

바람에 의한 서울시 기온이동현상 분석

김학열* · 허태영**

Analysis on Air Temperature Transfer by Wind in Seoul Metropolitan Area

Hak-Yeol Kim* · Tae-Young Heo**

요약 : 본 연구는 서울시 및 그 주변에 위치한 32개 AWS(자동기상측정소)에서 측정된 2005년 일평균 기온과 주풍향 자료를 이용하여 바람에 의한 기온의 이동현상을 평가하고자 한다. 이를 위하여 하나의 기준지점 AWS의 월주풍향의 풍상 쪽에 위치하면서 동일한 월주풍향을 갖는 최근린(Nearest Neighborhood)에 위치한 비교지점을 선택하여, 기준지점과 분석지점의 시계열적 일기온 변화에 구조적인 차이를 동질성 검정기법을 통하여 판단하였다. 그 결과, 전체 134개 분석샘플 중 약 80% 정도가 동질적인 시계열 구조를 나타내는 것으로 판정되었으며, 이는 서울과 같이 매우 복잡한 인공적·자연적 지형에서도 바람에 의해 기온이 이동될 것이라는 일반적인 가정을 실증하는 결과라고 판단된다. 만약 추가적인 AWS의 설치 운영으로 세밀한 연구가 진행된다면 서울시의 바람이동 및 기온분포를 공간적으로 파악하여, 바람과 기온을 동시에 고려한 기후지도 제작 및 이를 활용한 도시계획적 관리정책을 수립하는 데 효과적인 제어수단으로 사용될 수 있을 것이다.

주제어 : 대기온도, 동질성 검정, 자동기상측정소, 바람통로

ABSTRACT : The main purpose of this study is to analyze the transfer phenomenon of daily mean air temperatures during 2005 by most-frequent wind direction, monitored at 32 Automatic Weather Stations(AWS) located around Seoul Metropolitan Area. Daily temperature records from a selected AWS during a month are subjected to homogeneity tests against the reference series at the closest AWS which has the same monthly most-frequent wind direction as it and, at the same time, is located on its upper-wind area. The result shows that 80% of 134 paired series are tested as homogeneous ones, confirming that the role of wind regarding air temperature transfer is in line with general hypothesis even in such a very complex area as Seoul. If many additional AWS are operated and further studies similar to this article are extensively conducted, delineation of wind corridor and distribution of air temperature are spatially figured out. Also, the possible outcomes would give guidelines of making climatic map, simultaneously considering wind and air temperature, which can be used as an effective tool in terms of urban planning and management policies.

Key Words : air temperature, homogeneity test, AWS, wind corridor

* 서경대학교 도시공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Seokyeong University)

** 한국해양대학교 데이터정보학과 조교수(Assistant Professor, Department of Data Information, Korea Maritime University),
교신저자(E-mail: heoty@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4373)

I. 서론

최근의 도시지방정부는 도시열섬에 대한 일반시민의 관심도의 증가에 따라 이에 대한 해결책 마련에 고심하고 있다. 특히 몇몇 지방자치단체에서는 바람길 조성과 같은 도시계획적 대응책을 수립하고 부분적인 적용단계에 이르기까지 하였다. 자연의 메커니즘을 이용하여 대기온도를 낮추고자 하는 이러한 사업은 기후변화 대응책뿐만 아니라 대기오염 확산책으로서도 커다란 호응을 얻고 있다. 그러나 바람길 조성에 따른 대기온도 저감의 효과는 대류현상(Convection)과 같은 자연현상이라고 간주함으로써, 도시내 기온의 동태적 현상을 실증하거나 연구한 사례를 찾아보기가 극히 어렵다. 이러한 이유로 인해 관련학계에서도 바람길 조성의 효과가 있을 것이라는 원론적 측면을 인정하면서도 확신을 갖고 주장하는 데에는 적극적이지 못한 상황이다.

만약 이러한 이슈에 과학적인 실증이 가능하면, 도시내 기온의 역동적 체계를 구체적으로 이해함으로써 도시의 찬공기 생성지역의 조성과 도시의 바람길을 살리기 위한 노력에 실질적인 도움이 될 것으로 판단된다. 더 나아가서, 이 결과는 기류에 따른 등온 권역 혹은 등온 코리도(corridor) 설정에도 활용됨으로써 한 지점의 기온으로 다른 지점의 기온을 예측하는 데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

이에 본 연구는 바람에 따라 기온이 이동되는가에 대한 가설을 실증적으로 검증하는 것에 목표를 둔다. 이를 위하여 하나의 측정소의 주풍향과 주변 측정소간의 공간적 위치관계를 이용하여 샘플을 결정하고, 동질성 검정방법(Homogeneity Test)을 이용하여 두 지점의 시계열적 측정 자료가 구조적 변화가 발생하는지 여부를 통계적으로 검정하고자 한다.

II. 선행연구 검토

본 연구의 주제와 관련된 선행연구들은 바람의 강도를 수치적으로 해석하여 구조물 설치에 이용하는 연구, 바람통로를 모사·분석하여 지역적으로 활용하는 연구, 대기온도의 공간적 분포를 분석하는 연구 등으로 나눌 수 있다.

도시 내에서 바람의 움직임을 과학적으로 연구한 모델은 상당히 많다(김영문 외, 1998; Cermak, 2003; Oke, 1987; Plate, 1982). 이러한 연구는 복잡한 수리적 모델을 포함하는 경우가 많은데, 대기 경계층(Boundary Layer)의 유체역학적 수치해석을 통해서 구조물에 미치는 바람의 영향을 모사하여 강풍이나 난류에 안전한 구조물을 설계하는 토목학적 기준을 설정하는 데 활용되고 있다.

이러한 연구에 비교하여, 바람길 조성 및 도시 대기 순환 문제를 다루는 선행연구 사례는 상당히 드물다(엄정희 외, 2001; 전지현·박석봉, 2005; 정주희 외, 2007; Gál and Unger, 2009; Wong et al., 2010). 이 부류에 속하는 연구들은 주로 특정 대상지에 대해 일정 기간 주풍향과 지표면의 마찰 정도를 입력변수로 하여 컴퓨터 모델을 이용함으로써 바람통로를 확인하고 분석하는 연구들이다. 세계 여러 지방정부에서는 이러한 바람통로를 도시계획·관리의 기법으로 활용하는 단계에 이르고 있다. 동경에서는 바람길에 영향을 미치는 지역을 지정하여 도심재개발사업의 가이드라인으로 제공하고 있으며, 독일에서는 개발대상지의 도시 미기후를 악화시키는 개발행위를 법적으로 금지하고 있다(Ng, 2009). 국내의 경우에는 대구시가 바람통로를 지도화함으로써 대형 고층건물의 입지와 녹지축 조성 등에 활용하고 있다(전지현·박석봉, 2005).

대기온도에 대한 선행연구는 기온의 공간적 분포 현상을 분석하고자 하는 연구가 거의 대부분을 차지하고 있다. 특히 이러한 연구는 최근 들어 도시열섬현상과 관련하여 많은 분석이 수행되어 왔다. 도시온도의 공간적 분포에 관한 연구로는 연구대상지의 규모에 따라 구분해 볼 수 있다. 대도시를 포함하는 넓은 지역에 대한 연구들은 몇 개의 실측자료에 기초한 내삽과정(Interpolation)을 활용하여 등온 곡선을 추정함으로써, 고온 및 냉온발생 지역을 파악하고 그 발생 원인을 분석하고자 하는 연구가 대부분이다(김학열, 2003; 부경은 외, 1999; 조하만 외, 1988; Carnahan and Larson, 1990; Keuppers et al., 2008; Moreno-Garcia, 1994; Pauleit et al., 2005; Wanner and Hertig, 1984). 이러한 연구들의 특징으로는 장기간의 온도 시계열 자료를 이용하여 등온곡선의 변화를 분석하는 연구이거나, 대규모 지역에 대해 LandSat과 같은 위성영상자료의 열밴드 정보를 이용하여 대기온도를 추정하고 토지피복상태나 식생지수(NDVI)와의 관련성을 분석하는 연구들로 나타났다. 또한 연도별 기온분포의 변화를 분석한 연구들은 등온곡선의 변화를 육안으로 비교하는 것이 특징이다. 토지피복 상태에 따른 대기온도의 관계를 파악하는 경우에는 대개 간단한 단순회귀분석기법을 이용하여 관련 정도를 추정하는 연구방법이 사용되었다. 이와 반대로 소규모 지역에 대한 선행연구들은 실측자료를 기반으로 국지적인 기온변화 양상을 시각적으로 나타내면서 기온변화를 건물외장, 바닥 포장 특성 혹은 세부적인 토지이용형태와 연관시켜 수리적 모형을 구축하는 연구가 많다(윤용한, 2004; 윤용한 외, 2008; Ca et al., 1998; Shashua-Bar and Hoffmann, 2000; Takakura et al., 2000). 특

히 이런 연구들은 짧은 기간 동안 여러 번 기온을 측정하면서 다른 미기상적 요소(풍향, 풍속 등), 수증, 식재층위구조 등과 같은 매우 국지적인 요소들을 분석에 활용하였다.

이상과 같은 연구들은 바람의 이동이나 도시온도의 분포를 이해하는 데 중요한 연구 결과를 산출하였다. 그러나 기존 연구들은 바람과 기온의 동태적 변화 현상을 밀접하게 연관시켜 분석하는 데에는 미흡하였다. 다만, 바람이 기온을 전달하는 매체로 작용하고 있다는 것을 기본 전제로 연구를 진행하였을 뿐, 이에 대한 구체적인 실증이 이루어지지 못하였다. 특히 서울과 같은 대도시에서는 주변 산악지대와 인공구조물로 인하여 바람의 이동을 저해하는 요소가 많으므로 바람과 기온의 변화가 얼마나 관련성이 있는지가 의문시된다. 이에 본 연구에서는 서울시를 대상으로 바람의 이동으로 인하여 인접지역의 기온의 연동현상이 어느 정도 발생하고 있는지를 통계학적인 검증 기법으로 평가함으로써 서울 지역의 바람-온도의 동태적인 변화현상을 설명하는 데 기초자료를 제공하고자 한다.

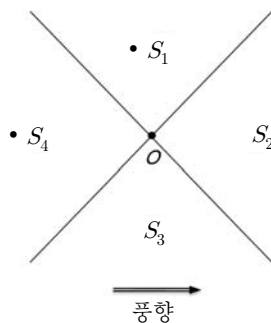
III. 분석표본 및 자료

1. 표본선정 방법

어떤 K 측정소 (O_k , 기준지점) 주변의 4방위에 (동서남북) 위치하는 가장 근접한 4개 측정소 $S_{k,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$)¹⁾를 선정하고, O_k 와 $S_{k,i}$ 의 상대적 위치관계와 O_k 월주풍향이 동일하게 나타나는 $S_{k,i}^*$ (비교지점)을 파악하고 이에 해당하는 조합을 $O_k - S_{k,i}^*$ 라고 한다. 예를 들어, 특정한 월 p 기간 동안 O_k^p 에서 서풍이 주풍향으로 관측되었고,

1) 1=북쪽, 2=동쪽, 3=남쪽, 4=서쪽의 위치를 나타낸다.

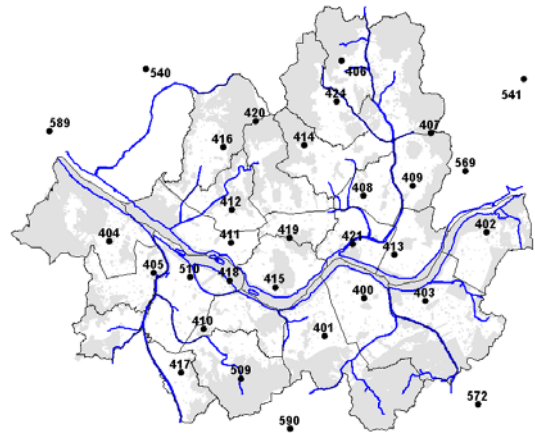
같은 시기에 O_k^p 의 서측에 위치한 $S_{k,4}^p$ 에서도 서풍이 주풍으로 측정되었다면(〈그림 1〉 참조), 이 조합을 $O_k^p - S_{k,4}^{p*}$ 로 하기로 한다. 이외는 달리, 만약 $S_{k,1}$ 측정소와 기준지점 O_k 에서 모두 동풍이 주풍향으로 확인되었다고 하더라도, $O_k^p - S_{k,1}^p$ 의 조합은 본 연구에서 사용될 샘플에 해당되지 않는다. 왜냐하면, 비록 이 조합은 주풍향이 동일한 방향이기는 하나, 주풍향과 두 측정소의 위치관계가 일치하지 않아 $S_{k,1}$ 지점의 공기가 O_k 으로 이동되었다고 가정하기가 어렵기 때문이다. 이에 따라 분석조합 $O_k^p - S_{k,i}^{p*}$ 에서 예상되는 결과로는, p 기간 동안 비교지점 $S_{k,i}^{p*}$ 에서 측정된 기온은 바람을 타고 기준지점 O_k^p 로 이동됨으로써 O_k^p 와 $S_{k,i}^{p*}$ 가 거의 동일한 기온의 변화양상을 나타낼 것이라는 가정이 가능하다. 이에 p 기간에 대한 분석표본을 결정하기 위해서는, 각 기준지점 O_k^p 의 주풍향을 파악하고 이를 둘러싼 4개 주변 지점 $S_{k,i}^p$ 중에서 주풍향이 동일하고 풍상쪽에 위치한 비교지점 $S_{k,i}^{p*}$ 을 선별하여 표본을 결정하게 된다.



〈그림 1〉 분석표본 결정의 공간구조

2. 자료 처리

온도자료는 2005년 서울시와 주변에 위치한 32개 자동기상측정망(AWS: Automatic Weather Station)의 시간별 자료를 이용한다. AWS에서 측정된 시간별 풍향 및 기온자료를 이용하여 각 AWS의 주풍향과 일평균기온을 계산하며, 이를 통해서 바람의 움직임과 기온의 전달과정을 설명하고자 한다.



〈그림 2〉 서울시 주변의 AWS 위치도

우선 주풍향은 0~360°로 측정된 풍향자료를 〈그림 1〉과 같이 각 측정소마다 4개 방향으로 나누고²⁾ 해당 방위에 속한 풍향의 빈도수를 계산하여 가장 빈도수가 높은 풍향이 해당 지점의 월별 주풍향으로 부여되었다. 만약 어떤 측정소에 1월 한 달 동안 지속적으로 북풍만 불었다면, 북풍에 총 744회(24시간×31일)의 빈도가 기록될 것이며, 주풍향은 북풍으로 확인될 것이다.

일평균 온도의 계산은 기상청에서 채택하고 있는 자동기상관측자료의 보고기준에 의해서 계산

2) 0° < 북풍 < 45°; 315° < 북풍 < 360°; 45° < 동풍 < 135°; 135° < 남풍 < 225°; 225° < 서풍 < 315°; 무풍=0°

하였는데 그 처리과정은 다음과 같다. 기상청에서는 일평균기온의 산정방법은 표준시간(KST) 3시, 6시, 9시, 12시, 15시, 18시, 21시, 24시 KST에 8회 관측된 1분 자료의 평균값을 일평균기온으로 정하고 있다(기준 1). 그러나 만약 8회 정시자료 중에서 결측이 발생한 경우에는 3시, 9시, 15시, 21시의 4회 관측된 자료의 평균값으로 하거나(기준 2), 6시, 12시, 18시, 24시의 4회 관측된 자료의 평균값으로 평균기온을 대체하고 있다(기준 3). 그 외의 경우에는 일평균기온을 결측치로 처리하고 있다(기상청, 2010). 본 연구에서는 2005년 시간별 기온자료를 미관측된 날짜를 제외하고 분석한 결과, 총 32개 AWS에서 11,679의 관측치가 확인되었고 그중 기준 1, 기준 2, 기준 3의 산출조건에 부합하는 것은 총 11,506개인 것으로 확인되었다. 기준 1에 해당되는 것은 11,208회, 기준 2에 해당되는 것은 182회, 기준 3에 해당되는 것은 116회로 나타났다. 이를 각 지점별로 정리하면 <표 1>과 같다.

<표 1> AWS별 일평균기온 획득 가능 일수(2005년)

지점	빈도	지점	빈도	지점	빈도	지점	빈도
400	365	408	365	416	365	509	359
401	363	409	365	417	361	510	360
402	364	410	323	418	352	540	349
403	363	411	364	419	356	541	362
404	363	412	360	420	360	569	365
405	365	413	365	421	365	572	364
406	339	414	362	423	351	589	365
407	363	415	361	424	357	590	365

여기서 추가적으로 고려할 사항은 동질성검정을 위해서는 두 개 측정소의 일평균자료의 관측날짜가 동일해야 임의의 두 지점의 시계열 자료를 비교할 수 있다는 것이다. <표 2>를 살펴보면, 406지점과 410지점은 2005년 365일 중 340일 미만의 날

짜만이 일평균기온의 계산이 가능한 것으로 나타났다. 단지 10개의 지점만이 365일 동안 일평균기온을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 32개 지점 모두가 일평균기온의 산출이 가능한 날짜는 230일로 확인되어 비교 가능한 날짜가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 특히 6월의 경우는 단지 6개의 날짜만의 모든 AWS에서 공통적으로 일평균기온의 계산이 가능한 것으로 분석되었다. 이에 본 연구에서는 비교가능한 시계열 자료를 늘리기 위해 일평균기온 누락이 가장 많은 두 지점(406 및 410 지점)을 제외하기로 하였으며, 이 때 전체적으로 총 273일이 확보될 수 있는 것으로 분석되었다.

<표 2> 월별 AWS의 공통 관측 일수(2005년)

월	공통 관측일 확보일수	
	32개 지점 모두	30개 지점 (406, 410지점 제외)
1	24	24
2	27	27
3	22	22
4	23	23
5	17	20
6	6	24
7	13	18
8	19	24
9	17	20
10	28	31
11	16	21
12	18	19
계	230	273

상기의 과정을 거쳐 풍향 및 온도 자료가 정리되면, 앞서 설명된 분석표본 선정에 적합한 조합을 확인하여야 한다. 즉, 월별로 각 AWS지점의 주풍향을 계산하고, 하나의 기준지점 O_k^p 주변에 4개 방향에 위치한 $S_{k,i}^p$ 지점 중에서 O_k^p 의 주풍향의 풍상쪽에 위치하면서 O_k^p 와 주풍향이 동일한 비교지점 $S_{k,i}^{p*}$ 를 파악하여 분석표본($O_k^p - S_{k,i}^{p*}$)을 결정한다.

다. 본 연구에서는 주풍향을 월별로 구분하여 계산하였으므로 이 분석표본은 기간 p 에 따라 변화된다. 이상적으로는 총 32개 AWS 지점에 대해 12개월의 조합이 가능하나(총 384개 조합), 기준지점과 비교지점 간의 상대적 위치와 주풍향이 일치하지 않은 지점이 많아 총 134개의 분석조합만이 동질성 검정분석이 가능한 것으로 확인되었다.

〈표 3〉 월별 분석표본 조합 수(2005년)

월	분석조합 수	월	분석조합 수
1	14	7	8
2	14	8	7
3	18	9	11
4	15	10	6
5	12	11	9
6	10	12	10
		총계	134

IV. 통계적 방법론

1. 동질성 검정

연속된 시계열 자료의 비동질성을 탐지하기 위해 Von Neumann Ratio Test(Von Neumann, 1941), Buishand Range Test(Buishand, 1982), Pettitt Test(Pettitt, 1979), Standard Normal Homogeneity Test(Alexandersson, 1986) 등과 같은 다양한 통계적 방법론이 개발되었으며, 특히 비동질적인 연속된 시계열 자료의 동질성 여부를 탐지하기 위한 다양한 동질성 검정 방법 중에 가장 많이 활용되는 있는 방법은 표준 정규 동질성 검정이다. Alexandersson(1986)은 관측치의 평균값의 구조적 변화가 존재하는지의 동질성 여부를 판단하기 위해 표준정규동질성 검정을 개발하였

으며, Alexandersson and Moberg(1997)은 관측치의 선형시계열 경향 형태 자료에 대한 동질성 여부를 확인하기 위하여 기존의 표준정규동질성 검정 방법을 수정 및 보완하였다. 따라서 본 연구에서는 표준정규동질성 검정을 선택하여 서울시에서 운용 중인 기상자료를 이용하여 지점별 그것들이 서로 동질한가에 대한 통계적 검정을 실시하였다.

2. 표준정규동질성 검정

본 연구에서는 표준정규동질성 검정 방법을 이용하여 두 지점의 시계열 자료의 동질성을 검정하고자 하며, 이 방법에 대한 간략한 설명은 다음과 같다.

$Y_i(i=1, 2, \dots, n)$ 는 동질성 검정을 위한 후보 시계열 자료에 대응되는 주변의 기준이 되는 시계열자료이고, $Q_i(i=1, 2, \dots, n)$ 를 기준 시계열 자료와 후보 시계열 자료의 차이를 의미하고 Z_i 를 Q_i 를 아래와 같이 표준화시킨 자료라고 하자.

$$Z_i = \frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma_Q} \quad (1)$$

여기서 \bar{Q} 와 σ_Q 는 각각 Q_i 의 평균과 표준편차를 의미한다.

기준 시계열 자료와 후보 시계열 자료의 평균에 대한 구조적 변화가 존재하는지 확인하기 위해 다음과 같은 귀무가설과 대립가설을 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_0: & Z_i \sim N(0,1) \text{ for } i=1, 2, \dots, n \\ H_1: & \begin{cases} Z_i \sim N(\mu_1, 1) \text{ for } i=1, 2, \dots, d \\ Z_i \sim N(\mu_2, 1) \text{ for } i=d+1, d+2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 N 은 평균과 분산을 가진 정규분포(Normal Distribution)를 의미한다.

표준정규동질성 검정은 귀무가설 가정 하에 시계열자료는 동일 평균을 가지고 있으며, 연속된 일련의 자료가 동질하다고 보는 반면에, 대립가설 하에서 표준정규동질성 검정은 평균에 있어 구조적 변화가 존재하며, 연속된 일련의 자료가 비동질(Inhomogeneity)하다고 판단한다.

Alexandersson and Moberg(1997)은 위에서 제시한 가설에 대한 통계량을 우도비 검정(Likelihood Ratio Test)에 기반하여 유도하였으며, 그 통계량은 다음과 같다.

$$T = \max\{dz_1^2 + (n-d)\bar{z}_2^2, 1 \leq d \leq n-1\} \quad (3)$$

식 (3)에서 \bar{z}_1 과 \bar{z}_2 는 각각 구조적 변화의 발생 전과 후의 평균값을 의미하며, 다음과 같다.

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d z_i, \quad \bar{z}_2 = \frac{1}{n-d} \sum_{i=d+1}^n z_i \quad (4)$$

식 (3)의 통계량 안에 포함되어 있는 상수 d 는 구조적 변화가 발생하는 가장 확률이 높은 지점을 의미하며, 시점 d 에서 T 값이 크면 d 시점에서 평균의 구조적 변화의 발생을 의미한다. 따라서 평균의 구조적 변화를 탐지하기 위한 검정통계량은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$T_0 = \max_{1 \leq d \leq n} T(d) \quad (5)$$

위에서 제시한 검정통계량 T_0 가 어떤 임계값(Critical Value)을 초과하면 귀무가설을 기각하게 되며 이러한 귀무가설이 기각될 확률은 표본의 크기에 따라 달라진다.

따라서 본 연구에서는 동질성검정을 통하여 검정통계량이 임계값을 초과하게 되면 두 지점의 한 달 동안 일평균 온도의 시계열 자료에서 구조적인 변화가 발생하는 것을 나타내는 것으로 두 계열이 동질하지 않다는 것에 충분한 근거가 있다고 판정하게 된다. 이와 반대로 임계값을 초과하지 않는 경우 두 지점의 온도자료는 평균으로부터 구조적인 변화 없이 동질한 시계열 자료임을 나타내는 것으로 판정하게 된다. 본 연구에서는 바람에 따라 대기온도가 전달될 것으로 가정하기 때문에 대부분의 $O_k^p - S_{k,4}^{p*}$ 조합에서 동질성이 확인될 것으로 예상하고 이를 검정하고자 한다.

V. 검정 결과

총 134개의 $O_k^p - S_{k,i}^{p*}$ 조합을 동질성 검정을 실시하여 결과를 월별로 정리해 보면(〈표 4〉 참조), 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 전체적으로 78.36%에 해당하는 $O_k^p - S_{k,i}^{p*}$ 조합이 온도 변화의 동질한 시계열 구조를 갖는 것으로 검정되었다. 즉, 주풍향을 고려한 두 AWS 지점의 조합들 중 약 80% 정도에서 1달간의 온도 변화는 온도 차이를 거의 보이지

〈표 4〉 월별 검정 결과

H_0 기각여부	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	총계
기각하지 않음	8	11	16	11	9	10	5	6	10	5	7	7	105
기각함	6	3	2	4	3	0	3	1	1	1	2	3	29
동질률(%)	57.14	78.57	88.89	73.33	75.00	100.0	62.50	85.71	90.91	83.33	77.78	70.00	78.36

〈표 5〉 AWS별 검정 결과

H_0 기각여부	400	401	402	403	405	407	408	409	411	412	413	414	415
기각하지 않음	10	2	5	6	5	2	3	4	3	2	8	3	1
기각함	0	2	3	0	2	0	0	1	1	0	3	0	2
동질률(%)	100.0	50.0	62.5	100.0	71.4	100.0	100.0	80.0	75.0	100.0	72.7	100.0	33.3
H_0 기각여부	416	418	419	420	421	423	509	510	541	569	572	589	590
기각하지 않음	4	6	2	1	10	3	5	3	2	2	6	5	2
기각함	1	4	0	1	1	0	2	1	1	2	1	1	0
동질률(%)	80.0	60.0	100.0	50.0	90.9	100.0	71.4	75.0	66.7	50.0	85.7	83.3	100.0

않은 채 동일한 구조를 유지하고 있는 것으로 확인되었다. 서울과 같이 다수의 산과 하천을 포함하는 대도시 지역에는 바람의 이동경로³⁾의 중간에 다양한 패치(patch)가 존재하므로, 바람이 냉온지역(하천, 녹지 등) 및 고온지역(건축물, 포장면, 기타 열발생지역)을 통과하면서 기온의 교란이 수차례 발생될 것을 감안한다면, 본 연구의 동질성 검정 결과는 바람에 의한 기온의 전달이 상당부분 이루어지고 있다는 것을 실증하고 있다고 판단된다. 여기서 동질하다고 판정된 원인이 순전히 바람의 영향에 기인한다는 것을 증명하기 위해서는 관측지점 주변의 지역적 여건이 통제되어야만 가능하다. 그러나 현재의 관측지점별 주변여건이 상이한 것을 고려해 볼 때, 두 시계열 구조가 동질한 원인이 주로 외부의 영향에 의한 것으로 판단할 수 있다. 다만, 향후 외부이동·영향효과를 정확하게 분석하기 위해서는 관측지점의 지역적 특성을 반영한 대기온도 변이 모형을 구축·적용함으로써 지역적 영향을 제거하는 과정이 필요할 것이다.

본 검정 결과를 월별로 살펴보면, 6월의 조합이

가장 동질한 시계열 구조를 갖는 것으로 분석되었다. 그 다음으로 9, 3, 8월 등의 순으로 나타났다. 한편 평균보다 동질률이 낮은 달을 확인해 보면(〈표 4〉의 음영처리 부분), 1, 2, 4, 5, 7, 11, 12월 등으로 나타났다. 특히, 1월의 경우 57.14%만이 동질한 시계열 조합을 이루고 있는 것으로 나타나 가장 낮은 동질률을 갖는 기간으로 분석되었다. 계절별로는 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12, 1, 2월)이 각각 80.0%, 84.0%, 84.6%, 68.4%의 동질률을 보여 가을 기간의 동질성이 가장 높은 것으로 분석되었다.

검정 결과를 AWS 지점별로 정리하면(〈표 5〉참조), 9개 AWS 지점에서의(음영 부분) $O_k^p - S_{k,i}^{p*}$ 조합이 모두 동질함이 검정되었다. 특이한 점은, 415지점의 경우 418지점과 총 3개의(3, 4, 5월) 조합이 분석샘플로 채택된 후 검정되었는데, 이 때 단지 하나의 조합만이 동질하다고 판명되었다. 〈그림 2〉에서 보면,⁴⁾ 비록 동일한 주풍향을 갖는 근거리 지점 사이라 할지라도 한강과 같은 대규모 수계를 거치면서 기온의 변동현상이 심화되

3) 본 연구는 주풍향이 동일하고 위치관계가 주풍향과 일치하는 두 개의 AWS 지점을 하나의 분석조합으로 선정하고 있으므로, 바람의 이동은 이 두 지점 사이에서 이루어지는 것으로 가정한다. 모든 분석조합에서 두 AWS 지점 간의 최소 거리는 약 2.4km이다.

4) 회색으로 처리된 부분이 공백·녹지로 조성된 곳이고, 굵은 점선으로 표시된 것이 하천을 표시한 것이다.

어 두 지점의 기온의 시계열 변화구조에 차이가 발생되었을 것으로 예상된다. 이와 유사하게 401지점의 경우, 3~5월 사이 415지점과 조합을 이루었으나 단지 4월달만이 동질성이 유지되는 것으로 판정되었다. 이는 앞서 언급한 대규모 수계에 의한 기온 변화현상이 발생했으리라는 추측을 더욱더 확신시킨다. 또한 418지점은 근거리에 위치한 510지점과 8, 9월을 제외한 나머지 모든 달에서 분석조합을 이루었으나 60%만이 동질한 것으로 판정되었다. 풍상쪽 510지점의 바람이 고층화된 여의도를 거치고 풍하쪽 418지점은 한강의 영향을 받음으로써 상호 근거리에 위치한 지점임에도 불구하고 동질률이 그다지 높지 않게 나타난 것으로 판단된다.

전체적으로 보면, 지점별 동질률이 평균(78.36%)보다 낮은 지점이 401, 402, 405, 411, 413, 415, 418, 420, 509, 510, 541, 569 등으로 나타났는데, 420, 509, 541, 569 등과 같이 산립지역에 근접한 지점을 제외하면 대부분 한강에 근접한 지점들로 구성되어 있다.

이상과 같은 경우와는 달리, 분석조합 사이에 기온을 변화시킬 만한 자연지형이 없는 400지점과 같은 경우는 총 10개의 분석조합 모두가 동질성이 있는 것으로 확인되었다. 400지점과 분석조합을 이루는 401 및 403지점과의 거리가 각각 3.8km, 4.5km 떨어져 있음에도 불구하고 분석조합 간에 동질한 시계열 자료로 평가된 것은 바람이 풍상지역에서 풍하지역으로 이동하면서 기온을 변화시킬 만한 열원지역이나 냉온지역을 거치지 않는 것에 원인이 있을 것으로 분석된다.

VI. 결론

본 연구는 서울시 및 그 주변에 위치한 AWS 지점에서 측정된 2005년 시간별 바람과 기온 자료

를 이용하여 바람에 의한 기온의 이동현상을 실증하고자 하였다. 이를 위하여 각 지점별로 일평균 자료 및 주풍향을 계산하여 기초자료를 구축하고, 어느 한 달 기간 동안 각 기준지점(O_k^p)의 주풍향의 풍상쪽에 위치하면서 동일한 주풍향을 갖는 가장 근접한 비교지점($S_{k,i}^{p*}$)을 선택하여 분석샘플로 결정하였다. 연후에, 기준지점과 분석지점의 시계열적 기온변화에 구조적인 차이가 발생하는지 여부를 동질성 검정기법을 통하여 판단하였다. 그 결과, 전체 134개 샘플 중 약 80% 정도가 동질한 시계열 구조를 나타내는 것으로 판정되었다. 특정 지점의 기온 변이에 영향을 주는 요인을 측정지점의 지역적 특성에 의한 요인, 바람에 의한 외부온도 전이 요인으로 구분해 볼 때, 관측지점별 주변여건이 상이한 상황을 고려한다면 두 시계열 구조가 동질한 원인이 외부온도 요인에 기인한 것으로 판단되게 한다. 이에 본 검정 결과는, 서울과 같은 매우 복잡한 인공적·자연적 지형이 존재함에도 불구하고 바람을 타고 기온이 이동할 것이라는 가정을 상당부분 실증하는 것이라고 판단된다.

비록 모든 샘플에서 O_k^p 와 $S_{k,i}^{p*}$ 가 동일한 시계열 구조를 갖는 것으로 판정되진 않았지만, 다음과 같은 연구의 한계를 고려한다면 상당히 의미 있는 결과라고 할 수 있다. 첫째, 분석조합의 최근 거리는 약 2.4km인데, 주풍향의 기류가 기온을 저감 혹은 상승시킬 수 있는 다양한 토지이용, 비오톱을 통과하면서 두 시계열 자료가 구조적인 차이가 발생할 가능성이 높다. 둘째, 비록 주풍향을 고려하여 분석샘플을 결정하였더라도, 풍향을 동서남북의 대단위로 구분함으로써 풍상쪽의 바람이 O_k^p 지점으로 대부분 도달하였으리라고 예상하기는 쉽지 않다. 즉, 각 방위의 범위가 넓은 것에 비하여 그 범역 내에 극히 제한적인 수의 AWS가

존재함으로써(〈그림 2〉 참조), 바람의 이동경로를 높은 신뢰성으로 추적하는 것은 어려운 상황이다. 만약 현재보다 조밀한 기상측정망이 설치·운영되고 기류 이동경로 주변의 지표상 열원 특성을 파악할 수 있다면, 연구의 제약사항을 보완되어 보다 의미 있는 결과를 산출할 수 있을 것으로 예상된다.

이상과 같은 본 연구의 결과와 한계는 다음과 같은 향후 연구방향을 제시한다. 첫째, 2005년 외의 다른 연도에 대하여 연구를 진행함으로써 연도별 분포 특성과 패턴 분석을 통하여 기온이동현상을 보다 체계적으로 입증하는 것이 필요하다. 둘째, 같은 주풍향을 유지하더라도 동질성이 확인된 지점들과 그렇지 않은 지점들의 발생 원인을 세밀히 파악하는 노력이 필요하다. 마지막으로, 대기 온도에 영향을 미치는 지역적 요인을 파악하여 지역적 온도변화요인을 제거한 순수한 기온이동현상의 분석도 필요하다.

이와 같은 연구가 진행된다면 서울시의 바람통로 및 그에 따른 기온의 변화현상을 공간적으로 밝혀내는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 바람과 기온을 동시에 고려한 기후지도 제작 및 이를 활용한 도시계획적 관리정책을 수립하는 데 효과적인 수단을 제공할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

기상청, 2010, 「자동기상관측월보(2010. 1)」
 김영문·유기표·김윤석, 1998, “소형 경계층 풍동을 이용한 경계층 형성”, 『한국풍공학회 학술발표회 논문집』, 93~99.
 김학열, 2003, “도시환경인자에 따른 대기온도 변화 연구”, 『국토계획』, 38(5): 259~269.

부경은·전영신·박지용·조하만·권원태, 1999, “자동기상관측자를 이용한 서울의 기온수평분포 분석”, 『한국기상학회지』, 35(3): 335~343.
 엄정희·우정현·양병이, 2001, “바람통로를 활용한 도시녹지계획에 관한 연구”, 『국토계획』, 36(1): 231~241.
 윤용한, 2004, “녹지의 토지 피복 현황과 식재 층위 구조가 미기상 조절효과에 미치는 영향”, 『한국산림휴양학회지』, 8: 25~33.
 윤용한·박봉주·김원태·조현수, 2008, “토지이용 행태에 따른 계절별 열섬현상의 강도”, 『국토계획』, 43(4): 21~30.
 전지현·박석봉, 2005, “바람길 조성을 위한 도시 미기후 측정 분석”, 『한국태양에너지학회 논문집』, 25(4): 111~118.
 정주희·김유근·문운섭·황미경, 2007, “수도권지역 대기질 예측을 위한 기상장 모델의 바람장과 온도장 비교 연구”, 『한국대기환경학회지』, 23(6): 640~652.
 조하만·조천호·정귀원, 1988, “서울의 도시화에 따른 온도의 변화”, 『한국기상학회지』, 24(1): 27~37.
 Alexandersson, H., 1986, “A homogeneity test applied to precipitation data”, *Journal of Climatology*, 6: 661~675.
 Alexandersson, H. and Moberg, A., 1997, “Homogenization of Swedish temperature data, Part I”, *International Journal of Climatology*, 17: 25~34.
 Buishand, T. A., 1982, “Some methods for testing the homogeneity of rainfall records”, *Journal of Hydrology*, 58: 11~27.
 Ca, V. T., Asaeda, T., and Abu, E. M., 1998, “Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park”, *Energy and Buildings*, 29: 83~92.
 Carnahan, W. H. and Larson, R. C., 1990, “An analysis of an urban heat sink”, *Remote Sensing of Environment*, 33: 65~71.
 Cermak, J.E., 2003, “Wind-tunnel development and trends in applications to civil engineering”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(3): 355~370.
 Gal, T. and Unger J., 2009, “Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter

- mapping in a large urban area”, *Building and Environment*, 44: 198~206.
- Kueppers, L. M., Snyder, M. A., Sloan, L. C., Cayan, D., Jin, J., Kanamaru, H., Kanamitsu, M., Miller, N. L., Tyree, M., Du, H., and Weare, B., 2008, “Seasonal temperature responses to land-use change in the western United States”, *Global Planetary Change*, 60: 250~264.
- Moreno - Garcia, M. C., 1994, “Intensity and form of the urban heat island in Barcelona”, *International Journal of Climatology*, 14: 705~710.
- Ng, E., 2009, “Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities-Air Ventilation Assessment(AVA) of Hong Kong”, *Building and Environment*, 44: 1478~1488.
- Oke, TR., 1987, *Boundary layer climates*, Cambridge University Press.
- Pauleit, S., Ennos, R., and Golding, Y., 2005, “Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change-a study in Merseyside, UK”, *Landscape and Urban Planning*, 71: 295~310.
- Pettitt, A. N., 1979, “A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem”, *Applied Statistics*, 28: 126~135.
- Plate, E. J., 1982, “Wind tunnel modeling of wind effects in engineering”, In Plate E. J. ed., *Engineering Meteorology*, 573~639, Amsterdam: Elsevier.
- Shashua-Bar, L. and Hoffman, M. E., 2000, “Vegetation as a climatic component in the design of an urban street(An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees)”, *Energy and Buildings*, 31: 221~235.
- Takakura, K., Kitade, S., and Goto, E., 2000, “Cooling effect of greenery cover over a building”, *Energy and Building*, 31: 1~6.
- Von Neumann, J., 1941, “Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance”, *The Annals of Mathematical Statistics*, 13: 367~395.
- Wanner, H. and Hertig, J. A., 1984, “Studies of urban climates and air pollution in Switzerland”, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(12): 1614~1625.
- Wong, M. S., Nichol, J. E., To, P. H., and Wang, J., 2010, “A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis”, *Building and Environment*, 45: 1880~1889.

원 고 접 수 일 : 2010년 4월 28일
 1차심사완료일 : 2010년 5월 17일
 최종원고채택일 : 2010년 6월 1일