

# PHC-W 흠막이 공법의 차수방안에 관한 차수성능확인을 위한 모형 압력 수조 실험 연구

## A Study on the Waterproofing Performance of Waterproofing Methods for PHC-W Earth Retaining Wall Based on Pressure Chamber Test

최 용 규 <sup>1</sup>	Choi, Yongkyu	Johannes, Jeanette Odelia <sup>2</sup>
윤 대 희 <sup>2</sup>	Yun, Daehee	김 채 민 <sup>3</sup> Kim, Chae min
전 병 한 <sup>4</sup>	Jeon, Byeong Han	

### Abstract

PHC-W earth retaining wall could be constructed continuously. Various retaining wall methods such as C.I.P. etc. method require separate waterproof method. However, the PHC-W retaining wall method prevents leakage of groundwater by inserting a waterproofing material at connection part between 2 PHC piles. In this study, the experimental study on 3 waterproofing method for PHC-W retaining wall was conducted at the model pressure chamber. In the method using textile with 1-liquid type and 2-liquid type urethane, rapid leak occurred at the pressure of 120 kPa and 140 kPa or more. In the method of textile with grouting, rapid leak occurred at the pressure of 120 kPa or more, however, in this method, the rapid leakage happened at the top part and the bottom part reinforced with urethane.

### 요 지

PHC-W 흠막이 벽체 공법은 연속시공이 가능한 공법이다. 기존 흠막이 공법에서는 지하수의 유출을 막기 위해 별도의 차수공법이 필요한데 반하여 PHC-W 흠막이 벽체 공법은 PHC-W 말뚝의 연결부에 차수제품을 삽입하여 지하수의 유출을 막을 수 있는 공법이다. 이 연구에서는 PHC-W 흠막이 공법에 적용할 3가지의 차수 방안을 선정하여 압력수조 실험을 진행하였다. 섬유패내에 1액형, 2액형 우레탄을 주입하는 방안에서는 120kPa, 140kPa 이상의 압력에서 급격한 누수가 발생되었으며, 섬유패내에 그라우팅하는 방안에서는 120kPa 이상의 압력에서 급격한 누수가 발생되었으며 이 방안에서는 차수재의 상단부와 하단부를 우레탄으로 보강한 부위에서 누수가 발생하였다.

**Keywords :** The PHC-W retaining wall method, Waterproofing methods, The model pressure chamber, 1-liquid type urethane waterproofing method, 2-liquid type urethane waterproofing method, Grouting type waterproofing method, The rapid leakage

1 정희원, 경성대학교 건설환경도시공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental & Urban Engrg., Kyungsoong Univ.)

2 정희원, 경성대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Student of Master degree, Depart. of Civil Engrg., Kyungsoong Univ.)

3 정희원, 경성대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Depart. of Civil & Environment Engrg., Kyungsoong Univ.)

4 정희원, 한국지반공학회 지반공학연구소 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Research Institute, Korean Geotechnical Society, Tel: +82-51-611-4753, Fax: +82-51-621-0729, hany0901@gmail.com, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

흙막이 가시설은 건축 및 토목구조물의 지하구조체 시공 시 지반 안정을 확보하기 위해 설치된 임시 구조물이며, 흙막이 벽체에 작용하는 토압과 수압 등의 수평토압에 대해 저항하고 주변 지반의 침하와 인접구조물의 보호를 목적으로 시공된다.

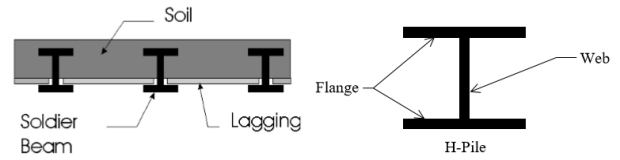
국내에서 주로 사용하는 흙막이 가시설은 H-PILE 토류판공법, S.C.W 공법, 지하연속벽과 C.I.P 공법을 들 수 있다. H-pile 토류판 공법은 공사기간이 짧고 엄지말뚝 보링 후 설치하면 소음과 진동이 적다. 그러나 차수성이 불량하기 때문에 지하수가 있는 경우 적용이 어렵다. S.C.W 공법은 연속체 차수와 토류벽의 두 역할을 충분히 할 수 있지만 토층의 변화가 심한 지반에서는 정확한 시멘트 밀크 배합이 어렵다. 지하 연속벽은 차수성과 연속성이 좋아서 도심지공사에 적합한 공법이다. 하지만 작업부지가 크기 때문에 다른 공법 보다 고가이다. 깊은 굴착인 경우 C.I.P공법이 많이 사용된다. C.I.P 공법은 장비가 소형이라서 많은 작업 공간이 필요 없다. 그리고 강성이 커서 배면지반의 수평변위를 억제할 수 있어서 인접구조물에게 가는 영향을 줄일 수 있다. 하지만 현장 타설 공법이므로 균질한 품질 확보가 어렵고 지하수가 있는 경우 별도의 차수 공법을 적용해야 한다.

PHC-W 흙막이 벽체 공법은 PHC 공장에서 제작되는 PHC-W 말뚝을 이용하여 시공되는 흙막이 공법이므로 품질 확보가 용이하며 별도의 차수 공법이 필요하지 않다. 별도의 차수 공법을 사용하지 않기 위해 PHC-W 말뚝의 연결부에 차수재료를 설치하여 차수를 실시할 수 있다. 이 연구에서는 3 가지 차수방안을 설정하였으며 이들 방안에 대하여 모형 압력수조실험을 실시하여 차수성능을 분석하였다.

## 2. 흙막이 공법의 종류 및 차수공법

### 2.1 H-PILE 토류판공법

H-PILE 토류판공법(Fig. 1)은 강재 엄지 말뚝을 지중에 타입하고 굴착을 진행하면서 토류판을 끼워 굴착벽을 지지하는 방법으로 공기가 짧고 공사비가 가장 저렴하여 널리 적용되는 공법이다. 하지만 차수성이 불량하여 토사유출이 발생하고 분사현상이나 용기현상이 발생할 우려가 있는 공법으로 지하수 유출 시 별도의 차수공



(a) Plane figure



(b) Site image

Fig. 1. Soldier pile and lagging method

법이 필요하다. 별도의 차수공법으로는 투수계수가 작은 뒷 채움재를 사용하거나 흙막이 후면 그라우팅을 통하여 지하수 유출을 막는다(Hwang, 2010).

### 2.2 S.C.W 공법

S.C.W(soil cement wall) 공법(Fig. 2)은 지반에 쏘일-시멘트 말뚝을 연결 시공하여 벽체를 형성하는 공법으로 연속 벽체를 시공한 후 철근이나 강말뚝으로 보강할 수 있다. 쏘일-시멘트 말뚝을 설치하는 방법에는 오거 굴착으로 지반을 교반하여 흙과 시멘트를 혼합하는 공법과 제트 그라우팅공법이 많이 적용되고 있다. 쏘일-시멘트나 제트 그라우팅을 사용하므로 말뚝 간에 연결성이 좋으므로 차수성이 좋으며, 토사의 유실 가능성도 매우 적고 시공이 간편하고 공기가 빠른 장점이 있다. 하지만 휨 모멘트에 취약하므로 적절한 보강이 필요하며 시공장비의 특성상 풍화암 이하에서는 시공이 불가능하므로 토사지반에서만 설치가 가능하다(Hwang, 2010).

### 2.3 지하연속벽공법

지하연속벽공법(Fig. 3)은 벤토나이트 안정액을 사용하여 지반을 굴착하고 철근망을 삽입한 후, 콘크리트를 타설하여 지중에 철근 콘크리트 연속 벽체를 형성하는 공법이다. 지하연속벽 공법은 근입부의 연속이 보장되

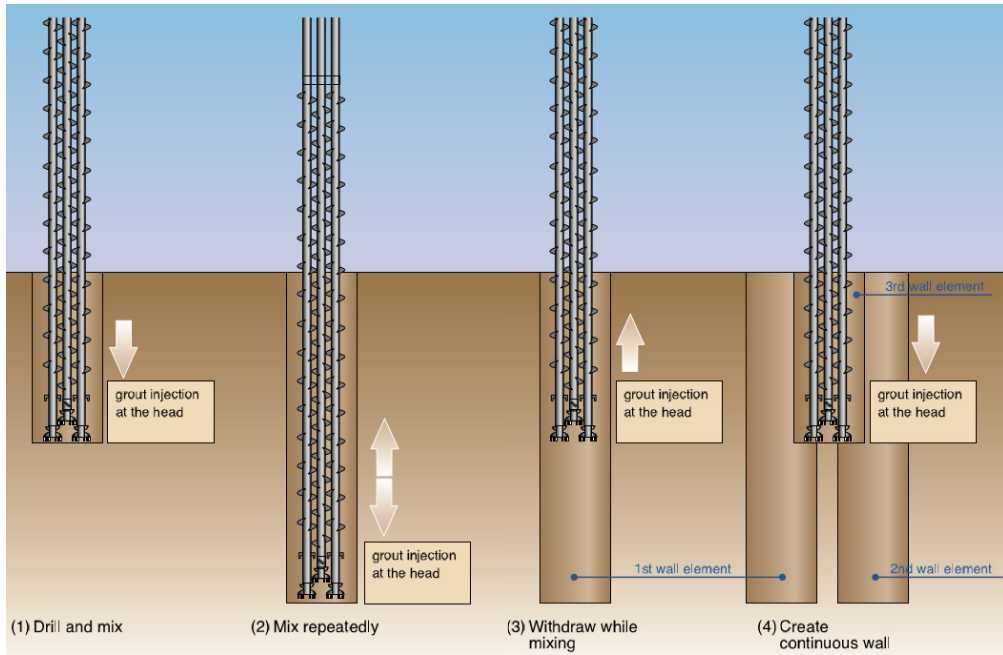


Fig. 2. S.C.W method (Raito Kogyo co., Ltd., 2006)

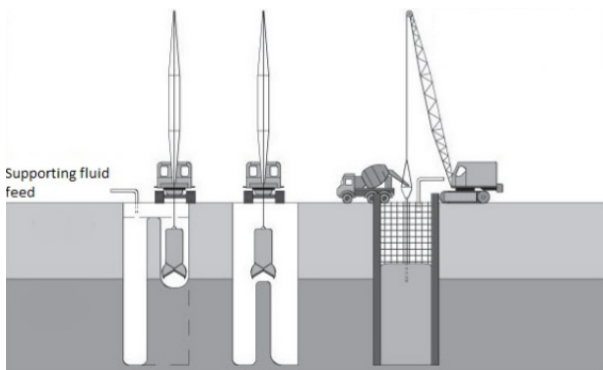


Fig. 3. Slurry wall method (Gudjónsson and Höskuldsson, 2014)

며 단면 강성이 크므로 대규모, 대심도 굴착공사 시 영구벽체로 사용될 수 있고, 소음 및 진동이 적어 도심지 공사에 적합하며, 연속적인 벽체시공으로 차수성이 우수한 장점이 있다. 그러나 공기와 공사비 측면에서 비교적 불리하며 안정액 처리문제로 철저한 품질관리가 필요하며, 고도의 기술력이 요구되는 공법이다(Oh and Cho, 2004).

#### 2.4 C.I.P 공법

C.I.P공법(Fig. 4)은 현장타설 콘크리트 말뚝을 지중에 연속적으로 설치하여 흙막이 벽체를 시공하는 방법이다. 주열식 말뚝이라고도 하는데 400~550mm 직경의 말뚝을 많이 사용한다. 지반에 구멍을 뚫어 모르타르를

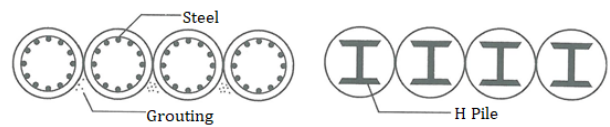
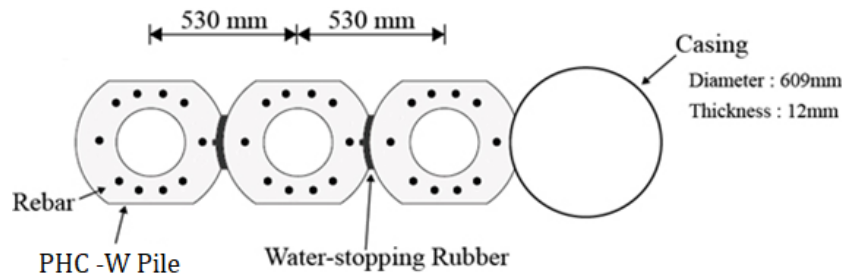


Fig. 4. C.I.P method

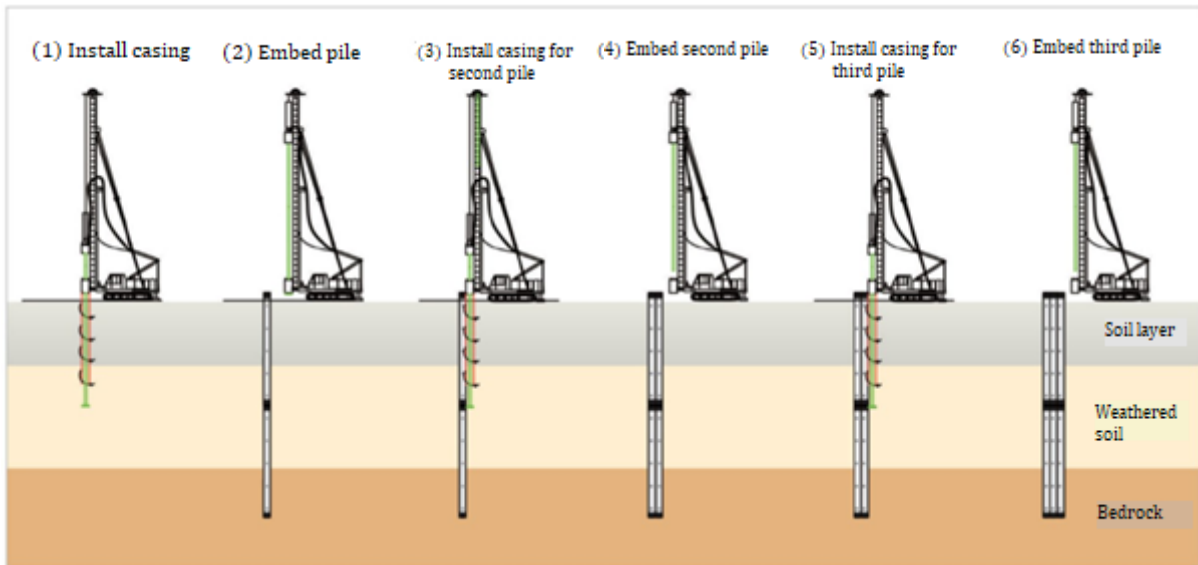
주입한 후 H형강말뚝이나 철근을 삽입하고 말뚝을 연속적으로 형성하여 흙막이벽으로 사용하는 공법으로 모든 지반에 시공이 가능하며 벽체의 강성이 크다. 깊은 심도에서는 시공 수직도 문제로 별도의 차수 그라우팅 보완이 필요하다(Oh and Cho, 2004).

#### 3. PHC-W 흙막이 공법 및 차수방법

PHC흙막이 공법은 PHC말뚝의 단면을 개선하여(Fig. 5(a) 참조) 흙막이 벽체로 사용하는데 품질이 우수하며 품질관리가 용이하다. 개선된 PHC-W 말뚝의 연결부 틈새에 차수제품을 삽입하여 별도의 차수공법이 필요하지 않은 장점이 있다. PHC-W 흙막이 벽체의 시공은 Fig. 5와 같이 항타장비를 이용하여 오거 굴착 및 케이싱 천공을 실시하고 말뚝을 근입한다. 그리고 다음공 천공 실시 후 연속적으로 말뚝을 삽입하여 시공하고 PHC-W 말뚝과 말뚝사이의 틈새에 차수재를 설치하여 지하수 유출을 막는 공법이다. 시공이 완료된 PHC-W 흙막이 공법을 Fig. 6에 모식적으로 나타내었다(Kim et al., 2017).



(a) A cross-section of PHC-W pile



(b) Construction step (Choi, 2014)

Fig. 5. Construction method of PHC-W earth retaining wall method

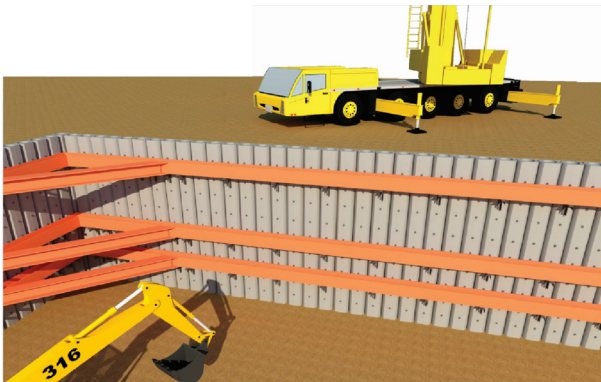


Fig. 6. A schematic drawing of PHC-W earth retaining wall (Choi, 2014)

PHC-W 흠막이공법에 사용할 차수재료로는 3 가지 (섬유팩, 우레탄, 그라우팅)를 선정하였으며 각 재료의 특성에 대하여 4장에서 기술하였다.

3 가지 차수 재료를 활용하여 PHC-W 흠막이 공법의 차수방안을 선정하였으며 아래에 설명하였다.

### 3.1 방안 1 : 섬유팩 내에 1액형 우레탄을 주입하는 차수 방안

이 차수 방안(Fig. 7(a))에서는 섬유팩과 팽창재인 1액형 우레탄을 사용하였다. 1액형 우레탄 주입기(Fig. 8(a) 참조)를 통하여 가장 상부에서 주입하였으며 1액형 우레탄은 물과 결합하여야 팽창하는 재료이다.

실제 현장 시공에서는 섬유팩 내부에 XL소재의 유공관을 삽입한 후 PHC-W 말뚝 연결부의 홈에 섬유팩을 설치하고 PHC-W말뚝을 시공하였다. 이 때 유공관의 외경은 16mm, 내경은 12mm이었으며 XL관에는 직경 10mm의 구멍을 100mm 간격, 180° 대칭으로 형성시켰다. 섬유팩 내부에 있는 유공관에 나일론소재의 주입관을 PHC-W 말뚝의 선단부까지 삽입하였고 이 관을 통하여 1액형 우레탄을 주입하였다. 이때 주입의 진행에 따라 주입관을 빼어 올리면서 1액형 우레탄을 연속적으로 주입하였다. 주입이 완료된 1액형 우레탄은 말뚝 연결부에서 팽창하여 말뚝사이의 공극과 흠의 간극에 침투하게 되어 지하수의 유출을 막을 수 있었다.

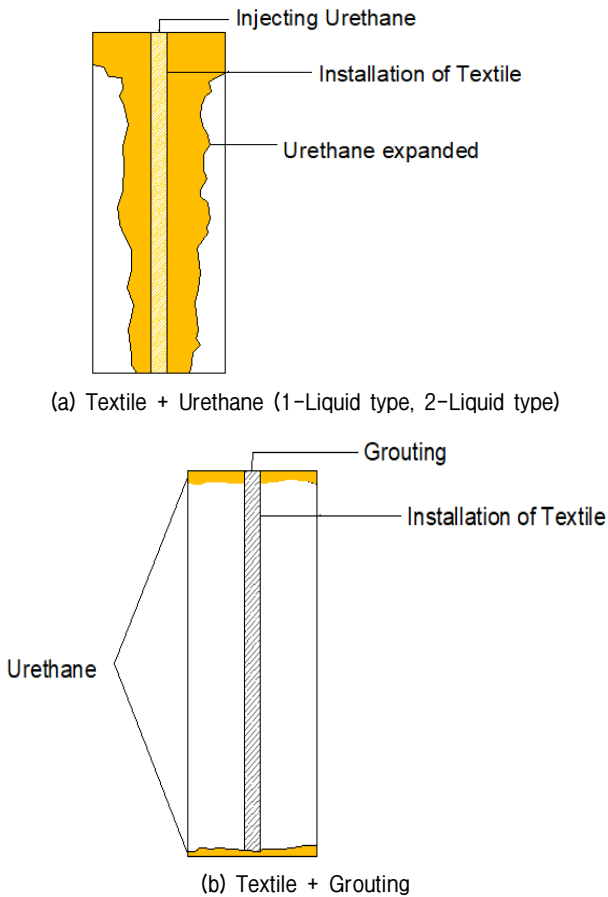


Fig. 7. Installation of suggested waterproofing method

### 3.2 방안 2 : 섬유팩 내에 2액형 우레탄을 주입하는 차수 방안

이 차수 방안(Fig. 7(a))에서는 섬유팩과 팽창재인 2액형 우레탄을 사용하였다. 2액형 우레탄은 물과 관계없이 2 가지 우레탄 용액(팽창재 및 경화제)이 혼합되면 팽창하였다. 경화제에는 혼합 후 일정 시간 경과 시 팽창을 시작할 수 있도록 하는 지연제 성분이 포함되어 있었다. 2액형 우레탄 주입기(Fig. 8(b) 참조) 끝에 주입용 호스를 연결하여 호스를 가장 하부에서부터 천천히 상부로 올리면서 주입하였다. 2액형 우레탄은 두개의 용액을 잘 섞어야 좋은 품질을 발현하므로 주입기 앞에 혼합노즐이 있어야 하지만 긴 혼합 노즐이 없어 가장 상부에서 주입호스를 통하여 혼합된 2액형 우레탄을 주입하였다. 혼합노즐을 통하여 2가지 우레탄 용액이 흘러가면 혼합노즐 내에서 회전하여 2가지 용액을 섞이게 되는 데 모형토조실험에서는 가장 상부에서 주입호스를 통하여 주입하는 방법을 사용하였다.

현장 시공에서는 섬유팩 내부에 XL소재의 유공관을

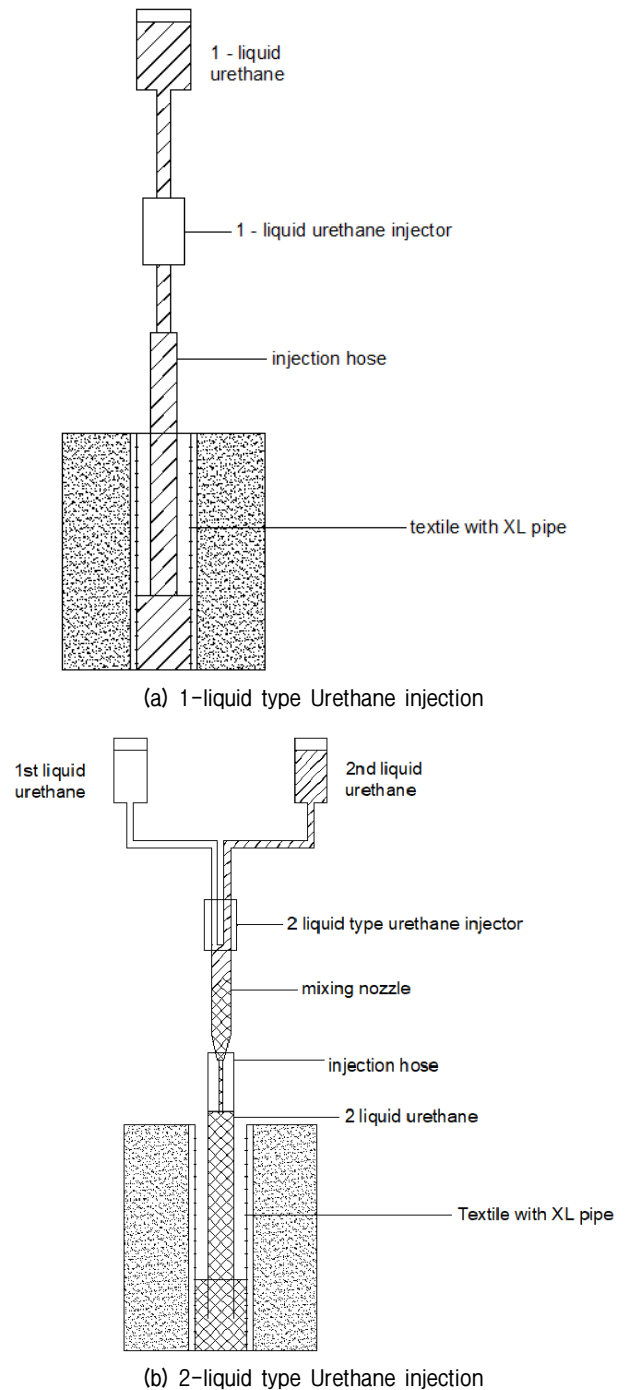


Fig. 8. Concept diagram of 1-liquid or 2-liquid type Urethane injection

삽입한 후 PHC-W 말뚝 연결부의 흠에 섬유팩을 설치한 후 PHC-W말뚝을 시공하였다. 이 때 유공관의 외경은 16mm, 내경은 12mm이었으며 XL관에는 직경 10mm의 구멍을 100mm 간격, 180° 대칭으로 형성시켰다. 섬유팩 내부에 있는 유공관에 나일론소재의 주입관을 PHC-W 말뚝의 선단부까지 삽입하고 이 관을 통하여 2액형 우레탄을 주입하였다. 이때 주입의 진행에 따라 주입관을



빼어 올리면서 2액형 우레탄을 연속적으로 주입하였다. 주입이 완료된 2액형 우레탄은 말뚝 연결부에서 팽창하여 말뚝사이의 공극과 흙의 간극에 침투하게 되어 지하수의 유출을 막을 수 있었다.

### 3.3 방안 3 : 섬유팩 내에 그라우트를 주입하는 차수방안

이 차수 방안(Fig. 7(b))에서는 섬유팩과 그라우트를 사용하였다. 포틀랜드시멘트를 사용한 그라우트의 w/c 는 85%이었다. 섬유팩 상부에서 유공관 내에 삽입된 주입관을 통하여 차수 부위의 하단으로부터 그라우트를 주입하였다.

실제 현장 시공에서는 섬유팩 내부에 XL소재의 유공관을 삽입한 후 PHC-W 말뚝 연결부의 흠에 섬유팩을 설치하고 PHC-W말뚝을 시공하였다. 이 때 유공관의 외경은 16mm, 내경은 12mm이었으며 XL관에는 직경 10mm의 구멍을 100mm 간격, 180° 대칭으로 형성시켰다. 섬유팩 내부에 있는 유공관에 나일론소재의 주입관을 PHC-W 말뚝의 선단부까지 삽입하였고 이 관을 통하여 시멘트 그라우트를 주입하였다. 이때 주입의 진행에 따라 주입관을 빼어 올리면서 그라우트를 연속적으로 주입하였다. 주입이 완료된 그라우트는 말뚝 연결부에서 팽창하여 말뚝사이의 공극과 흙의 간극에 침투하게 되어 지하수의 유출을 막을 수 있었다.

## 4. 차수성능실험 계획 및 방법

### 4.1 차수 재료 선정을 위한 예비 시험

#### (1) 섬유팩

섬유팩의 소재로는 면 100%, 레이온 100%, 폴리에스테르 50% + 면 50%, 아크릴 100%, 폴리에스테르 50% + 아크릴 50%, 폴리에스테르 100%, 방수재질을 사용하여 실험을 했다. 섬유팩의 소재에 따른 우레탄발포실험을 실시한 결과 방수재질을 제외한 나머지는 큰 차이가 없다. 하지만 방수재질인 경우 물과의 접촉이 잘 이루어지지 않아서 발포가 많이 이루어지지 않았다. 그래서 내구성과 흡수력이 좋은 면 또는 폴리에스테르를 선택하여 섬유팩을 제작하였다.

#### (2) 우레탄

폴리우레탄(Polyurethane)은 연결화성 수지는 아니지

만 유사한 3차원 구조를 가진 플라스틱을 말한다. 우레탄은 종류에 따라 다양하게 제작할 수 있으나 PHC-W 흠막이 벽체에서는 지하수 유출을 막을 수 있어야 하므로 좁은 공간에 침투할 수 있어야 하고 그 공간에서 발포되어 물의 유출을 막을 수 있는 소재로 결정하였다. 이때, 1액형 우레탄과 2액형 우레탄을 사용하였으며 발포 실험, 투수 실험 등을 통하여 제품을 결정하였다.

#### (3) 그라우트

그라우트는 지반이나 암반 등에 그라우팅을 할 때 사용하는 재료로 시멘트, 점토, 벤토나이트, 아스팔트, 약액 등이 있다. 이 실험에서 1종 포틀랜드 시멘트와 물을 배합하여 그라우트를 제조하고 배합비를 조정하면서 차수실험을 진행하였다.

## 4.2 차수 성능 실험 계획

### (1) 차수재 선정

3 가지의 다양한 차수재료에 대한 예비실험을 통하여 차수재로 사용할 3 가지 차수재를 다음과 같이 선정하였다(Table 1 참조).

### (2) 실험 계획

차수재료를 조합하여 3 가지 차수방안을 Table 2와 같이 선정하였다.

각 차수 방안에 대하여 모형 압력 수조의 압력챔버내의 압력을 20kPa 씩 증가시키면서 200kPa까지 압력을 증가시키도록 계획하였으나 실제 실험에서는 160kPa까지 압력을 증가시켰다. 이 때 각 압력 단계에서는 5 분 간격으로 1 시간 동안 유출량을 측정하였다.

Table 1. Waterproofing Materials used in this study

Waterproofing material	Characteristics
Textile (Polyester 100%)	A durability and a absorption capacity
1-Liquid type urethane	Adhesion shear strength = 45 N/cm <sup>2</sup>
2-Liquid type urethane	
Grout	w/c ratio = 85%

Table 2. Description of waterproofing method

Method	Content
Method 1	Textile with 1-Liquid type urethane
Method 2	Textile with 2-Liquid type urethane
Method 3	Textile with grouting

### 4.3 모형 압력 수조

차수 공법의 능력을 알기 위해 Fig. 9와 같은 모형 압력 수조를 제작하였다. 2 개의 큰 수조(압력 챔버 및 측정 챔버)를 두었으며 그 중간에 유로를 두었고 유로의 중앙 위치에는 차수재 설치용 홈을 두었다. 1 개의 수조는 압

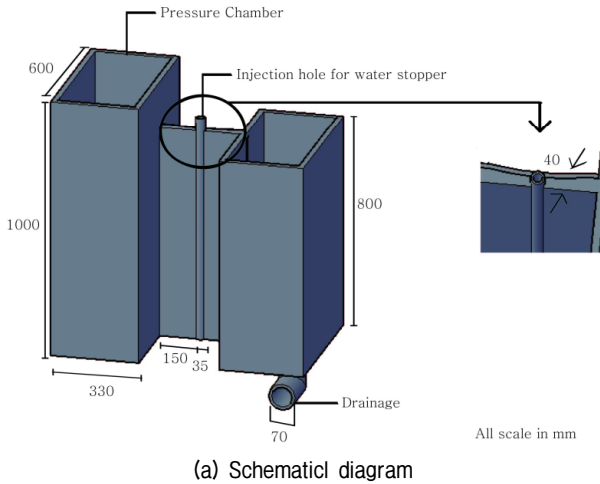


Fig. 9. Pressure chamber

력챔버로 사용하였으며 두께를 만들어 압력을 주입할 수 있게 하였다. 다른 1 개의 수조는 유출수량 용기로 사용하였으며 그 하부에는 배수구를 설치하였다. 유로의 상부에도 두께를 조립하여 압력 및 물을 밀폐할 수 있게 하였다. 2 개의 큰 수조 사이에 위치한 유로는 PHC-W 말뚝 연결부의 오목부와 볼록부 사이의 공간과 같은 형상 및 제원으로 제작하였으며 유로에는 홈을 채울 수 있도록 하였다. 또한 차수재 설치용 홈은 PHC-W말뚝의 차수재 부착용 홈과 동일한 크기로 제작하였다.

모형 실험에서는 당초 모형압력토조를 제작하였으며 PHC-W말뚝의 실제 시공 시 말뚝 연결부 사이에 채워지는 홈을 모형압력토조의 수로에 채우도록 계획하였다. 그러나 모형 실험 시행 과정에서 차수재 구성 및 설치와 관련하여 많은 시행착오를 겪다 보니 홈을 배제한 채 차수재만 설치하여 실험을 하게 되었다. 즉 모형 압력 수조 실험으로 차수 성능 실험을 실시하였다.

PHC-W 흠막이 벽체 공법은 PHC-W 말뚝의 흠에 차수제품을 부착하여 시공하므로 차수제품을 먼저 설치하고 압력챔버에 물을 채우고 압력을 작용시킨 후 압력에 따른 누수량을 측정할 수 있게 제작하였다.

### 4.4 차수재 설치 방법

#### (1) 방안 1 : 섬유팩 내부에 1액형 우레탄을 주입하는 방안

섬유팩(Fig. 10(a)) 내부에 XL소재의 유공관을 삽입(Fig. 10(b))하고 PHC-W 말뚝의 흠을 모사한 차수재 설치용 홈에 부착시켰다. 그 다음 가압용 챔버 및 측정용 챔버에는 차수재가 잠길 수 있을 정도의 수위를 유지시켜 두었다. 수조XL호스 내부에 주입용 호스를 유공관의 바닥까지 삽입한 후 1액형 우레탄 주입장치를 이용하여 1액형 우레탄을 주입하면서 주입의 진행에 따라 주입용 호스를 서서히 위로 들어 올렸다(Fig. 10(c)). 1액형 우레탄이 섬유팩 내부와 섬유팩 외부로 팽창하게 하였다(Fig. 10(d)).

#### (2) 방안 2 : 섬유팩 내부에 2액형 우레탄을 주입하는 방안

섬유팩(Fig. 10(a)) 내부에 XL소재의 유공관을 삽입(Fig. 10(b))하고 PHC-W 말뚝의 흠을 모사한 차수재 설치용 홈에 부착시켰다. 그 다음 가압용 챔버 및 측정용 챔버에는 차수재가 잠길 수 있을 정도의 수위를 유지시

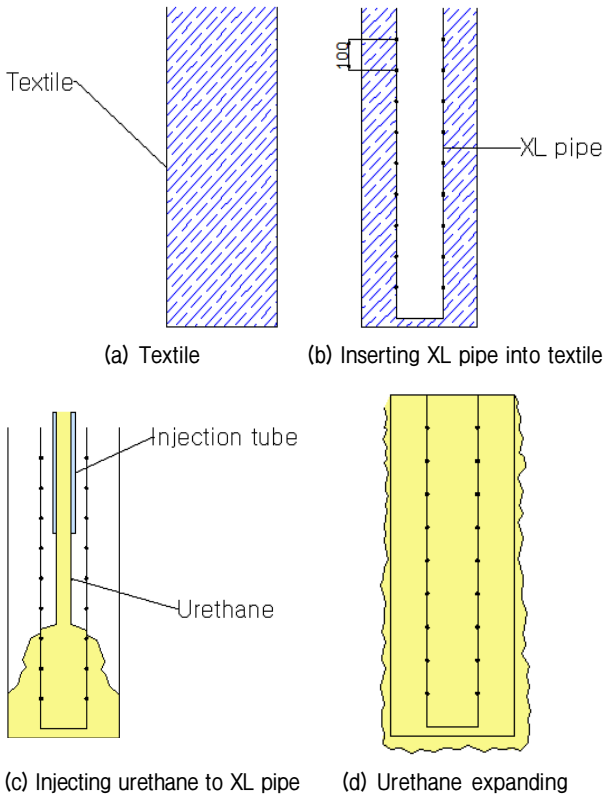


Fig. 10. Waterproofing method using textile and urethane

켜 두었다. XL호스 내부에 주입용 호스를 유공관의 바닥까지 삽입하였다. 2액형 우레탄 주입장치를 이용하여 2가지 우레탄 용액을 혼합하여 혼합된 우레탄을 주입용 호스 상부에서 주입용 호스를 통하여 주입하였다. 2액형 우레탄을 주입하면서 주입의 진행에 따라 주입용 호스를 서서히 위로 들어 올렸다(Fig. 10(c)). 2액형 우레탄이 섬유팩 내부와 섬유팩 외부로 팽창하게 하였다(Fig. 10(d)).

(3) 방안 3 : 섬유팩 내에 그라우트를 주입하는 방안  
 섬유팩(Fig. 10(a)) 내부에 XL소재의 유공관을 삽입(Fig. 10(b))하고 PHC-W 말뚝의 홈을 모사한 차수재 설치용 홈에 부착시켰다. XL호스 내부에는 주입용 호스를 유공관의 바닥까지 삽입하였다. 이 때 유공관 내부에는 그라우트를 가득 채워 두었다. 그 다음 가압용 챔버 및 측정용 챔버에는 차수재가 잠길 수 있을 정도의 수위를 유지시켜 두었다. 섬유팩 내부에 주입된 그라우트는 팽창성이 없었고 포틀란트 시멘트와 물을 혼합하여 주입하였으므로 물에 의해 섬유팩 내부의 그라우트가 유출될 가능성에 대비하여 주기적으로 반복 주입하였다. 하지만 우레탄과 달리 팽창하는 제품이 아니었으므로 차수재

삽입용 홈의 가장 아랫부분과 가장 윗부분에서는 우레탄으로 물의 유출을 막을 수 있도록 하였다.

#### 4.5 차수재 성능 실험 절차

3 가지 차수 방안에 대한 차수재 성능 실험 절차를 단계적으로 아래에 설명하였다.

- ㉠ 섬유팩 내에 유공관을 삽입한다.
- ㉡ 가압용 챔버 및 측정용 챔버에 차수재가 잠길 수 있도록 물을 채우고 차수재 설치용 홈에 섬유팩을 삽입한다. 차수 방안 3의 경우 차수재의 상단부와 하단부에서 물이 새어나올 수 있으므로 먼저 하단부에 먼저 우레탄을 충분히 주입한다.
- ㉢ 유공관 내에 주입용 호스를 삽입하여 차수 재료를 하단으로부터 주입하면서 주입의 진행에 따라 주입용 호스를 서서히 뽑아 올린다.
- ㉣ 차수재의 주입을 완료한다. 이 때 차수 방안 3의 경우 차수 재료의 상단부에서 물이 새어 나올 수 있으므로 이 부분에도 우레탄을 충분히 주입한다.
- ㉤ 1액형 및 2액형 우레탄 차수 방안의 경우 우레탄의 팽창 성능이 충분히 발현될 수 있도록 24시간 경과 후에 실험을 개시한다. 그리고 그라우팅 차수 방안의 경우 그라우트의 경화 성능이 충분히 발현될 수 있도록 36시간 경과 후에 실험을 시작한다. 압력 챔버의 상부 두께를 조립한 후 압력챔버에 물을 가득 채우며 측정 챔버의 물은 비운다. 이 때 차수재의 접착면, 차수재 설치용 홈의 상단 및 하단을 통하여 물이 흘러나오는 지를 확인하여야 한다.
- ㉥ 압력 챔버에 압력을 가하면서 측정 챔버로 유출되는 유량을 배수구를 통하여 측정한다. 이 때 압력은 20kPa씩 증가시키며 각 압력단계에서 60분간 5분 간격으로 유출 유량을 측정한다.
- ㉦ 유출유량이 급격하게 증가할 경우 실험을 종료한다.

### 5. 차수 성능 실험 결과 및 분석

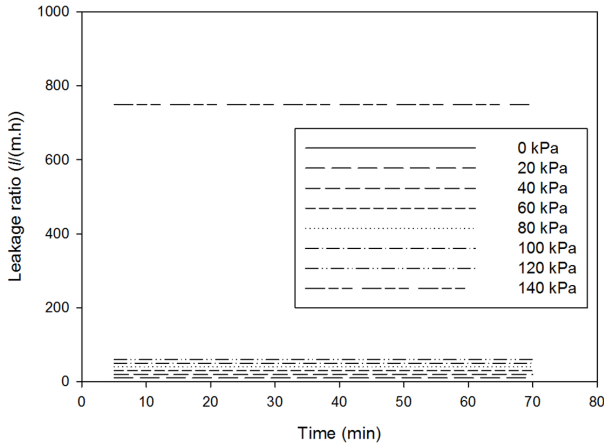
#### 5.1 차수 성능 실험 결과

모형 압력 수조를 이용하여 3가지 방안에 대한 차수 성능 실험을 실시하였다. 압력은 단계적으로 변화시켰으며 각 압력 단계에서는 시간의 경과에 따른 누수량을 측정하였다.

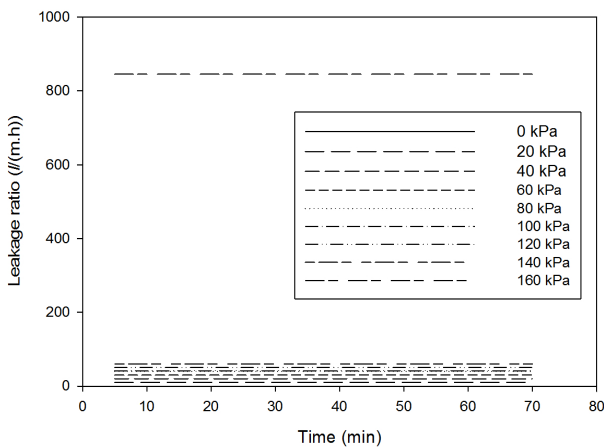


(1) 방안 1 : 섬유팩 내부에 1 액형 우레탄을 주입하는 차수 방안

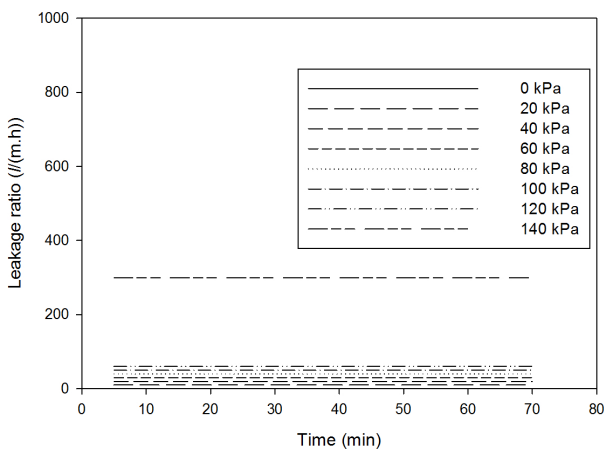
섬유팩 내부에 1액형 우레탄을 주입한 후 실시한 모형 압력 수조실험에서 가압 상태에서 측정된 분당 누수량은  $2.049l/(m \cdot h)$ 로 나타났으며 차수제품의 단위 길이(1m) 당 1시간 2.049l의 누수량을 확인 할 수 있었다. 압력토



(a) Textile + 1-Liquid type urethane



(b) Textile + 2-Liquid type urethane



(c) Textile + Grouting

Fig. 11. Results of pressure chamber test

조에 각각 20kPa씩 압력을 증가시켰을 때의 누수량을 측정하였는데 120kPa의 압력에서  $33.43l/(m \cdot h)$ 의 누수량이 측정되었으며, 140kPa의 압력에서  $749.29l/(m \cdot h)$ 의 급격하게 많은 누수량이 발생되었다. 급격하게 많은 누수량이 발생되었을 때, 팽창된 우레탄과 모형 압력수조의 외벽 사이에서 누수가 발생되었다. 시간과 압력에 따른 평균 누수량을 Fig. 11(a)에 나타내었다.

(2) 방안 2 : 섬유팩 내부에 2 액형 우레탄을 주입하는 차수 방법

섬유팩 내부에 2액형 우레탄을 주입한 후 실시한 모형 압력 수조실험에서 가압 상태에서 측정된 분당 누수량은  $2.084l/(m \cdot h)$ 로 나타났으며 차수제품의 단위 길이(1m) 당 1시간 2.084l의 누수량을 확인 할 수 있었다. 압력토조에 각각 20kPa씩 압력을 증가시켰을 때의 누수량을 측정하였는데 140kPa의 압력에서  $42.05l/(m \cdot h)$ 의 누수량이 측정되었으며, 160kPa의 압력에서  $845.28l/(m \cdot h)$ 의 급격하게 많은 누수량이 발생되었다. 급격하게 많은 누수량이 발생되었을 때, 팽창된 우레탄과 모형 압력수조의 외벽 사이에서 누수가 발생되었다. 시간과 압력에 따른 평균 누수량을 Fig. 11(b)에 나타내었다.

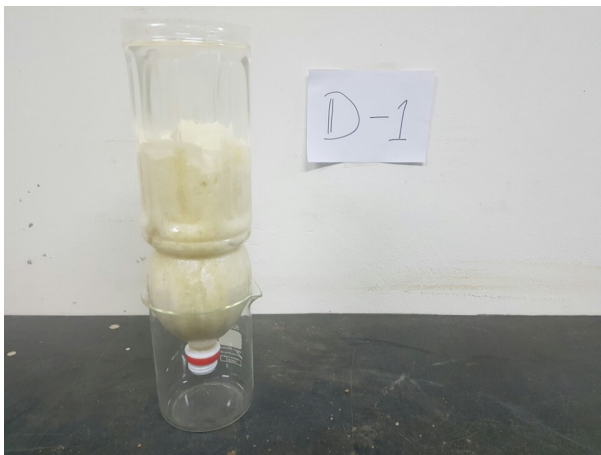
(3) 방안 3 : 섬유팩 내에 그라우팅하는 차수 방법

섬유팩과 그라우팅을 활용한 실내실험에서는 가장 아랫부분과 윗부분에서 많은 양의 누수가 발생되어 측정이 불가능하였다. 우레탄 주입기를 이용하여 가장 아랫부분과 가장 위부분의 틈을 보수하여 실험을 진행하였다. 이때, 모형 압력 토조에 담긴 물의 압력에서 측정된 분당 누수량은  $2.017l/(m \cdot h)$ 로 차수제품의 단위 길이 (1m) 당 1시간 2.017l의 누수량을 확인 할 수 있었으며, 타 실험과 같이 압력수조에 각각 20kPa씩 압력을 증가시켰을 때의 누수량을 측정하였다. 그리고 120kPa의 압력에서  $43.99l/(m \cdot h)$ 의 누수량이 측정되었으며, 140kPa의 압력에서  $299.74l/(m \cdot h)$ 의 급격하게 많은 누수량이 발생되었다. 급격하게 많은 누수량이 발생되었을 때, 내부를 확인할 결과 섬유팩과 그라우팅 부분의 누수를 확인할 수 없었으나 누수량이 급격하게 증가하는 가장 하부 및 가장 상부에 채웠던 우레탄 부분에서 누수가 발생되었다고 판단되었다. 섬유팩내에 그라우팅한 차수실험의 시간과 압력에 따른 평균 누수량을 Fig. 11(c)에 나타내었다.

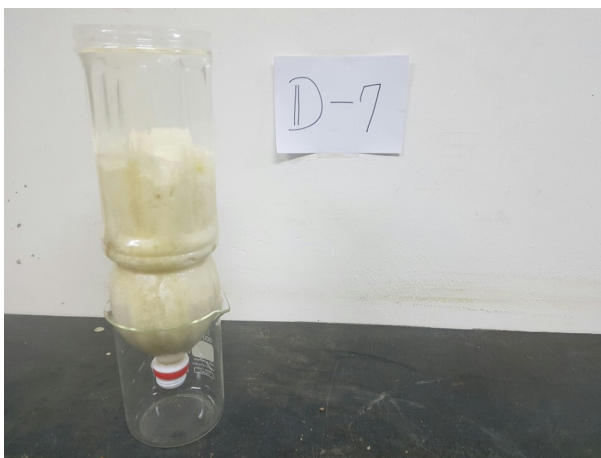
## 5.2 차수 성능 실험 결과 분석

실시된 3가지 방안에 대한 모형 압력 수조실험에서 모두 0kPa의 압력에서도 누수가 미미하게 발생되었다. 최초 0kPa의 압력에서 발생한 누수량과 급격하게 누수량이 증가되는 압력까지 누수된 물은 모형 압력 수조의 가장 상단과 아랫 부분 사이의 미세한 틈을 통한 누수라고 생각되었다. 육안 관찰에서는 발포된 1액형 우레탄, 2액형 우레탄, 그라우팅 자체를 통한 누수는 발견되지 않았다(Fig. 12 참조). 높은 압력 단계에서는 급격하게 누수가 발생하게 되는데 1액형 우레탄 및 2액형 우레탄 차수방안에서는 우레탄이 접착된 전체 부위에서 그리고 그라우팅 차수방안에서는 가장 윗 부분과 가장 아랫부분에서 급격한 누수를 육안으로 관찰할 수 있었다.

방안 1에서는 120~140kPa 압력에서, 방안 2에서는 140~160kPa의 압력에서 우레탄의 수축에 의해 누수가



(a) 1<sup>st</sup> Day after urethane expanded



(b) 7<sup>th</sup> Day after urethane expanded

Fig. 12. Permeability test on 1-Liquid type or 2-Liquid type urethane

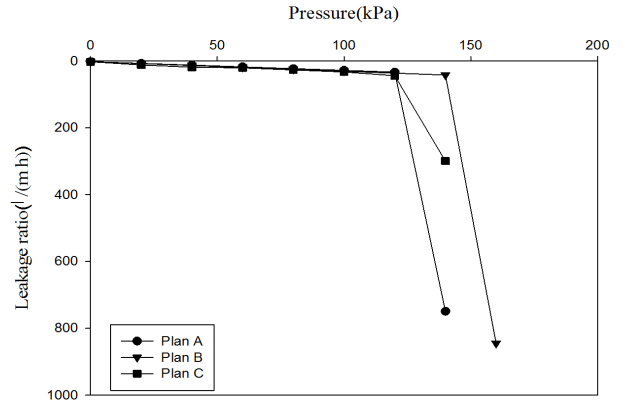


Fig. 13. Test results of waterproofing performance tests

발생되었고, 방안 3에서는 우레탄으로 보강된 가장 윗 부분과 아랫부분에서 누수가 발생되었다.

3 가지의 차수 방안에 대한 모형 압력 수조 실험에 의한 차수성능을 분석한 결과 120~140kPa 이상에서는 누수가 급격하게 증가하였다(Fig. 13). 그 이상의 지하수 압력에서는 3 가지 차수방안이 기능을 하지 못할 수도 있으나 이 모형 실험에서 PHC-W말뚝의 연결부를 모사한 모형압력수조의 재질이 상이하여 더 이상의 압력에서는 차수 성능을 발휘하지 못하였을 가능성도 추론해보았다. 즉 차수재가 부착되는 PHC-W 말뚝면은 콘크리트 재질로 되어 있으나 이를 모사한 모형압력수조는 강재로 제작되어 있었다. 즉 차수재가 부착되는 면의 마찰 특성의 차이로 인하여 누수가 급격하게 증가되는 최대 압력(즉 최대 차수 깊이)은 과소평가되었다고 생각되었다. 이에 대한 내용은 현재 시공중인 테스트베드에서 실시할 실증실험을 통하여 검증할 예정이다.

3 가지 차수 방안에 대한 시험에서 최대 압력에서 발생한 급격한 누수량은 압력을 낮추었을 때 누수량의 급격한 감소를 확인하였다. 압력에 의하여 우레탄이 팽창되어 변형이 발생되었으며, 압력을 낮추었을 때 원래 상태로 복원되었다고 판단되었다.

## 6. 제언 및 결론

PHC-W 흙막이 벽체는 별도의 차수공법이 필요하지 않는 공법으로 개발되었다. 별도의 차수공법 없이 지하수의 유출을 막기 위하여 3 가지의 방안을 선정하였으며 모형압력수조를 활용하여 압력 단계별로 시간의 경과에 따른 누수량 측정결과를 분석하였으며 결과는 다음과 같다.

- (1) 섬유팩 내부에 1액형 또는 2액형 우레탄을 주입하는 차수방안에서는 0kPa의 압력에서 각각 2.049l/(m·h), 2.084l/(m·h)의 평균누수량이 발생되었으며, 각각 120kPa, 140kPa 이후에는 누수량이 급격하게 증가되었다.
- (2) 섬유팩 내부에 그라우팅하는 차수방안에서는 0kPa의 압력에서 2.017l/(m·h)의 평균누수량이 발생되었으며, 각각 120kPa 이후에는 누수량이 급격하게 증가되었다. 그러나 그라우팅에서 발생된 누수가 아닌 차수재의 상단부와 하단부를 보강한 우레탄 부위에서 우레탄에서 발생된 누수로 판단되었다.
- (3) 실내실험에서 실시된 3 가지 방안에 대한 검증 결과는 현재 시공중인 테스트베드의 굴착면에서 실증적으로 검증할 예정이다.

### 감사의 글

이 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임(16TBIP-C111426-01).

### 참고문헌 (References)

1. Choi J. P. (2014), Study on The Economic Analysis of Retaining PHC-W Method Improved High Strength Pile, Pusan National Univ. Master's Thesis, pp.26-27.
2. Choi, J. P., Kim, M. J., Jin, H. M., Kim, S. S., and Choi, Y. K. (2016), A study on the economic and applicability analysis of PHC-W retaining wall, KSCE 2016 Convention, pp.59-60.
3. Gudjónsson, Gudjón Ólafur and Höskuldsson, Jón Grétar (2014), Functional Requirements for Permanent Diaphragm Walls, Chalmers University, p.6.
4. Hwang, S. H. (2010), Design of Earth retaining Structures, CIR, pp.47-53.
5. Kamran, M. N. (2005), Temporary Structures Excavation and Excavation Supports, Tokyo Institute of Technology, p.6.
6. Kim, C. M., Kim, S. S., Jeon, B. H., and Choi, Y. K. (2017), A Study on performance improvement of a PHC-W pile for PHC-W, *Journal of the Korea Geotechnical Society*, Vol.33, No.2, pp.27-34.
7. Oh, J. H. and Cho, C. H. (2004), Retaining engineering, Goomi bookstore, pp.31-35.
8. Raito Kogyo co., Ltd. (2006), Raito Soil Mixing Wall, p.2.

Received : November 4<sup>th</sup>, 2017  
 Revised : November 22<sup>nd</sup>, 2017  
 Accepted : November 30<sup>th</sup>, 2017