

다중 덮개시스템의 모세관 방벽 효과 평가

이정환 · 조현진 · 정재열* · 정해룡 · 윤정현

한국원자력환경공단

Evaluation of Capillary Barrier Effect of Multi-layer Cover System

Jeong-Hwan Lee · Hyun-Jin Cho · Jae-Yeol Cheong* · Haeryong Jung · Jeong Hyoun Yoon

Korea Radioactive Waste Agency

ABSTRACT

Capillary barriers, consisting of relatively fine-over-coarse materials, have been suggested as an alternative to traditional compacted soil covers. So, We were analysed to capillary barrier effect according to five cases of multi-layer cover systems. Water balance simulation was conducted with unsaturated flow model HELP to assess unsaturated hydraulic parameters such as hydraulic conductivity, climate affecting the performance of capillary barriers. Simulation were conducted for 5 Cases in the Ulsan area. Result of simulation indicated that three cases was formed unsaturated condition and capillary barrier effect.

Key words : Capillary barrier, Water balance, HELP, Unsaturated hydraulic parameter, Climate

1. 서 론

반건조나 건조지역은 부족한 강수량으로 인해서 다양한 폐기물을 처분하는데 이상적인 위치로 보고되고 있다(Nativ, 1991). 그러나 최근의 연구 결과에 의하면, 이러한 지역에서도 강수시 지하수 함양에 의한 방사성폐기물의 열화에 미치는 영향이 매우 중요하다는 것이 보고되고 있다(Gee and Hillel, 1988; Allison et al., 1994; Benson and Khire, 1995; Fayer et al., 1996). Gee et al.(1994)은 3곳의 사막 지역에 대해 물수지 분석을 통하여 강수의 60% 이상이 함양됨을 규명하였다. 따라서 강수의 지하수 함양으로 인해 폐기물이 심각한 영향을 받을 수 있으며, 이를 해결하기 위해서 공학적 폐기물 격납 시스템을 설치해야 한다.

일반적으로 Capillary barrier system(모세관 방벽 시스템)은 상부와 하부에 세립질과 조립질의 토양으로 구성되어 있으며, 강수에 의한 침투량을 저감시키는 시스템으로 기존의 압밀된 지층 덮개에 대한 하나의 대안으로 제안되어져 오고 있다(Daniel, 1994; Benson and Ckhire, 1995;

Stormont, 1996; Ward and Gee, 1997; Dwyer, 1998). 모세관 방벽에서 세립질 토양은 모세관 압력에 의해서 상부에서 침투되는 물을 보유하게 되어 수직적 유동에 대해 방벽으로서 역할을 담당하게 된다. 그러나 모세관 방벽 효과의 상실은 세립질과 조립질 토양의 경계면에서 세립질 토양의 함수량이 포화가 진행되어 토양 장력이 조립질 토양의 가스 유입 압력과 동일해질 때 발생한다. 따라서 모세관 방벽은 강수량이 매우 큰 여름과 증발산량이 가장 작은 겨울에 대부분 크게 영향을 받게 된다(Morris and Stormont, 1999). 그러나 모세관 방벽 시스템은 압밀된 토양층의 열화에 영향을 받지 않기 때문에 장기적으로 큰 건전성을 유지할 수 있으며, 단순한 설계 구조에 의한 경제성이 우수한 것으로 보고되고 있다.

모세관 방벽 효과에 영향을 미치는 것에는 강수량 조건, 증발산량 조건, 층의 경사 및 두께 등 다양한 인자들이 있지만, 이 중에서 상부의 세립질 토양층과 하부 조립질 토양층 사이의 불포화 수리적 특성에 대한 대비(contrast)가 지하수 유동을 가장 크게 제한하는 요인에 해당된다. 본 연구의 목적은 지역적인 수문환경을 고려한 다중 지층

*Corresponding author : jjy@korad.or.kr

Received : 2015. 12. 14 Reviewed : 2015. 12. 16 Accepted : 2015. 12. 21

Discussion until : 2016. 4. 30

덮개 시스템의 성능 유지 평가를 위해서 물수지 순환 분석을 수행하여 다양한 다중 덮개시스템의 모세관 방벽 효과를 규명하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 모세관 방벽 효과 분석법

본 연구에서 모세관 방벽 효과를 평가하기 위해 van Genuchten 함수를 적용하여 해석하였다(van Genuchten, 1980). van Genuchten 함수는 토양의 물리적 특성을 해석을 위해 일반적으로 적용되며, 수치 모델화 적용에 용이하고 실험 자료들의 매칭을 통하여 결과 비교가 명확하여 본 연구에서 해석 모델로 선정하였다. 함수비(θ (cm³/cm³))와 토양 장력(h (cm))과의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\theta = \frac{\theta_r - \theta_s}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad (1)$$

여기서, θ_r 는 잔류 함수비(cm³/cm³), θ_s 는 포화 함수비(cm³/cm³), α 는 가스 유입 압력(1/cm), $m = 1 - 1/n$ (무차원), n (무차원)은 입경분포 특성을 의미한다.

불포화대 조건에 따른 수리전도도 특성은 다음과 같이 표현된다.

$$k = k_s \theta^{1/2} (1 - (1 - \theta^{1/m})^m)^2 \quad (2)$$

여기서, k_s 는 포화 수리전도도(cm/s)이다.

2.2. 덮개시스템 물수지 분석법

본 연구에서 모세관 방벽 효과를 분석하기 위해서, EPA의 U.S.Army Corps of Engineers에 의해서 개발된 HELP(Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) code를 적용하였다(Schroeder et al., 1994). 이 전산코드는 매립장, 덮개시스템, 고품 처분장 및 오염물질 처리장 등의 물수지 분석을 수행하는데 일반적으로 적용된다(Mey et al., 1996).

3. 결과 및 고찰

3.1. 다중 덮개시스템의 설계

다중 덮개는 강수에 의한 최종 처분물질에 대해 접촉되는 침투수량을 최소화하며, 침식작용, 동결융해, 식물 뿌리 및 동물의 침입 등의 자연환경 변화에 의한 보호 등의 목적을 위해 여러 가지 재료로 구성된다. 다중 덮개 시스템 구성은 일반적으로 표면층(Surface layer), 보호층(Protective layer), 여과층(Filter lalyer), 배수층(Drainage layer), 모세관 방벽층(Capillary barrier layer)으로 구분된다(Fig. 1) (EPA, 1989). 표면층은 silty sand로 구성되며, 식물의 성장을 촉진시켜 모재의 침식을 제한하고 증산작용에 의한 토양 수분 제거 촉진이 주요한 목적이다. 보호층은 gravelly sand 혹은 pea gravel로 구성되며, 식물의 뿌리 혹은 동물의 침입을 방지하는 것이 주요한 목적이다. 여과층은 공학적인 멤브레인에 해당되며 공학적인 방벽층에 해당된다. 배수층은 sand로 구성되며, 식생층으로부터 흡수된 물을 배출하기 위한 목적이다. 모세관 방벽층은 clay로 구성되며, 흡수된 물의 포집 및 배수가 주요한 목

Surface layer (silty sand)	. slope : 3-5%(humid), 2%(arid) . thickness : ≥60cm[60-100cm(humid), 200cm(arid)]
Protective layer (gravelly sand, pea gravel)	. erosion rate : < 2ton/acre/yr . resistant repeated freeze/thaw cycles
Filter layer (flexible membrane liner)	. slope : ≥3% . thickness : ≥30cm . K : >10 ⁻⁶ cm/s
Drainage layer (sand)	. hydraulic transmissivity : > 3.0×10 ⁻⁵ m ² /s(3.0×10 ⁻⁹ cm ² /s) . particle size : >0.95cm
Barrier layer (clay)	. thickness : ≥60cm . slope : ≥3% . K : <1.0×10 ⁻⁷ cm/s(≈3.2cm/yr)

Fig. 1. Schematic performance of multi-layer cover system (from EPA, 1989).

Table 1. van Genuchten parameters for multi-layer cover system (from Schroeder et al., 1994)

Layer	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K (cm/s)	Porosity (cm ³)	Wilting point	Field capacity
Silty sand	0.1000	0.4700	0.044	1.523	1.0 × 10 ⁻⁴	0.47	0.1123	0.1894
Gravelly sand	0.0200	0.3200	0.1008	2.922	1.0 × 10 ⁻²	0.32	0.02	0.0203
Pea gravel	0.0300	0.2600	4.695	2.572	1.0 × 10 ⁰	0.45	0.03	0.03002
Sand	0.0450	0.3700	0.0683	2.080	3.0 × 10 ⁻²	0.37	0.0452	0.0559
Clay	0.0001	0.3600	0.0016	1.203	1.0 × 10 ⁻⁷	0.64	0.187	0.31

적에 해당된다. 본 연구는 다중 덮개시스템의 물수지 분석을 위해 적용된 토양 특성에 대해 van Genuchten 함수로 제시하였다(Table 1).

3.2. 다중 덮개시스템의 구성 물질의 모세관 방벽 효과 분석

모세관 방벽 효과는 인접한 두 층의 수리전도도 차이에 의해서 측면으로 배수시키는 개념으로 두 층의 수리전도도 차이가 클수록 기능이 우수하다(Morris and Stormont, 1999). 본 연구에서는 모래층과 점토층을 모세관 방벽으로 설정하였으며, 덮개 경사는 3.5%를 적용하여 모세관 방벽 효과가 원활히 생성될 수 있도록 설정하였다.

다중 덮개시스템을 구성하는 물질 중에서 모세관 방벽 효과에 영향을 미치는 물질은 배수층의 sand와 모세관 방벽층의 clay가 해당된다. 본 연구에서 적용된 토양을 van Genuchten 함수를 활용하여 장력조건에 따른 수리전도도를 평가한 결과, 모래층과 점토층의 교차점(Point C)이 확인되어 다중 덮개시스템 내에서 모래층과 점토층으로 구성된 모세관 방벽 효과를 확인할 수 있었다(Fig. 2). 즉 장력조건이 -120 cm 이상인 조건에서는 모래층의 수리전도도가 점토층의 수리전도도보다 더 작게 되어, 불포화대 조건에서는 점토층에서 물의 유동이 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 모래층과 점토층의 장력조건이 -120 cm 이하인 조건에서는 모래층이 점토층보다 수리전도도가 더 증가되어 모세관 방벽 효과가 상실되는 것으로 나타났다.

3.3. 다중 덮개시스템의 초기 침투수량 인자 분석

모래층과 점토층의 모세관 방벽 효과 특성을 규명하기 위해서 van Genuchten 함수를 활용하여 분석한 결과, 다중 덮개시스템 내에서 모세관 방벽 효과가 수리적으로 발생됨을 규명하였다. 또한 실제 한반도 지역의 기후조건을 반영한 다중 덮개시스템의 모세관 방벽 효과를 평가하는 것이 요구된다. 따라서 실제 기후 특성에 대한 도출된 다중 덮개시스템의 모세관 방벽 효과를 평가하기 위해서, 표면층의 강수량에 대한 초기 침투수량을 계산하였다. 본 연구에서는 한반도 남부 울산지역의 물수지 분석 자료를 활용하여 다중 덮개시스템의 입력 자료로 활용하였다(Lee et al., 2016).

연구지역의 연평균 강수량(1,286 mm)은 울산광역시외 과거 30년간(1985년~2014년) 강수량 자료를 이용하였으며, 증발산량(693 mm)은 Thornthwaite 방법(Thornthwaite et al., 1957), 직접유출량(124 mm)은 SCS-CN 방법(Morel-Seytoux and Verdin, 1981)으로 계산하였다. 기저유출량에 대해서는 현재까지 정확하게 연구된 자료가 없기 때문에 해안유출량 자료(17.8%)인 229 mm로 가정하

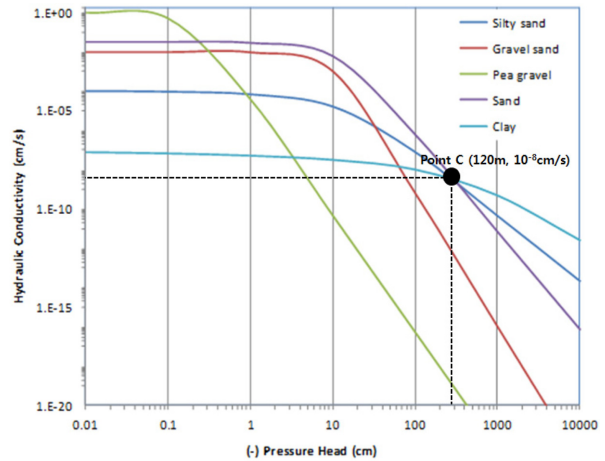


Fig. 2. Unsaturated hydraulic parameters in unsaturated materials.

여 적용하였다(Gwak et al., 2014). 또한, HELP code를 이용한 물수지 분석을 위해 연평균 강수량, 지표유출량, 증발산량 등은 처분장 지역의 30년간(1985~2014) 월평균 강수량 데이터, 온도데이터 등을 입력하고, 입면적지수 등 그 밖의 데이터는 HELP code에 포함되어 있는 DB 적용값을 이용하였다. HELP code의 기상 발생 모듈인 기상데이터 생성 모듈에서 연평균 강수량, 지표유출량, 증발산량을 생성하여 상호 결과를 비교한 결과, 수문순환을 고려한 물수지 방법과 수치 모델링에 의해 계산된 수치가 서로 유사하여 HELP code로 계산된 수문순환 자료를 다중 덮개시스템의 초기 입력인자로 설정하였다.

3.4. 다중 덮개시스템의 물수지 분석 결과

다중 덮개시스템의 모세관 방벽 효과에 따른 물수지 분석을 수행하기 위해서 모래층과 점토층의 두께와 구성배열을 다르게 적용하여 총 5가지(Case 1~Case 5)의 설계안에 대해 물수지 수치 모델링을 수행하였다(Fig. 3).

각각에 대해 물수지 분석 결과, 최종 점토층에서 누출되는 침투수량은 31.2, 31.2, 32.5, 33.1, 30.9 mm/y로 계산되었다(Table 2). 포화된 조건에서 점토층의 수리전도도는 약 1.0×10^{-7} cm/s로서, 연간 침투수량은 약 33 mm/y로 결정된다. 따라서 포화조건 침투수량보다 적은 경우는 Case 1, Case 2, Case 5가 해당된다. 위의 경우는 포화수리전도도보다 낮은 침투수량을 나타내기 때문에 불포화 조건이 형성됨을 나타내는 것이며, 이는 모세관 방벽 효과가 유지됨을 알 수 있다(ONDRAF/NIRAS, 2010). 또한 점토층 2열이 포함된 경우(Case 5)가 가장 낮은 침투수량을 나타내어, 모세관 방벽 효과가 가장 우수한 설계로 평가되었다.

Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Silty sand 2m	Silty sand 2m	Silty sand 2m	Silty sand 1m	Silty sand 1m
Gravelly Sand 0.5m	Gravelly Sand 0.5m	Gravelly Sand 0.5m	Gravelly Sand 0.5m	Gravelly Sand 0.5m
Pea Gravel 0.5m	Pea Gravel 0.5m	Pea Gravel 0.5m	Pea Gravel 0.5m	Pea Gravel 0.5m
Sand 0.3m	Sand 0.3m	Sand 0.3m	Sand 0.3m	Sand 0.3m
Clay 0.8m	Clay 0.6m	Clay 0.9m	Pea Gravel 0.3m	Clay 0.6m
Sand 0.3m	Sand 0.3m	Clay 0.9m	Sand 0.3m	Sand 0.3m
Clay 0.8m	Clay 0.6m	Clay 0.9m	Clay 0.6m	Clay 0.6m
Sand 0.3m	Sand 0.3m	Sand 0.3m	Sand 0.3m	Sand 0.3m
slope 3.5%, 5.5m	slope 3.5%, 5.1m	slope 3.5%, 4.5m	slope 3.5%, 3.8m	slope 3.5%, 4.1m

Fig. 3. Schematic diagram of multi-layer cover systems (Case1~Case 5) for estimating the capillary barrier effect.

Table 2. Result of water balance according to Case 1~5 using HELP code

	Case 1 (mm/y)	Case 2 (mm/y)	Case 3 (mm/y)	Case 4 (mm/y)	Case 5 (mm/y)
Rainfall	1286	1286	1286	1286	1286
Runoff	102.08	102.08	102.08	140.00	140.01
ET	769.09	769.09	769.09	769.40	768.63
Flux to side	387.67	387.66	385.98	348.61	371.99
Infiltration	31.16	31.17	32.53	33.08	30.90

4. 결 론

다중 덮개시스템의 모세관 방벽 효과를 분석하기 위해 HELP 코드를 활용하여 물수지 분석을 수행하였다. 수치 모델링 결과, 다중 덮개시스템 내로의 최종 침투수량은 각각 30.9~31.2 mm/y로 분석되었다. 각 처분 시스템의 조건에 따라 모세관 방벽에 해당되는 모래층과 점토층이 불포화조건을 형성하여 모세관 방벽 효과를 나타내는 것으로 분석되었다. 따라서 남동부 지역(울산광역시 지역) 기후조건을 반영한 다중 덮개시스템에서 모세관 방벽 효과의 성능 목표가 달성됨을 알 수 있었다. 이는 향후 본 연구 해당지역에 중·저준위방사성폐기물 처분시설의 최종 덮개시스템 설계 시 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20141720100610). 또한 논문 교정 작업을 맡아준 박보배님과 이원준님께도 감사를 전합니다.

References

- Allison, G., Gee, G., and Tyler, S., 1994, Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**, 6-14.
- Benson, C.H. and Khire, M.V., 1995, Earthen covers for semi-arid and arid environments, Landfill closures, *Geotech. Spec. Publ. No. 53*, New York, 201-217.
- Daniel, D.E., 1994, Surface barriers: Problem, solutions, and future needs, Proc. 33rd hanford symp. on Health and the Environment., 441-487.
- Dwyer, S., 1998, Alternative landfill covers pass the test, *Civ. Engrg.*, ASCE, **68**(9), 50-52.
- EPA, 1989, Technical guide document: Final covers on hazardous waste landfills and surface impoundments, United States Environmental Protection Agency, EPA 530-SW-89-047, 39 p.
- Fayer, M., Gee, G., Rockhold, M., Freshley, M., and Walters, T., 1996, Estimating recharge rates for a groundwater model using a GIS, *J. Envir. Quality*, **25**, 510-518.
- Gwak, Y.-S., Kim, S.-H., Lee, Y.-W., Khim, B.-K., Hamm, S.-Y., and Kim, S.-W., 2014, Estimation of submarine groundwater discharge in the Il-Gwang watershed using water budget analysis and 222Rn mass balance, *Hydrol. Process.*, **28**, 3761-3775.

- Gee, G. and Hillel, D., 1988, Grondwater recharge in arid regions: review and critique of estimation methods, *Hydrol. Process.*, **2**, 255-266.
- Gee, G., Wierenga, P., Andraski, B., Young, M., Fayer, M., and Rockhold, M., 1994, Variations in water balance and recharge potential at three western sites, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**, 63-72.
- Lee, J.-H., Jung, H., Park, S.-W., Cheong-J.-Y., Park, S.-J., and Lee, C.-H., 2016, Evaluation of percolation rate of bedrock aquifer in coastal area, *J. Korean Radioactive Waste Soc.*, In press.
- Mey, P.D., Rockhold, M.L., Nichols, W.E., and Gee, G.W., 1996, Hydrologic evaluation methodology for estimating water movement through the unsaturated zone at commercial low-level radioactive waste disposal sites, Division of Regulatory Applications Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 91 p.
- Morel-Seytoux, H.J. and Verdin, J.P., 1981, Extension of the soil conservation service rainfall-runoff methodology for ungaged watersheds, Report FHWA/RD-81/060 Offices of Research & Development Environmental Division, U.S. Federal Highway Administration, 75 p.
- Morris, C.E. and Stormont, J., 1999, Parametric study of unsaturated drainage layers in a capillary barrier, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 1057-1065.
- Nativ, R., 1991, Radioactive waste isolation in arid zone, *J. Arid Envir.*, **20**, 129-140.
- ONDRAF/NIRAS, 2010, Long-term evolution of the multi-cover: project near surface disposal of category a waste at Dessel STB-NF - version 1, Belgiam agency for radioactive waste and enriched fissile materials, NIROND-TR 2010-03, 175 p.
- Schroeder, P.R., Lloyd, C.M., Zappi, P.A., and Aziz, N.M., 1994, The hydrologic evaluation of landfill performance (HEPL) model, User's guide for Version 3, US EPA, Washington, D.C.
- Stormont, J.C., 1996, The effectiveness of two capillary barrier on a 10% slope, *Geote. & Geol. Eng.*, **14**, 243-267.
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., and Carter, D.B., 1957, Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance, Drexel Institute of Technology, Philadelphia. *Publications in climatology*, **10**(3), 185-311.
- van Genuchten, M., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892-898.
- Ward, A. and Gee, G., 1997, Performance evaluation of a field-scale surface barrier, *J Envir. Quality*, **26**, 694-705.