

쓰레기 매립지에서 가스-물 상대유체투과도를 적용한
매립가스의 포집특성분석

김 인 기 · 허 대 기 · 김 현 태 · 김 세 준 · 성 원 모*

한국지질자원연구원 석유해저자원연구부, *한양대학교 지구환경공학과

**Analysis of Collection Characteristics of Landfill Gas Using Relative
Fluid Permeability of Gas and Water in Waste Landfill**

In-Kee Kim · Dae-Gee Huh · Hyun-Tae Kim · Se-Joon Kim · Won-Mo Sung*

Petroleum & Marine Research Div., Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

**Department of Geoenvironmental System Engineering, Hanyang University*

ABSTRACT

It is difficult to accurately predict each flow rate of landfill gas and leachate extracted from many of wells, which have been completed into a waste landfill containing gas and water. However it may be approximately predicted if we can define only relative fluid permeability of gas and leachate flowing through landfill porous media. Therefore numerical simulation using multi-phase flow equations makes use of it's input data of the relative permeability which is measured and calculated in laboratory environment like in-situ, and consequently we can quantitatively obtain each flow rate of gas and leachate from collection wells. These series of technologies can provide with the important informations to determine the success or failure of landfill gas energy and landfill stabilization. This paper analyses the characteristics of landfill gas collection by six classes of case studies for none described landfill.

Key words : Absolute Permeability, Relative Fluid Permeability, Landfill Gas, Recovery

요 약 문

가스와 물이 공존하는 쓰레기 매립지에 개설된 여러개의 포집정으로부터 매립가스와 침출수의 추출량을 정확히 예측한다는 것은 매우 어렵다. 그러나 매립지 공극에 포함된 침출수와 가스의 상대적인 투과능력을 파악할 수 있다면 추출량을 어느정도 예측할 수 있다. 즉, 현장과 유사한 실험환경에서 침출수와 가스의 상대유체투과도를 측정하여 이 값을 다공질 매질을 통과하는 다상 유체유동방정식의 입력자료로 사용함으로써 포집정으로부터 각상의 추출량을 얻을 수 있다.

주제어 : 절대투과도, 상대유체투과도, 매립가스, 회수율

1. 서 론

쓰레기 매립지내에서 가스와 침출수의 유동성을 파악하는 것은 포집정으로부터 매립가스와 침출수의 추출량을 예측하여 장래 매립가스의 소각 또는 자원화와 침출수의 처리를 위한 중요한 기술적 정보를 제공해 준다. 특히 매립된 쓰레기 종류가 다양하고 불균질한 매립지에서 매립가스와 침출수의 추출량을 예측하기는 더욱 어려워질 수 있다. 일반적으로 쓰레기 매립기간이 20~30년 정도 경과한 매립지내에는 매립가스와 침출수가 공존하며, 먼저 유기물로부터 발생된 메탄과 이산화탄소가 대부분인 매립가스는 매립지층 공극에 어느정도 포화되어 있고 다음으로 침출수는 매립지 저부에 대부분 고여있지만 매립지층 공극에 대부분 가스와 물이 흡착되어 있다. 이러한 매립지층의 공극수와 흡착수로 형성된 침출수와 매립가스가 포집정을 통해 강제 추출될 때, 매립지층내에는 매립가스와 침출수가 동시에 다공질 공극을 따라 유동하게 된다. 이때 매립지층 공극내에서 매립가스와 침출수의 동시 유동성을 파악하기 위해서는 현장과 유사한 환경에서 실험을 통하여 가스와 물의 상대 유체투과도를

측정해야 하며, 이를 다상유체유동 전산모사에 주요 입력정보로 이용함으로써 포집정으로부터 매립가스와 침출수의 추출량을 정량적으로 예측할 수 있다. 이 과정은 매립지층내에 부존하는 유체가 단상(single phase)이 아닌 침출수와 매립가스로 이루어진 2상(two phase)유체이며 이들의 거동특성을 파악함으로써 포집정을 통해 추출되는 가스와 침출수의 유량과 이에 따른 생산성 여부를 분석해 내는 과정이다. 이를 통해 본 논문에서는 쓰레기 매립지의 주요 목표인 매립지 안정화에 크게 영향을 주는 매립가스의 포집율을 도출하여 최적의 매립가스 포집특성을 분석하고자 한다.

2. 가스와 물의 상대유체투과도 측정

2.1 실험장치 및 방법

매립층 토양은 미고결 시료이기 때문에 기존의 고결시료에서 사용하던 코아홀더를 사용할 수 없으며 미고결시료에 적합한 코아홀더를 제작해야 한다. 즉 코아홀더에 장착된 시료가 일종의 코아의 역할을 할 수 있도록 코아홀더의 내경 및 직경을 정확

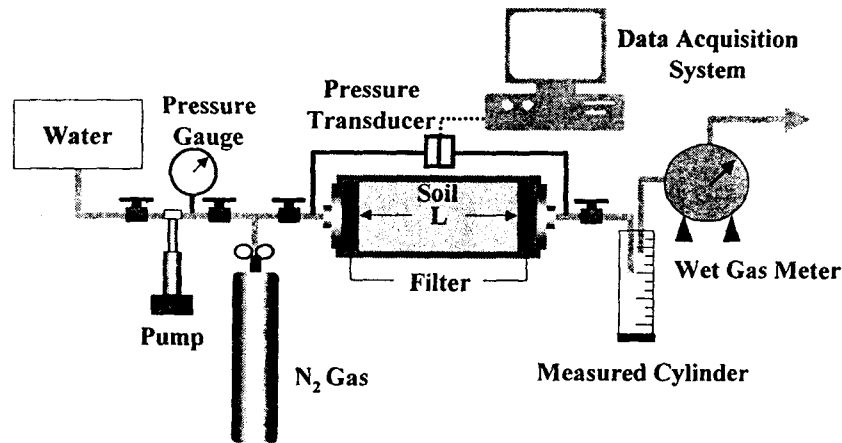


Fig. 1. Apparatus for relative permeability measurement.

히 표현할 수 있게 설계되었다. 이때 코아홀더의 내경은 5cm이고, 시험편의 길이는 시료의 양에 따라서 25~30cm로 변화될 수 있다. Fig. 1은 상대 투과 측정시스템의 개요도이며 코아홀더 상단에 가스와 물을 동시에 주입할 수 있는 정량펌프와 가스 탱크가 연결되어 있으며, 코아홀더 하단에는 매립층 시료를 통과한 가스와 물을 분리하는 장치와 가스유량계 및 물유량계가 부착되어 있다. 코아홀더와 차압 측정기는 병렬로 연결되었다. 여기서 측정된 압력은 자료취득 시스템에 저장된다. 실험은 정상유동상태하^{1, 2)}에서 수행되며, 먼저 코아홀더에 매립층 시료를 주입하고 가스의 절대투과도를 측정 한 다음 물로 100% 포화시킨 후 물의 절대투과도를 측정하였다. 마지막으로 수포화율을 감소시키면서 가스-물 상대유체투과도를 측정하였다.

2.2 매립지 기초물성 특성

2.2.1 수포화도

매립지층내에 포집정이 지표와 개방되기 전에 매립지층 공극 또는 간극내에는 물과 매립가스가 상존하고 있다. 이러한 매립지층내에 포집정이 지

표와 개방되면 매립가스는 지표밖으로 배출되면서 매립지층 공극내 상존하고 있었던 가스와 물의 체적이 변하게 되는데 이때 바로 수포화도의 변화가 일어나는 것으로 표현할 수 있다. 예를 들어 물과 가스가 부존되어 있는 저류암 공극내에서의 가스와 물에 대한 포화도를 살펴보면, 일반적으로 암석내에서 공극은 가스를 흡수하는 성질보다는 물을 흡수하는 성질이 강하여 공극내 암석표면에는 물이 흡착되어 있어 치밀한 공극에서도 저류층의 고압력에 의해 가스의 유동이 매우 자연스러울 수 있으나 저류층내의 압력이 저하되면 공극표면에 흡착된 물의 표면을 가스가 뚫고 나오기가 어려울 뿐만 아니라 물이 흡착된 공극내의 표면은 서로 연결되기가 쉽고 궁극적으로는 가스의 생산정까지 연결되어 water coning 현상이 발생하여 가스의 생산은 급격히 감소하고 물의 생산이 증가하게 되어 결국에는 가스의 생산을 중단하는 폐정까지 이르게 된다. 더욱이 매립지층 토양내의 공극 치밀성은 암석내의 공극에 비해 매우 약하여 공극간 연결성이 강하고 또한 침출수중 대부분은 중력에 의해 매립지층 저부에 고여 있고, 이러한 침출수는 가스포집 여건상 포집정에 유공층을 형성시키지 않으므로 완전 수포

화 층으로 볼 수 있으며 이층에는 가스의 유동이 전혀 일어나지 않는다. 그러나 이러한 매립지층 저부의 완전 수포화층 상부에는 침출수와 가스가 공존할 수 있는데 이러한 이유는 매립토양에 침출수가 흡착되어있는 경우가 하나 있고, 또 하나는 매립지층 저부의 완전 수포화층에서 연결된 상부 매립지층 공극내 모세관 작용에 의해 침출수가 매립가스층내로 부분적으로 수포화될 수 있다. 이와 같이 수포화도는 실지 매립가스가 유동될 수 있는 매립지층내에서 발생하는 것으로 그 영역을 정할 수 있다. 이러한 개념을 근간으로 매립지층내의 수포화도에 대한 정의하면 다음과 같다.

$$S_w = \frac{W_w}{V_s} = \frac{\left(\frac{W_w}{\rho_w}\right)}{V - V_s} = \frac{\left(\frac{W - W_s}{\rho_w}\right)}{\left(V - \frac{W_s}{\rho_s}\right)} \quad (1)$$

위에서 V , W , 는 각각 체적, 중량, 밀도이고 하첨자 w , s , v 는 각각 물, 건시료, 공극이며 하첨자가 없는 부분은 전체시료를 나타낸다.

2.2.2 절대투과도

일반적으로 토목수리공학 분야에서는 토양 속을 흐르는 유체가 물인 경우는 투수계수의 측정으로만 토양매질내에서 물의 전도능력을 알 수 있으나 침출수, 메탄 가스와 이상화탄소 가스가 유동하는 토양에서는 투수계수만의 적용은 배제되고 여기서는 "절대투과도(absolute permeability)" 라는 개념을 도입하는데, 이것은 물이나 가스가 토양매질 속을 흐를 때 절대적으로 통과할 수 있는 공간의 크기인 md(milli darcy) 단위 또는 darcy를 사용하는데 1 darcy의 매질은 $9.68 \times 10^9 \text{ cm}^2$ 의 면적의 공간으로 유체가 통과할 수 있는 공간의 크기를 가지고 있음을 의미한다. 즉 이때는 매질의 크기만 정해진 것이고 통과할 유체가 정해진 것은 아니다.

이러한 물리적 의미를 어떠한 매질내를 통과하는 유체의 유량과 압력의 관계를 정상적인 층류(laminar flow)상태에서 표현하면 다음의 darcy 법칙으로 설명할 수 있다.

$$q_w = \frac{KA_x}{\mu_w} \frac{dP}{dx} \quad (2)$$

식 (2)에서 q_w 는 물의 유량(m^3/sec)이고 K 는 절대투과도(cm^2 또는 darcy), A_x 는 x 방향으로 유체가 흐를 때 매질의 단면적(cm^2 또는 m^2), μ_w 는 물의 점성도(cp 또는 $\text{Pa} \cdot \text{sec}$), dP/dx 는 매질간의 유체의 압력구배(Pa/m 또는 kPa/m)이다. 실험을 통해 절대투과도 자료를 얻기 위한 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림을 살펴보면 코아홀더는 최대 가열범위인 110°C 이내의 내열에서도 견딜 수 있도록 알루미늄 재질로 제작하였으며 그 사양은 내경이 5cm, 고결 토양이 25cm의 길이로 압밀될 수 있는 크기이며, 코아홀더 양끝단에는 가압 또는 가열에 의해 내부충진 고결토양입자가 코아홀더밖으로 배출되지 않고 실험용 유체만이 배출되도록 다공성 매질을 부착하였다. 실험은 수평으로 놓인 코아홀더의 한쪽 튜브에 한가지의 유체(물 또는 가스)를 주입시키고 다른 한쪽의 배출튜브에는 유량계를 부착한다. 또한 코아홀더의 양끝단에는 차압을 측정할 수 있는 압력계를 부착하여 실험을 실시하게 되며, 실험시 배출부에 유량이 일정히 유지되었을 때 차압과 유량에 대한 실험자료를 획득하면 된다. 이상의 실험방법에 따라 실험유체로서 물을 사용한 경우는 유량-압력관계의 식 (2)를 K 에 대해 정돈하면 다음과 같다.

$$K = \frac{q_w \mu_w L}{A_x (P_m - P_{out})} \quad (3)$$

식 (3)에서 q_w 는 측정된 물의 유량(m^3/sec),

cc/sec, 또는 cc/min), μ_w 는 물의 점성도(cp 또는 Pa·sec), L 은 시험편의 길이(m 또는 cm), A_x 는 시험편의 단면적(m^2 또는 cm^2), P_{in} 과 P_{out} 는 각각 튜브내 주입지점과 배출지점에서 측정된 압력(kgf/ cm^2 , atm, kPa, 또는 psig)을 얻으면 적절한 단위변환을 통해 절대투과도 값을 얻을 수 있다.

2.2.3 측정결과

쓰레기 매립지내 유체의 유동에 영향을 끼치는 물성은 매립지층의 공극율, gas와 물의 공존시 초기수포화도, 절대투과도, gas와 물의 상대투과도이다. 대상 쓰레기 매립지층의 복토층 두께는 약 2m이며 현장 시료채취는 6m 간격으로 이루어졌다. Table 1은 A1 매립지 포집공에서 채취한 시료로부터 획득한 물성들이다. Table 1를 개략적으로 살펴보면, 공극율은 복토층이 포함된 0~6M 지점에서 0.389로서 0~6M 지점은 18~48M 지점의 0.46~0.53에 비해 낮게 나타나 쓰레기 매립지층에 비해 낮게 나타남을 알 수 있다. 한편 최하부 54~60M 지점은 공극율이 0.385로 낮게 나타나고 있으며 이것은 상부의 세질 고행입자가 침강하여 원래의 공극에 충전된 결과로 추측된다. 또한 공극내에 잔존하는 초기수포화도는 gas에 비해 0~6M 지점이 0.359로 공극내 수분이 차지하는 체적비가 비교적 낮고 매립층 하부지점으로 갈수록 수포화도가 증가하여 최하부 54~60M 지점에서는 0.93으로서 gas가 차지하는 체적비는 급속히 감

소한다. 이것은 하부 60M지점에 일정수위가 유지되고 있어 수분흡수 영향이 작용한 것으로 예측된다. 단상유체의 매립층내 투과능력을 지칭하는 절대투과도는, 채취한 시료로부터 확인한 바 악취가 심할 뿐만 아니라 진한 감청색 또는 진한 감녹색을 띠는 매립 쓰레기는 18~48M 지점에서 주로 관찰되었다. 이때 0~6M 지점에 복토층이 포함된 지점의 절대투과도는 약 714md이고, 18~24M 지점에서는 약 2,693md, 36~42M 지점은 213md, 42~48M 지점은 1,835md이며, 특히 36~42M 지점의 213md는 전형적인 비위생 매립지의 불균질한 시료형태로서 세립질 콘크리트 입자들이 시료에 포함된 것으로 관찰되었다. 한편 최하부 심도 구간이 54~60M 지점에서의 공극율 0.385, 절대투과도 858md로서 비교적 매립 쓰레기층의 절대투과도에 비해 낮게 나타나 상부로부터 세립질 고행입자의 지속적인 침강 또는 매립연한이 오래되어 무기물과 이물질이 다량 포함된 것으로 추정된다.

2.3 gas와 물의 상대유체투과도 특성

Fig. 2는 위의 시료를 가지고 실험으로부터 도출한 gas와 물의 상대유체투과도를 나타낸 것이다. 상대유체투과도는 다공매질의 공극형태, 습윤도, 유체의 분포상태, 포화도의 측정과정 등을 나타내는 종합적인 지시자 역할을 한다.3,4) 심도별 5개 구간의 시료에 대한 상대유체투과도 특성을 살펴보면 상대유체투과도 곡선이 모두 오른쪽(수포화율이 높은 구간)으로 치우쳐져 있는 것을 알 수 있으며 최소 수포화율은 0.61~0.67로 상당히 균일한 수치를 나타내고 있다. 이러한 특성은 강력한 수습윤성을 보여주는 것으로 일반적으로 gas의 유동은 gas의 포화율이 나타나기 시작한 점부터 급격히 증가하여 gas포화율이 40%에 이르기 이전에 최고점에 도달한다. 따라서 수포화율이 낮은 경우(60%이하) 침출수의 유동이 거의 이루어지지 않

Table 1. Property of landfill sample

Sample depth	Porosity	In-situ water saturation	Absolute permeability
0-6M	0.389	0.359	714.2md
18-24M	0.534	0.782	2,692.6md
36-42M	0.461	0.710	212.6md
42-48M	0.485	0.788	1,835.0md
54-60M	0.385	0.930	858.2md

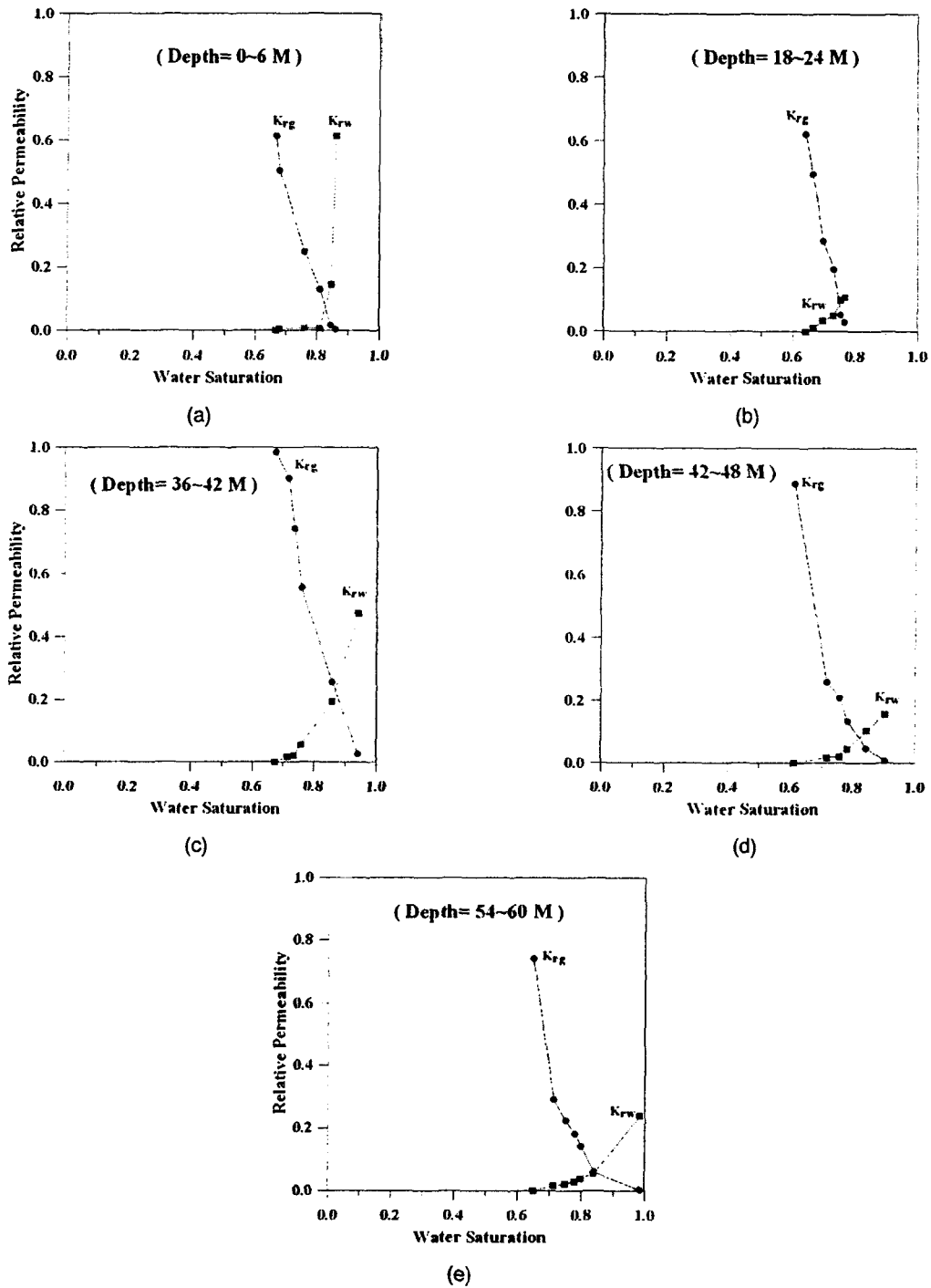


Fig. 2. Relative permeability of water and gas phase.

음을 알 수 있으며 가스만이 유동하는 포화율 구간이 짧음을 알 수 있다. 한가지 특이한 점은 복토가 많이 섞인 상부 시료에서도 이와 같은 현상이 나타나며 다만 다른 시료에 비하여 수포화율이 60%까지 높게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 이미 언급한 강한 수습윤 특성에 복토층의 혼합으로 인하여 물의 유동이 다른 층보다 용이한 데 기인하는 것으로 추측된다. 또한 끝점에서의 가스투과도는 모든 시료가 60%를 넘고 있으며 34~42M 시료와 42~48M 시료는 90%를 넘고 있다. 이 역시 매립층이 강력한 수습윤 특성을 가지고 있음을 나타내며 가스의 유동이 용이함을 알 수 있다. 최소 가스 포화율은 상부 2개 시료의 경우 14~20%를 나타내어 가스가 최초로 유동할 수 있는 포화율이 일반적으로 높게 나타나 상당한 가스가 축적될 때까지 가스가 유동치 못함을 알 수 있다. 반면에 하부 3개 시료의 경우는 최소 가스포화율이 10% 이하로 나타나 일반적인 고결 시료와 비슷한 수치를 나타내고 있다. 42~48M와 54~60M 시료는 모두 분해가 잘된 균질한 무기질 쓰레기로 거의 비슷한 상대유체투과도 곡선을 보여주고 있다. 36~42M와 18~24M 시료는 거의 비슷한 구성물질로 되어 있으나 36M~42M 시료의 상대유체투과도가 비정상적으로 높은 끝점을 나타내고 있어 가스의 유동이 활발함을 알 수 있고, 이는 단상 투과성이 낮은 지층공극의 침출수가 공극내벽에 흡착되어 있는 반면에 공극중앙부분에 가스는 원활한 유동을 암시케 한다.

3. 가스와 침출수 전산유동 모사시험

쓰레기 매립지로부터 쓰레기의 분해성분인 메탄 가스를 포집(생산)하기에 앞서 필수적으로 수행되어야 할 과정은 가스-침출수 2상 전산유동 모사시험이다. 이 작업은 석유·가스개발을 위해 생산전에 또는 생산중에 반드시 수행되고 있는 과정으로

서 석유 또는 가스가 부존된 저류층(매립가스에서는 매립지층을 지칭함)에 포함된 석유, 물, 탄화가스가 3상 유체상태로 존재하다가 생산정(production well)이 완결되면서 석유, 물, 가스 성분의 3상유체가 동시에 생산정으로 유동시, 저류층내를 흐르는 3상 유체의 거동과 생산성을 분석하는 과정이다. 이러한 작업과정을 응용하여 침출수와 가스성분의 2상 유체를 포함하는 쓰레기 매립지에서 매립가스와 침출수의 거동과 생산성을 파악하는 데에 이러한 전산유동모사시험 작업이 수행될 수 있다. 단상유체의 다공성 매질내 유동은 압력과 유량을 얻게 되지만, 2상 유체의 매질내 유동은 압력, 유량, 각상의 포화도를 얻을 수 있다. 또한 2상 유체의 전산유동모사 작업을 위해서는 실험적으로 중요한 자료인 각 상에 대한 상대유체투과도 정보가 반드시 존재하여야 한다. 한편 쓰레기 매립지에는 가스와 침출수가 존재하고 2상 동시유동을 하므로 다상유동에 의한 생산성 분석을 반드시 실시해야 한다. 금번 연구에서 전산유동모사 작업을 위해 대상 쓰레기 매립지의 포집공에서 채취한 시료를 기준하여 매립지의 기초물질과 가스와 침출수에 대한 상대유체투과도 자료를 이용한다.

3.1 매립지 지층 및 물성

대상 매립지는 A1, A2매립지로 구분되어 있으며 A1매립지와 A2매립지내 가스와 침출수는 상호 유동을 하지 못하는 독립된 매립지로 구성되어 있으므로 전산유동모사작업은 개별적으로 수행되었다. 매립지의 개략적인 형태는 최상부 지표에서 심도는 65M이고 최상부 2M는 세립질 토양으로서 복토되어 있고 최하부 수준은 5.0~6.0ML이다. 매립지 전산유동모사시험을 위한 유동층의 수는 4개로 나누었으며, 그 두께는 제 1층은 4M이고 최상부 2M 두께로 복토되어 있으며, 제 2, 3, 4층은 각각 18M로 나누었고 제 4층 하부는 5M 수위가

유지되고 있다. 또한 매립지 외곽은 차수막으로 매립지를 둘러싸고 있고 사면에는 세립질 토양으로 복토되어 있어 가스와 침출수의 사면밖으로 유출은 거의 없는 것으로 관찰되며, 포집정으로부터 가스 포집시에는 사면밖으로의 가스 차단효과가 발생하므로 매립지 전산유동 모사시험시 사면과 최상부 지표는 차가스 경계조건(no flow gas boundary condition)으로 설정할 수 있다. 한편 매립지 전산유동모사시험을 위해 매립지층을 4개 층으로 나눈 것은 시료채취작업이 심도구간 6M 간격으로 이루어졌고 Table 1과 2의 포집공에서 채취한 물성자료를 기본으로 한다.

3.2 가스-침출수 2상 유동이론 및 응용

가스와 침출수가 동시에 어떤 다공성 매질을 통

해 흐를 때, 매질내에서 유체의 질량 변화율이 매질을 통과하는 질량교환율과 동일해야하는 “질량보존법칙”에 대한 연속방정식과 Darcy법칙으로부터 가스와 침출수에 대한 유동방정식이 유도되며 다음과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) = \Delta \left[\frac{KK_{rw}}{\mu_w B_w} \Delta \Phi_w \right] + Q_w \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{R_{gw} S_w}{B_w} \right) \right] = \Delta \left[\frac{KK_{rg}}{\mu_g B_g} \Delta \Phi_g \right] \quad (5)$$

$$S_w + S_g = 1.0 \quad (6)$$

$$P_g - P_w = P_c = f(S_w) \quad (7)$$

위에서 식 (4)는 공극구조의 매질을 통과하는 물

Table 2. Relative permeabilities of water and gas phase

Depth	0~6M 구간			18~24M 구간			36~42M 구간			42~48M 구간			54~60M 구간			
	Sw	Krw	Krg	Sw	Krw	Krg	Sw	Krw	Krg	Sw	Krw	Krg	Sw	Krw	Krg	
Data point no.	1	0.860	0.613	0.004	0.768	0.108	0.029	0.943	0.475	0.026	0.905	0.158	0.008	0.984	0.239	0.004
	2	0.846	0.146	0.017	0.755	0.099	0.053	0.858	0.194	0.256	0.845	0.105	0.047	0.839	0.054	0.061
	3	0.810	0.005	0.129	0.732	0.050	0.196	0.759	0.054	0.556	0.784	0.045	0.136	0.799	0.039	0.143
	4	0.760	0.008	0.248	0.698	0.034	0.285	0.736	0.021	0.742	0.759	0.020	0.209	0.780	0.029	0.182
	5	0.679	0.005	0.504	0.666	0.010	0.495	0.715	0.017	0.902	0.718	0.017	0.259	0.750	0.022	0.225
	6	0.667	0.000	0.613	0.641	0.000	0.623	0.674	0.000	0.985	0.612	0.000	0.887	0.714	0.016	0.291
													0.650	0.000	0.741	

Table 3. Input data of landfill layer grid system

Layer no.	A1, A2 landfill				A1 landfill		A2 landfill	
	Bottom depth (m)	Thickness (m)	In-situ pressure (psia)	Well head pressure (psia)	Number of completed wells	Number of landfill grids	Number of completed wells	Number of landfill grids
1	6.0	4.0	16.0	0.71	32	699	23	391
2	24.0	18.0	26.1	0.71	32	807	23	466
3	42.0	18.0	35.3	0.71	58	1141	48	791
4	60.0	18.0	51.0	0.71	58	1542	48	1061

에 대한 유동방정식이며 식 (5)는 가스성분에 대한 유동방정식이며 기호 B는 유체의 체적계수(gas formation volume factor)로서 매립지 환경상태에서의 가스체적과 대기압 상태에서 가스체적의 비를 말하며 단위는 분율이다. (μ , Q, R은 각각 유체의 점성도, 포집정에서의 유체의 생산량, 그리고 침출수에 용해되어있는 가스의 용해도이며 단위는 분율이다. 식 (6)은 물과 가스성분의 포화도 관계식이며 식 (7)은 가스와 물 사이에 작용하는 모세관 압력을 나타내는 식이다.

$$\Delta P_w = \Delta P_w - \gamma_w \Delta z \quad (8)$$

$$\Delta P_g = \Delta P_g - \gamma_g \Delta z \quad (9)$$

한편 식 (8)과 식 (9)는 각각 물과 가스의 유동을 일으키는 단위체적 당 작용하는 힘, 즉 포텐셜로서, 압력구배에 유동방향으로의 고저에 따라 비중량(specific weight)이 첨가된 매개변수이다. 이 상에서 미지변수인 가스의 압력 P_g , 침출수의 압력 P_w , 가스의 포화도 S_g , 침출수의 포화도 S_w 에 대한 해는 4개의 식 (4)~(7)로부터 얻을 수 있다. 식 (4), (5)의 단위는 체적유동 분율(fractional volumetric flow rate)로서 유한차분화 과정에서 격자체적을 곱해주어 실 체적유동율을 나타낼 수 있다.

가스-침출수 2상 전산유동모사시험을 위해 격자화한 격자수는 XY 방향으로 50×50으로 하였으며 격자크기는 X방향이 24.5M, Y방향이 18.4M로 정하여 전체의 X방향으로는 1.225M, Y방향으로는 920M로 하여 매립지의 모든 유동층이 포함되도록 하였고, 또한 현재 계획된 가스 포집정 사이의 간격에 충분히 격자가 포함되어 포집정 간 유동성을 분석할 수 있도록 전산 격자시스템을 설정하였다. 2방향의 유동층은 총 4개로 설정하였으며 각 층의 두께는 제 1층 4M, 제 2, 3, 4층은 각각

18M로 하여 총 유동층 심도는 58M이고 최상부에는 유동층이 아닌 복토층의 두께는 2M로 설정하였다. 한편 매립지의 공극율(ϕ), 초기수포화도(S_{wi}), 절대투과도(K)는 Table 1의 기초물성값을 이용하였고, 가스와 침출수에 대한 상대유체투과도(K_{rg} , K_{rw})는 Table 2의 값을 이용하였다. 또한 매립지내 온도는 약 40℃로 설정하였고, 포집정내 설정압력은 0.71psia(4.89kPa)로 설정하여 충분한 진공효과를 주어 매립지층의 초기 공극압력과 포집정내의 압력차를 부여하여 유체의 유동을 용이하게 하였다. 매립지층의 초기 공극압력은 매립지층 공극내 함유된 초기 수포화도에 대한 관계로부터 계산되었다. 또한 대상 매립지는 오랜 매립기간에 달했으므로 더 이상 쓰레기 분해 중 발생하는 가스의 지속적인 생성은 없는 것으로 고려하였다. 이상의 자료를 기초로 매립지 가스-침출수 전산유동모사시험을 수행하고자 한다. Table 3은 A1, A2매립지에 대한 유동층별 유동모사시험에 필요할 수치 격자자료를 나타낸 것이다.

한편 1개의 포집정의 가스 포집능력은 5,100m³/day를 한계 포집량으로 설정하고 그 이하로 가스가 포집시에는 해당 포집정은 폐정(shut in well)으로 고려한다. 따라서 전산유동모사시 가스 포집정은 가스의 포집량이 한계 포집량 이하로 감소될 때는 폐정되며 이때까지의 기간, 즉 폐정전 포집기간(shut in time)이 결정될 수 있다.

3.3 사례분석

금번 연구에서 매립지에 적용한 전산유동모사 환경은 총 6가지 사례로 설정하였다.

Table 4에서 사례 1은 기본 설계안을 기초로 A1, A2매립지 폐정시 가스의 유량을 5,100m³/(day·well)로 하였으며, 매립지내 압력조건은 Table 4의 자료를 원래 값으로 이용하였고 가스 포집정 수는 기본설계를 중심으로 설정하였다. 그

Table 4. Specification of system cases for computational gas and water flow simulation

Case no.	Changing system parameter of A1 and A2 landfill		
	Shut in gas flow rate(m ³ /day · well)	Number condition of in-situ wells	Spacing between wells(m)
1	5,100	original value	120
2	2,550	original value	120
3	5,100	half	240
4	2,550	half	240
5	1,275	quarter	360
6	≥0	original value	120

외 사례 2~5까지는 폐정을 위한 가스의 한계 포집 가스유량을 변화시키거나 포집정의 수를 조절하여 가스의 생산성을 분석하고자 하였다. 사례 6은 포집정을 폐정하는 조건을 위해 원래의 한계 가스유량을 설정하지 않고 가스가 전혀 포집되지 않는 경우에 폐정시키는 것으로 설정하였다. 이것은 초기에는 가스의 포집량에 의한 에너지 이용 측면을 고려하였지만 그후 에너지 이용 측면보다는 매립지 안정화 측면, 즉 매립지내의 가스를 충분히 추출해야 하는 안정적인 매립지 환경상태를 조성하는 이 유에서 설정된 것이다.

3.3.1 기본사례

기본사례는 사례 1로서 A1, A2매립지의 폐정가 스한계유량(shut in landfill gas flow rate)은

Table 5. Shut in time and it's number of wells of case 1

A1 landfill		A2 landfill	
Shut in time	Number of wells	Shut in time	Number of wells
9 days	53	2 days	33
9~52 days	4	--	--
52~103 days	1	2~3 days	15
Total	58	Total	48

5,100m³/(day · well)을 기준하였다. 이상의 매립지 환경을 설정하여 가스·침출수 전산유동 모사시 험을 실시하였다. 가스 포집정의 폐정시기를 나타 낸 Table 5를 살펴보면 A1매립지인 경우는 가스를 포집하기 시작한 후 9일이 지나면 가스의 유량이 5,100m³/(day · well)이하로 떨어져서 폐정되는 포집정 수는 53개이고 그후 52일이 지나면 4개, 103일이 지나면 가스의 유량이 5,100m³/(day · well)이하로 저하되는 폐정수는 1개이다.

A2매립지에 대한 모사결과를 살펴보면 2일이 경과하면서 폐정되는 포집정 수는 33개이고 그후 3일이 경과하면 폐정수는 15개로서 A2매립지의 모든 가스 포집정은 폐정될 수밖에 없다. 이러한 상황은 1개 포집정의 가스 포집량 한계를 너무 크게 설정한 이유로 이러한 결과가 나타난다. A1매립지의 폐정시기가 A2매립지에 비해 지연되는 것은 A1매립지의 크기가 A2매립지에 비해 클 뿐만 아니라 A2매립지의 포집정 단위면적당 수가 과도한 결과이다. Table 6은 초기 매장량에 대한 가스

Table 6. Landfill gas and water production until shut in time of case 1

Case 1	A1 landfill			A2 landfill			Total		
	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)
Landfill gas	3.53	5.16	68.4	0.52	3.41	15.2	4.05	8.57	47.3
Water	0.00695	11.722	0.06	0.0006	7.755	0.008	0.00755	19.477	0.039

와 침출수에 대한 추출량을 보여주고 있다. A1매립지에 대해 폐정시기까지 가스의 총 생산량은 $3.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로서 가스매장량 $5.16 \times 10^6 \text{ m}^3$ 에 대해 회수한 가스 포집율은 약 68%로서 나머지 32%는 생산되지 못하고 매립지 내에 잔존해 있다.

추출된 침출수는 $6.95 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로서 초기매장량 $11,721.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 에 대해 회수한 비율은 0.06% 정도였다. 이것은 매립지층 내에 포화된 침출수는 누

적된 수위를 유지하기보다는 매립지 공극에 포화되거나 습윤된 상태로 가스의 상대적인 유동저항 영향으로 많은 유량의 침출수가 추출되지 않는 것을 알 수 있다. A2매립지에 대해서 가스의 총 생산량은 $0.52 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로서 초기매장량 $3.41 \times 10^6 \text{ m}^3$ 에 비해 회수율은 15%에 불과하다. 이는 폐정시기가 짧아진 데에 기인하며 폐정시기가 짧아졌다는 것은 작은 크기의 매립체에 대한 포집정 수의 증가로

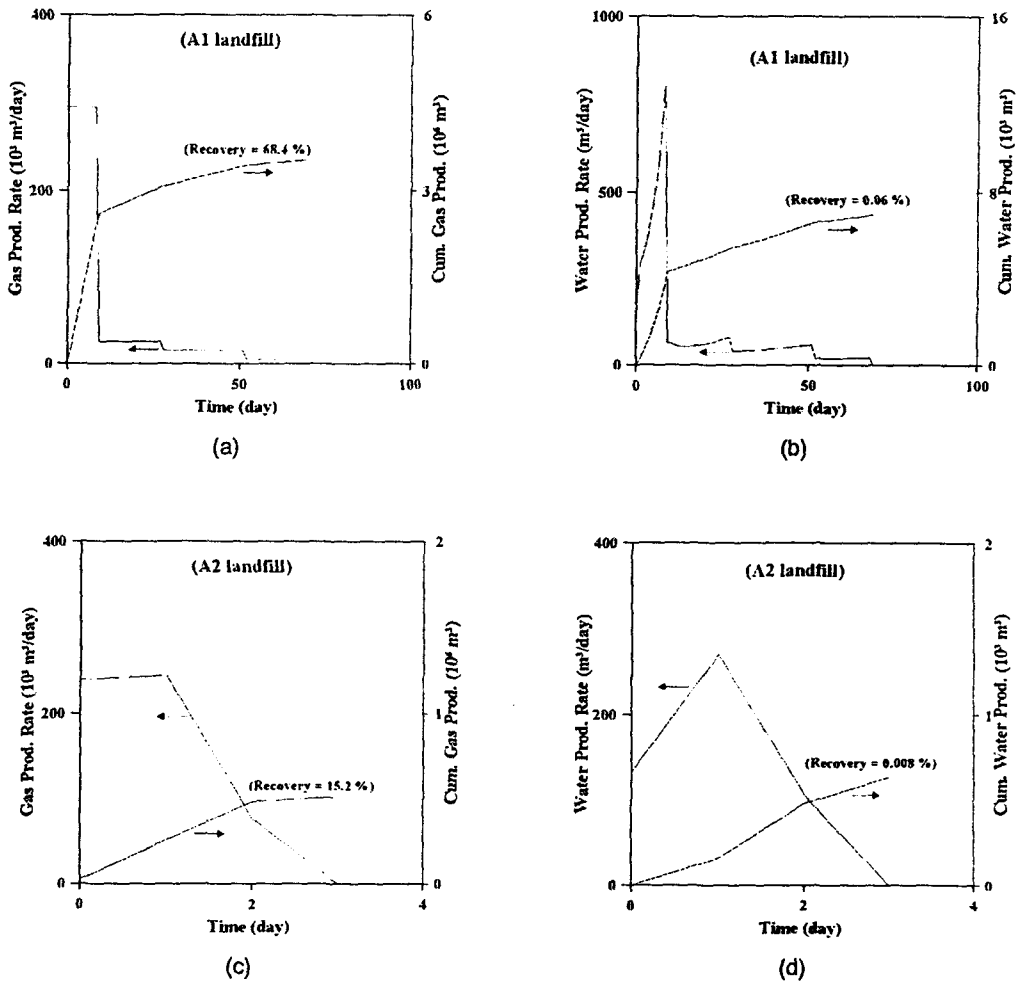


Fig. 3. Landfill gas and water production, and its recovery in case 1.

그 만큼 매립지층내 압력강하가 빠르게 일어남으로써 폐정입계가스 포집량 $5,100\text{m}^3/(\text{day} \cdot \text{well})$ 이하로 감소했기 때문이다. 침출수의 추출량은 $0.6 \times 106\text{m}^3$ 로서 약 0.008%밖에 회수되지 못하므로 침출수의 추출은 미비한 것으로 나타났다. A2매립지의 가스회수율 약 15%는 나머지 잔존가스부존율이 85%이며 매립가스의 에너지 이용 측면 또는 매립지의 안정화 측면에서도 문제가 될 수 있다.

Fig. 3은 가스와 침출수 생산량과 초기부존량에 대한 회수율을 나타낸 그림이다. 그림 (a), (b)는 A1매립지, 그림 (c), (d)는 A2매립지에 대한 결과이다. 그림에서 좌측의 종축은 생산유량, 우측은 누적생산량을 나타낸다. (a)의 좌측을 살펴보면 매립가스의 생산유량은 약 $300,000\text{m}^3/\text{day}$ 까지 보이다가 운전 10일 이후부터 포집정이 폐정되어 유량은 급속히 저하하며 약 70일에는 모든 포집정이 폐정된다. 또한 우측의 누적생산량에서 초기 가스부존량에 대해 약 $3,500,000\text{m}^3$ 로서 68%의 회수율을 나타낸다. (b)는 A1매립지에서 침출수생산유량과 누적생산량을 나타내며 침출수는 가스와 동시에 생산되며 일시에 약 $800\text{m}^3/\text{day}$ 까지 생산된 후 포집정의 폐정으로 인해 $50\text{m}^3/\text{day}$ 정도로 감소한다. 70일까지 침출수 누계량은 약 $7,000\text{m}^3$ 이다. A2매립지에 대해서 (c)의 매립가스를 살펴보면 가스의 유량은 최대 $250,000\text{m}^3/\text{day}$ 에서 점점 감소한 후 포집정이 완전 폐정되는 시기는 3일로 나타나며 누적생산량은 약 $500,000\text{m}^3$ 정도로서 회수율은 15%에 지나지 않아 A2매립지에 대한 생산성은 매우 저조함을 알 수 있다. (d)는 A2매립지의 침출수에 대한 생산을 나타내며 최대 약 $300\text{m}^3/\text{day}$ 까지 생산 후 감소하며 누계량은 약 600m^3 정도이다. 기본 사례에서 주안점은 회수율을 높이기 위한 것으로 폐정조건 한계유량을 낮추어야 하며 또한 포집정수를 낮추어 매립지내 압력강하를 감소시켜야 한다. 회수율을 높인다는 것은 매립가스를 가능한 최대로 추출하여 매립지층의 안정성을 높이는 데에

있으나 가스의 회수율을 높이기 위해 폐정조건 한계유량을 낮추게 되면 그 만큼 가스 생산유량이 감소하여 에너지 시설의 이용성이 저하될 수 있으므로 초기에 매립가스 개발시 최적의 폐정조건 한계유량과 포집정수에 부합되도록 적절한 에너지 시설투자를 해야한다.

3.3.2 사례 2, 3, 4

기본사례에서의 매립가스 회수율을 높이고자 사례 2, 3, 4에 대해 유동모사시험을 실시하였다. 사례 2는 가스의 폐정한계유량을 기본설계 $5,100\text{m}^3/(\text{day} \cdot \text{well})$ 의 1/2인 $2,550\text{m}^3/(\text{day} \cdot \text{well})$ 로만 설정하였고, 사례 3은 A1, A2매립지의 가스 포집정수만을 각각 1/2로 감소시킨 경우이며, 사례 4는 폐정한계유량과 A1, A2매립지의 가스 포집정수를 모두 1/2로 감소시킨 경우이다.

매립가스를 안정적으로 생산하기 위해서는 매립지층내 압력강하를 억제하는 데에 있다. 따라서 폐정한계유량을 낮추거나 포집정수를 낮게하여 매립

Table 7. Shut in time and it's number of wells of case 2

A1 landfill		A2 landfill	
Shut in time	Number of wells	Shut in time	Number of wells
23 days	53	9 days	43
23~95 days	4	—	—
95~122 days	1	10 days	5
Total	58	Total	48

Table 8. Shut in time and it's number of wells of case 3

No. 1 landfill		No. 2 landfill	
Shut in time	Number of wells	Shut in time	Number of wells
21 days	28	3 days	16
21~129 days	1	3~5 days	8
Total	29	Total	24

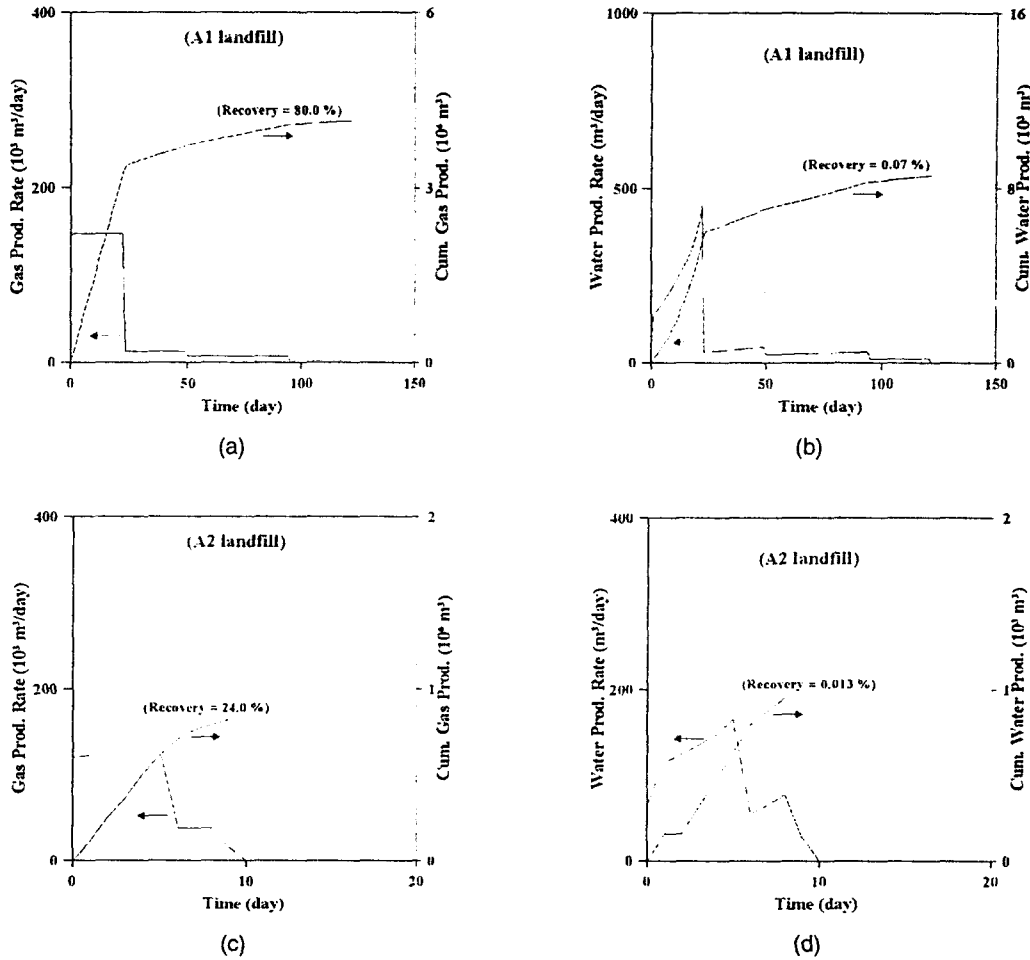


Fig. 4. Landfill gas and water production, and it's recovery in case 2.

지층내 압력강하를 억제할 수 있다. 각 사례에 대한 가스 포집정의 폐정시기는 Table 7, 8, 9에 나타나 있다. Table 7의 사례 2의 A1매립지에 대해서는 122일이 지나면 모든 포집정은 폐정되며 A2 매립지는 10일이 지나면 모든 포집정이 폐정된다. 기본사례에 비해 폐정한계유량을 반으로 감소시킴으로써 폐정 전 생산기간은 그 만큼 지연됨을 알 수 있다. Table 8의 사례 3에서는 포집정 수를 원래에 비해 반으로 감소시킨 결과로서 사례 1에 비

Table 9. Shut in time and it's number of wells of case 4

No. 1 landfill		No. 2 landfill	
Shut in time	Number of wells	Shut in time	Number of wells
50 days	28	9 days	16
—	—	10~19 days	5
50~227 days	1	19~49 days	3
Total	29	Total	24

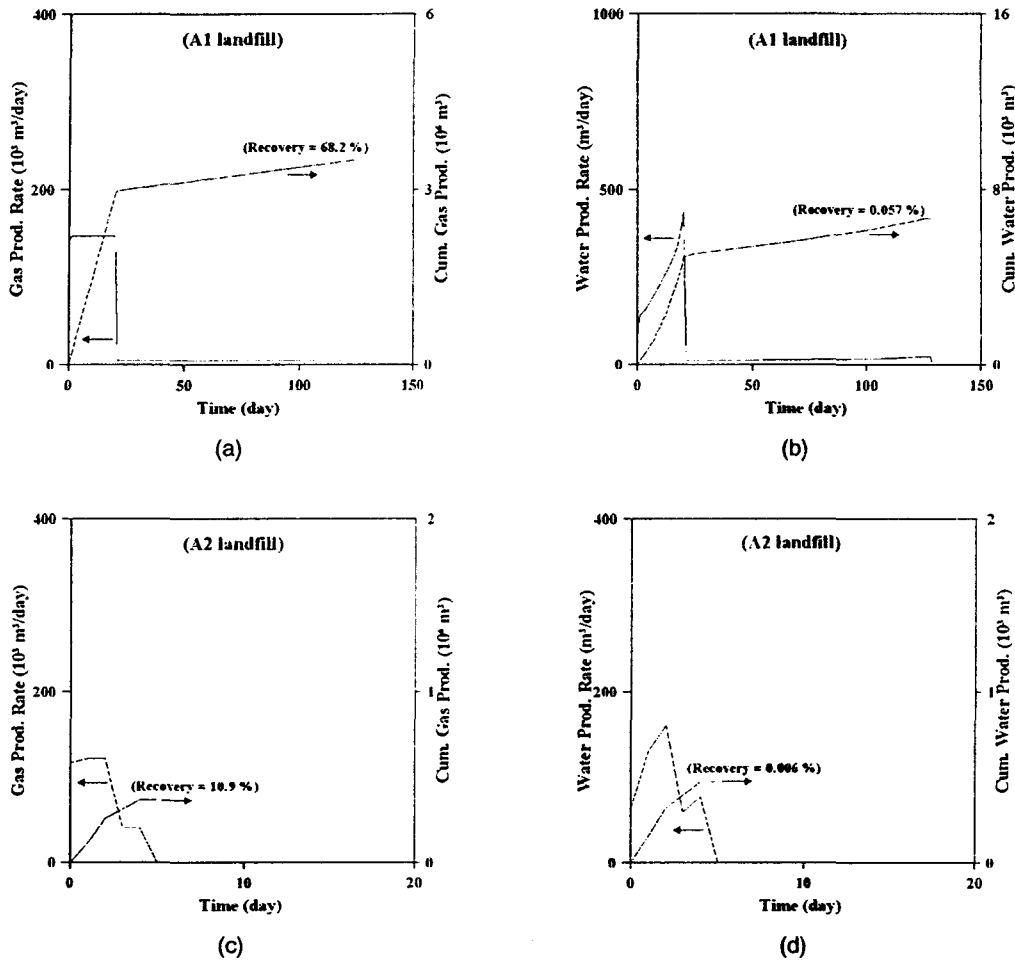


Fig. 5. Landfill gas and water production, and it's recovery in case 3.

해 가스 생산기간이 연장됨을 알 수 있다. Table 9의 사례 4인 경우는 폐정한계유량과 포집정 수를 각각 반으로 줄인 결과 생산기간은 사례 1에 비해 매우 연장되고 있으며 포집정 수의 감소가 매립지 층의 압력강하 억제에 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. Table 10, 11, 12의 사례 2, 3, 4는 초기매장량에 대한 가스 및 침출수에 대한 생산량을 보여 주고 있다. A1매립지에 대해 폐정시기까지 가스의 총 생산량은 사례 2, 3, 4가 각각 $4.13 \times 10^6 \text{ m}^3$,

$3.52 \times 10^6 \text{ m}^3$, $4.07 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이고 이에 따라 회수율은 80%, 68.2%, 78.9%로서 사례 2의 경우에 매립가스 회수가 양호하며, A2매립지에 대해서는 각각 $0.82 \times 10^6 \text{ m}^3$, $0.37 \times 10^6 \text{ m}^3$, $0.95 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이고 회수율은 각각 24.0%, 10.9%, 27.9%로서 사례 4의 경우에 매립가스 회수율이 높게 나타났다. 이것은 A1매립지에 대해서는 폐정한계유량을 감소시켜야 높은 회수율을 보이며, A2매립지에 대해서는 폐정한계유량뿐만 아니라 포집정 수 또한 감소시켜

Table 10. Landfill gas and water production until shut in time of case 2

Case 2	No. 1 landfill			No. 2 landfill			Total		
	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)
Landfill gas	4.13	5.16	80.0	0.82	3.41	24.0	4.95	8.57	57.8
Water	0.00853	11.722	0.07	0.00098	7.755	0.013	0.00951	19.477	0.049

Table 11. Landfill gas and water production until shut in time of case 3

Case 3	No. 1 landfill			No. 2 landfill			Total		
	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)
Landfill gas	3.52	5.16	68.2	0.37	3.41	10.9	3.89	8.57	45.4
Water	0.00667	11.722	0.06	0.00045	7.755	0.006	0.00712	19.477	0.037

Table 12. Landfill gas and water production until shut in time of case 4

Case 4	No. 1 landfill			No. 2 landfill			Total		
	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)
Landfill gas	4.07	5.16	78.9	0.95	3.41	27.9	5.02	8.57	58.6
Water	0.00784	11.722	0.067	0.00136	7.755	0.018	0.0092	19.477	0.047

야 회수율을 높일 수 있음을 암시한다. (Fig. 4, 5, 6참조)

3.3.3 사례 5

이전 사례 1, 2, 3, 4에서 매립가스의 생산성을 분석해 본 결과 대체적으로 폐정한계가스유량과 포집정의 수를 감소시켰을 때, 초기매립가스매장량에 대한 회수율이 증가함을 알았다. 이러한 이유로 A1, A2매립지에 각각 포집정을 9개로 매립가스를 생산하고 또한 폐정한계가스유량을 원래의 1/4 즉 1,275 m³/(day · well)로 감소시킨 경우를 고려해

보았다. Table 13의 사례 5에서 폐정시기를 살펴 보면 A1매립지는 340일간 모든 포집정에서 매립가스의 생산이 가능하고 A2매립지는 생산 후 74일간은 4개의 포집정이 폐정된 후 202일이 지나면 5개의 포집정이 폐정됨을 알 수 있다. 이와 같이 사례 5인 경우에 폐정시기가 연장되는 것은 매립지층내의 압력강하가 이전 사례에 비해 크지 않아 이때의 압력이 매립지층내에서 가스와 침출수를 원활하게 유동할 수 있도록 도와준다. 매립가스와 물의 총 생산량과 회수율은 Table 14에서와 같으며 A2매립지에 대한 매립가스의 생산량이 두드러지게 향

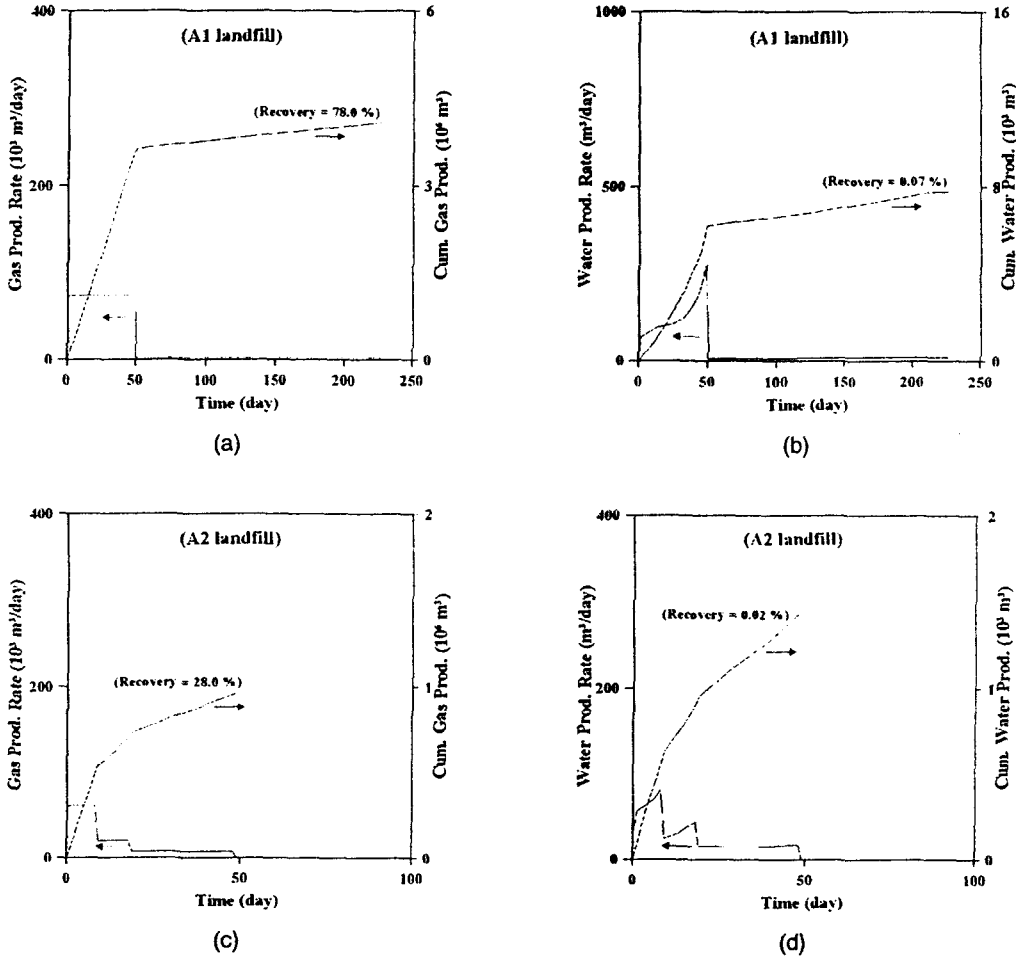


Fig. 6. Landfill gas and water production, and it's recovery in case 4.

Table 13. Shut in time and it's number of wells of case 5

A1 landfill		A2 landfill	
Shut in time	Number of wells	Shut in time	Number of wells
—	—	74 days	4
0~340 days	9	74~202 days	5
Total	9	Total	9

상되었음을 알 수 있다. Fig. 7의 이러한 결과에 따라 폐정한계가스유량과 포집정의 수를 감소시켰을 때 매립가스의 회수율은 증진될 수 있음을 보여 준다.

3.3.4 사례 6

이전 사례에서는 폐정가스한계유량을 정하여 가스와 침출수의 생산성에 대해 검토한 것이며, 이 사례는 폐정가스한계유량을 정하지 않고 포집정에

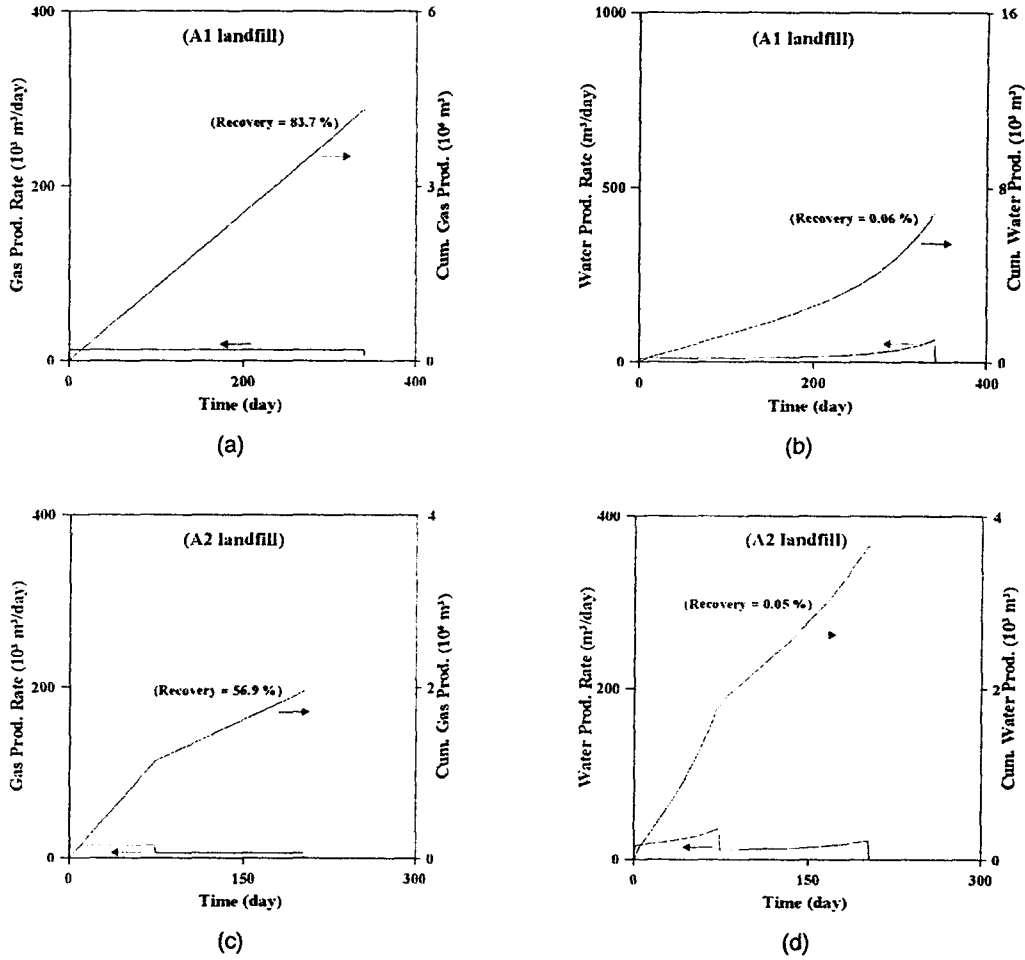


Fig. 7. Landfill gas and water production, and its recovery in case 5.

Table 14. Landfill gas and water production until shut in time of case 5

Case 5	A1 landfill			A2 landfill			Total		
	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)
Landfill gas	4.32	5.16	83.7	1.94	3.41	56.9	6.26	8.57	58.6
Water	0.00688	11.722	0.059	0.00363	7.755	0.047	0.01051	19.477	0.05

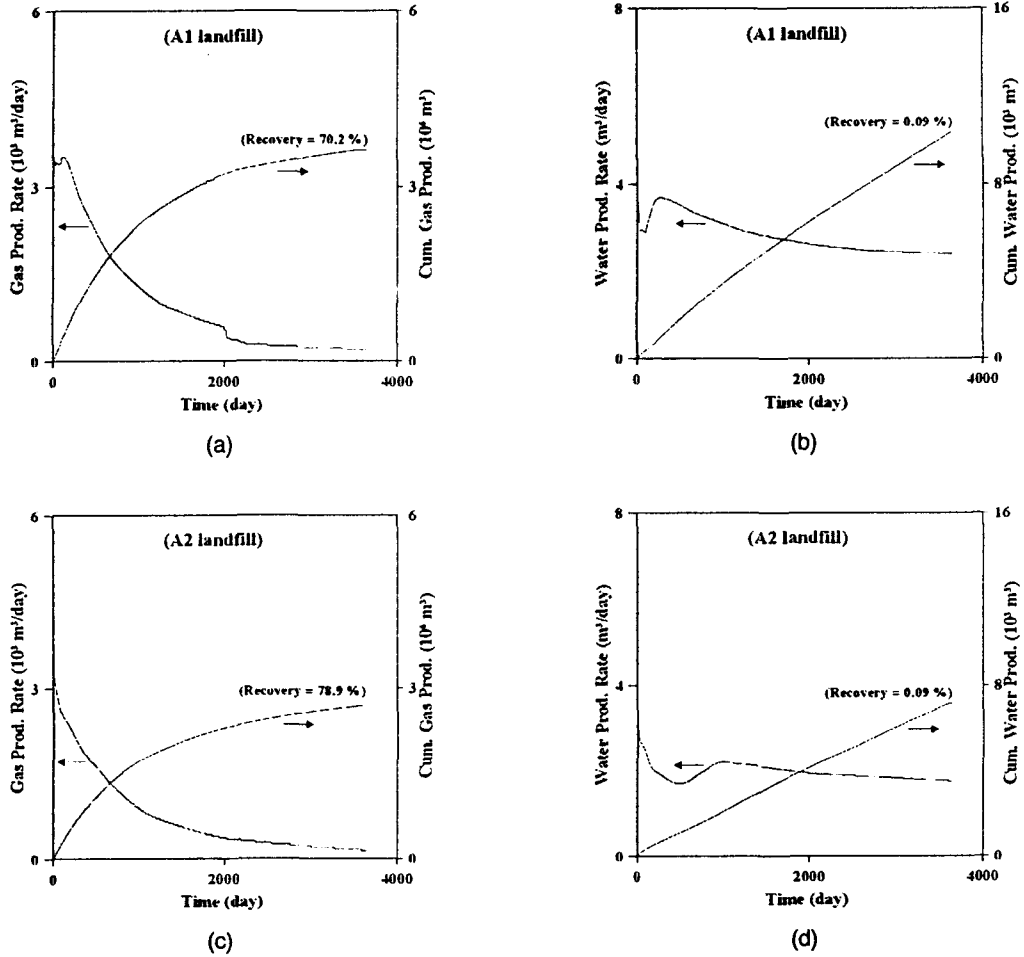


Fig. 8. Landfill gas and water production, and it's recovery in case 6.

서 가스의 유량이 추출될 때까지, 즉 매립지층내의 압력이 포집정내 압력과 거의 같아질 때까지 가스를 포집하는 것으로 설정하였다. 이것은 포집정 1개에서 추출하는 가스의 경제적인 유량뿐만 아니라 그 후 경제적인 가스의 유량이 추출되지 않더라도 매립지층내에 포화되어 있는 가스를 최대한 추출하여 매립지층의 안정화 측면도 고려한 것이다. 사례 6은 폐정기간이 없고 gas와 물의 추출은 거의 1년이 경과하면 미량만이 일정히 추출되어 이 기간까

지의 생산량을 Table 15에서 살펴보면, A1매립지층내에서 가스의 총 생산량은 $3.62 \times 10^6 \text{m}^3$ 로서 이때의 가스회수율은 약 70%로서 사례 5에 비해 저하되어 있다. 이것은 A1매립지의 매립가스생산은 포집정 수를 줄이고 어느정도 폐정가스한계유량을 설정해야만 매립가스의 회수율을 높힐 수 있음을 알 수 있으며, A2매립지에 대해서는 가스의 총생산량은 $2.69 \times 10^6 \text{m}^3$ 로서 가스회수율은 약 79%이며 사례 5의 가스회수율 57%에 비해 매우 높은 회

Table 15. Landfill gas and water production of case 6

Case 6	A1 landfill			A2 landfill			Total		
	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)	Cum. production (10 ⁶ m ³)	In-situ reserve (10 ⁶ m ³)	Recov. (%)
Landfill gas	3.62	5.16	70.2	2.69	3.41	78.9	6.31	8.57	73.6
Water	0.01033	11.722	0.088	0.00715	7.755	0.092	0.01748	19.477	0.09

수율을 나타낸다. 이것은 A2 매립지층내 매립가스의 회수율을 증대시키기 위해서는 포집정 수를 줄여야할 뿐만 아니라 폐정가스한계유량을 매우 낮추거나 거의 이러한 유량을 설정하지 않아야 매립지층내에 잔존하는 가스를 최대로 추출할 수 있음을 암시한다. Fig. 8은 매립지내 가스와 물을 생산한 시기에 따라 가스와 물의 유량과 총 생산량을 나타낸 것이다. A1, A2매립지 모두는 2000일이 경과한 후 거의 미량으로 일정히 추출되고 약 1년 이후 그 양은 극히 적어짐을 알 수 있다.

4. 토의 및 결론

가스침출수 전산유동 모사시험 결과분석해 대해 살펴보면, 사례분석을 통해서 매립가스와 침출수의 생산유량과 총 생산량에 대해 분석한 결과 매립지층내에 부존한 매립가스를 최대로 추출해 낼 수 있는 적절한 가스포집시스템환경을 어느정도 도출해낼 수 있고 사례분석을 통해 이루어 졌다. 가스침출수 전산유동모사시험을 위해 입력된 정보는 2개의 포집정에서 획득된 자료로만 이루어져 A매립지층의 대표적인 물성으로 보기는 어렵지만 만일 매립지층이 계획적이고 위생매립되었다면 매립지층의 물성은 균일한 물성특성을 나타낼 수 있다. 그러나 유기물로부터 분해된 쓰레기물질의 물성중 유체의 유동에는 어느정도 대표적 특성이 나타날 수 있다. Fig. 9는 사례분석별로 가스의 초기 매장

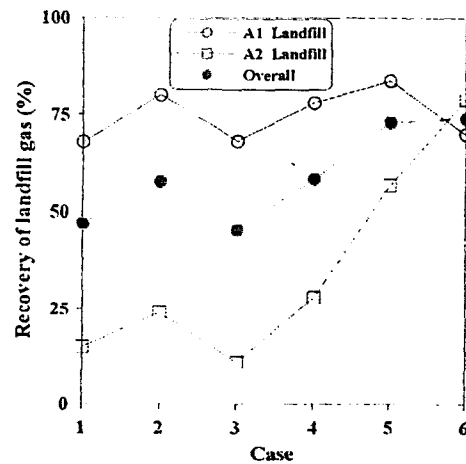


Fig. 9. Recovery of landfill gas by cases.

량에 대한 매립가스의 회수율을 나타낸 그림이다. 사례 1과 3은 거의 유사하게 매립가스의 회수율이 저하되어 있고, 사례 5에서 매우 높은 매립가스의 회수율이 상승되었다. 특히 A1, A2매립지의 포집정을 모두 사용하고 폐정가스한계유량을 설정하지 않은 사례 6의 경우에 A1매립지의 가스회수율은 약간 저하되었지만 A2매립지의 가스회수율은 매우 상승하였다. 이것은 A1, A2매립지층내에 가스와 침출수는 상호 유동하지 않는 매립지층의 환경을 감안하여 A1매립지층의 포집정 시스템은 사례 5로 A2매립지층의 포집정 시스템은 사례 6으로 매립가스를 포집한다면 그 효율성은 매우 높을 것으로 사

료된다. 그러나 A1매립지층의 기존에 이미 시공된 포집정으로부터 가스를 포집한다면 경제적인 측면에 비해 매립지층의 안정화 측면에서 가스포집 1년 이후라도 지속적인 매립가스의 추출을 통해 가스 회수율을 높일 수 있으므로 사례 6을 따를 수도 있다. 이상의 결론사항을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 쓰레기 매립층의 상대유체투과도를 측정함으로써 향후 침출수의 효과적인 제거와 가스 포집량을 예측할 수 있게 되었다.
- (2) 쓰레기 매립층의 상대유체투과도는 매립쓰레기의 종류가 다양하고 불균질함에도 불구하고 일정한 경향을 나타내고 있으며 층별 구성물질에 따라 변화된 형태를 보이고 있다.
- (3) 절대투과도는 200~3,000md로 다양한 분포를 나타내며 수포화율은 하부로 내려갈수록 급격히 상승하고 공극율은 매립쓰레기의 종류에 따라 38~53%를 나타내고 있다.
- (4) 상대유체투과도 곡선에서 교차점에서의 수포화율이 모두 75% 이상이며 S_{nr} 이 60% 이상이고 S_{gc} 가 20% 이하로 강력한 수습윤 특성을 나타내며 또한 가스의 유동이 침출수의 유동보다 용이하여 짧은 가스포화율 구간에 국한됨을 알 수 있다.
- (5) A1와 A2 매립지에 대해 기본사례의 매립가스 회수율 각각 68%, 15%에서 사례 5의 84%, 57%까지 매립가스 회수율을 증진시킬 수 있었다.

(6) A1 매립지의 포집정 시스템은 사례 5가, A2 매립지는 사례 6이 매립가스의 회수증진에 기여할 것으로 예견된다.

(7) 매립지층의 크기가 클 때, 매립가스의 생산성 제고를 위해서는 적절한 폐정가스의 한계유량 설정이 요구되며, 그 크기가 상대적으로 작으면 한계유량을 낮추거나 무시해야 할 필요가 있다.

참고 문헌

1. 허대기, 김현태, 이원석, 석유저류층 모델개발 연구, KR-93(T)-25, 과학기술처 연구보고서, pp.49~59(1993).
2. Poston, S.W. et al. "The Effect of Temperature on Irreducible Water Saturation and Relative Permeability of Unconsolidated Sands", *SPEJ*, pp.171~180(1970).
3. William G. Anderson "Wettability Literature Survey-Part 5 : The Effects of Wettability on Relative Permeability" *JPT*, pp.1453~1468(1987).
4. 허대기, 김인기, 김현태, 김세준 "쓰레기 매립지에서의 가스와 물의 상대유체투과특성", 1999년도 추계총회 및 제73회 학술발표회, 한국자원공학회, 한국자원연구소, 대전, pp.193~197(1999).
5. K. Aziz and A. Settari, *Petroleum Reservoir Simulation*, Applied Science Publishers Ltd, London(1979).