

동수경사 변화에 따른 연직배수재의 통수능

Discharge Capacity for Vertical Drain Boards with Hydraulic Gradient Variation

김 주 형¹ Kim, Ju-Hyong
조 삼 덕³ Cho, Sam-Deok

이 광 우^{2*} Lee, Kwang-Wu
장 갑 식⁴ Chang, Gap-Shik

ABSTRACT

This paper studies the discharge capacity of vertical drain boards that is controlling hydraulic gradient among many factors in the specification. The KS K 0940(2008), a testing method based on the conventional Delft type method for measuring the discharge capacity of a vertical drain, was specified in Korea Standard recently. In this test method, the variation in hydraulic gradient can result in large differences in the discharge capacity for the same vertical drain board.

요 지

본 연구에서는 국내에서 사용하고 있는 연직배수재의 통수능시험 평가방법과 국내 관련 시방기준들을 고찰하고 연직배수재 통수능 시험시 결과에 영향을 미치는 인자로 동수경사 변화에 따른 연직배수재의 통수능 시험 결과를 분석하였다. 국내 연직배수재의 통수능 평가시험방법으로 기존 Delft 방법에 근거한 KS K 0940(2008)이 최근 한국표준으로 등재되었으며, 이 시험방법을 사용하는 경우 동수경사의 변화에 따라 연직배수재의 통수능의 차이가 크게 나타날 가능성이 있는 것으로 확인되었다.

Keywords : Prefabricated vertical drain, Discharge capacity, Hydraulic gradient, Reynolds number, Flow rate

1. 서 론

플라스틱 연직배수재는 얇고 유연한 띠 형태이기 때문에 배수재의 변형, 필터의 막힘, 필터의 투수계수 등의 여러가지 요인에 의해 배수 성능이 좌우되는 것으로 알려져 있다(Rawes, 1997). 연직배수재의 통수능 시험은 연직배수재 내부로 유입되는 간극수를 외부로 배출하는 능력을 평가하는 것으로 연직배수재의 성능을 평가하는 매우 중요한 시험방법이다. 국내에서는 최근까지 ASTM D4716(2004) “Test method for determining the (in-plane) flow rate per unit width and hydraulic transmissivity of a geosynthetic using constant head”와 Oostveen and Troost(1990)가 제안한 Delft 방법을 연직배수재의 통수능 시험방법으로 사

용하여 왔다. 표 1은 국내에서 제안된 연직배수재의 통수능 시험방법과 기준사항을 정리한 것이다. 2007년에 제안된 항만어항공사 전문시방서는 ASTM과 Delft 시험법을 모두 사용할 수 있게 되어 있으며, 2004년도와 2005년도에 각각 제안된 댐 및 상수도공사 전문시방서와 고속도로공사 전문시방서에서는 연직배수재의 통수능 평가방법으로 Delft 시험법을 사용하도록 하고 있다. 미국에서 플라스틱 연직배수재에 대한 통수능 시험방법으로 ASTM D4716(2004) 시험법을 사용하도록 구체적으로 제안하고 있으나 (ASTM D6917, 2003), 이 방법은 일반적인 토목섬유의 통수성능을 평가할 수 있는 범용 시험방법으로, 연직배수재의 통수능만을 평가하도록 특별히 고안된 방법이 아니다. 따라서 연직배수재 완제품의 크기에 적합하게 제작되지

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute Construction Technology)
2* 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 전임연구원 (Member, Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea institute of Construction Technology, E-mail: kwangwu@kict.re.kr)
3 정회원, 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 선임연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology)
4 정회원, FITI, 신뢰성 본부, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Reliability, Reliability Assessment Center, FITI Testing & Research Institute)

표 1. 국내에서 제안된 연직배수재의 통수능 시험방법과 기준사항

구 분	항 목	항만어항공사 전문시방서(2007)		댐 및 상수도공사 전문시방서(2004)		고속도로공사 전문시방서(2005)	
		기준사항	시험방법	기준사항	시험방법	기준사항	시험방법
Drain재 (Core + Filter)	배수성능	180cm ³ /s @10kPa	ASTM D4716(2004), Delft 시험법	25cm ³ /s (직선)	Delft 시험법	20cm ³ /s (직선) @300kPa	Delft 시험법
		140cm ³ /s @300kPa		15cm ³ /s (굴곡)			

얇은 시험기를 사용하는 경우에는 연직배수재 측면과 시험기 간의 틈이 생길 수 있으며, 이로 인해 연직배수재 통수능 시험 결과에 오류가 발생할 가능성이 있다. 또한 ASTM D4716(2004)을 사용하여 연직배수재의 통수능을 평가하는 경우 지반의 압밀로 인해 발생하는 연직배수재의 굴곡에 대한 평가가 불가능한 단점도 있다. 따라서, 국내에서는 ASTM D4716(2004) 보다는 연직배수재의 통수능만을 평가하도록 특별히 고안된 Delft 시험법을 더 많이 사용하고 있다. Delft 시험법은 그 동안 시험기 규격과 동수경사, 가압크기, 가압기간 등의 시험방법에 대한 표준시험법이 없이 발주처 또는 시험관계자가 임의로 결정하여 사용하였으나, 산업자재에 대한 시험평가 기관인 FITI 시험연구원에서 2006년도에 자체적인 FITI 단체표준 (SPS-FITI TM 0004-1709)을 개발하였으며, 이 표준이 2008년 5월 국가 표준인 KS K 0940(2008) “플라스틱 연직배수재의 배수성능 시험방법”으로 채택되었다. 또한 2010년 1월에는 KS K 0940(2008)에서 제시하고 있는 연직배수재의 굴곡 형태 시험방법이 ASTM D6918-09 “Standard test method for testing vertical strip drains in the crimped condition”에서 제시하고 있는 두 가지 굴곡 형태 시험방법 중 Method B로 채택된 바 있다.

국내에서는 십 수년 전부터 Delft 시험법을 연직배수재 통수능 평가방법으로 사용하여 왔으며, 이를 토대로 발주처에서는 기준사항을 결정하는 등의 방식으로 연직배수재에 대한 통수능 평가를 해왔으나, Delft 시험법은 2008년에서야 KS 표준시험법으로 채택되는 등 연직배수재 통수능 평가에 대한 시험체계 확립과 평가 기준 정립이 매우 미비한 상태이다. 또한, 연직배수재의 정확한 통수능 시방 기준 도출을 위해서는 KS 표준시험법에서 적용하게 되어 있는 동수경사, 적용압력 크기, 압력유지기간 등이 영향인자가 연직배수재의 통수능 결과에 어떻게 영향을 미치는지 등에 대한 세밀한 고찰이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 연직배수재의 통수능시험 결과에 미치는 대표적인 영향인자 중 동수경사가 연직배수재 통수능 시험 결과에

미치는 영향을 중점적으로 분석하였다.

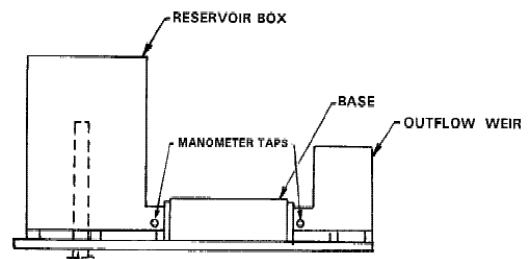
2. 동수경사의 영향

2.1 ASTM D4716(2004)

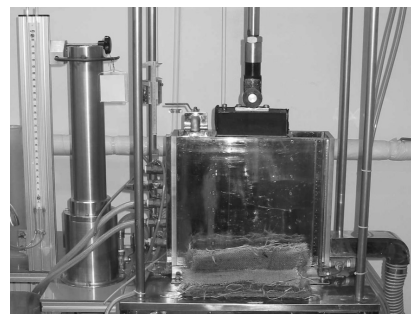
ASTM D4716(2004)은 단계별 연직응력 하에서 시험편의 길이 방향과 평행하게 흐르도록 유로를 형성하는 토목 섬유에 대해 정수위 수리 투과율을 측정하는 방법으로 그림 1과 같은 시험장치를 사용한다. 이 시험으로 수리 투과율(hydraulic Transmissivity) θ 는 식 (1)과 같이 산정한다.

$$\theta = (QL)/(WH) \quad (1)$$

여기서, θ = 수리 투과율(m²/sec), L = 시험편의 길이(m), Q = 단위시간당 통과한 평균유량(m³/sec), W = 시험편의 폭(m), H = 수위차(m)이다.

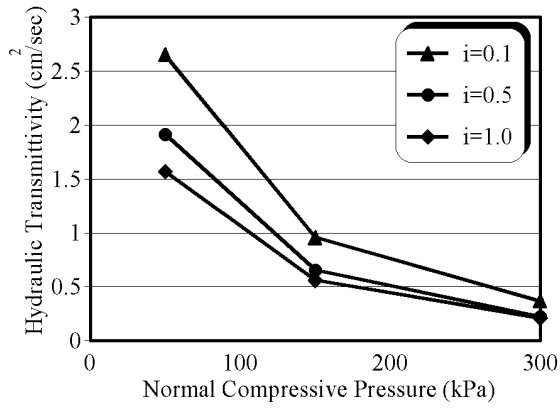


(a) 개요도

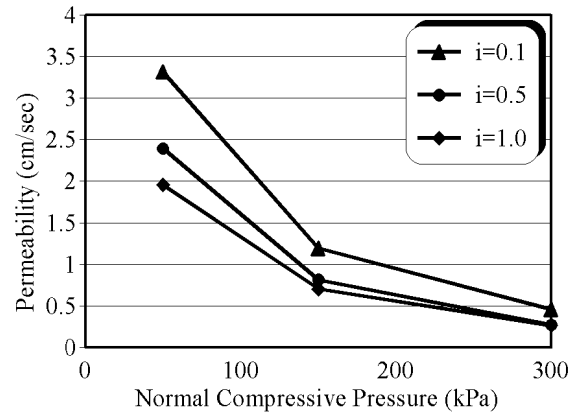


(b) 시험장치모습

그림 1. ASTM D4716(2004)



(a) 수리 투과율



(b) 투수계수

그림 2. 동수경사 변화에 따른 수평 천연섬유배수재 투수성능 결과 비교

ASTM D4716(2004)에서는 시험 재료의 특성 및 시험 목적에 따라 필요한 동수경사를 사용하도록 하고 있으며, 특별히 시험재료에 대한 동수경사가 정해져 있지 않은 경우에는 0.05, 0.10, 0.25, 0.50, 1.0 등의 동수경사를 선택 사용하여 시험하도록 하고 있다. 또한, 토목섬유에 가하는 압력도 재료 특성 및 시험목적에 따라 필요한 값을 사용하도록 하고 있으며, 따로 정해져 있지 않은 경우에는 10, 25, 50, 100, 250, 500kPa 등의 압력 값을 선택해서 사용하도록 하고 있다.

그림 2는 ASTM D4716(2004) 시험시 동수경사가 시험 결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 모래 대체 재료로 사용하는 수평 천연섬유배수재에 대한 시험 결과를 나타낸 것이다. 이 시험에서는 폭 9cm, 길이 20cm, 두께 1cm의 코이어(coir) 매트 1겹과 매트 상부와 하부에 황마필터를 위치시켜 시험편을 제작하였으며, 이 시험편에 대해 각각 50kPa, 150kPa, 300kPa의 압력을 가한 상태에서 동수경사(i)를 각각 0.1, 0.5, 1.0으로 변화시켜 시험을 수행하였다. 그림 2(a)는 ASTM D4716(2004)을 이용하여 얻은 수평 천연섬유배수재의 수리 투과율을 나타낸 것이며, 그림 2(b)는 동일 시험편에 대한 시험결과를 단위면적당 투수계수로 환산하여 나타낸 것이다. 이 결과에서 보면 동수경사가 증가하면 유량은 증가하나, 수리투과율이나 투수계수를 산정하면 동수경사 증가에 따라 수리투과율이나 투수계수는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 낮은 구속압 상태에서 동수경사에 따른 수리투과율이나 투수계수의 차이가 더 크게 나타나고 있어, ASTM D4716(2004) 방법을 이용하는 토목섬유의 투수성을 평가하기 위해서는 적절한 동수경사를 정하여 시험 결과를 제시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

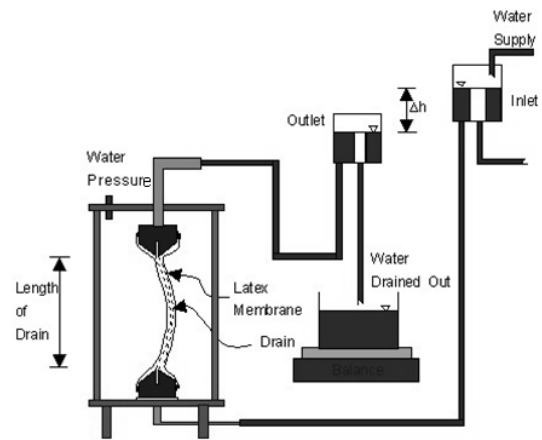


그림 3. Delft 투수성 시험기

2.2 Delft 시험

Oostveen and Troost(1990)가 개발한 연직배수재 투수성 시험방법은 국내에서는 Delft 시험이라고 통칭하고 있다. 이 방법은 그림 3에 나타낸 것과 같은 투수성시험기를 사용하는데, 연직배수재를 고무 멤브레인으로 감싼 후 구속압을 가한 상태에서 배수재를 통해 종방향으로 흘러나오는 유량을 측정한다. 이 시험방법은 구속압 증가를 통해 지반 투수성 감소현상을 모사할 수 있으며, 또한 상부와 연결되는 로드(rod)를 조절하거나 클램프 등을 이용하여 연직배수재를 굴곡에 따른 연직배수재의 투수성 감소효과를 평가할 수도 있다.

Oostveen은 50, 150, 250 그리고 350kPa의 총 4가지 구속압 조건에서 각 7일 동안 총 28일 동안 연직배수재의 투수성을 시험하도록 제안하였다. 난양대학교(Broms, 1994)에서는 Oostveen과 동일한 구속압 조건을 제안하였지만, 각 구속압 유지 시간을 1시간으로 하고 층류를 유지하기

위해 동수경사 0.5를 사용하도록 하였다. Akagi(1994)도 연직배수재에 대한 통수능은 층류상태의 Darcy법칙에 근거하여 통수능을 계산하기 때문에, 동수경사를 0.2~0.5로 유지하도록 제안하였다. Rawes(1997)도 연직배수재에 대한 통수능 시험결과 동수경사를 0.2~0.3으로 하는 것이 층류상태를 유지할 수 있을 것으로 제안한 바 있다. Hansbo(1993)는 유럽표준위원회(CEN)의 기술위원회(TC288)에서 연직배수재에 대한 통수능시험 방법 초안에서 100kPa와 300kPa를 표준 구속압으로 하고 동수경사를 0.1로 시험을 수행하는 것을 제안한 바 있다.

이와 같이 여러 문헌을 통해 구속압의 크기와 구속압 유지시간 그리고 동수경사의 크기에 대한 여러 제안사항이 있음에도 불구하고 2008년에 제안된 KS K 0940(2008)에서는 기본적으로 300kPa의 한가지 구속압을 가하여 시험을 하도록 되어 있으며, 구속압 유지 기간이 정해져 있지 않고, 동수경사의 값을 0.5로 고정하여 시험을 수행하도록 되어 있다. 또한, KS K 0940(2008)이 정식으로 한국표준으로 채택되기 이전에 제안된 항만어항공사 전문시방서(2007), 댐 및 상수도공사 전문시방서(2004), 고속도로공사 전문시방서(2005)에서는 Delft 시험법을 사용하는 것만 제시하였을 뿐, 통수능 시험시 압력의 유지시간이나 어떤 동수경사를 적용해야 하는지에 대한 자세한 언급이 없다. 따라서, Delft 시험법을 이용하여 연직배수재의 통수능을 평가하는 경우에도 동수경사와 구속압 유지기간 등의 다양한 영향인자가 통수능에 미치는 효과를 검증해 볼 필요가 있다.

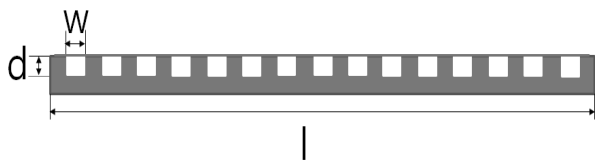


그림 4. 금속판의 단면

3. 동수경사에 따른 연직배수재 통수능 변화

3.1 금속판을 이용한 통수능 시험 결과

연직배수재 내부의 물의 흐름이 층류와 난류 상태인지의 여부는 레이놀즈(Reynolds) 수를 평가함을 통해 확인이 가능하다. 그러나, 실제 연직배수재를 사용하는 경우에는 외부의 구속압으로 인해 필터의 변형이 발생하게 되며 변형된 필터가 코어의 유로 내부로 밀려들어오기 때문에 유로의 정확한 단면적을 평가할 수가 없다. 따라서, 이를 이론적으로 분석하기 위해 그림 4와 같이 요철형의 유로를 가지며 유로 외곽부분은 단단한 금속 재질로 만들어져 외부 하중의 크기와 상관없이 일정한 단면을 유지할 수 있는 요철형 코어를 가지는 시험용 표준 금속판을 제작하였다. 요철형 표준 금속판은 유로의 깊이에 따라 총 4가지 종류 (A, B, C, D)를 제작하였으며, 제작한 금속판의 제원은 표 2와 같다.

금속판을 이용한 시험에서는 동수경사를 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5로 6차례 조절하였으며, 각 동수경사 단계에 대한 통수능 시험 결과는 그림 5~그림 8에 나타내었다. 그림 5에는 유량과 동수경사 간의 관계를 나타낸 것이며, 그림 6은 통수능과 동수경사 간의 관계를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보면 동수경사가 증가할수록 유량도 증가하지만, 유량을 동수경사로 정규화한 통수능은 그림 6에서와 같이 동수경사에 따라 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 앞서 ASTM D4716(2004)으로 시험한 결과에서도 나타나는 동일한 현상으로 동수경사가 작을수록 통수능이 커지는 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8은 각 금속판의 유로깊이에 대해 유량과 통수능이 동수경사 값에 따라 차이를 나타내고 있음을 보여주고 있다. 특히 그림 8에서 보면 유로깊이가 1mm인 경우에는 통수능은 15~20cm³/sec 정도로 동수경사 변화에 큰 변화를 보이지 않지만, 유로깊이가 증가할수록, 동수경사는 작아질수록 통수능은 커지는 경향을 뚜렷하게 발견할 수 있다. 동수경사를 0.1~1.5로 변화하여 시험을

표 2. 금속판의 제원과 적용 동수경사

Sample No.	d (mm)	w (mm)	number of channel	length of board (cm)	l (mm)	hydraulic radius (mm)	hydraulic gradients
A	1.01	2.87	15	37	95	0.435	0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5
B	1.49	2.83	15	37	95	0.726	0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5
C	1.97	2.83	15	37	95	0.824	0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5
D	2.56	2.80	15	37	95	0.905	0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5

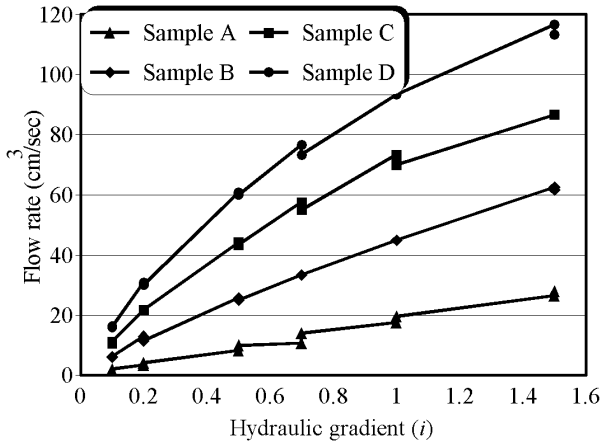


그림 5. 유량과 동수경사

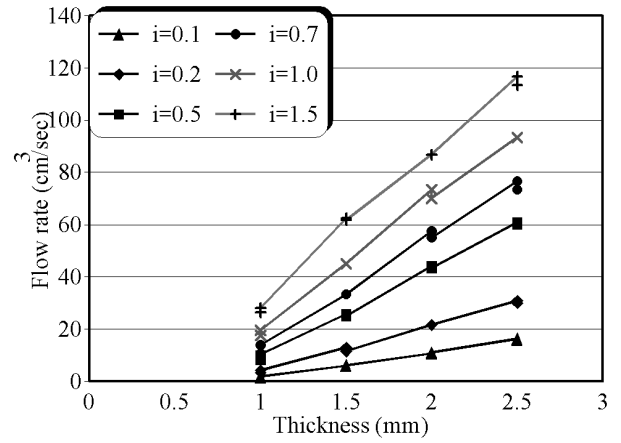


그림 7. 유량과 유로깊이

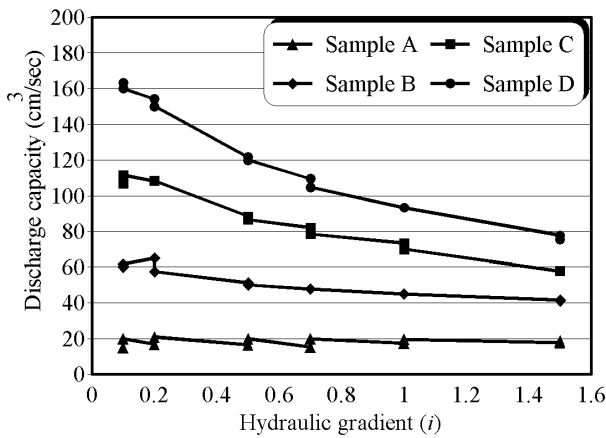


그림 6. 통수능과 동수경사

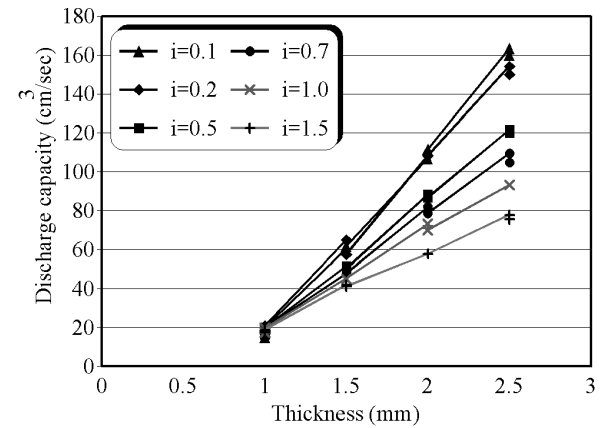


그림 8. 통수능과 유로깊이

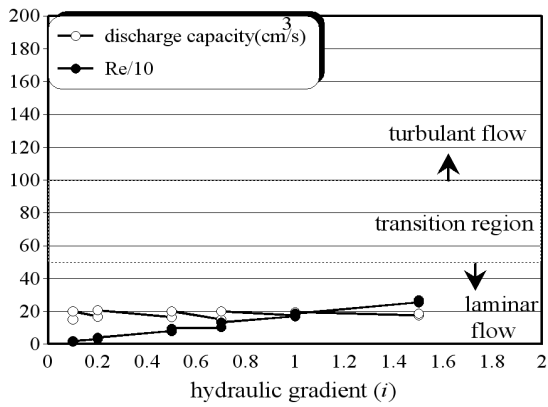
수행했을 때, 유로깊이가 1.5mm인 경우, 통수능은 41~65cm³/sec정도로 최소 값 대비 최대 값의 차이는 58%정도로 나타났으며, 유로깊이가 2.0mm인 경우에는 통수능은 58~111cm³/sec정도로 최대 통수능과 최소 통수능의 차이는 91%정도 나타났다. 또한, 유로깊이가 2.5mm인 경우에는 76~163cm³/sec정도로 최대 통수능과 최소 통수능의 차이가 약 115%를 나타내고 있음을 알 수 있다.

앞서 언급한 시험 결과에서 알 수 있듯이 유로깊이가 증가할수록 동수경사 변화에 대한 통수능의 차이가 매우 큰 것으로 나타났는데, 이는 동수경사의 크기에 따라 금속체 내부의 유체 흐름의 레이놀즈수(Re)로 구분되는 층류 또는 난류로 구분되기 때문이다. 유로의 레이놀즈수 (Re)는 다음과 같은 식으로 산정할 수 있다(Chadwick 등, 2004).

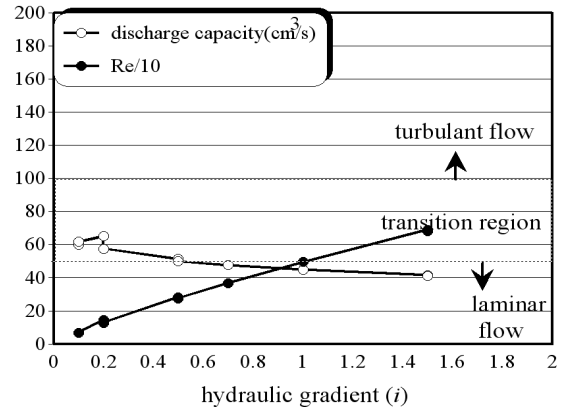
$$Re(\text{channel}) = \rho R V / \mu \quad (2)$$

여기서 ρ : 유체의 밀도, V : 유체의 속도, D : 유체가 흐르는 관의 내경 R : 수력 반경, μ : 흐르는 유체의 점성계수이다.

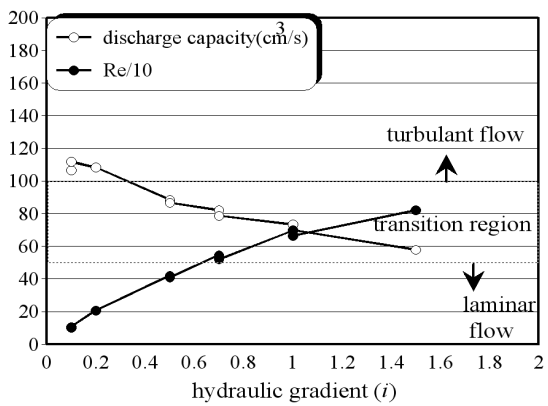
식 (2)에서 수력반경은 유로의 단면적(A)과 유로의 총 둘레길이(P)의 비로 구할 수 있다. 유로에 흐름으로 가득 차 있는 경우에 레이놀즈 수가 500 이하이면 층류 상태로 판단하고 1,000이상의 경우 난류 상태로 판정할 수 있다. 그림 9는 각 금속판에 대해 측정된 통수능과 식 (2)를 이용하여 산정한 레이놀즈 수를 함께 나타낸 것이다. 여기에서 레이놀즈 수는 통수능과의 비교를 위해 10으로 나눈 값을 그래프에 도시하였다. 유로 깊이가 가장 작은 Sample A의 경우에는 그림 9에 나타낸 것과 같이 동수경사가 1.5인 경우에도 레이놀즈수가 270에 불과하여 금속판 내부의 유체 흐름이 층류상태가 유지되는 것으로 나타났다. 그림 9(b)는 유로 깊이가 1.5mm인 Sample B의 경우에 동수경사변화에 따른 통수능과 레이놀즈수를 나타낸 것으로, 동수경



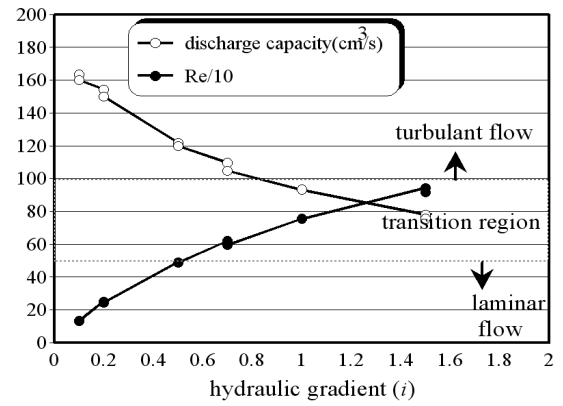
(a) Sample A



(b) Sample B



(c) Sample C



(d) Sample D

그림 9. 동수경사와 통수능, 레이놀즈수의 관계

사의 변화에 대해 레이놀즈수가 Sample A에 비해 급격히 변화하는 것으로 나타났다. 또한, 층류상태의 한계점인 $Re=500$ 일 때의 동수경사는 1.0으로 나타났다. 그림 9(b)에서 보면 비록 금속판 내부의 유체가 층류상태인 레이놀즈수 $Re=500$ 이하의 값을 가진다고 하더라도 층류상태에서 측정된 통수능들은 최대 45%의 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 9(c)는 Sample C의 동수경사 변화에 대한 통수능과 레이놀즈수를 나타낸 것이다. 여기에서는 동수경사가 0.6이하일 때 금속판 내부의 유체가 층류 상태를 유지하는 것으로 나타났으며, 이 경우에도 역시 층류상태에서 측정된 통수능 간에 최대 32%의 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 9(d)는 Sample D에 대한 시험 결과로서 금속판 내부 유체가 동수경사가 0.5 이하인 경우에 층류를 유지하는 것으로 나타났으며, 층류상태인 경우에도 통수능이 최대 36%의 차이를 나타내고 있다.

본 시험에서 사용한 금속판의 경우에는 구속압으로 인한 유로 축소 등의 영향을 받지 않기 때문에 실제 통수능

시험 결과와는 다소 거리가 있는 매우 이상적인 조건으로 시험을 수행한 것이지만, 이를 근거로 유추해보면, KS K 0940(2008)에서 사용하도록 되어 있는 동수경사 0.5를 적용하는 경우, 유체의 흐름은 층류상태를 유지하는 것으로 판단된다. 그러나 층류 상태에서도 동수경사의 차이에 따라 32%~45% 정도의 통수능 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 플라스틱 배수재를 이용한 통수능 시험 결과

앞서 연직배수재의 단면을 이상적으로 묘사한 표준 금속판으로 통수능 시험을 수행한 결과를 바탕으로 실제 연직배수재를 이용하여 동수경사에 따른 연직배수재의 통수능 결과를 비교 분석하였다. 표 3은 본 연구에서 사용한 두 종류의 플라스틱 배수재에 대한 통수능 시험조건을 나타낸 것이다. No.1 플라스틱 배수재에 대해서는 300kPa의 구속압을 28일 동안 지속하였으며, 시험 시작 직후부터 1주일 단위로 0.1, 0.3, 0.5, 1.0의 4가지 동수경사 조건에

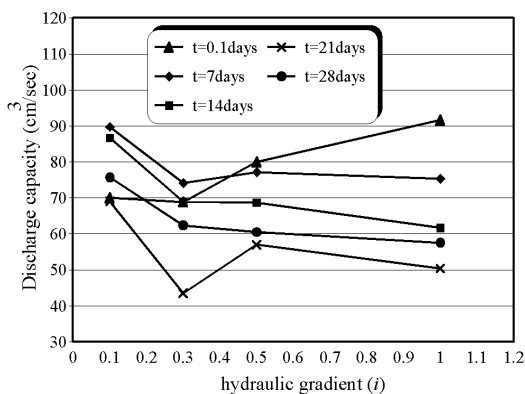
대해 통수능을 측정하였다. 또한, No.2 플라스틱 배수재는 500kPa의 구속압 조건에서 시험하였으며, 측정주기와 가압지속시간은 No.1 플라스틱 배수재와 동일한 시험조건으로 수행하였다.

그림 10은 No.1 플라스틱배수재 1종에 대해 300kPa 구속압 상태에서 통수능 시험 결과를 나타낸 것이다. 플라스틱 배수재의 통수능 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 동일한 조건으로 3회 시험을 수행하였다. 그림 10에서 나타낸 3회의 시험 결과에서 보면, 시간과 동수경사에 따라 통수능 결과가 매우 다르게 나타나는 현상을 확인할 수 있다. 우선 모든 시험 결과에서 시험이 시작된 직후($t=0.1days$)에는 동수경사가 증가할수록 통수능이 증가하는 양상을 나타냈다. 그러나, 일주일이 경과된 이후에는 동수경사가

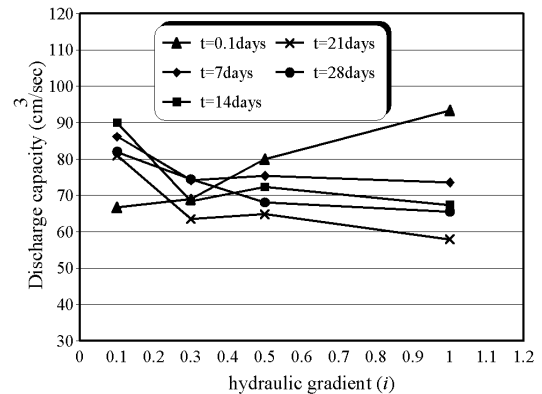
증가할수록 통수능이 감소하는 양상을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상은 시험초기에 높은 구속압이 가해지는 경우 필터가 유로 내부로 밀고 들어오기 때문에, 낮은 동수경사를 이용해서는 충분한 통수 단면을 확보하기 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 구속압을 가한 후 7일이 경과된 시점에서는 동수경사가 0.3, 0.5, 1.0일 때 평균 통수능은 각각 75, 77, 74 cm^3/sec 로 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, 동수경사가 0.1인 경우에는 통수능이 92 cm^3/sec 정도의 값을 나타내, 동수경사가 큰 경우에 비해 약 20~25%정도 더 큰 통수능 값이 산출되었다. 이는 시간이 경과할수록 초기 구속압 조건과는 달리 연직배수재 내부의 유체 흐름에 대한 충분한 통수 단면이 확보된 것으로 판단된다. 동수경사가 작을수록 통수능이 커지는 양상은 시간이 경과되어도 동일하게 유지되며, 동수경사가 0.1인 경우 28일 경과시에 측정된 통수능은 동수경사가 큰 경우에 비해 약 24~37%정도 큰 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 동수경사 상태에서 시간 경과에 따라 통수능이 감소하는데, 7일 경과 후 측정된 통수능과 21일 또는 28일 경과된 후 측정된 통수

표 3. 플라스틱 배수재 통수능 시험 조건

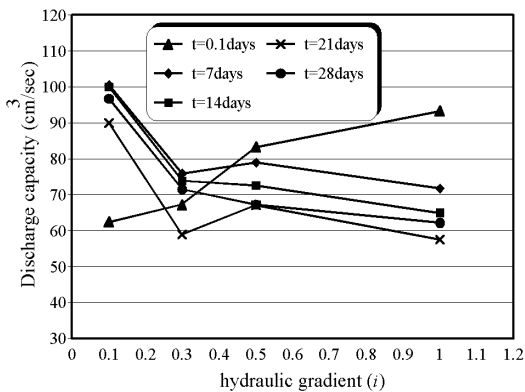
Plastic vertical drain No.	confining pressure	duration	hydraulic gradient
1	300kPa	28 days	0.1, 0.3, 0.5, 1.0
2	500kPa	28 days	0.1, 0.3, 0.5, 1.0



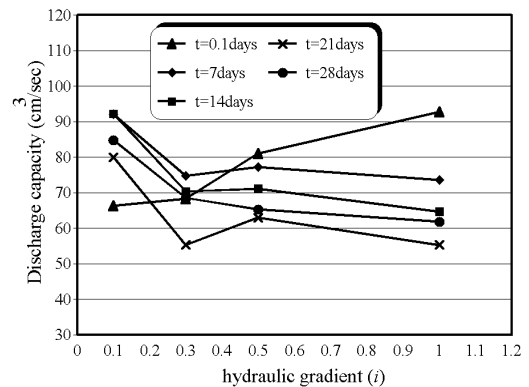
(a) 시험 결과 1



(b) 시험 결과 2



(c) 시험 결과 3



(d) 평균 시험 결과

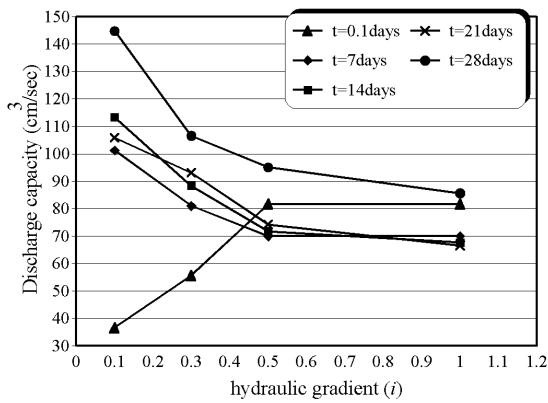
그림 10. 동수경사에 따른 통수능 시험 결과(300kPa 구속압)

능을 비교한 결과, 구속압을 오래 가할수록 동수경사의 크기에 따라 약 9~19%의 낮은 통수능이 측정되었다. 다만, 그림 10에서 보면 21일 경과시 측정된 통수능이 28일 경과시의 통수능보다 작게 평가되었는데, 이에 대한 정확한 원인을 알 수 없으며 28일 이상의 장기 통수능 평가를 통한 원인 분석이 추가로 필요할 것으로 판단된다.

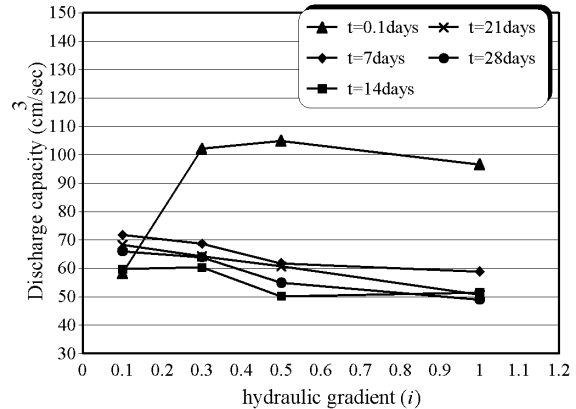
이와 같은 결과는 No.2 플라스틱 배수재에 대한 시험에서도 동일하게 나타났다. 그림 11은 No.2 플라스틱 배수재를 500kPa 구속압 상태에서 3회 통수능 시험을 수행한 결과로, 그림 11에 나타난 연직배수재의 통수능 시험 결과는 그림 10에 나타난 연직배수재의 통수능 결과와는 달리 각 시험에 따라 통수능 값의 차이가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 특히 그림 11에 나타난 시험결과 4의 경우에는 28일 경과시의 통수능이 가장 크게 나타나 시험 결과 5와 시험 결과 6과 차이를 나타내고 있어, 3회씩 수행한 각 통수능 시험결과를 평균하여 그림 11의 (d)와 같이 평균 통수능으로 나타내었다. 그림 11(d)에 나타난 평균시험결과로 판단하면, 시험 시작 직 후($t=0.1\text{days}$)에 측정된 통수능

은 동수경사가 증가할수록 증가하는 양상을 확인할 수 있으며, 시간 경과에 따라 동수경사가 증가할수록 통수능이 감소하는 경향 역시, 앞서 그림 10과 동일한 것으로 확인되었다. 시험 시작 후 7일 경과시에 평균 통수능 값을 비교하면, 동수경사가 0.1일 때의 통수능은 동수경사가 0.5일 때에 비해 약 37%정도 큰 것으로 나타났다 28일 경과시에 도 평균 통수능은 동수경사가 0.1일 때, 동수경사가 0.5일 때에 비해 약 41%정도 큰 값을 나타내고 있으며, 그림 10에서 나타난 결과와 같이 시간이 경과할수록 동수경사에 따른 통수능의 상대적인 차이는 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 구속압을 500kPa로 가한 경우, 동일 동수경사 상태에서 시험지속시간이 길어질수록 통수능이 감소하는 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

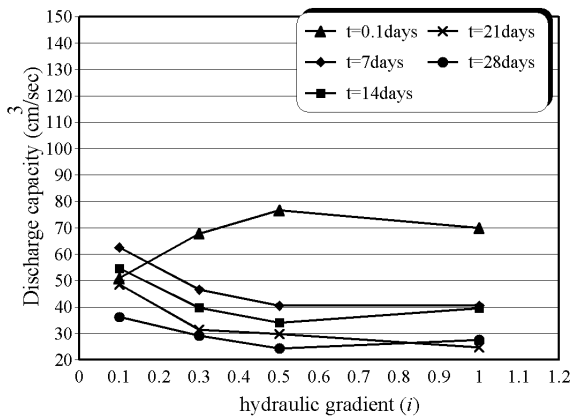
앞서 표준 금속판을 이용하는 경우에는 구속압에 따라 유로의 단면이 변화하지 않아 레이놀즈수를 계산하여 연직배수재 내의 흐름상태가 층류인지 난류인지 판단할 수 있었으나, 실제 연직배수재의 경우에는 필터가 구속압에 따라 유로내부로 밀려들어 오기 때문에 유로 단면 계산이



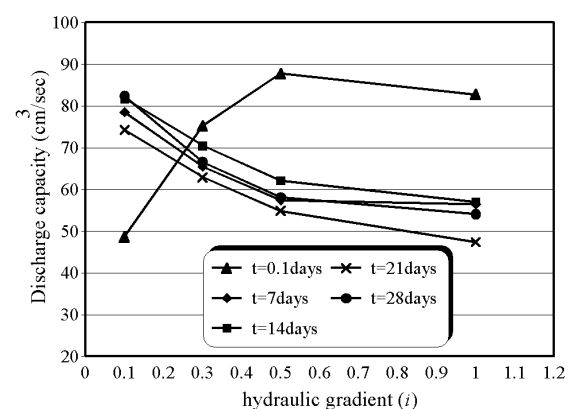
(a) 시험 결과 4



(b) 시험 결과 5



(c) 시험 결과 6



(d) 평균 시험 결과

그림 11. 동수경사에 따른 통수능 시험 결과(500kPa 구속압)

어려워 레이놀즈수를 계산하는 것이 매우 어렵다. 표준 금속판으로 시험을 수행하였을 때 얻은 통수능과 연직배수재로 시험을 수행하였을 때 얻은 통수능을 비교하여 분석하면, 동수경사 0.5정도로 시험한 경우 유로 내에 흐름은 층류가 형성되는 것으로 판단되지만, 층류 상태인 경우에서도 동수경사가 작은 경우와 큰 경우에 연직배수재의 통수능 차이가 최소 20%이상 나타내기 때문에 동수경사 변화에 따른 연직배수재의 통수능 시험 결과의 시방기준 만족 여부에 많은 논란이 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 연직배수재는 10m 이상의 연약지반이 존재하는 곳에 설치하는 것이 일반적이며 지반 전단파괴의 우려로 인해 통상 성토속도는 2cm~5cm/day 정도로 시공하기 때문에, 실제 성토공사시에 발생하는 동수경사는 0.1~0.2에 불과하다. 따라서 현재 KS K 0940(2008)에 제안된 동수경사를 사용하여 통수능 시험을 수행하는 경우, 실제 현장에서 발휘되는 연직배수재의 통수능을 과소평가하게 되는 결과를 낳을 것으로 판단된다. 또한, 시험지속시간이 길어질수록 연직배수재의 통수능이 감소하고 있는 경향을 확인할 수 있었는데, 시험시간을 무한정 지속할 수 없기 때문에 연직배수재의 통수능 평가방법의 표준화를 위해서는 고정 시험지속시간에 대한 내용을 통수능 시험방법 표준에 반영할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 동수경사의 변화가 연직배수재의 통수능에 미치는 영향을 분석하기 위해 KS K 0940(2008)에 제시된 방법으로 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연직배수재 내부의 유로 내의 흐름 상태를 평가하기 위해 연직배수재의 단면을 이상화 한 표준 금속판을 이용하여 통수능 시험을 수행한 결과, 동수경사가 증가함에 따라 통수능은 감소하는 양상을 나타내었다. 또한, 층류상태로 판정된 영역 내에서도 동수경사가 작을수록 통수능이 증가하는 양상을 나타내었으며, 약 32~45%정도의 상대적인 차이를 나타내고 있음을 확인하였다.
- (2) 플라스틱 재질의 연직배수재를 이용하여 통수능 시험을 수행한 결과, 표준 금속판을 이용한 경우와 동일하게 동수경사가 증가함에 따라 통수능이 감소하

는 경향을 나타내었다. 유럽표준위원회(CEN)의 기술위원회(TC288)에서 제안하고 있는 동수경사 0.1을 기준으로 통수능을 산정한 경우, 국내 기준인 KS K 0940(2008)에서 제안되어 있는 동수경사 0.5를 기준으로 평가한 통수능에 비해 20~41%정도 큰 것으로 평가되었다. 실제 현장에서 발생하는 동수경사는 일반적으로 0.5보다 작기 때문에 현장의 성토재하조건을 면밀하게 검토한 후 적합한 동수경사를 선정해 연직배수재 통수능 시험을 수행하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

- (3) 시험지속시간이 길어질수록 통수능은 감소하는 것으로 나타났으며, 장기간 구속압을 가한 통수능 시험 결과를 바탕으로 시험지속시간에 따른 연직배수재의 통수능 시험 결과의 적정성을 파악하여 국내 표준시험방법을 보완하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 신뢰성 기반기술확산사업의 지원 받은 연구결과입니다.

참고문헌

1. 한국도로공사 (2005), *고속도로공사 전문시방서*, pp.2-11.
2. 한국수자원공사 (2004), *댐 및 상수도 공사 전문시방서*, 토목공사편.
3. 해양수산부 (2007), *항만어항공사 전문시방서*, pp.164-174.
4. ASTM D4716 (2004), *Test Method for Determining the (In-Plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using Constant Head*.
5. ASTM D6917 (2003), *Standard Guide for Selection of Test Methods for Prefabricated Vertical Drains (PVD)*.
6. Akagi, T. (1994), "Hydraulic Applications of Geosynthetics to Filtration and Drainage [roblemns-with special reference to Prefabricated Band-Shaped Drains]", *Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextile, Geomembranes and Related Products*, Singapore, Preprint of keynote lecture, pp.99-119.
7. Broms, B.B., Chu, J. and Choa, V. (1994), "Measuring the Discharge Capacity of Band Drains by a New Drain Tester", *Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.2, Singapore, pp.803-806.
8. Chadwick, A., Morfett, J. and Borthwick, M (2004), *Hydrau-*

- lics in Civil and Environmental Engineering*, pp.126-128.
9. Hansbo, S. (1993), *Vertical Drainage*, CEN/TC288-Working Group 11, Draft 9.
 10. KS K 0940 (2008), *플라스틱 연직배수재의 배수성능 측정 방법*, 한국표준협회.
 11. Oostveen, J.P. and Troost, G.H. (1990), "Discharge Index Tests on Vertical Drains", *Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.1, The Hague, Netherlands, pp.345-350.
 12. Rawes, B.C (1997), "Critical Parameters for Specification of Prefabricated Vertical Drains", *Technical Paper, Geosynthetics International*, Vol.4, No.1, pp.51-64.
 13. STM D6918-09, *Standard Test Method for Testing Vertical Strip Drains in the Crimped Condition*.

(논문접수일 2010. 4. 19, 심사완료일 2010. 6. 1)