

사용종료 폐기물 매립장의 멤브레인 차수시스템 안정성 평가

Evaluation of the Stability of Geomembrane Liner System in Closed Waste Landfill

이 흥 길¹ Lee, Heung-Gil
오 영 인^{2*} Oh, Young-In

ABSTRACT

Recently, the effective use of closed waste landfill nearby urban areas has been demanded, because of the lack of the usable land. However, the reuse of closed landfill is needed an adequate stabilization of liner system. But most of these places are consisted of steep slope and hence it is necessary to use the geosynthetics liners in there. Liner system of waste landfills is an important facility which prevents leachate outgoing from the landfills and also groundwater infiltrating from surroundings into the landfills. During the waste disposal stage, differential settlement and tensile stress of the geosynthetic materials could occur due to impact load of trucks and dozers, waste loads and weak foundation soils. In this study, the tensile strength and tracer test were performed to evaluate the stability of geomembrane liner systems. Based on the tensile strength test result of in-situ geomembrane sample, the yield tensile strength maintain the suitable strength by specification and current law. However, according to the tracer test, the damage of geomembrane liner was detected on sanitary landfill section.

요 지

최근 도시에 근접한 매립장은 인구밀집 지역과의 근접성, 부지개발에 따른 경제적 가치급등 등의 이유로 활용 가능한 새로운 건설부지로서의 관심이 집중되고 있다. 그러나 대부분의 사용 종료된 매립장은 매립장 내에 침출수의 누출방지를 위한 차수시스템이 바닥 및 사면부에 존재되어 있으며, 상부 부지의 재활용 설계 시 침출수 집배수 및 차수시스템의 안정성 평가를 실시하여 차수시스템 손상에 따른 지하수 주변지역 오염을 방지하여야 한다. 일반적으로 사용 종료된 폐기물 매립장의 차수시설은 매립장 운영과정에서 폐기물 덩핑에 따른 충격하중, 장비하중, 장기적인 매립폐기물 하중으로 인하여 인장강도변화 및 불규칙한 침하에 의한 손상이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 사용종료매립장 부지의 재활용 시, 침출수의 누출방지를 위하여 기존 차수시스템 안정성 평가에 대한 연구를 수행하였다. 기존 사용종료매립장의 차수시스템의 안정성 및 손상여부를 평가하기 위하여 굴착 샘플링 시료에 대한 인장강도 시험 및 현장 추적자 조사를 실시하였다. 현장시료에 대한 인장강도 시험 결과, 항복인장강도는 시방기준 및 현행 폐기물관리법 설치기준에 적정하였으나, 추적자 조사결과, 위생매립구간 차수슈트의 손상이 확인되었다.

Keywords : Closed waste landfill, Tracer test, Tensile strength, Geomembrane sheet, Liner system

1. 서 론

세계적으로 폐기물 발생량이 증가함에 따라 매립지의 숫자는 증가하고 있으나, 사용이 종료된 매립지에 대한 재활용 및 처리는 아직까지 많은 어려움이 있다. 특히, 도시

폐기물 매립장은 인구밀집 지역과의 근접성, 부지개발에 따른 경제적 가치의 급등 등의 이유로 활용 가능한 새로운 건설부지로서 많은 관심이 집중되고 있다. 또한, 개발면적이 협소하고, 도심지역에서 개발대상지역의 확보 필요성이 절실한 우리나라의 경우, 도시 인접지역의 폐기물 매립

1 비회원, 국립충주대학교 토목공학과 교수, (Non-Member Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungju National University)

2* 정회원, 한국농어촌공사 농어촌연구원 환경자원연구팀 주임연구원 (Member, Senior Researcher, Research Group on Rural natural Environment, Rural Research Institute, KRC. E-mail: yioh2010@kgri.co.kr)

장 재활용은 큰 의미를 갖는다. 사용종료 매립장의 토지활용의 경우, 현행 폐기물 관리법 제 54조(사용종료 또는 폐쇄 후의 토지 이용 제한 등)에서는 사용 종료된 매립장이 침출수 누출, 제방유실 등 주변 환경에 심각한 위해를 가저을 우려가 있는 시설을 제외하고는 사용종료 매립장의 토지활용을 가능하도록 하고 있다(환경부, 2008). 토지 이용 제한은 사용종료매립장의 법적 사후관리 기간인 20년 동안 지속되나, 앞서 기술한 바와 같이 매립장으로 인하여 주변 환경이 심각하게 오염될 우려가 없을 경우는 토지이용계획도면, 지적도, 사용종료 매립장의 관리현황만 파악되면 토지활용을 할 수 있다. 일반적으로 사용 종료된 폐기물 매립장의 차수시설은 매립장 운영과정에서 폐기물 덩핑에 따른 충격하중, 장비하중, 장기적인 매립폐기물하중으로 인하여 인장강도변화 및 불규칙한 침하에 의한 손상이 발생되었을 수 있다(박지원, 2002; Singh and Murphy, 1990). 본 연구에서는 사용종료매립장 부지의 재활용을 위한 기본 전제조건인 침출수의 누출여부 평가기법에 대하여 연구를 수행하였다. 기존 사용종료매립장의 차수시스템의 안정성 및 손상여부를 평가하기 위하여 추적자 조사를 실시하였으며, 추적자 조사결과에 따른 대책방안을 제시하였다. 본 조사대상매립장은 경상남도 00군에 위치한 사용종료매립장으로 비위생 및 위생매립구간이 복합적으로 구성되어 있다. 매립시설 운영은 1991년 1월~1995년 7월까지 4년 7개월이며, 매립대상 폐기물은

생활폐기물로 사용종료 후 현재 사후관리중인 매립장이다(마산시, 2003, 2008). 표 1은 연구대상 사용종료매립장의 개요를 표로 나타낸 것이다.

2. 차수시스템 안정성 평가기법분석

2.1 추적자 조사기법

추적자 조사의 목적은 지하 매질의 관심 있는 두 지점 사이의 수리적인 연결성을 확인하거나 대수층에서 용질의 이동특성을 반영하는 물리·화학·생물학적 매개변수를 추정하고자 하는 것이다. 본 과업에서 수행된 추적자 시험은 전자에 해당하는 시험으로 특히 위생매립지의 차수시설 손상파악을 목적으로 수행하였다. 지하수에서 추적자의 이동은 크게 이송(Advection)과 분산(또는 확산, Dispersion)에 의해 일어난다. 이송은 지하수의 흐름에 따라 오염물질이 함께 움직이는 작용(Bulk movement)으로 오염물질의 이동을 예측하는 중요한 역할을 한다. 이송에 의한 추적자의 이동속도는 매질의 수리전도도, 유효공극률, 수두구배에 따라 결정된다. 분산 혹은 수리동력학적 분산은 오염원이 지하수의 주된 흐름방향을 따라 퍼져나가는 현상을 말한다. 만약 이송에 의해서만 오염물질이 이동한다면 그림 1에서 보는바와 같이 수직적 형태의 전면(Sharp front)을 가지며 앞서가는 전면의 후면에서도 초기농도와 같은 농도

표 1. 연구대상 사용종료매립장 개요

구 분	개 요		
위 치	경상남도 00군 일원	토지소유	사유지
매립면적	225,400m ²	토지이용실태	농경지
매립용량	1,417,000m ³	지 형	평 지
매 립 고	•최종복토층 : ≒2.0~3.0m •폐기물층 : 1.5~7.5m(매립층 약 5.0m)	매립폐기물종류	생활폐기물
매립기간	'91. 01 ~ '95. 07(약 4.7년)	사용종료	1995년 7월

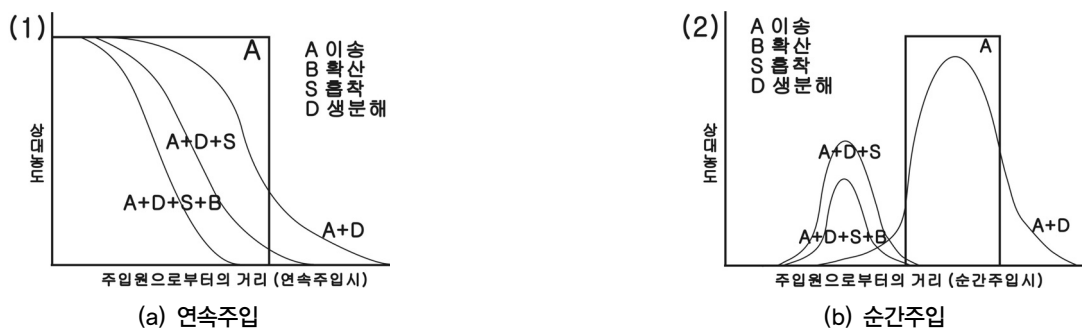


그림 1. 추적자의 이동 특성(Wiedemeier 등, 1999)

를 보일 것이다. 그러나 실제 오염물질의 이동은 확산에 의하여 더 퍼져나가는 형태를 띠게 된다.

분산은 기계적 분산과 분자확산(diffusion), 두 가지 과정으로 구분할 수 있다. 기계적 분산은 오염물질이 지하매질을 통과할 때 경로에 따라 속도의 차이를 보이는데 이러한 속도와 경로 차이로 인하여 오염물질이 퍼져나가는 현상을 말하며, 분자확산은 지하수 흐름방향과 무관하게 높은 농도에서 낮은 농도로 퍼져나가는 현상을 의미한다. 일반적으로 수리지질학적 조건에서는 기계적 분산이 지배적이며 대부분의 지하수 연구에서 분자확산은 그 규모가 작아 무시한다. 또한 지하수의 흐름속도가 빠를수록 이송과 기계적 확산의 중요도가 증가하고 분자확산의 영향이 극히 미미해진다. 분자확산이 큰 영향을 줄 수 있는 경우는 지하수의 흐름속도가 극단적으로 작거나 혹은 관심대상 시간의 길이가 수백 혹은 수천 년인 경우이다(문상기 등, 2002).

앞서 언급한 추적자조사는 일반적으로 지하수의 흐름 특성분석에 주로 적용되어져 왔으며, 최근 오염물질의 분산, 이송, 확산, 흡착특성을 파악하고 수질모델링 자료 수집을 위하여 적용되고 있다. 국내에서 추적자 조사기법을 통한 폐기물매립장의 침출수 누출조사는 이광열 등(2004)에 의해 최초 보고되었으며, 요오드와 로다민 WT 추적자를 활용하여 매립시설의 차수시설 손상도 평가를 효과적으로 수행한 바 있다. 또한, 최근 해양에서 특성수괴(녹조 현상)를 추적하기 위하여 개발된 SF₆가스를 매립지 침출수 누출 영향범위 측정 및 평가에 활용하는 연구가 수행된 바 있으며, 기존의 염료, 이온, 동위원소 추적자의 단점(탁도 영향, 짧은 잔류시간)을 보완하여 주변물질의 성상과 반응을 보이지 않으며, 실시간으로 장기간 측정이 가능하다고 보고된 바 있다(이기택, 2006). 특히, SF₆는 가스 상태로 물속에 녹아있기 때문에 필터를 통과해도 제거되지 않으며, 화학적으로 안정하기 때문에 반응에 따른 흡착 등이 발생되지 않는 장점을 가지고 있다.

2.2 주입 추적자의 특징

추적자는 일반적으로 반응성 추적자와 비반응성 추적자로 나뉘며 반응성 추적자의 경우, 지하 매질의 화학적 생물학적 반응상태를 측정하기 위한 것으로 NH⁺, Mg²⁺, 포도당, 젖산 등이 있다. 비반응성 추적자의 경우, 지하 매질의 수리 물리학적 특성을 측정하기 위해 사용되는 추적자로서 대표적인 물질로는 H⁺, Cl⁻, Br⁻, I⁻ 및 NO₃²⁻ 등의

무색 추적자, 고가의 SF₆와 같은 가스 상 추적자가 있으며, 저렴하고, 사용하기에 단순하면서 효과적인 염료(dye) 추적자가 있다. 이러한 추적자들은 이류에 의해 지하수의 공급 유속과 비슷한 상태로 움직이거나 미시적 규모에서 비반응물질은 매체의 불규칙성과 공극크기의 차이에 의해 발생하는 역학적인 분산과 농도구배 및 지하수의 이류현상이 동시에 발생하는, 즉 이류와 수리분산이 지배되는 조건하에서 움직이게 된다. 본 연구의 추적자 시험 목적은 지하수 흐름구간에 설치된 소규모 매립시설의 차수시설 손상파악이 일차적인 목적으로 하고 있어, 매립시설 내에 약 5m 깊이의 트렌치와 지하수 관측정, 가스 측정공 등에 추적자를 주입하고, 지하수 흐름 하류부에서 추적자 검출 여부를 모니터링 하도록 계획하였으며, 적용추적자는 염료 추적자인 로다민 WT(Rhodamine WT)와 플루오레시언(fluorescein; 별칭 우라닌(uranine)) 두 가지 형광추적자를 이용하였다. 로다민 WT는 적색을 띠는 형광물질로서 최소 검출능력, 광화학적, 미생물학적 분해 비율, 흡착성 등에서 가장 유용한 추적자로 사용되고 있으며, 추적자 시험에 사용되는 염료 중 가장 보존성이 높다. 본 연구에서는 Turner Designs사(미국)에서 농도 20%로 제조된 표준시약을 사용하였다. 화학식은 C₂₉H₂₉N₂O₅-Na₂Cl이며, 분자량은 567이다. 이 형광추적자가 지하수 연구에 세계적으로 광범위하게 적용되고 있는 이유를 Sutton et al. (2001)은 다음과 같은 다섯 가지를 제시하고 있다. ① 형광광도계(fluorometer)를 이용하여 0.1 µg/L의 저농도까지 측정할 수 있다. ② 형광색소 중에서 가장 안정하다. 햇빛과 염소원소에 의해 가장 크게 영향을 받으나 이들은 자연 지하수계에는 존재하지 않는다. ③ pH가 6 이상이면 형광강도에 영향을 받지 않는다. ④ 미국환경청에 따르면, 연방기록문서(Federal Register)에 기재된 국가위생지침만 따른다면 로다민 WT를 추적자로 사용하여도 건강상 위해는 없다. ⑤ 1~2mg/L 정도의 로다민 WT를 24시간 이상 지속적으로 지하수에 공급하더라도 급성 위험은 없다. 플루오레시언의 경우, 녹색 형광물질로 광분해는 비교적 큰 편이나, 지하수 추적자 시험에는 거의 문제가 되지 않는다. 염료 중 생물학적으로 안전한 물질로 알려져 있으며, 배경농도에 대한 조사가 충분히 이루어져야 한다는 것이 특징이다.

2.3 형광추적자 분석장비

채취된 시료는 추적자 분석 장비를 통해 시료의 농도를



그림 2. 형광추적자 분석 장비(10-AU)

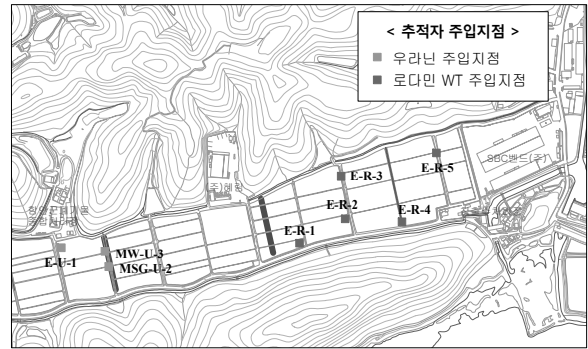


그림 3. 추적자 주입 지점

표 2. 배경농도 및 탁도 측정 결과

지점명	배경농도(μg/L)		탁도 (NTU)
	로다민 WT	우라늄	
MSL-1	3.6	95.7	16.3
MSL-2	0.4	20.9	16.4
F-1	0.2	0.1	0.3
F-2	0.1	0.2	0.4
SW-2	0.2	2.7	8.5
MSG-2	2.0	5.9	55.0
MSG-3	2.2	11.1	268.0

분석하게 된다. 본 시험에서 시료의 농도 분석에 사용된 장비는 Turner Designs사(미국)의 10-AU-005-CE Field Fluorometer(그림 2)이며, 로다민 WT와 우라늄의 분석에 0.01μg/L의 검출능을 가지고 있다. 이 광도계는 휴대가 간편하며 현장에서 직접 형광추적자의 농도를 측정할 수 있다. 외부에서 단파장 혹은 고에너지의 빛이 주사되면 로다민 WT와 같은 형광물질은 여기(excitation)되어 발색을 하며 저에너지 혹은 장파장의 방사선을 방출하게 된다. 각각의 형광물질은 특정 여과 및 방출 스펙트럼을 가지므로 적절한 필터를 이용하여 여기 및 방출파장을 조절함으로써 로다민 WT 뿐만 아니라 엽록소, 원유 및 우라늄 등을 검출할 수 있다.

3. 추적자 조사 시험

3.1 추적자 배경농도 및 탁도측정

추적자를 현장에 적용하기에 앞서 추적자로 사용된 로다민 WT와 우라늄이 현장에서 추적자 시험의 수행에 적절한지를 확인하기 위하여 지하수와 침출수, 지표수에서 배경농도를 측정하였다. 표 2에서 보는바와 같이, 추적자의 배경농도는 침출수와 가스 측정공에서 높은 값을 보였



그림 4. 우라늄 주입(E-U-1)

다. 특히, MSL-1의 우라늄 배경농도는 95.7μg/L로 매우 높은 값을 나타내었다.

3.2 추적자 주입위치 및 주입량

추적자 주입은 차수시설이 설치되어 있지 않은 비위생 매립지역이 흐름특성 파악과 멤브레인 차수시스템이 설치된 위생 매립지역의 차수시스템 안정성 파악을 위하여 각각 다른 추적자를 사용하였다. 차수시설이 설치되지 않은 1, 2 단계 지역에는 우라늄을 주입하였고, 차수시설이 설치되어 있는 지역(3, 4단계)에는 로다민 WT를 주입하였다(그림 3, 그림 4). 우라늄의 경우 E-U-1에 약 48g을 물 2,000L와 함께 주입하고, 물을 충분히 주입하여 추적자의 이동이 용이하게 하였다. MSG-U-2와 MW-U-3은 각각 20g의 우라늄을 사용하여 추적자 용액을 각각 375L, 300L 제조하여 정량펌프를 이용하여 주입하였고, 주입 후 물을 약 75L씩 주입하였다. 로다민 WT는 E-R-1, E-R-2, E-R-3에는 농도가 20%인 로다민 WT를 각각 250g씩 물 2,000L와 함께 주입하였고, 주입 후 물을 충분히 주입하였다. E-R-4, E-R-5의 경우에는 농도가 20%인 로다민 WT를 각각 50g씩 물 2,000L와 함께 주입한 후 물 약 5,000L 주입하였다.

3.3 추적자 시료채취 및 검출방법

추적자 주입 후 추적자 검출여부를 확인하기 위하여 2일에 1회씩 모니터링을 실시하였다. 추적자 모니터링을 위한 시료채취 지점은 그림 5와 같다. 지하수 흐름의 하류부로 예상되는 지점의 지하수 관측정 MW-3, MW-4, MW-5와 침출수, 지표수, 주변 지하수 관정 등에서 추적자 농도 관측을 실시하였고, 주입정 MW-1에서 주입농도의 변화를 살펴보았다.

3.4 추적자 시험 결과

3.4.1 추적자 우라닌 분석결과

우라닌 추적자 주입은 침출수 처리장 아래로 유출되는

침출수 성격을 띤 지하수(MSL-2)의 유입경로 및 비위생 매립구간의 지하수 및 침출수의 위생매립구간 유입여부 확인을 위해 실시하였다. 매립시설 1, 2단계에서 주입한 추적자 우라닌의 경우 MSL-2에서는 지속적으로 배경농도의 값과 비슷하거나 낮게 도출되었다(표 3). 이러한 결과는 우라닌 주입정에서 하부 지하수 조사지점(MSL-2)까지의 거리가 약 800m 이상으로 하상퇴적물의 투수성(약 $6.7E-03\text{cm/sec}$)을 감안할 때 지하수 이동 속도는 약 0.096m/day 이고, 15일 동안 이동한 거리는 약 1.45m이다. 따라서 주입한 추적자가 매립층 하부에 존재할 수 있는 구하천(지하수 흐름이 빠른 구간)을 만나지 못한다면 매립지 하부 관측지점에서 추적자 우라닌이 검출되는데 좀 더 시일이 필요할 수 있음을 의미한다. 반면 비위생 매립구간인 1, 2단계에 인접하며, 위생매립시설 외측에 존재하는 주변

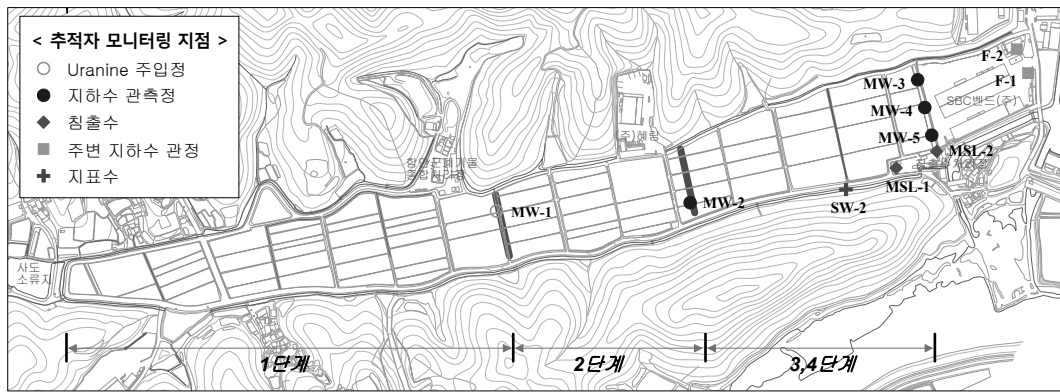


그림 5. 추적자 모니터링 지점

표 3. 추적자 우라닌 모니터링 결과(단위 : $\mu\text{g/L}$)

경과시간(day)	MSL-1	MSL-2	F-1	F-2	SW-2	MW-1	MW-2	MW-3	MW-4	MW-5
1	98.9	26.3	0.0	0.2	8.6	-	-	-	-	-
3	91.5	28.6	0.0	0.1	4.1	-	10.5	8.0	14.4	40.6
7	80.6	26.6	0.0	0.1	3.0	284.0	13.0	32.0	19.3	23.7
9	92.8	3.3	0.0	0.0	2.1	91.5	12.7	15.6	14.2	13.9
11	88.8	5.8	0.1	0.1	4.4	54.7	15.8	6.5	9.4	12.6
13	83.7	6.5	0.0	0.1	3.3	35.8	11.6	3.4	14.1	14.9
15	103.0	6.5	0.0	0.0	4.0	31.7	10.7	6.7	14.7	19.9
17	96.4	4.3	0.2	0.0	4.5	22.1	14.5	7.9	10.6	17.0
19	91.3	6.9	0.3	0.6	3.6	24.1	14.4	6.3	14.5	10.5
21	104.0	2.0	0.0	0.0	3.8	15.7	13.7	4.0	8.2	15.8
23	97.3	1.9	0.1	0.2	7.1	17.8	12.6	1.3	8.9	10.9
25	94.6	1.6	0.3	0.3	5.7	21.4	13.3	1.1	6.8	7.4
27	91.6	22.7	0.6	0.2	3.5	11.7	17.0	1.2	7.8	16.3
29	99.7	30.5	1.3	0.5	4.1	10.8	14.5	3.2	6.8	13.2
31	96.1	34.2	0.5	0.4	3.6	9.1	18.3	2.3	7.6	12.2
33	96.6	3.4	0.7	0.5	4.5	8.8	12.0	3.6	9.6	16.8

* 가스측정공 배경농도 : MSG-2 ($5.9\mu\text{g/L}$), MSG-3 ($11.1\mu\text{g/L}$)

지하수 이용관정 F-1, F-2의 경우 주입 후 약 25일이 경과한 시점부터 농도가 약간 증가하는 경향을 보였으며, 지표수(SW-2)와 MW-2에서도 1, 2단계 지역에서 주입한 추적자(우라닌)의 영향을 받은 것으로 판단된다.

3.4.2 추적자 로다민 WT 분석결과

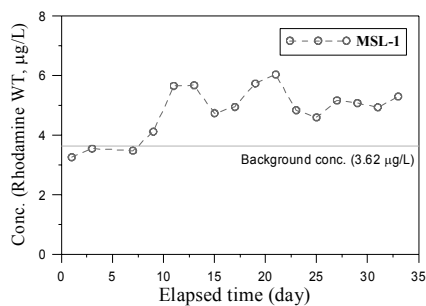
위생 매립구간인 3, 4 단계의 차수시설 손상여부를 확

인하기 위해 매립시설 3, 4단계의 폐기물 매립층에 주입한 추적자 로다민 WT는 주입 후 약 9일이 경과한 3월 6일부터 침출수(MSL-1) 및 지하수 관측정(MW-2, MW-3, MW-4, MW-5)에서 로다민 WT의 농도가 약간 증가하는 경향을 보였다(표 4, 그림 6). 침출수(MSL-1)에서는 주입 후 약 20일까지 농도가 증가하는 경향을 보이다가 20일이 경과한 후부터 약간 감소하는 경향을 보였다. 지점별로 시

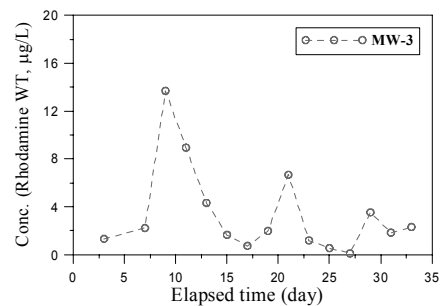
표 4. 추적자 로다민 WT 모니터링 결과(단위 : $\mu\text{g/L}$)

경과시간 (day)	MSL-1	MSL-2	F-1	F-2	SW-2	MW-2	MW-3	MW-4	MW-5
1	3.3	0.4	0.0	0.3	0.1	-	-	-	-
3	3.6	0.5	0.0	0.2	0.4	-	1.3	2.6	4.2
7	3.5	0.5	0.2	0.1	0.2	2.3	2.2	3.1	3.7
9	4.1	0.2	0.0	0.0	0.0	12.5	13.7	15.1	14.9
11	5.7	0.3	0.0	0.0	0.0	8.0	9.0	7.1	9.7
13	5.7	0.1	0.0	0.1	0.0	5.1	4.3	14.1	4.7
15	4.7	0.5	0.0	0.5	0.9	1.1	1.7	6.4	6.9
17	5.0	0.1	0.2	0.1	0.5	2.8	0.7	3.2	5.5
19	5.7	0.1	0.2	0.0	0.1	3.1	2.0	4.7	3.0
21	6.0	0.1	0.0	0.0	0.0	5.8	6.7	4.0	4.8
23	4.8	0.1	0.0	0.0	0.0	4.9	1.2	3.6	6.1
25	4.6	0.0	0.0	0.0	0.2	2.7	0.5	1.7	1.2
27	5.2	0.2	0.0	0.0	0.0	4.1	0.1	1.8	4.4
29	5.1	0.7	0.1	0.0	0.2	3.3	3.5	2.0	5.3
31	4.9	0.5	0.1	0.0	0.1	5.4	1.8	2.1	4.7
33	5.3	0.1	0.0	0.0	0.3	3.2	2.3	3.5	7.2

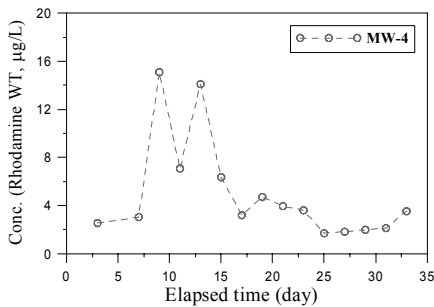
* 가스측정공 배경농도 : MSG-2 (2.03 $\mu\text{g/L}$), MSG-3 (2.28 $\mu\text{g/L}$), a) MW-1 : 로다민 WT 모니터링 제외



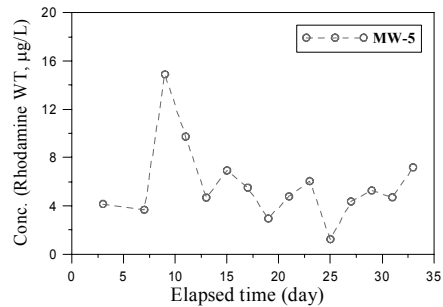
(a) 침출수(MSL-1)



(b) 지하수(MW-3)



(c) 지하수(MW-4)

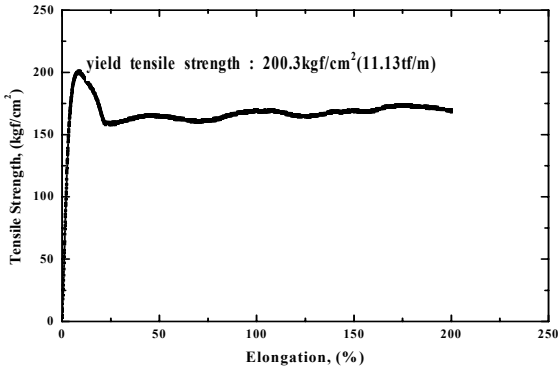


(d) 지하수(MW-5)

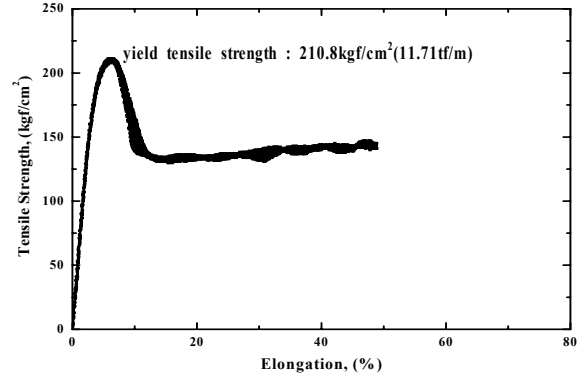
그림 6. 추적자 로다민 WT 모니터링 결과

표 5. 차수시트 인장강도 시험결과

시트종류	두께(cm)	폭 (cm)	항복인장강도(kgf/cm ²)	항복인장강도(tf/m)
현장시트(MD)	0.18	0.58	200.3	11.13
현장시트(CD)	0.18	0.58	210.8	11.71
현행 생산시트(MD)	0.153	0.593	199.4	13.03
현행 생산시트(CD)	0.153	0.593	186.5	12.19



(a) 현장시트(MD방향)



(b) 현장시트(CD방향)

그림 7. 인장강도시험 결과

료채취 시기에 따라 추적자 농도의 편차가 약간씩 나타나지만 매립지 하류부 관측정과 침출수에서 로다민 WT가 검출된 것으로 판단된다. 따라서 매립시설 3, 4 단계의 차수시설은 폐기물 매립과정에서 손상이 발생되었으며 현재 침출수가 외부로 유출되고 있는 것으로 사료된다.

4. 차수 지오멤브레인의 인장강도 평가

일반적으로 폐기물매립장 차수시트의 역학적 특성 중에서 인장강도는 가장 중요하고 기본적인 성능으로 분류된다. 인장특성이란 차수시트에 축방향의 힘을 작용시켜서 인장시킬 때, 이 힘과 변형과의 관계, 또는 축 방향으로 신장시킬 때, 신장과 힘의 관계로부터 유도되는데 인장특성은 측정조건, 주위의 온습도, 시료의 크기, 시료의 배열(방향) 등에 따라 그 값이 달리 나타나는 특성이 있다(신은철 등, 2000, 2001).

현재 매립장 하부에 설치되어 있는 기존 차수시트의 인장강도를 평가하기 위하여 현장조사 시 시트를 샘플링 하여 인장강도 시험을 실시하였다. 인장강도 시험은 ASTM D 6693에 의하여 수행하였으며, 시험 시편의 초기 길이 (l_0)는 75mm이며, 시험속도는 50mm/min로 수행하였다(Koerner, 1997; Triplett and Fox, 2001). 시험은 MD(Machine direction)방향과 CD(Cross machine direction)방향에 대

하여 수행하였으며, 현재 생산되고 있는 일반적인 차수시트에 대한 인장강도 시험을 병행하여 수행하였다. 표 5와 그림 7은 인장강도 시험결과를 나타낸 것으로 항복인장강도가 약 11.13tf/m(MD방향)로 매립장 조성 시 시방기준인 5.4tf/m의 2배 이상의 항복인장강도를 유지하고 있으며, 현행 폐기물 관리법 기준인 7.5tf/m보다도 양호한 항복인장강도를 유지하고 있는 것으로 도출되었다.

5. 결론

본 연구는 사용종료매립장의 지오멤브레인 차수시스템에 대하여 추적자 조사 및 인장강도시험을 통하여 매립장 운영 및 사후관리 기간 동안 침출수와 하중조건에 노출되었던 지오멤브레인의 안정성 및 손상도에 대하여 평가하였다. 총괄 연구결과에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 연구대상 사용종료 매립장의 지오멤브레인 손상여부 파악을 위하여 수행한 추적자 조사결과, 1, 2구역에 주입한 추적자(우라닌)는 검출이 되지 않았으나, 3, 4구역에 주입한 추적자(로다민 WT)는 주입 9일 경과 후부터 모니터링 지점에서 검출되었다. 따라서, 비위생 매립구역으로부터의 지하수 및 침출수 유입은 없는 것으로 판단되며, 위생매립구간의 기존 지오멤브레인

- 차수시스템은 손상이 발생된 상태인 것으로 사료된다.
- (2) 사용종료 매립장의 사면부에 설치된 기존 차수시트를 샘플링하여 인장강도를 실험한 결과, 매립장 조성 당시의 시방기준 및 현행폐기물관리법에 적정하게 항복 인장강도를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 차수시설 손상원인은 침출수에 대한 장기노출 및 하중재하에 따른 강도감소보다는 1990년대 폐기물매립 시설 설치기준에 차수시설 상부 보호층 시설기준이 부재하여 매립장 시공 및 운영과정에서 편칭 등의 손상이 발생된 것으로 판단된다.
 - (3) 본 연구대상 사용종료매립장의 차수시트 안정성 및 손상평가 결과, 인장강도는 설계 및 시공 시 인장강도를 유지하고 있었으나, 차수시설이 전체적 기능에 대한 추적조사 및 주변수질분석결과, 침출수 누출이 발생되고 있는 것으로 도출되었다. 따라서, 침출수의 외부유출 및 확산을 방지할 수 있도록 안정화조치가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2009년 충주대학교 교내학술 연구비의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

참고문헌

1. 마산시 (2003), *마산시 사용종료매립장 주변환경영향종합조사 보고서*. 마산시 환경시설 사업소.
2. 마산시 (2008), *마산시 사용종료매립장 주변환경영향종합조사 보고서*. 마산시 환경시설 사업소.
3. 문상기, 우남철, 이광식 (2002), “지하수위 유형과 유역별 지하수 함양률의 관련성 연구 : 국가지하수 관측망 자료의 분석”, *한국지하수토양환경학회지*, 제7권, 제3호, pp.45-59.
4. 박지원(2002), *매립지 차수시설의 안정성에 관한 연구*, 석사학위논문, 동국대학교.
5. 신은철, 오영인, 허열 (2000), “원심모형실험을 통한 폐기물매립장의 사면안정성 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제16권, 제2호, pp.145-154.
6. 신은철, 이성근, 김인대 (2001), “Geocomat를 활용한 폐기물매립장의 사면안정성 검토”, *한국지반환경공학회 2001년도 학술발표회 논문집*, pp.117-122.
7. 이광렬, 이영준, 장삼식 (2004), “추적자시험에 의한 폐기물 매립장 침출수 누출조사”, *한국지반공학회 논문집*, 제20권, 제4호, pp.49-56.
8. 이기택 (2006), *SF₆를 이용한 매립지 침출수 누출 영향범위 측정 및 평가에 관한 연구*, 포항공대 산학협력단.
9. 환경부 (2008), *폐기물관리법*, 시행규칙 제54조, pp. 126-127.
10. Koerner, R.M. (1997), *Design with Geosynthetics*, 4th Ed, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
11. Singh, S. and Murphy, B.(1990), *Evaluation on the Stability of Sanitary Landfills*, Geotechnics of Waste Fills : Theory and Practice, ASTM STP 1070, pp.240-258.
12. Sutton M.A., Asman W.A.H., Ellerman T., van Jaarsveld, J.A., Acker K., Aneja V., Duyzer J.H., Horvath L., Paramonov, S., Mitosinkova M., Tang Y.S., Achermann B., Gauger T., Bartnicki J., Nefel A. and Erisman J.W. (2001), “Establishing the link between ammonia emission control and measurements of reduced nitrogen concentrations and deposition.”, *In: UNECE Ammonia Expert Group (Berne, 18-20 September 2000) Proceedings (Eds. Menzi H. and Achermann B.)*, SAEFL, Berne, pp.57-84.
13. Triplett, E.J. and Fox, P.J. (2001), “Shear Strength of HDPE Geomembrane/Geosynthetic Clay Liner Interfaces”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.127, No.6, pp.543-553.
14. Wiedemeier, T.H., Rifai, H.S., Newell, C.J., Wilson, J.T. (1999), *Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface*, John Wiley and Sons, New York, pp.504.

(논문접수일 2010. 1. 10, 심사완료일 2010. 3. 22)