

피폭선량 해석과 대기확산계수 결정

한국에너지연구소 방사선환경연구실

金炳佑 · 韓文熙 · 李英馥 · 李鉦浩

요 약

원자발전소의 가동에 따른 기체상 방사성물질의 방출로부터 주변주민이 받는 피해는 정상상태와 사고 경우로 나뉘어서 해석하게 된다. 정상상태 경우 방사성물질의 대기확산 모델은 주로 연평균 통계치를 사용하는 Gaussian식을 채택하나 사고결과 해석시에는 풍향·풍속의 변화를 추적하는 실시간(real time) 확산모델을 이용한다.

본고에서는 고리 원자력발전소의 정상가동에 따른 1977~1982년 6개년에 걸친 주변주민의 피폭선량을 Gaussian 직선제도 모델에 의한 대기확산인자치로 계산하였으며 사고경우에 대해서 요구되는 대상지역 주변의 대기확산계수 특성치를 구하는 간편한 영상처리방식을 실제 실험을 통해 제시하였다.

서 론

원자력발전소의 가동에 따른 기체상 방사성물질의 방출은 여러 경로를 통해 주변주민을 피폭시킨다. 방사성물질이 원자력발전소로부터 대상주민까지 이동·확산하여 각 경로, 부위별로 주는 피폭선량을 계산하는데 있어 가장 가변성과 오차를 많이 가지는 단계가 대기확산 부분이다.

정상가동에 따른 영향은, 1년이란 장기간을 대상으로 하여 부지경계선상에서 최대개인피폭선량과 반경 80km내 대중피폭선량으로 평가한다. 이 경우 1년 연평균 대기확산인자를 구하기 위해서는 일반적인 Gaussian 모델에 기초하며, 인구, 농수산 등 각종 자료와 함께 피폭경로, 피폭부위, 연령별로 피폭선량을 계산한다. 이와 같이하여 1977년~1982년까지 6년에 걸쳐 고리 1호기로부터 방출된 기체상 방사성물질에 의한 주민의 영향을 평가했다.

한편, 발전소 가동에 따른 확률론적 위해도 분석보다 실제 사고결과를 예측하여 재해대책을 수립해야 할 때 Gaussian 모델은 풍향·풍속의 변화, meandering과 지형구조에 의한 와류, 해풍에 의한 순환을 고려할 수 없다. 따라서 근래 완전해법 보다 수치해석법에 의한 추산방식으로 방사성물질의 거동을 실시간으로 추

적하고 있으며¹⁾, 이 경우 50~60년대 미국의 평탄한 지형 위에서 얻은 대기확산 실험결과인 Pasquill-Gifford 폭선²⁾상의 대기확산계수를 사용하면 심한 오차를 파생시킨다. 그것은 한국의 원자력발전소 주변의 지형구조가 기복이 심하며 해안에 위치해 있기 때문이다. 따라서 실제 부지주변의 대기확산계수 특성치를 구하여야 하며 이를 위해 최근 개발한 저렴하고 효율적인 영상처리방식과 풍동장치(wind tunnel)에 의한 그 처리방법의 실증을 제시하였다.

장기 대기확산인자와 피폭선량 계산

원자력발전소로부터 방출되는 기체상 방사성물질은 각종 방사성핵종에 따른 신체영향, 반감기등을 고려하여 미국 10CFR20에 그 방출규제를 설정하고 있다. 여러 처리장치와 감시체제를 거쳐 미량으로 방출되는 이들 물질은 대기의 거동에 따라 이동, 확산 및 침적되고 각 경로에 따라 외부 및 내부 피폭을 준다. 이를 계산하기 위해 먼저 장기 대기확산에 타당한 Gaussian 직선 제도 모델에 근거한 Sagendorf 식을 아래와 같이 채택했다³⁾.

$$\bar{C}(x) = \frac{f}{2\pi x/n} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q'}{\pi \sigma_y \sigma_z \bar{u}} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] dy \quad (1)$$

$\bar{C}(x)$: 풍하거리 x 에서 대기중 방사성물질의 농도 Ci/m^3

Q' : 방사성물질의 방출속도, Ci/sec

σ_y, σ_z : 대기안정도에 따른 수평, 수직확산 표준편차, m

f : 주어진 소구역으로 바람이 불 시간의 분율

n : 고려할 대상 구역수

$2\pi x/n$: 소구역의 폭

h : 방출고도, m

\bar{u} : 평균풍속, m/sec

이 식을 부지 주변 16방위별로 나누어 $h=0$ 인 지표면 방출로 고려하면,

$$\frac{\bar{C}}{Q} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{8}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^M \frac{f_i}{\sigma_{zi} \bar{u}_i x} \quad (2)$$

i, M : 대기안정도

즉, 발전소로부터 $Q Ci/sec$ 의 방사성물질 방출속도와, 평균풍속 \bar{u} 및 대기안정도에 따른 Pasquill-Gifford 확산상의 대기확산계수 σ 를 알면 임의 지역에서의 대기중 방사능농도 \bar{C} 가 결정된다. 이를 전산 프로그래밍하여 고리 원자력발전소 기상탑으로부터 입수한 매 15분 간격의 1년에 걸친 35,040개의 풍향, 풍속, 대기안정도자료를 1977~1982년 6년에 대해 처리하여 대기확산인자값을 계산하였다.

다음, 이들 값으로부터 방사성붕괴에 의한 감소, 감소 및 침적을 보정하고 각종 인구, 농수산 자료등과 함께 미국 규제지침(Regulatory Guide) 1.109의 해석식에 의해 각 피폭경로별로 선량을 GASPARD¹⁰ 전산코드로 계산했다.

피폭경로는 방사성기체 구름과 방사성물질의 침적에 의한 지표면오염으로부터 외부피폭과, 호흡 및 채소·목류·육류·우유 섭취에 의한 내부피폭으로 나뉘었다. 관여하는 방사성핵종은 요오드, 트리튬, 불활성기체 및 핵분열물질과 전이금속으로, 피폭부위는 전신,

피부, 갑상선, 기관지등 8개 신체기관으로 고려한다.

영양상처리에 의한 대기확산계수의 결정

1. 이론

기동력학적 와류, 해안·삼림·도시·수권(水圈)과 기복이 심한 지형에서는 Pasquill-Gifford 확산계수곡선이나 이에 근거한 Brigg의 해석식⁵⁾ 및 Smith, Wendell, Heffter의 단순식이나 Johnson의 Fickian 식⁶⁾ 등의 사용은 심한 오차를 발생시킨다. 따라서 지형의 기복이 있고 해안에 위치한 한국의 원자력발전소의 가상적 사고에 대처하기 위해선 부지 주변의 대기확산계수 특성치들을 찾아내어야 한다.

이를 위해서 수많은 노동력, 시간, 경비가 소요되던 기존 확산실험 방식을 지양하고 Gifford의 smoke-plume이론⁷⁾에 영양처리(image processing) 기법을 적용하여 대기확산계수를 결정기 위해, 풍동장치 실험을 통하여 그 정확성을 검토했다.

먼저 Robert⁸⁾의 opacity-law에 근거한 Gifford의 이론은 아래와 같다. 방출원으로부터 배출되는 방사성 물질은 순간적으로 meandering 현상을 보이며 시간의 경과에 따라 이를 중첩시킬 경우 Fig. 1과 같은 형태를 취한다. 방출원으로부터 거리에 따른 오염물질의 농도편차는 Gaussian 분포를 가진다고 하면

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right\} \quad (3)$$

이며 이를 x 방향으로 적분시키면,

$$\int_0^\infty C dz = \frac{Q \exp(-y^2/2\sigma_y^2)}{2\sqrt{2\pi}\sigma_y\bar{u}} \quad (4)$$

와 같다. Plume의 가시(可視) 가장자리를 시야의 누적선이라고 하면,

$$C_{ILS} = \int_0^\infty C dz \quad \& \quad C_{ILS}(y_e) = C_e = \text{Const} \quad (5)$$

C_{ILS} : 누적선에서 방사성물질의 농도

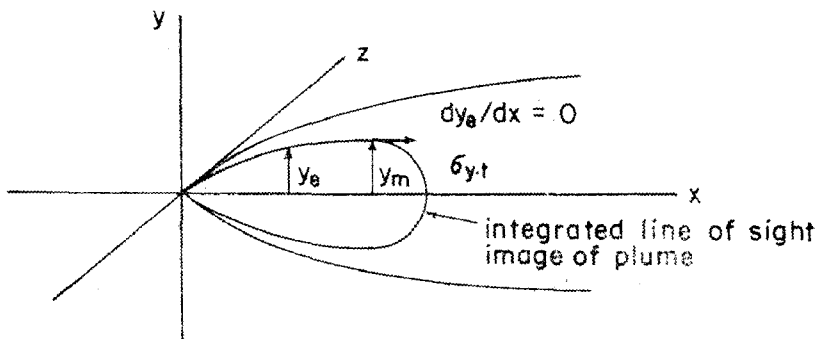


Fig. 1. Image of time averaged plume.

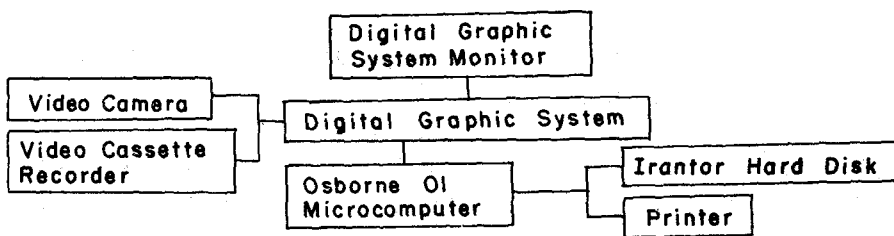


Fig. 2. Schematic diagram of plume image processing.

$y_e=0$ 에서 $\sigma_y=\sigma_{yT}$ 이므로

$$C_e/Q=1/C_2\sqrt{2\pi}\sigma_y\bar{u} \quad (6)$$

(6)식을 (5)식으로 나누면,

$$\sigma_y/\sigma_{yT}=\exp(-y_e^2/2\sigma_y^2) \quad (7)$$

Logarithm을 취해 미분하면

$$\frac{d y_e}{d x} = \frac{\sigma_y}{y_e} \left(\frac{y_e^2 - \sigma_y^2}{\sigma_y^2} \right) \frac{d \sigma_y}{d x} \quad (8)$$

$y_e=\sigma_y$ 이면 $d y_e/d x=0$ 이므로

$$y_e^2 = \sigma_y^2 = y_m^2 \quad (9)$$

(7), (9)식에 의해

$$e y_m^2 = \sigma_{yT}^2 \quad (10)$$

식 (7)을 다시 쓰면

$$\sigma_y = y_e \left\{ \ln \left(\frac{e y_m^2}{\sigma_y^2} \right) \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

즉, σ_y 를 plume-image의 y 값으로 계산할 수 있다.

2. 실험 방법

먼저 일정속도로 oil fog smoke를 풍동장치에서 발생시켜 1m/sec의 풍속으로 분산시킨다. 이를 터널 각 거리마다 노출시간 4분으로 촬영하고 동시에 video camera로 연속촬영한다. 다음 배탄 tracer 가스를 분산시키며 gas chromatograph FID를 사용하여 위와 같은 방식으로 농도를 측정하고, hot film probe로 풍속과 난류강도등을 측정한다. 촬영한 image를 Fig. 2의 digital image processing system을 거쳐 전산처리한다. 다음 d/p(distance/pixel) 값을 구해 plume 폭을 구하고 host computer내 software를 사용하여 pixel당 slice를 절단하여 hard disk에 저장한다. plume slice 각 부분의 명도를 인쇄하고 break point를 설정하며 앞의 이론에 따른 y_e 와 σ_y 를 계산한다.

결과 및 고찰

대기확산인자 계산과 피폭선량해석식으로 구한 고리 1호기 주변주변의 77~82년 6년간의 피폭선량 결과와 영상처리방식에 의한 대기확산계수 결정의 풍동장치 실험결과를 제시한다.

1. 대기확산인자치와 피폭선량

1) 기체상 방사성물질 총배출량과 대기확산인자치

77~82년간에 미국 10 CFR 20 방출규제치 이하로 방출된 기체상 방사성물질은 Ar 41, Xe 133, Xe 135, Xe 133M, Xe 135M, Kr 85, Kr 87, Co 58, Co 60, Mn 54, Cr 51, Fe 59, Zr 95, Nb 95, Cs 134, Cs 137, Tc 99M, Ru 88, Ru 103, I 131, I 133 및 H 3 등이며 Fig. 3에서 보는 바와 같이 증가 추세를 보여 주고 있다.⁹⁾ 주의할 점은 해마다 증가한 방출량에 비례해서 피폭선량이 증가하지는 않는 것이다. 그것은 방사성물질의 반감기와 피폭경로에 따라 피해정도가 달라지기 때문이다. 즉 기체상 방사성물질 방출량의 대부분인 불활성기체는 그 반감기가 짧아 민감한 영향을 주지 않는 반면, 반감기가 긴 입자성 물질은 지표면침적등으로 인한 오염에 의해 민감한 영향을 미친다.

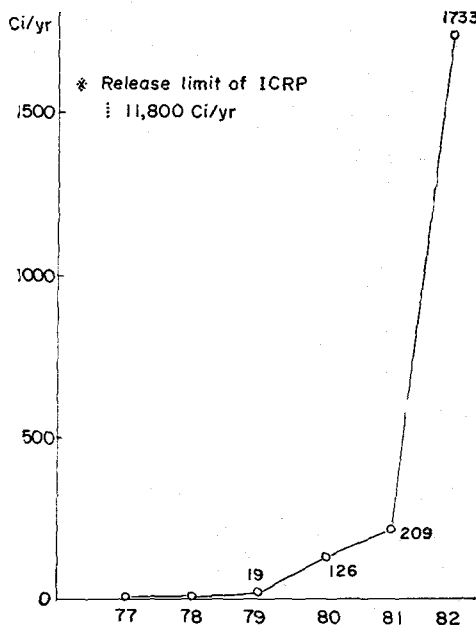


Fig. 3. Yearly total radioactivity of gaseous effluents for Kori Unit 1.

Table 1. Atmospheric diffusion factor, C/Q(sec/m³) Kori 1, 1982.

DIR	0.0~1.	1.~2.	2.~3.	3.~4.	4.~5.	5.~10.	10.~20.	20.~30.	30.~40.	40.~50.
N	1.190E-05	2.380E-06	1.250E-06	2.010E-07	7.760E-08	3.380E-08	1.320E-08	7.620E-09	3.920E-09	2.160E-09
NNE	1.980E-05	3.970E-06	2.070E-06	3.370E-07	1.310E-07	5.670E-08	2.260E-08	1.310E-08	6.760E-09	3.740E-09
NE	2.470E-05	4.980E-06	2.610E-07	4.210E-07	1.620E-07	7.070E-08	2.750E-08	1.590E-08	8.200E-09	4.510E-09
ENE	1.470E-05	2.970E-06	1.560E-06	2.520E-07	9.670E-08	4.200E-08	1.630E-08	9.400E-09	4.840E-09	2.650E-09
E	1.440E-05	2.930E-06	1.540E-06	2.480E-07	9.500E-08	4.120E-08	1.600E-08	9.230E-09	4.750E-09	2.610E-09
ESE	1.620E-05	3.270E-06	1.720E-06	2.780E-07	1.070E-07	4.680E-08	1.820E-08	1.060E-08	5.460E-09	3.010E-09
SE	1.330E-05	2.690E-06	1.410E-06	2.270E-07	8.720E-08	3.780E-08	1.470E-08	8.470E-09	4.350E-09	2.390E-09
SSE	1.930E-05	3.890E-06	2.030E-06	3.300E-07	1.280E-07	5.620E-08	2.200E-08	1.280E-08	6.580E-09	3.640E-09
S	2.380E-05	4.790E-06	2.510E-06	4.060E-07	1.580E-07	6.940E-08	2.720E-08	1.580E-08	8.170E-09	4.520E-09
SSW	1.550E-05	3.150E-06	1.650E-06	2.680E-07	1.030E-07	4.500E-08	1.750E-08	1.020E-08	5.250E-09	2.890E-09
SW	1.430E-05	2.900E-06	1.530E-06	2.450E-07	9.400E-08	4.070E-08	1.580E-08	9.110E-09	4.690E-09	2.570E-09
WSW	9.370E-06	1.900E-06	9.980E-07	1.610E-07	6.180E-08	2.690E-08	1.050E-08	6.060E-09	3.130E-09	1.720E-09
W	7.050E-06	1.420E-06	7.440E-07	1.190E-07	4.570E-08	1.990E-08	7.700E-09	4.450E-09	2.280E-09	1.250E-09
WNW	4.640E-06	9.350E-07	4.910E-07	7.810E-08	2.960E-08	1.280E-08	4.910E-09	2.820E-09	1.440E-09	7.880E-10
NW	5.260E-06	1.060E-06	5.550E-07	8.710E-08	3.250E-08	1.390E-08	5.260E-09	2.990E-09	1.510E-09	8.140E-10
NNW	5.400E-06	1.100E-06	5.810E-07	9.210E-08	3.450E-08	1.470E-08	5.620E-09	3.200E-09	1.630E-09	8.810E-10

Table 2. Gross wind rose (in % of total observation) in the Kori 1 site, 1982.

	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	CALM
8.1	7.4	4.6	3.1	2.0	2.5	2.6	5.2	8.4	11.0	6.7	7.1	6.9	4.9	7.6	11.9	0.1	

Table 3. Maximum individual doses from the gaseous radioactive effluents of Kori unit 1.

	Gaseous effluents (Ci/yr)	Dose for adult (mrem/yr)			Annual beta air dose (mrad/yr)	Annual gamma air dose (mrad/yr)
		T. Body	Thyroid	Skin		
1 9 7 7	35×10 ⁻⁶	1.49×10 ⁻⁵	1.45×10 ⁻⁵	1.7×10 ⁻⁵	0.	0.
1 9 7 8	13×10 ⁻⁶	3.09×10 ⁻³	3.03×10 ⁻³	3.56×10 ⁻³	0.	0.
1 9 7 9	19	0.033	5.929	0.029	1.01×10 ⁻³	2.02×10 ⁻³
1 9 8 0	126	20.14	16.65	18.11	1.09×10 ⁻²	3.67×10 ⁻³
1 9 8 1	209	0.01	0.13	0.02	1.90×10 ⁻²	6.42×10 ⁻³
1 9 8 2	1,733	0.10	0.11	0.21	2.88×10 ⁻¹	9.69×10 ⁻²
10 CFR 50, Appendix I	—	5	15	15	20	10
ICRP Recommendation	11,800	500	3000	3000	—	—
FSAR	—	3.04	16.27	—	—	—

한편 6개년 중 1982년의 16개 방위별, 10개 거리구간별 대기확산인자치는 Table 1과 같으며 풍향의 빈도는 Table 2의 gross wind rose를 볼 때 북풍과 남서풍이 주요한 것으로 평가되었다.

2) 최대개인 및 대중 피폭선량

미국 10 CFR 50, Appendix I에 제시된 설계목표치로서의 최대개인피폭선량은 전신, 갑상선 및 피부에 대해서 각각 5, 15, 15mrem/yr이고 β 및 γ 공간선량율은 20 및 10 mrad/yr로 주어져 있다. 위의 방출량과 대기확산인자 및 각종 사회환경 자료를 사용하여 GAS-PAR 전산코드에 의해 계산한 고리 부지경계선상의 최대개인피폭선량은 Table 3과 같다.

1980년을 제외한 5년간에 있어 계산결과는 설계목표치를 훨씬 하회하여 무시할 정도의 값을 보여주고 있다. 그러나 1980년 경우는 설계목표치를 상회하고 있으며 이는 반감기가 긴 입자성 방사성물질의 방출에 따라 이들 입자의 지표면침적에 의한 오염에 기인했다. Table 3의 ICRP 권고치나, 개인이 원자력발전과 전혀 무관한 상태에서 환경방사능으로부터 받는 1년 피폭선량 추정치 100 mrem에 비하면, 비록 설계목표치를 상회했어도 그 영향은 역시 무시할 정도이다.

한편 고리부지 반경 50mile(80km) 이내에 거주하는 인구수는 1980년 이미 천만명선을 넘어서고 있으며¹⁰⁾ 미국 TMI-2 사고시 주변인구의 5배가 되고 있다. 1~50mile 반경내 16개 방위별로 산출한 인구자료, 대기확산인자와 그 감소효과, 채소류·곡류·육류·우유 생산량 등을 통계처리하여 계산한 대중피폭선량을 Fig. 4에 제시하였다. 77~82년까지 1.7×10⁻⁵, 3.5×10⁻³, 5.5×10⁻¹, 3.4×10², 2.2×10⁻¹, 5.7 person-rem로 1980년의 335 person-rem을 제외하고는 모두 낮은 값을 보이고 있다. 1980년의 경우는 방사성 부유입자의

방출로 증가했지만 캐나다의 대중선량 한계치 10,000 person-rem/yr나 TMI 사고시 4260 person-rem¹¹⁾에 비해 비교가 되지 않을 정도이다.

2. 대기확산계수의 결정

영상처리 방식과, hot-film probe에 의한 난류의 직접 측정방식의 두 결과를 Table 4에서 비교하였으며 여러 기상 매개변의 값들이 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이 값들은 실제 야의 실험에서 고감도의 난류 측정기로 찾아내기엔 현실성이 희박하여, 영상 처리에 의한 방식의 효율성을 부각시켜 주고 있다.

풍동장치 내에서 확산계수를 구하기 위해 일반적인 방식으로 gas chromatograph에 의해 분산된 tracer 물질 methane의 농도를 분석하여 얻은 확산계수와, oil smoke의 발생후 이의 확산과정을 촬영해 영상처리

Table 4. Turbulence parameters derived from smoke-plume photographs and direct wind measurements.

Quantity	Symbol	Estimated from smoke plume analyses	Derived from turbulence measurements
RMS crosswind velocity	σ_v	8.7cm/s	9.1cm/s
Lagrangian integral timescale	τ_L	3.1s	3.0s
Eddy diffusivity	κ	233cm ² /s	250cm ² /s
Eddy dissipation rate	ϵ	23.4cm ² /s ³	23.8cm ² /s ³
Turbulence intensity	i	8.7%	9.2%

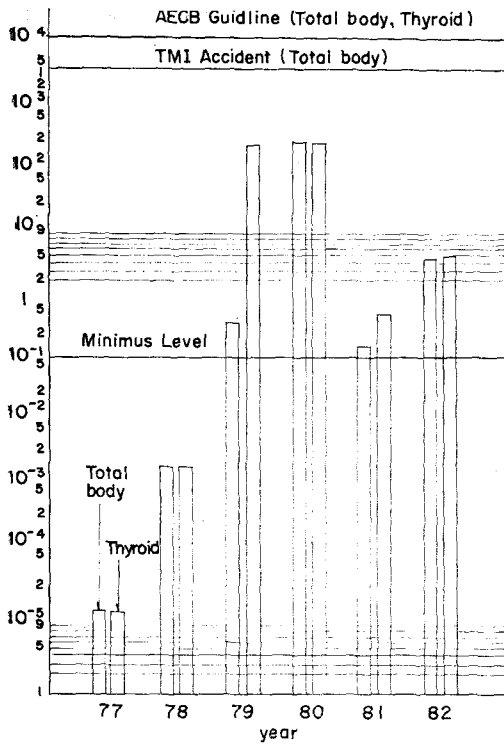


Fig. 4. Population doses for Kori unit 1.

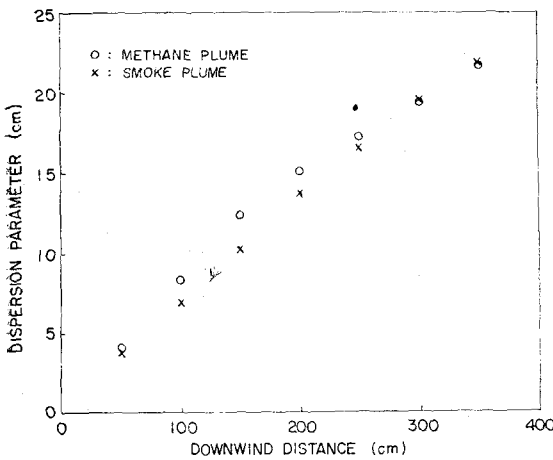


Fig. 5. Dispersion parameters derived from smoke-plume photographs and direct methane concentration analysis by gas-chromatograph.

방식으로 분석한 확산계수를 풍하거리에 대해 도시한 것이 Fig. 5이다. 대기확산계수의 두 방식에 의한 결과치가 거의 일치하고 있다.

결론

원자력발전소로부터 방출되는 기체상 방사성물질에 의한 피폭선량 해석에 있어 가장 불확실성과 오차가 큰 대기확산부분을 정상상태와 사고경우로 나누어 고찰했다.

정상상태 경우에 있어선 일반적인 Gaussian 직선계도모델이 타당하여 이 모델로 계산한 장기 대기확산인 자치와 각종 사회환경 자료를 이용하여 고리 1호기의 77~82년 사이 연 최대개인 및 대중 피폭선량을 계산한 결과 1980년을 제외한 5년은 설계목표치를 하회하는 피폭선량을 보였으며, 1980년 경우는 설계목표치는 상회했으나 ICRP의 권고치에 비해 무시할 정도의 값을 나타내었다.

사고결과에 해석에 쓰이는 수치해석 방식에 있어서는 장기성 대기확산 모델과는 달리 부지주변의 대기확산계수 특성치가 필요하며 이를 결정하기 위해 효율적인 영상처리 방식을 적용한 결과 풍동장치 내에서 정 확한 결과를 나타내었다.

참고 문헌

- 1) US NRC, PRA Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants, NUREG/CR-2300, Vol. 2, D1-D38 (1983)
- 2) D H Slade, Meteorology and Atomic Energy, 102~103, US AEC (1965)
- 3) US NRC, Regulatory Guide 1. 111 (1977)
- 4) K.F. Eckerman and D.G. Lash, GASPAR: Evaluation of Atmospheric Releases, US NRC (1977)
- 5) S.R. Hanna, G.A. Briggs and R.P. Hosker, Handbook on Atmospheric Diffusion, DOE/TIC-11223, 30, NTIS (1982)
- 6) R.L. Drake, Mathematical Models for Atmospheric Pollutants, EPRI EA-1131, EPRI (1979)
- 7) F. Gifford, Smoke Plumes as Quantitative Air Pollution Indices, J. Air. Poll., 2, 42~50 (1959)
- 8) O.F.T. Roberts, The Theoretical Scattering of Smoke in a Turbulent Atmosphere, Proc. of the Royal Soc. of London, 640~654 (1923)
- 9) 이정호 외 21인, 환경감시방법의 표준화연구,

KAERI/RR-423/83, MOST (1984)
 10) 경제기획원, 1980, 인구 및 주택센서스속보(1980)

11) P.F. Knight, A Review of the Population Rad-
 iation Exposure at TMI-2, NSAC-26 (1981)

**Analysis of Exposure Doses and Determination of
 Atmospheric Diffusion Coefficients**

**Byung Woo Kim, Moon Hwee Han,
 Young Bok Lee, and Jeong Ho Lee**

*Radiation Environment Division, Korea Advanced Energy Research Institute,
 Seoul, Korea*

=Abstract=

The exposure doses by the radioactive gaseous effluents from nuclear power plants are investigated in the two cases of normal operation and hypothetical accident.

Gaussian equation is adapted in the normal operation as the diffusion model of effluents for long period, which uses annual average meteorological data. But the real time models have been used in the case of accidents which analyze the changes of wind direction and speed.

In this study the annual exposure doses by the normal operation of Kori unit 1 during 1977~1982 were calculated on the basis of the atmospheric diffusion factor by the Gaussian straight line model. And the image processing technique was suggested as the effective method through the wind tunnel experiments to get the characteristic value of atmospheric diffusion coefficient required especially in the accidents of nuclear power plants.