

파랑에 의한 해저 매설관로 주변의 국부세굴특성 Characteristics of the Local Scour Around Submarine Imbedded Pipelines Due to Waves

김경호* · 김홍훈* · 오현식* · 연주흠*

Kyoung Ho Kim*, Hong Hoon Kim*, Hyoun Sik Oh* and Ju Heum Yeun*

요 지 : 사실성 해저바닥 위에 관로가 설치되는 경우 자가매몰 되는 경향이 있는 것은 잘 알려진 사실이다. 본 연구는 해저에 매설된 관로 주변의 국부세굴의 특성을 실험적으로 고찰한 논문이다. 관로의 매설비에 따라 국부 세굴심을 측정하였다. 관이 매설된 경우의 국부세굴에서는 배후류가 세굴에 큰 영향인자로 작용하는 것으로 나타났다. 일반적으로 세굴심은 매설비가 클수록 감소하는 경향을 나타내었다. 실험결과를 이용해서 상대 세굴심과 K-C수 및 수정 Ursell 수의 상관성을 알아보고 이들의 관계식도 도출하였다. 실험결과 K-C수 및 수정 Ursell 수가 증가할수록 세굴영역이 확장되고 세굴심이 증가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : K-C 수, 수정 Ursell 수, 국부세굴, 세굴심, 매설관로, 매설비

Abstract : It is well-known that when pipelines are positioned on a sandy seabed, they have a tendency to bury themselves. This paper presents the results of an experimental investigation on the characteristics of the local scour around the submarine imbedded pipelines exposed to waves. Scour depths were measured according to the imbedment ratios of the pipelines. The results indicated that the effect of lee-wake of the pipe is the key element in the scour process of the submarine imbedded pipelines. In general, scour depths are smaller as the imbedment ratios are larger. Using the experimental results, the relative scour depths are related to Keulegan -Carpenter number and modified Ursell number, and the empirical equations are established. These equations show that the relative scour depths are proportional to above two parameters and the scour region is extended as Keulegan -Carpenter number and modified Ursell number are larger.

Keywords : K-C number, modified Ursell number, local scour, scour depth, imbedded pipelines, imbedment ratio

1. 서 론

해저 관로는 원유, 가스, 물 및 공기 등, 각종 유체의 수송은 물론이고 육상으로부터의 산업폐기물이나 온배수의 방출에 이용되고 있으며, 근래 해저의 광케이블을 이용한 정보의 이동·전달에 이용되고 있어 해안공학에서 매우 중요한 관심대상중 하나로 부상하고 있다. 해저 관로는 설치된 지역의 해양환경에 견디면서 그 기능을 원활히 수행하여야 하기 때문에 여러 가지 특수한 사항들을 고려하여 설계하여야 한다. 해저관로를 설치할 경우 설계

과정에서 고려되어야 할 가장 중요한 요소 중의 하나가 세굴이다. 해저 관로의 하부에서 국부세굴이 발생하면 관로는 동수력에 의해 진동하거나 자가매몰에 의해 정적·동적 하중이 부가되어 관로의 파괴를 유발할 수도 있다. 이러한 세굴이 해저관로에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 국부세굴에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 인자들에 대한 충분한 검토가 선행되어야 한다.

해저에 놓인 관로의 세굴에 대한 연구는 크게 흐름이 정상(steady)인 상태와 파(wave)가 작용할 때에 대한 연구로 나눌 수 있다. Chao and Hennessy(1972)는 2차원

*충북대학교 토목공학과(Corresponding author: Kyoung Ho Kim, Department of Civil Engineering, Chung-Buk National University, Cheongju, Korea. coastal@cbucc.chungbuk.ac.kr)

포텐셜 흐름 이론에 기초하여 흐름상태에서 해저관로의 최대 세굴심을 검토하기 위해서 해석적인 방법을 고안하였고, Kjeldsen 등(1973)은 1차원 흐름에서 해저관로의 국부세굴을 연구하기 위해 수리실험을 수행하였다. 그들이 제시한 식은 세굴심을 유속과 관의 직경과의 관계로 나타내었고, 수심과 토사입자의 크기 효과는 무시하였다. Littlejohns(1977)는 평형세굴심을 정상류 상태에서 측정하였고, Bijker and Leeuwestein(1984)은 한 방향 흐름 조건에서 관의 일부가 해저면에 묻혀있는 경우에 대한 실험을 통하여 세굴심과 유속, 수심, 관경, 관의 매설깊이와 같은 매개변수에 대한 관계를 경험식으로 제시하였다. Ibrahim and Nalluri(1986)는 해저관로의 국부세굴에 대한 실험을 광범위하게 실행하여 세굴심에 대한 실험식을 제안하였고, Mao(1986)는 수조를 이용한 실험에서 유속의 변화에 대하여 해저관로에 형성되는 세굴공의 모양을 관찰하였다. Sumer et al.(1988)과 Kristiansen(1988)은 유체력에 의해 진동하는 관로에서의 세굴에 대한 연구를 하였고, Mao(1988)는 관 측면 상·하류의 압력차가 관 밑으로의 침투의 원인이 된다는 결론을 얻었고, Chiew(1991)는 최대세굴심은 허용 전단응력이 한계 전단응력과 같아질 때 발생한다고 결론지었다.

정상흐름 상태에서의 관로 주위의 흐름은 집중적으로 연구되어 왔지만 파가 존재하는 상태에서의 관로 주변에 대한 연구는 상대적으로 폭 넓게 이루어지지 못하였다. 그러나 최근 다각적인 측면에서의 연구가 활발히 진행되고 있다. Herbich(1981)는 여러 가지 해안경사 및 파랑조건에 대한 2차원 수리모형 실험을 실시하였다. 실험에서 해저관로에 대한 파의 입사각, 수심, 매설심도와 쇄파대와 관련된 매설위치 등을 고려하였으며, 해저관로 주위는 구조물과 토사의 상호작용으로 부분적인 세굴이 발생한다고 결론지었다. Lucassen(1984)은 조파수조 실험을 통해서 체계적으로 정리되지는 않았지만, 세굴자료를 무차원 형태로 제시한 바 있다. 파에 의해 유발되는 세굴에 대한 집중적인 연구는 Sümer and Fredsøe(1990)에 의해 수행되었는데, 그들은 모래입자의 크기를 고려한 정상흐름과 파가 작용하는 경우에서의 세굴실험을 실시하여 관의 직경과 위치 및 시간에 따른 세굴패턴의 변화를 비교·분석하였고, 그 결과 이동상 조건에서 평형세굴심을 결정하는 중요 매개변수는 KC (Keulegan-Carpenter number, KC) 수이며, 관의 표면 조도는 실제로 세굴 과정에 영향을 미치지 않는다고 결론지었다. Sümer et al.(1993)은 원형, 구형, 삼각형의 단면을 갖는 파일에 대한 상대세굴심의 변

화를 측정하였다. 한편, Çevik and Yüksel(1999)은 규칙과 실험결과에 기초하여 수정 Ursell수를 구하고 이것을 이동상에 대한 상대세굴심 산정에 적용하였다. Sümer and Fredsøe(2001)는 정상흐름과 파가 존재하는 경우에 대한 세굴의 발생과 매몰(self-burial)에 대하여 상세한 실험을 하였다. 이 실험에서, 관로의 상승류와 하강류 측에서의 압력차가 관로 밑에서의 침투흐름을 발생시키며 이러한 흐름이 과도하게 일어날 경우 관공작용이 발생하고 그 결과 관로 밑에서 세굴이 발생한다고 결론지었다.

본 연구에서는 천해역에서 파가 작용하는 경우 해저관로 주변의 세굴 특성을 고찰하였다. 국부세굴에 영향을 미치는 각종 매개변수를 선정하고 관의 직경에 변화를 주면서 세굴심을 측정하였다. 특히 본 연구에서는 관을 해저면에 매설하고 환경에 대한 관의 매설 깊이의 비, 즉 상대매설비에 따른 국부세굴의 변화 특성을 알아보고, 또한 상대 매설심, KC 수 및 Ursell수에 대한 관계도 살펴보았다. 이러한 무차원 매개변수들과 상대 매설심과의 관계분석을 통해 상대 세굴심에 대한 실험식도 함께 제시 하였다.

2. 세굴에 관련된 무차원 매개변수

해양구조물의 세굴 현상은 지질학적 특성과 해저하상의 유동은 물론 수리학적 조건에 의해서도 영향을 받게 되는 종합적 과정으로 생각할 수 있다. 세굴현상을 예측하기 위해서는 와류 이론에 기초한 해석적 접근 방법이 타당하지만 와류(Vortex)를 일으키는 원인이 다양하고 세굴심과 와류형성과의 관계를 수치적으로 나타내는데 어려움이 있다. 따라서 와류 이론과 실험 데이터와의 연계를 통한 상관성을 이끌어 내거나, 실험 또는 실측을 통하여 세굴을 일으키는 매개변수를 도출하고 이들의 차원 해석을 통하여 Fr 수나 KC 수, 수정 Ursell 수와 같은 무차원 매개변수들을 이용한 공식들이 주로 이용되고 있다.

파에 의한 세굴을 일으키는 영향인자는 유체의 특성이나 관로 주변의 흐름, 하상재료 및 관로 형상의 특성 등으로 대별되며, 세굴심과의 함수적인 관계는 다음과 같다.

$$S/D = f(Re, \theta, KC, d/H, H/D, e/D, H/L) \quad (1)$$

여기서 d 는 수심, H 는 파고, D 는 관로의 직경, e 는 관의 매설깊이이며, L 은 파장을 나타낸다. 따라서 S/D 는 상대세굴심, d/H 는 수심 매개변수, H/D 는 상대파고, e/D 는 관의 매설비, H/L 은 파경형사를 나타내는 무차원 매개변수

이며 Re 및 θ 는 각각 레이놀드 수 및 Shields수를 나타낸다.

선행 연구들에서 상기 매개변수와 세굴심과의 관계에 대해 많은 실험이 실시되었으며, 그에 대한 결과를 다수 제시하고 있다. Sümer and Fredsøe(1990)는 세굴진행이 관의 조도에 의해서 실질적인 영향을 받는 지를 알아보기 위한 조도실험을 실시하였고, 그 결과 조도는 세굴심에 영향을 주지 못한다는 사실을 밝혔다. 그리고 한 방향 흐름인 경우에 관 주위의 상대 세굴심은 레이놀드 수에 관계되나, 파가 작용할 경우 바닥의 최고속도와 관경을 이용하여 정의되는 레이놀드 수에 의한 세굴심의 변화는 아주 미약하며, 상대 세굴심 사이의 상관관계가 명확하지 않다고 보고되고 있다(Sümer and Fredsøe, 1990). 한편 토사입자의 이동 여부를 판단할 수 있는 함수로서 Shields 수를 들 수 있다. Shields 수는 일반적으로 세굴과정의 시간축척에 대해서는 비교적 크게 영향을 미친다. 따라서 평형 세굴심이 같다고 하더라도 Shields 수에 따라 세굴과정의 시간축척이 다를 수 있다. 그러나 Sümer and Fredsøe (1990)는 실험 결과 Shields 수가 상대세굴심에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 세굴과정에 있어서 Shields 수의 효과는 무시되었다.

Sümer and Fredsøe(1990)는 파에 의해 반주기 마다 진동하는 흐름장에서 와류 형태의 확장과 그 형상은 KC 수에 의해 결정되는 것을 밝히고, 파에 의한 이동상 조건의 평형세굴심을 결정하는 주요 매개변수로서 KC 수를 제안하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 보다 큰 KC 수에서 더 큰 와열길이(L_w)와 세굴심(S)을 가지며, 세굴 영역은 반주기 동안 배후류에 의한 영향을 받게 된다. 또한, 관로 주변의 세굴공이 KC 수의 증가에 따라 좌우 대칭의 완만한 경사를 갖는 것을 알 수 있다. KC 수는 다음 식으로 정의된다.

$$KC = \frac{2\pi a}{D} = \frac{U_b T}{D} \tag{2}$$

여기서 a 는 파의 진폭이고, U_b 는 해저 바닥에서의 최대

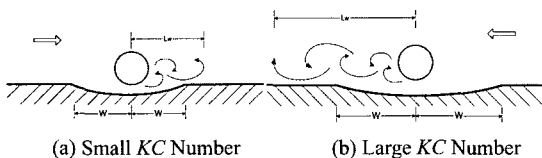


Fig. 1. Streamwise Extent caused by Lee-Wake.

수입자 속도, T 는 파의 주기이며, D 는 관의 직경이다. KC 수의 값이 매우 작은 경우 관으로 인한 상승류는 형성되지 않거나 작게 나타난다. 반면에 보다 큰 KC 수에 대해서는 관의 측면상에 와열(Vortex street)이 형성된다. 세굴공의 경사가 좀 더 완만해 질 경우, 관로 하부의 흐름장은 외부 흐름에 대한 영향이 증가하게 될 것이다. 따라서 관 밑의 유속은 증가하게 되고, 세굴 또한 증가하게 된다. Sümer and Fredsøe(1990)는 KC 수에 대한 상대 세굴심의 변화의 실험을 통해서 다음 식을 제시한 바 있다.

$$S/D = 0.1\sqrt{KC} \tag{3}$$

Çevik 등(1999)은 천수변형 조건에서 실험을 통하여 KC 수에 따른 상대세굴심과의 변화를 분석하고, 경사진 해안에서 KC 수와 상대 세굴심과의 관계에 상당한 분산을 보이고 있음을 지적하였다. 따라서 관 주위의 와류 형성이 경사 해변에서 관로 밑의 침식을 일으키는 유일한 기구가 아니며, 입자속도의 증가에 따른 증가된 토사 이송량 또한 세굴심을 증가시키는 원인으로 보았다. 이에 따라 새로운 지배 매개변수로서 Ursell 수를 제시하였다. Ursell 수(U_R)는 파에 의해 발생하고 해저로 전달되는 에너지의 크기를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$U_R = \frac{HL^2}{d^3} \tag{4}$$

Çevik 등(1999)은 실험결과를 통하여 관의 직경이 세굴심에 영향을 주는 주요 인자인 것을 밝혀내고 식 (4)로 표시되는, Ursell수에 관경 D 를 포함시켜 표현하였다. Çevik등은 상대파고를 이용하여 식 (5)와 같이 무차원 매개변수를 정의하고 이를 수정 Ursell수라 불렀다.

$$U_{RP} = U_R \left(\frac{H}{D}\right)^2 = \frac{H^3 L^2}{d^3 D^2} \tag{5}$$

3. 실험장치 및 실험방법

실험은 높이와 폭이 각각 1.0 m 및 0.8 m이고 길이가 25 m인 조파 수조를 이용하여 수행되었다. Fig. 2와 같은 2차원 조파 수조에 높이 0.2 m의 해저면 모형을 제작하고 그 위에 모형 관을 매설하고 국부세굴에 대해 실험하였다. 관의 직경에 의한 세굴특성을 알아보기 위해 직경이 $D=25, 38, 60$ 및 90 mm인 4개의 PVC관을 이용하였고 또한 관의 매설 깊이에 따른 세굴특성을 규명하기 위해 각 관경에 대해서 매설비의 값을 $1/6, 1/3, 1/2$ 로 달리

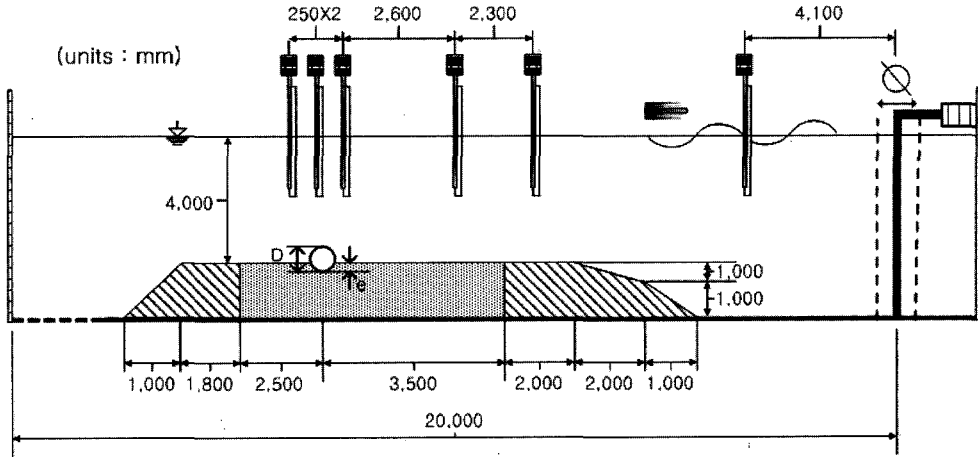


Fig. 2. Schematic description of experimental setup.

하였고 각 경우에 대해 파고 및 주기를 달리하면서 실험을 수행하였다. 파고는 용량식 파고계를 이용하여 측정되었고 관을 중심으로 3개, 모형관 전면에 2개 그리고 심해파 측정용으로 1개가 설치되었으며 그 설치위치는 Fig. 2와 같다. 그림에서 D 는 관의 직경이고 e 는 매설깊이를 나타낸다. 세굴 전후의 단면 변화는 사면계를 이용하여 기준면에서 바닥까지의 거리를 관을 중심으로 5 mm 간격으로 측정하였다. 저면 바닥 속도는 측정범위 $u = \pm 200$ cm/s인 전자유속계를 사용하여 0.05~0.1 sec의

시간 간격으로 측정하였다. 본 실험에 이용된 저면 재료는 $d_{50} = 0.85$ mm, $d_{90} = 3.2$ mm이고 기하표준편차 $\sigma_g = 2.96$ 의 특성을 갖는 모래이다. 평형 세굴심을 얻기 위해서 각 실험 조건에 대해서 최소 1000개의 파를 발생시켰으며 본 실험의 조건은 Table 1과 같다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 매설된 관로 주변의 국부세굴특성

본 연구에서 평형세굴심(S)은 원래의 해저면에 대한 세굴 깊이로서 어느 한계과 이상이 오더라도 더 이상 변화가 없는 최대 세굴심을 말한다. 터널형 세굴에서는 관의 바로 밑에서 발생하고 기타 세굴에서는 관의 배후부에서 발생하였다. 세굴이 시작되는 시점은 하상재료의 특성에 따라 각각 다르나, 700개 정도의 파가 진행하였을 때 평형세굴심의 80%정도의 세굴이 발생되었다. 관로를 매설하였을 때의 세굴은 관로가 바닥에 밀착되어 놓여있는 경우와는 세굴형태가 다르게 나타났다. 바닥에 밀착되어 놓여진 경우의 세굴의 시작은 관로의 양 측면에서 침식이 일어나며, 관로 밑으로의 침투류(seepage flow)에 의해 터널형 세굴(tunnel scour)이 발생하는 반면(오현식 등, 2002), 관로가 매설된 이번 실험에서는 관로 양 측면에서의 침식 정도가 매설되지 않은 경우보다 현저하게 작았다. 거의 모든 경우에서 최종 평형 세굴심의 모양은 비대칭 형태를 보이고 있으며, 상승류 부분 보다 하강류 부분에서 좀 더 완만한 경사를 보이고 있다. 이것은 관 측면에서 발생하여 반주기마다 관로의 양 측면을 침식시키

Table 1. Experimental condition for the local scour

Scour condition Case No.	Pipe diameter (mm)	Embedment ratio	Wave period (sec)
Case 1	25	1/6	2.5
			3.0
			3.5
			4.0
			4.5
Case 2	38	1/2	5.0
			1.0
			3.0
			4.0
			4.5
Case 3	60	1/3	3.0
			5.0
			1/2
			5.0
Case 4	90	1/6	3.0
			1/3
			1/2

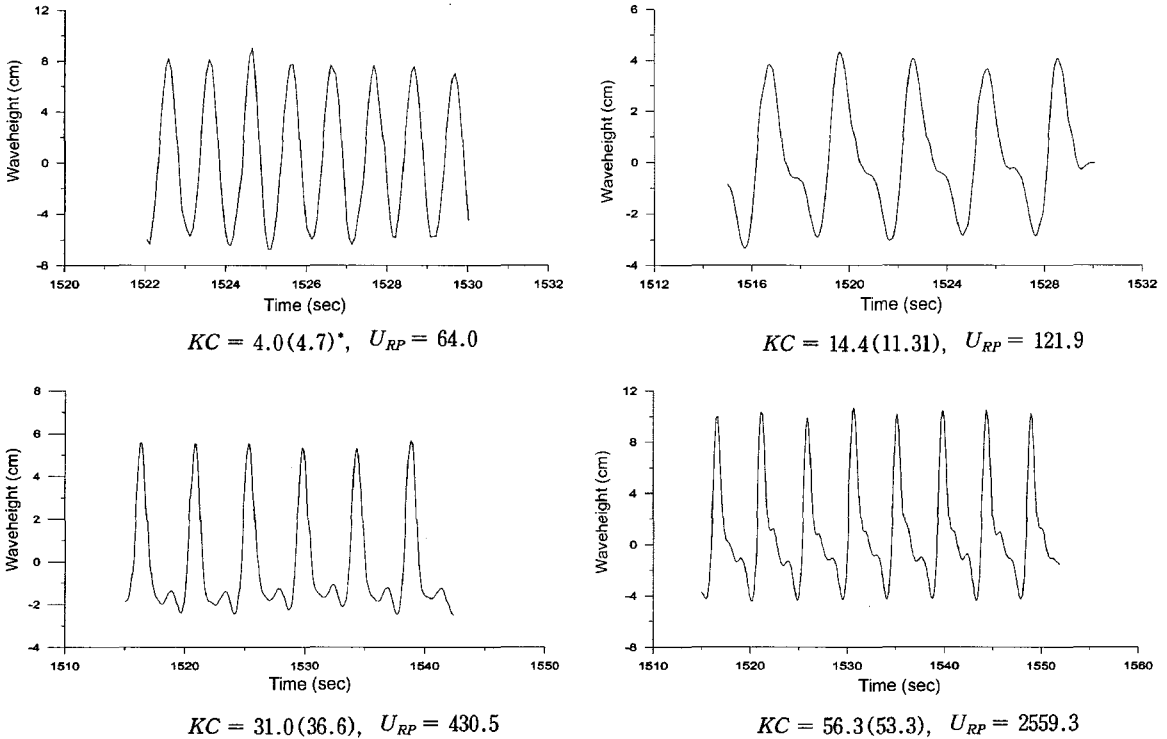


Fig. 3. Wave height patterns for time series: D=38 mm.

는 배후류의 강도가 다르다는 것을 의미한다. 파의 비선형으로 인해 파봉에서의 수립자 속도는 파곡에서의 수립자 속도보다 크기 때문에 배후류의 강도는 관의 양 쪽 측면에서 다르게 나타난다. 배후류의 이러한 차이는 비대칭적인 세굴 단면의 원인이 된다고 볼 수 있다. 실험결과 이러한 이유로 인하여 대부분의 최대 세굴심이 관로의 뒤쪽에 형성되는 경향을 보이고 있다. Fig. 3은 관경이 D=38 mm인 관로가 설치된 위치에서 측정된 파형의 일부를 도시한 것으로서 상기한 사실을 잘 설명해주고 있다.

그림에서 KC수는 선형파이론에 의해 구한 값이며, 팔호안의 값은 측정된 바닥속도를 이용하여 구한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 KC수와 수정 Ursell수가 클수록 파가 비선형, 비대칭이 되며, 이것이 세굴단면의 형성에 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 실험결과를 이용하여 얻어진 국부세굴에 영향을 미치는 각 매개 변수들의 값을 정리하여 Table 2에 제시하였고, 변수에 붙은 첨자 *는 실측한 바닥속도를 이용하여 산정한 값이다.

4.2 주요 세굴 영향인자에 따른 세굴심의 변화 양상

Fig. 4~Fig. 9는 관경이 D=25 mm, D=38 mm, D=60 mm, D=90 mm일 때, 매설깊이를 관경의 1/6, 1/3, 1/2로 변화시키고, 파고와 주기를 변화시켜 가며 평형세굴심을 측정 한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4~Fig. 7은 대부분의 실험에서 나타난 일반적인 세굴 형태를 나타낸 것으로 관로 밑으로 터널형의 세굴이 발생하지 않았고, 관로의 앞부분의 세굴깊이에 비해 관로 뒤 부분의 세굴깊이가 더 크게 나타남을 볼 수 있다. 이런 현상의 원인으로는 관로의 앞에 발생하는 와류보다는 관로의 뒤에 발생하는 배후류의 강도가 더 크기 때문에 관로의 뒤 부분의 세굴이 더 크게 발생한다고 할 수 있다. 세굴깊이는 주기와 파고가 커질수록 커지고, 대부분의 경우 매설깊이가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 Bijker와 Leeuwestein (1984)의 연구와 동일한 경향을 나타내는 것이다. Fig. 8~Fig. 9는 각각 터널형 세굴이 발생한 경우와 관로가 매몰된 경우의 형태를 나타낸 것이다. 본 연구에서 터널형 세굴은 관로를 수평바닥에 밀착하여 설치하거나, 바닥과의 공간을 두어 설치했을 때

Table 2. Experimental data for parameters influence on scour ($d_{50} = 0.85$ mm)

Test No.	Period T (sec)	Pipe diameter D (m)	Embedment ratio e/D	Eq. Scour depth (m)	U_b (m/s)	U_{b*} (m/s)	Wave Height (cm)	KC	KC_*	U_{RP}	S/D	Re	Re_*
1	1.0	0.038	1/2	0.0035	0.138	0.159	12.80	3.6	4.2	48.637	0.092	5244.0	6023.0
2	1.0	0.038	1/3	0.0065	0.152	0.159	14.03	4.0	4.2	64.048	0.171	5776.0	6023.0
3	1.0	0.038	1/6	0.0055	0.161	0.159	14.79	4.2	4.2	75.031	0.145	6118.0	6023.0
4	3.0	0.060	1/6	0.0020	0.163	0.143	6.24	8.2	7.2	35.073	0.033	9780.0	8598.0
5	3.0	0.060	1/2	0.0025	0.165	0.143	6.26	8.3	7.2	35.411	0.042	9900.0	8598.0
6	3.0	0.060	1/3	0.0040	0.167	0.143	6.35	8.4	7.2	36.961	0.067	10020.0	8598.0
7	3.0	0.090	1/2	0.0045	0.263	0.224	9.95	8.8	7.5	63.198	0.050	23670.0	20187.0
8	3.0	0.090	1/3	0.0090	0.265	0.224	10.07	8.8	7.5	65.512	0.100	23850.0	20187.0
9	3.0	0.090	1/6	0.0100	0.267	0.224	10.14	8.9	7.5	66.888	0.111	24030.0	20187.0
10	3.0	0.090	1/6	0.0170	0.335	0.302	12.74	11.2	10.1	132.661	0.189	30150.0	27189.0
11	3.0	0.090	1/3	0.0175	0.337	0.302	12.78	11.2	10.1	133.914	0.194	30330.0	27189.0
12	3.0	0.090	1/2	0.0125	0.356	0.302	13.52	11.9	10.1	158.550	0.139	32040.0	27189.0
13	3.0	0.038	1/3	0.0095	0.165	0.143	6.33	13.0	11.3	91.278	0.250	6270.0	5445.4
14	3.0	0.060	1/3	0.0085	0.265	0.224	10.08	13.3	11.2	147.842	0.142	15900.0	13458.0
15	3.0	0.060	1/6	0.0055	0.274	0.224	10.38	13.7	11.2	161.439	0.092	16440.0	13458.0
16	3.0	0.060	1/2	0.0080	0.277	0.224	10.52	13.9	11.2	168.060	0.133	16620.0	13458.0
17	3.0	0.038	1/2	0.0115	0.176	0.143	6.71	13.9	11.3	108.723	0.303	6688.0	5445.4
18	3.0	0.038	1/6	0.0100	0.183	0.143	6.97	14.4	11.3	121.857	0.263	6954.0	5445.4
19	3.0	0.060	1/6	0.0260	0.379	0.302	14.36	19.0	15.1	427.445	0.433	22740.0	18126.0
20	3.0	0.060	1/2	0.0260	0.388	0.302	14.73	19.4	15.1	461.345	0.433	23280.0	18126.0
21	3.0	0.060	1/3	0.0275	0.395	0.302	15.02	19.8	15.1	489.133	0.458	23700.0	18126.0
22	3.0	0.038	1/2	0.0205	0.263	0.224	9.97	20.8	17.7	356.647	0.539	9994.0	8523.4
23	3.0	0.038	1/3	0.0175	0.265	0.224	10.06	20.9	17.7	366.393	0.461	10070.0	8523.4
24	3.0	0.038	1/6	0.0170	0.267	0.224	10.19	21.1	17.7	380.781	0.447	10146.0	8523.4
25	5.0	0.038	1/6	0.0195	0.169	0.149	4.95	22.2	19.5	126.069	0.513	6422.0	5643.0
26	5.0	0.038	1/3	0.0185	0.176	0.149	5.15	23.2	19.5	141.976	0.487	6688.0	5643.0
27	5.0	0.038	1/2	0.0185	0.181	0.149	5.26	23.8	19.5	151.269	0.487	6878.0	5643.0
28	3.0	0.038	1/6	0.0135	0.314	0.302	11.95	24.8	23.9	614.125	0.355	11932.0	11479.8
29	3.0	0.038	1/2	0.0080	0.323	0.302	12.24	25.5	23.9	659.929	0.211	12274.0	11479.8
30	3.0	0.038	1/3	0.0330	0.346	0.302	13.18	27.3	23.9	823.946	0.868	13148.0	11479.8
31	2.5	0.025	1/3	0.0250	0.291	0.203	12.20	29.1	20.3	1019.944	1.000	7275.0	5080.0
32	2.5	0.025	1/2	0.0300	0.300	0.203	12.58	30.0	20.3	1118.249	1.200	7500.0	5080.0
33	3.0	0.025	1/3	0.0090	0.256	0.224	9.70	30.7	26.9	758.849	0.360	6400.0	5607.5
34	4.5	0.038	1/3	0.0220	0.262	0.309	8.01	31.0	36.6	430.543	0.579	9956.0	11738.2
35	2.5	0.025	1/6	0.0190	0.312	0.203	13.07	31.2	20.3	1254.075	0.760	7800.0	5080.0
36	3.0	0.025	1/2	0.0105	0.260	0.224	9.93	31.2	26.9	814.119	0.420	6500.0	5607.5
37	3.0	0.025	1/6	0.0165	0.263	0.224	9.97	31.6	26.9	823.997	0.660	6575.0	5607.5
38	4.5	0.038	1/2	0.0220	0.284	0.309	8.73	33.6	36.6	557.394	0.579	10792.0	11738.2
39	5.0	0.060	1/6	0.0660	0.460	0.420	13.35	38.3	35.0	991.978	1.100	27600.0	25176.0
40	5.0	0.060	1/2	0.0540	0.470	0.420	13.63	39.2	35.0	1055.713	0.900	28200.0	25176.0
41	5.0	0.060	1/3	0.0680	0.475	0.420	13.79	39.6	35.0	1093.330	1.133	28500.0	25176.0
#42	4.0	0.038	1/3	0.0575	0.380	0.445	12.40	40.0	46.8	1252.931	1.513	14440.0	16898.6
#43	4.0	0.038	1/2	0.0585	0.382	0.445	12.43	40.2	46.8	1262.047	1.539	14516.0	16898.6
#44	4.0	0.038	1/6	0.0535	0.392	0.445	12.76	41.3	46.8	1365.256	1.408	14896.0	16898.6
45	4.5	0.038	1/6	0.0255	0.395	0.309	12.10	46.8	36.6	1484.142	0.671	15010.0	11738.2

Table 2. (continued)

Test No.	Period T (sec)	Pipe diameter D (m)	Embedment ratio e/D	Eq. Scour depth (m)	U_b (m/s)	U_{b*} (m/s)	Wave Height (cm)	KC	KC^*	U_{RP}	S/D	Re	Re_*
46	4.5	0.038	1/3	0.0640	0.395	0.462	12.11	46.8	54.7	1487.825	1.684	15010.0	17563.6
47	4.5	0.038	1/2	0.0655	0.400	0.462	12.24	47.4	54.7	1536.256	1.724	15200.0	17563.6
48	4.5	0.038	1/6	0.0700	0.436	0.462	13.37	51.6	54.7	2002.229	1.842	16568.0	17563.6
49	5.0	0.038	1/3	0.0640	0.424	0.420	12.27	55.8	55.2	1920.115	1.684	16112.0	15944.8
50	4.5	0.038	1/2	0.0325	0.475	0.450	14.51	56.3	53.3	2559.303	0.855	18050.0	17115.2
#51	5.0	0.038	1/6	0.0640	0.443	0.444	12.83	58.3	58.4	2195.197	1.684	16834.0	16856.8
52	5.0	0.038	1/6	0.0610	0.445	0.420	12.96	58.6	55.2	2262.604	1.605	16910.0	15944.8
#53	5.0	0.038	1/3	0.0630	0.445	0.444	12.95	58.6	58.4	2257.371	1.658	16910.0	16856.8
54	4.5	0.038	1/6	0.0250	0.499	0.450	15.31	59.1	53.3	3006.388	0.658	18962.0	17115.2
#55	5.0	0.038	1/2	0.0610	0.458	0.444	13.29	60.3	58.4	2439.880	1.605	17404.0	16856.8
#56	4.0	0.025	1/2	0.0525	0.382	0.445	12.48	61.1	71.2	2951.162	2.100	9550.0	11117.5
57	5.0	0.038	1/2	0.0645	0.465	0.420	13.49	61.2	55.2	2551.699	1.697	17670.0	15944.8
58	4.5	0.038	1/3	0.0300	0.537	0.450	16.48	63.6	53.3	3749.653	0.789	20406.0	17115.2
#59	4.0	0.025	1/6	0.0445	0.411	0.445	13.42	65.8	71.2	3669.500	1.780	10275.0	11117.5
60	3.5	0.025	1/2	0.0090	0.473	0.378	16.55	66.2	52.9	5214.079	0.360	11825.0	9447.5
#61	4.0	0.025	1/3	0.0470	0.421	0.445	13.73	67.4	71.2	3929.714	1.880	10525.0	11117.5
62	3.5	0.025	1/6	0.0175	0.483	0.378	16.83	67.6	52.9	5483.224	0.700	12075.0	9447.5
63	3.5	0.025	1/3	0.0145	0.483	0.378	16.86	67.6	52.9	5512.598	0.580	12075.0	9447.5
64	5.0	0.025	1/2	0.0580	0.455	0.420	13.22	91.0	83.9	5548.494	2.320	11375.0	10490.0
*65	4.5	0.025	1/3	0.0350	0.581	0.462	17.80	104.6	83.2	10916.079	1.400	14525.0	11555.0
*66	4.5	0.025	1/6	0.0405	0.585	0.462	17.91	105.3	83.2	11119.708	1.620	14625.0	11555.0
*67	4.5	0.025	1/2	0.0405	0.595	0.462	18.23	107.1	83.2	11726.453	1.620	14875.0	11555.0
68	5.0	0.025	1/3	0.0670	0.564	0.420	16.36	112.8	83.9	10515.518	2.680	14100.0	10490.0
69	5.0	0.025	1/6	0.0620	0.605	0.420	17.53	121.0	83.9	12936.790	2.480	15125.0	10490.0

와 같이 관로 밑으로의 침투류에 의한 관공현상으로 인하여 발생한 것은 아니다. 반면에 본 연구에서의 터널형 세굴은 실험 초반에서 중반까지는 실험의 다른 일반적인 형상과 동일한 경향을 보이나, 배후류가 강하게 발달하여 관 후면의 와류가 관로의 저부를 침식시킴으로써 관로의 뒤 쪽에서 시작되어 관로의 앞 쪽으로 세굴이 진행하여 터널형 세굴이 발생하였다. Fig. 10은 터널형 세굴이 발생하는 과정을 시간에 따라 나타낸 것이다. 관로가 매몰된 경우, 터널형 세굴이 발생한 경우와 마찬가지로 실험 초반에는 대부분의 경우와 같은 양상을 보이나, 대략 300과 이상이 진행하였을 때부터 과가 진행할 때 처음 반주기에 관로 뒤에서 침식된 토사가 관로 후면에서 발생한 강한 와류로 인해 관경의 2배 이상 솟아올라 흐름이 관로의 앞 쪽으로 향하는 후반 반주기 동안에 관로의 앞부분으로 이동하여 쌓이고, 또 모형의 시작부에서부터 토사가 이동하여 관로 앞에 퇴적되어 관로를 매몰시켰다.

4.3 KC 수 및 수정 Ursell 수에 따른 상대세굴심의 변화

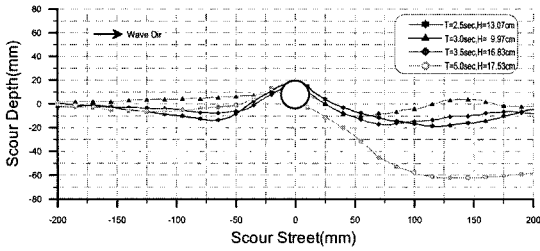
실험에서 측정된 결과 값들의 분석을 통하여 선형과 이론을 적용하여 구한 KC 수와 바닥속도 측정에 의해 구한 KC 수 (KC^*), 수정 Ursell 수 (U_{RP})와 상대세굴심(S/D)과의 관계를 살펴보았다. Fig. 11~Fig. 13은 KC 수에 대한 상대세굴심의 관계를 매설비(e/D)에 따라 각각 도시한 것이다.

그림에서 표시 ○는 실측한 바닥속도를 이용해서 얻은 값을 나타낸 것이다. 그림으로부터 상대세굴심은 KC 수가 증가할수록 크게 발생하는 것을 알 수 있으나, 관의 매설비가 클수록 상대적으로 그 상관도는 떨어지는 것을 알 수 있다. 실험결과를 회귀분석하여 KC 수에 따른 상대세굴심의 관계를 나타낸 것이 식 (6)~식 (8)이고 그림에 실선으로 표시하였다.

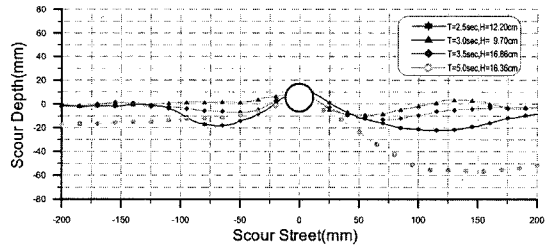
$$S/D = 0.008KC^{1.202}, r = 0.85 (e/D = 1/6) \quad (6)$$

$$S/D = 0.017KC^{1.040}, r = 0.87 (e/D = 1/3) \quad (7)$$

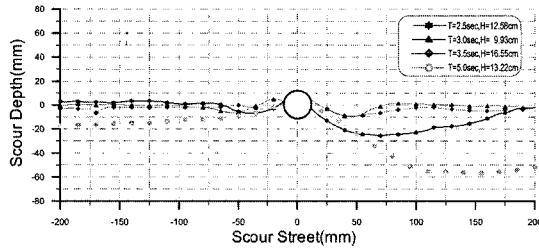
$$S/D = 0.011KC^{1.128}, r = 0.87 (e/D = 1/2) \quad (8)$$



(a) $D = 25 \text{ mm}$, $e/D = 1/6$

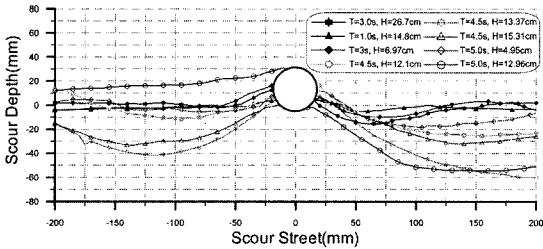


(b) $D = 25 \text{ mm}$, $e/D = 1/3$

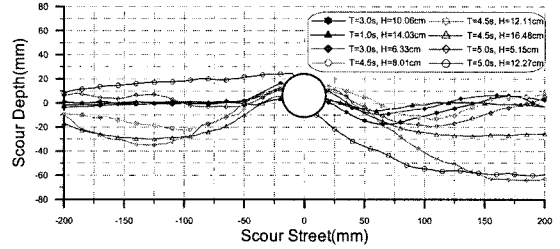


(c) $D = 25 \text{ mm}$, $e/D = 1/2$

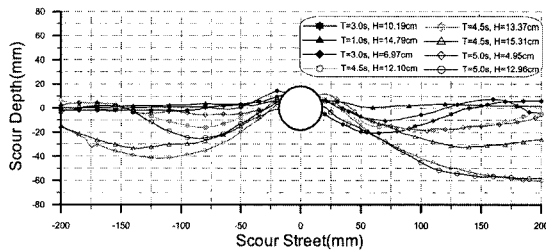
Fig. 4. Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (pipe diameter $D = 25 \text{ mm}$).



(a) $D = 38 \text{ mm}$, $e/D = 1/6$



(b) $D = 38 \text{ mm}$, $e/D = 1/3$



(c) $D = 38 \text{ mm}$, $e/D = 1/2$

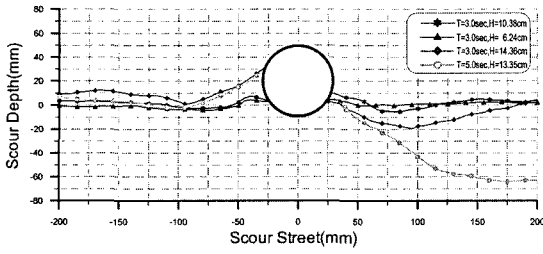
Fig. 5. Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (pipe diameter $D = 38 \text{ mm}$).

Fig. 14-Fig. 16은 수정 Ursell 수에 따른 상대세굴심의 변화를 관의 매설비를 달리하면서 도시한 것이다. KC 수의 경우와 마찬가지로 수정 Ursell 수에 대해서도 수정 Ursell 수가 증가할수록 상대세굴심이 증가하는 일반적인 경향을 나타내고 있으며, 역시 관의 매설비가 커질수록 실

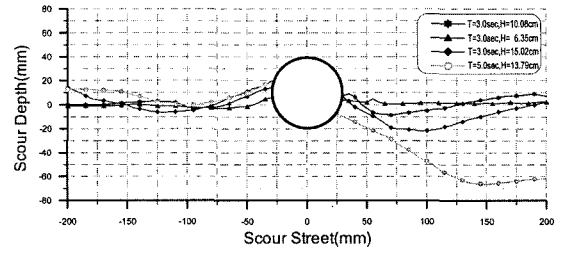
험결과의 분산정도가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

실험 결과를 회귀분석하여 각각의 매설비에 대하여 식 (9)-(11)과 같은 실험식을 얻었다.

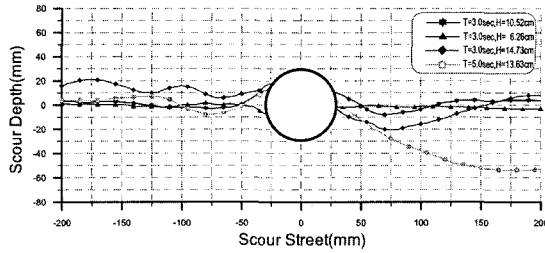
$$S/D = 0.011U_{RP}^{0.588}, r = 0.87 \quad (e/D = 1/6) \quad (9)$$



(a) $D = 60 \text{ mm}$, $e/D = 1/6$

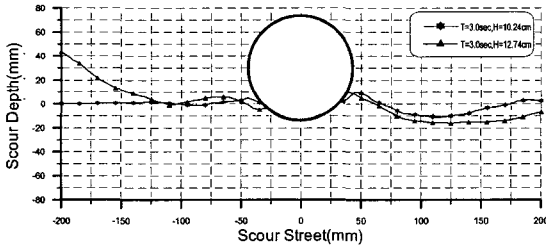


(b) $D = 60 \text{ mm}$, $e/D = 1/3$

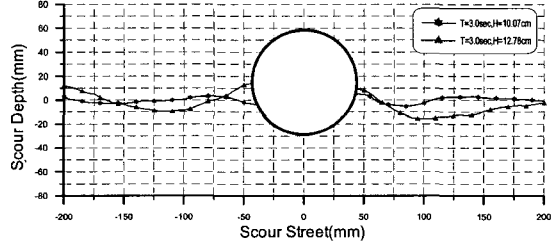


(c) $D = 60 \text{ mm}$, $e/D = 1/2$

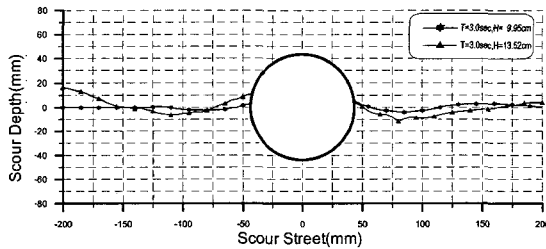
Fig. 6. Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (pipe diameter $D = 60 \text{ mm}$).



(a) $D = 90 \text{ mm}$, $e/D = 1/6$



(b) $D = 90 \text{ mm}$, $e/D = 1/3$



(c) $D = 90 \text{ mm}$, $e/D = 1/2$

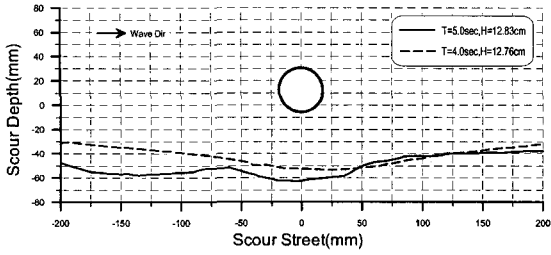
Fig. 7. Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (pipe diameter $D = 90 \text{ mm}$).

$$S/D = 0.016U_{RP}^{0.543}, r = 0.87 \quad (e/D = 1/3) \quad (10)$$

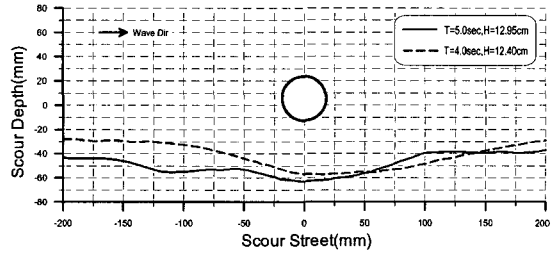
$$S/D = 0.088U_{RP}^{0.630}, r = 0.83 \quad (e/D = 1/2) \quad (11)$$

관을 매설한 경우의 본 실험 결과를 KC 수와 수정 Ursell 수, 2개의 매개변수에 대해서 분석해 본 결과 상

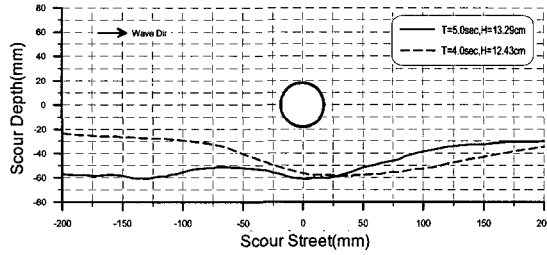
대 세굴심과의 상관성은 약간의 차이는 있으나 두 경우 비슷한 경향을 보이고 있다. 따라서 어느 매개변수가 매 물된 해저관로의 세굴을 더 적절하게 표현한다고 단정할 수가 없다. 이를 위해서는 더욱 세밀한 연구가 필요하다고 판단된다.



(a) $D = 38 \text{ mm}$, $e/D = 1/6$

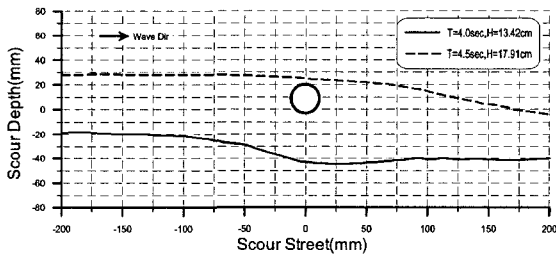


(b) $D = 38 \text{ mm}$, $e/D = 1/3$



(c) $D = 38 \text{ mm}$, $e/D = 1/2$

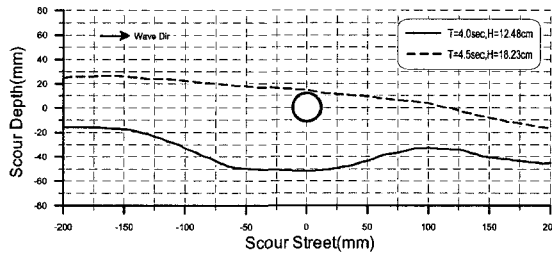
Fig. 8. Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (pipe diameter $D = 38 \text{ mm}$).



(a) $D = 25 \text{ mm}$, $e/D = 1/6$



(b) $D = 25 \text{ mm}$, $e/D = 1/3$



(c) $D = 25 \text{ mm}$, $e/D = 1/2$

Fig. 9. Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (pipe diameter $D = 25 \text{ mm}$).

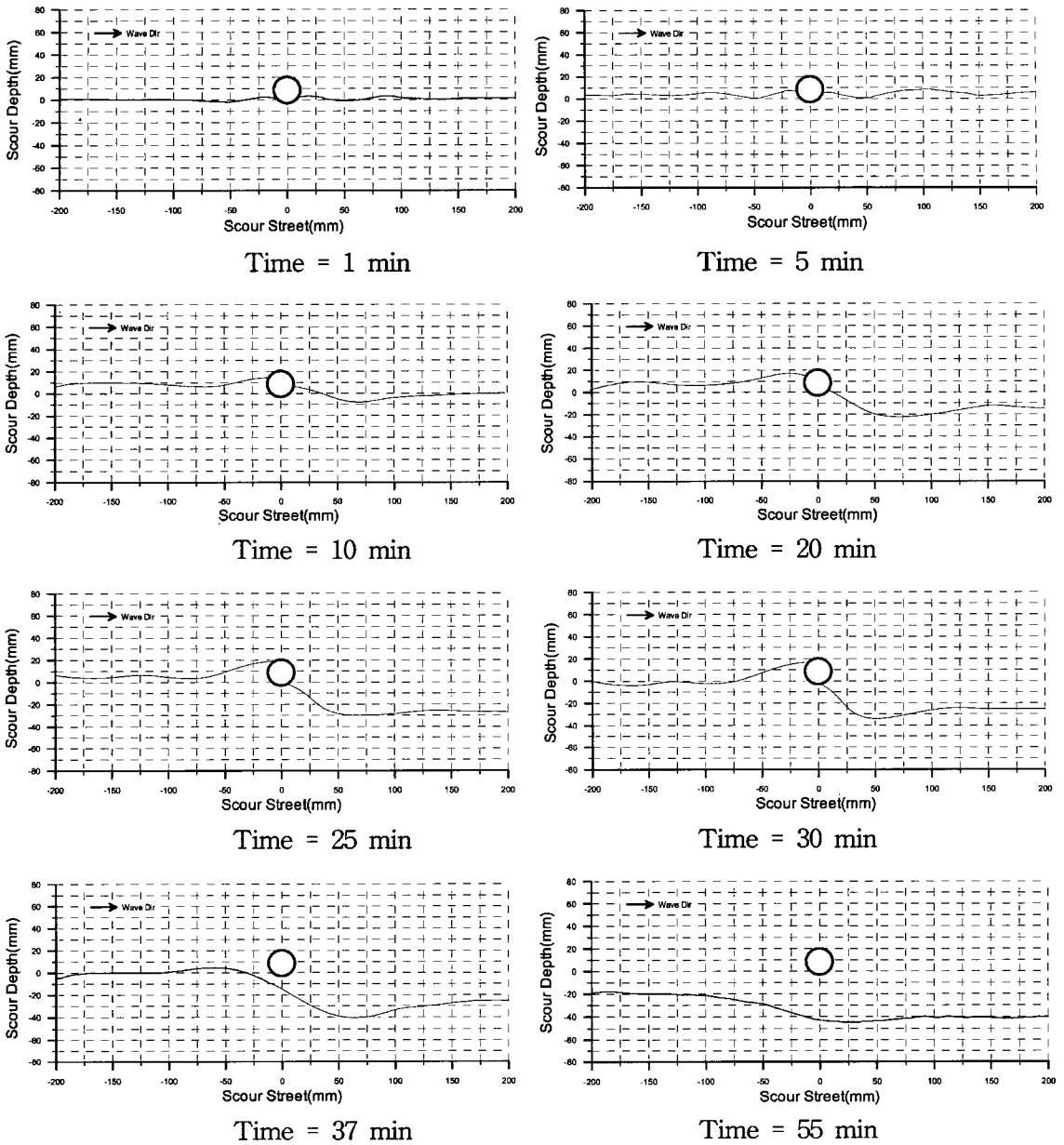


Fig. 10. Development of scour ($D=25$ mm, $T=4.0$ sec, Run 3, Test No. 5).

5. 결 론

수평한 해저에 매설된 해저관로의 국부세굴 특성을 알아보기 위해 매설비와 각종 매개변수를 달리하면서 실험을 수행하였다. 파에 의한 관로 주변의 국부 세굴에 영향을 주는 변수로는 여러 가지를 들 수 있으나, 본 실험에서는 파고(H), 국부수심(d), 관경(D), 주기(T), 및 바닥속

도(U_b)의 영향이 상대적으로 컸다. 관로의 배후부의 세굴이 더 크게 발생하는 원인으로서는 파의 비선형성으로 인해 관로 앞에 발생하는 와류보다는 관로 뒤에 발생하는 배후류가 더 큰 것에 기인한다. 대부분의 경우 세굴깊이는 매설깊이가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 관로가 매설되어 있는 경우에는 매설되지 않은 관로의 경우와는 달리, 터널형 세굴은 관로의 앞쪽의 칩투류에 의

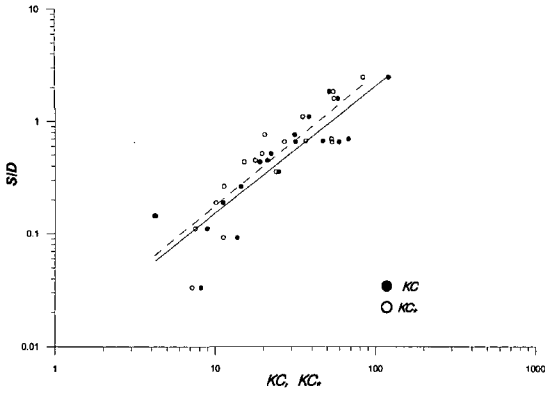


Fig. 11. Relative scour depth versus KC number ($e/D = 1/6$).

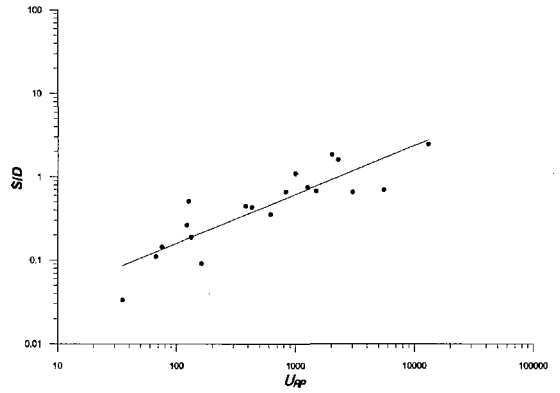


Fig. 14. Relative scour depth versus modified Ursell number ($e/D = 1/6$).

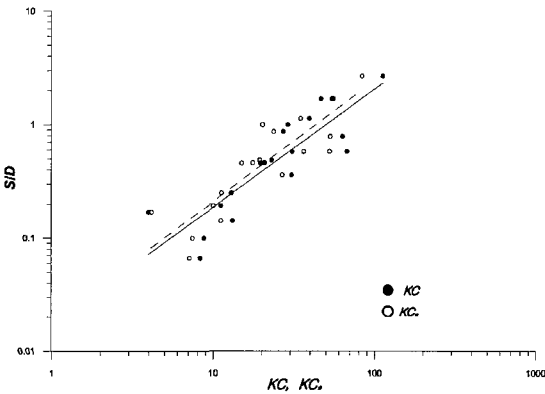


Fig. 12. Relative scour depth versus KC number ($e/D = 1/3$).

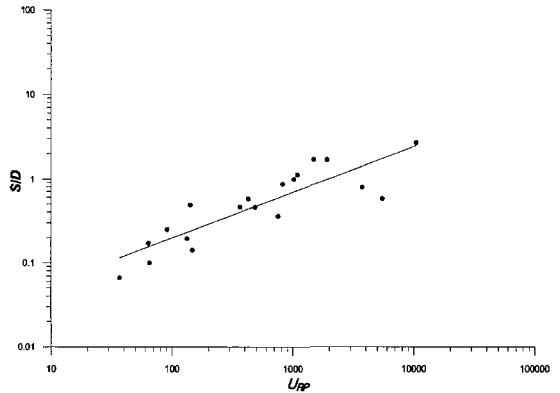


Fig. 15. Relative scour depth versus modified Ursell number ($e/D = 1/3$).

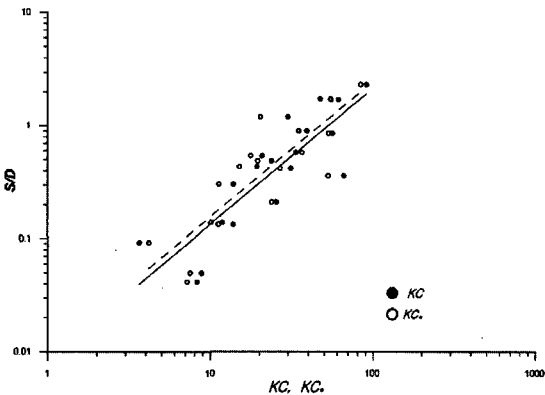


Fig. 13. Relative scour depth versus KC number ($e/D = 1/2$).

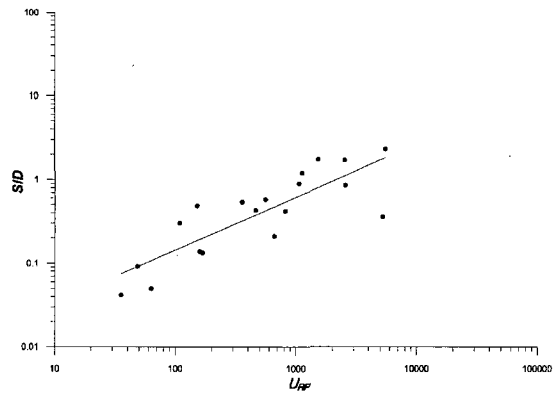


Fig. 16. Relative scour depth versus modified Ursell number ($e/D = 1/2$).

한 관공현상에 의해 발생하는 것이 아니고, 관 뒤쪽의 배후류로 인해 형성되는 와류의 관공작용이 주원인으로 관측되었다. 한편 KC 수나 U_{RP} 수가 매우 큰 경우에는 심해로부터 발생하는 토사이송에 의해 관로가 매립될 수 있는 것으로 나타났다. KC 수와 U_{RP} 가 어느 한계값 이하에

서는 세굴이 발생하지 않거나 불한정한 세굴을 보이는 것으로 관측되었다. 일반적으로 무차원 지배 매개변수인 KC 수와 수정 Ursell 수(U_{RP})가 증가할수록 배후류에 의한 세

굴 영역이 증가하고 상대세굴심도 증가하는 경향이 나타났고, 상대 세굴심은 이 두 매개변수와 비교적 좋은 상관성을 가지는 것으로 판명되었다.

감사의 글

“이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

참고문헌

- 오현식, 이호진, 김경호 (2002). 파에 의한 해저관로의 국부 세굴 특성. *대한토목학회* 22(4-B), 539-549.
- Bijker, E.W. and Leeuwestein, W. (1984). Interaction between pipelines and the seabed under the Influence of waves and current. *Seabed Mechanics, Proceedings Symp. IUTAM/IUGG International Union of Theoretical Applied Mechanics/International Union of Geology and Geophysics*, 235-242.
- Çevik, E. and Yuksel, Y. (1999). Scour under submarine pipelines in waves in shoaling conditions. *Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering*, 125(1).
- Chao, J.L. and Hennessy, P.V. (1972). Local scour under ocean outfall pipelines. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 44(7), 1443-1447.
- Chiew, Y.M. et al. (1990). Mechanics of local scour around submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 116(4).
- Chiew, Y.M. et al. (1991). Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(4).
- Fredsøe, J. and Hansen, E. A. (1987). Lift forces on pipelines in steady flow. *Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering*, 113(2), 139-155.
- Ibrahim, A. and Nalluri, C. (1986). Scour prediction around marine pipelines. *Proceedings of 5th International Symp. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Tokyo, Japan, 679-684.
- Kjeldsen, S.P. (1973). Local scour near offshore pipelines. *Proc, Second Int. Port and Ocean Eng. under Arctic conditions Conf.*, 308-331.
- Kristiansen, Ø. (1988). Current induced vibrations and scour of pipelines on a sand bottom. PhD thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway.
- Littlejohns, P.S.G. (1977). A study of scour around submarine pipelines. Rep. No. Int 113, Hydraulic Research Station, Wallingford, U.K.
- Lucassen, R.J. (1984). Scour underneath submarine pipelines. MATs Rep. PL-4. 2A, Marine Tech. Res., The Netherlands.
- Mao, Y. (1988). Seabed scour under pipelines. *Proceedings of 7th International Symp. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE*, 33-38.
- Mostafa, A.F., Jo Y.H.C. and Adrian, W.K.L. (1990). Wave induced breakout of half-buried marine pipes. *Journal of Waterway, port Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, 116(2).
- Voropayev, S.I., Testik, F.Y., Fernando, H.J.S. and Boyer, D.L. (2003). Burial and scour around short cylinder under progressive shoaling waves. *Ocean Engineering*, 30(13), 1647-1667.
- Sümer, B.M. and Fredsøe, J. (1990). Scour below pipelines in waves. *Journal of waterway, port Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, 116(3), 307-323.
- Sümer, B.M., Mao, Y. and Fredsøe, J. (1988). Interaction between vibrating pipe and erodible bed. *Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, 114(1), 81-92.
- Sümer, B.M., Truelsen, C., Shchmann, T. and Fredsøe, J. (2001). Onset of scour below pipelines and self-burial. *Coastal Engineering*, 42, 313-335.
- Yüksel, Y. and Narayanan, R. (1993). Breaking wave forces on horizontal cylinders close to the sea bed. *Coastal Engineering*, 23, 115-133.
- Yüksel, Y. and Narayanan, R. (1994). Wave forces on horizontal cylinder resting on sloping bottom. *Proceedings of 4th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2, 85-92.

Received April 1, 2005

Accepted May 27, 2005