

하천제방 간이투수조사장비의 개발과 적용성 평가에 관한 연구

Development of the Simplified Measurement Device for Permeability of the Levee and the Determination of Its Applicability

김진만¹ Kim, Jin-Man

진영지² Jin, Young-Ji

최봉혁³ Choi, Bong-Hyuck

이대영⁴ Lee, Dae-Young

Abstract

It is difficult to determine the strength and the permeability of a soil levee quantitatively because the damages of a levee have been evaluated only by visual inspection in Korea. Therefore, it is necessary to develop a simplified measurement device for measuring the strength and permeability of a levee. In this paper, a new in-situ permeability measuring device which can measure strength and permeability based on GWP is developed and its applicability to the field permeability test of a soil levee is introduced. From the laboratory and in-situ experiments, the new measuring device has the potential of measuring the soil permeability simply and accurately.

요지

국내 하천제방의 안정성 평가는 현장조사의 경우 육안점검에 의한 손상 유무만을 평가하고 있어, 강도 및 투수성 변화 등을 정량적으로 평가하기는 어려운 실정이다. 따라서 실제 현장의 강도 및 투수성 평가를 통한 합리적인 제방 안정성 평가를 위해 하천제방 간이조사장비의 개발이 필요한 것으로 판단된다. 본 논문에서는 GWP법을 적용하여 현장에서 흙의 투수성과 강도를 평가할 수 있는 일원화 된 간이 현장장비를 개발하였으며 간이투수성 평가에 대한 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 새로 개발한 조사장비는 실내 및 현장 적용성 평가결과에 따르면, 사용이 용이하고 정밀도가 높아 현장 투수계수 평가에 유용할 것으로 판단된다.

Keywords : In-situ permeability test, Soil permeability, Guelph well permeameter, Levee

1. 서론

하천제방은 기초지반과 제체가 일체가 되어 하천수가 제내지 측으로 범람하는 것을 방지하기 위해 토사로 축조된 치수공작물이다. 국내에서는 1960년대부터 본격적인 국토개발이 시작되어, 하천의 경우도 이수기능을 위한 수자원개발사업과 치수기능을 위한 하천개수사업이 시작되었다. 이때, 하천개수사업에서 가장 중요

한 것은 홍수범람을 방지하기 위한 제방축조이나, 하천 정비 초기 단계에서는 제한된 예산으로 최대의 치수효과를 얻기 위해 부적절한 제체재료를 이용하여 쌓은 제방도 다수 존재하는 것으로 알려져 있다.

특히, 각종 치수대책시설은 구조물의 완성시점부터 시간 경과와 함께 당초의 기능이 점차 저하하며, 하천제방의 경우에도 축제 후 기능이 저하하는 현상이 보고되고 있다. 제체의 내침투성 기능 또한 시간경과와 함께

1 정희원, 한국건설기술연구원 연구위원 (Research Fellow, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, KICT)

2 정희원, 한국건설기술연구원 Post-Doc. (Post-Doc., Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, KICT, jinyoungji@kict.re.kr, 교신저자)

3 정희원, 한국건설기술연구원 전임연구원 (Researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, KICT)

4 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Senior researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, KICT)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

저하하며, 형상·외관 관찰 및 제체내 품질변화를 측정함으로써 변형정도를 파악할 수 있다고 한다(JICE, 2006). 또한 하천수·우수가 제체내에 침투하여 발생하는 제방 비탈면의 파괴는 표층부 붕괴가 대부분을 차지하고 있어, 기설제방의 안정성 간이 측정 및 평가는 제방비탈면 부근의 표층부에 초점을 맞추는 것이 유용하다고 보고하였다(그림 1 참조).

국내 하천제방의 안정성 평가는 하천관리자에 의한 육안점검에 의존하고 있으며, 정밀안전진단을 수행하는 경우 육안점검 외에 필요에 따라 현장실험 및 수치해석을 통한 안정성 평가를 하고 있다. 하지만, 육안점검은 간단한 외관상태 평가를 통한 개략적인 안정성 평가는 가능하나, 제방 노후화에 따른 강도 및 투수성 변화를 정량적으로 평가할 수 없는 단점이 있어, 하천관리자 또는 점검자가 제방 안정성 평가 시 제방의 강도 및 투수성을 판정 할 수 있는 간이조사장비의 개발이 필요한 실정이다.

일반적으로 함수상태 및 제체 내 수위조건에 따라 제체 내 침투상황이 달라지므로 제체의 투수성을 정확히 파악하는 것은 어려운 것으로 알려져 있으며, 간이현장투수시험법으로 다음과 같은 적용사례가 있다. 현장투수시험법은 포화지반 투수성의 경우 양수법에 의해 평가하고 있으며, 제체와 같은 불포화 지반에 대한 현장투수성의 경우 『E-19법(필드담, 2003)』과 같은 간단한 원리를 이용하여 파악할 수 있으나 마리오트식 급수탱

크와 같은 시험장치가 많아 현장적용이 용이하지 않은 것으로 알려져 있다. 한편, 캐나다 켈프대학(Reynolds and Elrick, 1990)에서는 마리오트식 급수탱크를 관측공위에 세워 삼각대로 지지한 간단한 구조로 휴대가 용이하도록 『E-19법』을 개량하여 『켈프식 웰 퍼미아미터법(1993, 이하, GWP법이라 함)』을 개발하였다. 또한, Morii (2005)는 강제 단일 링에 마리오트식 급수탱크를 연결한 켈프식 프레스 인필트로미터(GPI)법(Reynolds and Elrick, 1990)과 GWP법을 이용하여 현장 투수시험법으로서의 적용성과 실무성을 평가하였다. 평가결과에 따르면 두 시험법은 모두 간단한 장치를 이용하여 성토지반의 투수계수를 용이하게 추정할 수 있으며 현장 적용성이 우수한 것으로 평가되었다. 하지만 국내에서는 GWP법 투수시험장비는 고가로 수입에 의존하고 있어 활성화되어 있지 않은 실정이다. 따라서 성토 제방체에 대해서 GWP법을 바탕으로 한 간편하고 정밀도 높은 현장 투수시험법의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 기존 육안점검의 단점을 보완하고자 하천관리자가 제방 안정성평가 수행 시에 활용할 수 있도록 간이 강도 및 투수성 측정이 가능한 복합실험장비인 KICT-II형을 개발하였다. 이에 본 논문에서는 KICT-II형 장비의 투수성 측정 장비로서의 적용성을 평가하고자 현장투수시험이 용이하다고 보고된 GWP법 투수실험장비를 제작하였으며, 실내 및 현장 투수실험을 실시하여 비교·분석하였다.

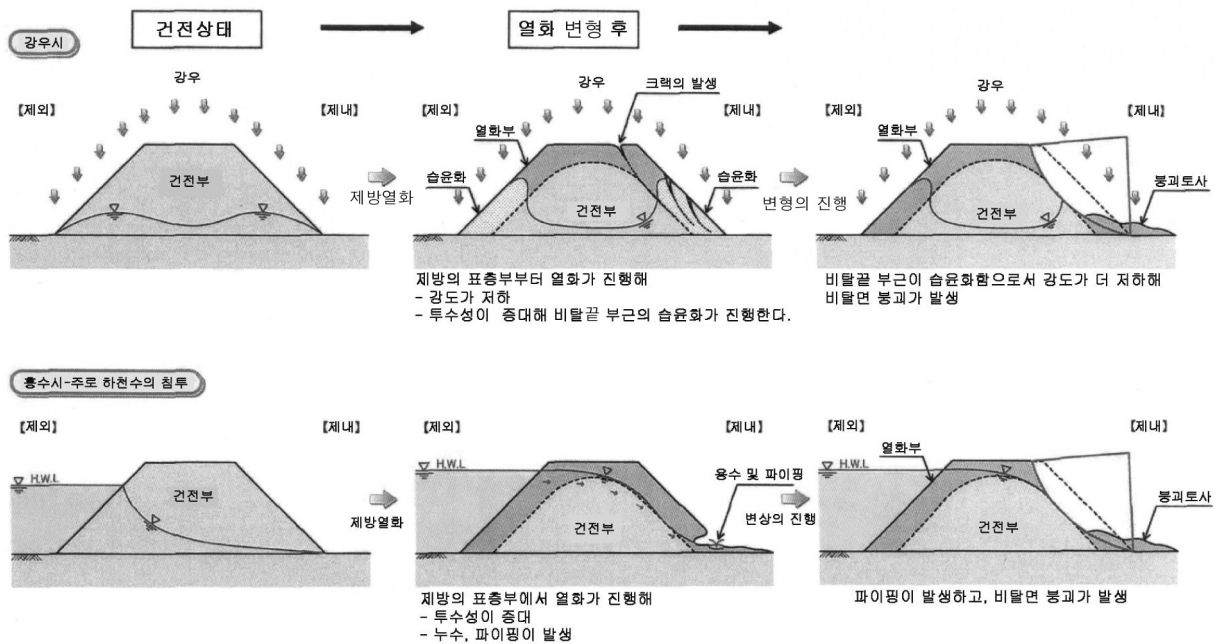


그림 1. 제체표면의 변형발생에서 제내비탈면 붕괴에 이르는 메커니즘의 모식도

2. 개발 투수시험장비

2.1 GWP법 투수시험의 개요

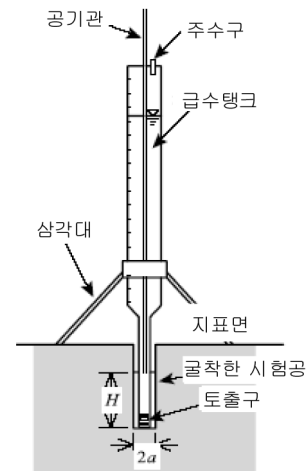
GWP법은 마리오트 사이폰 원리를 이용하여 개발한 간이현장투수시험 장치로, 마리오트 사이폰의 원리에 대해 설명하면 다음과 같다. 우선, 시험공 B의 수위가 안정된 상태라 가정하면 A수조에 연결된 파이프는 a지점에서 B의 수면에 접하고 있다. 이때, 지반 침투로 인하여 B수조의 수위가 하강할 경우 a를 통하여 A수조에 작용하는 공기압으로 인한 수위차로 B수조로의 흐름이 발생한다. B수조의 수위는 A수조와 연결된 정수위유지관 설치높이(a 지점)까지 상승하여, 지반침투에 따른 B수조의 정수위 H를 유지시키게 된다(그림 2 참조). 그림 3에는 Morii가 개발한 GWP법 장비와 본 연구에서 제작한 GWP법 장비를 나타낸다.

Morii et al.(2001)가 개발한 GWP법 투수시험 장비는 지반표면에서 지름 $2a$ (a:시험공의 반지름)의 시험공을 굴착한 후, 급수탱크 내 공기관을 조정하여 시험공내에 소정의 정수위 H를 부여하고, H 이하의 측벽과 시험공 바닥면에서 토양 속으로 들어가는 침투량을 측정한다. 시간의 경과와 더불어 침투량이 일정해지면, 이를 정상 침투량 Q_s 로 간주하고 시험을 종료하며, 현장 포화투수 계수(Field-saturated hydraulic conductivity of soil) K_{fs} 는

다음의 식으로 산출할 수 있다.

$$K_{fs} = \frac{C \cdot Q_s}{2\pi H^2 + C\pi a^2 + (2\pi H/\alpha^*)} \quad (1)$$

여기에서 α^* 는 토양 파라미터로 시험 전에 정해 둘 필요가 있으며, 토양의 조직이나 구조에 따라 표 1에 제시된 값이 권장되고 있다(Elrick and Reynolds, 1992). 식 (1)은 수치계산실험을 통해 지표면상에 있는 점원에서 침윤에 관한 이론해를 시험공 원통형 침윤에 확장 적용하여 유도하였다. C는 이 확장을 위해 도입된 형상계수



(a) Morii가 개발한 GWP법



(b) 본 연구에서 제작한 GWP법

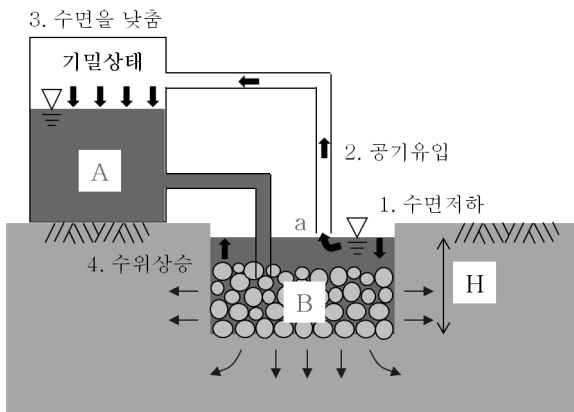


그림 2. 마리오트 사이폰 원리

그림 3. 기존의 투수시험장비

표 1. 토양의 조직/구조 분류에 따른 α^* 의 권장치

토양의 조직/구조분류	α^* (cm ⁻¹)
매립폐복재나 라이너 등의 다점구조가 없는 점성재료, 호성 또는 해성 퇴적토 등	0.01
미립조직(점성)으로 비구조성 토양	0.04
비구조성 재료와 잔모래를 포함하는 점토에서 림까지의 대부분의 토양 및 일반흙의 최초 선택 값	0.12
조사와 자갈질 모래 및 큰 균열과 매크로포어를 가진 고도로 구조화 된 토양 포함	0.36

표 2. 형상계수 C 의 함수를 부여하는 회귀적합계수

토양	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
점성토	-0.0069	0.2124	0.5542	-0.2137	0.026
흙	-0.0039	0.1989	0.576	-0.21	0.0259
모래	-0.0055	0.255	0.4735	-0.1447	0.015

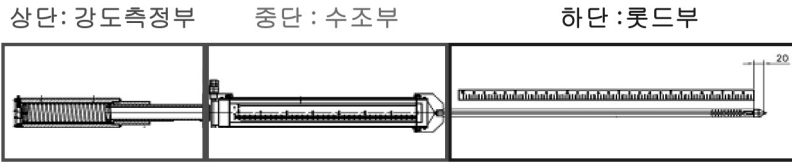


그림 4. 개발 장비의 구성 및 실험도구

로 토양의 종류에 따라 시험공의 형상비 H/a 의 함수로 주어지며(Reynolds, 1993), 다음과 같은 4차식이 제안되어 있다(Morii et al., 2005). 여기에서 b_0 부터 b_4 는 토양의 종류에 따라 표 2에 나타난 값을 취한다.

$$C = b_0 + b_1 \cdot \sqrt{H/a} + b_2 \cdot (\sqrt{H/a})^2 + b_3 \cdot (\sqrt{H/a})^3 + b_4 \cdot (\sqrt{H/a})^4 \quad (2)$$

2.2 개발장비의 개요

본 연구에서는 간이 관입측정장비와 GWP법 투수장비를 간략화하여 강도 및 투수성 측정이 가능한 복합시험장비인 KICT-II형을 개발하였다. 투수성 측정에 대해서 KICT-II형은 마리오트 사이폰 원리를 이용한 GWP 투수방식과 동일한 방법을 채택하였으며, 현장에서 용이하게 사용할 수 있도록 다공질 스틸재로 개량하였다(그림 4 참조). 개발 장비는 크게 강도측정부, 수조부, 룯드부로 구성되며, 실제 현장 투수시험을 수행할 때에는 강도측정부를 수조부로부터 탈착하여 룯드부 및 수조부만 연결하여 사용하고, 강도 실험시에는 룯드부, 수조부 및 강도측정부를 연결하여 사용하므로 투수시험과 강도실험을 동시에 수행할 수는 없다.

또한 개발장비의 총 무게는 6kg 이내로 기존의 간이 투수시험 장비와 강도실험 장비에 비해 크기와 무게를 줄임으로써 이동 및 현장 측정이 용이한 것으로 판단된다.

2.3 개발장비의 실험방법 및 주의 사항

GWP법과 KICT-II형 투수시험장비는 제작원리가 같

으므로 실험에 필요한 도구 및 실험방법이 동일하며 실험방법 및 주의사항은 다음과 같다.

- 1) 실험대상 지반을 원통형으로 굴착하고 시험공의 지름 길이 $2a$ 를 측정한다.
- 2) 투수관 끝에 위치한 유공관 부분을 시험공에 잘 맞춰 넣는다.
- 3) 공기관을 삽입한 후 주수밸브로 물을 채워 넣는다. 이때, 물의 온도는 주위 온도와 같아야 하며, 증류수 및 이온이 제거된 물은 사용하지 않는다.
- 4) 공기밸브와 주수밸브를 잠근 후 공기관을 천천히 연속적으로 들어 올려 투수시험을 시작한다. 이때, 공기관을 빨리 들어 올리면 지반과 유공관 사이의 틈을 통해 누수가 발생할 수 있으므로 주의한다.
- 5) 공기관 끝에서 기포가 발생하면 공기관을 들어 올린 길이 $H(\text{cm})$ 를 측정한다.
- 6) 일정 시간동안에 투수관내 수위 감소폭이 일정해 지는지 확인한 후, 시간당 유출량을 수회 측정하여 평균유출량 Q_s 를 측정한다.
- 7) 투수계수는 식(1)을 이용하며, a^* 및 형상계수 C 는 표 1, 2를 참조하여 계산한다.

3. 현장 적용성 평가를 위한 실험

그림 5는 개발장비를 이용하여 토사퇴적 지반에서 측정된 유출량의 시간변화를 나타낸다. 실험 개시 후 10분 이내에 단위시간당 유출량의 변화가 일정해 지는 것을 확인할 수 있다. GWP법을 이용한 Morii의 연구에서도

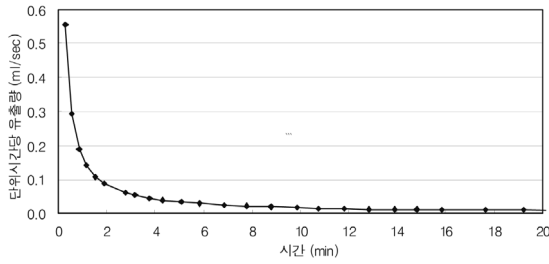


그림 5. 개발장비로 측정한 유출량의 시간변화

표 3. 현장실험 실험변화요소 및 실험개수

실험변화요소	실험개수
<ul style="list-style-type: none"> ◦흙종류 : 3종 (화강풍화토 2종(SM), 모래 1종(SP) 제방) ◦횡단 4개소 측정: 앞비탈 1개소, 독마루 2개소, 뒷비탈 1개소 ◦장비형태 : 기존 투수시험기(GWP), 개발 투수시험기(KICT-II형) 	◦3×4×2=24

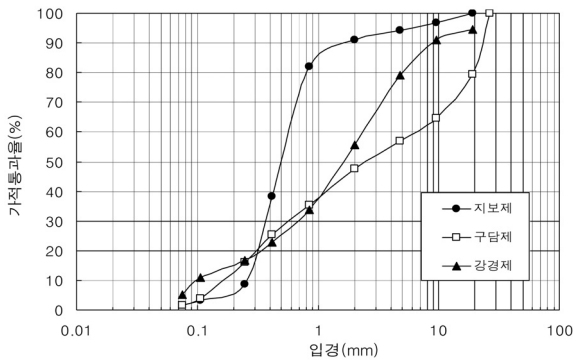


그림 6. 횡단실험 수행 현장의 입도분포곡선

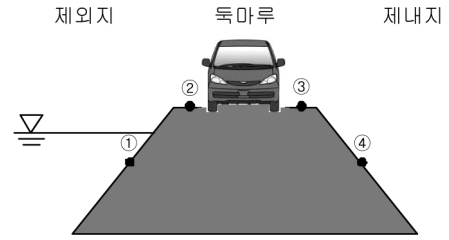
지반의 초기 수분상태에 관계없이 실험 시작 후 약 7, 8분 후에 유출량이 일정하게 된다고 보고되었다. 한편, 한 지점에서 유출량 측정에 소요되는 시간은 장치의 설치에서부터 유출량 측정종료까지 약 30분에서 한 시간 정도로 조사되어, 현장에서 많은 시간을 들이지 않고 간편하게 투수계수를 측정할 수 있는 것으로 판단된다.

3.1 현장투수시험의 내용 및 시료

본 절에서는 간이조사장비의 현장 적용성을 평가하

표 4. 현장투수시험결과(k cm/sec)

	No.	강경제		구담제		지보제	
		GWP 법	KICT-II	GWP 법	KICT-II	GWP 법	KICT-II
제외지	①	1.35E-05	3.57E-05	1.61E-05	1.38E-06	6.86E-05	1.44E-06
독마루	②	1.52E-05	1.30E-05	3.32E-05	3.21E-06	5.97E-05	2.61E-06
	③	2.83E-05	5.20E-05	2.93E-05	1.88E-06	5.09E-05	1.86E-06
제내지	④	2.15E-05	4.85E-05	2.56E-05	3.42E-06	9.75E-05	1.31E-06



(a) 현장 투수시험 실시위치



(b) GWP법



(c) KICT-II형

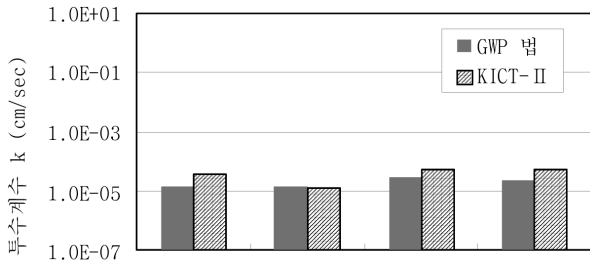
그림 7. 현장 투수시험 실시위치 및 투수시험 실시장면

기 위해 제방 횡단면에 따라서 투수시험을 실시하였으며 실험변화요소 및 개수는 표 3과 같다. 현장 지반의 조건은 화강풍화토 2종(충남 논산시 강경제, 경북 안동시 구담제), 모래 1종(경북 예천군 지보제)으로 그림 6에 각 흙시료의 입도분포곡선을 나타낸다.

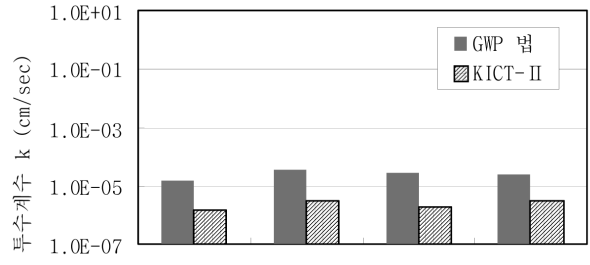
3.2 현장투수시험 결과

현장간이투수시험은 그림 7(a)에서 보듯이 제방 횡단면을 따라 4개소에서 GWP장비와 개발 KICT-II형 장비를 이용하여 수행하였으며, 그 결과를 다음과 같이 비교·분석하였다. 실험전경은 그림 7(b), (c)와 같으며, 실험은 오거를 이용하여 직경 8~14cm, 깊이 12~19cm 이내로 실험공을 굴착한 후 실험장비를 설치하여 실험기간 동안의 감소수위 및 시간을 측정하였다.

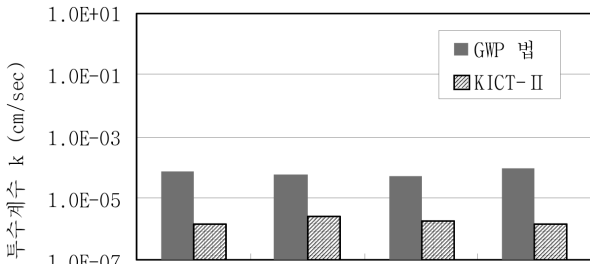
우선, 실험장비에 따른 투수특성을 살펴보면 강경제의 경우 GWP법과 KICT-II형 투수시험으로부터 얻어진 투수계수의 값이 서로 유사한 것을 알 수 있다. 이에 비



(a) 강경제(화강풍화토 제방)



(b) 구담제(화강풍화토 제방)



(c) 지보제(모래 제방)

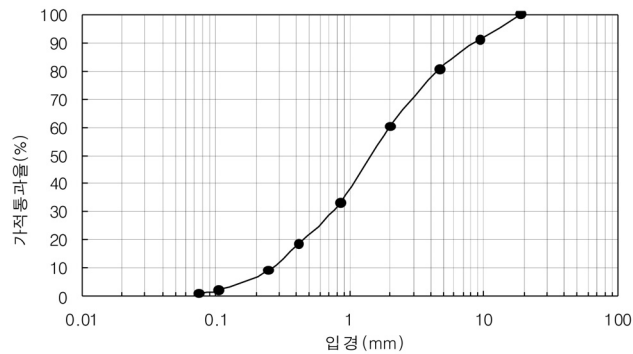
그림 8. 현장투수실험 결과

해, 구담제의 경우 KICT-II형 결과가 GWP법 결과에 비해 전체적으로 작은 값을 나타내나 비슷한 경향을 나타내고 있으며 투수계수 값의 차이도 1차수 이내로 크지 않는 것을 확인할 수 있다. 모래제방인 지보제의 경우에도 KICT-II형 결과가 GWP법 결과에 비해 전체적으로 작은 값을 나타내나 서로 유사한 경향을 나타낸다. 따라서 본 연구에서 개발한 KICT-II형은 기존 장비인 GWP법 투수장비와 유사한 결과를 나타내어 현장 적용성이 우수한 것으로 판단된다.

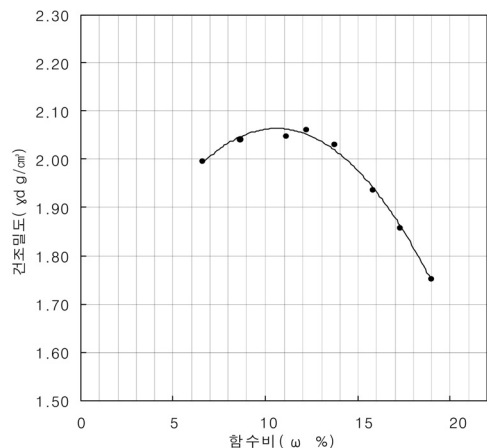
한편, 제방 횡단면에 대한 측정위치에 따른 투수특성을 살펴보면 제외지, 뚝마루, 제내지에 따른 위치에 상관없이 비슷한 값을 보이고 있다. 이는 제방 표면이 전체적으로 강우 및 우수에 의한 외력, 동결융해, 건습 등으로 인해 노출되어 측정위치의 특성에 따른 투수계수 편차가 크지 않은 것으로 평가된다.

3.3 실내투수실험 결과

실내 실험에 사용된 흙 시료는 경기도 고양시 곡릉제의 화강풍화토(SM)로 흙 시료의 공학적 특성은 그림 9의 입도분포곡선과 D다짐에 의한 다짐특성 곡선과 같다. 건조축 다짐도 90%에서 투수실험한 결과, GWP법 장비로 측정된 투수계수는 4.71E-05(cm/sec), KICT-II형 장비로 측정된 투수계수는 1.30E-05(cm/sec)로 유사한 값을 보인다. 또한 실내정수위시험기로 측정된 투수계수는 3.58E-04(cm/sec)로 GWP법 장비 및 KICT-II형 장비보다 적은 값을 나타내나 값의 차이는 1차수 이내로 크지 않는 것을 확인할 수 있다.



(a) 입도분포곡선



(b) 다짐특성 곡선

그림 9. 실내실험 시료의 공학적 특징

4. 결 론

국내 하천제방의 안정성 평가는 하천관리자에 의한 육안점검에 의존하고 있어, 제방 노후화에 따른 강도 및 투수성 변화 등 정량적으로 평가하기 어려운 실정이다. 이에 제방의 강도 및 투수성을 판정할 수 있는 일원화된 간이조사장비를 개발하였으며, 본 연구에서는 실내 및 현장 투수실험을 통해 개발장비에 대한 투수성 측정 장비로서의 적용성을 평가하였다. 그 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 개발장비를 이용하여 한 지점에서 유출량 측정에 소요되는 시간은 장치의 설치에서부터 유출량 측정 종료까지 약 30분에서 한 시간 정도로 조사되어, 현장에서 많은 시간을 들이지 않고 간편하게 투수계수를 측정할 수 있는 것으로 판단된다.
- (2) 현장간이투수실험의 결과, 투수실험장비에 따른 투수특성은 KICT-II형 투수시험결과가 GWP법 투수실험결과에 비해 전체적으로 작은 값을 나타내나 비슷한 경향을 나타내며 값의 차이도 1차수 이내로 크지 않는 것을 확인할 수 있다.
- (3) 현장간이투수시험의 결과, 제방 횡단면에 대한 측정위치에 따른 투수특성을 살펴보면 제외지, 독마루, 제내지에 따른 위치에 상관없이 비슷한 값을 보이고 있다. 이는 제방 표면이 전체적으로 강우 및 유수에 의한 외력, 동결융해, 건습 등으로 인해 노출되어 측정위치의 특성에 따른 투수계수 편차가 크지 않은 것으로 평가된다.
- (4) 실내간이투수시험의 결과, 화강풍화토를 이용하여 건조축 다짐도 90%에서 GWP법 장비로 측정한 투수계수는 $4.71E-05(\text{cm}/\text{sec})$, KICT-II형 장비로 측정

한 투수계수는 $1.30E-05(\text{cm}/\text{sec})$, 실내정수위시험기로 측정한 투수계수는 $3.58E-04(\text{cm}/\text{sec})$ 로 값의 차이는 1차수 이내로 크지 않는 것을 확인할 수 있다.

- (5) 실내 및 현장투수실험 결과로부터 본 연구에서 개발한 간이 투수시험장비인 KICT-II 형은 기존 장비와 유사한 결과를 나타내며, 측정이 간편하며 계속 소요시간이 짧아 현장 적용성이 우수한 것으로 판단된다. 향후 장비의 경량화를 통해 더욱 휴대성을 향상시키고 정밀도를 향상시켜 계속치의 오차범위를 줄여 나갈 필요가 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Reynolds and Elrick (1990), Poned infiltration form a single ring: I, Analysis of steady flow, Soil Science Society of America Journal, 54:1233-1241
2. Elrick and Reynolds (1992), Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers, Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice edited by G. C. Topp, W. D Reynolds and R. E. Grenn, SSSA Special Publication, 30, Soil Science Society of America, Madison, WI:1-24.
3. Reynolds (1993), Saturated hydraulic conductivity: Field measurement, Soil Sampling and methods of Analysis edited by Carter, M. R., Lewis Publishers: 599-613.
4. Morii, Takeshita and Shiga (2001), 原位置浸潤試験法を用いた土砂堆積地盤の透水性の評価, Tsuchi to Kiso, 일본지반공학회지, 49(11):7-9
5. フィルダム (2003), 農林水産省農村振興局(編), 土地改良事業計画設計基準設計「ダム」技術書, 社団法人農業土木学会, 502-503.
6. Morii (2005), 盛土堤体の品質照査に向けた簡便で精度のよい現場透水試験法の提案, 新大農研報, 50(2):129-137.
7. 国土技術研究センター JICE(2006), 河川堤防の劣化判定方法に関する研究

(접수일자 2010. 11. 26, 심사완료일 2012. 2. 10)