

라돈 환경계통의 제어 매개변수 모델링

주운표, 김진중**, 장시영***

*원자력안전기술원, **충남대, ***원자력연구소

Modeling a Radon Environment System with Dose Sensitivity to the Controllable Parameters

Oon-Pyo Zoo, Kern-Joong Kim**, Si-Young Chang***

*KINS, **ChungNam National Univ., ***KAERI

This paper aimed to analyse dose sensitivity to the controllable parameters of in-door radon (^{222}Rn) and its decay products (Rn-D) by applying the input-output linear system theory. Physical behaviors of ^{222}Rn & Rn-D were analyzed in terms of ^{222}Rn gas-generation, -migration and -infiltration to indoor environments, and the performance output-function (i.e. mean dose equivalent to Tracheo-Bronchial(TB) lung region was assessed to the following ranges of the controllable parameters ; a) the ventilation rate constant (λ_v) : 0-50 [h $^{-1}$]. b) the attachment rate constant(λ_a) : 0-500 [h $^{-1}$]. c) deposition rate constant (λ_d) : 0-50 [h $^{-1}$]. A linear input-output model was reconstructed from the original models in literatures, as follows, which was modified into the matrices consisting of 111 nodal equations . a) indoor ^{222}Rn & Rn-D Behaviour : Jacobt- Porstendoerfer- Bruno model. b) lung dosimetry : Jacobi-Eisfeld model. Some of the major findings, which identify the effectiveness of this model, were as follows. a) λ_v is most effective, dominant controllable parameters in dose reduction , if mechanical ventilation is applied. b) λ_a , depending on the air particle-concentration , reduces the dose somewhat within $\lambda v < 1 \text{ h}^{-1}$ range . However, the dose increases conversely, $\lambda v > 1 \text{ h}^{-1}$ range range. c) λ_d reduces the dose linearly as λ does. Such dose(z-axis) sensitivities are shown with three-dimensional plots whos x,y-axes are combined 2 out of the 3 parameters ($\lambda_v, \lambda_a, \lambda_d$).

이러한 배경아래 라돈환경계통의모델링을 통해 제어매개변수가 피폭선량에 미치는 효과를 이해함으로써 방사선 방어최적화의 방향을 마련하는 것이 필요하다. 본연구에서는 ^{222}Rn 기체에 대한 물리적인 이해뿐만아니라, Rn-D가 호흡되므로 발생한 상부폐기도관 피폭선량해석을 근거로 생물학적인 이해를 도모하였다. 또한 매개 변수의 효과에 대한 선량제어 가능성을 모색하고, 그 효과를 도식화하여 쉽게 보였다. 연구에서 제시된 제어변수효과를 활용하면 장기간Rn-D피폭으로 인한 폐암발생위험을 관리할 수 있으므로, 국민보건에 이바지할 것으로 기대한다.

2. 기존 연구고찰 및 모델의 가정

2.1 라돈 기체 기공모델[2]

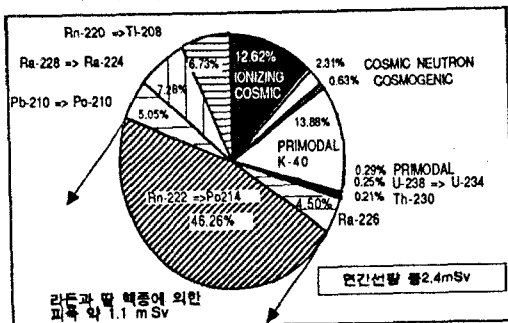
실내 유입 라돈 기체를 예측하기 위해서 라돈기체 확산대류방정식(3)을 식 (1)과 같이 세울 수 있다.

$$(1) \frac{\partial A_m}{\partial t} = \nabla(D \cdot \nabla A_{Rn}) - \nabla A_{Rn} \cdot w + \eta \cdot \rho_s \cdot A_{Rn} \cdot \lambda_{Rn} - (\lambda_{Rn} + \lambda_v) \cdot A_{Rn}$$

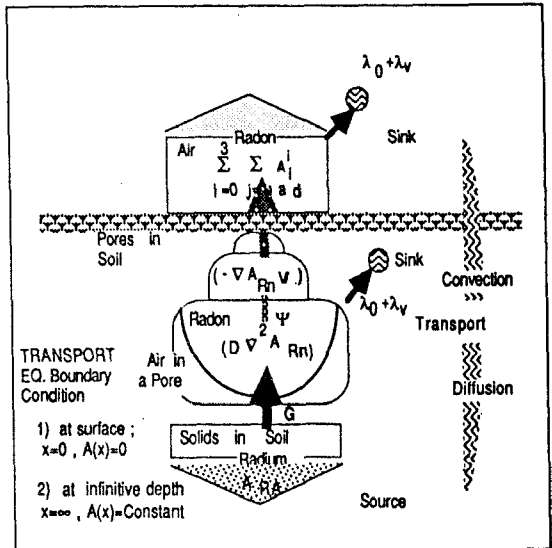
여기서 A_m 는 라돈방사능도[Bq / m 3], A_{Rn} [Bq / m 3]은 라돈방사능 함량, λ_{Rn} [h $^{-1}$]는 라돈붕괴정수, λ_d [h $^{-1}$]는 환기율정수, λ_a [h $^{-1}$]는 라돈붕괴정수, ρ_s [kg / m 3]는 재질밀도, w 는 대류 속도, D (m 2 /s)는 라돈-대기확산계수로 표현되었다.

1. 서론

구미 각국은 지하광부들의 과도한 폐암발생이 자연방사선 원인 라돈 및 라돈붕괴생성물(^{222}Rn & Rn-D)때문이라는 것을 1950 년대에 비로소 인식하였다. 주거 환경에서도 자연 방사선피폭선량이 인공방사선선량 한도를 초과하는 경우가 발생하게 되므로, 국제 방사선 보호위원회는 피폭제한 원칙을 인공방사선원에 국한 하지않고 제어가능범위내에서 ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 원칙을 적용하여 최적화할것을 권고하고 있다[1]



(그림1) 자연 방사선원으로부터 피폭되는 연간 실효선량당량의 추정
edited from , UNSCEAR1988 Report.p.95



(그림2) 기공모델개념도

위방정식의 경계조건을 표면에서 라돈기체의 농도가 0이고, 토양 깊은 곳에서의 라돈기체농도가 일정하다고 설정한다. 아래와 같은 가정으로 해를 구하면, (2)식과 같다.

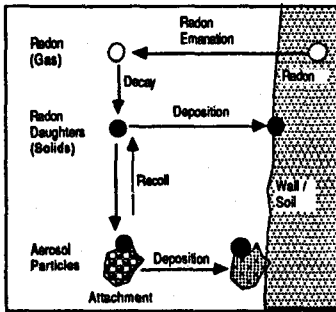
- 가정 I 토양(건축재료포함) 및 라돈확산계수가 등방성이다.
- 가정 II 기공내 유체의 v_n 는 vector가 아닌 scalar로 간주한다.
- 가정 III 3차원 공간을 일차원 수직축(x)만으로 단순화 한다.

$$(2) A_{Rn} = (n \cdot \rho_a \cdot A_{Ra} \cdot \lambda_{Rn}) / (\lambda_{Rn} + \lambda_v) \cdot (1 - \exp(-\frac{v}{2D})) - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v}{D}} \cdot \sqrt{4 \cdot \frac{\lambda}{D}} \cdot x$$

이를 개념화하면 그림2와 같다.

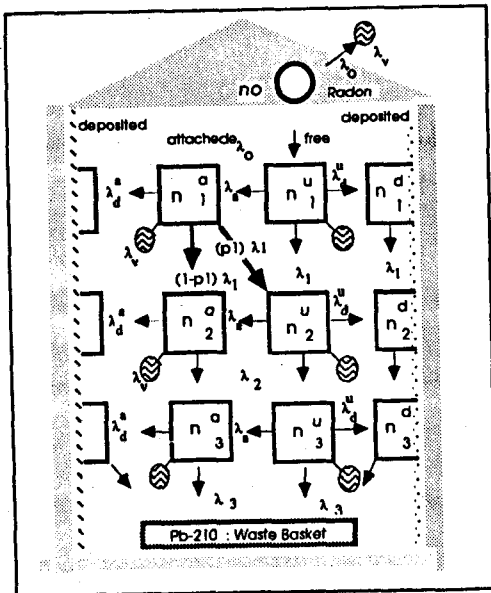
2.2 실내라돈기체 및 붕괴생성물 예측모델

토양 및 건축재료의 기공으로부터 유입된 ^{222}Rn 기체는 아래그림3에서 보는 것같이, 붕괴하여 Rn-D로 되고, 실내표면에 침적하거나 공기 부유물에 부착(일부 다시 pi확률로 반동)하여 실내표면에 침적하게 된다[5].



(그림3) 실내라돈기체 및라돈붕괴생성물거동기본개념도 [Pors1984 p.107]

그림4는 위개념을어려운문[6],[7],[8]에서 확장한 Porstendoefel-Bruno 모델 [5]이다. ^{210}Po 만 부착했다가 다시 붕괴할 때 pi확률로 반동(탈착분리)한다고 가정한다.



(그림4) 실내라돈-222및라돈붕괴생성물거동확장개념도

그림4의 모델개념은 아래식(3)-(11)으로 수식화 된다[5],[6],[7].

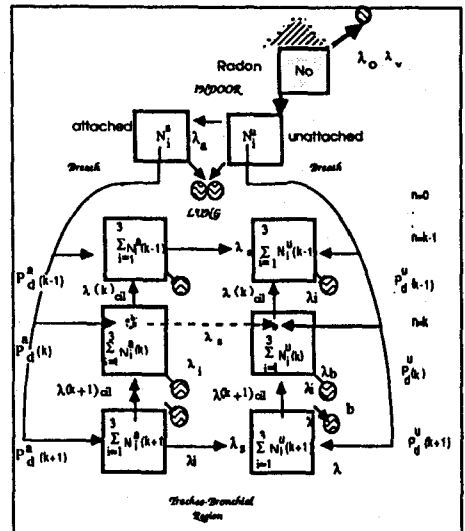
- (3) $(\lambda_0)n_0 = (\lambda_a + \lambda_u + \lambda_1 + \lambda_d) \cdot n^u_1$
- (4) $\lambda_a \cdot n^a_1 = (\lambda_a + \lambda_1 + \lambda_d) \cdot n^u_1$
- (5) $\lambda_d \cdot n^u_1 + \lambda_d \cdot n^a_1 = \lambda_1 \cdot (S/V) \cdot n^d_1$
- (6) $\lambda_1 \cdot n^u_1 + p_1 \cdot \lambda_1 \cdot n^a_1 = (\lambda_a + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_d) \cdot n^u_2$
- (7) $(1-p_1) \cdot \lambda_1 \cdot n^a_1 + \lambda_1 \cdot n^u_2 = (\lambda_a + \lambda_2 + \lambda_d) \cdot n^d_2$
- (8) $\lambda_1 \cdot (S/V) \cdot n^d_2 + \lambda_d \cdot n^u_2 + \lambda_d \cdot n^a_2 = (\lambda_2 \cdot (S/V)) \cdot n^d_2$
- (9) $\lambda_2 \cdot n^u_2 = (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_d + \lambda_a) \cdot n^u_3$
- (10) $\lambda_2 \cdot n^a_2 + \lambda_2 \cdot n^u_3 = (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_d) \cdot n^d_3$
- (11) $\lambda_2 \cdot (S/V) \cdot n^d_3 + \lambda_d \cdot n^u_3 + \lambda_d \cdot n^a_3 = (\lambda_3 \cdot (S/V)) \cdot n^d_3$

여기서 n은 원자수농도, 상첨자u는 미부착상태, a는 부착상태, d는 침적상태, 하첨자 v는 환기를 가르키고, i는 핵종상태로 0는 ^{222}Rn , 1은 ^{218}Po , 2는 ^{214}Pb , 3은 ^{214}Bi 를 각각 표현한다. ^{210}Po 는 반감기가 아주길어(22.3y)무시한다. (^{222}Rn ; ^{218}Po ; ^{214}Pb ; ^{214}Bi 의 반감기는 3.82d; 3.11m; 26.8m; 19.9 m)

위모델은 선원항(^{222}Rn)이 실내표면에 균일분포되고, Rn-D는 완전흡되었다고 전제한다. 여기서 제어가능한 매개변수를 부착율정수(λ_a), 부착침적율정수(λ^d), 부착침적율정수(λ^u)로 잡고, 가정의 환기조건 및 먼지수농도등에 따라 그 변수범위를 정하여 9가지 미지수핵종상태를 구한다. 위 수식에서 S는 실내표면적, V는 실내체적이며, S/V의 대표값인 1.9를 초기값으로 취한다[6]. 위의 모델은 미지수인 Rn-D농도를 예측할 수 있는 유용한 예측모델로 널리 쓰이나 선량을 직접계산할 수 없는 한계가 있다.

2.3 폐선량모델

라돈 딸핵종은 α 방사선 붕괴를 하므로 인체호흡중에 폐상부기관지에 방사선 피폭을 유발하여 피폭선량크기에 따라 폐암의 발생가능성이 비례적으로 커지게 된다. [9],[10],[11]. J-폐선량모델[12]에서는 Weibel-A[12]모델을 사용하여 폐기도(TB)를 대기기하학적으로 가정하고, Rn-D가 폐에 침적, 이동, 흡수, 제거되는 평형방정식을 구성한다. 물리제거율정수(방사능붕괴)에 상응하는 생물학적 제거정수(점액이동율정수 λ_{cl} , 용해흡수율정수 λ_s , 혈액흡수율정수 λ_b)를 가정하여 미지수인 k분화관방사능 농도를 계산한다. 평형상태의 생성, 이동, 소멸을 개념화 하면 아래 그림 5와 같다. 미부착 핵종과 부착핵종은 각각 $P^u_d(k)$ 와 $P^a_d(k)$ 의 확률로 k 분화관에 침적한다. 그림5를 수식화 하면 식(12), 식(13)와 같이 표현된다.



(그림5) 폐기도선량개념도

$$(12) N_1^a(k) = \frac{V_1 \cdot P(k) \cdot n_1^a + \lambda(k+1) \cdot c_{il} \cdot N_1^a(k+1) + \lambda_{1-1} \cdot N_{1-1}^a(k)}{\lambda_1 + \lambda(k) \cdot c_{il} + \lambda_s}$$

$$(13) N_1^u(k) = \frac{V_1 \cdot P(k) \cdot n_1^u + \lambda(k+1) \cdot c_{il} \cdot N_1^u(k+1) + \lambda_{1-1} \cdot N_{1-1}^u(k) + \lambda_s \cdot N_1^u(k)}{\lambda_1 + \lambda(k) \cdot c_{il} + \lambda_s}$$

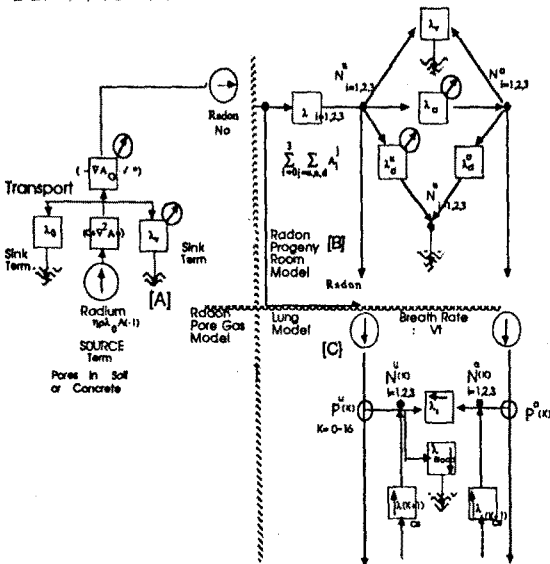
여기서 $N_1(k)$ 는 k 분화관에서 구하고자 하는 i 핵종이 원자수 농도, V_1 는 흐름률[m³/h], n_1 는 실내 i 핵종의 원자수 농도이고, k 는 0-16사이 분화관을 표현한다. $k=2-15$ 분화관에서 선량율은 다음 식으로 쓸수 있다

$$(14) \bar{H} = \frac{1}{14} \sum_{k=2}^{15} \left[\frac{A_1^a(k) + A_1^u(k) \cdot HF^i(k)}{S_k} \right]$$

여기서 A 는 핵종방사능농도[Bq/m³], HF^i 는 단위면적당 선량율 환산계수[Sv/h per Bq/m³], S_k (m²)는 기도면적, \bar{H} 는 평균선량율[Sv/h per Bq/m³]이고, 폐암발생가능성의 지표(1.25*10⁻²/Sv)가 된다. [13] J-E폐선량모델은 폐기도에서의 확산 방정식을 세워 침적 확률을 구하고, 선량을 예측하는 모델이다. 그러나 폐입력되는 Rn-D의 농도비를 지정하고 문제를 풀게되므로 제어매개변수에 대한 정보를 제공하지 않는다.

3. 입출력 선형대수모델의정형화

위에서 살핀 기존모델을 회로개념으로 전환하면 각마디는 상태변수, 각 매개변수는 어드미턴스로 등가화할 수 있다 (표 1). 그림6은 이를 개념화한 것으로 소멸항은 접지, 생성항은 전압원, 제어가능 매개변수는 조절판으로 표현되었다.



(그림6)제어가능한 라던한 경계층의 모델개념

(표1) 물리유추개념

In Electrical Network Eqs.		In Gas Transport/ Decay Eqs.	
Time-Constant	CR [h]	Diffusion Lenth	l [m]
Admittance	Y [A/V]	Rate Constant	λ [h ⁻¹]
Voltage	V [V]	Atoms Concentration	N [#m ³]
Current	I [A]	Activity Concentration	A [Bq/m ³]
Impedance	Z [V/A]	Average Time	$T_{1/2} / \ln 2$ [h]

본 연구에서 제안한 모델목적은 제어 매개변수를 변화시켜 선량율을 최소화하는 변수의 범위를 주거환경의 제약조건에 따라 모색하는데 있다. 선량율 \bar{H} 은 평형상태에서 기도관방사능농도(\bar{Y})의 함수(식15)이고 \bar{Y} 는 (B)행렬을 써서 다음식(16), (17)과 같이 쓸수 있다.

$$(15) H = f(Y_o + Y_u)$$

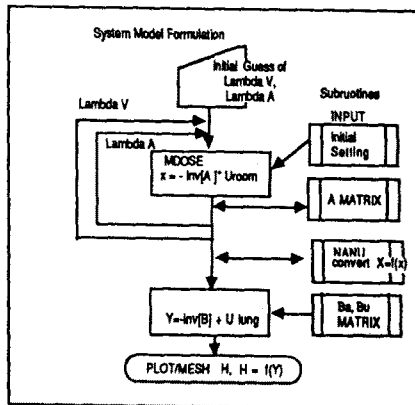
$$(16) Y_o = (B_o)^{-1} X_o$$

$$(17) Y_u = (B_u)^{-1} (X_u + \lambda_2 Y_o + U_u)$$

여기서(B_o),(B_u)는 3가지 핵종이 17개 분화관에서 평형상태를 이룰 때 각각 (12)식, (13)식의 51원 연립방정식의 계수행렬이고 X는 k분화관의 Rn-D입력량이다. U_o은 폐로 유입되는 라던입력량이다. X는 실내에서 상태변수인 x의 변형인데 x는 식(3)-(10)인 9원연립방정식 계수행렬(A)로부터 구해진다

$$(18) x = (A)^{-1} U_p$$

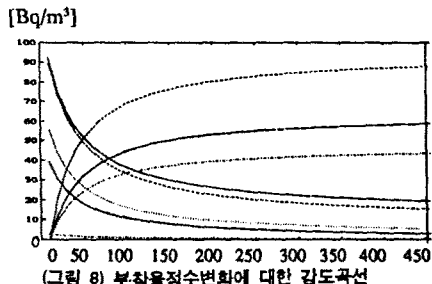
여기서 U_p은 실내에 유입되는 입정율의 라던입력량으로식 (2)로부터 구할 수 있다. 그림 7에서 계산흐름도를 보았다.



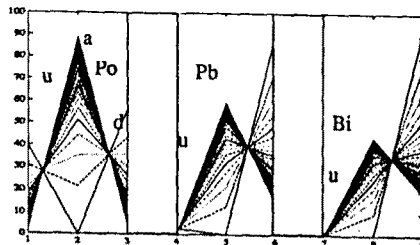
(그림7) 제어매개변수에 따른 선량계산 흐름도

4. 모의계산결과 및 고찰

프로그램으로 매개변수변화에 대한 9가지 상태핵종검토를 계산한 결과는 그림 8-11과 같다. 매개변수의 효과를 알기 위해서 λ_1 는 0-50h⁻¹, λ_2 는 0-500h⁻¹, λ_3 는 0-500h⁻¹으로 그 범위를 큰폭으로 변화시켜 보았다.

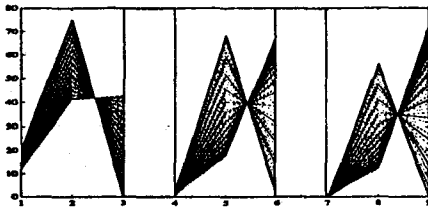


(그림 8) 부착물정수변화에 대한 감도곡선

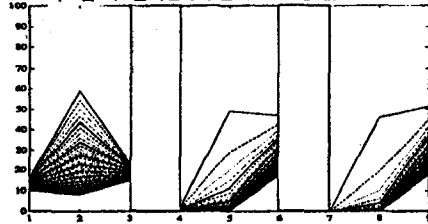


(그림 9) 부착물정수변화에 대한 감도단층도

그림 8-9에서부착물감도 곡선과 부착물 벡터감도 단층도 (sensitivity-strata/-profiles)를 보았다.미부착핵종과 부착핵종은 서로 반대방향으로 소멸,생성되고 있고, 부착물정수의 값이 방사선 붕괴물정수보다 상대적으로 크기 때문에 최대상태값(농도)가 $i > 1$ 이면 그 높이가 적어진다. 단, 침적상태값은 반대이다.



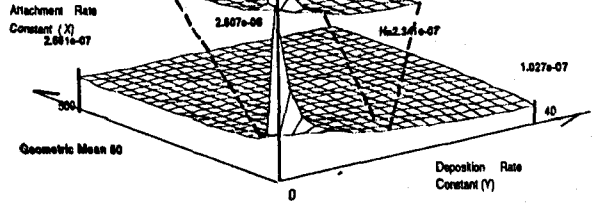
(그림 10) 침적물정수변화에 대한 감도단층도



(그림 11) 침기율정수변화에 대한 감도단층도

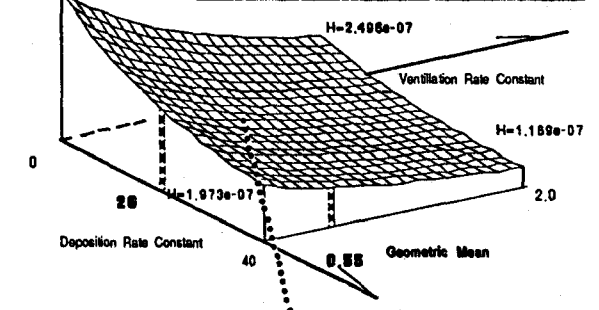
그림 9-11에서 단층의 소밀폭(중간값, 중간값)으로 감도를 판단할 수 있었다. 그러나 이러한 단층도라도 직접선량을 보여주지는 못한다. 선량을 z축으로 도식화하고, x, y축에 3가지 매개변수중 2개 조합으로된 변수값을 넣어, 모든 선량계산값을 3차원 그래프(그림 12-14)로 보였다.

h-X	h-Y	H-Z
500	0	2.861e-07
0	0	2.607e-08
500	40	2.341e-07
0	40	1.027e-07



(그림 13) 제어매개변수(λd-λa)변화에 대한 선량변화 효과

λd=0.0	λd=0.0	λd=0.0	λd=0.0
h=0.00	h=0.00	h=2.00	h=2.00
Ha=3.313e-07	Ha=1.325e-07	Ha=1.307e-07	Ha=5.641e-08
Hu=1.323e-07	Hu=6.474e-08	Hu=1.189e-07	Hu=6.049e-09
H=4.836e-07	H=1.973e-07	H=2.498e-07	H=1.159e-07



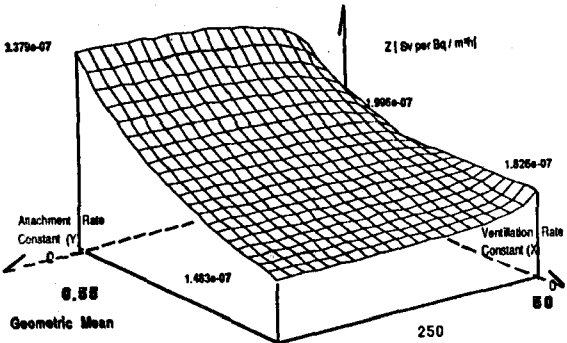
(그림 14) 제어매개변수(λd-λv)변화에 대한 선량변화 효과

5. 결론

라돈 환경계통을 회로개념을 적용하여 선형모델화한 결과, 기존 각 모델의 한계를 극복, 제어관점에서 선량계산을 손쉽게 할 수 있으며 그 효과를 이론적으로 이해 하는 것이 가능해졌다. 벡터단층도로 상태변수의 감도를 도식적으로 이해할 수 있었다. 3차원 그래프로 최적제어의 바탕이 되는 매개변수 물리계산조건에 대한 선량효과를 관찰할 수 있었다. 부수적으로본연구를 통해 회로개념으로 전환한 물리유체계가 유효함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 유옥중, 이호영, 방사선 방호 최적화 과정에서의 비용-편익 분석(ICRP37: Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection (1983)) (번역물, 과학기술처, (1987), 부록 C-6, p.136.
- [2] Nazaroff et al Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Migration and Entry, in NAZA 1988 (eds) p.57-p.112
- [3] Bird, Byron, R., Stewart, W.E., Light foot, E.N., Transport Phenomena Wiley (1960), p.568
- [4] Jassen, A., et al Transient in the exhalation of Radon caused by changes in ventilation and atmospheric pressure, Rad. Prot. Dosi., Vol. 7 (1983), p. 81-p.86
- [5] Knutson, E.O., George, A.C et al., Radon Daughter Plate-out-II: Prediction Model, Health Physics, Vol.45, p.445.
- [6] Porstendoerfer, J., Wicke, A., et al., The influence of exhalation, ventilation and deposition process upon Radon and Thoron and their decay product in room air Health Physics Vol. 34 (1978) p.475
- [7] Bruno, Ronald, C., Verifying a Model of Radon Decay Product Behavior Indoors., U.S.- E.P.A., Health Physics, Vol.45 (1983), p.471-p.480
- [8] United Nations, Sources and Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, with annexes, New York (1988) p.182-p.133
- [9] National Research Council, Health Risks of Radon and other internal deposited alpha-emitters; BEIR IV., National Academy Press, (1988)
- [10] National Council in Radiation Protection and Measurements, Evaluation of Occupational and Environmental Exposures to Radon and Radon Daughters in the United States, NCRP Report No.78, (1983), Bethesda, M.D
- [11] ICRP 50, Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters*, A Report a Task Group of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, (1987)
- [12] Jacobi, W., Eistfeld, K., Dose to tissues and effective dose equivalent by inhalation of RADON-222, RADON-220 and their short-lived daughters., GSF-Report S-626., Germany, February, (1980)
- [13] 유옥중, 이 호영, 자연 방사선으로부터 공중의 피폭을 제한하기 위한 제 원리(ICRP 39: Principles For Limiting Exposure of Public to natural Sources of Radiation), 번역물, 과학기술처, (1986) p.12



(그림 12) 제어매개변수(λa-λv)변화에 대한 선량변화 효과

위 3차원 그래프로 최적제어가가능위에서의 매개변수들의 변화에 대한 선량감도를 이해할 수 있다. 환기효과가 가장큰 이유는 선원인 라돈기체까지 제거하는 효과를 갖고 있기 때문에 생긴 효과라고 판단된다. 부착물정수의 변화는 환기율과 조합될 때 1h⁻¹이하의 환기율에서 특이한 영역을 포함하고 있는 것을 계산결과로 관찰할 수 있었다.