

A Study on the Diffusion of Gaseous Radioactive Effluents Based on the Statistical Method

Man-Gyun Na and Goung-Jin Lee

Department of Nuclear Engineering, Chosun University
375 Seosuk-dong Dong-gu Kwangju 501-759

통계적 방법을 이용한 방사성 물질의 대기 확산 평가

나만균 · 이경진

조선대학교

(1998년 11월 19일 접수, 1999년 1월 20일 채택)

Abstract - A diffusion model of radioactive gaseous effluents is improved to apply for domestic nuclear power plants. Up to now, XOQDOQ computer code package developed by U. S NRC has been used for the assessment of radioactive plume dispersion by normal operation of domestic nuclear power plants. XOQDOQ adopts the straight-line Gaussian plume model which was basically derived for the plane terrain. However, since there are so many mountains in Korea, the several shortcomings of XOQDOQ are improved to consider the complex terrain effects. In this work, wind direction change is considered by modifying the wind rose frequency using meteorological data of the local weather stations. In addition, an effective height correction model, a plume reduction model due to plume penetration into mountain, and a wet deposition model are adopted for more realistic assessments. The proposed methodology is implemented in Yongkwang nuclear power plants, and can be used for other domestic nuclear power plants.

Key Words : radioactive gaseous effluents, dispersion, straight line Gaussian plume model, wind direction change, complex terrain, wet deposition

요약 - 국내 원전에 적용하기 위한 기체 방사성 물질 확산 및 피폭 평가 코드를 개발하였다. 정상 운전에 의한 기체 방사성 물질 확산 및 피폭 평가에는 직선 궤도 가우시안 플룸 모델을 사용하는 XOQDOQ 코드가 사용되어 왔다. 본 연구에서는 이 코드의 단점인 발전소 주변 지역에서의 바람 방향의 영향, 산악 지형에 대한 모델, 습식 침적에 대한 개선이 이루어졌다. 현실적인 유효 고도 보정 및 산악 침투 모델을 통해서 산악 지형에 대한 고려를 하였고, 바람 발생 확률 빈도를 수정하여 직선 궤도 모델을 보완하였다. 개발된 코드는 영광원전의 주민피폭선량평가를 위해 채택되었으며, 산악이 많은 우리 나라 다른 발전소에 적용하기 위해 산악지형 입력변경을 통하여 적절히 사용될 수 있을 것이다.

중심어 : 기체 방사성 물질, 확산, 직선 궤도 가우시안 플룸 모델, 바람장, 산악 지형, 습식 침적

서 론

실험적으로 구한 확산 계수를 사용하는 통계적 방법이 방사성 물질 및 오염 물질의 대기 확산을 계산하는데 실질적으로 많이 사용되고 있다. 통계적 방식에는 플룸(plume)의 이동 경로를 시간에 따라 추적하면서 계산하는 방식(가변 궤도 모델)과 바

람 방향이 일정하다고 가정하고 계산하는 방식(직선 궤도 모델)이 있다. 가변 궤도 모델은 주로 사고 해석용 코드에 사용되는데, 시간에 따른 방사성 플룸의 확산을 보다 정확하게 계산하지만, 과도한 계산 시간으로 인하여 정상 운전에 의한 평균적인 피폭 계산에는 비효율적인 방식이 된다. 따라서 정상 운전에 의한 기체 방사성 물질의 확

* 이 논문은 1996년도 조선대학교 학술연구비 지원을 받아 연구되었음.

산 및 피폭 계산에는 직선 궤도 모델을 이용하는 통계적 방식이 주로 사용되고 있다.

XOQDOQ[1]코드는 경수로로부터 기체상 방사성 물질의 일상 방출에 대한 대기 수송 및 확산을 평가하기 위해 US NRC가 미규제지침 1.111[2]에 근거를 두고 개발한 전산 코드로서 국내 원전의 환경 영향 평가에 사용되고 있다.

이 코드를 넓은 평지 지형에 대해 사용하는 것은 적절하지만, 우리 나라의 지역적 특성에 대해서는 보완할 점들이 상당히 많다. 특히 산악 등 복잡한 지형에 의한 플룸의 감쇄 현상을 고려할 수 없기 때문에, 이에 대한 수정이 요구된다. 아울러 비교적 강수량이 많은 우리 나라의 경우에는 습식 침적이 상당히 중요한 역할을 할 수 있음에도 불구하고, 습식 침적을 고려하지 않고 있어 이에 대한 수정도 요구된다. 또한 직선 궤도 가우시안 플룸 모델로서는 바람 방향의 변화에 따른 확산 특성을 적절히 반영하기 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 산악 지형에 대한 적절한 모델, 습식 침적에 대한 고려, 그리고 바람장 변화에 대한 모델을 통해 기존의 XOQDOQ 코드의 단점을 보완하여, 국내 원전에 사용하기 적절한 코드를 개발하였다.

모델 개발

본 연구는 XOQDOQ 코드에 기반하여 개발되었으며, Gaussian 플룸 모델에 기초한 평균 대기확산인자 X/Q 를 계산하기 위하여 연속방출 및 22.5° 의 방향 격자의 반경방향의 수직한 방향에 대하여 방출물 농도가 일정하게 분포된다고 가정한다. 지표면 및 고도방출에 대한 농도가 계산되며, 방출이 혼합모드일 때는, 고도와 지표면방출에 대한 농도가 계산되고 최종 농도값은 방출이 일어난 유형에 대한 시간 분율로 계산된다. 평균 대기 확산인자는 확산방정식으로부터 복잡한 과정 및 단순화를 통하여 고도방출에 대하여는 식(1), 지표면방출에 대하여는 식(2)와 같이 표현될 수 있다 [1].

$$\begin{aligned}
 X/Q(k, m) &= \frac{2.032}{x(m)} RF(k, m) \\
 &\times \sum_{i,j}^{N,T} \frac{DEPL_{ij}(k, m) DEC_i(m) f_{ij}(k, m)}{u_i(m) \sigma_{zj}(m)} \quad (1) \\
 &\times \exp\left(-\frac{h_{ei}^2(k, m)}{2\sigma_{zj}^2(m)}\right).
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X/Q(k, m) &= \frac{2.032}{x(m)} RF(k, m) \sum_{i,j}^{N,T} DEPL_{ij}(k, m) \\
 &\times DEC_i(m) f_{ij}(k, m) [u_i \sigma_{zj}(m)]^{-1}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서

$X/Q(k, m)$ = 풍향 k , 거리 m segment에서 방출원 세기에 의하여 정규화된 평균 대기확산인자 [sec/m^3],

$x(m)$ = m segment까지 풍하 방향 거리 [m],
 $RF(k, m)$ = 공기 재순환 및 정체로 인한 보정인자,

u_i = 풍속 등급 i 의 중간값 [m/sec],

$\sigma_{zj}(m)$ = 대기안정도 j 에 대한 플룸의 수직 확산계수 [m],

$DEPL_{ij}(k, m)$ = 플룸 감쇄에 의한 감소 인자,

$DEC_i(m)$ = 방사능 붕괴에 의한 감소 인자,

$f_{ij}(k, m)$ = 풍속 등급 i , 대기안정도 j 에 대한 바람 발생 확률,

$h_{ei}(k, m)$ = 유효 플룸 높이 [m],

$\sigma_{zj}(m) = \text{Min}\{(\sigma_{zj}^2(m) + CD_z^2/\pi)^{1/2}, \sqrt{3}\sigma_{zj}(m)\}$, (3)

C = 건물와류상수 (=0.5),

D_z = 건물높이 [m].

또한 상대 건식침적인자 [m^{-2}]는 특정 거리에 대하여 다음의 상관식에 의하여 계산된다:

$$D/Q(k, m) = \frac{RF(k, m) \sum_{i,j}^{N,T} d_{ij} f_{ij}(k, m)}{(2\pi/16)x(m)}, \quad (4)$$

여기서 d_{ij} 는 미국규제지침 1.111에 제시된 상대 침적율이다[2].

기존의 XOQDOQ 코드와 달라진 것은 지표면 농도와 관련하여 3개의 인자 $h_{ei}(k, m)$, $f_{ij}(k, m)$, $DEPL_{ij}(k, m)$ 들이 달라졌으며, 또한 산악침투에 의한 효과가 추가되었다. 다음부터는 이들 인자들에 대한 변경사항에 대하여 서술한다.

바람장 모델

플룸의 진행 방향이 일정하다고 가정하는 직선 궤도 모델에서는 발전소 부지에서의 기후 자료만이 사용된다. 따라서 발전소로부터 떨어진 주변 지역의 지역적 특성에 의한 기후 변화를 적절히 고려하지 못한다.

본 연구에서는 상기의 단점을 보완하여 영광 부지로부터 반경 80 km 내외에 위치한 광주, 전주, 정읍, 임실, 남원, 군산, 부안, 목포, 순천, 해남, 장흥, 무안, 그리고 영광 지역의 기상 자료로부터 바

람장을 구하여 대기 확산 계산에 사용함으로써 대기 확산의 결과가 보다 현실적이 되도록 하였다. 바람장에 의해 영향을 받는 파라메타는, 원전 부지에서 풍속 등급 i , 대기 안정도 j , 풍향 k 에 대한 바람발생확률 $f_{ij}(k)$ 이다. 즉 바람장의 변화에 의해 $f_{ij}(k)$ 가 수정된다.

한국원자력연구소(KAERI)에서는 직선 궤도 모델에 바람장을 고려하는 방법에 대해 제안하였다[4]. 본 연구에서는 KAERI에서 제안한 방법을 보완하여, Fig. 1에 보인 것처럼, $-k$ 방향(역방향)으로 바람이 부는 것에 대해 고려할 수 있도록 하였다.

k sector, m segment로 불어 들어오는 바람에 대하여, 영광 부지 주변 관측소로부터 자료를 이용하여 대기 안정도별 풍속 구간별 기후 자료를 사용하여 16개 방향 22개 거리별 각 segment에서 바람발생빈도확률을 구한다.

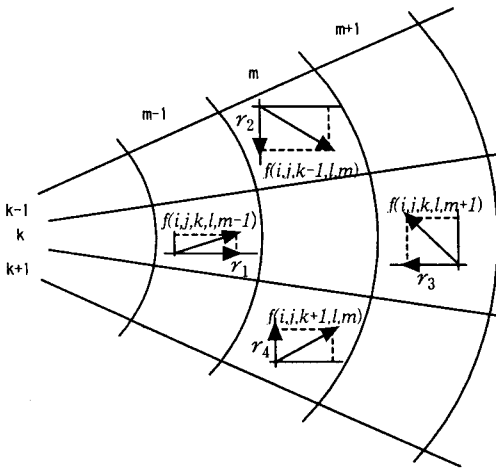


Fig. 1. Wind frequency compensation.

Fig. 1에 보인 것처럼 (k, m) segment와 인접한 $(k, m-1)$, $(k-1, m)$, $(k, m+1)$, $(k+1, m)$ segment들에서 (k, m) segment로 불어 들어오는 성분을 고려하므로써 $R_1(i, j, k, m)$, $R_2(i, j, k, m)$, $R_3(i, j, k, m)$, $R_4(i, j, k, m)$ 의 4개 값을 계산한다. $R_1(i, j, k, m)$ 은 부지의 k 방향으로 불어온 바람이 k 방향으로 그대로 남아 있는 비율을, $R_2(i, j, k, m)$ 은 부지의 $k-1$ 방향으로 불어온 바람이 $(k-1, m)$ segment에서 $k-1$ 방향의 오른쪽으로 불어 나간 비율을, $R_3(i, j, k, m)$ 은 $(k, m+1)$ 부지의 k 방향으

로 불어온 바람이 $(k, m+1)$ segment에서 반대 방향으로 분 비율을, 그리고 $R_4(i, j, k, m)$ 은 부지의 $k+1$ 방향으로 불어온 바람이 $(k+1, m)$ segment에서 $k+1$ 방향의 왼쪽으로 불어 나간 비율을 의미한다.

이 비율로부터 영광 부지의 바람 발생 빈도 확률을 다음과 같이 수정한다[5].

$$f(i, j, k, m) = f_o(i, j, k) \times R_1(i, j, k, m) + f_o(i, j, k-1) \times R_2(i, j, k, m) + f_o(i, j, k) \times R_3(i, j, k, m) + f_o(i, j, k+1) \times R_4(i, j, k, m) \quad (5)$$

여기서 $f_o(i, j, k)$ 는 방출 지점에서의 바람발생빈도확률이고, $f(i, j, k, m)$ 는 계산 지점에서 바람발생빈도확률이다.

위에서 구한 $f(i, j, k, m)$ 를 XOQDOQ 코드에서 $f_{ij}(k)$ 대신에 대입하면 바람장을 이용한 보정된 대기 확산 인자를 얻게 된다.

습식 침적 모델

방사성 물질의 침적은 크게 건식 침적과 습식 침적으로 구분된다. 영광의 기존 방사성물질 대기 확산 평가에서는 건식 침적만을 고려하고 습식 침적을 무시한다. 그러나 습식 침적은 비가 오는 경우에 건식 침적에 비해 침적량이 매우 크고, 우리나라에는 우기가 있으므로 습식 침적을 고려할 필요성이 크다. 따라서 본 연구에서는 건식 침적 외에도 습식 침적을 추가로 고려하였다.

Englemann[6]에 의한 상대 습식 침적인자 $W/Q [m^{-2}]$ 는 다음과 같다.

$$W/Q(k, m) = \frac{\alpha}{2\pi x} \cdot \frac{wN_k}{\bar{u}L} \quad (6)$$

여기서

α = 단위 환산 상수,

w = washout ratio,

$N_k = \sum_r a_{kr} \cdot I_r \cdot 8760 [mm/yr]$ (연간 강수량을 나타내는 dots분포),

a_{kr} = 풍향 k 와 강수 강도 r 과의 통계적 상관 계수,

I_r = 강수강도 [mm/hr],

\bar{u} = 풍속 [m/sec],

L = 혼합층의 높이 ($\approx 500 m$).

m 번째 segment에서 습식 침적분을 fw_m 은 다음과 같다.

$$fw(k, m) = \frac{v_w(k)}{z_m} \cdot \frac{\delta x_m}{u}, \quad (7)$$

여기서

v_w = 습식침적속도 (= awN_k) [m/sec],

δx_m = m 번째 segment 반경방향 거리 [m],

\bar{z}_m = m 번째 segment의 플룸 평균고도 [m],

\bar{u} = 풍속 [m/sec].

따라서 m 번째 segment에서 습식침적에 의한 플룸 잔존분 FW 은 다음과 같다.

$$FW(k, m) = \exp\left(-\sum_{i=1}^m fw(k, i)\right). \quad (8)$$

이와 같이 습식침적을 고려하므로써 식 (1)-(2)에서의 단지 건식침적에 의한 감쇄인자인 $DEPL_{ij}(k, m)$ 에 습식침적에 의한 플룸 잔존분을 계산하여 곱하므로써 이 인자를 변경시킨다.

한국원자력연구소에서 수행한 연구에서도 습식침적을 고려한 적이 있다 [4]. 그러나 습식침적을 고려하면서 이로 인한 플룸 감쇄를 고려하지 않았으며 플룸 감쇄는 무시할 수 있다고 부연하였다. 분석에 의하면, 습식침적 효과가 건식침적 효과보다는 작고, 대기 조건에 따라 차이는 있지만 우기의 경우에는 상당한 침적 효과를 나타내는 것을 알 수 있었다. 특히 안정 상태에서 습식 침적에 의한 침적 효과는 커지며, 이것은 안정 상태에서 상대적으로 방사능 농도로 평균한 플룸의 고도가 낮기 때문이다. 영광 지역에서 대기 상태는 안정할 확률이 60% 정도 되기 때문에 이는 무시할 만하지 않고 연평균 15%에 이르는 것으로 분석되었다. 특히 강수 시 바람 방향이 한 방향으로 집중되는 경우, 집중되는 sector에서 습식 침적에 의한 플룸 감쇄는 훨씬 클 것으로 판단된다.

산악 지형 모델 : 유효 플룸 고도 변경

본 연구의 대상이 되는 영광원전 주변의 경우, 남북으로 달리는 산줄기가 있어서 산악 지형의 적절한 고려는 분석의 신뢰도 및 정확도 향상을 위해 필수적이라고 할 수 있다. 산악에 의한 효과는 크게 유효 고도의 변경과 산악에 의한 침투 효과를 들 수가 있다.

식 (1)-(2)에서 산악과 같은 복잡한 지형에 의한 영향은, 유효 플룸 고도 h_e 및 산악에 의한 추가적인 침적량을 계산함으로써 반영할 수 있다. XOQDOQ[1], CRACIT[7], Valley 모델[8] 등에 사용되는 h_e 의 보정 방식에 대해 비교 검토하였다.

XOQDOQ 코드에서도 플룸의 유효 고도를 계산하나, 이는 대기 조건의 안정 및 불안정에 관계없

이 발전소 부지로부터 계산 지점까지의 최고의 지형 높이를 그 지점의 지형 고도로 가정하여 유효 고도를 계산하게 된다. 따라서 예측된 플룸의 중심선은 다른 어떤 모델보다도 지표면에 가까이 있어 피폭에 직접적으로 영향을 주게 되므로, 지나치게 보수적인 값을 주게 된다.

CRACIT에서는 산악지형의 묘사시 중립 및 불안정 대기조건하에서는 산의 높이가 실제 높이의 절반으로 가정하여 유효고도를 계산한다. 안정조건하에서는 실제 산의 높이를 이용하여 유효고도를 계산한다.

Valley 모델은 미국환경보호청에서 개발된 것으로 대기안정도가 중립이거나 불안정일 경우는 플룸이 초기 유효고도를 유지하면서 산을 넘는 것으로 가정한다. 그러나 안정인 경우에는 유효고도가 산의 고도만큼 낮아지는 것으로 가정한다.

Fig. 2에는 산의 모양 및 높이가 주어져 있고, Fig. 3은 이런 지형에서 안정 조건에 대한 유효 플룸 고도를 도시하였다. Fig. 4에는 대기 안정도 F (안정 조건)에 대하여 계산한 X/Q 값을 도시하였다. 이 경우 XOQDOQ가 지나치게 보수적인 값을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에는 불안정 및 중립 대기 조건하에서 유효 플룸 고도를 도시하였다. XOQDOQ에서는 대기 조건에 관계없이 안정 상태와 같은 유효 플룸 고도를 갖는다. 한편 Valley 모델에서는 플룸은 산을 타고 그대로 넘어가며, 플룸의 중심선과 지표면 고도 차이는 일정한 값을 갖는다고 가정하므로, 유효 고도는 100 m로 일정한 값을 유지하고 있다. Fig. 6에는 대표적인 불안정 조건인 대기 안정도 A에 대하여 계산한 X/Q 값을 도시하였다.

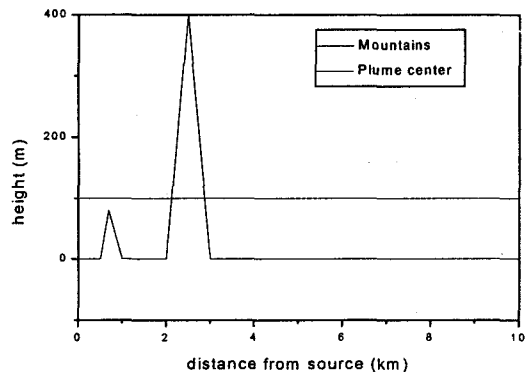


Fig. 2. Height of initial plume and mountains.

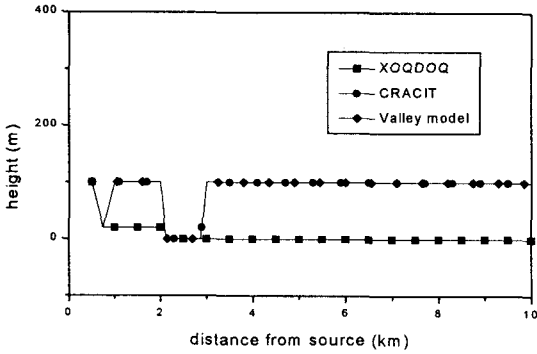


Fig. 3. Effective plume height for stable condition (atmospheric stability F).

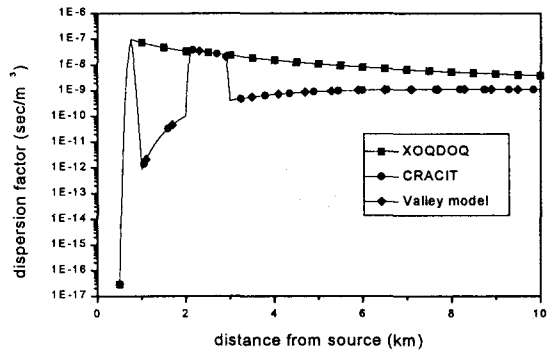


Fig. 4. X/Q values for stable condition (atmospheric stability F).

Fig. 6을 보면 Fig. 4와는 달리 유효 고도에 따라 X/Q 값의 차이가 거의 없다. 이것은 대기 안정도 A, F에서 확산 계수 σ 를 비교하여 보면, A에서 확산 계수가 F에서의 확산 계수보다 10-100배 더 크기 때문이다. 즉, 불안정 조건하에서는 대체적으로 확산 계수가 안정 조건에 비하여 훨씬 커서 지형적 효과가 적은 것을 알 수 있다.

산악 지형 모델 : 산악에 의한 침투 효과

대기 안정도가 안정인 경우에, 확산 중인 플룸은 중심선의 높이보다 높은 산을 만나게 되면, 산의 지표면을 타고 올라가거나, 산등성이를 돌아가게 된다. Valley 모델에서는 안정 조건에서 산과 플룸이 만나는 경우, 플룸이 지표면에 침투되는 현상을 고려하였다.

플룸의 산악 침투에 의한 플룸 잔존분율은 다음과 같다.[8]

$$D_{ij}(k, 1) = \frac{401 - h_{ij}(k, 1)}{400} \tag{9}$$

$$D_{ij}(k, m) = \frac{401 - h_{ij}(k, m)}{400} \cdot D_{ij}(k, m-1) \tag{10}$$

여기서, $D_{ij}(k, m)$ 는 풍향 k , 거리 segment m 에서 산악 침투로 인한 플룸 잔존분율이고, $h_{ij}(k, m)$ 는 플룸의 중심선보다 상승한 산의 표면의 고도이다. 플룸의 중심선이 산의 표면보다 높은 경우, 산악 침투 현상이 일어나지 않기 때문에 $h_{ij}(k, m)$ 은 1이 된다. 식 (9)-(10)에 의해 계산된 플룸 잔존분 $D_{ij}(k, m)$ 을 식 (1) 및 (2)에 곱하므로써 X/Q $h_{ij}(k, m)$ 을 보정하게 된다.

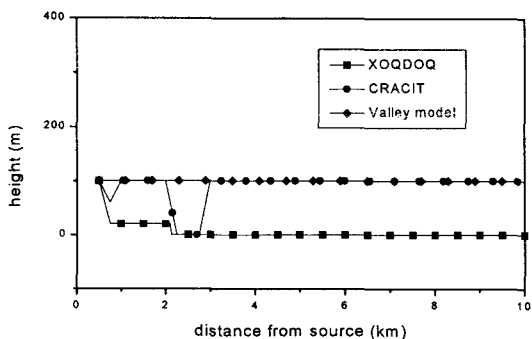


Fig. 5. Effective plume height for unstable and neutral conditions.

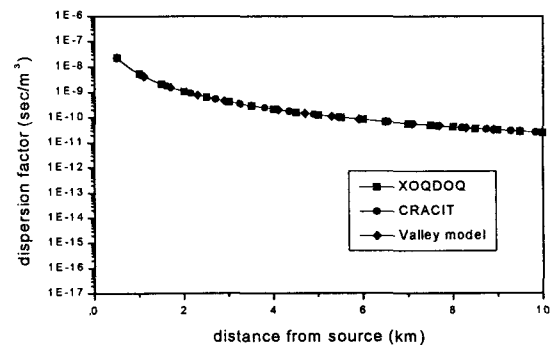


Fig. 6. X/Q values for unstable conditions (atmospheric stability A).

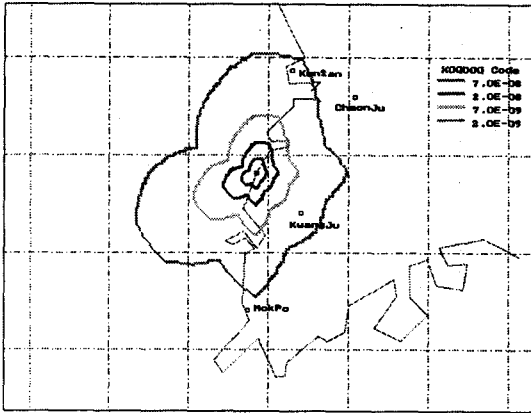


Fig. 7. X/Q values by XOQDOQ code.

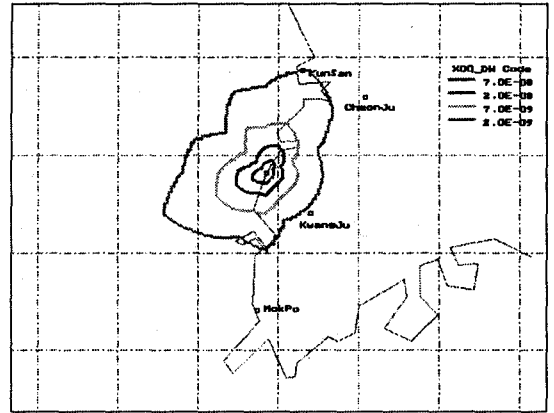


Fig. 8. X/Q values by XOQ_DW code(with wet deposition).

결과 및 토의

위에서 제안된 방법들은 새로이 개발된 XOQ_DW 코드에 적용되었다. 기존의 XOQDOQ 코드에 비해 개선된 사항은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- $DEPL_{ij}(k, m)$: XOQDOQ 코드에서는 건식 침적만 고려되었으나, 습식 침적에 의한 추가 침적을 고려하였다.
- $f_{ij}(k, m)$: XOQDOQ 코드에서는 원전 부지에서의 바람 자료만 이용하지만, 반경 80 km 내외의 바람장을 모두 고려하였다.
- $D_{ij}(k, m)$: 산악 침투에 의한 플룸 침적을 고려하였다.
- $h_e(k, m)$: 3가지 모델(XOQDOQ, CRACIT, Valley Model)에 의하여 유효 고도를 계산할 수 있도록 하였다. 지나친 보수성을 배제하기 위해서 앞으로는 현실적인 방식인 Valley Model을 사용하여 유효 고도를 변경하는 것이 타당할 것이다.

건식 및 습식 침적에 대한 계산에 의하면, 우기 시 북동풍의 바람 발생 확률이 크므로 남서쪽에서 습식 침적이 건식 침적보다 큰 것으로 나타났으며, 통상 연평균 습식 침적량이 건식 침적량의 15% 정도에 이르는 것으로 나타났다.

제안된 방법의 개선 여부를 살펴보기 위하여 기존 코드인 XOQDOQ 코드 및 본 제안된 방법들이 첨가된 XOQ_DW 코드를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 기존 방식에 의한 계산 결과를 Fig. 7

에, 개선된 모델을 사용한 계산 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 이 계산에서 원전부지 기후자료로는 1998년 4월의 자료가 이용되었으며, 4월 총 강우량은 17.5 mm이다.

바람장을 생성하기 위한 원전주변지역의 기후자료로는 1989년-1994년의 4월의 기후 자료가 이용되었으며, 유효고도를 위해서는 Valley 모델이 이용되었다. 또한 1998년 4월의 영광부지의 강우량은 17.5 mm이다.

높은 지형의 장벽으로 인한 산악 침투에 의한 효과에 의해 S, SSW, ENE, E, ESE, SE, SSE 방

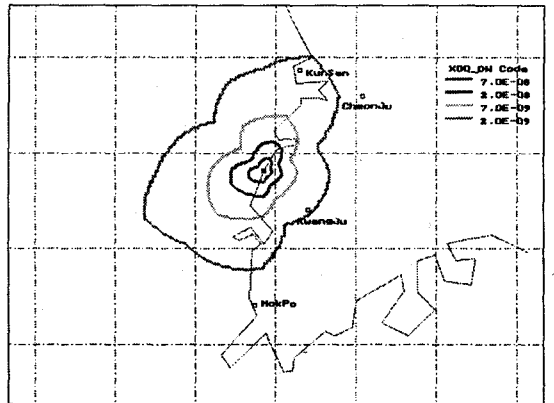


Fig. 9. X/Q values by XOQ_DW code(without wet deposition).

항에서의 플룸 감쇄가 큰 것을 알 수 있다. 새로 개발된 모델에 의한 X/Q 는, 보수적인 기존 방식에 비해 작은 값을 보였다. Fig. 9는 습식침적을 고려하지 않은 경우의 X/Q 를 보여준다. 이 결과에 의하면 습식침적의 영향이 15% 정도에 이를 수 있다.

결론

정상 운전에 의한 기체 방사성 물질 확산 및 피폭 평가를 위해 직선 궤도 가우시안 플룸 모델을 사용하는 XOQDOQ 코드를 토대로 XOQ_DW 코드가 개발되었다. XOQ_DW 코드는 산악 지형에 대한 적절한 모델, 즉 지형고도의 자세한 입력을 가능하게 하며 3가지의 유효고도 변경방식을 사용자가 선택하여 쓸수 있도록 하였다. 유효고도 모델을 위해 현실적인 결과를 얻기 위해서는 Valley 모델이 유용하다. 또한 산악지형에서 플룸이 산에 부딪쳐 침적하는 현상이 모델되었다. 또한 습식침적에 대한 고려, 그리고 바람장 변화에 대한 모델을 통해 기존의 XOQDOQ 코드의 단점을 보완 하므로써 국내 원전에 사용하기 적절한 코드를 개발하였다.

참고문헌

1. US NRC, XOQDOQ: A Computer Program

- for the Meteorological Evaluation of Routine Effluent Releases at Nuclear Power Stations, NUREG/CR-2919(1982).
2. US NRC, Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents Routine Releases from Light Water Reactor, Reg. Guide 1.111(1977).
 3. D. H. Slade (ed), Meteorology and Atomic Energy, U.S AEC Report, TID-24190(1968).
 4. 이영복, 김병우, 한문희 외, 고리 주변 환경 종합 평가 및 관련 모델 개발, 부록 I - 대기 확산 모델 개발, KAERI/NSC-397/89(1989).
 5. 김승평, 나만균, 이경진 외, 영광원전 지역에 적합한 환경방사선 평가모델 개발, KEPRI-93N-J01(1996).
 6. R. J. Englemann, Scavenging Prediction Using Ratios of Concentration in Air and Precipitation in Precipitation Scavenging, CONF-700601(1970).
 7. OCONEE PRA - A Probabilistic Risk Assessment of OCONEE Unit 3, Vol. 4, Appendix I(1984).
 8. E. W. Burt, Valley Model User's Guide, EPA-450/2-77-018, U.S Environmental Protection Agency(1977).