

Compound Weirs를 월류하는 유출현상의 실험적 고찰

尹東煥* 池洪基** Martin F. LAMBERT***

1. 서론

Weir를 월류하는 유출현상의 실험에 있어서 단순한 광정웨어(simple broad-crest weir)를 월류하는 흐름은 흐름방정식에 의해서 상류의 수두를 측정함으로써 웨어의 월류량을 결정할 수 있다. 그러나 복합웨어(compound broad-crest weir)에서 유량을 결정할 때는 복합웨어를 월류하는 수두-유량 관계식이 단순한 광정웨어를 월류하는 경우와는 크게 달라진다.

본 연구에서는 상류의 수두와 복합웨어를 월류하는 수두-유량의 관계식을 유도하고 복합웨어에 적용될 수 있는 유량계수를 구해야 한다. 먼저, 단순웨어에 대해서는 Bos(1976)의 이론을 적용하기 위해서 실험실에 설치된 실험수로의 실제유량과 상류의 수두를 측정하여 이를 베르누이 방정식에 적용하여 구한 이론유량을 비교함으로써 본 실험의 적합성과 신뢰성을 검증토록 하였다. 다음으로, 제원이 다른 복합웨어의 어깨 높이와 폭을 변화시키면서 각 조건에 대한 유량의 범위, 수두, 유속 및 한계수심을 측정하고 기존의 이론에서 다중 한계수심이 존재한다고 제시된 복합웨어 정상부근의 월류현상에 대한 실험에 중점을 두었다.

또한 Bos와 Henderson(1976, 1966)의 유량계수를 사용하여 이론유량을 조정함으로써 복합수로에서의 각각의 제원에 대한 수두-유량관계를 비교하였으며, 수두와 유량사이의 상호관계에 근거한 최대유량해석법(maximum discharge analysis)에 따라 분석을 실시하였다.

2. 실험제원 및 절차

적용할 광정웨어에 대한 이론의 검정과 Bos의 흐름방정식을 증명하고 실험의 검정과 복합웨어에서의 월류현상을 조사하기 위해서 단순 광정웨어의 실험이 선행되었다.

연구의 주된 구성요소는 복합웨어가 측면(one side) 및 양면(two side)를 가진 각기 제원이 다른 웨어 어께를 포함하고 있으며, 실험결과는 광정웨어 이론과 비교하고 다중 한계수심의 변화를 파악하도록 하였다.

* 영남대학교 토목공학과 박사과정

** 영남대학교 토목공학과 교수

*** The University of Adelaide, Professor

복합웨어의 월류에 의한 흐름은 각 웨어의 여러 흐름의 상황에 대한 상류측 수두를 측정함으로써 복합웨어의 월류현상을 정확히 이해할 수 있다. 그러나 복합웨어에서 흐름현상을 측정하기 위해서 본 연구에서는 어깨의 높이(h_s) 보다 수위가 작거나 클 때의 상황에 대해서 흐름의 특성을 비교 분석하였다.

2.1 웨어의 제원

웨어의 높이와 길이는 Bos가 광정웨어에 적용한 제원(턱의 길이, 높이, 폭 : L , p , b 및 상류측 수두 : h_1)을 고려하여 선택하였으며, 광정웨어의 크기는 ① $0.08 < h_1/L \leq 0.33$, ② $h_1/(h_1+p) \leq 0.60$, ③ $p \geq 0.15m$, ④ $b \geq 0.30m$ 및 $b \geq L/5$ m 과 같은 조건에 대해서 실험을 실시토록 하였다.

웨어의 길이는 편의상 1m로 정하고 웨어의 높이는 광정웨어에서 0.40m로 하였으며, 이 값들은 아래 그림 1과 같다. 웨어는 어깨의 높이(h_s)와 폭을 변화시키는 방법으로 실험을 진행하였으며, 그림 2는 실험실 수로의 규모에 따라 실험에서 사용되고 있는 광정웨어 단면의 종류를 나타낸 것이다.

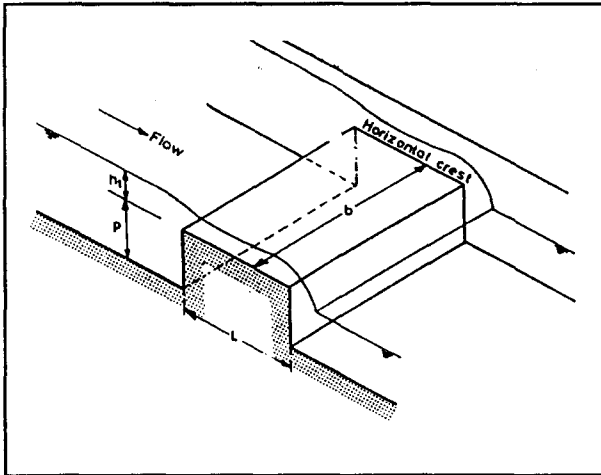


그림 1 사각형 광정웨어

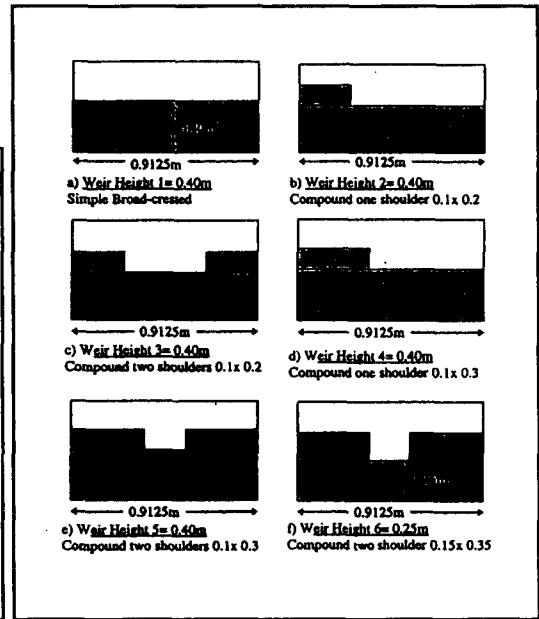


그림 2 웨어의 제원

2.2 실험장치 설치

본 실험에서는 자연하천과 같이 완전한 흐름을 재현시킬 수 있는 0.91m의 실험수로를 사용하였으며, 고가수조(elevated tank)로부터 물이 안정적(steady state)으로 공급되도록 하였다. 본 실험에 설치된 실험장치는 다양한 형상의 단순 혹은 복합웨어로서 목재로 조립하였으며, 그림 3은 실험실 환경(조건)과 각종 계측시스템 및 실험실 장치를 나타내고 있다.

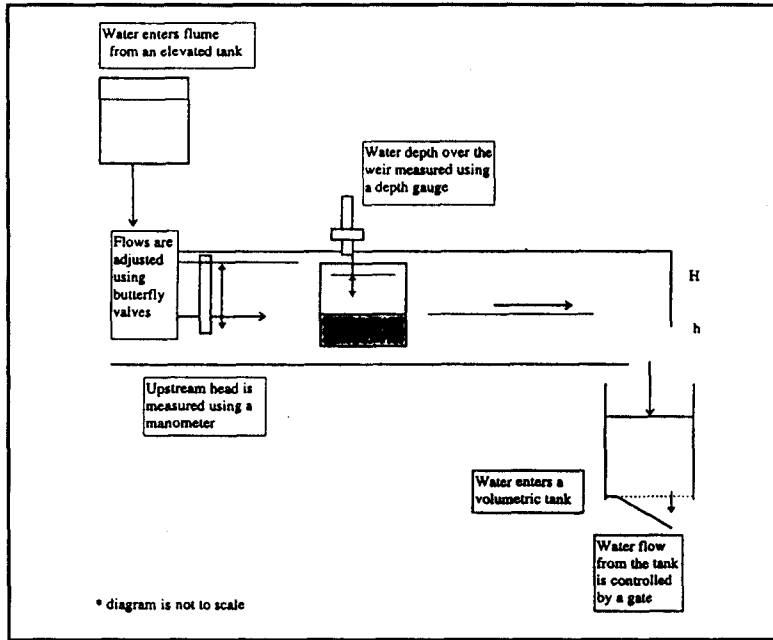


그림 3 실험장치도

웨어를 월류하는 수두는 포인트 수위계로 측정하고 관측은 흐름의 형태를 주시하면서 흐름이 주수로에 한정되어 월류하는지 복합웨어의 어깨를 넘어 월류하고 있는지를 면밀히 관찰하였다. 또한 유량은 물이 실험실 수로로부터 저류탱크(volumetric tank)로 모아지면서 측정된다(그림 3 참조). 우선 저류탱크에 설치된 수위계에서 일정 수위의 변동시간을 측정하고 시간은 동일 유량에 대해서 세 번 반복한 후 평균하여 계산하도록 하였다. 탱크의 단면적에서 수위를 곱하면 체적이 계산되며, 유량계산을 위해서 앞에서 시간을 평균한 값을 나누면 웨어를 월류하는 실제유량이 계산된다.

2.3 단순 광정웨어의 검정

사각형 광정위어는 복합웨어의 실험을 실시하는데 필요한 기초자료와 광정웨어의 월류현상을 이해하기 위해서 선택되었다. 초기의 측정(검정)은 Bos의 흐름방정식과 계수의 정확성을 증명하기 위해서 수행되었다.

측정된 상류측 수심 h_1 으로부터 h_1/L 과 $h_1/(h_1+p)$ 는 Bos의 유량계수곡선에서 유량계수가 결정되고, 사각형 웨어 단면에서 $C_d \times h_1/(h_1+p)$ 를 계산함으로써 유속계수 C_v 는 유속계수곡선으로부터 결정된다. 수두-유량 관계식을 사용함으로써 이론유량은 각각의 상류수두에 대해서 계산이 되고, 실험실 수로에서 저류탱크에 의해서 측정된 실제유량과 이론유량을 비교하면 표 1 및 그림 4와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 월류수두 0.25m보다 작을 때는 실제유량과 잘 맞았으며, 0.25m보다 클 때는 부정확한 결과가 나타났다. 이론치는 실제치와 최대오차 13%, 최소오차 0.1% 평균 3.5%의 결과로 나타났으며, 그 결과는 그림5와 같다.

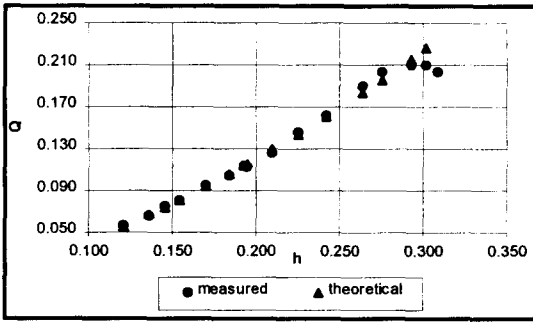


그림 4 일반웨어에서 수두-유량 관계

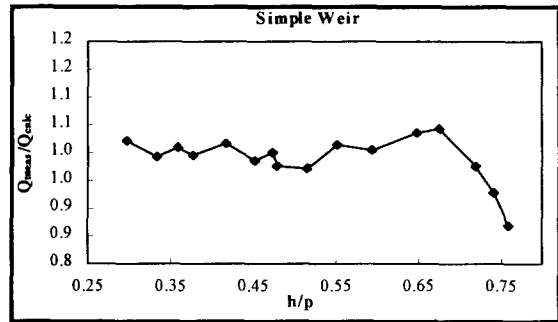


그림 5 일반웨어의 측정치와 계산치의 오차

표 1 단순광정웨어에서의 수두-유량관계 분석

tav	Q _{meas}	h+p	h	A	v	H+p	H	h ₁ /L	h ₁ /(h ₁ +p)	C _d	Q _{calc}	yc(meas)	yc(calc)	h/p	Q _{meas} /Q _{calc}
sec	m ³ /s	m	m	m ²	m/s	m	m	-	-	-	m ³ /s	m	m	-	-
19.053	0.057	0.547	0.121	0.548	0.104	0.548	0.122	0.121	0.231	0.848	0.056	0.081	0.081	0.297	1.021
16.417	0.066	0.562	0.136	0.563	0.118	0.563	0.137	0.136	0.253	0.848	0.067	0.091	0.091	0.334	0.992
14.487	0.075	0.572	0.146	0.573	0.131	0.573	0.147	0.146	0.266	0.848	0.074	0.097	0.098	0.359	1.010
13.563	0.080	0.580	0.154	0.581	0.138	0.581	0.155	0.154	0.277	0.848	0.081	0.103	0.103	0.378	0.996
11.417	0.095	0.596	0.170	0.597	0.160	0.597	0.171	0.170	0.297	0.848	0.094	0.113	0.114	0.418	1.017
10.437	0.104	0.610	0.184	0.611	0.171	0.611	0.185	0.184	0.314	0.848	0.106	0.123	0.124	0.452	0.986
9.563	0.114	0.619	0.193	0.620	0.184	0.621	0.195	0.193	0.324	0.848	0.114	0.129	0.130	0.474	0.999
9.647	0.113	0.621	0.195	0.622	0.181	0.623	0.197	0.195	0.327	0.848	0.116	0.130	0.131	0.479	0.977
8.657	0.126	0.636	0.210	0.637	0.197	0.638	0.212	0.210	0.343	0.848	0.129	0.140	0.141	0.516	0.972
7.467	0.146	0.651	0.225	0.652	0.224	0.654	0.228	0.225	0.359	0.848	0.144	0.150	0.152	0.553	1.014
6.737	0.162	0.668	0.242	0.669	0.242	0.671	0.245	0.242	0.376	0.848	0.161	0.161	0.163	0.595	1.006
5.727	0.190	0.690	0.264	0.691	0.275	0.694	0.268	0.263	0.396	0.848	0.184	0.176	0.179	0.649	1.035
5.343	0.204	0.701	0.275	0.702	0.290	0.705	0.279	0.274	0.406	0.848	0.196	0.183	0.186	0.676	1.042
4.143	0.210	0.719	0.293	0.720	0.292	0.723	0.297	0.292	0.422	0.848	0.216	0.195	0.198	0.720	0.976
3.117	0.210	0.728	0.302	0.729	0.287	0.732	0.306	0.301	0.429	0.848	0.226	0.201	0.204	0.742	0.930
2.143	0.203	0.735	0.309	0.736	0.276	0.739	0.313	0.308	0.435	0.848	0.203	0.206	0.209	0.759	0.869

3. 최대 유량(최소 비에너지) 분석

비에너지가 최소인 점에서 유량은 최대가 되며, 최소 비에너지 혹은 최대 유량인 지점에서 한계상태를 결정하고 상류측 수두와 유량관계는 에너지보존법칙에서 계산할 수 있다. 한편 최소 비에너지는 Bos에 의해 웨어공식에서 유도되었으며, 이 방정식은 상류측 수두로부터 유량을 결정하는 과정을 보여준다.

복합웨어에 있어서 흐름의 두 가지 형태 즉, $h_s > y_c$ 일 때는 주수로의 흐름(단순웨어)으로 그리고 $h_s < y_c$ 일 때는 복합흐름(복합웨어)으로 각각 구분할 수 있다.

주수로 흐름(단순웨어)

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)} b_m H^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

복합수로 흐름(복합웨어)

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}g} T \left(H - h_s + \frac{h_s b_m}{T} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

식(1)은 주수로에 제한되어 흐를 때는 상류측 수두로부터 웨어가 월류하는 유량의 계산이 가능하게 되고, 식(2)는 복합웨어를 월류하고 흐를 때 적용되는 식이다.

식(1)과 식(2)는 최소 비에너지(최대유량)가 되는 한계조건하에서 식을 유도하였다. 웨어에 대한 이론 유량을 조정함에 있어 요구되는 실제 유량계수(C_d)의 값은 상류 수두와 어깨의 높이에 대한 비를 도시함으로써 계산된다. Bos는 유량계수를 통합시켜 수두-유량관계식인 식(3) 및 식(4)에서는 상류측 수두를 계산하고 관성력과 점성력의 효과를 설명하고 있다. 그리고 Henderson에 의해서 유도된 유량계수식은 식(5)에 나타나고 있으며, Bos와 Henderson에 의해서 보정된 유량은 그림 6과 그림 7 그리고 표 2 및 표 3에서 실제유량과 이론유량의 차이를 보여주고 있으며, 이론유량보다 유량계수를 사용한 보정유량이 실제치와 잘 맞는 것으로 나타났다.

● 주수로 흐름(단순웨어)

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g} b_m h^{1.50} \quad (3)$$

● 복합수로 흐름(복합웨어)

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g} T \left(H - h_s + \frac{h_s b_m}{T} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

● Henderson C_d

$$C_d = 0.611 + 0.08 \times \frac{h}{p} \quad (5)$$

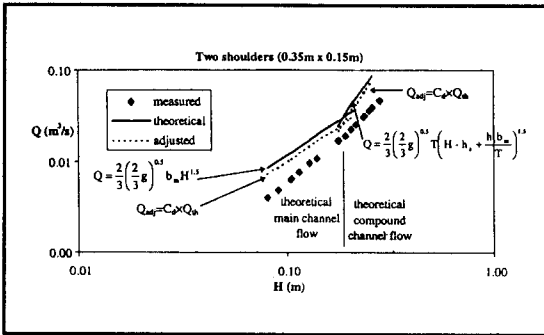


그림 6 Bos C_d 에 의한 수두-유량관계

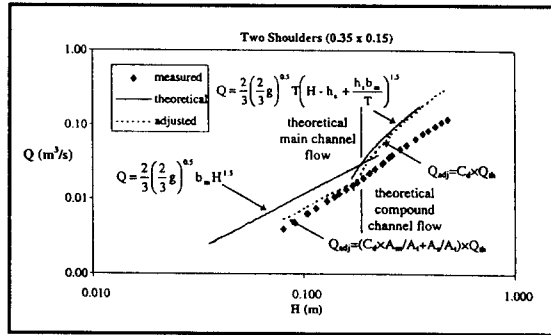


그림 7 Henderson C_d 에 의한 수두-유량관계

4. 실험결과의 비교 고찰

Bos의 유량계수는 상류측 수두의 측정으로부터 정확한 유량계산을 가능하게 하였다. 그러나 본 실험에 적용된 1차원적 실험은 복합단면에 있어서 모델링의 조건을 만족시키지 못하였다. 이러한 복합단면에서 다중 한계수심은 단일 유량을 결정하는데 있어서 문제를 발생시킬 수 있을 것이다.

Henderson에 따르면 단순웨어에 대한 유량계수는 이러한 웨어들에 대한 수축의 정도에 따라 근접한 근사치를 제공할 수 있다.

최소 비에너지(최대유량)를 분석하는 방법은 복합웨어의 유량분석에 사용되어 왔으며, 어깨 정상부근의 단면에 대해서 복합웨어의 제원이 다른 형상에 적용시킬 수 있는 유량계수곡선을 결정하는 것이 우선 필요

표 2 Bos-Cd에 의한 수두-유량관계(0.35×0.15)

Weir	h	H	Q _{meas}	Q _m	Q _c	Bos C _d	Q _{madj}	Q _{cdj}
	m	m	CMS	CMS	CMS		CMS	CMS
two shoulders	0.213	0.235	0.030	0.042	0.0653	0.871	0.057	0.057
	0.245	0.284	0.047	0.056	0.1089	0.873	0.095	0.095
	0.270	0.335	0.066	0.071	0.1606	0.878	0.141	0.141
	0.296	0.384	0.084	0.083	0.2177	0.882	0.192	0.192
	0.325	0.446	0.108	0.110	0.2964	0.890	0.264	0.264
	0.336	0.476	0.121	0.121	0.3386	0.890	0.301	0.301
	0.224	0.253	0.036	0.047	0.0799	0.871	0.070	0.070
	0.214	0.238	0.031	0.043	0.0672	0.871	0.059	0.059
	0.199	0.217	0.025	0.037	0.0510	0.865	0.032	0.044
	0.168	0.179	0.017	0.028	0.0256	0.858	0.024	0.022
	0.229	0.260	0.039	0.049	0.0865	0.869	0.075	0.075
	0.167	0.178	0.017	0.028	0.0250	0.858	0.024	0.021
	0.180	0.192	0.019	0.031	0.0337	0.859	0.027	0.029
	0.191	0.206	0.022	0.034	0.0431	0.865	0.030	0.037
	0.133	0.140	0.004	0.019	0.0065	0.848	0.016	0.005
	0.078	0.081	0.005	0.008		0.848	0.007	
	0.088	0.091	0.006	0.010		0.848	0.009	

표 3 Henderson Ca에 의한 수두-유량관계(0.35×0.15)

Weir	h	H	Q _{meas}	Q _m	Q _c	error
	m	m	CMS	CMS	CMS	%
two shoulders	0.213	0.235	0.030	0.035	0.056	45.885
	0.245	0.284	0.047	0.083	0.099	52.823
	0.270	0.335	0.066	0.140	0.150	56.052
	0.296	0.384	0.084	0.202	0.206	59.176
	0.325	0.446	0.108	0.287	0.285	62.361
	0.336	0.476	0.121	0.333	0.327	63.803
	0.224	0.253	0.036	0.051	0.070	48.414
	0.214	0.238	0.031	0.037	0.058	45.793
	0.199	0.217	0.025	0.025	0.042	40.052
	0.168	0.179	0.017	0.019	0.019	9.195
	0.229	0.260	0.039	0.058	0.077	45.589
	0.167	0.178	0.017	0.019	0.018	9.169
	0.180	0.192	0.019	0.021	0.026	27.200
	0.191	0.206	0.022	0.023	0.035	35.961
	0.133	0.140	0.011	0.013		14.282
	0.078	0.081	0.004	0.005		25.664
	0.088	0.091	0.005	0.007		25.107
	0.100	0.104	0.006	0.008		20.637

5. 결론

본 실험에서는 복합웨어 흐름의 해석에 대해서 분명한 흐름현상의 이해를 보여주고 있으며, 단순웨어로부터 발전된 분석방법들은 다양한 형태의 복합웨어의 흐름에 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 Bos 이론의 적용은 복합웨어 단면에 대해서 최소 비에너지 지점과 최대 유량을 제시함으로써 복합웨어를 통한 흐름해석을 가능하게 하였다.

지금까지의 실험결과에서 각각의 방법들은 상류측 수두로부터 유량을 예측하는 것이 가장 정확한 방법이라는 사실을 입증하였으며, 실험치의 오차는 웨어를 월류하는 흐름이 마찰이나 수축 등에 따라 영향을 받기 때문에 어깨 높이, 폭 그리고 웨어의 주수로 단면에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 수두-유량관계를 적용하는데 필요한 유량 계수곡선은 실험 결과로부터 유도될 수 있었다.

따라서 앞으로 보다 정확한 유량관측을 위해서는 임의의 혼합웨어에 적용될 수 있는 계수곡선의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

- Blalock M.E and Stum T.W, 1981, Minimum Specific Energy in Compound Channel Flow, ASCE, J Hydraulics Div, 107, HY6, p 699~717.
- Bos M. G., 1976, Discharge Measurement Structures, International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Chaudhry H.M. and Bhallamudi M.S., 1988, Computation of Critical Depth in Compound Channels, Journal of Hydraulic Research, Vol 26, No 4.
- Chow, V. T., 1959. Open Channel Hydraulics, McGraw Hill Book Company, New York.
- Henderson, F. M., 1966, Open Channel Flow, Mac Millan, New York, NY.
- Traver R. G., 1993, Modelling Critical Depth in Open Channels., Hydraulic Engineering, Proc. of the 1993 National Conference, ASCE, New York.