

# A Study on the Oceanic Diffusion of Liquid Radioactive Effluents based on the Statistical Method

Soong-Pyung Kim and Goung-Jin Lee  
Department of Nuclear Engineering, Chosun University

## 통계적 방법을 이용한 방사성 물질의 해양 확산 평가

김승평 · 이경진  
조선대학교

**Abstract** - A diffusion model of radioactive liquid effluents is developed and applied for YGN NPP's site, based on the Gaussian plume type model. Due to the complexity of oceanic diffusion characteristics of YGN site, a simple and reliable statistical model based on Reg. Guide 1.113 is developed. Also, a computer code package to calculate dilution factors as a function of plant operation conditions and pathway of radioactive materials.

A liquid effluents diffusion model is developed by dividing the diffusion range into two categories, i. e, a near field mixing region and a far field mixing region.

In the near field, the initial mixing is affected by a buoyance force, a high initial turbulence and momentum which is characterized by a plant operation condition and environmental conditions.

The far field mixing is similar to gaseous effluents diffusion. So, beyond the near field region, wellknown Gaussian plume model was adopted. A different area averages of Gaussian plume equation was taken for each radioactive exposure pathway.

As a result, we can get different dilution factors for different pathways. Results shows that present dilution factors used for YGN ODCM is too much overestimated compared with dilution factors calculated with the developed model.

*Key words* : Radiation Exposure, Liquid Effluents, Near Field, Far Field, Gaussian Plume, Dilution Factor

**요약** - 영광 원전 지역에 적용될 수 있는 액체 방사성 물질의 확산 모델을 개발하였다. 영광에서의 해양 확

---

\* 이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

산 조건은 매우 복잡하기 때문에 수치적 모델을 적용하는 것은 매우 어렵다. 따라서 비교적 단순하면서도 신뢰성 있는 미규제 지침 1.113에서 제시한 통계적 모델을 적용하였다. 이를 통해, 발전소 운전 조건이나, 피폭 경로에 따른 희석 인자를 계산할 수 있는 컴퓨터 코드를 개발하였다. 액체 방사성 물질의 확산에 대해서, 혼합 범위에 따라 근거리 혼합 모델과 원거리 혼합 모델로 구분하여 모델을 개발하였다. 근거리 혼합 현상은 부력과 초기 운동량 및 난류에 의해 결정된다. 원거리 혼합에서는 대기 중의 구름 확산과 유사하게 가우시안 푸름 모델을 적용할 수 있다. 서로 다른 피폭 경로에 대해 물리적으로 타당한 적분을 수행함으로써, 경로에 따른 희석 인자를 구할 수 있었다. 개발된 모델을 사용하여 계산한 결과에 의하면, 현행 영광 ODCM에 사용되는 희석 인자는 상당히 과평가되어 있음을 알 수 있다.

중심 단어 : 액체 방사성 물질 확산, 희석 인자, 근거리 모델, 원거리 모델, 피폭 경로, 가우시안 푸름 모델

### 서론

방사성 물질의 해양 확산에 의한 피폭을 평가하기 위해서는 희석 인자 또는 혼합 계수가 입력 자료로 주어져야 한다[1][2][3]. 여기서 희석 인자는 현지의 특수성을 고려한 모델을 개발하여 계산을 하여야 한다. 해양으로 방출된 액체 방사성 물질은 해양 특성에 따라 각기 다른 양태의 확산을 하게 된다. 영광의 경우는 간만의 차가 크고, 수심이 얇아서, 방사성 물질의 확산이 조류에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 이러한 특성을 잘 반영할 수 있는 영광 지역에 적용하기에 적합한 해양 확산 모델을 개발하고, 이를 코드화하여 실제 적용하였다.

물질의 해양 확산을 계산하기 위해서는 수치적 모델이나 통계적 모델이 사용된다[4][5]. 수치적 모델은 개별 물리적 현상들이 잘 모델되는 경우에는 매우 정확한 값을 얻을 수 있다. 그러나 영광의 경우처럼 조수간만의 차가 크고 수심이 얇은 경우에 대해서는 모델을 정확히 세우는 것이 매우 어렵고, 계산 시간도 많이 걸리게 되며, 계산 결과를 피폭 평가 모델에 적용하는 것이 매우 어렵게 된다.

반면에 통계적 모델은 그 형태가 매우 간단하여, 수치적인 모델에 비해 정확도가 떨어진다고 볼 수 있지만, 정상 운전에 의한 장기 피폭을 계산하는 경우에는 결과에 대한 신뢰도가 높고, 모델에 대한 검증이 용이하며, 사용이 간편하고, 계산 결과를 피폭 평가 모델에 적용하는 것이 용이하다.

따라서 본 연구에서는 통계적 모델을 개발하고 코드화하여, 개인 최대 피폭 선량을 계산하기 위한

부지경계면에서의 희석 인자와, 각기 다른 피폭 경로에 대한 희석 인자를 계산하였다.

### 해양 확산 계산 모델 개발 및 적용

해양 확산을 그림 1에 보인 것처럼 크게 초기 혼합(근거리 혼합)과 원거리 혼합 현상으로 나누어 모델하였다. 본 논문에서는 영광 부지에 적용할 수 있는 근거리 혼합 및 원거리 혼합 모델을 개발하고, 프로그램화 하였다.

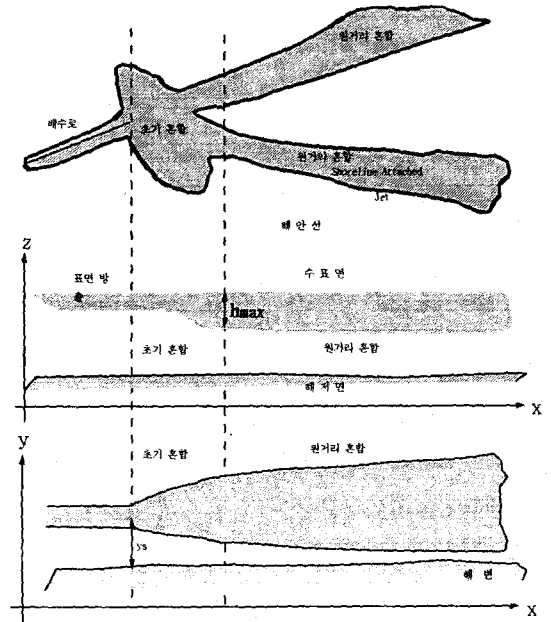


Fig. 1. 액체 방사성 폐기물의 해양 확산 양태

**초기 혼합(근거리 혼합) 모델 선정 및 적용**

초기 혼합 현상은 통상 방출구 특성 길이(방출구 유동 단면적 절반의 평방근)의 100배 이내의 짧은 거리에서 일어나며, 혼합의 정도를 나타내는 희석률  $DF_{\text{근거리}}$ 는 10에서 100에 이르게 된다.

영광의 경우는 개수로를 통하여 자유 방출을 하고 있기 때문에 표면 단일점 방출의 범주에 속한다. 현재의 영광 ODCM[6]에서는 부지 경계면에서의 희석 인자 값을 임의로 2를 주고 있는데, 이것은 너무 보수적인 값이라고 생각된다.

유동 단면적이  $A_0$  인 수로를 통해 방출이 이루어지는 경우의 방출 특성 길이  $l_0$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$l_0 = \sqrt{A_0/2} \tag{1}$$

영광에서와 같은 표면 방출에서는 부력에 의한 제트류(Buoyant Jet)에 의해 방출 특성이 결정된다. 부력 제트류의 수력학적 특성은 무차원수인 Froud 수  $F_0$ 에 의해 결정된다.

$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho)gl_0}} \tag{2}$$

위 식에서 방출 속도는 질량보존식을 사용하여 다음과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$U_0 = \frac{Q_0}{A_0} \tag{3}$$

부력을 계산하기 위한  $\Delta\rho$ 도 에너지보존식을 이용하거나, 응축기의 출구 온도 자료를 사용하여 간단히 계산할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{m C_p} \tag{4}$$

해수의 온도 상승이 계산되면, 증기표로부터  $\Delta\rho$ 를 쉽게 계산할 수 있다.

근거리 혼합에 의한 희석률  $DF_{\text{근거리}}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$DF_{\text{근거리}} \equiv C_0 / C_B \tag{5}$$

여기서,

$C_0$  = 방사능 물질 농도,

$C_B$  = 근거리 혼합 경계면에서의 방사성 물질 농도.

영광 부지의 수용체 특성으로는 정체 또는 저유속의 수심이 얇은 수용체로의 방출 특성 및 Crossflow가 센 수용체로의 방출 특성을 모두 보여 준다.

정체 또는 저유속의 수심이 얇은 수용체로 방출에서의 희석 인자  $DF_{\text{근거리}}$ 는 다음과 같이 주어진다[9].

$$DF_{\text{근거리}} = 1.4 r_s F_0 \tag{6}$$

여기서  $r_s$ 는 수심에 대한 실험적인 보정인자로 다음과 같이 표현된다.

$$r_s = \left[ \frac{0.75}{h_{\text{max}}/H} \right]^{0.75} \tag{7}$$

$h_{\text{max}}$ 는 푸름의 최대 침투 깊이로서 다음과 같이 주어진다.

$$h_{\text{max}} = 0.42 l_0 F_0 \tag{8}$$

Crossflow가 센 경우의 희석 인자 ( $DF_{\text{근거리}})_{\text{attached}}$ 는 방출수의 희석이 한쪽 단면에서만 이루어진다는 보수적인 가정하에서 다음과 같이 쉽게 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} (DF_{\text{근거리}})_{\text{attached}} &= 0.5 (DF_{\text{근거리}})_{\text{shallow}} \\ &= 0.7 r_s F_0 \end{aligned} \tag{9}$$

실제 실험에 의하면 Crossflow가 센 경우의 확산은 정체 또는 저유속의 수심이 얇은 수용체로의 확산에 비해 상당히 낮은 확산을 보여주므로 식(9)는 식(6)에 비해 언제나 보수적인 결과를 얻게 된다.

초기 혼합 경계면까지의 거리는 Jirk et al.[7]에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$x = \min(15 l_0 F_0, 2 l_0 / L) \quad (10)$$

(10)식은 개인 최대 피폭선량을 계산하는 경계면이 된다.

**원거리 혼합 모델 개발 및 적용**

해양에서의 액체 방사성 물질 확산에 대해서는 미 규제 지침 1.113[8]에 제시된 가우시안 푸름 모델을 사용할 수가 있다.

$$C(x, y, z) = \frac{C_0 Q_0}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} f(\sigma_z, z, H) \cdot f(\sigma_y, y, y_s) \cdot \exp(-\lambda x / u) \quad (11)$$

어류 등 수산물의 채취는 수심에 관계없이 이루어지기 때문에 위 식을 깊이 방향인 z축 방향에 대해 다음과 같이 평균화한다.

$$C(x, y) = \frac{\int_0^H C(x, y, z) dz}{H} \quad (12)$$

(12)식에 대해 적분을 수행하면, 다음과 같은 농도 분포식을 구할 수 있다.

$$C(x, y) = \frac{Q_0 C_0}{\sqrt{2\pi} \sigma_y H u} \exp[-0.5 y^2 / \sigma_y^2] \quad (13)$$

한편 방사성 물질의 자연 붕괴에 의한 감쇄를 고려하면 위 식은 다음과 같이 된다.

$$C(x, y) = \frac{Q_0 C_0}{\sqrt{2\pi} \sigma_y H u} \exp[-0.5 y^2 / \sigma_y^2] \times \exp(-\lambda x / u) \quad (14)$$

y 방향의 확산이 해변 등에 의해 제약을 받는 경우에는 방사성 푸름의 대기 확산에서와 같은 방식으로 Image Source 항을 고려한다. 복잡성을 피하기 위해 붕괴항을 무시하면, 다음과 같다.

$$C(x, y) = \frac{Q_0 C_0}{\sqrt{2\pi} \sigma_y H u} [\exp(-0.5 (y - y_s)^2 / \sigma_y^2) + \exp(-0.5 (y + y_s)^2 / \sigma_y^2)] \quad (15)$$

반감기가 짧은 핵종에 대해서는 (15)식에 자연붕괴 항을 추가한다.

실제 방사선 피폭 계산 코드에서 요구되는 변수인 희석률 DF는 평균적인 단일 값(상수)이다. 따라서 피폭 계산 코드에서 요구하는 단일 값을 주기 위해 물리적으로 의미 있는 평균을 취하여야 한다.

**해산물 섭취에 대한 희석률 계산 : 어류**

피폭 평가시 어류의 생산량 데이터는 있지만, 어류의 정확한 채취 지점(피폭 지점)을 알 수 없기 때문에, 해산물 중에서 어류는 비교적 먼 거리(20 km)까지 고르게 분포한다고 가정한다. 이 경우 희석 인자는 고려 범위를 20 km까지 된다고 가정하여 평균 값을 구하면 된다.

식(13)을 y sector에 대해서 평균하면 다음과 같다.

$$M_p(x) \equiv 1/DF(x) \equiv \frac{C(x)}{C_0} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{C(x)}{C_0} dy}{\pi x} = \frac{Q_0}{\pi H u x} \quad (16)$$

(16)식은 원거리 혼합에 의한 희석이 거리에 비례하는 것을 나타내는데, 이 결과는 미 규제 지침 1.113의 결과와도 경향이 잘 일치한다.

평균화된 대표 값의 혼합 계수 또는 희석 인자를 얻기 위해서, (16)식을 어로 범위인 반경 R = 20 km까지 면적 평균하면, 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$M_p \equiv 1/DF \equiv \overline{C/C_0} = \frac{\int_0^R \frac{C(x)}{C_0} \pi x dx}{\pi R^2 / 2} = \frac{2 Q_0}{\pi H u \cdot 20000 m} \quad (17)$$

**해산물 섭취에 대한 희석률 계산 : 패류, 양식 수산물**

해산물 중에서도 패류와 양식 수산물의 경우, 그 채취 지점이 주로 해안가를 따라 위치하고 있다. 평균값을 구하기 위해 적분을 수행할 때, 관련된

$$\begin{aligned}
 C(x) &= \frac{Q_0 C_0}{\sqrt{2\pi\sigma_y H u}} \frac{\int_{0m}^{1000m} \exp[-0.5(y-500)^2/\sigma_y^2]}{1000m} \\
 &+ \frac{Q_0 C_0}{\sqrt{2\pi\sigma_y H u}} \frac{\int_{0m}^{1000m} \exp[-0.5(y+500)^2/\sigma_y^2]}{1000m} \\
 &\ll \frac{Q_0 C_0}{\sqrt{2\pi\sigma_y H u}} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-0.5y^2/\sigma_y^2] dy}{1000m} \\
 &= \frac{Q_0 C_0}{H u 1000m}
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

영역에 대해서만 적분을 수행하여야 물리적인 의미를 갖는 희석률을 구할 수 있다.

이 경우, 해산물(패류, 양식류) 채취의 범위가 해변으로부터 1000 m 라고 가정하고, 해변에 의한 반사를 고려하는 식(15)를 사용하여 다음과 같은 희석률을 구할 수 있다.

**기타 해상 활동에 대한 희석률 계산**

위와 마찬가지로 원리를 사용하여 기타 해상 활동에 의한 피폭 계산시 요구되는 희석률 또는 혼합비율을 계산할 수 있다.

어로 행위와 같이 활동이 넓은 바다에 걸쳐서 이루어지는 경우는 어류에 대한 희석률 식인 식(16)을 사용하고, 해변 활동 또는 수영과 같이 주로 해변에서 피폭이 이루어지는 경로에 대한 희석

Table 1. 근거리 혼합 모델 입력 변수 및 상수

변수(상수)	내용	변수값	참고
A <sub>0</sub>	방출단면적, m <sup>2</sup>	50.0	추정치
Q <sub>0</sub>	해수방출율, m <sup>3</sup> / sec	72.0	영광 ODCM
ΔT	방출수 온도 상승, °C	5.0	추정치
U <sub>a</sub>	avg. crossflow velocity	0.1	추정치
u	평균 해류 속도, m/sec	0.35	영광 ODCM
H	plume 최대침투지점 수심	10.0	추정치
ρ <sub>0</sub>	해수 밀도, kg / m <sup>3</sup>	1000.0	상수(증기표)
Δρ / °C	밀도상승율, kg / m <sup>3</sup> / °C	0.2	상수(증기표)
g	중력가속도	9.8	상수

Table 2. 원거리 혼합 모델 선정

모델명	모델 특성	대상	계산식	입력 자료	결과 및 적용
원거리	- 해양확산 특성 - 통계적 모델 (Gaussian모델)	어류섭취 및 해상활동	(16)	- plume 중심 이동 속도	원거리 확산에 의한 희석인자 계산으로 피폭 선량(대중 집적 선량) 계산시 요구되는 혼합계수 계산
혼합 모델	- 정상상태 연속방출(puff 방출의 경우는 연속방출로 환산하여 계산) - 자연붕괴 항 및 반사체의 영향 고려		(17)	- 방사성 방출 농도 - 폐기물 방출율 - 평균 수심	
		양식어패류 및 수영 해변활동	(18)		
비 고	원거리 혼합 모델에 사용되는 입력변수는 표 1에 제시된 근거리 혼합 모델의 경우와 동일하다.				

Table 3. 영광 ODCM에 사용된 회석인자 값과 개발된 모델에 의한 회석인자 값의 비교

피폭지점	회석인자 DF	개발된 모델에 의한 DF	
		어류	해변활동
근 거 리 혼 합	2.0	1.57	
고 창	1.27 e+01	0.956 e+03	0.486 e+03
군 산	3.27 e+01	6.59 e+03	
김 제	3.00 e+01	5.54 e+03	
목 포	2.44 e+01	6.60 e+03	
무 안	2.02 e+01	4.30 e+03	
부 안	2.20 e+01	2.96 e+03	
신 안	2.04 e+01	4.59 e+03	
영 암	2.52 e+01	7.17 e+03	
옥 구	2.65 e+01	6.12 e+03	
합 평	1.75 e+01	3.83 e+03	
장 항	-	6.69 e+03	

들은 어패류의 경우에 적용되는 식(18)을 사용한다.

해양 확산 계산에 적절히 사용될 것으로 본다.

## 결과 및 결론

위에서 개발한 모델들을 코드화하여 부지 경계선에서의 회석 인자 및 여러 가지 피폭 경로에 대한 회석 인자를 계산하였다. 회석 인자의 계산에 요구되는 입력 변수로는 배수로의 방출 단면적, 순환수 방출률, 방출수의 온도 상승, 유동 직각 방향의 유속, 주 해류 속도, 해수 평균 수심 등으로서, 발전소 운전 자료 및 실측을 통해 쉽게 구할 수 있는 자료들이다. 표 1에는 근거리 혼합 모델에 사용된 입력 변수 값을 나타내었고, 표 2에는 원거리 혼합 모델 선정 결과를 나타내었고, 표 3에는 현행 ODCM에 사용되는 회석 인자 값과 개발된 모델을 사용하여 계산한 회석 인자를 보여주고 있다.

제시된 계산 결과에 따르면 현행 ODCM에 사용되는 회석 인자는 너무 보수적인 결과를 주는 것을 알 수가 있다. 아울러, 기존의 ODCM과는 달리 피폭 경로에 따른 회석 인자를 계산하게 되므로 보다 현실적인 피폭 경로를 고려하게 된다. 개발된 모델은 추가 호기 가동에 의한 영향 등을 포함한

## 참 고 문 헌

1. USNRC, Reg. Guide 1.109.
2. 10 CFR 20 Appendix B.
3. LADTAP II User's Manual.
4. Adams, E. E., Harleman et al., "Near Far Field Analysis of Buoyant and Surface Discharges into Large Bodies of Water," Technical Report 205, MIT, (1975).
5. Adams E. E. et al., "Heat Disposal in the water Environment," MIT, (1979).
6. 영광원자력본부 주변 주민 선량 계산 지침서 (ODCM).
7. Jirka et al., "Properties of Buoyant Surface Jets," J. Hydr. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 107, (1981).
8. USNRC, Reg. Guide 1.113, "Estimating Aquatic Dispersion of Effluents from Accidental and Routine Release."
9. NUREG/CR-3332 Ch3, "Transport of Radionuclides in Surface Water", USNRC (1983).