

## 천층처분시설 덮개 설계분석

### Analysis for Cover Design of A Near Surface Disposal Facility

이은용, 박주완, 박세문, 이찬구, 김창락, 염유선

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

한국수력원자력(주)의 중저준위 방사성폐기물 천층처분시설 개념설계(B type)를 근거로 HELP Code를 이용하여 물수지 분석을 수행하고 처분덮개를 통한 물침투량을 평가하였다. 대전지방 100년 예측 기상조건에서의 모사결과 처분덮개를 통한 최종 물 침투량은 1.0mm 이하 인 것으로 분석되었다. 그러나 인공방벽으로서 지오멤브레인과 아스팔트는 장기 건전성에 대한 입증에 문제가 있으며 이를 고려한 시나리오로서 이 두 방벽층이 기능을 상실하였다고 가정하면 덮개를 통한 최종 물 침투량은 약 35mm인 것으로 분석된다.

#### Abstract

Model Simulation based on NETEC concept design of disposal facility was performed by using HELP Code and the infiltration rate through cover system was estimated with method of water budget. The final leakage through bottom of bentonite mixed layer estimated lower than 1.0mm/year. But long term integrity of geomembrane and asphalt as engineered barrier is not guaranteed yet. So assuming that these two barrier lost their function, the final leakage will be increased to 35mm/year.

#### 1.서론

중저준위 방사성폐기물 처분방식으로 천층처분 방식이 고려됨에 따라 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원은 천층처분시설 개념설계를 수행하였고 설계 기초자료 확보와 성능실증을 위한 처분덮개 시험시설 건설과 시험을 계획하고 있다. 천층처분시설의 안전성 확보에 가장 중요한 점은 강수에 의한 물과 폐기물과의 접촉을 방지하는 것이며 이는 처분덮개 인공방벽성능 확보로서 실현된다. 우리나라 기후조건을 고려하면 장마철에 집중되는 강수에 의한 물 침투를 최소화하는 것이 처분덮개 성능확보와 설계에 관건이라 할 수 있으며 따라서 처분덮개를 통한 물 침투 현상에 대

한 분석과 평가가 필수적이다. 처분덮개를 통한 물 침투는 덮개모사를 통한 물수지 분석(water budget analysis)을 통해 평가 할 수 있다. 본 논문에서는 HELP Code를 이용한 처분덮개 모사분석을 통하여 덮개 각 층의 물 침투 성능을 분석하였다. 설계분석에서는 현재의 설계개념으로 물 침투량을 어느 정도로 최소화 할 수 있는냐에 주안점을 두었으며 개념설계 기준 덮개층 구조 별 유형에 대한 비교분석을 통하여 수리방벽층의 성능을 평가하도록 하였다.

## 2. 처분덮개 성능요건과 설계개념

처분덮개의 성능요건은 1)물 이동의 최소화, 2)배수촉진, 3)부지 내 토양의 투수성과 같거나 낮은 투수성 물질사용, 4)유지보수 최소화, 5)건전성 유지로 요약 될 수 있으며 이는 복합기능을 발휘 할 수 있는 다층덮개 시스템으로 실현 될 수 있으며 다음과 같은 기능을 갖는 보호층, 배수층, 수리방벽층으로 구성된다.

- 보호층(Protective Bio-Barrier Layer)

성능요건으로서 폭우 등 특이조건에서의 강수 표면유출을 유도 할 수 있어야 하나 이로 인한 침식은 허용 한도 내에 억제되어야 한다. 동결과 건열로 부터 수리방벽층을 보호하고 증발산에 의해 건조화 되지 않도록 저류능과 두께가 유지되어야 한다. 또한 식물 뿌리, 동물 등에 의한 손상과 침입을 방지 할 수 있어야 한다

- 배수층(Drainage layer)

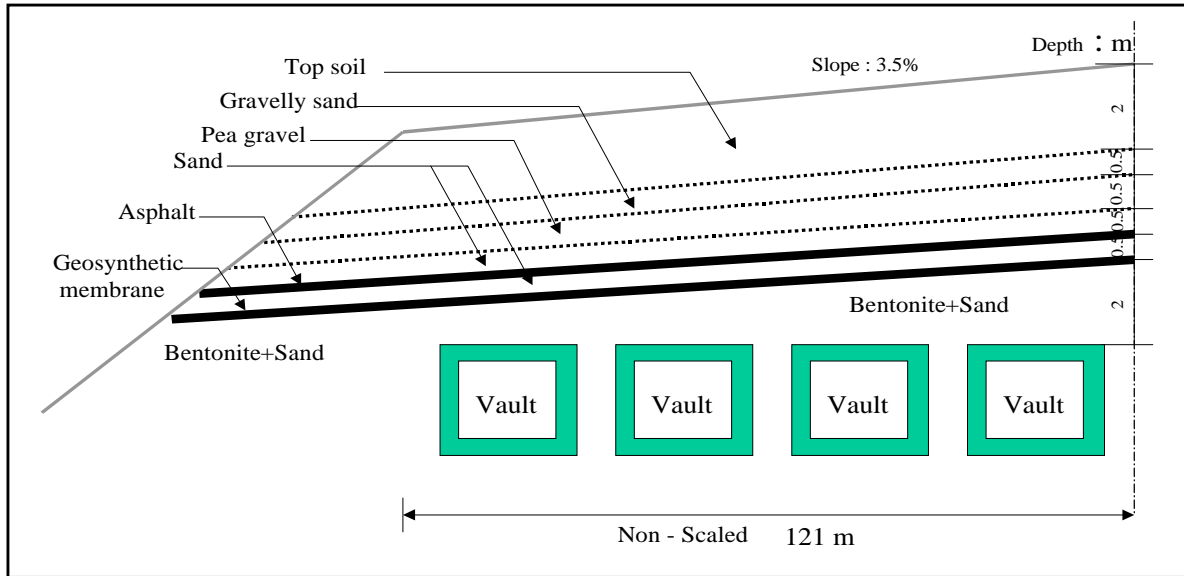
배수층은 가능한 한 수두를 낮게 유지함으로서 이 층을 통한 급격한 배수 현상이 나타나지 않도록 해야하며 수리전도도가 큰 물질을 사용하여 수평방향 흐름을 유도 할 수 있어야 한다.

- 수리 방벽층(Hydraulic Barrier Layer)

덮개를 통한 물 침투를 최소화하는 가장 중요한 역할을 한다. 포화 수리전도도가  $10^{-7}$ cm/s 이하가 되도록 한다. 실트질 내지 점토질 토양을 사용하나 geosynthetic clay liner등이 수리 방벽층 물질로 고려 될 수 있다.

한수원(주) 원자력환경 기술원이 수행한 중저준위 방사성폐기물 천층처분시설 개념설계에서 처분 덮개는 이 같은 복합 기능을 고려한 다층덮개 개념으로서 우리나라 기후 특성 즉, 우기와 건기의 구분이 뚜렷하며 년 중 장마 기간에 강수가 집중되는 현상을 고려하여 수리방벽층으로서 아스팔트 층과 지오멤브레인층 두어 차수 기능을 보완함과 동시에 배수층의 효율성을 높이도록 한 것이 특징이며 설계 개념은 그림1과 같다.

그림 1. 천층처분시설 설계개념(B Type)



## 2. 처분덮개 HELP 모사

### 1) 토양 내 수분이동 기구(mechanism)

물 수지는 다음과 같은 관계식으로 간단히 표현 할 수 있다.

$$RG = P - (RO + ET + \Delta S)$$

$RG$  = 충전량

$P$  = 강수량

$RO$  = 유출량

$ET$  = 증발산

$\Delta S$  = 토양수분 저류량

HELP Code는 기상조건 그리고 토양 물성과 투수성에 따라 유출량, 증발산, 저류량을 계산하며 위 관계식에서 충전량은 시스템을 통하여 침투되는 수량이 된다. 표면 유출량은 경험적 방법(USDA, Soil Conservation Service의 Curve-Number Method)에 의해 간접 계산되며, 증발량과 발산량이 토양 물성과 식생 특성에 따라 각각 계산된다.

토양 내 수분은 포화/불포화 상태 수직이동과 포화상태 수평이동 기구에 따라 이동한다. 그래서 HELP 모델 모사에서 각층은 수직 이동층, 수평 배수층, 방벽층으로 그 기능이 설정되고 이에 의한 이동기구에 의해 물 침투량이 계산된다.

### 가) 불포화 상태 수직이동

불포화 상태에서 수직이동은 토양수분 특성곡선과 Genuhten 공식으로 산출되는 field capacity와 wilting point 값 내에서 허용되며 다음과 같은 일차원 유동 Darcy 법칙에 따라 계산된다. 이때 모세관 현상과 중력에 의한 작용은 고려하지 않는다.

$$q = K \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{3+(2/\lambda)}$$

q = rate of downward flux

$\theta$  = soil water content

$\theta_r$  = residual soil water content

$\theta_s$  = porosity

$\lambda$  = pore size index

#### 나) 포화 상태 수직이동

포화 상태에서의 수직이동은 수리 방벽층에서 만 허용된다. 그래서 방벽층은 포화 상태가 유지되는 것으로 간주되며 침투량은 일차원 유동 Darcy 법칙에 따라 계산된다. 이 때 수두는 방벽층 상부에 형성되는 수두로 계산되므로 HELP 모델 모사에서 방벽층 직 상위에는 수평 배수층을 두어 가능한 불포화 상태가 유지할 수 있도록 한다.

#### 다) 포화 상태 수평이동

HELP Code에서 포화상태 수평이동은 측면 배수층에서 만 허용된다. 포화상태 수평이동은 아래 관계식으로 표현된다.

$$K_s \cos^2 \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left( y \frac{\partial h}{\partial x} \right) + R - K_B \left( 1 + \frac{y}{T} \right) = 0$$

x = horizontal distance from drain

y = saturated thickness in lateral drainage layer

$\alpha$  = inclination angle of lateral drain

h = elevation of phreatic drain

R = vertical drainage rate into saturated portion of lateral drainage layer

$K_s$  = saturated hydraulic conductivity in lateral drainage layer

$K_B$  = saturated hydraulic conductivity in barrier soil

T = thickness of barrier soil layer

이 관계식에서 첫 번째 항;  $[K_s \cos^2 \alpha \frac{\partial}{\partial x} (y \frac{\partial h}{\partial x})]$ 이 측면 배수량으로 계산되며 R은 상부로부터 배수층으로 유입되는 수량이고, 마지막 항;  $[K_B (1 + \frac{y}{T})]$ 은 하부 방벽층으로 유출되는 수량이다. 그래서 위에 언급한 바와 같이 HELP 모델에서 수평 배수를 유도하기 위해서는 배수층 하부에는

반드시 방벽층이 놓이도록 해야한다.

## 2) 덮개 시스템 모사유형

### 가) profile B1-1

덮개 시스템 구성별 성능과 효율성 비교 분석을 위한 기본 유형으로 설정하였다.

덮개 시스템의 성능요건을 만족하는 가장 기본적인 구조이며 처분덮개 개념설계에서 아스팔트층과 지오멤브레인이 제외된 유형이다. HELP Code의 수리지질학적 정의와 기능에 따라 1)상부 보호층; 실트질 표토와 자갈층으로 구성되며 이 층에서 수분은 수직방향 하부층으로 이동한다. 2) 측면 배수층; 모래층으로 불포화 상태에서 수분은 수직방향으로 이동하나 포화 상태에서는 수평방향으로 이동하며 이 수평방향 이동수량이 배수량으로 계산된다. 3)하부 수리방벽층: 벤토나이트(20%)와 사질 토양(80%)을 혼합한 토양으로 물 침투를 억제하는 수리방벽의 역할을 한다. 수리방벽층에서 수분이동은 포화상태 수직이동에 의하며 이 층을 통과한 수량이 덮개 시스템을 통과하는 최종 수량으로 결정된다.

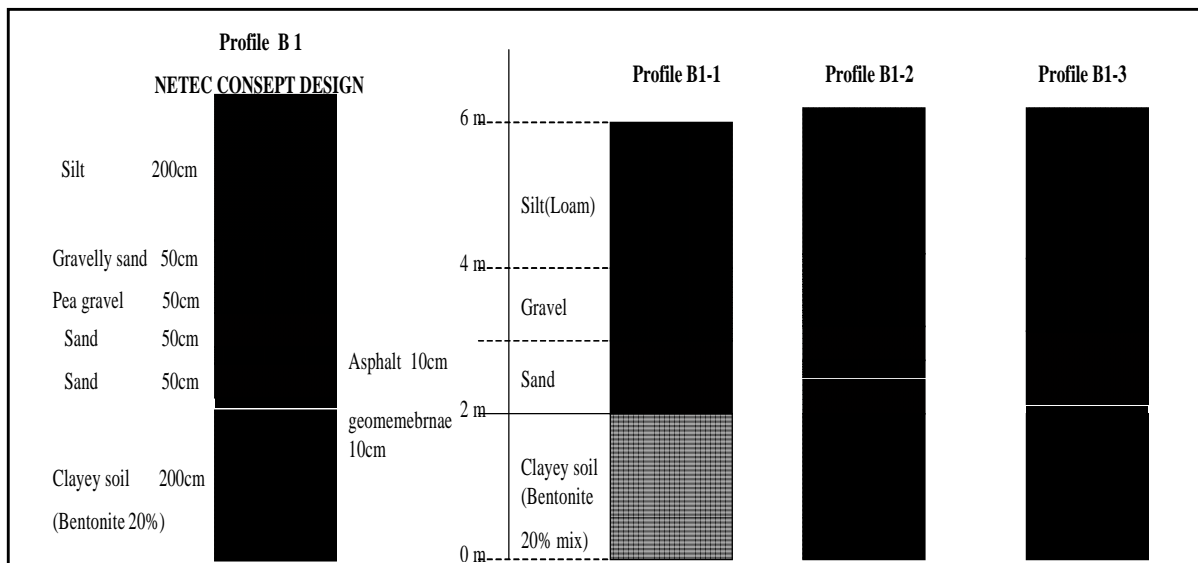
### 나) profile B1-2

Profile B1-1 기본 유형에서 모래층 사이 아스팔트 수리방벽층이 설치된 유형이다. 따라서 두 개층의 측면 배수층이 형성되며 상,하부 측면 배수층의 효율과 아스팔트층의 물 침투 억제효과를 분석하기 위한 유형으로 설정하였다. HELP Code에서 아스팔트층은 수리방벽층으로 기능하며 여타 층의 기능은 Profile B1-1 에서와 같다.

### 다) profile B1-3

Profile B1-1 기본 유형에서 벤토나이트 혼합층 상부에 지오멤브레인이 설치하여 수리 방벽층 기능을 보완 한 유형이며 여타 층의 기능은 Profile B1-1 에서와 같다.

그림2. 덮개 시스템 유형



3) 입력자료

가) 기상자료, 부지자료

기상자료는 대전지방 1969년부터 1999년까지 30년간의 기상관측 자료를 이용하였으며 HELP Code는 이 자료로서 향후 100년 간 기상을 예측하여 물 수지 계산에 이용한다. 대전지방 과거 30년 년 평균 강수량은 1353mm이다. 월 평균 강수량은 1월이 29.13mm로 가장 적고, 8월이 304.76mm로 가장 많으며 6월에서 8월 강수량이 781.23mm로 년 평균 강수량의 56.9%를 차지하여 이 기간에 강수가 집중된다.

향후 100년간의 예측 기상자료와 부지자료로서 물 수지계산에 이용된 입력치는 다음과 같다.

- 년 평균 강수량: 1373.67mm, 100년 주기 일 최대 강수량: 256mm
- 평균 풍속: 6.1KPH, 평균기온: 12.3℃
- 식생/성장기간: wheat grass/184일, 증발 깊이: 25cm
- SCS Curve Number: 74.14, 표면 경사: 3.5%

나)덮개물질 자료

덮개물질의 물성과 수리전도도는 개념설계에 제시된 물질로서 토양에 대해서는 흙의 통일분류법(USCS)에 의한 기준 토양으로 설정하고 이 기준토양의 물성치로서 HELP Model이 정하는 대표 물성치를 입력자료[1] 와 “방사성폐기물 천층처분시설 덮개의 물 수지평가” 장근무 외[4]를 인용하였다.

표1. 덮개물질 물성/수리전도도 입력자료

	Porosity (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Field Capacity (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Wilting Point (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Hydraulic Conductivity (cm/sec)
Top Soil (silt)	0.47	0.1894	0.1123	1.0× 10 <sup>-4</sup>
Gravel	0.32	0.0203	0.02	1.0× 10 <sup>-2</sup>
Pea Gravel	0.26	0.03002	0.03	1.0
Sand	0.37	0.0559	0.0452	3.0× 10 <sup>-2</sup>
Asphalt	0.022	0.021	0.02	1.0× 10 <sup>-7</sup>
Clayey Soil (Bentonite 20%)	0.26	0.138	0.1055	1.0× 10 <sup>-7</sup>
	Pinhole Density (#/ha)	Installation Defect (#/ha)		Hydraulic Conductivity (cm/sec)
Geomembrane	2	4		1.0× 10 <sup>-11</sup>

3)모사결과와 성능분석

처분덮개 개념설계 유형 B1에 대한 모사결과는 그림3 에 나타난 바와 같으며 설계분석을 위한

외 3가지 유형에 대한 계산 결과는 표2 와 같다. 개념설계 유형에서 최하부 벤토나이트 혼합 방벽층을 통한 최종 유출량 100년 평균 최종 침투수량은 0.5mm/년으로 물은 거의 처분고에 도달하지 않으며 4가지 경우 공히 표면 유출량과 증발산량의 합이 852.5mm/년으로 강수량의 62%를 차지한다.

아스팔트층을 통한 침투량은 89.09mm/년이며 아스팔트 층이 설치되지 않은 Profile B1-1 유형과 최종 침투량에서 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 수리전도도가 같은 조건의 벤토나이트 혼합층을 통한 침투량 34.68mm/년과 비교하면 아스팔트 층 두께 10cm로서는 수리방벽으로서의 성능을 발휘하지 못하는 것으로 분석되며 이는 차단방벽 물질로서 토양 또는 유사한 성분의 인공물질을 이용하는 경우 미국 EPA 방벽 설계기준으로 수리전도도는  $10^{-7}$ cm/s 이하의 물질로 두께는 60cm 이상으로 정한 것에 주목 할 필요가 있다 . 그러나 현실적으로 아스팔트 층을 60cm 이상으로 하는 것은 경제적인 측면에서 그리고 시공 상 문제점이 있으므로 향 후 설계에 고려되어야 할 것이다. 동시에 고가의 벤토나이트를 이용하는 경우 현재 2.0m로 설계된 두께를 조정하는 것이 설계에 참조되어야 할 것이다.

지오멤브레인은 불투수성 물질로서 물 침투를 차단 할 수 있는 기능을 갖고 있다. 모사 결과로 보아 최종 침투량을 1.0mm/년 이내로 억제하기 위해서는 지오멤브레인과 같은 토목섬유 사용이 불가피 할 것으로 평가된다. 그러나 토목섬유는 방사성폐기물 처분에서 요구되는 장기 건전성 유지요건을 만족하지 못한다. 프랑스 Lobe 처분장에서 방벽물질로 사용하는 geosynthetic clay liner를 고려해 볼 수 있을 것이다.

그림3. 모사유형 B1 100년 예측 모델계산 결과

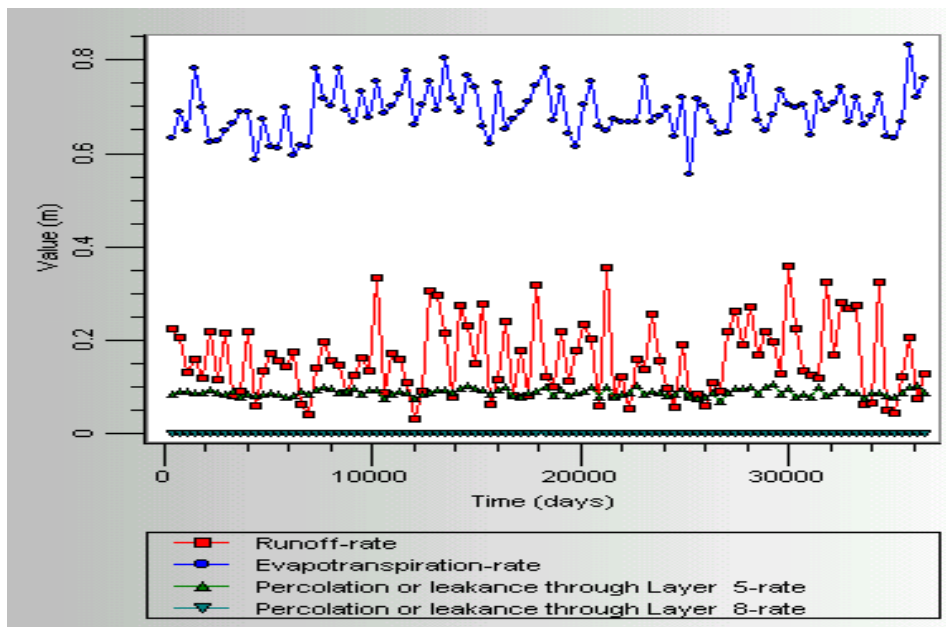


표2. HELP 모사결과 요약  
(100년 평균 물수지 계산결과)

단위; mm

	Profile B1	Profile B1-1	Profile B1-2	Profile B1-3
Precipitation	1373.62	1373.62	1373.62	1373.62
Runoff	161.31	161.31	161.31	161.31
Evapotranspiration	691.19	691.19	691.19	691.19
Lateral Drainage (Upper Layer)	431.98	485.51	431.98	519.14
Percolation through Asphalt	89.09	-	89.09	-
Lateral Drainage (lower Layer)	88.50	-	56.23	-
Percolation through Clayey Soil	<b>0.5</b>	<b>34.68</b>	<b>32.75</b>	<b>1.06</b>
Storage Change		0.913	0.132	0.906

### 3. 결론

한국수력원자력(주)의 중저준위 방사성폐기물 천층처분시설 개념설계(B type)를 근거로 HELP Code를 이용하여 물수지 분석을 수행하고 처분덮개를 통한 물침투 성능을 평가하였다.

물수지 분석을 위한 자료는 대전지방 기상청의 자료를 이용한 HELP Code의 기상예측 프로그램을 이용하였으며 향후 100년 간의 평균 강수량은 1373.62mm/년이고 100년 주기 일최대 강수량은 256mm이다.

이 기상조건에서 처분덮개 개념설계 유형 B1을 포함하는 4가지 유형에 대한 모사분석 결과, 표면 유출량과 증발산량의 합은 852.5mm/년으로 강수량의 62%를 차지한다. 개념설계 유형(Profile B1)에서 방벽 시스템을 통한 최종 침투량은 0.5mm/년으로 강수에 의한 물 침투를 거의 완벽히 차단하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 배수층 중간에 설치된 아스팔트층 10cm 두께로는 수리방벽층으로서의 성능을 충분히 발휘하지 못하는 것으로 평가된다. 또한 지오멤브레인과 아스팔트는 장기 건전성 측면에서 성능유지에 불확실성을 가지고 있으므로

이를 고려한 시나리오로서 이 두 방벽층이 기능을 상실하였다고 가정하는 경우 덮개 시스템을 통한 최종 물 침투량은 약 35mm/년 인 것으로 분석되며 이를 10mm/년으로 제한하기 위해서는 덮개물질의 재료개발 등을 통해 이를 설계에 적용하는 것이 필요 할 것으로 사료된다.

### 4. 참고문헌

- [1] U.S. EPA "THE HYDROGEOLOGIC EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE (HELP) MODEL" USER'S GUIDE FOR VERSION 3. 1994
- [2] EGG-EES-11455, "Calibration of HELP Version 2.0 and Performance Assesment of



Three Infiltration Barrier Designs for Hanford Site Remediation”, P. Martin 1994

[3] USREG/CR-6346 PNL-10843 "Hydrologic Evaluation Methodology for Estimating Water Movement Through the Unsaturated Zone at Commercial Low-Level Radioactive Waste Disposal Site" 1996

[4] “방사성 폐기물 천층처분시설 덮개의 물 수지평가” 장근무, 박주완 외, 1999