

수송시스템에서 고려중인 폐기물모듈 사용시 기체발생에 미치는 영향평가

조찬희, 김창락, 이명찬
한국원자력연구소

요 약

방사성폐기물 처분후 처분장에서는 금속의 부식, 셀룰로스의 미생물분해, 방사선에 의한 분해등으로 인하여 기체가 발생하게 된다. 이 논문에서는 저준위 폐기물 수송시스템에서 고려하고 있는 폐기물모듈 개념중 6-pack 모듈을 사용하여 처분할 때 기체발생에 미치는 영향을 평가하여 보았다. 계산은 방사성폐기물 처분장에 대한 초기 건설용량으로 고려중이었던 10만드럼 용량의 처분장을 기준으로 수행하였다. 평가결과, 6-pack 모듈을 사용하여 처분할 때 6-pack 모듈을 사용하지 않고 처분하는 경우에 비해 H₂의 발생량은 1.4배 정도 증가하며, CO₂, CH₄ 등에 있어서는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

1. 서론

방사성폐기물 처분장내에 기체가 발생하게 되면 처분장 및 폐기물 고화체내 기압이 증가하고, 기압증가에 따른 폐기물 고화체의 건진성 손상 및 처분시설 구조물의 파손, 처분장 주변 지하수 흐름체계의 변화, 방사성기체의 유출, 발화성기체의 발생으로 인한 발화의 위험성 등이 야기될 수 있다. 따라서 방사성폐기물 처분후, 처분장내에 발생하게 될 기체의 양을 예측하는 것이 중요하다.

처분장내에 금속물질 및 셀룰로스물질의 증가는 철의 부식에 의한 부식기체 및 미생물에 의한 분해기체를 증가시킬 것으로 예상된다. 이 논문에서는 방사성폐기물 수송의 용이성 제고를 위해 수송시스템에서 고려중인 폐기물모듈중 6-pack 모듈을 사용하여 처분하였을 때, 금속물질의 증가로 인하여 기체의 발생량에 어느정도 영향을 미치는지를 기체발생 예측 컴퓨터 프로그램인 GAMMON[1]을 사용하여 평가하였다.

2. 기체발생 메카니즘 및 수학적 모델링

앞에서 기술한대로 방사성폐기물 처분장 내에서의 기체발생은 크게 세가지의 원인에 의해 일어나게 된다. 첫째, 금속의 부식에 의한 수소기체의 발생은 철의 3단계 부식과정 중 마지막 단계에서 일어나게 된다[2]. 여기서는 처분장 조건에 따른 각 단계에서의 철의 부식률을 정확히 예측함으로써 수소기체의 발생량을 예측할 수 있다. 둘째, 방사성폐기물, 특히 잡고체내에 포함되어 있는 나무, 종이등과 같은 셀룰로스의 미생물에 의한 분해과정을 통해 수소, 이산화탄소, 메탄 등의 기체가 발생한다[2]. 처음에 고체상태의 셀룰로스 물질이 물리적변화와 가수분해를 통해 글루코스 형태로 변화하게 되고, 글루코스는 몇가지 형태의 박테리아에 의해 분해되면서 H₂, CO₂, CH₄ 등의 기체를 발생시킨다. 이러한 분해반응은 처분장 주변환경의 pH, NH₄⁺ 이온의 농도, 지하수의 농도 등에 의해 영향을 받게 된다[2]. 셋째, 방사선에 의한 분해를 통한 수소기체의 발생을 예상할 수 있으나, 이는 금속부식에 의한 수소기체의 발생량에 비해 현저히 작으므로 무시할 수 있다[3].

처분장내 기체발생률을 정확히 예측하기 위해서는 금속의 부식률과 셀룰로스의 미생물 분해에 대한 반응률을 결정하여야 하며, 이를 위해 흔히 Monod 방정식[4]을 사용한다. 예를들면, 셀룰로스의 미생물분해 과정에서 박테리아 농도 m 의 변화율은 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\frac{dm}{dt} = G m - D m$$

여기서, G 는 박테리아의 성장계수, D 는 박테리아의 소멸계수이며, 이는 주변 환경의 화학적 조성에 의해 영향을 받는다. 여기서, 박테리아의 성장계수 G 를 Monod 방정식을 도입하여 모델링하면 다음과 같다. 예를들어, 호기성 박테리아의 성장계수 G 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \mu \frac{[O_2]}{[O_2] + K_s}$$

여기서, μ 는 최적조건하에서의 박테리아의 평균성장계수이고, $[O_2]$ 는 산소의 농도, K_s 는 포화계수이다. 만약, 주변환경에 산소가 충분히 존재한다면 $[O_2]/([O_2] + K_s)$ 는 거의 1로서, 실제로 호기성 박테리아의 성장계수 G 는 최적조건하에서의 성장계수 μ 와 거의 같다. 반대로, 주변환경에 산소의 농도가 극히 낮다면 $[O_2]/([O_2] + K_s)$ 는 0에 가깝고, 박테리아의 실제 성장계수 G 는 상당히 낮아질 것이다. 역으로, 혐기성 박테리아의 성장계수 G 는 다음의 식으로부터 예측할 수 있다.

$$G = \mu \left[1 - \frac{[O_2]}{[O_2] + K_i} \right]$$

여기서, K_i 는 억제계수(inhibition coefficient)이다. 이 경우에는, 만약 주변환경에 산소의 농도가 충분하다면 $(1-[O_2]/([O_2]+K_i))$ 는 0에 가깝고, 따라서 실제 성장계수 G 는 상당히 낮아질 것이다. 반대로, 산소의 농도가 극히 낮으면 $(1-[O_2]/([O_2]+K_i))$ 는 거의 1이 되며, 이때의 혐기성 박테리아의 성장계수 G 는 최적조건하에서의 성장계수 μ 와 거의 같다.

이 논문에서, 기체발생 계산에 사용한 컴퓨터 프로그램 GAMMON[1]은 이와같은 방법으로부터 결정된 반응율을 조합하여 모델링함으로써 H_2 , CO_2 , CH_4 , H_2S 등의 발생률 및 발생량을 시간에 따라 예측할 수 있도록 프로그램 되었다.

3. 결과 및 고찰

방사성폐기물 처분장 초기 건설용량으로 고려중이었던 10만 드럼을 기준으로 할 때, 동굴의 형태는 LLW I, LLW II, LLW III, LLW IV 등으로 나누어서 각각 처분할 예정이었다[5]. 이중 기체발생 예측을 위해 LLW I 동굴에 대해서 계산을 수행해 보았다. LLW I 동굴은 폭 18.6m, 높이 10.5m, 길이 140m 용량이며, 여기에 처분 예정이었던 200리터 드럼의 수는 시멘트 고화된 농축폐액 10,425드럼, 시멘트 고화된 이온교환수지 4,516드럼, 시멘트 고화된 펄퍼 4,307드럼 등이다[5].

LLW I 동굴의 경우 GAMMON 계산을 위해 사용된 주요 입력 데이터는 다음과 같다. 동굴의 부피: $2.74 \times 10^4 m^3$, 탄소강의 초기농도: $17.6 kg/m^3$, 셀룰로스의 초기농도: $0.177 kg/m^3$, 폐기물내 물의 농도: $3.95 kg/m^3$, 폐기물내 NH_4^+ 의 초기농도: $7.08 \times 10^{-4} kg/m^3$, 동굴내 초기pH: 12 등이다. 이로부터 예측된 각 기체의 시간에 따른 발생률 및 누적발생량을 그림 1에 나타내었다. 그림 1로부터 다른 기체에 비해 수소기체의 발생률이 매우 많음을 알 수 있다.

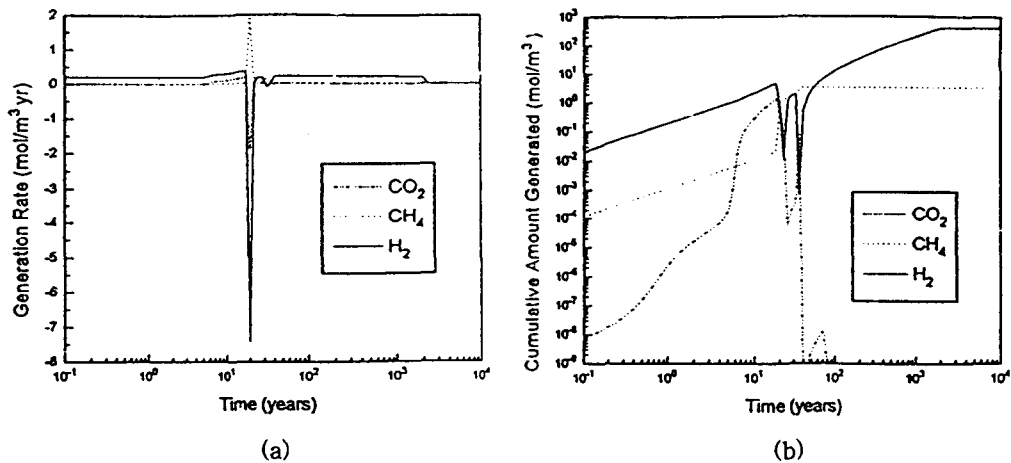


그림 1. LLW I 동굴에 대한 기체의 (a) 발생률 및 (b) 누적발생량

LLW I 동굴에 대해, 저준위 폐기물 수송시스템에서 고려하고 있는 폐기물모듈 개념중 그림 2와 같이 6-pack 모듈을 사용하여 처분하였을 경우, 6-pack 모듈을 사용하지 않고 처분하였을 경우와 비교하여 기체발생에 미치는 영향이 어느정도인지를 예측하여 보았다. 다음의 폐기물모듈 개념도에서 철의 재질을 드럼과 같은 탄소강, 밀면과 중간면의 철판의 두께를 0.2cm로 가정하였을 경우, LLW I 동굴에서 탄소강의 초기농도는 대략 24.6kg/m^3

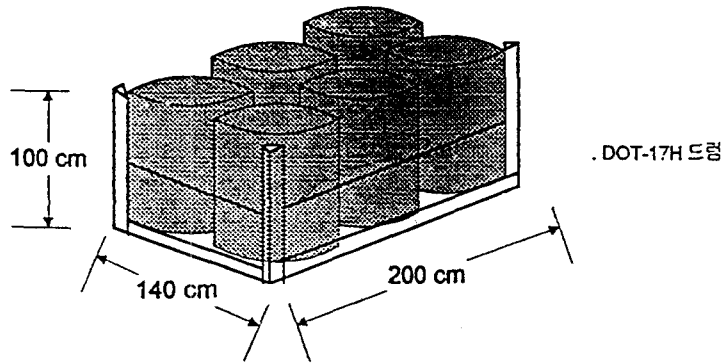


그림 2. 수송시스템에서 고려중인 6-pack 모듈 개략도

로 늘어나게 된다. 이와같은 6-pack 모듈을 사용해서 처분하였을 때 예측된 LLW I 동굴 내의 시간에 따른 기체의 발생률 및 누적발생량을 그림 3에 나타냈으며, 6-pack 사용유무에 따른 기체발생량의 비교치를 표 1에 나타냈다.

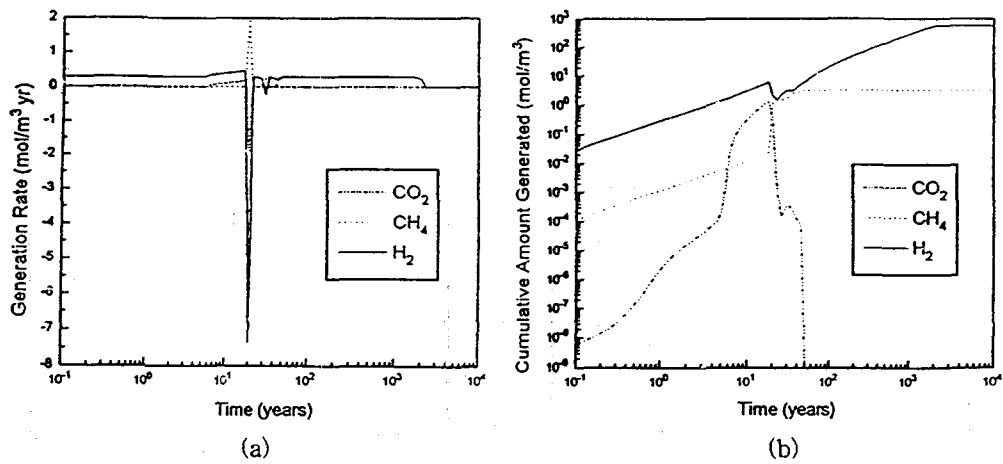


그림 3. 6-pack 모듈을 사용했을 때 LLW I 동굴에 대한 기체의 (a) 발생률 및 (b) 누적발생량

표 1. LLW I 동굴의 6-pack 사용유무에 따른 기체 발생률 및 누적발생량

동굴형태	기체	6-pack 사용유무	Cumulative Amount Generated (mol/m ³)	Peak Generation Rate (mol/m ³ yr)	Time of Peak (yr)
LLW I	H ₂	no	411.32	0.37372	18
		yes	577.75	0.45591	18
	CO ₂	no	-	0.18028	18
		yes	-	0.18033	18
	CH ₄	no	3.4175	1.9069	20
		yes	3.2423	1.9148	20

표 1, 그림 1 및 그림 3에서 알 수 있듯이 수송의 용이성 제고를 위해 6-pack 모듈을 사용하였을 때, LLW I 동굴내 기체발생에 대한 이산화탄소 및 메탄의 경우는 그 영향이 거의 없다. 그러나, 수소기체의 경우 6-pack을 사용하여 처분하였을 경우 누적발생량은 577.75 mol/m³으로 6-pack을 사용하지 않았을 때 411.32 mol/m³에 비해 약 1.4배 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 처분장내에 철의 농도가 증가함으로써 그에 따른 부식기체의 발생이 증가하기 때문이다. 이 결과를 좀더 명확히 나타내기 위해 6-pack 모듈 사용유무에 따른 수소기체의 발생률 및 누적발생량에 대한 변화를 그림 4에 나타냈다.

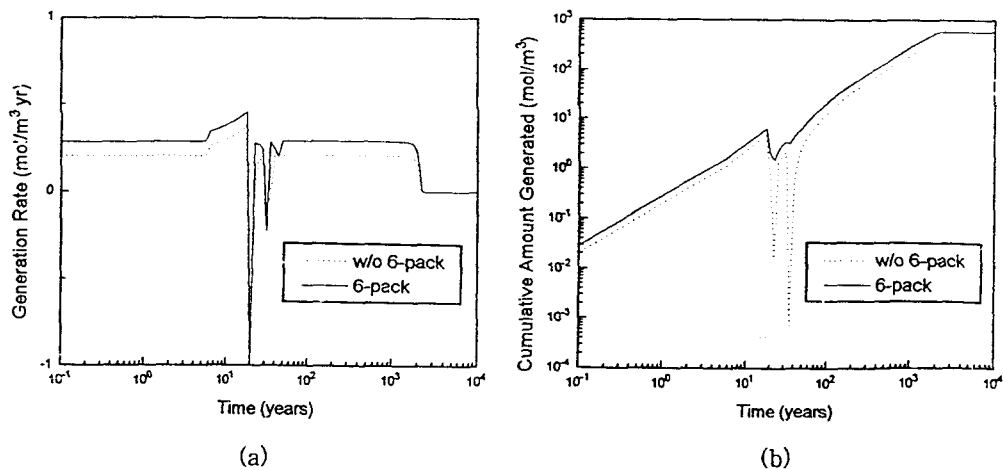


그림 4. 6-pack 모듈 사용유무에 따른 LLW I 동굴에 대한 수소기체의 (a) 발생률 및 (b) 누적발생량의 변화

LLW I 동굴 이외에 LLW II, LLW III, LLW IV 동굴에 대한 기체의 발생량에 대해서도 계산을 수행해 본 결과 LLW I 동굴과 비슷한 경향이 있음을 확인할 수 있었으며, 그 결과를 표 2에 나타냈다.

표 2. LLW II/III, LLW IV 동굴의 6-pack 사용유무에 따른 기체발생률 및 누적발생량

동굴형태	기체	6-pack 사용유무	Cumulative Amount Generated (mol/m ³)	Peak Generation Rate (mol/m ³ yr)	Time of Peak (yr)
LLW II/III	H ₂	no	1186.5	15.596	25
		yes	1703.0	18.153	25
	CO ₂	no	-	8.920	25
		yes	-	8.920	25
	CH ₄	no	132.58	35.253	200
		yes	132.52	35.363	200
LLW IV	H ₂	no	199.80	0.082	20
		yes	247.18	0.105	20
	CO ₂	no	-	0.022	20
		yes	-	0.022	20
	CH ₄	no	0.59	0.045	25
		yes	0.59	0.052	25

4. 결론

방사성폐기물 처분후 처분장내에 발생하는 기체는 금속물질의 양, 셀룰로스물질의 양, 주변 pH 등 여러 요소들에 의해 영향을 받게 된다. 이 논문에서는 수송의 용이성 제고를 위해 고려중인 폐기물모듈을 사용하여 처분하였을 때, 처분장내 금속물질의 농도 증가가 기체발생에 어느정도의 영향을 미치는가를 평가하여 보았다. 평가결과, 폐기물모듈 (6-pack)을 사용하였을 때 CO₂ 및 CH₄의 발생량에는 거의 영향이 없었으나, H₂는 LLW I 동굴의 경우 누적발생량이 577.75 mol/m³로서, 6-pack을 사용하지 않았을 경우의 누적발생량 411.32 mol/m³에 비해 약 1.4배 정도 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히, 수소기체는 다른 기체의 발생량에 비해 현저히 많은 점을 고려하면 그 영향은 비교적 클 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

- [1] G. Purdom and P. J. Agg, "GAMMON (Version 1A): A Computer Program Addressing Gas Generation in Radioactive Waste Repositories Part A: Overview," UK Nirex Ltd Report NSS/R338 (1993).
- [2] P. J. Agg, "Modelling Gas Generation in Radioactive Waste Repositories," Nucl. Energy, 32, No. 2, pp.81-87 (1993).
- [3] "Nuclear Waste Management in Switzerland: Feasibility Studies and Safety Analyses," Nagra Project Report, NGB 85-09 (1985).
- [4] B. Atkinson and A. Mavituna, "Biochemical Engineering and Biotechnology Handbook," Macmillan (1983).
- [5] 박현수 외, "저준위 폐기물 영구처분 시설 건설을 위한 기본설계 요건분석," 한국원자력연구소, KAERI-NEMAC/PR-32/93 (1993).