

바닥배수판을 이용한 터널 배수시스템의 통수능 평가

Evaluation of Drain Capacity in Tunnel Drainage System using Drainboard

배규진¹, 이규필*², 이성원³, 신휴성⁴

Bae, Gyu-Jin · Lee, Gyu-Phil · Lee, Sung-Won · Shin, Hyu-Soung

Abstract

This study proposes a new concept of a tunnel central drainage system by using a drain board to make a breakthrough on difficulties in the installation of conventional drainage system and draw-down of its drain capacity especially in long tunnels. A fundamental study has been performed for evaluation of the drain capacity of the planar drainage system adopted in this study. In fact, the system proposed makes possible to omit the side, transverse as well as central drainage pipes required in the conventional system, even if its drain capacity and any guideline for design are not available to date. In this circumstance, it is carried out to investigate the correlation between drain capacities and, shapes and positions of the columns of the drain board in terms of a variety of water inflows through hydrological model tests. It is shown from the tests that a drain capacity is highly influenced by the shape and the distance between the columns of a drain board in flowing direction, and a round rectangular shape of the columns leads to the highest capacity of drainage. And also, the shorter distance between the columns in flowing direction, the higher drain capacity would be achieved.

Keywords: Tunnel drainage system, drainboard, drainage capacity, hydrological model test

요 지

본 연구에서는 터널구조물 장대화로 인한 기존 배수시스템의 시공상의 어려움과 기능 저하문제 등을 해결하기 위하여 바닥배수판을 이용한 새로운 터널배수시스템을 제안하고 성능평가를 위한 기초연구를 수행하였다. 제안된 배수시스템은 기존의 측방향 배수관, 횡방향 배수관 및 유공관 등이 생략 가능한 배수시스템이다. 그러나 바닥배수판의 형상 등을 고려한 통수능 분석 및 설계기준 등이 정립되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 수리모형 실험을 통하여 바닥배수판의 돌기부 형상 및 위치와 유량조건별 통수능의 상관관계를 분석하였다. 바닥배수판 돌기부의 형상 및 유수방향 간격은 흐름에 대한 저항성 차이로 인하여 통수능에 큰 영향을 미치며, 앞뒤동근형 돌기부 형상이 가장 통수능 확보에 유리한 것으로 나타났다. 또한 돌기부의 유수방향 간격이 좁을수록 바닥배수판의 통수능을 향상시킬 수 있다.

주요어: 터널배수시스템, 바닥배수판, 통수능, 수리모형실험

1 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구부장

*2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (freely@kict.re.kr)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원

4 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원

1. 서론

터널 구조물의 배수시스템은 사용목적에 따라 다소 상이하나 일반적으로 측방향 배수관, 횡방향 배수관 및 유공관 등으로 구성되어 있다. 철도터널의 경우 유공관 설치 및 골재 포설 등의 작업 공정이 필요하며, 터널 연장이 장대화될 경우 배수용량 증가로 인하여 대형 유공관이 설치되어, 일본에서는 최대 900mm 직경의 대형 유공관이 시공된 사례도 보고되고 있다. 이러한 대형 유공관 시공시에는 상대적으로 굴착 폭이 좁은 철도터널의 특성상 트렌치 굴착 이외의 다른 공정의 진행이 어렵다. 또한 도로터널의 경우 콘크리트 라이닝 지점부의 배수시스템 시공은 수차례에 걸친 복잡한 작업공정으로 진행되며, 이로 인하여 시공기간 및 시공비의 증가가 불가피한 실정이다. 따라서 터널구조물 장대화에 따르는 배수시스템 시공상의 어려움과 기능 저하문제 등을 해결하기 위한 새로운 요소기술의 연구개발이 필요한 실정이다.

바닥배수판을 이용한 터널구조물의 배수시스템은 전세계적으로 2개소의 현장에 시공 또는 계획중에 있으나, 바닥배수판의 배수성능 극대화를 위한 돌기부 형상 및 돌기부 설치간격 등과 같은 최적화 설계를 위한 기준 등

이 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 바닥배수판을 이용한 새로운 터널배수시스템 개발을 위한 기초연구로서 바닥배수판의 통수능 향상을 위한 수리모형 실험을 수행하였다.

2. 터널구조물 배수시스템

현재 일반적으로 적용되고 있는 터널구조물의 배수시스템은 지하수의 배수방법에 따라 완전 배수형, 부분 배수형 및 외부 방수형의 세 가지 형식으로 구분할 수 있으며, 기존 터널구조물의 배수시스템과 바닥배수판을 이용한 배수시스템 각각의 내용을 정리하면 다음과 같다.

2.1 기존 터널구조물 배수시스템

배수시스템은 오염되지 않은 터널내 유입용수를 갱구부에서 집수/방류 처리하며, 청소용수, 소화용수 및 기타 노면유입수 등과 같은 오염된 유입용수는 정화처리 후 방류하는 이원화된 방법을 적용하고 있으며, 이러한 분리정도에 따라 배수시스템은 부분분리 또는 완전분리 시스템으로 크게 양분할 수 있다 (그림 1 참조).

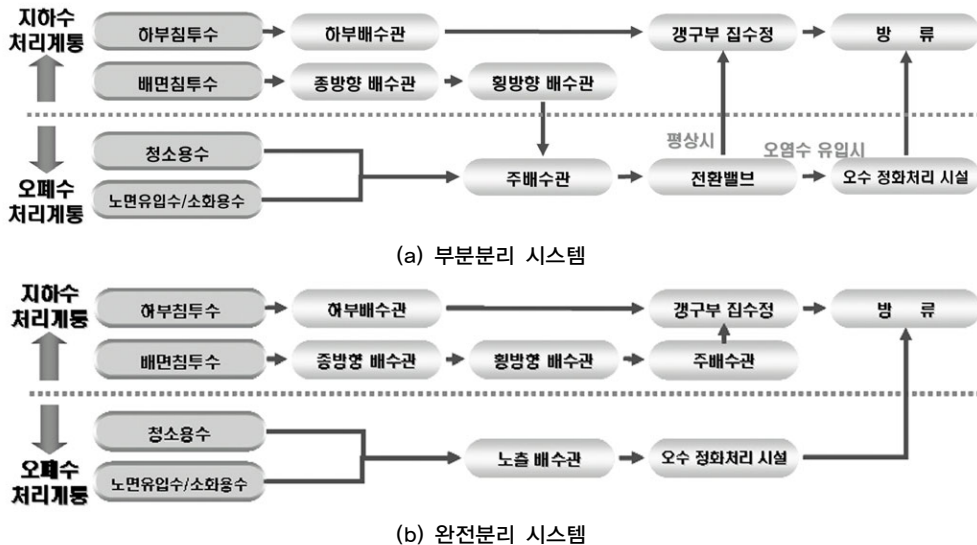


그림 1. 분리정도에 따른 터널 배수시스템

또한 터널구조물 배수시스템 구성은 철도터널, 지하철 터널 및 도로터널 등에서 다소 상이하나 일반적으로 측방 향 배수관, 횡방향 배수관 및 유공관 등을 적용하고 있다. 도로터널 완전분리 배수시스템의 배수관 개요도 및 연결부 상세는 그림 2~3과 같다 (Hohn, O. B. 등, 1996).

2.2 바닥배수판을 이용한 터널구조물 배수시스템

바닥배수판을 이용한 배수시스템은 국내에서 빌딩, 아파트, 대형매장 등과 같은 건축물의 최하층 바닥 배수를 위하여 널리 적용되고 있으나, 터널구조물에서의 적용은 최근 홍콩 black hill 터널에 적용된 것이 세계 최초이다. 국내 OO터널 현장에서 바닥배수판을 이용한 터널구조물 배수시스템의 시공이 계획되어있다.

Black hill 터널에 적용된 바닥배수판을 이용한 배수

시스템은 그림 4에서 나타낸 바와 같이 터널 굴착바닥면 정리 후 부직포, 바닥배수판 설치 및 그 상부에 콘크리트를 타설/양생하면 유로(流路)가 형성된 슬라브층이 시공된다. 이러한 콘크리트 슬라브를 기층 또는 보조도상으로 활용하게 되므로 기존 배수시스템의 측방향 배수관, 횡방향 배수관 및 유공관 등이 생략 가능한 배수시스템이다 (그림 4~6 참조).

3. 바닥배수판 통수량 분석을 위한 조사 및 분석

터널구조물 또는 지하주차장 등과 같은 지하생활공간에서의 지하수 배수를 위한 기존 바닥배수판의 형상은 통수량 극대화를 위한 최적화 개념이 적용되지 않고 통상적으로 원형 또는 사각형의 돌기부 형상이 적용되고

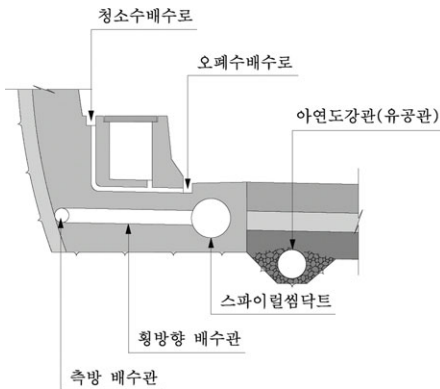


그림 2. 배수관 개요도

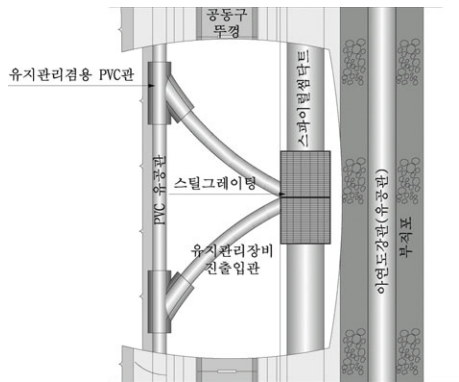


그림 3. 연결부분 평면도



(a) 인버트부 골재포설 및 정지작업

(b) 부직포 설치

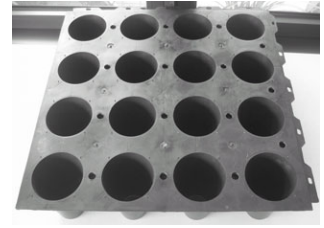
(c) 바닥배수판 설치

(d) 콘크리트 타설 및 양생

그림 4. 바닥배수판을 이용한 배수시스템 시공전경 (홍콩)



(a) 홍콩 Black hill 터널 적용 바닥배수판 (영국 H사)



(b) 국산 바닥배수판 (M사)

그림 5. 바닥배수판 샘플

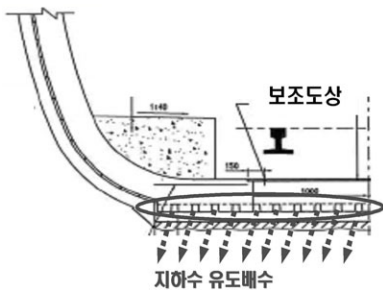


그림 6. 바닥배수판을 이용한 지하수 유도배수 개요

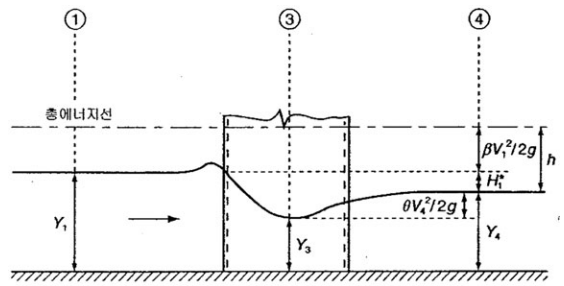


그림 7. Nagler식을 유도하기 위한 교각을 지나는 흐름의 측면도

있다. 즉 수리학적 측면에서 검토시 바닥배수판의 돌기부 형상은 배수판의 통수능력에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나, 이를 고려한 통수량 평가 기준은 마련되어 있지 않다.

바닥배수판의 돌기부는 교량의 교각과 같은 역할을 한다고 할 수 있다. 도로교설계기준(건설교통부, 2003)에 의하면 교량의 교각형상에 따른 하천흐름 저항계수를 표 1에서 보이는 바와 같이 규정하고 있으며, 이를 토대로 바닥배수판의 돌기부 형상과 통수능의 상관관계는 사각형 형상이 원형 또는 앞뒤둥근형에 비해 유수의 흐름을 저해하는 영향이 상대적으로 크다고 할 수 있다.

표 1. 교량의 교각형상에 따른 하천흐름 저항계수

→ → → (유수방향)			
형상	사각형	원형	앞뒤둥근형
저항계수	0.07	0.04	0.04

또한 Nagler는 교각의 형상 변화와 하천유량의 상관관계는 식 (1)에서 보이는 바와 같이 유량계수에 비례한다고 제안하였으며, 이러한 유량계수는 교각의 형상과 교량개도비 (M)로부터 구할 수 있다 (그림 7~8 및 표 2 참조). 교량개도비는 근본적으로 수축의 정도에 대한 척도이며, 그림 8에 나타난 바와 같이 일반적으로 단면 1의 수로 전체폭 (B)을 통과하는 총유량 (Q)과 단면 2의 폭 (b)을 통과하는 유량 (q)의 비이다. 교량개도비 1.0의 값은 교량이 하천 폭의 수축부를 가지고 있지 않으며, 모든 흐름은 개도부를 아무런 장애 없이 통과한다는 것

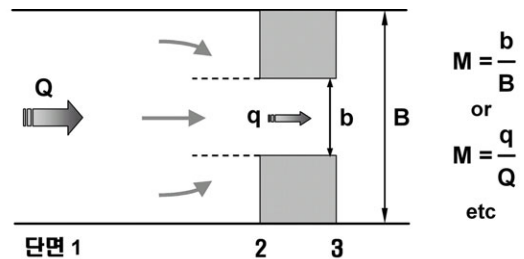




그림 8. 개도비 (M) 산정 개념도

표 2. 교각형상 변화에 따른 교량개도비와 유량계수의 상관관계

교각형상	교량개도비(M)				
	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
	유량계수(KN)	유량계수(KN)	유량계수(KN)	유량계수(KN)	유량계수(KN)
	0.91	0.87	0.86	0.87	0.89
	0.94	0.92	0.95	1.03	1.11

을 의미한다 (송재우, 2004).

$$Q = K_N b \sqrt{2g} \left(Y_4 - \theta - \frac{V_4^2}{2g} \right) \left(H_1^* + \beta \frac{V_1^2}{2g} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서, K_N : 유량계수 g : 중력가속도

바닥배수판의 교량개도비를 계산하면 약 0.5 정도이므로 단면형상 변화에 따라 유량계수는 1.24배 증가하는 것으로 나타났다 (그림 9 참조). 바닥배수판의 통수량 즉 유량은 유량계수와 비례관계에 있으므로 돌기부 형상변화를 통한 통수량의 증대 및 바닥배수판을 이용한 터널 구조물 배수시스템의 최적화 설계를 위한 자료로 활용할 수 있다.

한편, 윤성범 (1993) 등은 배수암거 수리모형 실험을 통하여 BOX 구조물 내부의 기동형상 및 유수방향에 대한 기동간 순간격 등에 따라 통수능은 큰 영향을 받는다 고 제안하였으며, 또한 도로교설계기준 및 유량계수 산정을 통한 바닥배수판의 통수량 분석은 바닥배수판 돌기부가 교량의 교각과 같은 역할을 수행하지만 교량의 교

각과는 달리 군주(群柱)를 이루고 있다는 특수상황을 충분히 반영하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 바닥배수판을 이용한 터널 구조물 배수시스템의 통수능 향상을 위하여 바닥배수판 돌기부의 형상과 주 배수방향의 돌기부 간격 등에 대한 수리모형 실험을 수행하였다.

4. 수리모형 실험 개요 및 결과분석

본 연구에서는 바닥배수판 돌기부 형상과 통수능의 상관관계 분석 및 통수능 증대를 위한 돌기부 배열 등을 결정하기 위하여 수리모형 실험을 수행하였으며, 수리모형 실험시 수위변화 측정을 통하여 각 돌기부 형상에 따른 개수로(開水路) 흐름의 저항 정도를 분석하였다.

4.1 수리모형 실험 개요

수리모형 실험은 그림 10에서 보이는 바와 같이 총 연장 12,000mm, 폭 400mm, 높이 400mm의 모형수로에 돌기부 형상이 원형, 정사각형, 앞뒤둥근형의 3가지 형상의 시편에 대하여 수행하였다. 모형수로 하부에는 유수에 의한 침전물의 생성 및 이에 따른 유수의 흐름 저해 등을 모사하기 위하여 높이 20mm의 위어 (weir)를 설치하였으며, 개수로 흐름에 큰 영향을 미치는 수로 경사는 0.25%로 고정하였다 (그림 10 참조).

원형시편의 재원은 원형 직경 114mm, 정사각형은 가로 □세로 = 114mm □114mm, 앞뒤둥근형 시편의 재원은 폭 □길이 = 114mm □500mm이며, 수리모형 실험시 시편은 수로 총 연장 12,000mm 가운데 10,000mm

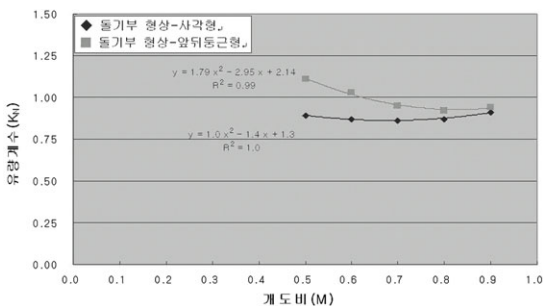


그림 9. 바닥배수판 돌기부 형상변화에 따른 개도비와 유량계수의 상관관계



그림 10. 수리모형 실험을 위한 모형수로

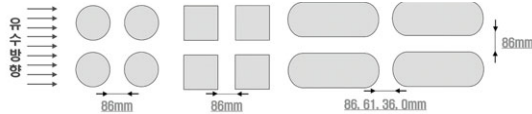


그림 11. 시편형상 및 수리모형 실험 시편 설치 개요

에 2열로 설치하였다. 유수방향에 대한 시편간 간격은 86mm이며 앞뒤동근형 시편의 경우 86mm, 61mm, 36mm 및 0mm 변화조건에 대하여 실험을 수행하였다 (그림 11 참조).

유량 조건은 현재 터널 구조물 배수시스템 설계에 널리 적용되고 있는 용수량 유입 조건 ($3\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$)을 기준으로 터널 연장 1.1km, 2.5km 및 4.1km에 해당하는 유량을 선정하였으며 (표 3 참조), 모형수로 상단에 설

치된 직사각형 위어(weir)를 통해 일정한 유량을 공급하고, 일정시간 경과 후 흐름이 안정되고 정상류에 도달하면 모형수로 중심선을 따라 1m 간격으로 point gage로 수위와 바닥고를 측정하여 수심을 구하였다.

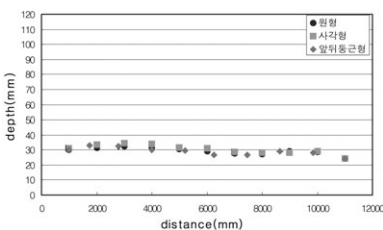
4.2 결과분석

그림 12는 모형수로 상류로부터 하류까지의 유량과 시편 형상별 측정 수심을 도시한 것으로, 시편의 유수저항에 의한 상류부 수위가 증가하는 수위곡선을 보여준다. 상류부 수위 증가는 유량이 증가할수록 증가하며, 돌기부 형상이 정사각형인 경우 수위증가가 가장 크고 원형, 앞뒤동근형의 순서로 상류부 수위증가가 감소하는 것으로 나타났다.

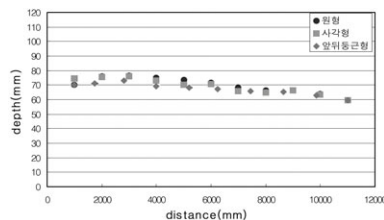
각 유량별 돌기부 형상에 따라 관측수면 형상은 유사하나, 최고 수위 및 수위 차는 표 4에서 보이는 바와 같이 터널 연장 4.1km 유량조건에서 사각형 돌기부 형상과 앞뒤동근형 돌기부 형상간 최대 수위 차는 약 7mm인 것으로 나타났다. 이는 총 연장 12m 모형수로 중 10m 구간에 시편이 설치조건에 대한 수리모형 실험 결과이므로 수 km 연장의 실제 터널구조물에 바닥배수판 적용시

표 3. 수리모형 실험 유량조건

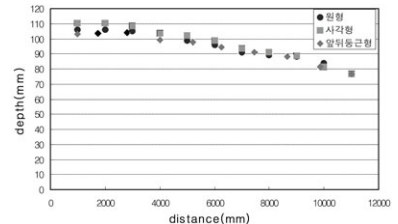
구 분	실험 유량		터널연장	비 고
	단위폭당 유량	현장조건 환산유량		
1	$0.0045\text{m}^2/\text{sec}$	$4,675\text{m}^3/\text{day}$	1.1km	기준조건 $3\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$, 터널 폭 12m
2	$0.0103\text{m}^2/\text{sec}$	$10,682\text{m}^3/\text{day}$	2.5km	
3	$0.0170\text{m}^2/\text{sec}$	$17,531\text{m}^3/\text{day}$	4.1km	



(a) 터널 연장 1.1km 유량조건



(b) 터널 연장 2.5km 유량조건

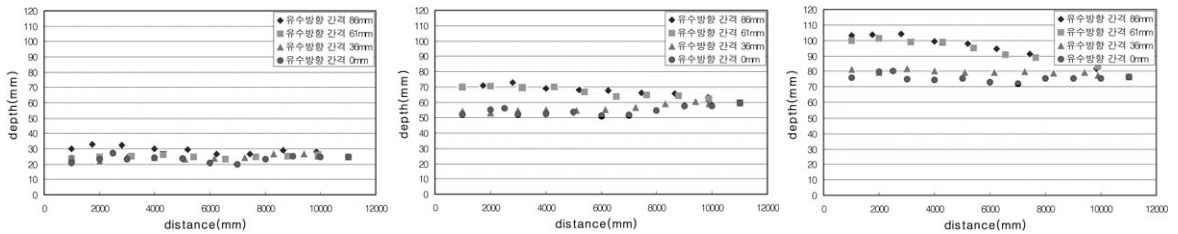


(c) 터널 연장 4.1km 유량조건

그림 12. 유량 및 시편형상에 따른 관측수면 형상

표 4. 유량 및 시편 형상별 최고 수위 및 수위 차

유량조건	시편형상	최고수위 (mm)	최고 수위 차 (mm)		
			사각형 vs. 앞뒤둥근형	사각형 vs. 원형	원형 vs. 앞뒤둥근형
터널 연장 1.1 km	사각형	34.5	2	2	0
	원형	32.5			
	앞뒤둥근형	32.5			
터널 연장 2.5 km	사각형	76.5	3.5	0.5	3
	원형	76			
	앞뒤둥근형	73			
터널 연장 4.1 km	사각형	110.5	7	4.5	2.5
	원형	106			
	앞뒤둥근형	103.5			



(a) 터널 연장 1.1km 유량조건

(b) 터널 연장 2.5km 유량조건

(c) 터널 연장 4.1km 유량조건

그림 13. 유량 및 유수방향 간격에 따른 관측수면 형상

이러한 형상변화에 따른 저항의 차가 터널 연장에 비해 하여 누적된다고 볼 수 있다. 따라서 돌기부 형상변화에 따른 최대 수위차는 증가하게 되며, 동일한 통수단면적에서의 바닥배수판 통수능 차이가 크게 발생할 것이다.

앞뒤둥근형 시편의 유수방향 간격을 (그림 11 참조) 86mm로부터 61mm, 36mm, 0mm의 3단계에 걸쳐 줄여가며 수심을 측정한 관측수면 형상은 그림 13과 같다. 터널 연장 1.1km 유량조건인 경우 시편의 유수방향 간격변화에 따른 관측수면 형상은 유사한 것으로 나타났다. 그러나 유량조건이 터널 연장 2.5km 및 4.1km 인 경우 시편의 유수간격 변화에 따라 수두손실이 감소하여, 설치간격이 상대적으로 좁은 36mm와 0mm의 경우에는 설치간격이 81mm 및 61mm 인 경우에 비하여 완만한 구배의 배수곡선이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 하류부에 침전물의 생성 및 이에 따른 유수의 흐름 저해 등을 모사하기 위하여 모형수로 끝부분에 설치한 위어 (weir)의 흐름저항이 10m 구간 내에 설치된 시편에 의한 흐름저항보다 크기 때문으로 판단된다.

또한 표 5에서 보이는 바와 같이 시편의 유수방향 설치

간격 변화에 따른 흐름저항 변화에 따른 최대 수위차는 약 24.5mm로 형상변화보다 통수능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

표 5. 유량 및 유수방향 시편 간격별 최고 수위 및 수위 차

유량조건	유수방향 간격 (mm)	최고수위 (mm)	최고수위 차 (mm)
터널 연장 1.1 km	86	33	6
	61	26	
	36	26.5	
	0	27	
터널 연장 2.5 km	86	73	13.5
	61	70.5	
	36	59.5	
	0	59.5	
터널 연장 4.1 km	86	104	24.5
	61	101.5	
	36	81.5	
	0	79.5	

6. 결론

본 연구에서는 바다배수관을 이용한 터널구조물 배수 시스템의 최적화 설계기술 개발을 위한 기초연구로서 수리모형 실험을 수행하였으며, 실험결과를 분석/정리하면 다음과 같다.

1. 수리모형 실험시 각 유량조건별 수위변화 측정을 통하여 각 돌기부 형상에 따른 개수로 흐름의 저항 정도를 분석하였으며, 바다배수관 돌기부 형상이 앞뒤등근형인 경우 사각형 또는 원형에 비하여 유수의 흐름을 저해하는 저항이 적어 상류측과 하류측의 수위차가 가장 작은 것으로 나타났으며, 따라서 앞뒤등근형의 바다배수관 돌기부형상이 통수능 확보에 보다 효과적인 것으로 판단되며, 원형 또는 사각형 등과 같이 기존 바다배수관에 널리 적용되고 있는 돌기부 형상을 앞뒤등근형으로 변경시 바다배수관의 통수능을 증대시킬 수 있을 것이다.
2. 유수의 흐름을 저해하는 저항이 가장 작은 앞뒤등근형 형상에 대하여 유수방향에 대한 종방향 설치간격 변화에 대한 수리모형 실험을 수행한 결과 종방향 간격이 좁을수록 수두손실이 적어 바다배수관의 통수능력이 향상되는 것으로 나타났다. 터널구조물의 배수는 터널 종방향의 주 지하수 흐름과 횡방향으로 지

하수가 유입되는 3차원적인 배수가 이루어지며, 따라서 횡방향 유입수의 원활한 흐름을 유지하는 범위 내에서 종방향 간격을 최소화한다면 바다배수관의 통수능을 증대시킬 수 있을 것이다.

3. 수리모형 실험시 모형수로의 구조적 제약사항으로 인하여 본 연구에서는 횡방향으로 유입되는 지하수를 모사한 수리모형 실험이 이루어지지 못하였으나, 향후 이러한 부분에 대한 추가 보완 실험 및 차량 하중조건에 대한 구조적 불안정성 등으로 인하여 수리모형 실험이 수행되지 못한 유선형 바다배수관 등에 대한 추가적인 수리모형 실험을 수행할 계획이며, 이를 통하여 바다배수관 통수능 극대화를 위한 최적형상 개발, 시공/유지관리 관련 지침 마련 및 시작품 제작, 현장적용 등을 수행할 계획이다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2003), 도로교설계기준.
2. 송재우 (2004), 교량수리학, pp. 185-264.
3. 윤성범 (1993), 인천교부근 공유수면 매립지 배수암거 수리모형실험 보고서.
4. Hohn, O. B., Thomas, R. K., and Elwyn, H. K. (1996), Tunnel Engineering Handbook, pp. 467-484.



배규진

한국건설기술 연구원 선임연구 부장
gjbae@kict.re.kr



이규필

한국건설기술연구원 지반연구부
선임연구원
freely@kict.re.kr



이성원

한국건설기술연구원 지반연구부
수석연구원
swlee@kict.re.kr



신휴성

한국건설기술연구원 지반연구부
선임연구원
hyushin@kict.re.kr