수중 부유구조물에 의한 세굴특성 분석

Analysis on Scouring Characteristics by Submerged Floating Structure

최흥식* · 이창훈**

Choi, Heung Sik · Lee, Chang Hun

Abstract

The scouring characteristics due to submerged floating structure which is affecting river bed changes are analysed by experiments. The critical scouring which initiates the movement of bottom substrates accompanying the erosions of luff, tunnel, and lee-wake is suggested according to the relative location(h_s/H) of the distance between the center of submerged floating structure and river bed over the water depth. The scouring depths accompanying erosion increase with the increasing of Reynolds, Froude, and Shields parameters governed by velocity. The tunnel erosion is dominant at the Froude of 0.65~0.67 according to the relative location(h_s/H) and the lee-wake erosion induced equilibrium scouring is progressed steadily over velocity increasing. The numbers of Reynolds and Froude result in greater relative scour effect than Shields parameter. The regression equations for equilibrium scouring depth(d_d/D) are suggested with Reynolds, Froude, and Shields parameters and the additional parameter(h_s/D) of the distance between the center of structure and river bed over the diameter of submerged floating structure which show the different scouring phenomena with h_s/D .

Key words : submerged floating structure, tunnel erosion, critical scouring, equilibrium scouring

요 지

실험을 통하여 하상변동에 영향을 줄 수 있는 수중 부유구조물에 의한 하상의 세굴특성을 분석하였다. 세굴의 진행양상에 따른 말굽형 침식, 터널침식 및 배후류 침식을 수반하는 하상입자의 움직임의 시작인 한계세굴은 수심에 대한 하상에서 부유구조물 중심까지의 거리 비(h_s/H)로 나타났다. 침식현상을 수반하는 세굴의 깊이는 유속의 증가에 따른 Reynolds수, Froude수, Shields수의 변화와 더불어 침식깊이가 증가하였다. 수중 부유구조물 위치에 따른 터널침식의 현상은 Froude수가 0.65~0.67 범위까지 우세하게 나타났고, 그 이상의 유속구조에서는 배후류 침식을 수반한 평형세굴로 진행하였다. 평형세굴심의 변화는 Reynolds수, Froude수는 Shields수에 비해 상대적인 세굴변화 양상이 크게 나타났다. 부유구조물 직경에 대한 하상과 구조물 중심까지의 거리와의 비(h_s/D)에 따른 상대 평형세굴심은 부유구조물 위치에 따라 세굴의 양상이 달라진다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 수중부유구조물, 터널침식, 한계세굴, 평형세굴

1. 서 론

하천환경의 인위적인 변화는 하천의 정비, 회복, 복원 등의 차원에서 진행되고 있다. 하천환경의 변화로는 어류 서식처 복원을 목적으로 수제, 식생의 도입을 통한 여울과 소의 조성을 포함하여 각종 인위시설의 도입을 통해 하천의 사행을 자연스레 유도함이 보편적이다. 이러한 차원에서 수중 부유구조물을 이용한 하천의 침식과 퇴적을 유도한 여울과 소의 조성성과 수중에 그늘과 같은 어류의 서식처 또는 휴식처를 제공할 수 있다는 가능성을 착안하여 수중 부유구조물에 의한 세굴과 퇴적의 양상을 분석하였다. 또한 해저 파이프라인의 경

우 세굴의 진행이 지속될 경우는 마치 수중에 떠 있는 구조물의 양상과 같음이 제기된다.

기존의 연구는 바닥에 놓인 관로, 교각, 호안의 밑다짐 등과 같은 고정 구조물 주변에서의 세굴에 대한 연구가 주로 이루어 졌다. 정상흐름 하에서 고정된 수중 부유구조물 주변에서 흐름의 변화와 바닥의 세굴특성의 분석이 요구된다.

Chao와 Hennessy(1972)는 세굴이 진행된 단면을 통과하는 분사속도를 측정하여, 해저관로 주변의 최대세굴심을 예측하였다. 분사속도가 세굴공에서 소류사의 한계전단응력과 같아질 때까지 세굴은 발생한다고 하였다. 아울러 최대 세굴심 계산에 2차원 포텐셜 흐름을 이용한 관로 밑에서의 최대세굴

*정회원 · 상지대학교 건설시스템공학과 교수(E-mail : hsikchoi@sangji.ac.kr)

**한국건설기술연구원 연구원

심을 산정할 수 있는 해석적인 방법을 제시하였다. Kjeldsen (1973)은 해저관로 주변의 세굴을 측정하기 위해 3차원 이동상수로 실험을 실시하여 세굴심은 입경과 수심의 영향이 아닌 흐름속도와 관경에 의한 경험식을 제안하였다. Little Johns(1977)는 정상흐름 상태에서의 해저관로 아래의 평형 세굴심을 측정하였고, Bearman과 Zdravkovich(1978)는 1차원 흐름에서 원형관로 주위의 압력계수의 분포를 측정하였다. Bijker와 Leeuwestein(1984)은 1차원 흐름 조건에서 관의 일부가 바닥에 매설되어 있는 경우의 실험을 통하여 세굴심에 대하여 유속, 수심, 관경, 관의 매설깊이와 같은 세굴에 영향을 미치는 주요 인자에 대한 경험식을 제시하였고, 또한 관로세굴의 기본 형태를 세 가지로 나누어 제시하였다. 그러나 이러한 연구는 해석적이라기보다 실험과 관찰결과에 지나지 않았다. Ibrahim과 Nalluri(1986)는 해저관로 주변에서의 국부세굴에 관한 대규모 실험을 통해 이동상조건과 정지상 조건에서 수심을 포함하는 세굴심에 대한 두 개의 경험식을 제시하였다. Hansen 등(1986)은 원래의 하상고와 원형관의 하부사이의 거리와 세굴 단면에서의 유속에 따른 수학적모형을 개발하여 하상 전단응력이 소류사 이동 한계 전단응력과 같아질 때 평균 세굴심에 도달한다고 제시하였다. Chiew(1990)는 비점착 토사위의 해저관로에서 초기 및 국부 세굴의 실험을 통하여 세굴의 지배적인 영향인자는 파이핑으로, 관로의 상류부의 높은 정체압력과 비교적 낮은 하류부의 압력차에 의한 압력경사가 소류사의 부력경사를 초과할 때 파이핑이 발생한다는 것이다. Chiew(1991)는 최대 세굴심은 허용전단응력이 한계 전단응력과 같아질 때 발생한다고 결론지었다. 이상의 연구는 고정된 관로에서의 세굴에 대한 것이었고, Sümer 등(1988)과 Kristiansen(1988)은 진동하는 관로에서의 세굴에 대한 연구를 수행하였다. Mao(1988)는 Bearman과 Zdravkovich(1978)의 관로주변의 압력계수분포를 이용하여 관로의 측면 상류부와 하류부의 압력차가 관로 밑으로의 침투의 원인이 된다는 결론을 얻었다.

황현구(2003)는 2차원 불규칙 조파수조를 이용하여 경사해빈에 설치된 관로 주변에서의 국부세굴 특성의 실험을 통해 분석하였다. 일정 경사면을 갖는 모형 해빈상에 모형관로를 설치하고, 파형경사를 달리해 가면서 실험을 하였으며, 세굴과 관련된 매개변수를 산정하여 국부세굴에 대한 경험식을 제시하였다. 염주흙(2006)은 정상흐름의 경우와 파에 의한 흐름의 경우에 대해서 바닥에 설치된 관로 아래에서의 국부세굴의 특성과 세굴영향 인자간의 상관성을 알아보기 위해 각각의 경우에 대해 실험을 수행하였다. 정상흐름의 경우 평형 세굴심은 관 아래에서 발생하지 않고 관의 후면부에서 발생한다는 것과 파랑의 영향을 받는 경우에 대해서는 평형세굴심과 관계가 있는 매개변수에 의한 회귀분석식을 제시하였다. 김경호 등(2007)은 정상흐름에 대해서 바닥에 설치된 관로 주변에서의 국부세굴특성과 세굴영향 인자간의 상관성을 알아보기 위해 각각의 경우에 대해 실험을 수행하여 Reynolds 수, Shields 수, Froude 수에 따른 상대세굴심에 대한 회귀분석식을 제시하였다.

본 연구에서는 수중 부유구조물 설치에 따른 하상의 세굴

특성 분석을 위한 실험을 실시하였다. 이를 위해서는 바닥에서 부유 구조물중심까지 거리(h_s)에 따른 세굴에 영향을 미치는 주요 인자들의 값을 무차원 매개변수화하여 이에 따른 수중 부유구조물 주변에서의 유속과 국부세굴에 대한 특성을 파악하고 이에 대한 실험식을 도출하였다.

2. 구조물 주변의 침식특성과 이를 수반한 세굴특성

하천에서의 구조물 주변의 흐름은 축소 구간의 발생과 더불어 구조물 전면부에서의 말굽형 와류의 형성, 구조물 배후에서 후류의 형성에 의한 터널침식의 양상에 의한 세굴의 형태로 진행된다. 이러한 현상들은 일반적으로 침식을 수반한 국부적인 유사수송 능력을 증가시켜서 세굴을 유발하게 된다. Bijker와 Leeuwestein(1984)은 관로세굴에 의한 주변의 침식에 대하여 다음과 같은 기본적인 3가지 형태를 확인하였다 (Fig. 1).

- ① 말굽형 침식(Luff erosion) : 구조물의 상류부 측면에서 발생하고, 구조물의 상류부에 형성되는 와에 의해 발생한다.
- ② 배후류 침식(Lee-wake erosion) : 구조물 하류부 측면에서 발생하고 본래의 흐름보다 큰 흐름의 발생과 구조물 하류부의 거친 후류에 의해 발생한다.
- ③ 터널 침식(Tunnel erosion) : 구조물 밑에서 발생하고, 교란된 속도와 비교하여 구조물 밑에서 증가된 속도가 직접적인 영향으로 발생한다.

말굽형 와류는 구조물의 정면으로 수직 강하되는 흐름과 관련이 있으며 침식의 발달에 따라 아래로 이동하면서 침식

Fig. 1. Sketch of three vortices and onset of scour(Mao, 1988)

에 의한 세굴을 확장시키는 역할을 하게 된다(Melville, 1984). 세굴 초기에는 구조물 정면에서 흐름에 의한 침식력이 작용하게 되고, 이후 구조물 주위를 지나게 되면서 흐름이 가속화되어 더욱 큰 침식을 일으키게 되는데, 말굽형 와류의 작용으로 인해 침식은 점차로 확장되고 단면적은 커지게 되고, 침식 단면적이 증가할수록 말굽형 와류의 자체현상은 감소하게 된다(여흥구, 2006).

침식을 수반한 세굴이 발달한 후에는 관의 뒤쪽에서 와류 발생(vortex shedding)이 일어난다. 이때의 커다란 난류형 와류를 배후류라 한다. Fig. 2는 관로가 초기에 하상과의 사이에 틈이 없이 단단하게 고정되어 있는 정상상태흐름에 노출되어 있는 곳에서 전형적인 실험결과를 나타내고 있다. 침식은 초기에 매우 빠르게 발생하고, 결과적으로 모래언덕이 관로 측면 하류부에 형성되기 시작한다. 그렇지만 이 모래언덕은 서서히 하류부로 이동하고 결국 점선으로 표시되는 평형 세굴에 다다른다.

침식성 바닥위에 놓여 있는 구조물이 초기에 깊게 묻혀 있지 않고, 구조물 주변의 흐름이 충분히 강하면 Fig. 3과 같이 세굴은 구조물 하에서 구조물의 상류부와 하류부 사이에서 압력차로 인해 시작된다. 따라서 세굴의 시작은 터널침식으로 불리는 단계 뒤에 이어진다. 초기단계에서는 구조물과 바닥 사이의 틈(ϵ)이 작은 즉, $\epsilon \ll D$ (D 는 관경)인 단계 동안에는 많은 양의 물이 틈을 통해 흘러서 틈새에서 아주 큰 속도로 되고 결국 구조물 바로 밑부분의 전단응력을 아주 크게 만들게 된다. 일반적으로 바닥 전단응력의 증가는 $\alpha = \tau/\tau_0$ 로 정의 되는 증폭인자의 향으로 나타낼 수 있다. 이때 τ 는 바닥 전단응력, τ_0 는 교란되지 않은 흐름의 바닥전단응력이다.

정상상태흐름의 영향을 받는 구조물에 대한 연구(Jensen 등, 1990)에서 유속증정치는 세굴과정의 초기단계에 상응하는 증

Fig. 2. Scour development in length of time in current(Mao, 1986)

Fig. 3. Definition sketch of approach flow(Jensen et al., 1990)

Fig. 4. Tunnel erosion below a pipeline(Jensen et al., 1990)

수중 부유구조물에 의한 세굴특성 분석

폭인자는 $\alpha = 0$ 이었다. 구조물 밑 부분에서의 전단응력이 크게 증가하면 유사수송은 엄청나게 증가하게 된다. 이것은 세굴이 시작된 직후에는 Fig. 4에서와 같이 구조물 주변의 세굴이 아주 격렬하게 되는 것을 의미한다. 즉 격렬한 제트의 형태인 모래와 물의 혼합흐름으로 된다. 이러한 세굴과정을 터널침식이라고 한다.

3. 실험내용 및 방법

수중 부유구조물 주변의 국부세굴을 측정하기 위한 가변 경사형 개수로 실험장치는 유량공급 고수조 저수용량은 2 m^3 이고, 저수조용량은 6.75 m^3 이다. 유량공급은 60 Hz, 11 kW의 원심력 펌프로 최대유량 2,800 l/min을 양수할 있고, 수로의 길이는 12 m, 폭 및 높이는 0.4 m의 직사각형 수로로 10 mm의 투명유리로 되어 실험양상을 관찰할 수 있다. 수중 부유구조물은 직경 $D=0.077 \text{ m}$ 이며, 매끄러운 스텐레스로 된 구형의 구조물이다. 유속의 측정은 마그네틱 유속계(LP1100)로 수중 부유구조물의 전방 0.1 m에서 측정하였으며, 부유구조물의 위치로서 바닥에서 구조물 중심까지 거리에 따라 수심과 유속을 변화시켜 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 비교적 균등입자의 사용을 위한 체가름을 통하여 비중 2.63, 중앙입경(d_{50}) 4 mm인 잔자갈을 길이 3 m, 높이 0.1 m, 폭 0.4 m에 포설하여 실험한 구간이다. 개수로 레일위의 이동장치에 수중 부유구조물 장치를 부착하여 하상도 포설 중앙지점에서 수리특성을 측정하였다. 거의 일정유량의 방류를 실시하고, 개수로 하단 위어를 통해서 유속을 조절하였다. 세굴은 수중부유구조물 주변에서 세굴을 관측하였다. 또한 실험을 통하여 Froude수가 0.45(수심: 0.15 m, 유속: 0.54 m/s, 유량: $0.033 \text{ m}^3/\text{s}$)이하일 때는 세굴이 발생하지 않았으며, Froude수가 0.77(수심: 0.1 m, 유속: 0.76 m/s, 유량: $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$)이상일 때는 상류에서 동적 세굴이 발생하여 잔자갈이 교란되어 더 이상 측정이 불가능한 상태가 되었다. 따라서 세굴의 진행은 Froude수가 0.45이상에서 발생하였고, 본 실험의 범위는 Froude수가 0.77까지이다.

본 실험에서 바닥에서 구조물 중심까지 거리(h_s)는 0.0385 m, 0.0435 m, 0.0485 m, 0.0535 m, 0.0585 m, 0.0635 m, 0.0685 m의 5 mm씩 차이를 둔 7개 경우에 대해 실험하였다. 수중 부유구조물의 변화구간이 0.03 m의 작은 구간에 이루어졌고, 또한 기타 변수들인 부유구조물의 직경, 모래입자의 중앙입경, 수로폭, 하상경사의 조건들은 동일한 상태에서 실시되었다. 실험

Fig. 5. Schematic description of experimental setup

Fig. 6. Experimental set-up and measurements

의 수심(H)은 0.1~0.15 m, 유속은 0.5~0.8 m/s 범위에서 실시되어 전반적으로 수심이 감소하고, 유속이 증가할수록 h_s/D 가 증가하였으며, 실험의 h_s/D 의 범위는 0.500~0.890 사이이다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 수중 부유구조물 주변에서의 침식양상에 따른 세굴특성

정상흐름에 놓인 구조물 주변에서의 국부세굴은 다양한 변수들에 의해 영향을 받는다. 국부세굴에 영향을 미치는 변수들은 유속, 수심, 물의 밀도, 부유구조물의 직경, 바닥에서 구조물 중심까지 거리 등이 있다. 침식에 기인된 세굴이 평형 상태에 도달했을 때를 원 하상으로부터의 세굴깊이를 세굴심(d_d)이라 정의한다. 따라서 수중부유구조물 위치에 따른 상대 평형세굴심, d_d/D 는 Reynolds수(Re), Shields수(θ), Froude수(Fr) 및 하상과 구조물중심까지 거리와의 수심과의 비(h_s/H)에 지배될 것으로, 이 무차원 매개변수에 따른 평형세굴심의 관계를 분석하였다. h_s/D 는 바닥에서 구조물중심까지 거리와의 부유구조물 직경의 비로서 이 값은 부유구조물의 상대적 위치를 나타낸 값이다.

실험은 부유구조물이 바닥과 붙어있는 상태인 $h_s/D=0.500$ 에서 실시하였다. 침식을 수반한 세굴의 양상을 확인하기 위해서 개수로 하류부의 위어의 조절에 의한 유속의 증가를 유도하고 그에 상응하는 세굴의 양상을 관측하였다. 수면경사의 증가를 통한 유속의 증가와 수위의 감소에 따른 세굴의 진행은 h_s/H 가 0.252, Froude수 0.44에서부터 침식을 수반한 세굴이 시작되어 이를 본 실험에서 한계세굴로 정의하였다.

세굴 초기단계에서 세굴 진행단계에서의 유속의 증가에 기인된 구조물 위와 아래의 압력차로 침식이 발달하여 Jensen 등(1990)이 제안한 터널 침식작용이 발생하였고, 터널침식으로 인한 토사는 부유구조물 뒷부분에 언덕인 퇴적으로 발생하였고, 유속의 0.71~0.73 m/s 범위와 h_s/H 는 0.356까지 터널침식이 우세하게 나타났다. 그리고 이 이상의 유속이 발생하는 구간에서는 배후류 침식작용이 지배적으로 작용하여 일종의 언덕을 이루던 퇴적물이 하류부로 이동하면서 토사입자들은 완만한 경사를 형성하여 평형세굴의 형태를 나타냈다. 이는 Mao(1986)가 제시한 침식을 수반한 세굴 발달 후의 배후류에 의한 모래언덕의 형성과 평형세굴의 양상과 유사함을 볼 수 있다.

평형세굴에 이르기까지 유속의 증가에 따른 Reynolds수, Froude수, Shields수의 증가와 더불어 침식깊이가 증가하는 경향을 보여줌을 Table 1을 통해서 확인하였다. 이때 h_s/H 의 증가는 큰 유속을 얻기 위하여 수면경사를 크게 함에 따른 수심의 감소에 기인된 것으로 세굴의 특성을 지배하는 변수로 사용하기는 어려운 것으로 나타났다.

수중부유구조물 위치에 따른 터널침식의 현상은 h_s/D 가 0.565일 때 h_s/H 는 0.378로 Froude수는 0.69, h_s/D 가 0.630일 때 h_s/H 는 0.401로 Froude수는 0.65, h_s/D 가 0.695일 때 h_s/H 는 0.461로 Froude수는 0.67까지 우세하게 발생하였다. 따라서 터널침식을 지배하는 Froude수는 0.65에서 0.67사이로 나타났다. 아울러 그 이상의 유속 구조에서는 배후류 침식작용이 지배적으로 작용하여 일종의 언덕을 이루던 퇴적물이 하류부로 이동하면서 토사입자들은 완만한 경사를 형성하

Table 1. Experimental results for local scour and their corresponding parameters

h_s/D	depth H (m)	velocity V (m/s)	scour depth d_d (m)	relative scour depth d_d/D	Reynolds number Re	Shields parameter θ	Froude number Fr	relative depth h_s/H
0.500	0.153	0.54	0.005	0.0649	27,341	0.0231	0.4400	0.2516
	0.144	0.57	0.006	0.0779	28,913	0.0447	0.4797	0.2674
	0.136	0.61	0.007	0.0909	30,993	0.0648	0.5291	0.2831
	0.126	0.66	0.011	0.1429	33,258	0.0825	0.5898	0.3056
	0.119	0.67	0.016	0.2078	33,800	0.0995	0.6168	0.3235
	0.108	0.72	0.018	0.2338	36,742	0.1122	0.7038	0.3565
	0.102	0.76	0.019	0.2468	38,635	0.1261	0.7616	0.3775

Table 1. Continued

h_s/D	depth $H(m)$	velocity $V(m/s)$	scour depth $d_d(m)$	relative scour depth d_d/D	Reynolds number Re	Shields parameter θ	Froude number Fr	relative depth h_s/H
0.565	0.153	0.56	0.003	0.0390	28,592	0.0231	0.4602	0.2843
	0.146	0.58	0.005	0.0649	29,623	0.0450	0.4881	0.2979
	0.140	0.61	0.006	0.0779	30,705	0.0659	0.5166	0.3107
	0.134	0.63	0.007	0.0909	31,754	0.0856	0.5461	0.3246
	0.127	0.66	0.008	0.1039	33,495	0.1036	0.5917	0.3425
	0.120	0.72	0.012	0.1558	36,370	0.1200	0.6609	0.3625
	0.115	0.73	0.015	0.1948	36,911	0.1363	0.6852	0.3783
	0.103	0.77	0.020	0.2597	39,058	0.1450	0.7661	0.4223
0.630	0.148	0.58	0.002	0.0260	29,336	0.0454	0.4801	0.3277
	0.141	0.61	0.005	0.0649	30,739	0.0662	0.5154	0.3440
	0.138	0.65	0.005	0.0649	32,802	0.0871	0.5559	0.3514
	0.129	0.68	0.007	0.0909	34,628	0.1046	0.6070	0.3760
	0.121	0.71	0.010	0.1299	36,099	0.1206	0.6533	0.4008
	0.115	0.74	0.013	0.1688	37,401	0.1363	0.6943	0.4217
	0.108	0.78	0.015	0.1948	39,582	0.1496	0.7582	0.4491
	0.100	0.80	0.016	0.2078	40,326	0.1600	0.8028	0.4850
0.695	0.127	0.67	0.004	0.0519	34,121	0.0829	0.6028	0.4213
	0.116	0.71	0.005	0.0649	36,200	0.0979	0.6691	0.4612
	0.110	0.76	0.006	0.0779	38,771	0.1135	0.7359	0.4864
	0.105	0.79	0.009	0.1169	39,971	0.1285	0.7766	0.5095
	0.101	0.81	0.013	0.1688	40,850	0.1432	0.8092	0.5297
0.760	0.137	0.60	0.001	0.0130	30,638	0.0650	0.5211	0.4270
	0.130	0.67	0.003	0.0390	34,188	0.0840	0.5969	0.4500
	0.120	0.69	0.003	0.0390	35,237	0.1000	0.6404	0.4875
	0.114	0.73	0.005	0.0649	36,961	0.1162	0.6892	0.5132
	0.108	0.75	0.008	0.1039	38,094	0.1309	0.7297	0.5417
	0.101	0.82	0.010	0.1299	41,679	0.1432	0.8256	0.5792
0.825	0.115	0.75	0.008	0.1039	38,263	0.0974	0.7103	0.5522
	0.110	0.78	0.008	0.1039	39,514	0.1135	0.7500	0.5773
	0.107	0.79	0.010	0.1299	39,988	0.1301	0.7696	0.5935
0.890	0.117	0.73	0.005	0.0649	36,928	0.1181	0.6796	0.5855
	0.107	0.75	0.005	0.0649	38,213	0.1301	0.7354	0.6402

였고, $h_s/D=0.890$ 일 때 h_s/H 가 0.640이상부터는 상류에서 동적 세굴이 발생하여 모래가 교란되어 더 이상 측정이 불가능한 상태가 되었다. 따라서 이 값은 수중 부유구조물에 의한 침식을 수반한 세굴실험의 한계로 판단된다.

말굽형의 침식은 교각과 같이 전면부에 작용하는 것이 아닌 물의 흐름에 따라 이동하게 되어서 상류의 세굴과 세굴깊이의 발달에 영향을 주지는 않았다. 실험결과 중 대부분의 경우 최대 세굴심은 부유구조물의 바로 밑 부분에서 형성되는 경향을 보이고 있다.

4.2 세굴 영향인자에 따른 세굴심의 변화

실험값을 기준으로 의 변화에 따른 국부세굴심의 측정결과는 Fig. 7과 같다. 각각의 경우를 살펴볼 때 유속범위에 따른 바닥에서 h_s/D 가 작아질수록 세굴심은 증가하고 있음을

볼 수 있다. Jensen 등(1990)의 제안과 유사하게 유속이 점차 커짐에 따라 터널침식을 수반한 세굴의 양상이 진행되고, 터널침식에 이은 배후침식에 의한 평형세굴에 다다른 양상을 볼 수 있다. 평형세굴의 양상은 세굴심의 증가는 물론 구조물 하류에 터널침식에 의해 쌓인 토사가 하류로 이동하면서 완만한 형태의 세굴이 진행됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 h_s/D 가 작은 범위에서 현저하게 진행됨을 보여준다.

Fig. 8은 동일한 유속의 범위인 0.71 m/s에서 0.73 m/s를 가질 때 바닥에서 구조물중심까지 거리에 따라 부유구조물 주변의 평형세굴단면을 도시한 것이다. 각각의 경우를 살펴볼 때 동일한 유속에 대해 h_s/D 가 작아질수록 세굴심이 증가하고 있는 경향을 나타내고 있으며, 수평 바닥층의 세굴의 범위 역시 부유구조물의 전면부보다 후면부에서 현저하게 증가하고 있는 경향을 나타내고 있다. 본 실험에서는 전반적으로

a) $h_s/D=0.500$ b) $h_s/D=0.565$ c) $h_s/D=0.630$ d) $h_s/D=0.695$ e) $h_s/D=0.760$ f) $h_s/D=0.825$

Fig. 7. Local scour depth profiles with velocity

Fig. 8. Local scour depth profiles with h_s/D (velocity of 0.71~0.73 m/s)

동일한 유속일 경우 바닥에서 h_s/D 가 작아질수록 세굴심이 깊어 증가하는 것으로 나타났다. 실험결과에서 세굴심은 h_s/D 에 따라 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4.3 매개변수에 따른 평형세굴심의 변화

실험에서 얻어진 상대세굴심 d_d/D 를 주요 매개변수인 Reynolds수, Shields수, Froude수, h_s/H 에 대하여 Fig. 9에

a) $h_s/D=0.500$

b) $h_s/D=0.565$

c) $h_s/D=0.630$

Fig. 9. Relative scouring depths with various parameters

c) $h_s/D=0.630$ (continued)

d) $h_s/D=0.695$

e) $h_s/D=0.760$

Fig. 9. Continued

Table 2. Regression equations and their determination coefficients with h_s/D

h_s/D	Regression equations	Coefficients of determination (R ²)	h_s/D	Regression equations	Coefficients of determination (R ²)
0.500	$\frac{d_d}{D} = 0.5 \times 10^{-20} Re^{4.306}$	0.930	0.630	$\frac{d_d}{D} = 0.566 Fr^{3.714}$	0.919
	$\frac{d_d}{D} = 1.349 \theta^{0.864}$	0.871		$\frac{d_d}{D} = 9.133 \left(\frac{h_s}{H}\right)^{4.826}$	0.876
	$\frac{d_d}{D} = 0.590 Fr^{2.709}$	0.939	0.695	$\frac{d_d}{D} = 0.8 \times 10^{-28} Re^{5.903}$	0.865
	$\frac{d_d}{D} = 9.818 \left(\frac{h_s}{H}\right)^{3.628}$	0.947		$\frac{d_d}{D} = 9.061 \theta^{2.110}$	0.941
0.565	$\frac{d_d}{D} = 0.2 \times 10^{-25} Re^{5.496}$	0.963		$\frac{d_d}{D} = 0.306 Fr^{3.727}$	0.882
	$\frac{d_d}{D} = 1.204 \theta^{0.957}$	0.886		$\frac{d_d}{D} = 3.445 \left(\frac{h_s}{H}\right)^{5.002}$	0.902
	$\frac{d_d}{D} = 0.677 Fr^{3.432}$	0.972	0.760	$\frac{d_d}{D} = 0.2 \times 10^{-36} Re^{7.778}$	0.954
	$\frac{d_d}{D} = 17.980 \left(\frac{h_s}{H}\right)^{4.725}$	0.954		$\frac{d_d}{D} = 27.18 \theta^{2.762}$	0.958
0.630	$\frac{d_d}{D} = 0.1 \times 10^{-27} Re^{5.936}$	0.929		$\frac{d_d}{D} = 0.412 Fr^{5.038}$	0.947
	$\frac{d_d}{D} = 3.835 \theta^{1.596}$	0.963		$\frac{d_d}{D} = 6.471 \left(\frac{h_s}{H}\right)^{6.932}$	0.906

정리하였고, 각각에 대하여 회귀분석한 결과는 Table 2와 같이 높은 상관성을 보여주었다. Reynolds수에 따른 상대세굴심의 변화는 Reynolds수가 커질수록 d_d/D 또한 급격하게 증가하였으며, 이는 d_d/D 과 Reynolds수는 상대적인 세굴변화 양상이 밀접한 것을 알게 되었다. 또한 약간 차이는 있지만, Froude수와 h_s/H 도 d_d/D 과 상대적인 세굴변화 양상이 밀접한 것을 알게 되었다. Shields수에 따른 d_d/D 의 변화는 Shields수가 증가할수록 d_d/D 이 완만하게 증가한다는 것으로 나타났다. 따라서 Shields수는 상대적으로 Reynolds수, Froude수와 h_s/H 보다는 세굴변화에 상대적으로 적은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

또한 아래의 식 (1)~(4)는 부유구조물 직경에 대한 하상과 구조물 중심까지의 거리와의 비 h_s/D 에 따른 각종 매개변수를 달리 하였을 시 상대세굴심의 변화에 대한 식으로 부유구조물 위치에 따라 세굴이 양상이 달라진다는 것을 알 수 있었다. 식 (4)는 부유구조물 직경에 대한 바닥에서 구조물중심까지 거리와의 비 h_s/D , Reynolds수, Shields수, Froude수에 따른 상대 평형세굴심에 대한 식이다.

$$d_d/D = -0.137 + 1.565 \times 10^{-5} Re - 0.468 \frac{h_s}{D}, R^2 = 0.850 \quad (1)$$

$$d_d/D = 0.196 + 1.597 \theta - 0.379 \frac{h_s}{D}, R^2 = 0.829 \quad (2)$$

$$d_d/D = 0.042 + 0.552 Fr - 0.442 \frac{h_s}{D}, R^2 = 0.862 \quad (3)$$

$$d_d/D = 0.267 - 1.42 \times 10^{-5} Re + 0.701 \theta + 0.825 Fr - 0.397 \frac{h_s}{D}, R^2 = 0.878 \quad (4)$$

5. 결 론

본 연구는 정상흐름 상태에서 수중에 설치된 수중 부유구조물 주변에서의 침식을 수반한 국부세굴의 특성과 세굴 영향인자간의 상관성을 알아보기 위해 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구형 수중 부유구조물 주변에서의 세굴은 원형 관로 주위에서의 양상인 말굽형 침식, 터널침식에 이은 배후류 침식을 수반한 유사한 평형세굴의 특성으로 나타남을 확인하였다. 일정한 수심과 유속의 정상흐름에서 세굴심은 바닥에서 구조물중심까지 거리가 좁아질수록 커지는 경향을 나타내고 있으며, 수평 바닥층의 세굴의 범위 역시 바닥에서 구조물 중심까지 거리가 좁아질수록 넓어지는 경향을 나타내고 있다. 평형세굴에 이르기까지 유속의 증가에 따른 Reynolds수, Froude수, Shields수의 증가와 더불어 침식깊이가 증가하였다.

- 2) 부유구조물이 바닥에 놓여있는 상태 $h_s/D=0.500$ 에서는 유속이 증가할수록 세굴심과 세굴의 범위가 뚜렷하게 커지는 것으로 나타났다. 본 실험의 결과에서는 수면경사의 증가를 통한 유속의 증가와 수위의 감소에 따른 세굴의 진행은 h_s/H 가 0.252, Froude수 0.44에서부터 침식을 수반한 세굴이 시작되어 이 값을 이용하여 한계세굴로 정의하였다. 한계세굴과 함께 터널침식 발생으로 인한 토사 입자는 부유구조물 뒷부분에 언덕형상의 퇴적이 진행하여 유속의 0.71~0.73 m/s의 범위인 $h_s/H=0.356$ 까지 터널침식이 우세하게 나타났고, 그 이상에서는 배후류 침식이 지배적으로 나타났다.
- 3) 수중부유구조물 위치에 따른 터널침식의 현상은 실험결과 h_s/D 가 0.565일 때 h_s/H 는 0.378로 Froude수는 0.69, h_s/D 가 0.630일 때 h_s/H 는 0.401로 Froude수는 0.65, h_s/D 가 0.695일 때 h_s/H 는 0.461로 Froude수는 0.67까지 우세하게 발생하였다. 따라서 터널침식을 지배하는 Froude수는 0.65에서 0.67사이로 나타났다. 아울러 $h_s/D=0.890$ 일 때 h_s/H 가 0.640이상부터는 상류에서 동적세굴이 발생하여 모래가 교란되어 더 이상 축적이 불가능한 상태가 되었다. 따라서 이 값은 수중 부유구조물에 의한 침식을 수반한 세굴실험의 한계로 판단된다.
- 4) 매개변수 Reynolds수, Shields수, Froude수, h_s/H 의 변화에 따른 상태 평형세굴심의 변화에 대하여 회귀분석을 수행한 결과 Shields수는 Reynolds수, Froude수, h_s/H 에 비해 상대적 변화 기울기가 완만한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-01)에 의해 수행되었습니다

참고문헌

- 김경호, 염주흠, 이호진 (2007) 정상흐름에 의한 해저관로 주변의 국부세굴 특성, *건설기술논문집*, 제26권, 제1호, pp. 219-232.
- 염주흠 (2006) *해저관로 주변의 국부세굴에 관한 연구*, 박사학위논문, 충북대학교.
- 여흥구 (2006) *다기능 하천 설계기준 실험검증사업*, 건기연 2006-059, 한국건설기술연구원.
- 황현구 (2003) *해저 바닥에 놓인 관로하의 파에 의한 국부세굴 특성*, 석사학위논문, 충북대학교.
- Bearman, P.W. and Zdravkovich, M. M. (1978) Flow around a circular cylinder near a plane boundary. *J. of Fluid Mech*, 89(1), pp. 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*, pp. 235-242.
- Chiew, Y.M. (1990) Mechanics of local scour around submarine pipelines. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 4, pp. 515-529.
- Chiew, Y.M. (1991) Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 4, pp. 452-466.
- Chao, J.L. and Hennessy, P.V. (1972) Local scour under ocean outfall pipelines. *J. of Water Pollution Control*. 44(7), pp. 1443-1447.
- Hansen, E.A., Fredsøe, J. and Mao, Y. (1986) Two dimensional scour below pipelines. *Proc. 5th International Symp. on Offshore Mechanics and Arctic Eng.*, ASCE, Tokyo, Japan, Vol. 3, pp. 670-678.
- Ibrahim, A. and Nalluri, C. (1986) Scour prediction around marine pipelines. *Proc. 5th Int. Symp. on Offshore Mech. and Arctic Eng.*, ASCE, New York, Vol. 3, pp. 679-684.
- Jensen, B.L., Sümer, B.M., Jensen, H.R. and Fredsøe, J. (1990) Flow around and force on a pipeline near a scoured bed in steady stream. *J. of Offshore Mechanics and Arctic Eng.*, 112, pp. 206-312.
- Kjeldsen, S.P. (1973) Local scour near offshore pipelines. *Proc. Second Int. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions Conf.*, pp. 308-331.
- Kristiansen, Ø. (1988) *Current induced vibrations and scour of pipelines on a sand bottom*. Ph. D. Thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway.
- Little Johns, P.S.G. (1977) *A study of scour around submarine pipelines*, Rep. No. Int. 113, Hydraulic Research Station, Wallingford, U. K.
- Mao, Y. (1986) *The interaction between a pipeline and an erodible bed*. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- Mao, Y. (1988) Seabed scour under pipelines. *Proc. 7th International Symp. on Offshore Mechanics and Arctic Eng. OMAE*, pp. 33-38.
- Melville, B.W. (1984) Live bed scour a bridge piers. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 9, pp. 1234-1247.
- Sümer, B.M., Mao, Y. and Fredsøe, J. (1988) Interaction between vibrating pipe and erodible bed. *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 114, No. 1, pp.81-92.

- ◎ 논문접수일 : 11년 03월 22일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 03월 28일
 ◎ 심사완료일 : 11년 12월 05일