

국부교각세굴에서 마제형와의 부정류적 특성에 관한 실험적 해석

Experimental Analysis of Effect of Unsteadiness of Horseshoe Vortex on Local Pier Scour

이승오* · 김형준** · 조용식***

Lee, Seung Oh · Kim, Hyung-Jun · Cho, Yong-Sik

Abstract

The clear-water scour experiments were conducted to shed light on the unsteadiness of the horseshoe vortex around a bridge pier since the fluctuations of velocity components and unsteadiness of the horseshoe vortex can be considered as one of the main factors on local scour. The characteristics of the flow speed and turbulence around a bridge pier was examined using an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) and the flow visualization with kaolin clay particles upstream of a bridge pier. The outcomes of this study on the turbulence characteristics related with scour mechanism were presented with the quadrant analysis, the integral time scales, and the bed shear stresses before and after scouring, respectively. The bed shear stress before scouring was approximately quadruple times higher than that of the equilibriums state. It implies that the unsteadiness of the horseshoe vortex would play a significant role in the initial development of scour depth. Therefore, the bimodal distribution of flow velocity was identified as one of the mechanical properties of the horseshoe vortex and the unsteadiness of horseshoe vortex can be one of the major characteristics to understand the flow structure and local pier scour.

Keywords : local pier scour, horseshoe vortex, shear stress, quadrant analysis, unsteadiness

요 지

교각 국부세굴에 있어서 세굴발생에 주요한 역할을 하는 마제형 와의 부정류적 특성을 수리실험을 통해 규명하였다. 이를 통해 교각 전면에서 발생하는 유사이송에 관한 물리적 이해를 도모하고자 하였다. 본 연구에서 kaolin 점토를 이용한 흐름의 가시화를 통하여 마제형와의 부정류적 특성을 관찰하였고, 음파 도플러 유속계(ADV)를 이용하여 유속과 난류 특성을 측정하였다. 교각 전면부 상류방향 한 지점에 대해서 세굴 발생 전과 평형세굴심 도달 후의 유속 및 난류 성분을 측정하여 비교·해석하였다. 세굴 발생전 바닥 전단응력이 평형 세굴심 도달 후의 값보다 4배정도 크게 나타났는데, 이는 마제형와의 부정류적 거동이 세굴공을 형성하는 초기 단계에 주요한 역할을 하는 것임을 말해 준다. 그러므로, 본 연구를 통하여 속도 변동 성분의 이점 분포는 마제형 와의 중요한 특성 중의 하나임을 알게 되었고, 이러한 마제형 와의 부정류적 특성은 교각 주위의 흐름 구조와 세굴 현상간의 관계를 이해하는 주요한 인자임을 알 수 있게 되었다.

핵심용어 : 교각 국부세굴, 마제형 와, 전단응력, 사분면 해석방법, 부정류적 특성

1. 서 론

홍수와 지속적인 유수의 작용으로 인해 교각 기초부에서 발생하는 국부적인 하상 변동 현상을 교각 국부 세굴이라 한다. 이러한 교각 국부 세굴은 교각 붕괴와 이로 인한 경제적 내지는 인명적 피해를 발생시키는 주요 원인으로 알려져 있다. 그림 1에서와 같이 일반적으로 세굴의 직접적인 원인이라 할 수 있는 교각 주위의 국부 흐름은 교각 전면부에서의 축방향 하강류, 하상 부근에서 교각 주위를 감싸는 형상을 가지면서 교각 세굴의 직접적인 영향을 미치는 마제형 와류, 교각 후면에 발생하는 후방와류, 교각 전면의 자유

수면에서 발생하는 선수파(bow wave)등으로 구성되어진다. 일반 하천 흐름에서 흐름이 교각쪽으로 접근할 때, 교각 전면에서의 흐름이 정지된다. 이로 인해 흐름방향에 대한 부압력차가 발생하고, 이러한 압력차는 하상으로부터 박리 현상을 일으키고, 그 결과 교각과 하상이 접한 부분에서 여러 개의 와류가 연속적으로 발생하는데, 이들은 하류쪽으로 연장(stretching)되어 교각 주위를 감싸면서 하류로 이동한다. 이러한 흐름 구조를 마제형 와류계(horseshoe vortex system)라고 한다. 그 중에서 주 마제형 와는 경계층 와류와 같은 방향으로 회전하는 반면, 부 와류들은 그렇지 않다. 교각 전면부에 가장 가까운 마제형 와가 연장됨으로써 그 크

*정회원 · 홍익대학교 건설도시공학부 전임강사 (E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr)

**정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (E-mail : john0705@hanyang.ac.kr)

***정회원 · 교신저자 · 한양대학교 토목공학과 교수 (E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr)

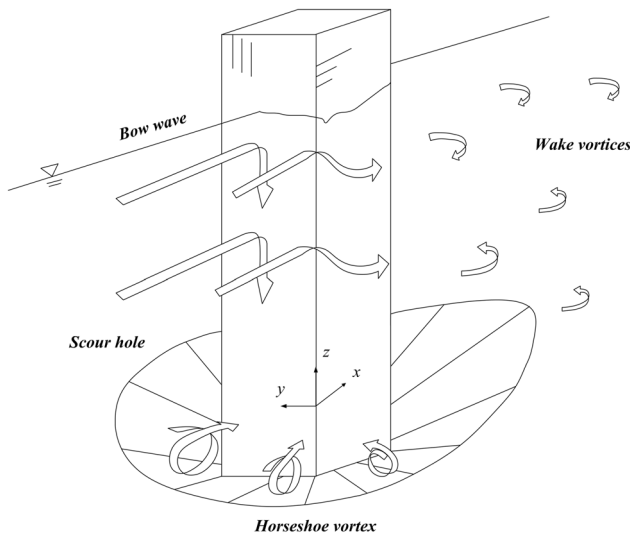


그림 1. 교각 주위의 흐름 구조

기가 줄어들게 된다. 그 동안 새로 생성된 작은 부 마제형 와가 주 마제형 와방향으로 이동하게 되는데, 그 크기와 강도는 시간에 흐름에 따라 점점 증가하게 된다. 일정 시간이 지나면, 부 마제형 와들을 주 마제형 와와 합쳐지거나, 주 마제형 와를 등념기식으로 넘어서 주 마제형 와의 강도를 증대시키기도 한다. 이러한 과정이 불규칙적으로 반복된다 (Dargahi, 1989; Simpson, 2001).

교각 전면부를 따라 정체압력은 수면에서 멀어질수록 감소하는데, 이렇게 발생한 압력차로 인해 하강류가 발생한다. 하강류는 수면에서 하상으로 갈수록 빨라지는데, 최대 하강류의 크기는 평균 접근 유속의 40%정도가 될 수도 있다. 이러한 하강류는 하상 근처에 이르러 흐름 반대 방향의 유속을 생성하게 되는데, 그 발생 지점은 유속 변화가 없는 정체점이다. 이 부근에서는 아주 얇은 층의 역방향 흐름이 존재하게 되는데, 이로 인해 흐름방향의 유속에 대한 주상도는 이점분포를 나타내게 된다 (Devenport와 Simpson, 1990). 그리고, 세굴 발생시 하강류는 교각 전면에서 세굴공을 형성시키는 주요한 원인이 되며, 마제형 와는 불안정해진 하상물질을 세굴공 외부로 이송하는 역할을 한다(서일원과 김영도, 2000).

세굴심이 시간에 따라 증가할 때, 마제형 와의 강도는 약해지는 반면 그 크기는 증가한다. 그러나, 후방와류는 세굴이 진행되는 동안 거의 변화가 없다. 그러므로, 후방와류는 마제형 와의 특성에는 거의 영향을 미치지 않는다(Dargahi, 1989). 교각에 의해 국부 흐름구조가 변화됨으로써 교각 주위에 하강류, 마제형 와류와 같이 매우 복잡하고 3차원적인 와류 구조가 형성된다. 이러한 와류 구조와 세굴 발생 현상 간의 상호 작용을 해석적인 방법으로 접근하는 것은 매우 어려우므로, 국내외 대부분의 연구들은 차원해석을 바탕으로 한 수리실험 내지는 수치모의를 이용하여 주요 인자들과 세굴심간의 관계를 연구하고 있다.

여러 연구 결과들을 통하여 복잡한 3차원적 와류 구조 중에서 세굴 현상에 가장 큰 영향을 미치는 것은 교각 전면과 측면에 발생하는 마제형 와류인 것으로 알려져 있다. 서일원과 김영도(2000)의 실험적 연구 결과에서도 마제형 와가 원형 교각 주위의 흐름 및 난류 특성을 지배하는 주요인자인

것을 확인하였다. 3차원 수치모형을 이용한 직사각형 단면의 교각 주위 흐름특성에 대한 계산 결과를 보면, 같은 흐름 조건에서 고정상에서의 최대 전단응력의 발생 지점이 최대 세굴심이 발생하는 교각 전면부와 일치하지 않는다 (Ge 등 2005). 이는 세굴 현상을 이해하기 위해서는 교각 주변의 일반적인 흐름 특성에 대한 연구와는 별도로 마제형 와 자체에 대한 보다 자세한 연구가 필요함을 나타낸다. 또한, 많은 이전 연구들에서 마제형 와의 강도와 크기를 교각 국부 세굴현상의 해석에 있어 가장 중요한 인자로 간주하고 있다 (Baker, 1980; Muzzammil과 Gangadhariah, 2003; Qadar, 1981). 따라서, 마제형 와에 대한 정확한 특성을 밝히는 것이 교각 국부 세굴을 보다 정확히 이해하고, 세굴현상과의 관계를 보다 분명히 규명하므로 교각 세굴심을 예측 또는 방지하는 데 있어 필수적이라 할 수 있다. 이러한 마제형 와의 특징은 교각의 폭(b), 접근 수심(y_j) 및 유속(V_j), 바닥 조도계수(k_s)와 경계층 두께(δ)에 의해 주로 영향을 받는다. 마제형 와의 크기 및 위치는 교각 폭이나 접근유속으로 무차원화 된 변수를 이용하여 나타낼 경우 일정한 값을 갖는 것으로 여러 실험들에서 알려졌다. 예를 들면, Nakagawa와 Suzuki(1975)는 염료를 이용한 흐름 가시화 실험을 통하여 마제형 와의 직경, D_v 는 원형 교각 Reynolds 수($Re_b = V_j b / \nu$)의 변화에 영향을 받지 않고 $D_v = 0.35 \times b$ 로 나타내었고, Dargahi(1989)도 마제형 와의 크기와 위치는 Reynolds 수에 대하여 무관함을 실험을 통하여 보였고, 원형 교각 상류 방향에서 발생하는 박리현상의 위치(이는 마제형와의 상류방향 선단과 거의 일치함)가 교각폭의 약 33%임($x/b = -0.33$) 보였다.

본 연구에서는 교각 국부세굴에 관한 실험적 연구를 바탕으로 교각 전면부에 발생하는 마제형 와의 부정류적 흐름 특성과 이로 인해 교각 국부 세굴에 미치는 영향을 밝히고자 한다.

2. 수리실험

실험 수로는 그림 2와 같이 길이 24.2 m, 폭 1.1 m 및 깊이가 0.5 m인 가변 경사식 개수로에 중앙입경 0.3 mm의 모래를 두께 200 mm 정도로 하여 전 수로길이에 걸쳐 포설하였다. 사각형 단면의 교각 모형의 폭은 46 mm이고, 교

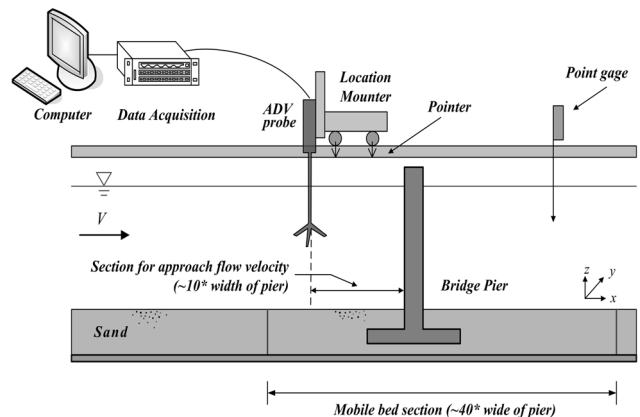


그림 2. 실험수로 개략도

각 모형을 설치된 지점으로부터 상·하류로 7 m 이상 되는 이동상 구간에 설치하였다. 두 대의 원심펌프를 이용하여 최대 유량 0.3 m³/s를 305 mm와 152 mm관을 통하여 수로로 흘려 보낼 수 있다. 각각의 관에는 전자기 유량계(±2.8×10⁻⁴ m³/s)가 설치되어서, 유입유량이 0.06 m³/s보다 클 경우는 305 mm관에 부착된 게이트 밸브를 이용하여 유량을 조절하였고, 0.06 m³/s이하의 유량일 경우는 152 mm관에 부착된 게이트 밸브를 이용하였다.

대상 흐름 영역에 있어 난류의 특성을 관찰하는데 일반적으로 안정성, 간결성, 민감도 및 고주파수에 대한 응답성을 고려한다 (Nezu와 Rodi, 1986). 주어진 흐름장에 가장 적절한 측정 방법을 선정하기 위해서는 변동량의 스케일, 측정에 중요한 평균적인 성질이 아니라 잡음이라 할 수 있는 성질의 인자들, 난류길이(microscale of turbulence, *l*)와 변동의 최대 주파수 (*f_{max}*)를 산정해야 한다. 무차원화된 파수 (*L_xk_{max}*)는 최소한 100이상이어야 하므로 다음과 같은 식으로 난류길이와 최대 주파수를 계산할 수 있다(서일원과 김영도, 2000).

$$l = \frac{1}{k_{max}} \leq \frac{L_x}{100} \approx \frac{h}{100} \quad (1)$$

$$f_{max} = \frac{k_{max}U}{2\pi} \geq \frac{100U}{2\pi L_x} \approx \left(\frac{50}{\pi}\right)\left(\frac{U}{l}\right) \quad (2)$$

여기서, *k_{max}*는 변동의 최대파수, *U*는 단면평균유속, *h*는 수심, *L_x*는 특성길이이다. 본 실험에서 사용되는 대표 값들을 대입하여 계산해 보면(*h*=0.19 m, *U*=0.6 m/s), *l*<19 mm와 *f_{max}*>50 Hz 라는 결과가 나온다. 따라서, 본 연구에서는 교각 주위의 흐름 구조와 난류의 특성은 초당 50개의 유속 자료를 취득할 수 있는 16 MHz 3차원 음파 도플러 유속계 (Acoustic Doppler Velocimeter, ADV)를 이용하여 측정하므로 그 기준을 만족시켰다고 할 수 있다. 16MHz ADV는 16MHz의 음파의 방출시켜 검사체(sampling volume)내의 미세입자의 거동으로 인하여 반사되는 파를 이용하여 초당 최대 50개의 유속을 측정하는 장치로, 측정범위는 0.03~1.0 m/s 이고, 허용오차는 0.1 mm/s 이다. 지름이 약 4.5 mm, 높이가 약 5.6 mm(<19 mm)인 원기둥의 형태를 가지는 검사체(sampling volume)의 체적은 약 90 mm³이다. 그리고, 음파 도플러 유속계의 탐사봉에서 검사체적까지의 거리가 50 mm이므로, 탐사봉으로 인한 국부 흐름의 교란이 없다고 간주하였다 (SonTek, 2001).

본 연구에서 정지상 세굴 조건(*V₁/V_c*<1)에서 세굴심이 발생하기 이전과 세굴심이 평형 세굴심에 도달한 후 흐름 특성을 음파 도플러 유속계를 이용하여 측정하여 비교하였다. 세굴심 발생 이전의 흐름을 측정하기 위하여 교각 주위의 하상물질을 폴리우레탄을 이용하여 조도계수의 변화가 거의 없을 정도로 균일하게 분포 시킨 후 고정시킨 상태에서 실험을 수행하였다. 이동상 실험에서 세굴심이 평형 세굴심에 도달한 후에 흐름 특성을 조사하였다. 측정이 진행되는 동안 음파 도플러 유속계가 측정한 추출체적과 하상간의 거리를 산정하여 세굴심을 측정하였고, 측정이 끝난 후에 포인터 게이지를 이용하여 세굴심을 재측정한 결과 그 차이가 미비함을 보였다(±2 mm 미만). 이는 이동상 실험에서 음파 도플러 유속계로 인한 흐름 교란이 거의 없어서 세굴심에 변화

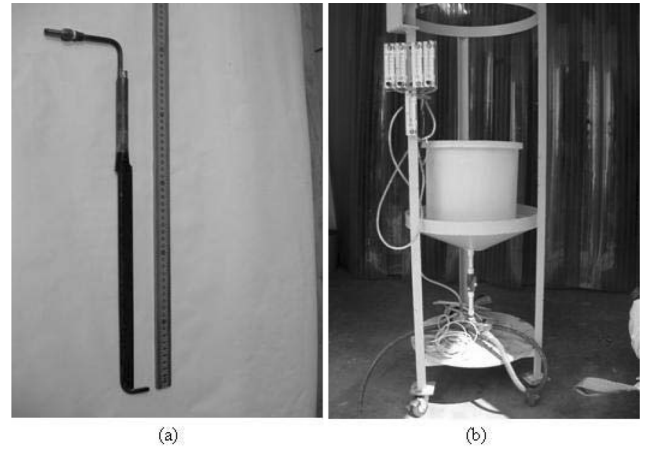


그림 3. Kaolin 혼합물 유입 노즐 및 펌프 시스템: (a)노즐; (b) 유량공급장치

가 없었음을 보여준다. 실험의 수리학적 조건은 표 1에 제시한 바와 같다. 음파 도플러 유속계를 이용한 유속 및 난류 특성자료는 교각 전면부에서 시작하여 상류방향으로 일정한 간격을 유지하면서 측정하였다. 측정하고자 하는 흐름 영역이 난류의 영향이 지배적이므로 충분한 측정 자료의 확보를 위해 한 측정지점에서 최소 3분 이상 측정하였고 교란 등으로 인해 노이즈 발생이 빈번한 바닥에 가까운 점들에 대해서는 5분 이상 측정하여 그 결과를 이용하였다. 측정된 결과에서 노이즈와 이상 신호를 제거하기 위하여 필터링 작업을 하였다. 필터링의 조건은 자료간의 상관수(correlation)가 70%이상이고 SNR(signal to noise ratio)값이 15이상인 자료만을 사용하도록 하였다(SonTek, 2001).

그리고, 마제형 외를 비롯한 교각 주위의 흐름 구조를 가시화 하기 위해 크기가 0.2~0.5 μmm 정도의 kaolin 점토 입자를 이용하였다. 물과 kaolin 점토 입자를 혼합한 혼합물 농도는 1000 mg/L였다. 이 혼합물을 흐름의 교란을 최소화 할 수 있도록 유선형의 형태를 갖춘 4.7 mm 직경의 노즐과 유량공급장치를 이용하여 수로 흐름의 평균 유속과 일치하도록 유입 유량을 조절하면서 분출하였다(그림 3참조).

3. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 마제형 외류계 내에서 관측된 자료를 바탕으로 대축척 부정류적 특성을 가지는 마제형 외와 관련된 난류사상을 알아 보기 위하여, 유속성분의 확률분포를 이용한 해석, 사분면 해석방법(quadrant analysis) 및 적분시간축적(integral time scale)을 이용하였다.

3.1 유속성분의 확률분포

기존의 연구(Devenport와 Simpson, 1990)와 시간에 따른 마제형 외의 변화를 가시화한 그림 4에서 알 수 있듯이, 마제형 외는 시간에 따라 그 크기와 강도가 변화한다. 교각 전면부에 발생하는 마제형 외의 시간 변화에 대한 개략도를 개념적으로 그림 5에 나타내었다. 교각 전면부에서 주 마제형 외는 위치와 크기가 불규칙하게 변화함을 알 수 있다. 그림 6에서 나타낸 바와 같이 *x/b*= -0.33 지점에서 측정된 시간별 유속의 변화를 관측해 보면, 3-5분의 측정 시간 내에

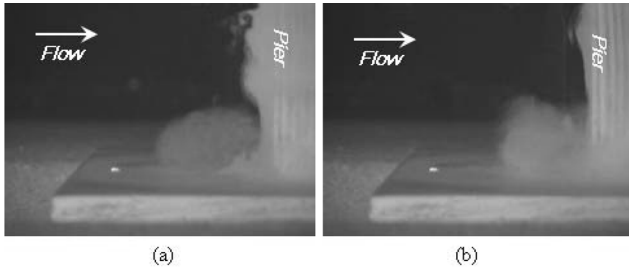


그림 4. Kaolin을 이용한 교각 전면부에서 발생한 마제형 와의 시간에 따른 변화: (a) $t=t_1$; (b) $t=t_1+0.26$ 초 ($C_o=1000$ mg/L)

서 교각쪽으로 흐르는 유속 자료들과 반대로 상류쪽으로 흐르는 유속 자료들을 관측할 수 있다. 이러한 결과는 Devenport와 Simpson(1990)이 수행한 비행기 날개 모형을 이용한 풍동 실험에서도 나타난다. 그들은 이러한 두 가지의 상태를 나타내는 마제형 와가 차지하는 전체 시간에 대한 비중은 20~30%정도 이고, 마제형 와가 시간에 대한 대축척의 부정류적 특성을 가지고 있다는 것을 알아내었다. 또한, $x/b = -0.2$ 인 지점에서 흐름방향의 유속 성분의 확률분포가 두개의 첨두를 가지는 이중분포였지만, 측정 지점이 바닥에서 멀어질수록 하나의 첨두를 갖는 일정분포로 바뀌는 것을 실험을 통하여 보여주었다($z/b=0.14$ 이상인 경우 일정분포를 보였음). 또한, 교각 상류방향 $x/b = -0.33$ 은 Dargahi (1989)에 실험한 결과에서 나타난 주 마제형 와의 박리 현

상이 발생하는 지점과 거의 일치한다. 따라서, 이 지점($x/b = -0.33$)은 주 마제형 와의 내부에 있는 점임을 나타낸다. 그러므로, 본 실험에서 ADV의 탐사봉의 크기까지 고려하여 교각과 바닥에 가장 가까운 측정가능한 지점으로($x/b, z/b = (-0.33, 0.17)$)을 정하였다.

본 실험에서 측정된 교각 상류방향으로 $x/b = -0.33$, 수심 방향으로 $z/b=0.17$ 지점에서의 유속 자료의 확률분포를 나타내면 그림 6과 같다. 그림 5에서와 같이 고정된 지점(DV₁과 DV₂ 사이)에서 관측하면 마제형 와는 두 가지의 안정화된 형태를 가지므로, 이로 인해 종방향과 연직방향의 유속 확률분포는 그림 6에서와 같이 각자 다른 부호의 평균 값을 가지는, 두개의 첨두를 가진, 이중분포로 나타난다. 이 사실로 마제형 와로 인해 하상 근처에서 얇은 층을 가지는 역방향 흐름이 발생했음을 알 수 있고, 박리 현상이 발생하는 지점이 교각에 가까워지면($x/b = -0.33$) 종방향 유속은 흐름방향과 일치하게 된다. 그러나, 음과 도플러 유속계를 이용하여 정확하게 역방향 흐름을 나타내는 얇은 층을 측정할 수 없지만, 그림 6을 통하여 정성적으로 마제형 와가 시간에 따라 진동하는 대축척의 부정류적 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 연직방향의 유속성분을 보면 전체 측정 시간 중에서 음의 값은 73.4%인 반면 양의 값은 26.6%이다. 또한, 양의 값을 나타내고 있는 첨두의 높이도 음의 값을 나타내는 첨두 높이보다 작다. 이는 유속 측정 지점에 따라 좌우된다. 더 높은 지점, z/b 의 값이 큰 지점으로 갈수록, 유속

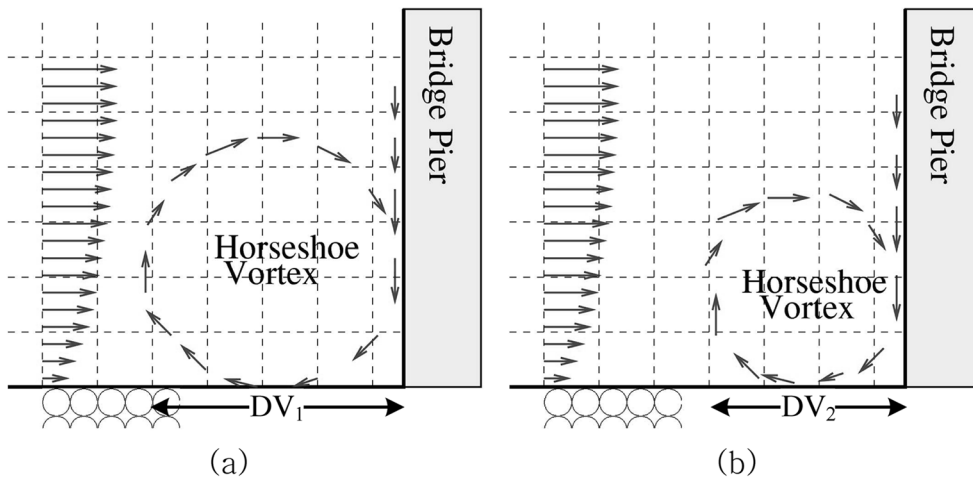


그림 5. 시간에 따른 마제형 와의 시간 변화를 나타내는 개략도: (a) $t=t_1$; (b) $t=t_1+t$

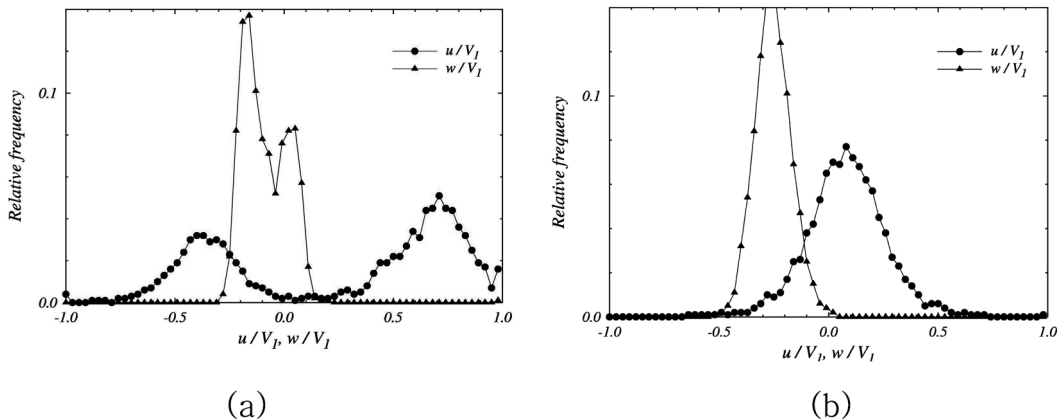


그림 6. x방향과 z방향의 유속 확률 분포 : (a) 세굴 발생전; (b) 평형세굴심 도달후 ($x/b = -0.33, z/b=0.17$)

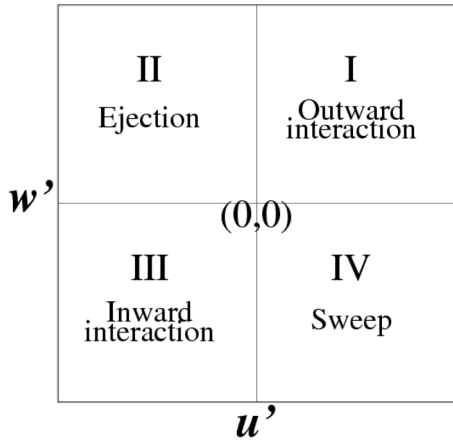


그림 7. 사분면 해석방법의 개략도(Marchioli와 Soldati, 2002)

확률분포에서 이정분포의 특성을 관측할 수 없다(Devenport와 Simpson 1990).

3.2 사분면 해석방법

사분면 해석방법은 그림 7와 같이 종방향과 연직방향의 유속 변동 성분(u' , w')의 결합확률분포를 이용하여 사분면에 분포한 정도를 이용하여 난류의 특성을 알아내는 방법이다.

외향 상호작용(outer interaction)으로 표현된 I 사분면은 빠른 유속의 유체가 하상에서 바깥 쪽으로 움직이는 것을 나타내며, 배출(ejection) 또는 파열(burst)로 표기된 II 사분면은 느린 유속의 유체가 하상으로 부터 멀어지려는 것을 나타내며, 내향 상호작용(inward interaction)으로 표기된 III 사분면은 느린 유속의 유체가 하상쪽으로 움직이려 하는 것과 관련이 있고, 일소(sweep)로 표기된 IV 사분면은 빠른 유속의 유체가 하상쪽으로 움직임을 나타낸다. 그러므로, 유체와 입자간의 움직임을 사분면 해석방법으로 설명할 수 있다. $\overline{u'w'}$ 은 하상에 대한 전진 운동량의 흐름율을 나타내므로, 배출과 일소는 하상 전단응력에 명백하게 기여함을 알 수 있다. 즉, 일소 현상이 존재함은 하상에서의 전단 응력의 국부적 증대를 나타내고, 배출 현상이 발생하면, 전단응력의 국부 감소를 뜻한다. 그러므로, 일소와 배출은 하상물질을 하상으로부터 멀어지게 하거나 하상으로 가까이 가게하는 현상과 밀접한 관련이 있다(Marchioli와 Soldati, 2002). 또한, 세굴공 내에서의 바닥 전단응력은 Reynolds 응력의 영향을 받고, 다음과 같은 식으로 추정될 수 있다(Dey와 Raikar, 2007).

$$\tau_b = \sqrt{\tau_\theta^2 + (\tau_r \cos \beta + \tau_z \sin \beta)^2} \Big|_{\text{at scoured bed}} \quad (3)$$

여기서, $\tau_\theta = \tau_{wu} + \tau_{uv}$; $\tau_r = \tau_{uv} + \tau_{uw}$; $\tau_z = \tau_{wu} + \tau_{vw}$; $\tau_{uv} = -\rho \overline{u'v'}$; $\tau_{vw} = -\rho \overline{v'w'}$; $\tau_{wu} = -\rho \overline{w'u'}$; β : 세굴공의 경사이다.

본 실험에 관측된 유속 자료 중에서 교각 전면에서 측정된 세굴 발생 전과 평형 세굴심 도달 후의 x 방향과 z 방향에 대한 유속 변동 성분을 사분면 해석방법으로 비교 분석하였다(그림 8과 그림 9 참조). 거의 같은 위치에서 측정된 유속자료를 이용하였고, 각각의 결합 확률 분포의 값은 최대값으로 나누어 최대 값이 1.0이 되게 하였으며 그 축척 값은 각각 그림 중앙 위쪽에 표기 하였다. 그림 8과 그림

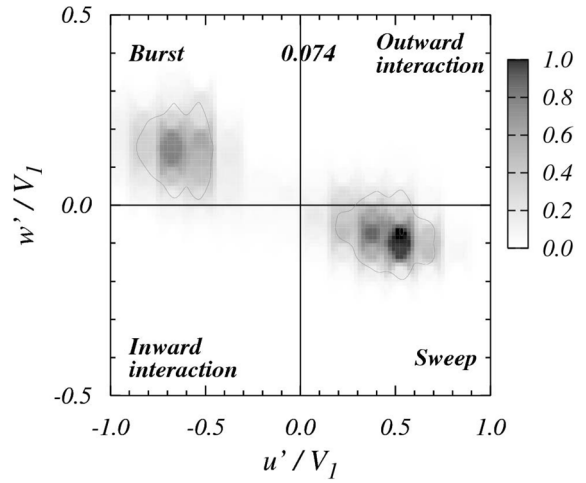


그림 8. 세굴 발생전의 결합 확률 분포 ($x/b = -0.33$, $z/b = 0.17$)

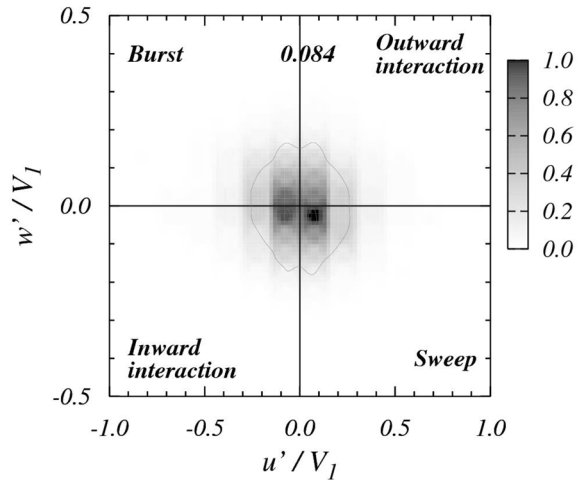


그림 9. 평형 세굴심 도달 후의 결합 확률 분포 ($x/b = -0.33$, $z/b = 0.17$)

9을 통해서 알 수 있듯이, 사분면 해석방법으로 두 조건에 대해 분명히 다른 난류 특성을 발견하였다.

세굴 발생 전인 경우(그림 8 참조), 파열과 일소 현상이 거의 대칭적으로 이정 분포하면서 발생 확률이 매우 큰 주된 난류 특성을 보여주고 있다. 그러므로, 파열과 일소 사상이 초기 세굴공을 생성하는 주요한 역할을 한다고 생각되어진다. 더욱이, 박리 현상이 발생하는 지점이 교각 전면부에서 상·하류로 움직이면서 마제형 외가 불규칙적으로 팽창하거나, 줄어들게 되는데, 이로 인해, 파열과 일소 현상도 불규칙하게 반복될 것이다. 이로 인해, Reynolds 응력 ($-\rho \overline{u'w'}$) 변화에 따라 바닥 전단응력이 변화하게 되고 이는 교각 전면부에 있는 하상 물질을 간헐적으로 부유 또는 침강 하도록 반복하게 만들 수 있다. 하상 물질의 움직임이 반복적으로 진행되는 동안 마제형 외가 흐름 하류방향으로 연장(stretching)하는 것에 의하여 하상 물질이 교각 전면부에서 이탈하여 세굴공이 생성되게 된다. 이와 같이 교각 전면부에서 이탈된 하상 물질은 주로 후방외류의 영향으로 하류로 이송되게 된다. 반면, 그림 9에서 평형 세굴심 상태에 도달한 후의 결과를 보면, 4개의 사분면에서 모두 특별히 두드러지는 난류특성을 발견하지 못했다. 이는 난류특성이 세굴공 안에서 흐름의 변화로 인해 하상 전단응력에 영향을 미칠 만큼의 능력을 가지지 못함을 나타낸다. 또한, 이정분

표 1. 실험 조건 및 무차원 변수

Q , m ³ /s	y_j , m	V_j , m/s	Fr_1	b/d_{50}	V_1/V_c	y_1/b	d_s/b
0.29	0.19	0.60	0.44	13.95	0.83	4.16	2.91

표 2. 바닥 전단응력, τ_b 비교

	τ_{ms} , N/m ²	τ_{vs} , N/m ²	τ_{ws} , N/m ²	β , degree	τ_b , N/m ²
Before scour	3.327	-0.579	0.369	0	4.605
After scour	-0.746	-0.476	0.414	40.23	1.021

표 3. 적분 시간 축적값의 비교

	Before scour, sec	After scour, sec
Streamwise direction	1.8	1.3
Vertical direction	4.3	0.7

포의 특성도 사라졌음을 알 수 있다. 세굴 발생 전과 후의 바닥 전단응력을 Dey와 Raikar(2007)가 제안한 식으로 계산 비교해 보면, 세굴 전에 발생하는 바닥 전단응력이 평형세굴심 상태 보다 4배정도 더 큰 것으로 나타났다(표 2 참조). 이는 세굴공의 진행률이나 최대 세굴심이 초기 바닥 전단응력에 영향을 받는 것으로 사료된다.

3.3 적분시간축척

마제형 와의 난류 특성을 이해 할 수 있는 다른 방법으로써, 적분 시간 축척(integral time scale)을 이용하였다. 이는 유속 성분이 과거 값에 의존하고 있는 시간 정도를 나타내는 것으로 유속 변동 성분이 얼마만큼 강하게 자기상관관계(auto-correlation)에 있는가를 시간간격의 척도를 이용하여 정의하는 방법이다. 따라서, 적분 시간 축척은 일정 시간에 걸쳐 측정된 유속 변동 성분에 대한 자기상관분포(auto-correlation distribution)를 이용하여 시간에 따라 적분하여 구할 수 있다. 또한, 이는 일정시간동안 진행과정을 기억하는 척도로도 사용될 수 있다(Kundu, 1990; Tennekes와 Lumley, 1972).

세굴 발생 전과 후의 두 실험 자료를 이용하여 난류 특성 면에서 다른 차이점을 제안하고자, 표 3에 주어진 바와같이 적분 시간 축척을 계산하여 비교하였다. 연직방향에 대하여 세굴 발생 전의 적분 시간 축척은 평형 세굴심 도달 후의 값보다 훨씬 큰 반면, 종방향 시간 축척에서는 그 차이가 그다지 크지 않다. 세굴 발생 전에 연직방향 유속 변동 성분은 하상물질을 하상으로부터 들어올리거나, 이탈시키는 것에 기여하였을것으로 사료된다. 따라서, 세굴 발생 초기에 하상 물질 이송이 급격히 증가할 때에는 유속 변동 성분에 대한 적분 시간 축척이 길 경우가 그렇지 않는 경우보다 더 많이 하상 물질을 이동시킬 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 사각형 단면의 교각 주위에서 발생하는 국부 세굴과 주요한 인자인 마제형 와의 특성을 실험을 통하여 규명하였다. 본 실험을 정지상 세굴 조건에서 수행하였고, 세굴심 변화와 교각 전면부에 발생하는 마제형 와간의 관계를 유속 변동 성분의 확률분포, 사분면 해석방법과 적분 시

간 축척을 이용하여 설명하였다. 세굴 발생전과 평형 세굴심 도달 후의 조건에서 교각의 전면부 상류 방향의 동일한 지점($x/b = -0.33$, $z/b = 0.17$)에서 측정된 유속 자료를 비교, 분석하였다. 본 연구를 통하여 밝혀진 바는 다음과 같다. 첫째, 세굴 발생 전에는 이 지점에서 유속 확률 분포가 부호가 다른 두개의 첨두를 가지는 이중분포를 나타내었고, 둘째로, 종 및 연직 방향 유속 변동성분에 대하여 사분면 해석방법을 적용한 결과, 난류 특성으로 파열과 일소의 특성이 지배적으로 나타났다. 이 두 성분은 하상 전단응력에 큰 영향을 미치고, 두 개의 첨두를 갖는 결합 확률 분포를 나타내었다. 또한, 이 두 성분은 마제형 와의 불규칙한 거동의 결과로써, 세굴공을 형성하는 초기 단계에 주요한 역할을 한다. 그러므로, 하상 물질은 이러한 간헐적인 거동에 의하여 하상으로부터 떠오르고, 이탈하게 된다. 그러나, 세굴심이 평형 세굴심에 도달한 후에는 세굴공 내의 흐름변화로 인해 더 이상 이중분포를 관찰할 수 없었다. 셋째, 세굴 전후에 대하여 바닥 전단응력을 비교해 보면, 세굴전이 평형 세굴심 도달 후 보다 크게 나타나는데, 이는 세굴심의 변화가 Reynolds 응력 내지는 바닥 전단응력과 밀접한 관계가 있음을 나타낸다. 이러한 사실을 통해서, 유속 변동 성분의 이중 분포는 마제형 와의 중요한 특성 중의 하나이고, 이로 인해 마제형와는 상대적으로 큰 시간 축척의 부정류적 특성을 가짐을 알 수 있다. 이러한 마제형 와의 부정류적 특성은 교각 주위의 흐름 구조와 세굴 현상간의 관계를 이해하는 주요한 인자임을 알 수 있다.

본 연구에서는 실험적 해석방법을 이용하여 세굴 발생 이전과 이후의 유속과 난류 성분의 해석에 초점을 두었고 다음과 같은 연구가 추가적으로 수행되어 할 것으로 사료된다. 먼저, 상대적으로 긴 흐름 시간에 걸쳐, 예를 들면, 세굴 초기 발생시부터 평형 세굴심에 이를 때까지, 교각 주위의 유속과 난류 성분을 측정하여 본 연구의 수행 결과와 병합하면 교각 주위에서의 흐름 특성과 세굴심의 변화에 대한 보다 명확한 이해관계를 제시할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 초기 세굴 발생시 마제형 와에 영향을 미치는 다른 요소(접근유속, 교각 폭, 경계층 두께 등)에 대한 정량적인 비교를 위한 연구가 수행되어야 하고, 그 결과를 바탕으로 마제형 와와 하상 물질의 입경크기와의 관계도 연구하게 되면, 세굴 발생 현상과 평형 세굴심에 대한 보다 나은 이해를 도모할 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(지진해일 방재대책 수립) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 서일원, 김영도(2000) 원형교각 주위의 국부세굴 난류구조에 관한 실험적 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제20권, 제II-3호, pp. 343-350.
- Baker, C.J. (1980) Theoretical approach to prediction of local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 18,

- No. 1, pp. 1-12.
- Dargahi, B. (1989) Turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in Fluids*, Vol. 8, No. 1-2, pp. 1-12.
- Devenport, W.J. and Simpson, R.L. (1990) Time-dependent and time-averaged turbulence structure near the nose of a wing-body junction. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 210, pp. 23-55.
- Dey, S. and Raikar, R.V. (2007) Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 4, pp. 399-413.
- Ge, L., Lee, S.O., Sotiropoulos, F., and Sturm, T. (2005) 3D unsteady RANS modeling of complex hydraulic engineering flows. II: Model validation and flow physics. *Journal of Hydraulic Engineering* Vol. 131, No. 9, pp. 809-820.
- Kundu, P.K. (1990). *Fluid mechanics*, Academic Press, San Diego.
- Marchioli, C. and Soldati, A. (2002) Mechanisms for particle transfer and segregation in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 468, pp. 283-315.
- Muzzammil, M. and Gangadhariah, T. (2003) Caracteristiques moyennes d'un vortex en fer a cheval au droit d'une pile cylindrique (The mean characteristics of horseshoe vortex at a cylindrical pier). *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 3, pp. 285-297.
- Nakagawa, H. and Suzuki, K. (1975) Application of stochastic model of sediment motion to local scour around a bridge pier. *Proceedings 16th Congress, IAHR*, Sao Paulo, Braz, pp. 285-299.
- Nezu, I. and Rodi, W. (1986) Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 5, pp. 335-355.
- Qadar, A. (1981) Vortex scour mechanism at bridge piers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London, England, pp. 739-757.
- Simpson, R.L. (2001) Junction flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 33, pp. 415-443.
- Son Tek. (2001) ADV Principles of operation. SonTek Inc., San Diego, CA.
- Tennekes, H. and Lumley, J.L. (1972). *A first course in turbulence*, Mass., MIT Press, Cambridge.
- (접수일: 2006.11.21/심사일: 2007.3.2/심사완료일: 2007.7.30)