

## 새만금 방수제 축조사면의 안정성 검토를 위한 실험적 분석 An Experimental Analysis for the Stability Investigation of Slope on Saemangeum Lake Dykes

장동기<sup>1)</sup>, Dong-Gi Jang, 김기년<sup>2)</sup>, Ki-Nyun Kim, 김동환<sup>3)</sup>, Dong-Hwan Kim, 서관석<sup>4)</sup>, Kwan-Seok, Seo, 손문준<sup>4)</sup>, Moon-Joon, Son

<sup>1)</sup> (주)대한콘설탄트 지반공학부 기사, Engineer, Dept. of Geotechnical Engineering, Daehan Consultants Co., Ltd

<sup>2)</sup> 한국전력기술(주) 대리, Senior Manger, KEPCO Engineering & Construction Co., Inc

<sup>3)</sup> (주)대한콘설탄트 지반공학부 부장, General Manager, Dept. of Geotechnical Engineering, Daehan Consultants Co., Ltd

<sup>4)</sup> (주)대한콘설탄트 지반공학부 이사, Director, Dept. of Geotechnical Engineering, Daehan Consultants Co. Ltd

**SYNOPSIS** : This study was designed to carry out studies on critical seepage velocity and critical hydraulic gradient using a piping test targeting SM and ML which are widely distributed ahead of and behind the depth of E.L(-)10m in Saemangeum area in order to examine stability of embankment built on the ground vulnerable to piping. The effects of relative densities on critical hydraulic gradient and critical velocity were also compared and analyzed using empirical formula and theoretical formula, and relative densities were set up as respectively 9%, 25%, 50%, and 75% for this experiment. As a result, for critical hydraulic gradient, most of specimens detected piping at lower values than the empirical formula of Terzaghi(1922). It is, therefore, considered that the empirical formula devised by Kalin(1977) or Hayashi(1978) is more reasonable to be conservative. It was also found that critical velocity decreased as relative density increased, and critical velocity predicted was mostly lower than the theoretical formula.

**Key words** : a piping test, relative density, critical velocity, critical hydraulic gradient

### 1. 서 론

전 국토면적의 70%이상이 산악지형으로 형성된 우리나라에서는 국토의 효율적 사용을 위하여 새만금 지역을 대상으로 대대적인 매립사업을 실시하고 있으며, 각종 부지조성을 위한 방수제 축조사면이 진행됨에 따라 제체의 침투파괴에 대하여 신뢰성 있는 안정성 검토를 필요로 하게 되었다. 새만금 지역은 심도 E.L(-)10m 전후에 SM, ML계열의 실트질 세사가 폭넓게 분포되어 있으며, 토질특성상 파이핑에 취약한 투수성 지반인 것으로 나타났다. 따라서 차수성이 요구되는 제체의 안정성을 판단하기 위하여 파이핑 발생여부를 검토하게 되며, 파이핑 안정성을 평가하는 주된 검토방법에는 Terzaghi(1922)에 의한 한계동수경사와 한계유속에 의한 방법으로 검토되고 있다. 그러나 한계동수경사 이론식은 파괴직전까지 재료상태가 완전 균일하며 파괴양상을 상향침투력으로 인한 지반전체의 붕괴를 전제로 하여 내부 침식을 고려하지 않고 있으며, 한계유속을 이용한 방법은 여러 학자들의 연구에 의해 과대평가 된다고 보고

되는 등 체체의 안정성 평가시 정성적인 방법에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 파이핑 시험을 통해 침투유량, 표면고의 변화, 수두변화 및 동수경사를 측정하고, 시험결과를 바탕으로 파이핑 발생시 한계동수경사 및 한계유속에 관한 연구를 수행하였다. 또한 시험을 통해 파악된 심도별 상대밀도가 한계동수경사와 한계유속에 미치는 영향을 경험식을 이용하여 비교 분석하였다.

## 2. 파이핑 시험

### 2.1 시료특성 분석

파이핑 시험에 사용된 대상시료는 새만금 만경3공구 현장에서 채취한 해사를 이용하였으며, 대상시료 체분석 결과 균등계수가 4이하인 입도가 불량한 모래로 나타났다. 또한 통일분류법에 의해 SC, SM으로 분류되었으며, Sherard(1953)가 제안한 기준에 따르면 대상시료는 파이핑에 취약한 특성을 가지고 있을 것으로 판단된다.

표 1. 대상시료 기본 물성치

분 류	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmin}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_{max}$	$e_{min}$	$G_s$
SC, SM	15.380	12.170	1.213	0.751	2.69

### 2.2 시험장치

본 시험장치는 직경 200mm, 높이 500mm의 원통형 아크릴 프레임으로 제작되었으며, 시험기 측면에는 수두측정 장치(Stand pipe)를 50mm 간격으로 설치하여 파이핑 발생시 시료 위치별 수두의 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 동수경사 조절을 위하여 그림 1과 같이 유출수조와 유입수조가 있으며, 유입수조에서 배수관로를 통해 유입된 물이 시험기 상하부를 통해 시료 내부로 유입되어 상하부 배수관로를 통해 유출수조로 나오게 된다. 이때, 물의 흐름은 두 수조의 수두차로 조절된다. 또한, 유출수조에서 나온 유출수의 양을 측정하기 위하여 원형 셀과 전자저울을 설치하여 유량계 시스템을 구성하였다.

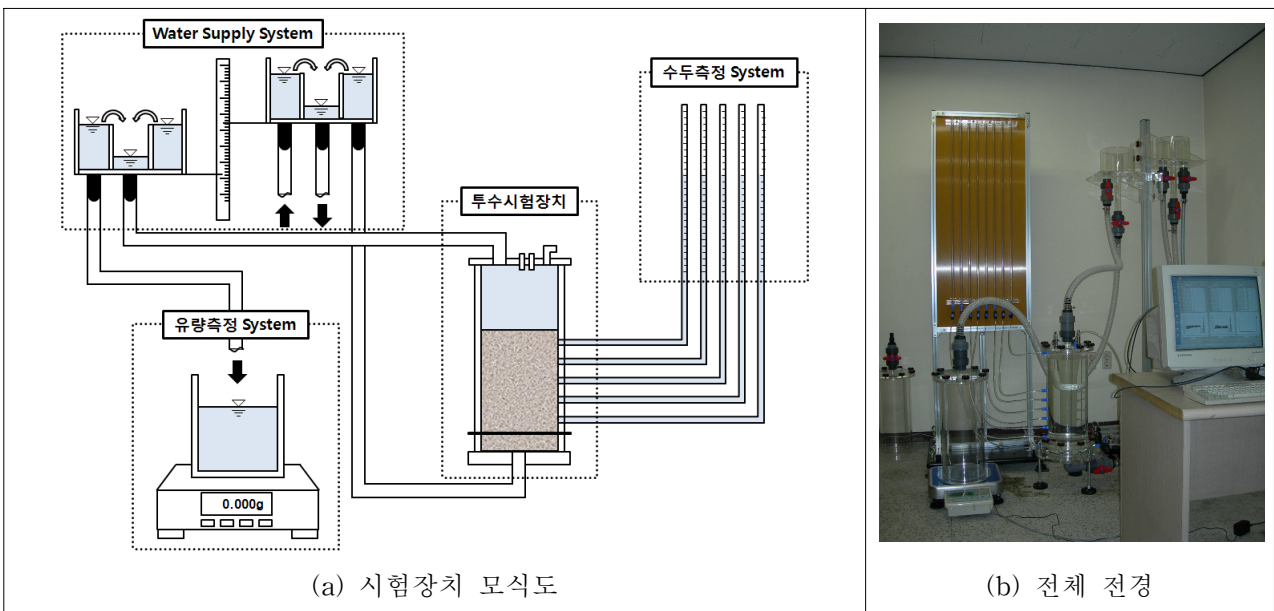


그림 1. 파이핑 시험장치 모식도 및 전체 전경

## 2.3 시험방법 및 시험조건

본 연구에서는 준설향사를 일정 높이까지 투기하여 형성하는 제체를 대상으로 하여 각 투기에 따라 심도별로 서로 다른 단위중량 즉, 상대밀도를 가질 것으로 예상된다. 이에 조성된 제체의 심도별 상대밀도를 예측하기 위해 투기고를 증가시키면서 투기고에 따른 상대밀도를 측정하여 파이핑 시험을 실시하였다. 파이핑 시험에 사용된 시료는 세립분 함량이 많아 200번체에 잔류하는 시료를 사용하였으며, 측정된 상대밀도 결과를 바탕으로 대상시료를 대단히 느슨, 느슨과 보통, 조밀함의 네 가지 조건으로 시료를 포설하여 시험을 실시하였다.

표 2. 파이핑 시험조건

대상시료	구분	대상시료 입경조건	상대밀도, $D_r(\%)$
SC, SM	Case 1	$d > 0.075\text{mm}$	9% (Very loose)
	Case 2		25% (Loose)
	Case 3		50% (Medium)
	Case 4		75% (Dense)

## 3. 파이핑 시험결과

### 3.1 한계동수경사의 산정

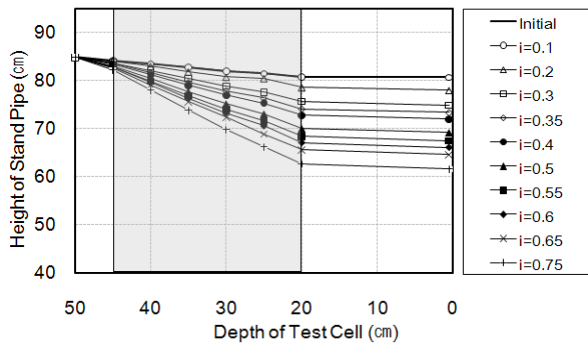
대상시료는 동수경사가 변화에 따라 육안 상으로 구분 가능한 수두의 현저한 변화를 관찰하기 어려우며, 시료 내 불균일한 다짐영역 등의 문제점이 발생할 수 있으므로 관측수두의 변화만을 이용하여 한계동수경사를 산정하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 수두손실을 고려하여 동수경사를 보정하고 수두변화, 표면고 변화, 유량 등 다양한 방법을 통해 한계동수경사를 산정하였다.

#### 3.1.1 수두 및 표면고 변화에 의한 산정

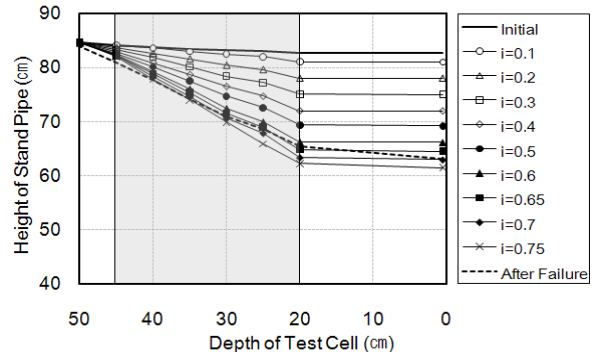
동수경사가 증가할수록 시료의 상부 수두는 감소하는 것으로 나타났으나 이러한 경향으로부터 한계동수경사를 산정하기는 어려우므로 동수경사 변화에 따른 정규화된 수두변화를 도시하여 검토하였다. 수두증분에 의한 분석결과, 그림 3에서와 같이 Case 1과 Case 2의 경우 2회 이상의 급격한 수두감소가 발생하여 내부침식과 외적 파이핑 현상이 구분되어 나타났으며, Case 3과 4의 경우에는 1회의 수두감소와 외적 파이핑 현상이 관찰되었다. 그에 반해 표면고 측정결과와 비교, 표면고가 급변하는 것을 관측할 수 있었으나 수두측정 결과에 의해 추정된 한계동수경사와 특정한 관계를 보이지 않는 것으로 나타났다.

#### 3.1.2 유량 및 유속 변화에 의한 산정

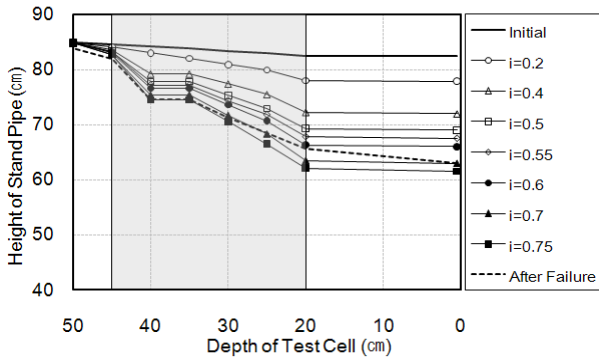
유량은 상대밀도가 증가함에 따라 간극의 크기가 감소하므로 유량이 작아지는 경향을 보이나 파이핑에 의한 한계동수경사를 명확히 파악할 수는 없었다. 이에 변곡점에 대한 보다 명확한 표현 방법으로 동수경사 변화에 따른 유량 증분을 도시하여 검토하였다. 유량증분에 의한 분석결과 Case 1의 1차 파이핑 예측지점을 제외한 나머지 Case에서 수두증분에서 결정한 파이핑 발생시점과 유사한 것으로 나타났다. 그러나 유속 변화 측정결과와 비교, 수두증분 및 유량증분으로부터 추정하였던 결과치와 동수경사에 따른 유속 변화 양상과 특별한 연관성을 찾아볼 수 없었다.



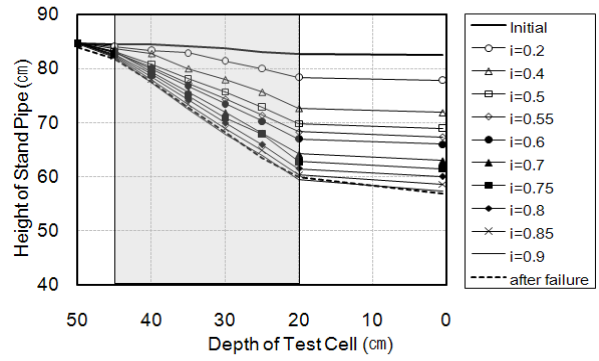
(a) Case 1 ( $D_r=9\%$ )



(b) Case 2 ( $D_r=25\%$ )

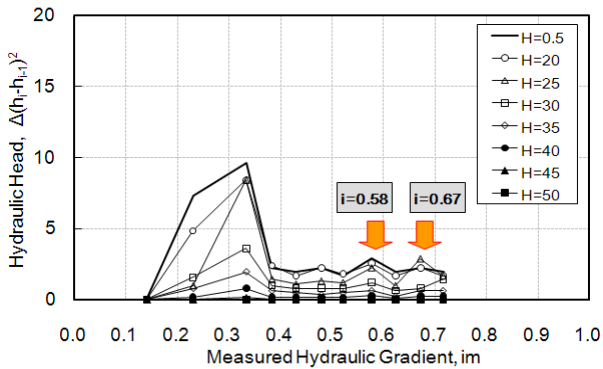


(c) Case 3 ( $D_r=50\%$ )

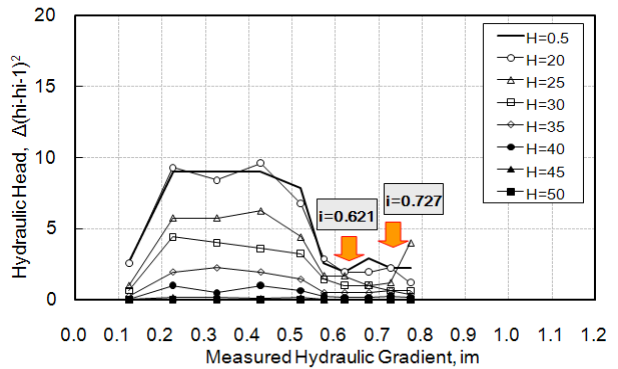


(d) Case 4 ( $D_r=75\%$ )

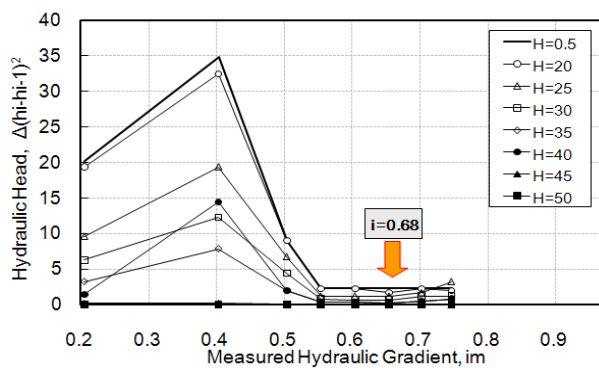
그림 2. 시료깊이에 따른 동수경사별 수두 변화



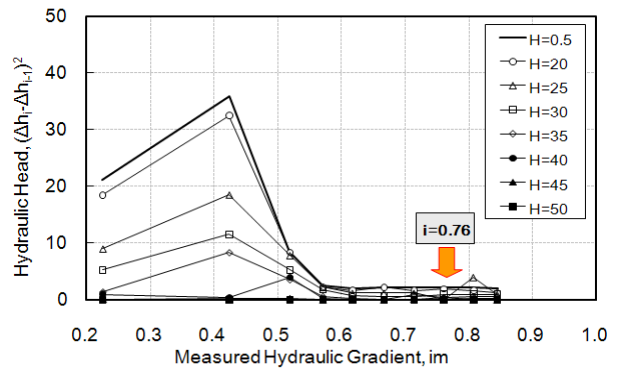
(a) Case 1 ( $D_r=9\%$ )



(b) Case 2 ( $D_r=25\%$ )

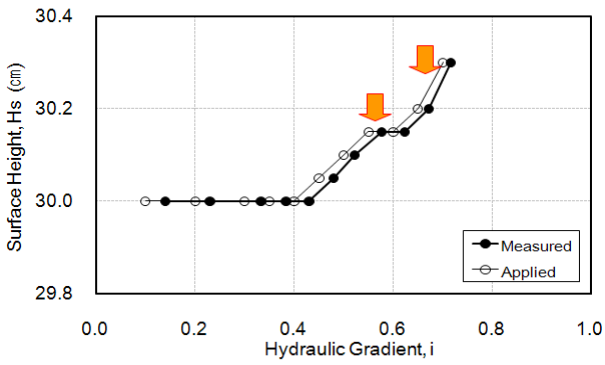


(c) Case 3 ( $D_r=50\%$ )

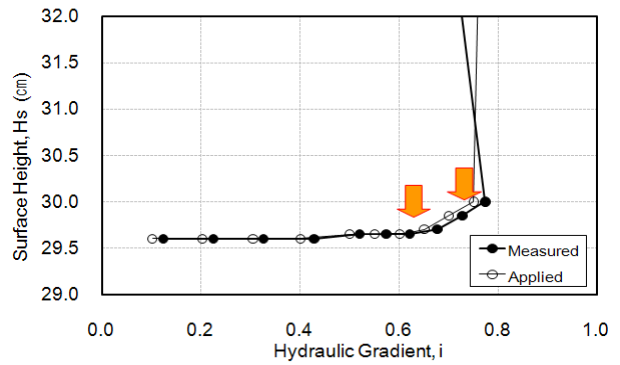


(d) Case 4 ( $D_r=75\%$ )

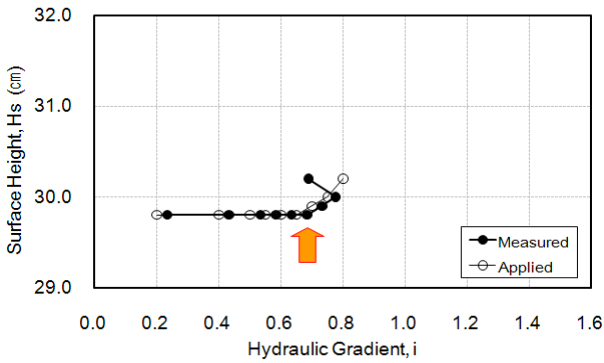
그림 3. 동수경사에 따른 시료깊이별 수두증분 변화



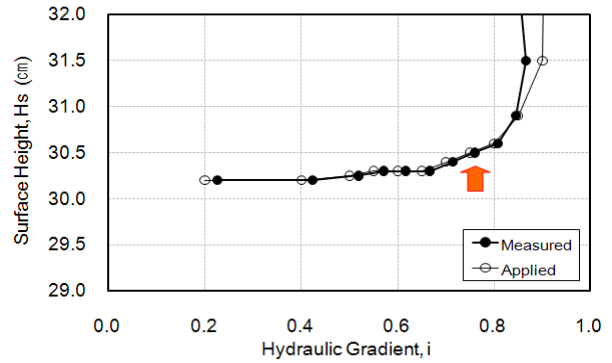
(a) Case 1 ( $D_r=9\%$ )



(b) Case 2 ( $D_r=25\%$ )

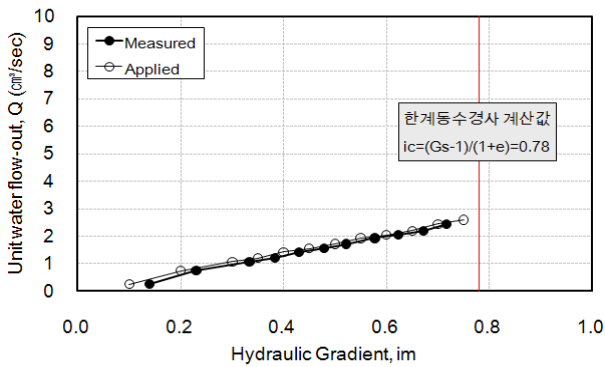


(c) Case 3 ( $D_r=50\%$ )

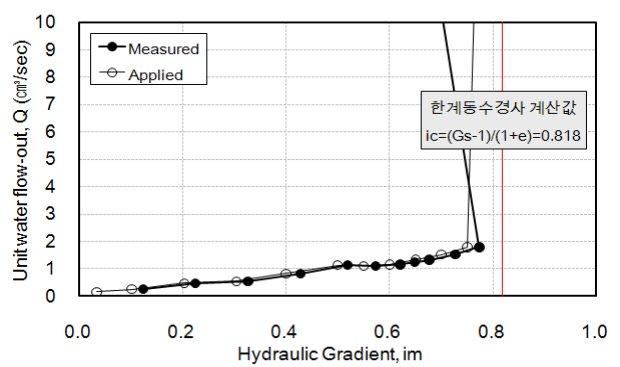


(d) Case 4 ( $D_r=75\%$ )

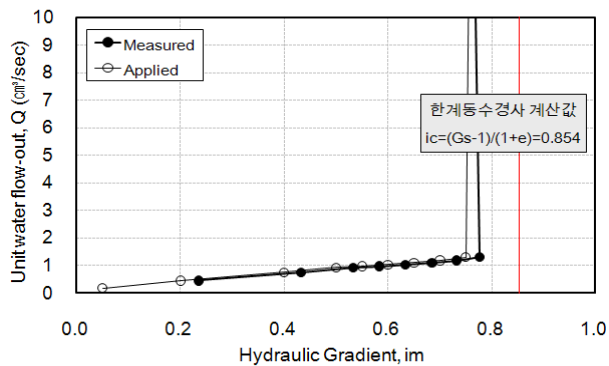
그림 4. 동수경사에 따른 표면고 변화



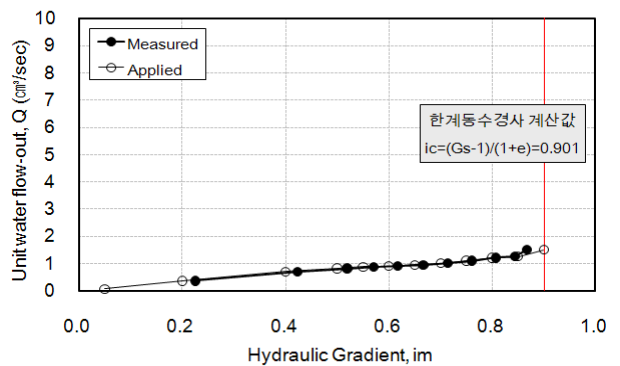
(a) Case 1 ( $D_r=9\%$ )



(b) Case 2 ( $D_r=25\%$ )

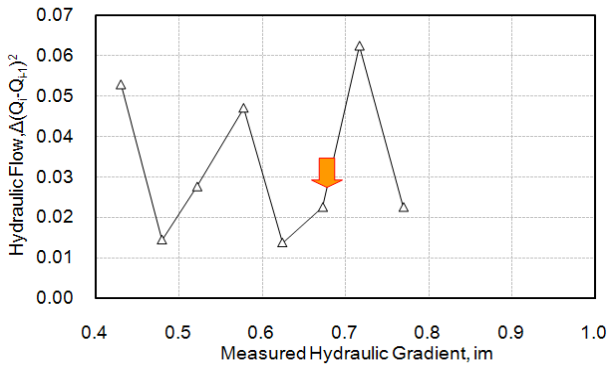


(c) Case 3 ( $D_r=50\%$ )

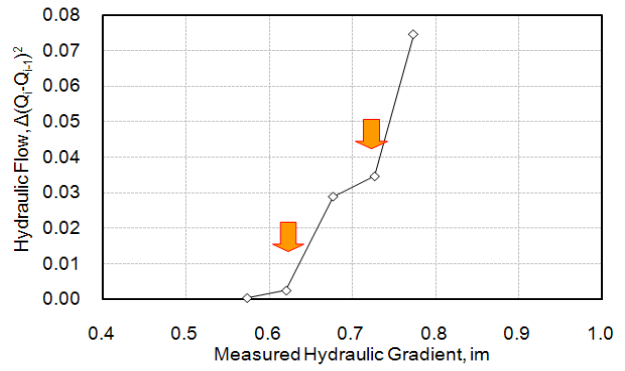


(d) Case 4 ( $D_r=75\%$ )

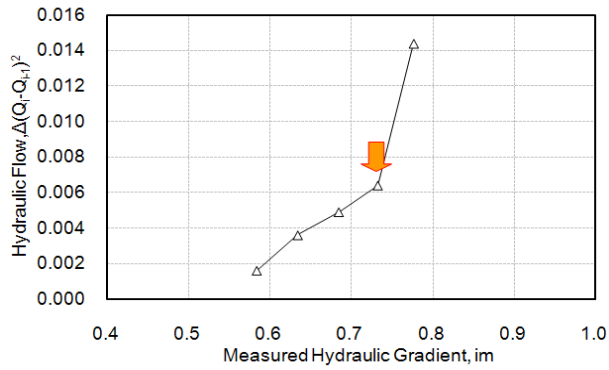
그림 5. 동수경사에 따른 유량 변화



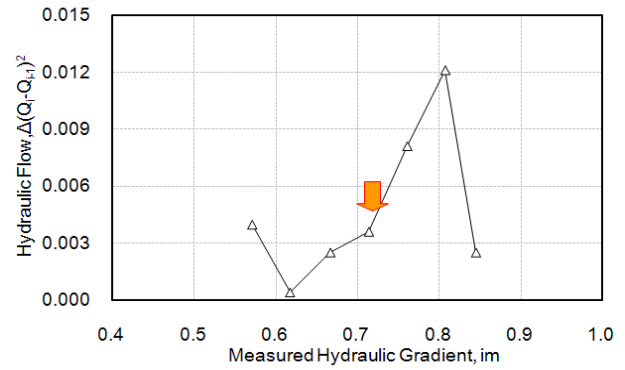
(a) Case 1 ( $D_r=9\%$ )



(b) Case 2 ( $D_r=25\%$ )

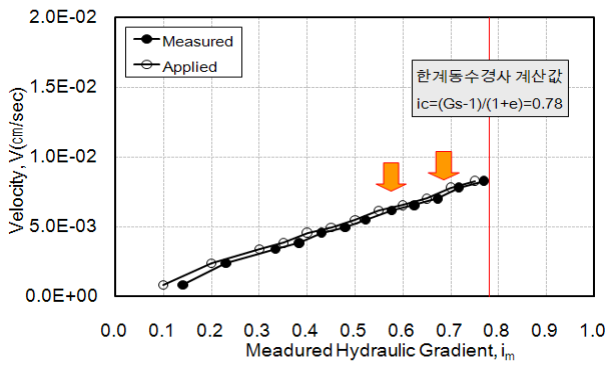


(c) Case 3 ( $D_r=50\%$ )

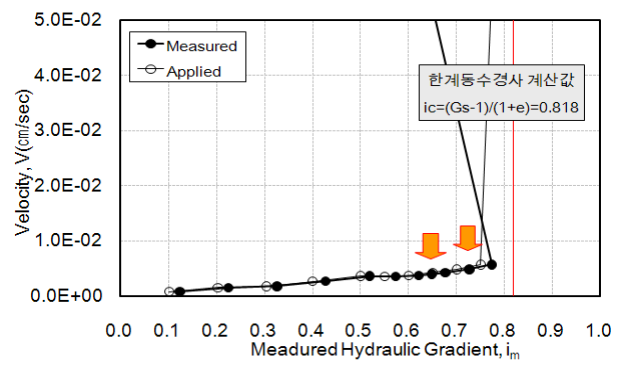


(d) Case 4 ( $D_r=75\%$ )

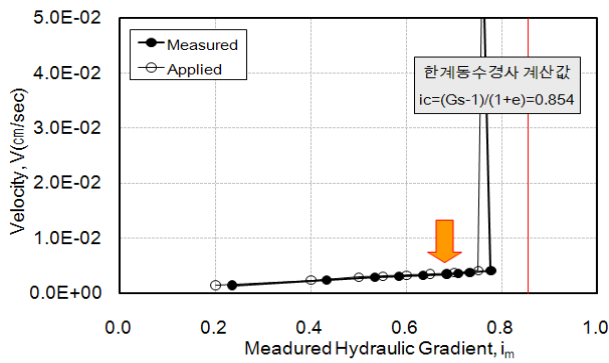
그림 6. 동수경사에 따른 유량증분 변화



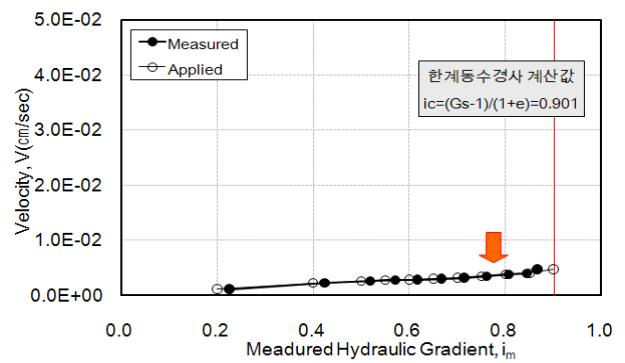
(a) Case 1 ( $D_r=9\%$ )



(b) Case 2 ( $D_r=25\%$ )



(c) Case 3 ( $D_r=50\%$ )



(d) Case 4 ( $D_r=75\%$ )

그림 7. 동수경사에 따른 유속 변화

### 3.2 한계동수경사의 결정

표 3은 수두 증분, 유량 증분, 표면고 변화 등을 통해 파악한 한계동수경사이며, 한계상태 관정은 각 조건별로 해당 동수경사에서 큰 값의 변화를 나타내는 지점을 선정하였다. 또한 각 조사항목별 동수경사 값은 수두 증분이 발생하기 직전(측정값 1)과 직후(측정값 2)의 동수경사 평균값을 사용하였으며, 한계동수경사는 측정된 평균 동수경사 중 안전측으로 평가하기 위하여 표 4에서와 같이 각 Case별 최소값을 한계동수경사로 결정하였다.

표 3. 파이핑이 발생한 조사항목별 동수경사 결정

구 분	수 두			수두 증분			표면고 변화		
	측정값 (1)	측정값 (2)	평균값	측정값 (1)	측정값 (2)	평균값	측정값 (1)	측정값 (2)	평균값
Case 1	0.522	0.577	0.549	0.522	0.577	0.549	0.430	0.479	0.455
Case 2	0.677	0.727	0.702	0.677	0.727	0.702	0.677	0.727	0.702
Case 3	-	-	-	0.685	0.732	0.709	0.685	0.732	0.709
Case 4	0.713	0.761	0.737	0.761	0.807	0.784	0.807	0.845	0.826
구 분	유 량			유량 증분			유 속		
	측정값 (1)	측정값 (2)	평균값	측정값 (1)	측정값 (2)	평균값	측정값 (1)	측정값 (2)	평균값
Case 1	-	-	-	0.672	0.716	0.694	-	-	-
Case 2	-	-	-	0.621	0.676	0.648	0.733	-	0.733
Case 3	-	-	-	0.732	0.776	0.750	0.777	-	0.777
Case 4	0.867	-	0.867	0.713	0.761	0.737	0.866	-	0.866

표 4. 파이핑 시험결과에 따른 한계동수경사 결정

구 분	수 두	수두 증분	표면고 변화	유 량	유량 증분	유 속	결정값
Case 1	0.549	0.549	0.455	-	0.694	-	0.455
Case 2	0.702	0.702	0.702	-	0.648	0.733	0.648
Case 3	-	0.709	0.709	-	0.750	0.777	0.709
Case 4	0.737	0.784	0.826	0.867	0.737	0.866	0.737

### 3.3 한계유속의 결정

한계유속은 표 5와 같이 앞서 산정된 한계동수경사에 해당하는 유량 측정결과로부터 계산된 값이며, 이 역시 측정값(1)과 측정값(2)의 평균을 취하였다. 파이핑 발생시 측정된 유량으로부터 산정된 한계유속은 상대밀도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.

표 5. 파이핑 시험결과에 따른 한계유속 결정

구 분	상대밀도	한계동수경사 결정값, $i_c$	한계유속, $V_c$		
			추정값 (1)	추정값 (2)	결정값
Case 1	9.0	0.455	4.55E-03	4.93E-03	4.74E-03
Case 2	31.0	0.648	3.69E-03	4.23E-03	3.96E-03
Case 3	49.8	0.709	3.50E-03	3.76E-03	3.63E-03
Case 4	72.3	0.737	3.21E-03	3.50E-03	3.36E-03

## 4. 결과 분석

### 4.1 파이핑 시험 결과와 경험식과의 비교 분석

#### 4.1.1 한계동수경사의 비교 분석

본 연구에서 수행한 파이핑 시험결과에 의해 추정된 한계동수경사와 기존 경험식에 의해 산정된 한계동수경사를 비교한 결과는 표 6과 같다. 경험식에 의해 산정된 한계동수경사는 대부분 Terzaghi식에 의한 값보다 작은 값에서 파이핑이 발생하였다. 따라서 일반적인 Terzaghi식을 바탕으로 한계동수경사 산정시 안정성에 문제가 있을 것으로 판단되며, Terzaghi식에 의한 산정값에 안전율을 적용하거나 보정계수를 도입한 Kalin(1977) 또는 Hayashi(1978)의 경험식으로 산정하는 것이 안전할 것으로 판단된다.

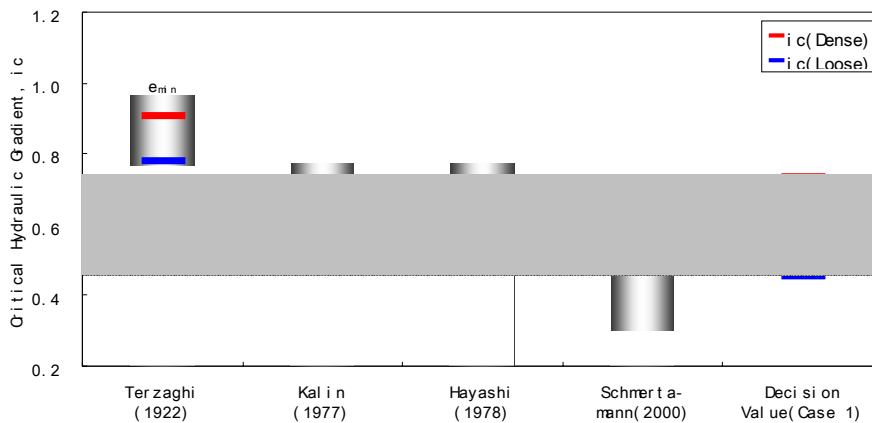


그림 8. 파이핑 시험과 경험식에 의한 한계동수경사의 비교

표 6. 파이핑 시험과 경험식에 의한 한계동수경사의 비교

구 분	실측에 의한 한계동수경사 ( $i_c$ )	경험식			
		Terzaghi (1922)	Kalin (1977)	Hayashi (1978)	Schmertmann (2000)
Case 1	0.455	0.780	0.624	0.624	0.300-0.610
Case 2	0.648	0.818	0.654	0.654	0.300-0.610
Case 3	0.709	0.854	0.683	0.683	0.300-0.610
Case 4	0.737	0.907	0.726	0.726	0.300-0.610



Terzaghi(1922) 경험식을 이용하여 예측한 한계동수경사와 파이핑 시험으로 파악된 한계동수경사를 비교한 결과는 그림 9와 같으며, Terzaghi 경험식을 이용하여 파이핑에 대한 안전율을 적용할 경우 Case 1, 즉 준설지반의 지표와 같이 상대밀도가 낮은 경우를 고려하여 안전율 2.0을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

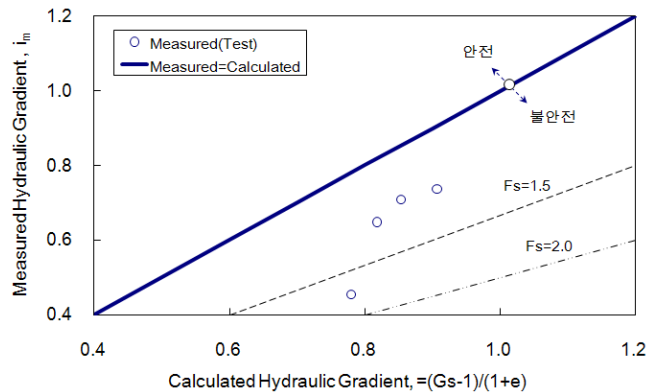


그림 9. 경험식을 이용한 파이핑 안전율에 대한 검토

#### 4.1.2 한계유속의 비교 분석

경험적 한계동수경사와 상대밀도별 시험결과를 경험식에 따라 한계유속을 산정하여 추정된 결과값을 비교하였다. Justin(1923), Sughii(1989)의 경험식에 의해 유효입경( $D_{10}$ )을 적용하여 한계유속을 도시화하였으며, 나머지 경험식에 대해서는 상대밀도에 따라 한계동수경사 결정값 이하에서 단위유량에 따른 투수계수를 산정하여 적용하였다.

댐설계기준(2005)에 따라 Justin, Sughii의 경험식의 1/100의 값을 허용한계유속 최소값으로 정의하여 도시화한 결과, 모든 경우 허용한계유속보다 작은 값을 나타냈다. 또한 상대밀도에 따라 한계유속을 도시화한 나머지 경험식에 대해서는 Kovacs(1982), Scharadt(1928)과 Abramov(1952)의 경험식에 의한 최소 한계유속보다 모두 작게 나타났으며, Schmieder(1975)의 경우에도 모든 Case에 대해서는 한계유속이 작은 것으로 나타났다. 경험식에 의해 한계유속을 산정한 결과와 시험결과를 비교한 결과, 모든 경험식의 최소값보다 시험결과가 작게 나타났으므로 본 연구대상지역의 준설토는 경험식을 통해 한계유속을 결정할 경우 안정성에 문제가 발생할 것으로 판단된다.

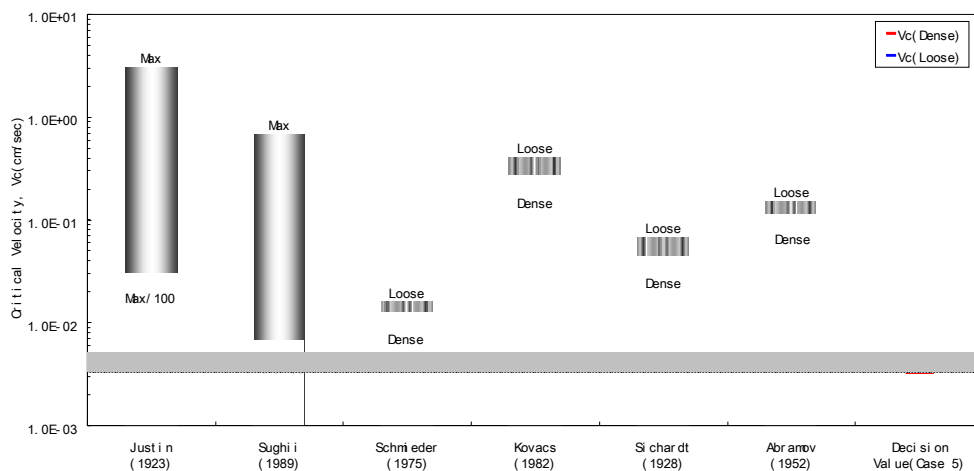
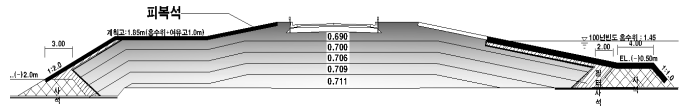
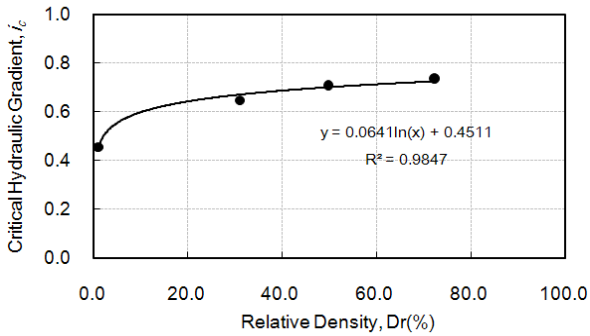


그림 10. 파이핑 시험과 경험식에 의한 한계유속의 비교

## 4.2 한계동수경사의 적용

상대밀도에 따른 한계동수경사는 그림 11과 같이 매우 높은 상관관계를 나타낼 것으로 예상되며, 실측된 단위중량과 비교하여 시공시 제체 단면에서의 심도별 한계동수경사를 예측할 수 있다. 각 단계별 심도는 1.0m로 구분하여 한계동수경사를 예측한 결과, 심도 1.0m의 한계동수경사는 상대밀도 42% 가정시 0.642, 5.0m에서 58% 가정시 0.711로 예측되었다.



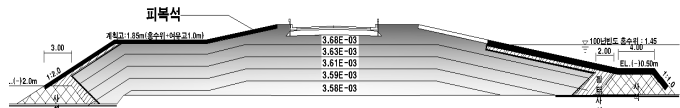
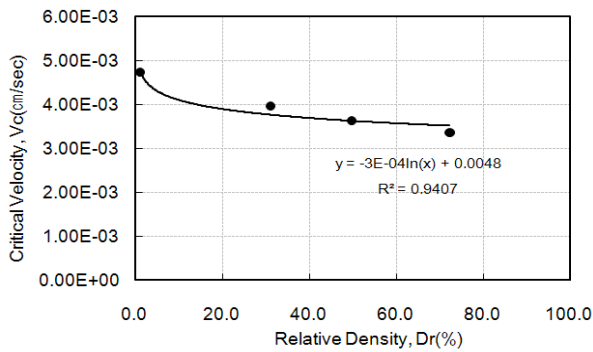
(a) 상대밀도에 따른 한계동수경사

(b) 한계동수경사 분포도

그림 11. 상대밀도에 따른 한계동수경사의 적용

## 4.3 한계유속의 적용

상대밀도에 따른 한계유속은 그림 12와 같은 추세를 나타낼 것으로 예상되며, 매우 높은 상관관계를 나타냈다. 각 단계별 심도는 1.0m로 구분하여 한계유속을 예측한 결과, 심도 1.0m의 한계유속은 상대밀도 42% 가정시 3.68E-03cm/sec, 5.0m에서 58% 가정시 3.58E-03cm/sec로 예측되었다.



(a) 상대밀도에 따른 한계유속

(b) 한계유속 분포도

그림 12. 상대밀도에 따른 한계유속의 적용

## 5. 결론

본 연구에서는 파이핑 안정성을 검토하기 위한 방법으로써 이론적인 접근으로 실제 현장의 토질 조건에 따른 영향을 반영하지 못하는 한계를 보완하기 위하여 실내시험을 통해 시료별 한계동수경사를 이용하여 파이핑 안정성 평가를 수행하였으며, 시험 결과와 이론식의 비교를 통해 적용 적합성을 확인하였다. 다음은 본 연구로부터 도출된 결론들은 다음과 같다.

- (1) 파이핑 발생 시점을 판단하기 위하여 수두변화, 수두증분 변화, 유량, 표면고 및 유속을 분석하였다. 동수경사에 따른 수두 및 유량 변화를 검토한 결과 관측수두의 변화를 이용하여 파이핑 시점을 파악하기 쉽지 않음에 따라 수두 증분 및 유량 증분을 활용한 결과 변곡점이 발생함을 확인하여 이를 한계동수경사 결정에 반영하였다. 표면고의 변화도 수두 증분 및 유량 증분에서와 비슷한 시점에서 급격한 표면고 증가 현상이 나타남을 확인하였다.
- (2) 측정결과를 바탕으로 결정된 한계동수경사는 안전측 설계를 위해 가장 낮은 값으로 선정하였으며, 상대밀도 9%에서의 한계동수경사는 0.455, 75%에서의 한계동수경사는 0.737로 나타났으며 이 값은 대부분 Terzaghi의 식보다 작은 값을 나타냈다.
- (3) 한계동수경사일 때의 유량으로 파악한 한계유속은 상대밀도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. Case 1( $D_r=9\%$ )의 한계유속은  $4.73E-03\text{cm/sec}$ 이고, Case 4( $D_r=75\%$ )은  $3.36E-03\text{cm/sec}$ 로 나타났다. 예측된 한계유속은 대부분 이론식보다 낮음을 확인하였다.
- (4) 새만금 방수제 대표단면에 대한 투기고와 상대밀도 등을 분석하여 결정된 한계동수경사 및 한계유속 분포도로 볼 때, 파이핑 발생 가능성이 가장 높은 제체 최하단부의 한계동수경사는 0.711, 한계유속은  $3.58E-03\text{cm/sec}$ 이다.

## 참고문헌

1. 권교근, 한상현(2006) “우리나라 하천제방에 대한 내부침식 파괴 과업: 사례과업”, **대한토목학회논문집**, 제26권, 제1C호, pp.33-42
2. 신방웅(2000), “파이핑 현상에 따른 하천제방의 안정성 평가”, **건설기술연구소 논문집**, 제 19권, 제 2호, pp.157~167.
3. 이 송(2003), “하천제방의 세굴에 대한 안정성 연구”, **한국구조물진단학회**, 제 7권, 제 3호, pp.175~181.
4. 장남주(2009), “제체의 파이핑 안정성 평가에 대한 실험적 연구”, 한양대학교 석사학위논문
5. 정형식, 류재일, 안상로(1989) “토질 제체의 파이핑 파괴에 대한 시험적 과업”, **대한토질공학회지**, 제 5권, 제 4호, pp.17~26.
6. Kalin, M.(1977), “Hydraulic Piping-Theoretical and Experimental Findings”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 14, No. 1, pp.107~124.
7. Kovacs, G.(1981), *Seepage Hydraulics*, Elsevier Scientific Publishing Co., pp.349~362.
8. NAVFAC(1982), *Foundations and Earth Structures*, Design Manual 7.2, pp.38~43.
9. Schmertmann, J. H.(2000) “The No-Filter Factor of Safety against Piping through Sands”, *ASCE, Geotechnical Special Publication*, No.111, pp.65~133.
10. Sherard, J. L.(1953) “Influence of Soil Properties and Construction Methods on the Performance of Homogeneous Earth Dams”I, Technical Memorandum 645, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, pp.1~71.
11. Sherard, J. L., Dunnigan, L.P. and Talbot, J.R.(1984) “Basic properties of sand and gravel filters”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 10, No .1, pp.684~700.
12. Sughii, T. O., Sato, D., Woono, D. O. and Yamada, S. G. (1989) “Process of Seepage Failure and Effect of Heterogeneity in Soil(Japanese)”, *Soil and Foundation*, Vol. 6, pp. 17~22.