

지표면 유출에서 중력흐름과 표면장력흐름

Gravity flow and Surface-tension flow on Surface runoff

이민호*, 원유승**, 유동훈***
Min Ho Lee*, Yoo Seung Won**, Dong Hoon Yoo***

요 지

일반적으로 도달시간은 지표면 유출의 흐름상태에 의존하며, 대개 중력흐름으로 가정하여 도달시간을 산정하고 있다. 본 연구에서는 흐름상태를 중력흐름과 표면장력흐름으로 구분하고 각 흐름을 판단할 수 있는 임계치를 추정하였다. 도달시간 산정을 위해 유역경사와 지표면조고의 영향을 고려할 수 있는 무차원수를 도입하였으며, 이 임계치의 범위에 따라 중력흐름과 표면장력흐름을 구분하고 두 조건의 흐름상태에 따른 도달시간 산정식을 각각 개발하였다.

중력흐름에 의한 도달시간 산정식과 표면장력흐름에 의한 도달시간 산정식을 개발하고 검증하기 위하여 기존 외국에서 실험한 자료를 비교·분석하였다. 분석결과를 통하여 이러한 흐름특성을 고려한 도달시간 산정식을 모형에 적용할 경우 유출모형을 통한 유출량산정의 정확도 향상에 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지표면 유출, 중력흐름, 표면장력흐름, 도달시간, 유역경사, 지표면 조고

1. 서론

최근 지구 온난화의 영향으로 시공간적으로 집중적인 호우가 발생하고 도시화로 인하여 유역의 지표면이 불투수층으로 바뀌어 유출특성이 변하고 있다. 이러한 도시화는 도달시간을 감소시키고 첨두유출을 증가시켜 홍수 및 내수침수의 직접적인 원인이 되고 있다. 홍수피해를 최소화하기 위해서는 홍수량의 정확한 예측이 무엇보다 중요하며, 이러한 홍수량은 유출모형을 통하여 예측이 가능하다. 홍수유출모형은 유효우량 산정모형과 유역유출모형, 하도유출모형으로 구분할 수 있으며, 도시화로 인한 불투수층에서의 흐름을 보다 정확히 해석하기 위해서는 지표면 유출현상을 보다 면밀히 분석하여 유역유출모형의 개선이 필요하다. 도시지역에서 유역유출량은 정확한 도달시간의 추정에 기초한다. 현재까지 대부분의 모형에서 도달시간은 지표면흐름을 중력흐름으로 가정하여 산정하고 있다. 그러나 유역의 지표면 흐름은 수심에 따라 중력흐름과 표면장력흐름으로 구분할 수 있으며 중력흐름은 주로 지표면 조고와 수심 또는 레이놀즈수의 함수로 생각할 수 있으나, 표면장력흐름은 유역경사의 영향이 추가적으로 작용하는 것으로 판단된다.

일반적인 개수로흐름의 거동은 흐름의 점성과 관성력 및 중력과의 상대적인 효과에 의하여 지배되며, 물의 표면장력은 특정한 상태에 한하여 흐름의 거동에 영향을 미치지 모르나 공학적으로 일어나는 대부분의 개수로에 관한 문제에 있어서 그다지 중요한 역할을 하지 않는 것으로 알려져 있다(Chow, 1980). 그러나, Woo & Brater(1961)의 실험자료는 지표면에서 조고뿐만 아니라 유역경사에 따라 마찰계수가 변하는 것을 확인하였다. 이와 같이 특별한 조건에서 일반적인 중력흐름과 달리 지표면에서 표면장력의 영향이 있을 것으로 판단되었다. 이러한 현상을 파악하기 위하여 흐름구분을 어떠한 특성치에 따라 중력흐름과 표면장력흐름으로 구분하고 각각의 흐름에 따라 도달시간산정식의 이론식을 도출하여 Butler(1977)의 실험자료와 비교·분석하였다.

* 정회원·아주대학교 건설교통공학과 박사과정·E-mail : 518minho@hanmail.net

** 정회원·건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 연구사·E-mail : yswon@moct.go.kr

*** 정회원·아주대학교 환경건설교통공학부 정교수·E-mail : dhyoo@ajou.ac.kr

2. 흐름특성과 무차원수 도입

2.1 중력흐름과 표면장력흐름

Varwick(1945)의 실험자료를 분석한 결과 마찰계수는 레이놀즈수와 조고의 영향을 받는 것으로 나타났고, Woo & Brater의 실험자료를 분석한 결과 마찰계수는 레이놀즈수, 조고뿐만 아니라 유역경사에 따라 마찰계수가 변하는 것을 확인하였다. 이와 같이 마찰계수가 유역경사의 영향을 받는 원인을 분석한 결과 각 실험자료 중 수심의 범위가 크게 다름을 파악하였다. Woo & Brater의 실험자료에서 수심은 4~22 mm인 반면, Varwick의 실험자료는 24~240 mm의 범위로 측정되었다. 이와 같이 수심조건에 따라 중력 또는 표면장력의 영향으로 인하여 흐름특성이 달라져 유역경사의 영향을 받는 것으로 가정하였으며, 본 연구에서는 상기 실험자료 중 측정된 수심으로부터 임계수심 h_c 를 22 mm로 추정하고 수심의 조건에 따라 중력의 영향을 받는 중력흐름과 표면장력의 영향을 받는 표면장력흐름으로 구분하였다.

2.2 무차원수 도입

흐름의 특성을 구분하기 위하여 무차원수가 도입되었으며, 관성에 대한 점성의 효과로부터 레이놀즈수(R)가 도입되어 흐름의 난류특성을 파악할 수 있다. 또한 흐름상태에 미치는 중력과 관성력의 비를 후르드수(F)라 하며, 중력과 관성력이 같으면 한계상태에 있다고 한다. 만약 관성력보다 중력의 영향이 크면 상류상태가 되고 중력보다 관성력이 크면 하류상태가 된다. 유역경사가 중력에 영향을 미칠 경우 경사 후르드수(F_S)로 나타낼 수 있으며, 그밖에 웨버수(W)는 관성력과 표면장력의 관계를 나타내며, 본고에서 제시한 표면장력흐름을 표현하는데 중요한 기본무차원수이다.

$$R = VL/\nu, F = V/\sqrt{gL}, F_S = V/\sqrt{gLS}, W = V\sqrt{\rho L/\sigma}, L \sim H, h, k_W, b_S \quad (1)$$

여기서 V 는 유속, L 은 특성길이로써 동수반경(H), 수심(h), 조고(k_W), 수면폭(b_S) 등을 취할 수 있으며, ν 는 점성계수, g 는 중력가속도, S 는 유역경사, ρ 는 밀도, σ 는 표면장력이다.

표면장력의 영향을 포함하는 웨버수와 중력의 영향을 포함한 후르드수를 조합하고 특성길이를 조고로 취하면 Y_{WF} 수, 수로경사의 영향을 포함하는 경사 후르드수를 조합하고 특성길이를 조고로 취하면 Y_{WF_S} 수가 도출된다.

$$Y_{WF} = W/F = L\sqrt{\rho g/\sigma} = k_W\sqrt{\rho g/\sigma}, Y_{WF_S} = W/F_S = L\sqrt{\rho g S/\sigma} = k_W\sqrt{\rho g S/\sigma} \quad (2)$$

2.3 도달시간 산정식

Singh(1976)은 지표면흐름을 kinematic wave 이론으로 해석하였으며, 유역형상을 평면형상과 수렴형상, 발산형상으로 분류하여 도달시간 산정식을 제시한 바 있다. 도달시간 산정식은 연속방정식으로부터 지표면흐름에서 단위폭당 유량을 고려한 연속방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial h}{\partial x} + h\frac{\partial V}{\partial x} = I(x, t) \quad (3)$$

$$q = Vh = \eta(x)h^m, V = \eta(x)h^{m-1} \quad (4)$$

여기서 h 는 수심, V 는 평균유속, q 는 단위폭당 유출량, $I(x, t)$ 는 유효강도이고, $\eta(x)$ 는 마찰관계항이다.

유와 전(2000)은 도달시간의 연속방정식과 지수형 마찰계수 산정식으로부터 일반형 도달시간 산정식을 이론적으로 유도하였다.

$$t_c = I^{-\frac{1-m}{m}} (L/\eta)^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

여기서 t_c 는 도달시간이며, I 는 강우강도, L 은 유역길이, η 는 마찰관계항, m 은 상수이다. 한편 마찰관계항은 유역경사(S)를 포함하고 있다. 따라서, 일반형 도달시간 산정식은 강우강도(I), 유역길이(L), 유역경사(S)를 포함한다.

식 (5)의 일반형 도달시간 산정식의 마찰관계항(η)과 상수(m)를 구하기 위하여 Chezy 평균유속공식에 개수로마찰계수 지수함수식을 대입하여 일반형 도달시간 산정식을 유도할 수 있다. Chezy의 평균유속 공식은 다음과 같다.

$$V = \sqrt{gHS/C} \quad (6)$$

여기서 H 는 동수반경, S 는 수로경사, C 는 마찰계수이다.

유역의 형상을 직사각형의 2차원 공간으로 가정하였기 때문에 광폭수로에서의 흐름과 같이 동수반경 H 를 수심 h 와 같다고 가정하고, 층류 또는 완난류 흐름의 경우 동수반경 레이놀즈수(R_H)의 함수로 표기하면 식 (7)과 같다.

$$C = \alpha_{g,t} R_H^\beta, \quad R_H = Vh/\nu \quad (7)$$

$$\alpha_g = a_g Y_{WF} = a_g k_W \sqrt{\rho g / \sigma} \simeq a + b k_W, \quad \alpha_t = a_t Y_{WF_s} = a_t k_W \sqrt{\rho g S / \sigma} \simeq c S^d \quad (8)$$

여기서 마찰계수 산정식의 α_g 는 중력흐름인 경우 Y_{WF} 수의 영향을 받을 것으로 추정되며, Varwick의 실험자료로부터 계수 a , b 를 산정하였다. α_t 는 표면장력흐름인 경우 Y_{WF_s} 수에 영향을 받는 함수로 Woo & Brater의 실험자료로부터 계수 c , d 를 산정하였다. 또한 β 는 동수반경 레이놀즈수의 함수이다.

일반형 도달시간 산정식을 유도하기 위하여 식 (6)에 식 (7)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{gHS}{C}} = \sqrt{\frac{ghS}{\alpha_{g,t} (Vh/\nu)^\beta}} = \left(\frac{g\nu^\beta S}{\alpha_{g,t}} \right)^{\frac{1}{2+\beta}} h^{\frac{1-\beta}{2+\beta}} \quad (9)$$

식 (4)로부터 마찰관계항(η)과 상수(m)을 도출하면 다음과 같다.

$$\eta = \left(\frac{g\nu^\beta S}{\alpha_{g,t}} \right)^{\frac{1}{2+\beta}}, \quad m = \frac{3}{2+\beta} \quad (10)$$

식 (8)과 식 (10)을 식 (5)에 대입하여 중력흐름과 표면장력흐름에 대한 일반형 도달시간 이론식을 식 (11)과 같이 유도할 수 있다.

$$t_c = \alpha_{g,t}^{1/3} C_{IS}^L{}^{1/3}, \quad \alpha_g = a + b k_W, \quad \alpha_t = c S^d, \quad C_{IS}^L = \left(\frac{1}{g\nu^\beta} \frac{L^{2+\beta}}{I^{1-\beta} S} \right) \quad (11)$$

식 (11)에서 층류일 경우 $\beta = -1$, 완난류 I 일 경우 $\beta = -0.25$ 를 대입하여 도달시간 이론식을 유도할 수 있다. 이론식을 유도한 결과 중력흐름에서의 도달시간은 $S^{-1/3}$ 에 비례하며, 표면장력흐름에서는 α_g 의 유역경사 영향으로 도달시간은 $S^{-1/6} \sim S^{-1/9}$ 에 비례하는 것으로 나타났다.

3. 자료분석 및 검토

3.1 실험자료의 수집

지표면흐름 및 개수로흐름 특성을 파악하기 위한 실험은 수행에 어려움이 따르며 정확도를 확보하기 위해서는 세심한 주의를 기울여야 하며, 만족스러운 결과를 얻기 어렵다. 본 연구에서는 중력흐름에 대한 영향

을 검토하기 위하여 Warwick의 실험자료를 분석하였으며, 표면장력흐름에 대한 영향을 검토하기 위하여 Woo & Brater의 실험자료를 분석하였다. 분석된 결과로부터 도출된 이론식의 계수를 이용하여 Butler의 실험자료와 비교·검토하였다. Butler는 도달시간과 레이놀즈수의 관계를 연구하였으나, 본 연구에서는 강우 강도, 유역경사, 유역길이와 도달시간의 관계에 중점을 두어 도달시간을 분석하였다.

3.2 자료분석

표 1에는 Warwick의 실험자료와 Woo & Brater의 실험자료를 분석하여 중력흐름에서는 조고의 함수로, 표면장력흐름에서는 유역경사의 함수로 마찰계수 산정식의 계수를 추정하여 제시하였다.

표 1. 마찰계수 산정식의 계수

구 분	수로표면	중력흐름		표면장력흐름		β
		$\alpha_g = a + bk_W$		$\alpha_t = cS^d$		
		a	b	c	d	
층류	메소나이트	2.5	3	8.7	0.15	-1
	모래			35.0	0.35	
완난류 I	메소나이트	0.028	0.05	0.27	0.35	-0.25
	모래			0.75	0.50	

Woo & Brater는 수로표면에 메소나이트를 바르고 기울기를 변화시켜 실험을 실시한 후 $k_W=2$ mm($\phi=1$ mm)의 모래를 아교로 붙여 추가실험을 수행하였으며, 본 연구에서는 메소나이트 표면을 $k_W=0.01$ mm로 가정하였다. Butler의 실험자료에서 수로의 조고는 제시되어 있지 않고 미리 적신 콘크리트 표면에서 실험을 수행되었으며, 본 연구에서는 실험자료와 비교하기 위해서 젖은 콘크리트의 조고를 0.5 mm로 가정하였다. 표 1의 계수 c 와 d 를 메소나이트와 모래의 중간 값을 취하였으며, 층류에서 12.0와 0.2, 난류에서 0.3과 0.4를 적용하였다. 이론적으로 유도된 도달시간 산정식 식 (11)로부터 각 흐름에 대한 도달시간을 산정하였으며, Butler의 실험관측 도달시간자료와 비교하여 표 2에 제시하였다.

표 2. 도달시간에 대한 실험관측자료와 이론식의 비교

번호	흐름 조건	강우강도 I [mm/hr]	유역경사 S [m/m]	유역길이 L [m]	레이놀즈수 R_h	특성값			도달시간(t_c) [min]		
						α_g	α_t	C_{IS}^L	관측치	중력흐름	표면장력흐름
1	층류	14.99	0.005	51.22	180	4.00	4.16	411	10.45	10.88	11.02
2	층류	9.91	0.005	76.83	180	4.00	4.16	620	19.50	16.41	16.63
3	층류	6.60	0.005	152.45	240	4.00	4.16	1,022	24.40	27.04	27.40
4	층류	25.40	0.010	51.22	310	4.00	4.78	230	6.53	6.08	6.45
5	천이영역	44.70	0.005	102.45	1,100	0.03	0.04	1,441	10.20	7.50	7.93
6	난류	200.91	0.005	152.45	7,400	0.03	0.04	971	5.65	5.06	5.35
7	난류	190.25	0.010	152.45	6,950	0.03	0.05	789	4.70	4.11	4.76
8	난류	188.72	0.020	102.45	4,600	0.03	0.06	498	3.20	2.59	3.30
9	난류	188.98	0.020	152.45	6,900	0.03	0.06	628	3.98	3.27	4.16

3.3 결과검토

개수로흐름을 중력흐름과 표면장력흐름으로 구분하고 이론적인 도달시간 산정식으로 실험자료와 비교하였다. 그림 1에 도시된 바와 같이 층류에서는 중력흐름과 표면장력흐름이 큰 차이가 없으며, 난류에서는 표면장력흐름으로 산정된 도달시간이 관측치에 접근하고 있다. 그림 1(b)의 5번 자료의 경우 천이영역에 속하여 흐름특성이 달라진 것으로 판단된다.

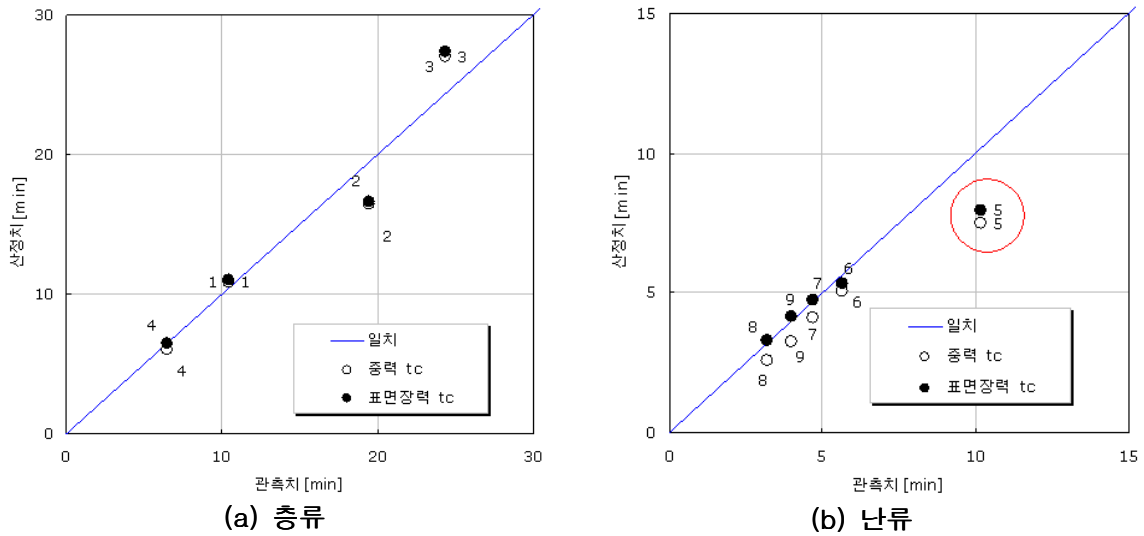


그림 1. 실험관측자료와 이론식에 의해 산정된 도달시간의 비교

산정치의 자료를 비교하면 중력흐름보다 표면장력흐름으로 산정된 도달시간 각각의 상관성이 양호한 것으로 나타났으며, 충분한 실험을 통한 실험자료와의 비교 등 추가적인 연구를 통하여 중력흐름과 표면장력흐름에 대한 규명이 필요하다.

4. 결론

Varwick과 Woo & Brater의 실험자료로부터 도달시간 산정이론식의 계수를 추정하였으며, Butler의 실험관측자료와 도달시간 산정이론식의 결과를 분석하였다. 분석결과 임계수심보다 작은 흐름에서 대부분 표면장력이 우세한 흐름으로 나타났다. 따라서 특수한 조건에서는 중력뿐만 아니라 표면장력의 영향을 받는 흐름에 대한 연구가 필요하다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03-산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

1. 유동훈, 전우용(2000). 불투수층 사면에서의 도달시간, 한국수자원학회 논문집, 제33권, 제2호, pp. 195-205.
2. 유동훈(2003). 최신수리학. 새문출판사.
3. Butler, S. S.(1977). Overland-flow travel time versus Reynolds number, *Journal of Hydrology*, Vol. 32, pp. 175-182.
4. Chow, Van Te.(1986). *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill.
5. Singh, V. P.(1976). Derivation of time of concentration, *Journal of Hydrology*, Vol. 30, pp. 147-165.
6. Varwick, F.(1945). Zur Fliess fromel fur offene Kunstliche. These inedite, Dresden University.
7. Woo, Dah-Cheng and Brater, Ernest F.(1961). Laminar Flow in Rough Rectangular Channels, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, No. 12, pp. 4207-4216.