

Atmospheric Dispersion Assessment for Potential Accidental Releases at Yonggwang Nuclear Power Plants

Man Gyun Na, Young Rok Sim, Chul Kee Jung, Goung Jin Lee,
Soong Pyung Kim, and Sung Tai Chung*
Chosun University, *Korea Electric Power Company

영광원전에서 가상 사고시 대기확산 평가

나만균 · 심영록 · 정철기 · 이경진 · 김승평 · 정성태*
조선대학교, *한국전력공사

(2000년 4월 17일 접수, 2000년 6월 12일 채택)

Abstract - XOQ_DW code is currently used to assess the atmospheric dispersion for the routine releases of radioactive gaseous effluents at Yonggwang nuclear power plants. This code was developed based on XOQDOQ code and an additional code is required to assess the atmospheric dispersion for potential accidental releases. In order to assess the atmospheric dispersion for the accidental releases, XOQAR code has been developed by using PAVAN code that is based on Reg. Guide 1.145. The terrain data of XOQ_DW code inputs and the relative concentrations (X/Q) of XOQ_DW code outputs are used as the inputs of the XOQAR code through the interface with XOQ_DW code. By using this code, the maximum values of X/Q at exclusion area and low population zone boundaries except for sea areas were assessed as 1.33×10^{-4} and $7.66 \times 10^{-6} \text{ sec}/m^3$, respectively. Through the development of this code, a code system is prepared for assessing the atmospheric dispersion for the accidental releases as well as the routine releases. This developed code can be used for other domestic nuclear power plants by modifying the terrain input data.

Key words : accidental release, atmospheric dispersion, radioactive gaseous effluents, exposure dose assessment

요약 - 현재 영광원전에서 정상운전중 기체 방사성물질의 대기확산 평가를 위해 XOQ_DW 코드가 이용되고 있다. 이 코드는 기본적으로 XOQDOQ 코드에 근거하여 개발되었으며, 정상운전 및 사고시 피폭평가를 수행하기 위하여, 사고시 대기확산을 평가하는 방법이 첨가되어야 한다. 사고시 대기확산을 평가하기 위해서 USNRC Reg. Guide 1.145에 기초하여 개발된 PAVAN 코드에 근거하여 가상 사고시 대기확산 코드인 XOQAR 코드가 개발되었다. 이 코드는 XOQ_DW 코드와의 인터페이스를 통하여 XOQ_DW 코드의 입력인 지형 모델 그리고 XOQ_DW 코드의 출력인 연평균 대기확산인자가 본 코드의 입력으로 이용되었다. 본 코드를 이용하여 제한구역경계와 저인구지대 경계에서 대기확산인자 값이 바다방향을 제외한 최대값은 각각 1.33×10^{-4} 와 $7.66 \times 10^{-6} \text{ sec}/m^3$ 이었다. 본 코드의 개발을 통하여 영광원전에서 정상운전 및 사고시 대기확산을 평가할 수 있는 코드 시스템을 갖추게 되었다. 또한 개발된 코드는 산악이 많은 우리나라 다른 발전소에 적용하기 위해 산악지형 입력변경을 통하여 적절히 사용될 수 있을 것이다.

중심어 : 사고방출, 대기확산, 기체 방사성 물질, 피폭평가

서론

원자력발전소의 안전성을 평가하기 위하여 정상운전 뿐만 아니라 설계기준사고시 방사성 물질의 유출로 인해 인근 주민과 환경이 받게 될 영향에 대해 평가하여야 한다. 이를 위해 사고직후 및 사고

후 30일까지의 저인구지대 (LPZ, Low Population Zone)와 제한구역 (Exclusion Area) 경계에 대한 대기확산 인자를 계산하는 것이 요구된다.

방사성 물질 및 오염 물질의 대기 확산인자를 계산하는데 실험적으로 구한 확산 계수를 사용하는 통계적 방법이 실질적으로 많이 사용되고 있

다. 통계적 방식에는 플룸(plume)의 이동 경로를 시간에 따라 추적하면서 계산하는 방식 (가변 궤도 모델)과 바람 방향이 일정하다고 가정하고 계산하는 방식 (직선 궤도 모델)이 있다. 가변 궤도 모델은 시간에 따른 방사성 플룸의 확산을 보다 정확하게 계산하지만, 과도한 계산 시간으로 인하여 비효율적인 방식이 되어, 기체 방사성 물질의 확산 및 피폭 계산에는 직선 궤도 모델을 이용하는 통계적 방식이 주로 사용되고 있다.

XOQ_DW 코드[1]는 XOQDOQ 코드[2]에 기초하여 개발되었으며, 현재 영광원전에서 정상운전 시 피폭평가를 위해 이용되는 대기확산 코드이며, 발전소 주변 지역에서의 바람 방향의 영향, 산악 지형에 대한 모델, 습식 침적에 대한 개선이 이루어졌다. 즉, 현실적인 유효 고도 보정 및 산악 침투 모델을 통해서 산악 지형에 대한 고려를 하였고, 복잡한 지형에 의한 Plume에의 영향을 고려하기 위하여 바람장 모델을 도입하여 바람 발생 확률 빈도를 보정하여 직선 궤도 모델을 보완하였다.

정상운전 및 사고시 피폭평가를 수행하기 위하여 사고시 대기확산을 평가하는 방법이 첨가되어야 한다. 영광 3·4호기 FSAR에서 사고시 대기확산 계산에는 AZAP 코드[3]가 이용되었다. 이 코드는 USNRC Reg. Guide 1.145[4]에 기초하여 개발되었으며, 기본적으로 통계적인 Gaussian 모델에 기초하며, 정상운전 중 평가에 비하여 보수성을 갖도록 하였다. 물론 AZAP 코드는 정상운전 중 대기확산인자가 계산 가능하며, 이는 기본적으로 XOQDOQ와 똑같이 USNRC Reg. Guide 1.111 [5]의 방법론에 기초한다.

본 연구에서는 사고시 대기확산 코드를 개발하므로써, 영광원전에서 정상운전 뿐만 아니라 사고시 대기확산에 의한 피폭을 평가하기 위한 대기확산 코드 시스템을 갖추는 것을 목표로 하였다. 사고시 대기확산을 평가하기 위해서 USNRC Reg. Guide 1.145에 기초하여 개발된 PAVAN 코드[6]에 근거하여 가상 사고시 대기확산 코드인 YOQAR 코드가 개발되었다. 이 코드는 정상운전 중 대기확산 코드인 XOQ_DW 코드와의 인터페이스를 통하여 XOQ_DW 코드의 여러 입력 자료 및 출력자료가 이용된다.

재료 및 방법

PAVAN 코드에 의한 사고시 대기확산

PAVAN 코드는 USNRC Reg. Guide 1.145에

근거하여 개발되었다. USNRC Reg. Guide 1.145에서 제시한 사고시 대기확산 인자의 계산 방법에 대하여 살펴보겠다. 대기안정도와 풍향·풍속의 빈도 분포를 나타내는 결합빈도분포 (Joint Frequency Distributions)를 사용하여 제한구역경계와 저인구지대 경계에서 방향 및 시간대별로 상대적 방사능 농도인 X/Q 값을 계산한다. X/Q 값은 대기로 방출되는 방사능 물질이 방사능 운의 중심선을 따라 정규분포를 이루며, 방출점과 X/Q 값이 계산되는 모든 지점들 사이에서 방사능 운이 직선으로 이동하는 것으로 가정하여 계산된다.

16 방향으로 나뉜 각 풍향에 대하여 두 지점 (보통 제한구역 경계와 저인구지대 경계)에서 풍속과 대기안정도의 각 조합에 따른 X/Q 값을 계산하고, 이를 각 방향별 크기 순으로 나열하여 누적빈도분포를 계산한다. 이 값으로부터 총 시간에 대하여 0.5% 누적빈도에서 X/Q 값이 각 방향별로 선정되고, 이들 중 가장 큰 값이 USNRC Reg. Guide 1.145에 언급된 최대 섹터 (Maximum Sector) X/Q 값으로 사용된다. 또한 같은 방법으로 모든 풍향에 대하여 풍속과 대기안정도의 각 조합에 따른 X/Q 값을 계산하고, 이를 크기 순으로 나열하여 누적빈도분포를 계산한다. 총 시간에 대하여 5%의 누적빈도에서 X/Q 값이 선정되고, 이 값이 전체부지 (Overall Site) X/Q 값으로 불린다. 최대 섹터 X/Q 값과 전체부지 X/Q 값 중 큰 값이 사고 후 0~2 시간의 X/Q 값으로 이용된다.

USNRC Reg. Guide 1.145에 의하면 지표면 방출에 대한 X/Q 값을 계산하기 위하여 이용되는 식들은 다음과 같다:

$$X/Q(x, k, i, j) = \frac{1}{U_{i10}[\pi\sigma_{yy}(x)\sigma_{zz}(x) + cA]} \tag{1}$$

$$X/Q(x, k, i, j) = \frac{1}{3\pi U_{i10}\sigma_{yy}(x)\sigma_{zz}(x)} \tag{2}$$

$$X/Q(x, k, i, j) = \frac{1}{\pi U_{i10}\Sigma_{yy}(x)\sigma_{zz}(x)} \tag{3}$$

여기서

- X/Q(x, k, i, j) = 풍향 k, 거리 x, 풍속 i, 대기안정도 j에 대하여 방출원 세기에 의하여 정규화된 평균 대기확산인자 [sec/m³],
- U_{i10} = 풍속 i, 대기안정도 j에 대한 10 m 높이에서 보정된 풍속 [m/sec],

$\sigma_{yj}(x), \sigma_{zj}(x)$ = 수평 및 수직 확산계수 [m],
 c = 건물와류상수 (=0.5),
 A = 건물의 최소 단면적 [m^2],
 $\Sigma_{yj}(x)$ = 대기안정도, 풍속, 풍하거리의 함수로
 사행 (Meandering Effect) 및 와류효과를 고
 려한 수평확산 보정 인자 (참조 참고문헌 [4]).

위 식들은 다음 2가지 기상조건에 대하여 달리 적용된다:

- 1) 풍속이 6 m/sec보다 작고 대기안정도가 중립(D) 혹은 안정(E, F, G) 일 때는 식 (1)과 (2)에서 계산된 X/Q 값 중 높은 값을 선택하여 이것과 식 (3)에서 계산된 값을 비교, 작은 값을 사고 후 2시간 내의 X/Q 값으로 결정된다. 이때는 수평 사행효과가 고려될 수 있다.
- 2) 그 외의 기상조건인 경우에는 식 (1)과 (2)에서 계산된 X/Q 값 중 높은 값을 사고 후 2시간 내의 X/Q 값으로 결정한다. 이때는 수평 사행효과가 고려되어서는 안 된다.

고도방출은 주변 구조물 높이의 적어도 2.5배 높이에서 방출된 것을 포함하며, 다음 식들이 이용된다 (고도방출에 관한 자세한 사항은 USNRC Reg. Guide 1.145 참조).

$$X/Q(x, k, i, j) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{h_e(k, x)}{\sigma_{zj}(x)}\right)^2\right]}{\pi U_{ij}(h_s) \sigma_{yj}(x) \sigma_{zj}(x)}, \quad (4)$$

(Nonfumigation 조건)

$$X/Q(x, k, 6) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} U(h_e) \sigma_{y6}(x) h_e(k, x)}, \quad (5)$$

(fumigation 조건, 풍속에 독립)

여기서

$X/Q(x, k, 6)$ = 풍향 k , 거리 x , 대기안정도 6에 대하여 방출원 세기에 의하여 정규화된 평균 대기확산인자 [sec/m^3],
 $U_{ij}(h_s)$ = 풍속 i , 대기안정도 j 에 대한 방출 높이로 보정된 평균풍속 [m/sec],
 $h_e(k, x)$ = 유효 플룸 높이 [m],
 $U(h_e)$ = 대기의 안정층을 대표하는 풍속 (= 2m/sec).

한편 중간시간대 (2~8시간, 8~24시간, 1~4일,

4~30일)의 X/Q 값은 USNRC Reg. Guide 1.111에 기술된 정상운영시 X/Q 값과 2시간대의 X/Q 값을 대수적으로 내삽하여 결정된다. 정상 운영시 X/Q 값은 보수적인 평가를 위해 플룸 상승효과, 침적 및 감손효과, 방사능 붕괴 등이 고려되지 않는다.

XOQAR 코드에 의한 사고시 대기확산

PAVAN 코드는 USNRC Reg. Guide 1.145에 기초하여 개발되었으며, 본 연구에서 개발된 XOQAR 코드는 PAVAN 코드에 다음과 같은 주요한 기능 등이 추가되었다.

- 1) PAVAN 코드는 총 시간에 대하여 0.5% 혹은 5% (방향 독립) 누적빈도에서 X/Q 값만 계산하는데 비하여, XOQAR 코드에서는 각 방향별 50% 누적빈도에서 X/Q 값을 계산하는 기능이 추가되었다. 원자력시설의 사고로 인해 주변 주민 및 환경에 미치는 방사선 영향을 좀더 현실적으로 평가하기 위해, 각 방향별 50% 누적빈도에서 X/Q 값은 계산 가능하도록 하였다.
- 2) 사고후 중간시간대 (2~8시간, 8~24시간, 1~4일, 4~30일)의 X/Q 값을 계산하기 위해서는 정상운영시 (Annual Average) X/Q 값과 사고후 0~2 시간 X/Q 값을 대수적으로 내삽하여 결정한다. 따라서 정상운영시 대기확산에서 이용되고 있는 XOQ-DW 코드로부터 정상운영시 X/Q 값을 입력받을 수 있도록 코드 인터페이스를 위한 루틴이 추가되었다. 인터페이스를 통하여 XOQ-DW 코드에서 개선된 여러 모델 등이 추가되었다 (참조 참고문헌 [1]).
- 3) 영광 부지에서와 같이 주변 지역이 평탄하지 않아 지형적 영향이 크기 때문에, 지형고도를 입력할 수 있는 Data 개수를 증가시켰으며, 지형장 모델을 개발하여 코드 입력으로 제공하였다.
- 4) 16방향에 대한 2개의 계산지점 (제한구역경계, 저인구지대 경계) 외에, 추가로 22개의 정해진 각 계산지점 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 15.0, 20.0, 27.5, 35.0, 42.5, 50.0, 57.5, 65.0, 72.5, 80.0 km)에서 X/Q 값을 계산하는 기능이 추가되었다.
- 5) 소구역 (Segment) 평균의 단기 및 장기 X/Q 값을 계산하는 기능이 추가되었다. 각

방향에 대하여 10개 소구역 (1-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-20, 20-35, 35-50, 50-65, 65-80 km)에 대한 소구역 평균 X/Q_{seg} 는 다음과 같이 계산된다:

$$X/Q_{seg}(k) = \frac{R_1 X/Q(R_1, k) + r_1 X/Q(r_1, k) + \dots + r_n X/Q(r_n, k) + R_2 X/Q(R_2, k)}{R_1 + r_1 + \dots + r_n + R_2} \quad (6)$$

여기서

- X/Q_{seg} = 소구역에 대한 평균 X/Q ,
- R_1, R_2 = 소구역 경계까지의 반경,
- r_1, \dots, r_n = R_1 과 R_2 사이를 n 개로 분할한 동심원의 반지름.

한편 사고후 중간시간대 (2~8시간, 8~24시간, 1~4일, 4~30일)의 X/Q 값은 USNRC Reg. Guide 1.111에 기술된 정상운영시 X/Q 값과 2 시간대의 X/Q 값을 대수적으로 내삽하여 결정된다. 따라서 사고시 대기확산 계산을 수행하기 위해서는 정상운영시 X/Q 값이 필요하게 된다.

현재 영광원전에서 정상운전시 피폭평가를 위해 이용되는 대기확산 코드는 XOQ_DW 코드이며, XOQDOQ 코드에 근거하여 발전소 주변 지역에서의 바람 방향의 영향, 산악 지형에 대한 모델, 습식 침적에 대한 개선이 이루어졌다. 즉, 현실적인 유효 고도 보정 및 산악 침투 모델을 통해서 산악 지형에 대한 고려를 하였고, 복잡한 지형에 의한 Plume에의 영향을 고려하기 위하여 바람장 모델을 도입하여 바람 발생 확률 빈도를 보정하여 직선 궤도 모델을 보완하였다. 정상운영시 X/Q 값은 XOQ_DW 코드에서 지표면 방출에 대하여는 식 (7), 고도 방출에 대하여는 식 (8)과 같이 계산된다:

$$X/Q(k, x) = \frac{2.032}{x} RF(k, x) \sum_{i,j} DEPL_{ij}(k, x) DEC_i(x) f_{ij}(k, x) [U_{i0}(x) \Sigma_{xj}(x)]^{-1} \quad (7)$$

여기서

- $X/Q(k, x)$ = 풍향 k , 거리 x 에서 방출원 세기에 의하여 정규화된 평균 대기확산인자 [sec/m^3],
- $RF(k, x)$ = 공기 재순환 및 정체로 인한 보정인자,

$U_{i0}(x)$ = 풍속 등급 i , 대기안정도 j 에 대한 10 m 높이에서 보정된 풍속 [m/sec],

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

$h_{\sigma_j}(k, x)$ = 유효 플룸 높이 [m],

$\Sigma_{xj}(x) = \text{Min}\{(\sigma_{xj}^2(x) + cD_z^2/x)^{1/2}, \sqrt{3}\sigma_{xj}(x)\}$,

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

c = 건물와류상수 (=0.5),

D_z = 건물높이 [m].

$$X/Q(k, x) = \frac{2.032}{x} RF(k, x)$$

$$\sum_{i,j} \frac{DEPL_{ij}(k, x) DEC_i(x) f_{ij}(k, x)}{U_{i0}(x) \sigma_{xj}(x)} \exp\left(-\frac{h_{\sigma_j}^2(k, x)}{2\sigma_{xj}^2(x)}\right) \quad (8)$$

여기서

$h_{\sigma_j}(k, x)$ = 유효 플룸 높이 [m].

결과 및 논의

정상운영시 대기확산인자 평가와 마찬가지로 영광원자력발전소부지내 기상관측소에서 15분 (1999.5월부터는 10분) 간격으로 58m 첩탐에서 측정된 기상자료 (1995.1.1~1999.12.31까지의 5년간 자료)를 사용하였으며, 프로그램내에서 10m 높이의 기상자료로 변환되어 이용된다. 보수성을 위해 지표면 방출로 가정하였으며, 각 방향별 50% 누적 빈도에 상응하는 X/Q 를 계산하였다. 또한 사고후 중간시간대(2~8시간, 8~24시간, 1~4일, 4~30일)의 대기확산을 평가하기 위하여 XOQ_DW 코드 출력이 인터페이스를 통하여 이용되는데, 이의 바람장 모델을 위해 부지 주변 80 km 내외의 지방 기상대의 기상자료 (1995.1.1~1999.12.31까지의 5년간 자료)가 이용되었다. 보통 운전허가와 관련된 최종환경영향평가를 수행하는데 최적평가를 수행하게 되며, 그래서 방사능 붕괴 및 플룸 감소 효과를 고려한 경우를 다루기로 한다 (사고후 2시간 이내의 대기확산인자 평가시는 고려하지 않았음). 이를 위해 XOQ_DW 코드에서는 개선된 습식 침적, 산악침투에 의한 플룸 침적, 바람장 모델, Valley 모델을 통한 유효고도 보정 (지표면방출로 인하여 실제 보정 안됨) 등이 이용되었다.

표 1은 사고 후 2시간 동안 80 km내의 소구역별 대기확산인자(X/Q)를 보여준다. 표 2는 사고 후 4~30일 동안 몇 개의 소구역에서, 총 시간에 대한 0.5% 누적빈도에 상응하는 X/Q 값이 비교되어 있다. 이 표로부터 총 시간에 대한 0.5% 누적빈도에 상응하는 X/Q 값을 본 코드와 기존 코드(PAVAN)의 결과를 살펴보면, 1-2km 구역에서는 거의 같으나, 10-20km 구역에서는 6.5% [$= (X/Q_{XOQAR} - X/Q_{PAVAN}) / X/Q_{PAVAN}$], 그리고 65-80km 구역에서는 12.6% 만큼 본 코드에 의하여 계산된 X/Q 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 1은 가상사고에 의한 제한구역경계(560m)에서 사고 후 2시간 및 4~30일, 그리고 정상운영시 대기확산인자 값이 그려져 있다. 바다방향을 제외한 제한구역 경계에서 사고후 2시간이내의 X/Q 값의 최대값은 남남서 방향에서 $1.33 \times 10^{-4} \text{ sec}/m^3$ 이다. 그림 2는 저인구지대 경계(5600m)에서 사고 후 2시간 및 4~30일, 그리고 정상운영시 대기확산인자 값이 그려져 있다. 바다방향을 제외한 저인구지대 경계에서 사고후 2시간이내의 X/Q 값의 최대값은 남남서 방향에서 $7.66 \times 10^{-6} \text{ sec}/m^3$ 이다.

그림 3은 PAVAN 코드를 이용한 경우 제한구역 경계에서 사고 후 2시간 및 4~30일, 그리고 정상운영시 대기확산인자 값이 그려져 있다. 원래 PAVAN 코드는 각 방향별 50% 누적빈도에서 X/Q 값을 계산할 수 없지만, 이 기능만을 첨가한 결과를 보여준다. 이 결과로부터 그림 1과 거의 차이가 없는 것으로 보인다. 이것은 평가 지점이 기체방사성물질의 방출지점에 가까워 습식침적, 산악침투에 침적, 방사성 붕괴 등에 의한 효과가 거의 나타나지 않았기 때문이다. 그림 4는 PAVAN 코드를 이용한 경우 저인구지대 경계에서 사고 후 2시간 및 4~30일, 그리고 정상운영시 대기확산인자 값이 그려져 있다. 사고후 2시간 동안의 X/Q 은 그림 2와 동일하며, 정상운영시 대기확산인자 및 정상운영시 대기확산인자가 보간법에 의해 이용되는 4~30일 동안의 대기확산인자 값에서는 차이가 있는 것을 확인할 수 있다.

결론

PAVAN 코드에 기초하여 사고시 대기확산을 평가하는 XOQAR 코드를 개발하였다. 정상운전중 대기확산 코드인 XOQ_DW 코드와 인터페이스가 가능하도록 하여, 일부 입력 자료 및 출력자료가

이용되었다. 본 코드를 이용하여 영광원전에서 대기확산인자를 계산하였으며, 제한구역경계와 저인구지대 경계에서 대기확산인자 값이 바다방향을 제외한 최대값은 각각 1.33×10^{-4} 와 $7.66 \times 10^{-6} \text{ sec}/m^3$ 이었다. 그리고 총 시간에 대한 0.5% 누적빈도에 상응하는 X/Q 값을 본 코드와 기존 코드(PAVAN)의 결과를 살펴보면, 1-2km 구역에서는 거의 같으나, 10-20km 구역에서는 6.5%, 그리고 65-80km 구역에서는 12.6% 만큼 본 코드에 의하여 계산된 X/Q 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통하여 영광원전에서 정상운전 및 사고시 방사성 기체방출물의 대기확산을 평가하는 코드 체계를 갖추게 되었다. 본 코드는 지형장 입력의 변경을 통하여 쉽게 다른 부지의 사고시 대기확산을 평가할 수 있다.

참고문헌

1. 나만균, 이경진, "통계적 방법을 이용한 방사성 물질의 대기확산 평가," 대한방사선방어학회지, 24(4), 251-257 (1998).
2. U.S. NRC, "XOQDOQ: A Computer Program for the Meteorological Evaluation of Routine Effluent Releases at Nuclear Power Stations," NUREG/CR-2919 (1982).
3. Pichurski, D.J., "User's Manual AZAP," Sargent and Lundy, Chicago (1989).
4. U.S. NRC, Reg. Guide 1.145, "Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assessments at Nuclear Power Plant," U.S. NRC Office of Standard Development, Washington, D.C. (1979).
5. U.S. NRC, Reg. Guide 1.111, "Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents Routine Releases from Light Water Reactor," U.S. NRC Office of Standard Development, Washington, D.C. (1977).
6. T. J. Bander, PAVAN: An Atmospheric Dispersion Program for Evaluating Design Basis Accidental Releases of Radioactive Materials from Nuclear Power Stations, NUREG/CR-2858, PNL-4413 (1982).
7. 한국전력공사, 영광 3.4호기 FSAR.

Table 1. X/Q for Each Segment During 0-2 Hours.

| Direction | Segment Boundaries in kilo-meters from the Site | | | | | | | | | |
|-----------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 1-2 | 2-4 | 4-6 | 6-8 | 8-10 | 10-20 | 20-35 | 35-50 | 50-65 | 65-80 |
| S | 1.57×10^{-5} | 5.55×10^{-6} | 2.61×10^{-6} | 1.64×10^{-6} | 1.45×10^{-6} | 9.31×10^{-7} | 6.01×10^{-7} | 5.28×10^{-7} | 5.01×10^{-7} | 4.85×10^{-7} |
| SSW | 3.77×10^{-5} | 1.63×10^{-5} | 8.80×10^{-6} | 5.87×10^{-6} | 4.32×10^{-6} | 2.33×10^{-6} | 1.23×10^{-6} | 9.76×10^{-7} | 8.73×10^{-7} | 8.02×10^{-7} |
| SW | 5.35×10^{-5} | 2.57×10^{-5} | 1.48×10^{-5} | 1.01×10^{-5} | 7.48×10^{-6} | 4.09×10^{-6} | 2.18×10^{-6} | 1.70×10^{-6} | 1.52×10^{-6} | 1.41×10^{-6} |
| WSW | 6.14×10^{-5} | 3.01×10^{-5} | 1.75×10^{-5} | 1.19×10^{-5} | 8.84×10^{-6} | 4.83×10^{-6} | 2.57×10^{-6} | 1.99×10^{-6} | 1.78×10^{-6} | 1.66×10^{-6} |
| W | 5.02×10^{-5} | 2.28×10^{-5} | 1.27×10^{-5} | 8.49×10^{-6} | 6.25×10^{-6} | 3.38×10^{-6} | 1.77×10^{-6} | 1.37×10^{-6} | 1.23×10^{-6} | 1.14×10^{-6} |
| WNW | 4.19×10^{-5} | 1.82×10^{-5} | 9.94×10^{-6} | 6.68×10^{-6} | 4.93×10^{-6} | 2.66×10^{-6} | 1.37×10^{-6} | 1.04×10^{-6} | 9.28×10^{-7} | 8.56×10^{-7} |
| NW | 3.62×10^{-5} | 1.55×10^{-5} | 8.30×10^{-6} | 5.51×10^{-6} | 4.03×10^{-6} | 2.16×10^{-6} | 1.11×10^{-6} | 8.65×10^{-7} | 7.70×10^{-7} | 7.09×10^{-7} |
| NNW | 3.90×10^{-5} | 1.66×10^{-5} | 8.94×10^{-6} | 5.96×10^{-6} | 4.38×10^{-6} | 2.35×10^{-6} | 1.21×10^{-6} | 9.32×10^{-7} | 8.22×10^{-7} | 7.57×10^{-7} |
| N | 5.32×10^{-5} | 2.31×10^{-5} | 1.25×10^{-5} | 8.40×10^{-6} | 6.25×10^{-6} | 3.43×10^{-6} | 1.80×10^{-6} | 1.37×10^{-6} | 1.16×10^{-6} | 1.07×10^{-6} |
| NNE | 4.14×10^{-5} | 1.75×10^{-5} | 9.38×10^{-6} | 6.28×10^{-6} | 4.64×10^{-6} | 2.52×10^{-6} | 1.32×10^{-6} | 1.02×10^{-6} | 8.37×10^{-7} | 7.61×10^{-7} |
| NE | 3.21×10^{-5} | 1.33×10^{-5} | 6.97×10^{-6} | 4.54×10^{-6} | 3.30×10^{-6} | 1.75×10^{-6} | 9.54×10^{-7} | 8.38×10^{-7} | 7.82×10^{-7} | 7.42×10^{-7} |
| ENE | 3.13×10^{-5} | 1.30×10^{-5} | 6.75×10^{-6} | 4.40×10^{-6} | 3.20×10^{-6} | 1.69×10^{-6} | 9.32×10^{-7} | 8.33×10^{-7} | 7.77×10^{-7} | 7.38×10^{-7} |
| E | 3.33×10^{-5} | 1.40×10^{-5} | 7.34×10^{-6} | 4.80×10^{-6} | 3.49×10^{-6} | 1.85×10^{-6} | 9.40×10^{-7} | 7.20×10^{-7} | 6.58×10^{-7} | 6.26×10^{-7} |
| ESE | 1.35×10^{-5} | 4.73×10^{-6} | 2.09×10^{-6} | 1.30×10^{-6} | 1.15×10^{-6} | 7.51×10^{-7} | 4.73×10^{-7} | 3.98×10^{-7} | 3.74×10^{-7} | 3.54×10^{-7} |
| SE | 4.95×10^{-6} | 1.78×10^{-6} | 7.66×10^{-7} | 3.68×10^{-7} | 4.85×10^{-7} | 4.04×10^{-7} | 2.93×10^{-7} | 2.63×10^{-7} | 2.53×10^{-7} | 2.46×10^{-7} |
| SSE | 5.67×10^{-6} | 2.03×10^{-6} | 1.00×10^{-6} | 5.43×10^{-7} | 5.86×10^{-7} | 5.08×10^{-7} | 3.57×10^{-7} | 3.21×10^{-7} | 3.10×10^{-7} | 3.03×10^{-7} |

Table 2. Comparison of X/Q Values from the XOQAR and PAVAN codes for Each Segment During 4-30 Days (X/Q Value in each sector that is exceeded 0.5% of the total time).

| Direction | Segment Boundaries in kilo-meters from the Site | | | | | |
|-----------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | XOQAR code | | | PAVAN code | | |
| | 1-2 | 10-20 | 65-80 | 1-2 | 10-20 | 65-80 |
| S | 1.38×10^{-5} | 5.86×10^{-7} | 9.60×10^{-8} | 1.46×10^{-5} | 9.51×10^{-7} | 1.56×10^{-7} |
| SSW | 1.48×10^{-5} | 8.33×10^{-7} | 1.36×10^{-7} | 1.54×10^{-5} | 1.07×10^{-6} | 1.74×10^{-7} |
| SW | 2.45×10^{-5} | 1.81×10^{-6} | 2.04×10^{-7} | 2.50×10^{-5} | 1.83×10^{-6} | 2.94×10^{-7} |
| WSW | 2.24×10^{-5} | 1.51×10^{-6} | 2.50×10^{-7} | 2.09×10^{-5} | 1.47×10^{-6} | 2.41×10^{-7} |
| W | 1.53×10^{-5} | 9.94×10^{-7} | 1.95×10^{-7} | 1.08×10^{-5} | 7.43×10^{-7} | 1.24×10^{-7} |
| WNW | 8.40×10^{-6} | 4.97×10^{-7} | 7.81×10^{-8} | 6.66×10^{-6} | 4.21×10^{-7} | 7.23×10^{-8} |
| NW | 7.35×10^{-6} | 5.06×10^{-7} | 8.53×10^{-8} | 8.26×10^{-6} | 5.45×10^{-7} | 9.27×10^{-8} |
| NNW | 7.80×10^{-6} | 5.09×10^{-7} | 8.72×10^{-8} | 7.91×10^{-6} | 5.11×10^{-7} | 8.67×10^{-8} |
| N | 1.01×10^{-5} | 7.98×10^{-7} | 1.44×10^{-7} | 1.27×10^{-5} | 8.85×10^{-7} | 1.49×10^{-7} |
| NNE | 1.15×10^{-5} | 7.81×10^{-7} | 1.36×10^{-7} | 1.10×10^{-5} | 7.39×10^{-7} | 1.26×10^{-7} |
| NE | 9.13×10^{-6} | 5.17×10^{-7} | 9.29×10^{-8} | 7.77×10^{-7} | 4.99×10^{-7} | 8.62×10^{-8} |
| ENE | 6.19×10^{-6} | 3.00×10^{-7} | 3.53×10^{-8} | 6.31×10^{-6} | 4.04×10^{-7} | 6.98×10^{-8} |
| E | 5.81×10^{-6} | 2.86×10^{-7} | 2.71×10^{-8} | 5.97×10^{-6} | 3.65×10^{-7} | 6.28×10^{-8} |
| ESE | 5.15×10^{-6} | 2.47×10^{-7} | 2.56×10^{-8} | 4.75×10^{-6} | 2.71×10^{-7} | 4.75×10^{-8} |
| SE | 4.72×10^{-6} | 2.30×10^{-7} | 3.61×10^{-8} | 5.41×10^{-6} | 3.14×10^{-7} | 5.54×10^{-8} |
| SSE | 5.04×10^{-6} | 2.42×10^{-7} | 3.16×10^{-8} | 5.98×10^{-6} | 3.55×10^{-7} | 6.19×10^{-8} |

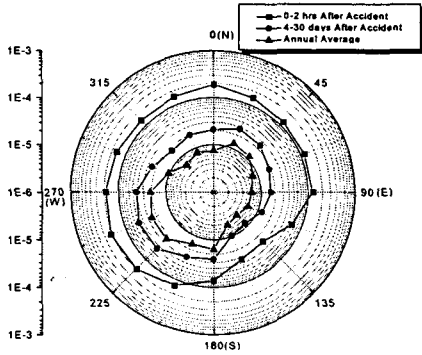


Fig. 1. X/Q values at exclusion area boundary.

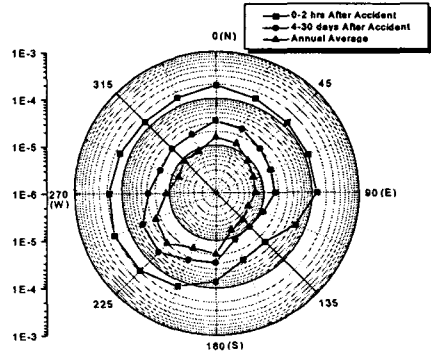


Fig. 3. X/Q values at exclusion area boundary (using the PAVAN code).

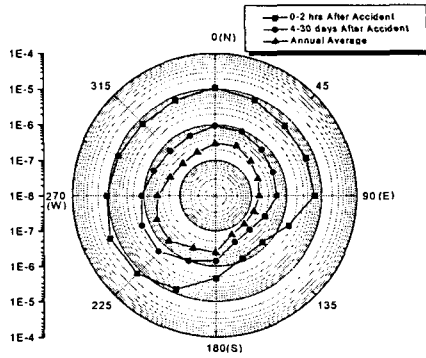


Fig. 2. X/Q values at low population zone boundary.

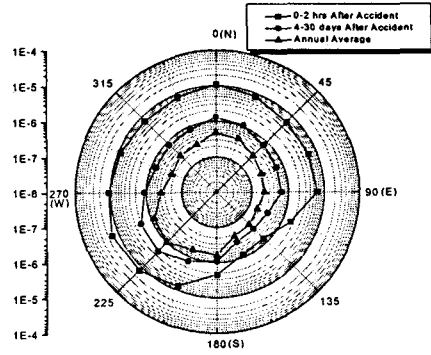


Fig. 4. X/Q values at low population zone boundary (using the PAVAN code).