



공학석사 학위논문

3차원 자유수면해석을 이용한 사다리꼴 Piano Key (PK) Weir의 방류 능력 평가

Evaluating of Discharge Capacity of Trapezoidal Piano Key Weir using 3D Free Surface Analysis

2023년 8월

서울대학교 대학원

생태조경지역시스템공학부 지역시스템전공

서 예 진

3차원 자유수면해석을 이용한 사다리꼴 Piano Key (PK) Weir의 방류 능력 평가

Evaluating of Discharge Capacity of Trapezoidal Piano Key Weir using 3D Free Surface Analysis

지도교수 최 원

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함 2023년 7월

서울대학교 대학원 생태조경지역시스템공학부 지역시스템전공 서 예 진

서예진의 공학석사 학위논문을 인준함 2023년 7월

- 위 원 장 _____ (인)
- 부위원장 _____ (인)
- 위 원 _____ (인)

국문초록

최근 지구온난화로 인해 이상기후가 빈번하게 발생함에 따라 집중 호우의 강도 증가하게 되어 홍수의 월류로 인한 댐 붕괴의 위험도가 높아지고 있는 실정이다. 재해 대비를 위해 중앙정부에 서 추진하는 치수 능력 증대 사업과 같은 범국가적 대책이 필수적 으로 요구되며, 이를 위한 다양한 구조물적 대책 중 래버린스 위 어 (Labyrinth weir)를 개조한 형태인 Piano key 위어는 여수로의 점유 면적과 관계없이 저비용으로 설치되며 기존 오즈 위어 (Ogee weir)보다 약 4배 이상 높은 방류 능력을 나타내는 큰 장점이 있 는 수리 구조물이다. 하지만 현재 Piano key 위어의 설계 기준이 없으며 방류 능력 향상을 위한 최적 설계인자 연구가 지속적으로 제안되고 있다. 기본 Piano Key 위어보다 더 높은 방류 능력을 보 이는 것으로 증명된 사다리꼴 Piano key 위어와 보조 설계인자 적 용에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있지만 설계인자가 많고 복 잡하기 때문에 다양한 설계인자 간의 영향 분석을 위한 추가 연구 가 여전히 필요한 실정이다.

본 연구에서는 사다리꼴 Piano key 위어의 다양한 주요 설계인 자와 새로운 보조 설계인자를 적용하여 설계인자 영향과 유동특성 을 분석하고 방류 능력을 평가하여 최적 설계인자를 제시하였다. 주요 설계인자 (Case A)는 폭 비율 1.25, 1.75, 2.25, 측벽 각도는 2°, 4°, -2°를 서로 교차하여 총 9가지의 모델로 설계하였으며 유 량 계수 증감률을 조사하였다. 보조 설계인자 (Case B)는 선행연 구의 사각형 Sq-parapet과 새롭게 제시하는 형태인 삼각형 Tri-parapet을 적용하였으며, 9가지 모델 중 높은 방류 능력을 나 타내는 모델에 추가하였다. 수학적 지배방정식들을 수치해석적인 방법으로 복잡한 물리 현상을 해석하는 전산 유체 역학 (CFD) 시 뮬레이션을 이용하여 각 모델 별 방류 능력 및 유동 특성에 대해 분석하였다.

주요 설계인자인 폭 비율과 측벽 각도 중 폭 비율을 기준으로 기준 모델과 비교했을 때 모든 측벽 각도에서 수위가 낮을수록 큰 폭으로 방류 능력이 증가하지만 수위가 높을수록 증가폭이 감소하 는 경향을 확인하였다. 측벽 각도가 0보다 크면 폭 비율과 비례하 여 방류 능력이 증가하지만 각도가 0보다 작을 땐 폭 비율 1.75와 2.25의 경우 수위가 증가할수록 오히려 감소하는 추세를 나타낸다. 측벽각도가 2°일 때 모든 폭에 대하여 안정적으로 방류 능력이 증가하 며 모든 수위에서 방류 능력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 측벽각도를 기준으로 비교하였을 때, 낮은 수두에서 측벽각도 - 2°가 가 장 높은 방류 능력을 나타냈지만 폭 비율 1.75와 2.25에서 - 2°는 방류능 력이 오히려 감소하는 추세를 보였다. 최종적으로 모든 수위에 대하여 안정적으로 방류 능력이 증가하는 폭 비율 1.25와 측벽각도 - 2° 모델과 폭 비율 2.25와 측벽각도 2° 모델이 선정되었으며 각각 최대 14.7%와 13.6%의 증가율이 나타났다.

유동 흐름 분석 결과 inlet crest의 낮은 유속은 유동 관성력을 감소시키고 측벽 접근성을 향상시키므로 흐름이 고르게 분포하여 마루의 효율성 향상시키는 것을 확인하였다. 또한 수위가 증가함 에 따라 수맥간섭이 심해져 방류곡선의 경사가 점차 완만해지며 잠류가 발생하여 방류 효율이 감소하는 것을 확인하였다. 9가지 모델 중 가장 큰 방류 효율이 나타난 두 모델에 Sq-parapet과 Tri-parapet을 적용한 결과 기존의 Sq-parapet보다 Tri-parapet의 방류 효율이 크게 개선되었음을 확인하였으며 최대 53.8%, 49.5% 증가하였다.

추후 본 연구를 통해 제한된 공간 하에서 사다리꼴 Piano key

위어의 폭 비율과 측벽 각도가 효율성에 미치는 영향을 고려하여 모델을 개선하고, 이를 바탕으로 실제 치수능력 증대를 위한 추가 설계 지침으로 활용될 것으로 기대된다.

주요어 : 사다리꼴 Piano key 위어, 수치해석, 최적 설계인자, 유동 특성, 유량 계수 학 번 : 2021-27313 목 차

국문초록	i
목 차	iv
List of Tables	vi
List of Figures	vi
List of Symbols	ix
제1장서 론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적	3
제 2 장 연구사	5
2.1 Piano key 위어의 개요	5
2.2 최적 설계인자	9
제 3 자 재근 민 바버	19
	10
3.1 연구 대장	12
3.1.1 기하학적 설계인자 추출	12
3.1.2 대상 PK weir 모델링	14
3.2 수치해석	17
3.2.1 전산유체역학	17
3.2.2 수치모의 조건 설정	20
3.2.3 격자 민감도 분석	23

제 4 장 결과 및 고찰	25
4.1 주요 설계인자 영향 분석	· 25
4.1.1 폭 비율 영향 분석	· 25
4.1.2 측벽 각도 영향 분석	· 26
4.1.3 유동특성 분석	• 36
4.2 보조 설계인자 영향 분석	• 41
4.2.1 Parapet 방류 능력 평가	• 41
4.2.2 최종 방류 능력 평가	• 44
제 5 장 요약 및 결론	47
참고문헌	49
Abstract	56

List of Tables

Table 2.1 Fundamental parameter nomenclature	10
Table 2.2 Studied PK weir optimal basic design factor	11
Table 3.1 Mesh sizes and numerical conditions (Mesh	
block 1) ·····	22
Table 3.2 Mesh sizes and numerical conditions (Mesh	
block 2)	22
Table 3.3 Mesh sensitivity analysis for the present stud	ly
	24

List of Figures

Fig.	2.1	Van Phong PK weir (Vietnam) (Frank et al., 2018) ••••••	9
Fig.	3.1	Geometric Parameters of PK weir	13
Fig.	3.2	Shape of a general PK weir (Top view)	15
Fig.	3.3	Shape of a general PK weir (Side view)	15
Fig.	3.4	TPKW modeling according to design factors	16
Fig.	3.5	Object recognition using FAVOR method (Flow	
Scien	ice, 2	2016)	18
Fig.	3.6	Sketch of mesh setup	21
Fig.	3.7	Applied boundary conditions	22
Fig.	3.8	Variations of the relative error of the discharge	
coeff	icien	t versus cell size ·····	24
Fig.	4.1	W_i/W_o effect analysis of discharge coefficient (C_d)

Fig. 4.2 Side wall angle (α) effect analysis of discharge coefficient (C_d) change rate: (a) $W_i/W_o=1.25$, (b) $W_i/W_o=1.75$, Fig. 4.3 Flow characteristics analysis of streamline distribution - high head $(H_t/P=0.52)$: (a) top view (z=0.01 m), (b) top view (z=2.00 m), (c) side view (z=0.01 m, z=2.00 m) 29 Fig. 4.4 3D diagonal view of top and bottom streams Fig. 4.5 Top view of flow characteristics analysis of streamline distribution – low head $(H_t/P=0.07)$: (a) z=0.01 m, (b) z=2.00 m ······ 31 Fig. 4.6 Flow characteristics analysis of flow rate distribution: Fig. 4.7 Flow characteristics analysis of surface curve (X-Z plan): (a) outlet ($\alpha = 4^{\circ}$), (b) outlet ($\alpha = 2^{\circ}$), (c) outlet ($\alpha = -2^{\circ}$), Fig. 4.8 Flow characteristics analysis of nappe interference $-WR_{1.25}\alpha_2$ (**Z**-**Y** plan): (a) $H_t/P=0.07$, (b) $H_t/P=0.32$, (c) $H_t/P=0.73$ 35 Fig. 4.9 Flow characteristics analysis of nappe interference $-H_t/P=0.73$ (**Z**-**Y** plan): (a) $WR_{1.25}\alpha_{-2}$, (b) $WR_{2.25}\alpha_{-2}$, **Fig. 4.10** Side wall angle (α) effect analysis of total crest length (*L*) ------ 38 Fig. 4.11 Side wall angle (α) effect analysis of vector angle:

(a) $WR_{2.25}\alpha_{-2}$, (b) $WR_{2.25}\alpha_{2}$, (c) $WR_{2.25}\alpha_{4}$	39
Fig. 4.12 Parapet discharge capacity assessment of flow	
characteristics: (a) $WR_{2.25}\alpha_2$, (b) $WR_{2.25}\alpha_2 - Tri$	41
Fig. 4.13 Parapet discharge capacity assessment of discharge	е
coefficient comparison ($WR_{2.25}\alpha_2$)	41
Fig. 4.14 Parapet discharge capacity assessment of flow	
characteristics: (a) $WR_{1.25}\alpha_{-2}$, (b) $WR_{1.25}\alpha_{-2}$ -Tri ······	42
Fig. 4.15 Parapet discharge capacity assessment of discharge	e
coefficient comparison ($WR_{1.25}\alpha_{-2}$)	42
Fig. 4.16 Application of piano keys and Ozweir in Bulgap	
Reservoir ·····	43
Fig. 4.17 Comprehensive discharge capacity evaluation of	
discharge coefficient comparison	44
Fig. 4.18 Discharge ratio compared to ogee weir	45

List of Symbols

- W_i inlet cycle width
- Wo oulet cycle width
- W width of weir
- *B_o* upstream or outlet cycle cantilever length
- B_i downstream or inlet cycle cantilever length
- C_d discharge coefficient
- **g** acceleration of gravity
- *H* piezometric head
- H_t total head (piezometric head plus velocity head)
- L total crest length
- **N** weir cycles
- *n* crest length to total weir width ratio
- **P** weir height
- **Q** discharge
- T_s wall thickness
- α sidewall angle

- V velocity
- **w** cycle width
- *z* water depth

제1장서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

현재 지구온난화로 인해 이상기후가 빈번하게 발생하여 최근 집중호 우와 같은 재해발생이 증가하고 있다 (Lee, 2021). 이러한 이상기후로 인 하여 농어촌 지역에서 가장 큰 피해가 발생하는 곳은 댐 하류 지역이다. 댐에 가둘 수 있는 물의 양이 넘쳐나면서 댐의 제방에 물이 월류하게 되 면 제방이 무너져 댐 하류의 주민에게 매우 직접적인 피해가 간다. 2020 년 8월에 2000년 이래로 역대 가장 긴 장마를 겪으며 38개 시·군·구, 36 개 읍·면·동이 특별재난지역으로 선포되기도 하였다 (행정안전부, 2020).

현재 국내의 댐의 현황을 보면 한국농어촌공사 소관의 댐 3,421개소 중 50년 이상 경과된 댐은 75.2% (2,572개소)이며 30년 이상 경과된 댐 은 88.1% (3014개소)에 임박한다 (한국농어촌공사, 2022). 최근 저수지를 증축할 때 장기 수문 자료에 기초하여 설계가 되지만 과거에 건설된 저 수지의 경우 단기간의 수문 자료에 근거한 설계 홍수량을 기준으로 적용 되어있어 (Lee, 2021) 변화하는 이상기후에 대한 대비가 미비한 상태이 다. 해외 사례로 1975년 중국의 반차오 (Banqiao)댐 붕괴 사고 시 17만 명 이상 사망하고, 12억 달러 이상의 경제적 피해, 도시 및 건물 파괴 되 었다고 보도되었다 (ICOLD). 따라서 특히 댐 파괴는 사람의 생명과 긴 밀히 연결되어 있기 때문에 절대 일어나서는 안되며 반드시 사전에 예방 되어야 한다.

우리나라는 1980년대 이후 일부 댐의 설계 홍수량으로서 가능 최대 홍수량이 채택되기 전까지는 적용 빈도에는 댐 별로 차이가 있었다. 다 목적댐과 같은 규모가 큰 댐의 경우에는 대략 500년에서 1000년 빈도의 확률 홍수가 채택되었고 기타 댐들은 콘크리트 댐의 경우 100년 빈도, 필 댐의 경우 200년 빈도의 확률 홍수를 채택하였다 (한국시설안전기술 공단, 2007). 외국의 경우 PMF의 개념이 도입되기 전에 10,000년 빈도의 홍수량을 채택하였던 것에 비하면 우리나라의 설계기준 홍수빈도는 상당 히 작은 규모로 적용해왔다. 현재 중앙정부에서도 월류로 인한 댐의 붕 괴를 대비하기 위하여 치수능력 증대사업을 진행해왔고 댐 설계 당시에 기초자료가 되었던 설계홍수량을 가능최대홍수량 (PMF)로 상향 조정하 여 댐의 안전성을 확보하는 것이 이 사업의 목표이다. 현재 국내에서 댐 의 설계 기준으로 삼고 있는 댐설계기준에서는 댐의 안전성을 고려한 저 수지 유입 설계홍수로 가능최대 홍수량을 선택하는 것이 적적하며 그 이 하의 규모로 채택하고자 할 때에는 마땅한 사유가 있어야 한다고 규정하 고 있다 (한국수자원학회, 2005).

저수지의 경우에는 재해대비설계기준개정 (농림부, 2003)에서 농업용 저수지에서도 일정한 규모보다 클 때 (유역면적 2,500 ha, 총 저수량 500 만 m³이상) 하류에 도시 또는 집단거주지역, 국가 중요시설 등이 있어 유사시 재산 및 인명피해가 클 것으로 예상되는 저수지는 PMF을 설계 홍수량으로 적용할 것을 규정하고 있다. 이 사업은 현재에도 계속해서 추진되어오고 있다. 댐 및 저수지의 치수 능력을 증대할 수 있는 구조적 방안은 여러 가지가 존재하는데, 물을 미리 방류할 수 있는 여수로를 증 설하거나 기존 여수로를 보완, 또는 비상 및 보조 여수로를 설치하는 방 법이 있다. 또 물의 방류를 조절할 수 있는 방법으로 수문을 설치하거나 사이편을 설치하는 방법이 존재한다.

하지만 이와 같은 방법의 경우 일단 높은 설치 및 유지관리 비용이 요구되며, 특히 수문과 사이펀의 경우 기계 및 전기적 문제의 가능성이 높다. 이에 뒤이어 새롭게 제시된 개념이 바로 래버린스 위어 (Labyrinth weir)이며 여수로의 물넘이 부분에 방류되는 물넘이 마루의 방류면적을 넓혀 동일한 시간에 더 많은 양의 물을 방류할 수 있도록 설 계한 구조물이다. 래버린스 위어의 경우 설치 비용이 상대적으로 매우 낮으면서도 기존 오즈 위어 (Ogee weir)보다 약 4배 이상의 방류 능력 을 보여주고 있어, 세계적으로 많은 지역에 실제 사용되고 있는 위어 형 태이다.

- 2 -

여수로의 물넘이 점유 면적에 비해 래버린스 위어의 경우 더 넓은 기 초부지를 필요로 하기 때문에, 여수로에 따라 폭의 한계로 인해 래버린 스 위어 설치가 어려운 경우가 존재하기도 하며 추가적인 설치 비용이 소요되기도 한다. 이러한 래버린스의 단점을 극복하기 위해 제시된 개념 이 바로 피어노키 위어 (Piano key weir, PK weir)이다. Piano key 위어 의 경우 래버린스의 개념에서 착안하여 방류면적을 증가시킨 형태이며 래버린스위어의 경우 동일한 폭에 대해 더 넓은 방류면적을 확보하지만 Piano key 위어는 기존의 점유 면적 위에서 설치하기 때문에 폭 연장에 한계가 있는 경우에도 유리하며 래버린스보다 더 1.2배 높은 방류 능력 을 가지고 있다는 큰 장점이 있다. Piano key 위어 또한 기존의 구조물 적 대책에 비해 낮은 설치 비용이 요구된다. 현재 국외에는 30개소의 저 수지에 설치되어 있으며 현재 국내 영광의 불갑저수지에서도 최초로 적 용되어 현재 시공 중에 있고 2024년 준공예정이다. 그러나 현재까지 Piano key 위어의 정형화된 최적 설계 기준이 존재하지 않는 실정이며 현재까지도 최적 설계 기준을 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다.

1.2 연구 목적

본 연구는 사다리꼴 Piano key 위어의 기하학적 설계인자에 따른 영 향을 분석하고 방류 능력을 평가하는 것을 최종 목표로 한다. 주요·보조 설계인자에 따른 방류 능력 분석 및 평가를 위해 먼저 사다리꼴 Piano key 위어의 주요 설계인자인 폭 비율과 측벽 각도 별 모델링을 진행한 다. 3차원 유동해석을 위해 CFD 시뮬레이션의 수치모의 조건을 설정하 고 선행연구의 실험 결과를 활용하여 격자 민감도 분석을 수행한 다음 도메인의 경계 조건을 설정한다. 주요 설계인자 영향 분석을 위해 폭 비 율 설계인자의 영향을 유량계수 증감률을 활용하여 분석하고 모델 별 유 동특성을 분석한다. 또 다른 주요 설계인자인 측벽 각도의 영향도 동일 하게 유량계수 증감률을 분석하고 유동특성을 분석한다. 주요 설계인자 를 고려한 Case A의 모델 중 가장 높은 방류 능력을 나타내는 모델에 Case B의 보조 설계인자인 Sq-parapet과 Tri-parapet을 적용한 뒤 방류 계수 비교 및 분석을 수행하여 최대 방류 능력을 나타내는 모델을 제시 한다.

제2장연구사

2.1 Piano key 위어의 개요

Piano Key (PK) 위어는 21세기의 댐 설계 부야에서 가장 혁신적인 기술로 인정받았으며, 댐 관련 국제 회의에서도 자주 소개되는 개념이며 실제 적용 사례와 수리모형 실험의 성과가 많이 존재한다. 국내 및 국외 에서 수행되어온 수리모형실험의 성과를 토대로 수리·경제적으로 계산하 여 최대 효율을 끊임없이 제안되어지고 있다. Piano Key 위어는 2003년 에 처음 소개된 개념이며 Hydrocoop의 Lemperiere와 알제리 Biskra 대 학 Quamane 교수에 의하여 최초로 제안되었다 (Lee, 2021). 프랑스에 위치해있는 수리 환경 실험실에서 10년 이상의 기간에 걸쳐 진행된 실험 결과를 바탕으로 베트남, 인도, 스위스 등 여러 국가에서 100가지 이상의 다양한 형태의 Piano Key 위어의 수리실험이 진행되었고 형상에 대한 수리특정이 검증되어 있다.

Piano Key (PK)라는 이름이 붙여진 이유는 위어를 평면도 상 위에서 볼 때 지그재그로 배열된 피아노 건반 형상과 매우 닮아서 이다. 이 구 조물은 2006년에 완공되었떤 EDF가 소유하고 있는 Goulours 댐의 치수 능력 증대 사업을 시작으로 적용되었으며 다른 여러 EDF 소유의 댐에 서도 설계 홍수량을 상향 조정하기 위해 필요한 치수 능력을 높이기 위 하여 적용되었다. 뿐만 아니라, 프랑스 이외에도 호주, 베트남 등에서 Piano Key 위어를 건설하거나 계획하고 있는 중에 있으며 미국을 비롯 한 다른 국가에서도 수리적 실험을 통한 연구가 지속적으로 진행되고 있 다.

기존에 건설되는 댐의 물넘이 구조물은 대부분이 칼날 위어 (Sharp crested weir)의 수면 형상을 따라 설계된 오즈 위어 (Ogee weir)를 선 형으로 설치하는 것이 일반적이다. 하지만 현재 배치되어 있는 물넘이 에서는 방류량이 한정되어있기 때문에 극한 홍수시에 큰 유량을 방류하 기엔 어려움이 여전히 존재한다. 따라서 이로 인한 큰 여수로의 규모를 확보하거나 댐의 높이는 등의 대응책이 필요하였다. 기존 댐의 문제를 해결하고 상시 활용 가능한 수위보다 더 높은 유량을 처리하기 위하여 새로운 형태인 Piano Key 위어가 등장하였다.

그러나 홍수량이 급격하게 증가하였을 때 필요한 여유고와 여수로 폭 은 지나치게 큰 규모가 필요하기 때문에 위의 두 가지 방안으로 해결하 는 것은 비경제적이며, 규모가 큰 댐의 경우에는 여수로에 조절이 가능 한 수문을 설치하는 방법을 활용한다. 수문을 설치한다면 홍수가 발생한 초기부터 큰 방류 능력을 확보할 수 있다는 이점으로 대응체계가 없는 댐에 비하여 상시 만수위의 여유고와 여수로 폭을 줄일 수 있다는 강점 이 있다. 하지만 수문을 설치할 경우 최악의 상황에서는 기계 혹은 전기 적 문제로 인하여 수문의 작동이 전적으로 불가능해질 수 있다는 위험도 가 항상 존재하기도 한다. 또한 운영상의 실수로 인하여 과도한 방류가 이루어졌을 때 오히려 댐의 하류에서 더 큰 홍수 피해를 발생시킬 위험 도 있으며 지역주민에게 중요한 저류수의 손실을 야기할 수도 있고 관리 자가 수문을 수리하는 중에 물길에 쓸려가는 위험한 문제상황이 발생하 기도 한다. 이를 보완하기 위해 제안된 개념이 래버린스 위어이며 이는 비조절식 구조물로서 수문식 여수로에 비해 아주 저비용으로 설치 가능 하며 유지 또는 보수 비용도 추가로 필요로하지 않는다는 장점이 있다.

50년 이상 전에 제안되었던 개념인 래버린스 위어는 철근 콘크리트 벽체를 사다리꼴 형태로 이어 만든 수리 구조물로서, 제한된 여수로 폭 에서 기존의 선형 위어에 비해 물이 넘어가는 위어 마루 길이가 약 4배 이상 연장된 형태이다. 이로 인해 동일한 폭의 여수로에서도 Ogee 위어 에 비해 약 2배 이상 높은 방류 능력을 확보할 수 있다. 하지만 래버린 스를 설치하기 위해선 기존의 점유면적보다 상하류 방향으로 더 넓은 부 지를 필요로하고 그 부지는 평평한 형태여야 하며 필요한 조건이 충족되 지 않을 때 설치가 불가하다는 단점이 존재한다. 하지만 Piano Key 위 어는 이 래버린스 위어를 개량한 형태로서, 래버린스 위어보다 약 2배 이상 더 큰 방류 능력을 갖고 있고 래버린스에 비해 필요로 하는 위어의 기초부지가 작기 때문에, 큰크리트 댐의 경우에도 신설 댐 뿐만 아니라 기존의 댐에도 적용할 수 있다는 큰 장점이 있다. 따라서 래버린스 위어, Ogee 위어와 비교하였을 때 Piano Key 위어는 대부분의 문제점을 해결 하고 경제적으로도 매우 효율적이라고 평가가 되어진다.

Piano key 위어는 하부 바닥면에서 상승방향으로 경사진 수로인 유입 부 (inlet)와 하강방향으로 경사진 유출부 (outlet)를 연결하여 배치된 형 태를 가지고 있다. 이 때 유입부와 유출부는 모두 직사각형 형태이며 비 선형 위어로 모델링 되어 있다. inlet과 outlet이 연속적으로 배치하여 구 성되어있다. Piano Key 위어는 대표적으로 두 가지 일반적이 형태가 사 용되는데 상하류 측으로 켄틸레버형태의 Key가 대칭되도록 돌출시킨 형 식이 Type-A이고 상류 측으로만 돌출시키는 형태는 Type-B 형태라고 제시된다.

Piano Key 위어는 현재 프랑스에 Goulours 댐과 Gloriettes 댐, 베트 남의 Van Phong 댐, 스코틀랜드의 Black Esk 등 외에도 국외 30개 지 역의 댐에 설치되어있으며, 현재 국내 최초로 영광에 위치하는 불갑저수 지의 치수능력확대사업의 일환으로 Piano Key 위어를 적용중이며 2024 년에 준공예정되어있다 (Jang et al., 2019).



Fig. 2.1 Van Phong PK weir (Vietnam) (Frank et al., 2018)

2.2 최적 설계인자

프랑스 Goulours 댐인 최초의 Piano key 위어 건설은 2006년에 완료 되었으며 프랑스의 Saint-Marc 댐인 두 번째 Piano key 위어 건설은 2008년에 완료되었다 (Laugier, 2009). Piano key 위어 설계에 대한 중요 한 기하학적 설계인자는 Table 2.1에 제시되어있다. Lempérière and Ouamane (2003)에 따르면 type-A Piano key 위어 기하학의 인자는 부 분적으로 type-A 위어 기하학이 프리캐스트 콘크리트 건설에 더 적합하 다고 보고되어있다. Barcoudaet al. (2006)와 Lempérière and Ouamane (2003)은 type-B가 $n \ P \ Colorer of Figure - A 보다 수리학적으로 10%$ 더 효율적이라고 말하며, Ouamane and Lempérière (2006)에 따르면 $<math>B_i/B_o=2$ 인 Piano key 위어에 비해 $B_i/B_o=0$ (type-B)인 PK는 12% 더 효율적이고 $B_i/B_o=1$ (type-A) Piano key 위어는 7% 더 효율적으로 보 고되었다. 검토된 모든 연구는 type-B 형상이 type-A보다 방전 효율이 더 높다고 사료된다.

P	위어 높이	W_i	inlet key의 폭
L	마루 중심선 길이	W_o	outlet key의 폭
W	여수로 폭	w	cycle 폭
В	점유 면적 길이	T_s	벽 두께
S_i	inlet cycle의 기울기	N	cycle 수
S_o	outlet cycle의 기울기	n	여수로 폭에 걸친 마루 길이(<i>L/W</i>)
B_i	inlet cycle의 캔틸레버 길이	B_i/B_o	하류에 걸친 둑 캔틸레버 길이
B_o	outlet cycle의 캔틸레버 길이	W_i/W_o	outlet key 폭에 대한 inlet key 폭

Table 2.1 Fundamental parameter nomenclature

Table 2.2에 따라 n의 테스트 값은 4에서 8.5까지이며 Lempérière와 Jun (2005)은 설계 목적을 위해 n이 4와 7 사이일 것을 권장한다고 주장 했다. Lempérière (2009)는 n=5가 최적이라고 언급하면서 해당 권장 사 항을 수정하였다. Barcoudaet al. (2006)은 최적의 n 값 6을 보고했습니 다. Ouamane과 Lempérière (2006)는 작은 *H*₄/*P* 값의 경우 높은 n 값 (8.5)이 효율성에서 상당한 이득을 가져온다는 것을 발견하였으나 더 큰 H_t/P 값에서 더 큰 n 값은 방전 효율의 상당한 증가를 보이진 않았다는 한계가 있다. Hienet al. (2006)은 n 값이 4, 5 및 7인 Piano key 위어 모 델을 평가하였으며 작은 H_t/P 값에 대해 n 값 7이 더 효율적이지만 5⁻⁶ 범위의 n 값이 더 효율적이라고 결론지었으며 이는 비용적인 면에서 효율적이고 더 큰 H_t/P 값에 대해 비슷한 방전 효율을 생성한다 (Lee, 2021).

W_i/W_o는 방전 효율에 영향을 미치는 것으로 보고된 또 다른 설계 설계인자입니다. Lempérière and Jun (2005)과 Barcouda et al. (2006)은 W_i/W_o=1.2가 최적에 가깝다고 제안하였고 Hienet et al. (2006)은 W_i/W_o=1.5인 Piano key 위어가 최적이라고 결론내려졌다.

Ouamene and Lempérière (2006)가 수행한 연구에서 0.67, 1.0 및 1.5 의 다양한 W'_i/W_o 비율로 세 개의 Piano key 위어를 테스트하였으며 효 율성 결과가 증가하지만 증가하는 원인에 대한 분석은 미흡하다. Ouamene and Lempérière (2006)는 W'_i/W_o =1.2인 Piano key 위어에 대 해 W'_i/W_o =1.2가 W'_i/W_o =1에 비해 효율성을 5% 증가시켰다고 주장한다. 이후 Lempérière (2009)는 최적에 가까운 W'_i/W_o =1.25를 제안하였다. Goulours and Saint-Marc 댐에 건설된 2개의 프로토타입 PK 둑은 W'_i/W_o 비율이 각각 1.43 및 1.41이다 (Laugier, 2009). 검토된 모든 연구 에서 통일된 의견으로는 W'_i/W_o >1.0이 W'_i/W_o <1.0보다 더 큰 방전 효율 을 갖는다는 것이다 (Anderson, 2011).

저자 (발행연도)	Type	L / W	W_{i}/W_{o}	S_{i}	S_{o}	T_s/P
Guodong et al. (2020)	А	5	1.43	2.05:1	2.05:1	0.067
Laugier et al. (2017)	А	6	1.20	2:1	2:1	NR
Erpicum et al. (2014)	А	5	1.43	2.05:1	2.05:1	0.067
Machiels et al. (2014)	А	6	1.20	2:1	2:1	NR
Olivier Machiels (2013)	В	6	1.20	1:1	2:1	NR
Laugier (2007)	А	5	1.43	2.05:1	2.05:1	0.067
Barcouda et al. (2006)	А	6	1.20	2:1	2:1	NR

Barcouda et al. (2006)	В	6	1.20	1:1	2:1	NR
Ouamane and Lempérière		4.9.5	0 (7 1 40	ND	ND	
(2006)	various	4-8.5	0.67-1.49	NK	NK	various
Hien, et al. (2006)	А	4-7.0	1.50	NR	NR	NR
Lempérière and Jun (2005)	А	6	1.20	2:1	2:1	NR
Lempérière and Ouamane		(1.00	0.75.1	1 50 1	ND
(2003)	А	6	1.00	0.75:1	1.50:1	NK

Table 2.2 Studied PK weir optimal basic design factor

제 3 장 재료 및 방법

3.1 연구 대상

3.1.1 기하학적 설계인자 추출

Piano key 위어는 동일한 형태가 반복적으로 이루어진 다각형 수리 구조물로 Fig. 3.1과 같이 다양한 변수가 존재한다. 본 연구에서 수행한 Piano key 위어의 물리적 영향을 미치는 요인에 대해 분석하기 위하여 Eq. 3.1과 같이 수리학적 설계인자를 산정하였다.

$$C_d = f(H_t, P, L, W, W_i, W_o, \rho, \sigma, \upsilon, \alpha)$$

$$(3.1)$$

여기서 C_d 는 유량계수, H_t 는 전수두, P는 위어의 높이, L는 총 마루 길이, W는 수로의 폭, W_i 는 inlet의 폭, W_o 는 outlet의 폭, ρ 는 물의 압 축성, σ 는 물의 점도, v는 물의 표면장력, α 는 측벽 각도이다.

Henderson (1966)에 의하면 벽의 두께 (*T_s*) 효과의 비율은 미비하므 로 무시할 수 있으며, 개수로 흐름의 경우 중력의 지배를 받기 때문에 (*R_e*>2000) 물의 압축성, 점도, 표면장력의 효과를 무시할 수 있다. 또한 *L/W*, *H_t/P*, *W_i/W_o*비율은 배출 계수에 영향을 미치는 주요 요인 (Hay and Taylor, 1970)보고가 있다. 따라서 방류 능력 향상에 영향을 미치는 인자들을 다음 Eq. 3.2와 같이 요약할 수 있다.

$$C_d = f(H_t/P, L/W, W_i/W_o, \alpha)$$
 (3.2)

여기서 C_d 는 유량계수, H_i/P 는 위어 높이 대비 전두수 비율, L/W는 폭 대비 마루길이 비율, W_i/W_o 는 outlet 대비 inlet 폭 비율, α 는 측벽 각도이다.

Piano key 위어의 방류량 산정 관계식은 다음과 같다.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} W H_t^{\frac{3}{2}}$$
(3.3)

여기서 Q는 총 유량 (m^3/s) , C_d 는 유량계수, g는 중력가속도 (m/s^2) , W는 수로의 폭 (m), H_t 는 전수두 (m)이다.



Fig. 3.1 Piano key weir (Pfister et al., 2013)

3.1.2 대상 PK weir 모델링

대상 Piano key 위어 모델링을 위하여 선행연구 (Crookston, 2010)를 참고한 설계인자를 선정하여 기본 PK weir 형상을 모델링하였다 (Fig. 3.2, 3.3). 본 연구에서는 사다리꼴 Piano key 위어의 폭 비율 (W/W)과 측벽의 각도별 방류 능력평가를 진행하기 위해 각각 3가지의 형상을 설 정하였다 (Case A). 폭 비율의 경우 W_i/W_o를 각각 1.25, 1.75, 2.25로 설 정하여 모델링하였고 측벽 각도의 경우 α는 각각 2°, 4°, -2°로 설정하여 모델링하였다. 서로 교차하여 모델링을 진행하였음으므로 총 9개의 모델 로 최종 선택되었으며, 추가로 9개의 모델 중 가장 높은 방류 능력을 보 이는 모델에 기존의 Sq-parapet과 새로운 형태의 Tri-parapet를 적용한 다음 방류 능력을 비교를 계획하였다. 폭 비율의 경우 측벽에 각도를 적 용하였을 때 inlet key와 outlet key가 서로 맞닿지 않는 최대한의 비율 까지 적용하였으며 측벽각도의 경우 5°, 10°를 적용하였던 선행연구의 결론에 따라 방류 능력 증가에 효과가 있었던 5°이하로 결정하였다 (Chahartaghi, 2019). Case A에서 가장 높은 방류 능력을 보이는 모델에 기존에 적용된 개념인 사각형 형태의 Sq-parapet과 새롭게 제시하는 삼 각형 형태의 Tri-parapet를 각각 적용하였다 (Case B) (Fig. 3.4).



Fig. 3.2 Shape of a general PK weir (Top view)



Fig. 3.3 Shape of a general PK weir (Side view)



Fig. 3.4 TPKW modeling according to design factors

3.2 3차원 수치해석

3.2.1 전산유체역학 (CFD)

Piano key 위어 설계인자들의 효과를 검증하기 위해 FLOW-3D 수치 모형을 사용하였다. FLOW-3D는 수치해석 알고리즘을 이용하여 자유표 면의 유동이 있는 표면이 시공간에 따라 변하는 것을 모사하기 위한 이 상적인 도구이다. 자유 표면이란 공기와 물의 다른 물성을 가진 유체 사 이에서의 특정 경계면을 지칭하며 이 복잡한 자유 표면을 해석하기 위해 서는 난류 모델과 유동방정식이 결합된 고급 알고리즘을 활용해야한다.

또한 수치해석 프로그램인 FLOW-3D는 3차원의 자유수면 유동해석 모델로서 정확한 자유수면의 추적을 기반으로 복잡한 현실의 물리현상을 정확하게 해석하는데 중점을 두었고, 2023년 현재까지 다양한 유동현상 해석을 위해 사용되고 있다. FLOW-3D는 실제 자연현상에서 자유수면 문제를 정확하게 모의하기 위해 VOF 기법을 사용하고 있다. 이 기법은 두 물성치의 경계면을 정확하게 추적하며, 시간에 따라 모의할 수 있으 며 이러한 기능을 활용하여 다양한 이상 유동 문제를 모의하여 현실적이 고 정확한 결과를 얻을 수 있다 (FlowScience, 2020).

따라서 FLOW-3D는 현재 농어촌공사와 농어촌연구원, 수자원공사, 학계 등에서 저수지 및 댐의 수리 해석을 위해 검증되어 사용되고 있으 며, 특히 농어촌공사의 정밀안전진단을 실시할 때 저수지 물넘이에서의 불완전월류를 3차원 수치해석 프로그램을 통해 분석하고 있다 (Flow Science, 2016). 뿐만 아니라 Piano key 위어와 Labyrinth 위어가 적용된 선행된 물넘이 연구는 가장 대표적으로 FLOW-3D 수치 모형을 통해 자 유 수면을 해석 및 분석해오는 경향을 보인다 (Ghaderi A, 2020).

FLOW-3D는 유한 체적법 (Finite Volume Method, FVM) 기법에 FAVOR (Fractional Area Volume Obstacle Representation Method) 기 법을 도입하고 이를 이용한 격자망을 구성하여 복잡한 3차원 지형자료를 인식하며 (Fig. 3.5), 이를 바탕으로 VOF (Volume of Fluid) 기법 적용 을 통해 복잡한 자유표면을 해석한다 (FlowScience, 2020).



Fig. 3.5 Object recognition using FAVOR method (Flow Science, 2016)

유동해석을 수행 할 때 유체의 비정상 유동 상태가 기본으로 설정되 어 있으며, 지배방정식으로 사용한다 (Flow Science, 2016).

$$V_{F}\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_{x}) + R\frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_{y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_{z}) + \zeta \frac{\rho u A_{x}}{x}$$

$$= R_{DIF} + R_{SOR}$$
(3.4)

여기서, V_F 는 자유수면 유체 분율, A_x , A_y , A_z 는 자유수면 흐름의 x, y, z방향 면적 비율, u, v, w는 각각 x, y, z방향의 속도성분, ρ 는 유체 의 밀도, ζ 는 0일 때 직교 좌표, 1일 때 원통형 좌표에 대응하며, R_{SOR} 은 질량의 생성 또는 소멸 (Mass source/sink) 항, R_{DIF} 는 난류 확산 항이 며, Eq. 3.5과 같다 (Flow Science, 2016).

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{\rho} A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{\rho} A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{\rho} A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \zeta \frac{v_{\rho} A_x}{x} \frac{\partial \rho}{\partial x}$$
(3.5)

여기서, $v_p = S_c \mu / \rho$ 와 같으며, $\mu = 점성과 같은 모멘텀 확산의 상수$ 를 의미하며, $S_c = 그 역수가 난류 슈미트 상수$ (Turbulent Schmidt number)를 나타낸다. 3차원 RANS 운동량 방정식은 아래 Eq. 3.6~3.8에 제시되어있다 (Flow Science, 2016).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x$$
(3.6)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y$$
(3.7)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z$$
(3.8)

여기서, G는 체적 가속도, p는 압력, u는 속도 평균, V_F는 자유수 면 흐름의 유체 분율, f는 점성 가속항, ρ는 유체의 밀도, A_x, A_y, A_z는 x, y, z방향의 자유수면 흐름을 위해 확보된 면적 비율 (Area fraction), u, v, w는 각각 x, y, z방향의 속도성분이다. 자유표면 해석을 위한 VOF (Volume of Fluid) 기법 함수는 다음 나타난 Eq. 3.9와 같다 (Flow Science, 2016).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (Fu) + \frac{\partial}{\partial y} (Fv) + \frac{\partial}{\partial z} (Fw) \right\} = F_{DIF} + F_{SOR}$$
(3.9)

여기서, F는 유체가 셀에서 차지하는 영역으로 0~1 사이 값으로 제 시된다 (Hirt and Nicholas, 1981). F_{DIF}는 유체 분율의 확산 항, F_{SOR}은 유체의 소멸 항을 나타낸다 (Flow Science, 2016).

유동해석을 수행할 때 난류 운동을 효과적으로 모델링하고 해석하기 위하 여러 방법으로 단일 방정식 난류 에너지 모델, Renormalized Group 모델 (RNG), Prandtl 혼합 길이 모델, k-w 모델, 표준 $k-\epsilon$ 모 델, LES (Large Eddy Simulation) 모델로 총 6가지 난류 모델이 있다. Prandtl 혼합 길이 모델과 단일 방정식 난류 에너지 모델은 모델의 단순 성 때문에 일반적으로 널리 사용되지 않는 모델이다. LES 모델은 난류 변동을 직접 해석하기 때문에 보다 정밀한 결과를 얻을 수 있지만, 해석 격자가 매우 밀도 있는 경향이 있어 해석 비용의 소모가 큰 축에 속한다 (FlowScience, 2016). 표준 *k*-*ϵ* 모델은 가장 일반적으로 난류 모델로서 사용되는 모델이며, RNG 모델은 표준모델을 개선하여 난류유동을 더욱 정확하게 모델링하는 특징을 가지고 있다. 또한 RNG 모델은 광범위한 응용 가능성을 갖고 있다 (FlowScience, 2016). RNG 모델은 속도 변동 을 등방성 스칼라 값으로 처리하여 시간에 따른 속도 변동을 완화하여 해석 속도를 향상시킨다. 이러한 특징으로 인해 LES 모델과 비교하였을 때 국지적 해석 규모에서도 정확성에 큰 차이가 없다고 보고되어 (FlowScience, 2020), 본 연구에서 국부적인 개수로 흐름 분석을 위해 RNG 난류 모델을 적용하였다.

3.2.2 수치 모의 조건 설정

개수로란 대기압이 작용하는 자유수면을 갖고, 중력에 의하여 흐르는 흐름이므로 중력은 z방향으로 -9.81 m/s² 를 설정하였으며 시뮬레이션에 서 사용되는 유체의 온도는 20 ℃, 밀도는 1000 kg/m³, 점도는 0.001 kg/m/s로 설정하였다. 본 연구의 수치 모의에서 RNG 난류 모델을 설정 하였으며 (Daneshfaraz et al., 2016; Zahabi et al., 2018; Daneshfaraz and Ghaderi, 2017) 수위는 *h*는 각각 0.21, 0.22, 0.26, 0.30, 0.34 m로 총 5개의 수위별로 시뮬레이션을 실행하였다. 수위별로 진행하여 서로 다른 Piano key 위어 형상에 대해 총 50개의 테스트를 수행하였다. 수치모의 시간은 정상상태 (Steady-state)가 될 때까지 충분히 길게 확보하기 위 하여 종료 시간 기본 60 s로 설정하였으며 구체적인 유체의 흐름 특성 분석을 위해 1 s 마다 output data 출력을 추가로 설정하였다.

Fig. 3.6와 같이 수치모의 해석 도메인은 직육면체의 격자로 구성되어 있으며 전체 범위를 해석하는 도메인 (Mesh block 1)과 더 조밀하게 구

성되어있는 위어 영역의 해석 도메인 (Mesh block 2)까지 총 2개로 연 결된 격자 상자 (Mesh block)를 통해 시뮬레이션을 실행하였다. Mesh block 1에서 가장 상류의 경계조건은 Pressue 조건으로 일정한 수위의 초깃값을 정체압으로 설정하였으며 (Up stream), 하류의 경계조건은 Outflow 조건으로 설정하여 수위가 월류량에 영향을 미치지 않는 완전 월류조건이 되도록 하였다 (Down stream). Mesh block 2의 경우 상·하 류 모두 Outflow 조건으로 설정하였으며 y 단면은 두 격자 모두 Symmetry, 수로의 상단의 경계조건은 Pressure 대기압을, 하단은 Wall 로 설정하였다 (Fig. 3.7).



Fig. 3.6 Sketch of mesh setup



Fig. 3.7 Applied boundary conditions

Mesh block 1					
	Axis	Min.	Max.		
Boundary -	X	Pressure	Outflow		
	У	Symmetry	Symmetry		
	Z	Wall Pressure			
Initial	Upstream	n H_t m Outflow			
Condition	Downstream				

Table 3.2 Mesh sizes and numerical conditions (Mesh block 1)

Mesh block 2					
	Axis	Min.	Max.		
Boundary	Х	Outflow	Outflow		
	У	Symmetry	Symmetry		
	Z	Wall Press			
Initial	Upstream	Outflow			
Condition	Downstream	Outflow			

Table 3.3 Mesh sizes and numerical conditions (Mesh block 2)

3.2.3 격자 민감도 분석 (Mesh sensitivity analysis)

유한요소법을 기반으로 하는 수치해석은 격자 크기에 따라 결과가 상 이하게 나타나며 해석 시간에도 영향이 크다. 격자 크기가 작고 조밀할 수록 해석의 정확성이 높아지는 반면, 격자의 개수가 많아져 해석 시간 이 길어진다는 단점이 있다. 일정 크기에 이르면 격자 크기가 작아지더 라도 결과에 큰 이점 없이 해석 시간만 기하급수적으로 늘어날 수 있기 때문에 (Denys and Basson, 2020), 형상 치수를 고려하여 적절한 격자 크기를 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 5가지의 격자 크기 조건 을 선정하여 격자 민감도 분석을 진행하였으며, 서로 다른 격자 크기를 설정하여 시뮬레이션을 수행하였고 결과에 따른 유량 비교를 수행하였 다. Mesh block 1과 Mesh block 2의 해석 도메인의 격자 밀도 차이를 결정할 때, 접하거나 연결된 각각의 해석 도메인의 격자 크기 비율은 2:1 또는 1:1이 가장 적절하며 2:1을 초과하면 안 된다는 조건에 기초하여 (Flow Science Inc., 2016) Mesh block 1의 Coarser cells size와 Mesh block 2의 Finer cells size를 격자 민감도 분석을 통해 선정하였다. 수치 해석 결과의 검증을 위해 상대오차 (Relative Error)를 사용하였으며 식 은 다음과 같다.

Relative
$$Error(\%) = 100 \times \frac{x_i - x_o}{x_o}$$
 (3.10)

여기서 x_i는 현재 근삿값, x_o는 참값이다.

각 격자의 정보와 격자 민감도 분석 결과는 Table 3.4와 Fig. 3.8에 나타나있으며 수치해석 결과가 상대 오차 5.0% 미만으로 나타난다는 것 을 확인할 수 있다. 격자 민감도 분석 결과, Mesh 4 조건부터 수치해석 결과의 정확도가 높게 나타나기 시작했으며, Mesh 5 조건에서 가장 높 은 정확도를 보인다. 하지만 검증 과정의 결과에서 알 수 있듯이 Mesh
5의 경우 셀 크기가 Mesh 4보다 작아지지만 오차가 크게 감소되지 않았 으므로 따라서 Mesh 4조건인 0.0625 m와 0.0125 m가 최종 격자 해상도 로 사용되었다.

Test No.	Coarser cells size (cm)	Finer cells size (cm)	Total mesh number	Relative Error (%)
Mesh 1	1.700	0.850	493,900	17.39
Mesh 2	1.550	0.775	645,996	11.19
Mesh 3	1.400	0.700	882,457	7.07
Mesh 4	1.250	0.625	1,228,800	3.83
Mesh 5	1.100	0.550	1,796,050	3.52

Table 3.4 Mesh sensitivity analysis for the present study



Fig. 3.8 Variations of the relative error of the discharge coefficient versus cell size

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 주요 설계인자 영향 분석

4.1.1 폭 비율 영향 분석

대칭 폭 비 (W/W=1) 및 각도 0°인 WR1.0000을 기준으로 다양한 W/W, 비율의 영향을 조사하였으며 유량계수의 증감률 분석을 위해 Eq. 4.1을 사용하였다. 폭 비율을 기준으로 방류계수 비교 결과 α=2°는 W_i/W_o=2.25에서 최대 약 13.6% 증가, α=4°는 W_i/W_o=2.25 에서 최대 약 6.2% 증가, α=-2°는 W_i/W_a=2.25 에서 최대 약 17.5% 증가하였다. α=2°, 4°의 경우 W/W, 값이 증가할수록 방류 능력 증가하였으며, 특히 수두 가 낮아질수록 방류 효율 더 큰 폭으로 증가하였다. α=-2°의 경우 H₄/P <0.26일 때 W/W 값이 증가할수록 방류 능력이 증가하지만 H/P 증가 함에 따라 방류 능력이 급격하게 감소하는 양상을 보였다. 각 각도별 최 대 유량계수가 나타난 모델로 α=2°는 W_i/W_a=2.25에서 최대 약 13.6% 증가, α=4°는 W/W=2.25에서 최대 약 6.2% 증가, α=-2°는 W/W=1.75 에서 최대 약 19.5% 증가하였으며 가장 높은 방류 효율을 보였다. 전체 그래프에서 확인할 수 있는 것은 α=2°, 4°의 경우 W_i/W_o이 증가할수록 방류 효율 증가하고, 특히 H₄/P>0.34 일 때, 수두에서 방류 효율 더 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다. α=-2°의 경우 W_i/W_o 값이 증가할수록 H₄/P<0.32 는 방류 효율 증가하지만 수위가 올라감에 따라 급격하게 감 소하는 것으로 나타났다. 모든 폭에서 방류 능력의 증가 추세를 보이는 안정적인 각도는 α=2°이며 그 중 가장 높은 방류 능력을 보이는 WR2.25 α2 모델을 선정하였다.

$$R_{ratio} = \frac{C_{d, WR} - C_{d, WR_{1.00}\alpha_0}}{C_{d, WR_{1.00}\alpha_0}}$$
(4.1)

여기서 R_{ratio} 는 유량계수비, $C_{d, WR}$ 는 비교모델 유량계수, $C_{d, WR_{1.00}\alpha_0}$ 는 $WR_{1.00}\alpha_0$ 의 유량계수이다.

4.1.2 측벽 각도 영향 분석

특벽 각도에 대한 비교 또한 폭 비율 비교와 동일하게 대칭의 폭 비 율 (W_i/W_o =1.00) 및 각도 α=0°를 기준으로 모든 표준 모델의 영향을 조 사하였다. W_i/W_o =1.25일 때 α=-2°에서 최대 약 14.7% 증가, W_i/W_o =1.75는 α=-2°에서 최대 약 19.5% 증가, W_i/W_o =2.25는 α=-2°에서 최대 약 16.9% 한 것으로 나타난다. W_i/W_o =1.25에서 각도가 감소할수록 방류 효율 증가하였고, 수위가 낮아질수록 α=-2°, 2°, 4°모두 더 큰 폭으로 증 가하였다. W_i/W_o =1.75와 W_i/W_o =2.25일 때 α=-2°의 경우 W_i/W_o 값이 증가할수록 $H_i/P<0.32$ 는 방류 능력이 증가하지만 H_i/P 증가함에따라 급격하게 감소하는 경향을 보인다 (Fig. 4.2). 각도가 작아질수록 높은 방류 능력을 보이는 안정적인 추세는 W_i/W_o =1.25일 때 확인할 수 있으 며 그 중 가장 높은 방류 능력을 보이는 $WR_{1.25}$ α₋₂ 모델을 선정하였다.



Fig. 4.1 W_i/W_o effect analysis of discharge coefficient (C_d) change rate: (a) $\alpha = -2^\circ$, (b) $\alpha = 4^\circ$, (c)

 α = 2°



Fig. 4.2 Side wall angle (α) effect analysis of discharge coefficient (C_d) change rate: (a) $W_i/W_o=1.25$, (b) $W_i/W_o=1.75$, (c) $W_i/W_o=2.25$

4.1.3 유동특성 분석

방류 효율성의 증가를 분석하고 흐름 특성을 파악하기 위해 하기 위 하여 각 모델의 유선분포를 확인하였다. 먼저 $H_t/P=0.52$ 일 때를 살펴 보 면 (Fig. 4.3) 유동 관성력으로 인해 inlet crest에서 유동 분리가 발생 (Machiels et al., 2011; Denys et al., 2017)하는 것을 관찰할 수 있으며 이로인해 유효 단면적이 감소하였다. $H_t/P=0.07$ 와 비교했을 때 세로방향 의 유동 관성력으로 인해 side crest의 유입 흐름이 불충분했으며 동시에 수면 (상단) 유선의 일부가 inlet crest으로 유입되는 것으로 보아 inlet crest의 과잉 공급 발생으로 방류 능력 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 조건에서 W_t/W_o 비율을 높이면 inlet crest의 유동 단면적 증가 되면서 배출 효율 향상을 기대할 수 있다.

H_t/*P*=0.07의 유선 분포를 살펴보면 (Fig. 4.4, Fig. 4.5), outlet crest에 접근하는 흐름은 상단 유선이며 inlet crest의 중심선에서 outlet 쪽으로 분기되어 수맥간섭으로 인하여 융기가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 inlet crest에 접근하는 흐름은 하단 유선이 직선방향으로 경사를 따라 inlet crest로 진입 후 월류하는 양상을 보인다. 이와 같이 inlet crest는 바닥 (하단) 흐름에서 공급되고 outlet, side crest는 수면 (상단) 흐름에서 공급된다는 것을 확인할 수 있다. *H_t*/*P*=0.07의 경우 *H_t*/*P*=0.52 에 비해 흐름의 속도와 운동량이 유선의 방향을 쉽게 바꿀 수 있을 정도 로 작기 때문에 inlet, oulet, side crest 에서 모두 자유 월류 상태이므로 전체 배출 효율이 상대적으로 높다고 평가할 수 있다.



Fig. 4.3 Flow characteristics analysis of streamline distribution – high head $(H_t/P=0.52)$: (a) top view (z=0.01 m), (b) top view (z=2.00 m), (c) side view (z=0.01 m, z=2.00 m)



Fig. 4.4 3D diagonal view of top and bottom streams $(H_t/P=0.07)$



Fig. 4.5 Top view of flow characteristics analysis of streamline distribution – low head (H_t/P =0.07): (a) z=0.01 m, (b) z=2.00 m

방류 효율성의 증가를 분석하기 위하여 각 모델의 유속 데이터를 추 출하였다 (Fig. 4.6). 유속데이터는 수위 H_i =0.3 m에 대한 수직 방향의 inlet key의 중심선 속도 데이터를 추출하였다. α=2°, 4°의 경우 W_i/W_o 비율이 증가함에 따라 상단 수면의 유속이 꾸준히 감소하는 경향을 보였 다. 이 현상은 H_i/P =0.07일 때 마루에서의 유속은 세로 방향의 유동 관 성력을 감소시키고 마루의 접근과 분포를 가능하게 하여 결과적으로 마 루의 효율성을 향상시킨 것으로 확인되었다 (Li et al., 2019; Machiels et al., 2013).

위어의 측면에서 수위에 따른 유동 표면곡선을 비교하였다. 측면 마루 에서 바라본 폭 사이의 outlet 선상의 수맥 간섭으로 인하여 표면 곡선 이 상승하는 경향을 볼 수 있다. 표면 곡선은 폭 비율이 증가함에 따라 함께 증가하지만 α=-2°의 경우 W_i/W_o =1.75, 2.25에 대하여 잠류가 발생 한 것을 확인할 수 있으며 이로 인하여 α=-2°의 경우 W_i/W_o =1.75, 2.25 일 때 방류 능력이 급격하게 감소하는 원인으로 확인할 수 있다 (Fig. 4.7).



Fig. 4.6 Flow characteristics analysis of flow rate distribution: (a) $\alpha = 2^{\circ}$, (b) $\alpha = 4^{\circ}$, (c) $\alpha = -2^{\circ}$





Fig. 4.7 Flow characteristics analysis of surface curve $(\mathbf{X}-\mathbf{Z}$ Plan): (a) outlet $(\alpha=4^{\circ})$, (b) outlet $(\alpha=2^{\circ})$, (c) outlet $(\alpha=-2^{\circ})$, (d) inlet $(\alpha=4^{\circ}, 2^{\circ}, -2^{\circ})$

α=-2°의 경우 Z-Y평면의 모의를 통해서도 방류 능력이 감소한 이유 를 확인할 수 있다. W_i/W_o가 증가함에 따라 수맥의 충돌 위치가 상승하 며 W_i/W_o=1.75부터 잠류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 수위가 증가 함에 따라 더 큰 W_i/W_o에서 효과가 감소하는 이유는 수맥 간섭이 높아 져 잠류가 발생함으로 인해 위어의 기능이 저하되는 것으로 판단된다. 이는 유동 표면 표고가 높아지더라도 측면 유출이 억제되어 수위가 높아 질수록 방류 능력이 저하되기 때문이다. 이로 인하여 outlet crest 속도가 저하되고 흐름에 침체가 이루어지며 수위가 높아져 방류 능력 급격히 감 소하는 것으로 판단할 수 있다 (Fig. 4.8, Fig. 4.9).



Fig. 4.8 Flow characteristics analysis of nappe interference - $WR_{1.25}\alpha_2$ (**Z**-**Y** plan): (a) $H_t/P=0.07$, (b) $H_t/P=0.32$, (c) $H_t/P=0.73$



Fig. 4.9 Flow characteristics analysis of nappe interference $-H_t/P=0.73$ (**Z**-**Y** plan): (a) $WR_{1.25}\alpha_{-2}$, (b) $WR_{2.25}\alpha_{-2}$, (c) $WR_{2.25}\alpha_{-2}$

폭 대비 총 마루 길이 (*L*/*W*) 비율이 Piano key 위어의 방류 능력에 가장 영향력 있는 기하학적 설계인자 보고되어있는 것 처럼 (Ouamane and Lempérière, 2006), 낮은 수두 (*H*_l/*P*<0.32) 일 때, 각도 중 가장 긴 마루길이를 보이는 α=2°가 모든 폭에서 가장 높은 방류 효율을 보인다. 그러나 수위가 증가함에 따라 가장 긴 마루 길이에도 불구하고 급격하게 방류 능력이 감소하는 것으로 나타나는 것을 볼 수 있기 때문에, 높은 수두 (*H*_l/*P*>0.12)일 때는 *L*/*W* 비율보다 *W*_l/*W*₀이 방류 능력에 더 영향 력 있는 기하학적 설계인자로 판단된다 (Fig. 4.10). 사다리꼴 Piano key 위어가 직사각형 Piano key 위어보다 방류 능력이 우수한 요인 중 하나 는 흐름 벡터의 경로이며, 벡터 각도에 따라 사다리꼴 Piano key 위어에 서 더욱 효율적인 물 흐름경로를 제공하기 때문이다 (Fig. 4.11). 따라서 α=-2°의 경우에는 폭 대비 총 마루의 길이 비율의 영향보다 폭 비율의 영향이 더 우세하다는 것을 확인할수 있다.



Fig. 4.10 Side wall angle (α) effect analysis of total crest length (L): $W_i/W_o=1.25$



Fig. 4.11 Side wall angle (α) effect analysis of vector angle: (a) $WR_{2.25}\alpha_{-2}$, (b) $WR_{2.25}\alpha_{2}$, (c) $WR_{2.25}\alpha_{4}$

4.2 보조 설계인자 영향 분석

4.2.1 Parapet 방류 능력 평가

Case A에서 가장 높은 방류 능력을 나타내는 두 가지 모델 (*WR*_{1.25}*a* -2, *WR*_{2.25}*a*₂)을 선정하였고 각각 Sq-parapet과 Tri-parapet을 추가하여 방류 능력을 확인하기 위해 유량계수를 비교하였다. 먼저 *WR*_{2.25}*a*₂에서 Sq-parapet, Tri-parapet를 추가한 모델까지 총 3가지 모델을 비교하였 을 때 Sq-parapet를 추가한 모델의 배출은 약 3.8~9.5% 증가하였고 Tri-parapet을 추가한 모델에서 배출은 약 5.2~48.8% 증가로 유량 효율 이 크게 개선된 것을 확인할 수 있다 (Fig. 4.13). *WR*_{1.25}*a* -2에서 Sq-parapet, Tri-parapet를 추가한 모델까지 총 3가지 모델을 비교하였 을 때 Sq-parapet를 추가한 모델의 배출은 약 4.1~6.9% 증가하였고 Tri-parapet을 추가한 모델에서 배출은 약 4.6~53.8% 증가로 유량 효율 이 크게 개선된 것을 확인할 수 있다 (Fig. 4.15). 모든 모델에서 *H*₄/*P*>0.32는 이전 분석과 동일하게 *H*₄/*P*증가에 따른 수맥간섭 발생으 로 인한 방류 능력 감소로 판단된다.

본 연구에서 제시하는 모델을 설계 기준으로 활용하기 위해서는 실존 하는 기존 저수 규모와 동일한 조건에서 효과가 검증되는 것이 필요하 다. 현재 Piano key 위어가 설치되어 있는 영광의 불갑저수지의 제원을 활용하여 동일한 규모에 수치 해석을 적용하였다. 기존의 오즈 위어보다 Piano key 위어에서 3배 이상의 높은 방류 능력을 보이는 것을 확인하 였으며 선행 연구와 동일하게 수두가 증가할수록 방류 효율을 감소하는 것을 확인하였다 (Fig. 4.16).



Fig. 4.12 Parapet discharge capacity assessment of flow characteristics: (a) $WR_{2.25}\alpha_2$, (b) $WR_{2.25}\alpha_2$ -Tri











Fig. 4.16 Application of piano keys and ogee weir in Bulgap Reservoir

4.2.2 최종 방류 능력 평가

비교 모델인 *WR*_{1.00}*a*₀와 Ogee weir를 주요 설계인자 및 보조 설계인 자의 유량계수와 비교하였다 (Fig. 4.17). 먼저 *WR*_{1.00}*a*₀와 비교하였을 때 *WR*_{2.25}*a*₂가 약 3.0~13.0% 높은 효율이 나타났고, *WR*_{1.25}*a*₋₂는 약 0.3~14.3% 높은 효율이 나타났다. *WR*_{2.25}*a*₂에 Tri-parapet 보조 설계인 자를 적용한 *WR*_{2.25}*a*₂-*Tri*에서 *WR*_{1.00}*a*₀보다 약 8.3~64.9% 높은 효율 이 나타났고, *WR*_{1.25}*a*₋₂-*Tri*에서 약 4.9~72.3%로 가장 높은 효율이 나타 났다.



.

Fig. 4.17 Comprehensive discharge capacity evaluation of discharge coefficient comparison

본 연구에서 Piano key 위어가 기존의 Ogee 위어보다 월류량이 증가 하는 것을 검증하기 위하여 유량을 비교하였다. 유량비는 오즈 위어와 Piano key 위어가 동일한 수로 폭과 높이의 값을 사용하였다. 유량비 산 정식은 다음과 같다 (송재우, 2005).

$$Q_{pk}/Q_N \tag{4.2}$$

여기서 Q_{pk} 는 Piano key 위어의 유량, Q_N 는 오즈 위어의 유량이다.

유량비 비교 결과 모든 모델에 대하여 최소 1.8에서 최대 5.4의 높은 유량비로 나타나며 유량비의 추세도 유량계수와 동일하게 수두가 증가할 수록 증가 폭이 감소하는 경향을 보인다. 기존 사용되고 있는 구조 형식 에서 PK weir를 적용하였을 때 높은 방류 능력을 기대할 수 있을 것으 로 보인다 (Fig. 4.18).



Fig. 4.18 Discharge ratio compared to ogee weir

제 5 장 요약 및 결론

본 연구는 사다리꼴 Piano key 위어의 주요 설계인자와 보조 설계인 자에 따른 방류 능력 분석 및 평가하기 위해 사다리꼴 Piano key 위어 의 주요 설계인자인 폭 비율과 측벽 각도 별 모델링을 수행하였으며, 우 수한 능력을 가진 모델에 보조 설계인자를 적용하여 추가 분석하였다. 3 차원 유동해석을 위해 CFD 시뮬레이션의 수치모의 및 경계 조건을 설 정하여 수치해석을 진행하였다. 이에 대한 연구 결과를 다음과 같이 요 약하였다.

주요 설계인자인 폭 비율에 따른 영향을 비교하면 α=2°, 4°의 경우 폭 비율이 증가함에 따라 방류 능력 증가하는 경향을 보이지만 α=-2°의 경우 폭 비율이 증가함에 따라 방류 능력이 역으로 감소하는 것을 확인 하였다. 또한 저수두일때는 큰 폭으로 증가하지만 고수두에서는 작은 폭 으로 증가하는 경향을 보인다.

유량 효율은 마루의 상단 유속과 측벽 사이의 수맥간섭의 두 가지 요 소에 의해 제어된다. 방류 능력이 높은 모델일수록 마루의 유속이 느리 고 그로 인해 유동 관성력의 영향이 적으므로 전체 배출 효율이 상대적 으로 높다. 흐름의 상단, 하단 유선 분포를 분석하였다. 높은 수두 (*H*_t/*P* =0.52)일 때, inlet crest에서 유동분리 발생으로 유효 단면적이 감소하며 상단과 하단흐름이 모두 inlet으로 유입되면서 흐름의 과잉 공급으로 인 해 방류 능력이 저하되는 것을 알 수 있다.

모든 모델에 대해 폭 비율이 증가할수록 측벽 사이 흐름에 수맥간섭 으로 인해 표면이 상승하는 경향이 있으며 폭 비율 W_i/W_o=2.25, 1.75의 측벽각도 α=2°모델은 잠류가 발생하여 방류 능력이 급격하게 감소하는 경향을 확인하였다. 주요 설계인자인 측벽 각도에 따른 영향을 분석하였 다. 모든모델에 대해서 각도가 감소할수록, 즉 L/W가 증가할수록 방류 능력이 증가하였고 선행연구에서도 L/W가 방류 용량에 가장 영향력 있 는 기하학적 설계인자라 보고되었지만, α=-2°의 경우 $H_t/P>0.12$ 일 때 L/W보다 W_i/W_o 가 방류 능력에 더 영향력 있는 기하학적 설계인자로 판단된다.

기존의 보조 설계인자 Sq-parapet보다 새롭게 제시하는 Tri-parapet 는 최대 53.8% 높은 방류 능력을 나타냈으며 Tri-parapet을 적용한 모 델이 모든 수두에서 가장 높은 방류 능력을 나타내는 것을 확인하였다.

설계인자 영향 분석 및 방류 능력 평가를 종합하면, 폭 비율과 측벽 각도의 범위가 모두 결합된 상세한 비교 연구를 수행하였으며 가장 높은 방류 능력을 보이는 모델에 새로운 형태의 보조 설계인자를 추가하여 고 도화된 TPK weir 모델을 제시하였다. 이 결과는 현재 최적 설계 기준이 존재하지 않는 Piano key 위어를 실제 적용할 때 설계 지침으로서 활용 될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- Abhash, A., and Pandey, K. K. (2021). Experimental and Numerical Study of Discharge Capacity and Sediment Profile Upstream of Piano Key Weirs with Different Plan Geometries. Water Resources Management 35(5): 1529 - 46.
- Abhash, A., and Pandey, K. K. (2022). A Review of Piano Key Weir as a Superior Alternative for Dam Rehabilitation. ISH Journal of Hydraulic Engineering 28: 541 - 51.
- Abhash, A., Pandey, K. K. and Tripathi, R. P. (2021). Study of Flow over Piano Key Weir of Different Plan Shapes with Free and Partially Submerged Outlet Conditions. Water Supply 21(6): 3141 -52.
- 4. Akbari, М., Salmasi, F., Arvanaghi, Н., Karbasi, М., and Gaussian Farsadizadeh. D. (2019).Application of Process Regression Model to Predict Discharge Coefficient of Gated Piano Key Weir. Water Resources Management 33(11): 3929 - 47.
- Anderson, R. M. (2011). Piano Key Weir Head Discharge Relationships. Utah State University.
- Anderson, R. M., and Tullis, B. P. (2013). Piano Key Weir Hydraulics and Labyrinth Weir Comparison. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 139(3): 246 - 53.
- Aydin, M. C., Aytemur, H. S., and Ulu, A. E. (2022). Experimental and Numerical Investigation on Hydraulic Performance of Slit-Check Dams in Subcritical Flow Condition. Water Resources Management 36(5): 1693 - 1710.
- Behroozi, A. M., and Vaghefi, M. (2022). Experimental and Numerical Study of the Effect of Zigzag Crests with Various Geometries on the Performance of A–Type Piano Key Weirs.

Water Resources Management 36(12): 4517 - 33.

- Bekheet, A. A., AboulAtta, N. M., Saad, N. Y., and El-Molla, D. A. (2022). Effect of the shape and type of piano key weirs on the flow efficiency. Ain Shams Engineering Journal 13(3): 101620.
- Ben Said, M., Hafnaoui, M. A., and Madi, M. (2023). Numerical Analysis of the Influence of Approach Flow Conditions on the Efficiency of Labyrinth Weir. Modeling Earth Systems and Environment 9(1): 41 - 51.
- Bhukya, R. K., Pandey, M., Valyrakis, M., and Michalis, P. (2022). Discharge Estimation over Piano Key Weirs: A Review of Recent Developments. Water 14(19): 3029.
- Chahartaghi, M. K., Nazari, S., and Shooshtari, M. M. (2019). Experimental and numerical simulation of arced trapezoidal piano key weirs. Flow Measurement and Instrumentation 68: 101576.
- Crookston, B. M., Anderson, R. M., and Tullis, B. P. (2018).
 Free-Flow Discharge Estimation Method for Piano Key Weir Geometries. Journal of Hydro-Environment Research 19: 160 - 67.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Di Francesco, S., Najibi, A., and Abraham, J. (2021). Three–Dimensional Study of the Effect of Block Roughness Geometry on Inclined Drop. Numerical Methods in Civil Engineering 6(1): 1 - 9.
- 15. Denys, F., and Basson, G. (2018). Transient hydrodynamics of Piano Key weirs.
- Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Pirotton, M., Cicero, G. M., and Schleiss, A. J. (2013). Labyrinth and Piano Key Weirs II. CRC Press.
- 17. FLOW Science, Inc., 2016. FLOW-3D v11.2.0 User Manual. Santa Fe, NM, USA.
- 18. FLOW Science, Inc., 2020. CFD-101. FLOW-3D. Accessed May

10, 2020. url: https://www.flow3d.com/resources/cfd-101

- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Abbasi, S., and Abraham, J. (2020). Numerical Analysis of the Hydraulic Characteristics of Modified Labyrinth Weirs. International Journal of Energy and Water Resources 4(4): 425 - 36.
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Dasineh, M., and Di Francesco, S. (2020). Energy Dissipation and Hydraulics of Flow over Trapezoidal Triangular Labyrinth Weirs. Water 12(7): 1992.
- 21. Im, J. H., Cho, H. S., Lee, S. O., and Song, J. W. (2009). Study on Environmental Hydraulic Characteristics of Undulating Crest Type of Labyrinth Weir using 3–D Numerical Simulation. Korean Society of Civil Engineers 1492–1495.
- 22. Jang, E., Jang, J., Lee, G., and Lee, C. (2019). Korea's first application Case of Piano Key Weir – introduction of Case of Bulgap Reservoir. Water for Future 52(4): 37 - 45.
- Kabiri-Samani, A., and Javaheri, A. (2012). Discharge Coefficients for Free and Submerged Flow over Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research 50(1): 114 - 20.
- 24. Kheir-Abadi, M. A., Moghadam, M. K., Sabzevari, T., and Ghadampour, Z. (2020). An Experimental Study of the Effects of the Parapet Walls Geometry on the Discharge Coefficient of Trapezoidal Piano Key Weirs. Flow Measurement and Instrumentation 73: 101742.
- 25. Kim, D. G., Park, S. J., Lee, Y. S., and Hwang, J. H. (2008). Spillway Design by Using Numerical Model Experiment-Case Study of AnDong Multipurpose Dam. In Proceedings of the Korea Water Resources Association 1604–1608.
- 26. Kim, S., Im, J., and Lee, S. (2014). Assessment of Sediment Exclusion Efficiency for Several Modified Labyrinth Weirs. Paddy

and Water Environment 12(1): 133 - 40.

- 27. Kocaer, Ö., and Yarar, A. (2020). Experimental and Numerical Investigation of Flow Over Ogee Spillway. Water Resources Management 34(13): 3949 - 65.
- 28. Korea Facility Safety Technology Corporation. (2007). Discovery of safety vulnerable elements by facility and countermeasures: dam, river, water supply facility.
- Kumar, M., Sihag, P., Tiwari, N. K., and Ranjan, S. (2020). Experimental study and modelling discharge coefficient of trapezoidal and rectangular piano key weirs. Applied Water Science 10(1): 43.
- 30. Kumar, S., Ahmad, Z., and Mansoor, T. (2011). A new approach to improve the discharging capacity of sharp-crested triangular plan form weirs. Flow measurement and instrumentation 22(3): 175-180.
- 31. Lee, E. (2021). Increased discharge capacity of dam spillway by Piano Keys Weir. Water for Future 45(7): 23 33.
- Lee, J. H. (2020). 3D Numerical Analysis Algorithm for Dam Break Flood Wave. Seoul National University.
- 33. Lee, S. O., Kim, Y. H., and Im, J. H. (2009). Effect on Maintenance of Vertical Profile of Stream for Triangle–Type Labyrinth Weir. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 9(3), 107–116.
- 34. Li, G., Li, S., and Hu, Y. (2020). The Effect of the Inlet/outlet Width Ratio on the Discharge of Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research 58(4): 594 - 604.
- 35. Li, S., Li, G., and Jiang, D. (2020). Physical and Numerical Modeling of the Hydraulic Characteristics of Type-A Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Engineering 146(5): 06020004.

- 36. Li, S., Li, G., Jiang, D., and Ning, J. (2020). Influence of Auxiliary Geometric Parameters on Discharge Capacity of Piano Key Weirs. Flow Measurement and Instrumentation 72: 101719.
- Machiels, O., Pirotton, M., Pierre, A., Dewals, B., and Erpicum, S (2014). Experimental Parametric Study and Design of Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research 52(3): 326 35.
- Mehboudi, A., Attari, J., and Hosseini, S. A. (2016). Experimental Study of Discharge Coefficient for Trapezoidal Piano Key Weirs. Flow Measurement and Instrumentation 50: 65 - 72.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2011). Dam Design Standard.
- 40. Noui, A., and Ouamane, A. (2011). Study of optimization of the Piano Key Weir. In Proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs 175–182.
- Oertel, M., and Shen, X. (2022). 3D Printing Technique for Experimental Modeling of Hydraulic Structures: Exemplary Scaled Weir Models. Water 14(14): 2153.
- 42. Park, S. H., and Moon, Y. I. (2007). A Study on Reconstruction Models of Side-channel Spillway for Discharge Capacity Improvement. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 7(3): 9–18.
- 43. Park, S. H., and Moon, Y. I. (2008). A study on flood discharge capacity and hydraulic characteristic of labyrinth weir as a side-channel spillway. Journal of Korea Water Resources Association 41(1): 65–74.
- 44. Pfister, M., and Schleiss, A. J. (2013). Estimation of A-type Piano Key weir rating curve. Labyrinth and Piano Key Weirs II 139-147.
- 45. Ribeiro, M. L., Pfister, M., Schleiss, A. J., and Boillat, J. L (2012).

Hydraulic Design of A-Type Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research 50(4): 400 - 408.

- 46. Roushangar, K., Majedi Asl, M., and Shahnazi, S. (2021). Hydraulic Performance of PK Weirs Based on Experimental Study and Kernel-Based Modeling. Water Resources Management 35(11): 3571 - 92.
- 47. Ryu, K. H., Kim, H. T., and Lee, S. O. (2015). Estimating Hydrodynamic Characteristics of Sediment Exclusion Labyrinth Weir Using 3D Numerical Analysis. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 15(2): 277–283.
- Safarzadeh, A., and Noroozi, B. (2017). 3D hydrodynamics of trapezoidal piano key spillways. International Journal of Civil Engineering 15: 89–101.
- Salehi, S., and Azimi, A. H. (2019). Discharge characteristics of weir-orifice and weir-gate structures. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 145(11): 04019025.
- 50. Sangsefidi, Y., Tavakol-Davani, H., Ghodsian, M., Mehraein, M., and Zarei, R. (2021). Hydrodynamics and Free-Flow Characteristics of Piano Key Weirs with Different Plan Shapes. Water 13(15): 2108.
- 51. Seo, I. W., Song, C. G., Park, S. H., and Kim, D. J. (2008). Increase of Spillway Discharge by Labyrinth Weir. KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research 28(1B): 11–20.
- 52. Shen, X., and Oertel, M. (2021). Comparative Study of Nonsymmetrical Trapezoidal and Rectangular Piano Key Weirs with Varying Key Width Ratios. Journal of Hydraulic Engineering 147(11): 04021045.
- 53. Singh, D., and Kumar, M. (2022). Hydraulic Design and Analysis of Piano Key Weirs: A Review. Arabian Journal for Science and

Engineering 47(4): 5093 - 5107.

- 54. Yazdi, A. M., Hoseini, S. A., Nazari, S., and Amanian, N. (2021). Effects of Weir Geometry on Scour Development in the Downstream of Piano Key Weirs. Water Supply 21(1): 289 - 98.
- 55. Yazdi, A. M., Hoseini, S., Nazari, S., and Fazeli, M (2022). Numerical and Experimental Analysis of Scour Downstream of Piano Key Weirs. Sādhanā 47(4): 189.

Abstract Evaluating of Discharge Capacity of Trapezoidal Piano Key Weir using 3D Free Surface Analysis

Seo, Yejin

Major in Rural Systems Engineering and Integrated Major in Global Smart Farm Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering The Graduate School Seoul National University

Recently, as abnormal weather conditions occur frequently due to global warming, the intensity of concentrated heavy rain increases, increasing the risk of dam collapse due to flooding overflow. Pan-national measures such as the central government's project to increase dimensional capacity are essential to prepare for disasters, Piano key weir, a modified form of Labyrinth weir, is a repair structure that is installed at low cost regardless of the spillway's occupied area and has a great advantage of showing discharge capacity about four times higher than the existing ogee weir. However, there is no design standard for Piano key Weir, and research on optimal design factors to improve discharge capacity is continuously proposed. Research on the application of trapezoidal Piano Key Weir and auxiliary design factors, which have been proven to show higher discharge capacity than basic Piano Key Weir, is also actively underway, but further research is still needed to analyze the impact between various design factors.

In this study, various major design factors and new auxiliary design factors of trapezoidal Piano Weir were applied to analyze the impact and flow characteristics of design factors and evaluate the discharge capacity to present optimal design factors. The main design factors (Case A) were designed into a total of 9 models by crossing the width ratios of 1.25, 1.75, 2.25, and the sidewall angles of 2° , 4° , and -2° , and the discharge coefficient increase and decrease rate was investigated. The auxiliary design factor (Case B) is the previously studied square Sq-parapet and the newly proposed tri-parapet, and is added to the model showing high discharge capacity among the 9 models. The discharge capacity and flow characteristics of each model were analyzed using computational fluid dynamics (CFD) simulations that interpret mathematical governing equations in a numerical manner.

When compared to the reference model based on the width ratio and the width ratio of the side wall angles, which are the main design factors, the lower the water level at all side wall angles, the greater the discharge capacity, but the lower the water level. If the side wall angle is greater than 0, the discharge capacity increases in proportion to the width ratio, but if the angle is less than 0, the width ratio 1.75 and 2.25 show a tendency to decrease as the water level increases. When the side wall angle is 2° , it can be seen that the discharge capacity increases stably for all widths and the discharge capacity increases at all water levels. Next, when compared based on the side wall angle, the side wall angle -2° showed the highest discharge capacity at the low water level, but at the width ratios of 1.75 and 2.25 -2° showed a tendency to decrease the discharge capacity. Finally, the width ratio 1.25 and sidewall angle -2° models with stable discharge capacity for all water levels, the width ratio 2.25 and sidewall angle 2° models were selected, with up to 14.7% and 13.6%, respectively.

As a result of flow flow analysis, it was confirmed that the low flow rate of the inlet crest reduces flow inertia force and improves sidewall accessibility, so the flow is evenly distributed to improve the efficiency of the crest. In addition, it was confirmed that as the water level increased, the interference in the water nappe intensified, and the slope of the discharge curve gradually became gentle, and undercurrent occurred, reducing the discharge efficiency. As a result of applying Sq-parapet and Tri-parapet to the two selected models, it was confirmed that the discharge efficiency of Tri-parapet was significantly improved compared to the existing Sq-parapet, and it increased by up to 53.8% and 49.5%.

In the future, this study is expected to improve the model in consideration of the effect of the width ratio and sidewall angle of the trapezoidal Piano key weir on efficiency under limited space, and based on this, it is expected to be used as an additional design guideline to increase actual discharge capacity. keywords : Trapezoidal piano key weir; Hydraulic experiment; Numerical analysis; Optimal design factor; Flow characteristics *Student Number* : 2021–27313