

재순환수 주입에 따른 매립장 함수율 변화특성 분석

김영규 · 최원영 · 천승규*

서울과학기술대학교 융합과학대학원

Analysis of the Characteristics of the Change in the Moisture Rate of Landfill with Recirculation Water Injection

Young-Kyu Kim · Won-Young Choi · Seung-Kyu Chun*

Graduate School of Convergence Science, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 01811, Korea

ABSTRACT

Analysis of the change in water content and distribution was conducted according to the supply of recirculation water to a landfill. An excavation sample analysis showed that the recirculation water injection zone had water content 8.8% point higher than that of the non-injection zone, after 8 months of operation. And due to the influence of recirculation water supply by vertical wells in injection zones, the water content increases along with depth more clearly than non-injection zone. According to an electrical specific-resistivity survey after 13 months of operation, the water content got higher towards the bottom of the landfill. The water transmission coefficient is 8.72×10^{-4} cm/sec for injection zones and 3.36×10^{-5} cm/sec for the intermediate cover layer; analysis shows that the intermediate cover layer may affect the penetration velocity of water supplied by the horizontal injection tube. For the scientific design and operation of re-injection facilities, it was deemed necessary to follow-up research on the residence time and behavior of re-injection water considering the ratio of recirculation water supply in horizontal and vertical tubes, and pitcher coefficient of intermediate and waste layers.

Key words : Bioreactor landfill, Leachate recirculation, Waste sampling, Electric resistivity, Hydraulic conductivity

1. 서 론

우리나라는 1990년대 이전 설치된 매립장의 대부분이 차수시설 및 침출수처리시설 등을 제대로 갖추지 못한 비위생매립장(Park et al., 2008)이었으나, 1990년대 초반부터 본격적인 위생매립시설 도입을 통해 환경적 악영향을 최소화하는 방안으로 변화되기 시작하였다.

본 연구 대상지인 수도권매립지는 1991년부터 반입폐기물 계량대, 우수배제시설, 차수시설, 침출수 집배수시설, 침출수 처리시설 등을 갖추어 폐기물 반입을 시작함으로써 비위생매립장에서 빈번하게 발생되었던 침출수에 의한 지하수 오염, 매립가스에 의한 대기 악영향 등(Kim et

al, 2001) 2차 오염을 효과적으로 제어할 수 있게 되었다.

한편, 이러한 개선 조치의 하나인 일일 및 중간복토 강화는 매립가스 표면발산(Trapani et al., 2013) 저감과 우수침투 억제 등을 통한 침출수 발생감소 효과를 가져왔으나, 동시에 매립장내 우수침투 억제는 하수슬러지 및 음식물류 폐기물의 직매립금지와 함께 매립장 내부 건조화를 초래하였고, 이는 매립폐기물의 혐기성 분해 저해로 인한 매립가스 발생량 감소와 매립지의 사후관리기간 증가의 원인이 되고 있다.

바이오리액터 매립공법(Morello et al., 2017)은 침출수 등의 재순환(Benson et al., 2007, Byun et al., 2019)을 통해 혐기성 분해에 필요한 적절한 수준의 함수율(Nwaokorie et al., 2018)을 유지시킴으로써 매립가스 발생 촉진과 에너지원으로서의 활용(Friesenhan et al., 2017), 매립장 안정화 촉진을 통한 주변 환경에의 영향 저감, 사후관리(Morris & Barlaz, 2011) 기간 단축에 의한 경제적 부담 감소와 매립장의 토지이용을 앞당기기 위한 것이다.

바이오리액터형 매립장 운영을 위해서는 최종 목표 함

주저자: 김영규, 서울과학기술대학교 융합과학대학원

공저자: 최원영, 서울과학기술대학교 융합과학대학원

*교신저자: 천승규, 서울과학기술대학교 융합과학대학원 교수
Email: skchun@seoultech.ac.kr

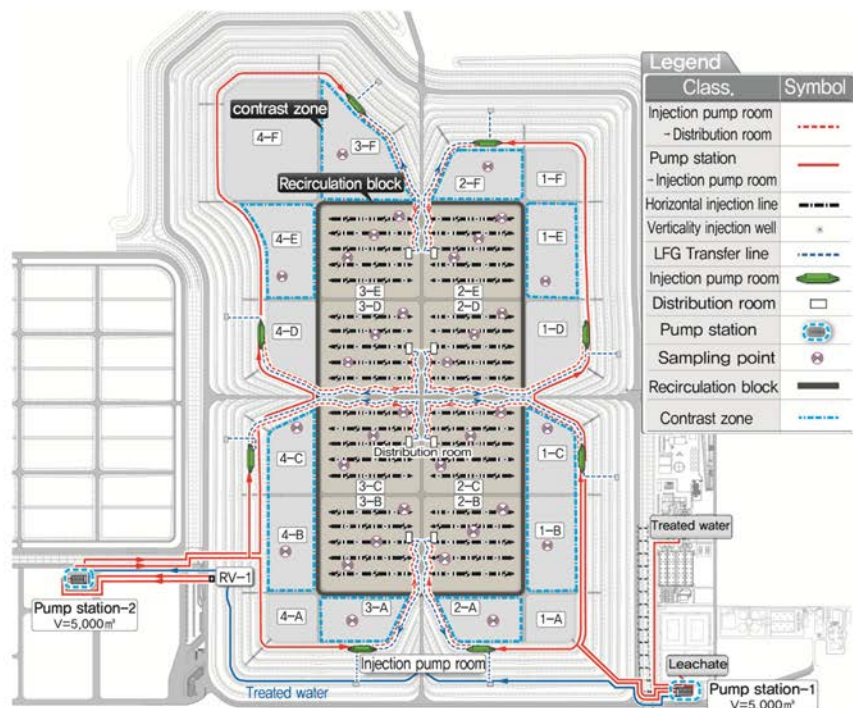
Received : 2021.09.06 Reviewed : 2021.09.10

Accepted : 2021.10.06 Discussion until : 2021.12.31

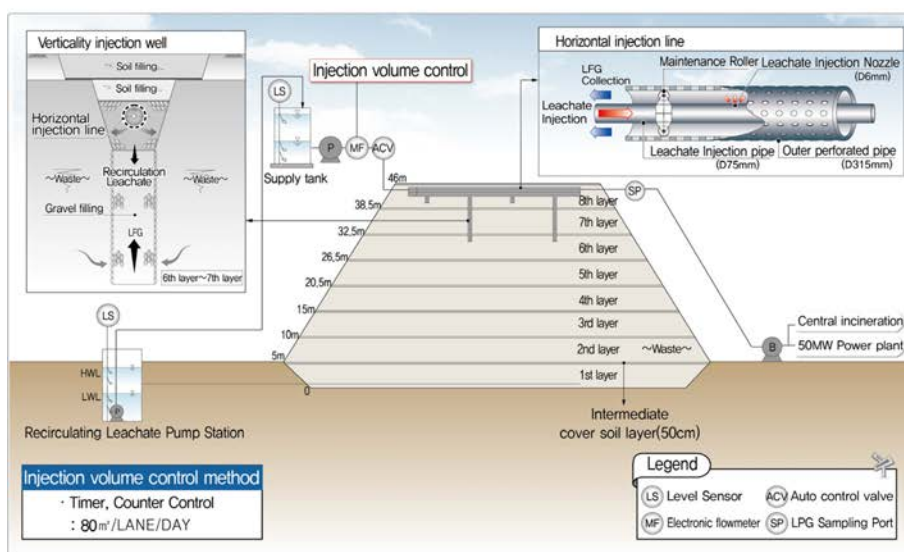
수출 도달을 위한 적절한 재순환수의 주입속도 그리고 매립장내부의 함수율의 고른 공간적 분포가 중요하며, 이를 위해서는 재순환수 주입에 따른 매립장 내부의 수분거동 분석이 필요하다. 그러나 국내의 경우 동 공법의 법적 근거가 최근에 마련된 관계로 이에 대한 현장 규모의 기초

조사 및 연구 자료가 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 향후 바이오리엑터형 매립공법의 신규 또는 운영 중인 매립장에 도입할 때 활용할 수 있는 현장 규모의 기초조사와 분석결과를 제시하는 것이다. 이를 위해 수도권매립지 제2매립장을 대상으로 침출수 등의



(a) Ground plan of SUDOKWON 2nd landfill.



(b) Lateral view of SUDOKWON 2nd landfill.

Fig. 1. Ground plan and Lateral view of SUDOKWON 2nd landfill and recirculation water injection facility.

재순환수 주입에 따른 매립장 내부 함수율 증가와 매립장 심도에 따른 함수율 차이 등을 굴착시료 분석과 전기비저항탐사를 통해 조사하였다. 또한 샌드위치형 매립장에 주입된 재순환수에 대한 각 단별 중간복토층과 폐기물층의 투수계수(Shin et al., 2017, Zhai et al., 2018) 측정실험을 하였다. 이러한 조사결과를 활용하여 향후 수평주입관로와 수직정에 의한 재순환수 공급비, 중간복토층과 폐기물매립층의 내부수분의 하층이동속도, 재순환수의 내부 체류시간 등을 감안한 최적 재순환수 공급방식과 공급속도를 도출할 수 있는 방법론 개발에 기여하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상매립장 개요

수도권매립지 제2매립장은 Fig. 1과 같이 총 24개 블록(평균 315 m × 300 m)의 8단 샌드위치형 매립장으로서, 각 단별 매립고는 5.0 m ~ 8.0 m(중간복토층 0.5 m, 폐기물층 4.5 m ~ 7.5 m)이다. 2000년 10월부터 2018년 10월까지 2,592 × 10³ m²의 매립면적에 Table 1의 폐기물 약 80.2 ×

10⁶ ton이 매립되어 현재 사후관리 중에 있으며, 침출수발생량은 약 1,600 m³/일이다.

설계당시 적용된 투수계수(Hatanakao et al., 2001)는 폐기물층 5.36 × 10⁻⁴ cm/sec, 중간복토층은 우수의 침출수화 방지를 위해 8.29 × 10⁻⁵ cm/sec 이하이며, 우수배제를 위해 복토면은 2% 이상의 기울기로 되어 있다.

2.2. 재순환수 주입시설

재순환수 주입시설은 제2매립장 전체 24개 블록 중 내부에 위치한 8개 블록에 설치되었다. 주요시설로는 펌프장 2개소, 상부공급시설 및 상부밸브실 8개소, 250 m의 수평주입관로 40개, 매립층 하부로의 수분확산을 위한 4.35 m와 13.4 m 심도의 수직주입정(Jain et al., 2010) 80개소(블록별 10개소)이며 세부구성은 Fig. 1과 같다.

시설설치 후 2020년 7월부터 Table 2의 수도권매립지 제1, 2매립장 침출원수, 탈질처리된 침출수 처리수, 그리고 전처리된 자원화단지 폐수 등을 주입하고 있으며, 2021년 7월말 현재까지 13개월 동안 일평균 주입량은 Table 3과 같이 3,076 m³(블록당 506 m³)이다.

Table 1. The composition of disposed waste

(Unit : 10³ ton)

Classification	Quantity	Combustible						Incombustible				
		Food	Paper	Plastic	Wood	Textile	Other	Glass	Metal	Ash	S.S. ¹⁾	Other ²⁾
Household	20,326	3,882	7,541	5,508	264	996	793	732	325	-	-	285
Construction	37,284	-	1,223	4,262	9,041	414	30	548	634	-	-	21,132
Industrial	22,571	-	-	-	-	-	1,672	-	-	2,034	8,927	9,938
Total	80,180	3,882	8,764	9,770	9,306	1,410	2,495	1,280	959	2,034	8,927	31,355
Rate (%)	100.0	4.8	10.9	12.2	11.6	1.8	3.1	1.6	1.2	2.5	11.1	39.1

1) Solidified Sludge

2) Dredged soil, slag material, briquette, brick, waste soil, etc.

Table 2. The composition of supplied recirculation water

	Pump station - 1			Pump station - 2		Sum
	Leachate	Treated leachate water ¹⁾	Leachate	Recycling complex		
				AD ²⁾	Sludge ³⁾	
Amount (m ³)	1,013,850	49,358	15,871	82,381	19,450	1,180,910
Average (m ³ /day)	2,560	124	39	340	54	2,982

1) Denitrified leachate to prevent nitrogen accumulation.

2) Pre-treated anaerobic digestion effluent of food wastewater.

3) Pre-treated condensate water from sludge drying.

Table 3. Supplied recirculation water by blocks

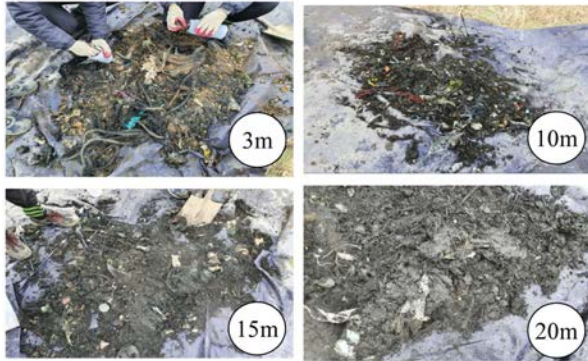
Block	2B	3B	2C	3C	2D	3D	2E	3E	Sum
Recirculation (m ³)	200,860	203,560	204,430	187,025	200,160	204,770	8,120	8,880	1,217,805
Average (m ³ /day)	508	514	516	472	506	517	20 ¹⁾	22 ¹⁾	3,076 ²⁾

1) Injection of 2E and 3E blocks were stopped with 9th additional layer of landfill.

2) A slight gap in the sum of Table 1 and 2 is due to the difference of the measuring equipment.



(a) Waste sampling by excavation



(b) Sample by depth (3B)

Fig. 2. Excavation equipment and waste samples.

2.3. 블록별 함수율 분석

재순환수 주입 후 약 8개월이 지난 시점에서 매립장 굴착시료 분석을 하였다. 굴착지점은 Fig. 1과 같이 재순환수 주입 블록 8개에 대하여 총 24개 지점(블록별 3개), 비주입 블록 16개 중 10개 블록(contrast zone)에 대하여 총 10개 지점(블록별 1개)이고, 이들 지점에 대하여 각각 4개 심도(3 m, 10 m, 15 m, 20 m)에 대한 시료채취를 하였다. 따라서 채취 시료는 총 34개 지점 136개이다. 아울러 제2매립장의 최대 심도는 약 42 m이나 두 가지의 재순환수 주입시설의 심도가 각각 4.35 m, 13.4 m이므로 작업의 난이도 등을 감안하여 시료채취 최대심도는 20 m로 하였다.

시료채취 작업은 Fig. 2(a)와 같이 25 ton 하이드로 오거($\phi=380$ mm)를 사용하였고, Fig. 2(b)의 심도별 채취시료에 대하여 수분을 포함한 삼성분 분석을 하였다.

2.4. 매립장 내부 수분분포 분석

재순환수 주입시설 가동에 따른 매립장 전체의 수분분포 상황을 확인하기 위하여 주입개시 후 13개월이 지난 시점에 Fig. 3과 같이 전기비저항탐사를 하였다(Shim et



(a) Investigation equipment



(b) Installation status

<Specification>

- Voltage : DC 11V ~ 18V
- Signal output voltage : DC 0~200V
- Signal input voltage : 0 ~ 1100mA
- Max Voltage : 220W
- Communication method : RS485

Fig. 3. Electrical specific resistance investigation equipment.

al, 2002, Kim et al., 2005). 동 측정법은 정확한 수분함량보다는 함수율과 비례적인 특성을 가지는 전기비저항값을 통해 각 구역별 상대적인 수분함량 평가를 위한 것이다. 측정지점은 재순환수 주입구역 8개 블록이며, 측정은 블록별 3개 측선(북측으로부터 ER1, ER2, ER3; 각 길이 175 m, 간격 100 m)으로 하였다. 각 측선의 전극간격은 3.5 m이고, 전극봉은 50개소를 설치하는 쌍극자배열 방식을 통해 전기저항 값의 수직분포 단면을 도출하였다. 전기비저항탐사에 사용된 장비는 GEA RM1(이탈리아, PASI)의 자동측정시스템이고, 자료 해석은 DIPRO for Windows V.4.0(지질자원연구원) 소프트웨어를 사용하였다.

2.5. 투수계수 분석

매립장 내부의 투수계수가 매립장 함수율 분포에 어떠한 영향을 미치는지는 금번 연구범위에 포함하지는 않았으나, 시료의 굴착채취시 후속연구를 위한 관련 데이터 확보를 위해서 중간복토층과 매립층의 투수시험을 하였다. 중간복토층의 투수계수는 Fig. 4의 현장 측정기를 이용하여 블록별 5개 지점씩 총 40개 지점에 대하여 측정하였으며, 폐기물층은 채취한 굴착 폐기물을 매립 폐기물의 설계 다짐밀도 0.9 g/cm^3 와 동일한 조건으로 한 후 중간복토층과 같은 방법으로 측정하였다(Lee & Lee, 2001).

3. 결과 및 고찰

3.1. 굴착폐기물 심도별 함수율

재순환수 주입구역과 비주입구역의 폐기물 굴착시료에 대한 함수율 분석결과는 Fig. 5와 같이 주입구역은 24.9%~55.5%, 비주입구역은 20.0%~49.1%이었다. 전체 평균으로는 주입구역이 비주입구역보다 약 7.1% point 높은 함수율을 보였으며, 9단 추가매립에 따라 주입이 중지된 2개 블록(2E, 3E)을 제외한 6개 블록과 비교 시에는 주입구역이 42.2%, 비주입구역이 33.4%로 8.8% point의 차이가 있었다.

굴착심도별 함수율은 재순환수 주입구역은 3 m 심도에서 30.9%, 20 m 심도는 46.0%로서 Fig. 5에서와 같이 대체로 심도가 깊을수록 함수율도 높았다. 그러나 비주입구역은 주입구역에 비하여 평균 함수율이 낮은 뿐만 아니라, 심도별 함수율 차이도 주입구역 함수율 편차가 7.7%인데 비하여 6.5%로 다소 작았다. 이는 재순환수 주입구역의 경우 수평관 외에 수직정을 통해 재순환수 중 상당량이 하부 쪽으로 직접 공급된 것도 원인의 하나로 판단된다. 향후 바이오리엑터 시설 설치 시 상부의 수평관과 수직정에서의 재순환수 침투비율에 대한 평가를 통해 수직정의 깊이와 투수율에 대한 조절의 필요성을 시사한다고 할 수 있다.

한편 Fig. 5에서 보는 바와 같이 재순환수 주입구역과 비주입구역 모두 함수율에 있어 주변과 비교적 큰 차이가 있는 블록들이 존재하였다. 예로서 2F 블록의 높은 함수율은 해당 블록에 탈수 슬러지가 상대적으로 많이 매립된 영향으로 판단된다. 매립장의 경우 이러한 각 단별 및 블록별 매립 대상 폐기물의 차이 외에도 중간복토층의 두께와 사용 재료의 차이, 내부 유로의 형성 등도 이와 같은 개별 블록별 함수율 차이에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 6은 재순환수 주입구역과 비주입구역의 굴착 폐기



<Specification>

- Total Length : 32.7 cm
- Diameter of Tube : 3.1 cm
- Volume of water required : 135 mL
- Length of water reservoir : 21.2 cm
- Length of mariotte tube : 28 cm
- Suction range : 0.5 to 7 cm

(a) Intermediate cover layer



<Specification>

- Total volume : 27.0 L
- Width : 30 cm, Length : 30 cm, Height : 30 cm

(b) Waste layer

Fig. 4. Hydraulic conductivity test of intermediate cover and waste layer.

물의 건량기준 가연분 함량이다. 가연분에는 종이류 등의 바이오매스계열 외에 비닐류 등이 포함되어 있다. 따라서 가연분 함량이 전량분해대상 물질은 아니나 가연분 함량과 매립가스 발생 잠재력(García et al., 2016)이 어느 정도 비례한다는 가정은 할 수 있다. Fig. 6 및 Fig. 7에서와 같이 재순환수 주입구역은 건량기준 가연분 함량이 평

Landfill depth	3 m	29.9	29.7	30.4	37.0	32.3	27.3	35.8	24.9	30.9
	10 m	50.6	42.6	47.5	37.7	43.2	39.3	33.7	43.3	42.2
	15 m	42.9	44.6	44.6	46.8	50.0	43.6	35.6	33.8	42.7
	20 m	45.9	47.4	47.8	55.5	46.5	50.2	34.7	39.9	46.0
Block		2B	3B	2C	3C	2D	3D	2E*	3E*	ave.
		20~30%	30~35%	35~40%	40~45%	45%above				

* Injection stop block(2E, 3E)

(a) Moisture content by depth of recirculation block

Landfill depth	3 m	26.9	20.0	25.0	27.8	38.7	32.7	23.9	33.1	25.9	37.6	29.2
	10 m	31.6	43.3	34.5	25.9	38.2	27.8	37.6	41.3	49.1	28.9	35.8
	15 m	34.1	43.2	40.8	32.8	35.0	34.6	39.7	25.4	45.8	29.7	36.1
	20 m	31.0	34.4	29.6	25.9	28.8	33.6	31.1	34.5	46.6	29.9	32.5
Block		1B	1C	2A	3A	4B	4C	3F	4E	2F	1E	Average
		20~30%	30~35%	35~40%	40~45%	45% above						

(b) Moisture content by depth of non-recirculation block

Fig. 5. Moisture content by depth of SODOKWON 2nd landfill.

Landfill depth	3 m	87.8	75.1	85.8	81.7	89.4	76.2	79.6	79.1	81.9
	10 m	88.1	85.2	86.5	86.2	83.8	86.2	83.4	78.9	84.8
	15 m	86.6	76.9	85.3	84.0	83.1	80.6	79.4	78.9	81.8
	20 m	84.8	78.7	85.7	88.8	85.6	81.9	83.1	73.5	82.8
Block		2B	3B	2C	3C	2D	3D	2E	3E	Average
		70% under	70~75%	75~80%	80~85%	85% above				

(a) Combustible content by depth of recirculation block

Landfill depth	3 m	62.6	73.5	90.7	84.9	77.0	85.0	75.4	90.4	75.5	89.0	80.4
	10 m	76.1	89.9	86.3	87.7	81.1	90.2	77.4	71.6	74.0	79.0	81.3
	15 m	75.7	95.6	80.6	77.6	97.7	85.7	86.1	79.3	71.9	73.1	82.3
	20 m	91.3	87.5	89.6	66.8	89.8	79.0	74.9	71.8	76.2	81.9	80.9
Block		1B	1C	2A	3A	4B	4C	3F	4E	2F	1E	Average
		70% under	70~75%	75~80%	80~85%	85% above						

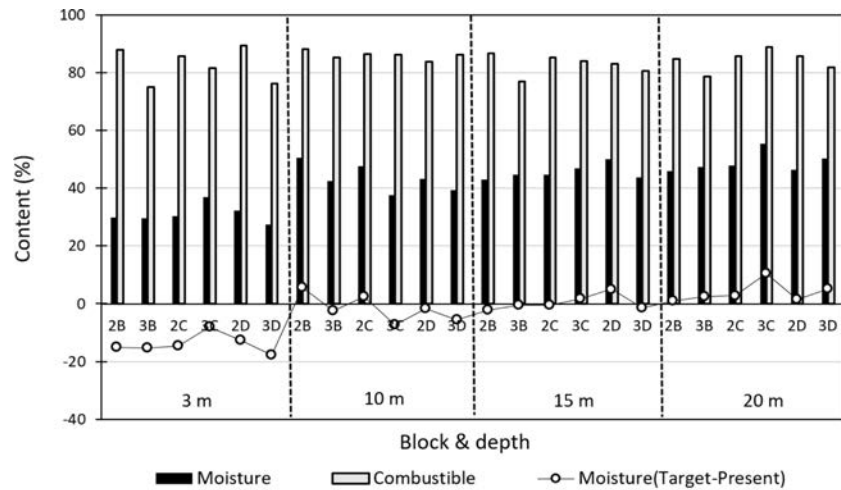
(b) Combustible content by depth of non-recirculation block

Fig. 6. Combustible content by depth of SODOKWON 2nd landfill.

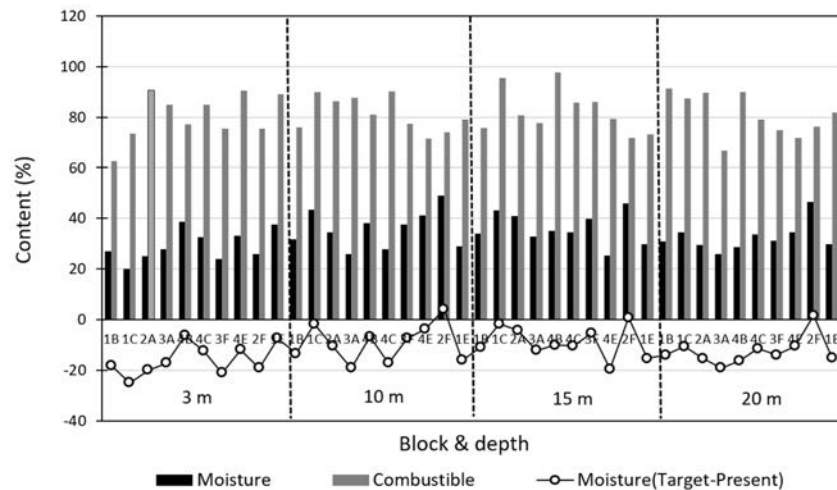
균 83.9%, 비주입구역은 평균 81.2%이었고, 함수율과 건량기준 가연분 함량과의 상관계수는 주입구역 0.24, 비주입구역 0.05로서 여러 오차요인이 있을 수 있는 현장 시료분석이 가지는 특성을 감안한다면, 차이는 거의 없는 것으로 판단되었다. 이는 재순환수 주입 개시 후 약 8개월 후 폐기물 시료채취를 한 관계로 함수율 증가와 폐기물의 분해도 관계를 평가하기엔 시간이 짧은 점, 가연분에는 비닐류 등이 상당량 포함되어 있는 점 등의 복합적 요인이

있을 것이다. 향후 바이오리액터형 매립장 운영효과의 평가를 위해서는 이러한 점을 감안할 필요가 있으며, 특히 폐기물 분해율 평가에 있어서는 삼성분 분석시 비닐류를 선별 제거 한 후에 가연분 함량을 평가하는 방법 또는 AT4 등의 생물학적 분석방법을 적용하는 것이 바람직할 것이다.

한편, Fig. 7에서와 같이 제2매립장의 목표 함수율 45%에 대한 주입구역과 비주입구역의 블록 및 심도별 함수율에 있어서 주입구역은 평균 4.53%, 비주입구역은



(a) Recirculation block



(b) Non-recirculation block

Fig. 7. Moisture and combustible contents of SODOKWON 2nd landfill.

11.6% 부족하였으며, 각 블록별 편차는 주입구역이 7.7%, 비주입구역이 6.5%로서 주입구역이 다소 더 크게 나타났다. 바이오리액터형 매립공법 도입 시 대규모 매립장에 적용하는 데에 현실적인 한계는 있겠으나, 재순환수의 공급은 가능한 목표 함수율에 빨리 도달하도록 하되 블록별로 동일 심도에서는 균등한 함수율을 가지도록 하고, 매립가스 발생 잠재력이 큰 상부의 함수율이 우선적으로 높아지도록 하는 것이 바람직할 것이다.

3.2. 전기비저항탐사 결과

8개 재순환수 주입구역 내 총 24개 지점(블록별 ER1, ER2, ER3)에서의 매립장 전체 심도 42 m에 대한 전기비

저항탐사 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 공간적인 분포가 다소 불규칙하고 정도의 차이는 있으나 공통적으로 매립장 상부보다는 하부가 전기비저항이 낮은 경향을 보여주고 있다. 이는 하부 쪽의 함수율이 상대적으로 높은 것을 의미하며 (Abuel-Naga & Bouazza, 2016), 침투 우수, 폐기물 함유수분, 재순환수가 시간이 경과함에 따라 매립장 하부로 이동함에 따른 결과로 볼 수 있다.

매립장에 대한 재순환수 공급에 의한 평균적인 적정 함수율도 중요하지만 가능한 매립장의 공간적인 함수율 분포가 균등한 것이 공급수분의 체류시간 증가, 매립가스 발생이나 안정화 촉진을 위해 바람직하며, 또한 관련법에 따

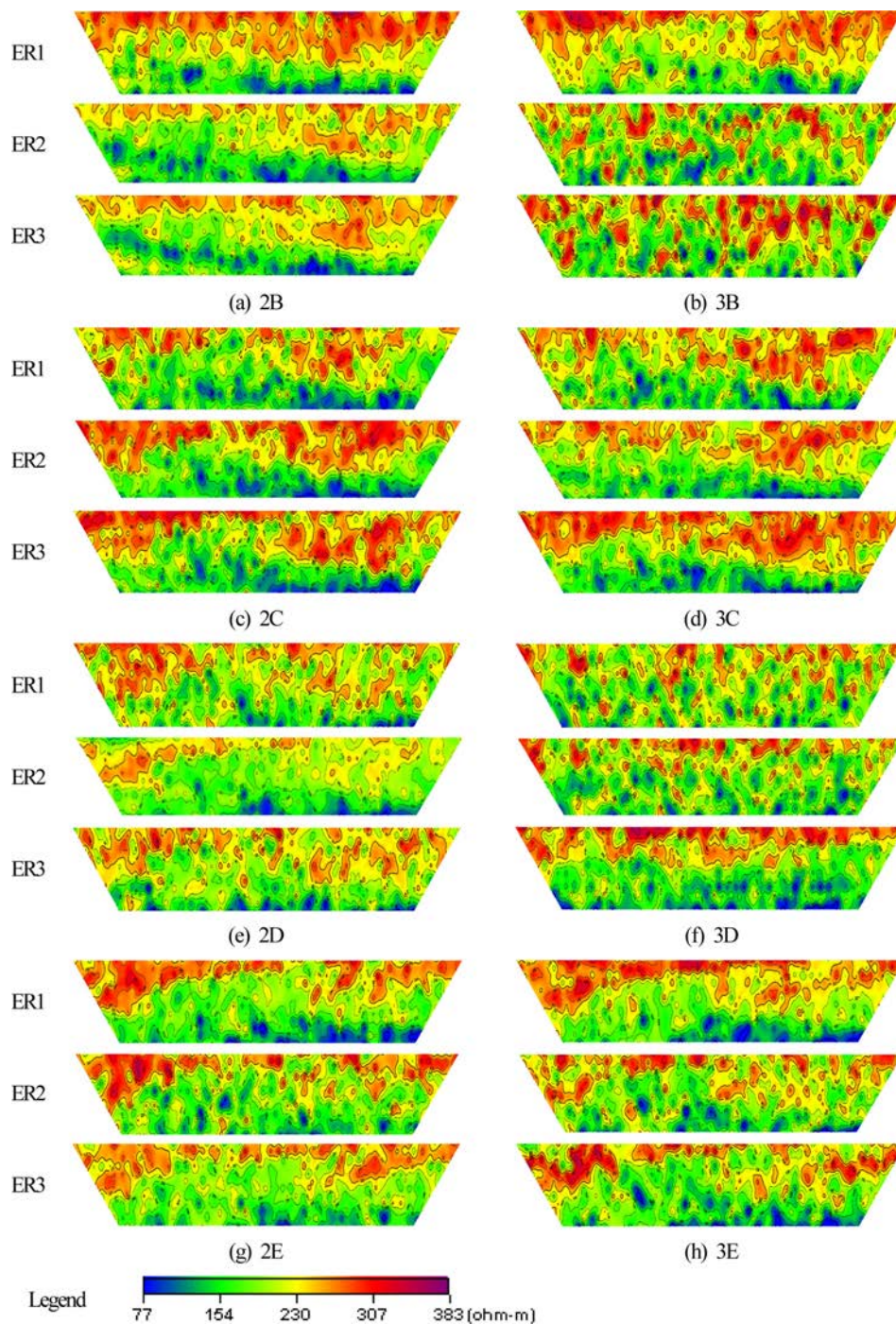


Fig. 8. The results of electric resistivity survey for SUDOKWON 2nd landfill.

라 매립장 사후관리 기간 중 침출수 누적수위 기준 준수 및 침출수 발생 억제를 위해 바람직하다. 따라서 이러한 비저항 탐사의 주기적 실시를 통해 매립장내 수분분포 변화를 관찰함으로써 채순환수 주입시설의 운영에 반영할 필요가 있다.

3.3. 투수계수 분석

샌드위치형 매립장인 제2매립장은 총 7개의 중간복토층과 8개의 폐기물층이 존재하며, 중간 복토층의 평균 두께는 약 50 cm이고, 소재는 토사와 슬러지 고화복토재(He et al., 2021) 등이 사용되었다.

Table 4. Hydraulic conductivity test results

Block	Hydraulic conductivity (cm/sec)	
	Intermediate cover layer	Waste layer
2B	4.13×10^{-5}	1.38×10^{-3}
3B	3.95×10^{-5}	9.17×10^{-4}
2C	3.17×10^{-5}	6.87×10^{-5}
3C	3.21×10^{-5}	9.09×10^{-4}
2D	3.29×10^{-5}	7.87×10^{-4}
3D	2.23×10^{-5}	9.17×10^{-4}
2E	4.21×10^{-5}	1.01×10^{-3}
3E	2.69×10^{-5}	9.87×10^{-4}
Average	3.36×10^{-5}	8.72×10^{-4}

중간복토층과 폐기물층에 대한 투수계수 실험결과는 Table 4와 같다. 중간복토층의 경우 각 블록별로 투수계수가 유사하였는데, 전체 평균 3.36×10^{-5} cm/sec 이었다. 반면, 폐기물층은 6.87×10^{-5} cm/sec ~ 1.38×10^{-3} cm/sec로 블록별 차이가 컸고, 평균 8.72×10^{-4} 로서 중간복토층에 비해 26.0배 컸다. 이는 매립장 건설 당시의 설계값과 비교할 때 중간복토층은 0.41배, 폐기물층은 1.63배 큰 값이다.

제2매립장의 경우 주입된 재순환수가 폐기물층을 포화시킨 후 수분보유능력 (Robertson et al., 2021) 이상의 수분을 하부로 전이 시 중간복토층이 투과속도에 영향을 미칠 수 있고(Qi et al., 2013), 이는 재순환수를 포함한 내부 침출수의 체류시간과 공간적 분포에도 영향을 줄 것으로 판단된다.

4. 결 론

수도권매립지 제2매립장에 대한 침출수 등 재순환수 공급에 따른 내부 수분분포 분석을 위해 굴착시료 분석, 전기비저항탐사, 중간복토층과 폐기물층에 대한 투수계수 실험을 하였으며 연구결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 재순환수 주입 후 8개월경과 시점에서 굴착채취시료 분석결과, 매립심도 20 m까지의 전체 매립장내 함수율은 재순환수 주입구역이 비주입구역에 비해 8.8% point 높았다.
2. 굴착심도별 수분함량은 비주입구역은 차이가 크지 않은 반면, 재순환 구역은 심도 3 m 평균 30.9%에서 심도 20 m 평균 46.0%로 높아졌으며, 이는 수평관보다는 수직정에 의한 재순환수 공급의 영향으로 추정되었다.
3. 건량기준 가연분 함량은 재순환수 주입구역과 비주입구역이 각각 83.9%, 81.2%로서 유사하였고, 함수율과 가연분 함량비율 간의 상관성은 거의 없어, 향후 폐기물

분해율 평가를 위해서는 충분한 운영기간이 필요한 것으로 판단되었다.

4. 전기비저항탐사 결과 수분분포는 블록별로 다소 불규칙하였으나 전반적으로 매립장 하부로 가면서 함수율이 높았다.

5. 투수계수 측정결과 폐기물층은 평균 8.72×10^{-4} cm/sec, 중간복토층은 평균 3.36×10^{-5} cm/sec로서 중간복토층이 폐기물층 보다 상당히 낮은 값을 보였다.

침출수 등 재순환시설에 대한 과학적 설계와 운영을 위해서는 향후 수평관과 수직정에서의 재순환수 공급비율 (Jain et al., 2014), 중간복토층 및 폐기물 층에서 투과계수를 고려한 재순환수의 체류시간과 거동에 대한 후속연구가 필요할 것으로 판단되었다.

References

- Abuel-Naga, H.M. and Bouazza, A., 2016, Electrical resistance method for assessing spatial variation of water content in geosynthetic clay liners at laboratory scale, *Geotext. Geomembranes*, **44**(1), 117-121.
- Benson, C.H., Barlaz, M.A., Lane, D.T., and Rowe, J.M., 2007, Practice review of five bioreactor/recirculation landfills, *Waste Manag.*, **27**(1), 13-29.
- Byun, B.K., Kim, I.C., Kim, G.R., Eun, J.W., and Lee, J.H., 2019, Stability of bioreactor landfills with leachate injection configuration and landfill material condition, *Comput. Geotech.*, **108**, 234-243.
- Friesenhan, C., Agirre, I., Eltrop, L., and Arias, P.L., 2017, Streamlined life cycle analysis for assessing energy and exergy performance as well as impact on the climate for landfill gas utilization technologies, *Applied Energy*, **185**, 805-813.
- García, J., Davies, S., Villa, R., Gomes, D.M., Coulon, F., and Wagland, S.T., 2016, Compositional analysis of excavated landfill samples and the determination of residual biogas potential of the organic fraction, *Waste Manag.*, **55**, 336-344.
- He, J., Feng, X.Y., Zhou, L.R., and Zhang, L., 2021, The effect of leachate seepage on the mechanical properties and microstructure of solidified sludge when used as a landfill temporary cover material, *Waste Manag.*, **130**, 127-135.
- Jain, P., Townsend, T.G., and Tolaymat, T.M., 2010, Steady-state design of vertical wells for liquids addition at bioreactor landfills, *Waste Manag.*, **30**(11), 2022-2029.
- Jain, P., Townsend, T.G., and Tolaymat, T.M., 2014, Transient design of landfill liquid addition systems, *Waste Manag.*, **34**(9), 1667-1673.
- Kim, D.W., Park, S.W., Lee, J.Y., and Lee, P.K., 2001, A Study

- on the Extent of Pollution of an Illegal Landfill, *J. KoSSGE*, **6**(2), 31-38.
- Kim, Y.G., Kim, T.H., Kim, K.Y., Hwang, S.H., and Chae, B.G., 2005, Analysis of Groundwater Flow Characterization in Fractured Aquifer System., *J. Soil Groundwater Environ.*, **10**(4), 33-44.
- Lee, J.M. and Lee, J.Y., 2001, A Study on Characteristics of Hydraulic Conductivity in the Soil-Bentonite Mixed Soils with Compaction Energy and Swelling in the Landfill, *J. KoSSGE*, **6**(4), 61-72.
- Morello, L., Raga, R., Lavagnolo, M.C., Pivato, A., Ali, M., Yue, D., and Cossu, R., 2017, The S.An.A.[®] concept: Semi-aerobic, Anaerobic, Aerated bioreactor landfill, *Waste Manag.*, **67**, 193-202.
- Morris, J.W.F. and Barlaz, M.A., 2011, A performance-based system for the long-term management of municipal waste landfills, *Waste Manag.*, **31**(4), 649-662.
- Nwaokorie, K.J., Bareither, C.A., Mantell, S.C., and Leclaire, D.J., 2018, The influence of moisture enhancement on landfill gas generation in a full-scale landfill, *Waste Manag.*, **79**, 647-657.
- Park, S.C., Cho, B.R., Jeong, J.H., Lee, M.H., Kim, T.Y., and Park, J.H., 2008, Assessment on environmental stabilization of used open dumping landfill - a case study of Kamkok landfill, *J. Korean Geo-Environ. Society*, **9**(6), 13-19.
- Qi, G., Yue, D., Liu, J., Li, R., Shi, X., He, L., Guo, J., Miao, H., and Nie, Y., 2013, Impact assessment of intermediate soil cover on landfill stabilization by characterizing landfilled municipal solid waste, *J. Environ. Manag.*, **128**, 259-265.
- Robertson, B.B., Almond, P.C., Carrick, S.T., Penny, V., Chau, H.W., and Smith, C.M.S., 2021, Variation in matric potential at field capacity in stony soils of fluvial and alluvial fans, *Geoderma*, **392**, 114978.
- Shim, B.O., Chung, S.Y., Kim, H.J., Sung, I.H., and Kim, B.W., 2002, Characteristics of Sea Water Intrusion Using Geostatistical Analysis of Geophysical Surveys at the Southeastern Coastal Area of Busan, Korea, *J. Soil Groundwater Environ.*, **7**(3), 3-17.
- Shin, K.J., Bae, W.H., Choi, S.W., Son, M.W., and Lee, K.M., 2017, Parameters influencing water permeability coefficient of cracked concrete specimens, *Construction Building Mater.*, **151**, 907-915.
- Trapani, D.D. and Bella, G.D., and Viviania, G., 2013, Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes, *Waste Manag.*, **33**, 2108-2115.
- Zhaia, Q., Rahardjo, H., and Satyanaga, A., 2018, A pore-size distribution function based method for estimation of hydraulic properties of sandy soils, *Engineering Geology*, **246**, 288-292.