

대기오염물질 개인노출 평가를 위한 시간/장소 조사방법의 고찰

이보람 · 반현경 · 장예림 · 이기영[†]
서울대학교 보건대학원 환경보건학과

Measurement of Time/Location for Personal Exposure Assessment of Air Pollutants

Boram Lee, Hyunkyung Ban, Yelim Jang, and Kiyoung Lee[†]

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

ABSTRACT

Objectives: Time location data are critical for accurately estimating personal exposures. This review papers summarized various measurement methods of time location pattern for air pollution exposure assessment.

Methods: Forty manuscripts (papers, books and reports) were reviewed to comprehensively describe time location measurement methods.

Results: This review included traditional methods such as time activity diary, questionnaire, observation, focus group and newly developed technical methods including global positioning system, web, radio frequency identification and ultrasound detection. Some research applied a combination of methods.

Conclusion: Although various methods have been used to collect time location data, further development of accurate measurement methods for time location data is needed.

Keywords: environmental health, exposure assessment, personal exposure, Time activity pattern, time diary

I. 서 론

대기오염의 개인 노출은 사람이 머무르는 미세 환경(Micro-environments)의 농도와 각 장소에서의 거주 시간에 의해 결정 된다. 따라서, 시간에 따라 거주하는 장소에 대한 정보는 개인의 오염물질에 대한 시간가중노출을 추정하는 데 있어 필수적인 요소이다. 시간/장소 정보는 미세 환경의 모니터링 자료와 함께 활용하여 개인 혹은 인구집단의 노출 평가에 사용될 수 있다.

시간/장소는 다양한 방법으로 조사되어왔는데 조사방법의 선정이 매우 중요하다. 부정확한 시간/장소의 조사 자료는 노출 값의 분류에 오류를 가져올

수 있으며 시간가중 노출 추정 값에 영향을 줄 수 있다. 개인 노출 평가를 위한 시간활동패턴조사는 개인의 편의성을 고려하여 정보 수집률을 높이는 것도 또한 중요하다. 따라서, 시간 활동 패턴 조사 방법에 대한 편의성, 정확성 등 다양한 측면에서의 고찰이 필요하다.

개인의 시간/장소 패턴은 직·간접적인 방법으로 측정이 가능하다. 직접적으로 측정하는 경우 측정 방법에 따라 일정 기간의 평균 노출을 측정하거나 각 미세 환경을 분리하여 장소의 농도와 기여 수준을 각각 측정할 수 있다. 이 방법은 정확성을 기할 수 있지만 많은 연구대상자에 대한 측정을 하기 어렵고 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다. 반면 미세

[†]Corresponding author: Department of Environmental Health Science, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Korea, Tel: +82-2-880-2818, Fax: +82-2-745-9104, E-mail: cleanair@snu.ac.kr

Received: 31 August 2016, Revised: 18 October 2016, Accepted: 18 October 2016

환경의 농도와 시간 활동 정보를 이용하여 개인 노출을 예측할 수 있는 간접적인 방법이 있다.¹⁾ 이런 방법은 환경 역학과 노출 평가 연구에 많이 사용되어 왔다.

시간 활동 정보는 시간/장소 정보와 각 장소에서의 활동으로 구분되며 이 두 정보는 노출 평가에 중요한 요소이다. 현대인이 머무르는 장소는 다양하며 각 장소의 특성에 따라 다양한 오염물질에 노출될 수 있다. 따라서 각 장소마다 거주한 시간을 파악하는 것은 개인 노출 평가에서 중요한 역할을 한다. 각 장소에서의 활동은 오염원과 직접적으로 관련이 있는 경우 중요한 정보를 제공할 수 있다. 연소와 관련된 활동을 하면 연소 산물에 대한 정보를 파악할 수 있고 화학 제품의 사용은 제품 내 물질의 노출과 연관성이 있다.²⁾

일반적으로 지금까지 사용되는 연구 방법을 비교할 때, 시간 활동 양상의 조사는 미세 환경의 농도 측정에 비해 정확성이 떨어진다. 따라서 이 연구의 목적은 시간/장소 조사 방법에 대한 고찰을 통해 기존에 사용된 조사 방법을 알아보고 최근 동향 및 미래의 연구 방향을 파악하고자 한다. 개인 노출의 정확성은 시간 활동 양상에 의해 영향을 받을 수 있으므로 시간 활동에 대한 조사 방법의 발전이 요구된다.

II. 재료 및 방법

웹 학술자료 데이터베이스 사이트인 Web of Science에서 키워드를 time, location, exposure, assessment를 이용하여 검색하고 이 검색 결과로 나열된 2,730편의 논문 중 환경보건 및 노출 평가를 키워드로 검색하여 선정된 논문 총 40 편을 고찰에 활용하였다. 1차 고찰에 활용된 논문 24 편 중 참고문헌 등을 활용하여 추가 조사된 16 편의 논문을 고찰하였고 총 40 편의 참고문헌을 활용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 설문조사

설문조사는 개인이나 그룹의 시간 활동 정보를 체계적으로 수집하는 데 많이 사용되며, 설문조사의 항목은 연구목적과 통계적 분석을 위하여 결정된다. 설

문조사는 연구의 참여자가 직접 작성하여 완성하거나 연구자가 직접 또는 전화로 인터뷰하는 방식으로 시행할 수 있다. 설문조사는 주로 가정이나 특정 장소에 대한 정보를 대상으로 하며, 보통 가정들에 대한 정보로 예를 들어 나이, 성, 인종, 직업과 같은 인구학적 정보와 도로의 인접성과 같은 지리학적 정보가 포함되어 있다. 연구의 목적에 따라 연소 장비의 종류, 자동차 혹은 가정 내 흡연자 거주, 집 안의 여러 방, 집의 건축과 같은 물리적 환경에 대한 정보가 포함될 수 있다.³⁾

설문조사는 응답자들이 질문에 대해 추측할 수 있거나 대답 할 수 있는 질문의 형식이 되어야 하기 때문에 사전에 이에 대한 준비가 되어야 한다. 대부분의 경우 표준화된 설문지를 활용하는 것이 권장된다. 참가자들의 참여 동기를 유발하고 유지 하기 위해서는 적절한 분량의 설문조사가 진행되어야 한다. 설문지가 너무 길면 참여자의 대답에 오차가 생길 수 있다.²⁾

시간/장소 조사를 위한 설문조사는 일정 기간의 평균적인 상황에 대해 물어보는 경우가 많으며 해당 기간은 평생, 일년, 또는 계절과 같은 비교적 장기간에 대한 질문이 되고 있다. 이런 경우에는 참여자의 기억에 의한 오류나 참여 의지에 영향을 받기 쉽다. 또 과거에 대한 질문으로 노출이 일어난 시기로 측정 기간을 지정할 수 있으나 대개 일반적인 질문을 하고 응답자의 기억에 따라 다른 시기를 연상할 수 있어 오차가 커질 수 있다.

2. 관찰과 포커스 그룹

사람의 활동에 대한 관찰 연구는 인류학자나 심리학자에 의해 오랫동안 활용되어 왔다. 그러나 시간 활동 패턴에 대한 관찰 연구는 극히 드물게 진행되었다. 볼리비아나 과테말라에서 연구 대상자가 문맹인 경우, 설문조사가 불가능하여 사용된 적이 있다.^{4,5)} 관찰 연구는 연구 참여자의 의지나 기억에 의존하지 않는 장점이 있지만 노동 집약적이며, 참여자의 생활 침해와 같은 문제가 발생할 수 있다. 대표적인 관찰 방법은 지속적인 관찰과 단시간 관찰의 방법이 있다. 시간 별 활동에 대한 조사는 관찰로 가능하지만 시간/장소의 조사에서 이 방법의 적용은 쉽지 않다. 시간 별 활동의 조사의 경우도 장시간 관찰에 따른 피로와 놓칠 수 있는 관찰 결과를 최소화 위

시간 활동 일지

※ 시간 활동 일지(time-activity diary)는 당신이 하루 중 어디 곳에 있었는지? 어떤 환경에 있었는지?를 조사하는 것입니다.

이름 : _____		가구번호 _____			
날짜 : 20__년 __월 __일 ~ __월 __일					
1. 실내 및 실외	1) 실내 : 주택(집), 지하상가, 상점, 또는 백화점 등의 실내공간을 의미합니다.				
	2) 실외 : 실외공간을 의미하며, 예를 들면 마당, 도로변, 야외 운동장, 야외 수영장, 산보, 텐트에서 자는 것조차 실외공간을 의미합니다.				
2. 당신은 어디 있습니까?	1) 잠(안) : 당신이 알고 있는 곳을 의미하며, 잠진 잠의 모든 실내공간을 의미합니다.				
	2) 잠밖 : 당신의 집 근처의 위치하는 다른 장소들을 의미합니다.				
	3) 직장(안) : 당신 직장의 실내공간을 의미합니다.				
	4) 직장(밖) : 직장의 실내공간을 벗어난 실외공간을 의미합니다.				
3. 주의사항	1) 교통 : 차량 안에 있는 것을 의미합니다.				
	2) 다른 표에서 간단히 V 표시를 하여 주십시오.				
	3) 시간단위는 30분 간격입니다.				
4. 작성예시	1) 당신이 30분 동안 두 장소에 있었다면, 두 장소 모두에 V 표시를 하여 주십시오.				
	4) 주행동은 "주로 한 활동 또는 행동"을 의미합니다. (예: 근무, 취사, 교육 등)				
	5) 동시행동은 "주행동과 동시에 한 부차적인 행동"을 의미합니다.				
	시간	교통수단 안	위치 회사 기타	주행동	동시행동
	05:00-05:30	V			
05:30-06:00	V				
06:00-06:30	V		요양	TV 시청	
06:30-07:00	V		아플리사	TV 시청	
07:00-07:30	V		출근		
07:30-08:00	V		출근		
08:00-08:30	V		회사업무	귀하	

시간	위치										주행동	동시행동	
	교통수단 아님					교통수단							
	집 안	회사 안	기타 안	기타 밖	기타	자전거	택시/승용차	버스	전차/지하철				
00:00-00:30													
00:30-01:00													
01:00-01:30													
01:30-02:00													
02:00-02:30													
02:30-03:00													
03:00-03:30													
03:30-04:00													
04:00-04:30													
04:30-05:00													
05:00-05:30													
05:30-06:00													
06:00-06:30													
06:30-07:00													
07:00-07:30													
07:30-08:00													
08:00-08:30													
08:30-09:00													
09:00-09:30													
09:30-10:00													
10:00-10:30													
10:30-11:00													
11:00-11:30													
11:30-12:00													
12:00-12:30													
12:30-13:00													
13:00-13:30													
13:30-14:00													
14:00-14:30													
14:30-15:00													
15:00-15:30													
15:30-16:00													
16:00-16:30													
16:30-17:00													
17:00-17:30													
17:30-18:00													
18:00-18:30													
18:30-19:00													
19:00-19:30													
19:30-20:00													
20:00-20:30													
20:30-21:00													
21:00-21:30													
21:30-22:00													
22:00-22:30													
22:30-23:00													
23:00-23:30													
23:30-24:00													

(다음 쪽에 연결하며 기록하여 주십시오)

Fig. 1. Example of time activity diary

해 비디오 촬영이 활용될 수 있다.^{6,7)} 하지만 비디오 촬영의 경우, 활동에 대한 조사를 반복적으로 검정하여 정확하게 분석하는 데 도움이 될 수 있지만 시간/장소 조사에는 적용하기 어렵다.

포커스그룹은 대개 5-10명의 개인을 특정 집단에서 추출하여 연구 주제에 대한 인터뷰와 설문 등을 통해 정보를 수집하는 방법이다. 주로 설문이나 일지 등 자료 수집 수단의 검증에 활용된다. 준비된 설문지를 포커스그룹이 작성함으로써 연구 대상 집단에 적절한 주제인 지 검증하고 설문지의 형식에 대한 의견을 취합하여 수정하는 데 활용할 수 있다. 그러나 이런 자료는 대상의 수가 한정적이어서 전체적인 대표 자료로 활용하는 데 한계가 있다.

3. 시간 활동 일지 (time activity diary)
 사람의 시간 활동 패턴을 조사하기 위해서 초기의 조사 방법으로 아직도 많이 사용되는 시간 활동 일지이다.⁸⁻¹⁰⁾ 시간 활동 일지는 미세 환경을 확인하고 연구 대상자의 흡연 습관, 요리 활동의 빈도 및 지

속 기간과 같이 개인의 노출에 영향을 미치는 활동들의 질적 그리고 양적인 데이터를 수집하기 위해 사용되어왔다. 시간 활동 일지는 대개 시간/장소 정보 (time line)와 시간 별 활동 (time budget) 이렇게 두 가지 부분으로 구성되어 있다. 시간 별 장소 정보는 전형적으로 집, 직장, 출퇴근과 같은 일상적인 한 개인의 하루 동안의 공간 사용을 조사하고, 경우에 따라 실내 그리고 실외와 같은 특정한 미세 환경의 좀 더 세밀한 부분을 조사할 수 있다. 시간 별 조사하는 장소의 수는 연구의 목표에 따라 달라진다. 가장 간단한 형태의 장소 선택은 집과 그 이외로 나눌 수 있다. 하지만 장소 선택은 해당 연구와 그리고 연구가 수행되어야 할 지역사회에 의거하여 선택되어야 할 것이다.¹¹⁾ 시간의 구분 수준은 24시간을 기준으로 보통 15분 또는 30분 정도이지만 한 시간 단위로 조사할 수도 있다. Fig. 1은 개인노출 평가에 많이 사용되는 시간 활동 일지의 예시이다.
 시간 별 활동은 대개 한 개인의 기상 시간을 시작으로 24시간 동안 일어나는 모든 활동을 조사하며,

활동의 조사 범위를 정할 때 노출 평가 시 요인 분석과 관련성이 덜한 기타 사항 및 세부 자세한 활동 패턴의 수집 여부는 연구자에게 달려있다. 시간 활동 일지는 생활을 하면서 기록하는 것이 가장 적절하지만 개인의 생활에 불편을 초래 할 수 있기 때문에 연구 대상자의 기억을 통해 기록하도록 하였다. 그러나 시간 활동 일지는 대상자들의 기억을 통하여 기록되는 것에 한계점이 많다는 것이 확인된 이후로 회상질문지에서 설문지의 형태로 대체하기도 하였다.¹²⁾ 일지의 경우 요일에 따른 변화나 계절별 차이를 보기 위해서는 오랜 기간 조사가 필요하다. 그러나 측정이 장기간 지속되면 참가자들의 부담을 증가시켜 낮은 참여율의 문제를 초래 할 수 있다.

이후 개발된 시간 별 활동 정보를 수집하는 대표적인 방법은 시간 할당 방법 (time allocation)이며, 이는 시간 활동 일지와 관찰이 통합된 것이다.¹³⁾ 이 방법은 참가자들이 일지를 작성하지 않고, 연구자들이 집으로 와서 방문해 있는 시간 동안 가족 구성원들이 시간 별 활동 일지를 작성한다. 하루에 깨어있는 시간 동안, 사계절에 걸쳐서 지역사회 단위의 많은 가정을 샘플링 함으로써 활동의 도수 분포를 얻는 것이 가능하였다. 이러한 접근은 참가자들에게는 편리성을 높여주고, 연구자들에게는 데이터의 신뢰성을 높일 수 있는 계기가 되었다. 노출 연구에서 연구자들에 의해 기록된 정보들의 범위는 연구자들의 특정 관심 영역에 따라 관찰되는 정보의 수집에 제한이 있을 수 있다. 이와 같은 방법에서의 한 가지 문제점은 조사자들이 가정을 방문함으로써 연구 대상자들의 행동이 평상시와 다를 수 있다는 것이다. 조사자들의 방문으로 관찰 대상자들의 평소 활동이 변경된다면 수집된 데이터들은 그들의 일상 생활을 정확하게 반영하지 못하기 때문이다. 이러한 관찰 조사 방법 이외에 대체 응답자 조사 방법이 교외의 거주자들을 대상으로 한 연구를 시작으로 개발되었다.⁹⁾ 교외의 거주자들 중의 일부 연구 대상자들은 읽고 쓸 줄 아는 능력이 낮아, 활동의 세밀한 기록이 어려웠다. 이러한 대체 응답자 기록 방법들은 쉽게 이해가 가능하도록 활동의 형태를 나타내는 도안과 같은 시각적인 시간 계획표를 포함시키기도 하였다.

4. 도구를 이용한 시간 활동 조사

종이에 펜으로 작성하는 시간 활동 조사 대신 도

구를 이용하여 조사를 하는 방법들이 개발되었다. 예를 들면 연구대상자들에게 주방에 들어갈 때마다 스톱워치를 켜고 주방에서 나갈 때는 끄도록 함으로써 주방에 머무르는 시간을 측정하는 방법이 활용되었다.⁵⁾ 이 방법은 원리적으로 가능할 지 모르지만 결과적으로는 혼란을 초래하였다.¹⁴⁾ 스톱워치가 지급된 가정에서 이 조사 방법은 거의 절반에 가까운 가정이 적절하게 사용하지 못했고, 아이들이 스톱워치를 가지고 놀며 여성들이 며칠 간 스톱워치를 잃어버리는 것과 같은 예상치 못한 문제들이 있었다.

1993년 시행된 연구에서는 전자 저장 장치(electronic data logger)를 개발하여 테스트하였다.¹⁵⁾ 3-5일에 걸쳐 진행된 이 연구는 참가자들이 장소에 도착하거나 떠날 때 key를 누를 수 있었다. 활동에 대해서는 참가자들이 register key, 특별활동에 대해서는 second key를 누를 수 있었다. 이러한 결과를 시간 활동 일지의 결과와 비교하였다. 그 결과 침실, 화장실, 직장의 장소에서는 높은 일치도를 보였으나, 평소에 자주 방문하지 않는 장소나 짧게 머무르는 곳, 그리고 지하철과 같은 교통수단의 일치도는 낮았다. 전자 저장 장치의 사용 시 정확도의 평가를 위해 시간 활동 일지의 작성이 동시에 이루어 지는 것을 권장하였으며, 시간 활동 일지의 작성보다 간편하여 연구 대상자들의 참여도를 높일 수 있는 것으로 확인되었다.

시간 활동 데이터의 수집 방법으로 시간이 소요되고 비용이 드는 전화 인터뷰나 일지를 이용하는 대신, 웹으로 일지와 설문조사를 개발하여 적용한 연구도 있다.¹⁶⁾ 웹 설문은 비용이 적게 드는 대신 참가자의 참여 의지에 영향을 받지만, 특정 인구집단에서는 적용이 가능한 것으로 나타났다. 어린 자녀를 두고 있는 55세 이하의 부부 151쌍과 55세 이상의 성인을 대상으로 주중과 주말 3개월의 회상 웹 일지를 수집하였다. 웹 일지를 통한 데이터와 웹 조사의 시험 대상자와의 전화 인터뷰로 수집한 시간 활동 정보를 비교해 본 결과 데이터의 일치도는 상당히 높았다. 하지만 전화 인터뷰에 비해 웹 일지 조사의 참여도가 떨어지는 문제점들이 발견되었으며, 이런 문제들의 대부분은 일지 조사 인터페이스와 몇몇 질문들의 수정 과정을 거쳐 최소화 되어야 한다. 웹 일지 조사 연구는 참여자의 부담을 줄이고 데이터 품질과 일지 조사의 참여도를 높일 수 있는 인터페이스 디자인을 개선하는 것이 중요하다.

2012년 중국에서 시행된 연구에서는 “mobile web logs”를 활용한 시간 활동 데이터 수집을 시도하였다. “mobile web logs”방법은 2G 혹은 3G 네트워크가 연결된 통신기기를 이용하여 실시간 Global Positioning System(GPS)정보를 수신하였으며, 지리학적 포함 범위는 북경 시 전체였다. 수집된 데이터는 [userID, phoneID, towerID, host, Aagent], [towerID, latitude, longitude] 와 같이 정리되어 분석되었다. 이 연구의 핵심 목표는 백만 단위의 연구 대상자를 통하여 위치 정보를 얻는 것이고, 무선 네트워크와 모바일 기기를 통하여, 연구 참여의 기회를 높여 북경 시 단위의 인구 범위의 조사 가능성을 확인하였으며, 설문조사 결과보다 시간 활동 데이터 수집에 효과적인 결과를 얻어냈다.¹⁷⁾ 역학 연구에서 대기오염 물질의 노출은 대개 하나의 지점을 기준으로 평가하는데, 그 기준은 주로 거주지를 사용한다. 그 외 장소에 대한 노출을 평가하기 위해 스마트 폰을 이용한 연구가 최근 시도되고 있다.¹⁸⁾ 스마트 폰을 이용한 시간/장소의 자료를 수집하는 접근 방법은 어플리케이션에서 시도되고 있는데 “Moves”를 이용한 시간/장소의 자료 축적을 이용하거나,¹⁹⁾ 미국 비영리단체에서 개발한 “AirCasting”등 다양한 어플리케이션이 개발 및 활용될 전망이다. “AirCasting”와 같은 경우는 스마트 폰의 마이크를 이용하여 소음 수준의 측정과 지도를 작성할 수 있고, “AirBeam”이라는 미세입자 측정 센서를 이용하여 시간/장소의 자료에 미세 입자의 농도를 접목시키는 기능을 갖추고 있다.²⁰⁾

5. GPS를 이용한 시간 장소 조사 방법

2000년 이후 일반인도 이용이 가능하도록 공개된 GPS 정보는 다양한 분야에서 이용이 되고 있으며, 노출 평가 연구의 시간/장소 조사에도 적용이 시도되고 있다.

(1) GPS수신기의 기본 작동 및 특성

최근 들어 GPS 장치는 개인의 시간에 따른 위치를 추적하여 개인에 미치는 환경 영향을 파악하는데 주요한 역할을 하고 있다. 지구 위치 파악 시스템은 시간에 따른 위치를 추적하는 시스템이다.²¹⁾ GPS는 하루 두 번씩 지구를 회전하는 미국 국방부의 항해 지원 시스템(Navigational System with Timing and Ranging)의 24개의 위성과 3개의 보조위성으로

전파를 수신하여 위치를 결정한다. 2차원과 3차원의 위치를 지정하기 위해서 최소한 4개의 위성이 필요하다. GPS 장치를 사용하여 시간에 따른 위도와 경도, 속도 등을 기록할 수 있다. 오염 물질과 건강 영향과의 연관성을 결정하는 데 중요한 역할을 한다. GPS는 노출 평가에 있어 시간 위치 정보를 제공하는 데 유용하다.

(2) GPS를 이용한 시간/장소 조사

GPS의 정보가 일반에 공개된 후에 GPS를 시간/장소의 정보 수집에 활용하려는 초기 연구는 측정기기 사양에 따른 기기의 부정확성 등에 따라 정확도가 떨어지는 결과를 나타냈었다.²²⁾ 2001년 발표된 논문에 따르면, GPS측정기기의 기계적 결함, 건전지의 짧은 수명으로 인하여 총 25번의 측정 중 30% 정도의 데이터만 분석에 사용될 수 있었다.²³⁾ 또한 실내에서의 콘크리트, 스틸 구조물 등에 인한 수신 신호 방해가 심하여 실내의 미세환경 구분에서의 오차의 발생률이 컸다.²⁴⁾

시간/장소의 정보 수집이 매우 중요하여 GPS가 가장 활발히 활용되는 분야 중 하나는 개인노출 연구 분야이며 꾸준히 그 활용가능성 평가가 진행되어 왔다.²²⁾ 초 미세먼지의 개인노출을 측정하기 위하여 성별, 직업에 따른 미세환경의 차이에 의한 개인노출 평가에 GPS가 활용되기도 하였으며,^{25,26)} 외기 측정 스테이션의 농도를 이용한 실내 초 미세먼지의 예측 모델과 GPS의 좌표의 네트워크로 개인노출을 산정하는 연구도 진행되었다.²⁷⁾ 또한 보행자가 차도를 걸을 때 노출되는 초 미세먼지를 평가하기 위하여 GPS와 초 미세먼지 측정기를 착용한 보행자가 직접 도로를 걸어 다니며, 차의 통행량 및 경로에 따른 노출평가를 수행하였다.²⁸⁾

초 미세먼지의 개인노출 이외에도 블랙카본의 개인노출 연구에도 활용되어왔는데, 특히 교통수단과 관련된 미세환경에서의 개인노출 연구가 대부분이다. 네덜란드에서는 12명의 피실험자를 대상으로 출퇴근길의 개인노출을 평가하기 위하여 GPS를 통한 시간/장소 정보 수집을 평가하였다. 특히, 이동수단의 구체적인 미세환경 그룹을 나누는 분석방법을 중심으로 걷기, 자전거 주행, 기차, 버스, 자가용 등의 이동환경을 분류하고 정확도를 평가하였다.²⁹⁾ 또한, GPS데이터를 이용하여, 이동 수단 별로 63명의 블

랙카본의 개인노출을 평가한 연구도 진행되었다.³⁰⁾ 블랙카본의 개인노출을 평가하기 위하여 8쌍의 부부를 섭외하여 GPS기기를 몸에 지니게 하고 동시에 호흡영역에서의 블랙카본을 측정하였다. 집, 직장, 이동 수단, 기타 실내 등의 미세환경에서의 각 개인의 블랙카본의 농도를 분석하여, 개인노출을 평가하였다.³¹⁾

어린이의 시간/장소 조사는 스스로 일지 작성의 어려움이 크기 때문에, GPS를 이용한 조사가 더욱 효과적이다. 캐나다에서 실시된 연구는 친식이 있는 54명의 어린이를 대상으로 GPS를 이용한 시간/장소 정보 수집과 초미세먼지(PM_{2.5}) 개인노출 모니터를 통하여 시간/장소에 따른 실시간 PM_{2.5} 농도를 분석하였다.³²⁾ 시간/장소 일지와 GPS 데이터를 비교한 결과 약 78%의 시간/장소 일치도를 보이며 노출 평가의 틀로써 사용가능성을 확인하였다.³²⁾ 미국의 National Human Exposure Assessment Survey(NHEXAS)에서는 31명의 3-5세의 어린이들에게 GPS를 부착하여 시간/장소 정보를 수집하였으며, 부모가 대리 작성한 일지와 비교한 결과 영유아들의 노출평가에 활용 될 수 있음을 검증하였다.³³⁾ 또한, 영국의 PEACH project에서는 1010명의 어린이들을 대상으로 GPS를 이용한 계절별 시간/장소 평가 연구를 진행하였다.³⁴⁾ 뉴질랜드의 한 연구에서는 GPS를 이용하여 5세에서 10세까지의 어린이 184명을 대상으로 야외 활동도를 조사하였다. 그 결과 지역 아이들의 시립 공원에서의 야외 활동의 빈도와 야외 놀이 시설의 방문 빈도를 분석하여 지역의 도시 환경 계획 및 야외 활동도와 지역 환경특성 등의 연관성에 대한 관리 및 개선방안을 제시하였다.³⁵⁾

(3) GPS를 이용한 시간/장소 조사 연구의 장, 단점 및 한계점

GPS를 활용한 시간 활동 조사와 기존의 방법과의 차이점은, 시간 활동 일지의 경우 참여자가 매 시간마다 기록을 하거나 기억에 의존하여 자료를 제공하는데 반해 GPS의 경우 기기가 자동으로 기록하기 때문에 이러한 참여자의 부담을 덜 수 있으며 기억에 의존하지 않기 때문에 정확도를 높일 수 있다. GPS를 통한 시간/장소 기록의 장점은 작고 가벼워서 착용이 용이하며, 작동법이 간단하여 어린이나 노인들도 쉽게 작동시킬 수 있다는 점이다. 이러한 장

점은 GPS의 착용 비율을 증가시킬 수 있으며, 이는 더 많은 데이터의 수집을 가능하게 한다. 단점은 건물이나 장애물로 인한 신호 방해로 위성 신호를 수신하지 못하는 경우 데이터의 수집이 불가능하다는 점이다.³⁶⁾ 또한, 참여자가 GPS 수신기를 항상 소지해야 기록이 가능하다는 단점이 있다. 초기에는 기기가 크고 무거우며, 안테나와 같은 부품이 있어 측정하기 번거로웠지만 기기가 점차 소형화 되고, 현재는 스마트 폰으로도 측정이 가능하다. 그러나 스마트 폰을 이용한 위치 정보 자료는 쉽게 구할 수 없기 때문에 제한 점이 될 수 있다.

모든 기기의 정확도와 신뢰도는 연구 적용에 있어서 핵심 사항이다. GPS는 일반적으로 위치와 거리 측정의 'gold standard'로 여겨지지만 아직은 연구 자료가 부족한 실정이다. 앞서 설명한 바와 같이, GPS가 위치를 추정하기 위해서는 최소 4개의 위성의 신호 수신에 필요 하며, 이러한 신호 수신 간의 간섭이 GPS의 정확성에 영향을 미치게 된다. 위성 신호는 건물, 대중 교통, 산의 협곡 등으로 인하여 GPS수신의 방해가 발생할 수 있으며, 이러한 현상은 수신 신호의 품질과 정확성의 저하나 'drop out'을 유발하게 된다. 수신 신호의 'drop out'은 GPS 수신기가 일시적으로 위성 수신 신호를 잃고 짧게는 몇 초에서 몇 분 동안 데이터 수집에 틈이 발생하게 되는 현상이다. 장 기간이 'drop out'이 발생하는 경우, 짧은 시간/장소 패턴을 놓칠 수 있으며 이는 노출 평가에도 영향을 줄 수 있다.³⁷⁾

시간/장소의 조사 방법의 각 특징을 비교한 결과 미세환경의 상세 구분이 가능한 조사방법 수단으로는 일지의 작성, 관찰연구, GPS의 방법이 있으며, 설문조사의 경우 응답자의 기억에 의존하기 때문에 상세한 미세환경의 조사에 한계가 있다. 시간/장소 정보의 측정 가능한 시간의 단위는 GPS는 초단위로 측정이 가능하며, 일지는 시간 및 일 단위로 측정이 가능하지만, 응답자의 의지 및 작성의 불편으로 주 단위 이상으로 측정되기에는 한계가 있을 수 있다. 관찰 연구는 응답자의 기억에 의해 기록되기 때문에 시간 단위의 구체적인 조사에는 어려움이 있으며, 개월에서 년 단위로 포괄적인 조사가 가능하다. 다른 조사방법과는 다르게 과거의 조사가 가능한 장점이 있으나, 응답자의 기억에 따른 데이터의 부정확성을 배제할 수 없다(Table 1).

Table 1. Time location information that can be obtained from different methods

Information	Diary	Questionnaire	Observation	GPS (+sensors)
<i>Micro-environmental classification</i>				
Non-residential indoor	O		O	O
Outdoor	O	Δ	O	O
Transportation	O	Δ	O	O
Residential indoor	O	O	O	O
<i>Exposure duration</i>				
Hour	O		O	O
Days	O		Δ	O
Weeks	Δ			O
Months		Δ		O
Years		O		Δ
Lifetime		O		
<i>Exposure history</i>				
Current	O		O	O
Retrospective		O		
<i>Subject to recall error</i>				
		O		
<i>Participation burden</i>				
	O		O	

O : Available to get the information. Δ : Insufficient available to get the information. Blank : Not available to get the information.

6. GPS와 다른 자료의 통합 활용에 의한 시간 장소 조사

GPS와 함께 실내·외 온도 측정 데이터를 이용하여 실내·외를 구분의 정확도를 높이려는 연구가 수행되어 왔다. 캐나다의 몬트리올에서 천식을 앓는 어린이들에게 GPS와 온도계를 착용시켜 실내·외의 시간 장소 패턴을 일지와 비교하여 정확도를 평가하였다.³²⁾ GPS와 온도데이터를 이용한 시간/장소 자료는 일지 결과와 비교적 일치하였지만 실외나 주택 이외의 실내에서 시간이 과소평가되었다. 이 연구는 온도가 1분에 0.1°C 변화하면 장소를 이동한 것으로 구분되었으나, 비교적 기온이 낮은 몬트리올에서 겨울에 진행 되어 온도의 기준을 다른 지역이나 계절에 적용하기가 어렵다.

실내·외의 온도는 비교적 측정하기 용이하기 때문에 실내·외의 구분을 위해 GPS와 보조적인 수단으로 활용도가 높으며, GPS를 이용한 방법보다 정확도를 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 계절적인 차이와 다양한 실내 환경에서의 적용 가능성을 평가하기 위해 53곳의 실내 환경에서 여름, 가을, 겨울에 실내·외의 온도 차를 조사한 연구가 있다.³⁷⁾ 여름, 가을 겨울 동안 다양한 장소 모두 2분에 2°C의

차이를 보일 경우 실내·외의 이동이 있다는 결과가 나왔으며, GPS의 자료와 함께 활용할 때 여름엔 19.4%, 가을엔 16.9%, 겨울엔 19.7%의 정확성이 증가하였다. 또한, 이 연구에서는 GPS, 온도와 함께 조도를 활용하는 방법도 제시하고 있다. 온도의 경우와 마찬가지로 53곳의 실내 환경에서 여름, 가을, 겨울에 조도의 차이를 조사하였다. 조도의 3,900lux를 기준으로 실내·외의 구분이 활용이 가능하지만 이 연구는 낮과 밤에 대한 조사를 하지 않아 이에 대한 추가 연구가 이루어 지면 활용의 가능성이 있다. 하지만 조도의 측정은 온도에 비해 어렵기 때문에 그 활용성에 대해서는 아직 확실하지 않다.

7. 실내에서의 이동에 대한 조사 방법

현대인들은 하루 중 53.2%의 시간을 주택에서 보내며³⁸⁾ 주택 내에서도 장소에 따라 오염 물질의 농도가 달라질 수 있기 때문에 실내 활동 공간에 대한 조사 방법 또한 연구 되었다. GPS의 경우 위성 수신에 제한적이기 때문에 실내 공간에서의 이동은 조사하기 어렵다. 대표적인 조사 방법이 Radio Frequency IDentification(RFID)나 초음파를 이용하는 방법이다. RFID는 라디오 주파수를 이용하여

움직이는 물체와 인식기 간의 데이터 통신을 하는 Automatic Data Collection(ADC) 기술이다. 대만에서는 작업 환경에서 근로자의 작업복에 이 장치를 부착하고 근로자의 위치를 파악하였다. 각 위치 별 업무활동을 카테고리화 하여 근로자들을 미세 환경 내에 위치시키는 것과 다양한 노동자들의 활동간의 구별하는 것을 할 수 있게 하였다. 사람의 관찰과 Radio Frequency identification Exposure Monitoring System(RFEMS) 시간 활동 패턴의 평균 기록의 편차는 0.21-1.57% 였다. 전력 소모에 대한 실험은 이 시스템이 124 시간 이상 지속될 수 있다고 보여주었다. 이 연구는 한정된 장소에서 근로자의 위치를 파악하기 위한 모니터링 시스템을 설명하고 있다.³⁹⁾

RFID와 비슷한 장치로 40-kHz 초음파 송신기(tag)를 이용한 시스템을 개발하여 시간/장소 조사에 활용한 사례가 있다. 실험 대상자가 이 송신기를 부착한 후 가정의 각 장소에 초음파 수신기(locator)를 위치시키고 송신기가 근처에 올 때마다 수신기에 신호가 접수되면 이 자료가 data logger에 저장되는 시스템이다. 참여자들의 존재와 부재가 각각 tag의 ultrasound ID 에 의해 모니터 된다. 이 시스템은 80-85%의 정확도, 86-89%의 민감도와 71-74%의 특이도 값을 나타내어 관찰조사 및 시간활동일지의 작성 방법을 대체 할 수 있는 방법임을 증명 하였다.⁴⁰⁾

IV. 결 론

시간/장소 정보의 자료는 개인 노출의 평가에 중요한 부분이지만 이직도 이에 대한 연구 방법의 확립이 뚜렷하게 이루어지지 않았다. 기존의 시간 활동 일지나 설문은 자생적 한계가 있어 새로운 방법의 개발이 요구된다. 가장 이상적인 시간/장소 정보의 수집은 연구 대상자에게 시간적, 육체적 부담이 적고, 휴대하기 용이하며 정확도가 높은 방법이다. 이의 실현을 위하여 GPS 기반의 휴대용 센서를 이용한 새로운 방법이 개발되고 있으나 이들 방법도 제한 점이 있으며 추가적인 연구와 개발이 필요하다. 이 고찰을 통해 현재 개발된 조사 방법에 대한 정보를 공유하고 추가 개발연구에 활용될 수 있을 것이다.

References

1. Klepeis NE. An introduction to the indirect exposure assessment approach: Modeling human exposure using microenvironmental measurements and the recent national human activity pattern survey. *Environmental Health Perspectives*. 1999; 107 (Suppl 2): 365-374.
2. Freeman NC, Tejada SS. Methods for collecting time/activity pattern information related to exposure to combustion products. *Chemosphere*. 2002; 49(9): 979-992.
3. King E. Human exposure assessment for airborne pollutants: Advances and opportunities. *The Annals of Occupational Hygiene*. 1992; 36(2): 219-221.
4. McSweeney BG. Collection and analysis of data on rural women's time use. *Studies in Family Planning*. 1979; 10(11): 379-383.
5. Engle P, Hurtado E, Ruel M. Sfy. *Human Organization*. 1997; 56(4): 408-417.
6. Zartarian VG, Ferguson AC, Leckie JO. Quantified dermal activity data from a four-child pilot field study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 1997; 7(4): 543-552.
7. Reed KJ, Jimenez M, Freeman NC, Liou PJ. Quantification of children's hand and mouthing activities through a videotaping methodology. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 1999; 9(5): 513-520.
8. Robinson JP, How Americans' use time : A social-psychological analysis of everyday behavior, 12nd ed. New York: Praeger Press; 1977. p.20-209.
9. Chapin FS, Human activity patterns in the city : Things people do in time and in space, 13th ed. Michigan: John Wiley & Sons press; 1974. p.272-280.
10. Juster FT, Stafford FP, Time, goods and well-being, 6th ed. Michigan: Survey Research Center, Ann Arbor Press; 1985. p.119-122.
11. Saksena S, Prasad R, Joshi V. Time allocation and fuel usage in three villages of the garhwal himalaya, India. *Mountain Research and Development*. 1995; 15(1): 57-67.
12. Robinson JP, The validity and reliability of diaries versus alternative time use measures, 1st ed. Michigan: Ann Arbor Press; 1985. p.33-62.
13. Feldstein HS, Tools for the field: Methodologies handbook for gender analysis in agriculture, 1st ed. Hartford: Kumarian Press; 1994. p.10-270.
14. Waldman JM, Bilder SM, Freeman NC, Friedman M. A portable datalogger to evaluate recall-based

- time-use measures. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 1993; 3(1): 39-48.
15. Bennett DH, Lee K, Cassady DL, Ritz B, Hertz-Picciotto I. Feasibility of using web surveys to collect time-activity data. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2012; 22(2): 116-125.
 16. Wu C, Xu B, Shi S, Zhao B. Time-activity pattern observatory from mobile web logs. *International Journal of Embedded Systems*. 2014; 7(1): 71-78.
 17. Su JG, Jerrett M, Meng YY, Pickett M, Ritz B. Integrating smart-phone based momentary location tracking with fixed site air quality monitoring for personal exposure assessment. *Science of the Total Environment*. 2015; 15(1): 506-507.
 18. Cho H, Shin DH. The effects of personal tracking on user attitude. *Journal of the HCI Society of Korea*. 2014; 12(1): 350-351.
 19. Heng I, Zhang AS, Obrok P. Development of a low-cost mobile embedded handheld air casting device. *International Journal of Engineering Research and Innovation*. 2012; 4(2): 5-11.
 20. Kaplan E. Understanding GPS: Principles and applications, 2nd ed. London: Artech House Press; 2005. p.450-510.
 21. Lee K, Kim J, Putti K, Bennett DH, Cassady D, Hertz-Picciotto I. Use of portable global positioning system (GPS) devices in exposure analysis for time-location measurement. *Korean Journal of Environmental Health Sciences*. 2009; 35(6): 461-467.
 22. Phillips ML, Hall TA, Esmen NA, Lynch R, Johnson DL. Use of global positioning system technology to track subject's location during environmental exposure sampling. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2001; 11(3): 207-215.
 23. Elgethun K, Fenske RA, Yost MG, Palcisko GJ. Time-location analysis for exposure assessment studies of children using a novel global positioning system instrument. *Environmental Health Perspectives*. 2003; 111(1): 115-122.
 24. Buonanno G, Stabile L, Morawska L. Personal exposure to ultrafine particles: The influence of time-activity patterns. *Science of the Total Environment*. 2014; 468(1): 903-907.
 25. Bekö G, Kjeldsen BU, Olsen Y, Schipperijn J, Wierzbicka A, Karotki DG, et al. Contribution of various microenvironments to the daily personal exposure to ultrafine particles: Personal monitoring coupled with GPS tracking. *Atmospheric Environment*. 2015; 110(1): 122-129.
 26. Gerharz LE, Krüger A, Klemm O. Applying indoor and outdoor modeling techniques to estimate individual exposure to PM_{2.5} from personal GPS profiles and diaries: A pilot study. *Science of The Total Environment*. 2009; 407(18): 5184-5193.
 27. Greaves S, Issarayangyun T, Liu Q. Exploring variability in pedestrian exposure to fine particulates (PM_{2.5}) along a busy road. *Atmospheric Environment*. 2008; 42(8): 1665-1676.
 28. Beekhuizen J, Kromhout H, Huss A, Vermeulen R. Performance of GPS-devices for environmental exposure assessment. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2013; 23(5): 498-505.
 29. Dons E, Panis LI, Van Poppel M, Theunis J, Wets G. Personal exposure to black carbon in transport microenvironments. *Atmospheric Environment*. 2012; 55(1): 392-398.
 30. Dons E, Int Panis L, 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.
 31. Nethery E, Mallach G, Rainham D, Goldberg MS, Wheeler AJ. Using global positioning systems (GPS) and temperature data to generate time-activity classifications for estimating personal exposure in air monitoring studies: An automated method. *Environmental Health*. 2014; 13(1): 13-33.
 32. Elgethun K, Yost MG, Fitzpatrick CT, Nyerges TL, Fenske RA. Comparison of global positioning system (GPS) tracking and parent-report diaries to characterize children's time-location patterns. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2007; 17(2): 196-206.
 33. Cooper AR, Page AS, Wheeler BW, Hillsdon M, Griew P, Jago R. Patterns of GPS measured time outdoors after school and objective physical activity in English children: The peach project. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2010; 7(1): 31-40.
 34. Quigg R, Gray A, Reeder AI, Holt A, Waters DL. Using accelerometers and GPS units to identify the proportion of daily physical activity located in parks with playgrounds in New Zealand children. *American Journal of Preventive Medicine*. 2010; 50(5): 235-240.
 35. Cooper AR, Page AS, Wheeler BW, Hillsdon M, Griew P, Jago R. Research patterns of GPS mea-

- sured time outdoors after school and objective physical activity in English children: The peach project. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2010; 7(1): 31-39.
36. Stopher P, FitzGerald C, Zhang J. Search for a global positioning system device to measure person travel. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2008; 16(3): 350-369.
 37. Lim C. Classification of indoor-outdoor using global positioning system (GPS), temperature and brightness level for personal exposure assessment. [Seoul]: Seoul National University; 2015.
 38. Yang W, Lee K, Yoon C, Yu S, Park K, Choi W. Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2011; 21(3): 310-316.
 39. Huang FC, Shih TS, Lee JF, Chao HP, Wang PY. Time location analysis for exposure assessment studies of indoor workers based on active RFID technology. *Journal of Environmental Monitoring*. 2010; 12(2): 514-523.
 40. Allen-Piccolo G, Rogers JV, Edwards R, Clark MC, Allen TT, Ruiz-Mercado I, et al. An ultrasound personal locator for time-activity assessment. *International Journal of Occupational and Environmental Health*. 2009; 15(2): 122-132.