

기상자료의 통계처리방법이 원자력발전소의 가상 사고시 단기 대기확산인자에 미치는 영향

황원태, 김은한, 정해선, 정효준, 한문희

한국원자력연구원

2012년 6월 15일 접수 / 2012년 7월 12일 1차 수정 / 2012년 7월 25일 2차 수정 / 2012년 7월 29일 채택

미국 원자력규제위원회(U. S. NRC)에서 개발한 PAVAN 프로그램을 사용하여 기상자료의 통계처리방법에 따른 원자력 발전소의 수명기간 중 발생할 수 있는 가상 사고시 단기 대기확산인자 값의 영향을 분석하였다. 대기확산을 평가하기 위한 기본요소는 기상자료이며, PAVAN에서는 대기안정도에 대한 풍향과 풍속의 발생빈도를 나타내는 결합빈도분포 자료를 사용하여 평가한다. 고리와 월성 원자력발전소 부지에서 2006~2010년까지 5년간 관측된 기상자료를 사용하여 풍속등급의 분류방법(U. S. NRC 권고와 균등발생빈도 분류방법)과 평가에 적용되는 기상자료의 통계처리기간(1년, 2년, 3년, 4년, 5년)에 따른 결합빈도분포자료를 작성하여 단기 대기확산인자를 평가하였다. 평가결과, 두 원자력발전소 부지 모두 풍속등급의 분류에 따른 단기 대기확산인자 값의 영향은 미미한 반면 평가에 적용되는 기상자료의 분석 기간은 상대적으로 중요한 영향을 나타냈는데, 최대값과 최소값의 비는 1.5배 이상의 차이를 보였다.

중심어: 가상사고, 단기 대기확산인자, 결합빈도분포자료, PAVAN

1. 서론

안전성분석보고서(Safety Analysis Report; SAR)는 원자력발전소(이하 원전)를 포함하는 모든 원자력시설의 건설 및 운영 인허가 신청을 위한 필수 문서이다. 동 보고서에는 원자력시설의 수명기간 중에 발생할지 모르는 만일의 사고를 가상하여 설령 그러한 사고가 발생하더라도 제한구역경계에 위치한 일반인의 방사능 위해가 기준치 이내임을 입증해야 한다.

원자력시설의 사고로 인해 대기로 누설된 방사성물질은 주변의 기상상태에 따라 이류(advection), 확산(diffusion)되어 인체에 영향을 주게 된다. 이러한 사고는 어떤 기상조건에서 발생할지 예측하기 힘들기 때문에 현재까지 수집된 부지기상자료를 사용하여 보수적으로 확산을 평가한다. 사고로 인한 방사선 피폭의 영향은 공기중 농도에 정비례하며, 방사성물질이 단위 방출률로 누설되었을 때 공기중 농도를 나타내는 대기확산인자를 사용하여 평가한다. 미국 원자력규제위원회(U. S. Nuclear Regulatory Commission; U. S. NRC)에서는 원자력시설이 위치한 부지에서 대기확산인자 평가를 위한 기상관측탑의 설치요건, 측정해야 할 기상요소, 기상관측방법, 수집된 기상자료의 통계처리방법 등에 대한 지침을 제공한다[1]. 또한 수집된 기상자료를 사용하여 가상 사고에 대해 0~2시간 대기확산인자(단기 대기확산인자)를 평가하

기 위한 방법에 대한 지침[2]과 아울러 동 지침을 이행하는 규제검증용 프로그램인 PAVAN [3]을 제공하고 있다. 가상 사고에 따른 기상자료수집 및 대기확산인자평가에 대한 국내 지침은 상기 U. S. NRC 규제지침을 기반으로 하여 원자력안전위원회 고시 2011-19호(원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사평가 기준)[4]로 법제화되어 있다.

규제검증용 프로그램 PAVAN에서 단기 대기확산인자의 평가는 측정된 기상요소 값을 이용한 대기안정도에 따른 풍향과 풍속구간의 발생빈도를 나타내는 결합빈도분포자료(joint frequency distribution data)를 사용한다. U. S. NRC 규제지침[2]에서 권고하는 결합빈도분포자료의 작성지침은 평가하고자 하는 부지에 대한 특별한 정보가 없는 경우에 일반적으로 적용 가능한 방법을 기술하고 있으며, 해당 원자력시설이 위치한 부지에 적용 타당성은 단계적 분석과 고찰을 통해 검토되어야 한다. 그럼에도 불구하고 지금까지 국내 사례를 보면 대부분의 경우 U. S. NRC에서 권고하는 방법을 준용하여 왔다.

본 연구에서는 국내 원전 부지에서 측정된 기상자료를 이용하여 가상 사고시 기상자료의 통계분석 방법(풍속구간의 분류, 평가에 적용되는 기상자료의 분석기간)에 따른 대기확산인자 값의 영향을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 사고시 대기확산인자

현재 국내에는 가압경수로와 가압중수로가 운영되고

책임저자: 황원태, wthwang@kaeri.re.kr
대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111 한국원자력연구원 (305-353)

있으며, 만일의 사고가 발생하는 경우에는 설계 특성상 방사성물질이 원자로 건물의 환기계통을 통해 혹은 누설 등으로 인해 환경으로 방출된다. U. S. NRC와 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA) 등의 기관에서는 이러한 유형의 방출을 지표면 방출(ground release)로 간주하여 평가하도록 권고하고 있다 [2,5]. U. S. NRC에서는 지표면 방출에 대한 단기 대기확산인자를 직선계적 Gaussian 플룸 모델(straight-line Gaussian plume model)을 사용하여 다음의 식과 같이 평가하도록 권고하고 있다[2].

$$\chi/Q = \frac{1}{U_{10}(\pi\sigma_y\sigma_z + A/2)} \quad (1)$$

$$\chi/Q = \frac{1}{U_{10}(3\pi\sigma_y\sigma_z)} \quad (2)$$

$$\chi/Q = \frac{1}{U_{10}\pi\sum_y\sigma_z} \quad (3)$$

- 여기서,
 χ/Q : 플룸 중심선의 지표면 위 단기 대기확산인자 [sec · m⁻³]
 U_{10} : 10 m에서 측정된 풍속 [m · sec⁻¹]
 σ_y : 수평확산계수 [m]
 σ_z : 수직확산계수 [m]
 \sum_y : 플룸의 사행효과(meandering effect)를 반영한 수평확산계수 [m]

플룸의 사행효과는 풍속이 낮고 대기가 안정할 경우에

플룸이 직선계적이 아닌 지그재그 움직임으로 인해 실제 이동거리가 길어지고 이에 따라 보다 많은 확산을 고려하기 위한 것이다.

풍속이 6 m · sec⁻¹보다 낮고 대기안정도가 중립(대기안정도 등급 D) 또는 안정상태(대기안정도 등급 E, F, G)에서는 수평방향으로 플룸의 사행효과가 고려된다. 이러한 기상조건에서는 식 (1)과 식 (2)로 평가된 대기확산인자 값 중에서 보다 높은 값이 선택되고, 선택된 값이 식 (3)으로 평가된 대기확산인자 값과 비교하여 보다 큰 값이 최종적으로 선택된다. 상기 기상조건 이외의 경우에 대해서는 식 (1)과 식 (2)로 평가된 대기확산인자 값 중에서 보다 높은 값이 선택된다. 이렇게 계산된 대기확산인자 값은 부지에서 측정된 기상자료의 결합빈도분포자료를 사용하여 16개 방향과 모든 방향에 대한 대기확산인자 값의 누적분포확률을 구한다. 이들로부터 총 시간의 방위별 0.5% 값과 모든 방향의 5% 값을 초과하지 않을 대기확산인자 값을 구한다. 16개 방위에 대해 가장 높은 대기확산인자 값과 모든 방향에 대한 대기확산인자 값을 비교하여 보다 큰 값이 최종적으로 해당 부지에 대한 단기 대기확산인자 값으로 결정되어 사고시 피폭선량평가에 활용된다.

2.2 기상자료분석

가압경수로와 가압중수로를 각각 대표할 수 있는 고리와 월성 원전부지에서 2006년부터 2010년까지 5년간 10 m의 높이에서 측정된 기상자료를 수집하여 분석하였다.

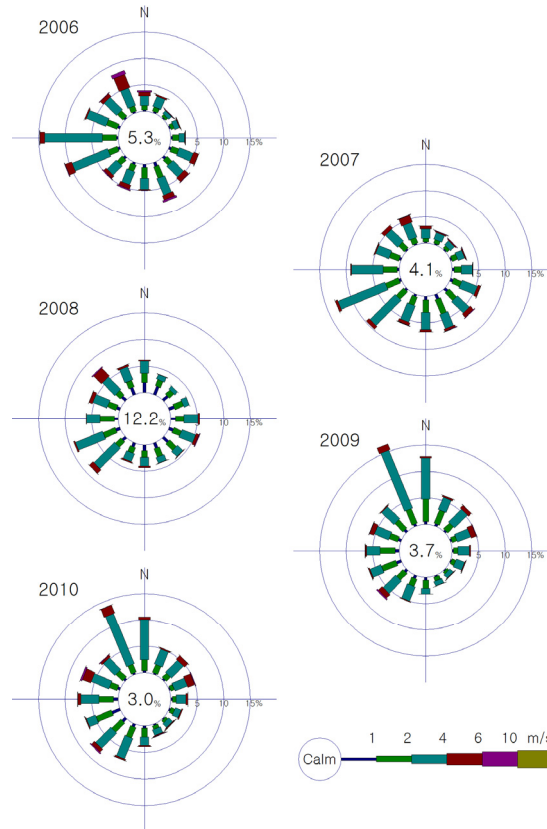


Fig. 1. Annual wind roses in Kori site (Each percent in the center of the circles represents an occurrence probability of calm condition).

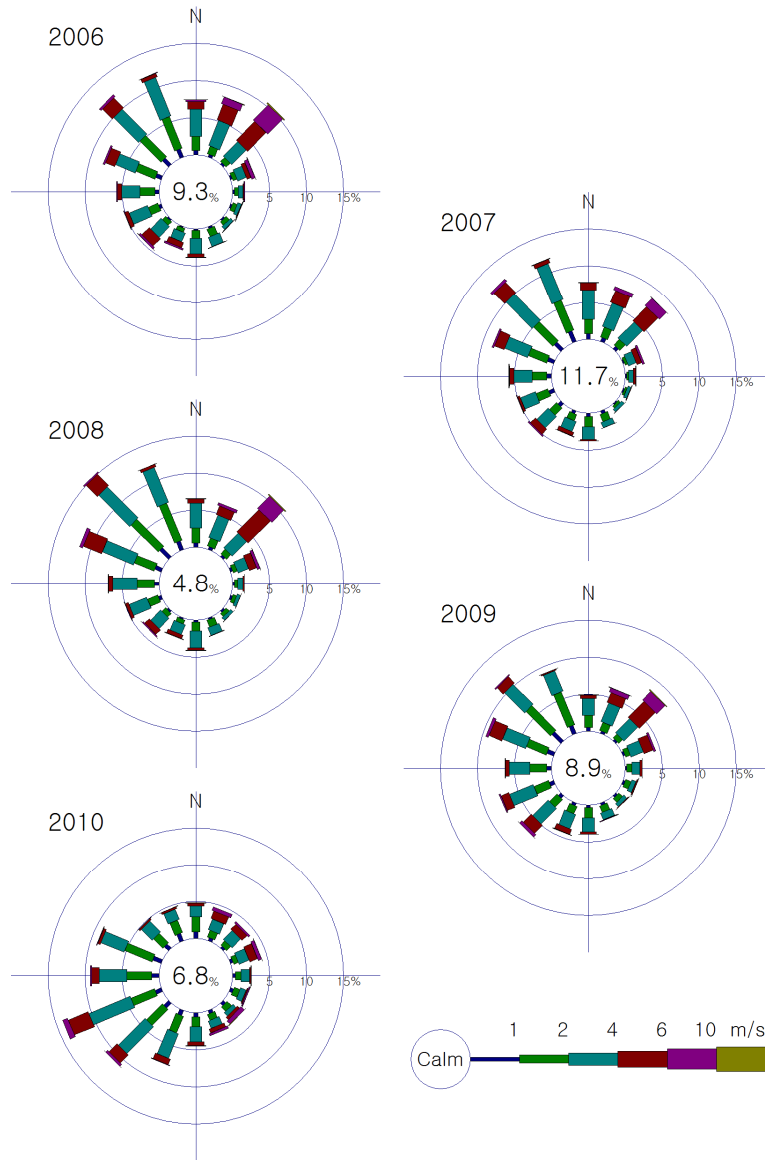


Fig. 2. Annual wind roses in Wolsung site (Each percent in the center of the circles represents an occurrence probability of calm condition).

그림 1과 그림 2는 각각 고리와 월성부지에서 관측된 기상자료를 분석한 연도별 바람장미(wind rose)를 보여 준다. 단기 대기확산인자 값은 확산이 잘 되지 않는 악한 기상조건 (풍속이 낮고 대기가 안정한 경우)의 발생확률이 중요한 인자이다. 대기확산인자 값은 풍속에 반비례하며, 이러한 관점에서 보면 바람이 거의 불지 않는 정온상태(calm condition ; 일반적으로 풍속이 $\leq 0.5 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ 로 정의)의 발생빈도는 고리부지가 월성부지에 비해 상대적으로 적게 관측되어 다른 기상조건이 동일하다고 가정하였을 경우 고리부지가 보다 양호하다고 추정할 수 있다. 다만 2008년도에 고리부지에서 관측된 정온상태의 발생빈도(12.2%)는 다른 해에 비해 3~4배가 많을 뿐 아니라 월성부지에서 5년간 관측기간 중에서 가장 높은 해의 발생빈도(11.7%)보다도 많이 관측되는 특이 현상을 나타내었다.

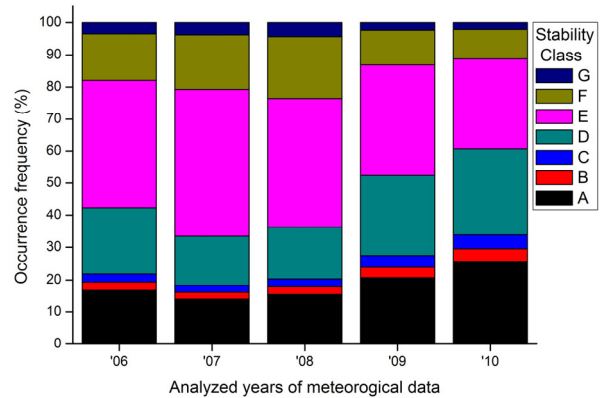


Fig. 3. Annual occurrence probabilities of atmospheric stability in Kori site (A: Very unstable, B: Unstable, C: Slightly unstable, D: Neutral, E: Slightly stable, F: Stable, G: Very stable).

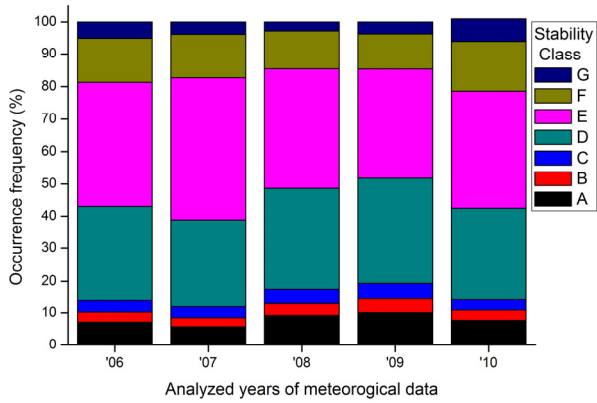


Fig. 4. Annual occurrence probabilities atmospheric stability in Wolsung site (A: Very unstable, B: Unstable, C: Slightly unstable, D: Neutral, E: Slightly stable, F: Stable, G: Very stable).

그림 3과 그림 4는 각각 고리와 월성부지에서 관측된 대기안정도의 연도별 발생빈도를 보여준다. 대기안정도 관점에서 확산에 좋지 않는 기상조건(Pasquill-Gifford 분류등급에 따른 대기안정도 F 혹은 G)은 고리부지의 경우 대기안정도 F 등급이 9.1~19.3%, G 등급이 2.1~4.4%, 월성부지의 경우 대기안정도 F 등급이 10.9~15.5%, G 등급이 2.8~7.1%의 연간 발생빈도를 나타냈다. 대기안정도의 연도별 발생빈도의 변화 폭이 넓어 두 부지의 상대적 확산의 양호성을 판단하기는 쉽지 않다. 다만 확산에 가장 좋지 못한 대기안정도 G 등급 발생확률은 월성부지가 상대적으로 높게 관측되었다.

풍속과 대기안정도 뿐 아니라 풍향의 발생빈도도 단기 대기확산인자에 중요한 영향을 준다. 즉 어떤 특정방향으로 풍향의 발생빈도가 많을 경우 전방향으로 고르게 분포되었을 경우보다 단기 대기확산인자는 높게 나타난다. 고리부지의 경우 최다풍향의 연도별 발생빈도는 9.6~16.6%, 월성부지의 경우 12.2~15.7%를 나타냈다. 대기안정도의 발생빈도와 마찬가지로 연도별 최다 풍향 발생빈도의 변화 폭이 넓어 두 부지의 상대적 확산의 양호성을 논하기는 쉽지 않다.

3. 결과 및 고찰

기상자료는 원자력시설의 사고시 환경으로 누설된 방사성물질의 이동 및 확산을 평가하기 위한 필수요소이다. U. S. NRC에서 개발된 단기 대기확산인자 평가 프로그램 PAVAN은 기상자료의 통계적방법에 근거하여 개발된 것으로, 이들 처리방법에 따라 단기 대기확산인자 값은 차이를 나타낼 수 있다. 이러한 영향을 분석하기 위해 고리와 월성 원전부지에서 2006년부터 2010년까지 5년간 10 m 높이에서 관측된 기상자료를 수집하였으며, 풍속등급의 분류방법과 평가에 적용되는 기상자료의 분석기간에 따라 다른 결합빈도분포자료를 작성하였다. 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 기상자료의 통계분석방법에 따른 영향을 분석하는 것이 주 목적이기 때문에 원자로 건물에 의한 확산영향은 고려하지 않는다.

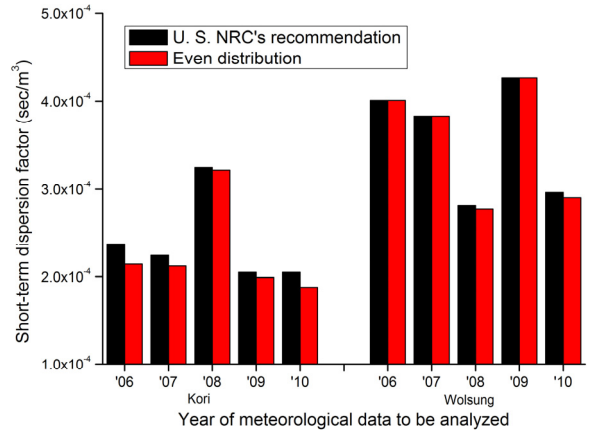


Fig. 5. Short-term atmospheric dispersion factor at the radius 1km from Kori and Wolsung nuclear power plants with different wind speed classifications, when annual meteorological data were used.

풍속구간의 분류에 따른 단기 대기확산인자 값의 영향을 분석하기 위해 U. S. NRC의 규제지침에서 권고하는 풍속등급의 구간(<0.5, 0.5~1.0, 1.1~1.5, 1.6~2.0, 2.1~3.0, 3.1~4.0, 4.1~5.0, 5.1~6.0, 6.1~8.0, 8.1~10.0, >10.0 m·sec⁻¹)과 국내 원전부지의 기상자료를 분석하여 균등 발생빈도를 나타내는 풍속등급의 구간으로 구분하였을 경우 결합빈도분포자료를 각각 작성하여 PAVAN 프로그램의 입력자료로 활용하였다. 풍속등급의 균등 발생빈도를 나타내는 풍속구간을 구분하는 방법은 정온상태를 발생빈도에 관계없이 하나의 등급으로 정하고, 나머지 발생빈도를 사용하여 9개 풍속등급으로 가능한 균등한 분포를 갖도록 구분하였다. 이러한 균등분포의 구분은 각 부지의 5년간 기상자료를 통계처리하여 설정하였다. 다만 고리부지의 경우 2008년도에 관측된 기상자료가 다른 연도와 달리 단기 대기확산인자에 중요한 영향을 미치는 정온상태의 발생빈도가 3~4배 높아 풍속등급의 균등분포를 설정하는데 있어서 왜곡될 수 있어 활용하지 않았다. 이러한 방법으로 얻어진 고리부지의 풍속등급 분류는 <0.5, 0.5~1.2, 1.3~1.6, 1.7~2.0, 2.1~2.3, 2.4~2.6, 2.7~2.9, 3.0~3.3, 3.4~4.0, >4.0 m·sec⁻¹이며, 월성부지의 경우에는 <0.5, 0.5~1.1, 1.2~1.5, 1.6~1.9, 2.0~2.3, 2.4~2.8, 2.9~3.3, 3.4~4.0, 4.1~5.0, >5.0 m·sec⁻¹이다.

그림 5는 고리와 월성부지의 연도별 기상자료를 사용하여 원전으로부터 반경 1 km 지점에서 풍속등급의 분류(U. S. NRC의 권고와 균등 발생분포)에 따른 단기 대기확산인자 값의 변화를 보여준다. 일반적으로 월성부지의 단기 대기확산인자 값이 고리부지보다 높게 나타났으며, 이는 월성부지가 정온상태를 포함한 저풍속 구간의 발생빈도가 상대적으로 많은 것이 가장 큰 요인인 것으로 판단된다. 2008년도 고리부지의 단기 대기확산인자 값이 다른 해에 비해 높게 나타났는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 특이하게도 다른 해에 비해 많은 정온상태가 관측되었기 때문이다. 두 부지 모두 균등 발생분포의 풍속구간으로 구분하였을 경우 U. S. NRC의 권고 풍속등급 구간으로 평가하였을 경우보다 단기 대기확산인자 값이 낮게 나타났다. 그러나 두 부지 모두 값에 대한 변화는 미미하

며, 특히 저풍속이 상대적으로 많은 월성부지의 경우에는 더욱 그러하다. 단기 대기확산인자 값은 확산에 좋지 못한 악한 기상조건에서 결정되기 때문에 이러한 결과가 도출된 반면, 정상 운영시 피폭선량에 활용되는 연간평균 대기확산인자의 경우에는 두 다른 조건의 풍속구간이 차이를 보일 수 있다. 연간평균 대기확산인자는 본 논문의 연구범위를 벗어나기 때문에 논하지 않는다.

U. S. NRC에서 출판한 안전성분석보고서 심사지침서 (NUREG-0800) [6]와 IAEA 보고서[7] 등에서는 평가에 활용되는 기상자료의 분석기간을 명시하지 않고 부지의 대표적인 기상현상을 모사할 수 있는 자료를 사용하도록 권

고하고 있다. 다만 미국의 법규를 준용하여 국내의 경우 원자력시설의 건설허가를 위해서는 최소한 1년, 운영허가를 위해서는 최소한 2년의 기상자료를 사용하여 평가하도록 규정하고 있다[4]. 국내 원전의 현황을 보면 부지 확보의 어려움으로 기존 부지에 추가적으로 건설·운영하는 경우가 많으며, 이 경우 기존 원전의 운영에 따른 방사성유출물관리와 방사능방재 등을 목적으로 이미 오랜 기간동안 기상관측탑이 운영되어 장기간의 자료를 확보하고 있다. 따라서 단기 대기확산인자를 평가함에 있어 적용되는 기상자료의 분석기간이 결과에 중요한 영향을 미칠 수 있다.

Table 1. Short-term Atmospheric Dispersion Factors at the Radius of 1 km from Kori and Wolsung Nuclear Power Plants, in the Case of Considering the Different Periods of Meteorological Data to Be Analyzed.

Years of meteorological data to be analyzed	Short-term atmospheric dispersion factor (sec·m ⁻³)	
	Kori site	Wolsung site
1 year	2006	2.37×10 ⁻⁴
	2007	2.24×10 ⁻⁴
	2008	3.25×10 ⁻⁴
	2009	2.05×10 ⁻⁴
	2010	2.05×10 ⁻⁴
2 year	2006~2007	2.25×10 ⁻⁴
	2007~2008	2.55×10 ⁻⁴
	2008~2009	2.44×10 ⁻⁴
	2009~2010	2.07×10 ⁻⁴
3 year	2006~2008	2.38×10 ⁻⁴
	2007~2009	2.28×10 ⁻⁴
	2008~2010	2.21×10 ⁻⁴
4 year	2006~2009	2.21×10 ⁻⁴
	2007~2010	2.12×10 ⁻⁴
5 year	2006~2010	2.09×10 ⁻⁴

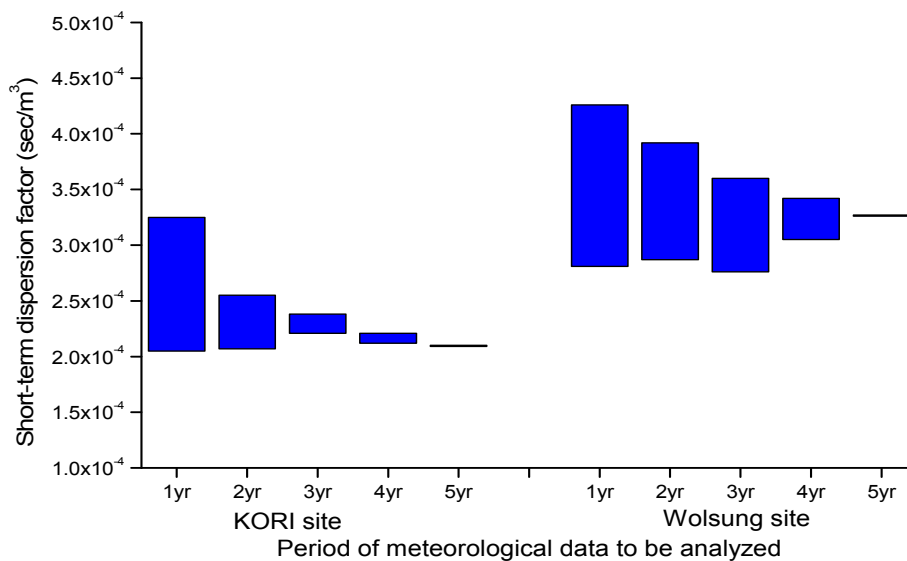


Fig. 6. Variation range of short-term atmospheric dispersion factors at the radius of 1 km from Kori and Wolsung nuclear power plants, in the case of considering the different periods of meteorological data to be analyzed.

표 1은 U. S. NRC 규제지침에서 권고하고 있는 풍속등급을 사용하여 평가에 적용되는 기상통계분석기간을 달리 하였을 경우 고리와 월성 원전으로부터 반경 1 km에서 단기 대기확산인자 값을 나타낸다. 고리부지의 경우 단기 대기확산인자의 최소값은 $2.05 \times 10^{-4} \text{ sec} \cdot \text{m}^{-3}$, 최대값은 $3.25 \times 10^{-4} \text{ sec} \cdot \text{m}^{-3}$ 으로 최대값에 대한 최대값의 비는 1.59였다. 또한 월성부지의 경우 단기 대기확산인자의 최소값은 $2.76 \times 10^{-4} \text{ sec} \cdot \text{m}^{-3}$, 최대값은 $4.26 \times 10^{-4} \text{ sec} \cdot \text{m}^{-3}$ 으로 최대값에 대한 최대값의 비는 1.54였다.

그림 6은 표 1의 결과를 사용하여 적용되는 기상통계 분석기간에 따른 단기 대기확산인자 값의 변동 폭을 나타낸다. 평가에 적용되는 기상자료의 통계분석 기간이 길수록 단기 대기확산인자 값의 변동 폭은 줄어들음을 알 수 있다.

4. 결론

미국 원자력규제위원회(U. S. NRC)에서 개발한 PAVAN 프로그램을 사용하여 기상자료의 통계처리방법(풍속등급의 분류, 평가에 적용되는 기상자료 분석기간)에 따른 원자력발전소의 수명기간 중 발생할 수 있는 가상 사고시 단기 대기확산인자 값의 영향을 분석하였다. 평가한 결과 두 원자력발전소 부지 모두 풍속등급의 분류에 따른 단기 대기확산인자 값의 영향은 미미한 반면 평가에 적용되는 기상자료의 분석기간은 상대적으로 중요한 영향을 나타냈는데, 최대값과 최소값의 비는 1.5배 이상의 차이를 보였다. 따라서 단기 대기확산인자를 평가함에 있어 풍속등급의 분류보다는 평가에 활용되는 기상관측기간의 선정에 보다 조심성을 기울여야 할 것으로 판단된다.

원자력시설의 신규부지 뿐 아니라 기존부지의 가상 사고에 따른 피폭영향평가는 방사선환경안전성 확인을 위한 필수 요소이다. 현재 우리나라의 지형적 및 사회적 특수성을 고려할 때 원자력시설 부지의 확보가 점점 어려워지고 있는 실정이며, 본 연구결과는 원자력부지의 방사선환경안전성 입증을 위한 국내고유의 피폭선량평가체계 확립에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 원자력안전위원회의 중장기연구개발사업으로 수행되었습니다. (과제번호 : 2012011939 및 2012028803)

참고문헌

1. U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). Meteorological monitoring programs for nuclear power plants, Regulatory guide 1.23 revision 1, 2007.
2. U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). Atmospheric dispersion models for potential accident consequence assessments at nuclear power plants, Regulatory guide 1.145 revision 1, 1979.
3. U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). PAVAN: An atmospheric dispersion program for evaluating design basis accidental releases of radioactive materials from nuclear power stations, NUREG/CR-2858, PNL-4413, 1982.
4. 원자력안전위원회. 원자력시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준. 원자력안전위원회고시 제2011-19호, 2011.
5. International Atomic Energy Agency. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment, Safety reports series No. 19, 2001.
6. U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). On-site meteorological measurements program, NUREG-0800 revision 3, 2007.
7. International Atomic Energy Agency. Dispersion of radioactive material in air and water and consideration of population distribution in site evaluation for nuclear power plants, IAEA safety standards series No. NS-G-3.2, 2002.

Influence of Statistical Compilation of Meteorological Data on Short-Term Atmospheric Dispersion Factors in a Hypothetical Accidental Release of Nuclear Power Plants

Won Tae Hwang, Eun Han Kim, Hae Sun Jeong, Hyo Joon Jeong, and Moon Hee Han
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - A short-term atmospheric dispersion factor (χ/Q) is an essential element for radiological dose assessment following a hypothetical accidental releases of light-water nuclear power plants. The U. S. NRC developed PAVAN program to comply with the U. S. NRC's Regulatory Guide 1.145. Meteorological data is an essential element for atmospheric dispersion, and PAVAN uses a joint frequency distribution data, which represents the occurrence probability of wind speed and wind direction for atmospheric stability. Using the meteorological data measured at Kori and Wolsung sites for the last 5 years (from 2006 to 2010), a variety of joint frequency distribution data were prepared to evaluate χ/Q values with different wind speed classifications (U. S. NRC's recommendation and even distribution of occurrence probability) and periods of meteorological data to be analyzed (1 year, 2 year, 3 year, 4 year, 5 year). As a result, it was found that the influence of the wind speed classification on χ/Q values is little, while the influence of the periods of meteorological data to be analyzed is relatively significant, representing more than 1.5 times in the ratio of maximum to minimum values.

Keywords : Hypothetical accident, Short-term atmospheric dispersion factor, Joint frequency distribution data, PAVAN