

기상학적 인자와 라돈 농도의 상관관계분석에 의한 실내 라돈농도 예측

Estimation of the Indoor Radon Concentration by the Analysis of Relationship between the Radon Concentration and the Meteorological Parameters

김정훈* · 이원근* · 장시영**

*경희대학교(경기도 용인시 기흥읍 서천 1리)

** 한국원자력연구소(대전광역시유성구 덕진동)

요 약

본 연구에서는 다중회귀분석법으로 실내에서 측정된 라돈농도와 온도, 압력 및 압력차 등의 기상학적 인자사이의 상관관계를 규명하여 실내 라돈농도의 이론적 예측방정식을 유도할 수 있음을 보였다. 실제로 기상학적인자와 실내라돈농도와의 상관관계를 분석한 결과 라돈농도는 실내온도의 변화에 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났으며, 실내의 압력차에는 큰 영향을 받지 않은 것으로 나타났다. 이론적으로 예측된 라돈농도는 실제로 측정된 라돈농도와 통계적 오차범위 내에서 잘 맞는 것으로 나타났다. 따라서 실내의 온도, 압력 및 압력차를 측정하여 본 연구에서 제안한 식에 대입하면 동일한 실내의 평균 라돈농도를 측정하지 않고도 이론적으로 예측하는 것이 가능하다.

Abstract

Theoretical equation to estimate the indoor Radon concentration can be derived from the multi-regression analysis method for the relationship between the indoor radon concentration and the meteorological variables such as the temperature, pressure and pressure difference at same indoor. The result of multi-regression analysis showed that the indoor radon concentration has been mostly influenced by the variation of the indoor temperature, while not so much influence by the indoor pressure difference. The indoor radon concentration theoretically estimated in this study agreed well with that really measured at same indoor within the range of statistical error. Therefore, it is possible to estimate the indoor radon concentration by using the theoretical equation adopting the temperature and pressure difference at the same indoor.

서론

한국인의 암사망률은 전체 사망률의 12%를 차지하고 있으며, 1990년대 중반까지는 간암과 위암에 의한 사망률이 1, 2위를 차지하였다. 그러나 1999년 이후부터는 폐암에 의한 사망률이 1위로 분석되었다. 또한 2000년도 폐암은 암에 의한 전체 사망률 중 남자의 경우 23.2%를 차지하면서 다른 선진국들과 마찬가지로 암에 의한 사망률을 높이는 원인이 되고 있다.[1] 폐암에 의한 사망률의 증가는 여러 가지 요인에 기인하고 있지만 여러 가지 정황에 의해서 라돈의 영향에 의한 상승작용일 가능성도 배제하기 어렵다. 왜냐하면 라돈이 인체, 특히 폐에 영향을 주어 폐암을 유발한다는 보고는 우라늄 광산이나 일본의 원폭피해자들의 역학연구에서 잘 들어나 있기 때문이다.[2,6,7]

라돈은 무색 무취의 불활성 기체로 일반인들의 자연 방사선에 의한 일년 피폭선량 2.4mSv 중 약 50% 정도가 라돈 및 자핵종의 호흡피폭으로 인한 것으로 1.2mSv를 라돈 자체가 차지하는 것으로 추정된다.[3] 피폭원으로써 라돈은 라돈자체의 피폭보다는 라돈 자핵종을 통해 인체에 해를 미친다. 즉 라돈자핵종은 정전기를 띠고 먼지나 기타물질과 흡착하여 호흡기로 유입되기 때문에 라돈자핵종에 의한 피폭에 관심을 가져야 할 필요가 있다. 라돈의 자핵종 중 알파 에너지를 방출하는 Po-218과 Po-214는 화학적인 활성과 생성당시부터 전하를 띠어서 폐조직 또는 폐에 존재하는 먼지들과 쉽게 흡착한 후 자신의 반감기 보다 긴 시간동안 폐에 머무르면서 붕괴를 하게 된다. Po-218과 Po-214의 붕괴로 방출되는 질량이 크고 높은 에너지를 지닌 알파입자가 폐세포, 특히 생명체에서 가장 중요한 DNA분자에 에너지를 부여하여, 세포의 사멸이나 돌연변이를 초래하게 된다. 따라서 본인에게는 암을, 후대자손에게는 기형아 출산의 원인을 제공하기도 한다.[4, 5, 6, 7]

라돈의 폐에 대한 유해영향을 최소화하기 위해 미국 국가방사선방호측정위원회(NCRP)는 1984년 뉴욕과 뉴저지 지역의 지표면 1-2 미터 위에서 측정된 라돈농도의 기하평균값을 기준으로 대기의 라돈 농도를 평균 0.18 pCi/L로 정하기도 하였다.[9, 10,13] 또한 실내와 실외의 라돈농도 중 실내 라돈의 농도는 거주자의 보건과 직접적인 관계를 가지기 때문에 실내 라돈 농도에 대한 세분화된 연구가 진행될 필요가 있다. 실내의 라돈 농도는 1층과 지하층이 다를 것으로 예상되는데, 지하층과 1층은 건축의 구조도 다를 뿐 더러 기상 인자의 특성 또한 다르다. 예컨대, 1층에 비하여 지하층은 더 시원한 반면, 환기나 통풍이 1층에 비하여 어렵다는 단점이 있다.

이에 본 연구는 기상학적 인자인 온도와 압력, 그리고 압력차가 실내 라돈 농도에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위하여 동일 장소에서 측정된 라돈방사능 농도와 기상학적 인자의 상관관계를 분석하여 측정된 기상학적 인자만을 입력변수로 사용하는 실험적 라돈농도 예측 방정식을 고안하였으며, 라돈 농도를 별도로 측정하지 않더라도 환기나 온도의 조절 등을 통해 라돈의 농도를 최소화 할 수 있는 방법을 제안하고자 하였다.

라돈의 특성

라돈은 천연적으로 존재하는 우라늄(U-238)과 토륨(Th-232) 그리고 ^{235}U 가 몇 단계의 방사성 붕괴를 거뒀던 후, 생성되는 무색, 무미, 무취의 방사능을 띤 불활성기체(noble gas)로 토양, 지하수 건축자재 등을 통해 대기 중에 방출되며, 폴로늄(Po), 비스무스(Bi) 납(Pb) 등의 자핵종으로 붕괴된다. 이 자핵종들은 붕괴 시 반조에너지에 의하여 양전하를 띠면서 공기중의 먼지 등에 흡착하여 에어로졸 상태로 존재한다. 라돈(^{222}Rn)의 동위원소중 토론이라고 부르는 ^{220}Rn 와 악티논이라고 지칭하는 ^{219}Rn 은 라돈과 동위원소 관계에 있으나 반감기가 짧으며, 지각에서 생성되어 지표 공기중으로 방출되는 양이 ^{222}Rn 에 비해 매우 적으므로 통상 라돈은 ^{222}Rn 을 지칭한다.[8]

라돈자핵종들은 생물학적 상대효과(RBE)가 큰 알파방사선을 방출하며(1.0 Bq의 라돈자핵종 당 대략~34,600MeV의 잠재 알파에너지 방출), 소화기관과 호흡기관을 통해 인체에 유입된다. 유입된 라돈 자핵종들은 기도의 상피조직(bronchial epithelium)내 기저세포(basal cell)에 방사선 손상을 일으킨다.[6, 7] 일반적으로 지각에서 생성되는 라돈은 암석이나 토양의 틈새에 존재하다가 확산이나 압력에 의하여 지표 공기 중으로 방출되기 때문에 지표 생활 환경 어디에나 존재하며, 방출량 또한 암석이나 토양 등 지역적 특성에 따라 상당한 차이를 나타낸다. 예컨대, 같은 건물이라 할지라도 실외보다는 환기율이 상대적으로 낮은 실내환경의 공기에서 높은 라돈농도 준위를 나타낸다.[2]

라돈의 자핵종은 물리적 성질이 서로 다르기 때문에 주위의 습도, 공기 중의 혼합물질 그리고 대기압 등의 환경 조건에 따라 흡착 또는 미흡착 비율이 다르게 나타난다. 따라서 앞에서 언급한 바와 같이 같은 건물이라 할지라도 실내와 실외의 라돈농도 준위가 다르게 나타나며, 실내에서도 환기의 여부에 따라서도 라돈의 농도는 차이를 보이게 된다.[8]

측정장비 및 방법

본 연구에서 기상학적 자료인 온도, 대기압, 대기압의 차이 및 라돈농도를 측정하기 위하여 사용된 측정 장비 및 방법은 다음과 같았다.

표 1. 연구 측정 장비

측정 장비	제조 회사	모델 명	측정 방법 및 범위
라돈 모니터	Sunnuclear	model 1027	수동 확산전리함을 이용하여 전리함 내부에서의 라돈농도를 채취
온도	Testostor	model 175	측정범위: $-35\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이고, 오차: $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
대기압	Setra	model C276	측정범위 : 600~1100 mb
압력 차	Setra	model C265	측정범위 : $\pm 25\text{ Pa}$
- 비고 : 압력 장치 model C276, model C265를 이용하여 Data Acquisition System으로 Lab view프로그램에 의해 측정값들은 실시간으로 매 600초마다 기록함			

기상자료 및 라돈농도의 측정 장소는 서울 용산구소재의 주거형 이층가옥이며, 지하층과 1층 공간의 라돈량을 각각 3일 측정하였다. 압력 차는 실내와 바닥 하부의 압력 차이를 측정 하고자 하였다. 따라서 지하층과 1층의 바닥 하부를 각각 1.5cm의 직경과 20cm의 깊이의 홀을 파서 압력 차를 측정하였다.

기상자료의 중회귀분석에 의한 라돈농도 예측

독립변인으로 작용하는 기상자료(실내온도, 압력차)를 이용하여 종속변인으로 작용하는 라돈농도를 예측할 수 있는 방정식을 중회귀 분석방법으로 결정하였다. 중회귀분석이란 독립변수가 두 개 이상일 때 적용하는 분석으로 단순회귀분석의 원리를 확대 적용한 형태이다.

본 논문에서 적용한 중회귀 분석법은 다음과 같다. 실험 분석결과 상관성이 가장 높은 두개의 변인 즉 압력차를 X_1 으로, 온도를 X_2 로 가정하여 중회귀 분석을 풀어보면, 라돈농도(Y)를 예측하는 회귀방정식의 형태는 다음의 식 (1)과 같아질 것이다..

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (1)$$

이 방정식에서 회귀계수를 결정하면, 주어진 독립변수에 대응하는 Y 를 예측할수 있다. 일반적으로 독립변수가 K 개인 중회귀모형은 다음의 식 (2)와 같으며,

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e \quad (2)$$

크기가 N 인 임의표본을 추출하였을 때 i 번째 측정치는 다음의 식과 같아진다.

$$Y_i = b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + \dots + b_k X_{ki} + e_i \quad (3)$$

여기서 모 중회귀방정식과 표본 중회귀방정식은 각각 식(4) 및 (5)와 같다.

$$\mu_{Y|X_1, X_2, \dots, X_k} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (4)$$

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + \dots + b_k X_{ki} \quad (5)$$

단순 회귀방정식에서와 같이 최소자승법칙을 적용하여 $\sum e_i^2$ 이 최소가 되는 회귀계수

b_0, b_1, b_2, b_k 를 결정하기 위하여 $\sum e_i^2$ 의 회귀계수에 대한 편미분이 0 이 되는 $(k+1)$ 개의 정규방정식은 다음의 식(6)과 같으며,

$$\sum_i e_i^2 = \sum_i \left(Y_i - \hat{Y}_i \right)^2 = \sum_i \left[Y_i - (b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + \dots + b_k X_{ki}) \right]^2 \quad (6)$$

식 (6)으로부터

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial b_0} = 0, \frac{\partial \sum e_i^2}{\partial b_1} = 0, \frac{\partial \sum e_i^2}{\partial b_2} = 0, \dots, \frac{\partial \sum e_i^2}{\partial b_k} = 0,$$

을 취하는 정규방정식이라고 하는 K+1개의 연립방정식 식 (7), (8) 및 (9)를 얻게 된다.

$$\sum Y_i = N b_0 + b_1 \sum X_{1i} \dots, b_k \sum X_{ki} \quad (7)$$

$$\sum X_{1i} Y_i = b_0 \sum X_{1i} + b_1 \sum X_{1i}^2 \dots, b_k \sum X_{1i} X_{ki} \quad (8)$$

$$\sum X_{2i} Y_i = b_0 \sum X_{2i} + b_1 \sum X_{1i} X_{2i} + b_2 \sum X_{2i}^2 \dots, b_k \sum X_{2i} X_{ki} \quad (9)$$

이를 다시 본 연구에서 고려하는 두 개의 독립변수(압력차 X_1 , 온도 X_2)에 대한 정규방정식의 형태로 풀면 식 (10), (11) 및 (12)를 얻을 수 있다.

$$\sum Y_i = N b_0 + b_1 \sum X_{1i} + b_2 \sum X_{2i} \quad (10)$$

$$\sum X_{1i} Y_i = b_0 \sum X_{1i} + b_1 \sum X_{1i}^2 + b_2 \sum X_{1i} X_{2i} \quad (11)$$

$$\sum X_{2i} Y_i = b_0 \sum X_{2i} + b_1 \sum X_{1i} X_{2i} + b_2 \sum X_{2i}^2 \quad (12)$$

이 세 개의 정규방정식으로 부터 다음 식 (13), (14) 및 (15)가 유도되며,

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 \quad (13)$$

$$SP_{Y1} = b_1 (SS_1) + b_2 (SP_{12}) \quad (14)$$

$$SP_{Y2} = b_1 (SP_{12}) + b_2 (SS_2) \quad (15)$$

여기서,

$$SP_{Y1} = \sum X_1 Y - \frac{\sum X_1 \sum Y}{N}$$

$$SS_1 = \sum X_1^2 - \frac{(\sum X_1)^2}{N}$$

$$SP_{12} = \sum X_1 X_2 - \frac{\sum X_1 \sum X_2}{N}$$

$$SP_{Y2} = \sum X_2 Y - \frac{\sum X_2 \sum Y}{N}$$

$$SS_2 = \sum X_2^2 - \frac{(\sum X_2)^2}{N}$$

식 (13), (14) 및 (15)를 정리하면 b_1, b_2 를 각각 식 (16) 및 (17)과 같이 얻을 수 있으며,

$$b_1 = \frac{SP_{Y1}(SS_2) - SP_{Y2}(SP_{12})}{SS_1(SS_2) - SP_{12}^2} \quad (16)$$

$$b_2 = \frac{SP_{Y2}(SS_1) - SP_{Y1}(SP_{12})}{SS_1(SS_2) - SP_{12}^2} \quad (17)$$

식 (16)과 (17)을 식 (13)에 대입함으로써 b_0 를 구하고, 이를 다시 식(1)에 대입함으로써 \hat{Y} 즉 라돈농도를 구할 수 있다.

연구 결과 및 검토

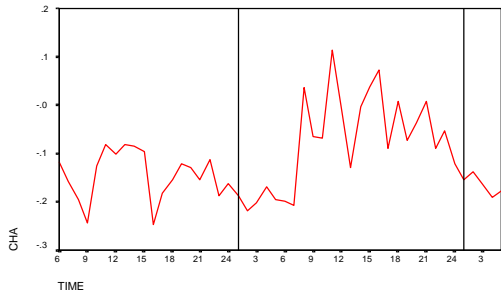
본 연구에서 3일동안 동일 주택의 1층과 지하층의 같은 장소에서 측정된 각 기상인자(실내 온도, 실내압력, 압력차) 및 라돈농도의 평균분포는 다음의 표2 및 그림 1 ~ 8과 같았다.

표 2. 측정 장소에 따른 기상인자와 라돈농도비교

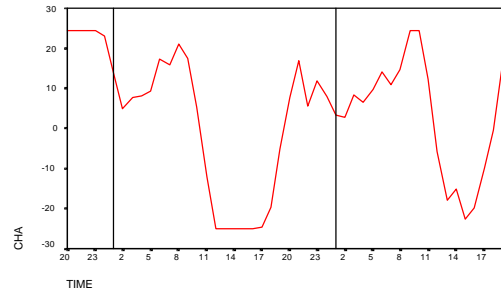
변인	측정장소	평균	표준편차	t통계값	p값
온도 (°C)	1층	27.188	.392	39.19	.000
	지하층	24.353	.313		
내부 압력 (mb)	1층	1002.987	1.139	17.21	.000
	지하층	1006.469	.817		
압력 차 (Pa)	1층	-.1125	.084	1.45	.151
	지하층	3.3602	16.6		
라돈농도 (pCi/L)	1층	1.271	1.182	7.69	.000
	지하층	5.644	3.756		

측정 장소에 따른 기상 인자를 비교한 결과, 온도는 1층이 더 높게 나타났으나, 내부 압력은 지하층이 더 높게 나타났으며 통계적으로도 유의수준 .05에서 유의한 차이를 나타내었다. 그러나 압력차는 지하층의 압력차가 더 크게 나타났으나 지하층의 경우 편차가 커서 측정 장소에 따른 차이는 없었다. 라돈농도는 1층이 1.271로 지하층의 5.644에 비하여 4.373정도 낮게 나타났으며, 통계적으로도 유의수준 .05에서 차이를 보였다.

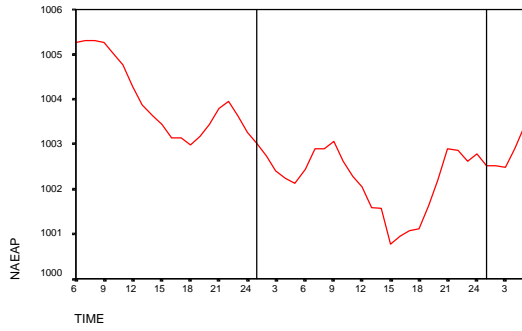
측정 장소에 따른 라돈농도의 차이를 알아본 결과, 지하층이 1층에 비하여 라돈농도가 높게 나타났다. 기상 인자를 매개변인으로 한 공분산 분석을 실시하기 위하여 라돈농도의 보정 평균값을 분석한 결과는 <표3>과 같다.



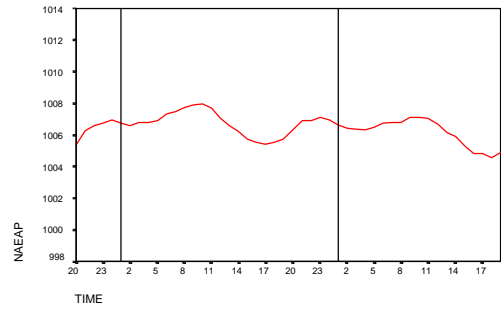
[그림 1] 1층의 압력차 분포



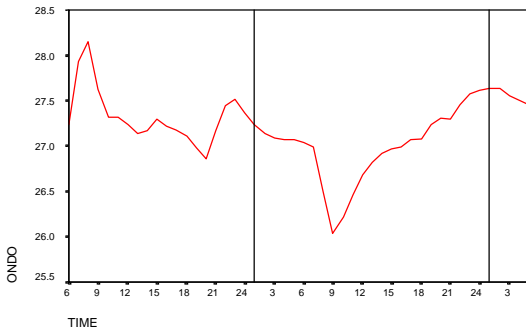
[그림 2] 지하층의 압력차 분포



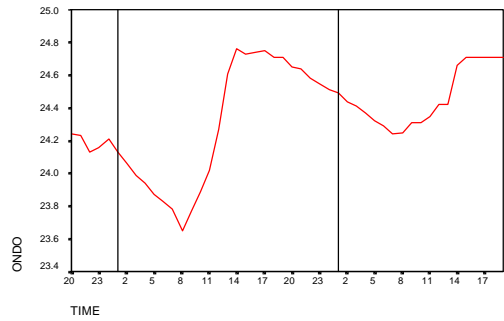
[그림 3] 1층의 내부 압력 분포



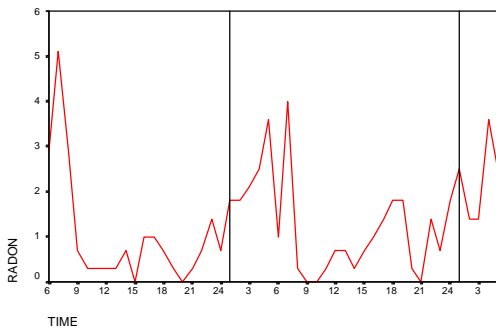
[그림 4] 지하층의 내부 압력 분포



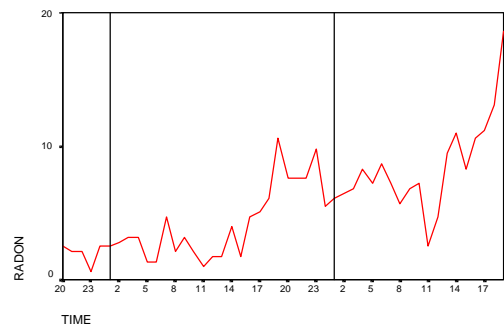
[그림 5] 1층의 온도 분포



[그림 6] 지하층의 온도 분포



[그림 7] 1층의 RADON량 분포



[그림 8] 지하층의 RADON량 분포

표 3. 라돈농도의 보정 평균값

	1층	지하층
측정된 라돈농도	1.271	5.644
라돈농도의 보정평균값	-6.126	13.040

표 3은 본 연구의 기상 인자인 온도, 내부 압력, 압력 차등의 변인을 통제한 상태에서 라돈 농도의 보정 평균값을 알아본 결과이다. 1층은 기상 인자를 통제하기 전에는 1.271이었으나 기상 인자를 통제한 후에는 -6.126으로 감소하여 나타났다¹⁾. 지하층은 5.644에서 기상인자를 통제한 후에는 13.040으로 증가하여 나타났다. 1층과 지하층의 라돈농도 보정값이 이렇게 큰 변화를 나타낸 이유는 기상 인자의 복합적인 영향으로 인하여 라돈농도가 증가 또는 감소될 수 있는 가능성을 시사하고 있다. 이를 정리하면 매개변인인 기상인자의 변화가 라돈농도의 변화에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

이로부터 매개변인인 기상 인자의 통계적 영향력을 알아보고, 기상 인자를 통제한 상태에서 라돈농도가 측정장소에 따라 차이를 나타내는지 분석한 결과는 표 4이다.

표 4. 측정 장소에 따른 라돈농도의 공분산분석표

분산원	자유도(df)	자승화(SS)	평균자승화(MS)	F통계값	p값
공분산					
온도	1	102.393	102.393	18.864	.000
내부 압력	1	.026	.026	.005	.945
압력차	1	14.675	14.675	2.704	.104
주효과					
측정 장소	1	361.531	361.531	66.606	.000
잔 차	91	493.939	5.428		
전체	95	1187.815			

표 4에서 보이는 바와 같이 측정 장소에 따라 라돈농도에 차이가 있는지를 알아보기 위하여 기상인자를 매개변인으로 공분산 분석을 실시한 결과, 온도만이 라돈농도에 대하여 매개변인으로서 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 매개변인을 통제한 상태에서 측정 장소에 따라 라돈농도도 차이를 나타내었다. 따라서 라돈농도는 기상인자에 의한 영향만을 받는 것이 아니라 측정 장소가 포함하고 있는 지질적 요소, 건축 자재 등과 같은 여러 요소에 의해서 영향을 받고 있다고 해석할 수 있다.

1) RADON량은 음수(-)를 가질 수 없으나 기상 인자의 영향으로 인하여 RADON량이 증가되어 나타났음을 의미하고 있다.

표 5. 기상 인자와 라돈농도의 상관관계

지역	기상인자	온도	내부 압력	압력차	RADON
1층	온도	1.000			
	내부압력	.4236*	1.000		
	압력차	-.4558*	-.3350*	1.000	
	RADON	.5181**	.1654	-.4683**	1.000
지하층	온도	1.000			
	내부압력	-.4422*	1.000		
	압력차	-.4761*	.4493*	1.000	
	RADON	.5955**	-.5793**	-.1114	1.000

* p < .01, ** p < .001

상관관계 검증은 유의수준을 .01, .001의 두 수준으로 나누어 살펴보았다. 또한 각 변수들간의 상관관계를 검증한 이유는 각 변인들간에 존재할 수 있는 다중공선성의 문제를 해결하기 위해서이다. 예측값을 위한 식을 수립하기 위해서는 다중 회귀분석을 사용하여야 한다. 그러나 변수들간에 다중공선성이 제기될 경우 회귀분석을 사용할 수 없다. 본 연구에서는 각 변수들간 상관 계수가 모두 .5이하로 나타났기 때문에 다중공선성은 문제시되지 않는다. 왜냐하면 각 변수들간 .7이상의 계수를 보일 때, 변인들간 회귀분석을 위한 다중공선성 문제가 제기되기 때문에 변인들간 다중공선성 문제는 해결되었다고 할 수 있다.

표 6. 1층에서 기상 인자가 라돈농도에 미치는 영향²⁾

변인	계수(B)	SE B	β	p 값
온도	1.5316	.4114	.4740	.000
압력차	-3.9172	1.5129	-.2936	.012
내부압력	-.1501	.0919	-.1906	.048
상수	109.7064			
총 설명력(R ²)	.35157			

1층에서 측정되어진 라돈농도에 기상인자가 미치는 영향을 알아본 결과, 온도가 β값 .4740으로 가장 큰 영향력을 가지고 있었으며 정적으로 영향을 미치는 변인으로 분석되었다. 다음은 압력차로 β값이 -.2936이며 라돈농도에는 통계적으로 유의한 부적 영향력을 가지고 있었다. 내부압력은 β값 -.1906을 나타내었고, 라돈농도 부적 영향력을 가지고 있었다. 이들 세 변인의 라돈농도에 대한 총 설명력은 35.157%이다.

2) 계수(B)의 의미는 다음의 식 $\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2$ 에서 b_1, b_2, b_3 에 해당하는 값이다. 상수는 b_0 에 해당한다.

표 6의 회귀 분석결과로부터 도출된 1층 실내의 라돈농도 예측방정식³⁾은 다음의 식(18)과 같았다.

$$R_i = 109.7064 + 1.5316X_{1i} - 3.9172X_{2i} - .1501X_{3i} \quad (18)$$

다음의 표 7은 지하층의 실내에서 측정된 기상인자가 라돈농도에 미치는 영향을 분석한 결과이다.

표 7. 지하층에서 기상 인자가 라돈농도에 미치는 영향

변인	계수(B)	SE B	β	p 값
온도	4.7327	.8056	.5833	.000
압력차	-.0250	.0188	-.1413	.187
내부압력	-.4660	.3766	-.1303	.220
상수	359.1552			
총 설명력(R^2)	.48169			

지하층에서 측정된 라돈농도에 대한 영향 기상요인의 변화영향은 1층과 마찬가지로 온도가 β 값 .5833으로 가장 큰 영향력을 가지고 있었으며 정적으로 영향을 미치는 변인으로 분석되었다. 그러나 압력차와 내부압력 등은 통계적으로 유의한 영향력을 가지지 못하였다. 반면 세 변인의 라돈농도에 대한 총 설명력은 48.169%이다. 이에 두 변수만을 가지고 회귀 분석을 한 결과, 두 변수 모두 통계적으로 유의한 영향력을 가지는 것으로 분석되었다. 따라서 라돈농도 예측을 위한 식은 두 변인만을 선택하여 회귀분석한 다음 표 8의 계수를 사용하였다.

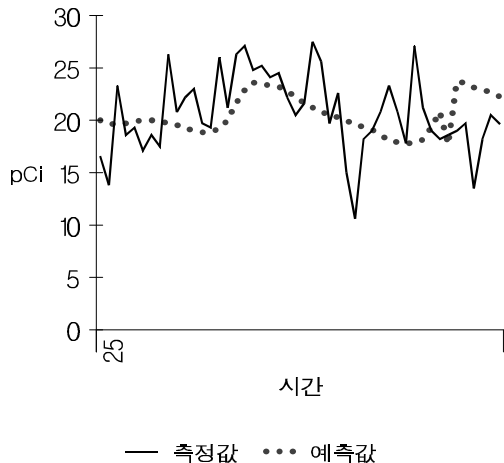
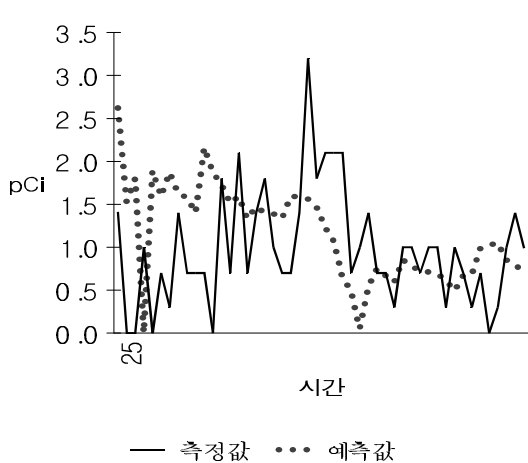
표 8. 지하층에서 온도와 내부압력이 라돈농도에 미치는 영향

변인	계수(B)	SE B	β	p 값
온도	4.59536	.3541	.5841	.000
내부압력	-.64385	.8035	-.1900	.049
상수	551.350			
총 설명력(R^2)	.45234			

표 8의 회귀분석결과로부터 도출된 지하층 실내의 라돈농도 예측방정식은 다음의 식(19)와 같았다.

$$R_i = 551.350 + 4.59536X_{1i} - .64385X_{2i} \quad (19)$$

3) R_i 는 i번째의 RADON 값을 나타낸다. 따라서 X_{1i} 는 i번째의 온도를, X_{2i} 는 i번째의 압력 차를, X_{3i} 는 i번째의 내부 압력 값을 대입한다.



[그림 9] 1층의 RADON 측정값과 예측값 [그림 10] 지하층의 RADON 측정값과 예측값

식 (18)과 식 (19)를 이용하여 1층과 지하층의 라돈농도 예측결과와 실제 측정값과의 비교 결과를 표 9, 그림 9 및 그림 10에 나타내었다. 비교 결과, 1층에서 라돈농도의 예측값(평균)이 1.1575인데 반하여 실제 측정값(평균)은 .9729로 예측값이 더 높게 나타났으나 통계적인 차이는 없었다. 따라서 예측값과 측정값은 차이가 없다고 평가될 수 있다. 지하층에 대한 예측값은 20.471로 20.731을 나타낸 측정값보다 미약하나마 낮은 값을 나타내었다. 표준편차 또한 측정값보다는 안정적인 것으로 분석되었다. 지하층 또한 1층과 마찬가지로 두 값사이에 유의한 통계적 차이를 나타내지 않았기 때문에 라돈농도의 실제 측정값과 예측방정식에 의한 예측값은 잘 맞는 것으로 평가될 수 있다.

표 9. 예측된 라돈농도와 측정된 라돈농도 사이의 비교결과

	1층				지하층				
	평균	표준편차	t통계값	p값	평균	표준편차	t통계값	p값	
예측값	1.1575	.553	1.49	.142	예측값	20.471	1.831	.46	.648
측정값	.9729	.672			측정값	20.731	3.765		

결론

동일 건물의 지하층 및 1층의 실내에서 측정된 라돈농도와 실내온도, 압력 및 압력차 사이의 상관관계를 다중회귀분석법을 이용하여 규명함으로써 기상자료를 입력변수로 사용하는 실내 라돈농도의 이론적 예측방정식을 유도하였다. 본 연구에서 유도된 예측방정식에 의한 실내 라돈농도는 실제로 측정된 라돈농도와 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 따라서 실

내의 기상인자가 정확하게 측정된다면 라돈농도를 직접 측정하지 않고서도 기상인자를 입력하여 실내의 라돈농도를 예측할 수 있음을 보여준다.

다중회귀분석법에 의한 라돈농도를 예측한 결과 실내의 온도가 라돈농도에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 반면에 실내의 압력차가 클수록 라돈농도가 감소하는 것으로 나타나서 기상인자에 대한 적절한 조절만으로도 실내의 라돈농도를 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

향후의 연구로 라돈농도와 기상인자 사이의 다중회귀분석법에 의한 라돈농도 예측 방정식의 정확성과 신뢰성 향상을 위하여 위치별, 건물형태별, 계절별로 장기간 기상인자 및 라돈농도의 측정이 필요할 것으로 보이며, 또한 특정한 온도나 압력의 변화가 없었음에도 불구하고 라돈농도의 최대점과 최소점이 현저하게 바뀌는 현상에 주목하여 이에 대한 원인규명도 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] 통계청, “2000년도 사망원인 통계연보 : 인구동태신고에 의한 집계”, (2001)
- [2] Lao. K. Q., Controlling Indoor Radon : Measurement, Mitigation and Prevention, N. Y.: Van Nostrand Reinhold. (1990)
- [3] United Nations, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 Report to the General Assembly, with annexes, UN Sales Publication No.E.88.IX.9 New York, pp.62~133(1988).
- [4] Faw. R. E. & J. Kenneth Shultis, Radiological Assessment Sources And Doses, Illinois : Prentice-Hall, Inc. (1999)
- [5] International Commission on Radiological Protection, “Lung cancer risk from indoor exposure to radon and radon daughters”, ICRP publication 50, Annals of the ICRP 17(1) (1987).
- [6] National Research Council, “Health risk of radon and other internally deposited alpha emitters”, report of the Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation(BEIR-IV), National Academy Press, Washington, D.C. (1988)
- [7] National Research Council, “Health effects of exposure to radon”, report of the Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation(BEIR-VI), National Academy Press, Washington, D.C. (1999)
- [8] International Commission on Radiological Protection, Protection Against Radon-222 at Home and at Work, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP(1993)
- [9] EPA, Radon:Your Health & Your Home, U.S. Environmental Protection Agency, Region 2, New York. (1988)
- [10] EPA, Consumer’s Guide To Radon Reduction:402-K 92-003, Aug.(1992)
- [11] 성태제, “현대 기초통계학의 이해와 적용”, 서울 : 양서원(1997)
- [12] 이종성, “통계 방법”, 서울 : 박영사(1993)
- [13] 주승환, 제원목, “ 라돈 방사능과 생활환경”, 서울 : 계축문화사(1995)