

경사해빈에 설치된 해저관로의 국부세굴 Local Scour at a Submarine Pipelines on Slope Beach

황현구* · 김경호* · 연주흠* · 오현식*

Hyon Ku Hwang*, Kyoung Ho Kim*, Ju Heum Yeun*, and Hyoun Sik Oh*

요 旨 : 해저관로가 사용 기간동안 안정적으로 그 기능을 다하도록 하기 위해서는 설계시 국부세굴의 가능성을 주의 깊게 살펴보아야 한다. 관로가 침식성 해저바닥 위에 놓여지면 세굴이 일어나고 관로가 밑으로 쳐져서 팽팽하게 된다. 이로 인해 해저관로의 부분 혹은 전체가 파괴된다면 막대한 복구비용이 소요될 뿐만 아니라 해양오염을 초래할 수도 있다. 본 논문에서는 실험을 통해서 해저관로 주변의 세굴특성을 알아보았다. 일정경사면을 갖는 모형해빈상에 모형관로를 설치하고 파형경사를 달리해 가면서 실험을 수행하였다. 그리고 실험결과로부터 얻은 데이터를 이용하여 분석에 필요한 매개변수 값들을 산정하였다. 상대세굴심과 KC 수, 수정 Ursell 수와의 상관관계를 분석하여, 국부세굴심에 대한 경험식을 제시하였다.

핵심용어 : 해저관로, 경사해빈, 국부세굴, KC 수, 수정 Ursell 수

Abstract □ In order to ensure that submarine pipelines are stable and functional during their project lives, attention must be paid to possibility of their local scouring. When a pipeline is placed on an erodible bed, scour will develop and cause the spanning of the pipeline. If they were destroyed partially or fully, it might cause enormous restoration expenses and contamination of sea water. This paper aims at examining the characteristics of the scour and the prediction of the local scour depths around the submarine pipelines. The pipelines on the model beach with the uniform slope are placed, and the local scour depths around the pipelines are obtained according to the various wave steepnesses. Using the experimental results, some parameters needed for analyses are calculated. Finally, empirical equations of the scour depth around the pipelines are suggested through the correlation analyses between the relative scour depth, the KC number and Modified Ursell number.

Keywords : submarine pipeline, slope beach, local scour, KC number, modified Ursell number

1. 서 론

해안·항만에서 이용되는 여러 가지 구조물 중 해저관로는 오일이나 가스의 운송, 바다에서 폐수의 처리, 상수도관의 배설, 데이터 전송 시스템을 위한 광케이블의 설치는 물론 교통 수단으로서의 해저터널에 이르기까지 광범위하게 사용되어지고 있으며, 최근 정보통신 공학기술의 발달로 해저에 설치되는 관로의 수와 규모가 점차 증대하는 추세이다. 따라서 해저관로들이 해안과정(coastal process)에 대하여 안정적으로 그 기능을 수행하기 위해서는 사전에 충분한 조사와 검토가 이루어져야 한다.

해저관로를 설치할 때 검토되어야할 중요한 인자중 하나가 세굴이다. 근해에서는 주로 파에 의한 세굴이 주를 이루며, 심해로 갈수록 해류에 의한 영향이 커지게 되고, 해저 토사의 퇴적과 침식이 평형을 이룬 상태를 평형세굴이라 한다. 평형세굴에 이르기까지 기간은 해저 하상의 지질학적 특성과 해류 또는 파가 구조물에 미치는 강도의 특성에 따라 다르며 대부분의 세굴은 전체 세굴시기의 30~40% 정도면 평형에 이르게 되며, 이 때의 국부세굴심과 세굴범위가 본 논문의 주 관심대상이다.

해저관로에 대한 세굴연구는 크게 두가지로 나누어질 수 있는데 그 하나는 정상흐름상태에 대한 연구이다.

*충북대학교 토목공학과(Corresponding author: Hyon Ku Hwang, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea. hyonku@nate.com)

Chao와 Hennessy(1972)는 2차원 포텐셜흐름 이론에 기초하여 최대 세굴심을 예측할 수 있는 해석적인 방법을 고안하였고, Littlejohns(1977)는 정상류 상태에서의 평형세굴심을 측정하였다. 그리고 Sümer등(1988)과 Kristiansen(1988)은 유체력에 의해 진동하는 관로에서의 세굴에 대해 연구를 하였고, Chiew(1991)는 틈새 흐름의 양이 교란되지 않은 흐름에서의 수심과 관 직경, 그리고 관과 하상사이의 거리에 의해 결정된다는 것을 알아냈다.

다음으로 파가 존재하는 경우에 국부세굴심에 대한 연구는 Lucassen(1984), Sümer와 Fredsøe(1990), Klomp등(1995)같은 연구자들에 의해서 수행되었다.

Sümer와 Fredsøe(1990)는 파가 존재하는 경우에 이동상 조건에서 평형세굴심을 결정하는 중요 매개변수가 KC (Keulegan-Carpenter) 수라고 결론지었고 레이놀드 수가 $10^3 < Re < 10^5$ 인 범위에서는 레이놀드 수에 별로 관계되지 않는다는 것을 발견했다. Yüksel과 Narayanan(1993)은 고정상에 놓여진 수평 실린더에 작용하는 쇄파파력에 대해 연구하였고, Klomp 등(1995)은 해저면에서 관의 매설 깊이에 따른 KC 수와의 관계를 알아보고 그에 대한 식을 제안하였다. Çevik과 Yüksel(1999)는 수리실험을 통해 관경 및 파고에 대한 상대세굴심을 측정하였다.

본 연구에서는 규칙파를 사용하여 일정 경사를 갖는 해저 지형에서의 파에 의한 국부세굴의 특성을 살펴보고 획득한 실험결과에 기초하여 최대 평형세굴심을 이동상 조건에 대한 수정 Ursell 수와의 상관관계를 분석하여, 매개변수를 이용한 해저관로 주변의 세굴심에 대한 예측을 시도하였다.

2. 기본이론

풍파나 조류와 같이 느리고 다양한 비 정상흐름 조건에 의해 유발되는 관로 양 측면에서의 배후류(LeeWake)와 정상 흐름에서 발생하는 배후류 사이의 가장 큰 차이점은 관로 주변에 하강류(down-stream)가 형성되는 후류계에 있다. 비정상흐름 조건에서는 정상흐름에 비해 강력한 배후류의 침식이 관의 양 측면에서 발생하고 Fig. 1과 같이 좀 더 완만한 하강류 경사를 만든다.

세굴현상을 예측하기 위해서는 와류 이론에 기초한 해석적 접근방법이 타당하지만 와류를 일으키는 원인이 다양하고 와류 형성과의 관계를 수치적으로 나타내기 어렵기 때문에 잘 이용하지 않는다. 따라서 실험 또는 실측을 통해서 세굴을 일으키는 매개변수를 도출하고 이들의 차

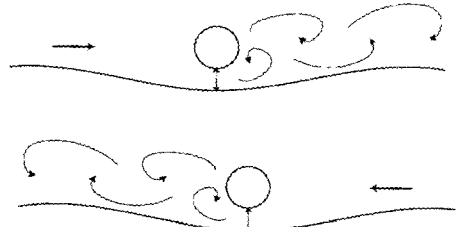


Fig. 1. Lee-wake effect in waves.

원해석을 통하여 KC 수나 수정 Ursell 수와 같은 무차원 인자들을 이용한 공식들이 주로 이용되고 있다.

2.1 매개변수에 따른 상대세굴심

파에 의한 관로에서의 국부세굴에 영향을 주는 인자를 함수식으로 나타내면 다음과 같다.

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

여기서 S 는 세굴심, D 는 관경, d/H 는 수심 매개변수, d/D 는 상대관지름, H/L 은 파형경사이며 θ 는 Shields 수이다.

Sümer와 Fredsøe(1990)은 세굴진행이 관의 조도에 의해서 실질적인 영향을 받는지를 알아보기 위해서, 관이 해양생물들로 완전히 피복되었다고 가정하고 상대조도 $k/D > 200 \times 10^{-3}$ (k_s =Nikuradse의 모래 조도)와 $k/D = 0.1$ ($k/D = 200 \times 10^{-3}$, $k_s = 2$ k)인 조건에서 반복 실험을 하였고, 그 결과 관 표면의 조도는 세굴심에 영향을 주지 못함을 알았고, 또한 레이놀드 수가 $10^3 < Re < 10^5$ 인 범위에서 세굴심에 별로 관계되지 않는다는 것을 발견했으며, 레이놀드 수와 상대 세굴심 사이의 상관관계가 명확하지 않은 것으로 지적했다. 또한 다음 식 (2)로 주어지는 Shields 수 또한 세굴에 대한 영향을 무시할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

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

여기서 Δ 는 토사입자의 상대밀도, g 는 중력가속도, d_s 는 바닥 재료의 입경, U_{fm} 은 교란되지 않은 바닥에서의 최대 전단속도이다. $U_{fm} = \sqrt{f/2} U_m$ 으로 계산되고, f 는 파가 존재할 때 경계층에서의 마찰계수이고 U_m 은 평균유속의 (U)의 최대값이다.

Sümer와 Fredsøe(1990)의 연구에서는 θ 는 0.03~2였으며 실험결과 상대세굴심에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 보고되었다. θ 값의 어떠한 변화도 유사이동의 변화

에 상응되기 때문에, 이러한 변화들은 세굴공의 상류와 내부에서 같은 크기로 발생하고, 결과적으로 평형 세굴심의 실질적인 변화가 없게 되므로 상대세굴심의 변동은 매우 미약하게 나타난다. 본 연구에서는 세굴과정에 있어서 Shields 수의 효과는 무시되었다.

2.2 세굴심과 KC 수와의 관계

파에 의해 반주기($T/2$)마다 진동하는 흐름장(Oscillatory motion)에서 와류형태의 확장과 그 형상은 다음 식으로 표현되는 KC 수에 의해 결정된다.

$$KC = \frac{2\pi a}{D} = \frac{U_b T}{D} \quad (3)$$

여기서 a 는 진폭이고, U_b 는 관이 없는 경우에 바닥에서의 최대 수립자 속도, T 는 파의 주기이며 D 는 관의 지름이다. KC 수가 매우 작은 경우 ($KC < 5$), 관으로 인한 하강류는 형성되지 않거나 작게 나타난다. 반면에 보다 큰 KC 수에 대해서는 관의 측면상에 와열(Vortex street)이 형성된다.

세굴심은 KC 수의 증가에 따라 증가하는데, 이 변화는 다음 식으로 대표된다(Sümer & Fredsøe(1990)).

$$S/D = 0.1 \sqrt{KC} \quad (4)$$

한 방향 흐름인 경우에 관 주위의 상대세굴심은 레이놀드 수에 관계된다. 그러나 Sümer와 Fredsøe(1990)는 파가 작용할 때 레이놀드 수에 의한 세굴심의 변화는 아주 미약하지만 진동(Oscillatory)흐름장을 고려할 때는 KC 수가 세굴과정에 있어 더욱 중요한 인자로 작용한다고 하였다.

2.3 상대세굴심과 수정 Ursell 수와의 관계

Çevik과 Yüksel(1999)은 천수변형 조건에서 KC 수에 따른 상대세굴심의 변화를 실험을 통해 분석하였고, 경사진 해안에서 KC 수에 따른 상대세굴심이 수평일 경우에 비해 약간의 편차를 보이는 것을 알아내었다. 따라서 KC 수가 상대세굴심을 결정짓는 유일한 매개변수가 아니라고 결론짓고, 다른 매개변수들과 상대세굴심의 관계를 분석하였으며, 무차원 매개변수 d/H 와 HL 의 조합으로 나타나는 Ursell 수와 상대세굴심과의 관계를 제시하였다.

Ursell 수는 파에 의해 발생하고 해저로 전달되는 에너지의 크기를 나타낸 것으로, 다음과 같이 정의하였다 (Ibrahim & Nalluri(1986)).

$$U_R = \frac{HL^2}{d^3} \quad (5)$$

여기서 H 는 국부파고, L 은 국부파장, d 는 국부수심이다. Çevik과 Yüksel(1999)의 실험결과를 이용하여 각각의 관의 지름에 대해서 Ursell 수에 대한 상대세굴심의 상관관계가 좋다는 것을 밝혔다. 그리고 상대세굴심(S/D)은 Ursell 수(U_R)뿐만 아니라, 상대파고(H/D)도 주요 영향인자로 작용하므로, 관의 지름을 포함한 상대세굴심에 대한 관계식을 얻기 위해 비선형 다중 회기분석을 이용하여 다음과 같은 무차원식을 얻었다.

$$\frac{S}{D} = 0.042 U_{RP}^{0.41} \quad (6)$$

여기서,

$$U_{RP} = U_R \left(\frac{H}{D}\right)^2 = \frac{H^3 L^2}{d^3 D^2} \quad (7)$$

이고, 여기서 H 는 국부파고, L 은 국부파장, D 는 관의 지름, d 는 국부수심을 나타내며 이를 수정 Ursell 수라고 부른다.

3. 파에 의한 해저관로의 세굴실험

3.1 실험장치 및 방법

본 연구는 길이 25 m, 너비 0.8 m 깊이 1 m의 조파수조에서 실행되었으며, 모형은 Fig. 2와 같이 제작하였다. 모형의 경사는 합판과 모래를 사용하여 중앙하단부터 폭 0.8 m, 길이 10 m 높이 1 m 규모로 제작되었으며 관의 직경에 의한 세굴의 특성을 알아보기 위해 $D=36, 60, 90$ mm의 매끄러운 PVC관을 사용하였다. PVC관은 수심이 0.25 m되는 위치에 설치하였으며, 어떠한 틈도 없이 모래바닥에 밀착되었고, 세굴 발생 후 관 지중에 의한 휨이 발생하지 않도록 단단히 고정시켰다.

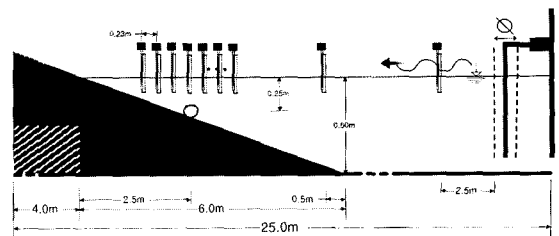


Fig. 2. Schematic description of experimental setup.

Table 1. Experimental condition

	Gain value	Pipe diameter	Wave period
	of wave maker	D (mm)	T (sec)
Scour condition	Run 1	36	1.0
			1.5
			2.0
	Run 2	60	2.5
			3.0
			3.0

파고의 측정에는 용량식 파고계를 사용하였으며, 관을 중심으로 뒤쪽에 3개 앞쪽에 3개 중심에 1개를 23 cm 간격으로 설치하였다. 또한 조파기로부터 3.5 m 떨어진 지점에 1개와 경사 시작부에서 0.5 m 떨어진 지점에 1개로 총 9개의 파고계를 설치하였다.

본 연구에서 사용한 하상재료는 입도분석 결과 $d_{50}=0.94$ mm, $d_{90}=3.03$ mm인 모래를 사용하였고, 2차원 조파장치를 이용해 규칙파를 발생시켜 실험을 하였으며, 이 때 규칙파의 주기(T)는 신호입력용 컴퓨터를 이용하여 1초~3초까지 0.5초 단위로 변화를 주었다.

본 연구에서는 평형세굴심에 도달하기 위해 모든 실험에 대해 1,200개 이상의 파를 발생시켰고, 파를 발생시키기 전에 사면계를 이용하여 세굴전의 단면을 측정하고 후 파를 작용시켜 세굴이 일어난 후의 세굴단면을 측정하였다. 세굴단면의 측정은 관의 전후 400 mm범위이다.

실험조건은 Table 1에 나타내었다.

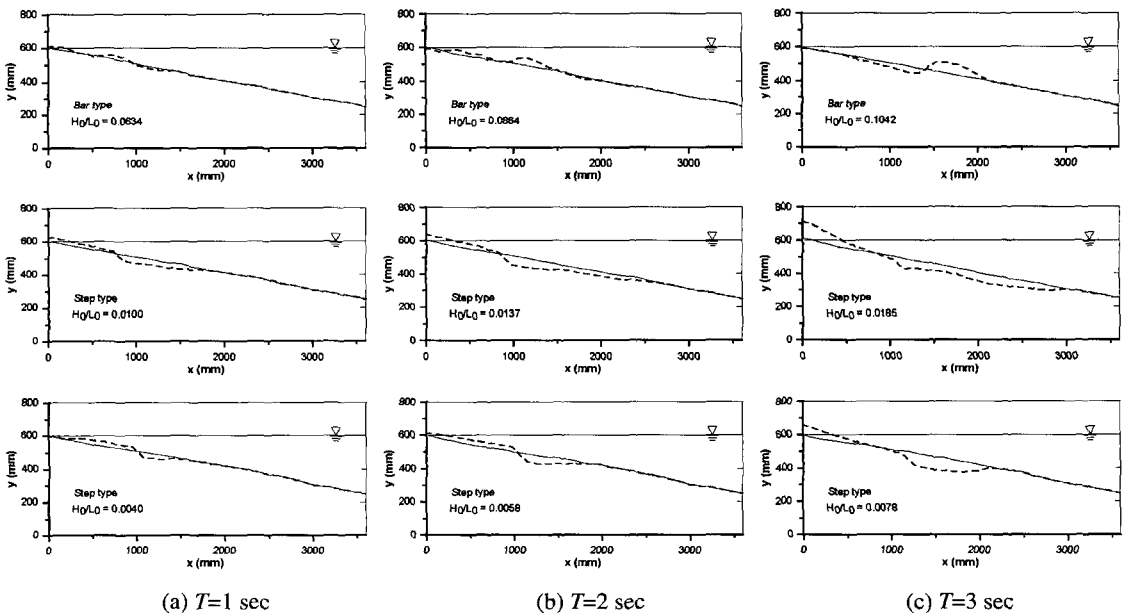


Fig. 3. Beach profiles on 1/10 slope.

3.2 경사해안에서의 해빈단면의 변화

해저관로와 같은 구조물이 설치되면 해안에 수직인 방향으로 해빈단면의 변화가 일어나고, 이와 같은 변화는 정선에 수직인 방향으로의 표사이동에 중요한 역할을 한다. 정선으로부터 시주 정부(crest)까지의 거리는 쇄파파고와 같이 증가하는데 큰 파는 작은 파에 비해 심해에 더 큰 외해시주(offshore bar)를 만든다. 따라서 해빈단면의 먼 바다방향에서의 침식양은 파의 조건과 단면 형태와 관계가 있고, 해빈단면의 먼 바다쪽에 놓여진 관에 의한 세굴 때문에 해빈단면을 고려하게 되었다. 본 연구에서는 1/10의 경사해안의 모형에 주기와 파고를 변화해 가며 해빈단면의 변화에 대해 실험하였다.

해빈 단면은 계단(step)형 단면과 사주(bar)형 단면으로 분류되어지는데 계단형 단면은 연안사주가 없는 해빈으로 전빈 경사가 급하고 간혹 전빈의 끝에 존재하기도 한다. 사주형 단면은 연안사주가 있는 해빈으로 전빈경사가 완만하다. Fig. 3은 1/10의 경사를 갖는 모형해빈을 만들어 규칙파를 작용시켜 얻은 해빈단면으로 처음에는 단면이 급격히 변화하다가 차차 변화가 적어지고 어느 정도 시간이 지난 후 거의 변하지 않는 평형상태에 접근하게 된다.

Fig. 3에서 제시된 바와 같이 파형경사가 작은 경우($H_0/L_0 \leq 0.0185$)에는 계단형 단면이 형성되고, 큰 경우($H_0/L_0 \geq 0.0634$)에는 사주형 단면이 형성되었다.

Table 2. Experimental data for scour parameters

Test no.	Pipe Diameter $D(m)$	Wave Period $T(s)$	Gain value of wave maker	U or U_m (m/s)	Eq. Scour depth(m)	Re	KC Number	Modified Ursell Number	S/D	비고
1	0.090	1.0	1	0.126	0.010	11340	1.4	4.267	0.112	
2	0.060	1.0	1	0.126	0.007	7560	2.1	9.824	0.117	
3	0.090	1.5	1	0.162	0.011	14580	2.7	9.996	0.123	
4	0.090	1.0	2	0.176	0.011	15840	2.0	11.679	0.123	
5	0.090	2.5	1	0.177	0.015	15930	4.9	17.177	0.167	
6	0.090	1.0	3	0.205	0.012	18450	2.3	18.635	0.134	
7	0.090	3.0	1	0.183	0.007	16470	6.1	20.549	0.078	
8	0.090	1.5	2	0.215	0.019	19350	3.6	23.649	0.212	
9	0.090	2.0	1	0.212	0.013	19080	4.7	26.016	0.145	
10	0.060	1.0	2	0.176	0.011	10560	2.9	26.542	0.176	
11	0.060	1.5	1	0.172	0.011	10320	4.3	27.626	0.184	
12	0.036	1.0	1	0.134	0.006	4824	3.7	32.355	0.167	
13	0.060	1.0	3	0.202	0.012	12120	3.4	39.863	0.193	
14	0.090	2.5	2	0.246	0.021	22140	6.8	44.745	0.229	
15	0.060	2.0	1	0.203	0.014	12180	6.8	52.546	0.234	
16	0.060	2.5	1	0.207	0.010	12420	8.6	60.404	0.167	
17	0.060	1.5	2	0.226	0.023	13560	5.7	60.625	0.377	
18	0.090	2.0	2	0.286	0.024	25740	6.4	63.163	0.262	
19	0.060	2.5	2	0.210	0.021	12600	8.8	64.401	0.352	
20	0.060	3.0	1	0.208	0.009	12480	10.4	69.147	0.142	
21	0.036	1.0	2	0.178	0.010	6408	4.9	69.714	0.279	
22	0.036	2.5	1	0.154	0.006	5544	10.7	70.827	0.167	
23	0.090	3.0	2	0.286	0.014	25740	9.5	77.629	0.156	
24	0.090	1.5	3	0.343	0.018	30870	5.7	94.004	0.195	
25	0.036	2.0	1	0.177	0.009	6372	9.8	95.244	0.237	
26	0.036	1.5	1	0.191	0.011	6876	8.0	103.794	0.293	
27	0.036	1.0	3	0.213	0.012	7668	5.9	128.207	0.321	
28	0.090	2.5	3	0.349	0.041	31410	9.7	130.370	0.458	
29	0.090	2.0	3	0.381	0.039	34290	8.5	150.100	0.430	
30	0.060	2.0	2	0.292	0.023	17520	9.7	154.159	0.377	
31	0.090	3.0	3	0.364	0.028	32760	12.1	159.338	0.307	
32	0.060	3.0	2	0.292	0.013	17520	14.6	186.579	0.209	
33	0.036	3.0	1	0.211	0.006	7596	17.6	197.878	0.154	
34	0.060	1.5	3	0.335	0.021	20100	8.4	198.313	0.352	
35	0.036	1.5	2	0.247	0.019	8892	10.3	222.643	0.530	※
36	0.036	2.5	2	0.237	0.012	8532	16.5	254.076	0.335	
37	0.060	2.5	3	0.346	0.033	20760	14.4	284.698	0.553	
38	0.060	2.0	3	0.372	0.038	22320	12.4	316.219	0.628	
39	0.060	3.0	3	0.370	0.029	22200	18.5	377.005	0.477	
40	0.036	2.0	2	0.284	0.035	10224	15.8	386.031	0.963	※
41	0.036	3.0	2	0.289	0.015	10404	24.1	507.206	0.419	※
42	0.036	1.5	3	0.335	0.014	12060	14.0	550.903	0.377	
43	0.036	2.5	3	0.346	0.040	12456	24.0	796.945	1.117	※
44	0.036	2.0	3	0.378	0.041	13608	21.0	920.413	1.131	※
45	0.036	3.0	3	0.370	0.049	13320	30.8	1050.870	1.368	※

3.3 관로 밑에서의 국부세굴특성

본 실험은 일정한 경사를 갖는 해안의 천수변형 구간(Shoaling Region)에서 이동상 위에 놓여진 고정된 관 주위의 국부세굴을 측정하기 위해서 수행하였다.

일반적으로 하상재료의 특성에 따라 평형 세굴에 도달하는 시간이 변화하게 된다. 실험이 시작된 후 얼마되지 않아 세굴이 시작되었고, 대략 120파가 진행되는 동안 평형세굴심의 70%~80%정도가 발생되었으며, 800파 이후의 세굴심의 변화는 거의 발생하지 않았다.

세굴과정의 초기단계에서는 세굴공에서의 유속의 증가로 인해 세굴심이 점점 깊어지고, 배후류 영역과 터널 침식 영역의 경계에서 모래 언덕이 발생하였고, 이 언덕은 관로 밑에서의 세굴심이 증가하는 동안 계속 발달하다가 점차 하류 방향으로 완만한 경사를 갖거나 강력한 배후류 침식에 의해 소멸되었다. 이 모래언덕은 세굴공에서의 흐름이 반주기 동안 방향을 바꿀 때 관 밑으로 지나는 흐름을 제한하여 세굴공에서 유속을 감소시키는 역할을 하며, 세굴공에서의 유속이 밖으로 모래를 운반할 수 있을 정도로 크지 않을 때 평형세굴 상태에 이르게 된다.

천수변형구간에서 최대 평형세굴심은 처음에는 관로의 바로 밑에 생기고 얼마 후에 관의 하류부분(흐름에 대해서 관의 뒤 부분)으로 서서히 움직인다. 따라서 상류부에서는 가파르고 하류로 갈수록 완만한 경사를 보이며 최종 세굴의 형상은 관을 중심으로 비대칭적인 형태를 보인다. 이러한 비대칭적인 세굴단면은 정수위를 기준으로 할 때 파봉과 파곡의 크기가 다르기 때문에 발생한다.

파봉에서 수립자의 속도는 파곡에서의 수립자 속도보다 크다. 파고 분포를 분석한 결과 크기는 파봉과 파곡에서의 위상차는 거의 2배에 달한다. 따라서 배후류의 강도는 관의 양쪽 면에서 서로 다르게 되고, 이와같은 강도차이 때문에 비대칭적인 세굴 단면을 형성한다고 볼 수 있다.

실험조건과 실험결과로부터 얻어진 국부세굴에 영향을 미치는 각 매개변수들의 값을 Table 2에 정리하였다. Table 2에서의 모든 매개변수들은 관경과 주기에 따라 정리하였고, 비교의 ※는 이상세굴을 표시한 것이다.

세굴심의 측정은 사면계를 이용하였고, 벽면효과를 최소화하기 위하여 조파수조의 중앙단면에서 측정하였다. 또한 세굴심(S)은 Fig. 4와 같이 경사진 해안 단면으로부터의 수직거리로 나타내었다.

Fig. 5~Fig. 7은 실험에서 얻어진 세굴단면을 관의 지름에 따라 도시한 것으로 관 지름 $D=36\text{ mm}$, $D=60\text{ mm}$, $D=90\text{ mm}$ 일 때 파고와 주기를 변화시켜 가며 평형 국부

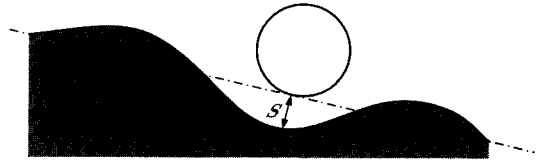


Fig. 4. Scour profile in shallow water region.

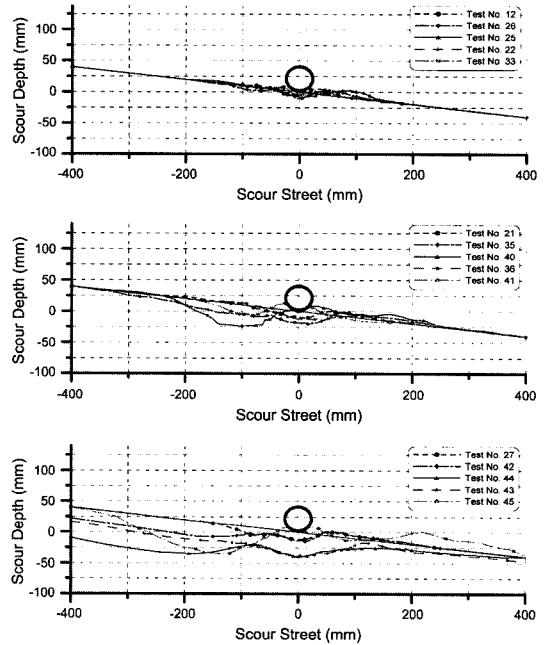


Fig. 5. Variation on equilibrium scour depth; pipe diameter= 36 mm.

세굴심을 측정된 결과로 평형세굴에 도달한 세굴단면을 도시한 것이다. 전반적으로 관의 지름과 파고가 커질수록 세굴심이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 각 그림에서 파고가 가장 크게 나타난 경우에 세굴심이 가장 높게 나타났다.

3.4 파고 분포에 따른 세굴단면의 특성

전술한 바와 같이 파봉과 파곡의 서로 다른 위상차에 의해 관로의 좌우에서 세굴 양상은 비대칭적으로 나타난다.

Fig. 8은 한주기 동안의 각 위상에서 관 주변의 수립자 궤적을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 파봉은 파곡에 비해 거의 두 배에 이르는 수립자 체적의 차를 갖는다. 이러한 파의 비선형성은 비대칭형 세굴단면의 원인이 되고, 이로 인해 최대세굴심은 관의 하류부에 발생하고, 배후류에 의한 침식도 하류부에서 더욱 활발히 일어나게 된다. 즉, 최대세굴심은 기준면에서 파봉까지의 높

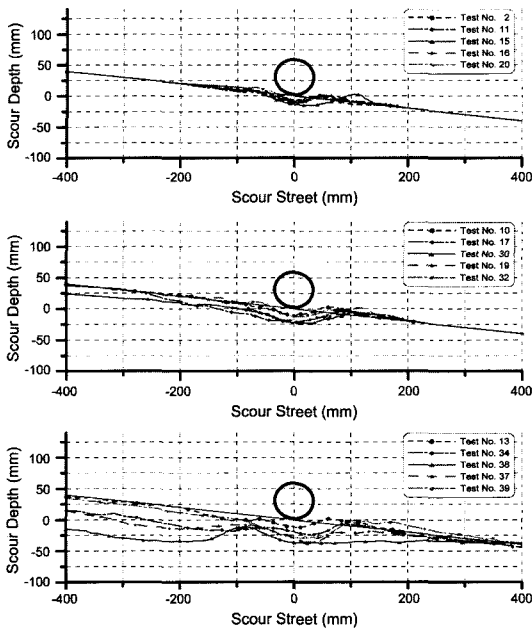


Fig. 6. Variation on equilibrium scour depth; pipe diameter=60 mm.

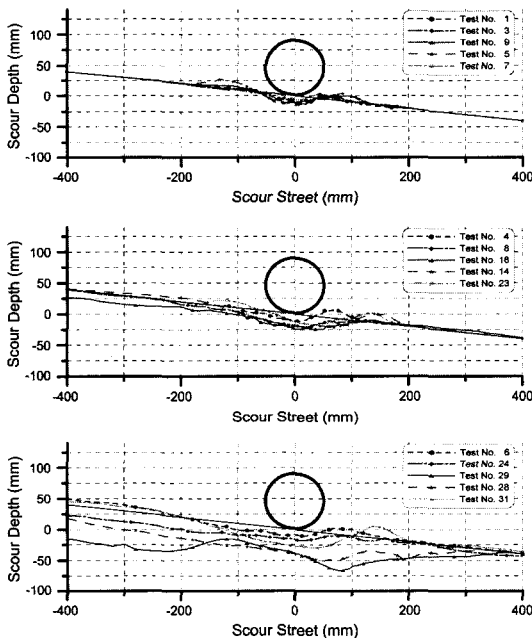


Fig. 7. Variation on equilibrium scour depth; pipe diameter=90 mm.

이에 해당하는 파고값에 의해 발생한다고 할 수 있다. Sümer 등(2001)은 세굴의 발생과정에 대한 실험에서 이러한 비선형성에 의해 파곡의 반주기에서의 압력변화가 관

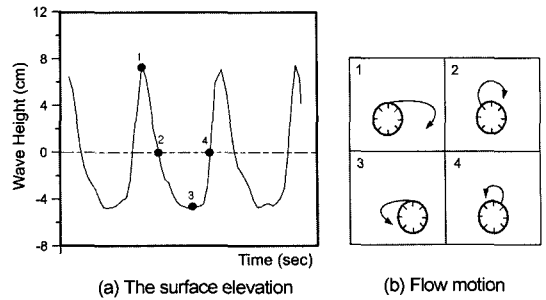


Fig. 8. Time series for the surface elevation and sequence of flow picture.

공작용을 일으키기에 충분하지 않다면 세굴은 파봉에서만 발생한다고 지적하고 있다.

3.5 KC 수와 상대세굴심

KC 수는 궤도 운동의 진폭과 구조물의 지름 비의 측정수단이며, KC 수의 물리적인 의미는 구조물의 크기(D)에 대한 한 주기 동안의 수립자의 이동거리($U_b \cdot T$)의 비로서 설명할 수 있다. 즉, KC 수는 진동 흐름장에서 구조물 주위의 흐름 형태를 정의한다.

상대 세굴심은 관 주위의 흐름 형태에 따라 바뀌므로, 상대 세굴심 역시 KC 수에 따라 변화하게 된다. Fig. 9는 실험 결과로부터 획득된 자료를 바탕으로 KC 수($KC=1.4 \sim 30.8$)에 대한 상대 세굴심을 나타낸 것이다.

이 때의 상관계수는 $r=0.72$ 로 나타났고, KC 수가 증가할수록 분산이 커지는 경향이 나타났다. Fig. 9의 자료를 회귀분석하여 다음과 같은 회귀방정식을 얻었다.

$$\frac{S}{D} = 0.07KC^{0.66} \tag{8}$$

3.6 수정 Ursell 수와 상대세굴심

실험 결과를 이용하여 상대 세굴심과 Çevik과 Yüksel

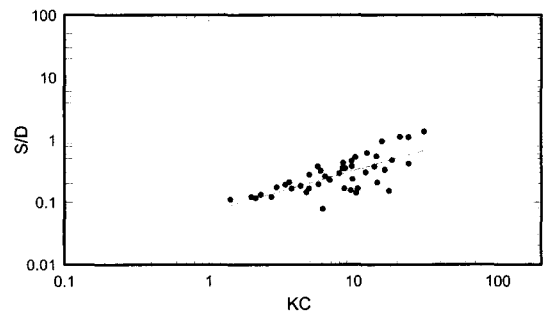


Fig. 9. Relative scour depth versus KC number.

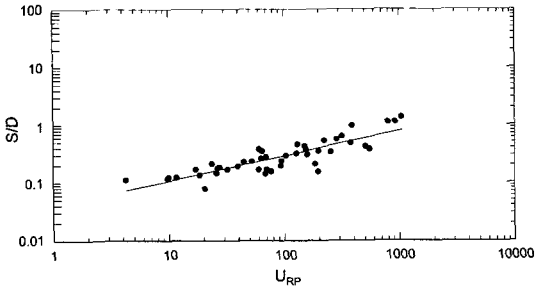


Fig. 10. Relative scour depth versus modified Ursell number.

(1999)에 의해 제안된 수정 Ursell 수와의 관계를 분석하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 수정 Ursell 수는 세굴심에 대한 관경의 영향을 포함하고 있다. Fig. 10은 본 실험에서 얻어진 수정 Ursell 수에 따른 상대 세굴심의 변화를 나타낸 것이다.

식 (9)는 Fig. 10의 결과 값을 회귀분석하여 얻은 결과식이다.

$$\frac{S}{D} = 0.039U_{RP}^{0.44} \quad (9)$$

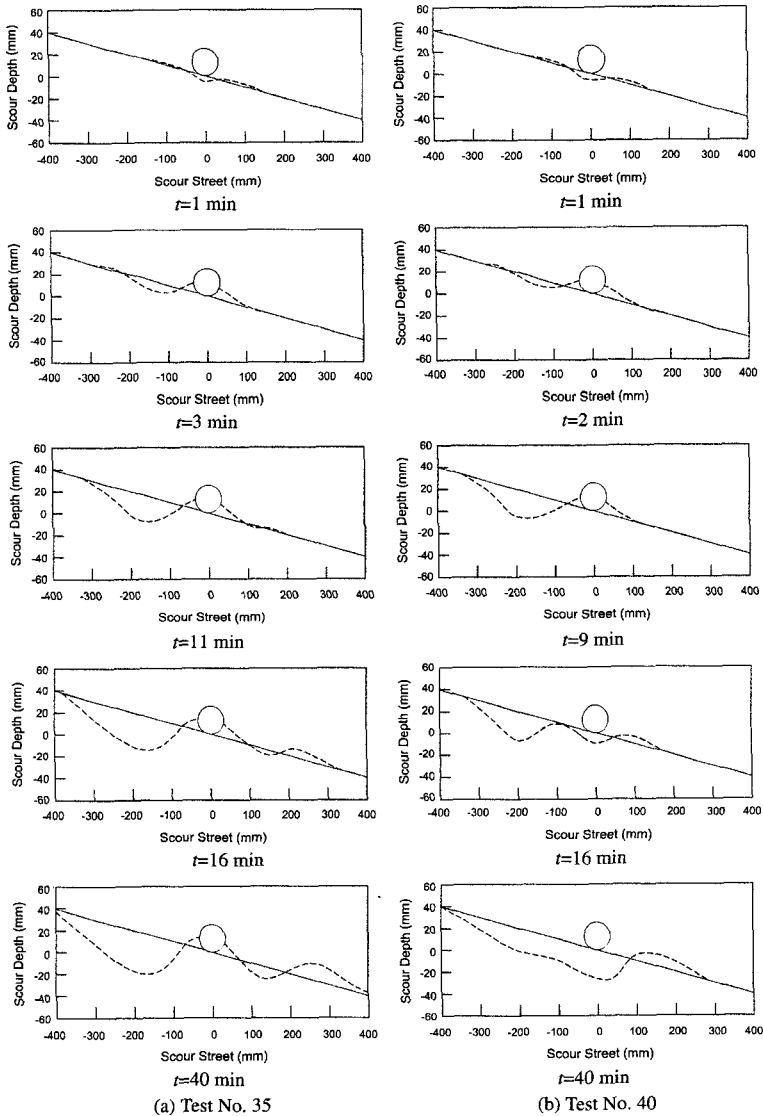


Fig. 11. Development of scour.

이 때의 상관계수는 $r=0.85$ 이며 KC 수에 비해 좋은 상관관계를 보이고 있다.

수정 Ursell 수에 대한 상대세굴심 예측은 천수변형조건에서 파에 의한 수립자의 유동을 파악하기 힘들 때 유리하며, 계산에 필요한 변수들은 현장에서 쉽게 얻을 수 있기 때문에 세굴 과정의 지배 매개변수로서 좋은 대안이 될 것으로 사료된다.

4. 이상세굴

본 실험에서는 세굴이 발생하지 않거나 뒷채움 현상으로 발전되는 이상세굴현상이 나타났다. Table 2에서 ※로 표시된 경우가 이에 해당한다. Fig. 11은 본 실험에서 발생한 대표적인 이상세굴단면을 도시한 것이다. Fig. 11(a)의 경우 실험 초기에 정상적인 세굴현상이 일어나다가 어느 순간부터 뒷채움 현상이 일어났고 평형상태에 이르러서도 뒷채움 현상이 나타났다.

Fig. 11(b)의 경우는 어느 시점부터 뒷채움 현상이 일어났고 실험 도중 뒷채움 현상이 일어났으며 어느 순간부터는 또 다시 정상적인 세굴형태를 나타냈다.

Klomp 등(1995)과 Sümer 등(1990)은 관경과 매설깊이(e)의 비로서 나타나는 매설비(embedment ratio, e/D)에 따른 세굴 특성에 대하여 실험을 실시하였으며 Fig. 12와 같은 관계가 있음을 발견했다.

Fig. 12에서 알 수 있는 바와 같이 매설비의 값이 클수록 세굴이 발생하지 않으며, 세굴이 발생하기 위한 한계 조건에 있을 경우 매설깊이를 작게 하거나 KC 수를 높이면 세굴이 일어난다.

세굴의 발생에 관해 그 한계 조건에 대한 실험적 연구는 있으나 아직 미미한 단계이고, 더욱이 이상세굴에 대

해 외류 형성과 관련된 정확한 원인을 규명한 연구는 없다. 만일 해저상에서 해저관로가 이와 같이 매몰된다면 관로는 정적, 동적 하중을 받게 되며, 수중 토압에 의해 심각한 영향을 받을 수 있다. 실제 해안에 관로가 설치된 후 주변에 다른 수공 구조물이 건설될 경우가 이에 해당한다고 볼 수 있으므로 구조물 설계시 반드시 고려해야 할 사항이다.

5. 결 론

본 논문에서는 경사진 해안에 놓여진 관로의 세굴특성을 파악하기 위해 수리모형 실험을 실시하였다.

파고(H), 주기(T), 관경(D)을 매개변수로 하여 국부 세굴 특성을 살펴보고, 획득한 실험결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 논문에 이용된 1/10의 경사를 갖는 해변단면에서는 파형경사가 작은 경우($H_0/L_0 \leq 0.0185$)에는 계단(step)형 단면이 형성되었고, 큰 경우($H_0/L_0 \geq 0.0634$)에는 사주(bar)형 단면이 형성되었다.

2. 경사진 해저하상에 놓인 관로에 파가 작용할 경우, 관로 주변의 세굴과정은 KC 수와 수정 Ursell 수로서 설명할 수 있으며, KC 수와 수정 Ursell 수가 증가함에 따라 국부세굴심 및 그 영역 또한 증가한다.

3. KC 수와 수정 Ursell 수에 대한 상대세굴심과의 상관관계를 분석한 결과, 경사진 이동상 조건에서 KC 수가 증가할수록, 상대세굴심은 큰 분산을 보였으며, 이에 반해, 수정 Ursell 수는 좋은 결과를 나타내고 있다. 수정 Ursell 수에 의한 상대세굴심의 예측은 천수변형 조건에서 파에 의한 수립자의 유동을 파악하기 힘들 때 더욱 유리하며, 계산에 필요한 변수들은 현장에서 쉽게 얻을 수 있기 때문에 세굴과정의 지배매개변수로서 좋은 대안이 될 것으로 판단된다.

4. 천수변형구간에서 대부분의 세굴이 초기에는 관로의 바로 밑부분에 발생하고, 파가 진행됨에 따라 세굴심은 증가하며 관의 하류부분으로 움직여 세굴공은 비대칭형태를 띠는데, 이는 파의 비선형성에 기인하는 것으로 판단된다.

5. 실험 중 특정 조건에서 뒷채움과 세굴이 반복되는 이상세굴이 발생하였다. 이는 관의 지름, 파고, 수심 및 주기사이의 상관성에 의해 발생하는 것으로 판단되며, 관경과 매설깊이의 비로 설명할 수 있다. 그러나 이들의 명확한 관계를 파악하기 위해서는 수리실험과 실제해역에서의 관측에 의한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

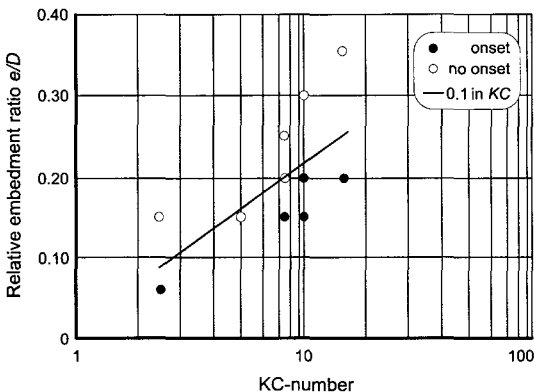


Fig. 12. Onset of scour and development regimes.

참고문헌

- Bijker, E.W., and Leeuwestein, W., 1984, *Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and current*, Seabed Mechanics, Proc. Symp. IUTAM/IUGG, Newcastle Upon Tyne, England, pp. 235-242.
- Chao, J.L., and Hennessy, P.V. 1972, Local scour under ocean outfall pipe-lines, *Journal of Water pollution control Fed.* **44**(7), pp. 1443-1447.
- Chiew, Y.M., 1991, Flow around horizontal circular cylinder in shallow flows, *Journal of waterway, port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, **117**(2), pp. 120-135.
- Çevik, E., and Yüksel, Y., 1999, Scour under Submarine Pipelines in Waves in Shoaling Conditions, *Journal of waterway, port, Coastal, and Ocean Engineering*, **125**(1).
- Herbich, J.B., 1981, *Offshore pipeline design elements*. Marcel Dekker Inc., New York.
- Ibrahim, A., and Nalluri, C., 1986, Scour prediction around marine pipelines, Proc. 5th Int. Symp. on Offshore Mech. and Arctic Engrg., ASME, New York, pp. 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 Hague, Netherlands.
- 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, *Proc. of 7th Int. Symp. on Offshore Mech. and Arctic Engrg.*, (OMAE), Houston, pp. 33-38.
- Sümer, B.M., and Fredsøe, J., 1990, Scour Below Pipelines in Waves, *Journal of waterway, port Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, **116**(3).
- Sümer, B.M., and Fredsøe, J., Christensen, S., Lind, M.T., 1999, Sinking/Floatation of pipelines and other objects on liquefied soil under wave, *Coastal Eng.*, **38**(2), pp. 53-90.
- Sümer, B.M., Mao, Y., and Fredsøe, J., 1988, Interaction between vibrating pipe and erodible bed, *Journal of Wtrway., Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, **114**(1), pp. 81-92.
- Sümer, B.M., Truelsen, C., Shchmann, T., Fredsøe, J., 2001, Onset of scour below pipelines and selfburial, *An International Journal for coastal, Harbour and Offshore Engineers*, pp. 313-335.
- Yüksel, Y., Ath, V., and Çevik, E., 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 Polar Engineering*, Golden, Colo., pp. 157-170.
- Yüksel, Y., and Narayanan, R., 1993, Breaking wave forces on horizontal cylinders close to the sea bed, *Journal of Wtrway., Port, Coast. and Oc. Engrg.* **23**, 115-133.

Received May 21, 2003

Accepted August 28, 2003