

압력 원형관로내 유사이송특성 연구

Sediment Transport Characteristics in a Pressure Pipeline

손광익* · 김현정**

Son, Kwang Ik · Kim, Hyun Jung

Abstract

The low carrying capacity caused by the deposition in a sewer line is one of the main reason of the urban flood. Therefore, an efficient maintenance and management of the storm water drainage system is very important to prevent urban flood. In this research, the sediment transport characteristics through a pressure pipeline were examined with laboratory experiments. Bed-forms in a pipeline, sediment rates, roughness due to sediments were examined. Experimental system consists of flow circulation system with a pump and a sediment feeder at the upstream of the pipeline. Sediments were supplied into a 60 mm-diameter and 8 m-long pipe. Maximum flow rate is 30 m³/hr, and the sediment feeding rate range is 5 g/s~19 g/s. Governing parameters and estimation equation for sediment transport rate were developed. The mean velocity (U), coefficient of viscosity (μ), unit width bed load (q_b), mean diameter of particle (d_{50}), unit weight of sediment in water (γ'_s) were adopted as the most influencing factors of sediment transport patterns. The prediction equation for sediment transport rate were developed with two dimensionless terms. These two dimensionless terms showed a linear relationship with high correlation coefficient.

Keywords : sewer design, sediment transport, pressure line, sediment loads, sediment waves, deposition

요 지

배수관로 내의 토사퇴적으로 인한 통수능 저하는 도시홍수의 주요 발생 원인으로 배수관로의 효율적 유지관리는 도시홍수 예방에 대단히 중요하다. 따라서 본 연구에서는 만관 원형관로에서의 토사이송 실험을 실시하고 배수관로 내에서 일어나는 유사이송 형태, 흐름의 저항 및 유사량 등 수리학적 특성을 분석함으로써 관로의 효율적 유지관리를 위한 기초 자료를 제시하였다. 본 실험은 길이 8 m, 관경 60 mm의 수평 관로와 유사 공급장치로 구성된 모형장치를 통하여 실내실험을 수행하였다. 실험장치는 최대 30 m³/hr 규모의 유량 순환시스템을 갖추고 있으며 관로 상류부에 5 g/s~19 g/s 규모의 유사 공급장치와 함께 관로 끝부분에 유사 회수시스템을 갖추고 있다. 본 연구 수행 결과 통수단면의 평균유속(U), 점성계수(μ), 단위 폭당 소류사량(q_b), 평균입경(d_{50}), 수중유사단위중량(γ'_s)를 주요 인자로 하는 두 개의 무차원 변수를 이용하여 압력 원형관로 내 토사이송을 예측하는 공식을 제안하였으며 이들 무차원 변수 간에는 선형 상관관계가 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 원형 배수관로, 압력관로 내 토사이송, 유사이송 형태, 유사이송 지배인자

1. 서 론

배수관로 내의 토사퇴적으로 인한 통수능 저하는 도시홍수의 주요 발생 원인으로 우리나라의 경우 일반적으로 대도시보다 중소도시에서 많이 발생하고 있다. 또한 일부 대도시 지자체의 경우 관로 내 토사제거 사업을 위해 매년 상당액의 예산을 책정, 집행하는 것으로 알려져 있다. 이 같은 관로 내 토사퇴적 현상을 방지하기 위해 우리나라는 물론 해외에서도 유속 또는 소류력 등 배수관로 내의 토사퇴적 방지를 위한 다양한 관로설계 기준이 제시되고 있다. 우리나라의 경우 하수 및 우수관은 최소유속 설계기준(환경부, 1998)에 의해 설계, 시공되었으나 토사퇴적 현상에 의한 피해가

지속적으로 발생하는 사례는 이러한 설계기준에 대한 보완이 필요하다는 것을 의미한다.

최근 외국의 배수관로 내의 토사퇴적 관련 연구사례를 보면 토사퇴적 방지개념이 아닌 경제성을 고려한 토사퇴적 조절기법이 많이 연구되고 있다. Butler 등(2003)은 관로 내의 유사이송특성을 연구하여 우수관로 내에 부분적 퇴적을 허용하거나 자가배사(Self-Cleansing) 기능을 가진 관로 설계기법에 대한 연구를 수행하였다. 즉, 유사입자가 퇴적되지 않도록 관로의 수리적 특성이 한계 유속 또는 한계 소류력보다 크게 설계하는 기존의 설계개념이 아닌 배수관로 내의 유사입자의 특성은 물론 유입되는 유사량의 규모를 고려하여 관로의 유사이송 능력을 결정하는 새로운 설계 기법이

*정회원 · 교신저자 · 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (E-mail : kison@yu.ac.kr)
**영남대학교 공학교육혁신센터

연구되고 있다. 이러한 설계개념의 변화는 개수로로는 물론 관수로 내에서의 유사이송특성에 대한 선행 연구를 요구하게 되었다.

Coleman 등(2003)은 관수로 내 유사이송 시 하상형태가 발달하기 시작하는 현상을 조사하여 관로 내에서의 하상형태 발달은 개수로 흐름에서 나타나는 현상과 같이 쇄기형태의 유사 퇴적군이 불연속적으로 형성되며 이후 이 퇴적군이 이동을 시작하여 궁극적으로는 쇄기형태의 유사과가 하류로 이송된다는 사실을 밝혔다. Kurihara(1998)는 기존의 연구 자료를 토대로 관로 내의 하상형태는 관로 내 유속이 퇴적한계 속도 이하일 경우 관저에 퇴적된 입자가 이동하지 않는 '퇴적층 흐름'과 관로 내 유속이 퇴적한계 속도 이상일 경우 입자가 소류상태로 이동하는 '부분퇴적층 흐름', '접동층 흐름'과 '부유 흐름'으로 구분하였다.

국내에서는 유동훈과 이정영(1999)이 관경만을 고려하는 기존의 비합리적 설계방법을 보완하여 하수관 설계 시 관경, 관중, 비중, 토사 입경, 유량을 종합적으로 고려한 양해법 산정식을 제안하였으며 2007년에는 단면형상이 원형인 경우와 정사각형인 경우에 따라 만수 시 유량이 50%에 대하여 최소유속, 관로, 경사, 관경 등의 결정을 위한 종합적인 양해법 산정식을 개발하였다. 여장건 등(2003)은 하수관거 내 유속 및 소류력 확보를 위해 flushing 방법을 적용하는 실험을 실시하여 하수관거의 순간방류를 통해 일반적 분류식 오수관거 유속에 비해 2~3배정도의 빠른 유속을 발생시킬 수 있었다.

이상과 같이 최근 국내외적으로 원형수로 내의 유사이송에 관한 연구가 수행되었으나 관수로 흐름과 개수로 흐름에 따라 수로내 유속분포가 다른 특성을 나타내는 수리학적 특성을 고려치 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 압력 원형관로 내 비점착성 유사에 대하여 수리모형실험을 통해 유사이송 특성을 지배하는 주요 인자를 찾아내고 새로운 배수관로의 설계기준 제안을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험개요 및 실험방법

2.1 실험장치 개요

압력관로 내 토사이송 특성을 연구하기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 제작하였다. 실험장치의 물은 순환하도록 설계되었으며 관로 상류에 유사를 일정하게 공급할 수 있는 유사공급장치를 설치하였다. 관로 하류에는 유사 회수조를 설치하여 관로를 통과한 유사는 회수되고 물만 다시 순환하도록 제작되었다. 관경 60 mm 아크릴 관로는 수평으로 설치하고, 흐름안정구간이 충분히 확보될 수 있도록 관로는 8

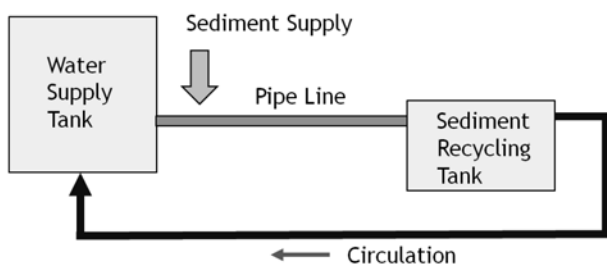


Fig. 1 Experimental System Diagram

m 길이로 제작하였다. 관로 내 유속은 최대 2.94 m/s, 유량은 최대 30 m³/hr를 공급할 수 있는 펌프를 사용하였으며, 밸브를 이용하여 유량 조절이 가능하도록 하였다. 유사는 스크루 펌프를 이용하여 수평관로의 시점부분에서 공급되며 스크루 펌프 속도에 따라 유사 공급량 조절이 가능하도록 하였다. 관로입경에 의한 유사이송 영향을 최소화하기 위하여 유사입경은 관로의 1/50 이하를 사용하였다.

관로는 아크릴 관을 사용하였으며 조도계수 산정을 위하여 1 m 마다 관로에 마노미터를 설치하여 에너지 손실을 측정함으로써 유량 변화에 따른 Manning의 조도계수 n을 산정하였으며 실험 전후에 수온을 측정하였다. 사용된 유량계는 체적산정 기법을 이용하여 검증을 실시하였다. 관로에 유사 가 퇴적될 경우 하상의 조도는 유사입경으로부터 조도를 산정하는 공식(Vanoni 등, 1975)을 이용하였다. 실험을 통해 얻어진 자료를 분석한 결과, 레이놀즈수(Re)에 따른 Manning의 조도계수 n 값은 레이놀즈수가 1.5×10⁵부터 5.0×10⁵으로 증가함에 따라 0.0218~0.0154로 감소하는 경향을 보였으며 향후 실험결과 분석 시 관로의 조도계수는 이 실험 결과를 활용하였다.

2.2 유사이송 실험

유사이송의 한계조건을 산정하는 전통적인 방법으로는 하상전단응력(τ_b)을 이용하는 무차원변수(ψ)를 이용하는 기법이 있다. 일반적으로 표현되는 하상전단응력(τ_b)은 단지 하도 측면과 하상의 조도가 상이하다는 기본가정을 내포하고 있는 반면 하상형태를 고려하는 경우 하상전단응력은 $\tau_o = \rho g R I = \rho U_*^2$ 으로 표현된다. 한편, 일반적으로 매끈한 관로의 경우 경계전단응력은 τ_w 으로 표현되며 여기서 U_* 는 평균 하상전단속도이다. 그러나 Ota와 Nalluri(2003)는 좁은 하도의 경우 전단응력은 균일하지 않으며 수위에 따라 20%까지 차이가 발생한다는 연구결과를 발표하기도 하였다. 잘 알려진 Shields diagram은 비점착성 유사의 한계조건(ψ_c)을 입자 Reynolds수(Re^*)와의 함수로 나타내며 역시 를 매개변수로 활용하고 있다. White(1940)의 공식으로 잘 알려진 $\phi = f(\psi)$ 형태의 소류사량 산정공식은 넓은 하도의 경우 단위 폭 당 소류사량(q_b)을 적용하기도 한다. 특히 이 소류사량은 유사농도와 체적의 함수로 표현함과 동시에 수심(y) 대신 수리반경(R)을 사용하여 직사각형 수로가 아닌 이형 수로에 적용하기도 한다. 이상의 문헌조사와 보편적으로 많이 활용되고 있는 소류사 산정기법(Kalinske; 1947, Meyer-Peter; 1934, Meyer-Peter와 Muller; 1948, Ota와 Nalluri; 2003 등)으로부터 예상되는 주요 지배인자로는 하상전단응력(τ_b), 마찰속도(U_*) 또는 평균유속(U), 단위폭당 소류사량(q_b), 유사 평균입경(d_{50}), 동수반경(R), 물의 밀도(ρ), 에너지경사(S) 등을 선정하였다.

지배인자간의 상관관계를 규명하기 위하여 압력관로 모형을 제작, 실내에서 모형실험을 실시하였다. 실험에 사용된 유사입경의 크기(d_{50})는 0.45 mm, 0.55 mm, 0.72 mm, 1.35 mm 등을 사용하였으며 실험 수행 범위는 Table 1과 같다. 각 유사의 균등계수(C_u)를 산정한 결과 모든 유사의 C_u 값은 2 이하로 모든 유사는 입도가 균등한 유사로 정의할 수 있음을 확인하였다. 유사공급량(Q_s) 범위는 5~19 g/sec이며 유량

Table 1. Experimental Range

Sediments	d_{50} (mm)	Q_s (g/sec)	Q (m^3/hr)	No. of Experiments
# 1	0.45	9.66	3.96-7.50	4
# 2	0.55	9.27	2.95-8.76	5
		13.15	3.22-6.94	3
# 3	0.72	7.95	4.08-7.01	3
		9.25	3.20-5.85	4
		12.26	3.42-6.18	3
# 4	1.35	5.93	2.20-5.50	5
		11.43	2.54-5.23	3

범위는 2.2~7.5 m^3/hr 로 총 30회의 실험을 수행하였다.

실험방법은 첫 번째, 일정 유량이 흐르는 압력 원형관로의 상류에 일정량의 유사를 장시간 공급하여 관로 내에서의 유사이동이 평형상태에 도달하도록 하였다. 실험결과 분석 시 평형상태의 관로 내 유사 이송량은 유사 공급량(Q_s)과 동일한 것으로 간주하였다. 평형상태의 하상형태 등 유사이동 특성을 관찰하였으며 수리적 특성과 함께 관로 내 유사의 퇴적깊이, 유사파의 높이 및 길이 등 하상의 기하학적 특성을 계측하였다.

두 번째, 동일유량에 대해 다른 유사량을 공급한 후 유사이동이 다시 평형상태에 도달하는 실험을 수행하였다. 동일한 유량조건에서 유사 공급량이 증가되면 초기에는 관로에 유사가 더 퇴적되어 통수단면적이 감소하나 유속은 빨라지며 원형단면 특성상 퇴적깊이가 커질수록 하상 폭이 넓어져 흐름에 노출되는 하상의 면적이 넓어짐으로써 유사 이송량도 증가하게 된다. 따라서 일정시간이 경과한 후 증가된 유사 공급량과 유사 이송량이 평형을 이루는 상태에 다시 도달하게 되며 전 실험과 마찬가지로 이 때의 각종 수리적 특성과 유사파의 기하학적 특성을 계측하였다.

세 번째는 동일 유량이 아닌 다른 유량에 대하여 첫 번째와 두 번째 방법과 동일하게 유사 공급량을 다양하게 변화시키는 실험을 반복하였다.

네 번째는 공급유사의 입경 등 유사의 기하학적 특성의 영향을 검토하기 위하여 유사의 평균입경 크기가 다른 유사를 이용하여 첫 번째부터 세 번째 실험을 반복 실시하였다.

3. 실험결과 비교 분석

3.1 관로내 유사이송 현상

흐름 조건들이 하상입자의 움직임에 유발하는 한계조건을 충족하거나 초과할 때, 유사 입자들은 움직이기 시작한다. 유사 입자들의 운동은 하상을 따라 전동(rolling), 활동(sliding), 도약(jumping)을 하게 되며 이를 소류사라 정의한다. 한편 입자에 작용하는 양력이 충분하거나 연직방향의 난류강도가 강해 도약된 입자가 다시 하상에 가라앉지 않고 계속 떠서 움직이는 유사를 부유사라 한다. 본 연구에서는 부유현상을 나타내는 조건에 대한 실험결과는 분석 시 제외하였으며 소류사 형태의 유사이송에 대한 실험결과만을 활용하였다. 따라서, 유사 이송량은 소류사량과 동일한 것으로 가정하였으며 유사 이송량을 하상 폭으로 나눈 값을 단위

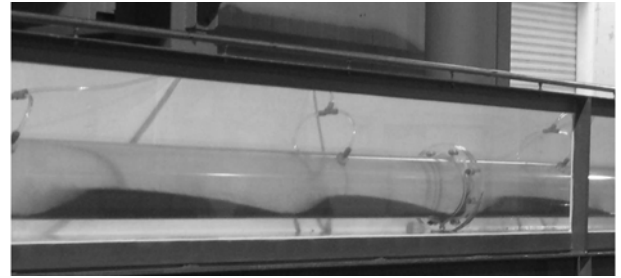


Fig. 2 Sediment Waves without Deposition

폭 당 소류사량(q_b)으로 정의하였다.

실험결과 Kurihara(1998)의 연구결과와 같이 관수로의 수리학적 특성이 유입 유사의 초기운동 조건을 충족할 경우 관로내의 유사이송특성은 유사입경에 따라 부분퇴적층 흐름, 점동층 흐름, 그리고 부유 흐름 등의 특성을 나타냄을 확인하였다. 특히 부분퇴적층 흐름이 발생하며 공급 유사량이 많지 않은 경우 Coleman 등(2003)이 발표한 바와 같이 하류로 계속 움직이는 쇄기모양의 유사 퇴적군(이후 유사파 또는 sediment wave라 명함)이 불연속적으로 형성되며 공급 유사량이 작아질수록 유사파의 간격은 넓어진다는 사실을 확인하였다. 반면 공급 유사량이 많아지면 Fig. 2와 같이 유사파 간격이 점차 좁아져 서로 연결되며 더 많은 유사량이 공급되면 관로 바닥에 일정깊이의 퇴적층을 형성한 후 퇴적층 위로 유사파가 발달하게 된다. 본 연구에서는 퇴적층 깊이를 포함한 유사파의 간격 등 이송현상이 평형상태에 도달했을 때의 통수단면에 대한 수리특성이 바로 공급 유사량을 이송시킬 수 있는 한계조건으로 해석하였다.

퇴적층 형성 후 평형상태에 도달한 관로 내 유사파의 형상은 Fig. 3과 같이 나타나며 이때의 이동형상을 대표할 수 있는 수리적 특성으로는 유사에 의한 하상 조도계수, 유사파 파봉 및 파곡에서의 통수단면 특성, 관로의 조도계수 등이 있다. 유사이송의 한계조건에 해당하는 수리학적 특성을 정량화 하기위한 대표 통수단면은 Fig. 4와 같다.

3.2 유사이송능 예측기법 개발

Fortier와 Scobey(1926)는 인공수로에서 평균 유속의 최대 허용 값에 대한 광범위한 현장 조사를 실시하여 인공수로

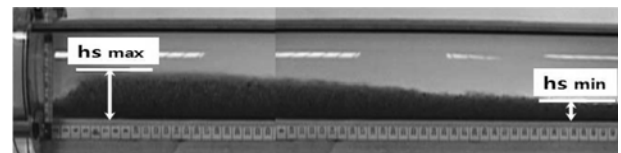


Fig. 3 Definition of Sediment Wave's Geometry

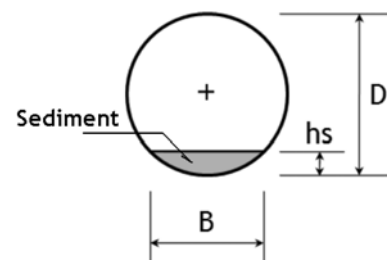


Fig. 4 Cross Section with Depositon

내 허용 가능한 유속을 표로 제시하였으며 Hjulstrom(1935)은 평균유속을 기초로 하여 균일한 입자에 대한 침식·퇴적 기준 그래프를 작성하였다. 또한 Vanoni(1977)는 유사의 거동에 대한 평균 유속과 유사 입경 관계를 나타내는 그래프를 제시하였으며 Yang(1973)은 기존 연구자들의 실험자료들을 정리하여 무차원 한계 평균유속과 레이놀즈 수의 관계 그래프를 제시하였다.

전술한 연구자들이 제안한 유사이송 지배인자들의 적절성을 검토하기 위하여 본 연구의 실험결과를 적용하여 독립인자와 종속인자간의 상관관계를 분석하였다. 예를 들어 본 연구 실험결과를 이용하여 Ota와 Nalluri(2003)의 지배인자 $\Phi = (\rho^{1/3} q_b^{2/3})/\gamma_s$, $\Psi = (\gamma R(Ks/Kr)^{3/2} S)/\gamma_s d$ 값을 산정하고 이들의 상관관계를 그래프로 표현하여 두 변수간의 상관관계를 분석하였으나 연구자들의 연구결과와 같은 상관관계는 확인할 수 없었다. Ota와 Nalluri(2003) 뿐만 아니라 유사한 방법으로 기타 선행연구(Kalinske : 1947, Meyer-Peter & Muller : 1948) 결과에 적용한 경우도 지배인자들이 유사이송을 적절히 기술하고 있다고 판단되는 상관관계는 발견할 수 없었다.

따라서 압력 원형관로 내에서의 유사이송 특성을 새로이 분석하기 위하여 예상되는 지배인자를 선정하고 본 연구 실험결과를 활용하여 이 인자들 간의 상관관계를 분석하였다. 우선, Fig. 5와 같이 유사이송 한계조건에 대한 지배인자를 유사이송 수리능과 유사특성 그리고 유체특성으로 가정하고 종속변수를 단위 폭당 소류수량(q_b)으로 가정하여 다음과 같은 기본 식을 수립하였다.

$$q_b = f(\text{수리능, 유사특성, 유체특성}) \quad (1)$$

유사특성 인자로는 평균입경(d_{50}), 수중유사단위중량(γ'_s)이 있으며 유체특성 인자로는 점성계수(μ)를 선정하여 Eq. 2를 유도하였다.

$$q_b = f(\text{수리능, } d_{50}, \gamma'_s, \mu) \quad (2)$$

한편, 유사이송을 지배하는 수리능에 해당하는 인자는 하상전단응력(τ_b), 하상전단속도(U_{b*}), 평균유속(U) 등이 있으나 이들은 서로 상관관계를 지니고 있어 이들을 동시에 독립변수로 선정할 수 없으며 따라서 Eq. 2는 수리능을 대표하는 독립변수에 따라 Eq. 3과 같이 세 가지 식 중 하나의 식으로 표현할 수 있다.

$$q_b = f(\tau_b, d_{50}, \gamma'_s, \mu) \quad (3a)$$

$$q_b = f(U_{b*}, d_{50}, \gamma'_s, \mu) \quad (3b)$$

$$q_b = f(U, d_{50}, \gamma'_s, \mu) \quad (3c)$$

각 식에 대한 차원해석을 실시한 결과는 Eq. 4와 같다.

$$\frac{q_b \mu}{d_{50}^3 \gamma_s'^2} = f\left(\frac{\tau_b}{d_{50} \gamma_s'}\right) \quad (4a)$$

$$\frac{q_b \mu}{d_{50}^3 \gamma_s'^2} = f\left(\frac{U_{b*} \mu}{d_{50}^2 \gamma_s'}\right) \quad (4b)$$

$$\frac{q_b \mu}{d_{50}^3 \gamma_s'^2} = f\left(\frac{U \cdot \mu}{d_{50}^2 \gamma_s'}\right) \quad (4c)$$

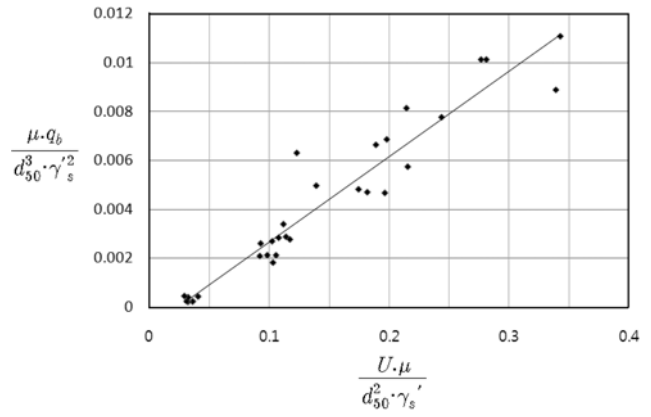


Fig. 5 Correlation between two Pi-terms

여기서, q_b 는 단위 폭 당 소류수량($q_b = Q_s/B$), U_{b*} 는 전단속도($U_{b*} = \sqrt{\tau_b/\rho}$), τ_b 는 하상전단응력, d_{50} 은 유사입경, γ'_s 은 수중 유사단위중량, μ 는 점성계수이다. Ota와 Nalluri(2003)에 의하면 원형관로에서의 하상전단응력 $\tau_b = \rho g R_b S$ 로 표현할 수 있으며 여기서 R_b 는 측벽의 영향을 무시한 하상에 대한 동수반경으로 정의하였다.

유사이송 한계조건에 대한 하상전단응력(τ_b), 하상전단속도(U_{b*}), 평균유속(U) 값은 통수단면과 밀접한 관계가 있으며 통수단면은 퇴적층 깊이(h_s)에 의해 결정된다. 퇴적층 깊이(h_s)는 유사과 파봉 또는 파곡에 따라 그 퇴적층 깊이가 달라지므로 관로 전 구간을 대표할 수 있는 하나의 퇴적층 깊이를 선정할 필요가 있다. 따라서 파봉에서의 퇴적층 깊이(h_{Smax}), 파곡에서의 퇴적층 깊이(h_{Smin}) 그리고 두 퇴적층 깊이의 평균(h_{Savg}) 등을 대표 퇴적층 깊이로 간주하여 산정한 통수단면 등 수리적 특성을 Eq. 4에 적용하여 두 무차원 변수간의 상관관계를 분석한 결과 퇴적층 깊이(h_s)값으로 h_{Savg} 를 사용한 경우 가장 우수한 상관관계를 보이는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 h_{Savg} 를 퇴적층 깊이로 선정하였다.

한편, 에너지 경사(S)를 산정하기 위해서는 통수단면의 조도계수가 요구된다. 퇴적층이 형성된 관로의 조도계수는 하상에 의한 조도(n_b)와 하상과 관로에 의한 등가조도(n_e)를 활용할 수 있다. 하상조도(n_b)의 경우 실내실험에서 균일사를 이용한 Stricker의 식(Vanoni 등, 1975)을 사용하였다.

$$n_b = d^{1/6} / 21.1 \quad (5)$$

여기서, d = 균일사 입경(m)

한편, 관로표면과 하상부분으로 형성된 통수단면에 대한 등가조도(n_e)도의 산정은 Horton-Einstein 방법(Vanoni, 1979)을 사용하였다.

$$n_e = \left(\frac{\sum p_i n_i^{1.5}}{\sum p_i} \right)^{2/3} \quad (6)$$

하상전단응력을 산정하기 위하여 위 두 가지 조도계수를 각각 적용한 후 Eq. 4의 상관관계를 해석한 결과 하상조도만을 사용한 경우 더 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 평균 퇴적층 깊이(h_{Savg}) 및 하상 조도계수(n_b)를 활용하여 Eq. 4a, 4b, 4c의 상관관계를 분석한 결과 Eq. 4c의 결정계수(R^2)가 0.923으로 가장 우수하게 나타났다. Fig. 5는 Eq.

4c를 이용한 두 무차원 변수간의 상관관계를 나타내고 있으며 이들의 상관관계 식은 Eq. 7과 같다.

$$\frac{\mu \cdot q_b}{d_{50}^3 \cdot \gamma_s^2} = 0.0349 \left(\frac{U \cdot \mu}{d_{50}^2 \cdot \gamma_s'} \right) - 0.0008 \quad (7)$$

4. 결 론

본 연구는 원형 하수관로내 유사퇴적 방지 설계기법을 연구하기 위하여 배수관로 내 유사퇴적 특성을 분석하고자 수리실험을 실시하였다. 실험을 통해 도출된 자료들을 기존의 소류사 이송식에 적용하여 적용성을 비교 검토하였으며 새로운 상관관계를 제시하였다.

실험 결과, 유사 유입량 및 관로 내 유량의 변화에 따라 관로 내 유속이 한계속도 미만인 경우 유사 이동형태는 '퇴적층 흐름'과 관로 내 유속이 한계속도 이상일 경우 유사입자가 소류상태로 이동하는 '부분퇴적층', '접동층 흐름'과 '부유 흐름'으로 구분할 수 있음을 확인하였다.

실험을 통하여 압력 원형관로 내 단위폭당 소류사량(q_b)은 평균유속(U), 점성계수(μ), 평균입경(d_{50}), 수중유사단위중량(γ_s')이 주요 변수임을 확인하였으며 이들의 상관관계 식을 개발하였다.

한편, 관로 내 유사 퇴적깊이는 유사파(sediment wave)의 파곡과 파봉의 평균 높이에 해당하는 통수단면과 하상입자에 의한 조도에 의한 에너지 손실 등이 유사이송을 지배하는 수리적 특성 인자로 임을 확인하였다.

본 연구는 관경 60 mm의 관로에서 수행한 실험결과로 보다 큰 관경에 대한 확대 적용 가능성을 검증하기 위해서는 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

심재호, 손광익, 신승철, 노진욱(2007) 원형 배수관로 내 토사이

동 특성연구. 2007 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 1245-1248.

여창건, 정우창, 김양섭, 송재우(2003) 하수관거 내 Flushing 효과에 의한 최소유속 확보에 대한 실험적 연구. 2003 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 5270-5275.

유동훈, 배덕원, 이태희(2007) 청소유속을 고려한 하수관거설계 산정식의 개선. 2007 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 1416.

유동훈, 이정영(1999) 하수관거의 최저유속. 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제4호, pp. 469-478.

환경부(1998) 하수도시설기준. 환경부

Butler, D., May, R., and Ackers, J.(2003) Self-cleaning sewer design based on sediment transport principles. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 129, No. 4, pp. 276-282.

Coleman, S.E., Fedele, J.J., and Garcia, M.H. Closed-conduit bed-form initiation and development. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 129, No. 12, pp. 956-965.

Fortier, S. and Scobey, F.C. (1926) Permissible canal velocities. *Transactions of the ASCE*, Vol. 89. Paper No. 1588, pp. 940-984.

Hjulstrom, F. (1935) Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Bulletin of the Geological Institute of Uppsala*, Vol. 25, Sweden.

Kalinske, A.A. (1947) Movement of sediment as bed load in rivers. *Transaction, American Geophysical Union*, Vol. 28, No. 4, pp. 41-54.

Kurihara, T. (1998) Study on flow resistance and sediment transport with sediment deposition in horizontal pipe. *JSCE*, No. 607/, pp. 45-54.

Meyer-Peter, E. and Muller, R. (1948) Formulas for the bed load transport. *Proc., IAHR, 2nd Congr.*, Stockholm. pp. 39-64.

Ota, J.J. and Nalluri, C. (2003) Urban storm sewer design: Approach in consideration of sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 129, No. 4, pp. 291-297.

Vanoni, V.A., ed. (1975) *Sedimentation Engineering*. ASCE Task Committee for the Preparation of the Manual on Sedimentation of the Sedimentation Committee of the Hydraulics Division (Reprinted 1977).

White, C.M. (1940) The equilibrium of grains on the bed of stream. *Proc. R. Soc. London*, Ser. A. 174, pp. 322-338.

Yang, C.T. (1996) *Sediment Transport*. McGraw-Hill, pp. 19-31, pp. 90-120.

Yang, C.T. (1973) Incipient motion and Sediment Transport. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 99, No. HY10, Proceeding Paper 10067, pp. 1679-1704.

(접수일: 2010.6.20/심사일: 2010.7.28/심사완료일: 2010.12.6)