

배수성능 평가를 위한 침투능 산정기법에 관한 연구(II)

Estimation Method of Infiltration Capacity for Assessment of Drainage Capacity II

정 지 수[†] · 심 정 훈¹⁾ · 이 동 혁²⁾ · 황 영 철³⁾ · 이 승 호⁴⁾

Jisu Jeong · Jeonghoon Shim · Dong Hyuk Lee · Youngcheol Hwang · Seungho Lee

Received: October 29th, 2020; Revised: November 25th, 2020; Accepted: November 30th, 2020

ABSTRACT : As a result of a suite of laboratory tests undertaken to suggest a rational method for the estimation of infiltration capacity, it is found that the infiltration rate tends to increase as the soil unit weight decreases while it tends to increase as the rainfall intensity increases. Comparative analyses for infiltration curves employing the reduction constant of initial infiltration capacity (α coefficient) that was suggested in this study has reasonably captured the time dependent variation of infiltration capacity. Consequently this study has presented an experimental model for the estimation of infiltration capacity to improve the Horton infiltration capacity curve that has been widely used for estimation of the infiltration capacity and amount of infiltration for its application to sandy soils.

Keywords : Rainfall intensity, Sandy soil, Infiltration capacity, Permeability

요 지 : 사질토지반에서 적용할 수 있는 합리적인 침투능 산정기법을 제시하기 위하여 실내실험결과를 분석한 결과, 단위중량이 감소함에 따라 침투속도는 증가하는 경향을 보였으며, 강우강도가 증가함에 따라 침투속도 또한 증가하는 것으로 나타났다. 또한 본 논문에서 제안한 초기침투능 감소상수(α 계수)를 적용한 침투능 변화 곡선에 대하여 비교·분석한 결과 시간에 따른 침투능 변화가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 침투능 및 침투량 산정 시 널리 사용되고 있는 Horton 경험식이 사질토지반에서 적용이 어려운 점을 개선하여 침투능 산정 모형을 제안하였다.

주요어 : 강우강도, 사질토, 침투능, 투수계수

1. 서 론

세계 기상·기후 전문가들의 전망에 따르면, 지구온난화와 기후변화의 영향으로 2100년이면 지구촌이 현재보다 2.0~3.8℃, 강수량은 3%정도 증가할 것이라고 예견하고 있다는 것이다. 국내 연구 결과만 살펴봐도, 최근 여름철 강수패턴이 변하고 있는 것으로 나타났다. 30년 동안 기상청 57개 관측소에서 관측된 강우자료를 보면, 여름철 평균 강수량이 1976~85년에는 661mm로 이전에 비해 크게 증가했음을 알 수 있다. 특히 1996년 이후에는 매년 여름철 강수량이 800mm를 초과하여, 과거에 비해 강수량 자체가 다소 증가한 것을 알 수 있다. 또한 하루 강수량 80mm 이상의 호우가 내린 날이 1954~63년 동안에는 연평균 1.6일에서 1994~2003년에는 2.3일로 늘어났다는 기상연구소의 연구결과도 이를 뒷받침해주고 있다.

따라서, 본 연구에서는 ‘배수성능 평가를 위한 침투능 산정기법에 관한 연구(I)’(Jeong et al., 2019)와 연계하여 사면의 안정성 평가 시 강우재해에 대비할 수 있도록 강우조건을 고려하여 투수계수에 따른 침투량 산정방법에 대한 실험적 연구를 수행하고, 사질토지반에서 기존 경험식을 바탕으로 수정된 침투능 및 침투량 산정방법을 제시하고자 하였다.

2. 실내실험 결과 분석

2.1 침투능 산정방법 적용성 검토

침투능 지배인자들은 지반의 초기조건과 강우침투에 따라 모두 연속적인 거동을 나타내지만 기존의 지반침투공식들은 현장의 조건과는 다른 불연속적 침투거동을 고려한 식으로, 지반 침투량을 산정하기 위한 다양한 경험식 및 이론

† Research Professor, Department of Civil Engineering, Sang Ji University (Corresponding Author : jjs99@hanmail.net)

1) Adjunct Professor, Department of Civil Engineering, Sang Ji University

2) Senior Researcher, Department of Civil Engineering, Sang Ji University

3) Professor, Department of Civil Engineering, Sang Ji University

4) Professor, Department of Civil Engineering, Sang Ji University

식이 제시되어 있다(Collins & Znidarcic, 2004).

앞서 서술한 바와 같이 일반적인 침투량 측정방법에는 침투계 및 강우모의기에 의한 침투량 측정 방법, 수문곡선 해석에 의한 침투량 측정 방법들이 있고(Chu, 1978), 침투능 산정에는 침투지수법에 의한 Φ -지수법과 w -지수법이 있다. 그리고 침투능 산정공식에는 경험적 공식인 Horton식과 Philip식 개념적 공식인 Green-Ampt식이 있다.

침투량 측정 방법인 지점측정과 지역측정의 경우 경제성 및 시공성이 떨어지며, 수문곡선해석을 위한 다수의 호우가 발생한 강우사상과 유역유출량의 자료 습득이 어려운 점이 있다(Fredlund & Rahardjo, 1993).

Φ -지수법과 w -지수법의 경우 강우강도에 따라 분리하여 침투능 산정에 이용되고 있다. 침투능을 산정하는 가장 간단한 방식이지만, 평균 침투능을 산정하기 때문에 불포화토에서의 침투능을 나타내기에는 한계가 있다.

경험적 공식인 Philip식의 경우 초기함수비와 최종함수비를 활용하여 침투능을 산정함으로써 초기 지반상태를 반영할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 강우지속시간이 무한히 길어지게 되면 침투량 또한 무한히 증가하는 모순을 가지고 있어 실질적인 불포화토에서의 침투능 및 침투량을 산정하기에는 한계가 있을 것으로 판단된다(Fourie, 1996).

Horton식의 경우 초기침투능과 종기침투능을 활용하여 시간에 따른 침투능 및 침투량을 산정할 수 있는 경험식으로서 감쇠상수 k 를 적용하여 보다 합리적인 산정식이다. 그러나 강우강도가 포화투수계수보다 작을 경우 적용이 어려운 것이 단점이라 할 수 있다.

마지막으로 개념적 공식인 Green-Ampt식은 Darcy법칙에 따른 대표적인 이론식으로서 다양한 토질에 적용하여 침투능 및 침투량을 산정할 수 있는 장점을 가지고 있다(Chenm & Young, 2006). 그러나 매개변수인 투수계수 K , 공극률 η , 습윤선에서의 토양흡인수 ψ , 유효공극률 θ_e , 그리고 함수비의 변화 $\Delta\theta$ 를 산정하여야 공식을 적용할 수 있으므로 매개변수 산정에 많은 어려움이 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 널리 사용되고 있는 Horton 경험식을 기본으로 사질토지반에서 합리적으로 적용할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. Horton 경험식은 강우강도가 임의 시간에서 침투능보다 크거나 같을 경우에 적용하는 것을 전제하고 있다. 본 연구에서 사용된 사질토의 경우 포화투수계수 즉, 종기침투능이 큰 경우에는 침투능 산정이 사실상 불가능하게 되어 있다. 따라서, Horton 경험식을 사질토 지반에 적용하기 위하여 실내실험결과를 바탕으로 검증하였다.

2.2 침투속도 결과 분석

실내실험에 사용된 시료에 대하여 단위중량 및 강우강도에 따른 침투깊이별 침투속도를 비교한 결과 침투속도는 뚜렷한 변화 양상을 찾아 볼 수 없었다. 분석 결과를 토대로 불포화토에서의 강우침투 시 연속적인 침투가 발생한다는 사실을 확인하였다(Fig. 1 참조). 따라서, 강우에 따른 일차원 침투속도는 깊이별 동일하게 적용 할 수 있을 것으로 판단된다.

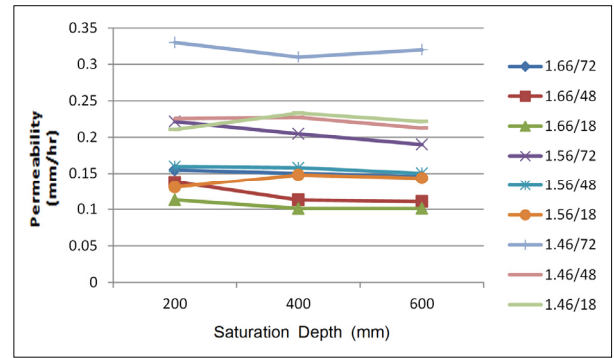


Fig. 1. Saturation Depth by unit weight and rainfall intensity

강우강도별 투수계수의 변화를 알아보기 위하여 실험결과와 포화투수계수의 변화를 분석하였다. 분석 결과 포화투수계수 및 강우강도별 투수계수의 절대값에는 차이가 있었지만, 감소경향은 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 이 결과는 실내투수계수실험 결과와 강우강도의 변화에 따른 침투속도를 유추할 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 2 참조).

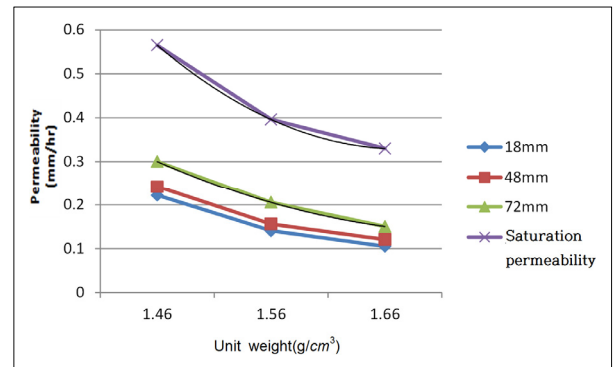


Fig. 2. Changes in permeability coefficient by rainfall intensity

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 단위중량과 강우강도의 변화에 따라 침투 실험을 실시한 결과 단위중량이 감소함에 따라 침투속도는 증가하는 경향을 보였으며, 강우강도가 증가함에 따라 침투속도 또한 증가하는 것으로 나타났다(Table 1). 또한 주문진표준사를 사용하여 산정된 포화투수계수로 부터 강우강도별 투수계수 감소상수인 α 계수를 산정한 결

과 강우강도 72mm/hr에서 0.5Ks, 48mm/hr에서 0.4Ks, 18mm/hr에서 0.35Ks의 결과를 도출할 수 있었다(Fig. 3). 또한 산출된 α 계수는 Horton경험식에서 초기침투능 값을 대체하여 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

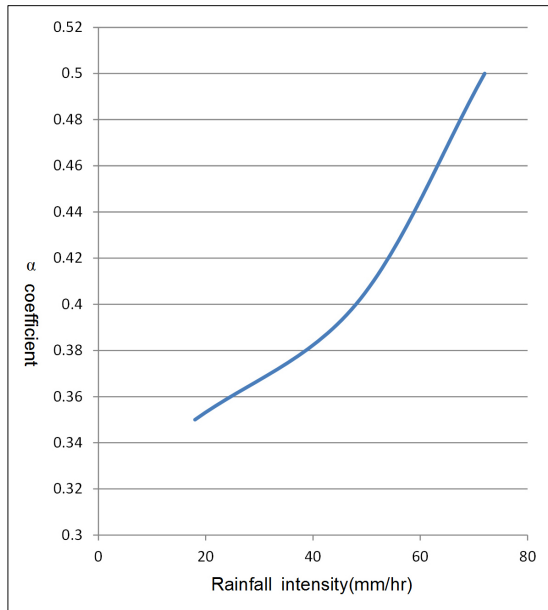


Fig. 3. Changes in α coefficient by rainfall intensity

$$f = f_c + (\alpha - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

그 결과를 요약하면 다음과 같다(Table 1~2 참조).

Table 1. Permeability coefficient according to unit weight and rainfall intensity

Rainfall intensity (mm/hr)	72mm/hr	48mm/hr	18mm/hr
Unit weight (g/cm^3)			
1.66	0.150	0.121	0.105
1.56	0.205	0.156	0.141
1.46	0.330	0.242	0.163

Table 3. Initial conditions applied to the Horton empirical formula

Ground condition (Unit weight)	Rainfall intensity	Initial infiltration capacity (mm/s)	Last infiltration capacity (mm/s)	Reduction constant (k)
Sandy soil ($1.46g/cm^3$)	72mm/hr	0.28	0.56	0.000856
	48mm/hr	0.224	0.56	0.000694
	18mm/hr	0.196	0.56	0.000691
Sandy soil ($1.56g/cm^3$)	72mm/hr	0.2	0.40	0.000585
	48mm/hr	0.16	0.40	0.000497
	18mm/hr	0.14	0.40	0.00043
Sandy soil ($1.66g/cm^3$)	72mm/hr	0.165	0.33	0.000413
	48mm/hr	0.132	0.33	0.000431
	18mm/hr	0.115	0.33	0.000373

Table 2. Permeability coefficient reduction constant according to rainfall intensity

Rainfall intensity (mm/hr)	72mm/hr	48mm/hr	18mm/hr
Reduction constant (α)			
Reduction constant (α)	0.5Ks	0.4Ks	0.35Ks

3. 침투능 산정 결과 분석

3.1 Horton 경험식을 이용한 침투능 산정

실험에 사용된 지반조건은 Horton 경험식에 적용하기 위하여 실험에 사용된 조건을 동일하게 적용하였다. 초기침투능은 실내실험을 통해 산출된 투수계수 감소상수를 적용하여 종기침투능 즉, 단위중량별 포화투수계수로부터 산출하였으며, 단위중량 및 강우강도에 따른 적용조건은 다음과 같다(Table 3 참조).

Horton 공식의 경우 대상지반의 초기포화도 혹은 초기함수비에 대한 항이 없어 지반의 초기함수비에 따른 침투거동을 알 수 없다. 초기함수비에 따른 흡인수두와 관련된 초기침투능 f_0 와 감소상수 K는 같은 흙이라도 지반의 초기함수비의 영향을 받는다. 지반의 초기함수비와 무관한 종기침투능 f_c 값은 포화투수계수로 흡인수두와 무관하며 상수이다. 또한, 사질토지반에서 침투능은 증가율이 점차 감소하여 일정한 종기침투능(포화투수계수)로 수렴함을 알 수 있다.

3.2 실내실험 결과를 반영한 침투능 산정

실내 실험에 사용된 지반조건은 Horton 경험식에 적용된 조건과 동일하게 적용하였다. 초기침투능은 실내실험을 통해 산출된 투수계수(침투속도)를, 종기침투능은 포화투수계수를 적용하였으며, 단위중량 및 강우강도에 따른 적용조건은 다음과 같다(Table 4 참조).

Table 4. Initial conditions for calculating penetration capacity reflecting the results of indoor experiments

Ground condition (Unit weight)	Rainfall intensity	Initial infiltration capacity (mm/s)	Last infiltration capacity (mm/s)	Reduction constant (k)
Sandy soil (1.46g/cm ³)	72mm/hr	0.33	0.56	0.000703
	48mm/hr	0.242	0.56	0.000657
	18mm/hr	0.163	0.56	0.000754
Sandy soil (1.56g/cm ³)	72mm/hr	0.205	0.40	0.00057
	48mm/hr	0.156	0.40	0.000505
	18mm/hr	0.141	0.40	0.000428
Sandy soil (1.6g/cm ³)	72mm/hr	0.150	0.33	0.00045
	48mm/hr	0.121	0.33	0.000455
	18mm/hr	0.105	0.33	0.000391

3.3 Horton 경험식과 실험결과 비교 분석

사질토지반에서 Horton 경험식을 적용하여 산정된 침투능곡선과 실내 일차원컬럼토조 실험결과를 반영하여 산정된 침투능 곡선을 비교 분석하였다. 비교결과 초기침투능의 미소한 차이를 제외하고는 모든 조건에서 거의 일치하는 것으로 판단되었다. 단위중량 및 강우강도별 침투능곡선 비교 결과는 다음과 같다.

단위중량 1.46g/cm³, 강우강도 72mm/hr에서 침투능곡선을 비교한 결과 실험결과와 경험식의 초기침투능 값이 0.05 mm/hr의 차이를 보이거나 시간이 경과함에 따라 종기침투능으로 거의 일치하게 수렴하는 것을 알 수 있다(Fig. 4 참조).

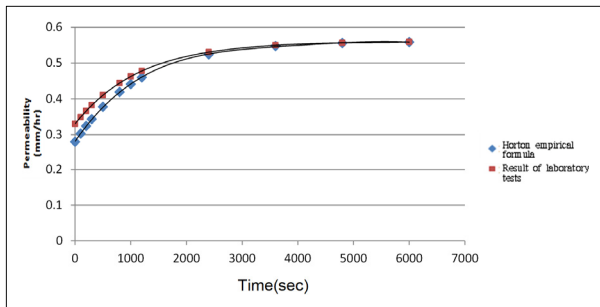


Fig. 4. Unit weight 1.46g/cm³ / Rainfall intensity 72mm/hr infiltration capacity compare

단위중량 1.46g/cm³, 강우강도 48mm/hr에서 침투능곡선을 비교한 결과 실험결과와 경험식의 초기침투능 값이 약 0.02mm/hr의 차이를 보이거나 시간이 경과함에 따라 종기침투능으로 거의 일치하게 수렴하는 것을 알 수 있다(Fig. 5 참조).

단위중량 1.46g/cm³, 강우강도 18mm/hr에서 침투능곡선을 비교한 결과 실험결과와 경험식의 초기침투능 값이 약 0.03mm/hr의 차이를 보이거나 시간이 경과함에 따라 종기침투능으로 거의 일치하게 수렴하는 것을 알 수 있다(Fig. 6 참조).

단위중량 1.56g/cm³, 강우강도 72mm/hr에서 침투능곡선을 비교한 결과 거의 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 7 참조).

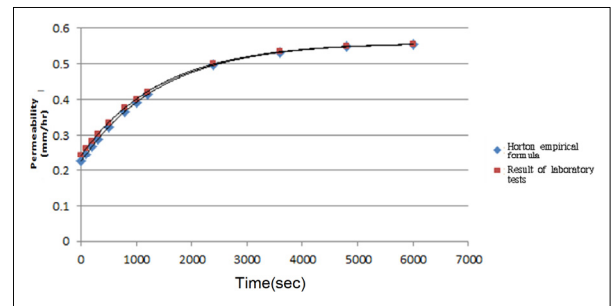


Fig. 5. Unit weight 1.46g/cm³ / Rainfall intensity 48mm/hr infiltration capacity compare

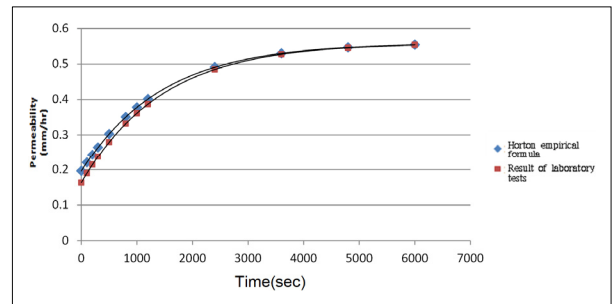


Fig. 6. Unit weight 1.46g/cm³ / Rainfall intensity 18mm/hr infiltration capacity compare

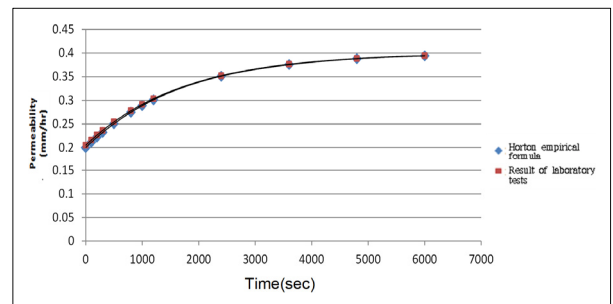


Fig. 7. Unit weight 1.56g/cm³ / Rainfall intensity 72mm/hr infiltration capacity compare

단위중량 1.56g/cm³, 강우강도 48mm/hr에서 침투능곡선을 비교한 결과 거의 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 8 참조).

단위중량 1.56g/cm³, 강우강도 18mm/hr에서 침투능곡선

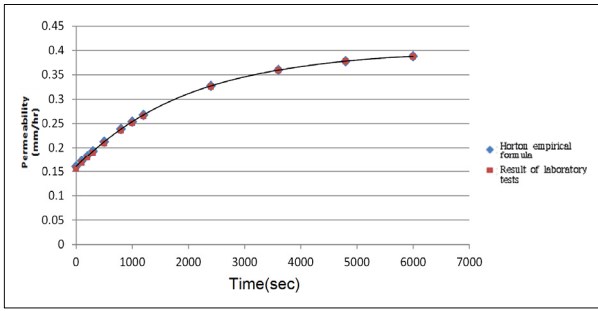


Fig. 8. Unit weight $1.56g/cm^3$ / Rainfall intensity 48mm/hr infiltration capacity compare

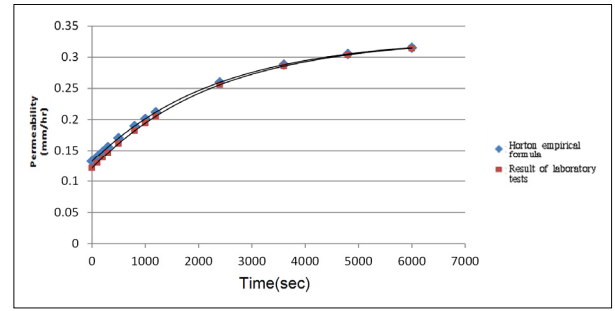


Fig. 11. Unit weight $1.66g/cm^3$ / Rainfall intensity 48mm/hr infiltration capacity compare

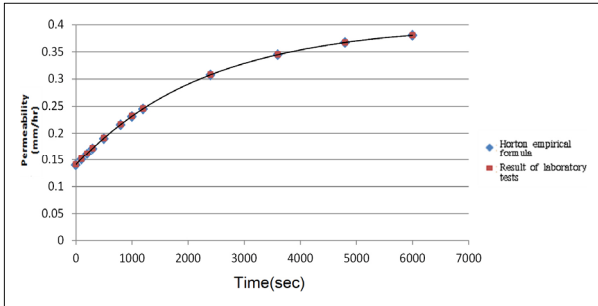


Fig. 9. Unit weight $1.56g/cm^3$ / Rainfall intensity 18mm/hr infiltration capacity compare

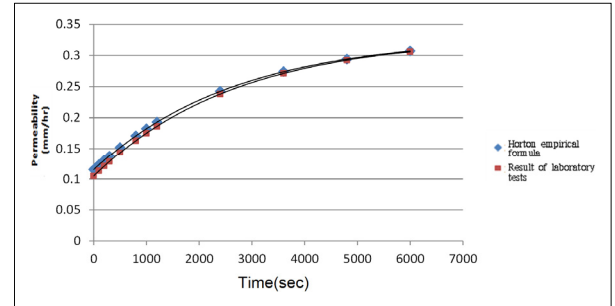


Fig. 12. Unit weight $1.66g/cm^3$ / Rainfall intensity 18mm/hr infiltration capacity compare

을 비교한 결과 거의 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 9 참조).

단위중량 $1.66g/cm^3$, 강우강도 72mm/hr에서 침투능곡선을 비교한 결과 실험결과와 경험식의 초기침투능 값이 약 0.015mm/hr의 차이를 보이거나 시간이 경과함에 따라 중기침투능으로 거의 일치하게 수렴하는 것을 알 수 있다(Fig. 10 참조).

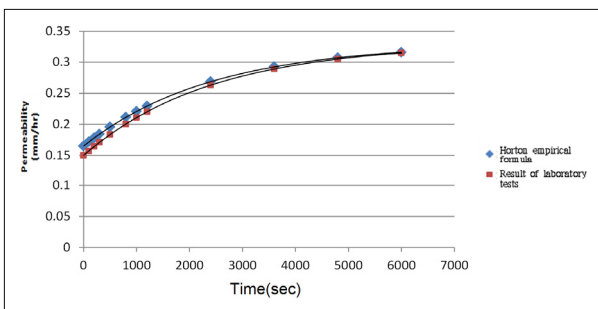


Fig. 10. Unit weight $1.66g/cm^3$ / Rainfall intensity 72mm/hr infiltration capacity compare

단위중량 $1.66g/cm^3$, 강우강도 48mm/hr에서 침투능곡선을 비교한 결과 거의 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 11 참조).

단위중량 $1.66g/cm^3$, 강우강도 18mm/hr에서 침투능곡선을 비교한 결과 거의 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 12 참조).

4. 결 론

본 연구에서는 사질토지반의 침투능을 산정하기 위하여 일차원컬럼 실내실험을 실시하였으며, 기존의 경험식에 사용되는 감소상수를 산정하는데 활용하고자 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 침투능 및 침투량 산정방법에 대하여 분석한 결과 추정 방법의 경우 경제성 및 시공성이 떨어지며, 호우가 발생한 경우사상과 유역유출량의 자료 습득이 어려운 점이 있었다. 침투지수법은 가장 간단한 방식이지만, 평균 침투능을 산정하기 때문에 불포화토에서의 침투능을 나타내기에는 한계가 있었다. Philip식의 경우 초기 지반상태를 반영할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 강우지속시간이 무한히 길어지게 되면 침투량 또한 무한히 증가하는 모순을 가지고 있었다. Horton식은 감소상수 k 를 적용하여 보다 합리적인 산정식이지만, 강우강도가 포화투수계수보다 작을 경우 적용이 어려운 것이 단점이었다. 마지막으로 Green-Ampt식은 매개변수 산정에 많은 어려움이 있는 것으로 판단되었다.
- (2) 사질토지반에서 적용할 수 있는 합리적인 침투능 산정 기법을 제시하기 위하여 실내실험결과를 분석한 결과,

단위중량이 감소함에 따라 침투속도는 증가하는 경향을 보였으며, 강우강도가 증가함에 따라 침투속도 또한 증가하는 것으로 나타났다.

- (3) 또한 주문진표준사를 사용하여 산정된 포화투수계수로 부터 강우강도별 초기침투능 감소상수(α 계수)를 산정한 결과 강우강도 72mm/hr에서 0.5Ks, 48mm/hr에서 0.4Ks, 18mm/hr에서 0.35Ks의 결과를 도출할 수 있었다.
- (4) 사질토지반에서의 침투능 산정 모형을 활용하여 실험결과와 초기침투능 감소상수(α 계수)를 적용한 침투능 변화 곡선에 대하여 비교·분석한 결과 시간에 따른 침투능 변화가 거의 일치하는 것으로 나타났다.
- (5) 따라서, 본 연구에서는 침투능 및 침투량 산정 시 널리 사용되고 있는 Horton 경험식이 사질토지반에서는 적용이 어려운 점을 개선하여 침투능 산정기법을 제안하였으며, 실내투수실험으로 얻어진 포화투수계수 값을 활용하여 보다 합리적이고 간편하게 시간 변화에 따른 침투능을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2018R1A6A3A01013103)의 지원

및 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(비탈면 대상 조사·점검 개선 및 보강시설 노후화 대응 기술 개발, 20SCIP-C151408-02)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Chenm, Li and Young, M. H. (2006), Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces, *Water Resources Research*, Vol. 42, No. 7, pp. 1-9.
2. Chu, S. T. (1978), Infiltration during an unsteady rain, *Water Resource Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 461-466.
3. Collins, B. D. and Znidarcic, D. (2004), "Stability analyses of rainfall induced landslides", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, New-York, Vol. 130, No. 4. pp. 362-372.
4. Fourie, A. B. (1996), Predicting rainfall-induced slope instability, *Proceedings of the Institutions of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 4, pp. 211-218.
5. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley and Sons, Inc.
6. Jeong, J. S., Shim, J. H., Hwang, Y. C. and Lee, S. H. (2019), Estimation method of infiltration capacity for assessment of drainage capacity I, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 20, No. 12, pp. 49-55.