

## 지수조건에 따른 Z형 강널말뚝 연결부의 투수특성

### The Permeability Characteristic of Z-Type Sheet Pile Joints under Water Sealing Conditions

정하익\* · 이용수\*\* · 홍승서\*\*\*

Chung, Ha-Ik · Lee, Yong-Soo · Hong, Seung-Seo

#### Abstract

In general steel sheet piles are used in the containment system, which are vertical barrier systems for waste disposal and landfill purposes, and roads in excavation for temporary structure. This paper presents case study of the use of an interlocking sheet pile for water and containment. Cut-off Z-type sheet pile joints are investigated to determine their permeability from the field test. Four different joint sealing materials are used in field test. The results showed joint permeability is significant time-dependent and joint-dependent. These are explored and conclusions on permeability characteristics of different sealants are noted. A case study gives a design example as well as suggestion on permeability and water tightness can be implemented in using the sheet pile barrier in civil and environment works. From the test results, the effective sealing programs of sheet pile interlocks are suggested.

**Keywords** : Sheet pile, Landfill, Permeability, Interlock

#### 요 지

강널말뚝(sheet pile)은 지하수의 침투저하 및 누수방지를 위하여 토목공사에서 폭넓게 이용되고 있으며, 특히 최근에는 강널말뚝의 지수효과로 인하여 오염된 지역의 지하수 흐름 또는 침출수의 차폐에도 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 Z형 강널말뚝을 오염지역의 오염물질 차폐방법으로 적용할 경우에 대하여 살펴보았다. 이를 위하여 지수재의 도포조건과 강널말뚝의 시공조건 그리고 지반조건에 따른 Z형 강널말뚝의 연결부에 대한 실내 및 현장실험을 실시하였다.

실험결과, Z형 강널말뚝에 대한 모형실험을 통하여 지반조건에 따른 강널말뚝의 팽창지수재 도포방법, 강널말뚝 설치방법, 지반조건, 압력수두에 따른 투수특성을 파악하였으며, Z형 강널말뚝 연결부분의 효과적인 지수방안을 강구하였다. Z형 강널말뚝의 장기적인 지수효과는 강널말뚝 연결부의 자연적인 막힘 현상에 의하여 얻을 수 있으며 단기적인 지수효과는 지수재 도포에 의하여 효과적으로 얻을 수 있다. 본 실험결과로 인하여 Z형 강널말뚝이 오염지역의 차폐에 효과적으로 적용될 수 있는 것으로 나타났다.

**주요어** : 강널말뚝, 폐기물매립장, 투수계수, 차폐

\* 비회원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원

# 1. 서론

강널말뚝은 지하수의 침투저하 및 누수방지를 위하여 일반 토목분야에서는 물막이공사, 차수공사 등으로 사용되고 있으며, 환경토목분야에서 위생매립장, 비위생매립장, 오염지반의 차수 및 차폐 등으로 이용되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 Z형 강널말뚝의 현장실험을 통하여 폐기물 매립지의 차폐 및 차수 기능을 검토하였다. 현장실험은 지수재의 종류, 지수재의 종류에 따른 Z형 강널말뚝의 연결부 차수성을 분석하였다.

## 2. 현장실험

### 2.1 사용재료

본 현장실험에 사용한 Z형 강널말뚝은 두께 9.0mm, 높이가 359.5mm, 폭 699mm인 것을 사용하였으며, 강널말뚝의 연결부에 사용하고 있는 지수재는 국내산으로 우레탄계열과 고무계열을 사용하였다.

Z형 강널말뚝의 연결부에 사용되는 지수재는 물이 지수재에 접촉하게 되면 일정 부피이상으로 팽창하여 강널말뚝의 취약부분인 연결부를 차단하게 된다.

그림 1은 지수재의 팽창원리를 나타내고 있다. 지수재의 팽창원리는 지수재의 미세분자 속에 물분자가 흡수되어 전체적으로 흡수된 물분자만큼 체적이 팽창하는 원리이다.

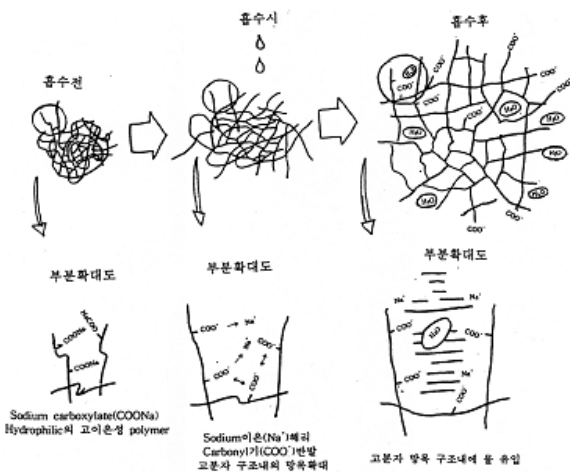


그림 1. 지수재의 팽창원리

본 연구에서 사용한 지수재의 팽창성을 분석하기 위하여 실내시험을 실시하였다. 지수재의 팽창성 실험은 지수재를 도포한 시편을 증류수에 담긴 채 실험시편의 지수재 팽창성을 조사하였다. 그 결과, 우레탄계열 지수재의 팽창량은 374%, 고무계열 지수재의 팽창량은 1,174%로, 고무계열의 지수재가 우레탄계열 지수재보다 3배정도 팽창성이 좋은 것으로 나타났다.

지수재의 팽창실험에서 부피 변화율은 식 (1)을 이용하여 지수재에 대한 무게와 체적팽창율을 산정하였으며, 그림 1과 그림 2에 나타내었다.

$$\Delta V = \frac{(W_3 - W_4) - (W_1 - W_2)}{(W_1 - W_2)} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $\Delta V$ : 체적팽창율(%)

$W_1$ : 담그기 전의 공기 중의 무게(g)

$W_2$ : 담그기 후의 수중의 무게(g)

$W_3$ : 담근 후의 공기 중의 무게(g)

$W_4$ : 담근 후의 수중의 무게(g)

그림 2에 의하면, 고무계열의 지수재가 96시간 후 최종 팽창율이 1,174%이고, 우레탄 계열의 지수재는 최종팽창율이 374%로 고무계열의 지수재가 팽창율이 우수한 것으로 나타났다. 각 지수재에 따른 특성을 살펴보면, 고무계열 지수재의 경우, 시간에 따라 체적팽창율이 24시간 이전까지는 급속하게 팽창하다 24시간 이후 완만하게 수렴되는 양상을 보이며, 우레탄 계열의 지수재는 12시간 이전까지 체적팽창이 크게 발생하였으나 그 후로는 완만하게 팽창하였다. 따라서, 두 지수재의 팽창실험 결과, 고무계열의 지수재가 우레탄 계열의 지수재보다 전체 체적팽창이 3배정도 크게 발생하였음을 알 수 있다.

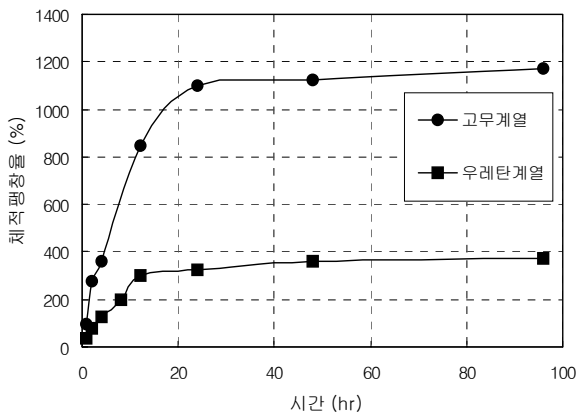


그림 2. 지수재의 경과시간과 체적팽창율과의 관계

## 2.2 토질특성

현장실험부지의 지층은 지표면 상부로부터 매립토층, 퇴적층, 풍화대 및 화강암층으로 구분되어 있다. 본 현장부지 주변의 특성은 남서쪽으로 전답이 있으며, 북쪽으로는 작은 시내가 흐르며 이 수계는 서북방향으로 흐르는 한강으로 유입되고 있다. 현장 지반의 토질 특성을 파악하기 위하여 현장부지의 시료를 채취하여 기본물성 시험을 수행하였다. 건조된 시료를 살펴보면 표토의 경우, 황갈색의 화강토에 약간의 퇴적토가 섞인 상태이고, 화강잔류토는 표토와 거의 비슷한 상태이나 자갈이 표토층보다 상대적으로 많이 혼입되어 있다. 사질토에서는 퇴적토와 화강토 성분이 약간씩 혼합되었다.

표 1. 원지반 및 뒤채움재의 기본물성

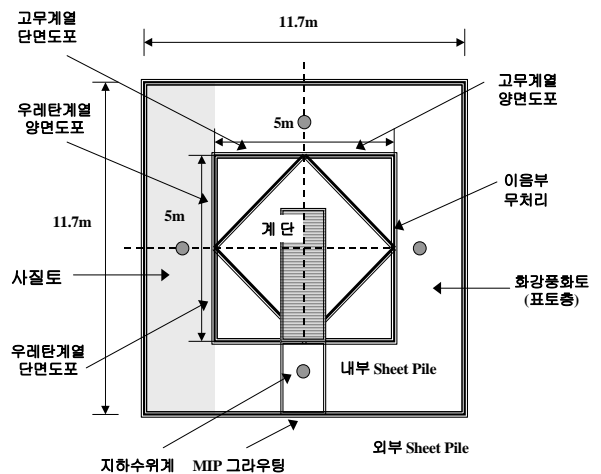
시험 내용	원지반			뒤채움재		
	표토	퇴적토	화강 잔류토	사질토	화강 혼합토	
비중 시험(GS)	2.66	2.69	2.63	2.67	2.74	
입도 시험	D10 (mm)	0.31	0.002	0.14	0.23	0.3
	D30 (mm)	0.51	0.081	0.4	0.39	0.61
	D60 (mm)	1.9	0.38	2.2	0.69	1.85
	균등계수 (Cu)	6.15	19	15.7	3.0	6.17
	곡률계수 (Cg)	0.42	8.63	0.52	0.96	0.29
	200번체 통과량(%)	3.1	8	0	3	0
	흙의 분류	SM	CL-ML	SM	SP	SM

표 1은 실험부지의 토질에 대한 기본특성을 정리한 것이다. 먼저, 입도분석 결과, 시료에 대한 흙의 분류는 표토와 화강잔류토는 SM계열이고, 사질토는 SP, 퇴적토는 CL-ML로 나타났다. 각 시료에 대한 비중실험결과, 원지반의 표토는 2.66, 퇴적토는 2.69, 화강잔류토는 2.63이며 강널말뚝의 뒤채움재의 사질토와 화강혼합토의 비중은 각각 2.67과 2.74로 나타났다.

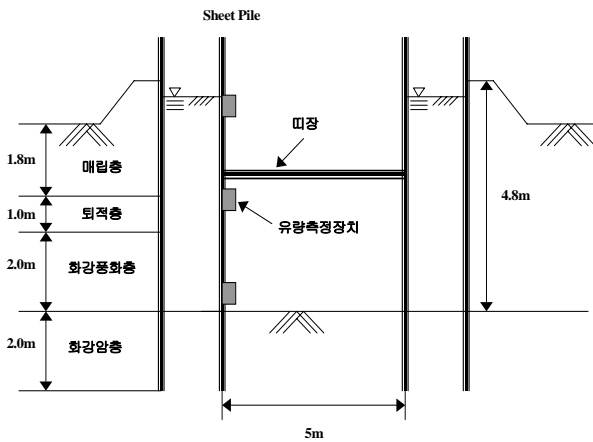
## 2.3 현장실험조건

강널말뚝의 차수특성을 살펴보기 위하여 그림 3과 같이 강널말뚝을 설치하였다. 강널말뚝 시공은 그림 3(a)와 같이 외부와 내부에 Z형 강널말뚝을 설치하였다. 외측의 강널말뚝 설치규모는 가로×세로가 11.7m×11.7m이고, 강널말뚝 설치심도는 약 평균 6.8m까지로 하였다. 외부의 강널말뚝은 인위적으로 외부와 내부사이에 물을 공급할 때 공급되는 물이 유출되지 못하도록 하는 기능과 강널말뚝사이의 토층을 인위적으로 바꿀 수 있도록 하였다. 내측의 강널말뚝 설치규모는 가로×세로가 5m×5m이고, 강널말뚝 설치심도는 약 평균 6.0m까지로 하였다. 내부의 강널말뚝은 강널말뚝 내부 토사굴착에 따른 토압의 지지 목적과 외부 지하수의 유입을 측정하는 공간을 제공하는 역할을 하게 된다.

그림 3와 같이 Z형 강널말뚝 연결부의 차수특성을 파악하기 위하여 내측 강널말뚝의 내부벽체에 유량 측정장치를 설치하였다. 유량측정장치는 강널말뚝 벽체에 지표로부터 1m 간격으로 심도 5m까지 설치하였다.



(a) 평면도



(b) 단면도  
그림 3. 현장 시험도

강널말뚝 연결부 시공조건은 표 2와 같이 강널말뚝 연결부의 처리조건을 무처리구간, 고무계열 지수재를 강널말뚝 연결부의 한쪽면과 양쪽면에 도포한 조건, 우레탄계열 지수재를 강널말뚝 연결부의 한쪽면과 양쪽면을 도포한 조건, 강널말뚝 항타 후에 강널말뚝 연결부를 MIP 그라우팅으로 처리한 조건을 선정하였다.

또한, 강널말뚝의 배면토는 그림 3과 같이 강널말뚝 설치 완료된 후, 외부 및 내부의 강널말뚝 사이에 원토를 굴착하여 그 공간에 화강토와 사질토를 물과 충분히 섞은 후 다짐없이 포설하여 물의 유동성을 좋게 하였다. 사질토 부분은 우레탄계열 지수재를 사용하였다.

표 2. 현장 시험조건

강널말뚝 연결부의 지수조건			
단순연결 방식	지수조건 무도입	무처리	
연결부 지수조건 도입방식	지수재 도포	고무 계열	단면도포
			양면도포
	우레탄 계열	단면도포	
		양면도포	
	그라우팅	MIP 그라우팅	

## 2.4 시험방법

강널말뚝의 연결부의 투수계수를 측정하기 위하여 다음

과 같은 절차로 실험을 실시하였다. 먼저, 강널말뚝 접합부에 유출되는 유출수를 받을 수 있는 측정장치인 몰드를 강널말뚝의 내부 벽체에 위치별로 설치하였다. 유량측정 몰드는 규격 60×300mm의 강철틀로 강널말뚝 내부의 연결부에 용접하였고, 강널말뚝과 몰드 사이에 물이 새는 것을 막기 위하여 이중으로 실리콘을 주입하였다.

또한 사각형의 아크릴통을 강철틀에 부착하여 강널말뚝의 이음부에서 물이 들어오는 것을 짐수할 수 있도록 하였으며 아크릴통에 채워진 물은 유량측정장치로 유입되어 유량을 측정할 수 있게 하였다. 다음에 내부 강널말뚝과 외부 강널말뚝 사이의 채움재에 물을 지속적으로 공급하여 흙을 충분히 포화시킨 후 일정시간이 경과한 후에 강널말뚝의 내부 벽체에 설치된 몰드로 유입되는 유량을 측정하여 이로부터 투수계수를 도출하였다. 그림 4는 유량측정장치의 개략도를 도시한 것이다.

현장시험은 강널말뚝의 이음부의 지수조건에 따라 무처리 구간, 고무계열 및 우레탄계열의 지수재 단면/양면 도포, MIP 그라우팅으로 처리한 부분으로 나누어 실시하였다. 지수조건에서 고무 및 우레탄 계열은 강널말뚝의 연결부에 지수재를 바르고 이 지수재가 완전히 건조된 후 강널말뚝을 연결시공한 조건이며, MIP 그라우팅은 강널말뚝의 연결부에 1열로 그라우팅을 실시한 조건이다. 이러한 조건에서 시험결과를 토대로 시간에 따른 투수계수를 비교 분석하였다.

강널말뚝의 투수계수는 유량측정장치에서 측정된 누수량(Q)으로부터 투수계수를 산정하였으며, Darcy의 법칙에 의하여 다음과 같이 나타내었다.

$$Q = k \times i \times A \times t \quad (2)$$

$$Q = k \times \frac{\Delta h}{l} \times A \times t \quad (3)$$

여기서, Q : 현장 누수량(ml/sec)

k : 투수계수(cm/sec)

t : 시간(sec)

Δh : 수두차(cm)

l : 강널말뚝 벽부위 환산길이(l=30cm)

A : 강널말뚝의 투수 유효단면적(cm<sup>2</sup>)

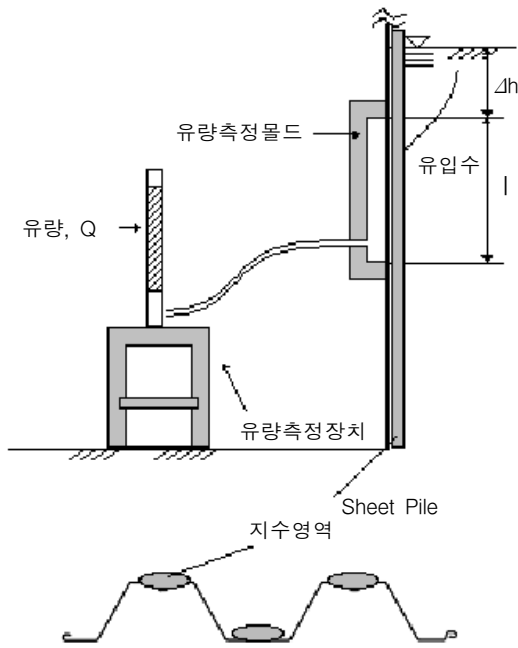


그림 4. 유량 측정 장치 개략도

### 3. 실험 결과 및 분석

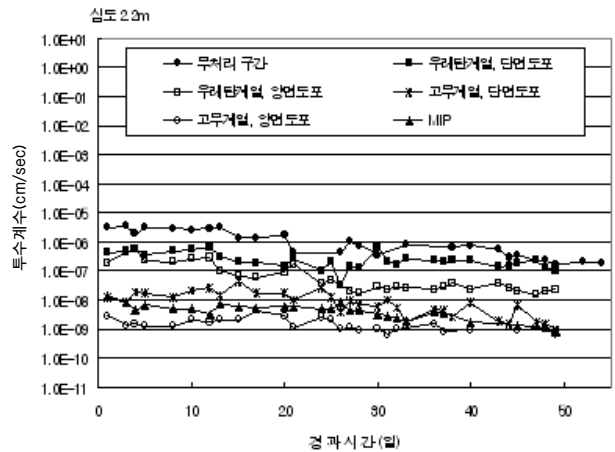
#### 3.1 지수조건에 따른 투수특성

강널말뚝 연결부의 지수조건에 따른 강널말뚝의 차수특성을 살펴보았다. 그림 5는 지수조건에 따른 투수계수를 나타낸 것으로 그림 5(a)는 심도 2.2m 지점에서 투수계수의 변화를 나타내고 있으며, 그림 5(b)는 심도 4.2m 지점에서 투수계수의 변화를 나타내고 있다.

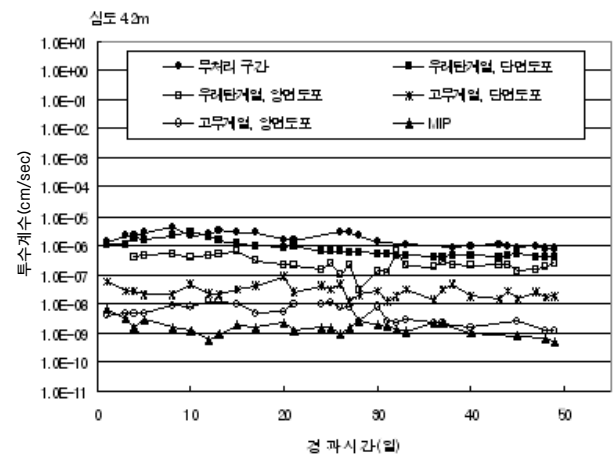
그림에서 보는 바와 같이 강널말뚝의 연결부에 지수처리를 하지 않은 무처리 조건의 경우, 투수계수의 범위는  $3.26 \times 10^{-6} \text{cm/sec} \sim 1.92 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 로 나타났다. 그리고 강널말뚝의 연결부에 지수재를 도포한 경우, 투수계수 범위는  $1.84 \times 10^{-6} \text{cm/sec} \sim 6.24 \times 10^{-10} \text{cm/sec}$ 로 나타났다. 또한 강널말뚝의 연결부에 MIP 그라우팅을 실시한 조건의 투수계수 범위는  $1.36 \times 10^{-8} \text{cm/sec} \sim 4.58 \times 10^{-10} \text{cm/sec}$ 로 나타났다.

따라서, 지수조건별로 투수계수를 살펴보면, 무처리구간 > 우레탄계열 지수재 > 고무계열 지수재 > MIP 그라우팅 순으로 나타났다. 또한 시간경과에 따른 투수계수의 변화를 살펴보면, 시간이 경과함에 따라 투수계수가 감소하는 경향을 나타내고 있고, 시간경과에 따라 투수계수가 점차 안정

화되는 것을 알 수 있다. 이는 강널말뚝의 차수성이 시간경과에 따라 차수효과가 증진되는 것으로 시간경과에 따른 투수계수의 감소원인은 지수재의 팽창과 세립분 토사가 강널말뚝의 연결부위에 막히는 막힘현상(clogging effect)에 의한 것으로 판단된다.



(a) 심도 2.2m



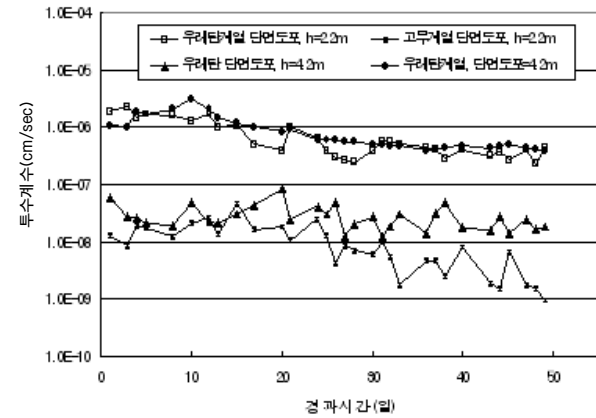
(b) 심도 4.2m

그림 5. 지수조건에 따른 투수계수의 변화

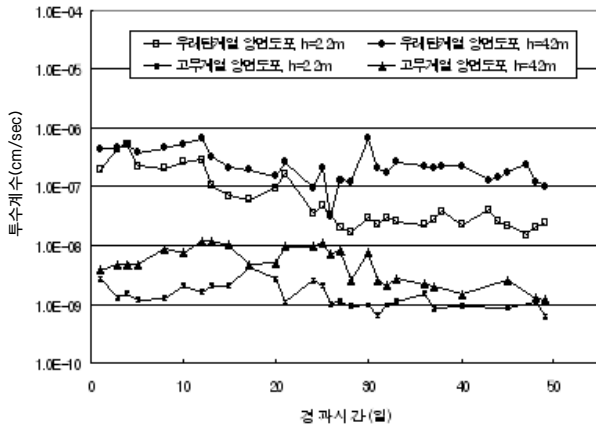
#### 3.2 지수재 도포조건에 따른 투수특성

그림 6은 강널말뚝 연결부의 지수재 도포조건에 따른 투수계수의 변화를 나타내고 있다. 그림 4에 의하면 강널말뚝의 연결부에 실시하는 지수재의 도포조건이 단면도포 조건인 경우 투수계수의 범위는  $1.84 \times 10^{-6} \text{cm/sec} \sim 6.24 \times 10^{-10} \text{cm/sec}$ 로 각각 나타났다. 그리고 지수재의 도포조건이 양면도포 조건인 경우 투수계수의 범위는  $1.93 \times$

$10^{-7}$  cm/sec ~  $6.298 \times 10^{-10}$  cm/sec로 각각 나타났다.



(a) 단면도포 조건



(b) 양면도포 조건

그림 6. 지수재의 도포조건에 따른 차수특성

따라서 단면도포 조건인 경우보다 양면도포 조건의 경우가 투수계수가 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 양면도포 조건의 경우가 단면도포 조건의 경우에 비하여 지수재 도포율이 커서 강널말뚝 연결부의 미세 간극을 더욱 조밀하게 메웠기 때문이다. 따라서, 지수재의 도포조건에 따른 차수특성을 살펴보면, 단면도포 조건의 경우, 우레탄 계열의 지수재가 고무계열보다 투수계수가 크게 나타났고, 양면도포조건에서도 고무계열의 지수재가 우레탄 계열보다 투수계수에서 우수한 것으로 나타났다.

### 3.3 깊이에 따른 투수특성

그림 5와 그림 6에서 깊이에 따른 투수특성을 살펴보면, 심도 2.2m의 투수계수 범위는  $3.26 \times 10^{-6} \sim 4.85 \times 10^{-10}$

cm/sec이고, 심도 4.2m구간에서 투수계수의 범위는  $1.28 \times 10^{-6} \sim 8.39 \times 10^{-10}$  cm/sec로 나타났다. 따라서 깊이에 따른 투수계수는 심도 4.2m의 투수계수가 심도 2.2m의 투수계수보다 크게 나타났다. 이는 깊은 지점이 낮은 지점보다 지하수위가 높아 강널말뚝의 연결부에 작용하는 수압이 크기 때문으로 판단된다.

### 3.4 시간경과에 따른 투수특성

시간경과에 따른 강널말뚝의 투수특성을 살펴보았다. 앞에 도시된 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 시간이 경과함에 따라 강널말뚝의 연결부의 투수계수의 크기가 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 현장실험에서는 측정기간이 50일로 실제로 강널말뚝이 현장에 설치되는 기간을 고려한다면 그다지 긴 기간은 아니지만, 50일 기간 중에도 투수계수 값이 일정하게 수렴되지 않고 점차적으로 미소하게 감소하는 경향이 보이고 있어 50일 이상의 장기간에 대해서는 투수계수가 더욱 감소될 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

따라서, 시간경과에 따른 투수계수의 크기를 살펴보면, 초기 투수계수의 범위는  $3.26 \times 10^{-6}$  cm/sec ~  $6.18 \times 10^{-9}$  cm/sec이고, 50일 경과후 최종 투수계수의 범위는  $1.92 \times 10^{-7}$  cm/sec ~  $8.39 \times 10^{-10}$  cm/sec이며, 초기 투수계수에 대한 최종 투수계수의 감소량 범위는 94.1% ~ 86.4%로 나타났다. 이로부터 강널말뚝의 차수특성은 시간경과에 따라 점차 좋아진다는 것을 알 수 있으며, 시간경과에 따라 차수효과가 증진됨을 알 수 있다. 여기에서 시간경과에 따른 투수계수의 감소원인은 시간경과에 따른 지수재의 팽창량 증가와 세립분 및 미분의 토사 또는 이물질이 강널말뚝의 연결부위에 채워지는 막힘현상(clogging effect)에 의한 것으로 판단된다.

## 4. 결론

- (1) 강널말뚝은 소정의 차수기능을 가지고 있기 때문에 위생, 비위생 및 사후종료 매립지뿐만 아니라 오염지반에서 침출수 및 오염물질의 유출억제 및 누출방지에 적용성이 크다고 볼 수 있다.
- (2) 강널말뚝 연결부에 도포되는 지수재에 대한 팽창시험 결과, 우레탄계열 지수재의 팽창량은 370%로 나타났다

고, 고무계열 지수재의 팽창량은 1,170%로 나타났다. 그리고 팽창시간은 고무계열이 긴 것으로 나타났으나, 팽창성은 고무계열이 우레탄계열보다 3배 이상 뛰어난 것으로 나타났다.

- (3) 현장시공 투수시험 결과, 지수조건별로 투수계수의 크기를 살펴보면 무처리구간>우레탄계열 지수재 단면도포>우레탄계열 지수재 양면도포>고무계열 지수재 단면도포>고무계열 지수재 양면도포>MIP그라우팅 순으로 나타났다. 따라서, 강널말뚝의 지수재는 현장의 조건을 고려하여 선정하여 하며, 고무계열의 지수재를 사용하는 것이 바람직하다.
- (4) 지수재 도포별 차수특성을 살펴보면, 일면도포 조건보다 양면도포 조건의 투수계수가 낮게 나타났는데, 이는 양면도포 조건의 경우가 단면도포 조건의 경우에 비하여 지수재 도포율이 커서 강널말뚝 연결부의 미세 간극을 더욱 조밀하게 메웠기 때문이다. 따라서 완벽한

차수등급을 요구하는 경우에는 단면도포 조건보다는 양면도포 조건이 바람직하다고 본다.

- (5) 깊이에 따른 투수특성을 살펴보면, 지하수위가 높은 경우의 투수계수가 낮은 경우의 투수계수보다 미소하게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 지하수위고에 의한 동수경사의 차이에 의하여 강널말뚝의 연결부에 작용하는 수압이 다르기 때문으로 판단된다.
- (6) 시간경과에 따른 투수특성을 살펴보면, 강널말뚝의 투수계수는 시간경과에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 시간경과에 따라 점차 투수계수가 감소하는 것으로 이는 차수효과가 증진됨을 알 수 있다. 감소원인은 지수재의 팽창시간과 세립분 토사가 강널말뚝의 연결부위에 막히는 막힘현상(clogging effect)에 의한 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2004년 10월 18일)

#### 참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원(1995), 오염지반 및 지하수 정화기술에 관한 연구, 한국건설기술연구원.
2. 천병식, 장연수(1996), 연약지반(V-2), 한국지반공학회지, 제 12권 제 3호, pp. 174~199.
3. 정하익, 이시한, 안태봉, 여병철, 윤태국(1996), 강널말뚝에 의한 폐기물 매립장의 차수시스템 구축방안, 96년도 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 173~178.
4. 한국건설기술연구원(1996, 1997), 인공차수재 및 복토재 개발, 연구보고서, 환경부.
5. J. B. Sellmeijer, J. P. A. E Cools, W. J. Post(1993), The hydraulic resistance of steel sheet pile joints, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, No. 2, pp. 105~110.