

한국경제지리학회지 제11권 제1호 2008(59~77)

교통흐름에 기인하는 미세먼지 노출 도시인구에 대한 시·공간적 분석*

이금숙**

요약: 자동차를 중심으로 하는 도로교통량이 크게 늘면서 교통에 기인한 다양한 피해 현상들이 나타나고 있다. 특히 교통량이 집중되는 대도시에서는 교통에 기인한 도시민의 건강피해가 심각한 것으로 밝혀지고 있다. 본 연구에서는 교통에 기인한 미세먼지의 피해를 직접적으로 받는 도시인구는 미세먼지의 주 발생원인 교통흐름이 있는 도로변에 가까이 노출되는 도시민들이라고 보고 도시 공간 내에서 교통흐름과 미세먼지, 그리고 도시 통행인구의 공간적 분포를 분석하였다. 특히 본 연구에서는 대기오염문제가 심각한 서울을 대상으로 교통에 기인한 미세먼지의 실태를 살펴보고, 서울을 둘러싸고 있는 경기도 일대에 대단위 주거지들이 밀집된 신도시들이 개발되면서 나타나는 인구분포와 통행패턴, 그리고 교통흐름 및 미세먼지 농도에 나타나는 공간적 변화와 이들 간의 공간적 관계를 종합적으로 파악하기 위하여 GIS를 적용하였다. 또한 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 데이터마이닝기법으로 추출해낸 통행흐름 자료를 이용하여 통행시간별 통행인구분포도를 작성하고, 이를 바탕으로 교통에 기인한 미세먼지에 직접 노출하게 되는 도시인구를 산정하는 시·공간적 모형개발을 시도하였다.

주요어: 교통흐름, 미세먼지, 통행패턴, 인구분포, GIS, 시·공간 모형

1. 서론

이제까지 우리나라에서 진행되어 온 교통에 대한 연구는 주로 교통의 순기능적인 측면을 위주로 진행되어 왔으며, 따라서 늘어나는 교통수요를 신속하고 효율적으로 유통시키는 문제와 그를 위한 시설 투자 계획에 초점이 맞춰져 왔다. 그러나 최근 자동차를 중심으로 하는 도로교통량이 크게 늘면서 교통에 기인한 다양한 피해 현상들이 나타나고 있다. 특히 교통량이 집중되는 대도시에서는 교통에 기인한 도시민의 건강피해가 심각한 것으로 밝혀지고 있다 (Kaur, et al, 2007). 따라서 도시민의 삶의 질 향상과 지속적

인 발전을 꾀할 수 있는 지속 가능한 도시교통체계를 구축하기 위해서는 이러한 교통의 역기능적 측면에 대한 연구가 보다 활발히 이루어져 할 것이다.

지속 가능한 도시교통체계 구축에 좀 더 일찍 관심을 가져 온 유럽 등 일부 선진지역에서는 늘어나는 자동차 교통량에 의한 교통의 역기능적 측면에 대한 연구를 10여 년 전부터 활발히 진행하여 왔으며 이를 기초로 도시 교통량을 줄일 수 있는 다양한 정책들이 입안되어 시행되고 있다. 대표적으로 1990년대 후반부터 시작된 WHO와 프랑스를 포함한 유럽의 여러 나라들이 함께 참여하여 공동으로 연구해온 ISHTAR Integrated Software for Health, Transport efficiency

* 이 논문은 2006년도 정부재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2006-B00022).

** 성신여자대학교 지리학과 교수

and Artistic heritage Recovery, 1998년-2002년)과 HEARTS Health Effects And Risks of Transport Systems: 2002년-2005년)라는 2개의 대형 연구 프로젝트가 수행되었고, 이 연구프로젝트를 통해 다양한 분야의 전문가들에 의해 교통이 도시민의 건강에 미치는 악영향을 다양한 측면에서 검토하여 그 피해를 산정하는 모형과 이론 및 방법론들을 제시하였다. 특히 교통이 미세먼지의 주 배출원이며 그로 인한 대기 오염이 도시민의 건강에 미치는 피해가 심각함이 지적되면서¹⁾ EU 국가들을 중심으로 교통에 기인한 대기오염에의 노출정도를 측정하는 모형 개발과 함께 그 건강피해에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Penard-Morand, et al., 2006; Vardoulakis, et al., 2005; Ponce, et al., 2005; Gulliver & Briggs, 2005; Hochadel, et al. 2006; Colville, et al., 2004; Kuehni, et al. 2006; Lipfert, et al. 2006; Filliger, et al., 1999).

현재 서울의 교통 혼잡과 대기오염 상태는 OECD에 속한 30개 국가의 대도시들 중 가장 열악한 상태로 2002년 현재 우리나라 대기오염의 사회적 비용은 10조 3천 억 원 이상으로 추정되며, 그중 미세먼지에 의한 손실액이 4조 3천 억 원에 달하는 것으로 나타나고 있다²⁾. 서울의 미세먼지량은 2000년대 초반을 고비로 최근 들어 다소 개선되고 있기는 하지만 아직 까지도 세계 주요 도시에 비해 최고 4배가 넘는 열악한 수준에 머물고 있다³⁾. 특히 도시지역의 경우 미세먼지 배출량에 도로이동오염원의 기여도가 50%이상으로 가장 큰 배출원이며, 특히 서울은 73% 이상이 도로이동오염원에 의한 배출원으로 나타나고 있다. 그 다음으로 배출량이 많은 비도로 이동오염원 까지 더하면 전체적으로 이동오염원에 의한 미세먼지 배출량이 70~90%까지 차지하는 것으로 나타나고 있다 (김동영, 조진식, 2006).

이러한 교통에서 배출되는 미세먼지는 도시민의 건강에 치명적인 영향을 미치는 것으로 밝혀져 대기오염을 다루는 많은 연구에서 교통량은 미세먼지 등 대기질에 노출정도를 가늠하는 측정치로 적용하고 있다 (Lipfert, et. al., 2006). 따라서 도시 대기오염의

주 발생원인 교통량에 대한 연구가 집중적인 연구가 이루어져야 할 것이다. 최근 들어 국내에서도 대기오염에 대한 연구가 다소 발표되고 있으나 대기오염 전반에 대한 접근이 주를 이루며, 외국에서 개발된 모형을 적용하여 미세먼지의 배출특성을 분석하거나 (김동영, 조진식, 2006), 호흡기질환과의 상관관계에 대한 연구가 일부 진행되고 있을 뿐(김운수 2004), 교통흐름과 연결 한 연구는 아직 진행되지 않고 있다 (Lee, 2004).

본 연구에서는 교통에 기인한 미세먼지의 피해를 직접적으로 받는 도시인구는 미세먼지의 주 발생원인 교통흐름이 있는 도로변에 가까이 노출되는 도시통행자들이라고 보고 도시 공간 내에서 교통흐름과 미세먼지, 그리고 도시 통행인구의 공간적 분포를 분석하고자 한다. 특히 본 연구에서는 대기오염문제가 심각한 서울을 대상으로 교통에 기인한 미세먼지의 실태를 살펴보고, 서울을 둘러싸고 있는 경기도 일대에 대단위 주거지들이 밀집된 신도시들이 개발되면서 나타나는 인구분포와 통행패턴, 그리고 교통흐름 및 미세먼지 농도에 나타나는 공간적 변화와 이들 간의 공간적 관계를 종합적으로 파악하기 위하여 GIS를 적용하였다. 또한 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 데이터마이닝기법으로 추출해낸 통행흐름 자료를 이용하여 통행시간별 통행인구분포도를 작성하고, 이를 바탕으로 교통에 기인한 미세먼지에 직접 노출하게 되는 도시인구를 산정하는 시·공간적 모형개발을 시도하였다.

2. 교통에 기인한 미세먼지의 지역적 비교

앞 서 도시 대기오염에 대해 관심을 가져온 유럽의 경우에도 교통에서 발생하는 대기오염 물질이 전체 대기오염 발생원의 절반 이상을 차지하고 있는 상태에서 대기질 개선을 위해 교통량 감소 및 오염물질 배출차량에 대한 규제를 강화하는 제도들이 마련되

표 1. 세계 주요국가의 미세먼지 환경기준

(2007년 현재)

오염물질		국가									
		한국	미국	영국	스위스	일본	싱가포르	대만	홍콩	WHO	EC
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연평균	50	50(20)	40	70	-	50	65	55	20	30
	24시간	100	150(50)	50	150	100	150	125	180	50	50

자료출처 : 환경부, () 캘리포니아 환경기준

어 시행되고 있다. 그러나 교통에 기인하는 오염에 대한 연구는 1990년대 초반부터 다양하게 진행되어 왔지만 일산화탄소와 휘발성 유기화합물(VOCs)에 대한 연구들이 주를 이루고 (Ashmore, et al., 2000; Chan, et al., 2002; Dor, et al., 1995; Duffy, et al., 1997; Lawryk & Weisel, 2002; Leung & Harrison, 1999), 미세먼지에 대한 연구는 최근 들어 활발히 진행되고 있다 (Adams et al., 2002; Alm, et al., 1999; Filliger, et al., 1999).

대기오염은 그 속성상 인체나 생태계에 누적적으로 진행되기 때문에 상황이 극도로 악화되기 전에는 그 피해를 쉽게 발견하기 어렵다. 따라서 우리나라의 대기오염은 위험수위를 넘은 지 오래되었음에도 불구하고 문제의 심각성을 아직 그다지 인식하지 못하고 있는 상태이다. 그러나 최근 국립환경과학원의 조사 결과에 따르면 우리나라 대기오염물질 연평균 농도는 세계 주요 도시보다 최고 4배 이상 높으며⁴⁾, 특히 사람의 건강피해 및 수명단축과 연관이 가장 큰 것으로 알려져 있는 미세먼지의 농도가 높아 (김동영·조진식, 2006) 최근 우리나라에서 압으로 인한

사망자 중 폐암환자가 차지하는 비율이 급격히 높아지고 있다는 보사부의 발표가 있었다⁵⁾.

우리나라에서 먼지에 대한 환경기준이 설정된 것은 1983년이지만 배출원 관리는 총먼지(TSP) 중심으로 되어 있었으며, 미세먼지(PM10)에 대한 환경기준이 설정된 것은 1993년에 들어서이다. 1993년 설정된 미세먼지에 대한 우리나라 환경기준은 하루 평균(24 시간 평균) 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (micrograms per cubic meter of air) 을 세 번 이상 초과하지 않을 것과 연평균 농도가 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하지 않을 것으로 설정하였다. 2001년 연평균 농도를 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 개정하였으나 여전히 OECD국가들에 비해 높게 설정하고 있었으며 2007년 1월 1일부터 24시간평균치 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 연간평균치 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 적용하고 있다. 다음 <표 1>은 2007년 현재 세계 주요 국가들의 미세먼지 환경기준을 나타낸 것이다. 우리나라의 환경기준이 최근 상당히 낮아지기는 하였지만 WHO나 EU 권고 기준에 비하면 여전히 높게 책정되어 있는 상태이다.

<표 2>는 교통에 기인한 미세먼지가 도시민의 건강

표 2. 국가별 교통에 기인한 미세먼지 변화율

(단위 : %)

구분	한국*	프랑스	스위스	독일	영국	네델란드	노르웨이	미국
교통 전체	+32	-28	-39	-29	-39	-41	-21	-35
도로교통	+38	-31	-52	-17	-46	-47	-46	-58
기타	+14	-21	-24	-66	-14	+7	+15	-9

자료출처:OECD Environmental Data COMPENDIUM 2006/2007, Air, pp21-25

* 한국의 경우 자료가 가능한 1999년부터 2004년 사이의 변화율이다.

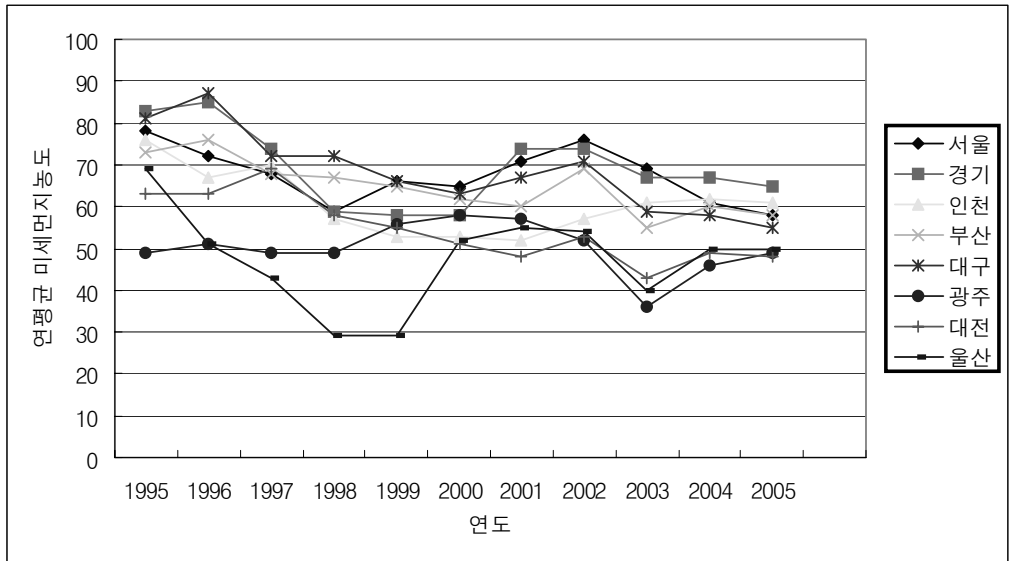


그림 1. 우리나라 주요 도시 미세먼지 농도 추이

에 미치는 피해가 인식되기 시작한 1990년 이후 최근 까지 OECD 주요 국가들의 경우 도로교통에 기인한 미세먼지 배출량의 변화율을 비교한 것이다. 지난 15년 동안 OECD 주요 국가들의 경우 모두 교통에 기인한 미세먼지 발생량이 크게 감소하였으며, 특히 도로 교통에서 발생하는 미세먼지량은 더욱 큰 폭으로 감소하였다. 이에 반해 우리나라의 경우는 지난 1999년 이후 줄곧 교통에 기인한 미세먼지량이 크게 증가하고 있으며, 그 중에서도 특히 도로교통에 의한 미세먼지 발생량은 더 큰 폭으로 증가하여 OECD 다른 국가들과 현격한 대비를 보여주고 있다.

그럼에도 불구하고 유럽 대부분의 도시들에서 교통에 기인하는 미세 먼지량을 감소시키기 위하여 자동차 교통량을 억제하는 다양한 제도들이 도입되어 적용되고 있다. 특히 런던의 경우 유럽의 도시 중 대기질 수준이 가장 낮다는 평가와 함께 매년 대기오염으로 인한 사망자 수가 1000여 명에 이르는 것으로 밝혀지면서 2008년 2월부터 대기 질 개선을 위하여 런던광역권(Greater London) 면적의 대부분이 해당되는 지역을 도시 내에 저 배출 지역(Low Emission

Zone)을 지정하고 이러한 저 배출 지역으로 진입하는 대형차량에 대해 강력한 단속을 시작하였다⁶⁾.

다음 <그림 1>은 지난 10 여 년 동안 우리나라 주요도시들의 미세먼지 농도를 나타낸 것이다. 우리나라 주요도시들은 1990년대 중반부터 IMF 이전까지 미세먼지농도가 상당히 높은 상태였고, 그 후 전반적으로 감소하는 추세를 보이다가 2002년까지 다시 증가하다가 그 이후부터 서서히 감소세를 보이고 있다. 그러나 대부분의 도시에서 아직까지 우리나라 환경기준을 초과하고 있는 상태며, 상대적으로 인구규모가 적고 산업화의 정도가 낮은 대전과 광주 등이 최근 들어 환경기준을 다소 밑돌고 있는 실정이다.

3. 교통량과 미세먼지 농도의 관계

우리나라 도시지역의 경우 도로이동오염원은 전체 미세먼지 배출량의 50%이상을 차지하는 가장 주요 배출원이며, 특히 서울의 경우는 총 미세먼지 배출량

의 73% 이상이 도로이동오염원에 의한 배출되고 있다 (김동영, 조진식, 2006). 도시공간의 교통흐름은 그 지역의 인구 분포와 토지이용 상황과 함께 그 도시의 교통체계와 도시민의 통행행태에 따라 상당한 차이를 보인다 (Vardoulakis, et al., 2005). 물론 미세먼지의 농도는 해당지역에서의 배출량의 영향 뿐 만 아니라 중장거리에서 이동하여 오는 것의 영향도 큰 것으로 알려져 있고(김동영, 조진식, 2006), 해당지역의 지형이나 기상상태 등의 영향도 받게 된다 (Vardoulakis, et al., 2005). 그러나 교통흐름에 기인한 미세먼지예의 노출의 경우 그 배출원에 직접 노출되어 있는 도로상이나 도로 인근의 도시민이 가장 직접적인 영향을 받게 되므로(Cohen, et al., 2005), 본 연구에서는 교통에 기인한 미세먼지에 초점을 두고 분석하기 위해 교통량과 미세먼지 농도의 관계를 살펴보고자 한다.

도시의 교통량과 미세먼지의 농도의 관계를 파악하기 위해 우리나라 주요도시들의 교통밀도와 미세먼지의 연평균 농도 사이의 관계를 분석해 보았다. 다음 <그림 2>의 (가)는 서울과 인천, 경기 등 교통량이 특히 많은 수도권 지역에서 교통밀도⁷⁾와 미세먼지의 관계를 분석한 것이고, <그림 2>의 (나)는 그 밖의 주요 도시들의 교통밀도와 미세먼지의 관계를 보인

것이다. 두 그림에서 미세먼지 농도는 교통밀도에 비례함을 알 수 있다.

서울의 경우 미세먼지(PM10) 오염도는 OECD 30개 회원국의 수도 중에서 가장 열악한 수준으로 나타나고 있는데 특히 도로 이동 오염원과 비도로 이동오염원을 더 더하면 전체적으로 이동오염원에 의한 미세먼지 배출량이 90% 가까이 차지하는 것으로 밝혀지고 있다(김동영, 조진식, 2006). 미세먼지 농도에 영향을 주고 있는 서울시 총교통량의 변화를 보기 위하여 연도 별 평균교통량을 산출하여⁸⁾ 시계열적 변화 추이를 도표로 나타내었다.(<그림 3> 참조)

서울시의 총 교통량은 1993년부터 2006년 까지 1997년, 2000년, 2003년을 변곡점으로 하여 큰 변화를 보이고 있다. 1993년에서부터 1997년까지의 기간 동안에는 서울시 교통량이 크게 증가하였다⁹⁾. 그러나 1997년을 정점으로 1998년까지 1년 동안 4.45%의 감소폭을 보인 이후, 2003년까지 5년간 비슷한 교통량을 지속하다가, 2004년에 다시 큰 폭으로 감소한 이후 지속적으로 감소하는 추세를 보이고 있다¹⁰⁾. 같은 기간 동안 서울시 미세먼지 농도는 전반적으로는 서울시의 교통량 감소에 따라 감소하는 추세를 보이나 교통량에 비해 그 감소폭은 적게 나타나고 있다.

이러한 현상이 나타나는 이유는 다양하겠지만 서

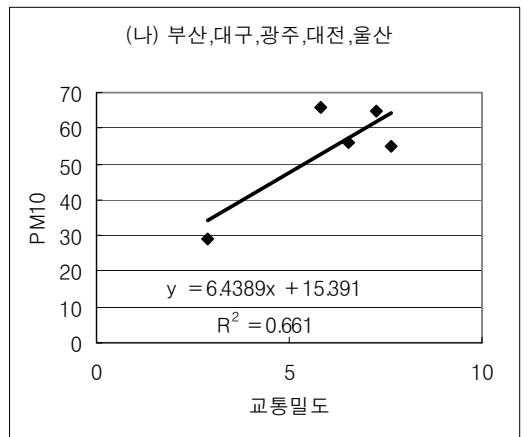
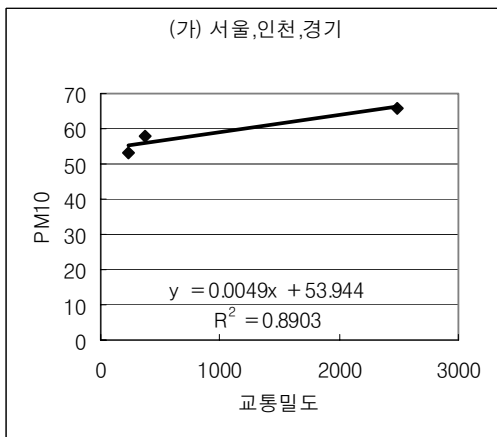


그림 2. 교통밀도와 미세먼지의 관계

64 이금속

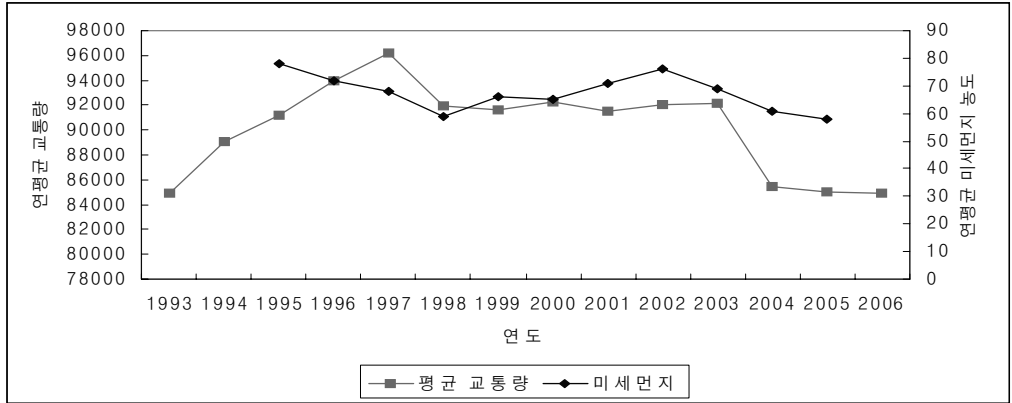


그림 3. 서울시 교통량의 변화 추이

울시의 미세먼지 농도에 서울자체의 교통흐름과 함께 서울을 둘러싸고 있는 경기도와 인천의 영향이 작용하기 때문이라고 생각할 수 있다. 앞의 <그림 1>에 나타나는 것과 같이 서울의 교통량이 크게 줄어든 2003년을 전후하여 경기도와 인천의 미세먼지 농도가 서울보다 높게 나타나고 있다. 이는 경기도는 전역에서 매우 빠른 속도로 인구 및 토지이용밀도가 높아지는 것과 함께 도로 교통량이 크게 증가하게 된 것이 작용하였을 것으로 생각할 수 있다.

<표 3>은 우리나라 전체에 대한 수도권지역의 차량 집중 정도와, 수도권 지역 내에서 서울과 경기, 인천 지역의 차량 증가율의 차이를 나타낸 것이다. 수도권 지역은 1990년대 초반 까지 우리나라 전체 차량의

50%이상이 집중되어 있었으며, 그 후 우리나라 전체적으로 차량이 크게 증가하여 그 집중률은 50%로 내려갔지만 차량 수는 크게 늘어난 상태다. 특히 2000년 이후부터 경기도지역의 차량등록대수는 서울을 크게 초과하였으며 그 증가율이 매우 높고, 서울과 수도권지역은 일일생활권으로 기능적 연계가 강하므로 통행거리도 증가하게 되어 수도권 전역에 걸쳐 교통량이 크게 증가하게 되어 결과적으로 미세먼지 오염농도는 점점 더 악화될 가능성이 높다. 따라서 서울시의 교통에 기인한 미세먼지 문제는 수도권 지역까지 확장하여 분석하는 것이 타당하다고 생각된다.

표 3. 수도권 자동차 집중율과 증가율 변화

단위 : 천대, (%)

	1985년	1990년	1995년	2000년	2005년	증가율*
전국	1,113	3,395	8,469	12,059	15,597	(1,401)
수도권 지역	660(59)	1,790(56)	4,038(48)	5,577(46)	7,115(46)	(1,078)
서울	446	1,194	2,043	2,441	2,809	(630)
경기도	114	447	1,551	2,488	3,506	(3,075)
인천	40	149	444	648	800	(2,000)

* 1985년을 기준으로 2005년 차량등록대수의 증가율을 나타냄.

4. 수도권지역 교통흐름과 미세먼지 농도의 시·공간적 분석

우리나라 수도권 지역은 인구는 물론 각종 산업시설과 경제·사회 활동이 집중되어 있어 많은 교통량이 유발되므로 교통에 기인한 미세먼지 배출량이 특히 많이 발생하는 지역이다. 그런데 이 지역은 우리나라 전체인구의 50%에 가까운 인구가 거주하는 인구 밀집지역이어서 이러한 교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 도시인구 규모가 매우 큰 지역이다.

서울시 교통흐름의 공간적 분포는 앞서 언급한 것과 같이 2004년부터 서울시 전체 교통량이 큰 폭으로 감소함과 함께 그 공간적 분포도 크게 변화하고 있다. 특히 도심 교통량이 특히 크게 감소하며 이전에 도심의 교통량 집중지역이었던 중구와 종로구의 교통량은 30~50%의 높은 감소율을 보이고 있다. 그러나 강북과 강남의 중심업무지역을 연결하는 통로 역할을 하는 한남대교와 성수대교의 교통량이 큰 폭으로 증가하면서 강남구 중심업무지역의 교통량은 크게 증가하고 있다. 2005년에 이르러서는 강남권 전역과 시계지역의 교통량이 크게 증가하고 있다. 서울시의 또 다른 업무지역에 해당하는 영등포권역은 1995년 까지 감소세를 보이다가 그 이후로는 전반적으로 증가하는 추세를 보이면서 강남권과 비등한 평균교통량을 나타내고 있다. 이러한 교통흐름의 변화는 교통량과 이에 기인하는 미세먼지의 공간적 분포에 영향을 미칠 것으로 보고 서울시내에서 하루 중 시간에 따라 교통흐름의 공간적 분포가 달라지면서 미세먼지 농도와 어떤 관계를 보이는지에 대해 알아보기 위하여 서울의 권역 별 하루 동안 교통흐름과 미세먼지 농도의 시간에 따른 변화를 비교해 보았다¹¹⁾. (<그림 4> 참조)

또한 서울의 요일별 통행량과 통행패턴에 많은 차이가 나타나므로 수도권 지역의 교통흐름과 미세먼지 농도의 시·공간적 분포 양상을 파악하기 위하여 전반적으로 미세먼지 농도에 황사 등의 외부적인 요

인이 적게 작용하는 가을철 한 주일의 요일별 미세먼지 분포를 지도화해 보았다¹²⁾. (<그림 5> 참조)

교통량이 특히 많이 몰리는 월요일에서 수요일까지(<그림 5>의 (가)~(다)) 거의 유사한 미세먼지 분포 양상을 보이는데, 서울이 경기도와 만나는 시계의 주요간선 부분들에 미세먼지 농도가 높게 나타나고 있다. 특히 서울의 북부시계 부분에 집중되며, 그 다음으로 서부 시계와 경인지역으로 연결되는 남서부, 그리고 동부의 시계부분에 집중되는 양상을 나타낸다. 그러나 목요일부터 주말까지(<그림 5>의 (라)~(바))는 그 정도가 약화되어 가며, 일요일(<그림 5>의 (사))에는 국지적 집중이 거의 사라지는 양상을 보인다.

5. 미세먼지 노출 도시인구의 시·공간적 분석

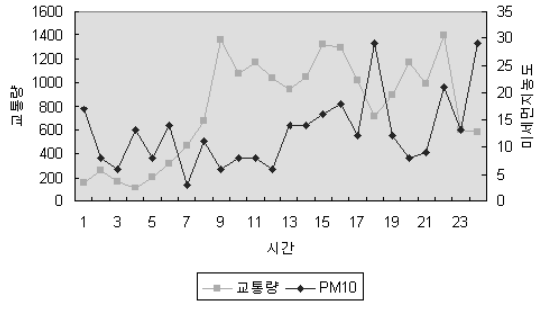
교통에 기인하는 미세먼지에 노출되는 도시인구의 규모는 교통량과 미세먼지의 공간적 분포와 함께 그러한 오염원 가까이에 위치하고 있는 인구의 규모가 얼마나 되는가에 영향을 받게 될 것이다. 특히 교통로를 따라한 이동하는 사람들이 가장 직접적으로 영향을 받게 될 것이므로 도시 통행흐름의 패턴을 검토할 필요가 있다.

도시의 교통흐름은 도시민의 생활과 도시기능이 작동하기 위해 필수적인 것으로 각 도시의 인구 및 도시기능의 공간적 분포와 교통망, 그리고 그 도시민의 통행행태 등에 따라 공간적 분포가 형성된다(Hieschman and Henderson, 1990; Shaw and Xin, 2003). 그런데 한 도시 내의 교통흐름은 그 도시의 인구분포 및 토지이용패턴, 교통망 및 교통체계와 함께 기술·경제·사회적 환경 등이 복합적으로 작용하여 형성되는 것으로 교통흐름의 공간적 분포는 도시 내 지역 간 기능적 연계의 공간적 구조에 영향을 받게 된다.

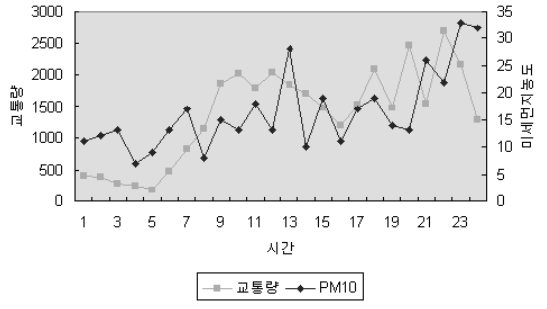
서울시는 급격한 도시성장으로 인구와 각종 도시

66 이금속

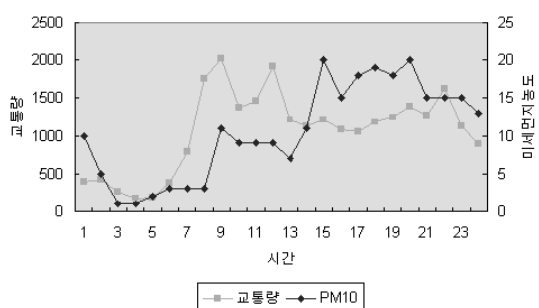
(가) 서울 북부



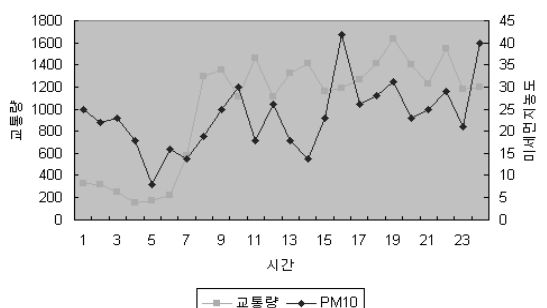
(나) 서울 남부



(다)서울 중심부



(라)서울 동부



(마)서울 서부

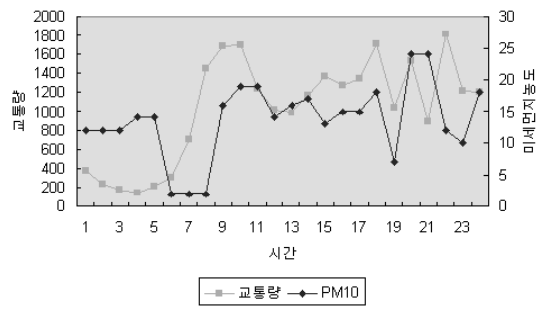


그림 4. 서울시 권역별 시간에 따른 교통흐름과 미세먼지 농도 변화

기능들이 크게 늘어나면서 여러 차례 시역이 외연으로 확장되어 왔다. 그에 따라 직주분리가 심화되어 왔고 통행거리도 증가하게 되었으며 사회 전반적인 소득 증대와 맞물리면서 자동차를 이용하는 통행자가 많아지게 되어 도로교통량이 크게 늘어나는 결과를 초래하였다. 특히 1990년대 중반 이후에는 서울시 역 밖의 경기도 일원에 대단위 고층아파트 단지로 구

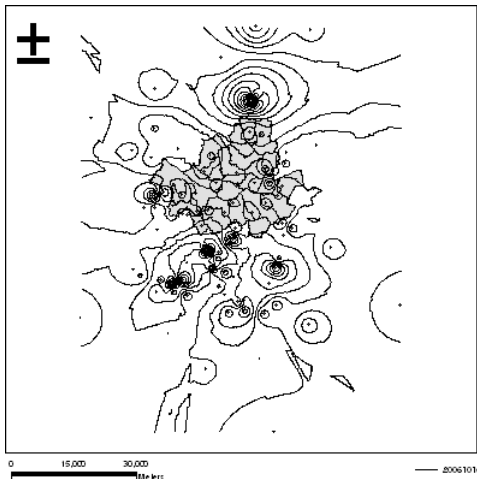
성된 신도시들이 건설되면서 교통흐름의 공간적 양상에 많은 변화가 나타나고 있다.

교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 인구문제는 도시의 인구분포, 도시 내의 기능적 연계 구조, 교통흐름의 분포, 미세먼지의 분포와 함께 도시 통행인구의 분포들을 종합적으로 고려하여야 하는 문제이므로 GIS를 적용하면 효과적이다 (Gulliver & Briggs,

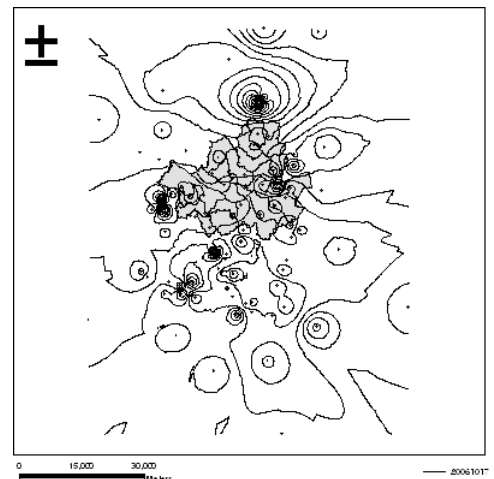
2005; Hochadel, et al. 2006). 앞 서 교통에 기인한 도시인구 산정을 위한 연구를 시도해 온 유럽에서는 도시 거주자 개개인의 하루 동안의 통행에 대한 매우 자세한 조사를 실시하여 그 자료를 바탕으로 GIS의 데이터베이스를 구축하고, 분석을 시도하였으나 도시민 전체를 대상으로 하루 시간대별 통행에 대한 이러한 조사는 엄청난 시간과 비용이 요구되는 것으로 서울과 같은 대도시에서는 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 서울의 경우 가능할 수 있는 방법을

모색하여 적용하였다. 서울시에서 1993년부터 118개 지점에서 하루 24시간 실시간 교통량을 측정하여 데이터베이스를 축적하고 있는 교통흐름에 대한 정보와³⁾, 2004년 대중교통체계 개편이후 서울시 통행의 70%정도를 차지하는 지하철과 버스 이용자의 이동에 대한 실시간 자료를 저장하고 있는 교통카드데이터베이스의 정보⁴⁾를 이용하여 서울시 교통흐름과 통행흐름을 분석하는 방법을 채택하였다. 다음 <그림 6>의 (가)와 (나)는 각각 위의 방법을 이용하여 2006년

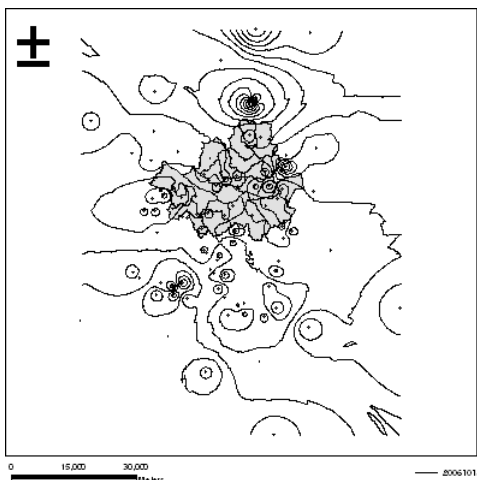
(가)



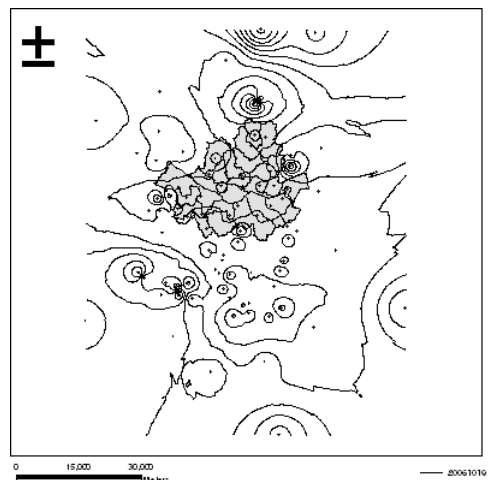
(나)



(다)



(라)



68 이금속

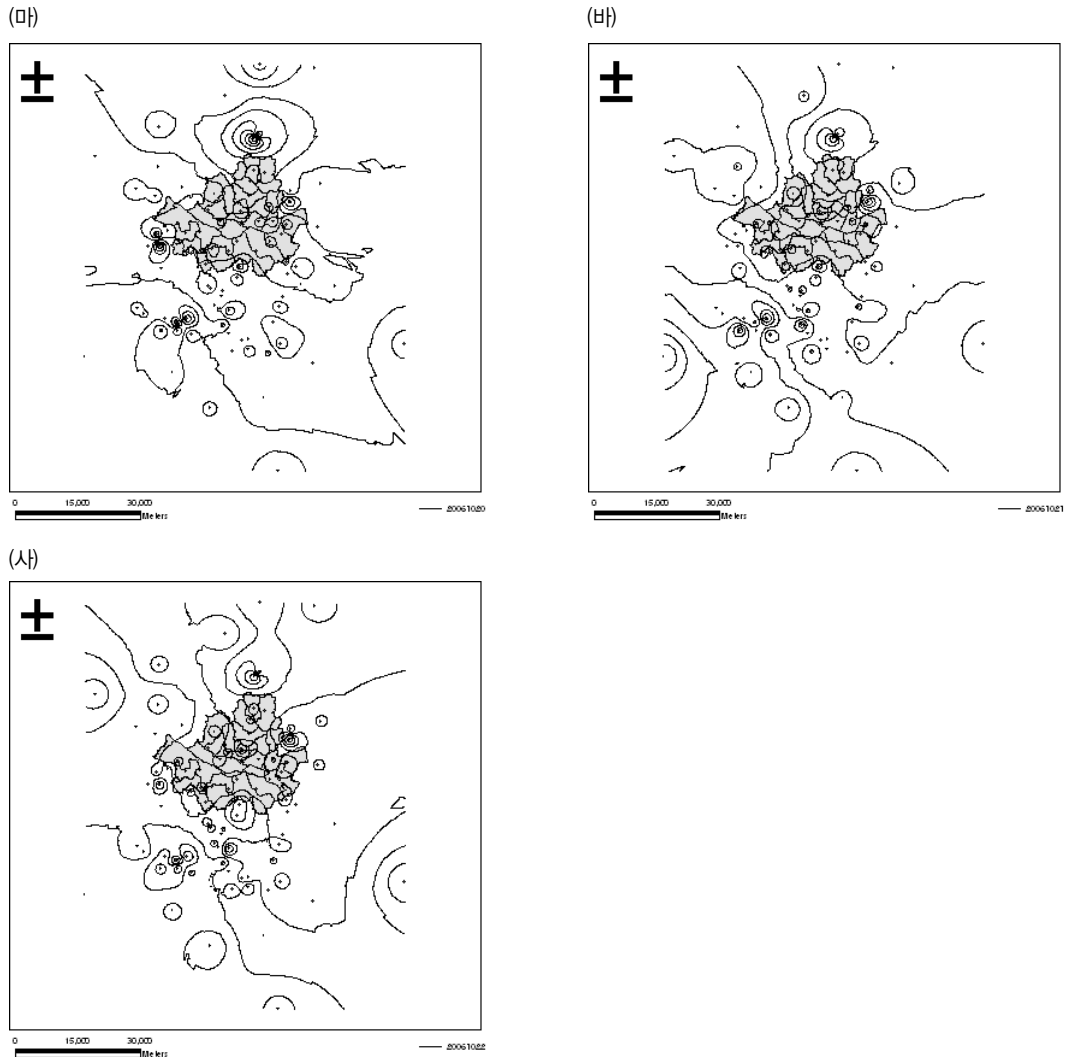


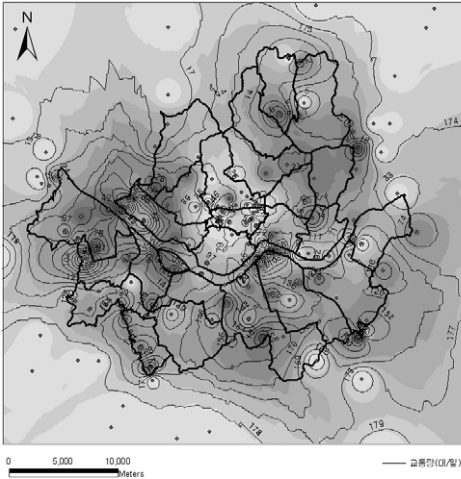
그림 5. 수도권 지역의 요일별 미세먼지 분포

10월 주 중 하루 도로 교통흐름과 대중교통 이용자의 통행흐름을 분석하여 공간적 분포를 나타낸 것이다.

서울을 중심으로 하는 수도권 지역의 인구분포 및 통행흐름은 1990년대 중반에 서울시 주변의 수도권에 5개 신도시 건설로 큰 변화를 보이고 있다. 1990년부터 2005년까지 15년 동안 서울시의 인구는 1990년 10,603,250 명에서 9,762,546 명으로 7.93% 감소하였다. 수도권지역에서 이러한 서울과 경기도사이

의 통근통학 인구의 증가는 서울시와 경기도의 경계인 서울시계의 유출입 교통량의 증가시키고, 통행거리가 길어지면서 전반적으로 통행량을 증가시키는 결과를 수반하였다. 또한 거주인구의 감소를 보이는 서울시내에서도 지역에 따라 그 감소폭에 큰 차이를 보여 도심인 종로구와 중구의 경우 각각 23.42%, 23.76%로 크게 감소한 반면 도봉구, 강서구, 노원구, 금천구의 경우 7.10%, 27.33%, 9.92%, 1.93%로 상대

(가) 도로 교통량 분포



(나) 도로 상에 노출되는 도시인구 분포



그림 6. 수도권 하루 교통흐름의 공간적 분포

적으로 감소폭이 적게 나타나고 있다. 이러한 인구분포의 변화로 경기도와 서울간의 출퇴근과 통학이 점점 증가하게 되어 서울시와 경기도를 오가는 교통량의 증가로 이어지고 있어 시계에서의 유출입 통행량이 급증하면서 서울시 교통흐름의 공간적 구조에 많은 변화를 초래하였다¹⁵⁾. 다음 <그림 7>은 서울시 거주인구와 통근통학으로 이동하는 통행인구를 함께 지도화한 것이고, <그림 8>은 미세먼지 농도의 분포도이다.

6. 교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 도시통행인구 산정모형 개발

교통에 기인한 미세먼지 문제가 대두되면서 교통에 기인한 대기오염 배출량을 측정하기 위한 다양한

모형들이 개발되어 소개되고 있다 (Gkatzoflias, et al., 2006; Zarate, et al., 2007; Han & Naeh, 2005; Xia & Sha, 2005). 그 중 전 세계적으로 널리 적용되는 COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport)는 세계 각 국가와 지역에 대한 월별 평균 기후 정보가 입력되어 있는 상태여서 대기 질을 분석하고자하는 지역의 차량정보, 연료 정보를 넣고 단계별로 실행해 주면 각 대기 오염 물질 별 총 배출량을 산출하여 대상지역의 대기 질을 분석해 주는 모형이다. 그러나 교통에 의해 배출되는 미세먼지에 노출되는 인구문제는 대상 도시의 교통체계와 교통상황 및 도시 공간의 인구 분포와 토지이용 상황, 기능적 연계 및 사람들의 구체적인 통행행태 등에 영향을 받으므로 연구대상 지역의 상화에 맞는 모형 정립이 필요하다 (Vardoulakis, et al., 2005).

특히 도로교통에서 배출되는 미세먼지는 특히 도로변에 가까이 있는 도시인구들에게 치명적인 영향을 미치는 것으로 밝혀지고 있어(Cohen, et al.,

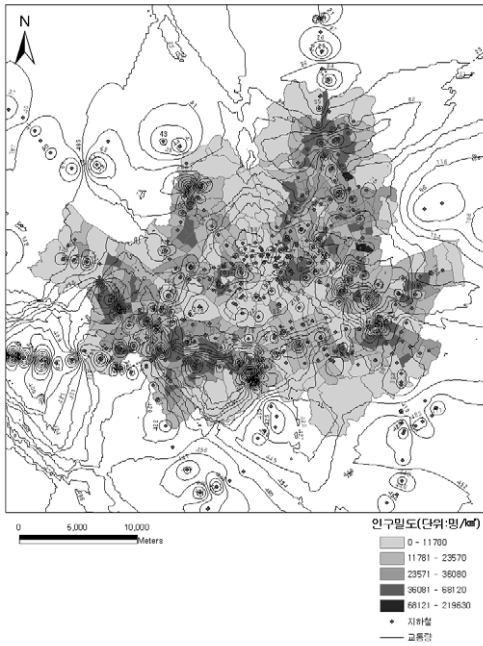


그림 7. 거주인구와 통행인구 분포

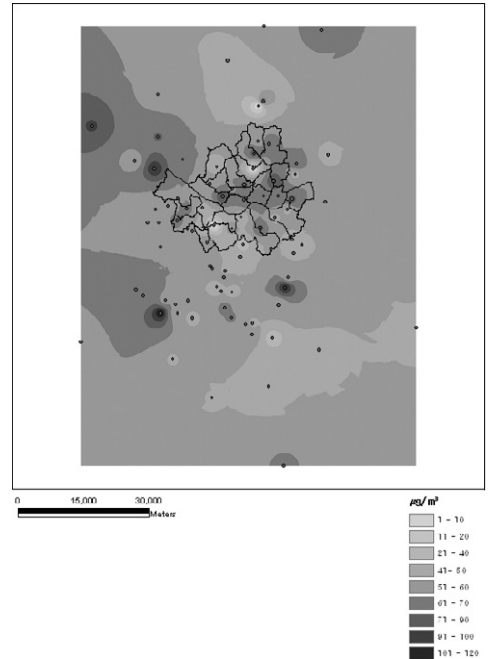


그림 8. 수도권 미세먼지 농도 분포

2005) 교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 도시인구 산정 문제에서는 집을 나서 교통로 상에 있게 되는 시간동안 교통에 기인하는 미세먼지에 직접 노출되게 되므로 하루 동안의 도시민들이 교통로상이나 그 부분에 있게 되는 통행시간 동안의 교통에 기인한 미세먼지에 직접적으로 노출되는 도시인구를 산정하는 지표로 사용하고 있다 (Gulliver & Briggs, 2005; Lipfert, et al., 2006). 본 연구에서는 기존 연구들이 채용한 지표를 바탕으로 교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 도시인구를 산정하는 모형을 개발하여 제시하고자 한다. 특히 교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 도시 통행인구를 산정하기 위한 모형을 개발하는데 초점을 맞추기로 한다.

우선 수도권 인구의 하루 통행흐름을 파악하기 위하여 2006년 5월 17일 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에 데이터마이닝 기법(Lee & Park, 2005; 박종수 · 이금속 2006; 이금속 · 박종수, 2007)을 적용하여 산출한 이동시간별 통행자 수의 분포함수를 도출하

였다 (<그림 9> 참조).

교통카드 트랜잭션 데이터는 교통카드를 이용하는 통행자에 대한 시간정보와 공간정보를 모두 가지고 있으므로 개개 통행자의 통행시간 뿐 만 아니라 통행구간에 대한 정보도 추출하는 것이 가능하다. 다음 <그림 10>은 하루 중 시간대에 따라 통행흐름의 공간적 분포를 지도화한 것이다. 그림에 나타나는 것처럼 시간대에 따라 교통로 주변에 노출되는 도시인구의 분포에는 확연한 차이가 있다.

따라서 수도권지역에서 도시통행인구가 통행을 위해 이동하면서 교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 정도를 산출하기 위해서는 미세먼지, 교통흐름, 도시통행인구의 시간에 따른 변화를 고려하여 다음과 같은 시 · 공간적 모형을 구축할 수 있다.

우선 통행을 위해 이동하는 시각 t_1 에서 t_2 동안 미세먼지에 노출된 교통로 주변 도시인구의 미세먼지 총 노출 P 는 도로 위에 외출시간을 고려한 다음 식을 써서 산정할 수 있다.

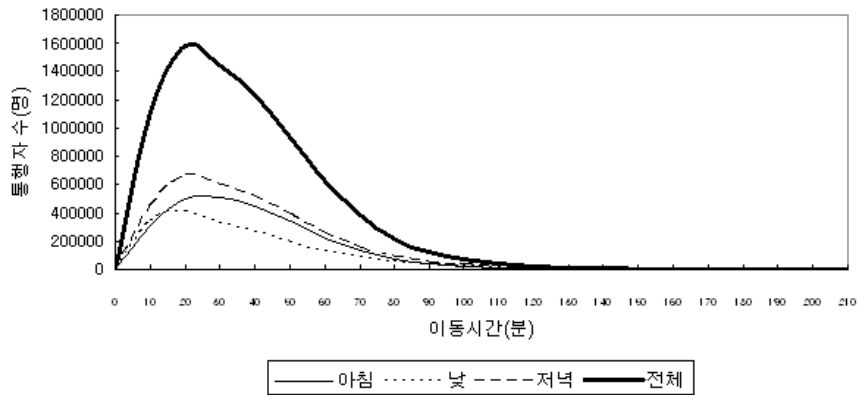


그림 9. 이동시간별 통행자수 분포도

$$P = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (1)$$

$$p(t) = \sum_i^n \sum_j^n C_{ij}(t) p_{ij}(t) x_{ij}(t) \quad (2)$$

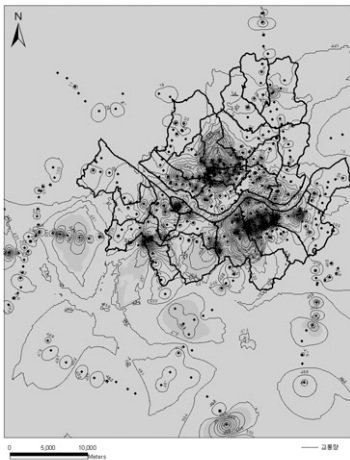
여기서 $p(t)$ 는 도시에서 t 시간대에 교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 전체 사람 수를 나타내고, C_{ij} 는 t 시간대에 지역 i 에서 j 까지 교통로 구간 ij 의 미세먼지 농도, $p_{ij}(t)$ 및 $x_{ij}(t)$ 는 각각 t 시간대에 i 지역과 j 지역 사이의 통행인구 및 이동시간을

의미한다. 구간 및 시간대마다 미세먼지 농도를 측정 한 자료가 없고 전체 도시 및 하루에 대한 평균값 C 만 주어져 있는 경우에는 이동시간이 시간대에 따라 변하지 않는다고 가정해서 위의 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

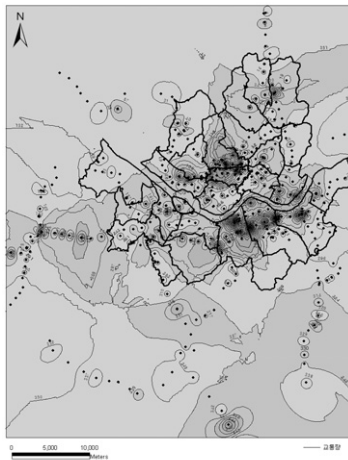
$$p = C \sum_i^n \sum_j^n x_{ij} \int_{t_1}^{t_2} p_{ij}(t) dt = C \int_{x_{min}}^{x_{max}} x f(x) dx \quad (3)$$

이 식에서 $f(x)$ 는 시각 t_1 에서 t_2 동안 이동시간이

(가) 아침



(나) 낮



(다) 저녁

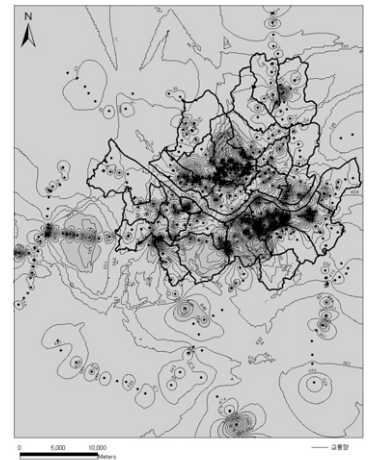


그림 10. 시간대별 통행흐름 분포(2006년)

x 인 전체 통행인구를 나타내며 x_{\min} 및 x_{\max} 은 각각 최소 및 최대 이동시간을 가리킨다.

7. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 현재 세계 주요 도시들에 비해 미세먼지의 농도가 매우 높으며 인구밀도가 높아 그 피해를 입는 도시인구 규모가 큰 서울시를 대상으로 교통에 기인한 대기오염에 노출되는 도시인구에 대한 분석을 시도하였다. 본 연구의 목적은 도시의 혼잡한 교통흐름이 도시민의 건강에 미칠 영향의 정도를 파악하기 위하여 도시의 교통흐름과 인구분포, 토지이용 상태를 감안하여 도시인구 중 교통에 기인한 각종 오염물질 및 위험에 노출되는 정도를 측정하는 모형을 개발하고, 그를 바탕으로 궁극적으로는 지속가능한 발전을 위한 도시교통체계 구축에 적용하려는 것이다.

서울시는 그 자체의 인구 및 도시중심기능의 집중도 크지만 그를 둘러싸고 있는 수도권지역에 고밀도의 주거지 개발이 지속되면서 빠르게 성장하고 있어 교통량이 크게 증가하고 있어 앞으로 교통에 기인한 미세먼지 문제가 심각히 우려되는 지역이다. 특히 수도권지역의 서울과의 기능적 연계가 커서 양 방향으로의 통근통학 인구규모가 늘어나고 있는데 이는 도시인구의 통행거리와 교통에 기인한 미세먼지에 직접 노출되는 통행시간의 증가와 연결되므로 앞으로 미세먼지의 피해를 받는 도시인구의 규모와 그 피해 정도가 증가할 것으로 예상되므로 이에 대한 연구와 대책이 시급히 요청되는 지역이다.

우리나라 미세먼지의 오염정도를 파악하기 위하여 OECD 주요국가와 도시들의 미세먼지에 대한 환경기준을 비교하고 최근 10여년 교통에 기인한 미세먼지의 증감률을 비교하였다. OECD 주요국가 들의 경우 모두 미세먼지 배출량 중 교통에 기인한 미세먼지의 배출량이 크게 감소하고 있는데 반해 우리나라는 오

히려 교통에 기인한 미세먼지의 배출 비율이 상당히 높게 나타나고 있다. 이는 역으로 우리나라의 경우 교통에 기인하는 미세먼지를 줄이면 미세먼지 오염 문제를 크게 개선할 수 있음을 시사한다.

서울과 수도권 지역에서 실시간 관측되고 있는 교통흐름 자료와 미세먼지 자료를 바탕으로 이들의 시간과 공간에 따른 분포를 분석하였다. 서울시 도로교통량과 미세먼지 오염농도는 거의 일치하고 있다. 즉 이는 서울시 도로교통량과 미세먼지 오염도가 밀접한 연관이 있음을 의미하며, 따라서 서울시 교통흐름의 분포를 통하여 미세먼지에 노출되는 도시인구의 정도를 파악할 수 있음을 의미한다. 또한 서울시 도로교통량 감소를 유도하여 서울의 대기 질 개선을 도모할 수 있는 가능성이 있음을 시사해 준다고 볼 수 있다.

또한 교통에 기인한 미세먼지에 직접적인 영향을 받는 도시인구를 분석하기 위하여 통행자의 통행에 대한 위치와 시간, 통행경로 등의 정보를 고스란히 담고 있는 교통카드 트랜잭션 데이터를 이용하여 수도권 통행인구의 이동시간에 따른 통행인구 규모를 분석하고, 이의 분포도 함수를 도출하여 그를 기반으로 교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 도시인구의 규모를 산정하는 시·공간적 모형을 개발하였다.

본 연구의 결과는 현재 서울을 중심으로 한 수도권 지역에서 교통시스템이 도시민의 건강에 미치는 유해 정도를 가늠하는 지표로 사용할 수 있으며 지속가능한 도시교통체계를 구축을 위해 향후 수도권 지역의 교통정책 입안과 교통체계 관리에 있어 나아가야 할 방향을 제시하고, 정책의 평가를 위해 좋은 방향타 역할을 할 수 있을 것이다. 또한 교통에서 기인하는 시민 건강 피해에 대한 정보를 시공간적으로 제공하여 사전 예방 조치 및 도시 교통 환경을 지속 가능한 도시체계로 개선하기 위한 홍보 및 시민참여 유도 수단으로도 활용할 수 있을 것이다.

물론 도시교통이 도시인구의 건강에 미치는 영향은 매우 다양하며, 그 메커니즘과 결과도 단순치 않으므로 교통이 인간에게 미치는 영향은 다양한 측면

에서 검토되어야 할 것이다. 또한 본 연구에서 제시된 모형은 초기 개발단계의 것으로 추후 좀 더 정교하게 다듬어져야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 주어진 자료의 한계에서 아직까지 국내에서 연구되지 않은 교통에 기인한 미세먼지에 노출되는 도시인구에 대한 첫 시도라는 점과 아직 작업하지 못한 다양한 부분으로 확장 할 수 있으므로 많은 후속 연구를 끌어낼 수 있다는 점에서 학문적 의의가 있다고 하겠다. 또한 프랑스는 물론 유럽의 여러 국가들에서 모두 깊은 관심을 보이고 있는 연구주제이므로 앞으로 이들과 자료 및 결과를 상호 교류하고, 방법론 및 이론 확립을 위한 교류와 협의를 위해 지속적인 국제 학술교류가 발전되고 확산될 가능성도 열려 있다고 생각한다.

謝辭

본 연구의 주제 선정과 진행 과정에서 많은 토론을 통해 의견을 나누는 프랑스 스트라스부르의 Universite Louis Pasteur CNRS UMR 7011, Laboratoire Image et Ville 소속의 Arnaud Banos 박사와 Nadege Blond 박사, 그리고 서울대학교 물리·천문학부의 최무영 교수에게 감사한다. 또한 교통카드데이터와 교통흐름데이터 작업에 도움을 준 성신여자대학교 컴퓨터 정보학부 박종수 교수와 성신여자대학교 지리학과 대학원생 홍지연과 민희화에게 감사한다.

주

- 1) 미세먼지는 연간 기준으로 30 이하의 농도에서도 사람들의 기대수명을 떨어뜨리며, 장기적으로 농도가 10 증가할 때 사망률을 10%나 높인다고 세계보건기구(WHO)가 공식적으로 밝힌 정도로 유해성이 높은 대기오염물질이다.
- 2) Korea Environment Institute, 2002
- 3) 2004년 기준 국내 미세먼지(PM10) 연평균 농도는 서울이 $61\mu\text{g}/\text{m}^3$ (이하 단위 생략)를 기록하는 등 전국 주요 도시

가 37~80으로, 뉴욕(22), 런던(27), 시드니(18.5) 등 세계 주요 도시에 비해 최고 4배가 넘었다.

- 4) 국립환경과학원, 2006, 대기환경 기준 개선을 위한 조사 연구 보고서
- 5) 이에 따라 국립환경과학원은 국민건강 보호를 위해 대기환경 기준을 현재보다 30% 이상 강화해야 한다고 제안했다. 미세먼지의 경우 24시간 평균 대기환경 기준을 현재 대기오염 농도 150에서 100으로, 연평균 기준을 현재 70에서 50으로 강화해 내년부터 적용하자는 개선안을 제시했다. 환경과학원은 또 이산화질소도 1시간 기준 대기환경 기준을 현재 0.15ppm에서 0.10ppm, 24시간 기준은 현재 0.08ppm에서 0.06ppm, 연간 기준은 0.05ppm에서 0.03ppm으로 강화하고, 대기환경 기준이 없는 벤젠에 대해서도 연간 환경기준을 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 새로 설정해야 한다고 지적했다. [한겨레 2006, 2. 19 김정수 기자 jsk21@hani.co.kr]
- 6) 런던의 저 배출 지역으로 지정된 범위는 1580km^2 로 된다 (시정연구 제186호 : 2008, 3. 3, www.tfl.gov.uk).
- 7) 교통밀도는 단위면적 당 교통량을 나타낸 것으로 각 도시의 총 교통량을 면적으로 나눈 값을 적용하였다.
- 8) 년도 별 서울시 평균교통량

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

F = 평균교통량 산정 방식

x_i = 지점별 교통량 ($i=1, 2, \dots, n$)

- 9) 이 기간 동안 서울시 전체 교통량은 84955대에서 96221대로 13.26%증가하였다.
- 10) 2003년에서 2004년 1년 사이에 교통량은 92101대에서 85448로 7.22%의 큰 감소율을 보였다. 2005년과 2006년에는 85003대와 84881대로 각각 0.52%, 0.14%로 지속적인 감소율을 보이고 있다.
- 11) 2006년 7월 2일 자료를 이용하였음.
- 12) 2006년 10월 16일 부터 22일까지 자료를 사용하였음.
- 13) 서울시의 교통량 측정방식은 도로에 loop coil을 매설해서 지나가는 차량수를 실시간 측정하고 있으며, 측정지점은 도심 23 개소, 시경계 36 개소, 한강교량 18개소, 주요간선 41개소이다.
- 14) 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에는 교통카드를 이용하여 통행하는 사람들의 통행에 대해 통행의 시작, 중간

의 갈아탐, 최종 도착지에 대한 위치, 시간, 통행수단 등 매우 많은 정보를 담고 있는데 이러한 대용량 교통정보 데이터베이스에서 효과적으로 데이터마이닝을 하면 이러한 분석에 필요한 유용한 교통흐름과 통행흐름에 대한 정보를 얻을 수 있다 이금속 외, 2005, 2006, 2007 연 구 참조).

- 15) 서울과 이들 신도시 간 통근·통학하는 인구가 크게 늘어나게 되어 경기도에서 서울로의 통근·통학하는 인구수가 1990년에서 2005년까지 79.43%의 증가하였으며, 서울에서 경기도로 통근·통학하는 인구수도 1990년에서 2005년까지 약 29만 명에서 약 49만 명으로 69.11% 증가하였다.

참고문헌

- 김동영·조진식, 2006, 수도권 미세먼지 모델링 연구, 경기 개발연구원.
- 김운수, 2004, 서울시 미세먼지 배출량 조사·분석 및 관리 방안 연구, 시정개발연구원.
- 박중수·이금속, 2007, "대용량 교통카드 트랜잭션 데이터 베이스에서 통행패턴 탐사와 통행행태 분석," 한국경제지리학회지 10(1), pp. 44-63.
- 이금속·박중수, 2006, "서울시 대중교통 이용자의 통행패턴 분석," 한국경제지리학회지 9(3), pp. 379-395.
- 국립환경과학원, 2006, 대기환경 기준 개선을 위한 조사연구 보고서.
- 서울지방경찰청 교통발전연구실, 1993-2006, 서울시 교통량 조사자료.
- Adams, H. S., Nieuwenhuijsen, M. J., Colville, R. N., Older, M. J., Kendall, M., 2002, "Assessment of road users' elemental carbon personal exposure levels, London, UK," *Atmospheric Environment* 36, pp. 5335-5342.
- Alm, S., Jantunen, M. J., Vartiainen, M., 1999, "Urban commuter exposure to particle matter and carbon monoxide inside an automobile," *J Expo Anal Environ Epidemiol* 9, pp. 237-244.
- Ashmore, M. R., Batty, K., Machin, F., Gulliver, J., Grossinho, A., Tate, J., 2000, "Effects of traffic management and transport mode on the exposure of schoolchildren to carbon monoxide," *Environ Monit Assess* 65, pp.49-57.
- Brajer, V., Mead, R.W., and Xiao, F., 2006, "Valuing the health impacts of air pollution in Hong Kong," *Journal of Asian Economics* 17, pp.85-102.
- Chan, A. T., 2002, "Indoor-outdoor relationships of particulate matter and nitrogen oxides under different outdoor meteorological conditions," *Atmospheric Environment* 36, pp. 1543-1551.
- Cohen, J., Cook, R., Bailey, C. R., and Carr, E., 2005, "Relationship between motor vehicle emissions of hazardous pollutants, roadway proximity, and ambient concentrations in Portland, Oregon," *Environmental Modelling & Software* 20, pp.7-12.
- Colville, R. N., Kaur, S., Britter, R., Robins, A., Bell, M. C., Shallcross, D., Belcher, S. E., and D.A.P.P.L.E. Project Co-investigators, 2004, "Sustainable development of urban transport systems and human exposure to air pollution," *Science of the Total Environment* 334, pp.481-487.
- Dor, F., Le Moullec, Y., Festy, B., 1995, "Exposure of city residents to carbon monoxide and monocyclic aromatic hydrocarbons during commuting trips in the Paris metropolitan area," *Journal of Air Waste Management Association* 45, pp. 103-110.
- Duffy, B. L., Nelson, P. F., 1997, "Exposure to emissions of 1,3-butadiene and benzene in the cabins of moving motor vehicles and buses in Sydney, Australia," *Atmospheric Environment* 31(23), pp.3877-3885.
- Filliger, P., Puybonnieux-Texier, V., Schneider, J., 1999, *Health Costs due to Road Traffic-related Air Pollution: An impact assessment project of Austria, France and Switzerland*, Technical Report on Air Pollution, Prepared for the WHO Ministerial Conference for Environment and Health.
- Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Ntziachristos, L., and Samaras, Z., 2006, COPERT 4 (Computer

- Programming to Calculate Emissions from Road Transport) User's Manual (Version 3.0), European Environment Agency.
- Gulliver, J., and Briggs, D. J., 2005, "Time-space modeling of journey-time exposure to traffic-related air pollution using GIS," *Environmental Research* 97, pp.10-25.
- Han, X. and Naeher, L. P., 2006, "A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world," *Environment International* 32, pp.106-120.
- Hirschman, I. and Henderson, M., 1990, "Methodology for assessing local land use impacts of highways," *Transportation Research Record* 1274, pp. 35-40.
- Hochadel, M., Heinrich, J., Gehring, U., Morgenstern, V., Kuhlbusch, T., Link, E., Wichmann, H-E., and Kromer, U., 2006, "Predicting long-term average concentrations of traffic-related air pollutants using GIS-based information," *Atmospheric Environment* 40, pp.542-553.
- Hwang, B-F., Lee, Y-L., Lin, Y-C., Jaakkola, J. J. K., and Guo, Y. L., 2006, "Traffic related air pollution as a determinant of asthma among Taiwanese school children," *Downloaded from thorax.bmjournals.com* on 10. pp.467-473.
- Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M., Colville, R., 2005 "Pedestrian exposure to air pollution along a major road in Central London, UK," *Atmospheric Environment* 39, pp. 7307-7320.
- Kim, J. J., Smorodinsky, S., Lipsett, M., Singer, B. C., Hodgson, A. T., and Ostro, B., 2004, "Traffic-related Air Pollution near Busy Roads," *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 170, pp.520-526.
- Kingham, S., Meaton, J., Sheard, A., Lawrenson, O, 1998, "Assessment of exposure to traffic-related fumes during the journey to work," *Transportation Research D* 3, pp. 271-274.
- Kuehni, C. E., Strippoli, M-P.F., Zwahlen, M., and Silverman, M., 2006, "Association between reported exposure to road traffic and respiratory symptoms in children: evidence of bias," *International Journal of Epidemiology* 35, pp.779-786.
- Lawryk, N. J., Weisel, C. P., 1996, "Concentrations of volatile organic compounds in the passenger compartments of automobiles," *Environmental Science Technology* 30, pp.810-816.
- Lee, Keumsook and Park, J. 2005, "Traversal pattern analysis of transit users in the Metropolitan Seoul," *Proceedings of International Forum on the Public Transportation Reform in Seoul*, (July 7-8, 2005, Seoul).
- Lee, Keumsook, 2004, "Spatial relationships between respiratory disease and the local environment in Korea," *Proceeding of IGC-UK* (2004. 8. 15-20, Glasgow).
- Leung, P-L, Harrison, R. M., 1999, "Roadside and in-vehicle concentrations of monoaromatic hydrocarbons," *Atmospheric Environment* 33, pp.191-204.
- Lipfert, F. W. Wuzga, R. E. Baty, J. D., and Miller, J. P., 2006, "Traffic density as a surrogate measure of environmental exposures in studies of air pollution health effects: Long-term mortality in a cohort of US veterans," *Atmospheric Environment* 40, pp.154-169.
- Penard-Morand, C., Schillinger, C., Armengaud, A., Debotte, G., Chretien, E., Pellier, S., Annesi-Maesano, I., and ISAAC-France., 2006, "Assessment of schoolchildren's exposure to traffic-related air pollution in the French Six Cities Study using a dispersion model." *Atmospheric Environment* 40, pp.2274-2287.
- Ponce, N.A., Hoggatt, K.J., Wilhelm, M., and Ritz, B., 2005, "Preterm Birth: The Interaction of Traffic-related Air Pollution with Economic Hardship in Los Angeles Neighborhoods," *American Journal of Epidemiology* 162(2), pp.140-148.
- Show, S. and Xin, X., 2003, "Integrated land use and transportation interaction: a temporal GIS exploratory data analysis approach," *Journal of*

76 이금숙

- Transport Geography* 11, pp.103-115.
- Vardoulakis, S., Gonzalez-Flesca, N., Fisher, B.E.A., and Pericleous, K., 2005, "Spatial variability of air pollution in the vicinity of a permanent monitoring station in central Paris," *Atmospheric Environment* 39, pp.2725-2736.
- Xia, L., and Shao, Y., 2005, "Modelling of traffic flow and air pollution emission with application to Hong Kong Island," *Environmental Modelling & Software* 20, pp.1175-1188.
- Zarate, E., Belacazar, L. C., Clappier, A., Manzi, V., Van den Bergh, H., 2007, "Air quality modelling over Bogota, Columbia: Combined techniques to

estimate and evaluate emission inventories," *Atmospheric Environment* 41, pp. 6302-6318.

교신 : 이금숙, 서울특별시 성북구 동선동 3가 249-1, 사회
과학대학 지리학과, Tel:02-920-7138, E-mail:
kslee@sungshin.ac.kr

Correspondence: Keumsook Lee, 249-1 Dongseon-dong
3-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-742, Korea, Tel: 82-2-
920-7138, E-mail: kslee@sungshin.ac.kr

최초투고일 2008년 2월 19일

최종접수일 2008년 3월 10일

Journal of the Economic Geographical Society of Korea

Vol.11, No.1, 2008(59~77)

Spacio-temporal Analysis of Urban Population Exposure to Traffic-Related air Pollution*

Keumsook Lee**

Abstract : The purpose of this study is to investigate the impact of traffic-related air pollution on the urban population in the Metropolitan Seoul area. In particular, this study analyzes urban population exposure to traffic-related particulate materials(PM). For the purpose, this study examines the relationships between traffic flows and PM concentration levels during the last fifteen years. Traffic volumes have been decreased significantly in recent year in Seoul, however, PM levels have been declined less compare to traffic volumes. It may be related with the rapid growth in the population and vehicle numbers in Gyenggi, the outskirt of Seoul, where several New Towns have been developed in the middle of 1990's. The spatial pattern of commuting has changed, and thus and travel distances and traffic volumes have increased along the main roads connecting CBDs in Seoul and New Towns consisting of large residential apartment complexes. These changes in traffic flows and travel behaviors cause increasing exposure to traffic-related air pollution for urban population over the Metropolitan Seoul area. GIS techniques are applied to analyze the spatial patterns of traffic flows, population distributions, PM distributions, and passenger flows comprehensively. This study also analyzes real time base traffic flow data and passenger flow data obtained from T-card transaction database applying data mining techniques. This study also attempts to develop a space-time model for assessing journey-time exposure to traffic related air pollutants based on travel passenger frequency distribution function. The results of this study can be used for the implications for sustainable transport systems, public health and transportation policy by reducing urban air pollution and road traffics in the Metropolitan Seoul area.

Keywords : traffic-related air pollution, Particulate Materials (PM), urban population, GIS, traffic flows, journey-time exposure, sustainable transport systems

* This work was supported by the Korea Research Foundation Grant funded by the Korean Government (KRF-2006-B00022)

** Professor, Department of Geography, Sungshin Women's University