

흐름에 의한 관로의 세굴특성

Characteristics of Scour around Pipeline in Current

김성덕¹⁾ · 안광국²⁾ · 이호진[†] · 이성민³⁾

Kim, Sungduk · Ahn, Kwangkuk · Lee, Hojin · Lee, Seongmin

ABSTRACT : This study is to investigate the characteristics of scour around pipeline in current and hydraulic model tests were performed. All the model test are 45 cases, which were conducted with velocities of 0.2 m/s to 0.5 m/s and pipe diameters of 45, 60, 90 mm. The developments of scour around pipeline were observed and equilibrium scour depths were recorded due to variation of pipe diameter and current velocity. According to the results, the equilibrium scour depth was proportional to current velocity and pipe diameter. The effect of diameter of pipeline on the equilibrium scour depth was bigger than current velocity. The correlations of relative scour depth and dimensionless number such as a Reynolds number, Shields number, and Froude number were analyzed. The Froude number and the relative scour depth had a high correlation of 0.900.

Keywords : Scour, Pipeline, Equilibrium scour depth, Relative scour depth, Current, Froude Number

요지 : 본 연구에서는 흐름에 의한 관로의 세굴특성을 조사하기 위해서 수리모형실험을 실시하였다. 관경 45mm, 60mm, 90mm의 관에 대해서 유속을 0.2m/s에서 0.5m/s까지 변화시켜 가면서 45회의 실험을 실시하였다. 관로 주변에서 세굴의 발달과정을 관찰하였고, 관경과 유속 변화에 따른 평형세굴심을 관찰하였다. 실험결과에 의하면 평형세굴심은 유속과 관경에 비례하는 것으로 나타났다. 관경이 평형세굴심에 미치는 영향이 유속의 영향보다 큰 것으로 나타났다. 상대세굴심과 Reynolds 수, Shields 수, Froude 수 사이의 상관성을 분석하였다. Froude 수와 상대세굴심이 0.900의 높은 결정계수를 갖는 것으로 나타났다.

주요어 : 세굴, 관로, 평형세굴심, 상대세굴심, 흐름, Froude 수

1. 서론

흐름이 있는 곳에 구조물을 설치하면 구조물 주변의 흐름 패턴이 변화되어 주변부의 토사가 침식 된다. 이렇게 토사가 침식되는 현상을 세굴(scour)이라 하며, 세굴이 발생하면 구조물의 안정성은 심각하게 훼손된다.

최근 들어, 수송의 편리성 때문에 관로를 이용하여 원유를 수송하거나, 하수종말처리장 처리수를 배출 하는 경우가 증가하고 있다. 이와 같은 관로시설은 흐름에 노출되어 설치되므로 주변부에 세굴이 발생할 가능성이 매우 높다. 특히, 원유나 하수를 수송하는 관로가 파괴되면 주변 수생태계의 오염뿐만 아니라 토양오염이 심각하게 발생하여 원상태로 복구되기까지 수십 년의 세월이 소요된다. 또한, 육상에서의 수리비용보다 10~100배 이상의 비용이 들기 때문에 관로 설치 이전에 충분한 검토와 조사가 이루어져야 한다. 따라서, 관로주변의 세굴 특성에 대한 분석이 관로의 안정성을 확보하기 위해서 선행되어야 한다.

그러나 교각, 방파제, 안벽 등의 구조물은 세굴이 붕괴의

주원인으로 인식되어 많은 연구를 해 왔으나, 관로에 대한 관심이 증가하게 된 것은 비교적 최근의 일이기 때문에 관로의 세굴에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 관로 주변의 세굴에 대한 연구를 살펴보면 다음과 같다. Mao(1988)는 관로 주변의 압력계수분포를 이용하여 관로의 측면 상류부와 하류부의 압력차가 관로 밑에서의 침투의 원인이 된다는 결론을 얻었다. Chiew(1990)는 관로주변의 세굴 발달과정에 대한 실험을 수행하여 관로에서 초기 세굴의 지배적인 영향인자는 파이핑(piping)이라는 결론을 얻었다. Yüksel 등(1995)은 병렬로 연결되어 있는 관로에 의해 바닥면에서 발생하는 흐름의 변화를 분석하여 세굴특성을 살펴보았다. Sümer 등(2001)은 정상흐름과 파가 존재할 때 세굴의 발생 및 매몰에 대한 실험을 수행하였다. 오현식 등(2002)은 파랑에 의한 관로 주변의 세굴특성을 수리모형실험을 통하여 분석하여, 수정 Ursell 수가 파에 의한 관로의 세굴을 평가하는 중요한 무차원 수임을 제시하였다. 김경호 등(2005)은 관로의 매설깊이에 따른 관로 주변의 파랑에 의한 세굴특성을 수리모형실험을 통하여 분석하여 매설깊이가

1) 비회원, 중앙대학교 토목환경공학과 연구원

2) 정회원, 충북대학교 토목공학과 조교수

† 정회원, 충북대학교 토목공학과 겸임교수(E-mail : lhjce@chungbuk.ac.kr)

3) 정회원, 영동대학교 토목환경공학과 부교수

세굴에 큰 영향을 미친다는 것을 제시하였다.

본 연구에서는 관로가 흐름방향에 수직으로 설치되었을 때 흐름에 의한 세굴특성을 실험적으로 살펴보고, 관경, 유속을 변화시키며 실험을 수행하였고, 관로 주변의 세굴을 관찰하였다. 유속, 관경의 변화에 따른 세굴 영역 및 세굴심의 변화를 살펴보고, 측정된 자료를 바탕으로 주요 무차원 매개변수인 Reynolds 수(Re), Froude 수(Fr), Shields 수(θ)와 상대세굴심의 상관관계를 분석하였다.

2. 관로 세굴에 대한 기본이론

2.1 흐름에 의한 세굴

관로 주변에서 하상의 세굴작용은 관로로 인한 흐름의 교란에 의해 발생한다. 관이 어떤 개방된 틈이 없이 평평한 바닥에 놓여 있다면 초기 균일한 흐름장의 분포는 관에 의해 교란되고, 세 종류의 와(vortex)가 관 주변에 형성된다(Mao, 1988).

그림 1에서와 같이 와류 A는 관 앞쪽에서 발생한다. 흐름은 큰 와류 B를 만들고 흐름방향에 대해 관의 하류부의 아래쪽 모서리 부분에는 와류 C가 생긴다.

Bijker와 Leeuwestein(1984)은 해저관로 주변의 침식에 대한 3가지 기본적인 형태를 다음과 같이 분류하였다.

- (1) Luff erosion : 관로의 앞쪽 하단에서 발생하고, 상승류로 인해 발생한 와류(vortex A)가 원인이다.
- (2) Lee erosion : 관로 뒤쪽의 하강류 쪽에서 발생하고, 하강류로 인한 난류성 배후류(Lee-wake)가 원인이다.
- (3) Tunnel erosion : 관로 밑에서 발생하고, 교란된 속도에 비교하여 관로 밑에서 증가된 속도가 직접적 원인

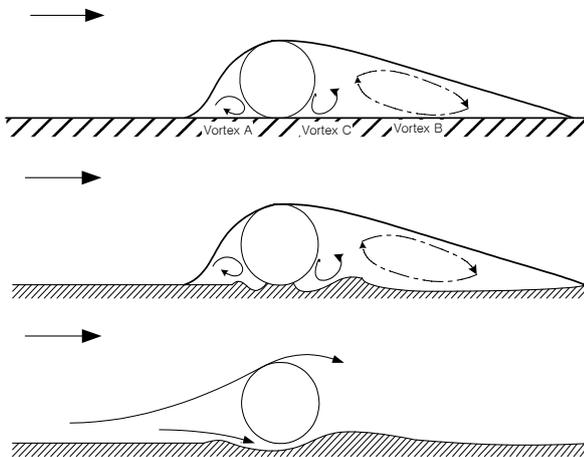


그림 1. 세 개의 대표적인 와의 형태

으로 작용한다.

그림 1에서와 같이 관 주변에서 와류 A와 C가 바닥면으로부터 모래입자를 이동시키지만 이동방향은 서로 반대이다. 반대로 와류 B는 모래 입자를 관 위쪽으로 이동시키지만 움직이는 범위는 와류 C에 의해 제한된다. 와류와 하상저류(河床低流)의 복합적인 작용으로 인하여 더욱 많은 모래 입자들이 멀리 이동되고, 결국 관로의 바로 아래에서 작은 틈이 발생한다. 이것이 한방향 흐름조건에서 세굴의 시작이다. 물이 관 밑으로 흐르기 시작한 후부터 흐름방향 앞쪽 와(vortex A)는 사라지고, 그 틈 사이의 속도는 거의 관 위의 속도와 같게 된다. 이와 같은 관 밑에서의 상대적으로 빠른 속도가 터널 침식(tunnel erosion)의 원인이 된다.

2.2 흐름과 관련된 무차원 수

2.2.1 Reynolds 수(Re)

세굴의 기본 메커니즘이 와류구조와 관련이 있으므로, 세굴심은 Reynolds 수의 함수로 나타낼 수 있다. Reynolds 수는 점성력에 대한 관성력의 비를 나타내는 무차원 수로서 다음과 같다.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$

여기서, V 는 유속(m/s), D 는 관경(mm)을 나타내고, ν 는 유체의 동점성계수(m^2/s)이다.

2.2.2 Froude 수(Fr 수)

자유표면을 갖고 있는 흐름은 중력이 지배적이며, 이 경우에는 Froude 수를 적용한다. Froude 수는 기하학적 상사와 결합하여 동역학적 상사를 만족시키기 위한 필요조건을 제공하기 때문에 매우 중요한 무차원 수이다. Froude 수는 중력에 대한 관성력의 비를 나타내는 무차원 수로서 다음과 같다.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

여기서, V 는 유속(m/s)이고, h 는 수심(m), g 는 중력가속도(m/s^2)를 나타낸다.

2.2.3 Shields 수(θ)

Shields 수는 토사입자의 이동 여부를 판단할 수 있는 매개변수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\theta = \frac{U_f^2}{(S-1)gd_{50}} \quad (3)$$

여기서, S 는 토사의 비중, g 는 중력가속도(m/s^2), d_{50} 은 중앙입경(mm), U_f 는 교란되지 않는 바닥에서의 최대 전단 속도로 식 (4)와 같다. Shields 수는 일반적으로 수평 또는 수평에 가까운 바닥에 적용되며, 이 때의 토사 입자의 이송을 어느 정도 설명할 수 있다.

$$\frac{V}{U_f} = 8.6 + 2.5 \ln\left(\frac{D}{2k_b}\right) \quad (4)$$

여기서, k_b 는 바닥조도계수로서 일반적으로 $2.5d_{50}$ 을 사용한다.

3. 실험장치 및 방법

흐름에 의한 관로의 세굴을 측정하기 위해 개수로 실험장치를 이용하여 모형실험을 수행하였다. 개수로 실험 장치의 수조제원은 그림 2와 같이 총 길이 20.0m, 높이 0.4m, 폭 0.4m 이며, 양쪽 외벽은 흐름과 세굴을 관측할 수 있는 유리로 구성되어 있다. 유속을 제어할 수 있는 유량제어 장치는 모터와 밸브 및 송수관으로 구성되어 있다.

모래를 이용하여 길이 11.0m, 높이 0.2m, 폭 0.4m의 모래하상을 제작하였고, 모래하상 전면부 약 2.0m에는 자갈을 이용하였다. 실험에 사용된 모래의 특징을 나타내면 표 1과 같다.

지름 45.0mm, 60.0mm, 90.0mm의 매끄러운 PVC 관을 사용하였고, 모형의 시작지점으로부터 6.0m의 위치에 관을 바닥과 틈이 발생하지 않도록 밀착시켜 설치하였다. 관의 양쪽 측면과 수조의 벽면을 밀착시켜 세굴이 발생하여도 관이 아래로 처지지 않도록 단단히 고정하였다.

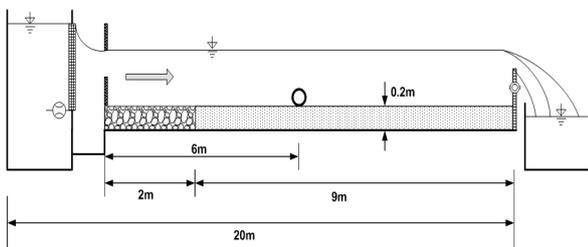


그림 2. 실험장치

표 1. 실험에 사용된 모래의 특성

비중(S)	2.63
중앙입경(d_{50})	0.68mm

유속은 0.2~0.5m/s의 범위를 갖고 0.02m/s의 간격으로 변화시켜가며 실험을 수행하였고 유속은 전자기 유속계를 이용하여 측정하였다. 3개의 관경에 대해 유속을 15단계로 변화시켜가면서 실험을 수행하여 총 45회의 실험을 실행하였고, 비정상적인 값을 나타낸 3개의 경우는 분석에서 제외하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 관로 주변의 세굴경향

관로 주변의 세굴 경향을 살펴보면, 흐름이 관로에 작용하면 얼마 지나지 않아 침식이 시작된다. 본 실험에서는 평형세굴심의 약 70% 정도가 2분 이내에 발생하였다. 세굴과정의 초기 단계에서 세굴심은 세굴공에서의 유속 증가로 인해 점점 깊어졌다. 결과적으로 관 밑에서부터 침식된 토사 입자의 퇴적에 의해 일종의 언덕이 관로 뒷부분에 형성되었다.

관로 밑의 상대적으로 강한 흐름은 관로 양쪽 측면부의 하상 토사를 침식시켰다. 실험에서 흐름에 의한 침식은 실험 개시 후 관로의 양쪽 모서리에서 곧 바로 일어나고, 그 후에 관로 밑에서의 터널형 세굴이 시작되었으며, 본격적인 세굴이 진행되었다. 이 세굴작용에 의하여 이동된 유사가 관로를 따라 서서히 쌓였고, 터널형 세굴이 점점 증가했고, 관로 하류부분의 모래언덕 또한 확장되었다.

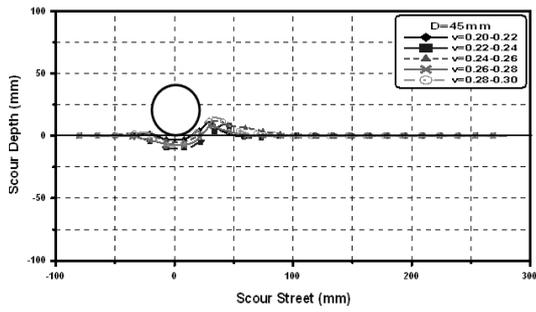
관로 밑에서의 세굴공의 크기가 커짐에 따라 관 밑에서의 유속은 점진적으로 감소하여 관로 아래에서의 유사이송은 외부와 안쪽에서 같은 양으로 발생되었고, 더 이상 세굴이 발생하지 않은 평형세굴심에 도달하였다.

세굴은 처음에는 관로의 바로 밑에서 발생했고, 시간이 지남에 따라 관로의 아래쪽으로 조금씩 이동되었다. 따라서 최종 평형세굴심의 모양은 비대칭 형태를 보이고 있고, 상류부 보다 하류부에서 좀 더 완만한 경사를 보였다.

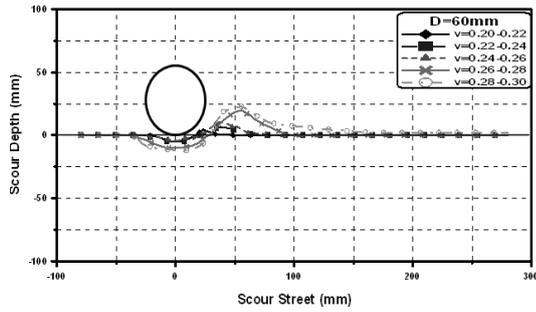
4.2 관경 및 유속에 따른 세굴심의 변화

유속범위가 일정한 경우에 관경변화에 따른 평형세굴심의 변화를 도식한 것이 그림 3~그림 5이다. 그림에서 가로 축은 관을 중심으로 세굴이 발생하는 범위를 나타내며 세로 축은 세굴심을 나타내고 있다.

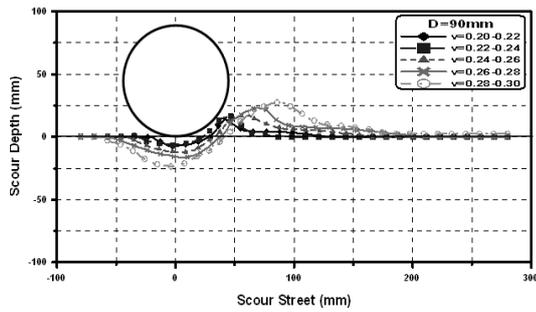
각각의 경우를 살펴볼 때 동일한 유속에서 관의 지름에 따라 평형 세굴심이 증가하고 있음을 볼 수 있으며, 수평 바닥층의 세굴 범위 역시 증가하고 있다. 본 실험에서는 전반적으로, 동일한 유속일 경우 관경이 90mm 일때 세굴심이



(a) $V=0.2\sim0.3\text{m/sec}$, $D=45\text{mm}$

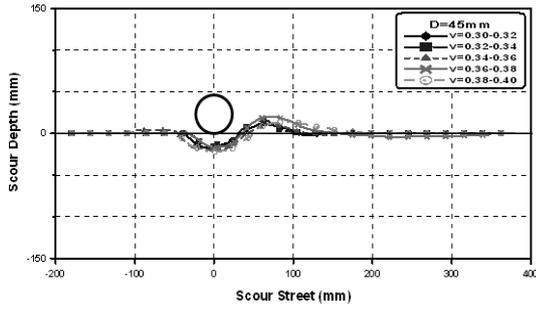


(b) $V=0.2\sim0.3\text{m/sec}$, $D=60\text{mm}$

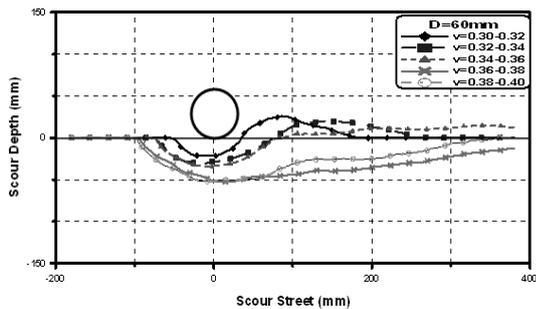


(c) $V=0.2\sim0.3\text{m/sec}$, $D=90\text{mm}$

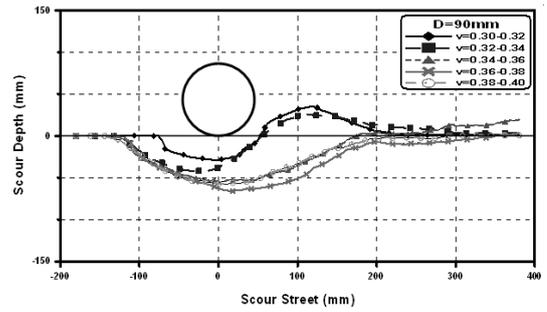
그림 3. 관경에 따른 세굴심의 변화 ($V=0.2\sim0.3\text{m/s}$)



(a) $V=0.3\sim0.4\text{m/sec}$, $D=45\text{mm}$

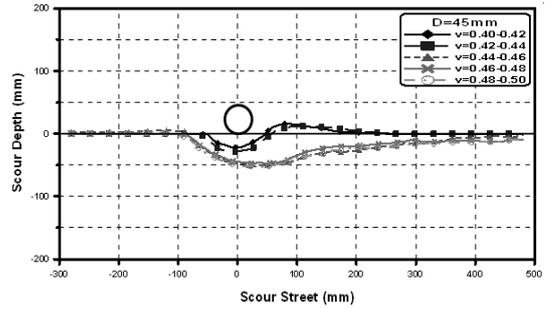


(b) $V=0.3\sim0.4\text{m/sec}$, $D=60\text{mm}$

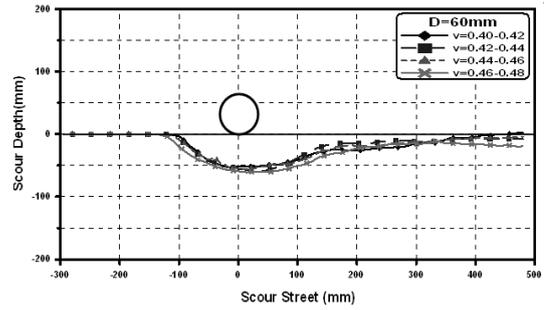


(c) $V=0.3\sim0.4\text{m/sec}$, $D=90\text{mm}$

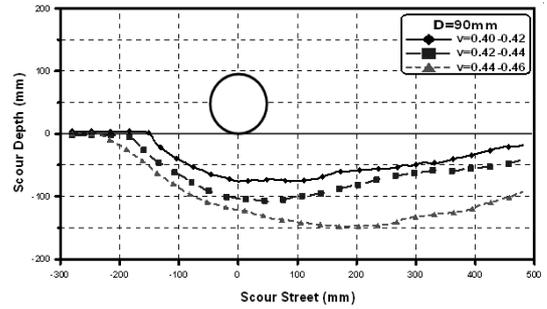
그림 4. 관경에 따른 세굴심의 변화($V=0.3\sim0.4\text{m/s}$)



(a) $V=0.4\sim0.5\text{m/sec}$, $D=45\text{mm}$



(b) $V=0.4\sim0.5\text{m/sec}$, $D=60\text{mm}$



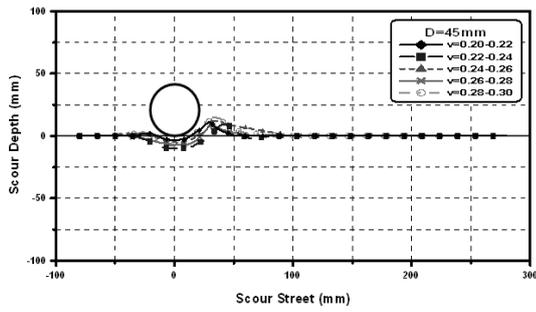
(c) $V=0.4\sim0.5\text{m/sec}$, $D=90\text{mm}$

그림 5. 관경에 따른 세굴심의 변화($V=0.4\sim0.5\text{m/s}$)

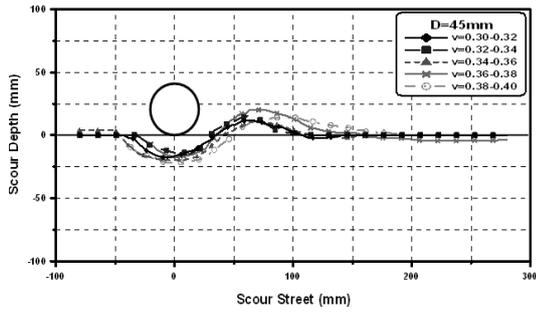
가장 높게 나왔다. 세굴심은 관의 지름과 유속에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다.

그림 6~그림 8은 실험에서 측정된, 동일 관경에서 각기 다른 유속에 따른 관로 주변의 평형세굴심을 도시한 것이다.

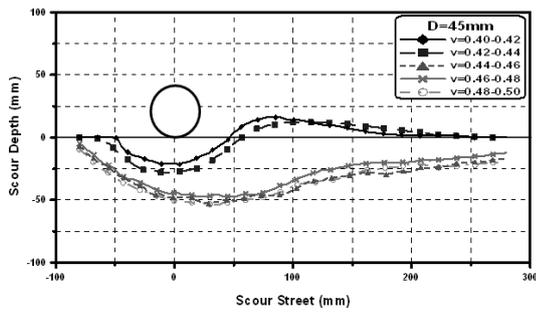
본 실험에서는 전반적으로, 동일한 관경일 경우 유속이 커질수록 세굴심이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 유속이



(a) D=45mm, V=0.2~0.3m/sec



(b) D=45mm, V=0.3~0.4m/sec

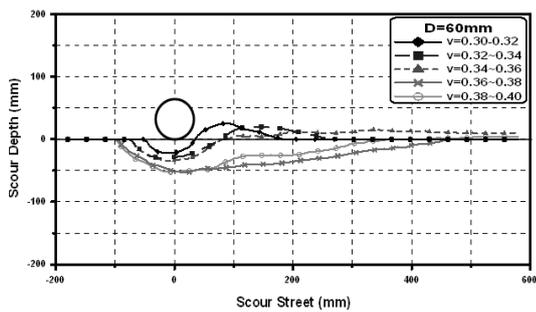


(c) D=45mm, V=0.4~0.5m/sec

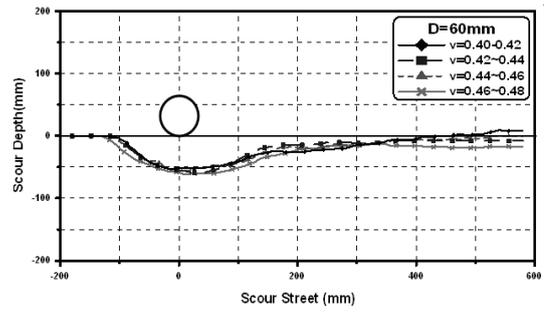
그림 6. 유속변화에 따른 세굴심의 변화(D=45mm)



(a) D=60mm, V=0.2~0.3m/sec

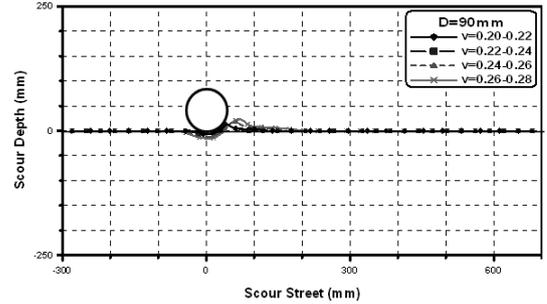


(b) D=60mm, V=0.3~0.4m/sec

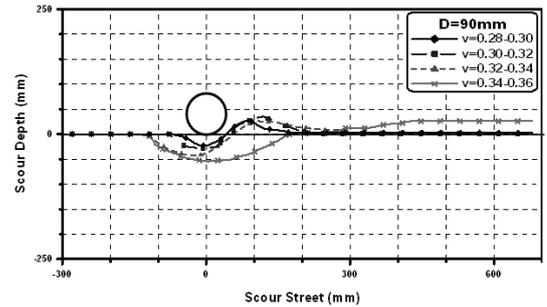


(c) D=60mm, V=0.4~0.5m/sec

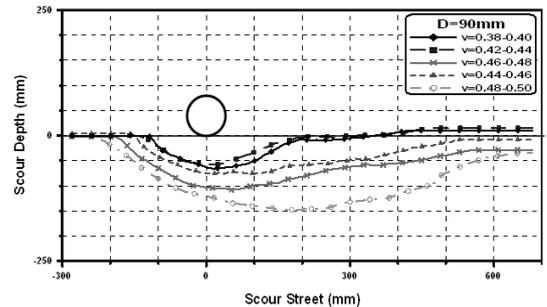
그림 7. 유속변화에 따른 세굴심의 변화(D=60mm)



(a) D=90mm, V=0.20~0.28m/sec



(b) D=90mm, V=0.28~0.36m/sec



(c) D=90mm, V=0.38~0.50m/sec

그림 8. 유속변화에 따른 세굴심의 변화(D=90mm)

커질수록 세굴심 뿐만 아니라 세굴 범위 또한 관로 뒤쪽 부분으로 크게 증가하는 것을 보이고 있다.

유속이 일정하고 관경이 변하는 경우와, 관경이 일정하고 유속이 변하는 경우의 실험결과를 비교할 때, 세굴심은 관경에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4.3 무차원 수와 상대세굴심의 관계

실험을 통해 얻어진 상대세굴심과 주요 무차원 수인 Reynolds 수, Froude 수, Shields 수와의 관계를 살펴보았다. 여기서 상대세굴심은 세굴심을 관의 직경으로 나눈 무차원 양(S/D)을 의미한다.

Reynolds 수와 상대세굴심과의 관계를 도시하면 그림 9와 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Reynolds 수가 커질수록 상대세굴심은 증가하나, 상대세굴심이 Reynolds 수에 민감하게 반응하지 않는 것으로 나타났다.

식 (5)는 그림 9에 도시된 Reynolds 수와 상대세굴심과의 관계를 회귀분석하여 나타낸 식이다.

$$\frac{S}{D} = 0.7 \times 10^{-8} Re^{3.364}, \quad R^2 = 0.456 \quad (5)$$

위 식에서 S/D 는 상대세굴심을 Re 는 Reynolds 수를 나타낸다. 위 식의 결정계수는 0.456으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 흐름조건에서 Reynolds 수와 상대세굴심 사이

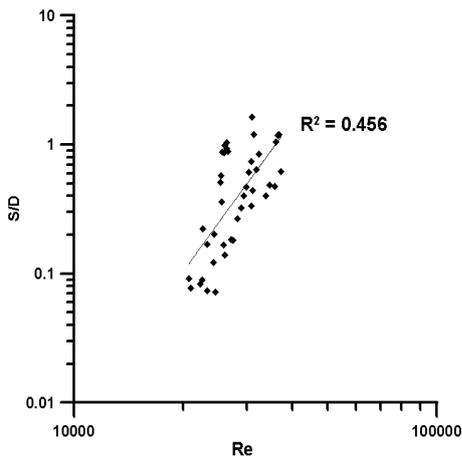


그림 9. Reynolds 수와 상대세굴심의 관계

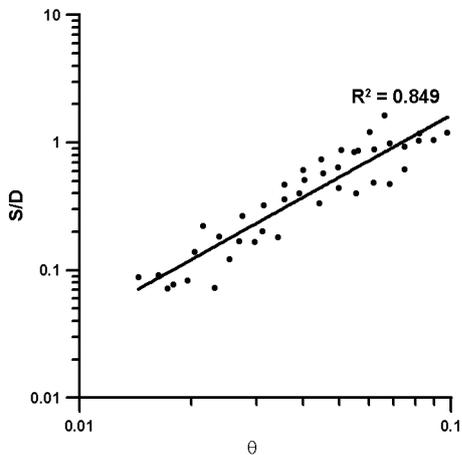


그림 10. Shield 수와 상대세굴심과의 관계

의 상관관계는 높지 않은 것을 알 수 있다.

그림 10은 Shields 수에 따른 상대세굴심의 변화를 도시한 것이다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 Shields 수가 증가할수록 상대세굴심이 증가하고 있으며, 상대세굴심이 Reynolds 수에 보다 Shield 수에 더 밀접한 상관성을 갖는 것을 알 수 있다.

그림 10에서 Shields 수와 상대세굴심과의 관계를 회귀분석하여 구하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{S}{D} = 68.45\theta^{1.82}, \quad R^2 = 0.849 \quad (6)$$

여기서, θ 는 Shields 수를 의미한다. 식 (6)에서와 같이 Shield 수와 상대세굴심의 결정계수는 0.849로 Reynolds 수보다 높게 나타났다.

그림 11은 Froude 수와 상대세굴심과의 관계를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Froude 수와 상대세굴심의 관계가 다른 두 개의 무차원 변수들보다 더 높은 상관성을 갖고 있는 것으로 나타났다.

그림 11에 나타난 Froude 수와 상대세굴심과의 관계를 회귀분석하여 나타내면 식 (7)과 같다.

$$\frac{S}{D} = 7.603Fr^{2.323}, \quad R^2 = 0.900 \quad (7)$$

위 식에서 Fr 은 Froude 수를 나타낸다. 식 (7)에서와 Froude 수와 상대세굴심 사이의 결정계수 0.900으로 나머지 두 개의 무차원 수보다 높게 나타났다. 이와 같은 이유는 관 수로를 제외한 자연계의 모든 흐름이 중력에 영향을 받는데 Froude 수가 중력의 영향을 고려할 수 있는 무차원 수이기 때문에 가장 높은 상관성을 나타낸 것으로 판단된다.

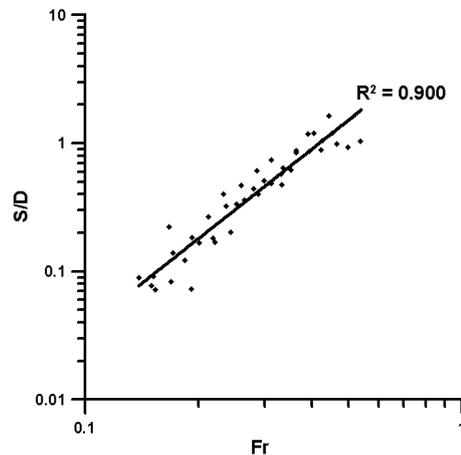


그림 11. Froude 수와 상대세굴심의 관계

5. 결 론

최근 들어 사용이 증가하고 있는 관로시설의 세굴특성을 파악하기 위해 수리모형실험을 실시하고 실험결과를 정리, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험에서 관로 설치 2분 이내에 평형세굴심의 70%에 도달하였다. 실제 시공에서도 이와 유사한 형태로 나타날 것이므로, 관로를 설치할 때는 초기 세굴량을 고려하여 공정을 계획하여야 할 것으로 판단된다.
- (2) 관로의 세굴은 유속 및 관경의 크기에 영향을 받는다. 동일관경일 때 유속이 증가하면 세굴심이 증가하고 있으며, 동일유속 일 때 관경이 증가하면 세굴심이 증가하고 있다. 또한, 실험결과를 비교할 때 관경의 증가가 세굴심의 증가에 미치는 영향이 유속의 증가보다 더 큰 것으로 나타났다.
- (3) 최대세굴심은 관의 중심에서 약간 뒤쪽에 형성되었고, 세굴범위는 관을 중심으로 상류부 보다 하류부에 더 넓게 형성되었다. 따라서, 관로의 세굴보호대책을 수립할 때는 세굴범위를 고려한 보강대책을 수립해야 하겠다.
- (4) 흐름특징을 나타내기 위해 많이 사용되는 Reynolds 수, Shields 수, Froude 수 와 상대세굴심과의 관계를 살펴 볼 때, Froude 수와 상대세굴심 사이의 상관성이 제일 높은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김경호, 김홍훈, 오현식, 연주흠 (2005), 파랑에 의한 해저 매설관로 주변의 국부세굴 특성, *한국해양·해양공학회지*, Vol. 17, No. 2, pp. 106~118.
2. 오현식, 이호진, 김경호 (2002), 파에 의한 해저관로의 국부세굴 특성, *대한토목학회 논문집*, Vol. 22, No. 4-B, pp. 539~549.
3. Bijker, E.W. and Leeuwestein, W. (1984), Interaction between Pipelines and the Seabed under the Influence of Waves and Currents, In: *Seabed Mechanics*, B. Denness, ed., Graham and Trotman, Gettysburg, Md., pp. 235~242.
4. Chiew, Y.M. (1990), Mechanics of Local Scour around Submarine Pipeline, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 4, pp. 515~529.
5. Mao, Y. (1988), Seabed Scour under Pipelines, *Proc. 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, ASME, Houston, TX, Vol. V, pp. 33~38.
6. Sümer, B.M., Truelsen, C., Shchmann, T. and Fredsøe, J. (2001), Onset of Scour below Pipelines and Self-Burial, *Coastal Engineering*, Vol. 42, No. 4, pp. 213~235.
7. Yüksel, Y., Ath, V. and Çevik, E. (1995), Flow Field along a Flat Surface with Parallel Placed Cylinder, *Proc. of 5th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Hague, Netherlands, pp. 157~170.

(접수일: 2009. 9. 1 심사일: 2009. 9. 3 심사완료일: 2009. 11. 17)