

점착성 및 비점착성 고형물이 퇴적된 관로 내 하수흐름의 특성 조사

이태훈¹, 강병준², 박규홍^{3*}

¹단국대학교 토목환경공학과 연구전담조교수, ²㈜엔솔파트너스 연구원, ³중앙대학교 사회기반시스템공학부 교수

Characteristics of Sewage Flow in Sewer Pipes Deposited with Cohesive and Non-cohesive Solids

Taehoon Lee¹, Byongjun Kang², Kyoohong Park^{3*}

¹Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

²Researcher, Environment Solution Partners Inc.

³Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering at Chung-Ang University

요약 본 연구에서는 실제 하수관로 내 흐름상태를 파악하기 위하여, 건기동안 처리구역 최상부에 위치한 관로의 수위, 유속, 유량의 값을 실제 측정하여 추정된 하수의 전단응력을 조사하였다. 수세분뇨 및 토사를 모사하기 위해 점착성 및 비점착성 고형물(두부와 모래)을 따로 또 함께 투입한 후 흐름의 상태를 촬영하였는데, 본 실험대상관로에서는 큰 방해없이 침전물이 하수와 함께 씻겨 내려가는 것을 관찰하였다. 경사가 0.00319인 관로에서 주중 하수의 최소전단응력을 초과하는 빈도는 0이었고 0.00603의 기울기의 경우 10회였다. 현장조사기간 중 최소전단력을 초과하는 이벤트는 1회 발생하여 하수도에서 악취가 증가될 가능성을 시사하였다. 경사가 가파른 관로의 최대전단응력은 2.9~3.1N/m²이었지만, 완만한 경사에서는 1.6~1.7N/m²으로 감소하였다. 강우시 합류식 관로로 유입될 수 있는 비응집성 입자를 포함한 하수는 최소전단응력 기준 이하로 유지되는 시간 간격이 주중에 비해 주말동안 증가하였다. 설계기준에 따라 설계된 본 실험대상 관로에서는 수세분뇨가 직투입되어도 관로내 침전물이 오래 퇴적상태로 머물지 않고 하수와 함께 흘러갈 수 있음을 확인할 수 있었다.

주제어 : 하수관로, 최소유속, 전단응력, 침전물, 악취

Abstract In order to find out the condition of flow in sewer pipes, this study investigated the characteristics of tractive force of sewage flow estimated using actual measured values of water level, velocity, and flowrate in sewers located at uppermost portion in a treatment area during dry weather periods. When the scene of sewage flow was taken by CCTV after cohesive and non-cohesive solids (tofu and sand) were put on the sewer invert, it was found that the solids could be flushed without significant interruption. In sewer with slope of 0.00319, the frequency exceeding the minimum tractive force of sewage during a weekday was zero, while it was 10 per day with slope of 0.00603. During the week of the field observation, the event to exceed the minimum tractive force occurred once, suggesting that sewer odor would potentially increase. Maximum tractive force in sewer with steep slope was 2.9-3.1 N/m², but with gentle slope it decreased to 1.6-1.7N/m². It was also observed that the interval of time maintained below the criterion of minimum tractive force increased, during weekends compared to weekdays and for the sewage including non-cohesive particles which could enter combined sewers during a storm period. This study found that the sewer sediments formed by direct feces input into sewers, through sewer pipes which were designed meeting the standard sewer design criteria, could be flushed without staying as deposited solids state for a long time.

Key Words : Sewers, Minimum velocity, Tractive force, Sediments, Odor

*This research was initiated with the support of Korea Water and Wastewater Association. This research was also supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Ministry of Science and ICT for convergent research in Development program for convergence R&D over Science and Technology Liberal Arts (NRF-2017M3C1B6069981).

*This paper is extended and excerpted from the doctoral dissertation at Taehoon Lee in Chung-Ang University.

*Corresponding Author : Kyoohong Park (kpark@cau.ac.kr)

Received May 30, 2020

Revised July 2, 2020

Accepted July 20, 2020

Published July 28, 2020

1. 서론

하수도법 제35조 및 시행령 제24조에서는 강우시 월류수(CSOs)에 의한 방류수역의 오염방지를 위하여 하수관로정비구역으로 공고한 지역 외 합류식하수관로 지역에서는 수세식 변기 설치시 정화조를 설치하도록 규정하고 있다. 합류식 하수관로 지역은 청천시 저유량의 하수가 유입되어 원활히 배제되지 않고 관로 내부에 퇴적되는 경우가 발생하며, 우천시의 경우 정화조의 상정수를 양수함에 따라 발생하는 악취 및 메탄가스 발생이 사회적 문제로 대두되고 있다.

합류식지역의 하수처리구역 내에 정화조를 두는 관례는 선진국에서는 전혀 사례를 보기 어려운 것으로, 우리나라만의 특이한 하수도 발전사에 기인하는 것이다. 한국전쟁 후에 급격한 인구증가, 산업화, 도시화의 과정 속에서 빗물배제(최대유량 기준)라는 시급한 하수도의 기능에 치중하면서 공공부문의 하수관로정비가 이루어졌다. 또한, 개인이 발생시키는 오수는 공공하수관로로 배제하도록 하되, 수세분뇨는 기존의 방식대로 정화조로 간이처리를 하도록 함으로써 공공부문의 하수 집수와 처리에 대한 책임이 개인에게 분담되는 형태로 발전하게 되었다. 이는 공공부문에서의 재정적인 부담을 줄이는데 큰 역할을 했으며, 민간부문의 어느 정도의 희생이 수반된 것으로 보아야 할 것이다.

최근 하수도 악취 민원의 주요 원인은 정화조라고 보고된 바 있으며, 2015년에 환경부와 서울시는 도심지역(종로구, 은평구, 영등포구) 하수도 악취 개선 시범사업을 시행하기도 하였다[1]. 한편, 악취저감대책으로 정화조에 공기 주입 또는 황산화 박테리아 주입 등의 악취저감기술을 적용하는 사업이 추진되었다[1]. 서울시의 2030 하수도정비 기본계획에 의하면, 중점 추진계획의 일환으로 수세변소수 직유입을 목표로 하고 있다[2]. 서울시는 군자 2구역 소블럭 정비 시범사업과 수색배수분구의 시범사업을 통해 수세분뇨의 관로 직투입을 위한 기본계획을 수립하였다[2]. 한국상하수도협회에서는 합류식지역의 정화조를 폐쇄하고 수세분뇨를 관로에 직투입하는 방안에 대한 연구를 수행하였다[3].

수세분뇨의 관로 직투입은 하수관로 내에 퇴적물 발생 가능성을 증가시킨다. 이는 퇴적물에 의한 악취가 발생할 우려를 가지고 있다. 오래된 도시의 경우 하수

관로 시스템의 관로경사가 완만하여 최소유속 기준이나 최소전단응력을 만족하지 못하는 하수관로가 존재하기 때문이다. 따라서 하수관로 내의 하수량 및 유량의 깊이의 변화에 따른 하수흐름을 조사함으로써 부적절한 관경사 등에 대한 문제를 진단하고 이에 대한 해결책을 제시할 필요가 지속적으로 제기되고 있는 상황이다.

본 논문에서는 하수처리구역 상류부에 위치한 간헐적인 저유량이 흐르는 하수관로에서 하수침전물의 발생에 영향을 줄 수 있는 수심, 유속, 유량을 실측하여 하수흐름의 전단응력 크기의 변화를 조사하였다. 수세분뇨 및 토사가 관로 내에 존재할 경우를 모사하기 위해 두부와 모래를 관로에 투입하여 하수의 흐름상태를 촬영하여 관찰하였다. 또한, 주중과 주말, 관경사, 유량과 수심의 차이에 따른 하수흐름의 전단응력 산정하여 비교, 분석하였다.

2. 하수흐름의 전단응력 및 침전물 이송 특성

하수관로를 설계할 때 때로 최소유속기준 대신에 전단응력 기준값을 사용하기도 한다. 하수에 포함되어있는 퇴적물의 이동에는 기존 하수관로 설계시 일반적으로 적용되는 하수의 유속 기준보다 전단응력이 더 가까운 상관성을 가지기 때문이다. 하수관로 내 하수흐름의 전단응력 τ (관로의 윤변에 작용하는 전단응력의 평균값)는 식 (1)과 같이 산정된다[4].

$$\tau = \rho g R i \quad (1)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도를 의미하며, g 는 중력가속도 값이다. R 은 수면적을 윤변으로 나눈 경심을 의미하며, i 는 관로의 경사를 의미한다. Table 1에는 기존에 보고된 하수관 설계시의 최소전단응력 기준을 제시하였다.

한편, 하수침전물 입자의 이송능력에 관한 실험으로 Rath와 McCauley(1962)는 8인치(205mm)관에서 0.15~7.9mm, 비중이 약 2.7인 입자의 이송능력을 평가하였다[5]. 경사도는 0.0015~0.0050, 관경에 대한 수심의 비인 y/D 를 0.1~0.57의 범위에서 실험을 실시하였다. 각 조건에 대한 전단응력을 식 (1)을 사용하여 계산한 결과, 식 (2)를 제시하였다.

$$\tau = 0.867 d^{0.277} \quad (2)$$

여기서, d 는 하수침전물 입자의 직경(mm)을 나타낸다.

3. 연구 방법

본 연구 대상지역인 S시는 합류식 지역이지만, Q시의 MDT- I 지역은 부분적으로 분류식 지역으로 계획, 건설되었다. MDT- I 지역의 오수관에는 수세분뇨를 포함한 생활오수가 유입되어 흐르다가 하류부에서는 차집관로로 합류해 공공하수처리시설에 유입되어 처리된다. MDT- I 지역에서의 실험을 위하여 GIS데이터를 확보하여 실제 현장의 데이터와 비교하였으나 일부 상이한 현황을 나타내어 재측량을 실시하였고 이렇게 측량된 관저고와 지반고를 실험에 사용하였다. 현장의 재측량 현황은 Table 2와 같다.

Fig. 1과 같이 현장에 CCTV, 유량계, 수위계를 설치하였다. CCTV를 이용해 촬영한 영상을 분석하여 하수에 포함된 고형물의 퇴적 및 세굴과정을 모니터링하였다. 점착성 입자 및 비점착성 고형물이 퇴적되어 있는 경우의 흐름을 관찰하기 위해, 각각 두부와 모래를 맨홀에서 투입하여 하수의 흐름에 따라 전단응력의 변화가 어떻게 발생하는지 관찰하였다. 두부를 투입할 때는 손으로 으깨면서 투입하여 비정형의 형태 및 크기로 사용되었다. 또한, 실험에 사용한 모래는 잔골재 체가름 시험방법에 근거하여 시험을 수행하였다. 체가름 시험에 사용한 체의 종류는 2.5mm, 5mm, 10mm, 15mm를 이용하였으며 2.5mm 체와 5mm 체에 남은 모래를 사용하였다. 이렇게 체가름된 모래의 중간크기 입자(d_{50})는 각각 3.6mm, 6.4mm로 측정되었다. 준비된 모래는 하수의 흐름에 의한 이송 순간의 유량, 수위, 유속 조건을 확인하기 위하여 맨홀에 투입하였다.

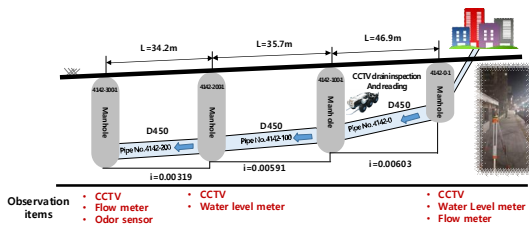


Fig. 1. Conceptual sketch and information of sewers and manholes used in this study

Table 1. Minimum tractive force criteria in designing sewers proposed in literatures[6]

Source	Country	Sewer type	Minimum shear stress (N/m ²)	Pipe flow conditions
Lysne (1969)[7]	USA		2.0~4.0	
ASCE and WPCF (1970)[8]	USA		1.3~12.6	
Yao (1974)[9]	USA	Storm	3.0~4.0	
		Sanitary	1.0~2.0	
Maguire rule (CIRIA 1986)[10]	UK		6.2	Full/half full
Lindholm (1984)[11]	Norway	Combined	3.0~4.0	
		Separate	2.0	
Scandia consult (1974)[12]	Sweden	All	1.0~1.5	1.5 if sand is present
Macke (1982)[13]	Germany	Sanitary	Depends on transport capacity and concentration	0.1 to full typical combined sewers under long term conditions
		Storm		
		Combined		
Brombach et al. (1992)[14]	Germany	Combined	1.6 to transport 90% of all sediments	

Table 2. Information of sewers and manholes in this study

Line number	4142-0	4142-1 00	4142-2 00	
From Manhole	4142-0 -1	4142-1 00-1	4142-2 00-1	
To Manhole	4142-1 00-1	4142-2 00-1	4142-3 00-1	
Invert elevation	Upper end (m)	2.808	3.091	3.302
	Lower end (m)	3.091	3.302	3.411
Ground surface elevation	Upper end (m)	1.505	1.512	1.72
	Lower end (m)	1.512	1.72	1.65
Length of sewer	(m)	46.90	35.70	34.20
Difference of leivation	(m)	0.283	0.211	0.109
Slope	(%)	6.03	5.91	3.19

유량계는 초음파 담지식 유량계와 플룸식 유량계를 이용하였다. 유량, 수위, 유속, CCTV 관측 등의 측정시험은 총 2회에 걸쳐 각각 1주일동안 수행하였다. 1차

시험은 3월 9일부터 3월 16일까지 약 160시간에 걸쳐 촬영한 데이터를 관찰하였으며, 2차 시험은 4월 27일부터 5월 8일까지 약 250여 시간동안 유량측정을 1분 간격으로 실시하였다. 특히, 시험기간 중 맨홀 하류부 2개 지점에서 유속, 수위를 관측값을 24시간동안 30분 간격으로 측정하였다.

4. 연구결과

4.1 관로내 점착성 고형물을 함유한 하수의 주중 및 주말 전단응력 변화

4142-0 관로에서 3월 10일 주중(금)에 측정된 수위 및 유량의 변화를 Fig 2에 나타내었다. 분류식 오수관 로이므로 으깨 두부를 투입함으로써 수세분노 등이 포함된 점착성 고형물의 침전물이 관로 내 존재하는 것으로 가정하여 관찰하였다. 으깨어진 상태의 비정형 형태와 크기의 두부는 하수가 흐름에 따라 작은 크기로부터 시작하여 조금씩 하수에 씻겨내려가다가, 하수량이 증가하여 흐름 때에 씻겨내려가는 양이 증가하면서, 1분 내에 모두 씻겨 내려감을 관찰하였다. Fig. 2에서 수위와 유량은 유사한 패턴을 나타내며 변화함을 알 수 있으며, 유량측정장치의 감지 한계로 수위 15mm미만에서는 안정된 값을 보이지 않을 때도 있었다.

수위값을 이용해 운변과 경심을 구한 후, 식 (1)에 의해 전단응력을 산정하여 Fig. 3에 나타내었다. 합류식 관로에서 퇴적물의 90% 이송을 가정한 최소전단응력 기준값을 1.6 N/m²로 제한한 Brombach 등(1992)의 연구결과를 인용해 Fig. 3에 수평선으로 나타내었다 [14]. 24시간동안 최소전단응력값을 초과하거나 근접한 값을 보인 횟수는 10회였다. 한편, 최소전단응력값에 미달되는 시간간격 중 최대값은 391분, 즉 6.5시간으로, 이때에 하수도악취가 발생할 개연성이 높은 것으로 판단되었다.

동일한 관로에서 다음날인 3월 11일 토요일에도 같은 방법으로 측정을 수행하였으며, 24시간동안의 전단응력의 변화추세를 Fig. 4에 나타내었다. 24시간동안 최소전단응력값을 초과한 값을 보인 횟수는 4회에 불과하였다. 한편, 최소전단응력값에 미달되는 시간간격 중 최대값은 859분, 즉 14.3시간으로, 주민들의 활동이 감소한 주말에는 하수사용량 감소에 따른 전단응력 감

소 경향이 뚜렷이 나타남을 알 수 있었다.

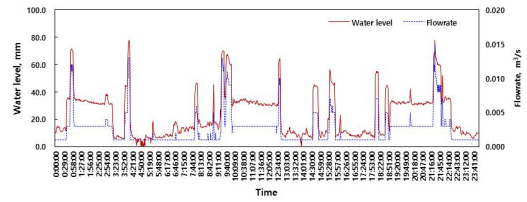


Fig. 2. Temporal change of water level and flowrate measured in sewer pipeline 4142-200 on Friday, March, 10.

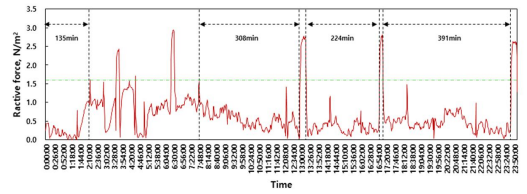


Fig. 3. Temporal variation of tractive force in sewer pipeline 4142-0 with slope of 0.00603 on Friday, March, 10.

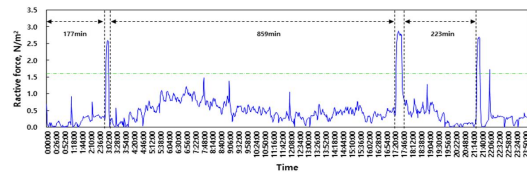


Fig. 4. Temporal variation of tractive force in sewer pipeline 4142-0 with slope of 0.00603 on Saturday, March, 11.

4.2 관로내 점착성 및 비점착성 고형물을 함유한 하수의 전단응력 변화

합류식 지역에서 우천시 지표면의 토사 등이 하수관로에 유입되어 퇴적되기 쉬운 여건임을 감안하여 동일한 실험대상 오수관로에 으깨 두부와 함께 두세 줌의 모래를 맨홀에서 간헐적으로 투입하면서 유량, 수위 등의 측정을 하였다. 으깨 두부가 모래와 함께 퇴적되어 있는 경우에 으깨 두부만 퇴적되어 있을 때보다 하수흐름으로 씻겨내려가는 속도가 느려지는 것을 관찰할 수 있었다. 전단응력의 변화를 Fig. 5에 나타내었으며, 24시간이 아닌 17시간동안에 4회 최소전단응력값을 초과하였고, 최대 476분 즉 7.0시간동안 최소전단응력 미달시간이 지속되었다. 이는 앞서 4.1절에서 나타난 점착성 고형물만 존재하는 경우의 최소전단응력 미달시간 6.5시간보다

약간 길어진 값으로, 비점착성 고형물이 하수에 포함될 경우 하수침전물의 퇴적이 더 발생함을 확인하였다. 하지만, 주말에 점착성 고형물만 하수에 유입되는 경우의 최소전단응력 미달시간 14.3시간에는 크게 못 미치는 것을 알 수 있었다.

본 시험에서 사용된 입자의 크기(d_{50})는 각각 0.36mm, 0.64mm로 각각의 입자 크기에서 평균 전단응력은 표준편차를 고려하였을 때, Raths와 McCauley(1962)가 8inch(205 mm)관에서 0.15~7.9 mm, 비중이 대략 2.7인 입자를 이용해 하수침전물의 이송능력을 평가해 제안한 식 (2)가 나타내는 침전물 이송곡선과 크게 차이나지 않음을 알 수 있었다[3].

실제 토사 등이 유입되는 합류식 하수관로에서 수세분뇨가 직투입될 경우의 실험 조건을 만들기가 현실적으로 어려워 본 연구의 실험방법을 사용하였으나, 더 실제상황에 맞는 실험연구를 통한 많은 데이터로 분석해 볼 필요가 있다.

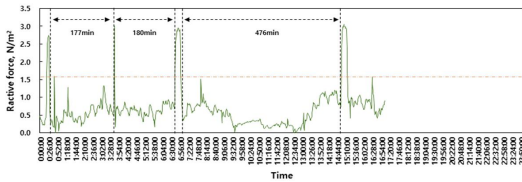


Fig. 5. Temporal variation of tractive force in sewer pipeline 4142-0 with slope of 0.00603 on Wednesday, March, 15.

4.3 관로의 경사도 차이에 따른 하수의 전단응력 변화

Fig. 6과 Fig. 7에는 4142-0 관과 4142-200 관의 전단응력을 24시간 동안 측정된 값을 각각 나타내었다. 하수관로 4142-0과 4142-200의 관경사는 각각 0.00603과 0.00319로 약 2배에 가까운 큰 차이가 있어, 경사값이 0.00603인 4142-0관은 24시간 동안 Brombach 등이 제안한 최소전단응력값을 초과하는 경우가 5회 발생하였으나 경사값이 0.00319로 상대적으로 작은 4142-200관에서는 최소전단응력값을 초과하는 경우가 한 번도 관찰되지 않았다.

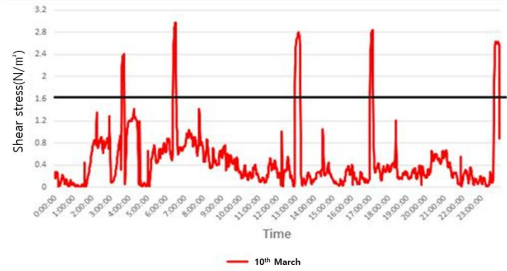


Fig. 6. Temporal variation of tractive force in sewer pipeline 4142-0 with slope of 0.00603

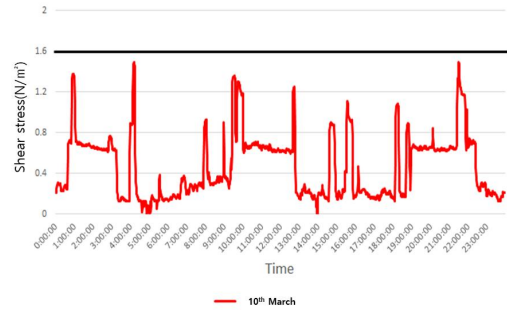


Fig. 7. Temporal variation of tractive force in sewer pipeline 4142-200 with slope of 0.00319

Table 3은 2회에 걸쳐 각 1주일동안 경사도가 다른 두 개 관로의 전단응력을 측정하기 위하여 각 관로의 말단에 있는 맨홀에서 측정된 유량값을 이용하여 전단응력의 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차를 분석하여 나타내었다. 경사가 작은 4142-200관로의 경우 Run 1 기간 중 단 1회를 제외하고는 1.6 N/m²의 전단응력 기준을 만족하지 못하였으며, Run 2 기간 또한 4월 28일의 1.6N/m²의 값을 1회 나타내었다. 이는 동일한 기간중 경사도가 상대적으로 큰 4142-0 관로의 최대전단력이 전단응력 기준의 1.7~1.9배로 분석된 것과 비교하였을 때 상당히 낮은 전단응력을 기록했음을 보여준다. 4142-0 하수관로의 하수가 4142-100하수관로와 4142-200 하수관로를 통해 이송되므로 유량값이 일정함에도 전단응력의 차이를 나타내었다.

Table 3. Variation of tractive force measured twice in pipeline 4142-0 with slope of 0.00603 and pipeline 4142-200 with slope of 0.00319

				Max	Min	Mean	Srd. Dev.	
RUN1	Pipeline 4142-0-1	0310	Fri	2.96	0	0.63	0.53	
		0311	Sat	2.9	0	0.46	0.43	
		0312	Sun	3.02	0	0.59	0.50	
		0313	Mon	2.9	0	0.68	0.48	
		0314	Tue	2.9	0	0.62	0.49	
	0315	Wed	3.08	0	0.67	0.53		
	Pipeline 4142-200-1	0310	Fri	1.5	0	0.47	0.32	
		0311	Sat	1.35	0	0.45	0.32	
		0312	Sun	1.38	0	0.43	0.33	
		0313	Mon	1.31	0	0.45	0.35	
		0314	Tue	1.66	0	0.31	0.34	
		0315	Wed	1.28	0	0.28	0.34	
	RUN2	Pipeline 4142-0-1	0316	Thu	1.25	0	0.20	0.30
			0428	Fri	2.84	0.3	0.90	0.40
			0429	Sat	2.72	0.24	0.91	0.40
0430			Sun	2.9	0.35	0.93	0.41	
0501			Mon	2.84	0.35	0.97	0.42	
0502			Tue	2.9	0.35	0.93	0.40	
Pipeline 4142-200-1		0503	Wed	2.9	0.41	0.96	0.40	
		0504	Thu	2.84	0.47	0.80	0.48	
		0428	Fri	1.6	0	0.25	0.33	
		0429	Sat	1.1	0	0.21	0.30	
		0430	Sun	1.25	0	0.25	0.32	
		0501	Mon	1.47	0	0.24	0.35	
		0502	Tue	1.5	0	0.25	0.34	
		0503	Wed	1.47	0	0.20	0.31	
		0504	Thu	1.19	0	0.25	0.34	
0505	Fri	0.84	0	0.04	0.17			

5. 결론

본 논문에서는 하수처리구역 최상류부에서 간헐적으로 저유량이 흐르는 하수관로에서 하수의 수위, 유속, 유량을 실측하여 하수흐름의 전단응력 크기의 변화를 조사하였다. 수세분뇨 및 토사가 하수관로 내에 퇴적되어 있는 것을 모사하기 위해 점착성 및 비점착성 고형물(두부와 모래)을 따로 또 함께 관로에 투입한 후 흐름의 상태를 촬영한 바, 본 실험대상관로에서는 큰 방해 없이 침전물이 하수와 함께 씻겨 내려가는 것을 관찰하였다. 경사도 0.00603인 관로에서는 금요일 최소전단응력값을 초과하는 횟수가 24시간에 10회 발생하였으나, 경사도 0.00319인 관로에서는 한번도 없었다. 관경사에 따른 최소전단응력이 1일 중 한번도 만족되지 않을 경우가 확인되었으며, 1주일간의 1차 측정기간동안 단 1회만 기준값을 초과하여, 관경사가 완만한 경우의 하수도 악취발생의 가능성이 큼을 보여주었다. 관경사가 각각 0.00603과 0.00319인 두 관로에서의 최대전단응력은 경사가 급할 때 2.9-3.1N/m²에서 경사가 완만해질 때 1.6-1.7N/m²로 감소하는 것으로 나타났다.

주말에는 주중에 비해, 그리고 모래 등의 비점착성 고형물이 하수에 포함될 경우, 최소전단응력값 미달시간이 증가하는 현상을 확인하였다. 최소유속기준에 입각한 하수도설계기준을 준수하여 설계된 본 실험대상지역의 관로에서는 수세분뇨의 직투입이 이루어져도 관로내 침전물이 오래 퇴적상태로 머물지 않고 하수와 함께 흘러갈수 있음을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] H. M. Song et al. (2014). *Development of Odor Control Technology and Policy Making in Sewer Pipe*. Sejong : Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.
- [2] Seoul Metropolitan Government. (2017). *2030 Sewer Rehabilitation Master Plan*.
- [3] K. H. Park, J. I. Oh, S. Y. Yoo, B. J. Kang, T. H. Lee, S. J. Kang & S. M. Kim. (2017). *Study of Sewage Direct Input Plan in the Combined Sewer Zone*. Korea Water and Wastewater Works Association.
- [4] D. Butler & P. Clark. (1995). *Sediment Management in Urban Drainage Catchments*. London : Construction Industry Research & Information Assoc.
- [5] C. H. Raths & R. F. McCauley. (1962). Deposition in a sanitary sewer. *Wat. Wks. and Sewage*, 109, 192-197.
- [6] N. Vongvisessomjai, T. Tingsanchali & M. S. Babel. (2010). Non-deposition design criteria for sewers with part-full flow. *Urban Water J.*, 7(1), 61-77. DOI : 10.1080/15730620903242824
- [7] D. K. Lysne. (1969). Hydraulic design of self-cleaning sewage tunnels. *J. SANIT. ENG. DIV. ASCE*, 95(1), 17-36.
- [8] ASCE and WPCF (1970). *Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers*. American Society of Civil Engineers Manuals and Reports on Engineering Practices, No. 37.
- [9] K. M. Yao. (1974). Sewer line design based on critical shear stress. *J. Environ. Eng.*, 100(2), 507-520.
- [10] CIRIA. (1986). *Sediment Movement in Combined Sewerage and Storm-water Drainage Systems*. Phase 1. Project Report.
- [11] O. G. Lindholm (1984). Pollutant loads from combined sewer systems. *In Proceedings of the*

3rd International Conference on Urban storm drainage(pp. 1602-1616). Gothenburg, Sweden : Almqvist & Wiksell International.

- [12] Scandiaconsult. (1974). *Synopsis of Research Programme for Self-cleansing Sewers*. Stockholm: Orrje.
- [13] E. Macke. (1982). *About sedimentation at low concentrations in partly filled pipes*. Announcements, Institute of Hydraulic Engineering, Braunschweig University, Braunschweig, German.
- [14] H. Brombach, S. Michelbach & C. Wohrle. (1992). *Sedimentation and Remobilization Processes, Precipitation, Self-published Environmental and Fluid Technology*. GmbH, Bad Mergentheim, German.

박 규 흥 (Kyoohong Park)

[정회원]



- 1984년 2월 연세대학교 토목공학(공학사)
- 1986년 2월 연세대학교 환경공학(공학석사)
- 1993년 1월 미국 Northwestern University 환경공학(공학박사)

- 1993년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 정교수
- 관심분야 : 물리화학적 수처리
- E-Mail : kpark@cau.ac.kr

이 태 훈(Taehoon Lee)

[정회원]



- 2005년 8월 : 중앙대학교 토목공(공학사)
- 2008년 2월 : 중앙대학교 토목화학공학(공학석사)
- 2019년 2월 : 중앙대학교 토목공학과(공학박사)

- 2020년 4월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 연구전담조교수
- 관심분야 : 상수처리, DAF, 하수관로, 자산관리
- E-Mail : th.lee@dankook.ac.kr

강 병 준(Byongjun Kang)

[정회원]



- 2006년 2월 : 서남대학교 환경화학공학과(공학사)
- 2008년 2월 : 서남대학교 환경화학공학과(공학석사)
- 2016년 2월 : 중앙대학교 토목공학과(공학박사)

- 2016년 2월 ~ 2019년 5월 : 중앙대학교 산학협력단 선임연구원
- 2019년 6월 ~ 현재 : (주)엔솔파트너스 SW사업부 차장
- 관심분야 : 하수도, 자산관리, Smart water
- E-Mail : iglgl@cau.ac.kr