

제방형 웨어의 마루길이 및 유량변화에 따른 수리특성의 실험적 해석

권선도* 신재욱* 김희수* 송부호 이종석**

1. 서 론

웨어는 인간에 의해 발전되어온 많은 수공 구조물 중 가장 오래된 구조물 중의 하나로서 하천 수로를 가로지르는 장애물을 이용하여 수위의 상승과 유로의 방향전환 및 유량의 측정에 사용되어 왔다. 제방형 웨어는 1898년 Bazin이 최초로 대칭인 상하부 측면의 기울기 변화에 따른 실험장치를 사용하여 연구한 이래로 Horton, Govinda Rao, Muralidhar 등 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다. 그러나 국내에서는 광정웨어나 제방형 웨어에 대한 실험연구가 활발하지 못해 관련 학회지 등에 발표된 논문이 많지 않은 실정이다.

본 연구에서는 제방형 웨어 모형의 상하부 측면 연직:수평의 기울기를 1:2, 웨어 마루길이 L_w 를 100, 200 및 400mm, 폭과 높이가 각각 40cm, 길이가 1,200cm인 사각형 단면의 가변식 개수로 실험장치를 이용한다. 이 실험장치에 설치된 하류단 수문의 개폐정도를 조절하여 그림 1과 2에서와 같이 자유 및 수중월류(free and submerged overflow)에서의 도수(a-jump), 침강 및 표면분사(plunging and surface jet)가 발생되도록 한다. 또한 이들 흐름에서 그림 5와 같이 웨어 마루의 길이와 유량을 변화시키고, 그림 5(a)에 정의된 각 구간들 중 웨어마루(③~④), 도약구간(⑤~⑥), 하부수로(⑥~⑦)에서의 수면분포, 유속분포 등을 실측함으로써 흐름특성을 실험적으로 해석하며, 흐름형식을 구분할 수 있는 관계식을 유도하고자 한다.

2. 본 론

제방형 웨어에서 자유월류는 그림 1에서와 같이 웨어를 월류한 수맥의 상부면 즉, 수면이 웨어 마루 높이 보다 낮은 상태의 흐름을 말하며, 그림 1에서 L_L 는 웨어하단으로부터의 도약구간 길이이고, x' 는 웨어하단을 원점으로하는 흐름방향 좌표이다. 수중월류는 그림 2과 같이 웨어를 월류한 수면이 웨어마루 높이보다 높은 상태의 흐름 즉, 잠수비 $y_i(=h_i/h_m)$ 의 크기에 따라 침강분사와 표면분사로 구분되며, 이 때의 하류부 수로의 총 유량은 수두 뿐만아니라 하류단 수위에 따라 변한다. 그림 2에서 L_R 와 $L_{R'}$ 는 하상에서 순환하는 수류의 마루하단 및 웨어하단으로부터의 바닥

*정회원 · 한밭대학교 대학원 토목공학과 석사과정

**정회원 · 한밭대학교 토목공학과 조교수

재순환 길이이고, x 는 마루하단을 원점으로하는 흐름방향 좌표이며, z_r 및 z_R 은 도약구간내 회전 및 순환수류의 하상으로부터의 높이이다.

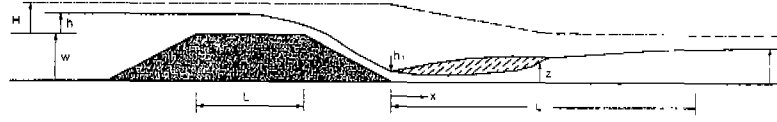


그림 1. 자유유향류의 각부 명칭

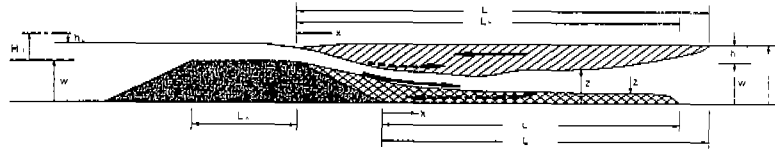


그림 2. 수중유향류의 각부 명칭

그림 1과 2의 제방형 웨어를 유향하는 1차원 흐름특성을 표현하기 위한 변수로는 제방의 단위폭 당 유량 q , 상류단 구간에서의 평균유속 V , 마루중심점의 표고를 기준으로하여 측정된 상류단 구간내의 수심 h_o 와 하류단 구간내의 수심 h_i 및 평균 총에너지 수두 H_o 가 포함될 것이다. 그 외에 추가될 변수로는 경계표면의 절대조건 x , 유체의 밀도 및 단위중량 ρ 와 γ , 유체의 점성계수 μ 등이 있다. 정의된 독립변수를 $f(w, L_w, q, h_o, h_i, x, \gamma, \mu) = 0$ 으로 표시하여 무차원화시킨 후, Reynolds 수 R_e 와 유량계수 C 를 도입하면 다음과 같이 표시할 수 있다(Kindsvater, 1964).

$$C = f(h_o/w, h_o/L_w, x/h_o, h_i/h_o, R_e) \quad (1)$$

여기서 w 는 웨어마루의 높이이다.

제방형 웨어를 설치한 실험수로에서 이론유량은 흐름이 한계수심 상태라면, 한계수심은 이론적으로 총수두의 2/3와 같으므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q_i = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g H_o^3} \quad (2)$$

식 (2)를 실제유체로 보정해 주고, 실험적으로 결정되는 계수를 중력 가속도와와의 조합에 의한 유량계수 C 로 대치시키면 다음과 같이 간단하게 쓸 수 있다.

$$q = CH_o^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

실험자료의 해석과 요약할 때에는 식 (1)과 (3)으로 정의한 C 를 유량계수 C_d 로 하는 간략화식이 자유 및 수중유향류에 적용될 수 있을 것이므로 제방형 웨어에서의 유량은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$Q = C_d b (2gH_o^3)^{1/2} \quad (4)$$

유량계수는 유향수심 h_o 를 포함하고 있는 편리한 계산식 (4)로 $H_o/w < 1/6$ 까지는 접근유속의 영향을 고려하여 구할 수 있으나, 이 보다 비교적 큰 유향수심에서 접근유속의 영향을 포함시키기 위한 총에너지 수두는 에너지 보정계수 $\alpha=5/3$ 을 갖는 평균 총에너지 수두로 계산해야 될 것이다(Kindsvater, 1964). 또한 유량계수는 불균등한 접근유속분포의 영향을 포함시키는 것 뿐만아니라 H_o/w 의 영향도 포함되어야 하는데, Kindsvater(1964)에 의하면 유량계수는 상대마루 길이 $\xi = H_o/(H_o + L_w)$ 의 함수로서 $0 < \xi < 1$ 의 범위에서 다음과 같이 구한다.

$$C_d = 0.43 + 0.06 \sin[\pi(\xi - 0.55)] \quad (5)$$

본 실험·연구에는 그림 3과 같은 다목적 수리실험장치의 실험용 수로를 사용하였다. 수로는 40cm×40cm의 사각형 단면으로 외부에서 흐름 현상을 눈으로 볼 수 있게 양측면을 유리로 제작하였고, 길이가 1,200cm이며, 20m의 지하 저수조에서 40마력의 펌프를 이용해 10m의 옥상에 위치한 고수조로 양수하여 순환시킴으로써 일정한 수두가 유지되도록 설계되었다. 유량은 지름 150mm관으로부터 게이트 밸브를 이용해 최소 1.84 l/s에서 최대 32.94 l/s까지 조절하여 실험할 수 있도록 계획되어 있으며, 제방형 웨어의 흐름이 하류단 구간의 잠수상태에 따른 수심의 크기에 의해 자유 및 수중월류가 발생되도록 하류단 수문을 조절하면서 실험하였다.

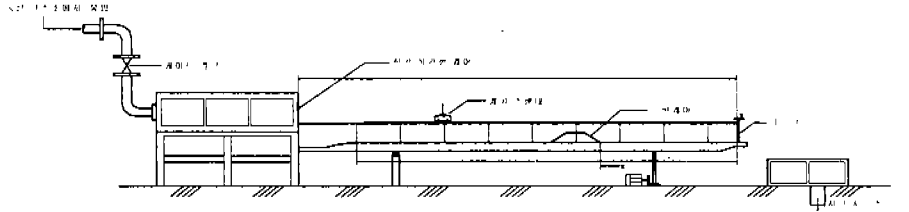


그림 3. 연구에 사용된 수리실험 장치

연구에 사용된 대표치 실험자료는 표 1에서와 같이 최소 11.59 l/s에서 최대 21.89 l/s의 유량범위를 갖는다. 표 1에서 평균 총수두는 $H_o/w < 1/6$ 범위에서 $H_o = [h_o + \{Q^2/2gb^2(h_o+w)^2\}]$ 이나 그 보다 큰 경우에는 에너지 보정계수를 고려하여야 하므로 $H_o = [h_o + \{\alpha Q^2/2gb^2(h_o+w)^2\}]$ 로 계산하였다. 또한 유량계수 C_d 는 본 연구에 사용된 총 에너지 수두가 $H_o/w > 1/6$ 이므로 식 (5)를 이용하여 구한 결과 평균유량계수는 0.427로 나타났다.

3. 비교고찰

제방형 웨어의 마루길이와 유량변화에 따른 자유 및 수중월류에서 수로내 각 측정구간의 수리 특성 실험결과를 분석하였다. 제방형 웨어에서 자유 및 수중월류의 흐름형식을 구별할 수 있는 관계식을 표 1에서와 같이 21개의 자료 중 상대마루길 ξ 가 같은 2개의 자료를 제외한 $L_w = 100\text{mm}$ 에서 3개, 200mm 에서 3개 및 400mm 에서 15개를 합한 19개의 자료를 사용하여 통계처리함으로써 유도할 수 있었는데, 그 결과는 다음 식과 같다.

$$y_{UL} = 0.894 - 0.772\xi \quad (6)$$

여기서 y_{UL} 은 흐름형식 한계비(h_{UL}/h_o)이고, 첨자 L 은 자유월류와 수중월류의 흐름형식 한계를 구분하는 의미로 사용되었으며, 식 (6)에 의한 예측치와 본 실험을 통한 실측치간의 비교 결과는 그림 4와 같이 나타났다. 그림 4에서 $\xi \rightarrow 0$ 의 경우 즉, 매우 긴 광정웨어는 y_{UL} 의 상한값인 0.894에 이르고, 마루길이가 감소함에 따라 흐름형식은 거의 식 (6)과 같이 선형적으로 변화함을 보였다. 이 결과에 의하면 흐름형식은 관계 직선의 윗 부분에서는 수중월류가, 아랫부분에서는 자유월류가 발생하는 것으로 나타났다.

또한, 마루길이가 $L_w = 100, 200, 400\text{mm}$ 모형에서 유량의 크기와 하류단 수문의 개폐정도에 따른 자유 및 수중월류에서의 수면분포 특성은 그림 5와 같이 나타났는데, 그림 5(a)에 정의한 웨어마루 ③~④구간, 도약구간⑤~⑥, 하부수로⑥~⑦에서의 유속분포 특성은 그림 6~8과 같이 나타났다.

표 1. 흐름형식의 관계식 유도에 사용된 실험자료

회수	내용	Q (l/s)	h ₀ (mm)	H ₀ (mm)	h(mm)	γ_1	ξ	L _w (mm)	비고
1		11.59	39.7	60.4	51.5	0.862	0.130	400	Plunging Jet
2		11.82	62.5	63.2	54.2	0.867	0.135	"	"
3		12.39	63.0	63.5	54.0	0.857	0.136	"	"
4		12.51	65.5	66.3	57.4	0.876	0.141	"	"
5		12.61	63.2	64.0	55.8	0.882	0.137	"	"
6		12.98	72.0	72.8	57.5	0.798	0.153	"	"
7		13.60	68.7	69.6	59.0	0.858	0.147	"	"
8		14.00	69.0	70.0	61.0	0.884	0.148	"	"
9		15.38	72.0	73.2	64.0	0.888	0.153	"	"
10		17.90	77.0	78.5	17.0	0.220	0.163	"	"
11		17.90	76.3	77.9	64.2	0.841	0.162	"	Surface Jet
12		18.04	79.0	80.6	65.2	0.825	0.166	"	Plunging Jet
13		19.42	84.3	86.0	73.2	0.868	0.175	"	"
14		20.25	80.2	82.2	22.4	0.279	0.448	100	"
15		20.25	98.3	100.0	95.5	0.971	0.498	"	Surface Jet
16		21.13	85.0	87.1	51.6	0.607	0.462	"	Plunging Jet
17		21.13	87.1	89.1	47.4	0.544	0.306	200	"
18		21.13	88.7	90.7	48.6	0.547	0.183	400	"
19		21.52	91.9	94.0	80.2	0.872	0.188	"	"
20		21.89	88.8	91.0	14.2	0.159	0.370	200	"
21		21.89	88.7	90.9	61.4	0.692	0.370	"	Surface Jet

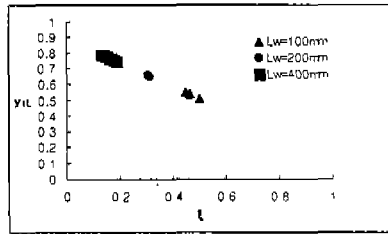
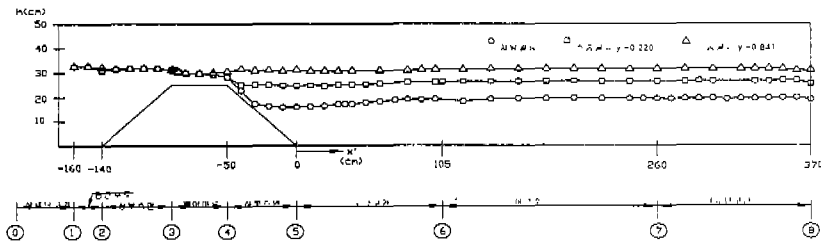
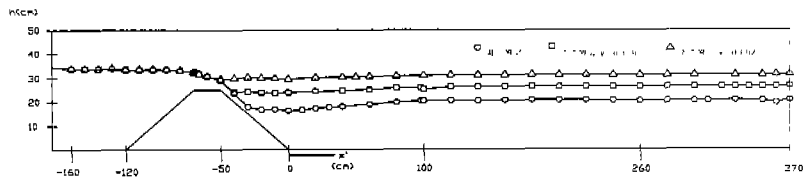


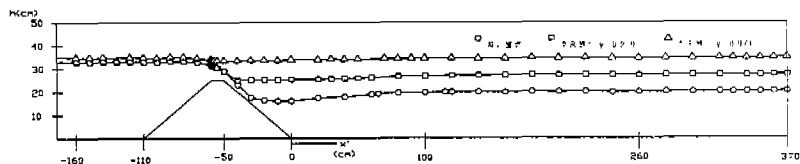
그림 4. 자유 및 수중월류의 흐름형식 한계



(a) L_w=400mm, Q=17.90 l/s의 경우



(b) L_w=200mm, Q=21.89 l/s의 경우



(c) L_w=100mm, Q=20.25 l/s의 경우

그림 5. 자유 및 수중월류의 수로구간 정의와 수면분포 비교

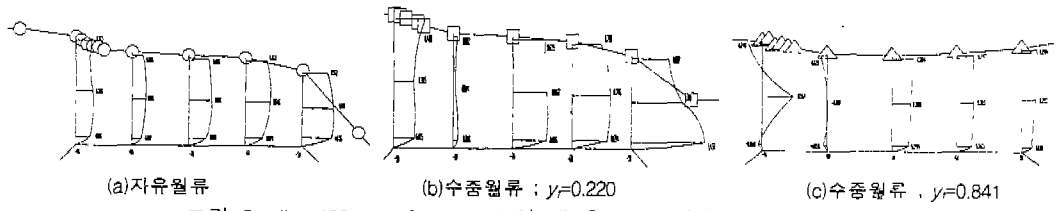
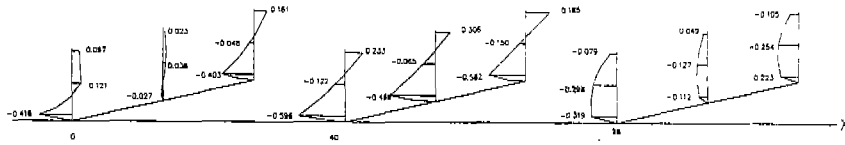
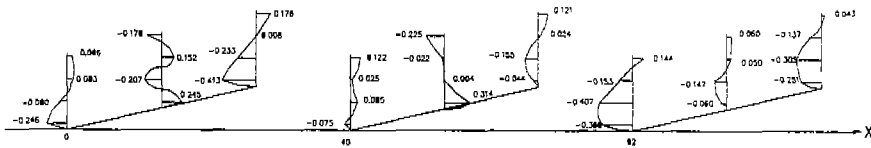


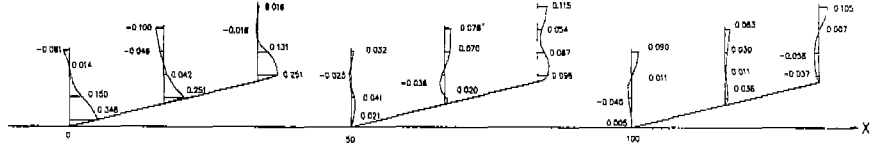
그림 6. $L_{ic}=400\text{mm}$, $Q=17.90 \text{ l/s}$ 일 때 ③~④구간의 유속분포 비교



(a) 자유유향류, $x'=0, 40, 98\text{cm}$

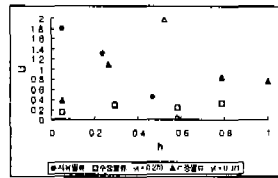


(b) 수중유향류 ; $y_f=0.159$, $x'=0, 40, 92\text{cm}$

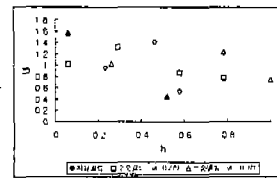


(c) 수중유향류 ; $y_f=0.692$, $x'=0, 50, 100\text{cm}$

그림 7. $L_{ic}=200\text{mm}$, $Q=21.89 \text{ l/s}$ 일 때 ⑤~⑥구간에서의 유속분포 비교



(a) $x'=140\text{cm}$



(b) $x'=180\text{cm}$

그림 8. $L_{ic}=100\text{mm}$, $Q=20.25 \text{ l/s}$ 일 때 ⑥~⑦구간에서의 유속분포 비교

4. 결론

(1) 제방형 웨어에서 흐름형식의 경계를 구분할 수 있는 관계식을 본 모형의 실험자료들에서 얻은 상대 마루길이를 함수로 하여 유도하였는데, 긴 광정웨어의 경우에는 잠수비가 0.894에 이르고 마루길이가 감소함에 따라 흐름형식은 거의 유도된 관계식과 같이 선형적으로 변화하는 것으로 나타난 바, 이 관계식을 이용함으로써 자유 및 수중유향류의 흐름형식을 구분할 수 있을 것이다.

(2) 웨어마루 구간내 마루길이가 200mm인 모형의 잠수비 0.159에서는 마루하단인 흐름방향좌표 -50 cm지점의 수면부근에 0.714m/s의 흐름방향 유속이, 하상부근에 -1.236m/s의 역방향 유속이 교차해 분포하는 것으로 나타났고, 마루길이가 400mm인 모형의 잠수비 0.220에서는 마루하단 지점의 수면부근에 0.902m/s, 하상부근에 1.437m/s의 흐름방향 유속이 분포하는 것으로 나타났는데, 이는 잠수비가 0.100~0.300부근의 침강분사 흐름에서는 마루하단으로부터 하부측면을 통한 도약구간내에 빠른 흐름이 발생되어 수면에 표면회전을 형성하기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 도약구간내 유속분포는 자유유향류의 경우 웨어하단인 시점에서는 수면부근의 흐름방향 유속

과 하상부근의 역방향 유속이 수심의 중간지점을 지나 대칭적으로 분포하는 것으로 나타났고, 중간지점에서는 불연속적인 수면의 변화와 이로 인한 기포의 발생 등으로 인해 불규칙적인 분포를 보였으며, 종점에서는 수로중앙에서의 흐름방향 유속이 아주 작게 분포하는 것으로 나타났다.

5. 기 호

- H_o : 평균 총에너지 수두
- h_o : 마루중심점의 표고를 기준으로하여 측정된 상류단 구간내의 수심
- h_t : 마루중심점의 표고를 기준으로하여 측정된 하류단 구간내의 수심
- L_R : 하상에서 순환하는 수류의 마루하단으로부터의 바닥 재순환 길이
- $L_{R'}$: 하상에서 순환하는 수류의 웨어하단으로부터의 바닥 재순환 길이
- $L_{r'}$: 웨어하단으로부터의 도약구간 길이
- L_w : 웨어마루의 길이
- q : 제방의 단위폭당 유량
- u : 임의 수심에서의 흐름방향(점) 유속
- u_m : 수심평균 흐름방향 유속
- V : 상류단 구간에서의 평균유속
- x : 마루하단을 원점으로하는 흐름방향 좌표
- x' : 웨어하단을 원점으로하는 흐름방향 좌표
- y_t : 잠수비(= h_t/h_o)
- y_{tL} : 흐름형식 한계비(= h_{tL}/h_o)
- z_R : 도약구간내 순환수류의 하상으로부터의 높이
- $z_{r'}$: 도약구간내 회전수류의 하상으로부터의 높이
- γ : 유체의 단위중량
- χ : 경계표면의 절대조도
- μ : 유체의 점성계수
- ξ : 상대마루 길이 [= $H_o/(H_o + L_w)$]
- ρ : 유체의 밀도
- w : 웨어마루의 높이

6. 참고문헌

- 이종석, 권선도, 신재욱(2000) 제방형 웨어에서의 마루길이와 유량변화에 따른 수리특성. 대전산업대학교 논문집, 제17권, pp. 141-158.
- Hermann, M. F., and Hager, W. H. (1998) Hydraulics of embankment weirs. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 963-971.
- Kindsvater, C. E. (1964) Discharge characteristics of embankment-shaped weirs. Geological Survey Water Supply Paper 1617-A, U.S. Washington, D. C., pp. 1-19.
- Laskhmana Rao, N. S. (1975) Theory of weirs. Advances in Hydrosience, Vol. 10, pp. 309-406.
- Leutheusser, H. J., and Brik, W. M. (1991) Drownproofing of low over flow structures. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 117, No. 2, pp. 205-213.