 공급원의 역할을 하지만 열 공급원의 역할은 약한 반면 다른 계절에서는 지표면이 수증기와 열의 공급원으로 작용한다. 그러므로 N3 지점에서 r_{Tq} 가 계절성을 보이는 것은 여름철에 눈물로 인해 지표면이 수증기 공급원으로 작용하지만 열 공급원으로 작용하지 않는 큰 중립 조건들이 상대적으로 많이 발생하기 때문이다. 중립조건에서 수증기와 열은 규모와 관계없이 낮은 상관관계를 가지므로 계절 평균 r_{Tq} 값은 여름철에 모든 규모에서 낮게 나타난다. 여름철을 제외한 계절에 농경지 내의 작은 규모의 비균질성의 영향은 상대적으로 작은 것으로 사료된다. N7 지점의 경우 1 s부터 30 s까지의 시간 규모에서 r_{Tq} 의 계절변화가 나타나는데 녹지가 국지적인 수증기 공급원으로 작용하는 여름철에 r_{Tq} 가 감소하는 특징을 보인다.

5. 결론 및 요약

지표면의 비균질성이 난류 수송에 미치는 영향을 조사하기 위해 낙동강 유역의 농경지(N3)와 공단지(N7)에서 관측된 난류 자료를 분석하였다. 기본 통계 특성 분석, 수증기와 열의 수송 효율 분석, 사분원 분석을 수행하였고, 그리고 에디 규모별 난류 수송에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다중 분해 분석을 수행하였다.

기본 통계 특성을 분석한 결과 속도와 온도 왜도, 온도와 연직 속도의 상관계수등은 균질한 지표면 상의 지표층에서 알려진 값과 유사하나 수증기와 연직 속도의 상관계수와 수증기의 왜도가 수증기의 공급원이 약한 공단지에서 작게 나타났다. 열과 수증기의 난류 수송 효율을 분석한 결과 두 지점은 강 유역이라는 큰 규모 비균질의 영향을 받는다는 공통점보다는 해당 지표면의 수증기 공급원 특성에 따라 상당한 차이를 보였다. 두 지점에서는 r_{Tq} 값이 낮은 조건이 다르게 나타나는데 수증기 공급원이 충분한 농경지는 주로 여름철 중립조건에서 r_{Tq} 가 낮고 r_{wq}/r_{wT} 가 크게

나타나는 반면 수증기 공급원이 제한적인 공단지는 불안정한 조건에서 수증기 공급이 제한될 때 r_{Tq} 가 낮고 r_{wq}/r_{wT} 가 낮아지는 특징을 보였다.

농경지(N3)와 공단지(N7) 모두에서 수증기와 열 플럭스 모두 불안정도가 증가함에 따라 sweep에 대한 ejection의 상대적인 플럭스 기여도가 증가했다. 농경지의 열과 수증기 플럭스 그리고 공단지의 열 플럭스의 경우, 균질한 지표면 상에서 보고된 것과 같이 ejection이 우세한 경우가 대부분을 차지하는 반면 공단지(N7)의 수증기 플럭스의 경우 ejection이 우세한 경우와 sweep이 우세한 경우가 비슷한 비율로 나타났고 sweep이 우세한 경우가 여름철에 많이 발생했다. 이러한 특성은 공단지의 약한 수증기 공급원과 강의 증발량의 계절변화와 관련이 있을 것으로 사료된다.

강 유역이라는 큰 규모의 비균질성은 두 지점 모두에서 계절에 상관없이 큰 시간규모에서 열과 수증기의 상관계수 r_{Tq} 를 현저히 감소시켰다. 계절별 특성으로 농경지에서는 여름철에 모든 규모에서 다른 계절보다 낮은 r_{Tq} 값을 초래하는데 이는 증발은 일어나지만 열적으로 중립인 조건들이 여름철에 상대적으로 많이 발생하기 때문이며 공단지에서는 중간 시간규모에서 계절별 r_{Tq} 의 크기의 변화를 일으키는데 이는 인근 지역의 녹지의 계절 변동이 영향을 미치는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상연구소 “응용기상기술개발 연구”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Arya, S. P., 2001: *Introduction to micrometeorology 2ed.* Academic Press, 420 pp.
- Beljaars, A. C. M., P. Schotanus, and F. T. M. Nieuwstadt, 1983: Surface layer similarity under non-uniform fetch conditions. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1800-1810.
- De Bruin, H. A. R., W. Kohsiek, and B. J. J. M. van Den Hurk, 1993: A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat, and water vapour using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities. *Bound.-Layer Meteor.*, **63**, 231-257.
- Dyer, A. J., 1974: A review of flux-profile relationships. *Bound.-Layer Meteor.*, **7**, 363-372.
- Foken, T., and B. Wichura, 1996: Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric. Forest Meteor.*, **78**, 83-105.

- Högström, U., 1988: Non-dimensional wind and temperature profiles. *Bound.-Layer Meteor.*, **7**, 363-372.
- _____, 1990: Analysis of turbulence structure in the surface layer with a modified similarity formulation for near neutral conditions. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1949-1972.
- Howell, J. F., and L. Marht, 1997: Multi-resolution flux decomposition. *Bound.-Layer Meteor.*, **83**, 495-520.
- Kaimal, J. C., and J. J. Finnigan, 1994: *Atmospheric Boundary layer flows*. Oxford, 289 pp.
- Katul, G., G. Kuhn, J. Schieldge, and C.-I. Hsieh, 1997a: Turbulent eddy motion at forest-atmosphere Interface. *J. Geophys. Res.*, **102**, 13409-13421.
- _____, C.-I. Hsieh, G. Kuhn, and D. Ellsowrth, 1997b: The Ejection-Sweep Character of Scalar Fluxes in the Unstable Surface Layer. *Bound.-Layer Meteor.*, **83**, 1-26.
- _____, S. M. Goltz, C.-I. Hsieh, Y. Cheng, F. Mowry, and J. Sigmon, 1995: Estimation of surface heat and momentum fluxes using the fluxes-variance method above uniform and non-uniform terrain. *Bound.-Layer Meteor.*, **74**, 237-260.
- Lee, Y., B. Lee, K. Kahng, S.-J. Kim, and S.-O. Hong, 2013: Quality control and characteristic of eddy covariance data in the region of Nakdong River. *Atmos. Korean Met. Soc.*, **23**, 307-320.
- Li, D., and E. Bou-Zeid, 2011: Coherent structures and the dissimilarity of turbulent transport of momentum and scalars in the unstable atmospheric surface layer. *Bound.-Layer Meteor.*, **140**, 243-262.
- Monin, A. S., and A. M. Obuhohov, 1954: Basic laws if turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Trans. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, **151**, 163-187.
- Moriwaki, R., and M. Kanda, 2006: Local and global similarity in turbulent transfer of heat, water vapour and CO₂ in the dynamic convective sublayer over a suburban area. *Bound.-Layer Meteor.*, **120**, 163-179.
- Ohtaki, E., 1985: On the similarity in atmospheric fluctuation of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields. *Bound.-Layer Meteor.*, **31**, 25-37.
- Panofsky, H. A., and J. A. Dutton, 1984: *Atmospheric Turbulence: models and methods for engineering applications*. Academic Press, 397 pp.
- Raupach, M. R., 1981: Conditional statistics of reynolds stress in rough-wall and smooth-wall turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, **108**, 363-382.
- _____, J. J. Finnigan, and Y. Brunet, 1996: Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy. *Bound.-Layer Meteor.*, **78**, 351-382
- Roth, M., and T. R. Oke, 1995: Relative efficiencies of turbulent transfer of heat, mass, and momentum over a patchy urban surface. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1863-1874.
- Webb, E. K., G. I. Pearrman, and R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effect due to heat and water vapor transfer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 85-100.
- Williams, C. A., T. M. Scanlon, and J. D. Albertson, 2007: Influence of surface heterogeneity on scalar dissimilarity in the roughness sublayer. *Bound.-Layer Meteor.*, **122**, 149-165.
- Zhang, Y., H. Liu, Th. Foken, Q. L. Williams, S. Liu, M. Mauder, and C. Liebenthal, 2010: Turbulence spectra and cospectra under the influence of large eddies in the Energy Balance Experiment (EBEX). *Bound.-Layer Meteor.*, **136**, 235-151.