한국위기관리논집 제9권 제1호 2013. 01 157~172쪽

파랑에 의한 매설관로 주변의 국부세굴폭 산정

김경호*, 오현식**

해저 관로 주변에서 발생하는 국부세굴폭은 파고(H), 주기(T), 관로의 크기(D)와 매설비(e/D)와 같은 다양한 변수에 의해 결정된다. 세굴폭과 세굴심은 이러한 변수들의 조합으로 얻어지는 무차원 매개변수들과 좋은 상관성을 얻을 수 있었다. 실험결과, 매설효과를 고려하였을 때 상대 세굴폭은 KC 수나 Ursell 수와 가장 양호한 상관성을 보였으며, 해저관로 주변의 국부세굴폭을 이들의 함수로서 표현되는 일차 회귀식으로 나타내었다.

주제어: 국부세굴폭, KC 수, Ursell 수

Ⅰ. 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

해저관로와 같은 해양 구조물을 구축하는 경우 구조물의 주변의 흐름장이 교란되어 침식성 와류가 발달하게 되고 이로 인하여 해양 구조물 주변에 국부적인 퇴적과 침식이 발생하여 직・간접적으로 구조물에 영향을 미치게 된다. 해저관로를 설치할 때 검토되어야 할 중요한 인자 중 하나가 세굴이다. 파랑이나 조류에 의한 세굴은 평형상태에 도달할 때까지 지속적으로 발생하여 관로 하부에 세굴공을 형성・발달시켜 자유경간(span shoulder) 하부로 인장력이 작용하여 관로의 파괴를 일으키게 된다. 특히 외양에 면한 해안에서는 단번에 큰 파에 의해 발생하는 세굴로 인하여 피해를 받는 일이 있기도 하다.

정상흐름에 의한 세굴에 관한 연구는 주로 하천 교각이나 조류의 영향을 받는 해양 구조물에 대해서 비교적 활발하게 이루어져 왔지만 파(wave)에 의한 관로의 세굴에 관한 연구는 정상흐름에 대한 연구에 비해 폭넓게 연구되어지지 않았으며, 파에 의한 관로의 세굴 중 매설깊이에 따른 세굴에 대한 연구는 수평바닥에 놓인 관로의 세굴에 비해 연구가 거의 이루어지지 않았다.

Herbich(1981)는 여러 가지 해안경사 및 파랑조건에 대한 2차원 수리모형 실험을 실시하였다. 실험

* 충북대학교 공과대학 교수(제1저자)
** 충북대학교 공과대학 박사(교신저자)

www.kci.go.kr

에서 해저관로에 대한 파의 입사각, 수심, 매설심도와 쇄파대와 관련된 매설위치 등을 고려하였으며, 해저관로는 해안경사에 큰 영향을 미치지 않으나 대부분의 경우에 해저관로 주위는 구조물과 토사의 상호작용으로 부분적인 세굴이 발생한다고 결론지었다.

Lucassen(1984)은 조파수조 실험을 통해서 체계적으로 정리되지 않은, 차원을 갖는 형태의 세굴자료를 무차원 형태로 제시하였다.

파에 의해 유발되는 세굴에 대한 집중적인 연구는 Sümer and Fredsøe에 의해 수행되었는데, Sümer and Fredsøe(1990)는 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(Kenlegan- Carpenter) 수이며, 관의 표면조도는 실제로 세굴 과정에 영향을 미치지 않는다고 결론지었다.

Yüksel and Çevik(1995)은 병렬로 연결되어 있는 관로에 의해 해저 면에서의 변화된 흐름을 분석하였고, Klomp, *et. al.*(1995)은 해저 면에서 관의 매설깊이에 따른 KC 수와의 관계를 알아보고 그에 대한 식을 제안하였다. 이 식은 관의 매설깊이가 증가함에 따라 세굴심이 증가함을 나타내고 있으며, $e/D<0.5$일 경우에 한정되었다. Çevik and Yüksel(1999)은 규칙파 실험결과에 기초하여 수정 Ursell 수를 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 연구는 파에 의해 실제적으로 영향을 받게 되는 천해역에서의 고정된 해저관로 주변에서의 매설깊이에 따른 국부세굴에 대한 실험결과를 분석하였다. 세굴 영향인자들과 세굴폭(W)과의 관계를 알아보기 위해 실험수조의 관을 중심으로 주요 부분에 파고계를 설치하였고, 관로가 설치되기 전에 관로가 설치될 지점에 유속계를 설치하여 교란되지 않은 바닥에서의 최대 전단속도를 측정하였으며, 관경(D), 파고(H), 주기(T), 매설깊이(e)를 변화시키며 실험을 하였다. 파고계로부터 얻어진 데이터와 유속계계로부터 측정된 바닥속도를 이용하여 주요 지점에서의 파고와 그 때의 주기를 산출하고, 이를 바탕으로 각종 세굴영향인자들을 계산하여 도표로서 정리하여 최종 관측된 세굴특성과의 상관관계를 이끌어 내었다. 이러한 실험결과에 기초하여 KC 수와 수정 Ursell 수를 구하고 이러한 무차원 매개변수에 따른 상대 세굴폭 예측은 물론 이 방법의 타당성과 그 적용성도 함께 고찰하였다.

Ⅱ. 기본이론

1. 세굴폭에 대한 차원 해석

www.kci.go.kr

파에 의한 관로에서의 세굴폭(W)에 영향을 주는 인자를 함수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$W = (g,\ \rho,\ \nu,\ \rho_s,\ \sigma_g,\ d_{50},\ D,\ U_m,\ T,\ L,\ k,\ h,\ H) \quad (1)$$

여기서 g는 중력가속도, ρ는 물의 밀도, ν는 동점성계수, ρ_s는 해저바닥 입자의 밀도, d_{50}은 중앙입경, σ_s는 모래의 기하학적 균등계수($\sigma_s = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$), U_m는 바닥에서의 최대 수립자 속도, T는 주기, L은 파장, k은 관의 조도계수, h는 국부수심, H는 국부파고이다. 주요 세굴영향인자로 사용된 대표적 변수들을 차원해석하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

식 (1)의 인자 중 본 연구에서 사용된 변수들을 차원해석 하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W/D = f\,(KC,\ Re,\ \theta,\ h/H,\ h/D,\ H/L) \quad (2)$$

여기서 W/D 는 상대세굴폭, KC는 Keulegan-Carpenter 수, Re 는 레이놀드 수, H/L은 파형경사이며 θ는 shields 수, h/H 는 파고에 관련된 무차원 수심 매개변수, h/D 는 직경에 대한 수심비이다. 따라서 파랑 하에서의 상대세굴폭에 대한 주요 영향인자는 해저 바닥에서의 유속과 주기, 관경, 파고 및 파장의 함수로 나타낼 수 있다.

1) 세굴영향인자

(1) 조도 및 Re 수

Sümer and Fredøe(1990)은 세굴진행이 관의 조도에 의해서 실질적인 영향을 받는 지를 알아보기 위한 조도실험을 실시하였고, 그 결과 조도는 세굴심에 영향을 주지 못함을 알았다.

한 방향 흐름인 경우에 관 주위의 상대 세굴심은 레이놀드 수에 관계된다. 그러나 Sümer and Fredøe(1990)는 파가 작용할 때 레이놀드 수에 의한 세굴심의 변화는 아주 미약하며, 상대 세굴심 사이의 상관관계가 명확하지 않은 것으로 지적했다.

(2) Shields 수

Shields 수는 토사입자의 이동 여부를 판단할 수 있는 함수로서 다음과 같이 주어진다.

$$\theta = \frac{{U_{fm}}^2}{(\Delta - 1) g d_s} \quad (4)$$

여기서 Δ는 토사입자의 상대밀도, g는 중력가속도, U_{fm}은 교란되지 않은 바닥에서의 최대 전단속도이다. $U_{fm} = \sqrt{f/2}\, U_m$으로 계산되고, 여기서 f는 파가 존재할 때 경계층에서의 마찰계수이며 U_m은 관로 밑에서의 최대 유속이다. Shields 수는 일반적으로 수평 이동상 또는 수평에 가까운 하상에 적용되며, 이 때의 하상재료의 이송을 어느 정도 설명할 수 있다. 세굴과정의 시간축척에 대해 Shields 수

www.kci.go.kr

의 영향은 비교적 크게 나타난다. 그러나 Sümer and Fredøe(1990)의 실험 결과 상대세굴심에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 보고 되었다. θ값의 어떠한 변화도 유사이동의 변화에 상응되기 때문에 상대세굴심의 변동은 매우 미약하게 나타난다. 이러한 변화들은 세굴공의 상류와 내부에서 같은 양으로 발생하고, 결과적으로 평형 세굴심의 실질적인 변화가 없게 되므로 본 연구에서는 세굴과정에 있어서 Shields 수의 효과는 무시할 수 있다.

(3) KC 수

파에 의해 반주기 마다 진동하는 흐름장(Oscillatory Motion)에서 와류 형태의 확장과 그 형상은 KC 수에 의해 결정된다. Sümer and Fredsøe(1990)는 파에 의한 이동상 조건의 평형세굴심을 결정하는 주요 매개변수로서 KC 수를 제안했다.

(a) Small KC Number (b) Large KC Number

<Fig. 1> Streamwise Extent of Lee-Wake Corresponding

<그림 1>에서와 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 갖는다.

$$\frac{L_w}{D} = 0.3\,KC \quad \text{with,} \quad KC = \frac{2\pi a}{D} = \frac{U_m T}{D} \quad (5)$$

여기서 a는 진폭이고, U_m는 관이 없는 경우 바닥에서의 최대 수립자 속도, T는 파의 주기이며, D는 관의 지름이다. KC 수의 값이 매우 작은 경우 관으로 인한 상승류는 형성되지 않거나 작게 나타낸다. 반면에 보다 큰 KC 수에 대해서는 관의 측면상에 와열(Vortex street)이 형성된다.

세굴공의 경사가 좀 더 완만해 질 경우, 관로 밑의 흐름장은 외부 흐름에 대한 영향이 증가하게 될 것이다. 따라서 관 밑의 유속은 증가하게 되고, 세굴 또한 증가하게 된다. KC 수에 대한 상대 세굴심의 변화는 식(6)으로 대표된다(Sümer and Fredøe, 1990).

$$S/D = 0.1\sqrt{KC} \quad (6)$$

(4) 수정 Ursell 수

Çevik, *et. al.*(1999)은 천수변형 조건에서 KC 수에 따른 상대세굴심과의 관계를 실험을 통해 분석

www.kci.go.kr

하여, 경사진 해안에서 KC 수와 상대 세굴심과의 관계에 상당한 분산을 보인다고 지적하였으며새로운 지배 매개변수로서 무차원 매개변수 h/H와 H/L의 조합으로 나타나는 Ursell 수를 제시하였다.

Ursell 수는 파에 의해 발생하고 해저로 전달되는 에너지의 크기를 정의한다. Ursell 수는 관의 지름을 포함하지 않지만 상대 세굴심(S/D)과, Ursell 수(U_R), 상대파고(H/D)는 다중 상관관계로 이루어져 있다. Çevik, *et. al.*(1999)은 상대 세굴심과 관경에 대한 Ursell 수를 비선형 다중 회기분석을 이용하여 다음과 같은 수정 Ursell 수를 도출하였다.

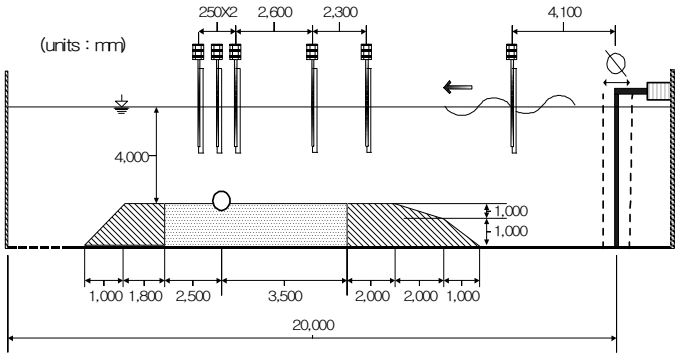
$$U_{RP} = U_R\left(\frac{H}{D}\right)^2 = \frac{H^3L^2}{h^3D^2} \quad \text{with,} \quad U_R = \frac{HL^2}{h^3} \quad (7)$$

여기서 H는 국부파고, L은 국부파장, h는 국부수심이다.

III. 파에 의한 해저관로의 세굴실험

1. 실험장치의 구성 및 실험방법

파고와 주기에 따른 세굴의 특성을 알아보기 위하여 조파장치를 이용해 규칙파를 발생시켰으며, 이때 신호입력용 컴퓨터를 이용하여 파고를 조절하였으며, 규칙파의 주기(T)는 1초~5초까지 변화를 주었다.



<Fig. 2> Schematic description of experimental setup

본 실험에서 측정된 KC 수의 범위는 3.63~121이고, 레이놀드 수(Re)의 값은 5244~32040이며, 하상재료는 d_{50}= 0.85㎜, d_{90}= 3.2㎜이고, 기하표준편차 σ_g=2.96의 특성을 갖는 모래가 이동상 조건에 대해 사용되었다. 실험조건은 <표 1>과 같다.

www.kci.go.kr

<Table 1> Experimental Condition for the Local Scour

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

IV. 실험결과 및 고찰

1. 국부 세굴폭의 경향

<그림 3>~<그림 6>은 평형 단계에 도달한 관로 주변부 국부세굴의 형태를 나타낸 것으로, 대부분의 경우 터널형 세굴이 발생하지 않았고, 관로의 앞부분의 세굴깊이에 비해 관로 뒤 부분의 세굴깊이가 더 크게 나타났다. 이런 현상의 원인으로는 관로의 앞에 발생하는 와류(vortex)보다는 관로의 뒤에 발생하는 배후류(lee-wake)의 강도가 더 크기 때문에 관로의 뒤 부분의 세굴이 더 많이 일어난다고 할 수 있다. 세굴깊이는 주기와 파고가 커질수록 커지고, 대부분의 경우 매설깊이가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 실험에서 일반적인 세굴 형태를 보이는 대부분의 경우 매설깊이(e, embedment depth)가 커질수록 세굴깊이가 감소하였다.

<그림 7>~<그림 8>은 터널형 세굴이 발생한 경우와 관로가 매몰된 경우의 형태를 각각 도시한 것이다. 터널형 세굴이 발생한 경우, 터널형 세굴이 관로를 수평바닥에 밀착하여 설치하거나, 바닥과의 공간을 두어 설치했을 때와 같이 관로 밑으로의 침투류(seepage flow)에 의한 관공현상으로 인하여 발생한 것이 아니라, 관찰한 결과로 보면 실험 초반에서 중반까지는 실험의 다른 일반적인 형상과 동일한 경향을 보이나 배후류(lee-wake)가 강하게 발달하여 관로의 저부를 침식시킴으로서 관로의 뒤쪽에서 시작되어 관로의 앞 쪽으로 세굴이 진행하여 터널형 세굴이 발생하였다.

www.kci.go.kr

<Table 2> Experimental data and parameters of influence on scour

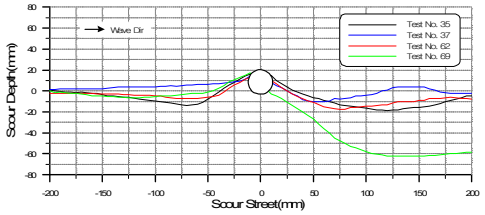
Test No.	Period T(sec)	Pipe diameter D(m)	Embedment ratio e/D	U_m (m/s)	Wave Height (cm)	KC	U_{RP}	W/D	Re
1	1.0	0.038	1/2	0.138	12.80	3.6	48.637	2.66	5244.0
2	1.0	0.038	1/3	0.152	14.03	4.0	64.048	2.66	5776.0
3	1.0	0.038	1/6	0.161	14.79	4.2	75.031	2.45	6118.0
4	3.0	0.060	1/6	0.163	6.24	8.2	35.073	2.13	9780.0
5	3.0	0.060	1/2	0.165	6.26	8.3	35.411	-	9900.0
6	3.0	0.060	1/3	0.167	6.35	8.4	36.961	2.38	10020.0
7	3.0	0.090	1/2	0.263	9.95	8.8	63.198	1.82	23670.0
8	3.0	0.090	1/3	0.265	10.07	8.8	65.512	-	23850.0
9	3.0	0.090	1/6	0.267	10.14	8.9	66.888	2.26	24030.0
10	3.0	0.090	1/6	0.335	12.74	11.2	132.661	2.61	30150.0
11	3.0	0.090	1/3	0.337	12.78	11.2	133.914	2.42	30330.0
12	3.0	0.090	1/2	0.356	13.52	11.9	158.550	2.09	32040.0
13	3.0	0.038	1/3	0.165	6.33	13.0	91.278	-	6270.0
14	3.0	0.060	1/3	0.265	10.08	13.3	147.842	2.57	15900.0
15	3.0	0.060	1/6	0.274	10.38	13.7	161.439	2.68	16440.0
16	3.0	0.060	1/2	0.277	10.52	13.9	168.060	2.42	16620.0
17	3.0	0.038	1/2	0.176	6.71	13.9	108.723	3.50	6688.0
18	3.0	0.038	1/6	0.183	6.97	14.4	121.857	3.82	6954.0
19	3.0	0.060	1/6	0.379	14.36	19.0	427.445	3.17	22740.0
20	3.0	0.060	1/2	0.388	14.73	19.4	461.345	2.47	23280.0
21	3.0	0.060	1/3	0.395	15.02	19.8	489.133	3.60	23700.0
22	3.0	0.038	1/2	0.263	9.97	20.8	356.647	4.16	9994.0
23	3.0	0.038	1/3	0.265	10.06	20.9	366.393	3.89	10070.0
24	3.0	0.038	1/6	0.267	10.19	21.1	380.781	3.32	10146.0
25	5.0	0.038	1/6	0.169	4.95	22.2	126.069	4.87	6422.0
26	5.0	0.038	1/3	0.176	5.15	23.2	141.976	4.37	6688.0
27	5.0	0.038	1/2	0.181	5.26	23.8	151.269	4.61	6878.0
28	3.0	0.038	1/6	0.314	11.95	24.8	614.125	-	11932.0
29	3.0	0.038	1/2	0.323	12.24	25.5	659.929	-	12274.0
30	3.0	0.038	1/3	0.346	13.18	27.3	823.946	-	13148.0
31	2.5	0.025	1/3	0.291	12.20	29.1	1019.944	7.40	7275.0
32	2.5	0.025	1/2	0.300	12.58	30.0	1118.249	4.44	7500.0
33	3.0	0.025	1/3	0.256	9.70	30.7	758.849	-	6400.0
34	4.5	0.038	1/3	0.262	8.01	31.0	430.543	5.42	9956.0
35	2.5	0.025	1/6	0.312	13.07	31.2	1254.075	8.16	7800.0
36	3.0	0.025	1/2	0.260	9.93	31.2	814.119	4.00	6500.0
37	3.0	0.025	1/6	0.263	9.97	31.6	823.997	-	6575.0
38	4.5	0.038	1/2	0.284	8.73	33.6	557.394	5.03	10792.0

www.kci.go.kr

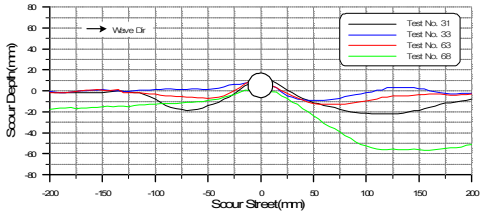
39	5.0	0.060	1/6	0.460	13.35	38.3	991.978	4.63	27600.0
40	5.0	0.060	1/2	0.470	13.63	39.2	1055.713	4.18	28200.0
41	5.0	0.060	1/3	0.475	13.79	39.6	1093.330	4.17	28500.0
# 42	4.0	0.038	1/3	0.380	12.40	40.0	1252.931	-	14440.0
# 43	4.0	0.038	1/2	0.382	12.43	40.2	1262.047	-	14516.0
# 44	4.0	0.038	1/6	0.392	12.76	41.3	1365.256	-	14896.0
45	4.5	0.038	1/6	0.395	12.10	46.8	1484.142	6.74	15010.0
46	4.5	0.038	1/3	0.395	12.11	46.8	1487.825	8.32	15010.0
47	4.5	0.038	1/2	0.400	12.24	47.4	1536.256	8.21	15200.0
48	4.5	0.038	1/6	0.436	13.37	51.6	2002.229	8.11	16568.0
49	5.0	0.038	1/3	0.424	12.27	55.8	1920.115	-	16112.0
50	4.5	0.038	1/2	0.475	14.51	56.3	2559.303	7.13	18050.0
# 51	5.0	0.038	1/6	0.443	12.83	58.3	2195.197	-	16834.0
52	5.0	0.038	1/6	0.445	12.96	58.6	2262.604	-	16910.0
# 53	5.0	0.038	1/3	0.445	12.95	58.6	2257.371	-	16910.0
54	4.5	0.038	1/6	0.499	15.31	59.1	3006.388	7.13	18962.0
# 55	5.0	0.038	1/2	0.458	13.29	60.3	2439.880	-	17404.0
# 51	5.0	0.038	1/6	0.443	12.83	58.3	2195.197	-	16834.0
52	5.0	0.038	1/6	0.445	12.96	58.6	2262.604	-	16910.0
# 53	5.0	0.038	1/3	0.445	12.95	58.6	2257.371	-	16910.0
54	4.5	0.038	1/6	0.499	15.31	59.1	3006.388	7.13	18962.0
# 55	5.0	0.038	1/2	0.458	13.29	60.3	2439.880	-	17404.0
# 56	4.0	0.025	1/2	0.382	12.48	61.1	2951.162	-	9550.0
57	5.0	0.038	1/2	0.465	13.49	61.2	2551.699	7.26	17670.0
58	4.5	0.038	1/3	0.537	16.48	63.6	3749.653	7.08	20406.0
# 59	4.0	0.025	1/6	0.411	13.42	65.8	3669.500	-	10275.0
60	3.5	0.025	1/2	0.473	16.55	66.2	5214.079	4.68	11825.0
# 61	4.0	0.025	1/3	0.421	13.73	67.4	3929.714	-	10525.0
62	3.5	0.025	1/6	0.483	16.83	67.6	5483.224	5.76	12075.0
63	3.5	0.025	1/3	0.483	16.86	67.6	5512.598	4.76	12075.0
64	5.0	0.025	1/2	0.455	13.22	91.0	5548.494	-	11375.0
# 65	4.5	0.025	1/3	0.581	17.80	104.6	10916.07	-	14525.0
# 66	4.5	0.025	1/6	0.585	17.91	105.3	11119.70	-	14625.0
# 67	4.5	0.025	1/2	0.595	18.23	107.1	11726.45	-	14875.0
68	5.0	0.025	1/3	0.564	16.36	112.8	10515.51	-	14100.0
69	5.0	0.025	1/6	0.605	17.53	121.0	12936.79	10.28	15125.0

: abnormal scour
- : no Scour or Not measured

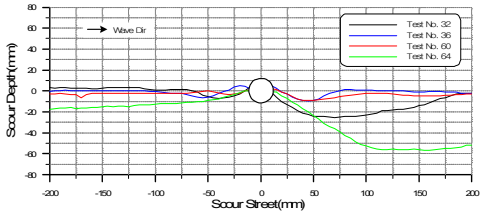
www.kci.go.kr



(a) $e/D=1/6$

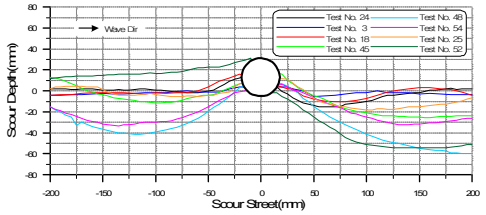


(b) $e/D=1/3$

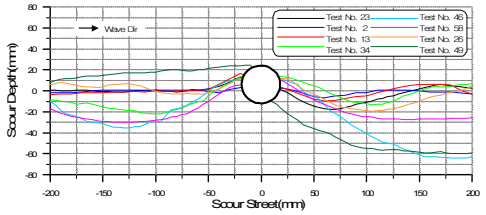


(c) $e/D=1/2$

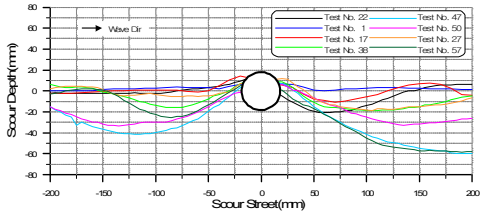
<Fig. 3> Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (D=25mm)



(a) $e/D=1/6$

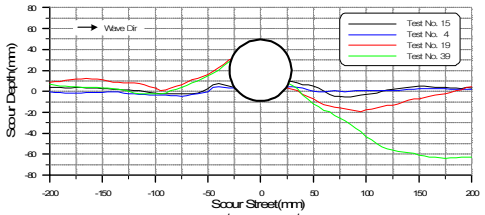


(b) $e/D=1/3$

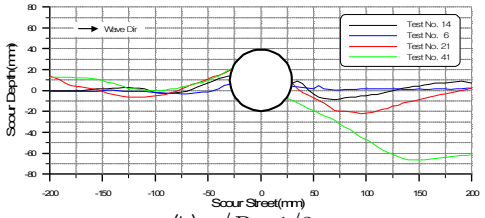


(c) $e/D=1/2$

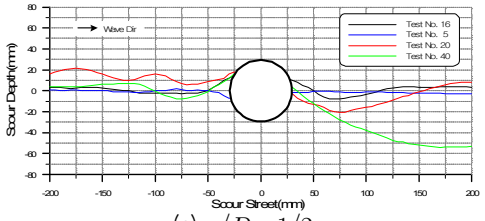
<Fig. 4> Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (D=38mm)



(a) $e/D=1/6$

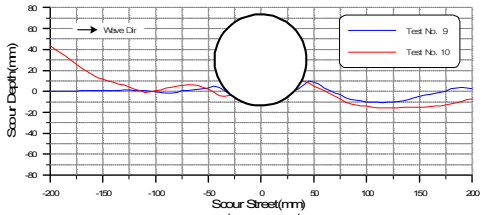


(b) $e/D=1/3$

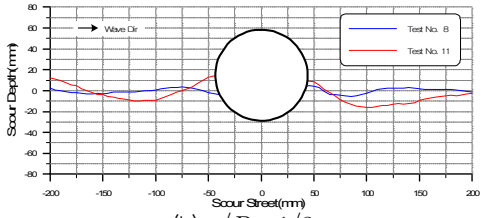


(c) $e/D=1/2$

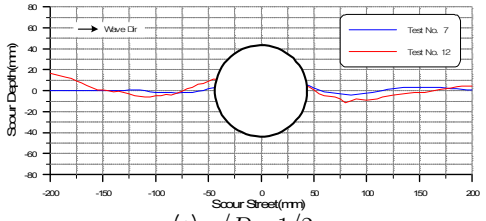
<Fig. 5> Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (D=60mm)



(a) $e/D=1/6$



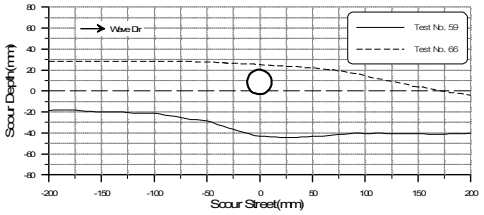
(b) $e/D=1/3$



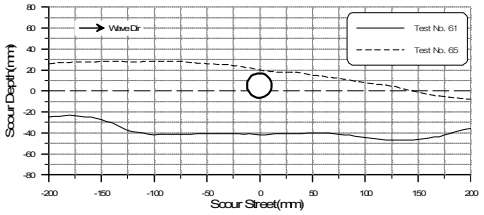
(c) $e/D=1/2$

<Fig. 6> Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (D=90mm)

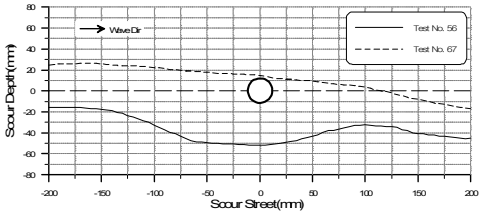
www.kci.go.kr



(a) $e/D=1/6$

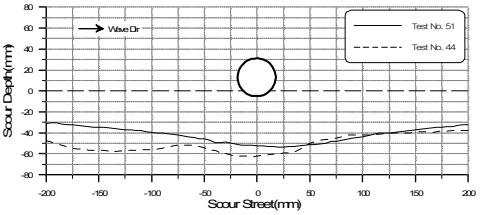


(b) $e/D=1/3$

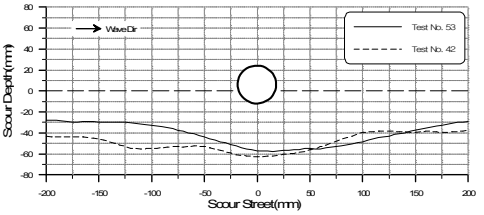


(c) $e/D=1/2$

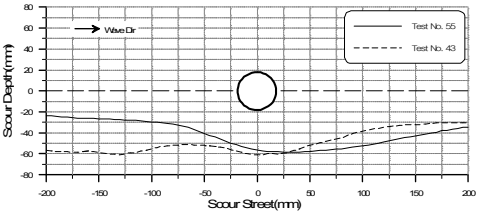
<Fig. 7> Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (D=25mm)



(a) $e/D=1/6$



(b) $e/D=1/3$



(c) $e/D=1/2$

<Fig. 8> Variation on equilibrium scour depth for embedment ratio (D=38mm)

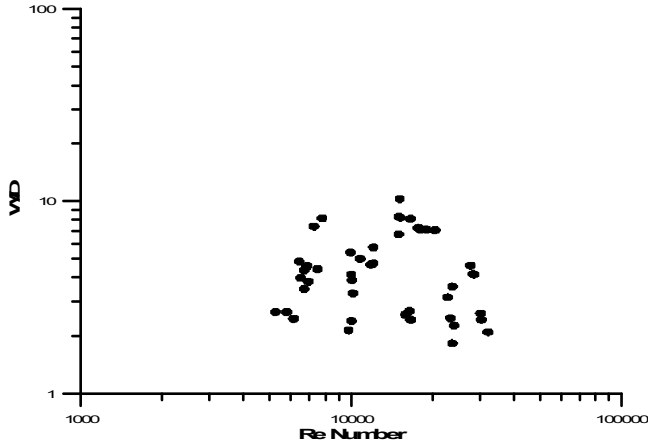
<그림 7>~<그림 8>은 관의 지름이 38mm일 때의 각각의 매설비(e/D=1/6, 1/3, 1/2)일 때, 선형파 이론에 의해 계산된 KC 수, 수정된 Ursell 수(U_{RP})와 상대세굴폭 W/D 와의 관계를 표현한 것으로 KC 수와 U_{RP}가 증가함에 따라 상대세굴심의 크기가 증가하고, 배후류(lee-wake)의 활동 범위 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 실험 전반에 걸쳐, 상류부의 세굴폭에 비해 하류부의 세굴폭이 보다 크게 나타났다.

2. 주요 무차원 변수와의 상관성 분석

1) Re 수

한 방향 정상 흐름에서의 국부세굴의 경우 유속의 증가는 보다 큰 난류를 유발하며 관로 하류부에서 형성되는 배후류의 강도에 큰 영향을 주게 된다. 그러나 단주기성 파랑과 같이 반주기마다 흐름이 역전되는, 진동 흐름장에서는 경우 난류가 충분히 발달하지 못하게 되며, 이러한 흐름장에서의 국부세굴 과정에서는 상대적으로 Re 수와 세굴폭과의 상관성이 매우 약하게 나타나게 된다. 이것은 Sümer and Fredøe(1990)의 난류의 영향에 관한 실험 결과와도 일치한다. <그림 9>는 국부세굴폭과 Re 수와의 상관성을 분석한 것으로 난류의 영향은 없는 것으로 나타났다.

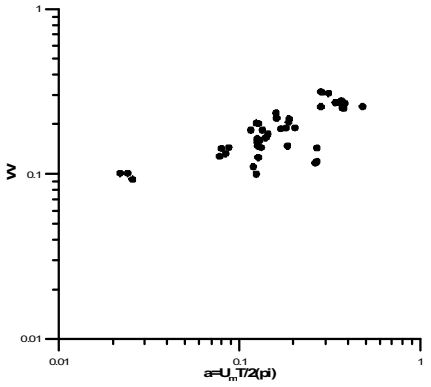
www.kci.go.kr



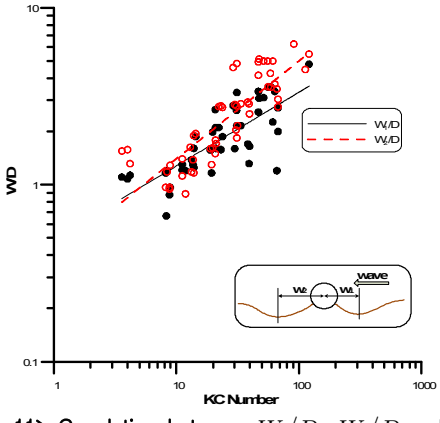
<Fig. 9> Correlation between W/D and Re number

2) KC 수

국부세굴폭은 관로가 놓인 해저 바닥에서의 수립자의 이동거리와 밀접한 관련이 있다. KC 수는 궤도 운동의 진폭과 구조물의 지름 비의 측정 수단이다. 한 주기 동안의 진폭 거리는 $U_m \cdot T$ 또는 $2\pi a$ 이며, 관경에 대한 수립자의 진폭거리의 비로 무차원화하여 KC 수를 계산할 수 있다. <그림 10>은 한 주기 동안의 진폭거리와 국부세굴폭과의 관계를 도시한 것이고, <그림 11>은 관 중심으로부터 상류부와 하류부에서 발생한 최대 세굴심까지의 수평거리를 각각 W_1, W_2로 표현하여 KC 수에 대해 도시한 것으로, 파의 비선형성으로 인해 KC 수가 증가함에 따라 W_1 보다 W_2가 더 크게 발달하고 있다.



<Fig. 10> Correlation between W and amplitude of orbital motion

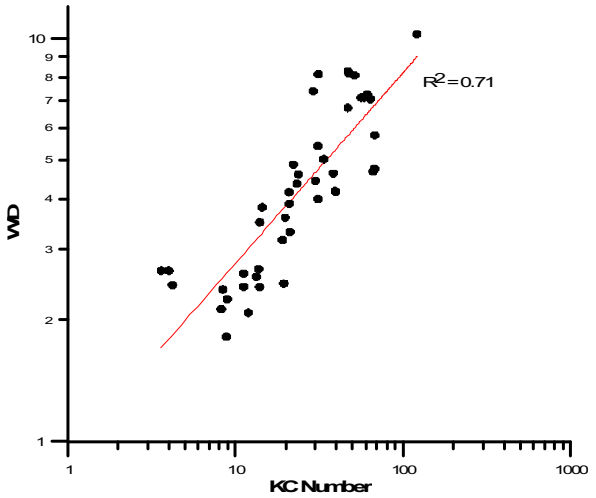


<Fig. 11> Correlation between W_1/D, W_2/D and KC number

<그림 12>는 KC 수와 관경에 대한 한 주기 동안의 총 세굴폭, $(W_1+W_2)/D$와의 관계를 도시한

www.kci.go.kr

것이다. KC 수가 커질수록 상대 세굴폭 역시 증가하고 있다.



<Fig. 12> Correlation between W/D and KC number

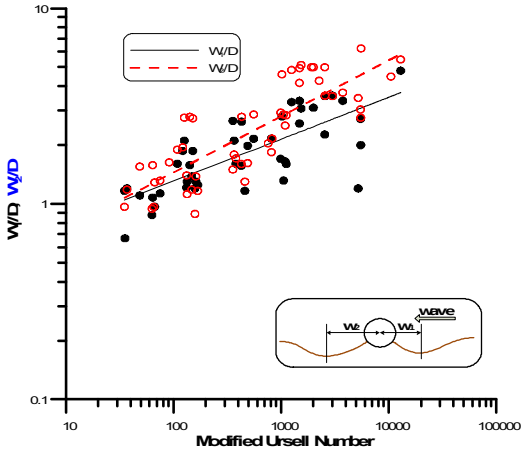
실험 조건의 최대 KC 수에서 관경의 10배 이상의 세굴폭 값을 나타내고 있으나 일반적인 자연 조건에서의 최대 KC 수는 20~30 정도임을 감안했을 때 최대 세굴심까지의 거리는 관경의 1.5~2배 정도라고 판단하면 될 것이다. e/D의 비율에 따른 상대 세굴폭은 뚜렷한 경향을 보이지 않는 것으로 나타났는데, 이는 대부분의 실험 조건에서 터널형 세굴이 발생하지 않았기 때문이며 , 터널형 세굴 형태를 보인 실험은 KC 수가 비교적 큰 경우(KC>40)로서, 최대 세굴심의 위치가 불명확하여 본 상관성 분석에서는 제외하였다. 식(8)은 <그림 12>의 자료를 회귀분석한 결과이다.

$$W/D = 0.93\, KC^{0.47} \quad (8)$$

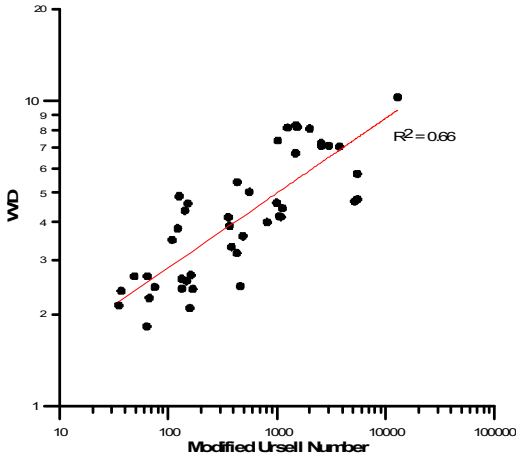
3) 수정 Ursell 수

Yüksel and Çevik(1999)이 제안한 수정 Ursell 수와 상대 세굴폭과의 상관성 분석은 KC 수와의 분석 과정과 동일하며 <그림 13>은 상류방향과 하류방향의 세굴폭을 W_1과 W_2로 구분하여 도시한 것이고, <그림 14>는 모든 자료에 대한 결과를 도시한 것이다. KC 수와의 분석 결과와 동일하게 수정 Ursell 수가 증가함에 따라 W_1/D보다 W_2/D가 크게 나타났으며, 최종 국부세굴폭의 경우 KC 수와의 분석 결과에 비해 다소 약한 상관성을 보이고 있다. 수정 Ursell 수와의 회귀분석 결과는 식(9)와 같다.

www.kci.go.kr



<Fig. 13> Correlation between W_1/D, W_2/D and Modified Ursell number



<Fig. 14> Correlation between W/D and Modified Ursell number

Ursell 수는 천해역에서 파의 비선형성의 크기를 나타내며 이러한 천수 변형 조건의 일부를 고려할 수 있다. 수심이 깊을수록 비선형적인 성질이 사라지며 파에 의한 유체력이 해저 바닥에 전달되는 크기로 그 물리적 의미를 해석할 수 있다. 실제 연안에서의 해저 바닥 유속 측정을 측정하지 않고 파고와 주기, 파장 및 수심 자료를 이용하여 보다 쉽게 세굴폭을 측정할 수 있다. 이러한 이유로 천수 변형 조건에서의 세굴 분석시 Ursell 수와의 상관석 해석은 KC 수에 비해 많은 이점을 제공한다.

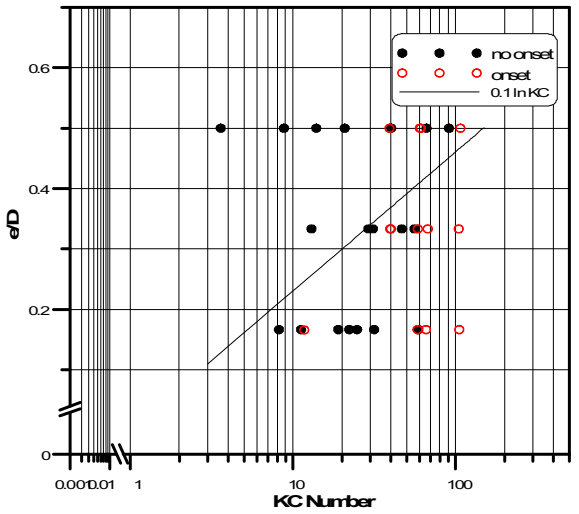
$$W/D = 0.92\ U_{RP}{}^{0.25} \quad (9)$$

4) KC 수에 따른 세굴공의 발달

매설 깊이가 클 경우 관로 아래에서의 세굴은 미약하게 발달하거나 터널형 세굴이 발생하지 않을 수 있다.

이와 관련하여 매설 깊이와 국부세굴 과정을 다룬 Sümer와 Fredsøe(1990)의 연구 결과에서 매설비(e/D)가 클 경우 터널형 세굴이 발생하지 않을 수 있으며 0.4 이상에서는 관로 하부에 세굴공이 발달하지 못한 것으로 나타났다. 그림 16은 세굴이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우를 KC 수와 e/D에 대하여 각각 도시한 것이다.

www.kci.go.kr



<Fig. 16> Onset of scour and development regimes.

그림을 보면 매설비가 0.4 이하에서는 KC 수 따른 한계 매설비에 대한 식을 만족하고 있으나 KC 수가 40 이상인 경우, e/D=0.5에서도 터널형 침식이 확인되었다. 폭풍 해일과 같이 순간적으로 강한 파력이 해저바닥에 전달될 경우, 0.5 이상의 매설비 값을 갖더라도 세굴이 발생하게 됨을 의미한다. 본 실험 과정 중 발생한 사련 현상은 정형적인 세굴 과정을 방해하는 요소가 되기도 하는데, 소축적 실험의 경우 그 영향은 더욱 크게 나타날 수 있다. 몇 가지 불확실성에 의해 e/D=1/6의 경우 세굴이 발달하지 못하는 양상을 보이기도 하였다. 이를 규명하기 위해서는 좀 더 체계적인 별도의 실험이 필요할 것으로 판단된다.

Ⅴ. 결론

파에 의한 관로 주변의 국부 세굴에 영향을 주는 주요 인자는 해저 바닥에서의 유속이며 상대 세굴폭과 관경은 선형 비례적으로 비례한다. 매설비에 따른 세굴폭의 변화는 상관성이 없는 것으로 분석되었다. 관로 주변부 수립자의 진폭 거리와 세굴폭의 크기는 밀접한 연관이 있으며, 진폭거리를 관경에 대해 무차원화한 KC 수와 상대 세굴폭의 상관성이 가장 강하게 나타났다.

수정 Ursell 수와 상대 세굴폭과의 상관성은 KC 수에 비해 다소 약하게 나타났다. 이는 상대적으로 주기가 긴 파고의 경우 완전히 소파되지 않고 반사파를 일으켜 Ursell 수의 계산에 어느 정도의 오차를 유발하기 때문으로 판단된다.

매설비에 따른 터널형 세굴의 유무를 분석한 결과, 전반적으로 KC < 40에서 터널형 세굴공이 확인되지 않았으며 KC > 40의 경우 매설비에 상관없이 대부분 세굴이 발생하였다. 본 연구는 이동상 조건을 대상으로 수행되었으나, 평형 상태를 유지하기 위한 유사 유입에 대해 어느 정도의 오류가 발생

www.kci.go.kr

할 수가 있고, 실험 과정 중 발생한 사련 현상으로 인해 관로 주변부에 침식량을 초과하는 유사가 유입되기도 하였다. 보다 자세한 연구를 위해서는 대축적 실험에 의한 모의가 필요하며 이동상 조건과 정지상 조건에서의 개별적인 실험이 선행될 필요가 있어 보인다.

참고문헌

Çevik. E., and Y. Yüksel. 1999. Scour under Submarine Pipelines in Waves in Shoaling Conditions. *Journal of Waterway: Port, Coastal, and Ocean Engineering.* 125(1): 9-19.

Herbich, J. B. 1981. *Offshore Pipeline Design Elements.* New York: Marcel Dekker Inc.

Ibrahim, A., and C. Nalluri. 1981. *Scour Prediction around Marine Pipelines*, Proc. 5th Int. Symp(Offshore Mech. and Arctic Engrg. ASME. New York): 679-684.

Klomp, W. H. G., E. A. Hansen, Z. Chen, R. Bijker, and M. B. Bryndum. 1995. *Pipeline Seabed Interaction, Free Span Development.* The International Society of Offshore and Polar Engineers, The Gague, Netherlands.

Lucassen, R. J. 1984. *Scour Underneath Submarine Pipelines.* MATs REp. PL-4 2A, Marine Tech. Res. The Netherlands.

Sümer B. M., and J. Fredsøe. 1990. Scour Below Pipelines in Waves. *Journal of Waterway, Port Coastal, and Ocean Engineering.* 116(3): 307-323.

Sümer B. M. and J. Fredsoe. 2001. Scour Around Pile in Combined Waves and Current. *Journal of Hydraulic Engineering.* 127(5): 403-411.

Yüksel, Y., V. Ath, and E. Çevik. 1995. *Flow Field along a Flat Surface with a Parallel Placed Cylinder.* Proc., 5th Int. Offshore and Polar Engrg. Conf., International Society of Offshore and Pollar Engineering, Golden, CO: 157-170.

金京鎬: 서울대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 쇄파후 파고감쇠 및 평균수위 변동에 관한 연구), 현재 충북대학교 토목공학부에서 교수로 재직 중이다. 관심분야는 해안세굴 및 표사, 파동역학과 해안수리, 등이며 주요 논문으로 "경사해빈에 설치된 해저관로의 국부세굴(2003)", "파와 흐름에 노출된 관로 주변부 국부세굴에 영향을 미치는 매개변수(2012)" 등이 있다(coastal@chungbuk.ac.kr).

吳賢植: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 천해역에서 파와 흐름에 기인한 해저관로 주변의 국부세굴 폭의 특성) 현재 충북대학교 토목공학부에서 강사로 재직 중이다. 주요 관심 분야는 해안세굴, 하천구조물 설계, 생태 구조물 설계 등이며, 주요 논문으로 "3차원 CFD 모형을 이용한 원형 교각의 국부세굴 특성 해석

www.kci.go.kr

(2008)", "파랑하 해저관로 주변의 세굴폭에 영향을 주는 매개변수 분석(2009)"등이 있다(octavius@nate.com).

투 고 일: 2012년 11월 23일
수 정 일: 2013년 01월 06일
게재확정일: 2013년 01월 25일

www.kci.go.kr

Estimation of Local Scour Width around the Embeded Pipelines in Wave

Kyoung Ho Kim, Hyoun Sik Oh

The local scour widths around the submarine pipelines are obtained according to the various parameters such as wave height(H), period(T), pipe diameter(D), and embedment to pipe diameter ratio(e/D). The scour width and the scour depth show good correlation with the relative scour width compared to the main non-dimensional parameter. Finally, empirical equations for the effect of embedment depth on the local scour around submarine pipelines are suggested through the correlation analyses between the relative widths and the KC number, modified Ursell number.

Key words : local scour width, KC number, ursell number

www.kci.go.kr