creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

[UCI]I804:11046-000000517639

서울시 거주 미취학 아동 대상 시설 공간 및 활동별 일일 미세먼지 노출 추정연구

연세대학교 보건대학원

산업환경보건학과 환경보건전공

정 경 준

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

서울시 거주 미취학 아동 대상 시설 공간 및 활동별 일일 미세먼지 노출 추정연구

지도 신 동 천 교수

이 논문을 보건학석사 학위논문으로 제출함

2018년 6월 일

연세대학교 보건대학원
산업환경보건학과 환경보건전공
정 경 준

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

정경준의 보건학 석사학위 논문을 인준함

심사위원 신동천 인

심사위원 임 영 욱 인

심사위원 양 지 연 인

연세대학교 보건대학원

2018년 6월 일

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

감사의 글

본 논문을 투고하기까지 저를 이끌어주신 많은 분들께 진심으로 감사의 말씀 드립니다.

환경보건에 대해 문외했던 저에게 보건학적 시야를 심겨주시고 학자의 길로 인도하여 주신 신동천 교수님께 진심으로 감사드립니다. 언제나 저를 살펴 주시고, 더 발전할수 있도록 아낌없는 조언을 주신 임영욱 교수님, 처음부터 끝까지 세심하게 조언해 주신 양지연 교수님, 논문의 중심과 방향성을 잡아 주신 이용진 박사님, 제가 갈팡질팡 할 때 진짜 힘이 되어주신 홍지연 박사님께 진심으로 감사드립니다.

진심어린 조언을 아끼지 않으셨던 승한선배, 업무적으로 언제나 도움만 받은 건우선배, 보이지 않는 곳에서 수고하는 지현 선배, 그리고 졸업한 선배분들게 진심으로 감사드립니다. 저를 언제나 이해해주고 도와준 정말 고마운 동기들, 현실적인 조언을 아낌없이 주시는 황지혜 팀장님, 먼저 도망간 분위기 메이커 위도 보면 아래도 봤으면 하는 보라, 낮에는 비실대다가도 밤만 되면 패기 넘치는 권사장 대호에게 정말 진심으로 감사드립니다. 다시 연구소 들어오셔서 궂은일 담당하시는 원이 형님과, 지금까지 자기 역할 잘 감당하고 있는 준혁이, 언제나 연구소를 지켜주는 연구소 수호대 승은이, 맡은 일에 책임을 다하는 헌산이, 귀찮은 일도 묵묵히 잘 해주는 경운이, 막내같지 않은 막내 슬기, 가끔씩 얼 타는 은지, 살 좀 찌웠으면 하는 준희까지 정말 감사드립니다. 보이지 않는 곳에서 항상 수고하시는 강지연 팀장님, 박하영 선생님, 김아름둘이 선생님과 연구소에서 정말 열심히 일하시는 종화샘, 유림샘에게도 감사의 말씀을 드립니다.

쪽문병신 회장 승운이와, 맴버 승봉이, 철로, 기태, 태근이에게도 감사의 말씀을 드리며, 대구 계모임 회장되신 민수와 정말 아끼는 동생들, 경인이와 준빈이에게도 감사의 말씀을 드립니다. 마지막으로 언제나 저를 믿고 도와주신 가족들에게 정말 사랑하고 감사하단 말씀 드립니다.

2018년 6월

정경준 사룀

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

차 례

국 문 요 약 ····· vi

Ⅰ. 서 론 ····· 1

1. 연구의 필요성 ····· 1

Ⅱ. 연 구 방 법 ····· 3

1. 연구 내용 ····· 3

2. 평가 대상자 ····· 4

3. 평가 대상 물질 ····· 4

4. 자료 선정 ····· 4

4.1. 미취학 아동 주요 시설공간 ····· 5

4.2. 주요 시설공간별 미세먼지 데이터 ····· 6

4.3. 미취학 아동 노출계수 ····· 7

4.4. 활동별 시간 ····· 8

5. 미취학 아동 미세먼지 노출시나리오 구성 ····· 11

6. 미세먼지 노출량 및 노출 기여도 평가 ····· 13

6.1. 미세먼지 노출량 평가 ····· 13

6.1. 미세먼지 노출 기여도 평가 ····· 14

Ⅲ. 연 구 결 과 ····· 15

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

1. 활동별 미세먼지 기여도 평가 ····· 15
2. 미취학 아동 미세먼지 노출량 평가 결과 ····· 19
3. 연령별 미세먼지 노출량 비교 ····· 27
4. 성별 미세먼지 노출량 비교 ····· 29
5. 시설공간별 미세먼지 기여도 평가 ····· 30

Ⅳ. 고 찰 ····· 34

Ⅴ. 결 론 ····· 38

참 고 문 헌 ····· 39

부 록 ····· 42

영 문 초 록 ····· 55

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 차 례

표 1. 미취학 아동(여아) 연령별 미세먼지 노출량 비교 ·····5
표 2. 한국형 어린이 노출계수 - 체류시간(hr/day) ·····6
표 3. 미취학 아동 시설공간별 사용된 미세먼지 농도 현황 ·····7
표 4. 한국형 어린이 노출계수 - 체중(kg) ·····7
표 5. 한국형 어린이 노출계수 - 호흡률(㎥/hr) ·····8
표 6. 한국형 어린이 노출계수 - 집에서의 주요 활동별 시간(hr) ·····9
표 7. 어린이집 교육과정 일과 전체시간 대비 활동 비율(%) ·····10
표 8. 어린이집 교육과정 일과 전체시간 대비 활동 시간(hr) ·····10
표 9. 한국형 어린이 노출계수 - 이동으로 보낸 시간(hr) ·····11
표 10. 노출시나리오 설정 ·····12
표 11. 미취학 아동(남아) 시설공간 활동별 PM-10 노출 기여도 평가 결과 1 ·····16
표 12. 미취학 아동(남아) 시설공간 활동별 PM-10 노출 기여도 평가 결과 2 ·····17
표 13. 미취학 아동(남아) 활동별 미세먼지(PM-10) 노출 기여도 평가 결과 ·····18
표 14. 미취학 아동(남아) 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출량 현황 ·····20
표 15. 미취학 아동(남아) 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출량 현황 ·····22
표 16. 미취학 아동(여아) 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출량 현황 ·····24
표 17. 미취학 아동(여아) 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출량 현황 ·····26
표 18. 미취학 아동(남아) 연령별 미세먼지 노출량 비교 ·····27
표 19. 미취학 아동(여아) 연령별 미세먼지 노출량 비교 ·····28
표 20. 미취학 아동 성별 미세먼지 노출량 비교 ·····29
표 21. 미취학 아동(남아) 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출 기여도 평가 결과 ·····30
표 22. 미취학 아동(남아) 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출 기여도 평가 결과 ·····31
표 23. 미취학 아동(여아) 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출 기여도 평가 결과 ·····32
표 24. 미취학 아동(여아) 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출 기여도 평가 결과 ·····33
표 25. 활용한 미세먼지 데이터 출처 정리 ·····36
표 26. 미취학 남아 대상 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출량 분포 ·····42
표 27. 미취학 남아 대상 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출량 분포 ·····43
표 28. 미취학 여아 대상 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출량 분포 ·····44

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 29. 미취학 여아 대상 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출량 분포 ·····45
표 30. 미취학 아동(남아) 시설공간 활동별 PM-2.5 노출 기여도 평가 결과 1 ·····46
표 31. 미취학 아동(남아) 시설공간 활동별 PM-2.5 노출 기여도 평가 결과 2 ·····47
표 32. 미취학 아동(여아) 시설공간 활동별 PM-10 노출 기여도 평가 결과 1 ·····48
표 33. 미취학 아동(여아) 시설공간 활동별 PM-10 노출 기여도 평가 결과 2 ·····49
표 34. 미취학 아동(여아) 시설공간 활동별 PM-2.5 노출 기여도 평가 결과 1 ·····50
표 35. 미취학 아동(여아) 시설공간 활동별 PM-2.5 노출 기여도 평가 결과 2 ·····51
표 36. 미취학 아동(남아) 활동별 미세먼지(PM-2.5) 노출 기여도 평가 결과 ·····52
표 37. 미취학 아동(여아) 활동별 미세먼지(PM-10) 노출 기여도 평가 결과 ····52
표 38. 미취학 아동(여아) 활동별 미세먼지(PM-2.5) 노출 기여도 평가 결과 ·····53

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

그 림 차 례

그림 1. 연구의 틀 ·····3

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

국 문 요 약

서울시 거주 미취학 아동 대상 시설 공간 및 활동별 일일 미세먼지 노출 추정연구

미세먼지는 호흡기 질환 및 심혈관 질환 등 다양한 질병의 원인이며, 성장 중인 만 3세부터 6세까지의 미취학 아동은 같은 조건 속에서 민감도가 일반 성인보다 더 크다. 따라서 미취학 아동에 대한 미세먼지 관리 방안이 필요하며, 적절한 관리 방안은 미세먼지 노출 평가로부터 시작된다고 볼 수 있다. 기존 미세먼지 연구는 실외 데이터를 바탕으로 집단에 대한 농도-반응 평가였다. 그러나 현대인은 하루 중에서 90%이상을 실내에서 거주하기 때문에, 실외 데이터를 이용한 연구는 한계가 존재할 수 있다. 이에 특정 집단별 하루 24시간 노출 패턴과 노출 시나리오를 구축하여 1일 미세먼지 노출량을 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 만 3세부터 6세의 미취학 아동을 성과 연령으로 구분하였다. 미세먼지는 PM-10과 PM-2.5로 구분하여 노출량을 평가하였다. 미취학 아동의 노출 패턴을 파악하기 위하여 한국형 어린이 노출계수 핸드북을 참고하였다. 미취학 아동이 주로 활동하는 공간으로 주택, 어린이집, 기타실내, 실외, 이동 총 5곳을 선정하였다. 기타실내는 2013년 국립환경과학원 보고서를 활용하여 도서관, 학원, 의료기관, 지하도상가, 대규모점포를 선정하였다. 연령별 체중과 호흡률을 적용하였으며 시설공간에서의 활동을 고려하여 안정시, 걷기, 뛰기, 수면 호흡률을 적용하였다. 국내에서는 수면 호흡률이 없어 U.S. EPA. 어린이 노출계수를 참고하였다. 공간별 미세먼지 PM-10 데이터는 환경부 지도점검 및 자가측정 자료와 에어코리아 대기측정자료를 활용하였고, PM-2.5 데이터는 2017년 12월부터 2018년 4월까지의 실측 자료를 활용하였다. 구축한 노출패턴과 노출계수를 바탕으로 미취학 아동에 대한 노

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

출시나리오를 구축하였고, 1일 미세먼지 노출량을 활동별로, 시설공간별로 산출하였다. 최종적으로 미세먼지 노출 기여도를 분석하여 우선 순위를 매겼다.

시설공간에서의 활동별 미세먼지 PM-10과 PM-2.5 노출량을 확인한 결과 주택실내에서는 수면, 안정시, 뛰기, 걷기 순으로 나타났다. 어린이집에서는 뛰기, 안정시, 걷기, 수면 순으로 나타났다. 이동에서는 걷기, 안정시, 뛰기 순으로 나타났다. 기타실내와 실외는 1가지 활동만 가정하였기 때문에 기여도를 분석할 수 없었다. 24시간 동안 활동별 미세먼지 노출량을 분석한 결과 연령, 성별 상관없이 뛰기, 안정시, 수면, 걷기 순으로 나타났다. 시설공간별 미세먼지 PM-10과 PM-2.5 노출량은 성별, 연령별 상관없이 어린이집, 주택실내, 기타실내, 이동, 실외 순으로 나타났다. 미세먼지 노출량은 연령이 증가하수록 감소하는 경향을 나타냈다. 3세에서 5세까진 여아에 비해 남아의 미세먼지 노출량이 많았지만 6세에선 여아의 미세먼지 노출량이 더 많았다.

본 연구는 미취학 아동을 대상으로 24시간 노출 패턴을 고려하여 노출량 평가를 수행하였다. 시설공간별 미세먼지 노출 기여도는 어린이집과 주택실내가 비슷했지만 재실시간을 고려한다면 어린이집에서의 기여도가 훨씬 크다는 것을 확인할 수 있었다. 연령이 증가할수록 미세먼지 노출량이 감소하는 이유는 체중의 영향이라고 보여진다. 주택실내에서는 수면의 미세먼지 노출 기여도가 가장 높았다. 이는 수면이 주택실내 점유시간에서 70% 이상을 차지하기 때문이라고 보여진다. 어린이집에서는 뛰기의 미세먼지 노출 기여도가 가장 높았다. 이는 뛰기가 차지하고 있는 시간과 높은 호흡률 때문으로 보인다. 그러나 활용한 미세먼지 PM-10과 PM-2.5의 데이터는 시점과 공간이 맞지 않으며, PM-2.5의 데이터 수가 부족하기 때문에 시설 대표성을 나타내는데는 한계가 존재한다. 따라서 추후 연구에는 PM-2.5에 대한 추가 실태조사와 더불어 연령별 시설공간 시간과 활동에 대한 노출계수 연구가 필요하다.

핵심어: 미취학 아동, 1일 미세먼지 노출량, 1일 미세먼지 노출 기여도, 노출 시나리오

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 필요성

미세먼지는 호흡기 질환과 심혈관 질환 등 다양한 건강 영향과 밀접한 관련이 있다(Dominici et al., 2014; Zhang et al., 2015; Fang et al., 2016). 특히 민감집단으로 구분되고 있는 만3세부터 6세의 미취학 아동은 면역체계가 완성되지 않아 같은 조건의 미세먼지 노출에 더 민감하며 그 대표적인 결과물은 환경성 질환이다 (국립환경과학원, 2009). 따라서 미취학 아동을 대상으로 미세먼지 노출에 대한 관리가 필요하며 적절한 관리 방안을 마련하기 위해선 미세먼지 노출에 대한 객관적인 평가가 동반되어야 한다.

미세먼지는 매우 다양한 물질의 결합체이다(F.J Kelly, J.C. Fussell et al., 2012). 인위적 오염 발생원의 비율에 따라 지역별 미세먼지 구성 물질은 다르다. 이에 미세먼지는 독성값이 존재하지 않으며 위해성 평가 연구가 진행된 사례가 거의 없다. 2012년 바이오연료를 취급하는 브라질 어느 지역에 거주하는 어린이를 대상으로 PM-2.5의 위해성 평가를 수행하였다(Oliveira et al., 2012). 그러나 해당 연구에서는 미세먼지를 구성하고 있는 다양한 물질 중에서 DPM의 독성값만 활용하여 비발암 위해수준을 평가하였기 때문에 완벽한 위해성 평가를 수행했다고 볼 수가 없다.

또한 미세먼지에 대한 건강 평가는 대규모 집단과 그 해당 지역에서 측정된 장기간 실외 미세먼지 농도값을 바탕으로 C-R function을 유도하고 농도 대비 사망률, 입원률, 건강 영향 등으로 나타내는 것이 대부분이다 (A Le Tetre et al., 2002; Tecer et al., 2008). 그러나 사람들은 하루 중 90% 이상 실내에서 거주하기 때문에 실외 미세먼지 농도값만 가지고 건강 영향을 평가하는데에는 한계가 존재한다. 또한 특정 집단과 개인별로 24시간 동안 시설공간, 점유시간, 활동 패턴이 다르기 때문에 Time-activity pattern이 고려된 실내 노출량을 확인할 필요가 있다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

이에 미세먼지는 어린이의 24시간 Time-activity pattern을 바탕으로 노출량을 평가하는 것이 바람직할 수 있다. 기존 연구에서는 개인별 24시간 실내 및 실외 미세먼지 노출 평가를 실시했으며(Monn et al., 2001), 국가에서 직접 조사한 통계적 인구 집단 활동 데이터에 오염 농도를 적용하여 노출 평가를 수행하였다(Klepeis et al., 2001). 선행 연구 방법을 적용하여 미취학 아동이 주로 이용하는 시설공간에 대한 국가 공개 데이터와 주로 활동하는 시설공간에서의 미세먼지 농도를 적용하여 시설공간별 미세먼지 노출량을 계산할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 미취학 아동을 대상으로 1일 미세먼지 노출량을 평가하기 위해 미취학 아동의 Time-activity pattern, 노출 계수, 각 공간별 PM-10과 PM-2.5의 농도를 활용하여 미세먼지 노출량을 평가하고, 활동별 및 공간별미세먼지 기여도를 분석하고자 한다.

본 연구의 세부 목적은 다음과 같다.

첫째, 미취학 아동 대상 1일 미세먼지 노출 시나리오를 구축한다.

둘째, 미취학 아동 대상 1일 미세먼지 노출량을 활동별, 시설공간별로 산출한다.

셋째, 미취학 아동이 주로 이용하는 활동 및 시설공간에서의 미세먼지 노출 기여도와 우선 순위를 산출한다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

Ⅱ. 연 구 방 법

1. 연구 내용

본 연구에서는 기상 조건이 고려된 실외 미세먼지(PM-10, PM-2.5)와 미취학 아동이 주로 활동하는 실내 시설의 미세먼지(PM-10)을 이용하여 실내 미세먼지(PM-2.5)를 추정한다. 다음으로 미취학 아동 대상 Time-activity pattern에 따른 시설공간과 시간, 어린이 노출계수, 미세먼지 농도를 활용하여 하루 미세먼지 노출량을 평가하고자 한다.

본 연구의 틀은 다음과 같다.

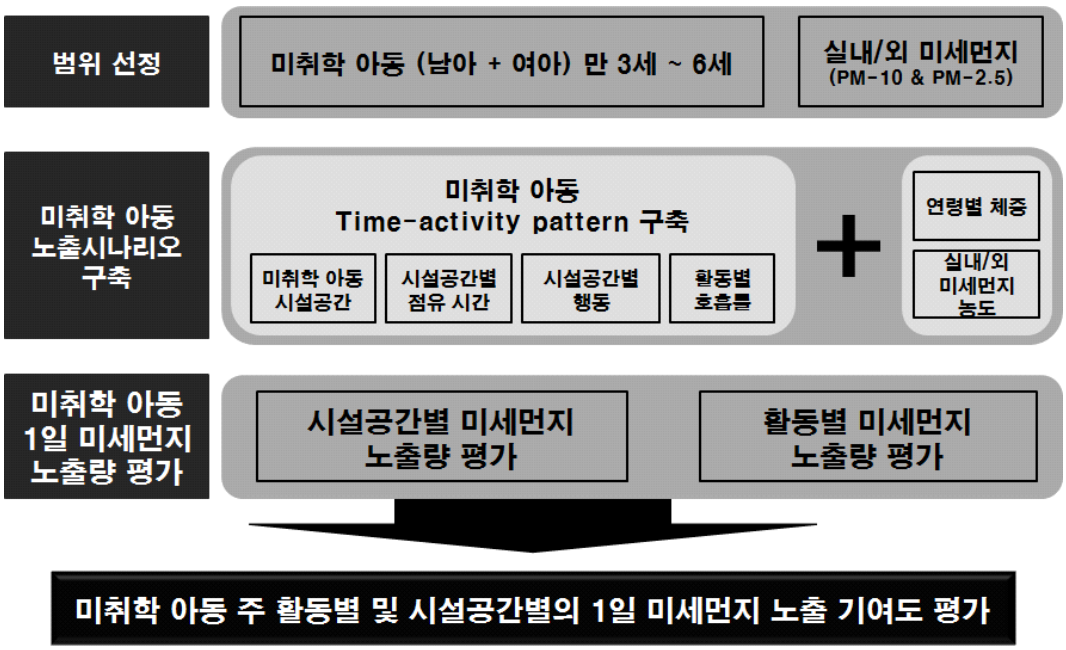


그림 1. 연구의 틀

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

2. 평가 대상자

서울시에 거주하는 만3세부터 6세까지 미취학 아동을 선정하였다. 또한 연령(3세, 4세, 5세, 6세)과 성별(남아, 여아)로 구분하여 미세먼지 노출 기여도를 평가하였다.

3. 평가 대상 물질

2018년 1월 기준 "다중이용시설 등의 실내공기질관리법" 상의 시행규칙에서 제시하고 있는 유지기준 미세먼지(PM-10)과 권고기준 미세먼지(PM-2.5) 총 2개 물질을 선정하였다.

4. 자료 선정

본 연구에서는 서울시에 거주하는 미취학 아동에 대한 미세먼지 노출 기여도를 평가하기 위하여 미세먼지 농도 데이터, Time-activity-pattern 데이터, 노출계수 데이터를 활용하였다. 미세먼지 농도 데이터는 2015년 1월부터 2016년 12월까지 2년 동안의 환경부 지도점검, 자가측정 자료와 2017년 12월부터 2018년 4월까지 측정한 실측자료, 2013년 다중이용시설 측정용역보고서 데이터, 에어코리아 대기측정자료, 국립환경과학원 보고서(2011)인 '주거 공간별 실내공기질 관리 방안 연구(Ⅲ)' 자료를 활용하였다. 미취학 아동의 Time-activity-pattern은 한국형 어린이 노출계수 개발 연구(국립환경과학원, 2013), 어린이노출계수핸드북(환경부, 2016), 유치원과 어린이집 일과운영 및 교사의 직무분석(육아정책연구소, 2012) 자료를 활용하였다. 미취학 아동 노출계수는 어린이노출계수핸드북(환경부, 2016)과 Child-Specific Exposure Factors Handbook(U.S.EPA, 2008)을 활용하였다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 1. 미취학 아동(여아) 연령별 미세먼지 노출량 비교

성별	구분	연령	전체 노출량 평균 (㎍/kg-day)	노출량 차이 (㎍/kg-day) (a_n-a_{n-1})
여아	PM-10	3세	22.57	-
		4세	20.70	1.87
		5세	18.01	2.69
		6세	17.94	0.05
	PM-2.5	3세	18.04	-
		4세	16.54	1.50
		5세	14.41	2.13
		6세	14.32	0.09

4.1. 미취학 아동 주요 시설공간

어린이노출계수핸드북(환경부, 2016)에서는 24시간 기준 미취학 아동의 주요 시설공간과 공간별 점유 시간에 대한 정보를 제공하고 있다. 표 1과 같이 미취학 아동은 주택에서 보내는 시간이 압도적으로 높으며, 어린이집, 이동, 기타실내, 실외 순이다. 기타실내는 국립환경과학원 2013년도 보고서인 한국형 어린이 노출계수 개발연구에서 미취학 아동이 주로 활동하는 5개 다중이용시설(지하도상가, 대규모점포, 학원, 의료기관, 도서관)을 선정하였다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 2. 한국형 어린이 노출계수 - 체류시간(hr/day)

시설공간	미취학아동
주택실내	16.14±2.57
어린이집	5.91±2.67
기타실내	0.63±1.15
실외	0.53±1.13
이동	0.78±0.91

출처 : 어린이노출계수핸드북(환경부, 2016)

4.2. 주요 시설공간별 미세먼지 데이터

표 2는 미취학 아동이 주로 활동하는 공간별 미세먼지 데이터를 보여주고 있다. 주택실내 미세먼지는 국립환경과학원 2011년 보고서인 '주거 공간별 실내공기질 관리 방안 연구(Ⅲ)'에서 측정된 데이터를 활용하였다. 어린이집과 기타실내의 미세먼지(PM-10)은 환경부 2015년, 2016년 지도점검과 자가측정 자료를 활용하였으며 미세먼지(PM-2.5)는 2017년 12월부터 2018년 4월까지 측정된 실측자료를 활용하였다. 실외는 에어코리아 대기측정자료를 활용하였으며, 이동은 측정된 자료가 존재하지 않아 실외와 동일하다고 가정하였다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 3. 미취학 아동 시설공간별 사용된 미세먼지 농도 현황

구분	시설공간	평균 (㎍/㎥)	표준편차 (㎍/㎥)	최솟값 (㎍/㎥)	최댓값 (㎍/㎥)
PM-10	주택실내	28.2	20.5	-	-
	어린이집	44.6	13.7	7.1	94.9
	기타실내	50.7	16.5	2.2	142.9
	실외+이동	44.1	21.2	3.4	143.7
PM-2.5	주택실내	22.5	17.0	-	-
	어린이집	39.7	20.0	10.0	96.7
	기타실내	28.6	14.8	3.8	83.0
	실외+이동	24.0	13.0	1.6	95.7

출처 : 환경부 지도점검('15~' 16), 환경부 자가측정('15~' 16), 주거공간별 실내공기질 관리 방안 연구(Ⅲ)(과학원, 2011), 에어코리아 대기측정망, 실제 측정자료('17.12~' 18.04)

4.3. 미취학 아동 노출계수

표 3과 같이 미취학 아동 체중은 한국형 어린이 노출계수를 근거하여 연령과 성별로 구별하였다. 체중은 평균과 표준편차를 활용하였다.

표 4. 한국형 어린이 노출계수 - 체중(kg)

성별	군질	연령	N	평균	표준편차	5th	25th	50th	75th	95th
남	유치원	3세	616	15.6	1.90	13.1	14.5	15.4	16.3	18.9
		4세		17.8	2.40	14.5	16.4	17.6	19.1	21.6
		5세		19.9	3.00	16.0	17.9	19.6	21.2	25.6
		6세		24.4	4.91	19.1	21.3	23.7	26.5	33.1
여	유치원	3세	554	15.1	1.84	12.5	13.9	15.0	16.0	18.2
		4세		17.4	2.66	14.6	15.8	16.8	18.4	22.5
		5세		19.5	2.91	15.8	17.5	19.1	21.1	24.7
		6세		22.4	4.02	17.8	19.9	21.8	24.1	29.3

출처 : 어린이노출계수핸드북(환경부, 2016)

미취학 아동 호흡률은 체중과 마찬가지로 한국형 어린이 노출계수를 근거하여 연령과 성별로 구별하였다. 미취학 아동이 주로 활동하는 공간에서 시간별

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

활동력이 다르기 때문에 호흡력도 달라질 수 있다. 따라서 표 4와 같이 안전시, 걷기, 뛰기, 수면시 총 4가지로 구분하였다. 국내에서는 안정시, 걷기, 뛰기 3가지에 대한 연령 및 성별 호흡률을 제공하고 있지만, 수면시의 호흡률 데이터가 없어 미국 EPA의 어린이 노출계수를 활용하였다.

표 5. 한국형 어린이 노출계수 - 호흡률(㎥/hr)

성별	연령	안정시		걷기		뛰기		수면시	
		평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
남자	3세	0.428	0.013	0.640	0.048	0.727	0.070	0.258	0.026
	4세	0.438	0.013	0.674	0.047	0.778	0.069		
	5세	0.498	0.154	0.773	0.165	0.864	0.158		
	6세	0.462	0.055	0.726	0.101	0.814	0.064		
여자	3세	0.399	0.007	0.574	0.042	0.608	0.072	0.258	0.026
	4세	0.405	0.008	0.609	0.047	0.668	0.080		
	5세	0.396	0.056	0.579	0.080	0.650	0.101		
	6세	0.424	0.062	0.691	0.101	0.773	0.063		

출처 : 어린이노출계수핸드북(환경부, 2016), Child-Specific Exposure Factors Handbook(U.S.EPA, 2008)

4.4. 활동별 시간

미취학 아동에 대한 미세먼지 노출 기여도를 보다 정밀하게 분석하기 위해선 주요 시설공간 속에서 활동별 시간을 확인하고 이를 호흡률에 적용해야 한다. 표 5에서는 한국형 어린이 노출계수에서 제공하고 있는 집안에서의 주요 활동별 시간을 보여주고 있다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 6. 한국형 어린이 노출계수 - 집에서의 주요 활동별 시간(hr)

연령	활동분류	평균	표준편차	25th	50th	75th	95th
3~6세 (n=855)	수면	10.27	1.26	9.50	10.00	10.50	12.00
	낮잠, 졸음	0.03	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
	가족과의 식사	1.07	0.51	1.00	1.00	1.33	2.00
	간식과 음료	0.10	0.22	0.00	0.00	0.00	0.50
	개인위생	0.62	0.54	0.00	0.50	1.00	1.50
	학교 외 스스로의 학습	0.34	0.63	0.00	0.00	0.50	1.50
	학교 외 기타학습	0.07	0.25	0.00	0.00	0.0	0.50
	TV시청	1.09	1.20	0.00	1.00	1.50	3.00
	독서	0.26	0.46	0.00	0.00	0.50	1.00
	컴퓨터 게임	0.17	0.42	0.00	0.00	0.00	1.00
	놀이	1.48	1.64	0.33	1.00	2.00	4.50
	아무것도 안하기 쉼	0.12	0.42	0.00	0.00	0.00	1.00
	이동하기 위해 기다리기	0.05	0.16	0.00	0.00	0.00	0.50
	기타	0.48	0.05	-	-	-	-

출처 : 어린이노출계수핸드북(환경부, 2016)

어린이집 일일 시간표는 육아정책연구소에서 2012년도에 발간한 '유치원과 어린이집 일과운영 및 교사의 직무분석'에서 통계한 자료를 활용하였다. 본 보고서에서는 교육과정 일과 전체시간 대비 활동 비율을 표 6과 같이 제시하고 있다. 따라서 비율을 한국형 어린이 노출계수 어린이집 점유시간에 적용하여 표 7과 같이 산출하였다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 7. 어린이집 교육과정 일과 전체시간 대비 활동 비율(%)

활동분류	비율
등원 및 인사	6.45
급식	20.55
실내 자유선택활동	19.18
집단활동	16.48
실외활동	13.15
낮잠	0.89
휴식	3.75
전이	4.48
기본생활	9.88
귀가	4.64
기타	0.57

출처 : 유치원과 어린이집 일과운영 및 교사의 직무분석(육아정책연구소, 2012)

표 8. 어린이집 교육과정 일과 전체시간 대비 활동 시간(hr)

활동분류	점유시간
등원 및 인사	0.38
급식	1.21
실내 자유선택활동	1.13
집단활동	0.97
실외활동	0.78
낮잠	0.05
휴식	0.22
전이	0.26
기본생활	0.58
귀가	0.27
기타	0.03

출처 : 어린이노출계수핸드북(환경부, 2016), 유치원과 어린이집 일과운영 및 교사의 직무분석(육아정책연구소, 2012)

이동으로 보낸 시간은 표 8과 같이 한국형 어린이 노출계수 데이터를 활용

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

하였다. 기타실내 및 실외 활동에 대한 객관적인 자료가 존재하지 않았다. 따라서 기타실내에서는 아이들이 걷고 실외에서는 아이들과 함께 놀기 때문에 뛴다고 가정하였다.

표 9. 한국형 어린이 노출계수 - 이동으로 보낸 시간(hr)

연령	이동	평균	표준편차
3~6세 (n=855)	걷기	0.343	0.604
	자전거	0.034	0.194
	승합차(택시포함)	0.115	0.360
	버스(시내 및 시외)	0.285	0.566
	전철	0.004	0.056

출처 : 어린이노출계수핸드북(환경부, 2016)

5. 미취학 아동 미세먼지 노출시나리오 구성

미취학 아동 주 시설공간과 활동을 바탕으로 호흡률을 표 9와 같이 가정하였다. 집에서는 수면, 낮잠·졸음에 수면시 호흡률을 적용하였고, 가족과의 식사, 간식과 음료, 개인위생, 학교 외 스스로의 학습, 학교 외 기타학습, TV 시청, 독서, 컴퓨터 게임, 아무것도 안하고 쉼은 안정시 호흡률을 적용하였다. 놀이는 뛰기 호흡률을 적용하였고, 이동하기 위해 기다리기는 걷기 호흡률을 적용하였다.

어린이집에서는 낮잠에 수면시 호흡률을 적용하였다. 급식, 휴식, 전이, 기본생활, 기타에 안정시 호흡률을 적용하였다. 실내 자율선택활동, 집단활동, 실외활동에는 뛰기 호흡률을 적용하였으며, 등원 및 인사, 귀가는 걷기 호흡률을 적용하였다.

기타실내는 아이들이 걷는다는 것을 가정하여 걷기시 호흡률을 적용하였으며, 실외에서는 활기차게 활동한다고 가정하여 뛰기 호흡률을 적용하였다.

이동에서는 걷기에 걷기시 호흡률을, 자전거는 뛰기시 호흡률을, 나머지 승

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

합차(택시포함), 버스(시내 및 시외), 전철에는 안정시 호흡률을 적용하였다.

표 10. 노출시나리오 설정

활동 공간	활동분류	점유시간(hr)		PM-10(㎍/㎥)		PM-2.5(㎍/㎥)		호흡률
		평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	만3세~6세
집	수면	10.27	1.26	28.2	20.5	22.5	17.0	수면
	낮잠, 졸음	0.03	0.25					수면
	가족과의 식사	1.07	0.51					안정시
	간식과 음료	0.10	0.22					안정시
	개인위생	0.62	0.54					안정시
	학교 외 스스로의 학습	0.34	0.63					안정시
	학교 외 기타학습	0.07	0.25					안정시
	TV시청	1.09	1.20					안정시
	독서	0.26	0.46					안정시
	컴퓨터 게임	0.17	0.42					안정시
	놀이	1.48	1.64					뛰기
	아무것도 안하기 쉼	0.12	0.42					안정시
	이동하기 위해 기다리기	0.05	0.16					걷기
	기타	0.48	0.05					안정시
어린이집	등원 및 인사	0.38	0.04	44.6	13.7	39.7	20.0	걷기
	급식	1.21	0.12					안정시
	실내 자유선택활동	1.13	0.11					뛰기
	집단활동	0.97	0.01					뛰기
	실외활동	0.78	0.08					뛰기
	낮잠	0.05	0.01					수면
	휴식	0.22	0.02					안정시
	전이	0.26	0.03					안정시
	기본생활	0.58	0.06					안정시
	귀가	0.27	0.03					걷기
	기타	0.03	0.01					안정시
기타실내	걷기	0.63	1.15	50.7	16.5	28.6	14.8	걷기
실외	뛰기	0.53	1.13	44.1	21.2	24.0	13.0	뛰기
이동	걷기	0.343	0.604	44.1	21.2	24.0	13.0	걷기
	자전거	0.034	0.194					뛰기
	승합차(택시포함)	0.115	0.360					안정시
	버스(시내 및 시외)	0.285	0.566					안정시
	전철	0.004	0.056					안정시

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

미취학 아동이 하루 24시간 동안 집, 어린이집, 기타실내, 실외, 이동 총 5군데를 활동한다고 가정하고, 점유시간별 미세먼지 농도, 호흡률, 연령 및 성별 체중을 적용하였다.

6. 미세먼지 노출량 및 노출 기여도 평가

6.1. 미세먼지 노출량 평가

노출시나리오를 근거로 미취학 아동을 남아와 여아로 구분하여 1일 미세먼지 노출량평가를 진행하였다. 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 미취학 아동의 미세먼지 노출량에 대한 분포도를 산출하였다. 미세먼지 농도값은 주택에서만 평균과 표준편차를 적용하였고, 나머지 시설공간에는 분포 데이터를 적용하였다. 체중과 호흡률은 평균과 표준편차 값을 적용하였다. 사용은 식은 다음과 같다.

$$ADD = C_A \times \frac{IR \times ET \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

ADD	:	미세먼지 일일 평균 노출량(Average of Daily Dose) (단위: ㎍/kg-day)
C_A	:	미세먼지 농도 (단위: ㎍/㎥)
IR	:	호흡률 (단위: ㎥/hr)
ET	:	노출시간 (hr/24hr)
EF	:	노출빈도
ED	:	노출기간 (hr)
AT	:	평균노출시간 (24시간)
BW	:	연령군별 평균 체중 (단위: kg)

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

6.2. 미세먼지 노출 기여도 평가

각 활동에 대한 미세먼지 일일 평균 노출량을 산정한 뒤 전체 노출량 대비 각 활동별 노출량을 놔눠 각 활동별 미세먼지 노출 기여도를 분석하였다.

$$\sum ADD = ADD_{\text{안정시}} + ADD_{\text{걷기}} + ADD_{\text{뛰기}} + ADD_{\text{수면}}$$

$$\frac{ADD_{\text{안정시}}}{\sum_{i=h}^{24h} ADD} + \frac{ADD_{\text{걷기}}}{\sum_{i=h}^{24h} ADD} + \frac{ADD_{\text{뛰기}}}{\sum_{i=h}^{24h} ADD} + \frac{ADD_{\text{수면}}}{\sum_{i=h}^{24h} ADD} = 1$$

각 시설공간별 미세먼지 일일 평균 노출량을 산출한 뒤 5개 시설의 총 노출량을 산출하였다. 다음으로 전체 노출량 대비 각 시설별 노출량을 나눠져 각 시설별 미세먼지 노출 기여도를 분석하였다.

$$\sum ADD = ADD_{\text{주택}} + ADD_{\text{어린이집}} + ADD_{\text{기타실내}} + ADD_{\text{실외}} + ADD_{\text{이동}}$$

$$\frac{ADD_{\text{주택}}}{\sum_{i=h}^{24h} ADD} + \frac{ADD_{\text{어린이집}}}{\sum_{i=h}^{24h} ADD} + \frac{ADD_{\text{기타실내}}}{\sum_{i=h}^{24h} ADD} + \frac{ADD_{\text{실외}}}{\sum_{i=h}^{24h} ADD} + \frac{ADD_{\text{이동}}}{\sum_{i=h}^{24h} ADD} = 1$$

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

Ⅲ. 연 구 결 과

1. 활동별 미세먼지 기여도 평가

미취학 아동 남아 시설공간에서의 활동별 PM-10 노출 기여도를 표 10, 11과 같이 분석하였다. 미세먼지 기여도는 호흡률과 체중 변수로 달라지기 때문에 연령과 성별에서 동일한 패턴을 보였다. 주택실내에서의 미세먼지 노출 기여도는 전 연령에서 수면, 안정시, 뛰기, 걷기 순으로 나타났다. 어린이집에서는 뛰기, 안정시, 걷기, 수면 순으로 나타났다. 이동은 걷기, 안정시, 뛰기 순이었다. 기타실내와 실외는 1가지 활동만 가정하였기 때문에 노출 기여도를 분석하는건 의미가 없었다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 11. 미취학 아동(남아) 시설공간 활동별 PM-10 노출 기여도 평가 결과 1

구분	성별	연령	시설공간	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-10	남아	3세	주택실내	안정시	3.34	32.9
				걷기	0.06	0.6
				뛰기	1.95	19.2
				수면	4.80	47.3
			어린이집	안정시	2.84	28.2
				걷기	1.20	11.9
				뛰기	6.00	59.5
				수면	0.04	0.4
			기타실내	걷기	0.31	100.0
			실외	뛰기	1.09	100.0
			이동	안정시	0.49	41.5
				걷기	0.62	52.5
				뛰기	0.07	5.9
		4세	주택실내	안정시	3.00	33.0
				걷기	0.05	0.6
				뛰기	1.82	20.0
				수면	4.21	46.4
			어린이집	안정시	2.54	27.3
				걷기	1.11	11.9
				뛰기	5.62	60.4
				수면	0.03	0.3
			기타실내	걷기	1.21	100.0
			실외	뛰기	1.02	100.0
			이동	안정시	0.44	40.7
				걷기	0.57	52.8
				뛰기	0.07	6.5

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 12. 미취학 아동(남아) 시설공간 활동별 PM-10 노출 기여도 평가 결과 2

구분	성별	연령	시설공간	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-10	남아	5세	주택실내	안정시	3.05	35.1
				걷기	0.05	0.6
				뛰기	1.81	20.9
				수면	3.77	43.4
			어린이집	안정시	2.59	27.7
				걷기	1.14	12.2
				뛰기	5.59	59.8
				수면	0.03	0.3
			기타실내	걷기	1.24	100.0
			실외	뛰기	1.01	100.0
			이동	안정시	0.45	40.5
				걷기	0.59	53.2
				뛰기	0.07	6.3
		6세	주택실내	안정시	2.31	33.9
				걷기	0.04	0.6
				뛰기	1.39	20.4
				수면	3.07	45.1
			어린이집	안정시	1.96	27.5
				걷기	0.87	12.2
				뛰기	4.29	60.1
				수면	0.02	0.3
			기타실내	걷기	0.95	100.0
			실외	뛰기	0.78	100.0
			이동	안정시	0.34	40.5
				걷기	0.45	53.6
				뛰기	0.05	6.0

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

미취학 아동 남아의 24시간 동안 활동별 PM-10 노출 기여도를 표 12와 같이 분석하였다. 마찬가지로 연령과 성별의 상관없이 활동별 미세먼지 노출 기여도는 동일한 패턴을 보였다. 활동별 PM-10 노출 기여도는 전 연령에서 뛰기, 안정시, 수면, 걷기 순으로 나타났다. 그 외 데이터는 부록에 첨부하였다.

표 13. 미취학 아동(남아) 활동별 미세먼지(PM-10) 노출 기여도 평가 결과

구분	성별	연령	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-10	남아	3세	안정시	6.67	29.2
			걷기	2.19	9.6
			뛰기	9.11	39.9
			수면	4.84	21.2
		4세	안정시	5.98	27.6
			걷기	2.94	13.6
			뛰기	8.53	39.3
			수면	4.24	19.5
		5세	안정시	6.09	28.5
			걷기	3.02	14.1
			뛰기	8.48	39.6
			수면	3.80	17.8
		6세	안정시	4.61	27.9
			걷기	2.31	14.0
			뛰기	6.51	39.4
			수면	3.09	18.7

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

2. 미취학 아동 미세먼지 노출량 평가 결과

미취학 아동이 하루 24시간 동안 활동하는 공간, 시간, 미세먼지 농도, 어린이 노출계수를 바탕으로 미취학아동에 대한 미세먼지 노출량을 평가하였다. 미취학 아동 남아의 미세먼지(PM-10)의 노출량 평가 결과는 표 13과 같다.

남아 3세의 시설공간별 PM-10 평균 노출량은 주택실내 10.30 ㎍/kg-day, 어린이집 10.23 ㎍/kg-day, 기타실내 1.33 ㎍/kg-day, 실외 1.11 ㎍/kg-day, 이동 1.20 ㎍/kg-day로 나타났다.

남아 4세의 시설공간별 PM-10 평균 노출량은 주택실내 9.24 ㎍/kg-day, 어린이집 9.48 ㎍/kg-day, 기타실내 1.23 ㎍/kg-day, 실외 1.04 ㎍/kg-day, 이동 1.10 ㎍/kg-day로 나타났다.

남아 5세의 시설공간별 PM-10 평균 노출량은 주택실내 8.88 ㎍/kg-day, 어린이집 9.55 ㎍/kg-day, 기타실내 1.27 ㎍/kg-day, 실외 1.04 ㎍/kg-day, 이동 1.12 ㎍/kg-day이다.

남아 6세의 시설공간별 PM-10 평균 노출량은 주택실내 7.09 ㎍/kg-day, 어린이집 7.43 ㎍/kg-day, 기타실내 0.99 ㎍/kg-day, 실외 0.81 ㎍/kg-day, 이동 0.87 ㎍/kg-day이다.

연령이 증가할수록 미세먼지 노출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 14. 미취학 아동(남아) 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출량 현황

구분	성별	연령	시설공간	평균 (㎍/kg-day)	50th (㎍/kg-day)	95th (㎍/kg-day)
PM-10	남아	3세	주택실내	10.30	8.25	24.67
			어린이집	10.23	9.69	16.66
			기타실내	1.33	1.25	2.22
			실외	1.11	0.98	2.17
			이동	1.20	1.07	2.33
			전체	24.17	21.24	48.05
		4세	주택실내	9.24	7.39	22.14
			어린이집	9.48	8.97	15.51
			기타실내	1.23	1.16	2.06
			실외	1.04	0.93	2.05
			이동	1.10	0.98	2.14
			전체	22.09	19.43	43.90
		5세	주택실내	8.88	7.04	21.54
			어린이집	9.55	8.94	16.27
			기타실내	1.27	1.17	2.29
			실외	1.04	0.91	2.12
			이동	1.12	0.99	2.28
			전체	21.86	19.05	44.50
		6세	주택실내	7.09	5.61	17.29
			어린이집	7.43	6.95	12.69
			기타실내	0.99	0.91	1.76
			실외	0.81	0.71	1.64
			이동	0.87	0.77	1.76
			전체	17.19	14.95	35.14

미취학 아동 남아의 미세먼지(PM-2.5)의 노출량 평가 결과는 표 14와 같다. 남아 3세의 시설공간별 PM-2.5 평균 노출량은 주택실내 8.23 ㎍/kg-day, 어린이집 9.10 ㎍/kg-day, 기타실내 0.75 ㎍/kg-day, 실외 0.60 ㎍/kg-day, 이동 0.65 ㎍/kg-day로 나타났다.

남아 4세의 시설공간별 PM-2.5 평균 노출량은 주택실내 7.38 ㎍/kg-day, 어린이집 8.48 ㎍/kg-day, 기타실내 0.69 ㎍/kg-day, 실외

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

0.57 ㎍/kg-day, 이동 0.60 ㎍/kg-day로 나타났다.

남아 5세의 시설공간별 PM-2.5 평균 노출량은 주택실내 7.08 ㎍/kg-day, 어린이집 8.50 ㎍/kg-day, 기타실내 0.72 ㎍/kg-day, 실외 0.57 ㎍/kg-day, 이동 0.61 ㎍/kg-day이다.

남아 6세의 시설공간별 PM-2.5 평균 노출량은 주택실내 5.65 ㎍/kg-day, 어린이집 6.62 ㎍/kg-day, 기타실내 0.56 ㎍/kg-day, 실외 0.44 ㎍/kg-day, 이동 0.47 ㎍/kg-day이다.

미세먼지 PM-10과 마찬가지로 연령이 증가할수록 미세먼지 노출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 15. 미취학 아동(남아) 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출량 현황

구분	성별	연령	시설공간	평균 (㎍/kg-day)	50th (㎍/kg-day)	95th (㎍/kg-day)
PM-2.5	남아	3세	주택실내	8.23	6.50	20.12
			어린이집	9.10	8.04	18.16
			기타실내	0.75	0.66	1.52
			실외	0.60	0.52	1.25
			이동	0.65	0.57	1.34
			전체	19.33	16.29	42.39
		4세	주택실내	7.38	5.83	18.03
			어린이집	8.43	7.46	16.90
			기타실내	0.69	0.61	1.41
			실외	0.57	0.49	1.18
			이동	0.60	0.52	1.23
			전체	17.67	14.91	38.75
		5세	주택실내	7.08	5.54	17.51
			어린이집	8.50	7.43	17.41
			기타실내	0.72	0.61	1.52
			실외	0.57	0.48	1.21
			이동	0.61	0.52	1.31
			전체	17.48	14.58	38.96
		6세	주택실내	5.65	4.41	14.02
			어린이집	6.62	5.79	13.59
			기타실내	0.56	0.48	1.18
			실외	0.44	0.38	0.94
			이동	0.47	0.41	1.01
			전체	13.74	11.47	30.74

미취학 아동 여아의 미세먼지(PM-10)의 노출량 평가 결과는 표 15와 같다. 여아 3세의 시설공간별 PM-10 평균 노출량은 주택실내 10.07 ㎍/kg-day, 어린이집 9.20 ㎍/kg-day, 기타실내 1.23 ㎍/kg-day, 실외 0.95 ㎍/kg-day, 이동 1.12 ㎍/kg-day로 나타났다.

여아 4세의 시설공간별 PM-10 평균 노출량은 주택실내 9.01 ㎍/kg-day, 어린이집 8.60 ㎍/kg-day, 기타실내 1.14 ㎍/kg-day, 실외 0.92 ㎍/kg-day, 이동 1.03 ㎍/kg-day로 나타났다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

여아 5세의 시설공간별 PM-10 평균 노출량은 주택실내 7.91 ㎍/kg-day, 어린이집 7.45 ㎍/kg-day, 기타실내 0.97 ㎍/kg-day, 실외 0.80 ㎍/kg-day, 이동 0.88 ㎍/kg-day이다.

여아 6세의 시설공간별 PM-10 평균 노출량은 주택실내 7.48 ㎍/kg-day, 어린이집 7.68 ㎍/kg-day, 기타실내 1.08 ㎍/kg-day, 실외 0.85 ㎍/kg-day, 이동 0.90 ㎍/kg-day이다.

남아와 마찬가지로 연령이 증가할수록 미세먼지 노출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 16. 미취학 아동(여아) 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출량 현황

구분	성별	연령	시설공간	평균 (㎍/kg-day)	50th (㎍/kg-day)	95th (㎍/kg-day)
PM-10	여아	3세	주택실내	10.07	8.07	24.11
			어린이집	9.20	8.70	15.01
			기타실내	1.23	1.16	2.05
			실외	0.95	0.85	1.89
			이동	1.12	1.00	2.19
			전체	22.57	19.78	45.25
		4세	주택실내	9.01	7.18	21.73
			어린이집	8.60	8.11	14.27
			기타실내	1.14	1.07	1.94
			실외	0.92	0.81	1.84
			이동	1.03	0.91	2.02
			전체	20.70	18.08	41.80
		5세	주택실내	7.91	6.33	19.05
			어린이집	7.45	7.01	12.45
			기타실내	0.97	0.90	1.68
			실외	0.80	0.70	1.61
			이동	0.88	0.78	1.74
			전체	18.01	15.72	36.53
		6세	주택실내	7.48	5.89	18.33
			어린이집	7.68	7.15	13.27
			기타실내	1.03	0.95	1.87
			실외	0.85	0.74	1.72
			이동	0.90	0.79	1.83
			전체	17.94	15.52	37.02

미취학 아동 여아의 미세먼지(PM-2.5)의 노출량 평가 결과는 표 16과 같다. 여아 3세의 시설공간별 PM-2.5 평균 노출량은 주택실내 8.03 ㎍/kg-day, 어린이집 8.19 ㎍/kg-day, 기타실내 0.69 ㎍/kg-day, 실외

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

0.52 ㎍/kg-day, 이동 0.61 ㎍/kg-day로 나타났다.

여아 4세의 시설공간별 PM-2.5 평균 노출량은 주택실내 7.17 ㎍/kg-day, 어린이집 7.66 ㎍/kg-day, 기타실내 0.65 ㎍/kg-day, 실외 0.50 ㎍/kg-day, 이동 0.56 ㎍/kg-day로 나타났다.

여아 5세의 시설공간별 PM-2.5 평균 노출량은 주택실내 6.32 ㎍/kg-day, 어린이집 6.63 ㎍/kg-day, 기타실내 0.55 ㎍/kg-day, 실외 0.43 ㎍/kg-day, 이동 0.48 ㎍/kg-day이다.

여아 6세의 시설공간별 PM-2.5 평균 노출량은 주택실내 5.65 ㎍/kg-day, 어린이집 6.83 ㎍/kg-day, 기타실내 0.58 ㎍/kg-day, 실외 0.46 ㎍/kg-day, 이동 0.49 ㎍/kg-day이다.

미세먼지 PM-10과 마찬가지로 연령이 증가할수록 미세먼지 노출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 17. 미취학 아동(여아) 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출량 현황

구분	성별	연령	시설공간	평균 (㎍/kg-day)	50th (㎍/kg-day)	95th (㎍/kg-day)
PM-2.5	여아	3세	주택실내	8.03	6.35	19.60
			어린이집	8.19	7.24	16.38
			기타실내	0.69	0.61	1.41
			실외	0.52	0.45	1.08
			이동	0.61	0.53	1.26
			전체	18.04	15.18	39.73
		4세	주택실내	7.17	5.64	17.59
			어린이집	7.66	6.75	15.44
			기타실내	0.65	0.57	1.32
			실외	0.50	0.43	1.05
			이동	0.56	0.49	1.16
			전체	16.54	13.88	36.56
		5세	주택실내	6.32	4.97	15.51
			어린이집	6.63	5.83	13.44
			기타실내	0.55	0.48	1.13
			실외	0.43	0.37	0.92
			이동	0.48	0.41	1.00
			전체	14.41	12.06	32.00
		6세	주택실내	5.96	4.63	14.89
			어린이집	6.83	5.95	14.15
			기타실내	0.58	0.50	1.24
			실외	0.46	0.39	0.99
			이동	0.49	0.42	1.05
			전체	14.32	11.89	32.32

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

3. 연령별 미세먼지 노출량 비교

미취학 아동의 미세먼지 전체 노출량에 대하여 표 17과 같이 연령별로 비교하였다. 남아 3세의 PM-10 전체 노출량은 24.17 ㎍/kg-day, 4세는 22.09 ㎍/kg-day, 5세는 21.86 ㎍/kg-day, 6세는 17.19 ㎍/kg-day였다. 3세와 4세는 2.06 ㎍/kg-day차이가 났고, 4세와 5세는 0.13 ㎍/kg-day차이가 났고, 5세와 6세는 4.67 ㎍/kg-day차이가 났다. 4세와 5세의 노출량 차이는 크지 않다는 점을 확인하였고, 5세와 6세는 많은 차이가 난다는 점을 확인할 수 있다.

남아 3세의 PM-2.5 전체 노출량은 19.33 ㎍/kg-day, 4세는 17.67 ㎍/kg-day, 5세는 17.48 ㎍/kg-day, 6세는 13.74 ㎍/kg-day였다. 연령별 노출량 차이를 확인한 결과 3세와 4세는 1.66 ㎍/kg-day, 4세와 5세는 0.19 ㎍/kg-day, 5세와 6세는 3.74 ㎍/kg-day만큼 차이가 있다는 것을 확인하였다. PM-10과 마찬가지로 3세와 4세는 큰 차이가 없었지만 5세와 6세는 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다.

표 18. 미취학 아동(남아) 연령별 미세먼지 노출량 비교

성별	구분	연령	전체 노출량 평균 (㎍/kg-day)	노출량 차이 (㎍/kg-day) (a_n-a_{n-1})
남아	PM-10	3세	24.17	-
		4세	22.09	2.06
		5세	21.86	0.13
		6세	17.19	4.67
	PM-2.5	3세	19.33	-
		4세	17.67	1.66
		5세	17.48	0.19
		6세	13.74	3.74

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

미취학 아동 여아의 미세먼지 전체 노출량에 대하여 표 18과 같이 연령별로 비교하였다. 여아 3세는 22.57 ㎍/kg-day, 4세는 20.70 ㎍/kg-day, 5세는 18.01 ㎍/kg-day, 6세는 17.94 ㎍/kg-day였다. 3세와 4세는 1.87 ㎍/kg-day차이가 났고, 4세와 5세는 2.69 ㎍/kg-day차이가 났고, 5세와 6세는 0.05 ㎍/kg-day차이가 났다. 5세와 6세의 노출량 차이는 크지 않다는 점을 확인하였고, 4세와 5세는 많은 차이가 난다는 점을 확인할 수 있다.

여아 3세의 PM-2.5 전체 노출량은 18.04 ㎍/kg-day, 4세는 16.54 ㎍/kg-day, 5세는 14.41 ㎍/kg-day, 6세는 14.32 ㎍/kg-day였다. 연령별 노출량 차이를 확인한 결과 3세와 4세는 1.50 ㎍/kg-day, 4세와 5세는 2.13 ㎍/kg-day, 5세와 6세는 0.09 ㎍/kg-day로 5세와 6세의 노출량은 거의 비슷하지만 4세와 5세는 상대적으로 차이가 있음을 확인할 수 있다.

남아와 여아에서 미세먼지 PM-10과 PM-2.5에서 연령이 낮아질수록 전체 노출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

표 19. 미취학 아동(여아) 연령별 미세먼지 노출량 비교

성별	구분	연령	전체 노출량 평균 (㎍/kg-day)	노출량 차이 (㎍/kg-day) (a_n-a_{n-1})
여아	PM-10	3세	22.57	-
		4세	20.70	1.87
		5세	18.01	2.69
		6세	17.94	0.05
	PM-2.5	3세	18.04	-
		4세	16.54	1.50
		5세	14.41	2.13
		6세	14.32	0.09

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

4. 성별 미세먼지 노출량 비교

미취학 아동의 성별 미세먼지 노출량을 표 19와 같이 비교하였다. 미세먼지 PM-10에 대하여 3세의 남아와 여아의 노출량 차이는 1.6 ㎍/kg-day, 4세는 1.39 ㎍/kg-day, 5세는 3.85 ㎍/kg-day, 6세는 -0.75 ㎍/kg-day였다. 3세에서 5세까지는 남아가 여아보다 PM-10 노출량이 많지만, 6세는 여아가 더 많은 노출량을 나타내고 있다.

미세먼지 PM-2.5에 대하여 3세 남아와 여아의 노출량 차이는 1.29 ㎍/kg-day, 4세는 1.13 ㎍/kg-day, 5세는 3.07 ㎍/kg-day, 6세는 -0.58 ㎍/kg-day였다. PM-10과 마찬가지로 3세에서 5세까지는 남아가 여아보다 노출량이 많지만, 6세는 여아가 더 많은 것을 확인할 수 있다.

표 20. 미취학 아동 성별 미세먼지 노출량 비교

구분	연령	전체 노출량 평균 (㎍/kg-day)		노출량 차이 (㎍/kg-day) (남아-여아)
		남아	여아	
PM-10	3세	24.17	22.57	1.6
	4세	22.09	20.70	1.39
	5세	21.86	18.01	3.85
	6세	17.19	17.94	-0.75
PM-2.5	3세	19.33	18.04	1.29
	4세	17.67	16.54	1.13
	5세	17.48	14.41	3.07
	6세	13.74	14.32	-0.58

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

5. 시설공간별 미세먼지 기여도 평가

미취학 아동의 남아를 대상으로 시설공간별 미세먼지 PM-10의 노출 기여도 평가 결과는 표 20과 같다. 연령에 따라 차이가 있지만 주택실내의 미세먼지 기여도는 40.6%~42.6%, 어린이집은 42.3%~43.7%, 기타실내는 5.5%~5.8%, 실외는 4.6%~4.8%, 이동은 5.0%~5.1%로 나타났다. 미세먼지 PM-10 노출기여도는 어린이집, 주택실내, 기타실내, 이동, 실외 순으로 나타났다. 주택실내와 어린이집에서의 노출 기여도가 80% 이상임을 확인할 수 있다.

표 21. 미취학 아동(남아) 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출 기여도 평가 결과

구분	성별	연령	시설공간	노출 기여도(%)
PM-10	남아	3세	주택실내	42.6%
			어린이집	42.3%
			기타실내	5.5%
			실외	4.6%
			이동	5.0%
			전체	100.0%
		4세	주택실내	41.8%
			어린이집	42.9%
			기타실내	5.6%
			실외	4.7%
			이동	5.0%
			전체	100.0%
		5세	주택실내	40.6%
			어린이집	43.7%
			기타실내	5.8%
			실외	4.8%
			이동	5.1%
			전체	100.0%
		6세	주택실내	41.2%
			어린이집	43.2%
			기타실내	5.8%
			실외	4.7%
			이동	5.1%
			전체	100.0%

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

미취학 아동의 남아를 대상으로 시설공간별 미세먼지 PM-2.5의 노출 기여도 평가 결과는 표 21과 같다. 연령에 따라 차이가 있지만 주택실내의 미세먼지 기여도는 40.5%~42.6%, 어린이집은 47.1%~48.6%, 기타실내는 3.9%~4.1%, 실외는 3.1%~3.3%, 이동은 3.4%~3.5%로 나타났다. 미세먼지 PM-2.5 노출기여도는 PM-10과 마찬가지로 어린이집, 주택실내, 기타실내, 이동, 실외 순으로 나타났다. PM-10에 비해 PM-2.5의 어린이집 노출 기여도가 더 높은 것을 확인할 수 있다.

표 22. 미취학 아동(남아) 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출 기여도 평가 결과

구분	성별	연령	시설공간	노출 기여도(%)
PM-2.5	남아	3세	주택실내	42.6%
			어린이집	47.1%
			기타실내	3.9%
			실외	3.1%
			이동	3.4%
			전체	100.0%
		4세	주택실내	41.8%
			어린이집	47.7%
			기타실내	3.9%
			실외	3.2%
			이동	3.4%
			전체	100.0%
		5세	주택실내	40.5%
			어린이집	48.6%
			기타실내	4.1%
			실외	3.3%
			이동	3.5%
			전체	100.0%
		6세	주택실내	41.1%
			어린이집	48.2%
			기타실내	4.1%
			실외	3.2%
			이동	3.4%
			전체	100.0%

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

미취학 아동의 여아를 대상으로 시설공간별 미세먼지 PM-10의 노출 기여도 평가 결과는 표 22와 같다. 연령에 따라 차이가 있지만 주택실내의 미세먼지 기여도는 41.7%~44.6%, 어린이집은 40.8%~42.8%, 기타실내는 5.4%~5.7%, 실외는 4.2%~4.7%, 이동은 4.9%~5.0%로 나타났다. 미세먼지 PM-10 노출기여도는 미취학 아동 남아와 마찬가지로 어린이집, 주택실내, 기타실내, 이동, 실외 순으로 나타났다. 주택실내와 어린이집에서의 노출 기여도가 80% 이상임을 확인할 수 있다.

표 23. 미취학 아동(여아) 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출 기여도 평가 결과

구분	성별	연령	시설공간	노출 기여도(%)
PM-10	여아	3세	주택실내	44.6%
			어린이집	40.8%
			기타실내	5.4%
			실외	4.2%
			이동	5.0%
			전체	100.0%
		4세	주택실내	43.5%
			어린이집	41.5%
			기타실내	5.5%
			실외	4.4%
			이동	5.0%
			전체	100.0%
		5세	주택실내	43.9%
			어린이집	41.4%
			기타실내	5.4%
			실외	4.4%
			이동	4.9%
			전체	100.0%
		6세	주택실내	41.7%
			어린이집	42.8%
			기타실내	5.7%
			실외	4.7%
			이동	5.0%
			전체	100.0%

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

미취학 아동의 여아를 대상으로 시설공간별 미세먼지 PM-2.5의 노출 기여도 평가 결과는 표 23과 같다. 연령에 따라 차이가 있지만 주택실내의 미세먼지 기여도는 41.6%~44.5%, 어린이집은 45.4%~47.7%, 기타실내는 3.8%~4.1%, 실외는 2.9%~3.2%, 이동은 3.3%~3.4%로 나타났다. 미세먼지 PM-2.5 노출기여도는 PM-10과 마찬가지로 어린이집, 주택실내, 기타실내, 이동, 실외 순으로 나타났다. PM-10에 비해 PM-2.5의 어린이집 노출 기여도가 더 높은 것을 확인할 수 있다.

표 24. 미취학 아동(여아) 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출 기여도 평가 결과

구분	성별	연령	시설공간	노출 기여도(%)
PM-2.5	여아	3세	주택실내	44.5%
			어린이집	45.4%
			기타실내	3.8%
			실외	2.9%
			이동	3.4%
			전체	100.0%
		4세	주택실내	43.3%
			어린이집	46.3%
			기타실내	3.9%
			실외	3.0%
			이동	3.4%
			전체	100.0%
		5세	주택실내	43.9%
			어린이집	46.0%
			기타실내	3.8%
			실외	3.0%
			이동	3.3%
			전체	100.0%
		6세	주택실내	41.6%
			어린이집	47.7%
			기타실내	4.1%
			실외	3.2%
			이동	3.4%
			전체	100.0%

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

Ⅳ. 고 찰

2012년 브라질에서는 PM-2.5에 대한 위해성 평가를 전 세계 최초로 수행하였다. 화학연료가 취급되는 도시 내 아이들을 대상으로 미세먼지 노출량을 산출하였으며, 디젤PM을 RfC로 계산하였다(De Oliveira et al., 2012). 그러나 본 연구는 주변 발생원을 고려하지 않고 미세먼지의 구성 성분을 분석하지 않았기 때문에 위해성 평가를 수행할 수 없었으며, 미취학 아동의 24시간 노출 패턴을 바탕으로 시설공간별 노출 기여도를 산출하였다.

미취학 아동 시설공간별 주택실내와 어린이집의 평균 노출량은 거의 차이가 나지 않았다. 그러나 95분위수에서는 차이가 명확하게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 어린이집보다 주택에서의 미세먼지 농도 평균에서 분산이 훨씬 크다는 것이며, 주택에서의 미세먼지 현황이 더 다양하다는 것을 확인할 수 있다.

미취학 아동 연령이 증가할수록 미세먼지 노출량이 감소하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 호흡률과 체중만 연령별로 적용하였고, 주요 시설공간, 공간에서의 시간별 활동, 미세먼지 농도는 일괄적으로 적용되었다. 연령과 체중, 호흡률은 비례적으로 증가한다. 그러나 연령이 증가할수록 체중은 크게 불어나지만, 호흡률은 크게 증가하지 않는다. 노출량 평가는 호흡률에 비례하고, 체중에 반비례하기 때문에 체중의 영향을 많이 받을 수 있다. 따라서 연령이 증가함에 따라 노출량이 감소하는 것은 체중의 영향이라고 볼 수 있다. 일반적으로 노출량 연구에서는 집단별 또는 개인별 변수를 적용하였다. 국내 어린이 및 성인을 대상으로 다환방향족탄화수소료의 인체노출량평가 수행하였을 때는 개별 섭취량이 고려되기 때문에 연령과 상관없이 노출량에 차이가 있음을 알 수 있다(김윤희 등, 2004).

노출량 평가에 적용한 노출계수는 환경부에서 연구한 한국형 어린이 노출계수 핸드북을 근거하였다. 핸드북에서는 연령별 호흡률과 체중을 제공하고 있지만, 연령별 활동 패턴은 제공하고 있지 않다. 연령별로 활동하는 비율이 다

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

르지만 그 부분을 고려할 수가 없는 점은 이 연구에서의 가장 큰 한계라고 볼 수 있다.

3세부터 5세의 남아는 여아보다 미세먼지 노출량이 더 많았다. 그러나 6세의 남아는 여아보다 노출량이 적었다. 3세부터 5세까지 남아와 여아의 체중은 거의 비슷했다. 그러나 6세의 체중은 여아보다 남아가 무거웠다. 남아가 여아보다 호흡률이 더 많다는 점을 고려했을 때, 현 노출량 계산에서 체중의 비중이 얼마나 큰지를 확인할 수 있다.

5개 주요 시설공간 중에서 집, 어린이집, 이동에서만 활용할 수 있는 활동별 시간데이터가 존재한다. 기타와 실외에서의 활동에 대한 객관적인 정보가 존재하지 않았다. 기타와 실외의 점유 시간은 집이나 어린이집에 비해 상대적으로 적지만, 활동에 대한 정보를 적용했다면 보다 정확한 미세먼지 노출량을 산출할 수 있었을 것이다.

한국형 어린이 노출계수 핸드북에는 미취학 아동이 주로 활동하는 공간 중 하나를 기타실내로 구분하였다. 기타실내는 시설구분은 되어있으나 시설의 범위가 제시되어 있지 않다. 따라서 본 핸드북 발간을 위해 2013년도에 용역과제로 연구했던 보고서에서의 미취학 아동 주요 활동 다중이용시설 5군데를 선택하였다. 그러나 미취학 아동은 선택한 시설 외 다중이용시설을 이용할 수 있으며 시설별 이용 시간 데이터가 존재하지 않기 때문에 기타시설에 대한 노출시나리오 가정에 한계가 존재한다. 연령별로 다중이용시설 이용시간에 대한 데이터 구축이 필요하다고 볼 수 있다. 또한 집단에 대한 노출량을 계산하였기 때문에 개별적인 편차가 클 수 있다. 국외 연구에서는 개별적인 노출량 평가를 수행하기도 하였다(E. William et al., 2000). 개인별 노출평가 연구는 개인의 위치와 행동에 따른 노출량을 정밀하게 분석할 수 있다. 이에 본 연구에서 집단과 개별 노출평가를 동시에 수행했다면 더 신뢰도 높은 결과를 산출할 수 있었을 것이다.

활용할 수 있는 실내 PM-10의 자료는 많이 존재한다. 그러나 실내 PM-2.5에 대한 데이터는 거의 존재하지 않았다. 실내 PM-10은 환경부와

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

시도별 보건환경연구원에서 매년마다 측정 및 관리하고 있어 데이터가 다중이용시설별로 축적되어 있다. 이는 PM-10이 다중이용시설등의 실내공기질관리법에서 유지기준으로 관리되고 있었기 때문이다. 그러나 PM-2.5는 2018년 1월부터 권고기준으로 지정되었기 때문에 의무적으로 측정되는 경우가 거의 없었다. 또한 공식적인 시험인증을 받은 PM-2.5 측정장비가 없이 mini-vol이나 higi-vol로 측정을 하고 있는 상황이다. 따라서 PM-10에 대한 노출량은 표준화되었다고 볼 수 있지만, PM-2.5는 앞으로 추가적인 실태조사를 통해 자료의 수를 축적하여 다시 분석할 필요가 있다.

표 25. 활용한 미세먼지 데이터 출처 정리

물질	시설공간	출처
PM-10	집	주거 공간별 실내공기질 관리 방안 연구(Ⅲ) (국립환경과학원, 2011)
	어린이집	환경부 지도점검('15~' 16) 환경부 자가측정('15~' 16)
	기타실내	환경부 지도점검('15~' 16) 환경부 자가측정('15~' 16)
	실외	에어코리아 대기측정자료('15~' 16)
	이동	에어코리아 대기측정자료('15~' 16)
PM-2.5	집	주거 공간별 실내공기질 관리 방안 연구(Ⅲ) (국립환경과학원, 2011)
	어린이집	실제 측정 자료('17.12~' 18.04)
	기타실내	실제 측정 자료('17.12~' 18.04)
	실외	에어코리아 대기측정자료('15~' 16)
	이동	에어코리아 대기측정자료('15~' 16)

또한 사용된 실내 PM-10은 2015년부터 2016년까지 측정된 환경부 지도점검과 자가측정 자료이다. 그러나 실내 PM-2.5는 2017년 12월부터

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

2018년 4월까지 측정된 자료이다. 측정된 시점과 장소가 다르기 때문에 사용된 자료가 시설을 대표성을 띈다고 보기는 어렵다.

미취학 아동 시설공간에 대한 미세먼지 노출 기여도에선 모든 연령에서 어린이집, 주택실내, 기타실내, 실외, 이동 순이었다. 주택실내와 어린이집의 노출 기여도는 거의 비슷했다. 그러나 점유 시간은 주택실내가 어린이집에 2.5배 이상이기 때문에 어린이집에서의 노출 기여도는 훨씬 크다고 볼 수 있다. 주택의 재실 시간은 16시간 이상이지만 10시간이 수면 시간이고, 주택 평균 농도가 어린이집에 비해 높지 않기 때문에 노출 기여도가 예상보다 작았다고 보인다.

활동별 미세먼지 노출 기여도에서는 24시간 동안 뛰기가 가장 큰 영향을 끼쳤다. 뛰기는 시간 비중이 24시간 대비 많지는 않지만, 호흡률이 가장 높기 때문에 가장 많은 영향을 준 것으로 보인다. 시설공간별로 활동에 대한 미세먼지 노출 기여도는 다른 패턴을 나타났다. 주택에서는 수면이 가장 큰 영향을 끼쳤지만, 어린이집은 뛰기가 가장 큰 영향을 미쳤다. 주택에서는 수면의 점유시간이 압도적으로 많기 때문으로 보이고, 어린이집은 뛰기 활동의 시간과 호흡률에 영향을 받은 것으로 보인다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

Ⅴ. 결 론

미취학 아동이 주로 활동하는 공간의 미세먼지 노출 기여도는 어린이집, 주택실내, 기타실내, 실외, 이동 순이었다. 어린이집은 주택실내와 기여도가 거의 비슷했지만 재실시간을 고려한다면 어린이집에서의 기여도가 매우 높음을 확인할 수 있었다. 어린이집은 환경부 다중이용시설등 실내공기질관리법으로 관리되고 있기 다중이용시설이기 때문에, 현재 관리하고 있는 미세먼지 PM-10 100 ㎍/㎥과 PM-2.5 70 ㎍/㎥의 수준을 더 강화할 필요가 있어 보인다.

남아와 여아 모두 연령이 증가할수록 미세먼지 노출량이 줄어들음 확인하였다. 또한 6세를 제외하고 여아보다 남아에서 미세먼지 노출량이 더 많았다. 이는 호흡률의 증가보다 체중이 더 큰 폭으로 증가하기 때문이며, 농도와 점유 시간은 연령별로 통제하지 못 했기 때문이다. 미취학 아동에 대한 세밀한 개별노출패턴을 분석하여 노출계수 데이터를 확립하는 연구가 추후에 필요하다고 여겨진다.

실내 PM-10에 비해 PM-2.5 자료수가 많이 부족하여 PM-2.5에 대한 노출량 평가에 한계가 존재하였다. PM-2.5에 대한 공정시험법 마련, 인증된 측정장비 마련 및 측정 시간 선정을 통해 보건환경연구원 및 자체 기관에서 측정할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있으며, PM-2.5에 대한 추가적인 실태조사를 통해 데이터의 신뢰도를 높일 필요가 있다.

본 연구는 미취학 아동 집단에 대한 노출량을 평가하였기 때문에 개별 특성이나 민감도를 고려하진 못 했다. 따라서 추후 연구에서는 집단 평가에 개별 평가를 동시에 진행하여 보다 정교한 연구 결과를 산출하고자 한다.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

참 고 문 헌

A Le Tertre et al., "Short-term effects of particulate air pollution on cardiovascular diseases in eight European cities", J Epidemial Community Health, 56, 773-770, 2002.

C. Monn et al., "Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogenity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone", Atmospheric Environment 35, 1-32, 2001.

De Oliveira et al., "Risk assessment of PM2.5 to child residents in Brazilian Amazon region with biofuel production", Environmental Health, 11, 64, 2012.

Dominici, F et al., "Particulate matter matters", Science 344, 257-259, 2014.

E. Wilson et al., "Estimating Separately Personal Exposure to Ambient and Nonambient Particulate Matter for Epidemiology and Risk Assessment: Why and How", Journal of the Air & Waste Management Association, 50, 7, 2000.

Fang et al., "Satellite-based ground $PM_{2.5}$ estimation using timely structure adaptive modeling", Remote Sens. Environ. 186, 152-163, 2016.

F.J. Kelly, J.C. Fussell et al., "Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter", Atmospheric Environment 60, 504-526, 2012.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

Klepeis et al., "The National Human Activity Pattern Survey(NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants", Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 11, 231-252, 2001.

Li et al., "Spatial and temporal analysis of Air Pollution Index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001-2011", Environ Pollut 190, 75-81, 2014.

N.C. Jones et al., "Indoor/outdoor relationships of particulate matter in domestic homes with roadside, urban and rural locations", Atmospheric Environment, 34(16), 2603-2612, 2000

Polidori et al., "Indoor/Outdoor Relationships, Trends, and Carbonaceous Content of Fine Particulate Matter in Retirement Homes of the Los Angeles Basin", Journal of the Air&Waste Management Association, 57(3), 2007.

Tecer et al., "Particulate Matter($PM_{2.5}$, $PM_{10-2.5}$, and PM_{10}) and Children's Hospital Admissions for Asthma and Respiratory Diseases: A Bidirectional Case-Crossover Study", Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 71, 512-520, 2008.

Zhang et al., "Fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in China at a city level", Sci. Rep, 5(14884), 2015.

Xu et al., "Examining the impacts of land use on air quality from a spatio-temporal perspective in Wuhan, China", Atmosphere, 7(62), 2016.

WHO(2005), "WHO Air quality guidelines for particulate

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide".
국립환경과학원(2009), “환경성질환의 이해와 국내 동향”.
국립환경과학원(2011), “주거 공간별 실내공기질 관리 방안 연구(Ⅲ)”.
국립환경과학원(2013), “한국형 어린이 노출계수 개발 연구”.
육아정책연구소(2012), “유치원과 어린이집 일과운영 및 교사의 직무분석”
환경부 지도점검(2015, 2016)
환경부 자가측정(2015, 2016)
김윤희 등, “한국인의 모델식이에 대한 다환방향족탄화수소류(PAHs)의 인체노출량평가”, 한국식품위생안전성학회지, 19, 4, 176-184, 2004.

부 록

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 26. 미취학 남아 대상 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출량 분포

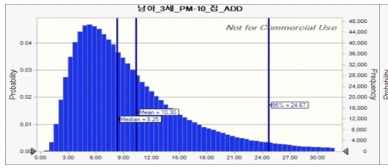
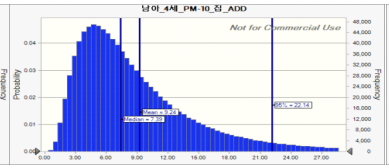
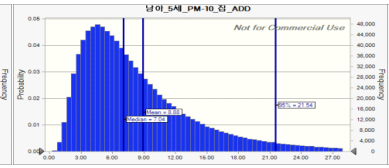
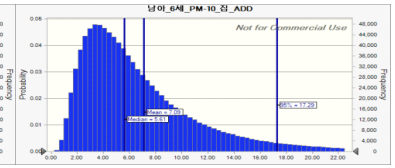
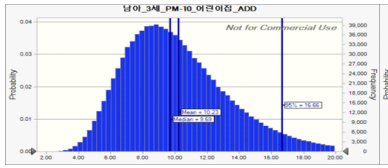
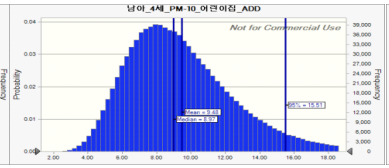
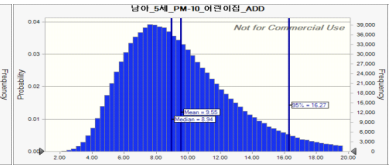
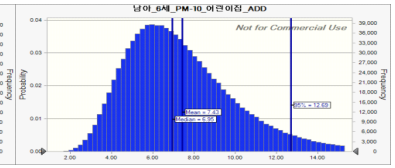
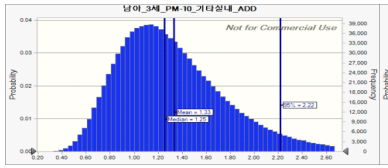
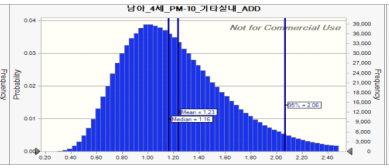
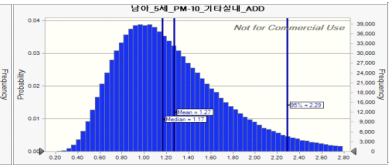
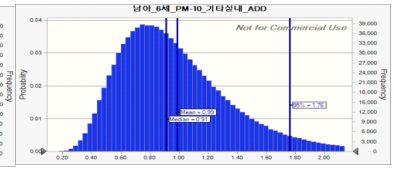
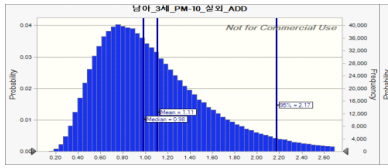
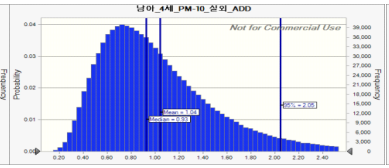
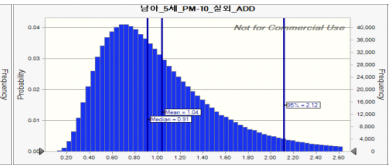
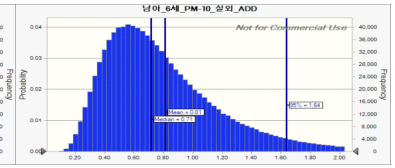
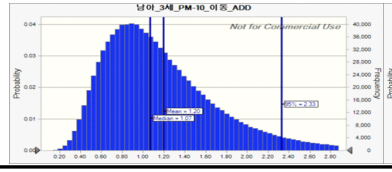
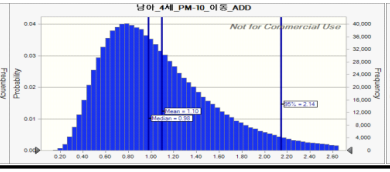
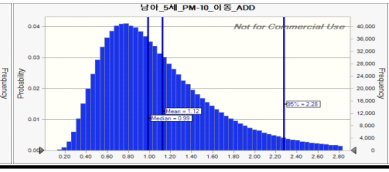
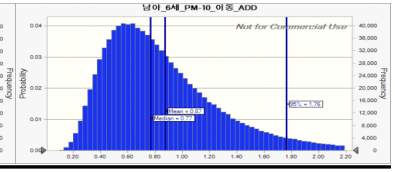
항목	PM-10 (㎍/kg-day)			
	남 아			
	3세	4세	5세	6세
주택실내				
어린이집				
기타실내				
실외				
이동				

표 27. 미취학 남아 대상 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출량 분포

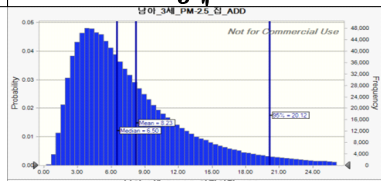
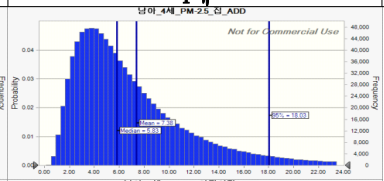
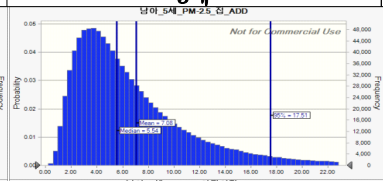
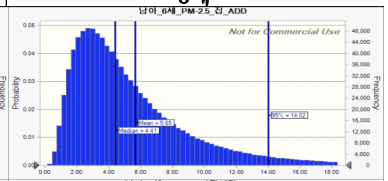
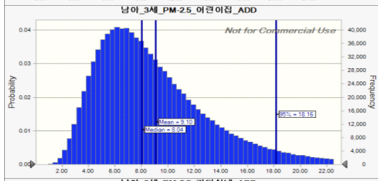
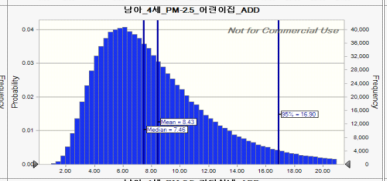
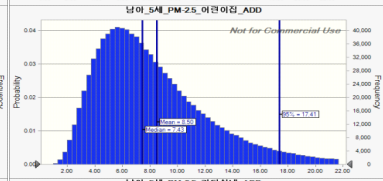
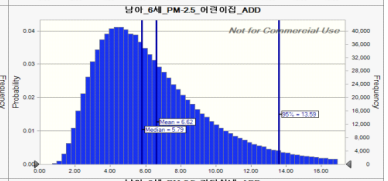
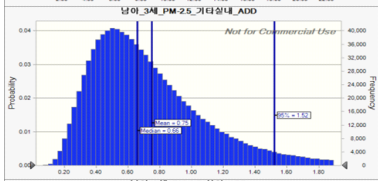
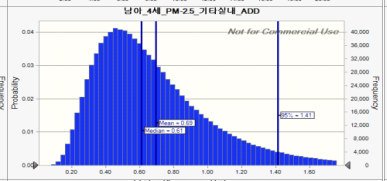
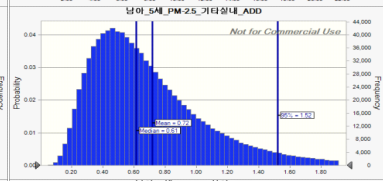
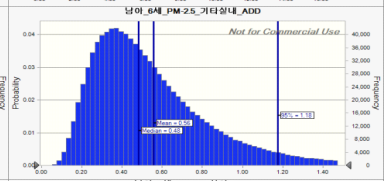
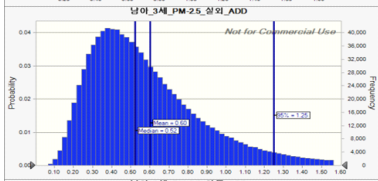
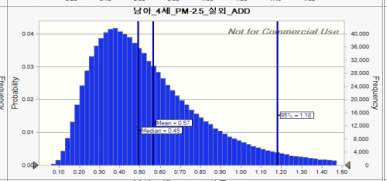
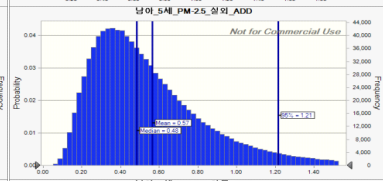
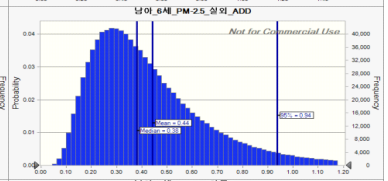
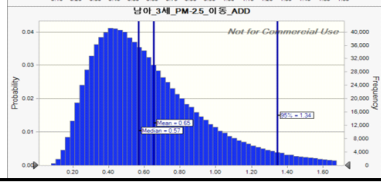
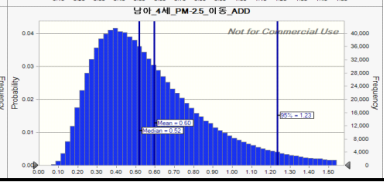
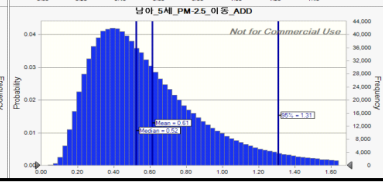
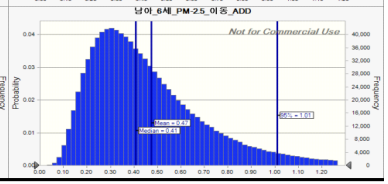
항목	PM-2.5 (㎍/kg-day)			
	남 아			
	3세	4세	5세	6세
주택실내				
어린이집				
기타실내				
실외				
이동				

표 28. 미취학 여아 대상 시설공간별 미세먼지(PM-10) 노출량 분포

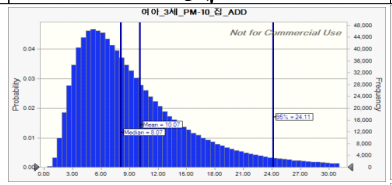
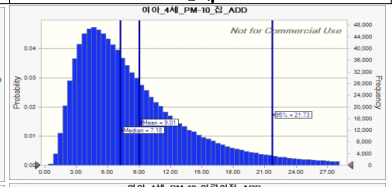
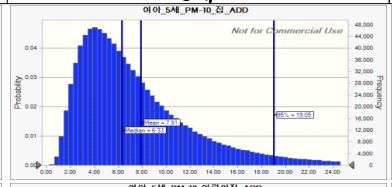
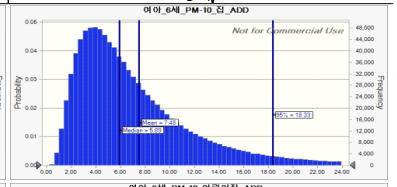
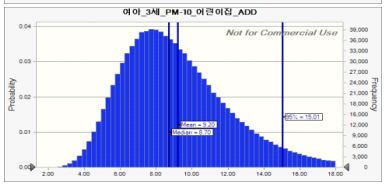
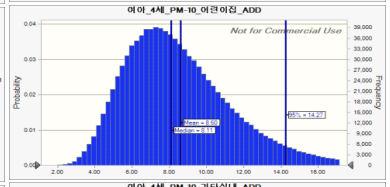
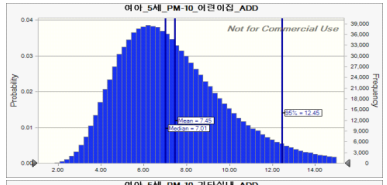
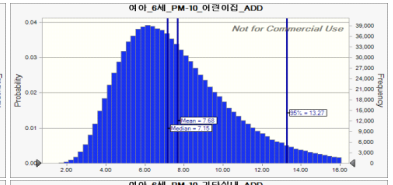
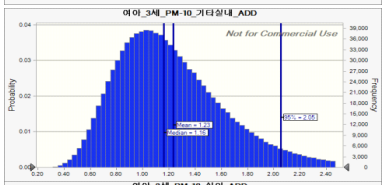
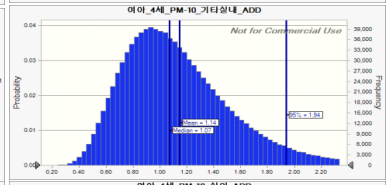
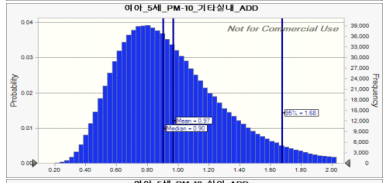
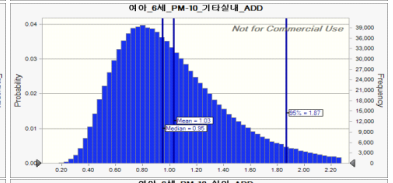
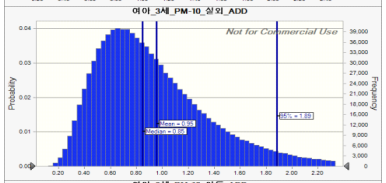
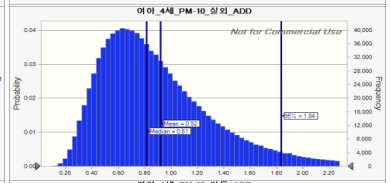
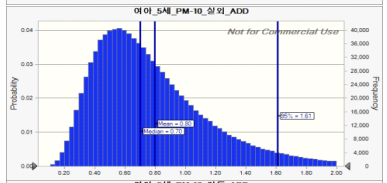
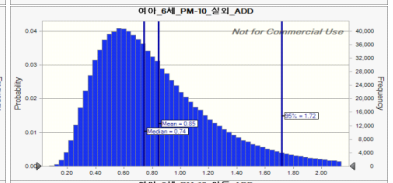
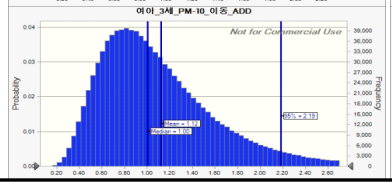
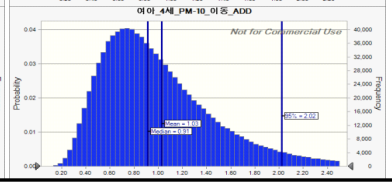
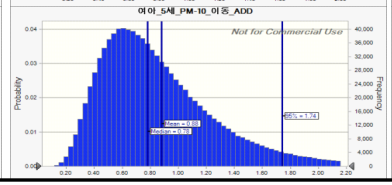
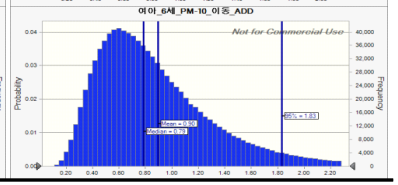
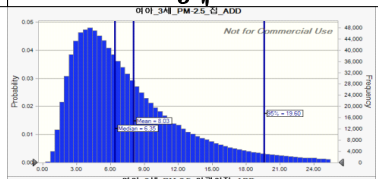
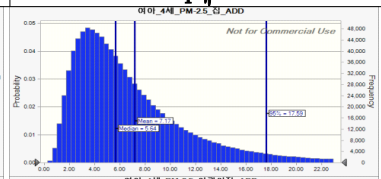
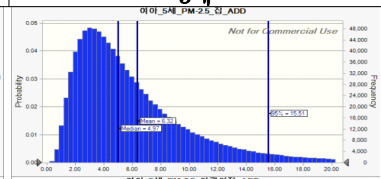
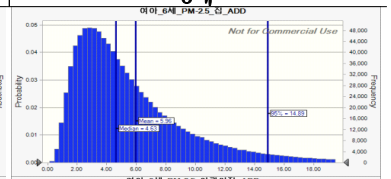
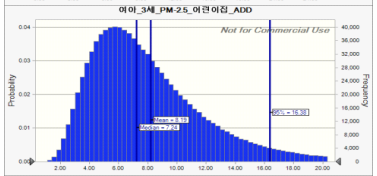
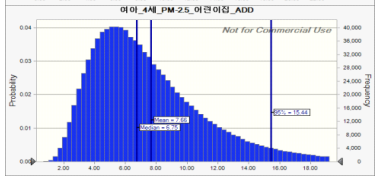
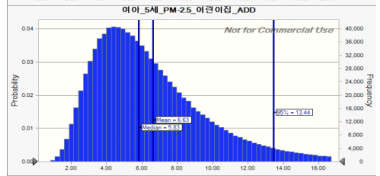
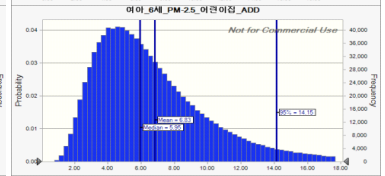
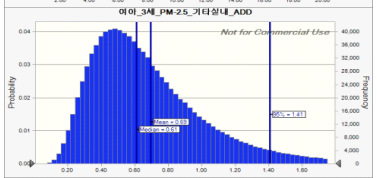
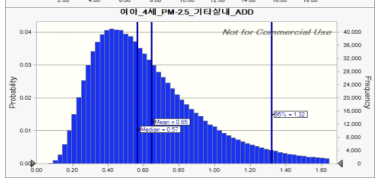
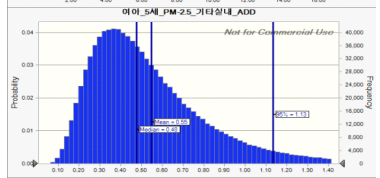
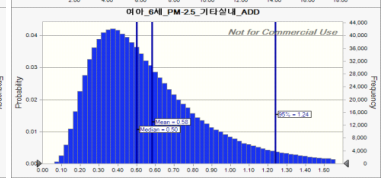
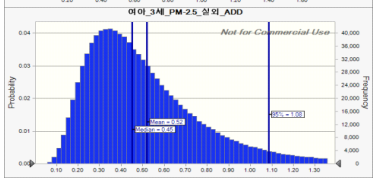
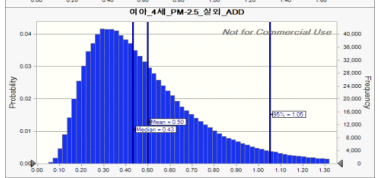
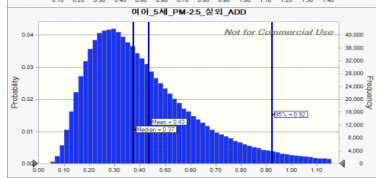
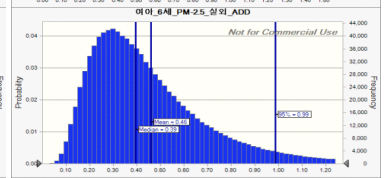
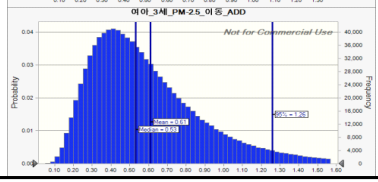
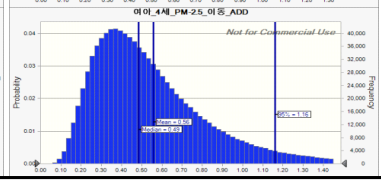
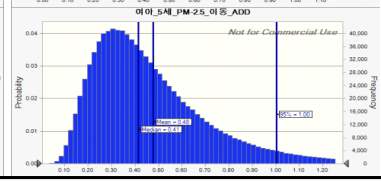
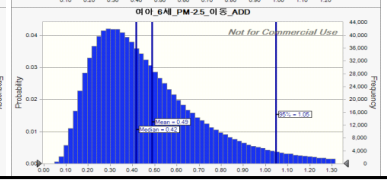
항목	PM-10 (㎍/kg-day)			
	여 아			
	3세	4세	5세	6세
주택실내				
어린이집				
기타실내				
실외				
이동				

표 29. 미취학 여아 대상 시설공간별 미세먼지(PM-2.5) 노출량 분포

항목	PM-2.5 (㎍/kg-day)			
	여 아			
	3세	4세	5세	6세
주택실내				
어린이집				
기타실내				
실외				
이동				

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 30. 미취학 아동(남아) 시설공간 활동별 PM-2.5 노출 기여도 평가 결과 1

구분	성별	연령	시설공간	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-2.5	남아	3세	주택실내	안정시	2.67	33.0
				걷기	0.05	0.6
				뛰기	1.55	19.1
				수면	3.83	47.3
			어린이집	안정시	2.53	28.2
				걷기	1.07	11.9
				뛰기	5.34	59.5
				수면	0.03	0.3
			기타실내	걷기	0.74	100.0
			실외	뛰기	0.59	100.0
			이동	안정시	0.27	41.5
				걷기	0.34	52.3
				뛰기	0.04	6.2
		4세	주택실내	안정시	2.39	33.0
				걷기	0.04	0.6
				뛰기	1.46	20.1
				수면	3.36	46.3
			어린이집	안정시	2.26	27.3
				걷기	0.99	11.9
				뛰기	5.01	60.4
				수면	0.03	0.4
			기타실내	걷기	0.68	100.0
			실외	뛰기	0.56	100.0
			이동	안정시	0.24	40.7
				걷기	0.31	52.5
				뛰기	0.04	6.8

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 31. 미취학 아동(남아) 시설공간 활동별 PM-2.5 노출 기여도 평가 결과 2

구분	성별	연령	시설공간	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-2.5	남아	5세	주택실내	안정시	2.43	35.1
				걷기	0.04	0.6
				뛰기	1.45	21.0
				수면	3.00	43.4
			어린이집	안정시	2.30	27.7
				걷기	1.01	12.2
				뛰기	4.97	59.8
				수면	0.03	0.4
			기타실내	걷기	0.70	100.0
			실외	뛰기	0.55	100.0
			이동	안정시	0.24	40.0
				걷기	0.32	53.3
				뛰기	0.04	6.7
		6세	주택실내	안정시	1.84	33.9
				걷기	0.03	0.6
				뛰기	1.11	20.4
				수면	2.45	45.1
			어린이집	안정시	1.74	27.4
				걷기	0.77	12.1
				뛰기	3.82	60.2
				수면	0.02	0.3
			기타실내	걷기	0.54	100.0
			실외	뛰기	0.42	100.0
			이동	안정시	0.18	40.0
				걷기	0.24	53.3
				뛰기	0.03	6.7

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 32. 미취학 아동(여아) 시설공간 활동별 PM-10 노출 기여도 평가 결과 1

구분	성별	연령	시설공간	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-10	여아	3세	주택실내	안정시	3.22	32.9
				걷기	0.05	0.6
				뛰기	1.68	19.2
				수면	4.96	47.3
			어린이집	안정시	2.73	28.2
				걷기	1.11	11.9
				뛰기	5.18	59.5
				수면	0.04	0.4
			기타실내	걷기	1.21	100.0
			실외	뛰기	0.94	100.0
			이동	안정시	0.47	41.5
				걷기	0.57	52.5
				뛰기	0.06	5.9
		4세	주택실내	안정시	2.83	33.0
				걷기	0.05	0.6
				뛰기	1.60	20.0
				수면	4.31	46.4
			어린이집	안정시	2.41	27.3
				걷기	1.02	11.9
				뛰기	4.94	60.4
				수면	0.03	0.3
			기타실내	걷기	1.12	100.0
			실외	뛰기	0.90	100.0
			이동	안정시	0.41	40.7
				걷기	0.53	52.8
				뛰기	0.06	6.5

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 33. 미취학 아동(여아) 시설공간 활동별 PM-10 노출 기여도 평가 결과 2

구분	성별	연령	시설공간	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-10	여아	5세	주택실내	안정시	2.47	31.9
				걷기	0.04	0.5
				뛰기	1.39	18.0
				수면	3.84	49.6
			어린이집	안정시	2.10	28.8
				걷기	0.87	11.9
				뛰기	4.29	58.8
				수면	0.03	0.4
			기타실내	걷기	0.95	100.0
			실외	뛰기	0.78	100.0
			이동	안정시	0.36	41.9
				걷기	0.45	52.3
				뛰기	0.05	5.8
		6세	주택실내	안정시	2.30	32.3
				걷기	0.04	0.6
				뛰기	1.44	20.2
				수면	3.35	47.0
			어린이집	안정시	1.96	26.7
				걷기	0.90	12.3
				뛰기	4.44	60.6
				수면	0.03	0.4
			기타실내	걷기	0.99	100.0
			실외	뛰기	0.81	100.0
			이동	안정시	0.34	39.5
				걷기	0.47	54.7
				뛰기	0.05	5.8

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 34. 미취학 아동(여아) 시설공간 활동별 PM-2.5 노출 기여도 평가 결과 1

구분	성별	연령	시설공간	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-2.5	여아	3세	주택실내	안정시	2.57	32.5
				걷기	0.04	0.5
				뛰기	1.34	16.9
				수면	3.96	50.1
			어린이집	안정시	2.43	30.1
				걷기	0.99	12.3
				뛰기	4.61	57.1
				수면	0.04	0.5
			기타실내	걷기	0.68	100.0
			실외	뛰기	0.51	100.0
			이동	안정시	0.26	43.3
				걷기	0.31	51.7
				뛰기	0.03	5.0
		4세	주택실내	안정시	2.26	32.2
				걷기	0.04	0.6
				뛰기	1.28	18.2
				수면	3.44	49.0
			어린이집	안정시	2.14	28.6
				걷기	0.91	12.2
				뛰기	4.40	58.8
				수면	0.03	0.4
			기타실내	걷기	0.63	100.0
			실외	뛰기	0.49	100.0
			이동	안정시	0.23	41.8
				걷기	0.29	52.7
				뛰기	0.03	5.5

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 35. 미취학 아동(여아) 시설공간 활동별 PM-2.5 노출 기여도 평가 결과 2

구분	성별	연령	시설공간	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-2.5	여아	5세	주택실내	안정시	1.97	31.9
				걷기	0.03	0.5
				뛰기	1.11	18.0
				수면	3.07	49.7
			어린이집	안정시	1.87	28.8
				걷기	0.77	11.9
				뛰기	3.82	58.9
				수면	0.03	0.5
			기타실내	걷기	0.53	100.0
			실외	뛰기	0.42	100.0
			이동	안정시	0.20	42.6
				걷기	0.24	51.1
				뛰기	0.03	6.4
		6세	주택실내	안정시	1.84	32.3
				걷기	0.03	0.5
				뛰기	1.15	20.2
				수면	2.67	46.9
			어린이집	안정시	1.74	26.7
				걷기	0.80	12.3
				뛰기	3.95	60.7
				수면	0.02	0.3
			기타실내	걷기	0.56	100.0
			실외	뛰기	0.44	100.0
			이동	안정시	0.18	39.1
				걷기	0.25	54.3
				뛰기	0.03	6.5

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 36. 미취학 아동(남아) 활동별 미세먼지(PM-2.5) 노출 기여도 평가 결과

구분	성별	연령	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-2.5	남아	3세	안정시	5.47	28.7
			걷기	2.20	11.5
			뛰기	7.52	39.5
			수면	3.86	20.3
		4세	안정시	4.89	28.2
			걷기	2.02	11.6
			뛰기	7.07	40.7
			수면	3.39	19.5
		5세	안정시	4.97	29.1
			걷기	2.07	12.1
			뛰기	7.01	41.0
			수면	3.03	17.7
		6세	안정시	3.76	28.5
			걷기	1.58	12.0
			뛰기	5.38	40.8
			수면	2.47	18.7

표 37. 미취학 아동(여아) 활동별 미세먼지(PM-10) 노출 기여도 평가 결과

구분	성별	연령	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-10	여아	3세	안정시	6.42	28.9
			걷기	2.94	13.2
			뛰기	7.86	35.4
			수면	5.00	22.5
		4세	안정시	5.65	28.0
			걷기	2.72	13.5
			뛰기	7.50	37.1
			수면	4.34	21.5
		5세	안정시	4.93	28.0
			걷기	2.30	13.1
			뛰기	6.51	36.9
			수면	3.87	22.0
		6세	안정시	4.60	26.9
			걷기	2.40	14.0
			뛰기	6.74	39.4
			수면	3.38	19.7

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

표 38. 미취학 아동(여아) 활동별 미세먼지(PM-2.5) 노출 기여도 평가 결과

구분	성별	연령	활동	평균 (㎍/kg-day)	노출 기여도(%)
PM-2.5	여아	3세	안정시	5.26	29.6
			걷기	2.02	11.4
			뛰기	6.49	36.5
			수면	4.00	22.5
		4세	안정시	4.63	28.6
			걷기	1.87	11.6
			뛰기	6.20	38.3
			수면	3.47	21.5
		5세	안정시	4.04	28.7
			걷기	1.57	11.1
			뛰기	5.38	38.2
			수면	3.10	22.0
		6세	안정시	3.76	27.5
			걷기	1.64	12.0
			뛰기	5.57	40.8
			수면	2.69	19.7

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

= ABSTRACT =

An Exposure Estimation Study of the Daily Particulate Matter Based On Facilities and Activities of Preschool Child in Seoul City

Kyung-Jun Jeong
Graduate School of
Public Health,
Yonsei University

(Directed by Professor Dong-Chun Shin, M.D., Ph.D.)

Particulate matter is a reason of various diseases such as respiratory and cardiovascular diseases. Preschool children aged 3 to 6 who are growing are more sensitive than adults in the same conditions. Therefore, it is necessary to develop particulate matter management method for preschool children, and proper management can be started from the exposure assessment of particulate matter. Conventional particulate matter studies have assessed concentration and response of particulate matter concentration based on outdoor data. However, since more than 90% of modern people live indoors in the day, research using outdoor data may be limited. Thus it is required to establishe a 24-hour exposure pattern and exposure scenarios per day for specific groups to assess the particulate matter exposure in a day.

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

In this study, the preschool children aged 3 to 6 were classifed into age and sex. Particulate matter was classified into PM-10 and PM-2.5. The Korean Children Exposure Factors Handbook was referred to understand the exposure pattern of preschool children. There are five main places where preschoolers are active, such as houses, daycare centers, other facilities, outdoor and mobile. Other facilites are consisted of libraries, academies, medical institutions, underground shopping malls, and large-scale stores based on the National Institute of Environmental Research report in 2013. Weight and respiration rate by age were applied to exposure algorithm. Stable, walk, run, and sleep respiration rate were also applied based on the activities per facility. There was no sleep respiration rate on the Korean Children Exposure Factors Handbook. So the sleep respiration rate was used from Child-Spedicif Exposure Factors Handbook, U.S. EPA. The PM-10 data for each space was utilized by the Ministry of Environment guidance and self-measurement data and the Air Korea atmosphere measurement data. The PM-2.5 data was utilized by sampling data from December 2017 to April 2018. The exposure scenario was contructed for preschool children based on the exposure pattern and exposure factors. And the daily particulate matter exposure was calculated by activities and facilities. Finally, the particulate matter exposure contribution was analyzed and prioritized.

Results of PM-10 and PM-2.5 exposure by activities in the house were in the order of sleep, stable, run, and walk. The

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

particulate matter exposure by activities in the daycare center was in the order of run, stable, walk, and sleep. The expousre in the mobile was in the order of walk, stable, run. Other facilites and outdoor were not able to be analyzed due to one simple activity scenario. The results of daily particulate matter exposure showed the order of run, stable, sleep and walk in all sex and ages. The PM-10 and PM-2.5 exposure by facility space wre in the order of daycare center, house, other facilities, mobile, and outdoor regardless of ex or age. As the age increased, the particulate matter exposure tended to decrease. Boys were exposed to particulate matter more than girls aged 3 to 5 years, but at age 6, girls were exposed to more particulate matter.

This study was conducted to evaluate exposure of particulate matter considering 24 hour exposure pattern for preschool children. The contribution of exposure in house was similar to that of daycare center, but when considering utilization time, the constribution daycare center was much greater than that of the house. The reason for the decrease in particulate matter exposure as age increases is considered to be the effect of weight. Sleep was the most contibutable activity in the house because sleep occupies more than 70% of utilization time in the house. The contribution of run activity was the highest in the daycare center. This is because of the time occupied by the run and the high respiration rate. However, the data of PM-10 and PM-2.5 are inconsistent in sampling time and facilities, and there is a limit to show facility representation due to the

연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

lack of PM-2.5 data. Therefore, it is necessary to investigate the current condition of PM-2.5 in each facilites, the time-activity-pattern by ages, and exposure factors by facilites and ages in further study.

Key words : Preschool Children, Daily Particulate Matter Exposure, Daily Particulate Matter Exposure Contribution, Exposure scenario