



# 밀도프루드수에 의한 하수관로 침전물 이송 특성 분석

## Analysis of characteristics of sediment transport in sewers by densimetric Froude number

박규홍<sup>1\*</sup>·이태훈<sup>1</sup>·유순유<sup>2</sup>·강병준<sup>1</sup>·현기림<sup>1</sup>

KyooHong Park<sup>1\*</sup>·Taehoon Lee<sup>1</sup>·Soonyu Yu<sup>2</sup>·Byongjun Kang<sup>1</sup>·Kirim Hyun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>중앙대학교 사회기반시스템공학부, 서울특별시 동작구 흑석로 84, 06974

<sup>2</sup>한국산업기술대학교 지식융합학부, 경기도 시흥시 산기대학로 237, 15073

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Consilience, ADD at Korea Polytechnic University, Sangidaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do 15073, Republic of Korea

pp. 001-008

pp. 009-021

pp. 023-033

pp. 035-043

pp. 045-052

pp. 053-060

pp. 061-073

pp. 075-083

### ABSTRACT

Even though sewers have been conventionally designed to prevent from sediment deposition using a specified minimum velocity or shear stress at a particular depth of flow or with a particular frequency of occurrence, it was appreciated that these methods do not consider the characteristics and concentration of the sediment and the specific hydraulic conditions of the sewer with sediment. In this study, a densimetric Froude number formula was suggested considering particle diameter and volumetric concentration of the sediment as well as flow depth and flowrate, based on several domestic field inspections, which was compared with other formulas proposed by previous investigators. When the sediment concentration was not considered, the calibration coefficient of 0.125-1.5 to the densimetric Froude numbers of this study was needed to obtain the similar ones with previous investigators'. For the densimetric Froude number formula obtained with consideration of sediment concentration, the exponent value of term  $C_v$  was almost the same as that of previous results and that of  $d_{50}/R_h$  was similar for  $F_r < 2.2$ .

**Key words:** Sewers, Sediment transport, Densimetric Froude number, Minimum velocity, Shear stress

**주제어:** 수관로, 침전물 이송, 밀도프루드수, 최소유속, 전단응력

## 1. 서 론

하수관로 내 침전물을 이송할 수 있도록 하수관로를 설계해야 할 필요성은 수십년간 인지되어 왔다. 일

반적으로는 특정 수심이나 발생빈도에서 최소유속값(ASCE 1969; British Standard Institution 1987; CEN 1997; KWWA, 2017) 또는 전단응력값(ASCE 1969; Lindholm 1984; Lysne 1969; Macke 1982; Yao 1974)을

Received 16 May 2019, revised 22 January 2020, accepted 30 January 2020.

\*Corresponding author: KyooHong Park (E-mail : [kpark@cau.ac.kr](mailto:kpark@cau.ac.kr))

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

규정함으로써 하수관을 설계해 왔다. 많은 경우에 이 방법은 별 문제없이 전세계적으로 오랫동안 사용되어 왔다. 하지만, 하수관 내 침전물의 농도와 특성, 하수관의 수리적 특성과는 무관한 최소유속의 단일값을 사용하는 것이 하수침전물 이송을 위한 하수흐름 능력을 합리적으로 나타내지는 못하는 것으로 지적되어 왔으며, 이는 하수관로의 과소설계 또는 과대설계를 유발함으로써 하수관 내에 침전물을 발생시켜 냄새 및 부식 문제를 일으키거나 경제성을 훼손하게 된다 (Banakdari and Ebtehaj, 2014; Banakdari and Larrate 2006; Butler et al., 2003). 이에 많은 연구자들이 여러 실험연구를 통해 허용가능한 최소유속을 예측하는 다른 방법을 제시하거나, 이에 관련된 침전물의 특성 및 수리적 조건을 특징짓는 연구(Banasiak, 2008; May et al., 1996; Ota and Nalluri, 2003; Ota and Perrusquia, 2013; Vongvisessomjai et al., 2010)와 자가세정이 가능한 하수관로의 설계기준에 관한 연구가 수행된 바 있다 (Ackers et al., 1996; Butler et al., 1996a, 1996b).

본 연구에서는 국내에서 실제 설치되어 사용하고 있는 하수관로에서 수위, 유량, 유속 등 수리적 특성을 관측하고 하수침전물의 농도 및 입경 크기를 고려함으로써 밀도프루드수를 산정하였다. 밀도프루드수에 영향을 주는 침전물의 농도, 경심, 침전물의 입자크기 등의 영향요인들의 실제값을 이용한 밀도프루드수 식을 도출하였으며, 외국에서 실험실 실험으로 수행된 선행연구의 밀도프루드수 식과 비교, 분석하였다.

## 2. 자가세정 하수관로의 설계방법

최근 많은 연구자들이 최소유속 또는 최소전단응력의 단일값에 기초한 하수관로 설계법은 변화하는 하수침전물의 특성과 유량조건에 대해 다양한 관경, 조도 및 경사 등 하수관의 자가세정조건을 적절하게 표현할 수 없다는 것을 보여주었다. Ackers et al. (1996)은 효과적인 자가세정관로를 “퇴적량과 침식량 간의 균형을 유지하기에 충분한 침전물 이송능력을 갖는 관로로서, 건설비 및 운영유지비 등 총비용을 최소화 하는 침전물 퇴적깊이의 시간평균값을 유지하는 관로”라고 정의하였다. 자가세정 하수관로의 설계에 영향을 주는 요인은 다음과 같다.

- 침전물의 크기, 밀도 및 농도에 관한 자료

- 부유사 또는 소류사로 움직이는 침전물의 이송속도 예측식
- 퇴적층 세굴에 필요한 전단응력 자료
- 침전물이 퇴적된 관로 내 흐름의 저항을 결정하는 식

하수관로 내 깨끗한 바닥면에서 하수침전물의 초기 유동(incipient motion)을 표현하기 위해 Ambrose (1953), Craven (1953), Novak and Nalluri (1975, 1984)의 연구가 수행되었고, 느슨한 바닥면에서 하수침전물의 초기유동에 대해 Ackers and White (1973), Garde et al. (1985), Shields (1936)의 연구가 수행되었다. 이들이 제안한 식은 모두  $\frac{V_L}{\sqrt{gd(s-1)}} = a\left(\frac{d}{R_h}\right)^b$  또는  $a\left(\frac{d}{y}\right)^b$ 의 형태이었다. 여기서,  $V_L$ 는 자가세정유속,  $g$ 는 중력가속도,  $d$ 는 침전물의 입경이며,  $y$ 는 수심,  $s$ 는 침전물 입자의 비중,  $R_h$ 는 경심,  $a, b$ 는 실험에 의해 결정되는 계수이다. 이는 프루드수의 형태인데, 유동의 관성과 중력의 비로 나타내는 무차원 수로서 이를 이용해 하수의 흐름과 중력에 의한 하수내 침전물의 퇴적현상과 하수의 흐름의 정도를 비교할 수 있게 된다.

다른 한편, 기존 관저의 침전물의 세굴 또는 이송을 위해 Camp (1942)가 제안한 식을 따라, Craven (1953), Durand (1953), Robinson and Graf (1972)는 강성 관저층에서 퇴적물 이송 공식을 유도하였는데, 대체로

$\frac{V_s}{\sqrt{gd(s-1)}} = cC_v^d$ 의 형태이다. 여기서,  $V_s$ 는 세굴유속이고,  $C_v$ 는 침전물 체적농도,  $c$ 와  $d$ 는 계수이다. 그 이후 제안된 Ab Ghani (1993), Azamathulla et al. (2012), Mayerle et al. (1991), Novak and Nalluri (1975), Vongvisessomjai et al. (2010) 등의 식들도 Table 1에 제시된 바와 같이 선행연구자들이 제안했던 밀도 Froude 수에 대한 표현을 따르고 있다. 여기서,  $\lambda_s = 0.851D_{gr}^{0.03}C_v^{0.04}\lambda_C^{0.86}$ 로 표현되는 퇴적물 이송상태의 마찰계수이며,  $\lambda_C$ 는 침전물 이송이 없는 깨끗한 물의 조건에서 마찰계수이다.  $D_{gr}$ 은 무차원 입경으로서,  $\sqrt[3]{g(s-1)/v^2}d_{50}$ 로 표현될 수 있다.

Ebtehaj et al. (2014)은 퇴적임계값에서 기존 유속공식을 검토하여, 세가지 데이터군을 이용하여 Vongvisessomjai et al. (2010)이 제시한 공식을 수정하



**Table 1.** Densimetric Froude number formula on sediment transport in sewers proposed in the previous studies

References	Formula	Remarks
Novak and Nalluri (1975)	$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 1.77 C_v^{1/3} \cdot \left(\frac{R_h}{d_{50}}\right)^{1/3} \lambda_s^{-2/3}$	(1)
Mayerle et al. (1991)	$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 4.32 C_v^{0.23} \cdot \left(\frac{R_h}{d_{50}}\right)^{0.68}$	(2)
Ghani (1993)	$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 3.08 D_{gr}^{-0.09} C_v^{0.21} \cdot \left(\frac{R_h}{d_{50}}\right)^{0.53} \lambda_s^{-0.21}$	(3)
Vongvisessomjai et al. (2010)	$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 4.31 C_v^{0.226} \cdot \left(\frac{d_{50}}{R_h}\right)^{-0.616}$	(4)
Azamathulla et al. (2012)	$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 0.22 D_{gr}^{-0.27} C_v^{0.16} \cdot \left(\frac{R_h}{d_{50}}\right)^{-0.29} \lambda_s^{-0.51}$	(5)

였다. Bonakdari and Ebtehaj (2014)는 smooth함수를 이용하여 우수관로내 퇴적임계값을 갖는 입자의 밀도 Froude수를 계산하는 공식을 제안하였고, 이를 기존의 공식과 비교하였다. 또한 인공지능망 기법, 진화알고리즘, 뉴로퍼지 적응 추론 시스템(ANFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy System), 지원벡터기계(SVM: Support Vector Machine)과 반딧불이 알고리즘(FFA: Firefly Algorithm)을 결합한 방법을 이용해 밀도 Froude수를 추정하는 방식이 제안되었다 (Ebtehaj and Bonakdari, 2013; Ebtehaj and Bonakdari, 2014a; Ebtehaj and Bonakdari, 2014b; Ebtehaj et al., 2016). Najafzadeh and Bonakdari (2016)는 Azamathulla et al. (2012)의 식이 다른 공식보다 오차가 적고, Vongvisessomjai et al. (2010)의 식은 Novak and Nalluri (1975), Mayerle et al. (1991)의 식보다 상대적으로 우수하다고 하였다. 또한 Mayerle et al. (1991)의 식은 원형관의 퇴적임계값에서 밀도 Froude수를 정확히 예측하지 못하고 있다고 하였다. Ebtehaj et al. (2016)은 밀도 Froude수를 산정하기 위하여 6개 함수관계를 firefly algorithm을 결합한 support vector machine 을 이용하여 시험한 결과,  $\frac{V_L}{\sqrt{gd_{50}}} = \Phi_1(D_{gr}, C_v, \frac{d_{50}}{R_h}, \frac{R_h}{D}, \lambda_s)$ 의 형태가 가장 우수한 모델이라고 보고하였다. 본 연구에서는 국내에 설치된 하수관로에서 관측된 데이터를 이용하여 하수침전물 입자의 밀도프루드 수 접근방식으로 주요 영향요인을  $C_v$ 와  $\frac{d_{50}}{R_h}$ 으로 보고 식을 제안해보고자 하며, 이를 외국에서 제안된 식(Mayerle et al., 1991; Vongvisessomjai et al., 2010)과 비교해보고자 한다.

### 3. 현장 실험

본 연구 대상지역인 S시는 전체적으로는 합류식 지역이지만, S시 안의 B지역은 부분적으로 분류식 지역으로 계획, 건설되었다. B지역의 우수관에 수집되는 수세분뇨를 포함한 하수는 하류부의 차집관로로 합류해 공공하수처리시설로 유입된다. B지역 우수관로의 GIS 자료를 확인하였으나, GIS 데이터와 실제 현장의 맨홀위치 및 관로 연장이 상이하여 직접 측량을 실시하여 지반고, 관저고를 관측하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.

최상류부의 4142-0 관로는 4142-0-1 맨홀과 4142-100-1 맨홀 사이에 위치한다. 이 관로의 연장은 46.9 m이며 관로시점부의 관저고와 관로 종점부의 관저고의 고차차는 0.283 m로 관경사는 0.00603이다. 이것에 연결된 4142-100 관로는 4142-100-1 맨홀과 4142-200-1 맨홀 사이에 있으며, 관로 연장은 35.7 m이며 관로시점부의 관저고와 관로 종점부의 관저고의 고차차는 0.211 m로 관경사는 0.00591이다. 이 관로는 CCTV 촬영결과 관로 중간에 타르 혹은 건설폐기물로 추정되는 장애물이 관찰되었으며, 위어와 같은 역할을 하여 관로의 수위 및 유속에 약간의 영향을 미칠 수 있는 상황이었으나, 본 연구 결과의 분석시 그 영향을 무시하였다. 그 하류에 연결된 4142-200관로는 4142-200-1 맨홀과 4142-300-1 맨홀 사이에 있으며, 관로의 연장은 34.2 m이며 관로시점부의 관저고와 관로 종점부의 관저고의 고차차는 0.109 m로 관경사는 0.00319이다.

하수관로 내에 CCTV와 유량계, 수위계를 Fig. 1과 같이 설치하였다. CCTV 촬영영상을 통해 하수침전물의 퇴적과정 및 세굴과정을 관찰하였으며, 미리 준비한

pp. 001-008

pp. 009-021

pp. 023-033

pp. 035-043

pp. 045-052

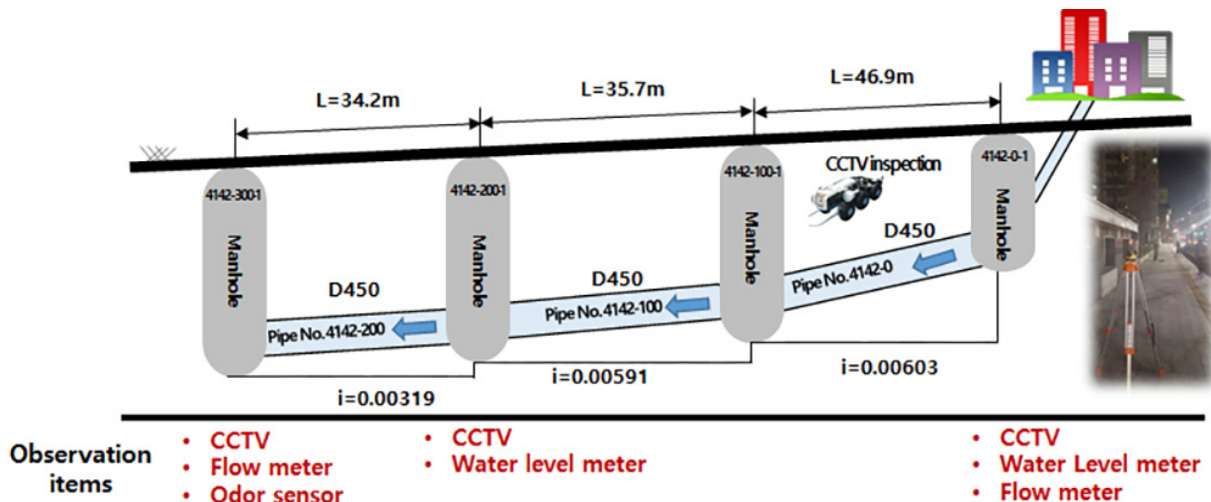
pp. 053-060

pp. 061-073

pp. 075-083

**Table 2.** Information on location of sewers and manholes used in this field study

Line number	From Manhole	To Manhole	Invert elevation		Ground surface elevation		Length of sewer (m)	Difference of elevation (m)	Slope (%)
			Upper end (m)	Lower end (m)	Upper end (m)	Lower end (m)			
4142-0	4142-0-1	4142-100-1	2.808	3.091	1.505	1.512	46.9	0.283	6.03
4142-100	4142-100-1	4142-200-1	3.091	3.302	1.512	1.720	35.7	0.211	5.91
4142-200	4142-200-1	4142-300-1	3.302	3.411	1.72	1.650	34.2	0.109	3.19



**Fig. 1.** Profile of sewers and manholes used in this field study.

모래를 맨홀을 통해 투입하여 하수흐름에 의한 이송 순간의 유속, 수위, 유량 조건을 확인하였다. 모래를 잔골재 체가름 시험방법(KS2502)에 의해 15 mm, 10 mm, 5 mm, 2.5 mm체를 이용하여 5 mm 체와 2.5 mm 체에 남은 비교적 균질한 크기의 것을 사용하였으며 두 가지 입자의 중간크기의 입자( $d_{50}$ )은 각각 6.4 mm, 3.6 mm로 산정하였다.

초음파 담지식 유량계와 플룸식 유량계를 이용하였다. 유량측정시험은 총 2회의 기간에 걸쳐 이루어졌다. 1차 시험은 2017년 3월 9일 22시에 설치하여 동년 3월 16일 14시까지 160시간동안 유속, 유량, 수위 관측을 실시하였으며, 2차 시험은 2017년 4월 27일 22시부터 동년 5월 8일 11시까지 253시간동안 실시하였다. 특히, 시험기간 중 30분 간격으로 24시간동안 맨홀 하류부 2개 지점(4142-0-1 맨홀과 4142-200-1 맨홀)에서 유속, 수위를 관측값을 구하였고, 각 지점에서 수집한 침전물을 실험실에 가져가서 총고형물농도( $C_v$ ) 분석을 수행하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 침전물의 체적농도의 변화에 따른 밀도프루드수의 변화

본 절에서는 현장에서 측정된 침전물 체적농도와 다양한 연구자들이 제안한 모델을 이용한 추정값을 비교하고자 하였다. Table 1에 제시하였던 선행연구자의 공식들에 본연구의 현장조건(침전물 체적농도 제외)을 입력하여 얻은 밀도프루드수( $F_r$ ) 계산값과 본 현장의 유량, 유속, 경심 등을 이용해 산정한 밀도프루드수를 비교하기 위해 Fig. 2와 Fig. 3에 두 맨홀에서 관측한 결과를 나타내었다(현장시험에서 얻은 유량, 유속 수위, 총 고형물량 등의 관측결과는 Park et al. (2017)). 선행연구자들의 공식을 이용한 결과와 변화추이가 유사하나, 값의 차이가 뚜렷하여 본연구의 결과에 보정계수를 고려하였다. 4142-0-1 맨홀에서 측정된 데이터를 이용해 얻은 밀도프루드수에 0.5의 보정계수를 반영한 결과 선행연구자들의 결과와 유사하게



나타났으며 이에 4142-0관로에서 식 (6)과 같은 밀도 프루드수 공식을 사용하여 다른 선행연구자들의 결과와 비교하여 나타내었다.

$$F_r = 0.5 \frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} \quad (6)$$

4142-200-1 맨홀에서 측정된 관측값의 경우 밀도프루드수에 0.125의 보정계수를 반영한 결과 선행연구자들의 결과와 유사하게 나타났으며, 유량이 0으로 기록된 시간대를 제외하고는 대부분 0.125~1.5의 밀도프루드수 범위 내에 분포하는 것으로 나타났다.

Fig. 2와 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 침전물 체적농도의 변화에 따른 밀도프루드수 예측값의 차이가 나타나는데, 대체로 Azamathulla et al. (2012)의 밀도 Froude수가 가장 작게 나타났으며(그림에 표시하지 않음), 그 다음으로 Novak and Nalluri (1975), Mayerle et al. (1991),

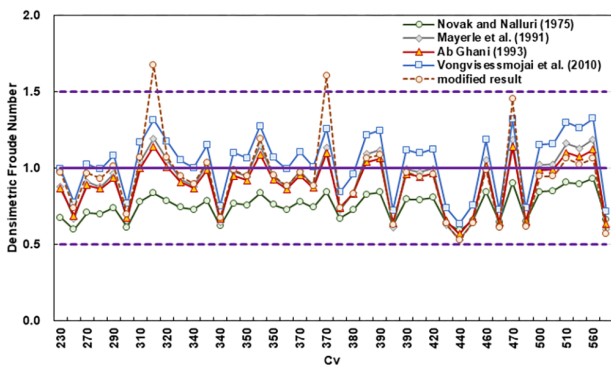


Fig. 2. Comparison between densimetric Froude numbers predicted by the previous existing models and observed at manhole 4142-0-1 in this study.

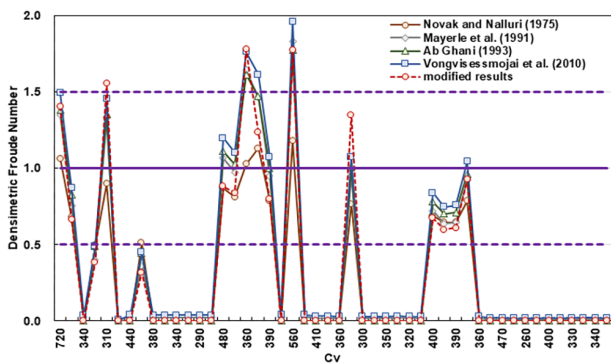


Fig. 3. Comparison between densimetric Froude numbers predicted by the previous existing models and observed at manhole 4142-220-1 in this study.

Ab Ghani (1993), Vongvisessomjai et al. (2010) 의 순으로 나타났다. 본 연구의 결과는 몇몇 데이터값을 제외하고는 대체로 Mayerle et al. (1991), Ghani (1993) 모델 예측값에 가까운 값들로 나타나는 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 현장실험 결과값을 이용한 밀도 Froude수 공식 도출

Table 1에 나타낸 선행 연구에서 도출한 밀도 Froude수 모델에서 공통적으로 사용하고 있는 매개변수는 밀도부피농도( $C_v$ ), 경심( $R_h$ ), 퇴적물의 중간입자크기( $d_{50}$ )이며, 이 매개변수를 이용한 일반식은 다음의 형태로 나타난다.

$$F_r = \frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = aC_v^b \left( \frac{d_{50}}{R_h} \right)^c \quad (7)$$

본 연구에서 현장실험으로 구해진 데이터를 식 (7)로 fitting한 결과는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며 이를 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다.

$$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 7.587 C_v^{0.231} \left( \frac{d_{50}}{R_h} \right)^{-1.86} \quad (8)$$

Fitting의 유효성을 검토하기 위하여 식 (8)의 좌변과 우변 값을 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 타당한 모델일수록 Fig. 5에 점선으로 나타낸 45도 직선에 실험

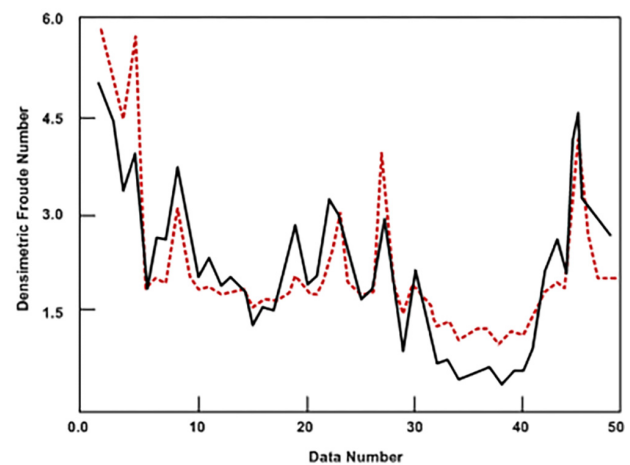


Fig. 4. Comparison of densimetric Froude numbers drawn as dotted line.

$$\left( \frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} \right) \text{ and solid line } \left( aC_v^b \left( \frac{d_{50}}{R_h} \right)^c \right)$$

pp. 001-008

pp. 009-021

pp. 023-033

pp. 035-043

pp. 045-052

pp. 053-060

pp. 061-073

pp. 075-083

값으로 산정된 점들이 나타나야 한다. Fig. 5에서 보면  $x$ 축에 나타낸  $F_{LHS}$ 이 약 2.2를 기준으로 매우 상이한 패턴을 보임을 알 수 있고 이는 이 값을 기준으로 서로 다른 모델을 적용해야하는 타당성을 나타낸다. 일반적으로 프루드수는 상류와 사류, 한계류를 구분하는데 사용되는 무차원수로, 하수 흐름과 하수침전물의 퇴적현상에 이와 유사한 경계값이 나타난 것으로 보인다. 이에 관하여는 추가적인 실험과 연구가 필요한 것으로 판단된다.

밀도 Froude수가 2.2 이하인 값에 대해 앞서와 동일한 fitting을 한 결과는 다음 식 (9)와 같고 Fig. 6에는 식의 좌변과 우변의 그래프를 도식하였다.

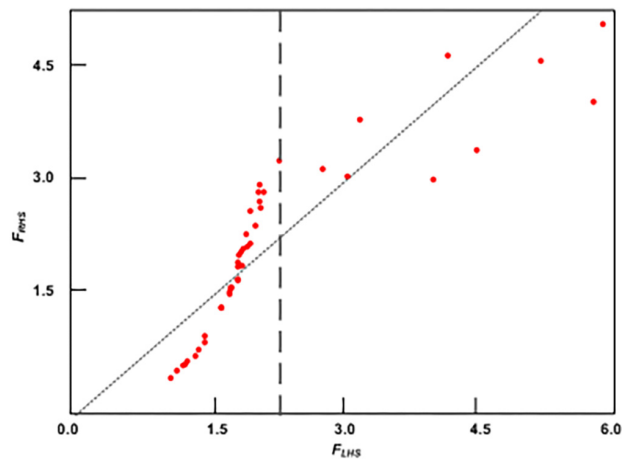


Fig. 5. Comparison of densimetric Froude numbers computed using the LHS and RHS terms of the equation derived in this study.

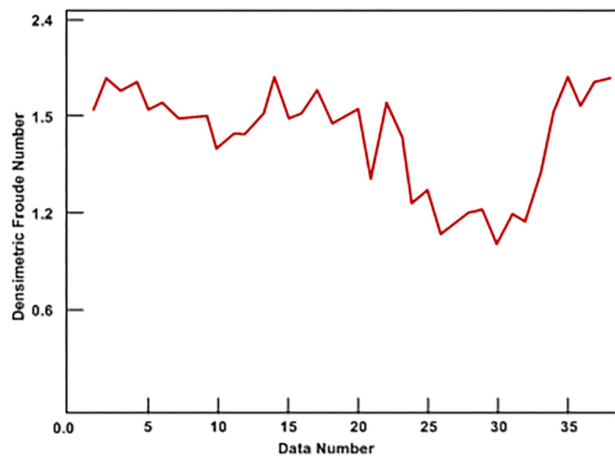


Fig. 6. Densimetric Froude numbers plotted using only data of  $F_r < 2.2$ .

$$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 4.56 C_v^{0.00118} \left( \frac{d_{50}}{R_h} \right)^{-0.608} \quad (9)$$

점선은  $\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}}$  이고 실선은  $a C_{V_L}^b \left( \frac{d_{50}}{R_h} \right)^c$ .

두 결과가 구분되지 않을 정도로 동일한 값을 준다. 이 결과는 parameter  $b$ 의 값이 극단적으로 작아 하수 침전물 농도가 거의 영향을 주지 않고 오로지 경심과 침전물 입경에만 영향을 받는다는 것인데, 주어진 데

이터에 의하면 식  $\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}}$ 의 변수는 오로지

$V_L$ 이므로 Fig. 5의 결과는 수위와 유속이 매우 강한 상관관계가 있음을 나타내는데 이는 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

한편 Froude 수가 2.2 이상에 대해 fitting한 결과를 식 (10)에 나타내었다. 하지만 이 경우는 관측값이 10개에 불과해 fitting의 타당성이 크지 않으므로 추가적인 실험을 통해 보완할 필요가 있다. 이 식의 좌변과 우변의 그래프를 도식하여 Fig. 8에 나타내었다.

$$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 0.178 C_v^{0.324} \left( \frac{d_{50}}{R_h} \right)^{-2.034} \quad (10)$$

이 결과는  $F_r > 2.2$  에서  $a C_{V_L}^b \left( \frac{d_{50}}{R_h} \right)^c$ 의 형태와는

다른 모델을 사용해야 함을 시사한다. Fig. 5의  $F_r > 2.2$  인 경우에 밀도 Froude수 식의 좌우변 값이 45° 선 주변에 폭넓게 분포하지만 그 경향성이 존재하는 것으로 보여 추가적인 조사연구가 필요하다.

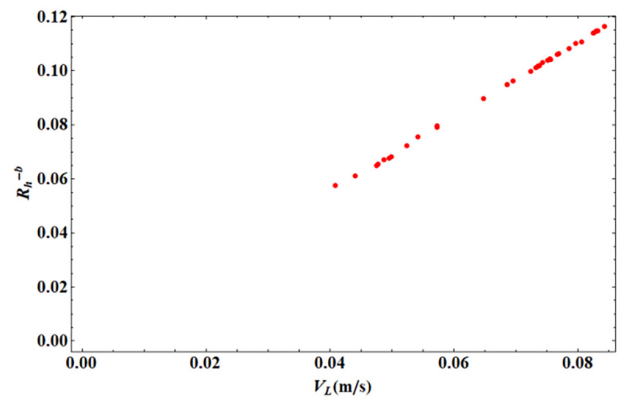
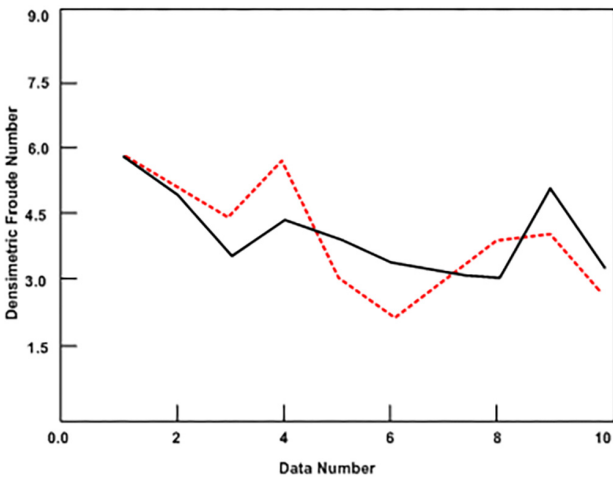


Fig. 7. Correlation between velocity and hydraulic radius using data of  $F_r < 2.2$ . (meaning  $V_L \propto R_h^{0.607}$ )



**Table 3.** Comparison of  $F_r$  formula of the previous results with that proposed in this study

References	Formula	Remarks
Mayerle et al. (1991)	$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 4.32 C_v^{0.23} \cdot \left(\frac{R_h}{d_{50}}\right)^{0.68}$	(2)
Vongvisessomjai et al. (2010)	$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 4.31 C_v^{0.226} \cdot \left(\frac{d_{50}}{R_h}\right)^{-0.616}$	(4)
This study	$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 7.59 C_v^{0.231} \left(\frac{d_{50}}{R_h}\right)^{-1.86}$	(8)
	$\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 4.56 C_v^{0.00118} \left(\frac{d_{50}}{R_h}\right)^{-0.608} \quad \text{for } F_r < 2.2$	(9)



**Fig. 8.** Comparison of densimetric Froude numbers using data of  $F_r > 2.2$ .

[dotted line  $\left(\frac{V_L}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}}\right)$  and solid line  $\left(a C_v^b \left(\frac{d_{50}}{R_h}\right)^c\right)$ ]

본 연구의 결과로 제시한 식과 Mayerle et al. (1991)와 Vongvisessomjai et al. (2010)의 식을 비교하여 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서 제안한 우변의  $C_v$  항의 지수는 거의 같은 값이며, Mayerle et al. (1991)와 Vongvisessomjai et al. (2010)의 식에서  $d_{50}/R_h$  항의 지수값이 유사한 것과 달리 본 연구의 지수 절대값이 더 큰 것을 알 수 있었다.  $F_r < 2.2$ 의 경우에 제시된 식의  $d_{50}/R_h$  항 지수값은 오히려 선행 연구의 값들과 비슷한 값을 나타내었으며,  $C_v$  항의 지수값은 훨씬 작은 값이었음에 주목할 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 국내의 하수관로에서의 유량, 유속, 수위, 침전물의 입경과 체적농도를 이용해 밀도프루드수 식을 유도하였으며, 기존의 연구에서 도출된 하수관로의 밀도프루드수와 비교하였다. 침전물의 농도를 고려하지 않고 유속, 침전물의 입경과 비중만을 고려해 기존 연구에서 제안된 밀도프루드식과 비교해 보니 관로의 흐름특성에 따라 0.125~1.5의 보정계수가 필요함을 알 수 있었다. 또한 침전물의 농도  $C_v$ 와  $d_{50}/R_h$ 를 고려한 밀도프루드식을 제시하였으며, 이를 선행 연구에서 제시된 식과 비교한 결과,  $C_v$  항의 지수는 거의 같은 값이었고,  $d_{50}/R_h$  항의 지수값은  $F_r < 2.2$ 의 경우에 제시된 식의 값과 비슷한 값을 보였다.

### 약어 설명

- $a, b, c, d$  : 실험에 의해 결정되는 계수
- $R_h$  : 경심
- $C_v$  : 침전물 체적농도
- $s$  : 침전물 입자의 비중
- $d$  : 침전물의 입경
- $V_L$  : 자가세정유속
- $d_{50}$  : 침전물 입도분포곡선의 50% 해당 입경
- $V_s$  : 세굴유속
- $D_{gr}$  : 무차원 입경
- $y$  : 수심
- $F_r$  : 밀도프루드수
- $\lambda_C$  : 침전물이송이 없는 조건의 마찰계수

pp. 001-008

pp. 009-021

pp. 023-033

pp. 035-043

pp. 045-052

pp. 053-060

pp. 061-073

pp. 075-083

- $g$  : 중력가속도  
 $\lambda_s$  : 퇴적물 이송상태의 마찰계수

## 사 사

이 논문은 2018년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (과제번호 : NRF-2017M3C1B6069981).

## References

- Ackers, P. and White, W.R. (1973). Sediment transport: new approach and analysis, *J. Hydra. Div.*, 99(hy11).
- Ackers, J.C., Butler D., John, S., and May, R.W.P. (1996). "Self-cleansing sewer design: the CIRIA Procedure", *Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Urban Storm Drainage*, Hannover, September, 875-880.
- ASCE and WPCF. (1970). Design and construction of sanitary and storm sewers, *Am. Soc. Civ. Eng. Water Pollut. Control. Fed.*, 37.
- Azamathulla, H.M., Ghani, A.A., and Fei, S.Y. (2012). ANFIS-based approach for predicting sediment transport in clean sewer, *App. Soft Comput.*, 12(3), 1227-1230.
- Banasiak, R. (2008). Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments, *Water Sci. Technol.*, 57(11), 1743-1748.
- Bonakdari, H., and Ebtehaj, I. (2014). "Verification of equation for nondeposition sediment transport in flood water canals", *7th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics*, RIVER FLOW 2014, Taylor & Francis Group, London, 1527-1533.
- Boankdari, H. and Larrate, F. (2006). "Experimental and numerical investigation on self-cleansing and shear in sewers", *2<sup>nd</sup> Int. IWA Conf., Sewer Operation and Maintenance*, SOM 06, SIG Eigen, Wien, 19-26.
- British Standard Institution. (1987). Sewerage guide to new sewerage construction, BS 8005-1, London.
- Butler, D., May, R.W.P., and Ackers, J.C. (1996a). "Sediment transport in sewers - Part 1: Background", *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Water, Maritime and Energy*, 118, June, 103-112.
- Butler, D., May, R.W.P., and Ackers, J.C. (1996b). "Sediment transport in sewers - Part 2: Design", *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Water, Maritime and Energy*, 118, June, 113-120.
- Butler, D., May, R.W.P. and Ackers, J.C. (2003). Self-cleansing sewer design based on sediment transport principles, *J. Hydraul. Eng.*, 129(4), 276-282.
- Camp, T.R. (1942). Minimum velocities for sewers final report committee to study limiting velocities of flow in sewers, *J. Boston Soc. Civ. Eng.*, 29, 286.
- CEN(European Committee for Standardization). (1997). "Drain and sewer system outside building", *Part 4: Hydraulic design and environmental considerations*, EN 752-4, Brussels, Belgium.
- CIRIA. (1986). Sediment movement in combined sewerage and storm-water drainage systems, Phase 1. Project Report.
- Craven, J.P. (1953). The transportation of sand in pipes; free-surface flow. *Hydraulics conference proceedings*, Iowa, State University of Iowa Studies in Engineering, bulletin 34, 67-76.
- Durand, R. (1953). "Basic relationships of the transportation of solids in pipes experimental research", *In Proc. 5th Congress*, IAHR, 89-103.
- Ebtehaj, I. and Bonakdari, H. (2013). Evaluation of sediment transport in sewer using artificial neural network, *Eng. App. Comput. Fluid Mech.*, 7(3), 382-392.
- Ebtehaj, I. and Bonakdari, H. (2014a). Comparison of genetic algorithm and imperialist competitive algorithms in predicting bed load transport in clean pipe, *Watet Sci. Technol.*, 70(10), 1695-1701.
- Ebtehaj, I. and Bonakdari, H. (2014b). Performance evaluation of adaptive neural fuzzy inference system for sediment transport in sewers, *Water Res. Manage.*, 28(13), 4765-4779.
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., and Sharifi, A. (2014). Design criteria for sediment transport in sewers based on self-cleansing concept, *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, 15(11), 914-924.
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Shamshirband, S., Ismail, Z., and Hashim, R. (2016). New approach to estimate velocity at limit of deposition in storm sewers using vector machine coupled with firefly algorithm, *J. Pipe. Sys. Eng. Prac.*, 8(2), 04016018-1-04016018-12.
- Ghani, A.A. (1993). Sediment transport in sewers, Ph.D. thesis, Univ. of Newcastle Upon Tyne, Newcastle, U.K.
- Lindholm, O.G. (1984). "Pollutant loads from combined sewer systems", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international conference on urban storm drainage*, Gothenburg, Sweden, June, 4(1602).
- Lysne, D.K. (1969). Hydraulic design of self-cleaning sewage tunnels, *J. San. Eng. Div.*, 95 (SA1), 17-36.
- Macke, E. (1982). "About sedimentation at low concentrations in partly filled pipes", *Mitteilungen, Leichtweiss Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig*, Braunschweig, Deutsche.