한국환경보건학회지, 제32권 제5호(2006)
Kor. J. Env. Hlth., Vol. 32, No. 5, pp 506~514(2006)

고압 송전선로 주변에 위치한 초등학교 학생들의 극저주파 자기장 노출량 예측 모델에 관한 연구

김윤신† · 현연주* · 최성호* · 노영만* · 홍승철**
한양대학교 환경 및 산업의학연구소, 인제대학교 보건안전공학과

Study about Prediction Model to Extremely Low Frequency Magnetic Fields for the Selected Primary Schoolchildren Nearby High Voltage Power Line

Yoon Shin Kim† · Youn Joo Hyun* · Seong Ho Choi* · Young Man Roh* · Seung Cheol Hong**
Institute of Environmental and Industrial Medicine, College of Medicine, Hanyang University
Department of Occupational Health & Safety Engineering, College of Biomedical Science & Engineering, Inje University
(Received June 20, 2006/Accepted August 30, 2006)

ABSTRACT

The objectives of this study were to evaluate personal exposure estimated using a time activity pattern and microenvironmental model. The study was carried out for 44 children attending a primary school nearby the lines (school A) and 125 children attending a school away from 154 kV power lines (school B). For children attending school A, the estimated personal level was a little weak correlated with the measured level(Pearson r = 0.34~0.35). For children attending school B, the correlation was very low (Pearson r = 0.09~0.16) using the TWA Model II, otherwise, TWA Model II-1 which considered the average residential MF level according to the distance from the power line and home explained 39~53% of the correlation in MF personal exposures. The estimated personal exposure level was very well represented by the measured exposure level using TWA Model II-2 which consisted on spot and 24 h stationary measurements at subject's home (Pearson r = 0.65~0.85). In conclusion, personal magnetic field expsoure estimated using a TWA Model II-2 should be provided for a reasonable estimate of measured exposure in schoolchildren living near the power line.

Keywords: extremely low frequency magnetic field, transmission power line, exposure assessment, microenvironmental model, residential exposure, personal exposure, spot measurements

I. 서 론

1979년 Wertheimer와 Leeper가 고압송전선 주변에 사는 어린이에게서 백혈병 및 뇌종양 발생이 상대적으로 높다는 연구 결과를 발표한 이래로 자기장 노출에 대한 학계의 관심이 유발되었다. 이후 1993년 소아 백혈병에 대한 극저주파 전자장의 영향을 보고한 Feychting 등에 의해 자기장에 대한 본격적인 논란이 시작되면서 그 이후 20여 년간 많은 역학 연구가 진행되고 있으며, 국내에서도 노출량 실태 조사 및 전자파 노출에 의한 환자-대조군 연구가 수행되고 있다.[1-3]

여러 역학자들은 이와 같은 자기장 역학연구 결과들의 인체 영향에 대한 끊임없는 논란이 부적절한 노출평가방법과 잘못된 노출장소의 선정 또는 불충분한 노출 메트릭스(metrics)를 사용하여 평가하였기 때문으로 제안하고 있다.[4] 이는 여러 연구에서 wire code에 근거한 자기장 노출수준에 따른 인체위해도 증가의 일관된 연구 결과를 보여주었는데 반해, 다른 노출평가 방법 중 주거 내 여러 위치에서의 spot 및 stationary 측정 등을 통한 자기장 노출수준은 백혈병 위해도 증가와 거의 상관없는 결과를 보여주기 때문이다.[5-9] 또한 선행연구에서 wire code와 단기간 자기장 노출량간에 약한

†Corresponding author : Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University
Tel: 82-2-2220-1510, Fax: 82-2-2299-3915
E-mail : yoonshin@hanyang.ac.kr

상관관계가 있음을 제시하고 있어서 노출평가방법에 대한 여러 고려가 필요하게 되었다.[7]

여러 노출평가 방법 중 시간가중평균값(Time-Weighted Average: TWA)을 이용한 자기장 노출평가가 주요 노출 metric로 가장 많이 이용되고 있으며 주로 개인노출측정에서 얻을 수 있다. 그러나 좀 더 많은 대안적 노출방법들이 여러 선행연구에서 제안되었는데, 주거에서 50 m 이내에 위치한 송전선의 특성, 주거내 선정된 장소에서의 단기간 또는 spot 측정, 주거내 고정된 장소에서의 24시간 측정, 컴퓨터 프로그램을 이용하여 주거 자기장수준의 예측치 계산, 정적 자기장 측정, 하모닉 측정, 접지 전류 측정 등이 노출평가에 이용되어 왔다. 또한 역치 이상에서의 시간분포, 여러 노출수준 범위에서의 시간분포, 간헐적 파장, 파장의 일관성, 시간적 일관성을 이용한 연구들도 있다.[5-20]

본 연구에서는 일상생활 중에서 주요 자기장 방출원인이 되고 있고 사회적 문제가 되고 있는 고압송전선에 대한 환자-대조군 연구에 있어서의 노출량 평가를 위해 미세환경모델을 이용하여 거의 모든 자기장 노출연구에서 시도되지 않았던 활동행태에 따른 시간자료를 통한 자기장의 개인노출량 모델을 예측하고 비교·분석하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

연구대상 학교는 송전선이 지나가지 않는 일반 초등학교 선정을 위해 국내 초등학교의 평균 학급수와 학생수 및 평균시설의 초등학교와 비슷한 수준의 경기도에 위치한 A 초등학교를 선정하였다. 송전선 주변 학교 선정을 위해 송전선이 학교건물 위를 통과하는 인천의 B 초등학교를 최종 선정하였다.

선정된 B 초등학교의 경우, 1 km 이내에 변전소가 있어 이 곳에서 접지되는 154 kV 송전선과 변전소를 지나는 154 kV 송전선이 합쳐진 345 kV 송전선이 통과하고 있으며, 건물을 관통하는 또다른 154 kV 송전선이 있어 총 2개의 송전선으로 둘러싸여 있었다.

연구기간은 송전선로 비 주변 초등학교, 즉 A 학교 학생들을 대상으로 2003년 7월 1일부터 25일까지 수행되었고, 송전선로 주변 초등학교인 B학교의 경우 2차에 걸쳐 측정하였는데, 1차 측정은 2003년 9월 1일~9월 24일, 2차 측정은 당해 11월 18일~12월 30일까지 수행하였다.

연구대상자는 연구수행에 무리가 없는 6학년 남녀 학생을 대상으로 하였는데 A 초등학교의 경우 6학년 11개 학급에서 무작위로 남녀 50명을 선정하였다. B 초등학교의 경우는 송전선과 가장 가까운 위치의 4개 학급의 남녀 학생을 대상으로 1차 측정시 66명, 2차 측정시 67명을 선정하였다.

2. 개인 노출 및 Spot 측정 방법

본 연구는 개인 노출량 평가와 주거지 내에서의 spot 측정을 통해 수행되었다. 연구에 사용된 자기장 측정기기는 EMDEX II와 EMDEX LITE(ENERTECH Inc.)로 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 개발한 x, y, z 세 축 방향을 측정할 수 장비로써, 각각, 정도검사를 실시하여, 실제 자기장값과 측정값간의 오차가 ±2%로 이루어졌음을 확인하였다.

연구대상자들을 대상으로 개인노출측정을 수행하였는데 측정기(EMDEX LITE, EMDEX II)를 작은 가방에 넣고 연구대상자가 열어보지 못하도록 자물쇠로 잠근 후 몸에 착용할 수 있게 하였고 동시에 일일시간활동표를 같이 동봉하였다. 보다 정확한 측정을 위해 학생들이 항상 몸에 착용할 수 있도록 교육하였고, 특히 취침시에는 전기제품과 멀리 떨어진 장소 중 연구대상자와 가장 가까운 곳에 측정기가 든 가방을 걸어두도록 하였다. 또한, 시간별 생활활동패턴을 알 수 있도록 연구대상자들이 시간활동표를 20분을 기준으로 작성하게 하였다. 초등학교 학생들의 주요 생활활동 미세환경을 주거, 학교, 학원, PC방, 교통수단, 기타로 구분하여 시간활동표를 구성하였는데, 주거의 경우 컴퓨터나 TV 등 가전제품을 이용하는 경우와 그렇지 않은 경우, 취침으로 세분화하였고, 학교는 교실, 운동장, 기타장소, 교통수단의 경우 버스, 자가용, 기타로 구분하여 학생들이 직접 기입하도록 하였다. 측정을 마친 연구대상자들은 일일시간활동표와 측정기가 든 가방을 반납하도록 하면서 연구대상자가 올바르게 시간활동표를 작성하였는지 측정자료를 측정기로부터 주컴퓨터에 전송할 때 측정된 자기장값과 시간활동표를 대조하며 연구대상자에게 활동정도를 일대일 사후인터뷰를 통해 확인하였다.

주거지에서의 spot 측정을 위해 송전선로 주변 초등학교 학생들 중 2차 측정에 참여한 연구대상자 67명의 주거환경에서 EMDEX II를 이용하여 자기장 노출량을 측정하였다. 측정방법은 크게 spot 측정과 24시간 stationary 측정으로 수행하였다. Spot 측정의 경우 측정기를 절연삼각대에 올려놓고 측정공간 중 가운데에서 수행하였는데 주거지 내 학생 방, 거실, 부엌에서 가전제품을 사용할 때와 그렇지 않을 때로 나누어 10분씩 측정하였고 현관문에서 1 m 안쪽의 실외에서도 수행하

였다. 24시간 stationary 측정은 측정기를 가방에 동봉하여 학생방의 침대 옆이나 잠자리에서 가까운 곳 중 가전제품의 영향을 받지 않은 장소에 두고 24시간 측정하였다.

3. 노출량 평가 모델

자기장의 개인노출량은 각 개인이 활동한 장소의 농도와 그 장소에서 머무른 시간을 곱하여 산출할 수 있으며, 이는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ec = \sum Ck \cdot Tk \quad (1)$$

$K = 1, \cdots, N$: microenvironment types, Ck: 각 미세환경의 자기장값, Tk: 각 미세환경에서 보낸 시간

본 연구에서는 위의 식 (1)을 이용하여 주택, 학교, 학원, PC방, 교통수단(버스, 자동차)에서의 자기장값과 각 장소에서 머무른 시간을 곱하여 TWA Model I로 명명하였으며, 이는 다음과 같이 정의하였다.

TWA Model I

P_{1i} = (HNTi · HU + HNTi · HN + HSTi · HS + SCTi · SC + SGTi · SG + ICTi · IC + BUSTi · BUS + CARTi · CAR + PCTi · PC) / (HUTi + HNTi + HSTi + SCTi + SGTi + ICTi + BUSTi + CARTi + PCTi)

P_{1i}: 참여자 I의 시간가중평균모델에 의해 예측된 자기장 개인노출량(μT), HNT_i: 참여자 i의 측정기간 동안 가전제품을 사용한 시간(hr), HU: 참여자 i의 주택에서 가전제품을 사용하였을 때 측정된 자기장값(μT), HNT_i: 참여자 i의 측정기간 동안 가전제품을 사용하지 않은 시간(hr), HN: 참여자 i의 주택에서 가전제품을 사용하지 않을 때 측정된 자기장값(μT), HST_i: 참여자 i의 측정기간 동안 취침한 시간(hr), HS: 참여자 i의 주택에서 취침할 때 측정된 자기장값(μT), SCT_i: 참여자 i의 측정기간 동안 학교 교실에서 보낸 시간(hr), SC: 참여자 i의 학교 교실에서 측정된 자기장값(μT), SGT_i: 참여자 i의 측정기간 동안 학교 운동장에서 보낸 시간(hr), SG: 참여자 i의 학교 운동장에서 측정된 자기장값(μT), SET_i: 참여자 i의 측정기간 동안 학교 기타장소에서 보낸 시간(hr), SE: 참여자 i의 학교 기타장소에서 측정된 자기장값(μT), ICT_i: 참여자 i의 측정기간 동안 학원에서 보낸 시간(hr), IC: 참여자 i의 학원에서 측정된 자기장값(μT), BUS_i: 참여자 i의 측정기간 동안 버스에서 보낸 시간(hr), BUS: 참여자 i의 버스에서 측정된 자기장값(μT), CAR_i: 참여자 i의 측정기간 동안 자동차에서 보낸 시간(hr), CAR: 참여자 i의 자동차에서 측정된 자기장값(μT), PC_i: 참여자 i의 측정기간 동안 PC 방에서 보낸 시간(hr), PC: 참여자 i의 PC방에서 측정된 자기장값(μT)

그러나 TWA Model I은 매우 이상적인 방법이나 본 연구의 목적상 연구대상자 별 각 미세환경에서의 자기장값을 모두 측정하여 평가할 수 없기 때문에 제한적일 수밖에 없다. 따라서 TWA Model I에서의 각 참여자 i의 미세환경 별 자기장 값 대신 다수 확보된 연구대상자들의 미세환경 별 평균 자기장값을 이용하여 송전선로 비 주변 초등학교 학생들의 개인노출량을 예측하였으며, 이때 사용된 수식을 TWA Model II로 명명하였고, 이를 다음과 같이 정의하였다.

TWA Model II

P_{2i} = (HNTi · AHU + HNTi · AHN + HSTi · AHS + SCTi · ASC + SGTi · ASG + ICTi · AIC + BUSTi · ABUS + CARTi · ACAR + PCTi · APC) / (HUTi + HNTi + HSTi + SCTi + SGTi + ICTi + BUSTi + CARTi + PCTi)

P_{2i}: 참여자 i의 시간가중 평균모델에 의해 예측된 자기장 개인노출량(μT), AHU: 전체 연구참여자의 주택에서 가전제품을 사용하였을 때 측정된 평균 자기장값(μT), AHN: 전체 연구참여자의 주택에서 가전제품을 사용하지 않을 때 측정된 평균 자기장값(μT), AHS: 전체 연구참여자의 주택에서 취침할 때 측정된 평균 자기장값(μT), ASC: 전체 연구참여자의 학교 교실에서 측정된 평균 자기장값(μT), ASG: 전체 연구참여자의 학교 운동장에서 측정된 평균 자기장값(μT), ASE: 전체 연구참여자의 학교 기타장소에서 측정된 평균 자기장값(μT), AIC: 전체 연구참여자의 학원에서 측정된 평균 자기장값(μT), ABUS: 전체 연구참여자의 버스에서 측정된 평균 자기장값(μT), ACAR: 전체 연구참여자의 자동차에서 측정된 평균 자기장값(μT), APC: 전체 연구참여자의 PC 방에서 측정된 평균 자기장값(μT)

위와 같은 TWA Model II를 이용한 예측치는 송전선로 주변 학생들의 경우 송전선과 주택간의 거리에 따라 주거환경에서의 자기장 수준이 차이가 있기 때문에 단순한 TWA Model II의 적용방법은 그 신뢰도가 떨어질 수 있음을 인식하고 이를 고려하기 위해 연구대

상자들이 가장 많이 거주하고 활동하는 공간인 주거환경에서의 노출량을 좀더 세분화하여 분석하였다. 이때 이를 평가하기 위해 다음과 같은 TWA Model II-1 모델을 선정하였다. 본 방법은 TWA Model II의 방법 중 앞에서 송전선과의 거리를 4가지로 분류한 방법(50 m 이내 : n = 1, 50~100 m : n = 2, 100~150 m : n = 3, 150 m 이상 : n = 4)을 이용하여 각 분류된 주거환경에서의 연구대상자들의 평균 자기장값으로 적용하였고 다른 미세환경은 TWA Model II의 방법을 따라 분석하였다.

TWA Model II-1

$$P_{3i} = (HNTi \cdot AHUn + HNTi \cdot AHNn + HSTi \cdot AHSn + SCTi \cdot ASC + SGTi \cdot ASG + ICTi \cdot AIC + BUSTi \cdot ABUS + CARTi \cdot ACAR + PCTi \cdot APC)/(HUTi + HNTi + HSTi + SCTi + SGTi + ICTi + BUSTi + CARTi + PCTi)$$

P_{3i} : 참여자 i의 시간가중 평균모델에 의해 예측된 자기장 개인노출량(μT), HNT_i: 참여자 i의 측정기간 동안 가전제품을 사용한 시간(hr), AHU_n: 송전선과 주택간의 거리(n = 1~4)에 따라 분류된 연구 대상자들의 주택에서 가전제품을 사용하였을 때 측정된 평균 자기장값(μT), HNT_i: 참여자 i의 측정기간 동안 가전제품을 사용하지 않은 시간(hr), AHN_n: 송전선과 주택간의 거리(n = 1~4)에 따라 분류된 연구 대상자들의 주택에서 가전제품을 사용하지 않을 때 측정된 평균 자기장값(μT), HST_i: 참여자 i의 측정기간 동안 취침한 시간 (hr), AHS_n: 송전선과 주택간의 거리(n = 1~4)에 따라 분류된 연구 대상자들의주택에서 취침할 때 측정된 평균 자기장값(μT)

그럼에도 불구하고 TWA Model II-1에서 사용된 방법은 송전선을 기준으로 구분하여 평균한 자기장 값으로 평가한 방법이므로 각 주거에서의 노출수준과는 차이가 발생될 수 있는 단점이 있다. 따라서 이를 극복하기 위해 TWA Model II-2 모델을 설정하여 운행하였다. TWA Model II-2는 각 연구대상자의 주거환경 중 학생방, 거실, 부엌에서 전기제품을 사용할 때의 평균 측정 자기장값과 전기제품을 사용하지 않을 때의 평균 측정값을 시간활동표에서 기록한 전기제품 사용 및 미사용시의 노출자기장값으로 이용하였고, 취침시의 자기장값은 학생 방에서 24시간 측정한 값으로 이용하여 개인노출량을 예측하는 방법이다. 다른 미세환경 중 자기장 측정값은 TWA Model II과 같이 연구대상자들의 평균 자기장값을 이용하여 분석하였다.

TWA Model II-2

$$P_{4i} = (HNTi \cdot AHUSi + HNTi \cdot AHNSi + HSTi \cdot AHSSi + SCTi \cdot ASC + SGTi \cdot ASG + ICTi \cdot AIC + BUSTi \cdot ABUS + CARTi \cdot ACAR + PCTi \cdot APC) / (HUTi + HNTi + HSTi + SCTi + SGTi + ICTi + BUSTi + CARTi + PCTi)$$

P_{4i}: 참여자 i의 시간가중 평균모델에 의해 예측된 자기장 개인노출량(μT), HNT_i: 참여자 i의 측정기간 동안 가전제품을 사용한 시간(hr), $AHUS_i$: 참여자 i의 주택 중 거실, 학생방, 부엌에서 가전제품을 사용하였을 때 측정된 spot 측정값의 평균 자기장값(μT), HNT_i: 참여자 i의 측정기간 동안 가전제품을 사용하지 않은 시간(hr), $AHNS_i$: 참여자 i의 주택 중 거실, 학생방, 부엌에서 주택에서 가전제품을 사용하지 않을 때 측정된 spot 측정값의 평균 자기장값(μT), HST_i: 참여자 i의 측정기간 동안 취침한 시간(hr), $AHSS_i$: 참여자 i의 주택 중 학생방에서 24시간 측정된 자기장값(μT)

4. 자료의 분석

자료의 통계분석은 SAS version 8.2(SAS Institute, Cary, NC)와 SPSS version 11.0(SPSS Institute)를 이용하여 수행하였다. 두 그룹간의 자기장 노출량의 비교는 t 검정을 이용하였고, 노출 모델의 적합성 평가를 위해 Pearson 상관성 검정과 회귀분석을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 송전선로 주변 및 비주변 학생의 전자파 노출량 비교

본 연구 대상의 송전선로 주변 및 비주변 초등학생의 24시간동안 노출된 자기장값을 나타낸 결과를 Table 1에 나타내었다. 송전선 주변 초등학교 학생의 평균 개인노출수준(AM: 0.379 μT, GM: 0.237 μT)은 송전선 비 주변 초등학교 학생들(AM: 0.055 μT, GM: 0.044 μT)보다 산술평균(시간가중평균), 기하평균 모두 6.9배, 5.4배 높은 값으로 산출되었고 통계적으로 유의한 차이를 보였다.

2. 송전선 비 주변 학교 학생들의 개인노출량 예측 및 평가

본 연구에서는 초등학생의 생활 행태와 여러 미세환경에서의 자기장 노출수준을 파악한 결과를 토대로 미세환경모델인 시간가중 평균모델을 통해 개인이 노출될 수 있는 자기장값을 예측하고자 하였다.

따라서 송전선 비 주변 학교 학생들에 대해 연구대상자들의 각 미세환경별 평균 자기장 노출수준과 각 연

Table 1. Summary statistics of selected metrics of 24 hrs personal exposure to magnetic fields for children attending the primary school located nearby and away from the power line

Metrics	Away from the line		Nearby the line		p value
	Mean	SD	Mean	SD	
Time-weighted average (μT)	0.055	0.024	0.379	0.228	<0.0001
Geometric means (μT)	0.044	0.021	0.237	0.142	<0.0001

구대상자들의 시간활동표를 이용하여 시간가중 평균모델을 각각의 (TWA model II)를 통해 24시간 개인노출량을 예측하였다. 그 결과를 보면 24시간 평균 자기장 개인노출수준은 산술평균인 경우 0.054±0.006 μT로 예측되었고, 기하평균인 경우 0.050±0.0056 μT로 예측되었으며, 실측된 개인노출은 AM = 0.056±0.024 μT, GM = 0.044±0.021 μT이었다. 예측된 값이 산술평균의 경우 실측된 값보다 낮게 추정된 반면 기하평균의 경우는 약간 높게 추정된 결과를 보여주었다.

예측값과 실측값간의 상관성을 보았을 때 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 산술평균값을 이용한 (a)에서는 Person 상관계수 값(r)이 0.35이었고, 기하평균값을 이용하여 분석한 (b)에서는 0.34의 값을 보여주어 약간의 상관관계를 나타내었다.

3. 송전선 주변 학교 학생들의 개인노출량 예측 및 평가

송전선 주변 학교 학생들의 개인노출량에 대한 예측은 크게 3가지 방법을 통해 수행하였다. 첫 번째 방법은 송전선 비 주변 학교 학생들의 개인노출량을 예측한 시간가중 평균모델(TWA model II)을 통해 추정하

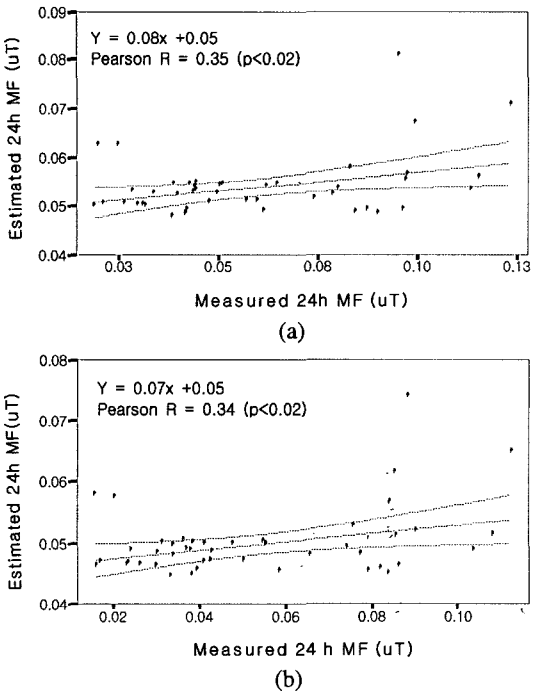

Fig. 1. Association between 24 hrs measured personal magnetic field exposure and estimated magnetic field exposure, showing regression line with 95% confidence limites by time weighted average model (TWA Model II) for schoolchildren away from the line. (a) is arithmetic means of measured personal exposure, and (b) is geometric means of measured personal exposure.

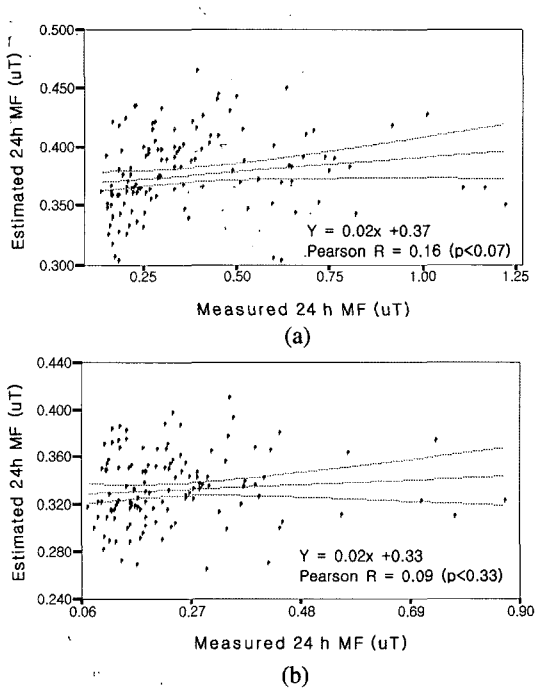

Fig. 2. Association between 24 hrs measured personal magnetic field exposure and estimated magnetic field exposure, showing regression line with 95% confidence limites by time weighted average model (TWA Model II) for children attending a school near the line. (a) is arithmetic means of measured personal exposure, and (b) is geometric means of measured personal exposure.

였는데, 그 결과를 보면 각 미세환경 별 산술평균 자기장값을 이용하여 분석한 경우 0.377±0.033 μT의 예측값을 보여주었고, 기하평균 자기장값을 이용하여 모델에 적용한 경우는 0.332±0.029 μT로 예측되었다. 산술평균은 실측값(0.379±0.228 μT)과 예측값이 거의 차이가 없었지만, 기하평균은 실측값(0.236±0.142 μT)보다 예측값이 더 높게 예측되었다.

이 두 값들이 얼마나 서로 상관성이 있는지에 대해 상관분석을 실시한 결과 산술평균을 이용한 실측값과 예측값은 Pearson 상관계수가 0.16이었고, 기하평균을 이용한 실측값과 예측값의 상관계수는 0.09로 계산되어 앞의 송전선 비 주변 학교 학생들에 비해 그 예측값의 설명력이 떨어지는 것을 볼 수 있다(Fig. 2).

두 번째 개인노출량 예측방법은 앞에서 첫 번째 예측방법을 이용한 결과가 실측값 및 예측값간에 미약한 상관성이 도출된 것을 좀더 보완하기 위해 모델에 사용되는 미세환경내 평균자기장값을 좀더 세분화하여 평가하는 방법이다. 연구대상자들의 거주지와 송전선간의 거리에 따라 앞에서 분류한 방법(50 m 이내, 50~100 m 이내, 100~150 m 이내, 150 m 이상)에 따라 주거환경에서의 자기장 노출량을 구분하여 평균한 후 모델(TWA model II-1)에 적용하여 예측하였다.

그 결과 산술평균 자기장값을 이용한 예측값은 0.381±0.092 μT이었고, 미세환경 내 자기장값의 기하평균을 이용한 예측값은 0.333±0.076 μT으로 예측되었는데 모두 실측값보다 높게 예측된 것을 알 수 있다.

예측값이 실측값과 얼마나 잘 부합되는지에 대해 상관분석을 수행한 결과를 Fig. 3에서 보여주고 있는데 산술평균의 경우 Pearson 상관계수가 0.39였고, 기하평균의 경우 상관계수가 0.53으로 평가되었는데 이는 앞의 TWA model II의 방법으로 평가하였을 때보다 훨씬 높은 상관성을 보여주고 있다. 다만 실측값과 예측값의 차이를 설명하는 다중회귀분석에서는 학교외 다른 장소, 자동차나 버스외의 교통수단이용 및 다른 미세환경에서의 활동에 대한 변수들이 모두 통계적으로 유의한 값을 보이지 않았고, 앞의 결과에서와 마찬가지로 그 영향이 매우 작은 것으로 추정되어 모델에서 평가하지 않은 미세환경이 실측치에 큰 영향을 주지 않았을 것으로 보인다. 그러나 주거환경에서의 자기장 노출수준에 대해 송전선을 고려한 모델에서 실측값과 예측값의 상관성이 좋아진 결과를 통해 주거환경에서의 노출량이 개인노출량에 영향을 주고 있음을 알 수 있고, 특히 송전선의 거리별 분류 방법이 예측치의 설명력을 높여 주었음을 알 수 있다.

세 번째 방법으로 2차 측정시 수행한 결과 중 각 연구대상자들의 주거환경 중 학생방, 거실, 부엌에서 spot 측정한 값과 학생방에서 24시간 stationary 측정 자기장값을 이용한 모델(TWA Model II-2)을 통해 24시간 개인노출량을 예측하였다.

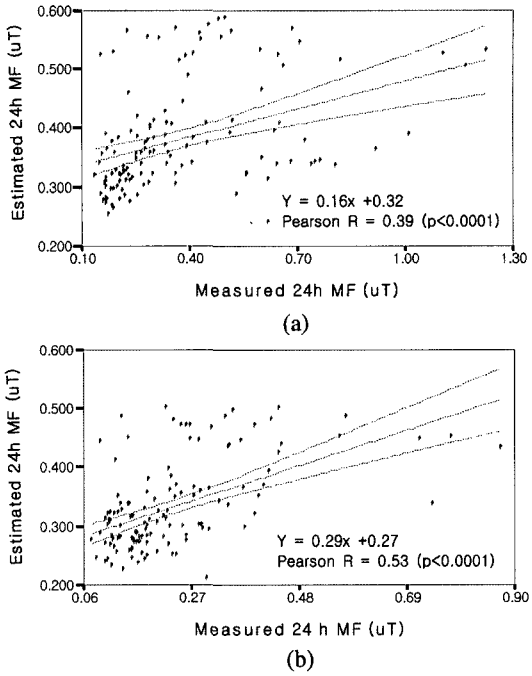

Fig. 3. Association between 24 h measured personal magnetic field exposure and estimated magnetic field exposure, showing regression line with 95% confidence limites by time weighted average model (TWA Model II-1) for children attending a school near the line. (a) is arithmetic means of measured personal exposure, and (b) is geometric means of measured personal exposure.

그 결과 각 미세환경에서의 산술평균 자기장값을 이용한 예측값은 0.354±0.148 μT였고, 기하평균을 이용한 예측값은 0.344±0.133 μT로 분석되었는데 산술평균은 실측값이 더 높았으나, 기하평균은 예측값이 더 높은 분포를 보였다.

두 예측값과 실측값간의 상관분석을 실시하여 평가하였을 때 Fig. 4에서 보듯이 산술평균의 경우 Pearson 상관계수가 0.65였으며, 기하평균의 경우 상관계수가 0.85로 산출되어 앞의 TWA Model II와 III의 방법으로 수행한 결과보다 매우 높은 상관성을 보여주었다. 또한 짝비교한 결과에 의하면 예측된 값과 실측된 값은 통계적으로 유의한 차이를 보였다(paired t-test, $p<0.001$).

다음과 같이 평가된 미세환경모델(Microenvironmental model), 즉 시간가중평균모델을 이용하여 개인노출량을

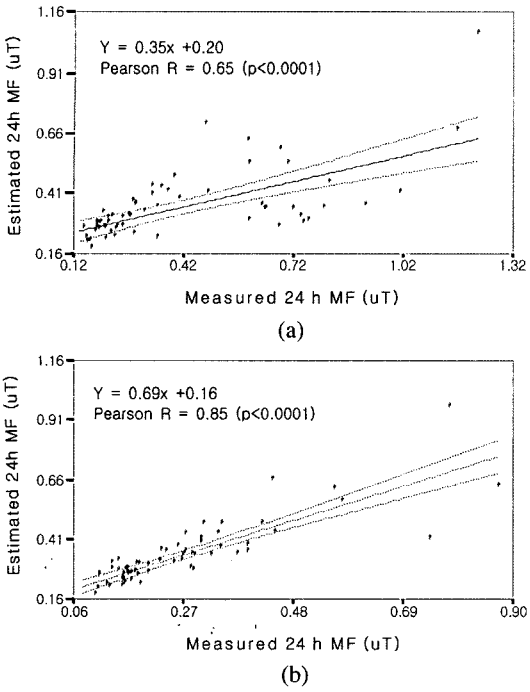

Fig. 4. Association between 24 h measured personal magnetic field exposure and estimated magnetic field exposure, showing regression line with 95% confidence limites by time weighted average model (TWA model II) for children attending a school near the line. (a) is arithmetic means of measured personal exposure, and (b) is geometric means of measured personal exposure.

예측 모델은 자기장 개인노출에 영향을 줄 수 있는 여러 미세환경에서의 활동시간에 따라 개인노출량을 예측할 수 있다는 전제로 수행되었다. 처음 자기장 노출에 대해 이러한 모델을 이용하여 분석한 연구는 Kaune 등의 연구로 주거내 자기장 노출수준을 예측하는데 매우 단순한 시간가중평균모델을 이용하였는데 이 연구는 1990년 미국 워싱턴 지역의 4개월부터 8세의 아동 29명을 대상으로 수행되었으며 주거내 여러 장소에서의 자기장값을 모델예측에 이용하였다.[10] 대상자들의 침실에서 24시간 측정한 자기장값으로 예측한 경우 실제 개인노출량과의 상관성이 0.88이었고, 두 번째로 가장 많이 이용하는 거실 및 가족공동공간에서의 자기장값으로 예측한 경우는 실측값과 0.91의 매우 높은 상관성을 보였다. 다만 부엌에서의 측정값으로 예측한 값과 실측값간의 상관성은 유의하지 않았다. 이렇게 높은 예측값의 상관성이 도출된 것은 본 연구 대상자들과는 다르게 연구대상자들이 8세 이하의 아동들이었고 대부분의 아동들이 주로 집에서 생활(17.2시간)하였으므로 다른 미세환경에서의 영향이 매우 적었음을 알 수 있다.

이에 반해 본 연구의 경우 연구대상자들이 매우 활동력이 많은 초등학교 6학년 학생들이었고 다른 외국 학생들과 비교하여 PC방이나 학원 등의 다양한 미세환경에서의 활동이 많기 때문에 Kaune의 연구와 같이 단순하게 주거환경에서의 자기장 노출수준만으로 평가하는 것보다 기존의 다른 대기오염물질에 대한 예측 연구들과 같이 활동 미세환경을 좀더 세분화하여 평가하는 방법이 필요하였다.[8] 다만 이러한 기존의 연구들은 주로 주거내 실내환경과 실외환경 및 작업환경 등으로 크게 구분한 미세환경에서의 활동력으로 예측하였지만 본 연구에서는 여러 활동 미세환경을 고려한 모델을 적용하여 평가하였다.[23,24] 또한 위의 연구들에서 제안된 방법인 개인 각자가 활동한 미세환경에서의 그 개인의 노출량으로 산정된 모델(TWA Model I)을 이용하지 않고 본 연구에서는 전체 연구대상자들의 미세환경별 평균노출수준으로 평가한 모델(TWA Model II)를 기본 모델로 설정하여 평가하였는데 이는 각 개인의 자기장 값을 이용하는 방법보다는 좀더 보편적인 값으로 평가할 수 있다는 장점이 있다. 이 모델로 예측한 자기장 값과 실측값과의 상관성이 송전선이 없는 지역의 학생들은 약 0.35의 비교적 높은 상관성을 보인 반면 송전선이 있는 지역의 초등학교 학생들은 낮은 상관성을 보였다(Pearson r = 0.09~0.16). 이러한 결과는 각 개인들의 개인노출량의 차이가 매우 컸기 때문으로 송전선이 지나가는 학교에서는 비슷한 조건에서의 노출수준을 보였지만 송전선 주변에 위치한 주택(50 m 이내: AM = 0.43 μT, GM = 0.36 μT)과 그렇지 않은 주택(150 m 이상: AM = 0.13 μT, GM = 0.12 μT)에서의 자기장 노출량의 차이가 가장 큰 원인으로 분석되었다. 따라서 모델의 불확실성을 줄이기 위해 다른 미세환경은 TWA Model II와 동일하게 하되 주거환경의 경우 주택과 송전선과의 거리를 4종류로 구분하여 그 집단의 주거환경 내 평균 자기장 수준을 고려한 모델(TWA Model II-1)로 예측한 결과 기하평균값의 예측값과 실측값의 상관계수가 0.53으로 매우 높아진 것을 볼 수 있었다. 또한 Kaune의 연구와 비슷하게 각 개인별 주거내에서 측정한 학생방, 거실, 부엌에서의 spot 및 학생방에서의 24시간 stationary 측정값을 주거환경내에서 노출된 자기장 수준으로 설정한 모델(TWA Model II-2)로 평가한 결과를 보면 더 실측값에 가깝게 예측한 것을 볼 수 있다(Pearson r = 0.65~0.85).[10] 기존의 다른 대기오염물질에 대한 예측값과 실측값간의 상관결과를 보면 Levy 등의 연구에서 이산화질소(NO_2) 노출수준의 상관계수가 0.81이었고, Lee 등의 연구에서는 호주에 거주

하는 57명의 실측 개인노출량과 모델을 이용한 예측값 간의 상관계수가 0.58이었으며, 핀란드의 헬싱키 지역에 거주하는 15명으로부터 48시간 동안의 포름알데히드(formaldehyde)와 아세트알데히드(acetaldehyde)에 대한 개인노출평가연구에서 실측값과 예측값의 상관성 결과 포름알데히드는 0.54, 아세트알데히드는 0.59의 값을 나타내었다.[22-24] 이러한 결과들과 본 연구결과를 비교할 때 TWA Model II-1와 TWA Model II-2를 이용한 예측값이 실측값을 비교적 잘 설명하고 있음을 알 수 있으며 따라서 건강영향과 자기장간의 상관성 규명을 위한 역학 연구에서 이러한 모델을 이용함으로써 비용과 시간이 많이 소모되는 직접적인 개인노출량을 측정하지 않고도 spot 및 stationary 측정 등의 간접 측정을 통해 자기장의 개인노출수준을 좀더 정확하게 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 연구는 송전선 비 주변 및 주변 초등학교 학생들을 대상으로 자기장 개인노출평가를 하기 위해 시간 활동 행태에 따른 여러 미세환경에서의 자기장 노출수준을 바탕으로 시간별 행동양식에 따른 24시간 개인노출수준을 시간가중 평균모델을 이용하여 예측하고 비교·평가하는 것으로써, 연구 결과를 바탕으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 연구대상자들의 24시간 동안의 개인노출수준 결과를 보면 송전선로 주변 학생의 평균 개인노출수준은 송전선 비 주변 초등학교 학생들보다 산술평균, 기하평균 모두 6.9 배, 5.4배 높은 값으로 산출되었다.

2. 전체 연구대상자들의 미세환경 내 평균 자기장값으로 계산한 시간가중 평균모델 (TWA model II)을 이용하여 예측된 자기장 개인노출수준을 보면 실측된 개인노출수준과 약간의 상관성을 보였다(Pearson r = 0.34~0.35). 실측된 개인노출량과 예측값간의 차이는 다중회귀분석을 통해 예측한 결과 모델에 적용되지 못한 학교내 교실이나 운동장이 아닌 다른 장소에서의 활동이 영향을 준 것으로 판단된다. 송전선 주변 학교 학생들에 대한 24시간 개인노출량 예측은 TWA model II에서는 실측값과 예측값 사이에 상관성이 매우 낮았다. 반면 TWA model II-1에서는 연구대상자들의 거주지와 송전선간의 거리에 따라 구분된 주거환경에서의 평균 자기장값을 이용하였는데 실측값과의 상관성이 0.39~0.53으로 훨씬 높아졌으며 spot 측정한 값과 24시간 stationary 측정값을 이용한 TWA Model II-2로 예측한 결과 실측값간의 상관성이 0.65~0.85로 산출되어 TWA 모델 중 가장 실측값을 잘 설명하였다. 실측값과 예측값간의 차이에 대한 설명으로 3종류의 TWA 모델에 대해 다중회귀분석을 수행하였으나 모든 독립변수들이 매우 작은 β 값을 보여주어 그 영향이 거의 없었다.

따라서 개인노출수준에 가장 중요한 영향인자가 송전선임을 명확히 알 수 있었고 비록 다른 인자들이 개인노출에 영향을 주더라도 송전선과 주거지와의 거리가 가까울수록 이러한 인자들의 영향은 매우 적은 것을 알 수 있었다. 특히 역학 연구에서 많이 수행하고 있는 spot 측정과 stationary 측정은 송전선이 존재하는 지역의 대상자들에 대한 개인노출수준을 완벽하게 평가할 수 없었으며 고전적 역학 방법인 주거환경에서의 노출수준평가만으로는 개인노출량과의 상관성이 떨어지는 문제가 발생하였다. 그러나 송전선이 없는 지역의 일반 초등학교 학생들에 대한 개인노출수준은 주거환경이 가장 많은 영향을 주었고 주거내 전기제품 이용 등의 활동이 주요 영향인자로 평가되었으며 주거외 다른 미세환경에서의 자기장 노출수준이 개인노출수준에 영향을 줄 수 있는 인자들임을 상관성분석과 시간가중평균모델을 통해 확인할 수 있었다. 따라서 개인노출수준을 예측하기 위해서는 기존의 주거환경 내 노출뿐만 아니라 다른 미세환경에 대한 고려가 필수적임을 알 수 있고 이는 미세환경모델을 이용하여 예측한 방법 중 spot 및 stationary 측정값을 이용한 주거환경 노출수준과 학교환경 노출수준을 모두 고려한 TWA Model II-2에서 24 시간 실측 개인노출수준과의 상관성이 가장 높게 평가된 점을 통해 확인할 수 있었다.

이상의 결과에서 환경인자에 민감한 집단인 어린이들의 자기장 노출수준과 개인노출에 미치는 영향인자 및 적합한 예측모델을 평가함으로써 인체노출평가를 수행하는데 있어 과학적 자료를 제공하고 향후 국내에서 활성화 될 전자파 노출에 의한 역학 연구에 있어서의 토대를 마련할 수 있는 효과가 있다고 사료된다.

감사의 글

이 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업 지원(과제번호 : Eco-No. 2003-09001-0018-0)에 의해 수행하는 연구결과의 일부임.

참고문헌

1. 김윤신, 조용성, 위승철, 홍승철 : 전자파 노출이 멜라토닌 분비량에 미치는 영향에 관한 조사 연구. 한국환

경위생학회지, **23**(3), 130-135, 1997.
2. 김윤신, 김수연, 박지연, 최원욱 : 극저주파 영역에서의 전자파 노출에 관한 조사 연구. 한국환경위생학회지, **23**(1), 55-61, 1997.
3. 조용성, 김윤신, 이종태, 홍승칠, 장성기 : 송전선로 주변과 비주변 초등학생을 대상으로 극저주파 자기장 노출과 뇨중 멜라토닌 분비량간의 상관성 연구. 한국환경보건학회지, **30**(3), 191-206, 2004.
4. Neutra, R. R. and Pizzo, V. D. : A richer conceptualization of "exposure" for epidemiological studies of the "EMF Mixture". *Bioelectromagnetics*, **22**, 48-57, 2001.
5. Wertheimer, N. and Leeper, E. : Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*, **109**, 273-284, 1979.
6. Savitz, D. A., Wachtel, H., Barnes, F. A., John, E. M. and Tvrdik, J. G. : Case control study of childhood cancer and exposure to 60 Hz magnetic fileds. *American Journal of Epidemiology*, **128**, 21-38, 1988.
7. Feychting, M. and Ahlbom, A. : Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines. *American Journal of Epidemiology*, **138**, 467-481, 1993.
8. Michaelis, J., Schuz, J., Meinert, R., Menger, M., Grigat, J. P., Kaatsch, P., Kaletsch, U., Miesner, A., Stamm, A., Brinkmann, K. and Karner, H. : Childhood leukemia and eletromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes & Control*, **8**, 167-174, 1997.
9. London, S. J., Thomas, D. C., Bowman, J. D., Sobel, E., Cheng, T. C. and Peters, J. : Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *American Journal of Epidemiology*, **134**, 923-937, 1991.
10. Kaune, W. T., Darby, S. D., Gardner, S. N., Hrubec, Z., Iriye, R. N. and Linet, M. S. : Development of a protocol for assessing time-weighted-average exposures of young children to power frequency magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, **15**, 33-51, 1994.
11. Severson, R. K., Stevens, R. G., Kaune, W. T., Thomas, D. B., Heuser, L., Davis, S. and Sever, L. E. : Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *American Journal of Epidemiology*, **128**, 10-20, 1988.
12. Linet, M. S., Hatch, E. E., Kleinerman, R. A., Robison, L. L., Kaune, W. T., Fredmans, D. R., Severson, R. K., Haines, C. M., Hartsock, C. T., Niwa, S., Wacholder, S. and Tarone, R. E. : Residential exposure to magneitc fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *The New England Journal of Medicine*, 337, 1-7, 1997.
13. Li, C. Y., Theriault, G. and Lin, R. S. : Residential exposiure to 60 Hz magnetic fields and adult cancers in Taiwan. *Epidemiology*, **8**, 25-30, 1997.
14. Sahl, S. L., Kelsh, M. A., Smith, R. W. and Aseltine, D. A. : Exposure to 60 Hz magnetic fields in the electric utility work environment. *Bioelectromagnetics*, **15**(1), 21-32, 1994.
15. Levallois, P., Gauvin, D. and Gingras, S. : Comparison between personal exposure to 60 Hz magnetic fields and stationary home measurements for poeple living near and away from a 735 kV power line. *Bioelectromagnetics*, **20**, 331-337, 1999.
16. Wilson, B. W., Matt, K. S., Morris, J. E., Sasser, L. B., Miller, D. L. and Anderson, L. E. : Effects of 60 Hz magnetic field exposure on the pineal and hypothalamic pituitary-gonadal axis in the Sberian hamster. *Bioelectromangetics*, **20**, 224-232, 1999.
17. Litovitz, T. A., Krause, D. and Mullins, J. M. : Effect of coherence time of the applied magnetic field on ornothine decarboxylase activity. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, **178**, 862-865, 1991.
18. Litovitz, T. A., Penafiel, M., Krause, D., Zhang, D. and Mullins, J. M. : The role of temporal sensing in bioelectromagnetic effects. *Bioelectromagnetics*, **18**, 388-395, 1997.
19. Burch, J. B., Rief, J. S., Yost, M. G., Keefe, T. J. and Pitrat, C. A. : Nocturnal excretion of a urinary melatonin metabolite among electric utility workers. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, **24**(3), 183-189, 1998.
20. Eskelinen, T., Niiranen, J. and Juutilainen, J. : Use of short-term measurements for assessing temporal variability of residential ELF magnetic fields exposure. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **13**, 372-377, 2003.
21. Quackenboss, J. J., Spengler, J, D., Kanarek, M. S., Letz, R. and Duffy, C. P. : Personal exposure to nitrogen dioxide: relationship to indoor/outdoor air quality and activity patterns. *Environmental Science & Technology*, **20**(8), 775-783, 1986.
22. Lee, K., Yang, W. and Bofinger, N. D. : Impact of microenvironmental nitrogen dioxide concentrations of personal exposures in Australia. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **50**, 1739-1744, 2000.
23. Levy, J. I. : Impact of residential nitrogen dioxide exposure on personal exposure : An international study. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **48**, 553-560, 1998.
24. Jurvelin, J., Vartiainen, M., Janlunen, M. and Pasanen, P. : Personal exposure levels and microenvironmental concentrations of formaldehyde and acetaldehyde in the Helsinki Metropolitan area, Finland. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **51**, 17-24, 2001.