

# 축소모형실험을 통한 부분배수 쉴드터널의 세그먼트 단면 축소 가능성 평가

마상준\* · 이영섭\*\* · 김동민\*\*\*

Ma, Sang Joon\*, Lee, Young Sub\*\*, Kim, Dong Min\*\*\*

## Evaluation of Reducing Cross Section of the Partial Drainage Shield Tunnel Segment using the Model Experiments

### ABSTRACT

The existing shield tunnel has constructed in the concept of non-drainage uniformly, but the leak has become a problem in the construction and management. The Shield tunnel design allowed for the water and earth pressure bring about the increasing segment thickness and the construction costs. In order to improve these problems, the study of the partial drainage shield tunnel is in progress. In this study, th model experiment was performed to confirm the possibility of the partial drainage shield tunnel. And the water and earth pressure was measured in drainage and undrained condition. Based on the results of model experiments, the effect of water pressure reduction was confirmed by reviewed the structure stability of the real design case.

**Key words** : Shield tunnel, Cross section of segment, Partial drainage, Water pressure reduction

### 초 록

기존 쉴드터널은 일률적으로 비배수 개념이 적용되고 있지만 시공 및 운영 과정에서 고질적인 누수 발생이 문제가 되고 있으며, 쉴드 세그먼트의 경우 토압 및 수압까지 고려한 설계로 인해 단면이 과다하게 증가되고 세그먼트 재료비 상승을 유발하고 있다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해 쉴드터널에 배수 개념을 적용한 부분배수형 쉴드터널에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 부분배수 쉴드터널의 적용 가능성을 평가하기 위해 축소모형실험을 통해 배수 및 비배수 조건에서의 토압 및 수압 변화를 측정하였다. 실험 결과를 통해 도출된 수압 저감 효과를 바탕으로 지하 수위 아래 위치한 쉴드터널 설계사례에 적용하여 구조 안정성을 검토하였고, 수압 저감을 통한 세그먼트 단면 축소 효과에 대해 평가하였다.

**검색어** : 쉴드터널, 세그먼트 단면, 부분배수, 수압 저감

## 1. 서론

최근 국가 교통망의 도심지 통과시 민원, 환경, 기존 노선과의 접속, 구조물 근접 등의 이유로 하저, 퇴적층, 경암 등의 복합지반에서의 터널공법의 적용이 요구되고 있으며, 이들 조건에서도 안전하게 시공이 가능한 쉴드(Shield) TBM에 대한 적용이 증가하고 있다(Jue et al., 2012). 쉴드터널 공법은 비교적 연약한 지반에서 원형단면의 쉴드라 불리는 강재로 된 통을 지중으로 밀어올리고, 그 내부에서 토사의 붕괴유동을 막으면서 굴착과 동시에 세그먼트라는 터널 라이닝을 조립하며 전진해 가는 비배수 방식의 터널공법을 말한다(Kim

\* 정희원 · 한국건설기술연구원 지반연구소 연구위원 (KICT · sjma@kict.re.kr)

\*\* 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원 (KICT · youngsublee@kict.re.kr)

\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원 (Corresponding Author · KICT · dmkim@kict.re.kr)

Received March 3, 2014/ revised May 12, 2014/ accepted February 6, 2015

et al., 2012). 하지만, 쉴드터널의 전체공사비는 NATM 터널 전체 공사비의 110~120% 정도로 비싸고, 세그먼트 라이닝은 쉴드터널의 직접공사비에서 약 25~40%로 가장 큰 비중을 차지하므로 합리적이고 경제적인 세그먼트 라이닝의 설계가 중요하다(Chang et al., 2011). 특히, 쉴드터널은 주로 지하수위 아래에 위치하는 경우가 많아 방수 및 배수처리가 터널 구조물의 품질에 크게 영향을 미친다(Kim et al., 2012).

기존 쉴드터널의 경우 일괄적으로 비배수 터널로 설계 및 시공되고 있으나, 비배수 설계임에도 불구하고 수팽창 지수재의 기능 상실 후에는 장기적인 누수관리가 불가능한 상황으로 누수 방지를 위한 과도한 뒤채움 주입으로 시공비만 증가하고 있는 현실이다(Kim and Ma, 2013). 또한, 토압 및 수압까지 고려한 비배수 설계에서는 안정성 확보 방안으로 쉴드터널 라이닝 단면을 증가시키게 되는데, 이로 인해 건설 재료 투입량이 증가하게 되어 재료비 상승을 유발하고 있으나 현실적으로 비배수 터널로서의 기능은 전혀 감당하지 못하고 있는 상황이다(Kim and Ma, 2013).

Ward and Pender (1981)의 경우에도 운영 중인 터널들에 대한 누수량 계측자료를 토대로 모든 터널은 궁극적으로 배수구처럼 거동한다고 보고하였다. 이는 비배수 터널로 건설하였더라도 장기적으로 구조물 열화 등의 원인으로 인해 누수가 발생하며, 따라서 터널은 궁극적으로 비배수 개념이 유지되지 않음을 의미하는 것이다(Shin et al., 2005). 만일, 쉴드터널에서 세그먼트 라이닝에 지하수 유입을 고려하거나 혹은 보다 적극적으로 배수 기능을 도입하면 지하수 배수에 의해 라이닝에 작용하는 하중을 감소시킬 수 있고, 결과적으로 세그먼트 두께를 감소시켜 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다. 이러한 시도의 일환으로 기존 비배수 개념의 쉴드터널에 배수 개념을 적용한 부분배수형 쉴드터널에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 부분배수 쉴드터널의 적용을 위해 배수 방안에 대한 검토를 실시하였고, 실제 지반에 작용하는 수압 변화를 파악하고자 비배수 및 배수 조건에서 쉴드터널에 작용하는 토압 및 수압의 변화를 측정할 수 있는 축소모형실험장치를 개발하였다. 모형실험을 통해 도출된 수압 저감 효과를 바탕으로 지하수위 아래에 위치한

쉴드터널 설계사례에 적용하여 부분배수형 쉴드터널의 구조 안정성을 검토하였다.

## 2. 배수 유효성을 이용한 부분배수 쉴드터널

부분배수 개념이 적용된 쉴드터널에서는 유입되는 지하수의 배수 방안이 필수적으로 요구되는데, Fig. 1은 배수 유효성의 위치 및 지하수 흐름을 나타낸 것이다. 세그먼트 4면에 배수용 유효성을 설치하여 지하수 유입시 중력방향으로 자연유도 시키게 되며, 중력 방향으로 유도된 지하수는 쉴드터널에 구현된 배수구를 통해 터널 내부로 자연 유입되고 터널 경사에 의해 자연적으로 배출되게 되기 때문에, 인력 및 장비에 의한 추가적인 유지 관리가 필요하지 않는다. 또한, 금형몰드에서 탈형하는 방식의 공장생산 제품인 쉴드 세그먼트 금형몰드 제작시 배수용 유효성 위치만 구현하게 되면, 시공과정의 변경이나 추가적인 생산비용 없이 배수시스템이 적용된 쉴드 세그먼트의 생산이 가능하다. 특히, 기존에 누수방지를 위해 쉴드터널 배면에 충전되던 그라우트재를 사용하지 않고, 모래 등과 같은 투수성 재료를 충전함으로써 효과적인 지하수 배수를 유도하고 환경유해 재료로 인한 지반오염을 방지할 수 있다.

## 3. 배수조건에 따른 쉴드터널 모형실험

### 3.1 축소모형실험장치

쉴드터널에서 부분적인 배수 기능을 도입할 경우 지하수 배수에 따라 터널에 작용하는 하중의 감소 가능성을 평가하기 위해, 축소모형실험장치를 개발하여 지중수력 및 배수 조건의 변화에 따른 쉴드터널 작용 압력을 분석하였다(Choi et al., 2013). 모형실험을 실시하는 경우에는 모형과 원형의 특성이 상사성을 갖추고 있어야 하며, 본 연구에서는 Froude의 상사법칙을 고려하여 모형실험장치를 제작하였다(Park, 2013). Froude의 상사에 의해 축척을 결정할 경우에는 모형의 물리적 성질, 모형의 제작 가능성, 비용 등을 고려하여 결정하게 된다. 축척이 너무 작을 경우에는 일명 축척효과(Scale effect)에 의해 모형과 원형의 상사관계가 성립하지 않을

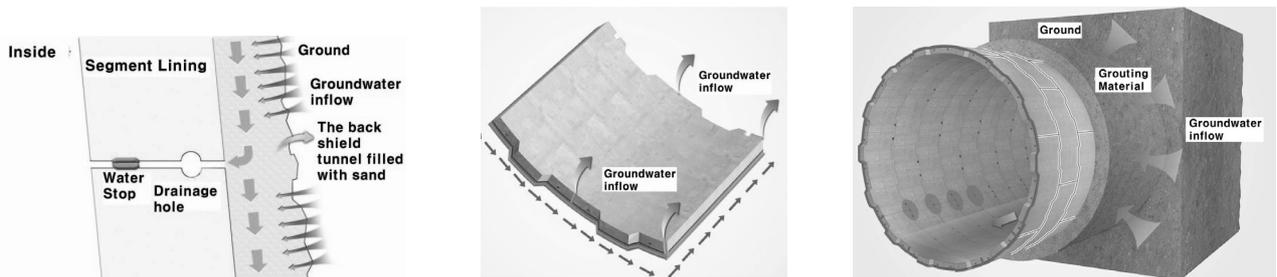


Fig. 1. Position of Drainage Hole in Segment and Underground Water Flow

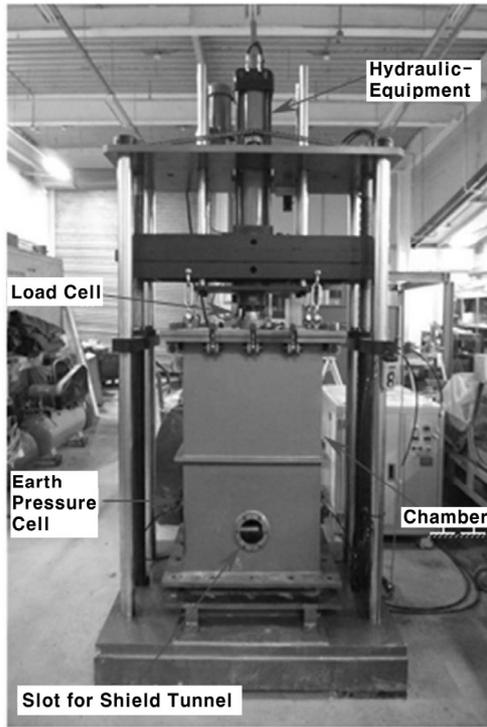


Fig. 2. Model Experiment

수 있으므로 적절한 규모의 축척을 결정하는 것이 중요하다(Park et al, 2013). 축소모형실험의 목적은 비배수 조건일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 전응력이 배수조건일 때 감소하는 것을 확인하는 것으로 모형실험장치는 실제 쉴드터널 직경을 고려하여 1/60로 제작하였다.

Fig. 2는 개발된 축소모형실험장치를 나타낸 것인데, 토조, 유압 장치, 외관, 내관 및 계측장치로 구성되어 있고 지반을 모사하는 시료는 Table 1의 표준사를 사용하였다. 토조는 폭 0.6m, 길이 0.6m, 높이 1.0m, 부피 0.36m<sup>3</sup>의 크기로 제작되었는데, 하단부에는 쉴드터널 모형을 설치할 수 있는 구멍을 구현하였다. 토조의 상부관 중앙에는 심도에 따른 토압 변화를 표현하고 사질토에 가해지는 하중의 측정 및 조절이 가능한 유압장치와 로드셀을 설치하였고, 로드셀 하부에는 지반에 하중을 균등하게 주기 위한 가압판을 설치하였다. 가압판에는 다수의 구멍을 형성하여 하중을 가하면서 지하수가 자유롭게 이동할 수 있도록 하여 토조 외부에서 지중 내에 작용하는 수압조절을 용이하도록 하였다. 또한, 토조 옆면에는 수압의 변화를 측정하고 조절하기 위해 수동식

Table 1. Material Property of Sand

Density(g/cm <sup>3</sup> )	Specific Gravity	Coefficient of Permeability(m/sec)	Coefficient of Uniformity	Unified Soil Classification System
1.57	2.63	2.71E-4	1.46	SP

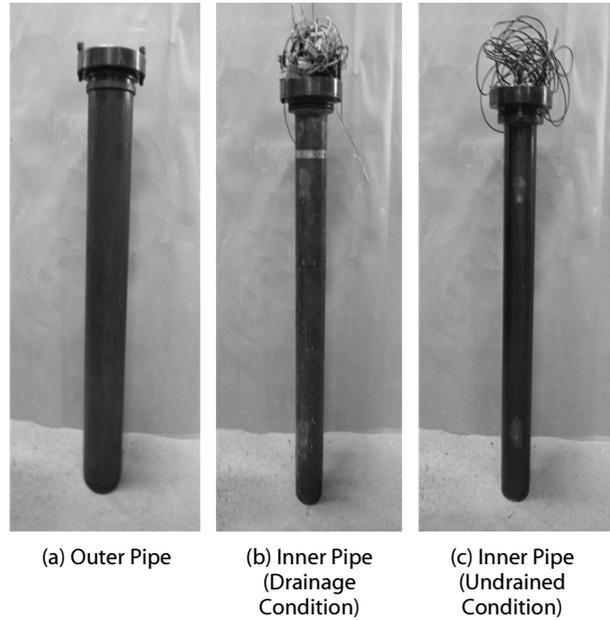


Fig. 3. Inner Pipe and Outer Pipe of Shield Tunnel Model

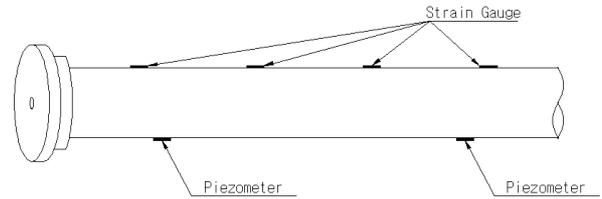


Fig. 4. Sensor Position of Inner Pipe

수압조절장치를 설치하였다.

Fig. 3(a)의 쉴드터널 모형 외관은 지반 굴착시 원지반과 세그먼트 라이닝 사이의 지반 이완영역을 모사하기 위한 장치로서 외경 100mm, 내경 80mm로 제작하였다, Figs. 3(b), (c)의 모형 내관은 쉴드터널 라이닝을 모사한 것으로 외경 75mm, 내경 60mm로 제작하였는데 모형 내관 표면에 직경 5mm의 지하수 유입구를 25개소 설치하고, 내부에 필터를 설치하여 지하수는 통과가 가능하지만 표준사는 통과가 안되는 모형과 유입구가 없는 모형을 따로 제작하여 배수 및 비배수 조건에서 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 모형 내관에 설치된 계측장치를 나타낸 것이다. 계측장치는 토조 및 모형 내관에 작용하는 토압을 측정하기 위한 토압계, 수압을 측정하기 위한 간극수압계, 모형 쉴드터널 라이닝의 거동을

측정하기 위한 변형률계를 설치하였다. 토압계는 쉘드터널 모형과 같은 높이의 토조 양측면에 설치하였고, 간극수압계는 배수구 및 집수장치가 모형 쉘드터널 하단에 설치되는 것을 고려하여 내관 아래 2개소 설치하였으며, 변형률계는 내관 위 중앙부 및 측면부에 각각 2개소 설치하였다.

### 3.2 실험 방법 및 조건

배수조건에 따른 모형실험 방법은 다음 순서로 진행되었다. 먼저, 모형 외관을 토조 내부에 설치하고 그 위에 표준사를 90cm 높이까지 자유 낙하 방식으로 채웠다. 그리고 지반에 균등한 압력을 가하면서 지중응력을 모사하기 위하여 상부 가압관(60cm×60cm)에 로드셀을 부착하고 하중을 재하 하였는데, 재하응력은 0.0278~0.1390MPa로 지하 2.86~14.30m의 지반이 받고 있는 압력을 모사하였다.

그 다음 외관을 제거하고 배수 및 비배수 조건의 쉘드터널 모형 내관을 설치하고, 하중을 가한 상태에서 토조 내에 물을 주입하면서 표준사를 포화시켜 지하수위 아래에 사공된 쉘드터널을 모사하였다.

토조 내 수압을 0.05MPa로 가압한 후 유지한 상태에서 토압을 1분당 0.0278MPa 씩 증가시켜 0.139MPa까지 가압하며 데이터를 측정하였다. 이후 수압 역시 0.10MPa, 0.15MPa, 0.20MPa로 단계적으로 증가시키고 일정하게 유지한 상태에서 토압을 0.139MPa까지 증가시키며 데이터를 측정하였다.

실험은 Table 2와 같이 총 4가지 수압 조건에 대해 비배수 조건 2회, 배수 조건 5회씩 실시하여, 총 28회를 실시하였다.

### 3.3 실험결과

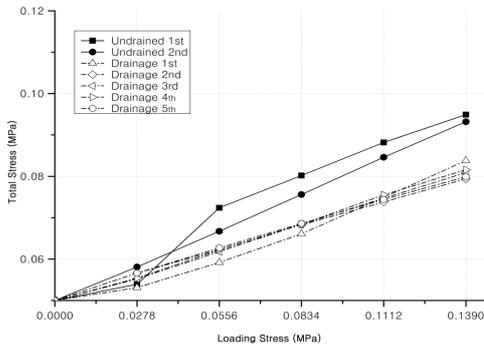
전응력 변화를 평가하기 위해 수압이 일정하게 유지된 상태에서 압력을 0.0278MPa 씩 0.139MPa까지 증가시키면서 토압계의 변화를 측정하였다. 이 때 토압계에서 측정되는 압력은 토압과 수압의 합이며 이론적으로는 배수 조건에서 수압이 감소하는 만큼 지반의 유효응력이 증가하기 때문에 비배수 조건과 배수 조건에서의 압력증가량이 같아야 한다(Lee, 1996). 그러나 측정 결과 비배수 조건에서의 압력증가량이 배수조건보다 더 크게 나타나, 실제로는 배수 조건에서 수압이 감소한 만큼 유효응력이 증가하지 않는 것으로 나타났다(Choi et al., 2013).

Fig. 5는 배수 및 비배수 조건에 따른 전응력의 변화를 나타낸 것이다. HP05에서 HP20까지의 4가지 수압 조건에서 실시한 비배수 실험에서는 평균 응력증가율이 0.270, 0.263으로 나타났고, 배수 실험에서는 평균 응력증가율이 0.237, 0.172, 0.209, 0.206, 0.190로 나타났다. 특히, 배수 조건 4회차 실험의 전응력 변화가 비배수 조건과 유사하게 나온 것을 확인할 수 있는데, 지하수 유출량이 다른 회차 실험보다 크게 나타났고 지하수의 이동 속도 증가로 유효응력 증가 또한 커짐에 따라 전응력 증가율이 배수 실험과 차이가 크게 나타나지 않았다.

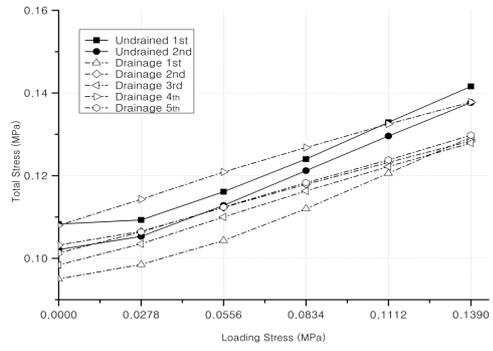
Fig. 6은 배수 및 비배수 조건에 따른 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 간극수압의 변화를 평가하기 위해 수압을 일정하게 유지한 상태에서 상부 재하 압력을 0.0278MPa씩 0.139MPa까지 증가시켰다. 비배수 실험 1회차에서 수압은 0.05MPa, 압력이 0.0MPa에서 0.139MPa로 증가할 경우 간극수압은 0.0500MPa에서 0.0535MPa로 증가하였고, 측정된 간극수압 증가량을 외부에서 가해진 수압으

Table 2. The Experimental Condition

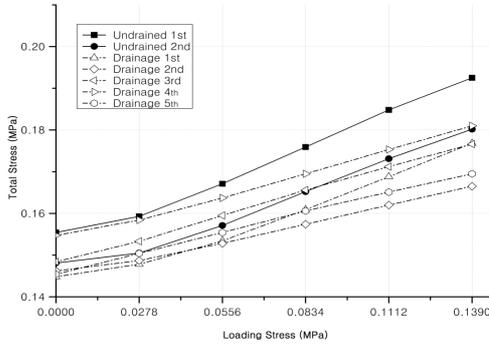
Division	Time (sec)	Hydraulic Pressure (MPa)	Earth Pressure (MPa)	Division	Time (sec)	Hydraulic Pressure (MPa)	Earth Pressure (MPa)	Note
HP05	00 ~ 60	0.05	0.0278	HP15	721 ~ 780	0.15	0.0278	
	61 ~ 120		0.0556		781 ~ 840		0.0556	
	121 ~ 180		0.0834		841 ~ 900		0.0834	
	181 ~ 240		0.1112		901 ~ 960		0.1112	
	241 ~ 300		0.1390		961 ~ 1,020		0.1390	
HP10	301 ~ 360	0.05 → 0.10	0.0000	HP20	1,021 ~ 1,080	0.15 → 0.20	0.0000	Hydraulic Pressure Change
	361 ~ 420	0.10	0.0278		1,081 ~ 1,140	0.20	0.0278	
	421 ~ 480		0.0556		1,141 ~ 1,200		0.0556	
	481 ~ 540		0.0834		1,201 ~ 1,260		0.0834	
	541 ~ 600		0.1112		1,261 ~ 1,320		0.1112	
	601 ~ 660		0.1390		1,321 ~ 1,380		0.1390	
	661 ~ 720	0.10 → 0.15	0.0000				0.0000	Hydraulic Pressure Change



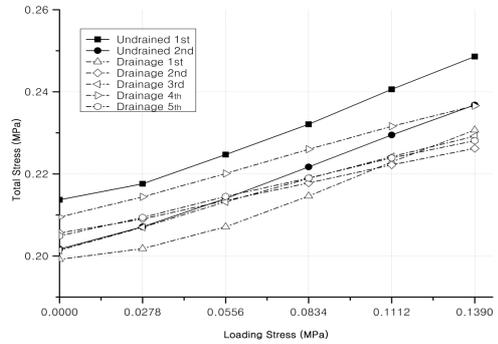
(a) Hydraulic Pressure 0.05MPa (HP05)



(b) Hydraulic Pressure 0.10MPa (HP10)

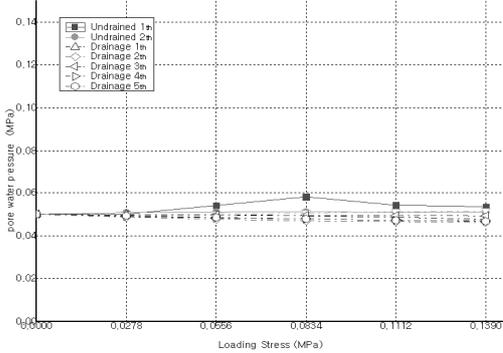


(c) Hydraulic Pressure 0.15MPa (HP15)

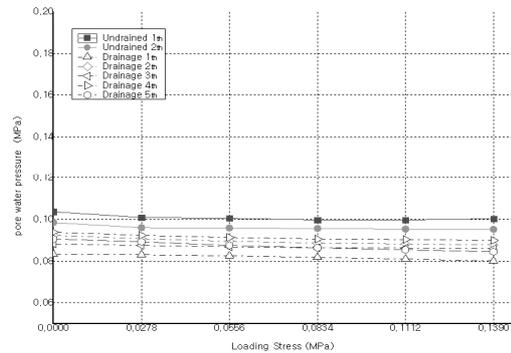


(d) Hydraulic Pressure 0.20MPa (HP20)

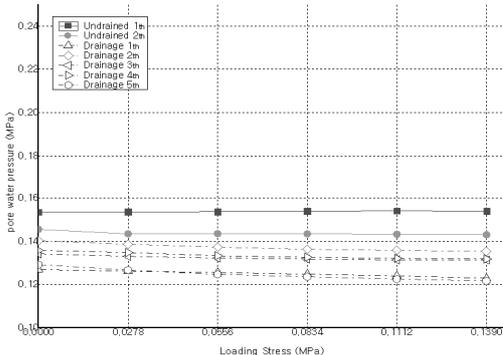
Fig. 5. Change in Total Stress due to Loading Stress



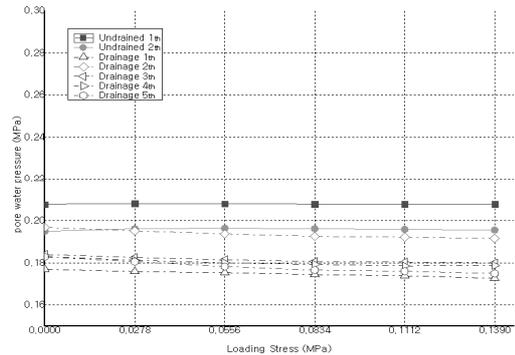
(a) Hydraulic Pressure 0.05MPa (HP05)



(b) Hydraulic Pressure 0.10MPa (HP10)



(c) Hydraulic Pressure 0.15MPa (HP15)



(d) Hydraulic Pressure 0.20MPa (HP20)

Fig. 6. Change in Pore Water Pressure due to Loading Stress

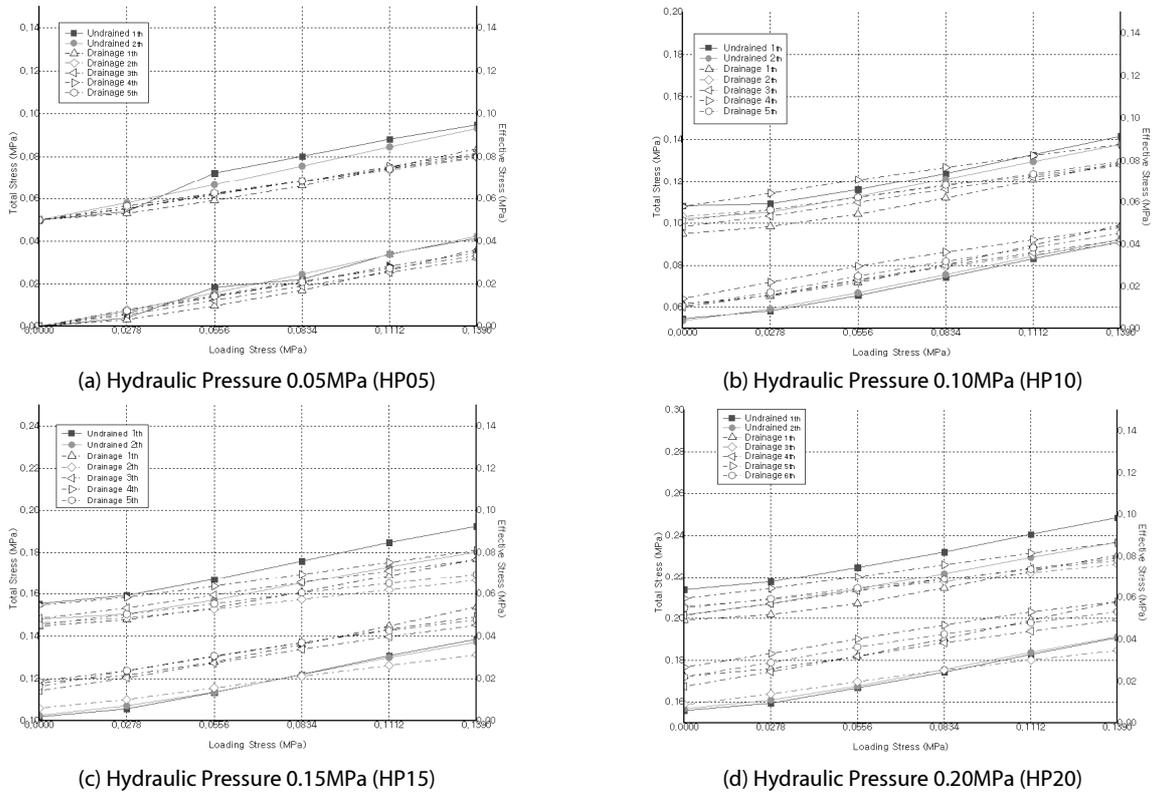


Fig. 7. Change in Effective Stress due to Loading Stress

로 나는 간극수압 증가율은 0.025로 나타났다.

비배수 실험에서 평균 간극수압 증가율은 0.001, -0.008로 나타나 동일한 수압이 작용할 때 간극수압은 거의 변화없이 일정하게 유지되었다. 반면에 배수조건에서 계산된 평균 간극수압 증가율은 -0.025, -0.033, -0.018, -0.027, -0.045로 나타났고, 간극수 유출과 함께 수압이 점차 감소하는 양상이 나타났다. 단, 완전배수 상황에서는 간극수압이 0으로 감소해야 하지만, 본 실험은 배수 조건을 조절하였기 때문에 간극수압의 감소량이 적었고 완전히 0으로 감소하지는 않았다.

Fig. 7은 비배수 및 배수 조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화를 나타낸 것인데, 그래프 위쪽은 전응력, 아래쪽은 유효응력을 나타내고 있다. 재하응력 증가에 따른 전응력의 증가량은 비배수 실험 결과가 크고, 유효응력 증가량은 배수 실험 결과가 큰 경향을 나타내었다. 즉, 쉴드터널에 작용하는 토압과 수압의 합인 전응력은 배수 조건보다 비배수 조건에서 더 크다는 것으로 보여 주고 있으며, 토압이 동일한 상황에서 배수 조건에서는 터널에 작용하는 수압이 비배수 조건보다 저감된다는 것으로 알 수 있었다.

### 3.4 수압 저감 효과

모형실험결과를 통해 얻어진 수압 저감 효과를 평가하기 위해

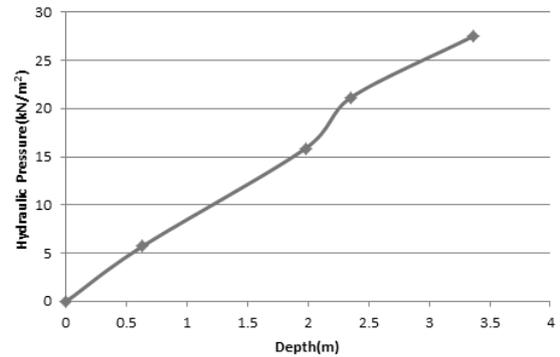


Fig. 8. Hydraulic Pressure According to Reduction Ratio

배수 조건 실험에서의 토압 및 수압의 감소비율을 산정하였다. Fig. 8은 비배수 및 배수 조건에서 토압 및 수압을 비교하여 감소율을 산정하고 심도에 따른 수압의 감소를 그림으로 나타낸 것이다. 지반 심도 1.0~20.0m까지 수압 감소 경향을 적용하면 깊이 x에 대한 수압 y의 관계를 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = -\frac{2.4635}{H}x^2 + 9.0726x - 0.0009H \quad (1)$$

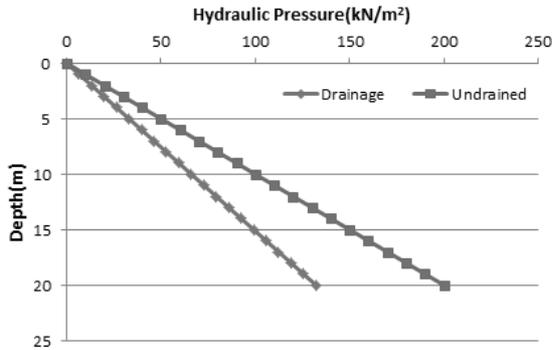


Fig. 9. Hydraulic Pressure of Drainage and Undrained Condition

여기서,  $H$  = 터널하단에서 지하수위까지의 깊이

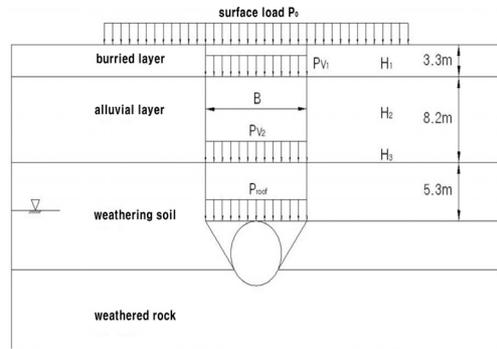
Fig. 9는 Eq. (1)을 이용하여 20m 심도까지 비배수 및 배수 조건에서의 작용 수압을 비교한 것으로 비배수 조건에서 작용하는 정수압과 달리 배수 조건에서는 수압 저감 효과를 확인할 수 있었다. Lee (1996)는 배수개념의 터널 설계시 지하수위 저하가 크지 않을 경우 침투압을 고려하여 작용수압을 0으로 보는 것은 적절하지 않다고 평가하였다. 그러나 배수 터널에 작용하는 수압에 대한 실제적인 계측 연구는 부족한 상황으로, 실무에서는 지하수 흐름에 의한 침투수압 및 유효 응력을 고려하여 경험식에 의거하여 수압을 고려하는 경우가 대부분이다.

본 연구에서는 쉴드터널 축소모형실험을 통해 지하수위 아래 위치한 쉴드터널에서 배수 조건의 경우 터널에 작용하는 수압의 감소 효과를 확인할 수 있었다. 도출된 수압 저감 효과를 실제 설계에 적용할 경우 세그먼트 라이닝에 작용하는 단면력 감소를 통해 보다 경제적이고 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다. 다만 본 실험은 제한된 토질 및 하중 조건에서 실시한 모형실험이므로 추후 실제 설계에 적용하기 위해서는 다양한 조건을 고려한 심도 있는 추가연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

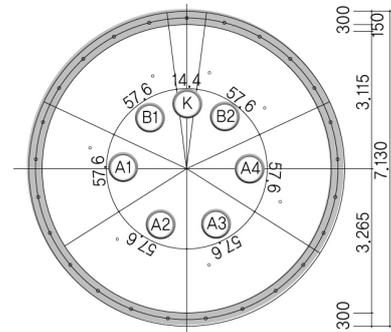
#### 4. 배수 설계의 쉴드터널 적용

##### 4.1 개요

배수 조건에 따른 쉴드터널 모형실험을 통해 도출된 수압 저감 효과를 적용하였을 경우 하중 저감으로 인한 단면력 감소를 평가하



(a) Ground Condition



(b) Cross-section of Subway Shield Tunnel

Fig. 10. Design Case of Seoul Subway Line-7

기 위해 기존 설계 사례를 바탕으로 구조 안정성 검토를 실시하였다. 설계 사례는 서울 지하철 7호선 000 공구의 쉴드터널 구간으로서 Fig. 10은 쉴드터널 구간의 지반 조건 및 실제 설계 단면을 나타낸 것이다. 설계 사례에서는 지하수위가 터널 천단면 위 1.4m 지점에 위치하고 있고, 이로 인해 작용하는 수압 및 토압에 의해 세그먼트 라이닝 두께는 0.3m, 외경은 7.13m, 내경은 6.53m로 설계되었다.

구조 안정성 평가에서는 Fig. 10(a)의 대상 지반에서 지하수위를 다양하게 변화시켜 가면서 기존 비배수 설계 방식에 따라 작용 수압 및 토압을 고려한 세그먼트 단면 두께를 산정하였고, 축소모형 실험을 통해 도출된 수압 저감 효과를 적용하여 동일한 안전계수를 갖는 세그먼트 단면 두께를 산정하여 그 차이를 비교하였다. 그리고 설계 사례에서 적용한 것과 같이 세그먼트 라이닝의 콘크리트 설계기준강도는 48MPa, 철근의 항복강도는 400MPa로 고정하였고, Table 3의 하중조합을 적용하여 지반조건 변화에 따라서 비배수

Table 3. Load Combination

Load Combination	Self Weight	Yielding Load		Hydraulic Pressure		Note
		Vertical Load	Horizontal Load	Vertical Load	Horizontal Load	
CASE I	1.54	1.54	1.8	1.54	1.8	Strength Design Method
CASE II	0.99	0.99	1.8	0.99	1.8	
CASE III	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	Serviceability

Table 4. Case Evaluation in accordance with an Underground Water Level

Division	Standard Factor of Safety Condition	Drainage Condition
Ground condition		
Level	Tunnel from the Top (+)1.4m	Tunnel from the Top (+)10.0m
CASE	CASE 1 : Undrained Condition	CASE 2 : Undrained Condition CASE 3 : Drainage Condition
Division	Undrained Condition / Rise in Water Level	Drainage Condition / Rise in Water Level
Ground condition		
Level	Tunnel from the Top (+)46.8m	
CASE	CASE 4 : Standard Factor(Water Level Rise)	CASE 5 : Factor of Safety(Fixed Amount of Rebar) CASE 6 : Factor of Safety(25% Reduction in Rebar) CASE 7 : Factor of Safety(50% Reduction in Rebar)

및 배수 조건으로 세그먼트 두께와 철근량 감소 가능 여부를 평가하였다.

#### 4.2 구조 안정성 평가 결과

Table 4는 구조 안정성 평가 CASE를 나타낸 것이다. 설계 사례의 지반 조건에 대해 비배수 조건을 검토하여 산출된 P-M 상관도, 강도감소계수에 의해 산출된 설계단면력과 하중 조건 및 조합에 따른 극한단면력과의 비인 안전계수를 기준안전계수로 설정하였다. 수위가 상승했을 경우 비배수 및 배수 조건의 쉴드터널이 기준 안전계수를 만족시키기 위한 세그먼트 두께와 철근량을 산출하여 배수 조건에서의 단면력 감소 효과를 평가하였다. 설계 사례인 CASE 1의 경우에는 세그먼트의 두께는 300mm, 철근 규격은 H19가 150mm 간격으로 배치되었고, Fig. 11의 P-M 상관도 분석 결과 7.0의 안전계수가 산출되었다.

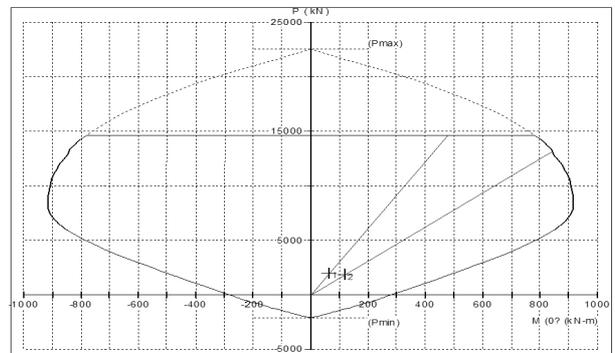


Fig. 11. P-M Diagram of CASE 1

CASE 2, 3의 경우는 비배수 및 배수 조건에서 수압 차이의 발생이 예상되는 지하수위 10m에 대해 구조 안정성을 평가한

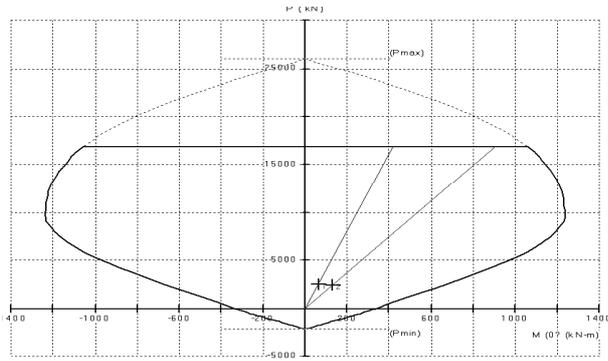


Fig. 12. P-M Diagram of CASE 2

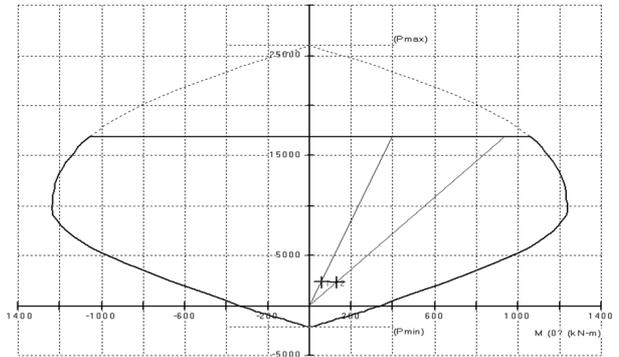


Fig. 13. P-M Diagram CASE 3

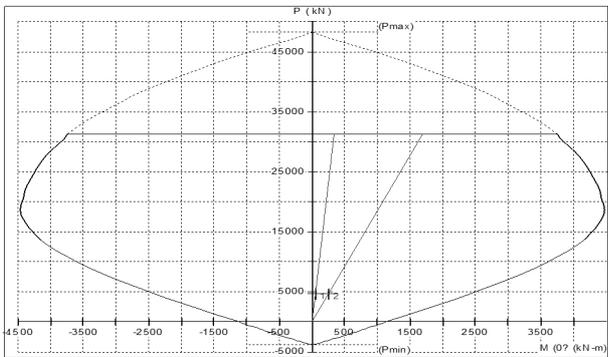


Fig. 14. P-M Diagram of CASE 4

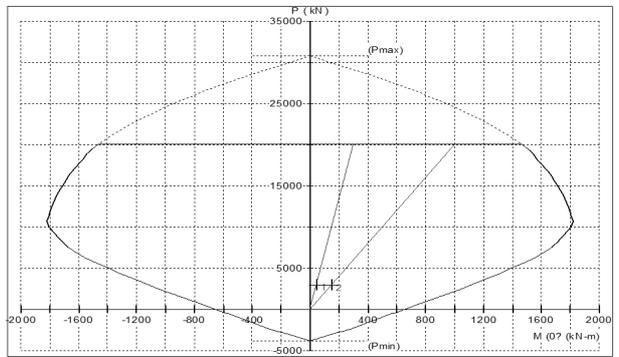


Fig. 15. P-M Diagram of CASE 5

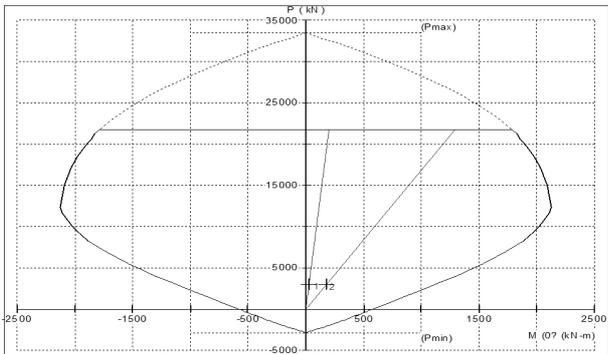


Fig. 16. P-M Diagram of CASE 6

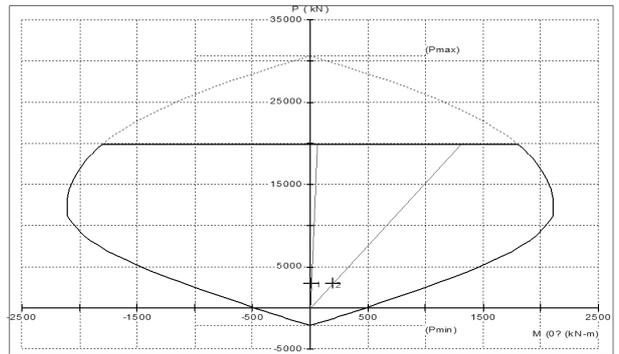


Fig. 17. P-M Diagram of CASE 7

결과이다. 두 경우 모두 세그먼트 두께는 350mm, 철근 규격은 H19로 동일하게 설계되었고, 안전계수는 Figs. 12 and 13의 P-M 상관도 분석 결과 6.8, 7.0으로 유사한 결과를 보였다. 이는 지하수위 10m 이내에서는 실제적인 수압 저감 효과가 나타나지 않음을 알 수 있다.

CASE 4는 수위가 지표 위 30m에 위치하는 경우 비배수 설계를 적용한 것이고, Fig. 14는 이때의 P-M 상관도를 나타낸 것이다. 구조 안정성 평가 결과 세그먼트의 두께는 650mm, 철근 규격은 H25까지 증가시켜야만 안전계수 6.7로 기준 안전계수와 유사한

결과를 보이는 것으로 나타났다. CASE 5는 같은 조건에서 배수 설계를 적용하고 철근 규격을 H25로 고정된 경우인데, 세그먼트 두께는 기존 650mm에서 400mm까지 감소가 가능하였고 이때의 안전계수는 Fig. 15에서 6.7로 동일하게 나타났다.

이러한 결과는 일률적인 비배수 설계의 실드터널에서 축소모형 실험을 통해 확인한 수압 저감 효과를 적용하여 배수 설계로 변경할 경우, 적정 지하수위 이상에서는 동일한 안정성을 유지하면서도 세그먼트 단면 두께를 축소시킬 수 있음을 보여 주는 것이다.

배수 설계 적용에서 세그먼트 두께 및 철근량 감소에 따른 효율을

높이기 위해 철근량을 25%, 50% 감소시킨 CASE 6, 7에 대해 추가적인 평가를 수행하였다. 철근량을 25%를 감소시키고 규격을 H22으로 적용한 CASE 6의 경우에는 세그먼트 두께가 기존 650mm에서 450mm로 축소 가능하였고, Fig. 16의 P-M 상관도 분석 결과 안전계수는 7.3으로 기존 안전계수 이상을 나타내었다.

그리고 철근량을 50% 감소시키고 규격 H19를 적용한 CASE 7의 경우에는 세그먼트 두께가 기존 650mm에서 500mm까지 축소 가능하였고, Fig. 17의 P-M 상관도 분석 결과 안전계수는 6.7로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 축소모형실험을 통해 배수 및 비배수 조건에서의 토압 및 수압 변화를 평가하였다. 그리고 축소모형실험 결과를 통해 도출된 수압 저감 효과를 지하수위 아래 위치한 쉴드터널 설계 사례에 적용하여 구조 안정성을 검토하고 배수 개념의 쉴드터널에서 얻을 수 있는 수압 저감 및 세그먼트 단면 축소 효과에 대해 검토하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존 비배수조건인 쉴드터널의 문제가 되는 누수방지를 위하여 쉴드터널 세그먼트에 배수용 유로홈을 설치하면 지하수 유입시 중력방향으로 자연유도 시키는 배수시스템의 적용으로 추가적인 유지 관리가 필요없이 배수가 가능하여 효율적인 누수방지가 가능하다.
- (2) 배수조건인 쉴드터널 축소모형실험에서 유효응력증가량을 계산한 결과 배수조건에서 평균 0.0519MPa로 비배수조건인 0.0411MPa보다 크게 나타나 배수조건에서 심도에 따라 수압이 감소되는 것을 알 수 있었고, 이러한 수압모형을 적용하면 터널의 작용하중을 감소시킬 수 있는 것으로 검토되었다.
- (3) 축소모형실험을 통한 배수모형을 적용해 쉴드터널 단면축소방안 연구결과, 철근량이 고정될 경우 배수개념의 쉴드터널의 세그먼트 두께는 비배수개념의 쉴드터널보다 약 40% 감소하였고, 세그먼트 두께와 철근량을 현장조건을 고려하여 조건별로 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- (4) 부분배수 조건에서 수압저감효과는 터널 상단에서 10m 이상 위에 수위가 존재해야 세그먼트 두께 감소 또는 철근량 감소가 가능하다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 시행한 2012 건설기술혁신사업 (과제명 : 배수 유로홈을 이용,

수압 저감을 통한 공사비 절감 슬림형 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발)의 지원으로 수행되는 것으로 연구를 가능케 한 국토해양부에 감사드립니다.

## References

- Chang, S. H., Lee, G. P., Choi, S. W. and Bae, G. J. (2011). "State of the art of segment lining in shield tunnel and statistical analysis of its key design parameters." *J. of the Korean Society for Rock Mechanics*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 21, No. 6, pp. 424-438 (in Korean).
- Choi, G. M., Yune, C. Y. and Ma, S. J. (2013). "An experiment with a model to study action of shield-tunnel lining subject to drain condition." *Proc. of 2013 Fall Conf. on Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, pp. 1224-1229 (in Korean).
- Jue, K. S., Sim, D. H., Kim, K. C., Jang, S. J., Choi, C. R. and Han, S. H. (2012). "A study of key items on the shield tunnel design for passing through under the han-river." *Proc. of 2012 Spring Conf. on Korean Society for Railway*, Korean Society for Railway, pp. 1101-1106 (in Korean).
- Kim, D. M. and Ma, S. J. (2013). "An assessment study on the optimal size of the drainage furrow in the partial drain shield tunnel." *Proc. of 2013 Conf. on Korean Society of Civil Engineers*, KSCE (in Korean).
- Kim, D. M., Ma, S. J. and Gil, H. J. (2012). "Study on application possibility for partial drain concept of shield tunnel using drainage hole." *Proc. of 2012 Conf. on Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp. 1346-1349 (in Korean).
- Lee, I. M. (1996). "A study of underground water problem in tunneling." *J. of the Korean Society of Explosives and Blasting Engineering*, KSEE, Vol. 14, No. 3, pp. 19-31 (in Korean).
- Park, D. H. (2013). *A study on hydraulic characteristics of circular blocks installed around pier*, Ph.D. Dissertation, University of Dong-A, Busan, Korea, pp. 55-56 (in Korean).
- Park, M. J., Woo, J. Y., Lee, J. H. and Song, Y. S. (2013). "Analysis of curved-channel characteristics on sloping drop structure using hydraulic model experiments." *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation, KOSHAM*, Vol. 13, No. 3, pp. 168-169 (in Korean).
- Shin, J. H., An, S. R. and Shin, Y. S. (2005). "Pore water pressure development mechanism and sustainability of tunnel linings." *Proc. of 2005 Conf. on Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp. 2958-2965 (in Korean).
- Ward, W. H. and Pender, M. J. (1981). "Tunnelling in soft ground-general report." *Proc. the 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 4, pp. 261-275.