

래버린스 웨어를 적용한 측수로형 여수로의 홍수배제능력 및 수리학적 특성 연구

A Study on Flood Discharge Capacity and Hydraulic Characteristic of Labyrinth Weir as a Side-Channel Spillway

박 세 훈* / 문 영 일**

Park, Sae Hoon / Moon, Young-Il

Abstract

The small and medium sized dams have the fill dam type of a lot of occasions, which are often weak in cases of major floods. For this reason, although a countermeasure is in great need, due to the importance of the facilities and financial situations, no direct safety measures have been taken. In this study, in order to minimize construction expenditure for practical safety measures in cases of major floods, the overflow section of spillway has been analyzed focusing on how the overflow capacity will increase in the case of partially rebuilding a part of the overflow section of spillway favorable for hydraulic conditions. The Labyrinth weir and movable weir was chosen for reconstruction models of the overflow section. Moreover, for analyzing the after-effects of the reconstruction, a small scale dam was temporarily chosen for various experiments such as the hydraulic model testing and the three dimension numerical evaluation through the use of Flow-3D.

keywords : Side-channel Spillway, Linear Weir, Labyrinth Weir, FLOW-3D, Nappe Interference, Submergence, Headwater Ratio, Rating Curve, Reservoir Routing

요 지

국내 농업용수 댐은 약 18,000개로 추산되는데 거의 대부분이 월류에 취약한 필댐이다. 여수로 형식은 자연월류 측수로형 여수호가 99%인 것으로 추산되고 있다. 본 연구에서는 댐의 홍수배제능력을 증대시키기 위한 방법의 하나로 측수로형 여수로의 선형웨어 부분을 래버린스 웨어로 개축할 경우 어느 정도의 방류량 증대효과가 발생하는지를 분석하였다. 분석방법은 저수용량 크기별로 5개의 댐을 임의 선정하여 수리모형실험과 Flow-3D를 이용한 3차원수치해석을 통해 월류수심별 방류량을 산정하였고, 확률홍수량과 가능최대홍수량(PMF)에 대한 저수지홍수추적을 실시하여 개축 전·후의 최고수위를 비교하였다. 분석결과 래버린스 웨어는 홍수유입초기에 방류량 증대효과가 있어서 선형웨어에 비해 홍수시 최고수위를 200년 확률홍수량 유입시 13.8~43.7%, 500년 확률홍수량 유입시 13.9~38.3%, PMF 유입시 6.1~9.6% 정도 저하시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 측수로형 여수로, 선형 웨어, 래버린스 웨어, FLOW-3D, 수맥간섭, 잠류현상, 수두비율, 수위-방류량 곡선, 저수지 홍수추적

* 정희원 · 한국시설안전기술공단 수리시설실 팀장, 서울시립대학교 토목공학과 박사
Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Hydraulic Structures Inspection Division, General Manager,
The University of Seoul, Department of Materials Science and Engineering, Ph.D
(e-mail: shpark@kistec.or.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 교수
The University of Seoul, Department of Materials Science and Engineering, Professor (e-mail: ymoon@uos.ac.kr)

1. 서 론

국내 농업용수 댐은 약 18,000여개로 추산되는데 거의 대부분이 월류에 취약한 필댐이고, 과거 설계기준에 의해 건설되어 홍수방어능력이 부족하여 대책마련이 시급한 상황이다. 최근 한국수자원공사와 한국농촌공사에서 치수능력증대사업을 활발히 추진 중에 있는데, 구조적인 홍수대책방안으로 보조여수로 신설, 여수로 확장 및 상류에 홍수조절용 댐 신설 등의 대책이 제시 및 시공되고 있으나 이러한 대책들을 중규모 이하 댐에까지 적용하기에는 예산확보 및 환경적인 측면에서 현실적으로 어려운 점이 있다. 본 연구에서는 시설물의 중요도 및 예산형편 등을 이유로 안전의 사각지대에 놓여있는 중·소규모 댐들에 대하여 사업비와 환경훼손을 최소화할 수 있는 현실적인 홍수대책을 강구하고자 국내 시공 사례가 없는 래버린스 웨어(labyrinth weir)를 여수로에 적용해 보았다.

래버린스 웨어에 관한 연구를 살펴보면 최태훈(1987)은 웨어의 기하학적 매개변수와 흐름조건을 변화시켜 차원해석과 수리모형실험을 수행하여 이러한 매개변수와 유량비, 효율과의 관계를 도표화하고 수자원의 치수를 위한 설계 기본자료를 제시하였다. Yildiz, D. and Uzucek, E. (1996)는 수리모형실험을 통해 Ungated 여수로와 래버린스 여수로를 비교하여 증대효과를 비교해 보았으며, Tullis et al.(1994)은 수리모형실험과 수치해석을 통해 수두비율이 0.9를 초과하게 되면 래버린스 웨어의 기능이 급격히 감소하게 된다고 하였다. 상기 연구논문들에서는 래버린스 웨어의 유리한 단면과 방류능력을 연구 발표하였다. 그러나 실제 여수로에 적용했을 경우 홍수 시 저수지 최고수위를 어느 정도 낮출 수 있는지에 대해서는 연구된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 래버린스 웨어를 여수로에 적용했을 경우의 수리학적 특성을 분석하였고, 특히 국내 여수로의 99%(농림부, 2003)를 차지하는 자연월류 측수로형 여수로에 적용해 보았다. 분석방법은 우선 래버린스 웨어를 시험 적용하기 위한 댐을 저수용량 크기별로 5개 선정하였고, 각 댐에 대하여 FLOW-3D를 이용하여 기존의 선형 웨어와 래버린스 웨어에 대한 월류 수심별 방류량을 산정하였다. 또한 FLOW-3D의 신뢰도를 검증하기 위하여 1개 댐에 대해서 수리모형실험을 병행하였다. 마지막단계로 래버린스 웨어의 개선효과를 분석하기 위하여 5개 댐 유역에 대한 강우량과 홍수량을 산출한 후 저수지홍수추적을 통해 선형 웨어와 래버린스 웨어의 저수지 최고수위를 비교함으로써 홍수 시 수위저감효과를 분석하였다.

2. FLOW-3D 및 수리모형실험을 통한 래버린스 웨어의 수리학적 특성분석

2.1 개요

기존 측수로형 여수로에 래버린스 웨어를 적용했을 경우에 대한 홍수배제능력을 분석하기 위하여 시험적용할 댐을 저수용량 크기별로 5개 댐을 임의 선정하였다. 개선효과를 분석하기 위해서는 래버린스 웨어를 적용했을 경우 홍수시 저수지 최고수위를 당초보다 어느 정도 저감시킬 수 있는가를 저수지홍수추적을 통해 확인할 필요가 있다. 이를 위해서는 기존 선형 웨어와 래버린스 웨어에 대해서 수위-방류량 곡선(rating curve)이 산출되어야 하므로 FLOW-3D를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 또한 수치해석의 신뢰성을 검증하기 위하여 수리모형실험을 병행하였다. 수치해석으로는 5개 댐을 분석하였고, 수리모형실험은 5개댐 중에서 중규모 댐에 가장 가깝고 모형축척을 가능한 크게 하기 위하여 대수호지를 대상으로 실시하였다. 댐 선정기준은 자연월류 측수로형 여수로를 갖는 필댐으로 제한하였고, 유효저수량은 1천5백만 m^3 이하에서 저수량 크기별로 임의 선정하였다. 해당 댐의 주요제원은 Table 1과 같다.

2.2 FLOW-3D를 이용한 수치해석

2.2.1 FLOW-3D의 기본이론

FLOW-3D는 X, Y, Z 방향의 유속을 모두 고려하여 수치모의를 수행하는 3차원 모형으로서 자유수면을 가지는 개수로 흐름, 정상+비정상 유동해석, 층류 및 난류 해석, 뉴턴 및 비뉴턴 유체계산, 압축성 및 비압축성 유체계산 그리고 열전달 해석이 가능하다. 미국 Flow Science, Inc.에서 개발한 상용 CFD 모형으로 Los Alamos National Laboratory에서 개발된 MAC(Marker and Cell) 방법과 SOLA-VOF방식을 기초로 하고 있다 (Flow Science, 1999). 해석방법은 기본적으로 비정상 유동상태에서 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열·유동해석에 이용하며 유체로부터 또는 유체로의 열전달에 의한 고체내의 온도는 열전달에 의한 에너지 교환을 에너지 방정식 생성항으로 사용하여 해석하고 있다. 또한 유체의 난류 유동에는 기본대수 모형으로부터 RNG(ReNormalization Group)모형까지의 다양한 난류방정식을 선택할 수 있으며 자유표면 해석을 위해 VOF(Volume of Fluid)방정식이 사용되고 있다. 직각형상 격자계 사용 시 일반 형상 기술보다 정확히 하기 위해 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method) 기법을 각

Table 1. Specifications of 5 Dams

Dams	Location	Area (km ²)	Effective Storage (10,000 m ³)	Height (m)	Length (m)	Type of Spillway	Length of Spillway(m)
Daesooho	Gyeongbuk Uljin	11.30	300.0	29	240	Side Channel	53
Mabuk	Gyeongbuk Pohang	16.00	550.3	46.3	286	Side Channel	67
Yeongyon	Gyeongbuk Pohang	68.92	696.1	20.8	203	Side Channel	192
Wonnam	Chungbuk Eumseong	75.70	833.5	26.7	205	Side Channel	150
Guangju	Jeonnam Damyang	43.60	1,520.0	25	505	Side Channel	60

방정식에 적용하고 있으며 비압축성 및 압축성의 계산 시 해석 속도를 증진시키기 위해 별도의 보조 방정식을 사용하고 있다. FLOW-3D는 기본 FDM(Finite Difference Method)방식에 FAVOR를 도입한 FVM(Finite Volume Method)형식을 취하고 있으며 해석 영역을 작은 3차원 셀로 나누어 각 셀에 대해서 주어진 압력에 따른 시간에 대한 외재적 전진으로 다음 시간에서의 속도를 구하며 이 속도를 이용하여 Poisson 방정식 형태의 압력방정식 해를 구한 다음 다시 속도를 교정해주고 그 후에 자유표면의 해석이 요구될 때는 VOF 방정식을 풀어나가는 방법을 이용하고 있다.

2.2.2 시험적용 댐별 래버린스 웨어의 설계

대수호지 등 5개댐에 대해서 수치해석을 통한 수위별 방류량을 산정하기 위하여 일차적으로 여수로에 적용할 래버린스 웨어를 설계하였다. 래버린스 웨어의 단면은 Fig. 1과 같은 형상으로 설계하였는데 측벽각도(α)는 수맥간섭의 효과를 고려하여 12°~25° 범위 내에서 댐 별로 다양하게 적용하였고, 웨어의 벽두께는 가로세로비(aspect ratio)를 고려하여 3차원 격자망에서 인식할 수 있도록 0.9 m로 통일하였다. 웨어 높이(P)는 기존의 웨어와 같게 하였고, 수직·가로세로비(vertical aspect ratio, W/P)는 인접측벽과의 수맥간섭을 방지

않도록 8로 하였다. 또한 배율(magnification), 즉 유효 길이($L_e=4a+2B$)와 폭(W)의 비(L_e/W)는 2.0으로 Hay and Taylor(1970)가 제시한 이상적인 배율 제한범위인 $2 \leq L_e/W \leq 4$ 이내의 값을 갖도록 하였다. 시험적용 댐별 래버린스 웨어의 제원은 Table 2와 같다.

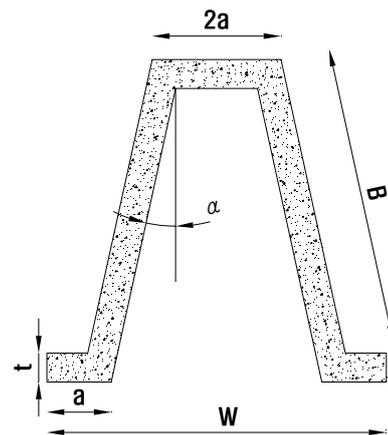


Fig 1. Detail Drawing of Labyrinth Weir

2.2.3 FLOW-3D를 이용한 월류양상 및 방류량 분석

대수호지 등 5개댐에 대한 3차원 수치모의를 수행하기 위해서는 래버린스 웨어의 설계단면을 바탕으로 실제 지형에 근거한 3차원 구조물 및 지형을 생성해야 하

Table 2. Specifications of Labyrinth Weir by 5 Dams

Classification	Shape of Labyrinth	α (°)	a (m)	B (m)	t (m)	n	P (m)	L_e (m)	W (m)	W/P	L_e / W
Daesooho	Trapezoid	25	1.32	9.31	0.9	5	1.5	24	12.0	8	2.0
Mabuk	Trapezoid	15	1.9	17.33	"	5	1.2	42.3	15.2	12.7	2.8
Yeongyon	Trapezoid	18	1.52	10.6	"	18.5	1.4	27.3	11.3	8.1	2.4
Wonnam	Triangle	12	-	27.5	"	12	1.5	55	13.9	9.3	4.0
Guangju	Trapezoid	20	1.5	14.25	"	5	1.6	34.5	14.5	9.1	2.4

Table 3. Initial and Boundary Condition for Numerical Analysis

Classification	Weir crest (EL. m)	Stage(EL. m) - Initial and Boundary Condition for Upstream							Dam crest (EL. m)
Daesooho Reservoir	64.5	65.0	65.5	66.0	66.5	66.9	67.5		68.0
Mabuk Reservoir	164.3	165.0	165.5	166.0	166.45	167.0	167.5		168.3
Yeongyon Reservoir	57.3	58.0	58.5	59.0	59.5	60.0	60.5	61.0	61.5
Wonnam Reservoir	115.7	116.5	117.0	117.5	118.0	119.0			119.0
Guangju Reservoir	74.6	75.2	75.8	76.4	77.0	77.6	78.2	78.4	78.4

므로 전처리단계(pre-process)인 선형 웨어 및 래버린스 웨어의 구조물 및 지형격자를 생성하였다. 초기조건 및 경계조건은 모의대상 영역을 직육면체로 제한하고 각각의 6개면에 대하여 수위 및 압력, 유속 등의 입력 자료에 의해 3차원 흐름해석을 하게 된다. 본 연구에서는 상시만수위부터 자연 월류되는 방식으로 초기 및 경계조건을 주었기 때문에 각 댐에 대해서 Table 3과 같이 상류단은 저수지 수위를 입력하였고, 하류단은 저수지 수위를 지정하지 않고 유출(outflow)되는 방식을 채택하였다. 저수지수위에 따른 여수로의 방류량을 산정하기 위해 댐 하류부에 검사체적을 설치하고 Fig. 2와 같이 수위별 검사체적을 통과하는 방류량을 시간에 따라 연속적으로 측정하여 일정한 값으로 수렴하는 부분(80초~120초)의 평균을 방류량으로 하였다.

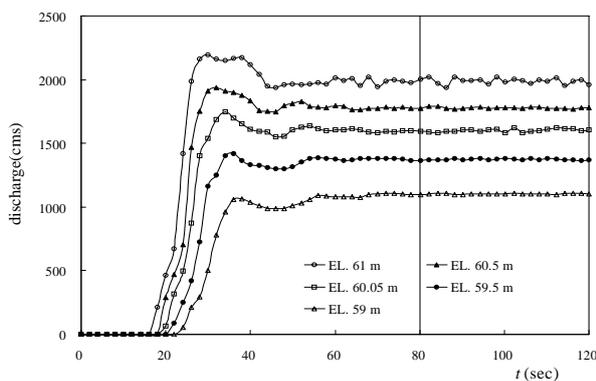


Fig. 2. Estimation of Reservoir Stage and Discharge(Yeongyon)

Fig. 3은 대수호지의 경우로 설계홍수위인 EL. 66.0 m조건에서 월류부 유속을 나타낸 것이고, 선형 웨어의 경우 최대 유속이 2.17 m/s, 래버린스 웨어의 경우 2.3~3.5 m/s의 값을 보였다. 유입부 유속 및 수위가 크게 분포하여 와류와 같은 특이사항은 없는 것으로 분석되었다.

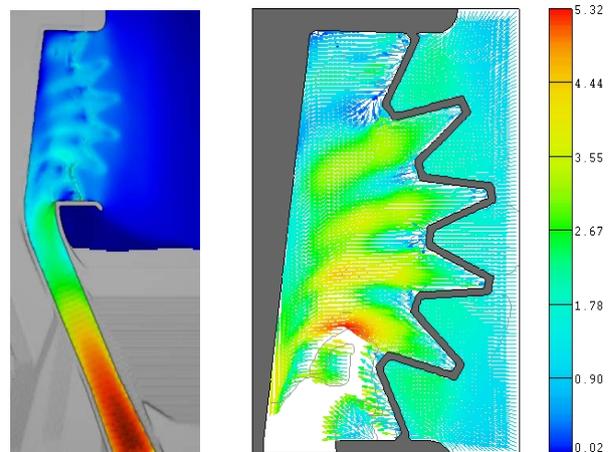


Fig. 3. Velocity Distribution of Labyrinth Weir (Daesooho, Design Flood 66.0 m)

설계홍수위(EL. 66.0 m) 조건에서 선형 웨어와 래버린스 웨어의 월류양상을 보면 Fig. 4와 같이 선형 웨어의 경우 시계방향의 2차류흐름을 보이는 반면 래버린스 웨어는 시계방향과 반시계방향의 난류가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 동일 수위에서 래버린스 웨어의 방류량(266.4 m³/s)이 선형 웨어(220.6 m³/s)보다 120% 더 많이 방류되는 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 측수로형 여수로를 갖는 5개 댐에 대하여 FLOW-3D를 이용하여 방류량을 분석한 결과이다. 댐 별로 약간의 차이는 있으나 공통적으로 초기에는 방류량이 증가추세를 보이다가 Tullis et al.(1994)이 제시한 h/p=0.9 지점부터 감소추세를 보이는 것으로 분석되었다. 그러나 월류수심이 h/p=0.9를 초과하면서 방류량곡선이 감소추세로 바뀌기는 하나 래버린스 웨어의 효과가 전혀 없는 것은 아니고, h/p=1.47~1.71정도에 해당하는 월류수심이 돼서야 선형 웨어의 방류량에 수렴하는 것으로 분석되었다. 또한 저수지 수위가 설계홍수위를 초과하여 월류량이 방류수로의 한계능력을 초과하게 되면 측수로 내의 수위가 상승하게 되고 그로 인해 웨

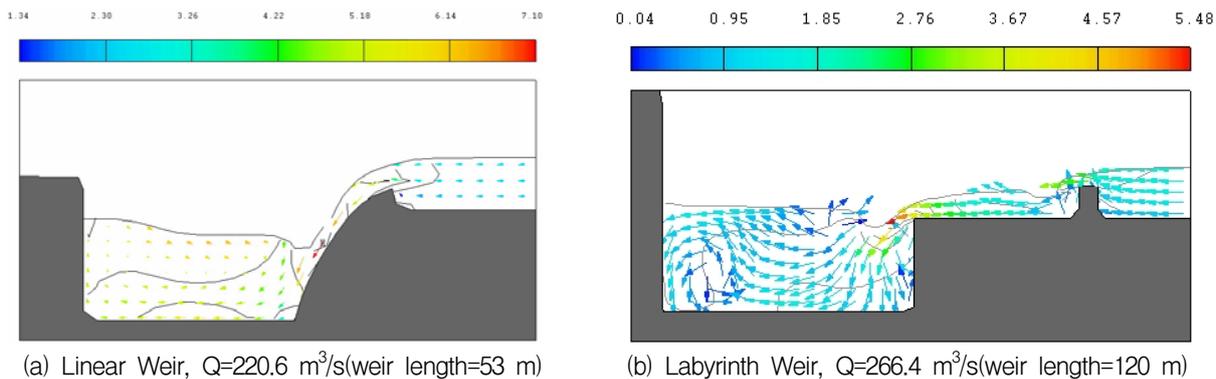


Fig. 4. Comparison of Overflow Aspects between Linear and Labyrinth Weir (Daesooho, Design Flood 66.0 m)

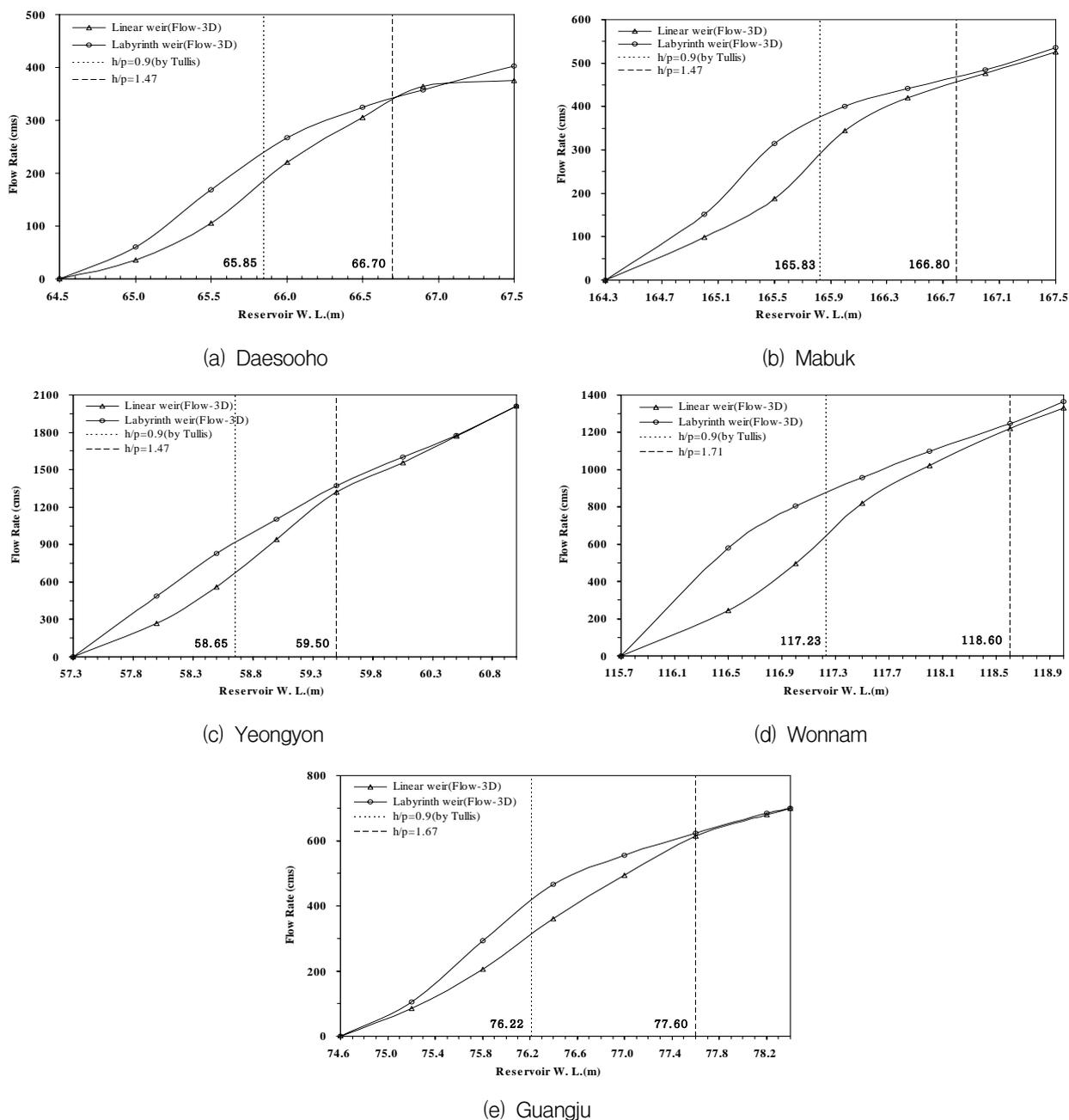


Fig. 5. Water Stage and Discharge Curve by 3D Numerical Analysis for 5 Dams

어의 잠류현상으로 불완전 월류가 발생하면서 수위상승이 짧은 시간에 이루어진다.

2.3 수리모형실험을 통한 FLOW-3D 신뢰도 검증

2.3.1 개요

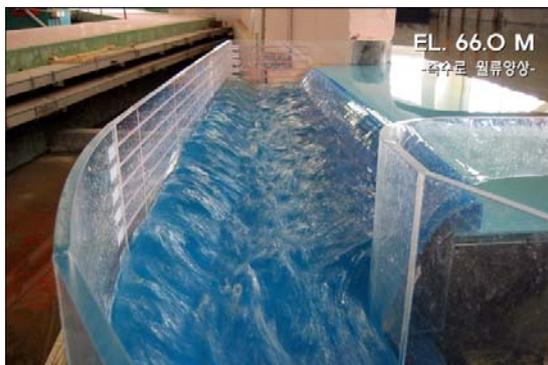
수리모형실험은 FLOW-3D를 이용한 수치해석 결과에 대한 신뢰도를 검증하기 위하여 실시하였다. 실험대상은 5개댐 중에서 중규모 댐에 가장 가깝고 모형축척을 가능한 크게 하기 위하여 대수호지를 선정하였다. 실험할 웨어 형식은 기존의 선형 웨어와 래버린스 웨어에 대하여 실시하였다.

본 실험의 대상인 여수로 흐름은 관성력과 중력이 지배력이 되며, 이때 상사법칙은 Froude 상사법칙을 적용할 수 있다. 상사법칙이란 원형에서 흐름을 지배하는 지배력의 영향을 모형에서 그대로 적용시키는 것이므로 모형에서도 원형과 같은 지배력이 흐름을 지배해야 한다. 그러나 모형이 과소한 경우 수심이 너무 작아져서 점성력의 지배를 무시할 수 없게 되는 경우도 있다. 이러한 바람직하지 못한 축척효과(scale effect)를 배제하기 위해서는 축척을 결정할 때 원형과 모형에서의 흐름 상태가 같은 지배력의 상관관계 하에 있도록 모형에서 일정치수를 보장해 줄 필요가 있다. “점성력을 무시하

려면 모형의 Reynolds 수가 1×10^4 보다 커야 한다” 혹은 “압거의 경우 직경이 100 mm 이상 보장되어야 한다” 등 (USB, 1980) 이러한 제한조건에 대해서는 이미 많은 연구를 통해 알려져 있다. 또한 USBR에서는 다양한 모형실험을 통하여 대댐의 여수로는 1/30~1/100의 범위를 그리고 하천모형실험은 일반적으로 수평축척의 경우 1/100~1/1,000, 왜곡모형에서의 연직축척은 1/20~1/100을 추천하고 있다. 본 수리모형실험에서는 월류수심 조건 및 모형의 크기, 순환 실험용수량 등을 고려하여 축척 1/40의 광역모형을 제작하였다.

2.3.2 수리모형실험

실험결과 Fig. 6과 Fig. 7의 월류양상에서 알 수 있듯이 선형 웨어와 래버린스 웨어 모두 설계홍수위를 초과하면서부터 측수로 내의 수위가 높아져 잠류현상(불완전 월류)이 발생하게 되고 그로 인해 방류량의 증가 폭이 둔화되는 것으로 나타났다. 래버린스 웨어의 경우 Tullis et al.(1994)이 제시한 $h/p=0.9$ 가 되는 EL. 65.85 m 전후에서 각 래버린스 간에 수맥간섭이 발생하는 것을 확인되었으나 그렇다 하더라도 $h/p=1.3$ 이 될 때까지는 선형 웨어 보다 더 많은 방류가 이루어지는 것으로 측정되었다. 그러나 홍수위를 초과한 EL 66.5 m부터는



(a) front view



(b) side view

Fig. 6. Overflow Aspects of Linear Weir (Flood Water Level 66.0 m)



(a) water level 65.0 m



(b) flood water level 66.0 m

Fig. 7. Overflow Aspects of Labyrinth Weir (Water Level 65.0 m & 66.0 m)

수맥간섭 및 잠류현상으로 인해 효과가 없는 것으로 나타났다. 또한 측수로 내 수위는 저수지 수위가 설계 홍수위를 초과한 EL. 66.5 m 전후에서 측수로 용벽을 월류하는 것으로 나타났다.

2.3.3 FLOW-3D 및 수리모형실험결과 비교분석

측수로형 여수로를 대상으로 기존의 선형 웨어 대신에 래버린스 웨어를 적용했을 경우에 대하여 FLOW-3D를 이용한 수치해석과 수리모형실험을 통해 월류양상, 측수로 내 수위 및 방류량 등을 분석하였다. Table 4와 Fig. 8은 FLOW-3D와 실험을 통해 구한 선형 웨어와 래버린스 웨어의 수위별 방류량을 비교한 결과이다. FLOW-3D를 이용하여 구한 저수지 수위별 방류량이 실험을 통해 구한 값과 근사한 결과를 보여 수치해석결과가 신뢰성이 있는 것으로 확인되었다. 한편 EL. 66.9m 이상되는 수위에서는 수치해석 값이 실험값보다 작게 나타나는데 그 이유는 실험에서는 웨어를 월류한

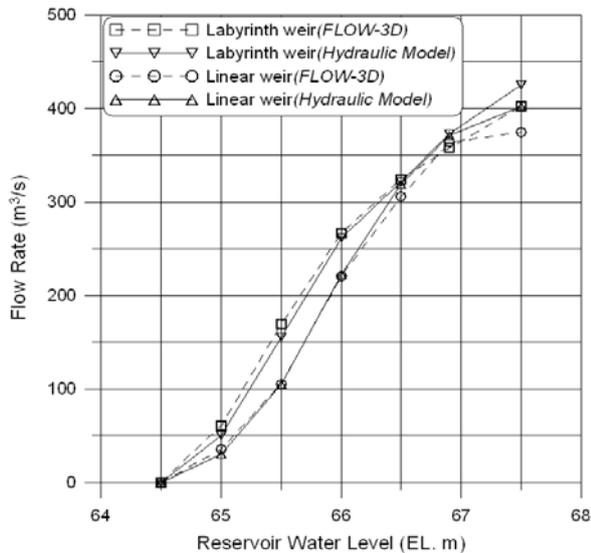


Fig. 8. Comparison of Water Stage and Discharge by Numerical Analysis and Hydraulic Model Experiments (Daesooho)

Table 4. Comparison of Water Stage and Discharge by Numerical Analysis and Hydraulic Model Experiments(Daesooho)

Water Level (m)	Linear Weir(m³/s)		Labyrinth Weir(m³/s)	
	Flow-3D	Hydraulic Model	Flow-3D	Hydraulic Model
64.50	0.0	0.0	0.0	0.0
65.00	35.2	30.3	60.2	50.3
65.50	105.0	105.0	168.9	155.0
66.00	220.6	222.1	266.4	261.7
66.50	305.5	319.1	324.5	321.9
66.90	364.0	371.2	357.8	373.2
67.50	374.9	402.8	402.2	424.9

흐름이 전면의 측수로 용벽을 월류하지 않도록 벽체를 충분히 높여서 실험한 반면, 수치해석에서는 실제 측수로 구간의 용벽높이(EL. 65.0~67.0 m)로 해석했기 때문에 저수지 수위가 상기 수위를 초과하게 되면 댐 월류에 앞서 측수로 용벽이 먼저 월류하게 되고 그로 인해 하류검사체적에서 분석되는 방류량이 줄어든 결과로 판단된다.

래버린스 웨어를 측수로형 여수로에 적용할 경우 수위별 방류량은 기존의 선형 웨어에 비해 최대 1.48배 증가하는 것으로 나타나 초기방류효과가 큰 장점이 있는 것으로 분석되었다.

3. 수문분석 및 래버린스 웨어 효과분석

측수로형 여수로에 래버린스 웨어를 적용할 경우 홍수시 최고수위를 어느 정도 저감시킬 수 있는지를 분석하기 위하여 수문분석을 통해 홍수량을 산출하고 저수지홍수추적을 실시하여 래버린스 웨어 적용 전·후의 최고수위를 비교 분석하였다.

3.1 수문분석

시험적용 댐별 강우자료는 대수호지는 울진(1971~2003년), 마북지와 용연지는 포항(1961~2004년), 원남지는 청주(1967~2004년), 광주호는 광주(1961~2004년) 관측소의 시우량 자료를 수집하여 빈도분석하였다. 빈도분석에 적용한 확률분포형은 Gamma, GEV 등 13개의 분포형을 적용하였고, 매개변수 추정은 확률가중모멘트법(Probability weighted moment method), 적합도 검정은 χ^2 검정, Kolomogorov-Smirnov 검정, Cramer-Von Mises검정, PPCC 검정법 등을 이용하였다. 또한 가능최대강수량은 '전국 PMP도 재작성 부도(건설교통부, 2004)'를 이용하였다.

홍수량 산출은 Clark 단위도법을 사용하였고, 도달시간은 Kraven I공식, Kraven II공식, Rizha 공식,

Table 5. Estimation of Flood Discharge by 5 Dams

Classification	Design Flood Discharge(m ³ /s)	Simulated Flood Discharge(m ³ /s)				
		Duration(h)	100 yr	200 yr	500 yr	PMF
Daesooho	207	6	153	190	251.4	436
Mabuk	313.87	6	243.0	269.7	305.6	548.5
Yeongyon	543.2	9	689.4	770.3	877.4	1,560.4
Wonnam	-	15	544.0	596.8	682.2	1,575.3
Guangju	495	6	546.7	600.7	675.4	1,599.1

Kirpich 공식 등을 이용하였으며, 저류상수(K)는 Clark 단위도법에서 일반적으로 이용하는 Sabol(1988)이 제안한 식으로 산정하였다. 강우의 시간분포는 Huff의 각분위를 사용하여 각 지속시간별 확률홍수량 및 PMF를 산정하였다.

홍수량을 산출하여 설계홍수량과 비교한 결과 Table 5와 같이 대수호지와 마북지는 설계홍수량이 200년 확률홍수량을 약간 초과하는 것으로 분석되었고, 그 외 3개댐은 설계홍수량이 200년 확률홍수량보다 적은 것으로 분석되었다.

3.2 래버린스 웨어 효과분석

래버린스 웨어를 측수로형 여수로에 설치할 경우 저수지 최고수위 저감효과를 분석하기 위하여 수치해석을 통해 구한 수위-방류량 곡선을 이용하여 댐별, 빈도별 홍수량에 대해서 저수지홍수추적을 실시하였다. 공통적으로 200년 및 500년 확률홍수량과 PMF에 대해서 적용 전·후의 저수지 최고수위를 비교한 결과 200년 확

률홍수량이 효과가 가장 크고, 댐의 설계능력을 초과하는 PMF에서 효과가 작은 것으로 나타났다. 대수호지의 경우 래버린스 웨어를 적용한 후의 최고수위 저하율은 200년 확률홍수량 유입시 21.4%, 500년 확률홍수량 유입시 16.7%, 그리고 PMF 유입시 9.6%로 분석되었다. 분석결과를 정리하면 Table 6과 같고, Fig. 9는 200년 확률홍수량에 대한 저수지 홍수추적 결과이다. 한편 유효저수량 및 유역면적의 크기와 개선효과 간에는 특별히 상관관계가 없는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 중·소규모 댐의 여수로 형식 중 가장 많은 측수로형 여수로를 대상으로 선형 웨어를 래버린스 웨어로 개축할 경우의 개선효과를 분석하였다. 분석을 위해 저수용량 크기별로 5개 댐을 임의로 선정하였고, 3차원수치해석과 수리모형실험을 통해 각 댐들에 대한 개축모형별 수위-방류량을 산출하였다. 그

Table 6. Result of Reservoir Routing at Linear Weir and Labyrinth Weir

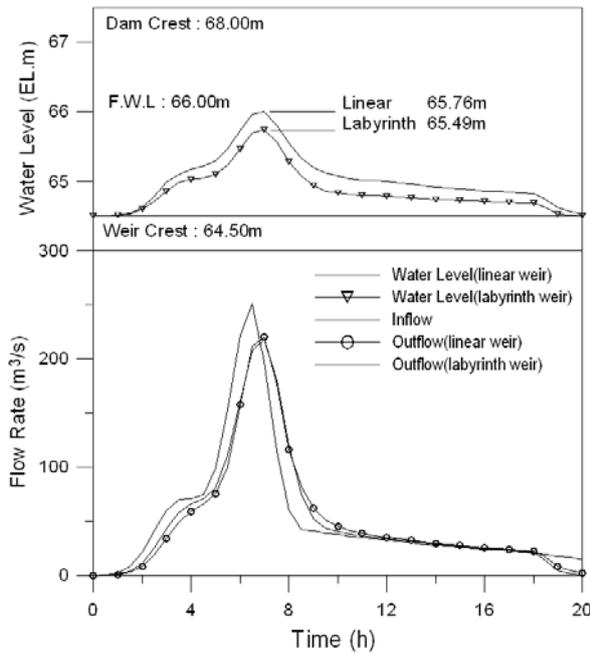
Classification		Daesooho	Mabuk	Yeongyon	Wonnam	Guangju	
Effective Discharge (10,000m ³)		300	550.3	696.1	833.5	1,520	
Initial Stage (Normal Water Level, m)		64.50	164.30	57.30	115.70	74.60	
The Highest Stage (m)	200yr Flood Frequency	Linear Weir	65.76	165.64	58.72	117.12	76.48
		Labyrinth Weir	65.49	165.42	58.41	116.50	76.22
		Reduction of Stage (% rate)	0.27 (21.4%)	0.22 (16.4%)	0.31 (21.8%)	0.62 (43.7%)	0.26 (13.8%)
	500yr Flood Frequency	Linear Weir	66.0	165.78	58.88	117.24	76.69
		Labyrinth Weir	65.75	165.55	58.58	116.65	76.40
		Reduction of Stage (% rate)	0.25 (16.7%)	0.23 (15.5%)	0.30 (19.0%)	0.59 (38.3%)	0.29 (13.9%)
	PMF	Linear Weir	66.9	166.90	59.93	Overflow	Overflow
		Labyrinth Weir	66.67	166.66	59.77		
		Reduction of Stage (% rate)	0.23 (9.6%)	0.24 (9.2%)	0.16 (6.1%)		

리고 각 댐 유역에 대하여 홍수량을 산출한 후 저수지 홍수추적을 통해 개축 전·후의 최고수위를 비교함으로써 래버린스 웨어의 적용효과를 분석하였다.

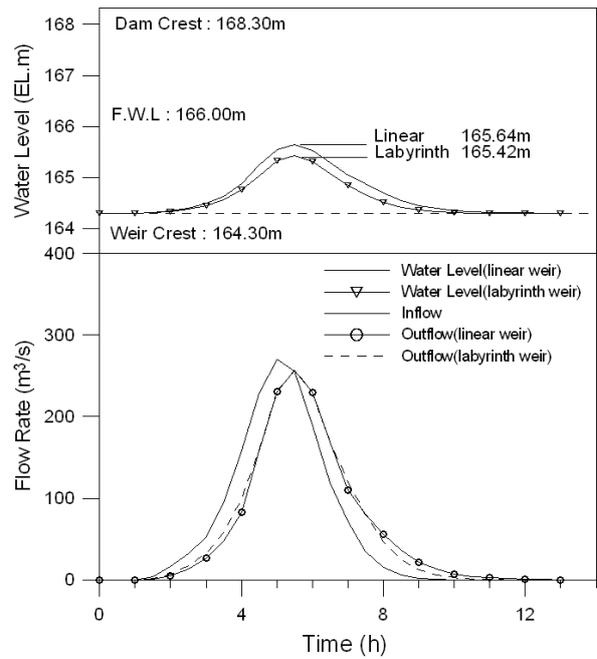
Flow-3D를 이용하여 3차원수치해석에서 구한 방류량과 흐름양상은 수리모형실험결과와 매우 유사하게 나타나 Flow-3D를 이용한 수치해석결과는 신뢰할 만한 수준으로 확인되었다.

래버린스 웨어는 선형 웨어에 비해 유효길이를 더

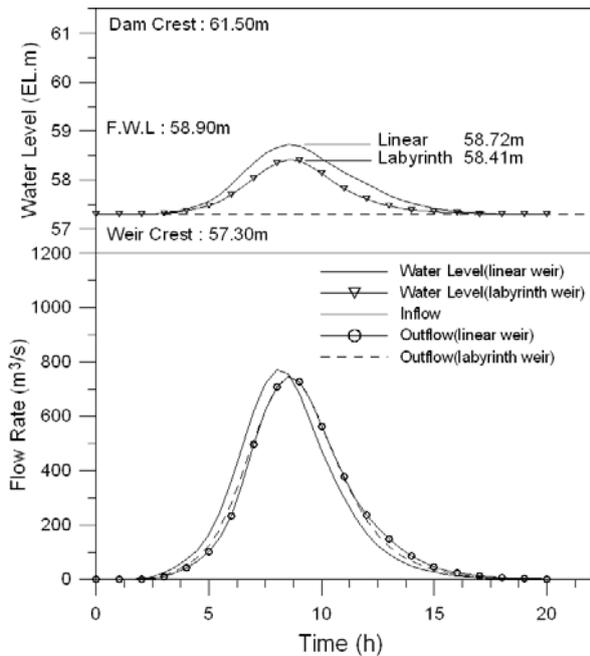
확보할 수 있어서 홍수유입초기에는 방류량 증대효과가 있으나 설계홍수위를 초과하면서 월류수맥의 간섭 및 측수로의 잠류현상(불완전 월류)으로 선형 웨어의 방류량에 수렴하는 것으로 나타났다. 댐별로 약간의 차이는 있으나 공통적으로 초기에는 방류량이 증가추세를 보이다가 Tullis et al.(1994)이 제시한 $h/p=0.9$ 지점부터 감소추세를 보이는 것으로 분석되었다. 그러나 월류수심이 $h/p=0.9$ 를 초과하면서 방류량곡선이 감소추세로 바뀌기



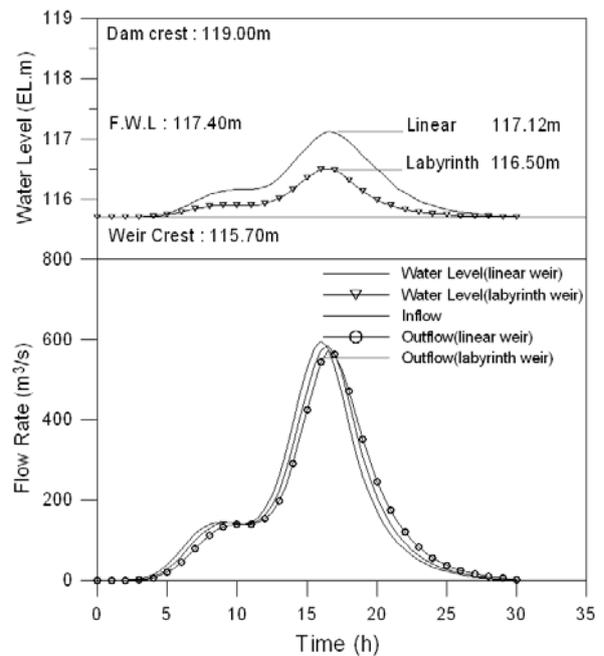
(a) Daesooho Dam (200yr)



(b) Mabuk Dam (200yr)

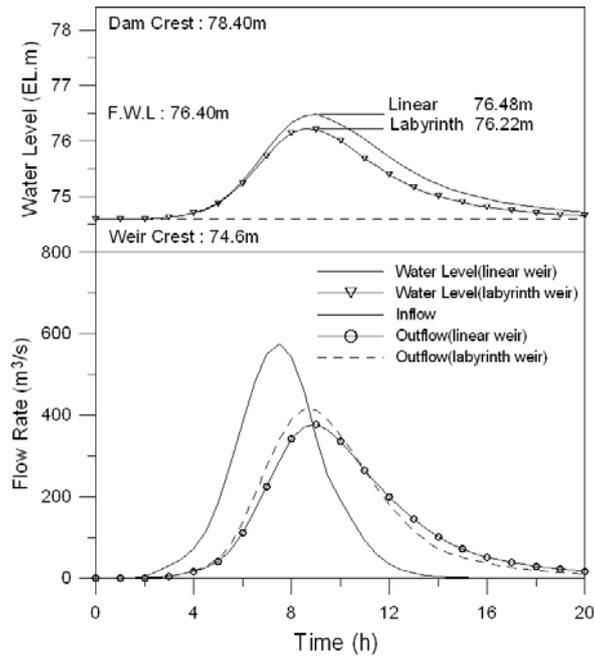


(c) Yeongyon Dam (200yr)



(d) Wonman Dam (200yr)

Fig. 9. Result of Reservoir Routing at Linear Weir and Labyrinth Weir(Continued)



(e) Guangju Dam (200yr)

Fig. 9. Result of Reservoir Routing at Linear Weir and Labyrinth Weir

는 하나 래버린스 웨어의 효과가 전혀 없는 것은 아니었고, $h/p=1.47\sim 1.71$ 정도에 해당하는 월류수심이 돼서 야 선형 웨어의 방류량에 수렴하는 것으로 분석되었다.

저수지홍수추적결과 래버린스 웨어는 선형 웨어 보다 200년 확률홍수량 유입시 13.8~43.7%, 500년 확률홍수량 유입시 13.9~38.3%, PMF 유입시 6.1~9.6%의 최고수위 저하효과가 있는 것으로 분석되었다.

이상과 같이 본 연구는 중규모 이하 댐의 치수능력을 증대시키기 위한 방법의 하나로 측수로형 여수로 월류부를 수리학적으로 유리한 단면으로 개축하는 방법, 즉 기존의 선형 웨어에 래버린스 웨어를 적용할 경우 홍수시 최고수위를 상당부분 저감시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 본 연구결과는 특정 댐들에 적용한 결과이고 실제 적용 시에는 각 댐별로 별도의 분석이 이루어져야 할 것이다.

한편 래버린스 웨어의 월류량은 수두비율(h/P) 및 잠류효과에 지배를 받는 것으로 나타났으므로 이러한 문제를 해결하기 위해 접근수로 바닥을 낮추는 방법, 잠류현상을 줄이기 위해 측수로 바닥을 낮추는 방법 등에 대한 지속적인 연구가 필요하고, 웨어 형식을 현재와 같은 고정식이 아닌 가동 웨어를 설치하는 방법 등에 대해서도 좀 더 다양한 연구가 필요하겠다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2004). 전국 PMP도 제작성 부도, pp 2-14.
 농림부 (2003). 농업생산기반정비사업 통계연보, pp 264-267
 최태훈 (1987). 댐 월류량 증대를 위한 Labyrinth 웨어의 수리특성에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 연세대학교, pp 13-31.
 Flow Science, Inc. (1999). *FLOW-3D User's Manual*.
 Hay, N. and Taylor, G. (1970). "Performance and design of labyrinth weirs." *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 96, No. HY11. pp 2337-2357.
 Sabol, G.V. (1988). "Clark Unit Hydrograph and R-parameter Estimation." *Journal of Hydraulic engineering, ASCE*, Vol 114, No. 1, pp 103-111.
 Tullis, J.P., Nosratollah, A. and Waldron, D. (1995). "Design of labyrinth spillways." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol 121, No. 3, pp 247-255.
 USBR (1980). *Hydraulic Laboratory Techniques*, A Water Resources Technical Publication, pp. 59-60.
 Yildiz, D. and Uzucek, E. (1996). "Modeling the performance of labyrinth spillways." *The International journal on HYDROPOWER & DAMS*, pp 71-76.

(논문번호:07-87/접수:2007.09.03/심사완료:2007.12.26)