

삼각형 래버린스 위어의 수심유지 효과

Effect on Maintenance of Vertical Profile of Stream for Triangle-Type Labyrinth Weir

이승오* · 김영호** · 임장혁***

Lee, Seung Oh · Kim, Young Ho · Im, Jang Hyuk

Abstract

The labyrinth weir can be applied to increase the overflow rate, maintain constant water depth and improve water quality. This weir can be defined that the plane shape of overflow part is not straight line and is a kind of weir having overflow length increased by changing its plane shape. There are relatively few studies related to effect of maintaining the water depth which has been used to consider for various functions as hydraulic facilities and design conditions of labyrinth weirs. Thus, it is needed to conduct studies related to the maintenance of water depth by the labyrinth weir. This study was to provide fundamental data which may become a facilitator for more accurate and proper design of hydraulic facilities related to the maintenance of water depth. The ranges of constant water depth ($H_t/P = 0.08\sim 0.27$) were provided for the triangle type labyrinth weir, and the effect of maintaining water depth was analyzed using hydraulic laboratory experiments and 3D-numerical simulations(Flow-3D).

Key words : Maintenance of water depth, Labyrinth weir, Hydraulic laboratory experiment, Flow-3D

요 지

일반적으로 래버린스 위어는 월류부의 평면형상을 변화시켜 월류 길이를 증가시킨 위어이다. 래버린스 위어는 월류량 증대 및 수심유지에 활용될 수 있으며, 수질개선에 효과적이다. 그러나 수공구조물로서 기능 및 설계조건을 고려할 수 있는 수심유지 효과에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 본 연구의 목적은 삼각형 래버린스 위어의 수심유지효과 범위를 제시하여 보다 효율적인 삼각형 래버린스 위어 설계가 가능토록 하는데 있다. 또한, 수심유지 효과는 수리모형실험 및 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하여 분석하였다. 이러한 결과, 본 연구에서는 삼각형 래버린스 위어는 시점부까지 전 범위에서 수심유지효과가 나타났으며, 위어 종점부까지 수심이 유지되는 범위($H_t/P = 0.08\sim 0.27$)를 정량적으로 제시하여 효율적인 설계가 가능하도록 하였다.

핵심용어 : 수심유지 효과, 래버린스 위어, 수리모형실험, FLOW-3D

1. 서 론

우리나라의 경우, 최근 이상기후로 인한 강우량 증가 및 이로 인한 댐 안정성 확보 대책으로 대부분 터널형이나 개수로형의 여수로를 추가로 제작하고 있다. 최근 들어 하천의 다양한 친수환경 조성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 친수의 필수 요건인 주운 및 친수공간에 대한 수리학적 특성은 수심과 중요한 관련성을 가진다. 주운에 대한 실제 운용 수심을 확보하기 위해서는 충분한 하도구간에 대하여 일정한 수심유지가 필요하고, 이와 관련된 수리학적 접근에 관한 연구가 필요한 실정이다. 또한, 현재 국내에서는 다양한 주운관련 사업의 활성화가 대두되고 있는 실정이다. 수공구조물인 래버린스 위어는 평면 형상을 삼각형이나 사

리꼴 형태로 제작하여 월류폭을 증가시킨 것으로 기존 선형 위어보다 수심이 일정하게 유지되고 월류량도 증가된다(Taylor, 1968). Hay와 Taylor(1970)는 삼각형 혹은 사다리꼴 labyrinth 위어의 월류량을 평가하기 위한 기준을 포함한 labyrinth 위어의 설계 과정을 제시하였다. 또한, 이들은 labyrinth 위어의 월류능력은 동일 수두 조건에서 선형위어보다 마루 확폭비에 의해 증가하며, 이러한 능력은 상류수두가 작은 경우에 크게 나타난다고 제시한 바 있다.

이러한 래버린스 위어의 수심이 일정하게 유지되는 효과는 운하 및 관개 시스템의 분기수로에 활용이 가능하다. 또한, 래버린스 위어는 유속 감소 효과에 의해 어도에도 활용될 수 있다. 소규모 농업용이나 도시배수용 댐에서 어도에 관련된 연구는 어도 단면 유속이 일반적인 수평 위어보다 더 작은

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

**정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정

***정회원 · 현대건설(주) 기술/품질개발원 과장(교신저자)

것으로 알려져 있다(Falvey, 2003). 그러므로 본 연구의 대상인 수심유지 효과는 수공구조물의 기초자료 및 설계에 활용성이 높을 것으로 기대된다.

국내 월류량 특성 관련 연구로 최태훈(1987)은 수리모형 실험에 의해 래버린스 위어의 수리학적 특성과 기존 선형위어와 비교하여 유량비와 효율을 분석하였다. 또한, 박세훈 등(2007)은 중·소규모 댐에 대한 홍수배제능력 증대방안에 대한 연구를 위해 래버린스 위어 일부를 실험조건에 포함시켜 연구 수행하였다. 수리모형 실험 및 수치모의 조건은 기존 중·소규모 댐 중에 대표적인 사례를 선택하여 적용하였으며, 수치모형은 FLOW 3D를 이용하였다.

또한, 국외 관련 연구로 Tullis 등(1995)은 기존 수리모형 실험 자료를 단순 회귀분석하여 삼각형 래버린스 위어의 유량계수를 산정하는 연구를 수행하였다. Tullis 등(2005)은 낮은 월류 높이를 갖는 래버린스 위어의 성능 개선에 대해 래버린스 위어 마루 형상을 변화시켜가며 실험을 수행하여 효율적인 마루 형상을 제시하였다. 수중 래버린스 위어에 관한 연구를 수리모형실험을 수행하여 수중 위어 조건에서는 래버린스 위어가 비효율적인 것으로 분석되었으며, 수두-유량관계식에 의해 이러한 결과를 정량화하였다(Tullis 등, 2007).

수치모의에 의한 래버린스 위어 관련 연구는 Hay와 Taylor(1969)가 컴퓨터 모형에 의한 래버린스 위어의 성능 평가에 관한 연구를 시작하였으며, Aminipouri 등(1994)은 래버린스 여수로에 대한 3차원 수치모의를 수행하였다. Bruce 등(2004)은 수치모의에 의한 래버린스 위어의 월류 높이와 위어 높이와의 비에 따른 월류량 변화를 연구하였으며,

FLOW-3D를 이용하여 설계된 모형에 대한 월류량을 모의하였다. 현재까지 래버린스 위어와 관련된 연구는 월류량 산정에 관한 내용이 대부분이며, 수심유지와 관련된 연구는 상대적으로 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 래버린스 위어의 형상 중 일반적으로 많이 사용되고 기본적인 삼각형 형상에 대해 수심 유지 효과에 대한 특성을 제시하여 삼각형 래버린스 위어를 보다 효율적으로 설계하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 삼각형 래버린스 위어에 대한 수리모형 실험 및 수치모의를 실시하여 수심변화에 대한 분석을 수행하여 수심유지 효과에 대한 범위를 정량적으로 제시하였다.

2. 차원해석

그림 1에 나타낸 바와 같이 래버린스위어의 설계를 위해 필요한 변수들로 래버린스 위어의 길이(L), 폭(W), 정부(crest) 높이(P), 벽면과의 사이 각(α), 마루형상, 선단(apex) 형태 등과 같은 많은 중요한 변수들이 있다. 본 연구에서는 물리적 영향을 고려하기 위해 차원해석에 의해 식 (1)과 같이, 수리학적 매개변수를 산정하였다. 본 연구에서는 수심유지 효과에 대한 영향인자를 고려하기 위해 차원해석을 적용하였으며, 차원해석은 Buckingham의 π 정리에 의하여 수행하였다.

$$C = f\left[\frac{L}{W}, \frac{W}{P}, \frac{H_t}{P}, \frac{H_d}{P}, \alpha\right] \quad (1)$$

여기서, C = 래버린스 위어의 유량계수, H_t = 전수두(= $H_t +$

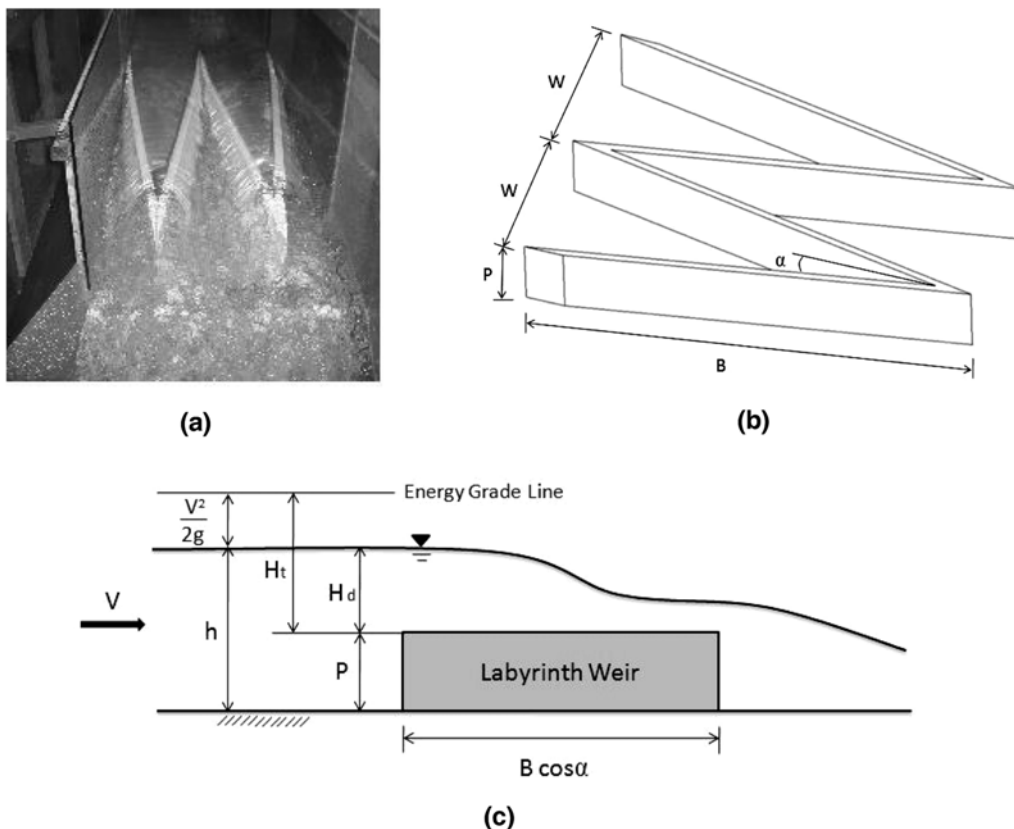


그림 1. 삼각형 래버린스 위어 관련 개요도

$V^2/2g$, V = 접근유속, g = 중력가속도), H_g = 윗류높이, h = 수심이다.

임장혁(2007)의 연구에 의하면, Lux 등(1985)의 연구에 의해 벽 두께비(래버린스 벽두께와 P 의 비)는 실험결과에 큰 영향을 미치지 않으며, Taylor(1968)의 실험으로부터 래버린스 위어의 수리학적 거동은 W/P 가 2보다 큰 경우에 영향이 없는 것으로 기술되어 있다. 또한 P 에 대한 값은 실험조건에서 고정할 수 있다. 그러므로 유량계수에 영향을 미치는 인자들을 다음 식 (2)와 같이 요약할 수 있다.

$$C = f[L/W, H_g/P, \alpha] \quad (2)$$

또한, 삼각형 래버린스 위어의 수심유지 효과에 대해서는 L/W 와 α 가 유사한 영향을 미치므로, 본 연구에서는 H_g/P 와 α 를 수심유지에 영향을 미치는 인자로 고려하였다.

3. 수리모형실험 및 수치모의

3.1 수리모형실험

본 연구에서 사용된 수리모형 실험장치는 그림 2에 나타난 바와 같이, 래버린스 위어의 수심유지 변화를 측정하기 위해 길이 20 m, 폭 0.6 m, 높이 0.9 m이며, 벽면이 아크릴로 된 직사각형 개수로 실험 장치를 사용하였다. 또한, 흐름의 안정을 위하여 수조로부터 8.0 m 지점에 래버린스 위어를 설치하였다. 고수조에는 유량을 조절하기 위한 삼각위어가 설치되어 있으며, 하류단에는 윗류하는 유량을 측정하기 위해 수조를 설치하였다. 본 연구에서는 유속 및 수심을 측정하기 위해 위어 시점부의 상류방향으로 1.0, 1.2, 1.5 m 지점 및 래버린스 위어 시점, 중점, 종점에 유속계를 거치하여 유속을 측정하였으며, 동일한 위치에 래버린스 위어의 수면형 변화를 관측하기 위해 피에조 미터 및 포인트 게이지를 이용하여 수심을 측정하였다(그림 3 참조). 하류단 수조 및 상류단의 삼각위어를 이용하여 윗류량을 측정하였으며, 전수두의 변화에 따라 실험을 수행하기 위해 하류단의 영향을 받지 않는 상류부 1.5 m 지점의 수위와 유속을 이용하여 전수두를 측정하였다. 또한, 일반 선형 위어의 수심유지 효과를 측정하기 위해 동일한 실험조건에서 수로폭과 같은 0.6 m의 일반 선형 위어를 설치하여 실험하였다.

본 연구에서 H_g/P 범위를 약 0.05에서 0.70까지 측정하였다. 또한 실험의 정확성 및 신뢰성을 확보하기 위해 각 실험에 대해 측정치의 오차범위가 5% 이내로 측정될 때까지 3회 이상 반복하였다. 본 연구에서 수행된 수리모형실험 장치의 평면도 및 측정위치를 그림 2와 그림 3에 나타냈다. 또한, 본 연구에서 사용된 삼각형 래버린스 위어 모형의 제원은 표

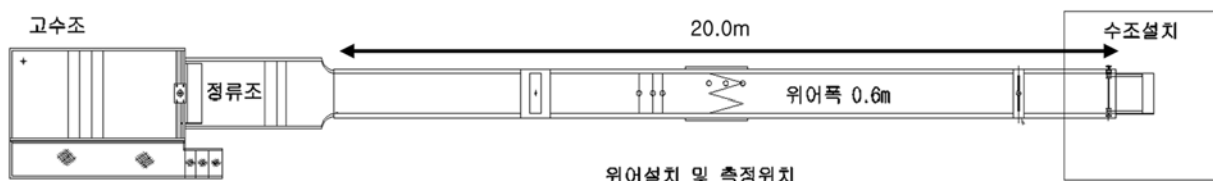


그림 2. 수리모형실험장치 평면도

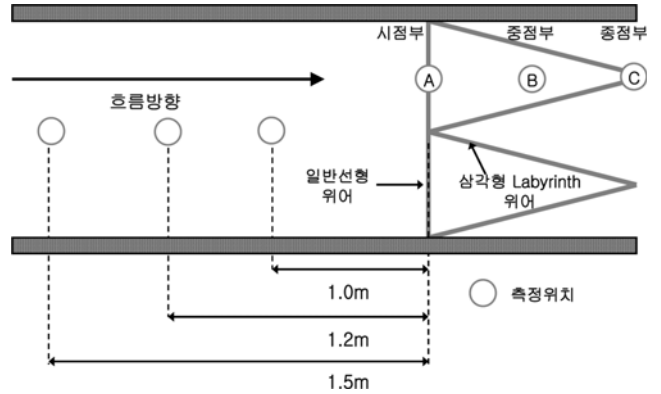


그림 3. 측정위치

표 1. 수리실험 모형의 제원

α (°)	L (cm)	L/W	W/P
6	287.00	9.57	2.00
8	215.54	7.18	2.00
10	172.76	5.76	2.00
15	115.90	3.86	2.00
25	70.98	2.37	2.00
35	52.30	1.74	2.00

1에 정리하였다.

3.2 수치모의

본 연구에서는 연구 대상인 삼각형 래버린스 위어의 3차원 수치모의를 위해 FLOW-3D를 이용하여 분석하였으며, 수치모의 프로그램, 조건 및 격자망 구성은 다음과 같다.

3.2.1 FLOW-3D의 개요

FLOW-3D 모형은 x, y, z 방향의 유속 및 압력을 모두 고려하여 수치모의를 수행하는 완전한 3차원 난류모형으로서 자유수면을 가지는 개수로 흐름, 정상 및 비정상 유동해석, 압축성 및 비압축성 유체계산, 뉴턴 및 비뉴턴 유체계산, 그리고 열전달 해석이 가능하다. 기본적으로 비정상 유동상태를 해석하며 연속방정식, 3차원 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 해석한다.

유한차분법(FDM, Finite Difference Method)에 직육면체의 요소로 일반 형상을 정의할 수 있는 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 방법을 도입한 유한체적법(FVM, Finite Volume Method) 형식을 취하고 있다. 자유수면 및 밀도차가 큰 흐름을 고려하기 위하여 VOF (Volume Of Fluid) 방법을 사용하기 때문에 개수로 흐름에

서 자유수면과 같은 밀도차가 매우 큰 두 종류 이상의 유체가 동시에 존재하는 상태도 해석할 수 있다. 난류해석을 위해서 Prandtl의 혼합거리 모형, 1-방정식 모형, 2-방정식 모형인 $k-\epsilon$ 모형, RNG 모형, LES 모형 등 5가지를 적용할 수 있다. 일반적으로 복잡한 3차원 흐름을 모의할 수 있는 레이놀드 응력에 관한 방정식을 구성하고 이를 풀기 위해 2차모멘트 방정식에 나타나는 3차모멘트를 근사화하는 방법으로 $k-\epsilon$ 모형, RNG 모형, LES 모형이 적절하다(Flow Science, 2003).

난류모형인 LES 모형은 Navier-Stokes 방정식의 시간 평균 대신 격자내 공간 평균을 실시하여 필터에서 표현할 수 있는 크기까지의 흐름은 직접 계산하고 그 보다 작은 흐름은 통계적으로 처리한다. 다른 모형에 비해 사실적인 난류 모의가 가능하나 복잡한 형상에서는 계산시간이나 수렴성에서 비효율적이다. RNG $k-\epsilon$ 모형은 $k-\epsilon$ 모형에 비해 수치모의의 시간은 길지만, 복잡한 난류 흐름을 보다 정확하게 모의할 수 있으며, 위어 및 여수로와 같은 전단 흐름에 대한 수치모의에 적합하다고 알려져 있다(Bruce 등, 2004). 본 연구에서는 래버린스 위어의 특성상 상류부 흐름조건에 따라 도수의 발생 등 복잡한 3차원 흐름특성을 나타내기 때문에 래버린스 위어 월류부의 수리특성을 반영할 수 있는 RNG $k-\epsilon$ 모형을 적용하였다.

3.2.2 수치모의의 조건

본 연구에서 수행된 수리모형실험에 의해 산정된 결과를 수치모의의 결과와 비교 분석하여 삼각형 래버린스 위어의 수심유지효과를 검증하였다. 본 연구에서는 수리모형 실험 결과와 비교하기 위해 기하학적 수리학적 대표성을 갖도록 $\alpha = 8^\circ, 15^\circ$ 와 35° 를 적용하였다. 또한, 표 2에 나타난 바와 같이, 기타 입력 조건은 수리모형실험과 동일하게 적용하여

표 2. 수치모의에서 이용된 상류단 경계조건

구분	H_t/P	V (m/s)	H (EL.m)
삼각형 8°	0.13	0.098	0.32
	0.44	0.482	0.35
삼각형 15°	0.15	0.073	0.32
	0.45	0.379	0.36
삼각형 35°	0.16	0.018	0.32
	0.42	0.181	0.36

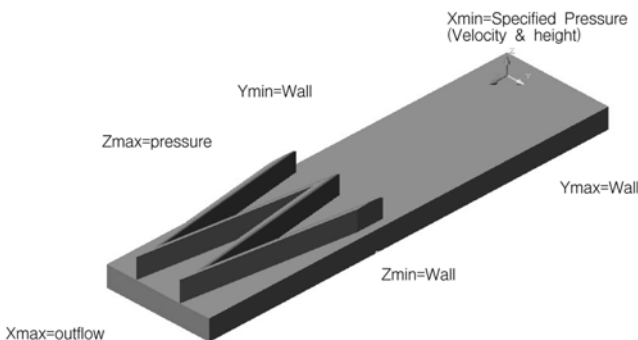


그림 4. 수치모의에 사용된 경계조건

벽면과의 사이 각(α)별로 2개의 유량조건에 대해 수행하였고, 유속관련 조건은 위어의 영향을 받지 않는 평균 유속개념으로 사용하기 위해 유속이 일정하게 유지되는 측정지점인 위어 시점으로부터 상류 방향으로 1.5m에서 측정된 값을 이용하였다.

그림 4에 나타난 바와 같이, 수치모의의 시 경계조건은 수리모형실험 조건과 동일하게 구성하여 모의하였다. 바닥과 좌안 벽면은 벽(wall) 경계조건을 사용하여 비활동 조건(no-slip condition)을 부여하였으며, 위어와 같이 특성상 상·하류단이 있는 구조물의 경우에는 압력흐름(pressure flow)을 이용하여 수심과 유속으로 경계조건을 입력하였다. 또한, 각 블록에 의해 연결되는 부분의 경계조건은 대기와 접하는 부분으로 압력(pressure) 조건, 래버린스 위어가 설치된 우안 벽면은 수위(압력) 조건을 부여하였다. 하부경계조건은 유출흐름(outflow)의 형태로 작성하였다.

3.2.3 FLOW 3D에 의한 격자망 구성

격자망의 구성은 FLOW-3D 모형 내부의 격자생성 기능을 사용하였으며, 다중 블록(multi-block)에 의한 방법을 적용하여 계산속도 및 안정성을 개선하였다. 이러한 방법은 기존의 격자 생성 방법보다 각 격자 및 셀을 거의 동일한 크기로 작성할 수 있어 계산속도와 안정성을 개선할 수 있다. 표 3에 제시된 바와 같이, 각 방향의 셀의 크기($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)는 0.01 m에서 0.03 m 범위로 수치해의 수렴성 및 안정성을 고려하여 결정하였다. 예를 들어, 해석시간과 해석의 정밀도를 고려하여 래버린스 위어 설치구간(block2)에서는 조밀한 격자망을 이용하였다.

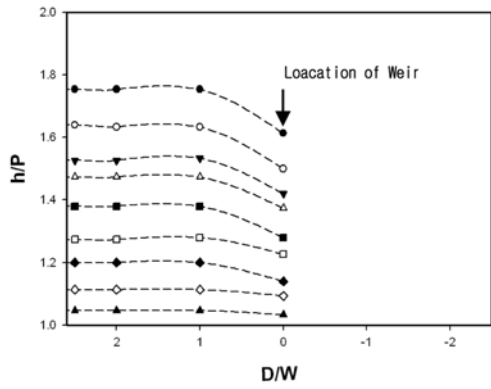
4. 결과 및 비교분석

4.1 수리모형실험 결과 및 분석

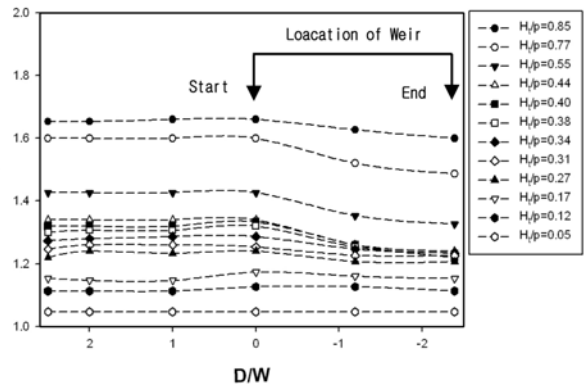
본 연구에서는 삼각형 래버린스 위어의 복잡한 수심변화를 분석하기 위해 수리모형실험을 실시하였으며, 그 결과를 FLOW-3D를 이용한 수치모의와 비교하였다. 삼각형 래버린스 위어 수리모형실험은 일반 선형위어의 비교 및 벽면과의 사이각(α)에 따른 수심변화를 비교하였으며, 수심유지 효과를 분석하여 다음과 같이 제시하였다.

표 3. 격자망의 구성내용

방향 및 block	구간(m)	격자수	셀크기(m)	
X	block1	0.00-1.35	45	0.03
	block2	1.35-2.30	70	0.01
	block3	2.30-2.60	10	0.03
Y	block1	0.05-0.65	40	0.03
	block2	0.05-0.65	120	0.01
	block3	0.05-0.65	40	0.03
Z	block1	0.15-0.45	10	0.03
	block2	0.15-0.45	30	0.01
	block3	0.15-0.45	14	0.03

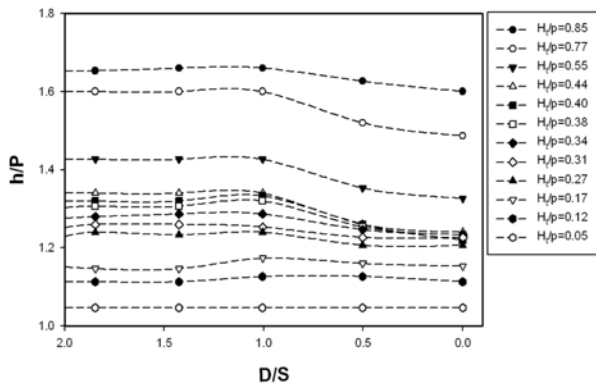


(a) 일반 선형 위어

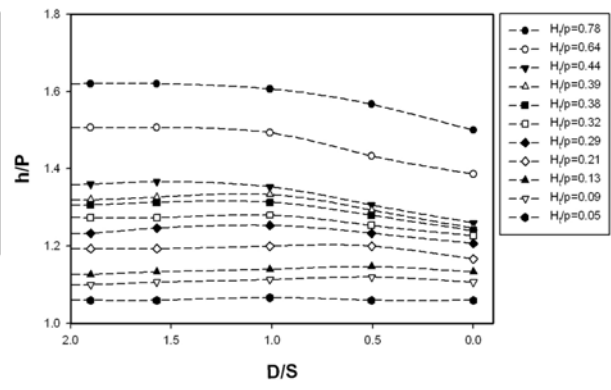


(b) 삼각형 래버린스 위어($\alpha = 6^\circ$)

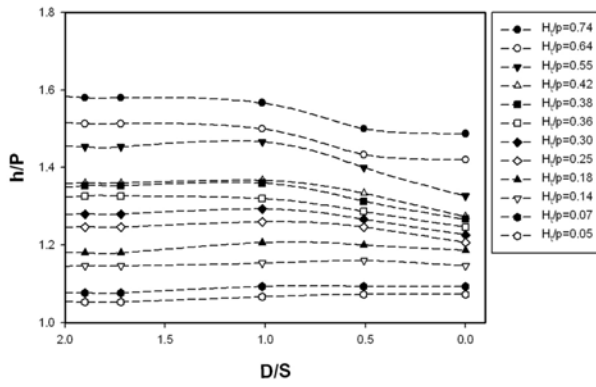
그림 5. 일반 선형위어와 삼각형 래버린스 위어의 수심변화 비교



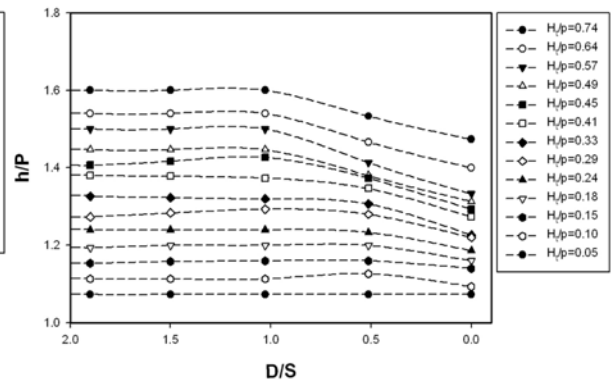
(a) $\alpha = 6^\circ$



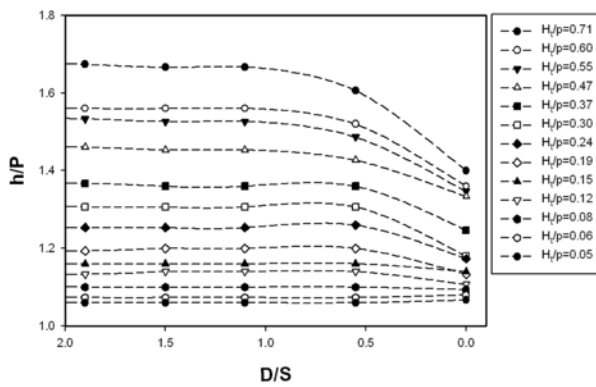
(b) $\alpha = 8^\circ$



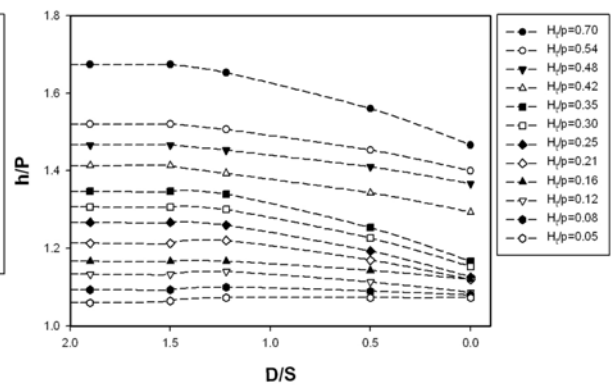
(c) $\alpha = 10^\circ$



(d) $\alpha = 15^\circ$



(e) $\alpha = 25^\circ$



(f) $\alpha = 35^\circ$

그림 6. 삼각형 래버린스 위어의 수심변화

4.1.1 일반 선형위어와 삼각형 래버린스 위어의 수심변화 비교분석

본 연구에서는 삼각형 래버린스 위어의 수심 유지 효과를 검증하기 위해 일반 선형위어와의 수심변화를 비교분석하였다. 위어의 거리에 따른 수심 변화를 분석하기 위해 횡축에는 위어 시점부에서 거리(D)와 수로폭(W)의 비를 이용하고, 종축에는 수심(h)와 위어 높이(P)의 비를 사용하여 무차원화하였다.

그림 5에 나타난 바와 같이, 일반 선형위어의 경우에는 위어의 시점부인 $D/W=0$ 인 지점에서 급격하게 감소하는 것으로 나타나는 반면에 삼각형 래버린스 위어의 경우에는 위어의 시점부 이후에도 종방향의 삼각형 형상에 수심이 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 또한, D/W 의 범위가 0부터 1까지 수심변화는 일반 선형 위어에서 급격하게 감소되고, $\alpha=6^\circ$ 인 삼각형 래버린스 위어는 비교적 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 삼각형 래버린스 위어의 수심유지 효과가 일반 선형 위어보다 우수한 것으로 분석되었다.

4.1.2 삼각형 래버린스 위어의 수심변화 분석

삼각형 래버린스 위어의 흐름특성 중 수심이 길게 유지되는 특성을 분석하기 위해 본 연구에서 사용한 분석 방법은 수심변화를 고려하기 위해 수심과 위어의 높이 비(h/P)를 종축으로 하고, 위어 시점부에서 종점부까지의 길이인 $S(=B\cos\alpha)$, 위어 종점부에서 측정위치까지의 거리인 D 와의 비인 D/S 를 횡축으로 하여 H_t/P 별로 도시된 수심변화 곡선을 이용하였다.

그림 6에서 나타난 바와 같이 H_t/P 가 증가함에 따라 수심

표 4. 삼각형 래버린스 위어의 형상별 위어의 수심유지 범위

형상	수심유지 위치	H_t/P 범위
$\alpha = 6^\circ$	위어 시점부($D/S = 1.0$)	$0.31 \leq H_t/P < 0.75$
	위어 종점부($D/S = 0.5$)	$0.27 < H_t/P < 0.31$
	위어 종점부($D/S = 0.0$)	$H_t/P \leq 0.27$
$\alpha = 8^\circ$	위어 시점부($D/S = 1.0$)	$0.29 \leq H_t/P < 0.75$
	위어 종점부($D/S = 0.5$)	$0.21 < H_t/P < 0.29$
	위어 종점부($D/S = 0.0$)	$H_t/P \leq 0.21$
$\alpha = 10^\circ$	위어 시점부($D/S = 1.0$)	$0.30 \leq H_t/P < 0.75$
	위어 종점부($D/S = 0.5$)	$0.18 < H_t/P < 0.30$
	위어 종점부($D/S = 0.0$)	$H_t/P \leq 0.18$
$\alpha = 15^\circ$	위어 시점부($D/S = 1.0$)	$0.33 \leq H_t/P < 0.75$
	위어 종점부($D/S = 0.5$)	$0.15 < H_t/P < 0.33$
	위어 종점부($D/S = 0.0$)	$H_t/P \leq 0.15$
$\alpha = 25^\circ$	위어 시점부($D/S = 1.0$)	$0.37 \leq H_t/P < 0.75$
	위어 종점부($D/S = 0.5$)	$0.08 < H_t/P < 0.37$
	위어 종점부($D/S = 0.0$)	$H_t/P \leq 0.08$
$\alpha = 35^\circ$	위어 시점부($D/S = 1.0$)	$0.41 \leq H_t/P < 0.75$
	위어 종점부($D/S = 0.5$)	$0.08 < H_t/P < 0.41$
	위어 종점부($D/S = 0.0$)	$H_t/P \leq 0.08$

이 증가하였으며, 위어 종점부로 갈수록 수심이 점차 감소되는 경향을 나타냈다. 수심은 α 의 전범위에 대해서 위어 시점부까지는 거의 일정하게 유지되었으며, α 와 H_t/P 가 증가할수록 위어 시점부에서 종점부까지 급한 경사로 감소하는 경향을 나타냈다. 래버린스 위어의 수리특성 중 하나인 수심유지 효과를 분석하기 위해 표 4에 삼각형 래버린스 위어의 형상에 따라 수심이 유지되는 H_t/P 범위로 나타냈다.

표 4에 나타난 바와 같이, 삼각형 래버린스 위어의 경우에는 수심이 유지되는 범위가 대체로 벽면과의 각, α 가 증가할수록 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

수심유지효과가 위어 시점부까지 나타나는 경우($D/S=1.0$ 일 때), 즉 위어 시점부에서 α 가 증가함에 따라 수심유지효과가 나타나는 H_t/P 의 범위가 좁아지는 경향을 나타냈다. 또한, 수심유지효과가 위어 종점부까지 나타나는 경우($D/S=0.5$ 일 때), α 가 증가함에 따라 수심유지효과가 나타나는 H_t/P 의 범위가 넓어졌다. 이러한 결과는 래버린스 위어의 월류량 증가에 의해 H_t/P 가 감소되는 것에서 기인한 것으로 분석되었다.

또한, 위어 시점부까지는 H_t/P 전 범위에서 수심유지 효과가 발생하였으며, H_t/P 가 α 에 따라 0.27에서 0.41 범위까지 형상별로 위어 종점부까지 수심이 유지되는 것으로 나타났다. 또한, 위어의 종점부까지 수심유지 효과가 나타나는 H_t/P 의 범위는 α 가 증가함에 따라 0.27에서 0.08까지 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 수심유지가 필요한 수공구조물 설계의 기초자료로 활용 가능할 것으로 사료된다.

4.1.3 삼각형 래버린스 위어의 수심유지 범위 산정

본 연구에서 수심유지 효과에 대해 공학적으로 의미가 있는 것은 전 구간에 대해 수심을 일정하게 유지하는 범위를 제시하는 것이므로, 표 4를 이용하여 위어 종점부까지 수심유지 효과가 나타나는 삼각형 래버린스 위어의 α 에 따른 H_t/P 의 범위를 정량적으로 분석하여 제시하였다.

또한, 위어 종점부까지 수심이 유지되는 각 α 에 대한 H_t/P 의 상한값을 그림 7에 도시하였다. 본 연구에서는 삼각형 래버린스 위어의 α 에 따른 일정한 수심유지가 가능한 H_t/P 범위를 제안하기 위해 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석은 일

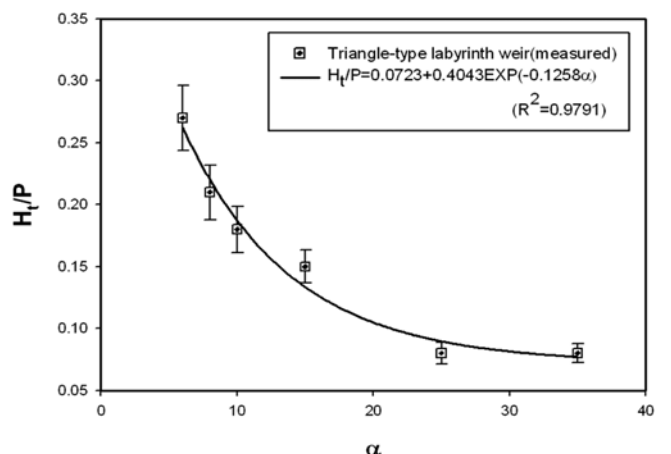


그림 7. 삼각형 래버린스 위어에서 수심이 유지되는 H_t/P 의 범위

반적인 감쇄현상을 나타내는 감쇄 지수 함수를 이용하였으며, 분석된 식은 식 (3)으로 유도되었다.

$$H_t/P = 0.0723 + 0.4043 \text{EXP}(-0.1258\alpha) \quad (3)$$

본 연구에서 유도된 식 (3)은 수리모형실험에 의한 자료에 의해 회귀된 값이므로 이와 관련된 오차를 포함하게 된다. 관련된 오차는 수심 측정에 의한 오차가 Weber 상사법칙에 의해 분석한 결과, 약 5%내외이며 속도 측정에 의한 오차는 약 2%에서 3%정도로 대략 10%이내의 오차가 발생될 것으로 분석되었다. 그림 7에 나타낸 바와 같이 유도된 회귀식의 결정계수(R^2)가 0.9791이고, 각 측정된 H_t/P 의 오차막대(Error-Bar)를 10%로 도시한 결과, 5%에서 10%의 범위내에서 추세선이 통과되므로 회귀식은 적절한 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시된 식은 삼각형 래버린스 위어의 α 에 따른 다양한 형상에 대해 수심이 일정하게 유지되는 H_t/P 의 범위를 제공할 수 있으므로, 일정한 수심 유지 기능이 필요한 수공구조물인 운하나 관개시설 등 기초설계에 이용이 가능할 것이다. 또한, 제시된 식 (3)에서 H_t/P 는 일반적인 설계 조건에서 설계수심과 유속에 의해 결정되므로, α 를 이용한 삼각형 래버린스 위어의 형상에 대한 설계제원을 산정하는데 활용할 수 있다고 사료된다.

4.2 수치모의 결과 및 분석

본 연구에서 모의된 래버린스의 3차원 대표적인 형상은 수면형상(fraction of fluid)를 이용하여 그림 8(a)에 나타냈으며,

수리모형실험 결과와 유사한 경향을 나타내며 월류량이 적절히 하류부로 배제되고 있는 것으로 나타났다. 그림 8(b)에서 그림 8(d)에 삼각형 15° 래버린스 위어의 3차원 유속분포를 나타냈으며, 산정된 압력수두를 이용하여 삼각형 15° 래버린스 위어 중앙부의 종방향 수심을 환산하였다. 수리모형실험을 통해 측정된 삼각형 래버린스 위어의 수심변화를 수치모의에 의한 수심변화와 비교 분석하였다.

본 연구에서는 수리모형실험과 수치모의의 수심변화를 비교하기 위해 실험치에 대한 오차막대(Error-Bar)를 h/P 에 대해 $\pm 5\%$ 오차로 도시하고, 삼각형 래버린스 위어 상의 변화를 분석하기 위해 D/S 변화에 대해 그림 9와 같이 도시하였다. 또한 수치모의에 의해 수행된 수심변화는 수치모의 결과가 수리모형 실험과 유사하게 정상 상태(steady flow)에 도달할 수 있도록 모의 시간을 충분히 크게 적용하였다(최소 10²초 이상으로 적용).

그림 9에 나타난 바와 같이, 대부분 수치 모의된 수심이 측정된 수심보다 다소 작게 나타났으며, 수심변화가 유사한 경향을 나타냈다. 수치모의된 수심변화가 $\alpha = 8^\circ$ 인 경우에서 위어 종점부 제외하면 대부분의 경우 $\pm 5\%$ 의 범위 내에서 발생하는 것으로 나타났다.

수치모형의 특성상 실험 범위 이외에 폭 넓은 해석조건을 적용할 수 있으므로 해석 범위 및 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 분석되었다. 또한, 수치모의와 수리모형실험 사이의 오차는 수치모의가 수리모형실험의 표면장력, 조도계수 및 기타 영향인자에 대한 차이로 발생하는 것으로 추측되었으며, 수치모의만으로는 래버린스 위어의 수심변화를 세밀하게

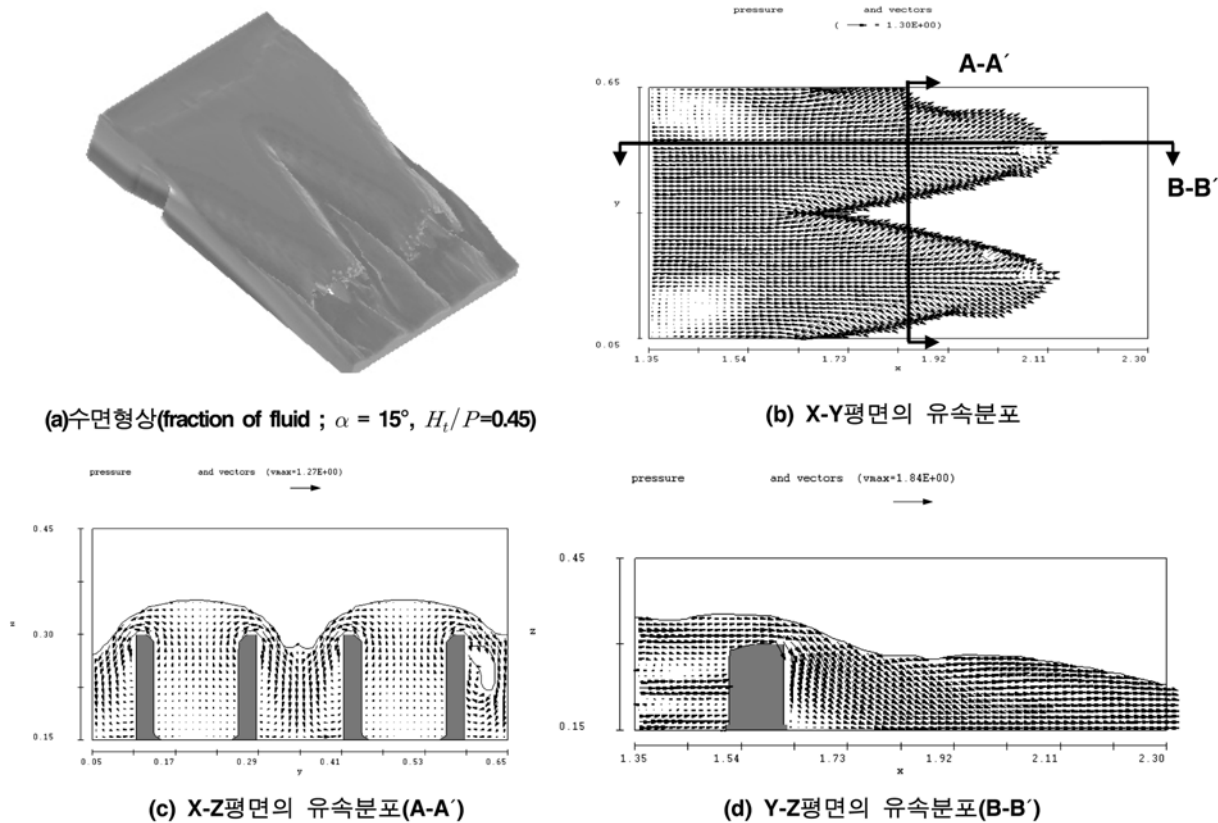
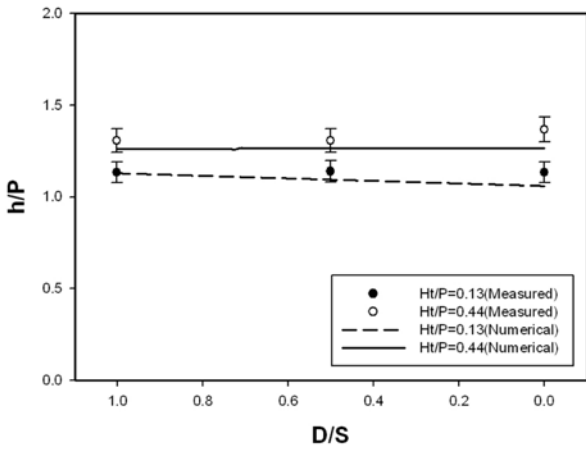
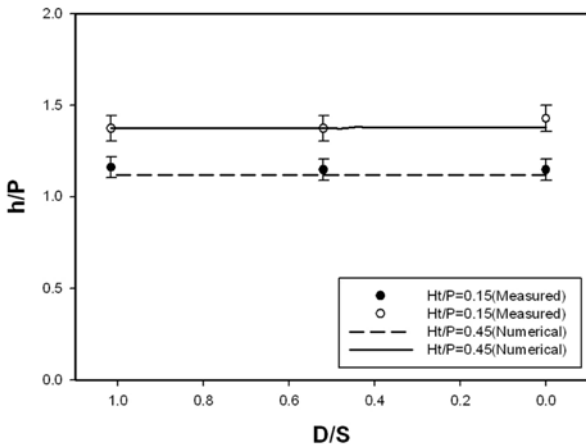


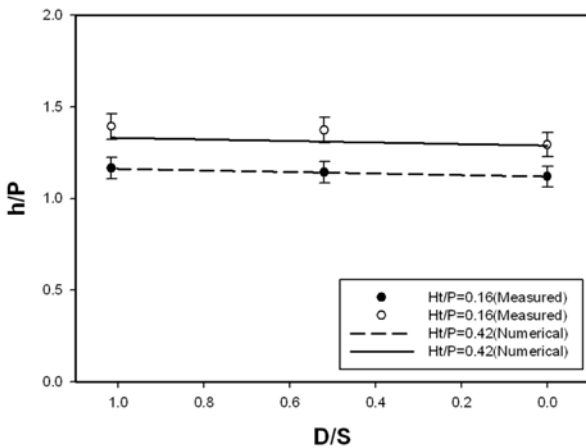
그림 8. $\alpha = 15^\circ$ 인 삼각형 래버린스 위어의 유속분포($H_t/P = 0.45$)



(a) $\alpha = 8^\circ$ 인 경우 수심변화 비교



(b) $\alpha = 15^\circ$ 인 경우 수심변화 비교



(c) $\alpha = 35^\circ$ 인 경우 수심변화 비교

그림 9. 수리모형실험 및 수치모의 결과 비교

모의하기에는 다소 한계성이 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서 수행된 삼각형 래버린스 위어의 수심유지 효과에 대한 수리모형실험 및 수치모의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구의 수리모형실험 결과, 일반 선형위어보다 삼각

형 래버린스 위어가 수심유지 효과가 우수한 것으로 분석되었다. 삼각형 래버린스 위어의 수심변화는 H_t/P 가 증가함에 따라 수심이 증가했으며, 위어 종점부로 갈수록 수심이 점차 감소되는 경향을 나타냈다. 수심은 α 의 전 범위에 대해서 위어 시점부까지는 거의 일정하게 유지되었으며, 위어 시점부에서 종점부까지 급한 경사로 감소하는 경향을 냈다.

(2) 삼각형 Labyrinth 위어의 수심유지 효과를 분석한 결과, 위어 시점부까지는 H_t/P 전 범위에서 수심유지 효과가 발생하였으며, H_t/P 가 α 에 따라 0.27에서 4.31 범위에서는 위어 종점부까지 수심이 유지되는 것으로 나타났다. 또한, 위어의 종점부까지 수심유지 효과가 나타나는 H_t/P 의 범위는 α 가 증가함에 따라 0.27에서 0.08까지 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 수심유지가 필요한 수공구조물 설계의 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

(3) 본 연구에서 제안된 회귀식은 결정계수(R^2)가 0.9791이고 5%내외 오차를 나타내어 삼각형 래버린스 위어의 α 에 따라 수심이 일정하게 유지되는 H_t/P 의 범위를 제공할 수 있다. 또한, 이러한 결과는 일정한 수심 유지 기능이 필요한 수공구조물 설계에 이용이 가능할 것이다. 제안된 회귀식에서 H_t/P 는 일반적인 설계 조건에서 설계수심과 유속에 의해 결정되므로, α 를 이용한 삼각형 래버린스 위어의 형상에 대한 설계제원을 산정하는데 활용할 수 있다.

(4) 삼각형 래버린스 위어에 대한 수리모형실험 및 수치모의 결과를 비교한 결과, 수치모의된 수심변화가 5%의 범위 내에서 발생하는 것으로 나타나 수치모의가 수리모형실험 결과 및 수리특성을 적절히 반영하는 것으로 분석되었으며, 또한 수치모의 및 수리모형실험 결과, 제시된 회귀식을 동시에 활용한다면 일정한 수심유지가 필요한 수공구조물의 보다 효율적인 설계에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 박세훈, 문영일 (2007) 측수로형 여수로의 홍수배제 능력증대를 위한 월류부 개축방안에 관한 연구. 한국방재학회 논문집, 한국방재학회, 제7권, 제3호, pp. 9-18.
- 임장혁 (2007) 래버린스 위어의 유량계수 산정, 박사학위 논문, 홍익대학교.
- 최태훈 (1987) 댐 월류량 증대를 위한 Labyrinth 웨어의 수리학적 특성에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 연세대학교.
- Aminipouri, B., and Valentine, E.M. (1994) Numerical modeling of labyrinth spillway. 2nd International Conference on Hydraulic

- Modeling*, Stratford-upon-Avon, U.K., June.
- Bruce S., Kathleen F., and Jimmy C. (2004) *Brains versus Brawn: The Changing World of Hydraulic Model Studies*. Hydraulic lab of Mcneese state university.
- Falvey, H., T. (2003) *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*. ASCE PRESS. pp. 1-45.
- Flow Science, Inc. (2003) *FLOW-3D User's Manual*. Los Alamos, New Mexico.
- Hay, N., and Taylor, G. (1969) A computer model for the determination of the performance of labyrinth weirs. *13th Congress of the International Association for Hydraulic Research*, Kyoto, Japan, Sept.
- Hay, N., and Taylor, G. (1970) Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 96, No. 11, pp. 2337-2357.
- Lux, F., and Hinchliff, D.L. (1985) Design and construction of labyrinth spillways. *15th Congress ICOLD*, Vol. IV, pp. 249-274.
- Taylor, G. (1968) *The performance of labyrinth weirs*, Ph.D Dissertation, University of Nottingham, Nottingham, England.
- Tullis, J.P. and Amanian, N. and Waldron, D. (1995) Design of labyrinth spillways. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 3, pp. 247-255.
- Tullis, B.P., Willmore, C.M., and Wolfhope, J.S. (2005) Improving Performance of Low-Head Labyrinth Weirs. *World Water Congress 2005*.
- Tullis, B.P., Young, J.C., and Chandler, M.A. (2007) Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 3, pp. 248-254.

© 논문접수일 : 08년 12월 03일
 © 심사의뢰일 : 08년 12월 04일
 © 심사완료일 : 09년 05월 27일