2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력발전소로부터 방출된 삼중수소의 건 침적과 환경 중 거동

Dry Deposition and Environmental Behavior of Tritium Released from the Nuclear Power Plants

최희주, 이한수, 강희석, 최용호, 이창우

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고리 원자력발전소로부터 방출된 삼중수소와 환경 중 방사능 농도와의 상관관계 도출을 위하여 모델링을 수행하였다. 발전소로부터의 삼중수소 연간 방출량과 χ/Q 값을 이용하여 공기 중 삼중수소 농도를 구하고, 건 침적 속도를 이용하여 건 침적량을 방위별, 거리별로 구하였다. 건 침적 계산결과를 분석하여 지표 환경을 유사한 거동을 하는 구역을 묶어 6 개 구역으로 나누었다. 6 개 구역을 다시 여러 개의 격실로 나누고, 부지 특성 자료로부터 전달계수를 구하였다. 건 침적으로부터 구한 선원항과 전달계수를 이용하여 발전소 주변 환경에서 삼중수소 거동을 격실 모델을 이용하여 계산하였다. 계산은 격실 모델의 준 해석해를 이용하는 AMBER 프로그램을 이용하였다. 계산 결과 육지에 침적된 삼중수소의 대부분이 대기와 해양으로 빠져나갔으며 축적되지 않았다. 지표 토양층 중의 농도는 측정치와 거의 일치하였다.

Abstract

The relationship between the tritium release rate from the nuclear power plant and the tritium concentration in the environment around the Kori site plants was modeled. The tritium concentration in the atmosphere was calculated by multiplying the release rates and χ/Q values, and the dry deposition rates at each sector according to the direction and the distance were obtained using the dry deposition velocity. The area around Kori site was divided into 6 zones according to the deposition rates. The six zones were divided again into many compartments for the numerical simulation. The transfer coefficients between the compartments were derived from the site characterization data around Kori site. Source terms were derived from the dry deposition rates. Using the data, the concentrations of tritium in the surface soil water and groundwater were calculated based upon the compartment model. The semi-analytical solution of the compartment model was obtained with the computer program, AMBER. The results showed that most of the tritium deposited onto the land released into the atmosphere and the sea and was not accumulated in the surroundings. Also, the estimated concentration in the surface soil water agreed well to that measured.

1. 서론

가동중인 원자력발전소에 대한 주기적안전성평가가 최근 의무화되었으며, 주기적안전성평가에서는 발전소로부터 방출된 방사성 핵종과 환경 중 농도와의 상관관계를 밝힐 것을 요구하고 있다.

이를 위하여 한국원자력연구소에서는 발전소 주변에서의 과거의 삼중수소 측정 자료를 분석하였으며, 새로이 시료를 채취하여 삼중수소 농도를 측정하였다[1].

3 가지의 수소 동위원소 중 유일한 방사성 핵종인 삼중수소는 매우 적은 에너지의 전자를 방출하며 ^{3}He 으로 붕괴한다. 반감기는 12.3 년이며, 방사성 붕괴시 방출되는 전자의 평균 에너지가 5.68 keV 로 이는 피부를 투과하기에 너무 낮아 외부 피폭은 거의 없고 인체에 흡수되었을 경우 내부 피폭만 가능하다.

삼중수소의 발생은 원자력발전소 뿐만 아니라 우주선과 대기 상층부의 공기와의 반응, 과거 핵실험, 동위원소로의 사용 등에 의한다[2]. 경수로에서의 삼중수소의 발생은 주로 3 조각 분열(ternary fission)에 의한 것이며, 리튬과 보론의 중성자와의 반응에 의한 것도 있다. 중수로에서의 발생은 중수소의 중성자 흡수에 의한 것이 3 조각 분열보다 많다. 원자로에서 생성된 삼중수소 중 대략 1% 미만이 대기 중으로 방출되고 있으며, 고리 원자력발전소의 경우 과거 10 년간 방출량을 살펴 보면 4 기의 원자로로부터 기체 상태로 대략 연간 10^{13} Bq 이 방출되었다[3].

원자력발전소로부터 대기 중으로 방출된 삼중수소는 대기와 함께 이동하며 확산되고, 일부는 침적된다. 침적 방법으로는 건 침적과 습 침적 방법이 있다. 본 연구의 목적은 원자력발전소에서 방출된 삼중수소가 얼마나 건 침적 되며, 침적된 핵종들의 주변 환경에서의 거동을 모델링하는 것이다. 건 침적 계산을 위하여 발전소에서 측정된 풍향, 풍속 등의 자료를 이용하여 얻어진 χ/Q 자료와 삼중수소 연간 방출량으로부터 대기 중 농도를 구하고 건 침적속도를 이용하여 침적량을 구하였다. 환경 중에서의 삼중수소 거동은 발전소 주변 환경을 여러 개의 격실(compartment)로 나누고 각 격실 내에서는 완전 혼합을 가정하며, 각 격실 사이의 전달계수를 결정하여 계산하였다. 각 격실 사이의 핵종 전달 계산은 AMBER 컴퓨터 프로그램을 이용하였다[4].

2. 삼중수소의 건 침적

대기 중으로 방출된 삼중수소와 환경 중에서 관측되는 삼중수소 사이의 상관관계를 알아내기 위해서는 대기 중 삼중수소 농도로부터 지표면으로 침적되는 양을 구하여야 한다. Briggs 등에 (1968) 의하면[5] 건 침적을 통하여 지표면으로 침적되는 양은 지표면과 근접한 대기중 농도와 건 침적속도를 통해 구해진다[6]:

$$w(x,y) = v_d C(x,y,0) \quad (1)$$

여기서 w 는 건 침적 되는 삼중수소 플럭스 [Bq m^{-2} s^{-1}],

v_d 는 삼중수소 건 침적 속도 [m s^{-1}],

C 는 대기중 삼중수소 농도 [Bq m^{-3}]이다.

또한, 대기중 삼중수소 농도는 Gaussian 확산 모델을 통하여 얻어진 χ/Q 값에 발전소로부터의 삼중수소 방출량을 곱하여 구한 값을 이용하였다. 그림 1 에는 1991 년부터 1999 년까지 고리 원자력발전소로부터 기체 상태로 연간 방출된 삼중수소와 희유기체 방사능을 나타내었다. 그림 1 에서 쉽게 알 수 있듯이 고리 발전소로부터 매년 방출되는 삼중수소의 양은 약간 증가하는 추세이다.

원자력발전소 주변 환경에서의 삼중수소 침적 경향을 알아보기 위하여 XOQDOQ 프로그램을 이

용하여 구해진 χ/Q 값을 분석하였다. 그림 2 는 1999 년 고리 발전소 주변의 주요 4 방향에 대한 χ/Q 값을 거리 별로 나타낸 것이다. 그림 2 에 나타난 바와 같이 각 방향 별로 χ/Q 값 차이는 있었지만 거리 별로는 비슷한 농도변화 경향을 나타내었다. χ/Q 값은 16 km 지점에서의 거의 무시할 정도 였으며, 4.8 km 를 벗어나면 매우 작아졌다.

원자력발전소 주변 16 방위에 대해 거리별로 결정된 섹터(sector)에 대해 구해진 χ/Q 에 연간 삼중수소 방출량 10^{13} Bq 을 곱하여 대기중 농도를 구하였으며, 이 값에 각 섹터 면적과 삼중수소의 토양에 대한 건 침적 속도[7] 4.94×10^{-4} m/s 를 곱하여 발전소 주변 16 방위에 대한 각 섹터별 삼중수소 건 침적량을 구하였다. 섹터별로 구해진 건 침적 값으로부터 육지로 침적되는 값과 해양으로 침적되는 양을 구하였다. 계산 결과 고리 발전소 주변 풍향이 주로 해양을 향하고 있어 육지에 침적된 양에 비해 해양에 침적된 양이 2.13 배 정도 되었다. 즉, 발전소에서 방출된 삼중수소의 60% 이상이 풍향에 의해 해양으로 침적되고 있다. 또한, 실제 육지 침적 계산의 경우 대개 토양에 식물체가 살고 있어 이를 고려하여 토양만의 면적은 전체 육지 면적의 50%로 가정하였다.

본 연구의 목적이 고리 발전소 주변 육지 환경에서의 삼중수소 농도를 분석하는 것이므로 침적량 계산 결과를 이용하여 비슷한 침적 경향을 갖는 지역(area)을 6 개로 나누어 6 개 구역(zone)에 대한 건 침적 양을 구하였다. 표 1 은 6 개 구역의 면적과 연간 건 침적 방사능을 나타내고 있다. 토양 지역의 건 침적량은 환경 중 삼중수소 거동을 모델링하는 데에 선원항으로 이용되었다.

3. 삼중수소의 환경 중 거동 해석 모델

침적을 통하여 대기로부터 지표 환경으로 이동한 삼중수소는 HTO 형태로 물과 동일한 특성을 갖고 거동한다. 즉, 지표 환경중의 삼중수소의 일부는 다시 증발하거나 지하수 이동 혹은 지표수 이동을 따른다. 원자력 발전소 주변 환경에서의 삼중수소 거동을 모델링하기 위하여 거동이 유사한 매질을 1 개의 격실(compartment)로 구분하고 각 격실 사이의 이동은 전달계수로 표시하는 격실 모델을 이용하였다. 각 격실 사이의 물질 수지식은 다음과 같다:

$$\frac{dA_i^t}{dt} = -\sum_n k_{ij} A_i^t + \sum_m k_{ji} A_j^t - \lambda^t A_i^t + S_i^t \qquad (2)$$

여기서 A_i^t 는 격실-i 내의 삼중수소 총량 [Bq],

k_{ij} 는 격실-i 에서 격실-j 로의 전달계수 [yr^{-1}],

λ^t 삼중수소 붕괴상수 [yr^{-1}],

S_i^t 격실-i 로 유입되는 삼중수소 선원항 [Bq yr^{-1}] 이다.

식(2)의 우변의 첫번째 항은 격실-i 로부터 주변의 격실로 이동하는 물질량을 두 번째 항은 주변 격실로부터 격실-i 로 유입되는 물질량을 나타내며, 세 번째 항은 방사성 붕괴, 네 번째 항은 격실-i 로의 선원항이다. 미분방정식(2)은 서로 연계되어 있어 해석해는 구하기 쉽지 않으며, 본 연구에서는 AMBER 프로그램을 이용하여 해를 구하여 계산하였다.

4. 격실 설정 및 전달계수 도출

고리 발전소 주변에서 계산된 χ/Q 값을 기준으로 지표면을 6 개의 구역으로 나누고 각 구역을 지표 토양층과 심부 토양층 2 개의 격실로 나누었다. 지표 토양층의 경우 공극률을 0.3, 심부 토양층의 경우 공극률을 0.25 로 가정하였다. 토양층 중 해수면과 경계를 하고 있는 격실에서는 해양으로 누출되는 핵종들이 있어 해양을 격실로 나누었으며, 각 격실에서 증발되는 핵종들을 고려하여 대기 격실을 설정하였다. 지표에 살고 있는 식물체는 이미 평형 상태에 도달해 있을 것으로 간주되어 격실에서는 제외하였다.

각 격실 사이의 핵종 이동은 빗물에 의한 Runoff, 지하수 흐름, 증발과 확산에 의한다. 고리 지역의 강우량과 증발량은 과거 10 년간의 자료의 평균값을 이용하였다. 고리 지역의 10 년간 평균 강우량은 약 1,390 mm, 증발량은 1,150 mm 이다[8]. 연 평균 강우량 중 증발량을 감한 240 mm 의 강우가 Runoff 혹은 지하수로 침투하는 것으로 고려하였다. Runoff 양은 통상 강우량의 10 ~ 30 % 정도로 추정되고 있어[9], 본 연구에서는 1,390 mm 의 약 10%인 140 mm 를 가정하였다. 따라서 실제 부지 내로 침투하여 심층 지하수로 유입되는 강우량은 100 mm 이다. 증발에 의한 격실로부터의 전달계수는 연간 증발량을 각 격실 내 물의 부피로 나누어 계산하였다. 계산 결과 전달계수는 격실에 관계없이 모두 0.128 yr^{-1} 이었다. Runoff 에 의한 전달계수는 각 격실마다 면적에 차이가 있어 그 값이 차이가 있으며, 표 2 에 나타내었다.

지하수는 강우가 직접 침투하는 것 외에도 관심 구역 밖의 지하수 흐름이 격실 내로 흘러 들어와 영향을 미치므로, 이에 대한 영향을 분석하기 위하여 고리 발전소 FSAR 을 검토하였다. 고리 발전소 FSAR 에 의하면 고리 주변 지하수 흐름은 내륙에서 해양을 향하고 있으며, hydraulic gradient 는 13% 이고, 수리 전도도는 10^{-3} ~ 10^{-5} cm/s 정도이다. 이들 지하수 흐름은 상부 지하층과 평행하게 흐르는 것으로 가정하여 전달계수를 도출하였다. 전달계수를 도출하기 위하여 지하수 흐름을 분석하였다. 지하 매질에서의 지하수 유량은 일반적으로 Darcy 의 법칙으로 설명된다[9]:

$$Q = KA\frac{dh}{dl} \tag{3}$$

여기서 Q 는 단면적 A[m^2]를 통해 흐르는 지하수 유량 [m^3/yr],

K 는 수리전도도 [m/yr],

$\frac{dh}{dl}$ 은 hydraulic gradient [-] 이다.

식(3)에 hydraulic gradient 0.13, 수리 전도도 10^{-4} cm/s 와 각 격실의 수직 단면적을 대입하여 각 격실을 흐르는 지하수 유량을 구하고 격실 내 지하수 부피로 나누어 전달계수를 구하였으며, 표 2 에 결과를 나타내었다.

지표 환경 중에서 핵종 이동 메커니즘의 하나로 확산을 고려할 수 있다. 확산은 각 격실 사이의 농도차이에 의한 이동이다. 확산에 의한 물질전달을 계산하기 위하여 HTO 의 지하 매질에서의 유효확산계수 4.3×10^{-4} m^2/yr 값을 이용하였다. 지하 매질과 같은 다공성 매질에서의 확산은 Fick 의 법칙으로부터 다음과 같이 표시된다:

$$J = -D_p A \varepsilon_p \frac{dC}{dx} \tag{4}$$

여기서 J 는 확산에 의한 단면적 A[m^2]를 통한 삼중수소 이동율 [Bq/yr],

D_p 는 공극에서의 확산계수 [m^2/yr],

ε_p 는 공극률 [-],

C 는 격실 내 삼중수소 농도 [Bq/m^3] 이다.

식(4)로부터 구한 삼중수소 유량을 격실 내의 삼중수소 총량으로 나누어 전달계수를 구하였다. 계산결과 확산에 의한 전달계수는 대략 10^{-10} yr^{-1} 정도 이며, 이 값은 다른 전달계수와 비교할 때 너무 작아 확산에 의한 물질 전달은 무시하였다.

5. 계산 및 결과 토의

고리 원자력 발전소로부터 기체 상태로 방출된 삼중수소의 환경 중 거동을 모델링을 통하여 구하였다. 표 1 에 주어진 토양으로의 연간 건 침적 방사능을 선원항으로 하고, 표 2 에 주어진 각 격실 사이의 전달계수를 이용하여 건 침적에 따른 각 격실 내의 삼중수소 방사능과 농도를 구하였다.

그림 3 은 구역-1 과 구역-2 의 각 격실 내의 삼중수소 방사능 변화를 나타낸 것이다. 그림 3 에 나타나 있듯이 지표 토양층에서의 삼중수소 방사능은 방출 후 10 년 정도면 평형 상태에 도달하였다. 침적된 삼중수소의 대부분은 물의 이동을 따라 sink 항인 대기와 해양 중으로 이동하였으며, 건 침적이 상대적으로 많은 구역-1 내의 지표 토양 중에 삼중수소가 다른 주변 환경 중 격실보다 많았다. 즉, 원자력발전소로부터 방출되어 침적된 삼중수소의 상당량 역시 발전소 주변 환경으로부터 쉽게 빠져 나갔다.

그림 4 에는 구역-1 과 구역-2 의 각 격실 중의 삼중수소 농도를 실측값과 비교하기 위하여 나타내었다. AMBER 를 이용한 계산 결과 삼중수소 농도는 구역-1 의 지표 토양층 격실에서는 대략 1.13 Bq/L, 구역-2 의 지표 토양층 격실에서는 0.135 Bq/L 로 계산되었다. 이 값은 고리 발전소 주변 환경 중 구역-1 에 해당하는 지점에서 채취한 지표 토양수 중의 삼중수소 농도[1] 1.67 Bq/L, 1.88 Bq/L, 2.50 Bq/L 와 비교하면 근사한 값이다. 본 연구를 통하여 계산된 1.13 Bq/L 과 글로벌 삼중수소 순환 모델을 이용하여 국내 자연 환경 중의 삼중수소 농도 계산[10]을 통해 구한 국내 지표 토양 중의 삼중수소 자연 방사능 0.618 Bq/L 를 더하면 유사한 값으로 추정된다. 측정치와 모델링을 통한 계산치의 적절성은 보다 상세한 수리지질 특성을 고려하여 격실을 나누고 입력자료를 확보하면 좋아질 것으로 판단된다.

그림 5 에는 구역-1 과 구역-2 의 각 격실 사이의 연간 삼중수소 전달량을 나타내었다. 그림 5 에 나타난 바와 같이 대부분의 삼중수소는 증발에 의해 대기로 순환되고 있으며, 지하수 흐름을 통해 바다로 이동하였다. 그림 6 에는 발전소 주변 6 개 구역 중의 지표 토양층 내의 삼중수소 농도를 나타내었다. χ/Q 값이 상대적으로 큰 구역-1 과 같이 발전소로부터 가까운 구역 내 지표 토양층 중의 삼중수소 농도가 먼 지역보다 높았고, 구역-4 내의 농도가 가장 낮았다.

6. 결론

운전 중인 원자력발전소에 대한 주기적안전성평가에서 요구하는 방사성 핵종 방출률과 주변 환

경에서의 농도와의 상관 관계를 밝히기 위하여, 고리 원자력발전소로부터 방출된 삼중수소와 환경 중 방사능 농도와의 상관 관계를 모델링을 통해 연구하였다. 발전소로부터의 삼중수소 연간 방출량과 실측된 기상자료를 입력 값으로 하여 구한 χ/Q 값으로부터 공기 중 삼중수소 농도를 구하였다. 공기 중 삼중수소 농도에 건 침적 속도를 곱하여 침적량을 방위별, 거리별로 구하였다.

건 침적량 계산 결과로부터 삼중수소의 60% 이상이 해양으로 침적되었다. 또한, 건 침적 계산 결과를 분석하여 유사한 거동을 하는 지표 환경을 묶어 6 개 구역으로 나누었다. 6 개 구역을 다시 여러 개의 격실로 나누고, 고리 발전소 주변 부지 특성 자료로부터 전달계수를 도출하였다. 건 침적으로부터 구한 선원항과 전달계수를 이용하여 발전소 주변 환경에서 삼중수소 거동을 격실 모델을 이용하여 계산하였다. 계산은 격실 모델의 준 해석해를 이용하는 AMBER 프로그램을 이용하였다.

계산 결과 원자력발전소에서 방출된 삼중수소는 대략 10 년 정도면 주변 환경과 정상상태를 이루었다. 침적된 삼중수소의 60% 이상은 해양으로 침적되었으며, 육지에 침적된 삼중수소 역시 대기와 해양으로 빠져나갔다. 삼중수소 이동의 가장 중요한 메커니즘은 증발량이었으며, 지표 토양층 중의 삼중수소 농도를 계산 값과 측정값을 비교한 결과 서로 잘 일치하였다.

감사의 글

이 논문은 과학기술부의 원자력중장기사업의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 최희주, 이한수, 강희석, 이창우, 고리 원자력발전소 주변 환경에서의 삼중수소 농도 변화 추이 분석, 2001 춘계 대한방사선방어학회 논문집 (2001).
2. Okada, S. and N. Momoshima, Overview of Tritium: Characteristics, Sources, and Problems, Health Physics, Vol. 65, pp. 595 – 609 (1993).
3. 한국전력공사, 원자력발전소 방사선관리 연보 (1999).
4. Enviros QuantiSci, AMBER 4.0 Reference Guide, Enviros QuantiSci, Oxfordshire, U.K. (1998).
5. Briggs, G. A., I. Van der Hoven, R. J. Englemann, and J. Halitsky, “Processes Other Than Natural Turbulence Affecting Effluent Concentrations,” in Meteorology and Atomic Energy 1968, D. J. Slade (ed.), Report TID-24190, pp.189-255, U.S.AEC (1968).
6. Faw, Richard E. and J. Kenneth Shultis, Radiological Assessment Sources and Exposure, PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1993).
7. Brudenell, A. J. P., C. D. Collins, and G. Shaw, Dynamics of Tritiated Water (HTO) Uptake and Loss by Crops After Short-Term Atmospheric Release, J. Environ, Radioactivity, Vol. 36, pp. 197 – 218 (1997).
8. 부산광역시, 효암천 하천정비기본계획 보고서, 부산광역시 (2000).
9. Freeze, R. A. and J. A. Cherry, Groundwater, Prentice-Hall, Inc., p.219 (1979).
10. 최희주, 이한수, 강희석, 이창우, Estimation of Tritium Concentration in the Environment based upon Global Tritium Cycling Model, 방사선방어학회지 (submitted).

표 1. 구역 및 구역별 삼중수소 연간 건 침적량

구분	면적 (m^2)	거리	연간 건 침적량 (Bq) (건침적속도: 4.94×10^{-4} m/s)	
			전체 면적	토양 면적(50%)
1-구역	1.81×10^{7}	4.8 km 까지	8.40×10^{10}	4.20×10^{10}
2-구역	3.22×10^{7}	8.0 km 까지	1.69×10^{10}	8.45×10^{9}
3-구역	1.36×10^{7}	4.8 km 까지	2.85×10^{10}	1.43×10^{10}
4-구역	2.41×10^{7}	8.0 km 까지	5.73×10^{9}	2.87×10^{9}
5-구역	6.53×10^{6}	4.8 km 까지	1.83×10^{10}	9.15×10^{9}
6-구역	1.61×10^{7}	8.0 km 까지	1.28×10^{10}	6.40×10^{9}

표 2. 각 격실 사이의 전달계수

전달계수 (yr^{-1})		값
Runoff	K_{1s}	0.0432
	K_{21}	0.0156
	K_{3s}	0.0431
	K_{43}	0.0156
	K_{5s}	0.0539
	K_{65}	0.0156
Groundwater Flow	K_{1s}	5.68×10^{-3}
	K_{21}	5.32×10^{-3}
	K_{3s}	5.71×10^{-3}
	K_{43}	5.34×10^{-3}
	K_{5s}	7.87×10^{-3}
	K_{65}	5.31×10^{-3}

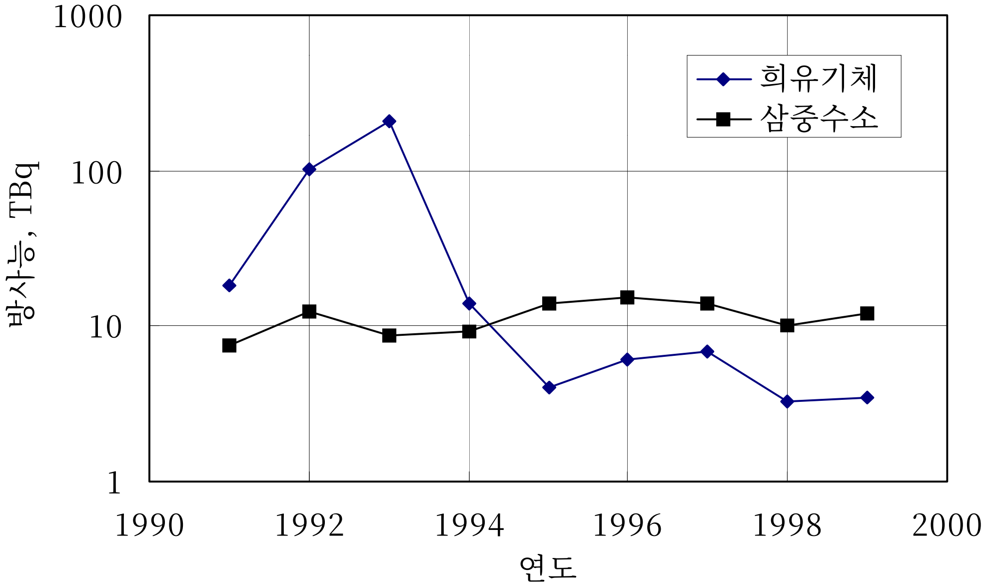

그림 1. 고리 발전소로부터 연간 방출되는 삼중수소와 희유기체 방사능.

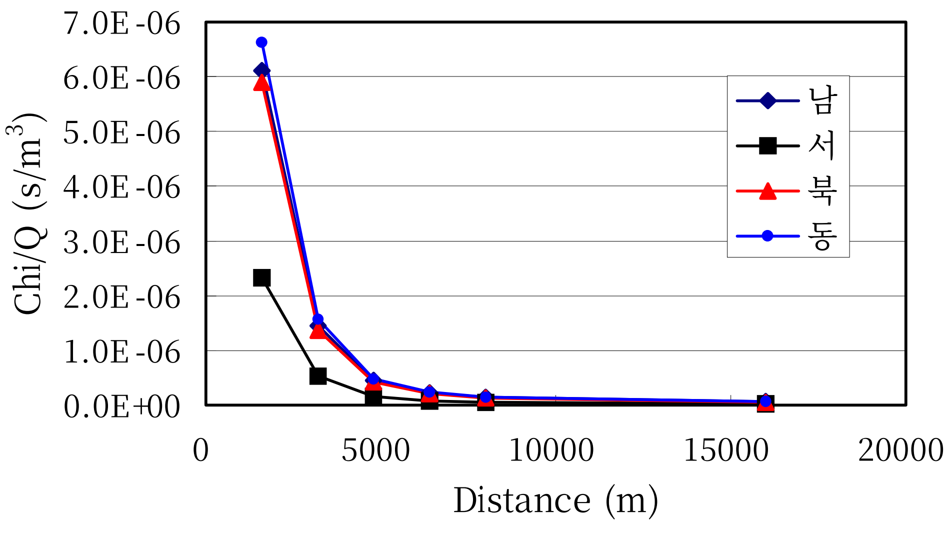

그림 2. 각 방위별 거리에 따른 χ/Q 값 (1999 년).

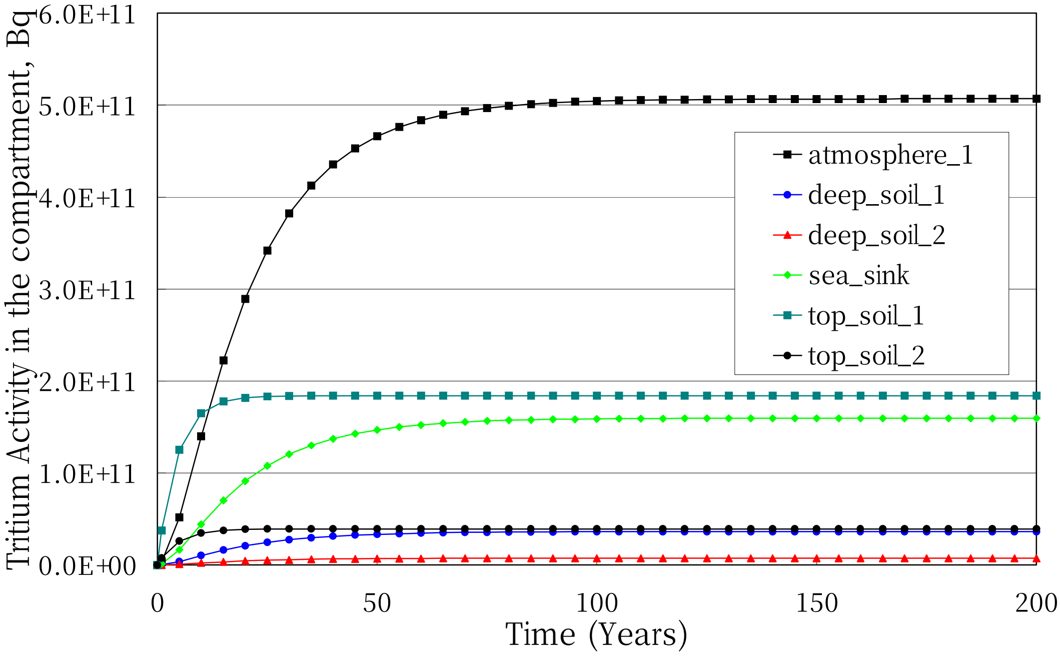

그림 3. 구역-1, 구역-2 의 각 격실 내 삼중수소 방사능.

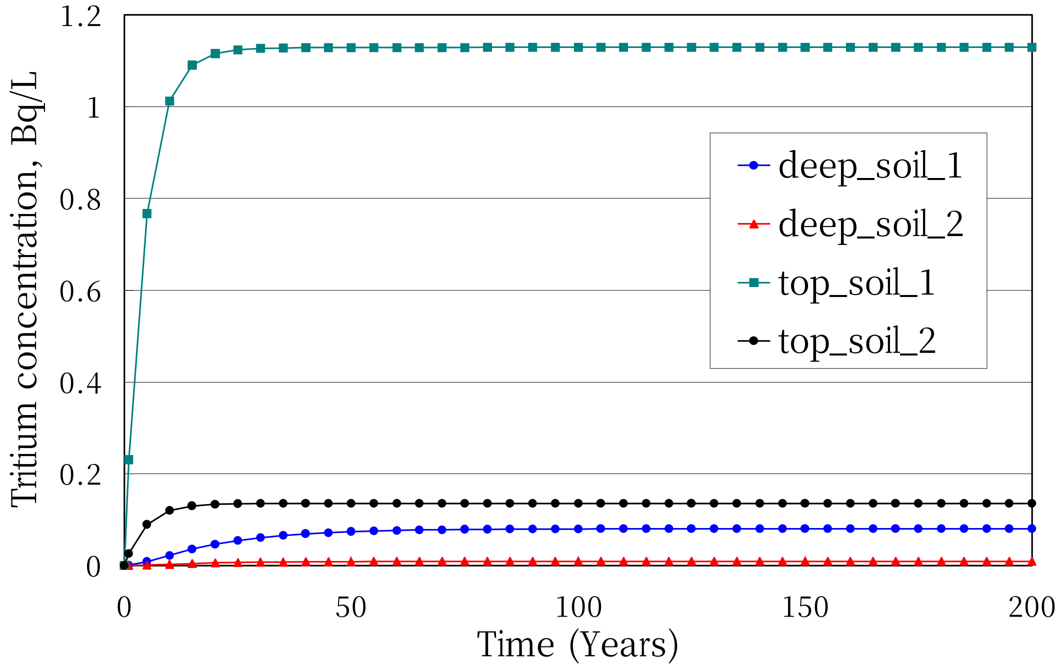

그림 4. 구역-1, 구역-2 의 각 격실 내 삼중수소 농도.

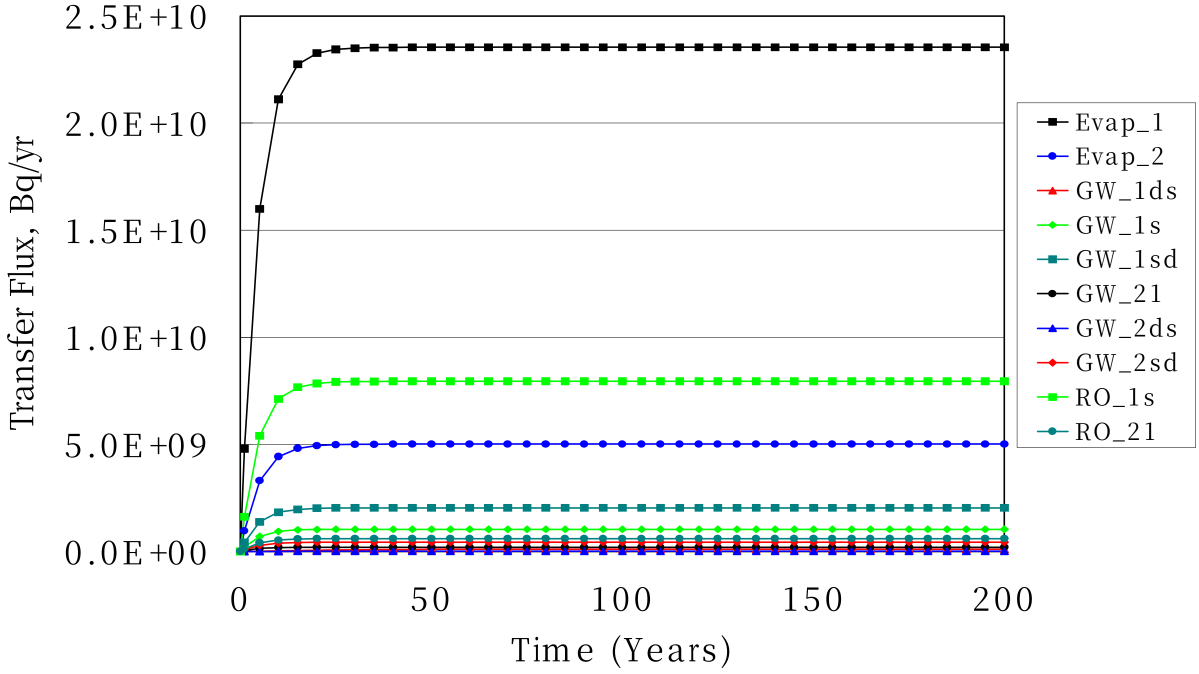

그림 5. 구역-1, 구역-2 의 각 격실 사이의 연간 삼중수소 전달률.

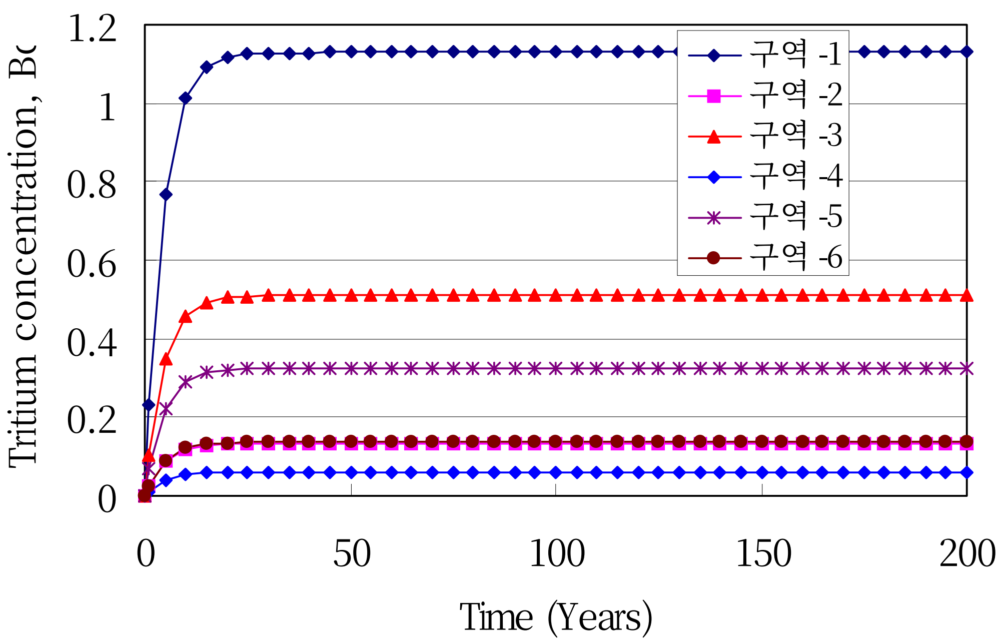

그림 6. AMBER 프로그램을 이용하여 계산한 지표 토양층 격실 내 삼중수소 농도.