지표면 온도상승이 빗물의 토양침투에 미치는 영향에 대한 실험 및 수치 해석적 연구

Experimental and Numerical Study on the Effect of the Rain Infiltration with the Increase of Surface Temperature

신나라 · 신미수 · 장동순[†]Nara Shin · Mi Soo Shin · Dong Soon Jang[†]

충남대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(2013년 1월 11일 접수, 2013년 5월 31일 채택)

Abstract : It is generally known that the increase of the Earth surface temperature due to the global warming together with the land desertification by rapid urban development has caused severe climate and weather change. In desert or desertification land, it is observed that there are always severe flooding phenomena, even if desert sand has the high porosity, which could be believed as the favorable condition of rain water infiltration into ground water. The high runoff feature causes possibly another heavy rain by quick evaporation with the depletion of underground water due to the lack of infiltration. The basic physics of desert flooding is reasonably assumed due to the thermal buoyancy of the higher temperature of the soil temperature than that of the rain drop. Considering the importance of this topic associated with water resource management and climate disaster prevention, no systematic investigation has, however, been reported in literature. In this study, therefore, a laboratory scale experiment together with the effort of numerical calculation have been performed to evaluate quantitatively the basic hypothesis of run-off mechanism caused by the increase of soil temperature. To this end, first, of all, a series of experiment has been made repeatedly with the change of soil temperature with well-sorted coarse sand having porosity of 35% and particle diameter, 2.0 mm. In specific, in case 1, the ground surface temperature was kept at 15°C, while in case 2 that was high enough at 70°C. The temperature of 70°C was tested as this try since the informal measured surface temperature of black sand in California's Coachella Valley up to at 191 deg. °F (88°C). Based on the experimental study, it is observed that the amount of runoff at 70°C was higher more than 5% compared to that at 15°C. Further, the relative amount of infiltration by the decrease of the surface temperature from 70 to 15°C is about more than 30%. The result of numerical calculation performed was well agreed with the experimental data, that is, the increase of runoff in calculation as 4.6%. Doing this successfully, a basic but important research could be made in the near future for the more complex and advanced topic for this topic.

Key Words : Desertification, Infiltration and Run-off, Water Management, Flooding of Desert, Thermal Buoyancy Induced Adverse Pressure Gradient, Porous Media Mass Transfer, Global Warming

요약 : 지구온난화와 도시 사막화에 따른 지표면의 온도 상승은 기상과 기후에 대한 실질적인 변화를 야기시킨다는 것은 경험적으로 잘 알려져 있다. 특히 사막화 지역에서는 사막 토양이 침투에 유리한 높은 기공성을 가졌음에도 불구하고 오히려 강우 시 강력한 유출(runoff) 현상에 의한 홍수가 빈번하게 발생하고 있다. 강수시 이러한 높은 유출 특성은 빠른 수분증발과 짧은 수자원순환주기에 의하여 집중호우를 발생시키고 지하수 자원을 고갈시키는 최악의 양극화 현상을 야기시키고 있다. 이러한 현상에 대한 물리적인 기전은 사막과 같은 토양에 높은 온도에 의한 강한 열적 부력현상에 의한 것으로 판단된다. 그러나 이러한 주제의 중요성에도 불구하고 이것에 대한 과학적인 연구가 제대로 이루어지지 않은 것으로 나타나고 있다. 본 논문에서는 이러한 현상에 대한 물리적인 가설에 대한 기전을 밝히기 위해 실험적인 연구와 수치 해석적 연구를 병행하였다. 실험적 연구를 위해 기공도 약 35%에 입도 2.0 mm를 가진 자갈상 모래를 가지고 토양 온도 변화에 따른 실험을 수행하였다. 온도 변화에 대한 구체적인 변수는 case 1의 표준상태의 경우에는 지표면의 온도를 15°C로 하였고, case 2의 경우는 70°C 비교적 높은 고온을 선택하여 각각 10회의 반복실험을 시도하여 평균값을 취하였다. 70°C를 선택한 이유는 캘리포니아 Coachella Valley이 검은 모래가 화씨 191도(섭씨 88도)까지 상승한다는 경험적 자료에 기초하였다. 실험 결과 온도가 70°C인 경우는 15°C인 경우에 비하여 유출(runoff)이 온도상승효과에 의하여 약 5% 이상 실질적으로 증가하는 결과를 보였으며 지하로 침투하는 침투량(infiltration)은 빗물의 양을 동일한 양으로 표준화 하여 보정한 경우 온도가 낮을 때 상대적으로 30% 정도 증가하는 현상을 나타내었다. 이러한 결과는 지표면 온도 상승이 지하수 고갈과 그에 따른 지반강하에 중요한 인자가 될 수 있음을 시사한다. 수치해석의 결과는 실험 결과와 비교할 때 온도상승에 의해 약 4.6% 정도 유출이 증가되는 것으로 나타나 실험결과와 비교적 잘 부합하였으며 강우량에 따른 변수 연구의 경우도 물리적으로 일관성이 있었다. 이러한 기본적인 연구 결과에 기초할 때 향후 보다 실질적인 시스템에 대한 연구가 가능할 것으로 판단된다.

주제어 : 사막화 현상, 강우 침투 및 유출, 수자원 관리, 사막의 홍수, 열적부력현상, 다공성 매질 열 물질 전달현상, 지구 온난화

1. 서론

작금의 지구촌의 기상의 근본적인 문제중의 하나는 특히

지난 50년간 가속되어 온 온난화와 지속적인 개발에 따른 도시의 사막화 현상 등에 기인한다. 온난화와 사막화의 복합적인 현상은 지표면의 온도의 상승을 유도하였고 그 결

[†] Corresponding author E-mail: p-dsjang@cnu.ac.kr Tel: 042-821-6677 Fax: 042-822-5610

과, 내리는 빗물보다 높은 지표면의 온도는 빗물을 순조롭게 지하로 침투시키는 대신 극단적인 예를 들면 마치 뜨거운 프라이팬에서 물이 튀듯이 그대로 하늘로 증발하는 현상을 나타낸다. 이 결과 수자원이 지하수로 유입되어 지표수로 올라와 하늘로 증발하는 완전한 수자원 순환 대신 그대로 지표수에서 하늘로 순환하는 “half-cycle” 형태에 의한 비정상적인 순환에 의한 집중호우 현상이 빈발하였다. 그 대표적인 결과가 PMP (Probable Maximum Precipitation, 예상가능최대강수량)에 준하는 집중호우가 많은 지역에서 현실로 나타나고 있다는 점이다.

그러므로 지표면의 온도와 빗물의 온도의 차이에 따라 빗물이 땅속으로 침투되는 양과 지표면에서 흘러나가는 양의 상관관계를 정량적으로 확인하여 수자원시스템에 미치는 영향을 파악하고자 하는 것이 중요한 주제로 대두되고 있으나 기존 수자원 관리체계에서는 아직 지표면과 빗물의 온도차가 중요한 변수로 파악되지 않고 있는 실정이다.

이를 위하여 본 연구에서는 실험실에서 빗물의 온도와 지표면 토양층의 온도차이가 강우 형태에 따른 침투(infiltration)와 유출(runoff)되는 양의 정량화를 위해 실험적인 방법과 수치해석적인 연구를 통하여 분석하고자 한다. 즉 실험을 수행하면서 이에 따른 다공성 매질에서의 유동에 대한 수치해석적인 분석을 병행하여 열적 부력현상에 따른 유출 현상에 대하여 저항 기전을 정량적으로 규명하고자 한다.

2. 실험적 연구 방법

본 연구에서는 실험실에서 빗물의 온도와 지표면 토양층의 온도차이가 강우형태에 따라 얼마만한 양이 지하로 침투하고 유출되는지를 분석하고자 한다. 실험 장치에 대한 도식도와 제원 Fig. 1에 나타냈으며 강우량 및 토양 온도변화에 따른 토양 침투 실험을 수행하였다. 지표면의 온도상승을 위해서는 토양 내부에 전열 장치를 설치하여 온도 변화에 따른 실험을 수행하고 그에 따른 유출량 증감에 대한 실험을 수행하였다. 실험 변수로는 크게 강우량과 빗물과 지표면의 온도 차이에 대한 변화로 나누어 볼 수 있다.

Fig. 1은 전열장치를 부착한 모형 지반의 실험 장치를 나타낸 것이다. 지표면 토양의 온도에 따른 유출량의 차이를

Table 1. Properties of the soil

Properties	Value
Maximum dry density, $\gamma_{\max}$ (kg/m ³)	1670
Minimum dry density, $\gamma_{\min}$ (kg/m ³)	1380
Uniformity coefficient, C_u	1.43
Coefficient of curvature, C_c	0.90
Specific gravity, G_s	2.66
Moisture content, ω (%)	17.6
Unified soil classification system	SP

알아보기 위해 온도를 상온과 고온에서 나누어 실험을 실시해 보았다. 이 때 상온실험은 일반적 토양의 온도 10~15℃에서 이루어 졌고 고온실험은 장치내부 전열기를 최고온도 75℃로 설정한 상태인 70~75℃ 사이에서 실험을 진행하였다. 저항 전열기에 의한 가열과 흐르는 물에 의한 냉각 현상에 의하여 일정한 범위에서 온도의 변화가 발생하였으며 신뢰성 있는 실험 자료의 도출을 위하여 변수에 대하여 각각 10회의 반복실험을 수행하였다.

본 실험에서는 모형지반을 조성하기 위해서 주문진 표준사와 마사토를 사용하였다. 표준사 입경이 매우 균등하며, 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_p)가 각각 1.43과 0.90으로 나타났다. 통일분류법(USCS)으로는 SP (poorly graded sand)로 분류되었다. 표에서 보듯이 모래의 비중은 2.66이었으며, 최대 및 최소 건조 단위 밀도는 각각 1,670 kg/m³과 1,380 kg/m³으로 각각 측정되었다. Table 1은 실험에 사용된 토양에 대한 물성치를 정리한 것이다.

3. 수치 해석적 연구 방법

3.1. 일반 지배방정식

수치해석을 위한 일반적인 지배방정식은 식 (1)에 나타냈으며 이 때 종속변수 ϕ 는 단위질량당의 물리량을, S_ϕ 는 단위체적당의 질량, 엔탈피, 운동량에 대한 생성항을 나타낸다.¹⁾

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{unsteady}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi)}_{\text{convection}} = \underbrace{\nabla \cdot (T \nabla \phi)}_{\text{diffusion}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{source}} \quad (1)$$

(a) A lab-scale equipment

(b) geometry

Fig. 1. A schematic diagram of equipment.

위 식을 Patankar의 방법을 사용하여 검사체적에 기초한 TDMA로 해석하였으며 압력과 속도 연계 문제는 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다.

3.2. 난류모델과 다상유동모델²⁾

본 연구에서 난류 유동장을 해석하기 위한 속도 성분 u , v 에 대해 순간 운동방정식을 시간 평균한 값을 이용하였고, $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였으며, 난류점성계수 μ_t 는 아래 식 (2)와 같은 Prandtl-Kolmogorov관계식에 의한 단위 질량당의 난류에너지 k 와 난류에너지 소산을 ϵ 을 이용하여 표현하였다.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (2)$$

특히 본 연구에서는 토양 공극의 유동의 흐름을 계산하기 위해 다상유동 모델 즉 VOF (Volume Of Fluid)모델을 사용하였다. VOF 모델은 혼합되지 않은 다상으로 존재하는 유체가 계면간의 상호작용이 없고, 모든 상들이 같은 값의 압력, 속도, 온도를 갖는다고 가정했을 때 발생하는 오차를 무시하는 것이다. 즉, 한 검사체적에 혼재된 다상의 유체는 같은 물리적 성질을 갖는다.

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (3)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (4)$$

$$c_p = \sum_i \frac{(c_p)_i \rho_i}{\rho} \alpha_i \quad (5)$$

여기서, $\alpha_i = \frac{V_i}{V}$ 는 Volume fraction이고 ρ_i , μ_i 그리고 $(c_p)_i$ 는 i 번째 상의 밀도, 물 점성, 비열을 나타낸다. Volume fraction α_i 의 확산은 다음과 같은 지배 방정식으로 나타낼 수 있다. 여기서 $S\alpha_i$ 는 i 번째 상의 생성 소멸항이다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \alpha_i dV + \int_S \alpha_i (\nu - \nu_g) \cdot da = \int_V s_{\alpha_i} dV \quad (6)$$

3.3. 다공성매질에서의 유동^{3,4)}

다공성 매질에서 유체의 유동은 Darcy의 법칙을 따른다. Darcy의 법칙은 식 (7)과 같이 표현된다. Δh 는 수두차, ΔL 은 통과거리, K 는 수리전도도(hydraulic conductivity)를 나타내며 다공성 매질을 통과하는 유체의 속도는 단위 거리당의 수두차(hydraulic gradient)와 수리전도도에 비례한다는 의미를 지닌다.

$$v = -K \frac{dh}{dl} \quad (7)$$

수두(hydraulic head)는 식 (8)과 같이 표현되며, 수리전도도 K 는 식 (9)와 같이 표현된다. 수리전도도는 매질뿐만 아니라 유체의 특성과도 밀접한 연관이 있다. 매질내의 유체의 속도는 입자의 직경(d), 유체의 밀도(ρ)에 비례하고 역학적 점성계수(μ)에 반비례한다.

$$h = z + \frac{P}{\rho g} \quad (8)$$

$$K = \frac{k \rho g}{\mu} \quad (k = Cd^2, C: \text{비례상수}) \quad (9)$$

정상상태의 포화유동은 비교적 간단한 과정을 통해 지배 방정식을 유도할 수 있다. 검사체적(control volume)내 들어온 질량과 나간 질량이 같다는 점을 이용하고 거기에 Darcy의 법칙을 적용하면 식 (10)과 같은 수두 지배방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \quad (10)$$

식 (10)은 매질구조가 수평 또는 수직 일 때에 가능하다. 만약 지질학적 원인으로 매질이 굴곡구조일 경우 수리전도도 텐서(hydraulic conductivity tensor)가 도입된다. 2차원 좌표계에서 수평구조와 굴곡구조의 매질은 각각 다음과 같은 식 (11)과 (12)로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) = C (K_{xy} = K_{yx} = 0) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) \\ = C (K_{xy} = K_{yx} \neq 0) \end{aligned} \quad (12)$$

다공성 매질에서의 점성저항(viscous resistance)과 관성저항(inertial resistance)은 Ergun Equation을 이용하여 식 (13)과 (14)로 나타낸다. 이러한 관성저항과 관성저항은 Darcy의 법칙의 투수계수(k)와 연관되어 전체유동에 영향을 주는 것이다.

$$P_v = \frac{150\mu(1-X)^2}{X^3 D_p} \quad (13)$$

$$P_i = \frac{1.75\rho(1-X)}{X^3 D_p} \quad (14)$$

Fig. 2. Boundary condition and grid generation.

Table 2. Inlet and boundary condition^{5,6)}

		15℃	70℃
Inlet	Mass flow rate (kg/s)	2.82×10^{-2}	2.89×10^{-2}
	Temperature (℃)	11	11
Porous region	Temperature (℃)	15	70
	Porosity	0.35	0.35
	Mean diameter (m)	1.99×10^{-3}	1.99×10^{-3}
Outlet (infiltration)	Outflow B.C.	$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \Gamma_\phi = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \Gamma_\phi = 0$
	Outflow B.C.	$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, \Gamma_\phi = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, \Gamma_\phi = 0$

Fig. 2에 실험 결과와의 비교를 위하여 수치해석에 사용한 계산영역 및 경계조건을 나타내었으며 좀더 자세한 내용은 Table 2에 나타내었다.

위의 그림은 경계 조건과 격자를 나타낸 것이다. 총 격자 수는 약 105,000개 정도로 구성하였으며 유입구와 유출구 부분은 조밀하게 격자를 구성하였다. 또한 토양의 공극을 빗물이 통과하는 형태이므로 Gas (air)와 Liquid (H₂O)의 2가지 상(phase)이 존재한다고 가정하였다.

입구에서의 조건과 경계조건을 살펴보면 Table 2와 같다. Inlet에서 빗물의 유입을 가정하였으며 강우강도에 따른 유입 속도의 변화에 따른 변수연구를 수행하였다. 토양부분을 다공성 매질로 가정하였는데 다공성 매질에서 관성저항(Inertial resistance)과 점성저항(viscous resistance)의 정확한 값을 측정하거나 가정하기는 어렵지만 본 연구에서는 상온과 고온에서의 빗물 침투량의 차이가 공극에서의 점성저항 변화에 따라 영향을 줄 것으로 판단하였다. 이는 빗물이 침투하기 전에는 토양공극의 대부분을 공기가 차지하고 있으므로 온도가 증가하면 공기의 점성이 증가하여 그에 따라

빗물 침투에 영향을 줄 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 입자의 평균직경(D_p), 유체의 밀도(ρ), 그리고 공극률(ϵ)의 관계식인 “Ergun” 식을 통해 관성저항(Inertial resistance)과 점성저항(viscous resistance)의 값을 추정하였다. 공극영역에서의 공극률을 0.3이라 가정하였고, 입구에서의 물의 온도는 평균 11℃이다. 실온에서의 열원이 없을 때 지표면의 온도는 15℃이고, 열원이 있는 고온에서의 지표면 온도는 70℃이다. 실험결과와 수치해석 결과의 검증을 위하여 초기의 수치 해석 시에 유입유량은 실험시의 편차를 고려하여 적용하였다.

4. 연구 결과 및 토론

본 연구는 상용코드를 활용한 수치해석과 실험을 통한 검증과정을 수행하였다. 수치해석적 연구를 위해 상용코드로는 STAR - CCM + Version 7.04을 이용하였다. 우선 조성된 모형지반장치를 3차원의 형상으로 모사하여 지반의 온도, 강우량의 변화에 따른 온도장, 유동장을 수치 해석하였다. 검증과정을 위해 지반모형 실험 장치를 제작하여 지표면 온도를 상온일 때와 고온(70℃)일 때를 구현하고, 10회에 걸쳐 실험을 수행하였다.

4.1. 실험 결과

열원이 없는 실온의 지표면 온도 15℃에서 10회 실험 시 21.49~23.26 L의 물이 유입되었고, 지표유출량은 16.49~17.52 L, 침투량(infiltration)은 3.45~6.47 L로 측정되었다. 또한, 전열기를 가동하여 지표면의 온도가 70℃라고 설정했을 때, 유입유량(precipitation)은 19.12~23.17 L이었고, 이때 지표 유출량(runoff)은 16.9~17.53 L이고, 침투량은 1.59~5.64 L로 나타났다. Table 3은 실험값의 평균값으로 열원의 유무에

Table 3. Averaged experimental data

Surface temperature (℃)	Inlet mass flow (L/S)	Inlet time (S)	Total of Inlet (L)	Total of runoff (L)	Runoff mass flow (L/S)	Total of infiltration (L)
15	0.0288	782	22.4	17.4	0.0223	5.03
70	0.0289	736	21.2	17.5	0.831	3.66

* As density of water at 4℃ and 1atm is 1 kg/L, 1L/s is 1 kg/s

(a) At 15°C

(b) At 70°C

Fig. 3. Experimental data infiltration and runoff.

Table 4. A comparison of percentage in experimental runoff and infiltration data (%)

	Runoff	Infiltration
15°C	77.70	22.30
70°C	82.55	17.45

따른 실험값의 차이를 비교하였다.

Fig. 3은 10회에 걸쳐 실험한 결과를 강우량을 100으로 기준해서 침투량과 지표유출량의 비율로 나타낸 것이다. 위에서 언급한 지표유출량과 침투량의 전체 평균값에서도 알 수 있듯이, 지표면이 70°C 일 때 지표유출량이 가시적으로 증가한 것을 확인할 수 있다.

Table 4는 실험데이터에서의 유입유량의 평균값에 대한 지표유출량 평균값과 침투량 평균값에 대한 백분율을 나타낸 것으로 유출량이 상온보다 고온에서 약 5% 정도 증가한 것을 볼 수 있다. 그리고 유입유량을 같게 통일하였을 때 온도가 낮은 경우(15°C) 유입유량 22.44 L에 대한 침투량 5.03 L을 온도가 높은 경우 유입유량 21.19 L로 보정하면 침투량은 5.03 L에서 $5.03 \times 21.19/22.44 = 4.74$ 가 된다. 그러므로 온도가 낮은 경우 온도가 높은 경우에 비하여 상대적으로 늘어난 침투량의 증가는 $(4.74-3.66)/3.66 = 0.3$ 으로서 약 30%에 달하는 큰 양이 증가한 것으로 나타나고 있다. 이는 지표면 온도 상승이 지하수 고갈과 지반 강하 등에 매우 실질적인 인자가 될 수 있음을 시사한다.

4.2. 수치해석 결과

지표면이 상온일 때와 지표면의 온도가 높을 때 유동 분포를 해석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 유동의 모습을 좀 더 가시적으로 확인해 보고자 유선도(streamline) 형태로 나타내었다. 수치해석 결과에서 살펴보면 유출량의 차이가 절대량 측면에서는 매우 크지 않고 작은 범위에서 차이를 나타내므로 결과 그림 상에 가시적으로 확연히 나타나고 있지는 않지만 유출되는 출구에서의 mass flow rate (kg/s)를 계산한 결과 확실하게 차이가 나는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 지표면 온도 차이에 따른 빗물의 체적비(volume fraction)를 나타낸 것이다. VOF 다상 모델을 설정했기 때문에 계산이 진행되는 동안 공기가 차지하던 토양공극에서의 air (gas)와 H₂O (liquid) volume fraction의 변화를 확인할 수 있다. 결과에 나타나 있듯이 지표면의 온도가 낮을 때는 토양의 공극이 빗물로 좀 더 채워져 침투 되는 양이 많은 반면 지표면의 온도가 높을 때는 지표면 온도가 낮을 때에 비해서 침투되는 양이 감소한 것을 볼 수 있다.

수치해석을 통한 mass flow rate (kg/s)를 구체적으로 계산하면 지표면 온도가 15°C 일 때 실험 시 유입량과 동일한 0.02870 L/s (kg/s)의 물을 유입시켰을 때 유입량 중 0.02311 kg/s 만큼 유출 되고 0.00562 kg/s 만큼의 물이 토양층으로 침투되는 것으로 나타났다. 지표면 온도가 70°C 일 때는 실험과 동일한 유입량 0.02880 L/s (kg/s)중 0.02451 kg/s 만큼 유출되고 0.00429 kg/s 만큼의 물이 토양층으로 침투되

Fig. 4. Streamline contour.

Fig. 5. Volume fraction of H₂O (y-z plate).

	Experimental result				CFD result			
	15°C		70°C		15°C		70°C	
Inlet	2.87×10^{-2}	100%	2.88×10^{-2}	100%	2.87×10^{-2}	100%	2.88×10^{-2}	100%
Runoff	2.23×10^{-2}	77,70%	2.38×10^{-2}	82,55%	2.31×10^{-2}	80,49%	2.45×10^{-2}	85,07%
Infiltration	6.40×10^{-3}	22,30%	4.98×10^{-3}	17,45%	5.62×10^{-3}	19,51%	4.31×10^{-3}	14,93%

는 것으로 나타났다. Table 5에 실험값과 수치해석 값을 비교하여 표시하였고 또한 빗물유입량에 대한 %로 표시한 결과를 나타내었다. 결과를 살펴보면 실험 결과 지표면 온도가 높은 경우 지표면 온도가 상온일 때에 비해서 유출되는 양이 약 5% 증가한 것을 볼 수 있으며 이는 수치해석 결과에서도 비슷한 양상으로 나타났는데 지표면 온도가 높은 경우 상온일 때에 비해서 유출량이 약 4.6% 정도 증가한 것으로 나타났다.

Fig.6과 7은 빗물 강도 변화에 따른 수치 해석 결과를 나타낸 것이다. 먼저 상온일 때와 고온의 지표면일 때 실험 조건 유량을 표준조건으로 하여 각각 유입속도를 1.5배, 2.0 배로 증가시켜 수치해석을 수행하여 Fig. 6에는 속도분포에 해당하는 유선도를 나타냈고, Fig. 7은 토양내부의 H₂O의 체적 분율을 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 유량이 증가할수록 유출량 비율이 감소되고 침투량 비율이 증가되는 것을 볼 수 있다. 이는 토양에 수직방향인 깊이방향으로 물

Fig. 6. A comparison of streamline contour plot.

Fig. 7. A volume fraction of H₂O.

Table 6. A comparison with intensity of inlet

(unit: kg/s)

Rainfall intensity (Inlet)	Surface temp.	Inlet	Runoff	Runoff (%)	Infiltration	Infiltration (%)
1	15°C	2.87×10^{-2}	2.31×10^{-2}	80.49	5.62×10^{-3}	19.51
	70°C	2.88×10^{-2}	2.45×10^{-2}	85.07	4.31×10^{-3}	14.93
1.5	15°C	4.31×10^{-2}	3.36×10^{-2}	77.96	9.52×10^{-3}	22.04
	70°C	4.32×10^{-2}	3.53×10^{-2}	81.71	8.30×10^{-3}	18.29
2	15°C	5.74×10^{-2}	4.46×10^{-2}	77.70	1.29×10^{-2}	22.48
	70°C	5.76×10^{-2}	4.56×10^{-2}	79.17	1.20×10^{-2}	20.83

의 유량이 증가하면서 토양의 공극을 뚫고 들어가려는 관성력이 좀 더 크게 작용한 것으로 판단된다. 그러나 강우강도가 증가할수록 유출량의 증가폭은 점점 둔화되는 것을 볼 수 있다.

지표면 온도상승에 따른 결과는 빗물 강도에 관계없이 모

두 지표면이 고온일 때 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 강우강도가 강해질수록 온도에 따른 영향이 감소되는 것으로 나타났다. 이는 온도상승에 따른 물성변화가 유동에 미치는 영향보다 유동강도 증가 자체가 전반적인 유동에 더 영향을 많이 미친 것으로 판단된다. 좀 더 자세

(a) at 15°C

(b) at 70°C

Fig. 8. A comparison of percentage of runoff and infiltration (%).

한 결과는 유출과 침투되는 출구에서의 질량 유량(kg/s)로 나타내어 Table 6에 정리하였다. 또한 Fig. 8은 강우량을 100으로 기준해서 침투량과 지표유출량의 비율로 산정하여 좀 더 가시적으로 나타낸 것이다.

4. 결론

본 연구는 환경재난에 영향을 주는 물리적인 변수들 중에서 ‘온난화나 사막화로 인한 지표면의 온도상승에 따른 빗물의 유출량 증가와 그로 인한 수자원 순환체계의 왜곡과 환경재난’에 초점을 둔 연구이다. 본 연구는 지구온난화에 따른 지표면의 온도상승에 따른 강우시의 침투량과 지표면유출량의 미치는 영향을 알아보기 위함으로 실험과 수치 해석적 방법을 사용하였으며 상호 비교검증을 하였으며 수학적 모델에 대한 타당성을 검증하였다.

실험 결과 온도가 70℃인 경우는 15℃인 경우에 비하여 유출이 온도상승효과에 의하여 5% 이상 실질적으로 증가하는 결과를 보였으며 수치해석 결과도 이와 유사하게 4.6%로 나타났다. 지하로 침투하는 빗물의 양은 유입빗물의 양을 동일한 값으로 보정한 경우 온도가 낮은 때 온도가 높은 경우에 비해 상대적으로 30% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지표면 온도 상승이 이 분야에서 중요한 물리적인 인자가 될 수 있음을 시사한다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 기초연구사업 분야 지역대학 우수과학자 연구사업(2011-0009303)의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. Suhas V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Mcgraw-hill book company, New York(1980).
2. S. Muzaferija and M. Peric, Computation of free surface flows using interface-tracking and interface-capturing methods, Comp. Mech. Publications(1999).
3. Huang, H. and Ayoub, J. "Applicability of the Forchheimer Equation for Non-Darcy Flow in Porous Media," *SPE J.*, **13**(1), 112~122(2008).
4. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., New York(1966).
5. Thomas E. Loynachan, Kirk W. Brown, Terence H. Cooper, and Murray H. Milford, "Sustaining Our Soils and Society," American Geological Institute, Soil Science Society of America, and USDA Natural Resource Conservation Service publication. pp.22~25(1999).
6. Fetter, C. W., Applied Hydrogeology, 3rd ed. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J(1994).