

자외선 (UVB) 노출 증가에 대한 피부암 위해도 예측 모델의 적용*

신동천 · 이종태 · 정 용 · 강나경 · 양지연

연세대학교 환경공해연구소

Application of the Health Risk Models Estimating Skin Cancer Caused by UVB Radiation

Dong-Chun Shin, Jong-Tae Lee, Yong Chug, Na-Kyung Kang and Ji-Yoen Yang

The Institute for Environmental Research, Yonsei University (IERY)

ABSTRACT

A decrease in stratospheric ozone probably caused by chlorofluorocarbons (CFCs) emissions, has been observed large parts of the globe. It is generally accepted that if ozone levels in the stratosphere are depleted, greater amounts of shortwave ultraviolet radiation-B (UVB) will reach the earth's surface, resulting in increased incidence of nonmelanoma skin cancer.

In this study, we evaluated several mathematical models, such as a power and an exponential model, and a geometric model considering the surface area of a human body part and ages for the prediction of skin cancer incidence caused by exposure to the UVB radiation.

These models basically estimated the risk of skin cancer based on those measurements of the local ozone in stratosphere and UVB. Both were measured at a part of Seoul with a Dobson ozone spectrometer and Robertson-Berger UV Biometer for 1995. As a result, we calculated the point estimation applying a biological amplification factor (BAF), UVB radiation and other factors.

We used a Monte-Carlo simulation technique with assumption on the distribution of each considered factor. The sensitivity analysis of model by there components conducted using Gaussian sensitivity method. The annual integral of UVB radiation was 2275 MED (minimal erythema dose)/yr. Also, an estimate of the annual amount of UVB reaching the earth's surface at a Korea's latitude and altitude was 3328 MED/yr. The values of the radiation amplification factor (RAF) were ranged from 0.9 to 1.5 in Seoul. To give the effective factors required to model the prediction of skin cancer incidence caused by exposure to the UVB radiation in Korea, we studied the pros and cons of above mentioned models with the application of those parameters measured in Seoul, Korea.

* 이 연구는 학술진흥재단 선정 '94 중점연구소 지원과제의 연구비로 진행된 내용임.

서 론

현대사회에서의 환경관련 문제는 국지적인 차원에서 벗어나 범지구적 측면에서 온 인류가 대처해 나가야 할 지상과제가 되었다. 다양한 인간활동의 결과 발생되는 부산물 등이 성층권의 오존과 반응하여 오존량을 감소시킴으로써 지표에 도달하는 자외선 복사의 강도 변화는 자연생태계 및 인체에 많은 영향을 미치고 있다. 오존층은 200~400 nm 파장의 자외선을 흡수하여 성층권의 온도를 상승시켜 대류권에서의 적정 온도를 유지시켜 주며, 유해방사선의 대부분을 흡수하여 지구생태계를 보호하며 기후적 요인에도 영향을 미치며, 오존량의 변동은 성층권내의 온도분포에 중요한 역할을 하고 성층권의 대기순환과 밀접한 관계를 이루고 있다¹⁾.

인체에 영향을 미치는 자외선은 보통 UV-A (320 nm ~ 400 nm), UV-B (280 ~ 320 nm), UV-C (280 nm 이하)의 세파장으로 나뉘어진다. 이중 UVB는 오존층에 의해 흡수가 되기 때문에 자연적, 인위적 원인으로 성층권 오존량의 변화에 따라 지상에 달하는 그 강도가 크게 달라지므로 UVB는 우리가 관심을 갖는 주요한 영역의 자외선이다.

90년대에 들어서면서 남반구에서 오존이 감소함에 따라 UVB조사량이 증가하는 것이 관측되었고²⁾, 캐나다에서는 최근 수년 동안의 오존 감소가 UV조사량 증가의 원인이라는 것이 보고된 바 있다³⁾. 독일에서도 1992년과 1993년의 UVB조사량의 측정을 비교해 볼 때 1993년의 늦봄과 초여름에 증가된 UVB조사량은 오존 전량의 감소에 의해 발생된 것이라고 발표하였다⁴⁾. 한반도 상공의 오존 감소 추세는 지난 10년동안 오존 전량이 4%가량 감소된 것으로 나타났으며, 지표면에 도달하는 UVB복사량이 증가되는 것으로 보고된 바 있다⁵⁾. 지표면에 도달하는 UVB복사의 증가는 인체에 홍반 (erythema)을 발생시키고 DNA (deoxyribonucleic acid)를 파괴하며 피부암 및 백내장을 일으킨다고 알려져 왔다. 한편 식물의 엽록소를 파괴하여 광합성 작용을 감소시킴으로써 성장장애를 일으키며 식물성 플랑크톤의 생존에도 영향을 주어 수중 식물의 먹이사슬을 변화시킨다⁶⁾.

그러나, 이렇게 인식된 위해도에도 불구하고 오존층 파괴에 따른 유해조사량의 위험성을 정량적으로 예측할 수 있는 방법론조차 없는 실정이다. 따라서 오존층 파괴로 인한 유해방사선에 대한 위험성을 확인하며,

또한 유해영향의 예측을 위한 위해도 예측모델의 정립이 시급하다. 그러나, 아직까지는 실험동물을 이용한 UVB조사량과 그 위해영향에 대한 용량-반응 평가 자료가 없기 때문에 오존층 파괴로 인한 정량적인 건강위해성 평가를 위해서는 건강영향에 미치는 유효 UVB조사량의 증가에 따른 피부암 발병율의 증가 등을 바탕으로 한 역학적인 연구결과만이 이용 가능한 실정이다. 역학연구결과를 바탕으로 한 인체 위해도 예측하는 수학적 모델들은 연구내용에 따른 여러 가지의 불확실성을 가지는데 이러한 불확실성을 최소화하기 위해 용량-반응 모델들에 대한 비교가 요구된다.

이 연구에서는 UVB조사량의 증가에 따른 피부암 발생의 역학자료를 이용한 인체 위해도 예측모델들의 특성에 대한 비교연구를 통하여, 서울에서 측정된 UVB조사량을 근거로 UVB조사량의 증가에 따른 피부암 발생의 증가를 예측하고, 향후 위해성 연구의 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

UVB조사량의 증가에 따른 인체 위해도 예측하는 수학적 모델들은 역학적인 연구에서 흔히 사용되고 있는 Power model과 Exponential model, 연령층화를 고려한 Age-specific model이 있다. 이 연구에서는 이들 모델들의 특성을 비교하고, 평면형(plane)만을 고려한 기존 모델에 구형(sphere)과 수직원통형(cylinder)의 인체모형을 고려하여 UVB조사량의 증가율(%)에 따른 피부암 발생율의 증가율(%)을 예측하였다.

또한, 불확실성을 최소화하기 위해 각 모델 구성인자의 분포를 가정 한 Monte-Carlo simulation을 이용하여 피부암 발생율의 분포를 예측하고, 민감도 분석(sensitivity analysis)을 이용하여 각 구성인자(parameter)의 영향력을 분석하였다(그림 1).

1. UVB조사량 증가에 따른 인체 위해도 예측 모델

UVB와 피부암과의 관계를 나타내는 용량-반응관계에는 다양한 접근방법들이 연구되어 왔다. 이러한 다양한 모델들은 피부암발생의 역학자료와 UVB의 측정자료를 이용하여 UVB조사량의 증가에 따른 피부암 발생의 증가를 예측할 수 있다. 특히 UVB조사량으로 인한 피부암 발생율은 인종과 지역특성 및 노출형태에

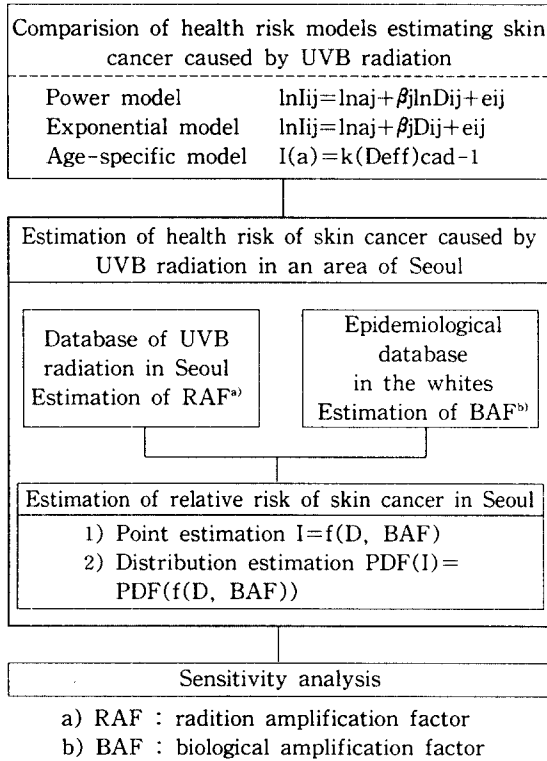


Fig. 1. Frame of study.

따라 차이를 나타내기 때문에 동물실험자료를 이용할 수 없는 특성을 가진다. 최근까지도 UVB조사량으로 인한 피부암 발생율과의 관계는 역학자료를 이용한 용량-반응 모델이 연구되어지고 있다. 이 연구에서는 역학 연구에서 사용되고 있는 Power model⁵⁾과 Exponential model⁶⁾, 그리고 연령별 피부암의 발생율을 예측할 수 있는 Age-specific model⁶⁾에 관하여 그 특성을 비교하고자 한다.

2. 서울에서 UVB조사량 증가로 인한 인체 위해도 예측 모델의 적용

가. 각 모델에서 UVB조사량의 증가율에 따른 피부암 발생의 증가율 비교

이 연구에서는 연세대학교에서 서울시내 일부 지역 상공에 대해 1995년 1월부터 12월까지 Robertson-Berger형 UV-Biometer (Mo. 501)로 관측된 UVB 조사량⁷⁾을 이용하여 연적산값을 산출하였다. 각 모델에서는 관측된 UVB조사량의 연적산값을 기준으로

UVB조사량의 증가율(%) 1%, 5%, 10%, 20%, 30%에 따른 피부암 발생의 증가율을 예측하였다.

서울에서 측정된 연적산 UVB조사량을 2275 MED (minimal erythema dose)/yr이며, 계절적 변동을 보면 전체적으로 봄과 여름의 월적산 UVB조사량이 높게 나타났다(그림 2).

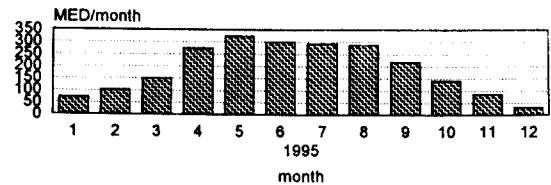


Fig. 2. Distribution of monthly cumulative UVB in an area of Seoul (source : Kwon⁷⁾, 1995).

또한, 위도 (latitude)와 고도 (altitude)를 이용하여 지표면에 도달하는 연간 UVB조사량을 추정하는 Scotto 등⁸⁾에 의한 수식을 적용하여 우리나라에서의 이론적인 UVB조사량의 추정치를 산출하였다.

$$UV \text{ count} = 1,500,000 - 50,000 \times (L - 37.9) + 105 \times (A - 1,500)$$

L = 측정지점의 북위도 (latitude, degrees north)
A = 측정지점의 고도 (altitude, ft)

여기에서 L은 서울에서의 북위도로 37.5도를 사용하였고, A는 측정지점의 고도로 58(ft)를 사용하여 이론적인 추정치를 산출하였다. 1 MED는 400counts의 sunburn-unit으로 나타낼 수 있다⁹⁾.

위의 UVB의 측정농도 (2275 MED=91 counts)와 이론적 추정농도 (3328 MED=133 counts)를 Power model과 Exponential model, Age-specific model에 대해서 UVB조사량이 1%, 5%, 10%, 20%, 30%로 증가할 때 이에 따른 피부암 발생율의 증가율을 예측하였다.

각 모델 구성인자의 확률분포를 가정한 Monte-Carlo simulation을 이용하여 각 모델에 따른 피부암 발생 증가율의 분포를 예측하였다.

나. 각 모델에 있어서의 인체모형에 따른 BAF (biological amplification factor)와 TAF(total amplification factor)값의 비교

이 연구에서 비교하고자 하는 Power model과 Exponential model, Age-specific model은 기본적으로 UVB조사량에 직접 노출되는 인체의 모형을 평면형 (plane)으로만 가정하였다. 따라서 유효 발암 방사선량과 유효 발암 파장으로 각 모형에서 받는 입사각과 출사각을 고려할 때 인체를 평면으로만 가정하는 모델의 과소평가(under-estimate)되는 제한점을 보정하기 위하여 구형 (sphere)과 수직원통형 (cylinder)의 인체모형을 고려하여 각각의 모델에 적용하여 BAF 및 TAF 값을 예측하였다.

다. 모델의 각 인자 (parameter)에 대한 민감도 분석 (sensitivity analysis)

위에서 제시된 각 모델을 통한 피부암의 발생을 예측하는데 있어 불확실성을 최소화하기 위해 Monte-Carlo Simulation으로 각 인자의 분포를 가정하였다. 이 simulation의 결과에서 평균 (mean) 또는 중위값 (median)과 표준 편차 (standard deviation)를 이용하여 각 인자 (parameter)에 대한 상대적 변화량으로 인한 결과에 있어서의 상대적 변화의 비로써 Gaussian 민감도 (sensitivity)를 산출하였다¹⁰⁾.

$$\text{Gaussian Sensitivity} = \frac{|\text{Risk}_{\text{baseline}} - \text{Risk}_{10\%}|}{|X_{\text{baseline}} - X_{10\%}|} \times \sigma$$

$\text{Risk}_{\text{baseline}} - \text{Risk}_{10\%}$ = 전체의 초과발암위해도 (total excess cancer risk)에 대한 baseline과 differential value
 $X_{\text{baseline}} - X_{10\%}$ = X에 대한 baseline과 differential value

위에서 산출된 각각의 인자에 대한 Gaussian 민감도를 총 Gaussian 민감도 (total Gaussian sensitivity)로 나누어 주어 상대적 민감도 (relative sensitivity)로 비교하였다.

$$\text{Relative Sensitivity} = \frac{X \text{의 Gaussian Sensitivity}}{X \text{값들에 대한 Total Gaussian Sensitivity}} \times 100(\%)$$

결과 및 고찰

1. 오존층의 파괴로 인한 UVB조사량 증가의 인체 위해도 예측 모델

가. UVB조사량의 증가로 인한 인체 위해도 예측 모델의 수학적 분류

UVB조사량과 피부암과의 관계는 통계적 방법이나 역학적 접근방법을 통해 설명되며, linear, log-linear, log-log regression을 통한 발생 (R)과 연간용량 (D)간의 단순한 관계를 보거나, 연간용량 (D)에 따른 통계적 오차 (statistical error)를 최소화 할 수 있는 방법을 통해 설명된다. 최근의 거의 모든 연구에서는 선형 (linear)관계는 제외되며, 로그-선형 (log-linear)이나 로그-로그 (log-log)관계를 통해 주로 설명된다.

로그-로그 (log-log)관계를 나타내는 Power model은 위도에 상관없이 BAF값이 상수로 존재하며 non-melanoma 피부암에 대해서는 연령에 독립적인 값을 나타낸다. 이에 비해 Exponential model은 로그-선형 (log-linear)관계를 나타내며 위도에 따라 BAF 값이 달라지며, 적도로부터 멀어질수록 작은 값을 나타낸다. Age-specific model은 연간평균 유효 UV용량 즉, OAF (optical amplification factor)에 따른 연령별 발생율을 구하는 모델로서, BAF의 용량-반응 관계는 비선형 (nonlinear)의 관계를 나타내므로 UVB조사량의 증가에 따른 피부암의 위해도는 노출과 위도에 따라 달라진다. 각 모델들의 수학적 특성을 표 1에 나타내었다.

UVB 조사량과 피부암의 발생과는 밀접한 관련성을 가지는데, melanoma의 연령별 피부암의 발생은 평생동안의 누적된 UVB조사량에 노출되기보다는 연간 용량과의 관련성이 더 크며, 높은 강도의 UVB조사량에 일시적 노출로 인해 발생되며, non-melanoma 피부암의 발생은 UVB조사량의 높은 누적노출로 인해 발생된다. 이는 UVB조사량의 개인적인 노출형태에 따라 미치는 인체영향이 달라지는 것을 설명하며, 계절적인 요인과 실외작업자들 즉, 노출형태와 시간에 대한 고려가 요구됨을 나타낸다. 역학적인 연구에서도 많은 연구의 제한점이 수반되는데, 병인적요인 때문에 UVB조사량외의 다른 요인들에 대한 이용할만한 적합한 다른 자료가 부족하며 혼란변수들의 조합된 영향들이 UVB조사량과 관련된다면 편의 (bias)가 존재 가능하다. 또한 위도에 따른 차이와 RAF값에서 기상상태 특히 구름의 피침정도를 고려하지 못하였으며 발생율에 있어서 지역적 차이와 환경적 변수가 UVB조사량보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 1. Comparisons of characteristics of mathematical models.

Model	Equation	Characteristics	Exposure assessment	Limit
Power model (Fears & Scotto, 1983)	$\ln R_{ij} = \ln \alpha_i + \beta_j \ln U_i + e_{ij}$ R_{ij} ; skin cancer incidence for the i th age group at location j U_i ; annual UVB count at the i th location α_i, β_j ; constants for the i th age group e_{ij} ; error	-log-log relation -BAF constant -independ on age -depend on gender	-retrospective follow-up study -nonmelanoma skin cancer of the whites -Poisson distribution -fitting by least square method on age -erythema dose -RB-counts/yr ^{a)}	-not regard for location specification -not regard for human race
Exponential model (Fears & Scotto, 1983)	$\ln R_{ij} = \ln \alpha_i + \beta_j U_i + e_{ij}$ R_{ij} ; skin cancer incidence for the i th age group at location j U_i ; annual UVB count at the i th location α_i, β_j ; constants for the i th age group e_{ij} ; error	-log-log relation -BAF depend on latitude -independ on age -depend on gender	-retrospective follow-up study -nonmelanoma skin cancer of the whites -Poisson distribution -fitting by least square method on age -erythema dose -RB-counts/yr ^{a)}	-largely effected by latitude -not regard for human race
Age-specific model (Slaper, 1993)	$I(a) = K(D_{eff})^c \cdot a^{-d}$ $I(a)$: the cumulative incidence D_{eff} : the effective annual dose c : the dose-dependence parameter d : the age-dependence parameter k : the genetic susceptibility of the population parameter, a : age	-log-log relation -non-linear relation : exposure/latitude -depend on age -estimation of skin cancer incidence on age	-retrospective follow-up study -nonmelanoma skin cancer of the whites(BCC, SCC) -Poisson distribution -erythema dose -RB-MED/yr ^{b)}	-not regard for location specification -not regard on cumulative UVB dose for chronic effects

a) annual integral of UVB counts at seoul as measured by a R-B meter $\times 10^4$

b) annual integral of UVB MED by a R-B meter

2. UVB조사량의 증가로 인한 인체 위해도 예측 모델의 적용

가. UVB조사량의 증가율에 따른 각 모델의 결과 비교

1) UVB조사량의 증가율에 따른 각 모델 결과의 점추정 (Point Estimation)

Power model과 Age-specific model에서의 피부암 발생의 예측결과는 UVB조사량과는 관계없이 증가율 (%)에 따라 달라지는 결과를 보였다. 그러나, Exponential model에서는 UVB조사량에 따라 즉, 위도에 따라 의존적인 결과를 보였다. 1%의 UVB조사량의 증가율에 따라 Power model과 Age-specific model에서는 기준이 되는 UVB조사량 (reference dose)과는 관계없이 1.56%과 2.71%의 피부암 발생의 증가를 나타내며, Exponential model에서는 측정농도 2275 MED에서는 1.05%, 이론적 추정농도 3328 MED에서는 1.54%의 피부암 발생의 증가를 예

측하였다(표 2).

Exponential model은 위도 즉, 기준이 되는 UVB농도의 증가율 (%)에 따라 다른 피부암 발생율의 증가를 보이는데 3328 MED/yr에서 Power model

Table 2. Relative risks of skin cancer by various levels of UVB increasement.

UVB conc.	UVB conc. increasement (%)	Relative risks of skin cancer(%)		
		Power	Exponential	Age-specific
measured conc. 2275 MED (91 counts)	1	1.56	1.05	2.71
	5	7.90	5.38	14.01
	10	16.01	11.05	29.26
	20	32.85	23.33	63.64
estimated conc. 3328 MED (133 counts)	30	50.50	36.96	103.54
	1	1.56	1.54	2.71
	5	7.90	7.96	14.01
	10	16.01	16.56	29.26
	20	32.85	35.86	63.64
	30	50.50	58.35	103.54

과 유사한 결과를 예측할 수 있었으며, Age-specific model은 다른 두 모델에 비해 비교적 높은 피부암 발생율의 증가를 보였다(그림 3).

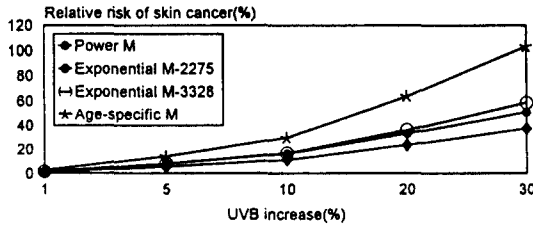


Fig. 3. Relative risks of skin cancer by various levels of UVB increase.

우리나라에서의 최근 보고¹⁾에 의하면, 한반도 상공에서는 지난 10년동안 약 4%가량의 오존전량 감소를 나타내었으며 이러한 오존 감소는 지표면에 도달되는 UVB조사량을 증가시키는 것으로 알려져 왔다. 또한 오존전량의 감소에 대한 UVB조사량의 증가를 나타내는 RAF는 태양천정각에 따라 0.9~1.5% 증가하는 것으로 보고²⁾되었다.

서울 일부지역에서 측정된 UVB의 연적산 값은 2275 MED/yr인데, 이는 기상상의 오차 (error)와 전압차에 의한 기기의 작동중지를 제외한 측정치로써 이러한 비측정일은 전체의 약 7.4%이다. 그러나, 지리학상의 북위도와 측정지점의 고도를 이용한 이론적인 추정치³⁾를 적용한 우리나라의 위도와 고도를 이용한 이론적인 UVB의 연적산값은 3328 MED/yr로써 실제 측정값보다 크게 산출되었다. 이러한 차이는 구

름의 퍼짐정도와 두께 등의 기상상태와 대기오염물질의 확산으로 인한 지표도달 UVB조사량의 양이 적는데 기인한 것으로 사료된다.

2) Monte-Carlo Simulation을 이용한 UVB방사량의 증가에 따른 모델비교

Monte-Carlo Simulation을 위한 모델들의 구성인자 (Parameter)들의 분포를 표 3과 같이 가정하였다.

우리나라에서의 지난 십년동안의 오존량의 감소가 4%라는 보고 (조희구 등, 1994)를 토대로 RAF값이 평균 1.2일 경우의 UVB방사량의 증가율 (%)을 가정하면 약 5% 정도이다. 5%의 UVB방사량의 증가로 인한 Simulation 결과를 보면, 각 모델에서의 50과 95 percentile값은 Power model에서 7.86%와 8.84%, Exponential model에서 5.60%와 7.33%, Age-specific model에서 10.52%와 16.35%를 나타낸다(표 4).

UVB조사량에 독립적인 Power model은 결과 분포가 uniform 형태와 유사하였으며, 이와 반대로 UVB조사량에 의존적인 Exponential model은 결과 분포가 UVB조사량의 분포와 유사한 경향을 나타내었다. Age-specific model은 UVB조사량과 연령변수에 비선형 관계를 보임으로 인해 결과 분포가 이형분포를 보였다(그림 4).

나. 각 모델에 있어서 인체모형에 따른 BAF와 TAF의 비교

1) 인체모형에 따른 각 모델에서의 비교

Table 3. Distribution types of parameter for Monte-Carlo simulation.

Model	Parameter	Distribution Type	Mean	Std	Min	Max
Power	UVB ^a β	Empirical	95.8	12.1	-	-
		Uniform	-	-	1.35	1.80
Exponential	UVB ^a β	Empirical	95.8	12.1	-	-
		Uniform	-	-	0.001	0.013
Age-specific	UVB ^b a	Empirical	2396.7	301.8	-	-
		Uniform	-	-	20	70
	k-bcc ^c	Uniform	-	-	1.51E-13	4.5E-13
	k-scc ^d	Uniform	-	-	5.40E-18	8.08E-17
	c-bcc	Uniform	-	-	1.0	2.0
	c-scc	Uniform	-	-	1.8	3.2

a : annual integral of UVB counts at seoul as measured by a R-B meter $\times 10^{-4}$

b : annual integral of UVB MED

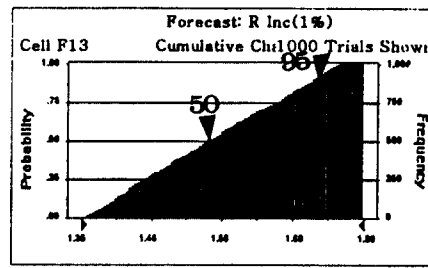
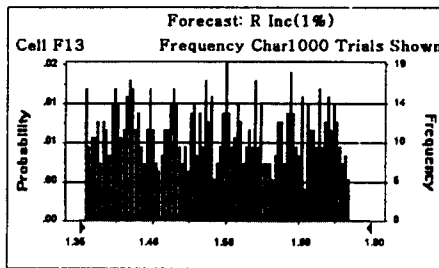
c : bcc-basal cell carcinoma d : scc-squamous cell carcinoma

Table 4. Relative risks of skin cancer by various level of UVB increasement using Monte-Carlo simulation technique.

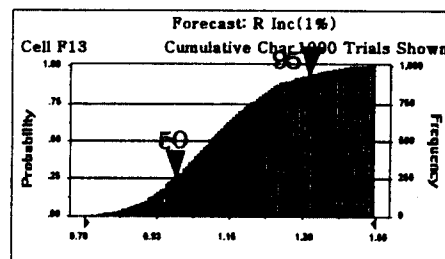
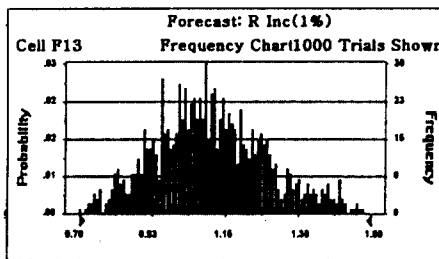
UVB conc. increasement(%)	Relative risks of skin cancer (%)					
	Power M		Exponential M		Age-specific M	
	50th	95th	50th	95th	50th	95th
1	1.56	1.74	1.10	1.42	2.05	3.14
5	7.86	8.84	5.60	7.33	10.52	16.35
10	15.93	18.00	11.51	15.19	21.62	34.45
20	32.69	37.26	24.35	32.68	45.56	76.22
30	50.24	57.74	38.67	52.83	71.94	125.89

< Frequency chart >

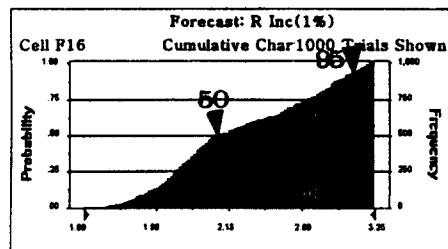
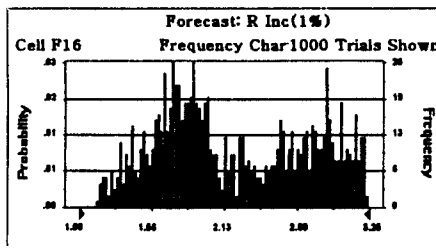
< Cumulative chart >



-Power model-



-Exponential model-



-Age-specific model-

Fig. 4. Result of BAF estimated from Monte-Carlo simulation technique.

인체모형에 따른 BAF 값은 Power model과 Age-specific model에서 UVB농도 즉, 위도에 독립적인 결과로 나타났으며, Exponential model에서는 위도에 따라 의존적인 피부암 발생율의 증가를 보였다. Exponential model은 2275 MED/yr의 측정치에서는 UVB조사량의 1% 증가로 인해 평면형에서는 1.05%, 구형에서 1.19%, 수직원통형에서는 1.25%의 피부암 발생율의 증가를 보이며, 이론치인 3328 MED/yr에서 평면형에서는 1.54%, 구형에서 1.74%, 수직원통형에서는 1.84%의 피부암 발생율의 증가를 보여 Power model에서의 BAF 값과 유사한 값을 나타내었다.

Age-specific model은 다른 두 모델에 비해 비교적 높은 BAF 값을 보였다(표 5).

Table 5. Estimate of BAF considering the surface shapes.

UVB conc.	BAF	Relative risks of skin cancer (%)		
		Power M	Exponential M	Age-specific M
measured conc. 2275 MED (91 counts)	plane	1.56	1.05	2.71
	sphere	1.77	1.19	3.06
	cylinder	1.86	1.25	3.22
estimated conc. 3328 MED (133 counts)	plane	1.56	1.54	2.71
	sphere	1.77	1.74	3.06
	cylinder	1.86	1.84	3.22

Table 6. Estimates of TAF considering the surface shape.

UVB conc.	TAF	Relative risks of skin cancer (%)		
		Power M	Exponential M	Age-specific M
measured conc. 2275 MED (91 counts)	plane	1.87	1.26	2.05
	sphere	2.12	1.43	2.31
	cylinder	2.23	1.50	2.44
estimated conc. 3328 MED (133 counts)	plane	1.87	1.85	2.05
	sphere	2.12	2.09	2.31
	cylinder	2.23	2.20	2.44

2) 인체모형에 따른 각 모델에서의 TAF의 비교
오존층의 1% 감소에 따른 피부암 발생율의 증가

(%)를 나타내는 TAF는 RAF (radiation amplification factor)와 BAF의 곱으로 산출될 수 있다. 서울에서의 RAF는 구름의 퍼짐정도와 태양천정각에 따라 0.9에서 1.5의 범위를 나타내며, 태양천정각과는 관계없이 평균 1.2의 값을 나타낸다. 표 6에서는 인체모형을 고려하여 각 모델에서의 TAF값을 산출하였다.

Exponential model은 2275 MED/yr의 측정치에서는 1% 오존층 감소로 인해 평면형, 구형 및 수직원통형에서 각각 1.26%, 1.43%, 및 1.50%의 피부암 발생율의 증가를 보이며, 이론치인 3328 MED/yr에서 각각 1.85%, 2.09%, 및 2.20%의 피부암 발생율의 증가를 나타내었다. Power model에서는 1%의 오존층의 감소로 인해 각각의 인체모형에서 1.87%, 2.12%, 및 2.23%의 피부암 발생율의 증가를 보이며, Age-specific model에서는 2.05%, 2.31%, 및 2.44%의 피부암 발생이 증가되는 결과를 보였다.

다. 각 모델의 인자(parameter)에 대한 민감도 분석 (Sensitivity Analysis)

Power model, Exponential model 및 Age-specific model에서 모두 UVB조사량이 각각 46.3%, 48.5%, 및 23.37%로 가장 영향력 있는 주요한 구성인자로 분석되었으며, Exponential model이 Power model에 비해 UVB조사량에 더 민감한 영향을 받는 것으로 예측된다. Power model과 Exponential model은 β 와 RAF가 서로 비슷한 민감도를 보이는 것으로 분석되었다. Age-specific model에서는 UVB조사량이 가장 큰 영향력을 미치며, RAF, k, c (BAF)와 a (연령)의 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 5).

이 연구에서 제시된 결과들은 몇가지 제한점을 가지는데, 첫째로 UVB조사량의 증가에 따른 인체 위해도를 예측하는 여러 모델들은 모두 백인종을 근거로 한

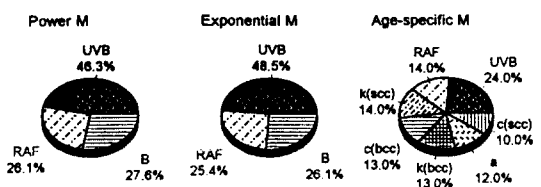


Fig. 5. Sensitive analysis of models by their components.

서양사람들에 적합한 예측모델이므로 우리나라에서 직접적으로 적용하는데에는 불확실성이 수반된다. 둘째로, 각 모델에서 제시된 UVB조사량의 증가에 따른 피부암 발생율의 증가(%)는 단순히 기준(baseline)이 되는 피부암 발생율에 대한 증가분을 나타낸 것이다.

이에 따른 결과로써 제안할 수 있는 사항으로는 우리나라에서의 UVB조사량의 증가로 인한 피부암의 발생을 예측할 수 있는 신뢰성과 타당성이 높은 역학자료 즉, 기준(baseline)이 되는 피부암 발생율에 대한 역학적 연구와 이의 의미있는 해석이 요구된다. 또한 지속적인 UVB와 오존량의 측정이 계속되어야 하며, 우리나라에 적합한 모델을 구성하는 것이 가장 불확실성을 적게 하는 것이라고 사료된다.

UVB는 일상 생활 패턴, 노출형태와 시간이 중요 영향인자이며, 이러한 영향인자를 고려한 노출 시나리오를 설정하여 실제적인 인체노출량을 측정해야 할 필요가 있다. 인체 노출 시나리오를 가정하지 않고 일반적으로 발생하는 피부암의 역학자료를 이용한 회귀분석을 전제로 한 기존의 수학적 모델들은 많은 불확실성이 수반된다. 따라서 향후 연구방향으로는 노출 시나리오를 전제로 실제적인 인체 노출량과 피부암 역학자료와의 상관관계를 이용하여 모델을 구하는 것이 훨씬 타당성 있는 UVB로 인한 인체 피부암의 발생율과 사망율을 예측할 수 있으리라 사료된다.

결 론

이 연구에서는 서울에서의 UVB조사량의 증가로 인한 피부암 발생을 예측하기 위해 지표에 도달되는 UVB조사량의 증가로 인한 인체영향의 정성적 조사 및 피부암 발생의 예측모델에 관한 특성을 비교하고 그 모델을 적용 평가하였다. 모델을 적용 평가하는 과정에서 UVB조사량의 증가(%)에 대한 피부암 발생의 증가(%)를 추정하였고, 각 모델의 인자들에 대한 민감도를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Power-model은 위도에 상관없이 BAF가 상수로 존재하며, 연령에 독립적인 값을 나타낸다. Exponential model은 위도에 따라 BAF가 변하며, 적도로부터 멀어질수록 작은값을 나타낸다. Age-specific model도 연령별 피부암 발생율을 산출할 수 있으며 BAF의 용량-반응 관

계는 비선형이다.

2. UVB조사량의 증가율(%)에 따른 각 모델의 산출결과를 비교해 보면 Power model과 Age-specific model에서는 기준(baseline)이 되는 UVB조사량과는 관계없이 UVB의 증가율(%)에 따라 증가하는 경향을 보였고, Exponential model에서는 위도에 따라 의존적인 결과를 보이며, 서울에서 측정된 UVB의 연적산값은 2275 MED/yr로 Exponential model에 의한 추정은 Power model에 비해 낮은 결과를 보였다.
3. Power model과 Exponential model에 의한 예측결과를 보면, 3328 MED/yr에서 유사한 예측결과를 보이는 것으로 나타났으며, 3328 MED/yr 이하에서는 Power model에 의해 추정하고, 3328 MED/yr 이상에서는 Exponential model에 의해 추정하는 것이 좀 더 보수적인(conservative) 결과를 얻을 수 있다.
4. 서울에서의 UVB조사량 1% 증가로 인한 피부암 발생의 증가는 평면형의 인체모형을 가정하면, Power model에서 1.56%, Exponential model에서 1.05%, Age-specific model에서 2.71%증가되며, 가장 높은 값을 보이는 수직원통형(cylinder)의 인체모형일 경우, Power model에서 1.86%, Exponential model에서 1.25%, Age-specific model에서 3.22%가 증가됨을 예측할 수 있다.
5. 각 모델의 구성 인자(parameter)에 대한 민감도 분석(sensitivity analysis)결과에서 UVB 조사량과 BAF, RAF가 중요 영향인자임을 예측하였다.

이 논문에서 사용한 서울시 UVB 조사량 자료를 제공해주신 연세대학교 조희구 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 조희구, 김해경, 이규태, 서울의 오존전량 변화 경향, 한국기상학회지 30(2), 219(1994).
2. Seckmeyer GB, Mayer RE, Bernhard G, UV-B in Germany Higher in 1993 : UV-B in Germany Higher in 1993 than in 1992. Geophys. Res. Lett., 21, 577(1994).
3. Kerr JB, Wardle DI, Ozone and UV-B Moni-

- toring Program in Canada in Private Communication 1994.
4. Tevini M, UV-B Radiation and Ozone Depletion, *Lewis Pub.* 1(1993).
 5. Fears TR, Scotto J, Estimating Increase in Skin Cancer Morbidity due to Increase in Ultraviolet Radiation Exposure, *Cancer Investigation* 1(2), 119(1983).
 6. Slaper H, Ozone Depletion and Skin Cancer Incidence : Integrated Risk Assessment Modeling, The 13th UOEH international symposium and the 2nd pan pacific cooperative symposium on impact of increased uv-b exposure on human health and ecosystem 1993.
 8. Scotto J, Fears TR, Fraumeni Jr JF, *Cancer Epidemiology and Prevention, Epidemiology and Preventive Medicine Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, New York, New York* 245(1983).
 7. 권효정, 오존층 변동에 따른 지표 자외선의 변동, 연세대학교 대학원 (1995).
 9. Mo T, Chai AT, Green AES, In Impact of Climatic Change on the Biosphere, CIAP Monograph 5, Part 1, Chapt. 2, Appendix L, pp.2-457 to 2-466, Department of transportation, DOT-TST-75-55(1975).
 10. Morgan MG, Henrion M, *Uncertainty : A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*, Cambridge Univ. New York(1990).