

국내 거주환경에서의 전자기장 노출평가를 위한 Wire code의 타당성에 관한 연구

탁상우[†] · 김 현* · 김록호*

노동환경건강연구소
*서울대학교 보건대학원

Application of a Wire code in Domestic Residential EMF Studies

Sang Woo Tak[†], Hyun Kim* and Rohko Kim*

Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health
*Graduate School of Public Health, Seoul National University
(Received 22 July 2000 ; Accepted 30 August 2000)

ABSTRACT

Wire codes, introduced by Wertheimer and Leeper, are interesting largely because several case-control studies have reported associations between them and certain types of cancers, including childhood leukemia. This paper is concerned with the reliability of wire codes as a surrogate for residential electric and magnetic field, divided into four categories based on the electrical wiring within 40 m of homes. To examine the correlation between spot measurements and wire codes, EMF was measured by using HI-3604 and classified by wire codes. The correlation between log-transformed RMS of magnetic field and wire codes was 0.81. But the correlation between log-transformed RMS of electric field and wire codes was 0.27. The results led us to determine a four category form of the Wertheimer and Leeper code that 1) may be useful in domestic epidemiological studies and 2) is not suitable for electric field exposure. Thus, the critical point of exposure assessment in residential magnetic field is to classify a wire code precisely.

Keywords : EMF, Wire codes, Spot measurement, Exposure assessment

I. 서 론

Wertheimer & Leeper는 소아암(childhood cancer)과 전자기장에 관한 역학연구에서 대체노출 평가방법으로 wire code 혹은 전선배치(wire configuration)를 사용하였다. 이는 대상자가 거주하는 주택주위의 전력선배치에 근거를 두고 자기장을 평가하는 것이다. 이들은 전력선의 외부로 작용하는 물리적 특성이 전력선을 따라 흐르는 전류를 예측할 수 있다고 주장하였다.^{1,2)} 즉, 전력선의 전류는 자기장의 수준과 비례하며 따라서 거주지의 자기장노출수준은 전력선주위의 장(field)에 의해 결정된다는 것이다. 또한 이러한 일상적인 자기장 노출이

총 전자기장 노출량의 가장 큰 지표가 된다는 것이다. 반면 Wertheimer & Leeper의 연구에 대한 비평 또한 제기되었다. 자기장 노출의 대체평가방법으로 전선 배치를 사용하지만 이로 인해 발생하는 nondifferential exposure misclassification에 대한 문제제기였다. 하지만 이러한 결점에도 불구하고 Wertheimer & Leeper의 전선배치를 이용한 노출평가는 소아암과 전자기장연구에서 관찰된 다른 어떤 결과들보다 강한 연관성을 보여주고 있다.^{3,4)}

그밖에도 많은 연구에서 다양한 노출평가방법이 시도되었는데 방법론에 따라 결과 또한 다양하였다. 이중 Wertheimer & Leeper의 전선배치를 이용한 wire code가 가장 일관된 연관을 보여주고 있었다.^{3,4)} 다른 방식의 wire code를 적용한 연구에서는 소아백혈병과의 연관이 나타나지 않았지만 이는 대상자가 거주한 실제 시간의 자료가 없으므로 해서 생긴 편견에 의한

[†]Corresponding author : Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health
Tel: 02-3668-7851, Fax: 02-745-9104
E-mail: swtak@hotmail.com

것이였다.

몇몇 소아암에 관련된 연구에서는 가정에서의 자기장 측정을 시도하였는데, 전기장과 자기장에 대해 짧은 시간 동안 측정하는 점측정과³⁾ 24시간 측정⁴⁾등의 방법이였다. 이는 wire code가 갖는 기본 가정과는 달리, 일 정시점에서의 측정치가 병인론적 추론을 위한 노출력을 반영한다는 가정에서 출발한다.

이에 대해 1993년 Dovan 등은 wire code와 거주지 자기장 측정의 반복성을 관찰하는 연구를 수행하였다. 이 연구의 목적은 거주지 자기장 노출수준을 범주화하는데 있어 wire code와 점측정의 과거 노출력 반영의 안정성을 평가하기 위함이었다. 1985년에 Savitz가 측정한 wire code와 자기장 측정치에 대해 5년 뒤 같은 가정을 대상으로 측정한 값과 비교하였는데, wire code의 경우 81개 가정 중 73개가 일치하였다(90%). 반면 점측정의 경우 85년에 측정한 56개 가정에서의 측정치와 1990년 얻은 측정치 사이의 상관계수는 0.7로 wire code가 좀더 안정적으로 노출력을 반영하는 것으로 나타났다.⁵⁾

Feychting과 Ahlbom은 노출평가방법으로 wire code에 기반한 과거의 자기장 노출평가를 시도하였는데 이는 가옥주변의 전선배치변화가 기록된 자료를 토대로 자기장 노출을 평가한 것이다. 이 연구에서 점측정과 현시점에서의 전자기장 계산치가 비교적 강한 상관($r=0.70$)을 보였고, 과거의 전자기장 계산치와는 약간 낮은 상관($r=0.50$)을 보이는 결과를 제시하였다. 또한 여기서 제시된 과거 전자기장 계산치는 소아백혈병에 대해 2.1에서 2.7에 이르는 교차비를 보였다. 이들은 또한 과거의 전선배치변화에 대한 기록자료와 wire code를 조합하여 만든 노출평가방법을 제시하면서 기존의 연구결과가 명확하게 나타나지 않은 이유를 spot measurement사용에 따른 오분류(misclassification)에 의한 것이라고 주장하였다.⁶⁾

위와 같은 연구 결과들을 토대로 본 연구에서는 소아암과 전자기장에 관한 국내의 연구에서 Wertheimer & Leeper의 wire code를 사용하는 것이 적절한가에 대한 검토를 하고자 하였다. 이를 위하여 실제 거주지의 전자기장 측정치를 구하고 이에 대한 wire code의 상관성을 살펴보고, 가정내의 전기제품이나 도체에 의한 효과를 없애기 위하여 가정 내가 아닌 주택의 현관 앞에서 실측을 수행하여 wire code와 측정치간의 보다 면밀한 관계도출을 시도하였다. 또한 이 결과를 이용하여 한국적 주택상황과 고전압 송전선 및 전선을 고려한 wire code의 개발을 위한 상관관계를 파악하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 점측정

대상지역은 경기북부 및 춘천을 포함한 강원도 일부 지역에서 이루어졌으며, 도로를 따라 이동하면서 무작위로 측정지점을 선정하였다. 측정 기기는 Gaussmeter (Model HI-3604, HOLADAY INDUSTRIES, INC, USA)를 이용하였으며 이에 필요한 물품으로 HI-4413 (interface adaptor), 측정기와 기록기(휴대용 컴퓨터)를 연결하는 광케이블(12 m), 각도기, 도체성질이 없는 측정기 받침대 등을 사용하였다.

전반적인 측정방법은 미국산업안전보건연구원(NIOSH)의 manual method #301⁷⁾을 참조하였다. X, Y, Z축 각각에 대해 averaging time을 5초로 하여 각각 20회씩 측정하였으며 측정은 모두 일과 시간대(오전 9시~오후 5시 사이)에 이루어졌다. 측정위치는 가옥의 현관 앞 1 m 지점으로 정하였다. 그 위치에서 측정기의 축만 바꾸어 X, Y, Z축에 대해 각각 단축 측정하였고, 이때 인체에 의한 영향을 없애기 위하여 HI-3604의 위치로부터 최소한 7~8 m 떨어진 위치에서 휴대용 컴퓨터와 연결된 원격조종기(Model HI-3613, HOLADAY INDUSTRIES, INC, USA)를 이용하여 조작, 기록하였다. 한 축에 대해서 자기장과 전기장을 측정한 후 축을 바꿔 동일하게 실시하였으며, Wertheimer & Leeper의 wire code를 적용하기 위하여 wire class와 이로부터의 거리를 30 m용 줄자와 각도계측기를 이용하여 측정기록 하였다. 또한 거주지의 성격 및 환경에 대해서도 기록하였다.

2. Wire code 분류

wire code는 거주지 주변의 송전선을 비롯한 전선에 대해 전력의 세기와 전선의 수를 고려하여 가정에 미치는 전자계의 크기를 예상하는 방법이다. 본 연구에서는 Wertheimer & Leeper의^{2,8)} 전선배치 분류를 송전선의 형태 및 전력량에 따라 다음과 같이 구분하여 사용하였다(Table 1).

측정치 분석을 위해 각 축에서 얻어진 값들을 평균하여 각 축값(X, Y, Z)에 대해 RMS(Root Mean Square)를 구하였다. 그 식은 다음과 같다.


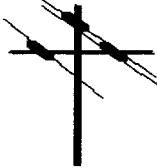
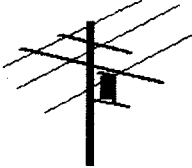
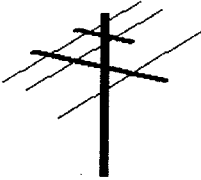
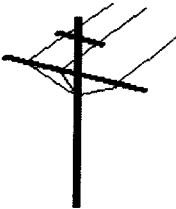
$$RMS(v) = 1/T \int_0^T v(t)^2 dt$$

v : mGauss 혹은 Volts/meter

T : 축의 개수

위의 방법으로 얻은 측정치를 wire code에 따라 할

Table 1. Definitions of Wire code^{2,8)}

Wire class	Figure	Wire code and distance from powerline			
		0 m	7.5 m	15 m	39 m
1. multiple(6 or more), thick 3-phase primary			VHCC		OHCC
2. primary distribution (thin conductor)			VHCC	OHCC	OLCC
3. secondary distribution (first span)				OHCC	OLCC
4. secondary distribution (second span)					OLCC
5. end pole					VLCC

VLCC : very low current configuration, OLCC : ordinary low current configuration, OHCC : ordinary high current configuration, VHCC : very high current configuration.

당하고 각 code 별로 분포와 평균치를 비교하였다. 나아가 두 변수간의 관계를 보기 위해 smoothing curve 를 구하였으며, 측정치의 분포를 고려하여 변수변환을 시도하였다.

3. 결과

총 25 지점에서 점측정을 실시하였는데, wire code와

주거지역별로 측정치들의 분포는 Table 2와 같다. wire code는 전신주 혹은 송전탑의 형태와 거리를 이용하여 분류하였다. 또한 측정치의 영점(reference)으로 사용하기 위하여 주변 반경 50 m 이내에 전신주나 지중 매설선이 없는 지점에서 전자기장을 측정하였는데 이 측정치가 가장 낮은 값을 보였다. 인가가 드물게 있는 농촌 지역이나 산악지역은 모두 전원지역으로 구분하였으

Table 2. Results of spot measurements by Electro-Magnetic Field

Categories		Frequency(%)	Magnetic field mean ± SD(mGauss) ^A	Electric field mean ± SD(V/m) ^B
Wire code				
Reference		1(4)	0.12	0.98
VLCC		3(12)	0.18 ± 0.11	4.87 ± 3.45
OLCC		10(40)	0.40 ± 0.16	10.62 ± 8.95
OHCC		9(36)	1.13 ± 0.48	18.47 ± 23.04
VHCC		2(8)	2.16 ± 0.90	67.01 ± 59.59
Total		25(100)	0.77 ± 0.67	16.88 ± 24.72
Residence				
Suburban		12(48)	0.66 ± 0.78	8.78 ± 8.43
Urban		13(52)	0.87 ± 0.57	25.66 ± 33.08
Total		25(100)	0.77 ± 0.67	16.88 ± 24.72
Wire class				
Reference		1(4)	0.12	0.98
Multiple thick 3 phase primary		3(12)	1.92 ± 1.07	41.8 ± 58.41
Primary distribution		4(16)	0.52 ± 0.26	1.65 ± 8.51
Secondary distribution(1st span)		5(20)	1.20 ± 0.33	20.94 ± 19.40
Secondary distribution(2 nd span)		6(24)	0.59 ± 0.34	15.27 ± 24.61
End pole		6(12)	0.28 ± 0.14	8.79 ± 8.85
Total		25(100)	0.77 ± 0.67	16.88 ± 24.72

A : Means of RMS(mGauss), B : Means of RMS(V/m).

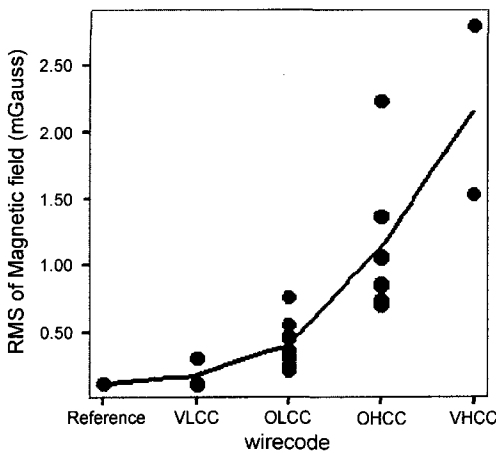


Fig. 1. Smoothing curve for RMS of magnetic field classified by wire code(Lowess smoothing) (RMS : Root Mean Square).

며, 주택이 밀집해 있는 곳이나 아파트 지역은 주택가로 구분하였다.

wire code에 따라 전기장과 자기장의 평균값이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 전원 및 산악지역의 전자기장 측정치보다 주택가의 측정치가 높게 관찰되었다.

자기장 RMS 값의 평균과 wire code 간에 Lowess smoothing을 취하였을 때 이 두 변수간에 로지스틱한

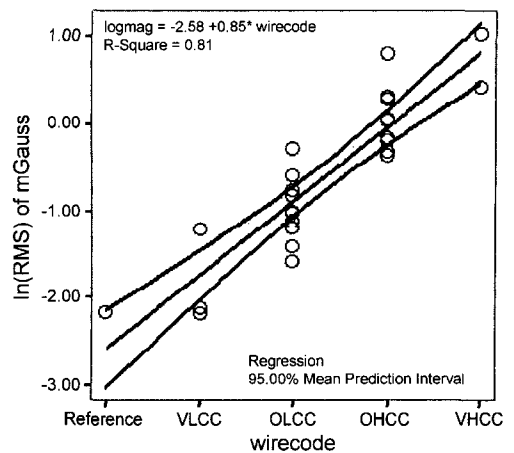


Fig. 2. Linear regression for log-transformed RMS of Magnetic-field (RMS : Root Mean Square).

상관관계가 있는 것을 알 수 있었다(Fig. 1)

자기장 측정치의 분포를 고려하여 자기장의 RMS 값에 자연로그를 취한 후 상관관계를 분석하였을 때 양의 관계식을 가지며 보정된 R-square 값이 0.81로 나타나 매우 높은 상관관계를 보이고 있었다($p < 0.01$) (Fig. 2).

전기장의 RMS와 wire code와의 관계에서는 전체적으로 wire code가 증가함에 따라 전기장 RMS도 증가

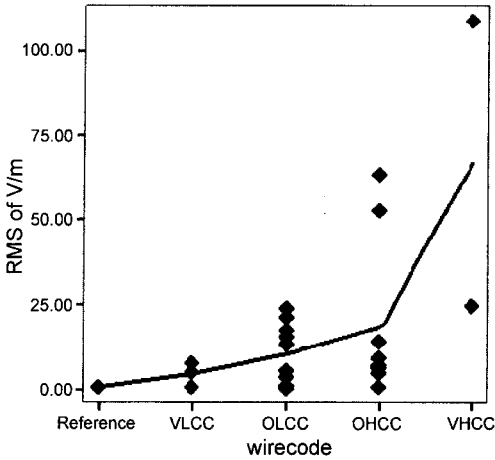


Fig. 3. Smoothing curve for RMS of electric field by wire code(Lowess smoothing) (RMS : Root Mean Square).

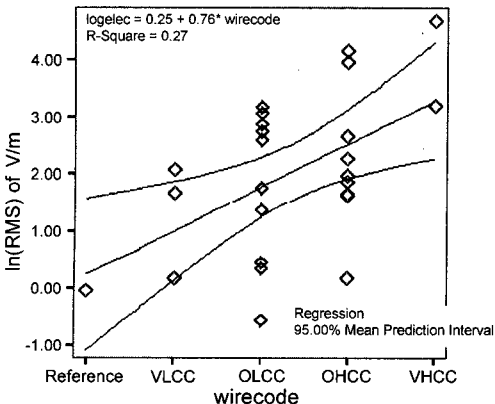


Fig. 4. Linear regression for log-transformed RMS of Electric field(RMS : Root Mean Square).

하는 것이 관찰되었다(Fig. 3). 그러나 wire code별 측정치들의 표준편차가 커서 로지스틱한 곡선이 명확히 나타나지 않았다. 전기장 측정치에 대해서도 로그 변환하여 관계를 살펴보았는데, 역시 자연로그를 취하였을 때도 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보이지만(p<0.1) 자기장의 관계만큼 유의한 상관관계를 나타내지는 않았다(Fig. 4).

III. 결론 및 고찰

Wire code는 Wertheimer & Leeper에¹⁾ 의해 소아암 연구에서 전자기장 노출평가의 대체지표로 사용하기 위하여 미국 콜로라도 덴버에서 개발되었다. 1979년도

연구에서는 2개의 범주로 나누어 적용되었지만 이후 5개의 범주로 나누어 1982년 연구에서 적용되었다. 이러한 분류는 가정에서부터 전력선까지의 거리를 고려하여 전력선의 특성을 구분하기 위한 것이었다. 따라서 이 방법은 가정이나 측정기의 접근성이 그다지 고려되지 않는다는 점과 전선배치의 변화가 급속하지 않기 때문에 현재 거주지와 과거 거주지에 대한 비교적 안정된 노출평가를 가능하게 하며 연구참여자의 편견에 의한 오차를 최소화 할 수 있다는 장점이 있다.

이 방법은 주로 노출력에 대한 평가의 인정성이 가장 중요한 후향적 연구에 많이 사용되었는데, 전기장의 노출평가에는 적절하지 못하다는 단점이 있기도 하다.⁹⁾

본 연구에서도 위의 내용을 뒷받침하는 몇 가지 결과들을 얻을 수 있었다. 자기장에 대해서는 wire code와 접촉정간의 유의한 양의 상관관계가 관찰되었다. 이는 wire code가 외부 전력선이나 송전선에 의한 가정내의 자기장 노출을 반영할 수 있음을 의미한다. 또한 측정결과 wire code와 실측치와는 지수적(logistic) 관계가 있음을 알 수 있었다. 따라서 가정내에서 생길 수 있는 여타 영향요인들에 의한 효과를 제외한 주변 전력선이나 송전선에 의한 자기장 평가방법으로 Wertheimer & Leeper의 wire code를 국내의 자기장 연구에서 사용하는 데 문제가 없을 것으로 생각된다. 다만 정확한 노출평가를 위하여 측정지에 의한 분류요류를 줄이는 방법들에 대한 연구가 더 필요할 것이다.

전기장의 경우 비록 옥외에서 측정할 수치이지만 건물에 의한 감소효과, 현관문이나 주변 금속도체에 의해 영향을 받았을 것으로 예상되는 결과를 얻었다. 실내에서의 전자기장 측정치는 wire code와 상관관계를 보이지 않을 것으로 생각된다. 따라서 wire code를 적용하는데 있어서 전기장의 측정지는 가정이나 주변의 도체물질에 의한 영향을 고려하여 측정하여야 할 것으로 생각된다. 또한 전기장 측정시 측정자의 움직임이나 위치, 거리등에도 영향을 받을 수 있으므로 충분한 거리를 확보하는 것이 필요하다.

위의 연구결과처럼 일반적으로 wire code보다 자기장 실측에 의한 결과가 소아암과의 연관성을 적게 나타낸다고 하지만 아직까지는 확실하게 증명된 방법이라 할 수 없다. 그러나 Wertheimer & Leeper의^{1,2)} 연구와 Savitz의^{3,9)} 연구로부터 소아암과의 관계에서 자기장 실측치보다 wire code와의 연관성이 높게 나타났고 다른 연구들로부터도 확인되는 부분이므로 실측치의 사용이 소아암 연구에서 의미 없는 방법이라고 치부해버리는 것은 곤란하다.

소아암과 전자기장 연구에서 관련성을 보고자하는 건

강영향 즉, 백혈병, 뇌종양 등은 흔하지 않은 질병이므로 개인에 대한 노출평가는 다소 후향적(retrospective)으로 가는 편이다. 전향적(prospective) 연구에서도 환자군이 발생되면 노출평가는 병인론적 관점에서 과거의 노출력을 평가하게 된다. 수 만 명을 대상으로 몇 년간 자기장 실측모니터링을 하는 연구는 실질적으로 힘들다 할 수 있다.

이를 극복하기 위하여 두 가지 전략이 있을 수 있는데, 첫 번째는 과거 노출력에 대한 기록, 예를 들면 전기제품사용, 거주지 주변의 전력선 변화 등을 이용한 방법이다. 두 번째는 과거 전자기장 노출력에 대한 간접적 대체지표로서 현재의 Wire code를 사용한 전자기장 측정이 있다. 전자는 노출원이 안정된 상태라는 전제가 필요하다. 하지만 이는 과거의 노출치를 대체하기 위한 현재의 측정치 또한 시간과 상관없이 안정되어야 한다는 가정에서 출발한다. 원칙적으로 노출평가는 노출원의 안정성뿐만 아니라 시간적 경과에 따른 부정기적 변화에 대해서도 이루어져야 한다.¹⁰⁾

몇 개의 연구에 대한 분석에서 wire code는 종종 전체 변이의 15%~20%만 예측할 정도로 자기장측정의 예측치로서는 다소 불완전해 보이기도 한다.^{11,12)} 하지만 이는 거주지의 전자기장에 가장 큰 영향을 미치는 전력선에 대한 부적절한 coding으로 생긴 오차 때문일 수도 있으며, wire code가 거주지 주변 전선배치에 대한 정확한 평가방법이긴 하나 건강영향에 관하여 또 다른 성질의 결정요인이 있기 때문일 수도 있다. 반면 상대적으로 낮은 wire code에 해당하는 가정의 경우는 다른 변수가정내 전선, 접지수도관 등 실제 외부의 전력선 배치상태의 설명력을 낮추는 다른 요인에 의해 부적절한 노출평가방법이 될 수도 있는 것이다.¹³⁾

참고문헌

- 1) Wertheimer N, Leeper E.: Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol* **109**, 273-284, 1979.
- 2) Wertheimer N, Leeper E.: Adult cancer related to electrical wires near the home. *Int J Epidemiol* **11**, 345-55, 1982.
- 3) Savitz DA, Wachtel H, Barnes FA, John EM, Tvrdik JG.: Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am J Epidemiol* **128**, 21-38, 1988.
- 4) London SJ, Thomas DC, Bowman JD, Sobel E, Cheng T-C, Peters JM.: Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am J Epidemiol* **134**, 923-937, 1991.
- 5) Dovan, T., Kaune, W.T. & Savitz, D.A.: Repeatability of measurements of residential magnetic fields and wire codes. *Bioelectromagnetics*, **14**, 145-159, 1993.
- 6) Feychting M, Ahlbom A.: Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines. *Am J Epidemiol* **138**, 467-81, 1993.
- 7) Joseph D. Bowman, Michael A. Kelsh, William T. Kaune: Area measurements of ELF electric and magnetic fields, Manual for measuring occupational electric and magnetic field exposures, DHHS(NIOSH) publication No. 98-154, 1998.
- 8) Jones, T. L., Shih, C. H., Thurston, D. H., Ware, B. J. & Cole, P.: Selection bias from differential residential mobility as an explanation for associations of wire codes with childhood cancer. *Journal of Clinical Epidemiology*, **46**, 545-548, 1993.
- 9) Savitz, D. A.: Overview of epidemiologic research on electric and magnetic fields and cancer. *American Industrial Hygiene Association Journal*, **54**, 197-204, 1993.
- 10) Christopher J. Portier, Mary S. Wolfe.: Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields, Working Group Report, NIH Publication No. 98-3981, 1998).
- 11) Kaune, W. T., Stevens, R. G., Callahan, N. J., Severson, R. K. & Thomas, D. B.: Residential magnetic and electric fields. *Bioelectromagnetics*, **8**, 315-335, 1987.
- 12) Kaune WT, Savitz DA.: Simplification of Wertheimer-Leeper wire code. *Bioelectromagnetics* **15**, 275-282, 1994.
- 13) EPRI.: The EMDEX Project Residential Study Interim Report. EPRI TR-102011: Project 2966-01. 1993b.