

도시와 농촌 거주 노령인구의 시간활동양상 차이와 초미세먼지 (PM_{2.5}) 노출

임채윤* · 곽수영* · 이기영***† · 홍윤철***

*서울대학교 보건대학원 환경보건학과

**서울대학교 보건환경연구소

***서울대학교 의과대학 예방의학교실

Time-activity Patterns and PM_{2.5} Exposure of the Elderly in Urban and Rural Areas

Chaeyun Lim*, Sooyoung Guak*, Kiyoung Lee***†, and Yun-Chul Hong***

*Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

**Institute of Health and Environment, Seoul National University, Seoul, Korea

***Institute of Environmental Medicine, College of Medicine, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Objectives: Personal exposure to air pollution is affected by contact over time and by location. The purpose of this study was to determine the relationship between personal exposure to PM_{2.5} and the time-activity patterns of the elderly in urban and rural areas.

Methods: A total of 44 elderly participants were recruited for a 24-hour PM_{2.5} personal exposure measurement. Twenty-four were from Seoul (urban area) and 20 were from Asan (rural area). Energy expenditure and spatiotemporal positioning were monitored through PM_{2.5} measurement. Spearman correlation analysis was conducted to determine the relationship between PM_{2.5} and time-activity pattern.

Results: Daily average PM_{2.5} personal exposures were 19.1 ± 9.7 µg/m³ in Seoul and 29.1 ± 16.9 µg/m³ in Asan. Although outdoor exposure was higher in Seoul than in Asan, residential indoor exposure was higher in Asan than in Seoul. Higher PM_{2.5} personal exposure in Asan could be explained by longer time in residential indoor environments and higher indoor PM_{2.5} concentrations. Seoul elderly had higher energy expenditure, which may be due to the use of mass transportation.

Conclusion: Personal exposure to PM_{2.5} was higher among Asan elderly than Seoul elderly because of high residential indoor concentrations and longer residential time. Lack of energy spent and higher personal exposure to PM_{2.5} might have led to higher risk among the Asan elderly.

Keywords: Air pollution, personal exposure, PM_{2.5}, regional variation, time-activity patterns

I. 서 론

사람들은 하루 중 상당 부분의 시간을 각종 대기

오염물질의 오염원이 존재하는 다양한 실내 환경에서 머물며 실외에서 교통 수단을 이용하는 도중에도 높은 농도의 대기오염물질에 노출된다.^{1,2)} 이에 따라

†Corresponding author: Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Tel: 82-2-880-2735, Fax : 82-2-762-2888, E-mail: cleanair@snu.ac.kr

Received: 9 September 2015, Revised: 27 December 2015, Accepted: 20 January 2016

대기오염물질의 개인노출은 개인이 속한 장소와 머문 시간에 큰 영향을 받으며 대기오염물질의 개인노출을 파악하기 위해서는 개인별 시간활동양상 (Time-activity patterns)의 파악이 중요하다.^{3,4)} 실제로 서울에 거주하는 시민들의 시간활동양상을 10가지의 군집으로 분류하여 각 군집의 초미세먼지 개인노출을 측정된 결과 각 군집에 따라 초미세먼지의 개인노출이 4배 이상 유의하게 다른 것으로 나타나 사람들의 시간활동양상이 초미세먼지의 개인노출에 영향을 미침을 보였다.⁵⁾

대기오염물질의 개인노출에 영향을 미치는 시간활동양상은 개인의 인구학적, 사회·경제적 특성 등에 따라 크게 달라질 수 있다.⁶⁾ 특히 이 중에서 거주 지역은 개인의 시간활동양상에 영향을 미쳐 지역에 따른 대기오염물질의 개인노출의 차이를 야기한다.^{7,9)} 특히 도시 간 상대적인 대도시화의 차이는 각 지역에 거주하는 주민들의 대기오염 개인노출에 영향을 미치는 큰 요인 중 하나로 밝혀져 있다.¹⁰⁾ 실제로 미국의 한 연구에서는 도시 간 초미세먼지 개인노출의 유의한 차이를 보였으며, 이는 도시 간 대도시화의 차이, 공업화 및 교통량의 차이 등으로 개인의 활동 패턴이 달라지거나 노출되는 오염원이 달라지는 원인에 의한 것으로 보고되었다.¹¹⁾

거주지역 외에 개인의 연령에 따른 시간활동양상의 차이 또한 대기오염물질의 개인노출 차이를 야기할 수 있다.⁶⁾ 나이가 증가함에 따라 사람들이 실내에 머무는 시간이 길어지며, 실외에서 이동하는 시간은 줄어드는 경향을 나타내는 것으로 밝혀진 바 있다.^{12,13)} 이렇게 나이에 따른 시간활동양상의 변화는 대기오염물질의 개인노출에도 영향을 미치게 되는데, 미국 Multi Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA) 연구에서는 45-84세의 연령 분포를 갖는 집단에서의 초미세먼지 개인노출을 비교한 결과 연령이 높아질수록 초미세먼지의 개인노출이 증가하는 것으로 보고되었다.¹⁴⁾ 이는 초미세먼지에 취약한 계층인 노령인구집단이 다른 인구집단과 다른 시간활동양상을 보이며 그에 따라 높은 농도의 초미세먼지에 노출될 수 있음을 나타낸다. 이와 같이 대기오염물질의 개인노출에 영향을 주는 개인별 시간활동양상은 지역, 연령 등의 요인에 따라 달라질 수 있다.

본 연구에서는 초미세먼지의 개인노출과 그에 영향을 미치는 개인의 시간활동양상간의 관계를 파악

하고 시간활동양상과 그에 영향을 미치는 요인들의 관계를 파악하고자 하였다. 따라서 지역의 차이와 연령이 시간활동양상에 영향을 미친다고 가정하였으며 이를 위해 측정을 계획하였다. 본 연구에서는 도시화의 진행 차이에 따라 구분된 두 지역에 거주하는 노령인구의 시간활동양상의 차이를 알아보고 그에 따라 달라지는 초미세먼지의 개인노출을 알아보고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 측정 대상 및 기간

노령인구의 시공간적 활동 특성 및 그에 따른 초미세먼지의 개인노출을 파악하기 위해 측정을 진행하였다. 개인별 시공간적 활동 특성인 위치 및 운동량 (Energy expenditure)과 초미세먼지 개인노출의 지역간 차이를 알아보기 위하여 도시 지역 (서울) 거주 노령인구 24명, 농촌 지역 (아산) 거주 노령인구 20명을 대상으로 총 44명의 노령인구의 위치, 운동량 및 초미세먼지의 개인노출을 측정하였다. 도시화가 진행된 정도의 차이를 뚜렷하게 확인할 수 있는 두 지역을 선정하기 위하여 도시 지역은 가장 도시화가 진행된 서울을 선정하였으며, 농촌 지역은 측정의 편의성과 접근성을 고려하여 아산을 선정하였다. 도시 지역은 서울특별시 종로구 및 성북구 거주 60세 이상의 노인 (평균연령 74.4±5.0 세)을 대상으로 하였으며, 농촌 지역은 충청북도 아산시의 면 단위에 거주하는 60세 이상의 노인 (평균연령 75.0±4.9세)을 대상으로 하였다. 본 연구에서는 노령인구의 생활 패턴이 거주지 유형이나 측정 요일에 따라 유의하게 달라지지 않는 것을 확인하였으며, 그에 따라 노령인구의 거주지 유형이나 측정 요일을 구분하여 측정을 진행하지 않았다. 측정은 2015년 1월, 2월 두 달 간 주말을 제외한 주중에 진행되었으며 한 개인 당 24시간의 실시간 데이터를 수집하였다.

2. 측정 방법

연구 참여자의 실시간 위치 정보는 GPS 장비 Ascen GPS Logger (GPS 741, Ascen Industry, Korea)를 이용하여 파악하였다. GPS 수신기는 위성으로부터 발사되는 전파의 지연시간을 측정하고 궤도로부터의 거리에서 현재의 위치를 구하는 방법을 사용하며, 정

확도 3.0 m 이내, 민감도 -165 dBm으로 사용자의 위치를 파악한다. 실내 공간 내에 머무르거나 터널 등을 통과할 때에는 위성신호 수신률이 74.5%로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 GPS 수신기 제조업체인 ‘아센코리아(ASEN Korea)’의 웹 페이지에서 제공하는 GPS 수신기 소프트웨어 ‘Data Logger’를 이용하여 날짜, 시간, 위도, 경도, 고도, 속도, 좌표계산에 이용된 위성의 수(used number of satellites, used-NSAT) 정보를 수신하도록 설정하였으며, 5초마다 한번씩 위성정보를 수신하도록 하였다.

연구 참여자의 운동량은 가속도계 (GT3X-Plus Activity Monitor, ActiGraph, Pensacola, FL, USA)를 사용하여 측정하였다. 측정간격은 5초로 하여 측정자의 활동 및 걸음을 측정하였으며, 24시간 중 취침시간을 제외한 시간에 가속도계를 가속도계 전용 벨트에 부착하여 측정자의 허리에 착용한 상태로 생활하게끔 하였다. 가속도계 제조 회사인 ActiGraph사에서 제공하는 소프트웨어 ‘ActiLife’를 사용하여 수집한 데이터를 다운로드 받도록 하였다.

연구 참여자의 초미세먼지 개인노출 측정을 위한 장비로는 Personal Aerosol Exposure Monitor (MicroPEM version 3.2A, RTI International, Research Triangle Park, NC, USA)를 사용하였다. 장비는 공기역학적 직경이 2.5 μm 보다 작은 입자의 중량 농도를 측정하며, 유량은 0.5 L/min로 유지되도록 하였다. 초미세먼지 측정 장비는 연구 참여자의 호흡기 근처에 위치하도록 하는 것이 바람직하나, 연구 참여자의 일상 생활에 불편함을 주지 않도록 어깨에 매는 가방에 고정하여 연구 참여자의 허리 위치에서 초미세먼지의 개인노출을 측정하도록 하였다. 측정된 24시간동안 1분 간격으로 초미세먼지 개인노출 데이터를 수집하도록 하였으며, 수집된 데이터는 RTI사에서 제공하는 소프트웨어인 ‘Docking Station Software’를 이용하여 기기로부터 다운로드 받도록 하였다.

3. 분석 방법

측정된 GPS, 가속도, 초미세먼지 데이터는 1분 간격으로 통합하여 분석에 사용하였다. 전체 44명의 노령인구 중 아산 거주 노령인구 한 명의 데이터는 측정 기기의 오류로 인하여 데이터가 수집되지 않아 데이터 분석 과정에서 제외되었으며, 따라서 43명의

노령인구 데이터를 분석에 사용하였다. GPS 데이터를 분석하여 개인별 자택 재실 시간 비율과 총 이동거리를 산출하였다. GPS 데이터로부터 연구 참여자가 머문 장소를 자택 실내, 기타 실내, 실외의 세 공간으로 구분하기 위하여 김태현 외, 2012에서 개발된 구분 방법을 사용하였다.¹⁵⁾ 자택 재실시간 비율은 GPS 데이터가 측정된 전체 시간 대비 자택에 머무른 것으로 처리된 데이터가 지속된 시간의 비율로 산출하였다. 개인별 총 이동거리는 GPS 데이터의 위도와 경도를 통해 1분 간격으로 이동한 거리를 모두 합하여 산출하였다.

가속도계로부터 확보된 데이터를 통해 개인별 운동량을 산출하기 위해 가속도계 제작 회사인 ActiGraph사에서 제공하는 운동량 산출 매뉴얼을 참조하였다. 본 연구에서 사용된 개인별 운동량 계산식을 아래 수식 (a)에 나타내었다. 수식 (a)를 통해 전체 측정시간에 대한 개인별 운동량을 산출하였다.

$$EE = \frac{\sum Axis \times 0.0000191 \times BM}{Sampling\ Time} \quad (a)$$

EE = Energy Expenditure (kcal/h)

BM = Body Mass in Kg

Axis 1 = Value of the axis “x” of accelerometer

Sampling Time = Total sampling time (h)

초미세먼지의 개인노출은 1분 간격으로 측정된 데이터를 분석에 사용하였다. GPS 데이터로부터 산출된 자택 재실시간 비율과 총 이동거리, 가속도계 데이터로부터 산출된 운동량, 측정된 초미세먼지 개인노출의 지역간 차이를 알아보기 위하여 Wilcoxon 비모수 검정법을 사용하였다. 또한 자택 재실시간 비율, 총 이동거리, 운동량, 초미세먼지 개인노출 간의 상관 관계를 파악하기 위하여 Spearman 상관 분석을 진행하였다. 통계 분석을 위한 소프트웨어로는 SAS 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 사용하였으며, 통계적 유의성을 검증하기 위해 0.05 이하의 p값을 사용하였다.

미세환경에 따른 초미세먼지의 개인노출을 알아보기 위해 수식 (b)를 이용하였다. GPS 데이터로 구분된 자택 실내, 기타 실내, 실외에서의 초미세먼지 개인노출을 각각 산출한 후, 전체 초미세먼지 개인노출 중 자택 실내와 실외에서 개인노출의 기여도를

Table 1. Descriptive statistics of residential indoor time proportion, total traveled distance, energy expenditure and PM_{2.5} personal exposure.

		N	Mean ± SD	25%	50%	75%
Residential indoor time proportion (%)	Seoul	24	75.9 ± 17.4	62.4	81.7	88.3
	Asan*	19	84.3 ± 14.5	72.2	90.1	94.9
	Total	43	80.1 ± 16.4	64.5	85	91
Total traveled distance (km)	Seoul	24	6.6 ± 5.5	1.3	4.7	10.2
	Asan**	19	2.4 ± 3.5	0.1	0.7	2.3
	Total	43	7.7 ± 19.9	0.3	2.3	6.7
Energy expenditure (kcal/h)	Seoul	24	11.5 ± 5.0	6.6	11.8	15.2
	Asan*	19	8.4 ± 4.4	4.1	7.9	10.8
	Total	43	9.9 ± 4.9	6.1	8.9	14.2
PM _{2.5} personal exposure (µg/m ³)	Seoul	24	19.1 ± 9.7	8.6	19.1	26.1
	Asan	19	29.1 ± 16.9	17.3	23.8	34.9
	Total	43	24.1 ± 14.5	13.2	22.9	28.9

*: *p*-value of Wilcoxon test < .05, **: *P* < .01

산출하여 자택 실내 및 실외에서의 초미세먼지 개인 노출이 전체 개인노출에 미치는 영향에 대해 알아보 고자 하였다.

$$PE = C_{RI} \times T_{RI} \times C_{OI} + T_{OI} \times C_O + T_O \quad (b)$$

PE = Personal exposure
RI = Residential indoor
OI = Other indoor
O = Outdoor

III. 결 과

전체 43명의 노령인구를 대상으로 측정된 데이터를 통해 산출한 자택 재실시간 비율, 총 이동거리, 운동량, 초미세먼지 개인노출을 Table 1에 나타내었다. 서울에 거주하는 노령인구 24명에 대한 자택 재실시간 비율의 산술평균은 75.9±17.4%이었다. 아산에 거주하는 노령인구 19명에 대한 자택 재실시간 비율의 산술평균은 84.3±14.5%로, 노령인구의 자택 재실시간은 아산이 서울보다 유의하게 높았다 (Wilcoxon 비모수 검정법, *p*<0.05). 서울에 거주하는 노령인구 24명에 대한 총 이동거리의 산술평균은 6.6 ± 5.5 km이었으며, 아산에 거주하는 노령인구 19명에 대한 총 이동거리의 산술평균은 2.4±3.5 km로 서울보다 통계적으로 유의하게 낮았다 (*p*<0.01). 서울에 거주하는 노령인구 24명에 대한 운동량의 산술평균

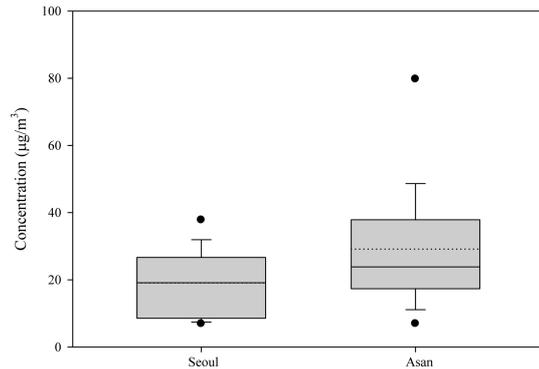


Fig. 1. Difference of daily average PM_{2.5} personal exposure (µg/m³) in Seoul and Asan. In box plot, the full line represents median value, the dotted line represents mean value, while the upper and lower ranges of the box represent the 75% and 25% quartiles, respectively; whisker parameters indicate 1.5×the interquartile range; closed circles indicate 5 and 95 percentiles.

은 11.5±5.0 kcal/h이었다. 아산에 거주하는 노령인구 19명에 대한 운동량의 산술평균은 8.4±4.4 kcal/h이었다. 지역에 따른 개인 운동량의 평균은 서울이 아산보다 유의하게 높은 운동량을 보였다(*p*<0.05). 서울에 거주하는 노령인구의 초미세먼지 개인노출의 산술평균은 24명에서 22.5±22.2 µg/m³이었으며, 아산에 거주하는 노령인구 19명의 초미세먼지 개인노출의 산술평균은 29.1±22.7 µg/m³이었다 (Fig. 1).

Table 2. Spearman correlation coefficients among residential indoor time proportion, total traveled distance, energy expenditure and PM_{2.5} personal exposure

	Seoul			Asan		
	Residential indoor time proportion	Total traveled distance	Energy expenditure	Residential indoor time proportion	Total traveled distance	Energy expenditure
Total traveled distance	-0.3			-0.7*		
Energy expenditure	-0.02	0.5*		0.02	-0.4*	
PM _{2.5} personal exposure	0.2	0.3	0.1	-0.3	0.4	-0.003

*: *p*-value of Spearman correlation coefficient < .05

Table 3. Contribution of residential indoor and outdoor personal exposure to entire PM_{2.5} personal exposure in Seoul and Asan

		C (µg/m ³)	T (h)	PE (µg/m ³ × h)	Level of contribution (%)
Seoul	Residential indoor	19.8 ± 11.6	18.2 ± 4.1	373.9 ± 252.0	75.3
	Other indoor	24.7 ± 10.2	3.1 ± 2.7	71.5 ± 59.3	4.1
	Outdoor	34.6 ± 20.8	3.6 ± 3.0	142.2 ± 156.7	20.6
Asan	Residential indoor	27.8 ± 15.2*	20.2 ± 3.6*	548.6 ± 277.4*	68.8
	Other indoor	28.1 ± 11.0	0.5 ± 0.9	18.4 ± 12.6	7.1
	Outdoor	27.3 ± 14.9 *	3.4 ± 3.6	92.8 ± 94.0*	14.1

*: *p*-value of Wilcoxon test < .05

C = Daily PM_{2.5} personal exposure

T = Time in each microenvironment

PE = Time weighted PM_{2.5} personal exposure

아산에 거주하는 노령인구의 초미세먼지 개인노출 평균이 서울에 거주하는 노령인구의 평균보다 높았으나, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다 (*p*=0.08).

초미세먼지 개인노출과 노령인구의 자택 재실시간 비율, 총 이동거리, 운동량 사이의 상관관계에 대한 분석을 진행하였고, Spearman 상관 분석을 이용한 결과를 Table 2에 나타내었다. 전체 노령인구의 자택 재실시간 비율과 총 이동거리의 Spearman 상관계수는 -0.6 (*p*<0.05)으로 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 나타내었다. 전체 노령인구의 자택 재실시간 비율과 운동량, 자택 재실시간 비율과 초미세먼지 개인노출의 Spearman 상관계수는 각각 -0.1 (*p*=0.5), 0.004 (*p*=0.9)로 낮은 상관성을 나타내었으며 통계적으로 유의하지 않았다. 총 이동거리와 운동량, 총 이동거리와 초미세먼지 개인노출, 운동량과 초미세먼지 개인노출의 Spearman 상관분석 결과 세 경우 모두 낮은 상관성을 나타내었으며 통계적으로

유의하지 않았다. 따라서 노령인구의 재실시간이 길수록 노령인구가 하루 동안 이동한 거리는 줄어드는 것으로 나타났다.

지역별로 연구 참여자를 구분하여 동일한 상관분석을 진행한 결과는 다음과 같았다. 서울에 거주하는 노령인구의 경우 자택 재실시간과 총 이동거리, 운동량, 초미세먼지 개인노출의 Spearman 상관계수는 각각 -0.3 (*p*=0.2), -0.02 (*p*=0.9), 0.2 (*p*=0.4)으로 통계적으로 유의한 결과를 보이지 않았다. 그러나 총 이동거리와 운동량 사이의 Spearman 상관계수는 0.5 (*p*<0.05)로 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 총 이동거리와 초미세먼지 개인노출, 운동량과 초미세먼지 개인노출은 통계적으로 유의한 관계를 나타내지 않았다. 따라서 서울 거주 노령인구의 경우 총 이동거리가 증가할수록 개인의 운동량 또한 같이 증가하는 것으로 확인되었다. 아산에 거주하는 노령인구의 경우 자택 재실시간과 총 이동거리의 Spearman 상관계수가 -0.7 (*p*<0.05)로

통계적으로 유의한 음의 상관관계를 보였다. 또한 총 이동거리와 운동량의 Spearman 상관계수가 -0.4 ($p < 0.05$)로 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 나타내었다. 이 외의 결과들 간에는 통계적으로 유의한 상관관계를 보이지 않았다. 따라서 아산 거주 노령인구의 경우 자택 재실시간이 길수록 총 이동거리가 줄어드는 것으로 확인되었고, 총 이동거리가 증가할수록 개인의 운동량은 줄어드는 관계를 보이는 것으로 확인되었다.

지역에 따른 초미세먼지의 개인노출을 파악하기 위해 자택 실내에서와 실외에서의 초미세먼지 개인노출 및 전체 개인노출에의 기여도 산출 결과를 Table 3에 나타내었다. 서울 거주 노령인구에서 자택 실내의 초미세먼지 개인노출은 $19.8 \pm 11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 아산의 경우 $27.8 \pm 15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 자택 실내의 초미세먼지 개인노출은 아산이 서울보다 높았다 ($p < 0.05$). 이로부터 산출된 초미세먼지의 자택 실내 시간 가중 개인노출은 서울 거주 노령인구에서 $373.9 \pm 252.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ 이었다. 아산에 거주하는 노령인구에서 자택 실내 초미세먼지 시간 가중 개인노출은 $548.6 \pm 277.4 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ 이었다. 자택 실내에서의 초미세먼지 개인노출은 아산이 서울보다 통계적으로 유의하게 높은 결과를 보였다($p < 0.05$). 서울 거주 노령인구에서 실외의 초미세먼지 개인노출은 $34.6 \pm 20.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 아산의 경우 $27.3 \pm 14.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실외 초미세먼지 개인노출은 서울이 아산보다 높았다 ($p < 0.05$). 이로부터 산출된 초미세먼지의 실외 시간 가중 개인노출은 서울 거주 노령인구에서 $142.2 \pm 156.7 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ 이었다. 아산에 거주하는 노령인구에서 실외 시간 가중 개인노출은 $92.8 \pm 94.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ 이었다. 실외에서의 초미세먼지 개인노출은 서울이 아산보다 통계적으로 유의하게 높은 결과를 보였다($p < 0.05$).

IV. 고 찰

노령인구를 대상으로 측정을 수행한 결과 자택 재실시간과 총 이동거리 사이의 상관성 결과로부터 지역에 따른 차이를 파악할 수 있었다. 서울 거주 노령인구의 경우 개인별 운동량과 총 이동거리 사이에 통계적으로 유의한 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 지역에 따라 차이가 나는 원인을 파악하기 위해 GPS 데이터의 속도를 통해 교통수단의 종류를

구분하여 살펴보았다. 서울에 거주하는 노령인구는 평균 속도가 $33.2 \pm 21.9 \text{ km/h}$ 인 대중교통을 주로 이용하는 것으로 파악되었으며, 자택과 기타 실내 사이 혹은 기타 실내와 다른 기타 실내의 거리가 아산의 경우에 비해 짧아 도보의 이용 비율이 높았다. 그에 따라 대중교통을 이용하는 경우를 제외하면 24명 중 18명의 연구 참여자가 이동의 상당부분을 도보로 이동한 것으로 파악되었다. 아산 거주 노령인구의 경우 개인별 운동량과 총 이동거리 사이에 통계적으로 유의한 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 아산에서는 자택과 기타 실내 혹은 기타 실내와 다른 기타 실내로 걸어서 이동하는 연구 참여자가 19명 중 6명으로 서울에 비해 실내 미세환경 간 이동을 도보가 아닌 교통수단을 주로 이용한 것으로 확인되었다. 서울에 비해 트럭을 포함한 자가용이나 택시를 이용하는 경우도 많아, 대중교통을 이용하기 위한 도보 이용이 더욱 줄어든 것으로 파악되었다.

자택 재실시간 비율과 총 이동거리 간의 상관성 분석에서 아산 거주 노령인구의 경우 유의한 음의 상관성 결과를 나타내었다. 서울 거주 노령인구에서 자택 재실시간이 길어질수록 총 이동거리가 유의하게 줄어들지 않은 원인은 예상범위 밖의 측정값을 가진 두 명의 측정결과 때문인 것으로 보인다. 연구 참여자 한 명의 경우 자택 재실시간 비율이 47.9%임에도 불구하고 총 이동거리가 0.3 km로 측정되었다. 이에 대한 원인을 찾아본 결과 자택으로부터 기타 실내까지 직선거리 3.6 km의 실외 왕복 이동 중 GPS 기록이 되어 있지 않았다. 이는 이동수단에 따른 기기의 위성신호 수신 오류인 것으로 사료된다. 다른 한 명의 경우 자택 재실시간 비율이 92.7%로 서울 거주 노령인구 중 가장 높은 비율을 보였으나, 총 이동거리 역시 12.8 km로 서울 거주 노령인구 중 3번째로 많이 이동함을 보였다. GPS 데이터를 살펴본 결과 전체 일과 중 대부분의 시간을 자택과 기타 실내 각 한 곳씩 총 2 장소의 실내 환경에서 머문 것으로 확인되었다. 자택과 기타 실내를 왕복하여 이동한 거리는 약 12 km으로 파악되었으며, 이동할 때의 평균 속도는 $35.2 \pm 18.7 \text{ km/h}$ 이었다. 따라서 이 연구 참여자는 시내버스나 셔틀버스를 이용하여 자택과 기타 실내 환경 사이를 왕복 이동하였으며, 두 실내 환경에서 머문 시간 자체가 길어 위와 같은 결과를 보인 것으로 사료된다.

아산에 거주하는 노령인구의 초미세먼지 개인노출은 서울보다 높았다. 일반적으로 서울에 비해 아산은 그 규모와 인구 밀도 등이 매우 작은 소도시이며 주변에 논과 밭이 넓게 분포한 지역이기 때문에 초미세먼지의 노출이 서울보다 낮을 것으로 기대하였다. 기존 국외 연구 결과에서도 유사한 결과를 찾아볼 수 있었다. 미국의 27개의 도시들에서 도시 간 일평균 초미세먼지 개인노출 차는 3.8-43.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지역에 따른 초미세먼지 개인노출의 유의한 차이를 보였으며 이는 도시 간 공업화, 대도시화의 차이, 교통량의 차이 등의 원인으로 인한 것으로 보고되었다.¹¹⁾ 미국 미네아폴리스 내 가장 인구밀도가 높은 지역에서 초미세먼지의 개인노출이 30.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 인구밀도가 가장 낮은 지역의 값인 24.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 나타나 지역 간 초미세먼지의 개인노출 차가 있음을 보고하였다.¹⁶⁾

아산에 거주하는 노령인구의 초미세먼지 개인노출의 평균이 서울보다 높은 것은 자택 재실시간이 서울에 비해 길고 자택 내 초미세먼지 개인노출이 높기 때문인 것으로 보인다. GPS로 구분된 자택 실내에 머문 시간에서의 초미세먼지 개인노출은 아산 거주 노령인구가 서울 거주 노령인구보다 더 높게 나타났다. 실외에서의 초미세먼지 개인노출은 서울이 아산보다 유의하게 높았지만 전체 개인노출에의 기여도는 자택 실내에 비해 다소 낮게 나타났다. 이는 본 연구에서 측정된 노령인구의 초미세먼지의 개인노출이 자택 실내에서의 개인노출에 큰 영향을 받으며 자택 실내를 제외한 다른 미세환경의 경우 머문 시간 자체가 짧아 전체 개인노출에 미치는 영향이 낮은 것으로 볼 수 있다. 자택 재실시간 외에도 자택 내 초미세먼지 농도 수준의 차이 또한 초미세먼지의 개인노출 차이를 야기하는 것으로 나타났다. 자택 내 초미세먼지 농도 값은 아산이 서울보다 40.4%가 높았으며, 이러한 초미세먼지 농도 수준의 차이와 자택 재실시간의 차이로 인해 아산 거주 노령인구의 초미세먼지 개인노출이 더 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이러한 개인노출의 차이는 노령인구의 자택 재실시간과 일일 총 이동거리를 종합하여 설명할 수 있었다. 자택 재실시간의 경우 아산이 서울보다 그 값이 더 높았는데 이에 따라 아산 거주 노령인구가 자택에서의 조리활동, 난방 등의 활동으로 인해 발생한 초미세먼지에 더 오래 노출되었

을 것으로 사료된다.^{17,18)} 또한 일일 총 이동거리가 서울 거주 노령인구에서 더 높은 값을 나타낸 것으로 볼 때, 서울 거주 노령인구의 경우 아산 거주 노령인구보다 주택 외부에서 이동한 거리가 길어 그만큼 실내에서의 초미세먼지 노출이 아산보다 낮아져 전체 개인노출이 아산보다 낮게 나타난 것으로 보인다. 이를 통해 대기 중 초미세먼지 개인노출은 서울이 아산보다 높았지만 자택 실내에서 머문 시간이 길어 자택 실내에서 더 오래 노출된 아산 거주 노령인구의 전체 개인노출이 서울보다 높게 나타난 것을 설명할 수 있었다. 자택 실내에는 초미세먼지의 24시간 개인노출에 가장 큰 기여도를 보인 미세환경으로, 사람들이 머무는 시간 자체가 타 미세환경에 비해 상대적으로 길기 때문에 초미세먼지의 농도 수준은 자택 실내가 낮다고 할지라도 초미세먼지 전체 개인노출에의 기여도는 자택 실내가 상대적으로 높아지는 것을 확인하였다.⁹⁾

본 연구 측정 진행 시 측정기기 숫자의 제한, 제한된 연구 참여자 수 등 한정된 측정 여건으로 인해 노령인구 44명만을 대상으로 연구를 진행하였으며, 각 노인 별 측정은 한 번만 수행되었다. 그러나 이렇게 상대적으로 작은 샘플 크기와 적은 측정 횟수로 인해 몇 가지 연구의 한계점이 발생하였다. 본 연구에서는 각 노인 별 반복 측정을 진행하지 않아 한 노인이 측정 당일 평소와 다른 특별한 생활 패턴을 보인 경우에 대해 고려하지 않았다. 이는 해당 지역의 전체 결과에 영향을 줄 수 있기 때문에 본 연구 결과의 일반화에 어려움을 주는 요인으로 사료된다. 본 연구에서는 두 지역에 거주하는 노령인구 선정 시 선정된 노령인구가 해당 지역의 전체 노령인구를 완전히 대표할 수 없다는 한계점이 있었다. 따라서 분석 결과를 해당 지역의 전체 노령인구를 대상으로 일반화시키는 데 어려움이 있을 것으로 사료된다. 하지만 선정된 노령 인구가 해당 지역에서 무작위로 선정되었다는 점을 감안할 때, 본 연구 결과로 나타난 초미세먼지 개인노출의 경향이 해당 지역의 전체 노령인구를 대상으로 측정했을 때에도 유사하게 나타날 수 있다고 사료된다. 이에 대한 근거를 마련하기 위해 두 지역에 거주하는 노령인구의 대표성을 확보하기 위한 추가 측정이 필요할 것으로 보인다. 추후 진행될 연구에서는 연구 참여자를 추가적으로 모집하여 분석을 위한 더욱 큰 단위의 샘플

플을 확보할 수 있다면 통계적으로 더욱 의미 있는 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

V. 결 론

측정된 자료를 통해 도시화의 진행 차이에 따라 구분된 두 지역에 거주하는 노령인구의 시간활동양상의 차이를 파악하고, 그에 따라 달라지는 초미세먼지의 개인노출을 알아보고자 하였다. 도시인 서울에 거주하는 노령인구는 농촌인 아산에 거주하는 노령인구에 비해 자택 외의 장소에서 오랜 시간을 보내며 하루 동안 이동하는 거리가 더 길었다. 실외에서의 초미세먼지 개인노출은 도시화가 상대적으로 많이 진행된 서울이 아산보다 높게 나타났지만, 자택 실내에서 더 오랜 시간을 보내며 더 높은 농도의 초미세먼지에 노출된 아산 거주 노령인구에서 초미세먼지의 개인노출이 더 높게 나타난 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 정부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 ‘노령인구의 환경유해인자 노출 및 건강영향 연구 (IV)’(No. NIER-SP2015-003)의 일환으로 수행되었습니다.

본 연구를 위해 24시간 동안의 측정에 참여해주신 서울과 아산 지역 44명의 주민들과 측정을 위해 함께 수고해 준 연구진(이대엽, 김혜진, 반현경, 이세원)에 감사의 말씀을 전합니다.

References

1. Sarnat SE, Coull BA, Schwartz J, Gold DR, Suh HH. Factors affecting the association between ambient concentrations and personal exposures to particles and gases. *Environmental Health Perspectives*. 2006; 114(5): 649-54.
2. Lee K, Sohn H, Putti K. In-vehicle exposures to particulate matter and black carbon. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2010; 60(2): 130-136.
3. Dons E, Panis LI, Van Poppel M, Theunis J, Willems H, Torfs R, et al. Impact of time-activity patterns on personal exposure to black carbon. *Atmospheric Environment*. 2011; 45(21): 3594-3602.
4. Buonanno G, Stabile L, Morawska L. Personal exposure to ultrafine particles: the influence of time-activity patterns. *Science of the Total Environment*. 2014; 468-469: 903-907.
5. Lim S, Kim J, Kim T, Lee K, Yang W, Jun S, et al. Personal exposures to PM_{2.5} and their relationships with microenvironmental concentrations. *Atmospheric Environment*. 2012; 47: 407-412.
6. National Institute of Environmental Research (NIER). Research for personal exposure assessment by time activity patterns on a nation. Korea National Institute of Environmental Research. 2010.
7. Querol X, Alastuey A, Moreno T, Viana M, Castillo S, Pey J, et al. Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) across Spain 1999-2005. *Atmospheric Environment*. 2008; 42(17): 3964-3979.
8. Dionisio KL, Arku RE, Hughes AF, Vallarino J, Carmichael H, Spengler JD, et al. Air pollution in Accra neighborhoods: spatial, socioeconomic, and temporal patterns. *Environmental Science & Technology*. 2010; 44(7): 2270-2276.
9. Baxter LK, Burke J, Lunden M, Turpin BJ, Rich DQ, Thevenet-Morrison K, et al. Influence of human activity patterns, particle composition, and residential air exchange rates on modeled distributions of PM_{2.5} exposure compared with central-site monitoring data. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2013; 23(3): 241-247.
10. Qu W, Arimoto R, Zhang X, Zhao C, Wang Y, Sheng L, et al. Spatial distribution and interannual variation of surface PM 10 concentrations over eighty-six Chinese cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010; 10(12): 5641-5662.
11. Pinto JP, Lefohn AS, Shadwick DS. Spatial variability of PM_{2.5} in urban areas in the United States. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2004; 54(4): 440-449.
12. Brasche S, Bischof W. Daily time spent indoors in German homes—baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2005; 208(4): 247-253.
13. Schweizer C, Edwards RD, Bayer-Oglesby L, Gauderman WJ, Ilacqua V, Jantunen MJ, et al. Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2007; 17(2): 170-181.
14. Diez Roux AV, Auchincloss AH, Dvonch JT,

- Brown PL, Barr RG, Daviglius ML, et al. Associations between recent exposure to ambient fine particulate matter and blood pressure in the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *Environmental Health Perspectives Online*. 2008.
15. Kim T, Lee K, Yang W, Do Yu S. A new analytical method for the classification of time–location data obtained from the global positioning system (GPS). *Journal of Environmental Monitoring*. 2012; 14(8): 2270-2274.
 16. Adgate JL, Ramachandran G, Pratt G, Waller L, Sexton K. Spatial and temporal variability in outdoor, indoor, and personal PM_{2.5} exposure. *Atmospheric Environment*. 2002; 36(20): 3255-3265.
 17. Olsen DA, Burke JM. Distributions of PM_{2.5} source strengths for cooking from the research triangle park particulate matter panel study. *Environmental Science & Technology*. 2006; 40: 163-169.
 18. Wallace L, Williams R, Rea A, Croghan C. Continuous weeklong measurements of personal exposures and indoor concentrations of fine particles for 37 health-impaired North Carolina residents for up to four seasons. *Atmospheric Environment*. 2006; 40: 7659-7660.