

# 이동상에서의 돌망태파괴 형태와 원형교각주위의 돌망태 크기결정

윤태훈\* 김정진\*\*

## 1. 서론

실제하천에 설치된 돌망태 세굴보호공의 거동에 부합되는 실험자료를 얻기 위하여 이동상에서 실험을 수행하였다. 이동상에서 돌망태의 파손양상은 전체파손과 매몰파손 두가지 형태를 갖는다. 전체파손(total disintegration)은 교각주위에서 생기는 흐름에 의해 돌망태의 대부분이 씻겨나가는 것이고, 매몰파손(embedment failure)은 사구의 곡부가 교각을 통과할 때 아래로 가라앉아 돌망태가 묻히는 현상이다. 이동상에서 돌망태파손의 대부분은 매몰파손이다.

## 2. 돌망태 보호공 실험

실험에 사용되는 수로는 폭 90cm, 길이 20m, 깊이 70cm이고 수로에는평균입경 0.45mm의 하천모래를 수로중간에 두께 25cm, 길이 8m가 되도록 부설하였다. 돌망태는 한 개의 층으로 교각표면에서부터 교각지름의 두배( $c/b=5$ )가 되도록 정사각형으로 부설한다. 부설된 돌망태의 최상단면이 하상과 일치( $Y=0$ )하도록 부설하였다.

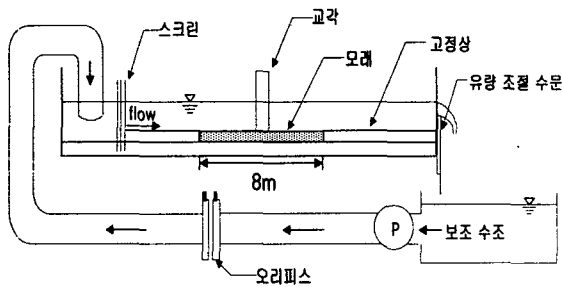


그림 1. 모형수로 개략도

이동상에서는 유사이송에 의해 돌망태의 이탈을 관찰할 수 없으므로 정지상과는 다른 파괴기준을 정해야 한다. 본 연구에서는 돌망태의 한계유속  $U_c$ 은 돌망태 설치시 하상저하량이 돌망태 미설치시 최대세굴심의 20%가 되었을 때 그때의 유속으로 정의한다 Melville(2000).

## 3. 차원해석

교각주위에 부설된 돌망태의 시동에 관련이 되는 변수들은 흐름조건(수심  $y$ , 유속  $U$ ), 교각특성(직경  $b$ ), 돌망태(환산직경  $d_v$ , 길이  $L$ , 두께 또는 직경  $t$ , 부설깊이  $Y$ , 부설범위  $c$ ), 하상조건(하

\* 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 한양대학교 토목공학과 석사과정

상입자의 한계유속  $U_{cs}$ , 중앙입경  $d_{50}$ , 하상경사  $S$ , 물의밀도  $\rho$ 와 점성계수  $\mu$  및 중력가속도  $g$ 이다.

$$f(y, U, U_{cs}, b, d_v, L, t, Y, c, d_{50}, S, \rho, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

차원해석을 통한 무차원수로 정리하면

$$F\left(\frac{d_v}{b}, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \frac{L}{t}, \frac{Y}{b}, \frac{c}{b}, \frac{y}{b}, \frac{b}{d_{50}}, \frac{\rho y U}{\mu}\right) = 0 \quad (2)$$

식 (2)에서 레이놀즈수  $\frac{\rho y U}{\mu}$ 의 영향은 완전한 난류흐름영역에서는 무시한다. 바닥물질의 영향은 교각크기와 바닥물질의 중앙입경비  $b/d_{50}$ 이 거의 모든 경우 25를 초과하므로 무차원수  $b/d_{50}$ 도 제외된다(Breusers & Raudkivi, 1991). 본 실험에서는  $\frac{c}{b} = 5$ 로 하고  $Y=0$ 으로 한다. 무차원수의 곱도 무차원임을 고려하여  $\frac{d_v}{b}$ 와  $\frac{L}{t}$ 의 곱을 하나의 무차원수로 나타내면 다음과 같게된다.

$$F\left(\frac{L d_v}{t b}, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \frac{y}{b}\right) = 0 \quad (3)$$

#### 4. 돌망태 파괴형태

교각직경, 수심, 하상입자의 중앙입경, 돌망태길이/두께 비는 일정하게 유지하고 돌망태 환산직경만을 변화시키며 파손 양상을 관찰하였다.

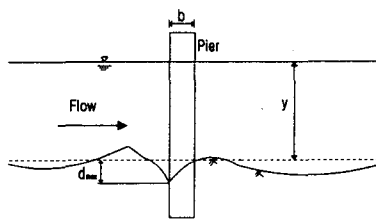


그림 2. 원형교각 주위 세굴

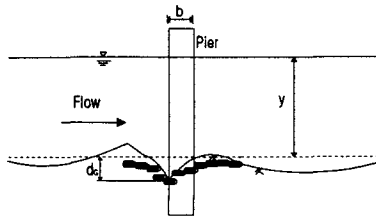


그림 3. 원형교각 주위 돌망태 문합

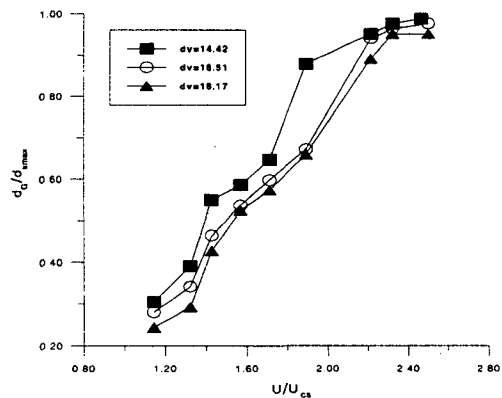


그림 4.  $d_c/d_{smax}$  와  $U/U_{cs}$ 의 관계

실험결과 유속이 증가함에 따라 교각주위에 설치된 돌망태 보호공 주위 하상저하량도 증가함을 알 수 있다. 유속이 계속 증가하면 하상저하량(  $d_G$  )은 보호공 미설치시의 최대세굴심(  $d_{s\ max}$  )에 접근함을 알 수 있다.  $d_{s\ max}$  은 보호공이 없을때 예측되는 최대세굴심으로 chiew(1995)가 제안한 식 (4)를 이용하여 구한다.

$$d_{s\ max} = 2bK(b / d_{50})K(y/b) + 0.06 \pi y \quad (4)$$

## 5. 돌망태 안정에 대한 변수들의 영향

교각 세굴 보호공으로 교각주변에 부설되는 돌망태의 시동에 많은 변수가 영향을 미친다. 그러나 이동상에서 이들 변수들의 상호작용에 관해서는 거의 밝혀진바가 없을뿐더러 이에 관한 문헌이 없는 것으로 파악된다. 따라서 본 과업에서는 이들 변수들의 영향을 평가하기 위한 실험이 수행되었다.

### 교각크기의 영향

일정한 수심과 돌망태의 길이/두께 비(L/t)에 대하여 교각직경을 증가시키면 한계유속이 감소한다. 이는 교각직경이 증가하면 세굴에 대한 돌망태 안정성이 감소됨을 의미한다.

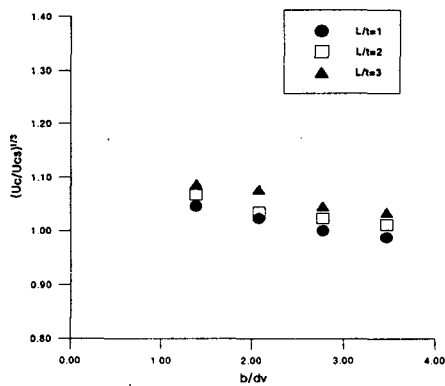


그림 5. 교각폭에 따른 한계유속의 변화

표 1 .교각폭에 따른 한계유속의 변화

b(mm)	$U_c$ (m/s)	L/t	d <sub>s</sub> (mm)	y(mm)
20	0.32	1	14.42	80
30	0.3	1	14.42	80
40	0.28	1	14.42	80
50	0.27	1	14.42	80
20	0.34	2	14.42	80
30	0.31	2	14.42	80
40	0.3	2	14.42	80
50	0.29	2	14.42	80
20	0.36	3	14.42	80
30	0.35	3	14.42	80
40	0.32	3	14.42	80
50	0.31	3	14.42	80

### 돌망태의 길이/두께(L/t)의 영향

그림 .6 은 길이/두께의 비(L/t)에 대한 돌망태의 시동상태의 한계유속을 도시한 것이다. 동일한 돌망태의 환산직경에 대하여 L/t가 증가하면 한계유속이 증가한다. 돌망태의 중량을 일정하게 유지하면서 L/t의 증가 즉 돌망태의 두께 또는 직경을 줄이고 길이를 증가하면 한계유속이 증가한다. L/t의 증가는 흐름에 대한 저항이 증가되어 돌망태의 안정성이 증가됨을 의미한다. 그러나 길이/두께 비가 3을 초과하면 한계유속의 증가는 크게 둔화되어 길이/두께의 비의 최소치는 3이 됨을 알 수 있다..

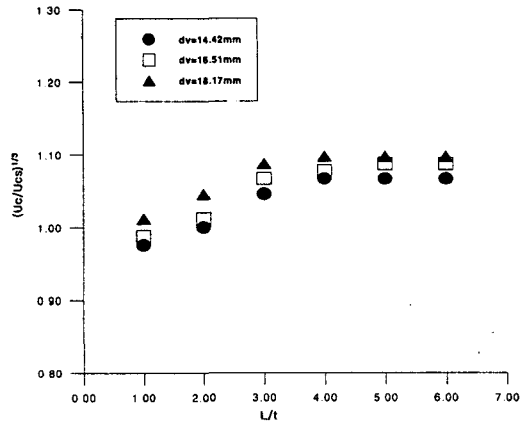


그림 6. 돌망태길이/두께 비에 따른 한계유속의 변화

표 2. 돌망태길이/두께 비에 따른 한계유속의 변화

$d_v$ (mm)	$t$ (mm)	$L$ (mm)	$L/t$	$y$ (mm)	$b$ (mm)	$U_c$ (m/s)
14.42	12.6	12.6	1	100	20	0.22
	10	20	2	100	20	0.28
	8.73	26.19	3	100	20	0.32
	7.94	31.76	4	100	20	0.34
	7.37	36.85	5	100	20	0.34
	6.93	41.58	6	100	20	0.34
16.51	14.42	14.42	1	100	20	0.23
	11.45	22.9	2	100	20	0.29
	10	30	3	100	20	0.34
	9.09	36.36	4	100	20	0.35
	8.43	42.15	5	100	20	0.36
	8.43	42.15	6	100	20	0.36
18.17	15.87	15.87	1	100	20	0.27
	12.6	25.2	2	100	20	0.32
	11	33	3	100	20	0.36
	10	40	4	100	20	0.37
	9.28	46.4	5	100	20	0.37
	8.73	52.38	6	100	20	0.37

### 수심의 영향

많은 문헌은 세굴심이 교각크기에 대한 상대깊이에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 이동상의 경우 교각의 3배보다 작은 수심의 흐름영역에서는 수심감소에 따라 한계유속의 증가로 돌망태의 안정성은 감소하고 교각크기의 3배보다 큰 수심에서는 돌망태의 안정성은 수심의 영향을 받지 않는다. 그러나 정지상의 경우 교각의 3배보다 작은 수심의 흐름 영역에서는 수심감소에 따라 한계유속의 감소로 돌망태의 안정성은 증가하고 교각크기의 3배 이상인 수심에서는 수심증가에 따라 한계유속이 감소경향을 갖는다

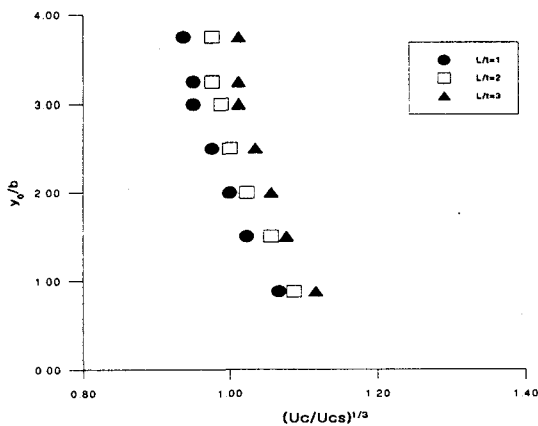


그림 7. 접근수심에 따른 한계유속의 변화

표 3. 접근수심에 따른 한계유속의 변화

$y$ (mm)	$b$ (mm)	$L$ (mm)	$t$ (mm)	$d_v$ (mm)	$U_c$ (m/s)
35	40	10	10	16.51	0.34
60	40	10	10	16.51	0.30
80	40	10	10	16.51	0.28
100	40	10	10	16.51	0.26
120	40	10	10	16.51	0.24
130	40	10	10	16.51	0.24
150	40	10	10	16.51	0.23
35	40	20	10	16.51	0.36
60	40	20	10	16.51	0.33
80	40	20	10	16.51	0.3
100	40	20	10	16.51	0.28
120	40	20	10	16.51	0.27
130	40	20	10	16.51	0.26
150	40	20	10	16.51	0.26
35	40	30	10	16.51	0.39
60	40	30	10	16.51	0.35
80	40	30	10	16.51	0.33
100	40	30	10	16.51	0.31
120	40	30	10	16.51	0.29
130	40	30	10	16.51	0.29
150	40	30	10	16.51	0.29

## 6. 돌망태 크기 산정식

설계식을 도출하기 위하여 매개변수들을 무차원수의 다양한 조합에 대한 회귀분석을 수행하여 높은상관계수의 회귀식을 돌망태 크기 설계식으로 선정하였다.

무차원 매개변수의 다양한 조합중에서 선정된 조합은 그림 8에서와 같이  $y/b < 3$  일때는  $Fr = \frac{U}{\sqrt{gy}}$ 이고  $Fr$  대하여  $Ld_v/b$ 가 도시되었고  $y/b \geq 3$  일때  $Fr_b = \frac{U}{\sqrt{gb}}$ 이고  $Fr_b$  대하여  $Ld_v/b$ 가 도시되었다. 이로부터 돌망태 환산직경  $d_v$ 는 다음과 같다.

$$y/b < 3 \text{ 일때} \quad d_v = (23.202 Fr^{1.6218}) \frac{tb}{L} \quad (5)$$

$$y/b \geq 3 \text{ 일} \quad d_v = (4.0118 Fr_b - 0.69) \frac{tb}{L} \quad (6)$$

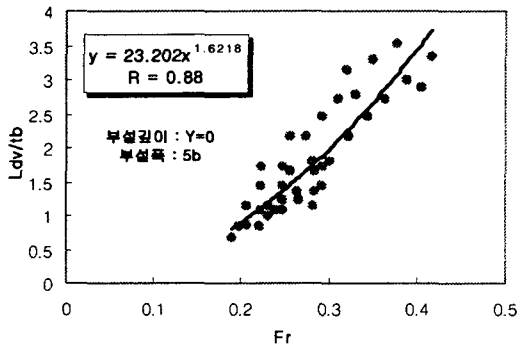


그림 8.  $y/b < 3$  일때  $Fr$ 에 따른  $Ld_v/tb$ 의 관계곡선

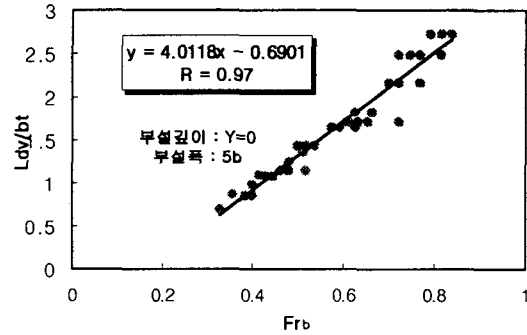


그림 9.  $y/b \geq 3$  일때  $Fr$ 에 따른  $Ld_v/tb$ 의 관계곡선

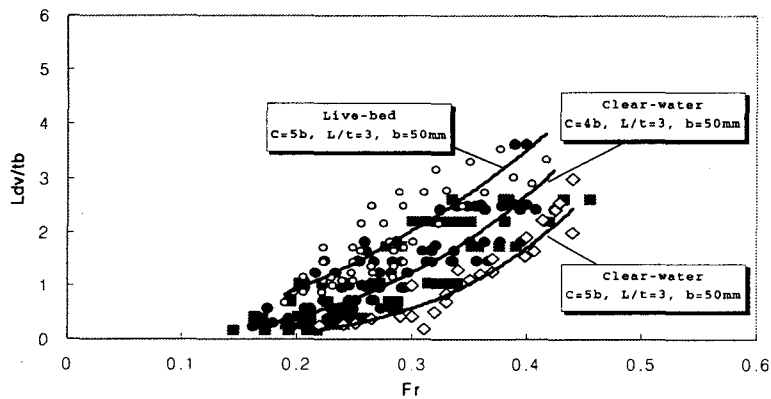


그림 10.  $Fr$ 에 따른  $Ld_v/tb$ 의 관계곡선

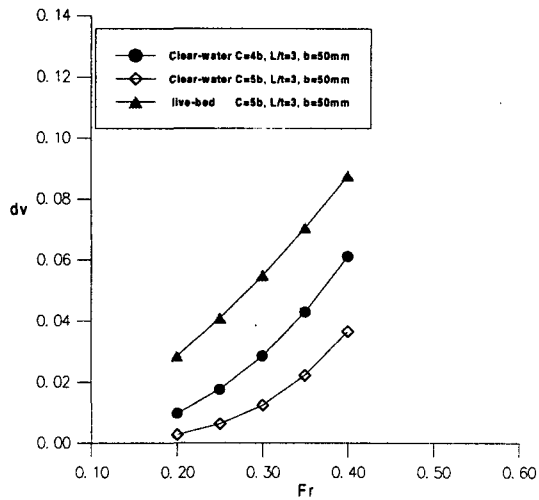


그림 11. 하상조건에 따른 dv값 차이

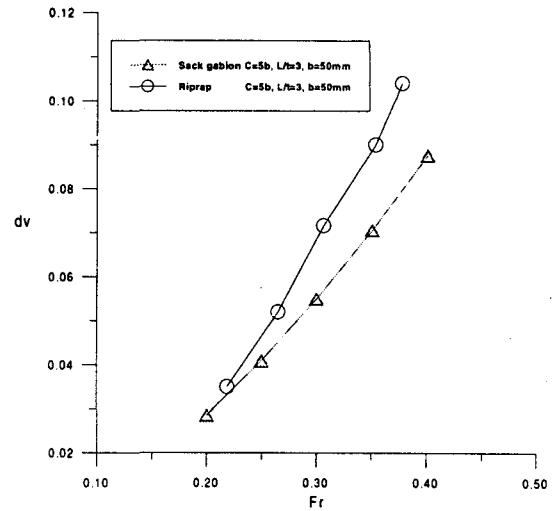


그림 12. 돌망태와 사석의 안정성 비교

## 7. 결론

본 연구에서 이동상에서의 돌망태 파손형태는 매물이 일어남을 실험을 통해서 알 수 있었고, 그림 .4 에서 볼 수 있듯이  $U / U_{cs}$  비가 증가할수록 이에 대응하는  $d_G / d_{s\max}$ 비도 증가함을 알 수 있다. 하지만  $U / U_{cs}$ 의 비가 어느 이상 증가하면 비록  $U / U_{cs}$ 값은 증가하더라도  $d_G / d_{s\max}$ 의 값은 일정함을 알 수 있다. 그 한계증가 비는  $2.3 < U / U_{cs} < 2.5$  일때임을 알 수 있다. 즉,  $U / U_{cs}$ 의 비가 2.3 - 2.5 이상이면 돌망태는 보호공으로서의 기능을 전혀 하지 못하는 것이다. 바꾸어 말하면 그 이하의 유속에서는 돌망태가 국부적으로 이탈하거나 하상입자에 의해 묻히더라도 보호공으로서의 기능은 어느 정도 하고 있는 것이다.

또, 보호공의 크기와 안정에 중요한 변수인 수심, 유속, 교각직경의 영향에 관하여 조사하였다. 변수들 중 수심은 교각직경의 3배보다 작은 흐름영역에서는 수심감소에 따라 한유속의 증가로 돌망태의 안정성은 감소하고 교각크기의 3배이상에서는 수심증가에 따라 한계유속이 일정한 경향을 보였다. 돌망태의 길이/두께비는  $L/t=3$ 이 적정한 것으로 나타났다. 하상조건이 다른 정지상과의 안정성 비교에서는 이동상이 덜 안정한 것을 알수있었고, 이동상에서 사석과의 안정성 비교에서는 돌망태가 더 안정한 것을 알수있었다.

## 참고문헌

1. Yee-Meng Chiew (1995) Mechanics of riprap failure at bridge pier, *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 121, No. 9, pp. 635-643.
2. Bruce W. Melville and Stephen E. Coleman (2000) *Bridge scour*, Water Resources Publication, pp. 217-242.
3. Yee-Meng Chiew and Foo-Hoat Lim (2000) Failure behavior of riprap layer at bridge pier under live-bed conditions, *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 126, No. 1, pp.43-55.
4. Christine S. Lauchlan and Bruce W. Melville (2001) Riprap protection at bridge pier, *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 127, No. 5, pp. 412-418.
5. Yee-Meng Chiew (2001) Parametric study of riprap failure around bridge pier, *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 39, No. 1, pp.61-72.