

파와 흐름에 노출된 관로 주변부 국부세굴에 영향을 미치는 매개변수 Parameters Analysis for Influence on the Local Scour around a Pipeline Exposed Waves and Currents

김경호* · 오현식* · 김흥국* · 손광식*

Kyoung-Ho Kim*, Hyoun-Sik Oh*, Heung Guk Kim* and Kwang-Sik Son*

요 지 : 이 논문은 천해역에서 파와 흐름에 노출된 관로주변의 세굴을 다루고 있다. 해저관로주변의 세굴특성을 알아보기 위해, 관경, 주기, 파고 및 흐름속도를 달리해 가면서 실험을 수행하였다. 파와 흐름 발생장치가 사용되었고, 흐름은 파와 동일한 방향과 그 역방향으로 발생시켰다. 실험결과를 이용하여, 세굴심과 KC수, Froude 수, Ursell 수 및 속도비등과 같은 무차원 매개변수들과의 상관관계를 분석하였다. 상대세굴심은 속도비 함수가 0에 접근하면 파의 성분에 지배되고, 1에 접근하면 흐름성분에 지배되는 것을 명료히 보였다. 속도비 함수는 파와 흐름이 공존하는 영역에서 관로주변의 세굴변화를 표현할 수 있는 적절한 매개변수임이 입증되었다. 또한 Froude 수와 KC수에 각각 파의 수립자속도와 흐름속도를 고려한 매개변수들은 세굴심을 나타내는데 더 좋은 상관관계를 보여 주었다.

핵심용어 : 국부세굴, Froude 수, KC 수, Ursell 수, 유속비

Abstract : This paper deals with the local scour around a pipeline exposed to combined waves and current in the shallow water zone. To investigate the characteristics of the scour around a pipeline on the sea bed, experiments were performed according to the various pipe diameters, wave periods, wave heights, and current velocities. Wave generator and current generator were used for the experiments. Two current directions were used ; co-direction and counter direction to the waves. With the experimental results, the correlations between the scour depths and non-dimensional parameters such as Keulegan-Carpenter number(KC), Froude number(Fr), Ursell number(Ur) and velocity ratio were analysed. The relative scour depths were found obviously to be dominated by the wave component when the velocity ratio function approaches zero and those are governed by the current component when the velocity ratio approaches unity. Velocity ratio function was approved to be a proper parameter which is able to express the change of the scour in the combined wave and current zone. Also considering the orbital velocity and the current velocity into Fr number and KC number respectively, scour depths show more favorable correlation with the parameters.

Keywords : Local Scour, Fr number, KC number, Ursell number, Velocity ratio

1. 서 론

해저관로는 원유나 가스, 물, 공기 등의 각종 유체를 수송하거나, 광케이블의 설치 및 교통수단의 기능을 수행하는 해양 구조물로서, 이러한 다방면의 해양 개발의 필요성에 의해 규모나 설치 빈도가 늘어나는 추세이다. 해저관로는 주기가 긴 조류 성분이나 하천 입구부와 같은 정상 흐름과 파랑에 의해 영향을 받게 되며, 관로에 의해 교란된 흐름은 구조물 주변에 침식작용을 일으킨다. 이러한 세굴(scour)은 동수력을 유발하여 관로를 진동시키거나 침하 및 매몰에 의해 정적·동적 하중을 유발시킨다.

관로 주변부 국부세굴에 대한 연구는 하천이나 강과 같은

정상 흐름 영역에서 출발하여 이후 천해역과 같은 진동형 흐름장으로 공간적 대상을 넓히며 다양한 조건에서 실험 및 연구가 수행되었으며 실험이나 현장의 조건에 대하여 제한적인 하지만 국부 세굴을 일으키는 기구를 파악하고 세굴을 정량화할 수 있는 기법이 개발되었다. 그러나 두 가지 서로 다른 흐름이 공존하는 경우에 대해서는 세굴 관련 연구가 상대적으로 매우 적고, 이를 실제 현장에 적용하기까지는 해결해야 할 문제들이 여전히 남아있다.

해저관로 주변에서 발생하는 세굴에 대한 연구는 정상흐름(steady current)이 작용할 경우, 파랑(waves)이 작용할 경우, 그리고 본 논문에서 수행한 파랑과 흐름이 결합되어 작용할 경우에 대한 연구 등으로 대별할 수 있다. Kjeldsen et al.(1973)

*충북대학교 토목공학과(Corresponding Author : Oh, Hyoun-Sik, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University, 410 Seongbong-ro, Heungdeok-gu, Cheongju Chungbuk 361-763, Korea. octavius@nate.com

은 한 방향 흐름조건에서 해저관로 주변의 세굴을 측정하기 위해 이동상 조건에서 수로 실험을 실시하여 세굴심이 입경과 수심의 영향이 아닌 흐름속도와 관경에 의해 영향을 받는다는 경험식을 제안하였고, Chiew(1990)는 해저관로에서 초기 세굴의 지배적인 영향인자는 파이핑(piping)이라고 보고하였다. 관로의 상류부의 높은 정제압력과 비교적 낮은 하류부의 압력에 의해 유도된 압력경사가 하상 부유물질의 부력경사를 초과할 때 파이핑이 발생한다는 것이다. Sümer and Fredsøe (1990)는 모래입자의 크기를 고려한 정상흐름과 파가 작용하는 경우에서의 세굴 실험을 실시하여 관경과 관의 위치 및 시간에 따른 세굴패턴의 변화를 비교분석하였고, 그 결과 이동상 조건에서 평형세굴심을 결정하는 중요 매개변수는 KC 수 (Keulegan-Carpenter number)이며, 관의 표면 조도는 실제로 세굴 과정상 영향을 미치지 않는다고 보고하였다.

본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로, 두 가지 크기를 갖는 관경과 정상흐름 및 파랑 조건을 달리하며 실험을 수행하였다. 특히 천해역에서 발생하는 파의 비선형성의 영향을 고려하여 정상 흐름의 방향을 파의 진행방향과 달리하여 그 결과를 분석하였다. 본 연구를 통하여 연안이나 천해역에서의 전체 세굴 영역에 대한 추이를 파악하고 이를 기초 자료로 활용하여 세굴 방지대책 수립에 제반 지식을 제공하고자 한다. 비록 해안이나 해저 상에 설치되는 구조물의 종류나 규모, 형상상의 차이가 있더라도 기본적인 실험 과정이나 분석 방법의 유사성을 고려할 때 다양한 해안 구조물로의 부분적 적용이 가능할 것으로 사료된다. 마지막으로, 본 연구는 김 등(2008)의 연구 결과를 유속비 함수에 따라 재구성한 것이며 기존 연구를 수정 및 보완한 것이다. 기 연구는 파와 흐름이 공존할 경우 변형된 파의 형상을 측정하여 대표파고 및 바닥전단유속을 계산하여 세굴심을 산정한 반면, 본 연구는 파와 흐름을 따로 측정하여 각각의 흐름 특성을 반영할 수 있도록 변형된 Fr 수와 KC 수로써 국부세굴의 거동을 설명하고자 하였다.

2. 파랑과 흐름의 공존역에서의 세굴

흐름이 한 방향으로 작용하게 되면 관로 하단에서 발생하는 와류에 의해 관공현상이 일어난다. 관공현상은 관로 하단에 터널형 세굴을 일으키며 평형 단계에 이를 때까지 세굴공을 확장시며 하류 방향에 모래 언덕을 형성한다. 하류 방향으로 길게 형성되는 후류와는 관로 하단의 세굴공을 하류쪽으로 연장시키며 비대칭형 평형 세굴단면을 이룬다(Fig. 1).

파에 의한 관로 주변의 세굴 메커니즘은 기본적으로 정상 흐름에서의 세굴로 설명할 수 있으며 와류 형성과정 또한 기본적으로 같다고 할 수 있다. 그러나 파와 같은 다양한 비정상류 조건에 의해 유발되는 관로 양 측면에서의 배후류와 정상류 흐름에서 발생하는 배후류의 주된 차이점은 관로 주변에 하강류가 형성되는 후류계(wake system)에 있다. 관을 중

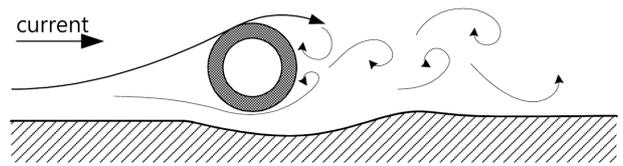


Fig. 1. vortex shading around the pipeline.

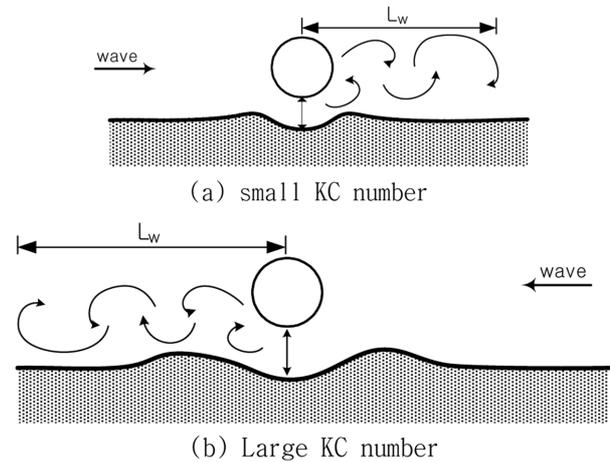


Fig. 2. Sketch of scour hole and stream wise extend of lee-wake.

심으로 좌우에서 와류들이 형성되며, 와발산(vortex shedding) 또한 대칭적으로 발생한다(Fig. 2). 따라서 반주기($T/2$)마다 관을 중심으로 고유의 영역을 갖고 좌우 대칭적인 세굴이 일어난다.

Sümer and Fredsøe(1990)는 그들의 실험에서 파에 의해 반주기마다 진동하는 흐름장(oscillatory motion)에서 와류 형태의 확장고 그 형상은 KC 수에 의해 결정되며, 파에 의한 이동상 조건의 평형세굴심을 결정하는 주요 매개변수로서 다음과 같은 KC 수를 제안하였다.

$$KC = \frac{2\pi a}{D} = \frac{U_w T}{D} \quad (1)$$

여기서, a 는 진폭이고, U_w 는 관이 없는 경우 바닥에서의 최대 수렴자 속도, T 는 파의 주기이며, D 는 관의 지름이다. KC 수의 값이 매우 작은 경우($KC < 5$), 관으로 인한 상승류는 형성되지 않거나 작게 나타난다. 반면에 보다 큰 KC 수에 대해서는 관의 측면상에 와열(vortex street)이 형성된다.

파와 흐름이 결합된 흐름장에서 두 유속이 작은 경우의 세굴은 파랑만 존재하는 경우에서의 국부세굴과 유사한 경향을 보이지만, 유속이 일정 속도 이상이 되면 정상흐름이 지배하는 세굴의 경향이 나타난다. 이러한 현상은 정상흐름과 파랑에 의해 해저면에서 발생하는 유속의 비로서 설명할 수 있으며, 속도비 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{cw} = \frac{U_c}{U_c + U_w} \quad (2)$$

여기서 U_w 는 비교란시 파랑에 의한 해저면에서의 최대 바닥

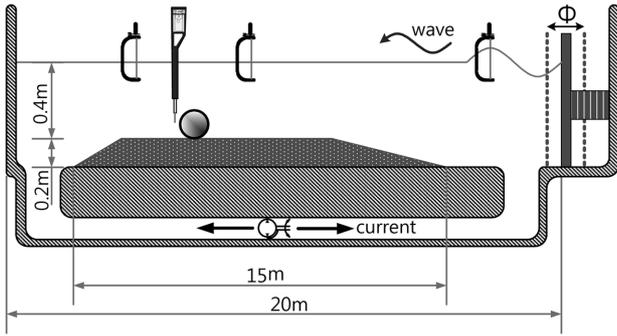


Fig. 3. Schematic description of experimental setup.

유속이고, U_b 는 비교란시 바닥으로부터 $D/2$ 거리에서 측정된 정상 흐름의 유속으로서 바닥근방 정상흐름 속도를 나타낸다. 즉, 유속비가 0인 경우는 정상 흐름이 없이 파랑만 존재하고, 유속비가 1인 경우는 정상 흐름만이 존재하는 경우이다.

3. 실험장치의 구성 및 방법

3.1 실험모형의 구성

본 실험은 파와 흐름이 공존할 때, 천해역을 대상 영역으로 하여 이동상 조건에서의 세굴과정을 모의하는 것으로 전체적인 실험 장치의 구성은 Fig. 3과 같다. 이에 따라 파장에 대한 수심비(h/L)의 크기를 1/25~1/2로 설정하되 틴세 흐름의 효과를 최소화 하도록 수심을 설정하였고, 수조 내에 적

어도 2개 이상의 파장이 발생하도록 주기를 산정하였다. 모래의 중앙입경은 이동상 조건에 따라 본 실험의 한계 Shields 수인 0.04 이상이 되도록 $d_{50}=0.71$ mm의 비점착성 모래를 사용하였다. 이 때 균등계수는 $C_u=5.2$ 이다. 관로는 바닥에 수평으로, 관로의 장축을 파에 수직하게 설치하였다. 관은 어떤 틴도 발생하지 않도록 모래 하상 위에 직접 놓였 으며, 파랑과 흐름의 압력에 의한 이탈 또는 세굴 발생 후 관 자중에 의한 자가매몰이 발생하지 않도록 단단히 고정시켰다. 최종 평형 세굴단면은 3축 사면 측정 장치를 사용하여 5 mm 간격으로 실측하였다.

3.2 실험방법

규칙파는 piston형 조파기에 의해 만들어지고 조파수조 양 단에 경사식 소파체를 두어 반사파의 영향을 최소화하였다. 관로는 양 끝단에 고정되어 침하되지 않으며 흐름에 따른 하상은 이동상 조건이다.

실험 조건에 따라 미리 설정된 파고에 다다르면 흐름발생 장치를 이용하여 흐름을 발생시켜 파랑과 흐름이 결합된 흐름장이 되도록 하였다. 평형세굴심에 도달하기 위해서는 최소한 1,000개 이상의 파가 관로에 작용되어야 하고, 1000개 이상의 파가 작용한 후에는 평형세굴심의 유의한 변화는 발생하지 않았다. 국부세굴이 어느 정도 발생한 후에는 모래의 이동이 없게 되어 평형상태에 이르게 된다. 실험 조건은 Table 1과 같으며 총 74회의 실험이 수행되었다.

Table 1. Experimental conditions for the local scour

Case No.	Scour condition	Pipe diameter D (mm)	Wave period T (sec)	Wave height H (cm)	Current velocity V (m/sec)
Case 1 (co-direction)		60	1	5	0.1
		90	2	10	0.2
		90	2	15	0.3
Case 1 (counter direction)		60	1	5	0.1
		90	2	10	0.2
		90	2	15	0.3

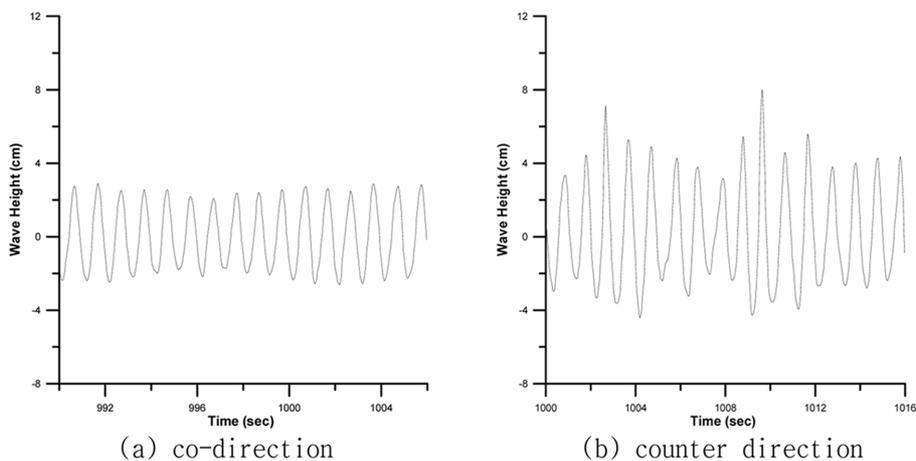


Fig. 4. Time series of wave heights pattern. ($D = 60$ mm, $T = 1$ sec, $H = 10$ cm, $V = 0.2$ m/sec)

4. 실험결과

주기가 1초일 경우 파랑과 흐름의 방향이 같을 때에는 파고가 파랑만이 존재할 때보다 감소했고, 반대 방향일 때에는 파고가 증가하고 다소 불규칙적인 파형을 나타내며 군파의 형태를 보인다(Fig. 4). 또한 천해역에서의 파형은 정수면으로부터 파봉까지의 거리가 파곡에 비해 큰, 비선형적인 형상이다. 따라서 최대 바닥유속은 수립자가 파봉의 위치에 있을 때 나타나고 바닥 부근에서의 수립자의 궤도도 흐름 방향으로 길게 치우치게 된다.

초기 세굴공은 관로 하단에서의 압력차로 인해 발생하여 터널형 세굴이 발생한 직후부터 급격히 확장된다. 관로 주변의 유속이 증가함에 따라 배후류의 강도가 커지고, 배후류의 강도는 관경과 한 방향 흐름 유속, 파고와 주기 등에 따라 달라지며, 세굴공의 크기는 이러한 배후류의 영향으로 교란된 흐름에 의해 관로 주변부 세굴심과 세굴폭 또한 변화하게 된다.

정상 흐름의 유속에 비해 파랑에 의한 유속이 큰 경우 ($U_{cw} < 0.7$) 관로 양쪽 측면 하단부에서 발생하는 침투성 와류로 인하여 터널형 세굴공이 먼저 발달하였고 이후 급격한 세굴이 진행되며 평형 세굴심에 도달하는 시간 또한 빠르다.

반면 한 방향 흐름이 주가 되는 경우($U_{cw} \geq 0.7$) 세굴의 경우 침투성 와류는 주로 흐름의 상류방향에서 발생하며 상대적으로 더디게 진행되었다.

4.1 파와 흐름의 진행방향이 같은 경우

Fig. 5는 파와 흐름의 방향이 동일한 경우의 세굴 단면을 도시한 것이다. 관 주위에서 생성되며 세굴공으로부터 이동되어 퇴적되는 모래 언덕은 주로 하류부에서 발생하며 주기가 길수록 관으로부터 멀어진다. 관로 양 측면에서 발달하는 후류 와는 관의 하류부에서 가장 크게 나타난다. 하류부에서 발달하는 후류와로 인해 세굴공으로부터 유출되는 토사 이동이 제한되어 이러한 모래 언덕을 형성하는 것이다.

동일한 파고와 주기 조건에서 모래 언덕의 높이는 흐름 유속성분(U_c)이 클수록 증가하며, 흐름 조건이 동일할 경우 ($U_c = const$)에는 파고가 클수록 낮아지지만 퇴적거리는 하류 방향으로 길게 형성된다.

4.2 파와 흐름의 진행방향이 반대인 경우

Fig. 6은 두 흐름이 역방향일 경우의 세굴단면으로서 후류 와는 상류 방향으로 좀 더 강하게 형성되며 모래 언덕은 상

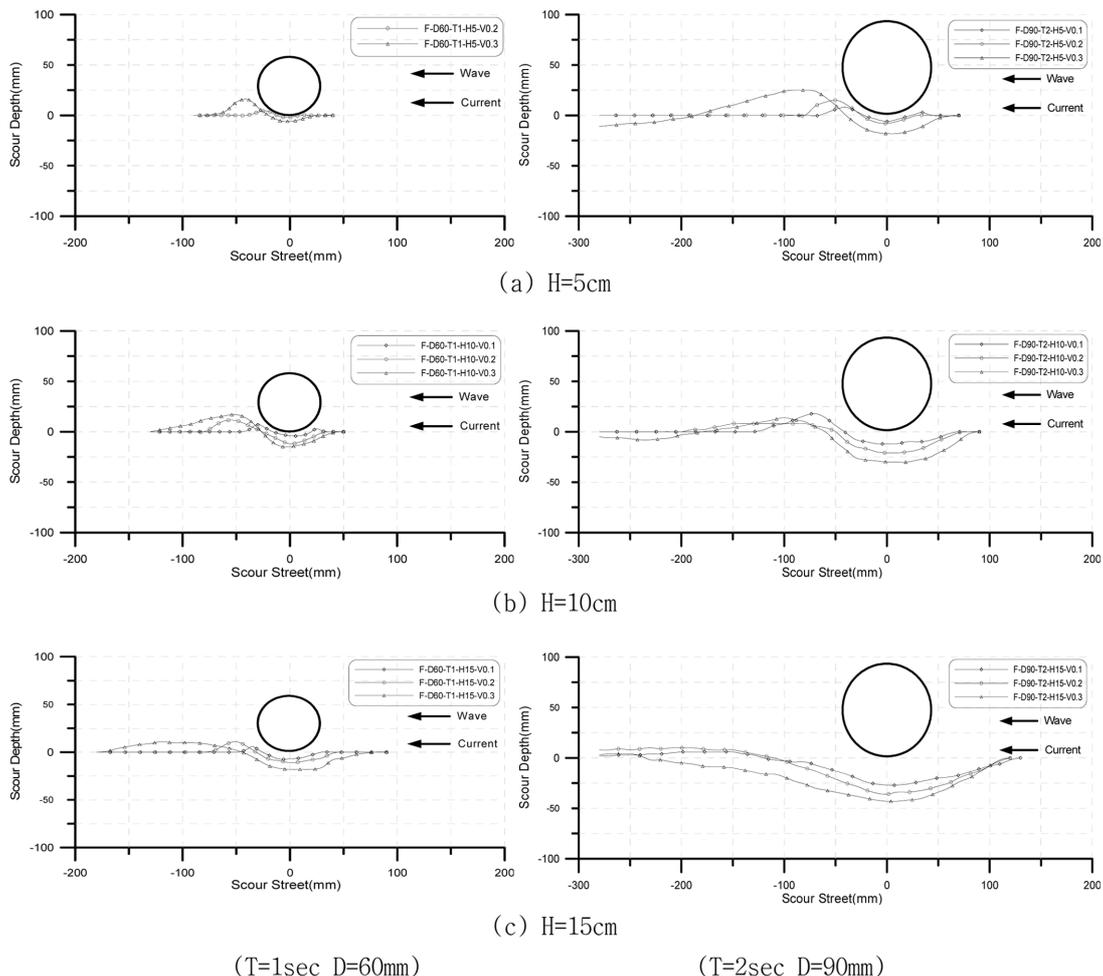


Fig. 5. Variations of equilibrium scour depths in case of co-direction.

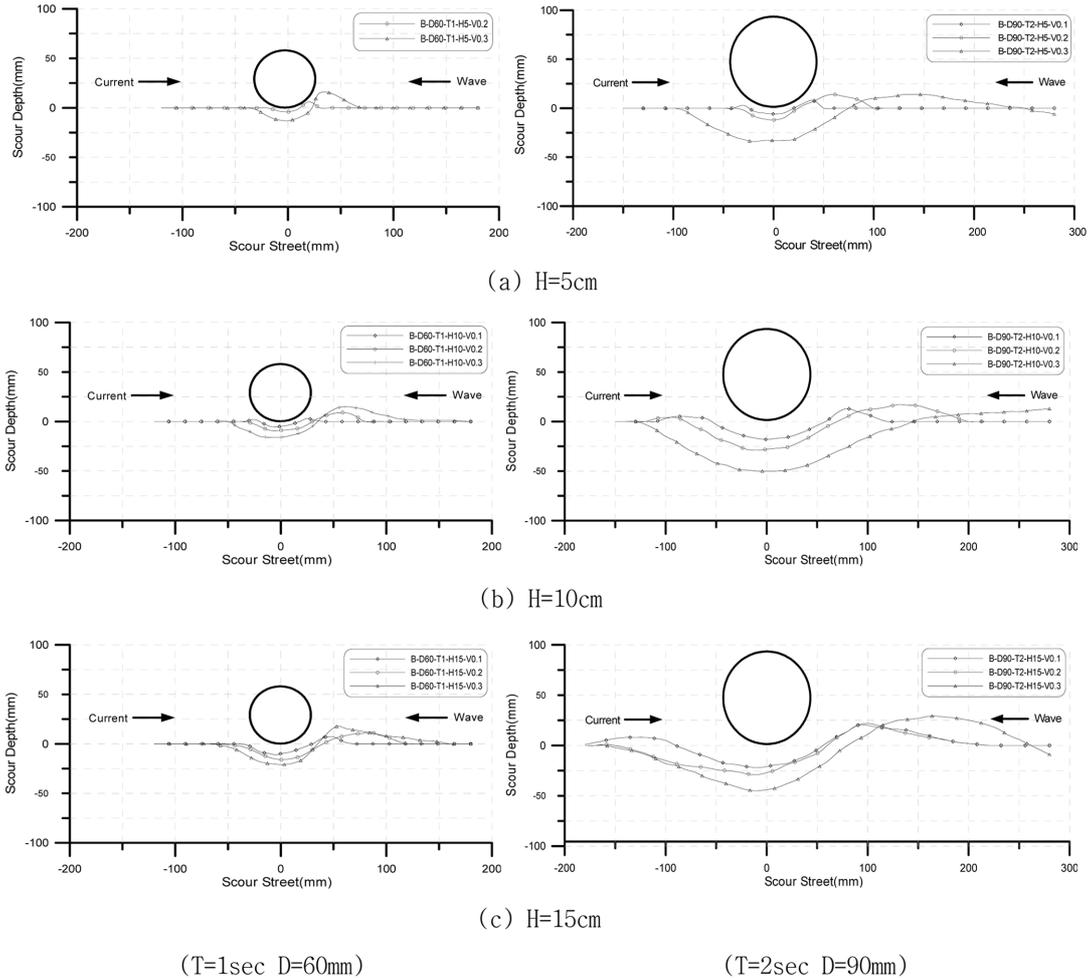


Fig. 6. Variations of equilibrium scour depths in case of counter direction.

류부에서 형성된다. 하지만 관경이 커지고 파랑에 의한 수립자의 유속이 커지면서 후류와는 관로 하류 방향으로도 발달하고, 상류와 하류 방향으로 모래 언덕이 형성된다. 파랑의 영향이 상대적으로 클 때 모래언덕의 경사가 좀 더 가파르고, 모래언덕 간의 수평 거리는 주기적 성질에 비례하며 길어진다. 따라서 관경이 작은 경우에는 두 흐름의 진행 방향이 같은 경우와 비슷한 양상을 보이지만 관경이 커짐에 따라 모래 언덕이 관로의 양 측면에서 발생하는 빈도가 잦고, 그 형상 또한 뚜렷하게 나타난다.

4.3 무차원 매개변수에 따른 세굴심 분석

한 방향 흐름에서의 세굴심 크기는 주로 바닥 유속의 크기에 따라 결정되지만 파랑에 의한 세굴심은 파고와 주기 및 관경의 상호 작용에 따라 다소 복잡한 양상을 보인다(김·오, 2011). 또한 기존 단일 흐름장에서의 세굴심은 Fr 수나 KC 수, Ursell 수 등의 무차원 매개변수로써 표현할 수 있었으나 서로 다른 성질을 갖는 두 개의 흐름이 동시에 작용하는 경우, 파랑이 주요 흐름이 되는 경우와 한 방향 흐름이 주가 되는 경우로 대별하여 분석하는 방법이 보편적이다. 따라서 김 등(2008)의 연구에서 다루지 못한, 한 방향 흐름을 대표하는

무차원 매개변수(Fr 수)와 파랑에 의한 수립자 속도를 대표하는(KC 수) 무차원 수에 대하여 각각 유속비와 상대 세굴심과의 관계를 규명하고자 하였다. 또한 두 흐름이 순방향과 역방향일 경우에 대하여 바닥 최대 유속에 따른 회귀분석을 수행하였다.

표 2는 실험 결과를 정리하여 주요 무차원 수를 흐름의 진행 방향별로 계산하여 정리한 것으로, 실험 조건에서 F는 파와 흐름이 같은 방향일 때이고 B는 역방향일 경우이며 관경(D)-주기(T)-파고(H)-정상 흐름의 유속(V) 순으로 정리하였다.

Fig. 7은 유속비 함수와 상대 세굴심과의 관계를 Fr 수와 KC 수 그룹을 매개변수로 하여 각각 도시한 것이다. 유속비 함수는 동일한 Fr 수 그룹에 대해서는 유속비가 증가함에 따라 상대 세굴심이 감소하는 경향을 보이고(Fig. 7(b)), 동일한 KC 수 그룹에서는 유속비가 증가할 때 상대 세굴심 또한 증가하는 상반된 경향을 보인다(Fig. 7(b)). 유속비가 $0.4 < U_{cw} < 0.6$ 은 두 흐름의 유속 성분 값이 비슷한 값을 갖는 경우이며, 국부적인 세굴현상은 Fr 수 보다는 KC 수에 대해 조금 더 민감하게 반응하는 것으로 보인다.

Fig. 7(b)를 그룹으로 나타내지 않고 KC 수의 크기별로 세분화하여 상대세굴심과 유속비 함수와의 관계를 나타내면

Table 2. Experimental data for the effects of parameters on scour

Test conditions	D (mm)	Period (sec)	U_m (m/s)	S/D	U_{wc}	Fr	Fr_*	KS	KC_*
F-D60-T1-H05-V0.1	0.06	1.0	0.153	0.000	0.632	0.050	0.077	0.972	2.5
F-D60-T1-H05-V0.2	0.06	1.0	0.253	0.033	0.774	0.101	0.128	0.972	4.2
F-D60-T1-H05-V0.3	0.06	1.0	0.353	0.100	0.837	0.151	0.178	0.972	5.9
F-D60-T1-H10-V0.1	0.06	1.0	0.208	0.067	0.462	0.050	0.105	1.943	3.5
F-D60-T1-H10-V0.2	0.06	1.0	0.308	0.200	0.632	0.101	0.155	1.943	5.1
F-D60-T1-H10-V0.3	0.06	1.0	0.408	0.250	0.720	0.151	0.206	1.943	6.8
F-D60-T1-H15-V0.1	0.06	1.0	0.263	0.117	0.364	0.050	0.133	2.915	4.4
F-D60-T1-H15-V0.2	0.06	1.0	0.363	0.183	0.533	0.101	0.183	2.915	6.1
F-D60-T1-H15-V0.3	0.06	1.0	0.463	0.300	0.632	0.151	0.234	2.915	7.7
F-D60-T2-H05-V0.1	0.06	2.0	0.204	0.100	0.632	0.050	0.103	1.943	6.8
F-D60-T2-H05-V0.2	0.06	2.0	0.304	0.117	0.774	0.101	0.153	1.943	10.1
F-D60-T2-H05-V0.3	0.06	2.0	0.404	0.183	0.837	0.151	0.204	1.943	13.5
F-D60-T2-H10-V0.1	0.06	2.0	0.309	0.183	0.462	0.050	0.156	3.887	10.3
F-D60-T2-H10-V0.2	0.06	2.0	0.409	0.250	0.632	0.101	0.206	3.887	13.6
F-D60-T2-H10-V0.3	0.06	2.0	0.509	0.417	0.720	0.151	0.257	3.887	17.0
F-D60-T2-H15-V0.1	0.06	2.0	0.414	0.383	0.364	0.050	0.209	5.830	13.8
F-D60-T2-H15-V0.2	0.06	2.0	0.514	0.450	0.533	0.101	0.259	5.830	17.1
F-D60-T2-H15-V0.3	0.06	2.0	0.614	0.500	0.632	0.151	0.310	5.830	20.5
F-D90-T1-H05-V0.1	0.09	1.0	0.153	0.022	0.632	0.050	0.077	0.648	1.7
F-D90-T1-H05-V0.2	0.09	1.0	0.253	0.089	0.774	0.101	0.128	0.648	2.8
F-D90-T1-H05-V0.3	0.09	1.0	0.353	0.156	0.837	0.151	0.178	0.648	3.9
F-D90-T1-H10-V0.1	0.09	1.0	0.208	0.067	0.462	0.050	0.105	1.296	2.3
F-D90-T1-H10-V0.2	0.09	1.0	0.308	0.111	0.632	0.101	0.155	1.296	3.4
F-D90-T1-H10-V0.3	0.09	1.0	0.408	0.233	0.720	0.151	0.206	1.296	4.5
F-D90-T1-H15-V0.1	0.09	1.0	0.263	0.111	0.364	0.050	0.133	1.943	2.9
F-D90-T1-H15-V0.2	0.09	1.0	0.363	0.178	0.533	0.101	0.183	1.943	4.0
F-D90-T1-H15-V0.3	0.09	1.0	0.463	0.300	0.632	0.151	0.234	1.943	5.1
F-D90-T2-H05-V0.1	0.09	2.0	0.204	0.067	0.632	0.050	0.103	1.296	4.5
F-D90-T2-H05-V0.2	0.09	2.0	0.304	0.089	0.774	0.101	0.153	1.296	6.8
F-D90-T2-H05-V0.3	0.09	2.0	0.404	0.200	0.837	0.151	0.204	1.296	9.0
F-D90-T2-H10-V0.1	0.09	2.0	0.309	0.133	0.462	0.050	0.156	2.591	6.9
F-D90-T2-H10-V0.2	0.09	2.0	0.409	0.233	0.632	0.101	0.206	2.591	9.1
F-D90-T2-H10-V0.3	0.09	2.0	0.509	0.333	0.720	0.151	0.257	2.591	11.3
F-D90-T2-H15-V0.1	0.09	2.0	0.414	0.300	0.364	0.050	0.209	3.887	9.2
F-D90-T2-H15-V0.2	0.09	2.0	0.514	0.400	0.533	0.101	0.259	3.887	11.4
F-D90-T2-H15-V0.3	0.09	2.0	0.614	0.478	0.632	0.151	0.310	3.887	13.6
B-D60-T1-H05-V0.1	0.06	1.0	0.153	0.000	0.632	0.050	0.077	0.972	2.6
B-D60-T1-H05-V0.2	0.06	1.0	0.253	0.067	0.774	0.101	0.128	0.972	4.2
B-D60-T1-H05-V0.3	0.06	1.0	0.353	0.217	0.837	0.151	0.178	0.972	5.9
B-D60-T1-H10-V0.1	0.06	1.0	0.208	0.083	0.462	0.050	0.105	1.943	3.5
B-D60-T1-H10-V0.2	0.06	1.0	0.308	0.150	0.632	0.101	0.155	1.943	5.1
B-D60-T1-H10-V0.3	0.06	1.0	0.408	0.267	0.720	0.151	0.206	1.943	6.8
B-D60-T1-H15-V0.1	0.06	1.0	0.263	0.183	0.364	0.050	0.133	2.915	4.4
B-D60-T1-H15-V0.2	0.06	1.0	0.363	0.267	0.533	0.101	0.183	2.915	6.1
B-D60-T1-H15-V0.3	0.06	1.0	0.463	0.350	0.632	0.151	0.234	2.915	7.7
B-D60-T2-H05-V0.1	0.06	2.0	0.204	0.100	0.632	0.050	0.103	1.943	6.8
B-D60-T2-H05-V0.2	0.06	2.0	0.304	0.200	0.774	0.101	0.153	1.943	10.1
B-D60-T2-H05-V0.3	0.06	2.0	0.404	0.517	0.837	0.151	0.204	1.943	13.5
B-D60-T2-H10-V0.1	0.06	2.0	0.309	0.233	0.462	0.050	0.156	3.887	10.3
B-D60-T2-H10-V0.2	0.06	2.0	0.409	0.333	0.632	0.101	0.206	3.887	13.6
B-D60-T2-H10-V0.3	0.06	2.0	0.509	0.767	0.720	0.151	0.257	3.887	17.0
B-D60-T2-H15-V0.1	0.06	2.0	0.414	0.167	0.364	0.050	0.209	5.830	13.8
B-D60-T2-H15-V0.2	0.06	2.0	0.514	0.433	0.533	0.101	0.259	5.830	17.1
B-D60-T2-H15-V0.3	0.06	2.0	0.614	0.783	0.632	0.151	0.310	5.830	20.5
B-D90-T1-H05-V0.1	0.09	1.0	0.153	0.044	0.632	0.050	0.077	0.648	1.7

Table 2. Continued

Test conditions	D (mm)	Period (sec)	U_m (m/s)	S/D	U_{wc}	Fr	Fr_*	KS	KC_*
B-D90-T1-H05-V0.2	0.09	1.0	0.253	0.089	0.774	0.101	0.128	0.648	2.8
B-D90-T1-H05-V0.3	0.09	1.0	0.353	0.222	0.837	0.151	0.178	0.648	3.9
B-D90-T1-H10-V0.1	0.09	1.0	0.208	0.089	0.462	0.050	0.105	1.296	2.3
B-D90-T1-H10-V0.2	0.09	1.0	0.308	0.167	0.632	0.101	0.155	1.296	3.4
B-D90-T1-H10-V0.3	0.09	1.0	0.408	0.267	0.720	0.151	0.206	1.296	4.5
B-D90-T1-H15-V0.1	0.09	1.0	0.263	0.178	0.364	0.050	0.133	1.943	2.9
B-D90-T1-H15-V0.2	0.09	1.0	0.363	0.222	0.533	0.101	0.183	1.943	4.0
B-D90-T1-H15-V0.3	0.09	1.0	0.463	0.278	0.632	0.151	0.234	1.943	5.1
B-D90-T2-H05-V0.1	0.09	2.0	0.204	0.067	0.632	0.050	0.103	1.296	4.5
B-D90-T2-H05-V0.2	0.09	2.0	0.304	0.133	0.774	0.101	0.153	1.296	6.8
B-D90-T2-H05-V0.3	0.09	2.0	0.404	0.378	0.837	0.151	0.204	1.296	9.0
B-D90-T2-H10-V0.1	0.09	2.0	0.309	0.200	0.462	0.050	0.156	2.591	6.9
B-D90-T2-H10-V0.2	0.09	2.0	0.409	0.322	0.632	0.101	0.206	2.591	9.1
B-D90-T2-H10-V0.3	0.09	2.0	0.509	0.556	0.720	0.151	0.257	2.591	11.3
B-D90-T2-H15-V0.1	0.09	2.0	0.414	0.244	0.364	0.050	0.209	3.887	9.2
B-D90-T2-H15-V0.2	0.09	2.0	0.514	0.322	0.533	0.101	0.259	3.887	11.4
B-D90-T2-H15-V0.3	0.09	2.0	0.614	0.500	0.632	0.151	0.310	3.887	13.6

KC_* : $U_{(c+w)}T/D$, Fr_* : $U_{(c+w)}/\sqrt{gh}$, 여기서 $U_{(c+w)} = U_c + U_w$

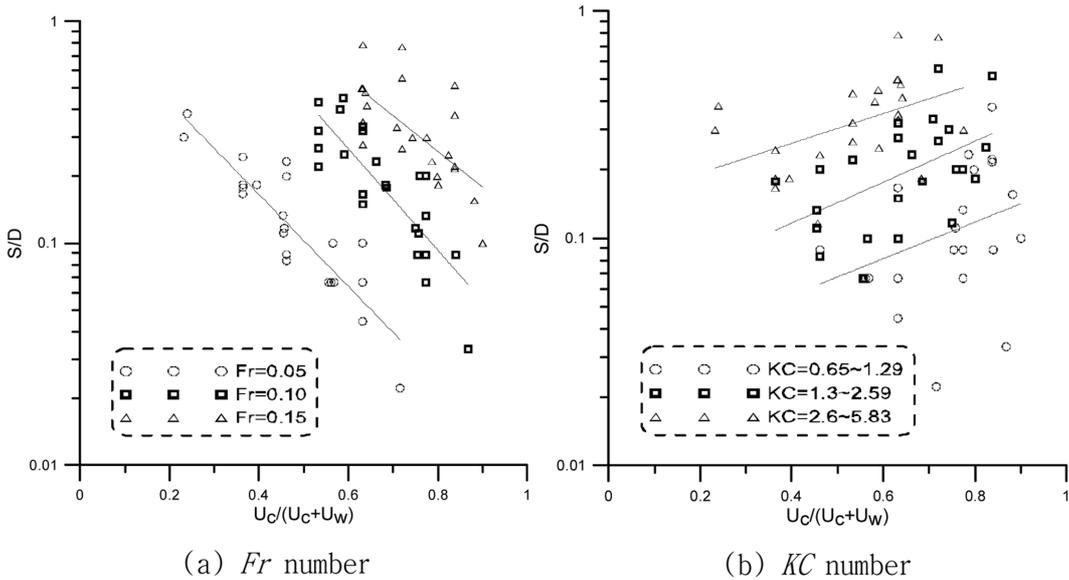


Fig. 7. Correlation between S/D and velocity ratio.

Fig. 8과 같다. 그림에 도시되어 있는 선분들은 KC 수의 크기 별로 직교다항회귀를 시행한 결과이다. 파랑만 작용할 경우의 상대 세굴심은 김 등(2004)의 실험 자료를 취하였다. Kjeldsen et al.(1973)과 Sümer and Fredsøe(1990), Chiew(1991a)의 실험 결과를 볼 때, 해저관로가 놓인 곳의 수심이 충분히 크다면($Fr \rightarrow 0$) 이동상 조건에서의 상대 세굴심은 대략 0.6 정도가 되는 것을 보였다. 본 연구에서는 수심의 영향이 어느 정도 작용하여 평형 세굴심이 좀 더 크게 나타났다.

그림에서 알 수 있듯이 흐름이 파와 중첩될 경우 유속비 값에 따라 세굴심이 커지거나 감소하고 있다. 유속비가 0인 경

우(파만 작용하는 경우), 상대 세굴심은 $0.1\sqrt{KC}$ 의 값으로 나타나고, 유속비가 1에 가까울수록(유속비는 흐름만의 함수) 정상 흐름에서의 최대 세굴심인 0.8~0.9 정도의 값에 접근한다. 또한 상대 세굴심은 유속비 값이 0으로부터 증가하면 파랑만 작용할 때의 세굴심보다 감소하는 구간이 나타난다. KC 수가 클수록 감소폭이 크게 나타나는데 이것은 파와 흐름이 중첩될 때 흐름 방향의 상류측 수립자의 변위가 작아서 관의 하부흐름이 제약을 받기 때문이다.

Fig. 9는 Fig. 7의 (a)와 (b)를 하나의 그래프로 도시한 것이다. Fr 수와 KC 수의 크기에 따라 서로 나란하게 교차하

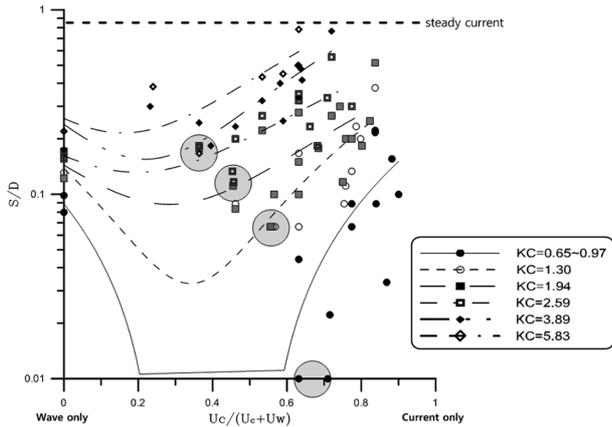


Fig. 8. Relationship of S/D and velocity ratio for specific KC number.

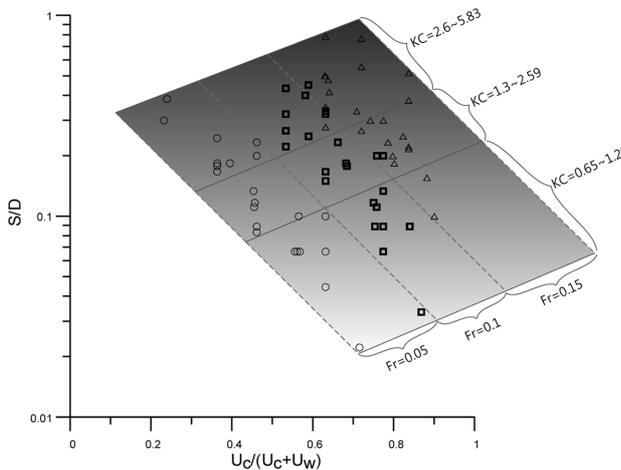


Fig. 9. Relative scour depth versus velocity ratio.

며 마름모 형태의 영역을 이루게 된다. 좌측은 파랑의 영향이 우세한 영역이고, 우측은 정상 흐름이 지배적인 영역이다. 상·하의 영역은 중첩된 두 흐름의 유속 성분의 크기가 모두 클 경우와 모두 작을 경우로 나뉠 수 있다. 앞서 언급한

바와 같이 유속비 값이 0.7에 도달한 이후에는 세굴심은 정상 흐름의 경우에 해당하는 값에 접근한다. 유속비가 0.7 이상이 되면 상류측 후류와의 영향은 사라지게 되어 정상 흐름에서의 세굴과정으로 바뀌기 때문이다. 따라서 본 실험 자료에서의 최대 세굴심은 유속비 값이 0.6~0.7 사이에서 발생하였다.

Fig. 10은 KC 수 및 KC^* 에 대한 상대 세굴심의 변화를 도시한 것이다. (a)의 경우는 파에 의한 세굴심의 변화를 Fr 수의 크기에 따라 도시한 것이고, (b)는 KC 수에 흐름 속도를 더한 경우이다. Fig. 10(a)를 보면 상대 세굴심은 KC 수와 Fr 수의 크기에 뚜렷한 비례관계를 나타내고 있다. 두 흐름이 중첩됨으로 인해 파에 의한 수립자 속도에 정상 흐름의 유속이 더해져 하류 방향으로 후류와를 크게 발달시키며, 이때의 중첩된 흐름으로 인한 최대 유속은 최대 세굴심을 형성한다. 따라서 두 흐름의 유속 성분을 같이 고려함으로써 Fig. 10(b)와 같이 양호한 상관성을 얻을 수 있었다.

$$S/D = 0.024KC_*^{1.16} \quad (3)$$

Fig. 11은 Fr 수 및 Fr^* 수에 대해 상대 세굴심이 변화하는 양상을 도시한 것이고, Fig. 11(a)는 Fr 수와 S/D 와의 관계를 KC 수를 매개변수로 하여 도시한 것이다. 여기서 Fr^* 는 Fr 수에 파에 의한 수립자 속도를 고려한 것이다. Fig. 10의 S/D 와 KC 수의 관계와 마찬가지로 상대 세굴심은 Fr 수와 KC 수의 크기에 따라 비례한다. Fig. 11(b)는 파와 정상 흐름의 방향에 따라 Fr^* 와 S/D 의 변화관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Fr^* 수는 상대 세굴과 상당히 좋은 상관성을 나타내었다. 다만 흐름의 방향에 따라 약간의 차이가 나타났지만 유의한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 파와 정상 흐름이 공존하는 영역에서의 상대 세굴심 변화는 두 흐름이 중첩되었을 때의 최대 유속에 기인한 것으로 판단되며, 결

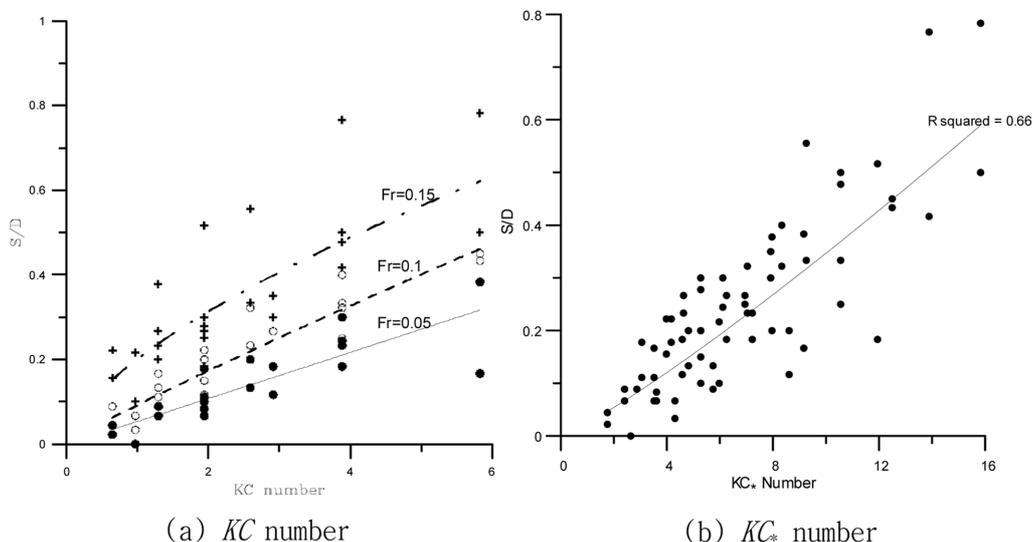


Fig. 10. Correlation between S/D and KC , KC^* number.

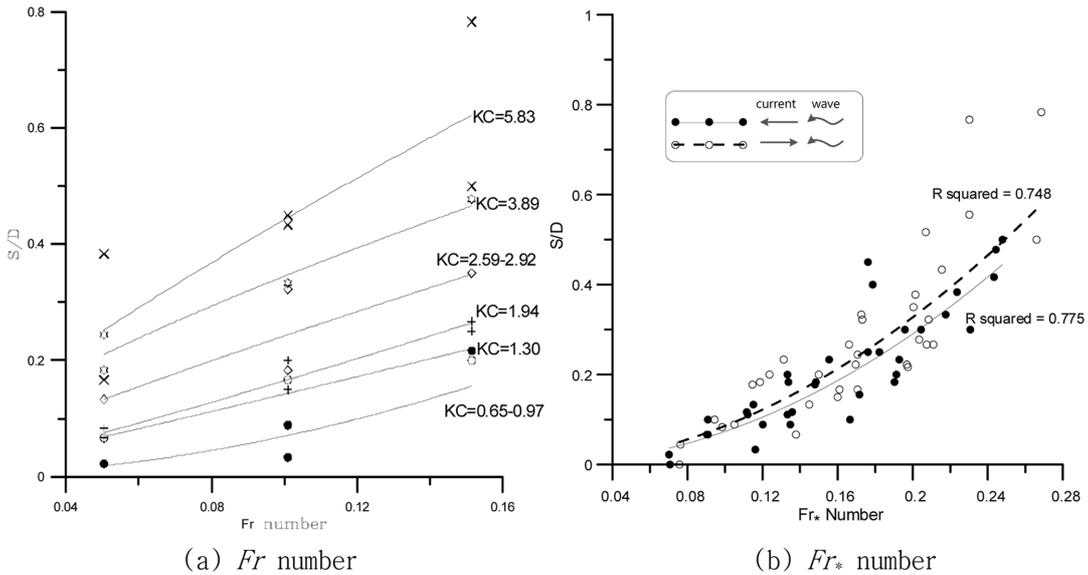


Fig. 11. Correlation between S/D and Fr , Fr_* number.

과적으로 파와 흐름이 공존하는 영역에서는 중첩되는 두 흐름의 수립자 속도 성분을 고려하는 것이 세굴심 산정에 효과적이라고 할 수 있다.

$$S/D = 7.5Fr_*^{1.98} \quad (4)$$

감사의 글

“이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 일반 과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음”

결 론

관경의 크기에 따라 세굴심은 선형적으로 증가하지만 세굴 폭의 크기는 관경의 크기에 따라 뚜렷하게 확장된다. 관경의 배후에서 발생하는 후류와의 크기에 의해 세굴영역이 증가하기 때문이다.

정상 흐름 속도가 0에서부터 증가할 때 상대 세굴심이 감소하는 경향을 보이며, KC 수가 작을수록 감소폭이 크게 나타났다. 이것은 두 흐름이 중첩될 때 흐름 방향으로의 세굴공의 상류측 변위가 축소되기 때문이며 이러한 변위 축소는 후류의 발달거리가 정상 흐름에 의해 감소하기 때문이다.

유속비 값이 작은 경우 상대 세굴심은 주로 KC 수에 의해 결정되며 유속비 값이 증가할수록 Fr 수의 영향이 커진다. Fr 수와 KC 수가 모두 작을 때는 KC 수가 지배적 세굴 인자이며 두 무차원 매개변수가 모두 큰 경우에는 Fr 수가 주요 영향인자인 것으로 나타났다.

유속비 값이 0.6~0.7 이후부터는 상대 세굴심이 정상 흐름만 존재할 때의 값으로 접근한다. 즉 상대적으로 우세한 정상 흐름의 영향으로 인해 파에 의한 상류측 후류가 제거되기

때문이다.

상대 세굴심은 바닥에서 중첩된 두 흐름 성분에 의한 수립자의 속도를 고려함으로써 판단할 수 있으며, 결과적으로 변수가 상대적으로 작은 수가 보다 강한 상관성을 나타내었다. 즉 두 흐름의 공존역에서 세굴심 산정은 KC 수에 대해서는 흐름 속도를 고려하고, Fr 수에 대해서는 수립자 속도를 각각 고려함으로써 세굴심 산정에 더 큰 효과를 기대할 수 있었다.

참고문헌

김경호, 오현식, 박재성, 이호진 (2004). 해저 바닥에 놓인 관로 하의 파에 의한 국부세굴특성. 대한토목학회 논문집, 24(3B), 247-257.

김경호, 오현식 (2011). 파랑 및 정상 흐름에 의한 해저 관로 주변의 국부세굴 특성 비교. 한국해양공학회지, 25(2), 21-28.

김경호, 이호진, 김완식 (2008). 파랑과 정상흐름의 공존역에서 해저관로 주변의 국부세굴. 한국해양공학회 논문집, 20(5), 510-521.

Arnskov, N.N., Fredsøe, J. and Sumer, B. M. (1993). Bed shear stress measurements over a smooth bed in three-dimensional wave-current motion, *Coast. Engrg.*, 20, 277-316.

Bearman, P. W. and Zdravkovich, M. M. (1978). Flow around a circular cylinder near a plane boundary, *J. Fluid Mech.*, 89(1), 33-47.

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, Dec.*, 235-242.

Chao, J. L. and Hennessy, P. V. (1972). Local scour under ocean outfall pipelines. *Journal of Water Pollution control Fed.*, 44(7), 1443-1447.

Chiew, Y. M. (1990). *Mechanics of Local Scour around Submarine*

- Pipe- lines. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 116(4), 515-529.
- Chiew, Y. M. (1991(a)). Flow around horizontal circular cylinder in shallow flows. *Journal of Waterway, Port, Coast and Ocean Engineering, ASCE*, 117(2), 120-135.
- Kjeldsen, S. P., et al. (1973). Local scour near offshore pipelines. *Proc. Second Int. Port and Ocean Eng. under Arctic conditions Conf.*, 308-331.
- Stümer and Fredsøe. (1990). Scour Below Pipelines in Waves, *Journal of waterway, port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, 116(3), 307-323.
-
- 원고접수일: 2012년 3월 5일
 수정본채택: 2012년 4월 20일
 게재확정일: 2012년 4월 26일