도심 강우유출수 침투시설 다공질 여재의 부유물 폐색 모델링 Modeling of Suspended Solid Clogging of Porous Media in Urban Stormwater Infiltration Facility

이병식* · 김이형** · 이관호** · 전평구*** · Segismundo, E.***

Lee, Byung Sik*, Kim, Lee Hyung**, Lee, Kwan Ho**, Jeon, Pyung Goo***, and Segismundo, E.***

Abstract

Infiltration facilities are applied increasingly as effective BMPs to the urban stormwater control. The important functions of the facilities are surface flow reduction, contaminants elimination and aquifer recharge resulting from filtration, retention and infiltration of stormwater by porous media. A major obstacle in operating infiltration facilities is clogging. Filters of porous media in the facility are clogged by deposition of sediment over time. Clogging reduces infiltration rate and lifespan of the facility. Clogging, thus, needs to be considered as one of the important design factors in constructing infiltration facilities. In this study, 3 clogging models were chosen to simulate clogging, which developed in different disciplines, environmental and geotechnical engineering. Since the models were developed initially for fine media, applicability to coarse media interested in this study needed to be examined. To examine the applicability of models, analytical procedures of models were thoroughly reviewed. Parametric studies were also conducted to determine appropriate input parameters. Finally, the models represented relatively appropriate applicability to estimate clogging developed in an artificial infiltration as well as a real infiltration testing conditions. Although further studies are still needed for considerable aspects in input parameters and equations, the models could be suggested as effective analytical tools to estimate clogging developed in infiltration facilities of urban stormwater.

Key words : soil filter, clogging model, infiltration, permeability, stormwater BMP(Best Management Practice)

요 지

비점오염 관리 및 도시 물 순환 체계 개선을 위한 효과적인 환경시설로서 침투시설의 적용이 증가되고 있다. 침투시설은 다공질 여재를 통해 강우유출수를 여과, 저류 및 침투시켜 표면유출수 저감, 오염물질 제거, 지하수 충전 등의 주요 기능을 수행한다. 이 시설의 운영에 있어 주요 문제는 폐색현상이다. 시설 내 다공질 여재 필터가 시간에 따른 퇴적물 증가로 인해 폐색된다. 폐색은 시설의 침투율과 수명을 저하시킨다. 따라서 폐색현상은 침투시설 건설 시 필히 고려하여야 할 중요한 설계조건 중의 하나다. 이 논문에서는 환경, 지반 등 서로 다른 학문분야에서 개발된 3가지 폐색모델을 선정하였다. 모델들이 당초 입경이 작은 여재에 대해 개발되었으므로 이 논문에서 다루는 굵은 여재에 대한 적용성 검토가 필요하였다. 적용성 검토를 위해 모델 해석 과정을 상세히 검토하였다. 적절한 입력자료를 결정하기 위해 영향분석도 수행하였다. 결과적으로 모델들은 가상 침투실험 조건 및 실제 실험조건에서 발생하는 폐색현상 모델링에 있어서 적정 수준의 적용성을 가지고 있음을 보였다. 입력자료와 방정식 등에 대한 후속 연구가 요구되지만 이 논문에서 다른 모델들을 도심 강우유출수 침투시설에서 발생하는 폐색을 추정하기 위한 효과적인 해석방법으로 제안할 수 있었다.

핵심용어 : 흙 필터, 폐색 모델, 침투, 투수능, 강우유출수관리기법

1. 서 론

비점오염 관리 및 도시 물순환 체계 개선을 위해 인공습지,

침투저류지, 투수성 포장, 식생여과대 등 자연형 강우유출수 침투시설이 적용되고 있다. 자연형 침투시설은 비교적 저비용의 환경친화적 처리기술로서 분산형으로 설치하므로 비점오

*교신저자. 정회원 공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수(Tel: +82-41-521-9309, Fax: +82-41-568-0287, E-mail: blee@kongju.ac.kr)
Corresponding Author. Member, Professor, Kongju National University

**정회원. 공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수
Member. Professor, Kongju National University

***정회원. 공주대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정
Member. MS candidate, Kongju National University

염 관리에 효과적이다(국토교통부, 2014; Kadlec *et al.*, 2008). 이들 시설은 자갈, 모래 등으로 구성된 다공질 여재인 필터 및 저류층 등을 통해 강우유출수를 여과, 저류 및 침투시킨다. 이 과정에서 오염물질 제거, 표면유출수 저감, 지하수 충전의 기능이 수행된다. 이들 시설의 적용에 있어 가장 심각한 단점은 다공질 여재에서 발생하는 공극 폐색현상이다.

폐색은 강우유출수 내의 부유물과 용전 유기물 등이 여재에서 침전, 걸림, 흡착현상으로 제거되면서 발생한 부동성 입자들이 여재 공극을 막는 현상이다. 폐색이 발생하면 시설의 통수능이 저하된다. 월류와 장기 침수 현상 등 기능수행에 장애가 발생하고 수명이 예상보다 짧아질 수 있다(Kandra *et al.*, 2014a, Hua *et al.*, 2013). 폐색현상은 수리환경 분야 뿐만 아니라 지반공학, 토양공학, 지질학, 유전(petroleum)공학 등 유사 관련 분야에서 지속적으로 다루어져 온 주제이다(Kandra *et al.*, 2014b; Siriwardene *et al.*, 2007). 하지만 강우유출수 침투시설에서 발생하는 폐색현상의 다양한 설계인자를 규명하기에는 연구결과가 부족하다. 따라서 실험연구들(Siriwardene *et al.*, 2007; Le Coustumer *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012; Hua *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2013; Kandra *et al.*, 2014a; Kandra *et al.*, 2014b; Mercado, 2014; Du *et al.*, 2014)이 지속적으로 수행되고 있다.

폐색 모델에 있어서는 부유물질에 의한 물리적 폐색과정을 모사하는 경험적, 이론적 모델이 수리환경분야에서 개발되었다(Blazejewski, 1997; Wang *et al.*, 2012; Hua *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2013). 더불어서 화학적, 생물학적 과정을 포함한 모델도 제안되었다(Nivala *et al.*, 2012). 하지만 강우유출수 침투시설에서 발생하는 폐색현상을 완벽히 규명하고 예측할 수 있는 모델은 아직 개발단계이다(Nivala *et al.*, 2012). 지반분야에서도 폐색모델이 개발되었다(Reddi *et al.*, 1997, 2000, 2005). 세굴방지 필터설계를 위해 개발된 이 모델은 그라우트(Kim *et al.*, 2009) 및 슬러리 주입(이 등, 2013) 침투 거동, 투

수성 포장 폐색 모델링(Deo, 2010)에 적용되는 등 지반공학 관련 폐색현상 규명에 적용되었다. 수리지질분야에서는 다공 스케일에서 부유물을 포함한 유체의 흐름 및 폐색을 모델링할 수 있는 네트워크모델이 개발되었다(Kim *et al.*, 2009; Raoof, 2011, 2013; Blunt, 2013).

위에서 언급한 폐색 모델들은 다공질 여재, 입도분포, 오염물질 농도, 유입유량, 오염물 구성 등이 상이한 폐색조건에 대해 개발되었다. 개발 모델들을 당면한 설계 문제에 적용하기 위해서는 모델 별 다양한 개발조건과 적용성에 대한 검토가 선행되어야 한다. 또한 모델 별 다양한 입력치 및 예제를 포함한 설명자료 제공이 요구된다. 이 논문에서는 언급한 모델 중 3 가지 폐색모델(Blazejewski, 1997; Wang *et al.*, 2012; Reddi *et al.*, 2000)을 선정하여 가상 강우유출수 침투시설 조건의 폐색현상 해석에 적용하였다. 또한 여재 침투실험 결과에 대해 선정한 모델을 적용하여 폐색을 모사하고 실험결과와 비교하였다. 이 과정에서 모델들의 해석과정을 습득하고 명확한 설명자료를 확보하였다. 또한 결과로부터 모델의 적용성과 신뢰도 수준을 검토하고 장단점을 분석하여 제시하였다. 결과적으로 이 논문의 목적은 강우 유출수 침투시설 폐색 모델링에 적절한 폐색모델을 제안하고, 관련 해석 자료를 제공하여 실무 활용성을 제고함에 있다.

2. 공극폐색 모델

2.1 모델

모델 선정 및 모사는 오염수 내 부유물질에 의한 물리적 폐색에 국한하였다. 그 이유는 강우유출수 침투 시설에 대한 화학-생물학적 폐색 모델이 아직 개발 중이고, 물리적 과정에 의한 폐색이 화학적, 생물학적 과정에 의한 폐색보다 지배적이기 때문이다(Siriwardene *et al.*, 2007). 폐색모델들은 모델 해석의 난이도가 비교적 낮은 수리환경과 지반분야에서 개발

Table 1. Clogging Models

Symbol	Model	Comments	Reference
S	Simple model	<ul style="list-style-type: none"> · Evaluate the permeability coefficient using Kozeny-Carman equation with considering decrement of pore volume due to sedimentation of suspended solids in a clogging layer · Consider the permeability coefficient for the entire layer as the permeability of clogging layer 	Blazejewski <i>et al.</i> (1997)
E	Equivalent permeability	<ul style="list-style-type: none"> · Calculate the permeability of clogging layer according to clogging process similar to the simple model · Consider the permeability coefficient for the entire layer as the equivalent permeability of clogging and filter layer · Need to modify the thickness of clogging layer and the permeability estimated from related experiments according to the flow condition 	Wang <i>et al.</i> (2012)
P	Particle capture	<ul style="list-style-type: none"> · Calculate the probability of sedimentation for particles with entire diameters flowing through the pore with arbitrary diameter · Calculate the amount of shrink in pore diameter by considering the pressure increment(increment of hydraulic gradient) with particle sedimentation · Calculate the amount of decrement of permeability with decreasing pore size for pores of entire diameters 	Reddi <i>et al.</i> (2000, 2005)

(a) S-model

(b) E-model

(c) P-model

Fig. 1. Flow Charts of Clogging Models : (a) S-model, (b) E-model, (c) P-model.

된 모델들을 선정하였다. 경험적 모델은 다양한 폐색조건에 적용하기에 문제가 있으므로 제외하였다. 수리지질분야의 다공스케일 네트워크모델은 검토 목적에 비해 과도한 해석 부하가 요구되고 추가 연구가 요구되므로 이 논문에서는 제외

하였다.

강우유출수 침투시설에서 발생하는 폐색을 모사하기 위해 검토한 폐색모델들을 표 1에 정리하였다. 표에서 사용한 모델 기호 및 모델명은 편의를 위해 이 논문에서 명명한 가칭이다. S- 및 E-모델은 수리환경공학 분야에서, P-모델은 지반공학 분야에서 개발된 모델들이다. 이들 모델은 비교적 폭 넓은 폐색조건에서 적용이 가능하고 해석 부하가 크지 않을 것으로 판단되어 선정하였다. 표 1에 각 모델들의 특징을 간략히 서술하였다. 각 모델들의 이론적 배경을 상세히 설명하기에는 지면이 부족하므로 생략하였다. 대신 각 모델의 폐색모델링 과정을 순서대로 작성하여 그림 1에 보였다. 그림 1에 보인 각 모델은 많은 입력자료를 필요로 한다. 이에 대한 설명은 2.2에서 상세히 기술하였다.

2.2 모델 평가를 위한 예제 해석

대표적인 침투모델을 가상으로 설정하고 2.1에서 선정한 모델을 사용하여 폐색을 모델링하는 예제해석을 수행하였다. 예제 해석의 목적은 첫째로 강우유출수 침투시설의 폐색현상에 대한 각 모델의 적용성을 검토하기 위함이다. 수리환경분야에서 개발한 S- 및 E-모델은 특정 침투조건에 대해서만 검증이 이루어졌고, P-모델은 지반환경분야에서 지반필터를 대상으로 개발된 모델이다. 이 모델들을 본 논문에서 다루고 있는 강우유출수 침투시설의 수리 및 지반조건에서 발생하는 폐색 모델링에 적용하기 위해서는 적용성 검토가 요구된다. 둘째로, 모델링 결과의 신뢰도 평가를 위해서 각 모델에서 요구되는 입력자료들에 대한 영향분석(parametric study)이 필요하다. 입력자료 중 값의 결정과정이 모호하거나 모델링 결

과에 크게 영향을 미치는 것으로 판단되는 입력자료들에 대한 검토를 수행하였다.

2.2.1 가상 침투시설 및 입력자료

침투시설의 주요 설계인자로는 다공질 여재 종류와 두께, 포설방법, 식생, 시설 규모, 유입유량, 오염물 부하량 등(Le Coustumer, 2012; Kandra, 2014b; Kim, 2014; Siriwardene, 2007)등이 알려져 있다. 가상 침투모델 예제 해석에서는 이들 설계인자 중 중요한 조건인 여재 두께, 유입유량, 오염부하량

을 고려하였다. 설정한 가상 침투모델의 수리 및 재료조건을 그림 2에 개념적으로 나타냈다.

가상 침투모델 예제 해석을 위해 각 모델에서 요구되는 설계인자와 입력자료들을 표 2에 정리하였다. 입력자료 중 값의 결정근거나 별도의 추가설명이 요구되는 자료들에 대한 상세 설명을 각주에 기술하였다. 일부 전형적인 입력자료 값들은 문헌자료에 근거하여 결정하였다. 각주에서 언급한 바와 같이 영향분석 혹은 결정절차가 요구되는 입력값들에 대해서는 요구되는 분석 및 절차에 따라 값을 결정하였다. 이들 입력값을

Table 2. Design Factors and Input Data for the Artificial Infiltration Model

Design Factors & Input Data		Value	Models
Column ^(a)	D	10cm	commonly applied
	L	30cm	"
Sand media	particle size	2~5 mm	commonly applied
	uniformity coefficient	1.7 (D_{60}/D_{10})	"
	porosity	0.4	"
	void ratio	0.667	"
	Specific gravity	2.53	"
	unit weight	18.81 kN/m ³	"
	density	1918 kg/m ³	"
Particle	PSD (particle size distribution)	$D_{10}=5.1 \mu\text{m}$, $D_{50}=34.5 \mu\text{m}$, $D_{75}=140 \mu\text{m}$, $D_{90}=301 \mu\text{m}$	P-Model
	Concentration	150 mg/L	commonly applied
	water content of SS in pore ^(b)	0.94 (parametric study)	S-Model
	density ^(b)	$1.05 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ (parametric study)	
Clogging layer	thickness of clogging layer, h_c ^(c)	100 mm (parametric study)	S-Model
	thickness of clogging layer, M_{CT} ^(c)	3 mm (parametric study)	E-Model
	permeability at stable condition, K_{Con}	empirical equation, $2.4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$	
Flow rate		100 ml/min= $1.67 \text{ cm}^3/\text{sec}$	commonly applied
Unit weight of pore fluid, γ		$9.8105 \times 10^{-3} \text{ N/mL}$	P-Model
Dynamic viscosity of pore fluid, μ		$1.005 \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{s/cm}^2$	
Characteristic pore length ^(d) , α^*		2 cm (parametric study)	
Ionic condition constant ^(e) , θ_0		3.0	
Critical velocity ^(f) , v_{cr}		5 cm/s (parametric study)	
Shape factor for cylindrical pores, C_s		1/32	
Media and Particle ^(g)	Pore size and numbers of media, r_i and $f(d_i)$	Fig. 3 (decision process)	
	Particle size and numbers of contaminant, a_j and $C(a_j)$	Fig. 4 (decision process)	

(a) The column diameter of 10cm was applied. The ratios of the diameter to the max. and min. diameter of filter media of 5mm and 2mm are 20 and 50, respectively. These values are within the range of 20 to 200, which were recommended by Lang *et al.* (1993).

(b) Though experiments might be needed, the value suggested by Blazejewski (1997) was applied. The value was verified by parametric studies.

(c) The S- and E-model were developed for fine sand media(0.1~0.25 mm) differently from the media of artificial model(2~5 mm). For E-model, the empirical equations suggested by Wang *et al.* (2012) cannot be applied. Thus, the values suggested by Blazejewski (1997) was applied. The appropriateness was evaluated by parametric studies.

(d) The critical length of straight cylindrical pore tube(Arya *et al.*, 1981; Arya *et al.*, 1989) cannot be determine easily for the artificial infiltration model. An appropriate value should be estimated by conducting parametric studies.

(e) The constant has a value of 3.0 for nonionic condition. The value may vary according to the ion concentration of pore water. The value of 3.0 was applied for the artificial infiltration model due to the nonionic pore water.

(f) The lumped parameter of the probability of particle sedimentation, $\theta = \theta_0 \exp(-v(r_i)/v_{cr})$ may affect significantly on the result of clog modeling. However, uncertainties exist in determining appropriate values. An appropriate values should be estimated by conducting parametric studies.

(g) The parameters affect significantly on the result of clog modeling. The process to determine the values is complicate, thus, the process is described in detail in the main paragraph.

Fig. 2. Details of Artificial Infiltration Model.

표에서 구분하기 위해 입력값 옆에 ‘parametric study’ 혹은 ‘decision process’로 표기하였다. 수행된 영향분석과 결정 절차는 다음 절에서 상세히 설명하였다.

2.2.2 다공성 여재의 공극 반경 분포와 오염물질 입자 반경 분포 결정

가상 침투 모델에 대해서 표 2의 각주(g)에서 언급한 여재

Fig. 3. Pore Radii Distribution of Artificial Infiltration Model : (a) Arithmetic Distribution of Pore Radii, (b) Logarithmic Distribution of Pore Radii, $m = 1.84$ and $b = 1.02$.

Fig. 4. Particle Distribution of Artificial Infiltration Model : (a) Volumetric Frequency of Particles, (b) Number of Particle.

공극분포와 오염물질 입자분포를 구하는 과정을 설명한다.

여재 공극분포를 Haines method 등 여재에 대한 SWCC (soil water characteristic curve) 실험결과로부터 모관 수두 변화 시 체적함수를 변화에 따른 물 배출량으로 추정하여 정할 수 있다(Rowell *et al.*, 1994; Lu *et al.*, 2004). 실험이 수행되지 않는 경우 여재 입자반경과 공극반경의 관계식, $r_i = \left[\frac{4eR_i^3}{3\alpha} \right]^{1/2}$ 을 사용해서 여재 공극분포를 추정한다(Arya and Dierolf, 1989). 관계식을 이용하여 가상침투 모델에 대해 추정한 공극반경과 분포를 나타내면 그림 3(a)와 같다. 그림의 결과로부터 공극 반경 r_i 와 단위체적 당 각 공극반경의 체적빈도 $f(d_i)$ 를 구할 수 있다. 같은 결과를 대수분포 모델에 적용한 결과는 그림 3(b)와 같다. 대수분포에서 구한 평균 m 과 표준편차 b 값은 각각 1.84와 1.02이다.

오염물질의 입자분포는 Coulter analyzer를 사용하여 각 입경의 입자 개수를 직접 측정하여 구할 수 있다. 실험 결과가 없는 경우 오염물질 부하량과 입경에 따른 입자 무게를 고려하여 입자 개수를 추정하는 간접방법이 있다. 가상 침투모델에 간접방법을 적용하여 각 입경의 입자들이 전체 체적에서 차지하는 빈도를 가정하여 정하면 그림 4(a)와 같다. 이 결과로부터 각 입경의 입자가 단위체적 당 차지하는 무게비를 구할 수 있다. 각 입경 입자 개수는 시간 당 유입되는 부하량에서 각 입경 전체 입자가 차지하는 무게를 구해 각 입경 입자

한 개의 무게로 나누어 추정할 수 있다. 시간 당 유입되는 부하량은 표 2의 시간 당 유입유량과 부하농도를 곱해 구한다. 각 입경 입자의 개수를 구한 결과를 그림 4(b)에 나타냈다. 이 그림의 결과로부터 표 2의 입경 a_j 와 입경 별 입자개수 $C(a_j)$ 의 값을 결정하여 입력하였다.

2.2.3 입력변수 영향 분석

선정한 3가지 모델들에 대해서 각각 표 2에서 언급한 영향 분석이 요구되는 변수들에 대한 검토를 수행하였다.

S-model에 대해서 표 2의 각주 (b)에서 언급한 함수비와 부유물질의 밀도 변화가 결과에 미치는 영향을 그림 5a와 5b에 각각 나타냈다. 그림 6에는 표 2의 각주 (c)항에서 언급한 폐색층 두께와 더불어서 여재 입자의 입경이 결과에 미치는 영향을 보였다. 그림 5와 6의 결과로부터 S-model을 이용한 폐색 모델에서 투수계수 감소에 크게 영향을 미치는 입력변수로는 공극 내에서 부유물 함수비, w_c (그림 5a)와 폐색층 두께, h_c (그림 6a)임을 알 수 있다. 부유물 함수비의 영향은 함수비가 90%이상일 경우에 변화율이 낮아지는 것으로 나타났다. 포화된 상태에서 부유물의 함수비를 90% 이상으로 가정할

수 있다면 결과에 대한 부유물 함수비의 영향은 낮다고 볼 수 있다. 여재입경이 투수계수에 크게 영향을 미치지만(그림 6a) 투수계수 감소율에 미치는 영향은 정규화되는 경향이 있다(그림 6b). 결과적으로 폐색층 두께가 폐색시간과 투수계수 감소율에 가장 큰 영향을 미치므로 입력값의 결정에 유의해야 함을 알 수 있다.

폐색층 두께는 여재입경에 따라 크게 좌우된다. 가상침투 모델에서는 입경범위(2~5 mm)가 경험식 $h_c=150d_{ef}(d_{ef}=d_{10})$ (Blazejewski, 1997)의 $5 \times 10^{-5} \text{ m} < d_{ef} < 3 \times 10^{-4} \text{ m}$ 조건을 만족하지 못하므로 적절한 값을 추정하여야 한다.

E-모델에 대해 폐색층 두께의 영향을 검토한 결과를 그림 7a에 보였다. 그림의 결과로부터 E-모델에서도 폐색층 두께가 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 폐색층의 안정상태 투수계수, K_{Con} 은 실험결과로부터 관계식을 결정하여 적용토록 제안되었다(Wang, 2012). K_{Con} 값의 영향을 검토하기 위해 부유물 입경과 공극율을 적용하여 투수계수 경험식으로 구한 값과 임의의 값을 적용하여 비교한 결과를 그림 7b에 보였다. 그림의 결과에서 K_{Con} 값이 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 시간에 따른 폐색층의 투수계수, K_{CLT} 는 원래의 계산식에

Fig. 5. Evolution of Hydraulic Conductivity in S-Model by Considering the Variations of Water Content and Density of Suspended Solid in Pore.

Fig. 6. Evolution of Hydraulic Conductivity in S-Model by Considering the Variations of Media Diameter and Clogging Thickness.

Fig. 7. Evolution of Hydraulic Conductivity in E-Model by Considering the Clogging Thickness, Stable Permeability K_{con} and Coefficient C .

Fig. 8. Evolution of Hydraulic Conductivity in P-Model by Considering the Variation of Critical Velocity, v_{cr} .

여재 조건을 고려하기 위한 상수, C 를 도입하여 $K_{CL} = K_{con} + K(1 - M_{CL}/M_{CT} - C)^5$ 으로 계산하였다. C 값의 영향을 검토하여 그림 7b에 함께 보였다. 그림의 결과로부터 값의 영향이 큰 것을 알 수 있고, 적절한 값을 결정하여 적용할 필요가 있음을 알 수 있다.

P-모델에 대해서 표 2의 각주 (d)와 (f)에서 각각 언급한 공극 특성 길이(characteristic pore length), α^* 와 한계속도(critical velocity), v_{cr} 가 결과에 미치는 영향을 검토하였다. 공극 내 입자의 퇴적은 유속이 한계속도보다 느려야 발생하고 확률은 θ_0/r_i 가 클수록 증가한다. $\theta = \theta_0 \exp(-v(r_i)/v_{cr})$ 의 관계로부터 한계속도가 퇴적확률에 미치는 영향이 크음을 알 수 있다. 가상 침투모델의 여재조건 대해서 적절한 한계속도, v_{cr} 를 추정하기 위한 영향분석 결과를 그림 8에 보였다. 공극특성길이, α^* 는 식(1)과 같이 공극반경과 입자반경의 관계식에 포함되어 있다. 또한 폐색에 의한 공극반경 감소로 증가되는 압력을 동수경사 증가량으로 변환 시 흐름거리로 고려된다(그림 1(c)). 공극특성길이, α^* 에 대한 영향분석 결과는 그림 9에 보였다.

그림 8(a)와 그림 9(a)의 결과를 비교하면 v_{cr} 와 α^* 이 폐색 현상에 미치는 영향에 역비례 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 두 입력변수를 동시에 고려하면서 적절한 입력값이 결

Fig. 9. Evolution of Hydraulic Conductivity in P-Model by Considering the Characteristic pore length, α^*

정되어야 한다. 그림 8(b)의 아래 그림은 최종 시간에서 각 반경의 공극에 퇴적된 입자별 입자들의 개수를 나타냈다. 입자들의 퇴적경향은 문헌의 결과들(Deo *et al.*, 2010)과 유사하게 나타나 결과의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

2.2.4 가상 침투시설에 대한 폐색 모델링

가상 침투시설 폐색모델링을 위한 S-, E-, P-폐색모델들의

Fig. 10. Comparison of Hydraulic Conductivity Evolution by the S-, E-, P-Models for the Artificial Infiltration Model.

입력변수를 문헌 및 영향 분석 결과에 의거하여 결정하였다 (표 2). S-모델에서는 그림 6에 보인 영향분석 결과를 바탕으로 판단하여 입경을 3 mm로, 폐색층 두께를 100 mm로 적용하였다. E-모델에서는 그림 7의 결과와 공극을 고려하지 않고 폐색층 두께를 계산하는 모델특성을 고려하여 폐색층 두께 입력값으로 S-model 보다 작은 값인 3 mm를 적용하였다. K_{con} 은 부유물 입경과 공극율을 적용하여 투수계수 경험식으로 구한 값을 적용하였다. 상수 C 는 그림 7의 결과로부터 판단하여 0.6을 적용하였다. P-모델에서는한계속도 v_{cr} 을 5 cm/s로 $\alpha^*=2$ cm로 적용하였다.

가상 침투시설에 대해 시간에 따른 통수능 감소현상을 각 모델들을 적용하여 구한 결과를 그림 10에 함께 비교하였다. 그림의 결과에서 모든 모델의 예측치가 폐색 진행 전 구간에서 유사하게 나타났다. 해석과정에서 모델개발 시 조건과 상

이한 침투시설에 대해 폐색모델을 적용함에 있어서는 입력값 선정이나 수치해석의 안정성 확보 등에서 불확실성이 내재되어 있음을 알 수 있었다. 하지만 선정한 모델들을 주의깊게 사용할 경우에 침투시설 폐색모델에서 발생하는 폐색현상을 모델링할 수 있는 유용한 해석도구로서 제안할 수 있음을 확인하였다.

3. 모델 적용

3.1 침투 실험

가상 침투시설의 폐색 모델링에 대해 적용성이 검증된 S-, E-, P-모델들을 실제 침투실험의 폐색 모델링에 적용하여 신뢰도를 평가하고자 한다. Mercado 등(2014)은 침투, 여과, 저류 기능을 가진 하이브리드 침투시설을 개발하였다. 이들 시설은 여과재의 폐색에 의한 기능 저하가 발생할 수 있다. 따라서 침투시설의 기능을 정상으로 유지하기 위한 유지관리가 빈번히 요구될 수 있다. 이러한 폐색 문제를 최소화하기 위해 침투시설의 폐색포텐셜을 평가하기 위한 실험실 침투실험이 수행되었다. 실험결과 유입유량과 부유물 부하량이 폐색에 크게 영향을 미침을 확인하였다. 이 논문에서는 2절에서 검토한 폐색 모델들을 침투실험에 적용하여 폐색현상을 모델링하였다. 모델링 결과에 근거하여 각 폐색모델의 적용성을 검토하였다.

3.2 폐색 모델링

3.2.1 실험결과(Mercado, 2014)

하이브리드 침투시설은 침투조, 저류조로 구성된다. 침투실

Fig. 11. Infiltration Test : (a) Infiltration and Retention Column, (b) Cumulative Change in Flux and Cumulative change in mass flux for Infiltration Column (Mercado, 2014).

험에서는 침투조 월류 시 월류량이 저류조에 부하되는 과정을 2개의 필터컬럼을 사용하여 재현했다(그림 11a). 중요한 실험 인자로는 평균유량(Average Flow)과 고유량(High Flow)에 대해 각각 저농도(Low Concentration)와 고농도(High Concentration) 오염부하량을 조합하여 실험했다. 여기서 평균유량과 고유량은 각각 100과 200 ml/min, 고농도와 저농도는 각각 210과 550 mg/L이다. 주어진 조건에 대한 일정유량의 오염부하를 지속적으로 공급하면서 유량과 오염부하에 대해 폐색이 발생할 때 까지 시간에 따른 유입유출 변화량을 구했다. 또한 실험조건에 따른 깊이별 부유물 퇴적량 및 부유물 입경 분포를 구했다. 주요 실험결과로는 오염부하량에 관계없이 저유량의 경우 폐색 포텐셜이 낮게 나타났다. 폐색층은 여재 종류에 상관없이 필터컬럼 25% 깊이까지 발달했다. 모래 필터에서는 50~250 μm 의 부유물이 여과되었지만 저회필터에서는 50 μm 이하 부유물은 여과되지 않았다. 상세한 연구결과는 원문(Mercado, 2014)을 참조하기 바라며, 여기서는 이 논문의 폐색모델 적용성 검토에 적용한 상대적으로 큰 유량이 유입되는 침투조에 대한 측정결과를 그림 11b에 보였다.

3.2.2 모델링 결과 및 분석

그림 11에 보인 침투실험에서 발생하는 폐색현상을 각 모델을 적용하여 모델링하였다. 침투컬럼은 오염부하에 따라 폐

색이 발생하여 유입, 유출량에 차이가 발생하고 이를 측정한 실험결과가 그림 11b 상단과 같다. 이들 폐색현상을 모델링하여 비교한 결과를 각 실험조건에 대해 그림 12에 나타냈다. 그림 12에서 실험결과와 편의 상 그림 11b의 유입, 유출량 차이를 침투컬럼 여과재의 투수계수 감소로 변환하여 나타내고 이를 모델링 결과와 비교했다. 모델링에서 적용한 입력변수 항목은 표 2와 같다. 입력변수의 값들은 침투실험 조건에 상응한 값을 적절히 적용하였고, 그 중 주요 인자의 값들은 그림 12의 결과에 요약하여 나타냈다.

침투시설에서 발생하는 폐색 예측을 위해 본 논문에서 검토한 폐색모델들의 가능성을 그림 12의 결과로부터 유추할 수 있다. 그림에서 각 모델에서 얻은 결과들이 실험결과와 각각 유사한 수준의 일치성을 보인다. 하지만 현재 연구결과 수준에서 이들 모델을 직접 적용하는 경우 다음과 같은 문제점들이 고려되어야 한다.

- 그림 12의 결과는 앞서 2절에서 검토한 각 모델 입력변수에 대한 영향분석 결과를 바탕으로 적정한 값을 입력하여 얻은 것이다. 주어진 침투시설 조건에서 실험 결과에 근거하지 않고 폐색포텐셜 평가를 위한 적정 입력변수를 결정하기 위해서는 추가 검토가 요구된다.

- 모델 선호도를 입력변수 부하량이 적으면서 유사한 수준의 예측 결과를 얻을 수 있는 순으로 평가한다면 S-모델, E-

Fig. 12. Comparisons of Clogging between Infiltration Test and Clog Modeling Results.

모델, P-모델 순이다. 하지만 S-, E- model 들의 경우 폐색 두께가 결과에 미치는 영향이 매우 크지만 결정근거가 매우 모호하다는 단점이 있다. 적용할 수 있는 경험 혹은 실험결과가 있는 경우 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것이다.

· E-모델은 실험결과에 근거하여 결정하여야 하는 입력변수가 많다. 실험결과가 부재한 경우에 신뢰도 수준은 S-model과 유사할 것이다. 다른 모델과 비교하여 큰 장점은 층이 진 여과재에 대해서 등가투수계수를 고려할 수 있다는 점이다.

· S-, E-모델과 비교하여 P-모델은 공극 내 투수와 입자의 폐색 현상을 물리적으로 더욱 유사하게 모델링하고 있다. 하지만 다른 모델들에 비해 입력변수가 많다. 특히 공극 반경 및 오염물 입자 분포는 별도의 결정과정이 요구된다. 활용의 난이도에 비해서 결과의 신뢰도가 다른 모델보다 월등하지는 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

강우유출수 침투시설 설계 및 운영에 있어서 폐색현상 설계 인자의 규명과 적정 모델을 이용한 관리수명 예측이 필요하다. 본 논문에서는 침투시설 폐색 예측에 적용할 수 있는 다공질 여재 폐색모델을 선정하여 적용성을 검토하였다.

각각 S-, E-, P-모델로 칭한 선정 모델들을 가상 및 실험실 침투시설에서 발생하는 폐색모델링에 적용하였다. 가상 침투시설 모델링에서는 모델의 주요 입력변수들에 대한 영향분석을 수행하였다. 실험실 침투시설 모델링에서는 영향분석 결과에 근거하여 결정한 입력변수 값을 적용하였다. 모델링 결과 실험실 침투시설 폐색으로 인한 투수계수 감소현상을 각 모델들을 적용하여 적정 수준으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

연구결과로부터 강우유출수 침투시설에서 발생하는 폐색 예측을 위한 해석도구로서 본 논문에서 검토한 폐색모델들을 제안할 수 있다. 더불어서 모델의 활용 수월성 및 신뢰도 향상을 위한 추가 연구의 수행을 제안한다. 그 이유로는 현 연구수준에서 입력변수 결정 과정에 어려움이 내재되어 있기 때문이다. 또한 모델 내 일부 관계식들은 침투조건에 따라 영향을 받을 수 있어 관련 연구수행을 통한 검증 및 개선이 필요하다.

수리지질분야의 다공스케일 네트워크모델은 검토 목적에 비해 과다한 해석 부하로 실용성이 낮으므로 이 논문의 검토에서 제외되었다. 하지만 모델 개발 및 적용 시 보다 정밀한 물리적 폐색현상과 더불어서 화학적 폐색현상도 함께 모델링 가능할 것으로 예상되어 향후 연구로서 제안할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2014년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- Arya, L.M. and Dierolf, T.S. (1989) "Predicting soil moisture characteristics from particle-size distributions: An improved method to calculate pore radii from particle radii." *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, 115-124.
- Blazejewski, R. and Murat-Blazejewska, S. (1997) "Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow." *Water Science and Technology*, Vol. 35, No. 5, pp. 183-188.
- Blunt, M.J., Bijeljic, B. *et al.* (2013) "Pore-scale imaging and modelling." *Advances in Water Resources*, Vol. 51, pp. 197-216.
- Deo, O. and Sumanasooriya, M., *et al.* (2010) "Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: Experiments and modeling." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 7, pp. 741-751.
- Du, X. and Wang, Z. *et al.* (2013) "Potential Clogging and Dissolution Effects During Artificial Recharge of Groundwater Using Potable Water." *Water Resources Management*, Vol. 27, No. 10, pp. 3573-3583.
- Du, X., Fang, Y., *et al.* (2014) "The Prediction Methods for Potential Suspended Solids Clogging Types during Managed Aquifer Recharge." *Water*, Vol. 6, No. 4, pp. 961-975.
- Hua, G.F. and Li, L., *et al.* (2013) "An integrated model of substrate clogging in vertical flow constructed wetlands." *Journal of Environmental Management*, 119: 67-75.
- Kadlec, R.H. and Wallace, S. (2008) "Treatment wetlands." CRC press.
- Kandra, H.S., McCarthy, D., *et al.* (2014a) "Assessment of clogging phenomena in granular filter media used for stormwater treatment." *Journal of Hydrology*, Vol. 512, pp. 518-527.
- Kandra, H., Deletic, A., *et al.* (2014b) "Assessment of Impact of Filter Design Variables on Clogging in Stormwater Filters." *Water Resources Management*, Vol. 28, No. 7, pp. 1873-1885.
- Kim, J.-S., Lee, I.-M., *et al.* (2009) "Groutability of cement-based grout with consideration of viscosity and filtration phenomenon." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 33, No. 16, pp. 1771-1797.
- Kim, Y.S. and Whittle, A.J. (2009) "Particle Network Model for Simulating the Filtration of a Microfine Cement Grout in Sand." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 2, pp. 224-236.
- Le Coustumer, S., Fletcher, T.D., *et al.* (2012) "The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: A large-scale column study." *Water Research*, Vol. 46, No. 20, pp. 6743-6752.
- Lu, N. and Likos, W.J. (2004) "Unsaturated Soil Mechanics." Wiley.
- Mercado, J.M.R., Maniquiz-Redillas, M.C., *et al.* (2014) "Laboratory study on the clogging potential of a hybrid best management practice." *Desalination and Water Treatment*: 1-8.
- Nivala, J., Knowles, P., *et al.* (2012) "Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Measurement, modeling and management." *Water Research*, Vol. 46, No. 6, pp. 1625-1640.
- Raoof, A. (2011) Reactive/Adsorptive transport in (partially-) sat-

- urated porous media: from pore scale to core scale. Environmental Hydrogeology Group, Utrecht University. Ph.D.
- Raoof, A., Nick, H.M., *et al.* (2013) "PoreFlow: A complex pore-network model for simulation of reactive transport in variably saturated porous media." *Computers & Geosciences*, Vol. 61, No. 0, pp. 160-174.
- Reddi, L. and Bonala, M. (1997) "Analytical Solution for Fine Particle Accumulation in Soil Filters." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 12, pp. 1143-1152.
- Reddi, L.N., Ming, X., *et al.* (2000) "Permeability reduction of soil filters due to physical clogging." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 3, pp. 236-246.
- Reddi, L.N., Ming Xiao, Malay G. Hajra, and In Mo Lee (2005) "Physical clogging of soil filters under constant flow rate versus constant head." *Can. Geotech. J.*, Vol. 42, No. 3, pp. 804-811.
- Rowell, David L. (1994) *Soil Science: Methods & Applications* : Siriwardene, N.R., Deletic, A., *et al.* (2007) "Clogging of storm-water gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study." *Water Research*, Vol. 41, No. 7, pp. 1433-1440.
- Wang, Z., Du, X., *et al.* (2012) "Surface clogging process modeling of suspended solids during urban stormwater aquifer recharge." *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 24, No. 8, pp. 1418-1424.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2014) "Environmentally Low Impact Construction Techniques to Develop Waterfront and Coastal Area, Research Report, Infrastructure and transportation R&D project, KAIA (09 Regional Technology Renovation B-01)." Kongju National University.
- Lee, I.M., *et al.* (2013) "Infiltration behavior and face stability of carbonate-added slurry shield tunnel." *J. of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 4, pp. 401-413.

Received	September 15, 2014
Revised	September 18, 2014
Accepted	October 20, 2014