

## 군말뚝 주변의 국부세굴에 관한 연구

### An Experimental Study on Local Scour Around Group Pile Foundation

윤 병 만\* / 서 정 필\*\* / 노 영 신\*\*\*  
Byungman Yoon / Jungphil Seo / Youngsin Roh

#### Abstract

This study analyzed the general scour characteristics around group pile foundations through laboratory experiments. The experiments were performed for the pile groups consisting of 4, 9, 15 and 35 piles to investigate the effects of pile number, mean velocity and the angle of attack on the scour hole shape, and the magnitude and the position of maximum scour depth.

Results reveal that the maximum scour depth for 4 and 9 piles have almost same values with single pier case regardless of approach velocity. The scour depth for 15 and 35 piles, however, increases as the mean velocity increases and reaches up to 2.2 times of maximum scour depth for single pier case. As the number of piles increase, the single scour holes are superposed and the overall scour hole turned out to be rectangular shape.

The experimental results for the case of 35 piles indicate that the scour depth has the maximum value at angle of attack of 35 degree and that the main scour hole is formed in diagonal direction.  
*keywords* : scour, group pile, maximum scour depth, angle of attack

#### 요 지

본 연구에서는 군말뚝 교각 주위에서의 세굴특성을 실험을 통하여 파악하였다. 실험은 4개, 9개, 15개, 35개의 파일로 구성된 군말뚝에 대해 수행하여 파일수, 유속, 접근각에 따른 세굴형상, 최대세굴심의 깊이 및 위치의 변화를 살펴보았다.

실험결과에 의하면, 4개 및 9개로 구성된 군말뚝의 경우 유속비와 상관없이 단일교각의 최대세굴심과 흡사하였고, 15개와 35개로 구성된 군말뚝의 경우 유속비가 증가함에 따라 최대세굴심도 급격히 증가하여 단일교각 세굴심의 약 2.2배 증가함을 알 수 있었다. 또한 세굴형태는 말뚝간격이 조밀해질수록 원형의 세굴공이 중첩되어 전체적으로 직사각형의 형태를 띠는 것으로 나타났다. 35개의 파일로 구성된 군말뚝에 대한 접근각의 영향을 살펴본 결과 세굴심은 접근각이 35°에서 최대가 되었으며 이때의 세굴공은 대각선 방향으로 형성됨을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 세굴, 군말뚝, 최대세굴심, 흐름 접근각

\* 명지대학교 SOC 공학부 토목환경공학과 부교수  
Associate Prof., Dept. of Civil & Envir. Eng., Myongji Univ., Yongin 38-2, Korea  
(E-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

\*\* 명지대학교 토목환경공학과 석사 수료  
Former Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Eng., Myongji Univ., Yongin 38-2, Korea

\*\*\* 명지대학교 토목환경공학과 박사과정  
Doctoral Student, Dept. of Civil & Envir. Eng., Myongji Univ., Yongin 38-2, Korea

## 1. 서론

국부세굴은 수공구조물 주변에서의 국부적인 흐름변화가 그 원인이라 할 수 있으며 이러한 변화는 교각 또는 교대의 하상물질을 제거한다. 특히 교량구조물의 기초에서 발생하는 세굴은 교량의 수명과 안정성에 좋지 않은 영향을 미치게 되며 특히, 우리나라와 같이 여름철 홍수시에 단시간에 걸쳐 유량이 급증하는 경우에는 급격한 교량기초 저면의 세굴로 인한 갑작스러운 교량 붕괴 사태를 초래할 수 있어 대형 인명사고를 초래하는 원인이 될 수 있다. 따라서 국부세굴의 경향을 예측하고 분석하는 것은 교량구조물이나 수중구조물의 설계에 있어서 매우 중요한 일이며, 교량의 안정성을 확보하기 위한 세굴방호대책을 수립하는데 있어서도 우선적으로 수행되어야 할 가장 중요한 사안이라 하겠다.

지금까지 국부세굴에 대한 연구는 국내외에서 많은 연구가 수행되어 왔다(FHWA, 1995; Jones, 1989; Raudkivi, 1986; 박성식 등, 1997; 최계운 등 1996). 하지만 이들 연구의 대부분은 균일단면을 갖는 교각에서의 세굴에 관한 것들로 최근 관심이 되고 있는 서해대교와 같이 군말뚝 기초를 사용하는 교량에 대한 연구는 그다지 많이 수행되지 않았다. 최근 교량의 기초부를 군말뚝으로 설계하는 사례가 증가하면서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, Hannah(1978)는 이중교각에서 두 개 교각의 각도를 변화시키며 최대세굴심의 변화를 관찰하였으며, Salim과 Jones(1996)는 군말뚝 주위의 세굴평가방법을 제시하였다. Summer 등(1992)은 과거 존재하는 지역에서의 말뚝간격에 따른 세굴심의 변화에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 군말뚝 기초주변의 세굴현상에 대한 실험을 수행하여 군말뚝 주변의 세굴특성을 파악하는데 그 목적이 있다. 또한 군말뚝 실험에 앞서 단일교각에서의 세굴특성을 파악하고 기존의 연구결과와 비교·

분석함으로써 군말뚝에서의 세굴특성을 단일 교각과 비교·검토하였으며 군말뚝 교각 주변에서 발생하는 국부세굴에 대한 실험을 실시하여 군말뚝 교각간격과 흐름각 변화가 군말뚝 주변의 세굴에 미치는 영향을 파악하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험은 기초실험과 군말뚝 실험으로 나누어 실시하였다. 기초실험은 단일교각, 이중교각에 대해 수행하였는데 군말뚝의 세굴특성과 비교·검토를 위한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다. 군말뚝 실험에서는 4개, 9개, 15개, 35개로 구성된 군말뚝 교각에 대해 실험을 수행하여 군말뚝에 대한 일반적인 세굴특성을 파악한 후 이중 35개로 구성된 군말뚝을 선택하여 흐름접근각에 대한 군말뚝에서의 세굴특성에 대한 실험을 수행하였다.

### 2.1 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치는 크게 개수로 실험장치와 유량공급장치로 구분할 수 있다. 개수로의 길이는 25m(수조포함), 높이 0.8m, 폭 0.8m의 체원을 가지고 있으며, 하상경사는 최대 0.0077까지 조절할 수 있다. 그리고 개수로 상류단에는 고수조에 유입된 물을 받아 유량을 조절할 수 있는 위어가 설치되어 있으며 수로의 끝에는 수위를 조절할 수 있는 수문이 설치되어 있다(그림 1). 유량공급장치는 고수조(3.8m×3.3m×1.7m H), 저수조(5.5m×5.5m×4.2m H), 순환수로(0.72m W×0.26m H), 펌프(10, 20, 50마력, 최대공급유량 360 l/s)로 구성되어 있다. 또한 실험시 등류상태를 확인하기 위해 사용된 초음파 유속계는 오차범위가 1~2mm 정도이며 실험대상구간의 상하류에 각각 한 개씩 배치하였다.

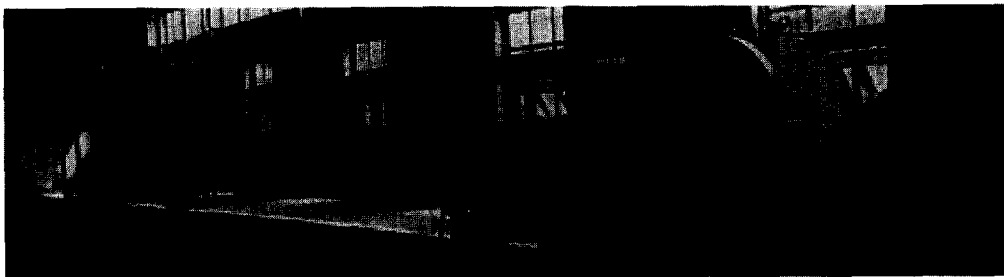


그림 1. 개수로 실험장치

## 2.2 기초실험

### 2.2.1 한계이동유속( $V_c$ )의 측정

유속은 세굴의 주요인자 중의 하나이다. 그 중 한계이동유속( $V_c$ )은 정적세굴(clear water scour)과 동적세굴(live-bed scour)을 분류하는 기준이 되는 인자이다. 본 연구에서는 유속비에 따른 세굴심의 변화를 나타내기 위하여 한계이동유속을 측정하였으며, 기초실험에서 한계이동유속을 측정하기 위해 수로의 중앙 5m 구간에 비중 2.65, 평균입경( $d_{50}$ )이 0.4mm인 모래를 두께 20cm로 포설한 후에 수로에 물을 서서히 공급하면서 포설구간 전체에 걸쳐 하상재료가 움직일 때를 한계이동유속으로 보고 몇 차례 측정하여 이들의 평균값인 28.8cm/s를 한계이동유속으로 결정하였다.

### 2.2.2 단일교각에 대한실험

단일교각에 대한 실험은 이중교각 및 균말뚝 교각의 실험결과를 단일교각과 비교·분석하기 위한 실험자료로써, 직경이 2.5cm인 원형교각을 수로에 설치하고 표 1의 조건하에서 실험을 수행하였다.

원형 단일교각은 수로의 중앙 5m 구간 하류부에 설치하고 하상재료를 완전히 성형한후 수로 하류부의 수

문을 닫고 미소유량을 수로내에 공급하면서 하상재료 층의 공극을 채운 뒤 하상표면에 수면이 다소 올라오면 서서히 유량을 증가시켜 실험유량 20.0 l/s까지 도달할 때까지 조절하였다. 실험유량이 완전히 유하된 후 3차원 초음파 유속계를 이용하여 수심방향으로 3점법, 수로폭 방향 9구간으로 나누어 측정하였고, 등류상태를 확인하기 위해서 대상구간 상하류에 수위측정기를 각각 1개씩 배치하여 수심을 확인하였다. 실험이 완료되면 유량을 서서히 감소시키면서 사런이 발생하지 않도록 주의를 기울이며 실험수로내의 물을 배수한 후 포인트 게이지를 이용하여 교각부 하상변동량을 종횡단 방향으로 측정하였다.

### 2.2.3 이중교각에 대한실험

말뚝 간격에 대한 세굴 특성을 비교·분석하기 위해서 이중교각의 간격에 따른 실험을 실시하였다. 이중교각 실험에 대한 제원은 표 2에 수록되어 있으며 그림 2에서와 같이 모형교각을 흐름방향(S)과 폭방향(B)으로 각각 배치하여 실험을 수행하였다. 이중교각에 대해서는 등류상태를 유지하며 유속과 수위를 변화시키면서 실험을 실시하였다.

표 1. 유속비에 따른 실험조건

case	평균유속 $V$ (cm/s)	유속비 $V/V_c$ (cm/s)	수심 $h$ (cm)
1	16.5	0.57	16.8
2	17.0	0.59	16.2
3	18.0	0.63	15.3
4	19.0	0.66	14.3
5	20.5	0.71	16.7
6	21.0	0.73	13.0
7	23.0	0.80	12.1
8	23.5	0.82	11.7
9	24.5	0.85	11.2
10	25.0	0.87	11.0

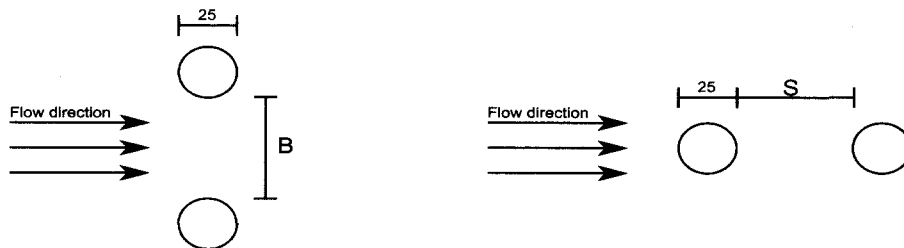


그림 2. 이중교각 배치도(단위: mm)

표 2. 이중 모형교각실험의 조건

	말뚝수	유속비	수위(m)	흐름방향간격(S)	폭방향간격(B)
Case1	2	0.57	7.6	2.5cm(1D)	2.5cm(1D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		
Case2	"	0.57	7.6	5.0cm(2D)	5.0cm(2D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		
Case3	"	0.57	7.6	7.5cm(3D)	7.5cm(3D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		
Case4	"	0.57	7.6	10.0cm(4D)	10.0cm(4D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		
Case5	"	0.57	7.6	12.5cm(5D)	12.5cm(5D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		
Case6	"	0.57	7.6	15.0cm(6D)	15.0cm(6D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		

표 3. 군말뚝 모형교각의 제원

	말뚝수	유속비	수위(m)	흐름방향 간격(S)	폭방향 간격(B)
Case 1	4	0.57	7.6	39cm(15.6D)	26cm(10.4D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		
Case 2	9	0.57	7.6	19.5cm(7.8D)	13cm(5.2D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		
Case 3	15	0.57	7.6	19.5cm(7.8D)	6.5cm(2.6D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		
Case 4	35	0.57	7.6	6.5cm(2.6D)	6.5cm(2.6D)
		0.74	12.3		
		0.89	18.1		

## 2.3 균말뚝에 대한 실험

### 2.3.1 말뚝 갯수에 따른 세굴특성 파악

균말뚝에 대한 세굴 특성중에서 말뚝의 갯수에 따른 특성을 파악하기 위해서 이미 언급한 바와 같이 말뚝의 개수를 4개, 9개, 15개, 35개인 균말뚝을 제작하여 모형실험을 수행하였다. 균말뚝 모형교각의 재원과 교각 배치도는 표 3 및 그림 3과 같다. 또, 흐름의 균말뚝에 대한 접근각은 그림 3과 같이 흐름에 대해 직각방향으로 고정하여 실험을 수행하였다.

### 2.3.2 접근각에 대한 실험

본 실험에 사용될 균말뚝 교각은 균말뚝의 특성을 좀더 잘 나타낼 것으로 판단되는 35개로 구성된 균말뚝을 선택하여 흐름각에 대한 세굴특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 균말뚝의 배치는

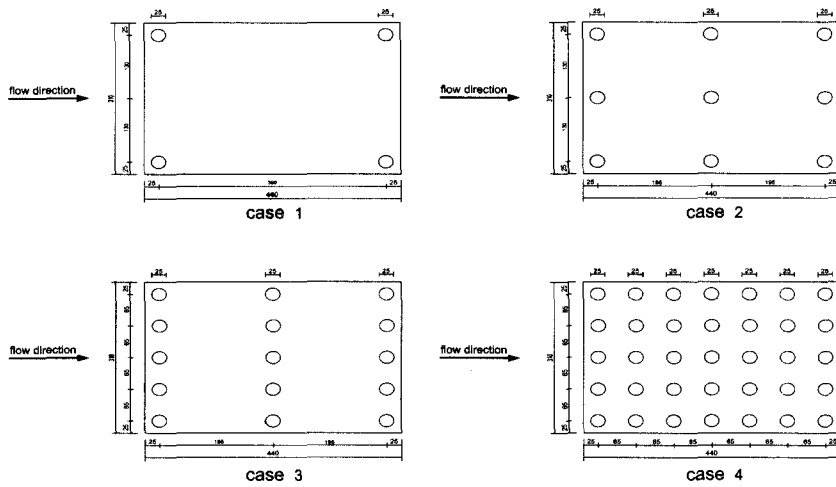


그림 3. 균말뚝 교각의 배치도

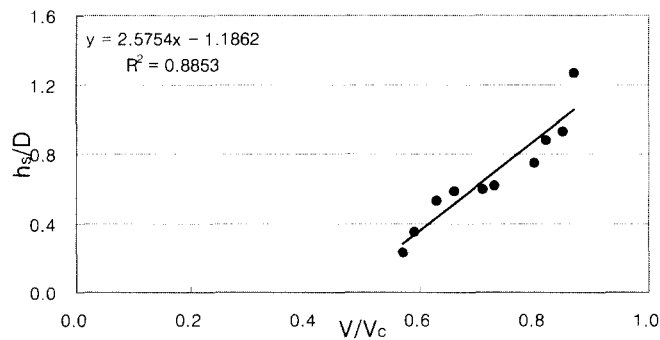


그림 4. 단일교각에서 유속비에 따른 세굴심 변화

그림 3의 case 4에 대한 배치와 동일하다. 접근각의 변화에 따른 세굴양상을 파악하기 위해 흐름방향과 균말뚝이 이루는 접근각이 0°, 10°, 20°, 30°, 35°, 45°인 총 6가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 단일교각 실험

일반적으로 교각세굴은 유속비  $V/V_c > 0.5$ 이면 시작되며  $V/V_c \leq 1$  범위에서는 유속비가 증가할수록 세굴심 또한 선형적으로 증가한다고 보고된 바 있다(Raudikivi, 1986; Chiew and Melville, 1987). 그림 4에서 보는 바와 같이  $V/V_c > 0.5$ 에서 세굴이 시작되는 것을 알 수 있으며  $V/V_c \approx 0.9$ 가 될 때까지 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

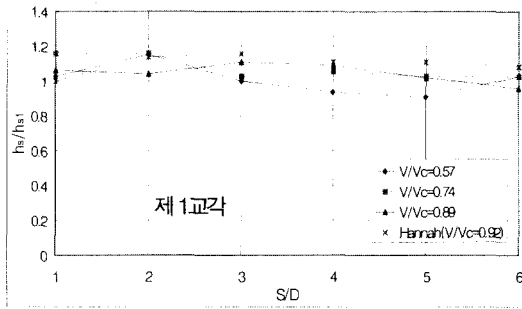


그림 5. 상류측 교각의 흐름방향간격에 따른 세굴심 변화

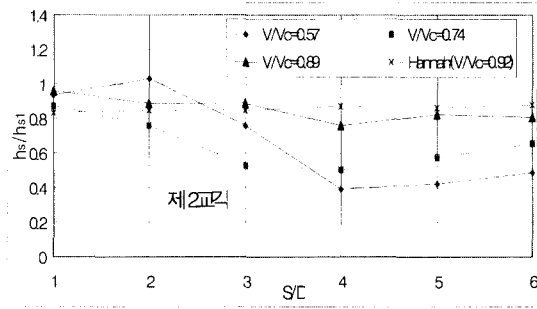


그림 6. 하류측 교각의 흐름방향간격에 따른 세굴심 변화

### 3.2 이중교각 실험

#### 3.2.1 흐름방향간격의 영향(교각간격1D~6D)

이중교각을 흐름방향으로 배치하여 얻은 결과는 그림 5와 그림 6에서 보는 바와 같다. 그림 5와 6은 각각 상류측 교각(제 1교각)과 하류측 교각(제 2교각)에 대해 무차원 세굴깊이( $h_s/h_{s1}$ )를 하류방향 무차원거리(S/D)로 표시한 것이다. 여기서  $h_{s1}$ 은 단일교각일 때의 세굴심이고, S는 상하류 교각사이의 거리를 나타낸다(그림 2 참조).

상류측 교각의 경우(그림 5) 최대세굴심이 발생하는 교각간격은 유속비에 따라 다소 차이는 있지만 교각 간격이 교각지름의 약 1~3배 사이에서 최대세굴심이 발생하여 그 크기는 단일교각에 비해 약 1.2배 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 교각의 간격이 약 6배인 경우에는 단일교각의 세굴형상과 흡사하게 나타났다. 한편 Hannah(1972)의 연구에 따르면 완전한 단일교각의 세굴형상은 약 S/D=16에서 발생한다고 발표된 바 있다.

하류측 교각의 경우(그림 6) 상류측에서와는 달리 단일교각인 경우에 비해 세굴심이 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 유속비에 따라 세굴심의 편차가 큼을 알 수 있고, 유속비는 상관없이 교각간격이 지름의 4배일 때  $h_s/h_{s1}$ 이 최소가 되며 교각지름이 지름의 4배보다 커짐에 따라  $h_s/h_{s1}$ 가 서서히 증가하여 단일교각 최대 세굴심에 접근하고 있음을 알 수 있다.  $h_s/h_{s1}$ 의 최소치는 유속비가 작을수록 작게 나타나 유속비가 0.89, 0.74, 0.57일 때  $h_s/h_{s1}$ 이 각각 약 0.76, 0.52, 0.40을 나타내고 있다. 즉 유속비가 증가할수록 단일교각 최대 세굴심에 빨리 접근하고 있음을 알 수 있다.

#### 3.2.2 폭방향간격의 영향(교각간격1D~6D)

이중교각을 폭방향으로 나란히 놓았을 경우 두 교각의 세굴심은 거의 같게 나타났다(오차범위 $\pm 2\text{mm}$ ). 그림 7의 각 점들은 두 개의 교각에서 발생한 최대세굴심을 평균하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 유속비가 0.57과 0.74의 비교적 작은 유속비에 대해서는 교각간격이 지름의 6배가 될 때까지는  $h_s/h_{s1}$ 이 특별한 변화를 나타내지 않고 있다. 유속비가 0.57인 경우는  $h_s/h_{s1}$ 이 1.2~1.3 범위에서 유속비가 0.74인 경우는  $h_s/h_{s1}$ 이 1.25~1.35 범위에서 거의 일정한 값을 보이고 있다. 반면에 유속비가 비교적 큰 0.89인 경우는  $h_s/h_{s1}$  교각간격이 1.0D에서는 약 1.32의 값을 보이거나 이 간격이 커짐에 따라 급격히 줄어 교각간격이 지름의 3배 정도 되면 거의 1에 접근함을 알 수 있다. 즉, 유속비가 0.89인 경우에는 교각간격이 지름의 3배가 되면 최대세굴심이 단일교각일 경우와 거의 같게 된다.

### 3.3 군말뚝 실험

#### 3.3.1 최대세굴심의 위치 및 세굴형상

case 1의 경우, 최대세굴심의 위치는 상류측 1행 양단에 배치한 교각에서 발생하였으며 세굴형상은 실험수행 초기부터 단일교각에서 볼 수 있는 서로 독립적인 원형의 형태를 나타내었다. 이러한 현상은 교각에 접근하는 유속이나 흐름형상이 말뚝의 흐름방향간격과 폭방향 간격에 대해 거의 독립적으로 작용하는 것으로 판단된다. 이 경우의 세굴양상은 유속비가 0.57, 0.74, 0.89인 경우 모두에서 비슷한 형태로 발생하였다.

case 2의 경우, 최대세굴심의 위치는 상류 1행 중앙에 배치한 교각에서 발생하였다. 유속비가 0.57일 때는 초기에 각각의 말뚝 주위에서 독립적으로 형성된 세굴공이 시간이 경과함에 따라 합쳐졌다. 유속비가 0.74,

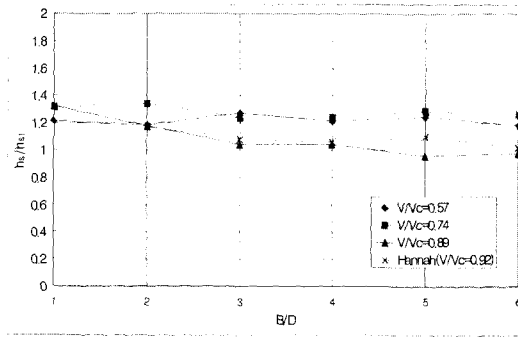


그림 7. 폭방향간격에 따른 세굴심 변화

0.89일 때는 0.57의 경우에서보다는 좀 더 빠르게 원형의 세굴공이 합쳐졌다. 또한 균말뚝 전체적으로 보면 모든 유속비에 대해 세굴공이 합쳐지기는 하였으나 세굴공이 완전히 합쳐졌을 때 생기는 직사각형 형태의 세굴공이 형성되지는 않았다.

case 3의 경우, 최대세굴심의 위치는 case 2와 마찬가지로 1행 중앙에 배치된 말뚝에서 발생하였고 세굴형상이 초기에는 단일교각에서 볼 수 있는 원형의 세굴공이 발생하였지만 시간이 경과함에 따라 세굴공의 크기가 증가하여 각각의 말뚝에서 발생한 세굴공이 합쳐졌다. 그리고 폭방향으로 설치한 5개의 말뚝 주위 세굴공은 서로 완전히 합쳐져서 직사각형 교각에서 발생하는 것과 같은 형상의 세굴공이 발생하였다. 균말뚝 전체적으로 보면 세굴형상은 case 2보다는 좀 더 완전한 직사각형 형태를 이루었다. 또한 1행, 2행, 3행 각각의 하류 부에서는 상하류 교각 사이의 간격이 없어 퇴적되는 부분이 존재하였다. 이러한 현상은 3개의 유속비 모두에서 발생하였다. 단지 유속비가 증가할수록 그 현상이 빨리 진행되었다.

case 4의 경우, 최대세굴심의 위치는 다른 것과는 달리 상류쪽 3행 중앙에 배치된 말뚝에서 발생하였으며 세굴형상은 균말뚝 내부에 있는 말뚝 주위에서 아주 작은 원형형태를 볼 수 있었으나 균말뚝 외가에서는 흐름방향간격이 좁아지면서 각각의 말뚝에서 발생하는 원형 형태의 세굴공이 합쳐져지는 것을 볼 수 있었다. 또한 상하류 말뚝의 간격이 좁아짐에 따라 case 3에서와는 달리 균말뚝 내부에서 퇴적되는 부분이 없이 모든 영역에서 침식이 발생하였다. 이러한 현상은 실험수행 초기부터 발생하였으며 유속비가 0.57, 0.74, 0.89 모두에서 같은 현상을 볼 수 있었다.

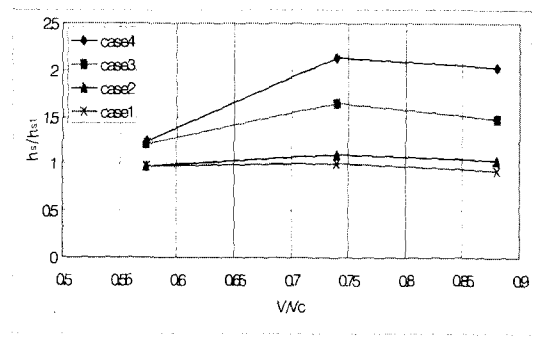


그림 8. 유속비에 따른 최대세굴심비의 변화

### 3.3.2 유속비에 따른 최대세굴심의 변화

그림 8은 각 case별로 유속비에 따른 최대세굴심비의 변화를 나타낸 것이다. case 1, 2의 경우, 유속비를 변화시켰을 때 최대세굴심의 변화 폭이 그다지 크게 나타나지 않았으며 이것은 인접교각사이가 넓어 말뚝간의 간섭이 적어서 각각의 말뚝에 대한 유속과 흐름형상이 거의 독립적으로 작용하기 때문이라 판단된다.

case 3, 4에서는 유속비가 0.57에서 0.74로 증가함에 따라 세굴심이 단일교각의 경우에 비해 급격히 증가하나 유속비가 0.74에서 0.89로 증가할 때는 최대세굴심이 증가하기는 하나 유속비 증가에 따른 단일교각의 세굴심 증가에는 못 미치는 것으로 나타났다. 초기에 세굴심비가 급격히 증가하는 것은 말뚝주변의 세굴심이 인근 말뚝주변의 세굴과 중첩되기 때문이며 이후 유속이 증가하여도 세굴심이 오히려 약간 감소하는 것은 인접교각과의 간섭 때문에 낮은 유속에서 미리 세굴이 진행되었기 때문이라 판단된다.

### 3.3.3 흐름접근각에 따른 세굴특성

본 연구에서는 접근각의 변화에 따른 세굴양상을 검토하기 위해 35개의 말뚝으로 구성된 균말뚝 교각을 선택하여 흐름방향과 균말뚝이 이루는 접근각이 0°, 10°, 20°, 30°, 35°, 45°인 총 6가지 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 접근각에 따른 최대세굴심의 변화는 그림 9와 같다.

실험결과 접근각이 점차적으로 0°에서 45°로 변할 경우 세굴심의 최대치가 발생하는 지역은 균말뚝에서 행방향(폭방향)의 중앙부에서 균말뚝의 대각선 방향 가장자리로 점차적으로 이동하는 양상을 띠는 것으로 나타났으며, 최대세굴심의 변화는 그림 9에서 보는 바와 같이 접근각 35°까지는 점차 증가하여 35°를 정점으로

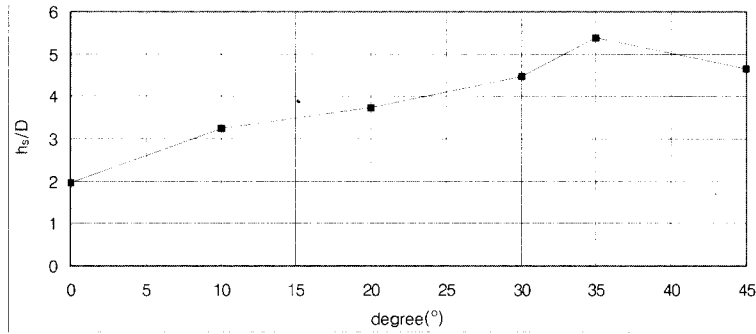


그림 9. 접근각에 따른 최대세굴심 변화

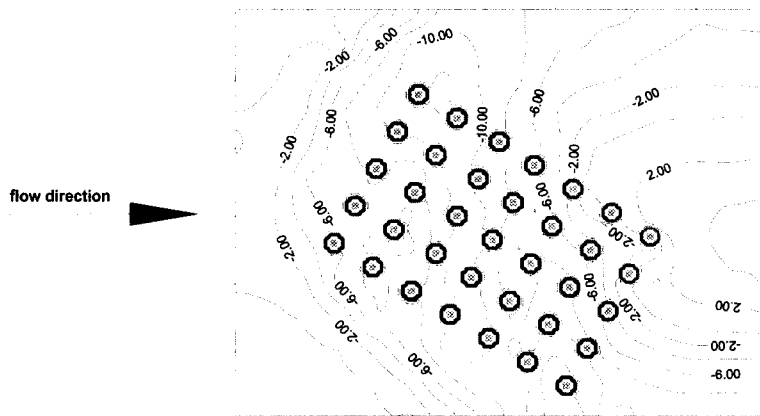


그림 10. 세굴 등고선도(흐름 입사각 35°)

45°에서는 다시 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 그림 10은 최대세굴심이 발생한 접근각 35°일 경우의 세굴위치와 형상을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 세굴심의 최대치가 발생하는 지역은 3행에 있는 말뚝주변임을 알 수 있으며 하류측에 설치된 말뚝 부근에서는 상대적으로 세굴이 적게 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러한 현상은 상류측의 말뚝 부근에서 세굴된 모형사들이 이송되어 하류측에 쌓이기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 단일교각, 이중교각 및 군말뚝(말뚝수 4, 9, 15, 35개)에서의 세굴특성을 파악하였으며 말뚝수가 35(5×7)로 이루어진 군말뚝 교각에 대해 흐름접근각에 따른 세굴특성을 파악하였다. 실험을 통한 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

##### (1) 단일교각 실험

단일교각에서의 정적세굴의 유속비에 따른 최대세굴심의 변화는,  $V/V_c > 0.5$ 에서 세굴이 시작되었으며  $V/V_c \approx 0.9$ 가 될 때까지 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과를 기존의 연구와 비교해 볼 때 유속비  $V/V_c > 1$ 의 범위에서의 최대세굴심의 변화는 유속비가 증가할수록 선형적으로 증가한다는 점과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

##### (2) 이중교각 실험

이중교각실험의 경우 흐름방향간격에 따른 세굴심의 변화는 상류측 교각의 경우, 교각 간격이 교각지름의 약 1~3배 사이에서 최대세굴심이 발생하여 그 크기는 단일교각에 비해 약 1.2배 증가하는 것을 알 수 있었다. 하류측 교각의 경우는 상류측교각과는 달리 단일교각에 비해 세굴심이  $S/D=4$ 에서 0.4배까지 감소하는 것으로 나타났으며,  $S/D$ 가 증가함에 따라 단일교각 최대세굴



심에 접근하는 것으로 나타났다. 폭방향간격에 따른 세굴심의 변화는 유속비  $V/V_c=0.57\sim 0.74$ 에서는 세굴심에 대한 특별한 변화를 나타내지 않으나 유속비  $V/V_c=0.89$ 인 경우 B/D가 증가함에 따라 단일교각 세굴심에 근접( $hs/hs1=1$ )하는 것으로 나타났다.

### (3) 군말뚝 교각 실험

군말뚝의 경우 말뚝간격이 조밀해질수록 원형의 세굴공이 중첩되어 전체적으로 직사각형의 세굴공을 이루는 것을 알 수 있으며, 최대세굴심은 교각수가 4, 9개로 구성된 경우 유속비와 상관없이 단일교각 최대세굴심과 흡사하였고, 15, 35개로 구성된 경우는 유속비가 증가함에 따라 세굴심도 급격히 증가하여 유속비가 0.89일 때 단일교각 세굴심의 약 2.2배까지 증가하는 것으로 나타났다. 또한 흐름접근각이 증가함에 따라 최대세굴심도 증가하여 접근각이 35°일 때의 최대세굴심이 단일교각의 2.7배로 가장 큰 것으로 나타났으며 45°에서는 다소 감소하는 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

박성식, 송재우 (1997). "만곡수로에서의 연속교각 세굴특성에 관한 연구." 1998년 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 431-436.  
 최계운, 김기형, 서병하 (1996). "하천내 연속교량 설치에 따른 세굴심도의 변화." 1996년 학술발표회 논문집, 대한토목학회, II권, pp. 107-110.  
 Chiew, Y. M. and Melville, B. W. (1987). "Local scour around bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118,

pp. 1260-1269.  
 FHWA (1995). *Evaluating scour at bridges*. Publication No. FHWA-IP-001, U.S. Dept of Transportation.  
 Hannah, C. R. (1978). *Scour at pile groups*. Report No. 78-3, Dept. of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, pp. 92.  
 Jones, J.S. (1989). "Laboratory study of the effect of footing and pile groups on bridge pier scour." *Interagency Sedimentation Committee Bridge Scour Symposium*, Dept of Transportation, Washington D.C.  
 Raudkivi, A.J. (1986). "Functional trends of scour at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No.1, pp. 1-13.  
 Salim, M. and Jones, J. S. (1996). "Scour around exposed pile foundations." *North American Water and Environment Congress*, ASCE, Anaheim, U.S.  
 Summer, B. M., Fredsoe, J. and Christiansen, N. (1992). "Scour around vertical piles in waves." *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 118(1), pp.15-31.  
 (논문번호:01-059/접수:2001.08.03/심사완료:2001.10.19)