

다단전도방식 가동보의 구조성능 평가를 위한 해석적 연구

최진우¹⁾ · 주형중²⁾ · 김정민³⁾ · 이규식⁴⁾ · 윤순종^{5)*}

¹⁾ 박사과정, 홍익대학교, 토목공학과 ²⁾ 대표이사, (주)아이시스이엔씨 ³⁾ 팀장, 일성보산업(주) ⁴⁾ 상무이사, (주)삼안 ⁵⁾ 교수, 홍익대학교, 토목공학과

An Analytical Study on the Structural Performance Evaluation of the Multistage Overturing Movable Gate

Choi, Jin Woo¹⁾ Joo, Hyung Joong²⁾ Kim, Jung Min³⁾
Lee, Kyu Shick⁴⁾ Yoon, Soon Jong^{5)*}

¹⁾ Ph.D., Candidate, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, 121-791, Korea

²⁾ Chairman, ISIS E&C Co., Ltd., Seoul, 121-842, Korea

³⁾ Team Manager, Ilsungbo Industrial Co., Ltd., Gimhae, 621-820, Korea

⁴⁾ Executive Director, Saman Co., Ltd., Seoul, 143-203, Korea

⁵⁾ Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, 121-791, Korea

ABSTRACT : Numerous water gates have been constructed and are under construction for the control of water level because, due to the topographical characteristics of mountainous area, many small size rivers are developed in Korean peninsula. Among the water gates, movable water gates are more efficient to control water level than the fixed water gates. By the field application of the movable water gates, many problems associated with the fixed water gates have been mitigated. The problems include the bottom water pollution, the change of habitats for the riparian organisms, etc. This is the reason to increase the field application of movable water gates. In the paper we present the result of analytical investigation pertaining to the structural behavior of multistage overturning movable water gate which is one of the movable water gates. In the analytical investigations, the finite element analysis on the constructed water gate has been conducted for illustration purposes and it was found that the multistage movable water gate is much better than the fixed and/or existing movable water gates in the point of structural and environmental performances.

KEYWORDS : movable gate, multistage overturning gate, stainless steel, the finite element analysis, structural behavior

1. 서론

최근 우리나라에서는 중소하천 및 4대강 유역의 농업용수 및 음용수 확보를 위해 중소형 보 및 대형 인공댐을 지속적으로 건설해왔다. 특히 우리나라는 문순강우 특성에 의해 계절별 강우의 분포가 일정하지 않기 때문에 근대화 이전부터

식수 및 농업용수 확보를 위한 보를 건설하였으며, 수중보는 최근까지도 수자원 확보를 위한 필수불가결한 요소라 할 수 있다^[1]. 또한 최근에 건설되는 보는 갈수기에 대비한 농업용수 및 생활용수의 확보나 주운을 위한 수심확보의 목적뿐만 아니라 공원 등의 친수공간 조성 및 소수력발전을 위한 용도로도 사용하고 있으며^[2], 강재 수문의 안전성에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다^{[3],[4],[5]}.

보는 구조적으로 수문이 설치되지 않고 일정 수위 이상이 되면 저수가 월류(overflow)하여 수위를 유지하는 고정보와 수문을 설치하여 수위조절이 가능한 가동보로 구분한다^[6]. 그 중 가동보는 고정보에 비해 수위를 자유롭게 조절할 수 있고, 상류부 저층수의 수질악화, 수변 생물서식처의 변화 등 고정보의 경우 발생할 수 있는 환경문제를 개선할 수 있기

Note.-Discussion open until June 30, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 12, 2013; revised September 23, 2013; approved on October 1, 2013. © KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-2-320-1479 Fax. +82-2-3141-0774
E-mail: sjyoon@hongik.ac.kr

때문에 최근 그 적용사례가 증가하고 있으며, 수요가 증가함에 따라 다양한 형태의 가동보가 개발, 시공, 운용되고 있다.

이 연구에서는 가동보의 종류 중 하나인 다단전도방식 가동보의 특징을 조사하였고, 유한요소해석 프로그램을 이용한 구조해석을 수행하여 다단전도방식 가동보의 안전성을 검토하였다. 또한 기존의 가동보에서 나타난 수리학적 문제점을 보완하고 자체의 강도를 증가시키기 위한 목적으로 설치된 저층수 배출장치와 원형가로보의 구조적 특징을 검토하기 위하여 저층수 배출장치 및 원형가로보를 배제한 구조물에 대한 유한요소해석을 수행하고, 기존 구조물의 해석결과와 비교 분석하였다.

2. 다단전도방식 가동보의 특징

2.1 구조적 특징

다단전도방식 가동보는 구조적으로 문비(gate leaf)와 받침틀로 구성되어 있으며, 문비 내에는 도복(throw-down) 및 기복(relief)을 위한 유압실린더가 장착되어 있다. 다단전도방식 가동보의 형태는 Fig. 1에 나타내었다.

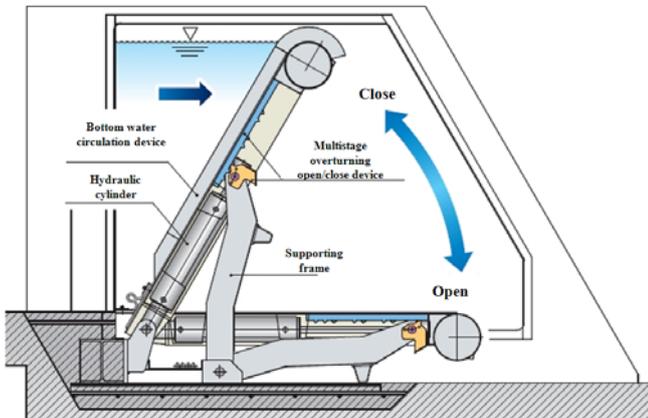


Fig. 1 Multistage overturning movable gate⁽⁶⁾

Fig. 1과 같이, 다단전도방식 가동보는 수문에 몸체가 고정되어 있는 유압실린더의 하부가 힌지로 구성되어 수문의 수평변위 및 수직변위가 고정되며, 이 하부 힌지를 중심으로 회전하면서 기복 및 도복되는 시스템으로서 유압실린더 단부 로드(rod)와 받침틀 또한 힌지로 연결하여 삼각형 트러스(truss) 형태의 안정적 구조형식으로 구성되어 있다.

다단전도방식 가동보는 삼각형 트러스 형태에서 유압실린더의 로드(rod)가 이동하여 문비를 개폐한다. 즉, 유압실린더의 스트로크(stroke)가 증가하면 수문의 문비는 도복하고 스트로크가 감소하면 문비는 기복하며 저수된다. 다단전도방식 가동보는 기복한 상태에서 저수에 의한 정수압이 작용하며, 작용하는 정수압에 대하여 문비는 휨모멘트에 저항하고, 받침틀은 문비로부터 전달되는 압축력에 저항한다.

2.2 다단전도개폐장치 및 작동원리

다단전도방식 가동보는 유압식 및 공압식으로 작동, 유지하는 기존의 가동보를 개선하기 위하여 다단전도개폐장치를 도입하였다. 다단전도개폐장치의 형태는 Fig. 2에 나타내었다.

다단전도개폐장치는 유압실린더의 스트로크가 증감하면 수문에 부착된 레일(rail) 및 가이드랙(guide rack)을 따라 이

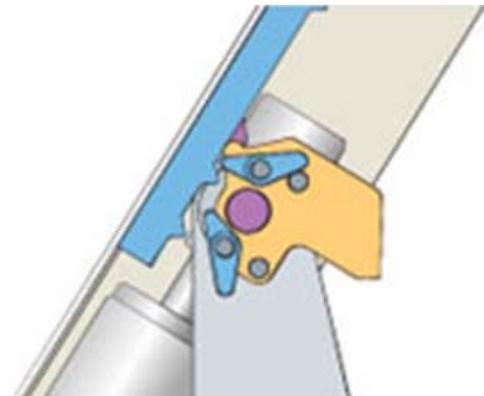


Fig. 2 Multistage overturning open and close device⁽⁶⁾

동하며 수문을 기복 및 도복시키는 기계장치이다. 즉, 다단전도방식 가동보는 유압을 이용하여 문비를 이동시키지만, 문비를 고정시키기 위해 유압을 유지하여야 하는 기존의 유압식 가동보와는 달리 다단전도개폐장치를 통해 문비를 고정한다. 이러한 기계식 기도복 시스템은 문비를 고정하기 위한 에너지손실 및 유지관리비용을 최소화할 수 있으며, 기도복 장치가 손상될 경우 기계장치에 의해 자동으로 가동보의 도복을 제한할 수 있기 때문에 일시적인 물의 무단방류로 인한 자연재해를 예방할 수 있다.

2.3 저층수 배출장치

기존 보의 가장 큰 문제점 중 하나는 보 상류 저층수의 오염으로 발생하는 환경적 피해이다. 즉, Fig 1에 나타낸 것과 같이 회전축이 하부에 배치된 경우 도복시 저수 상부가 우선 배출되기 때문에 저층수의 배출이 용이하지 않고, 이러한 현상은 환경오염의 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다단전도방식 가동보는 별도의 저층수 배출장치를 설치하였다. 저층수 배출장치의 형태 및 배출원리는 Fig. 3에 나타내었다.

저층수 배출장치는 도복시에는 작동하지 않으며, 수위가 상승하여 저수가 가동보를 월류하게 되면 수위차에 의한 수압에 의해 작동하여 저층수를 배출한다. 저층수 배출장치의 유입구는 유입수가 가동보의 배면에 대한 직각방향으로 직접 유입될 경우 이물질로 인해 막힘현상이 발생할 수 있기 때문에 측면에서 입수되는 간접 입수방식을 채택하여 유지관리가 최소화될 수 있도록 하였다.

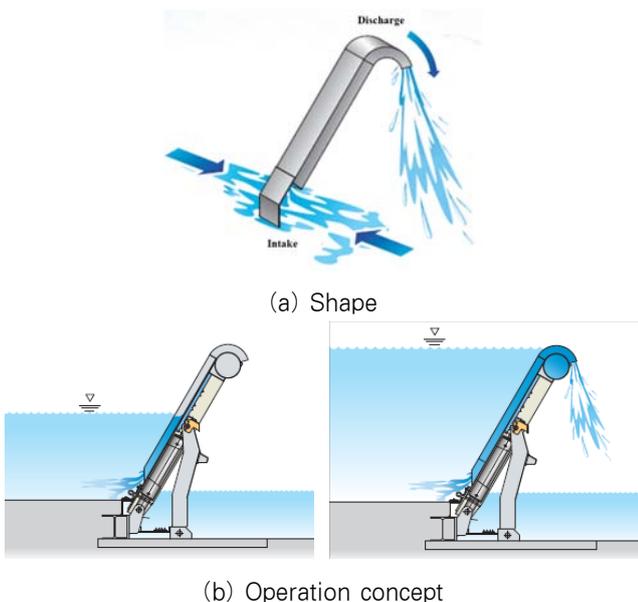


Fig. 3 Bottom water discharge device⁽⁶⁾

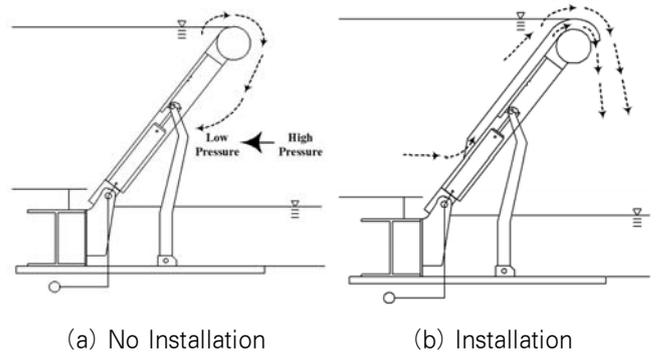


Fig. 4 Overflow mechanism due to bottom water discharge device

저층수 배출장치는 받침틀 설치 위치에 설치하며, 일반적인 설치 간격은 2.5m이다. 문비는 저수 위치 반대방향에 수압에 저항하기 위한 보강판이 설치되지만, 받침틀 설치 위치에는 다단전도장치 등으로 인해 보강판의 설치가 불가능하다. 그러므로 받침틀 설치 위치에 저층수 배출장치를 설치하여 해당 위치의 수압에 대한 하중저항성능이 향상되도록 구성하였다.

또한, 저층수 배출장치는 월류를 분배시켜 가동보 후면에 발생하는 부압을 감소시킨다. 가동보가 도복할 때 월류가 일정한 경우, 월류는 기압차로 인해 가동보 후면으로 진행하며 이는 기계장치를 손상시킬 수 있다. 따라서 저층수 배출장치로 인한 월류의 흐름을 분산시켜 기계장치의 손상을 방지할 수 있도록 구성되었다. 저층수 배출장치로 인한 월류의 흐름에 대한 개념도는 Fig. 4에 나타내었다.

2.4 지수고무 측면 벽

지수고무는 문비 후면 및 실린더 하부 회전 힌지에 이물질 방지 및 차수의 목적으로 설치하는 구성요소로서 EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) 재질을 사용하여 내구성을 확보하였다.

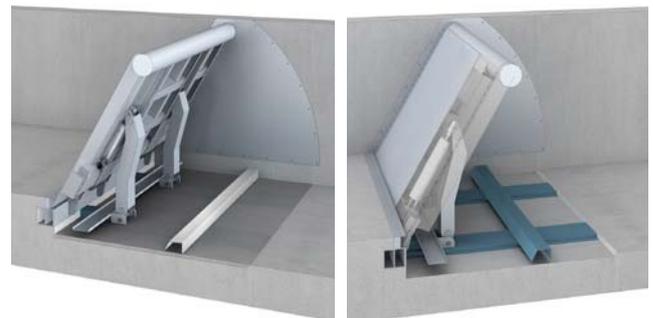


Fig. 5 Water stop at the side of multistage overturning movable gate

또한, 가동보의 측면은 지수고무를 이용하여 측면 벽에 스테인레스 스틸로 제작한 강판을 설치하고 다단전도방식 가동보에 EPDM 씬을 부착하여 저수에 대한 차수가 되도록 구성하였다. 다단전도방식 가동보 측면의 차수방안은 Fig. 5에 나타내었다.

2.5 시공방법

다단전도방식 가동보는 공장에서 제작한 구조물을 현장에 미리 타설해 놓은 기초 콘크리트 위에 위치시킨 후 2차 콘크리트 타설을 통해 합성하는 방법으로 시공한다. 구조물 시공 후에는 기계장치에 유압을 공급하기 위한 유압 작동시스템과 다단전도방식 가동보의 조작을 위한 조작실을 설치한다. 다단전도방식 가동보의 시공과정은 Fig. 6에 나타내었다.



Fig. 6 Construction process of multistage overturning movable gate⁽⁶⁾

3. 다단전도방식 가동보의 구조 안전성 검토

다단전도방식 가동보는 자중 외에 저수에 의한 정수압이 작용하며, 다단전도방식 가동보를 구성하고 있는 각 판부재들은 이에 대한 안전성을 검토하여야 한다. 이 연구에서는 기존에 시공된 다단전도방식 가동보에 대한 유한요소해석을 수행하여 구조 안전성을 검토하였다.

3.1 작용하중

다단전도방식 가동보에 작용하는 하중은 자중과 저수에 의한 정수압(hydrostatic pressure)이다. 정지상태의 유체는 일정한 형상을 홀로 유지할 수 없기 때문에 물이 담겨져 있는 용기 또는 주변환경과 동일하게 되며, 정지상태에서 용기, 바닥면 또는 수공구조물 등에 수직으로 작용하는 수압을 정수압이라고 한다^[7]. 다단전도방식 가동보는 설치 지역의 바닥면을 기준으로 경사로 설치되기 때문에 정수압은 Fig. 7에 나타낸 것과 같은 분포를 나타내며, 이때 전수압(total water pressure)은 식 (1)과 같이 구한다.

$$P_w = \frac{1}{2} \gamma_w B H^2 \cdot \text{cosec}(\theta) \quad (1)$$

식 (1)에서 γ_w 는 물의 단위중량, B 는 문비의 폭, H 는 수심, θ 는 문비의 기립각을 나타낸다. 즉, 전수압은 문비의 수심에 따라 크기가 결정되며, 기립각에 따라 실제 문비에 재하되는 하중의 크기가 결정된다. 또한 자중에는 문비의 자중 및 유압실린더, 다단전도개폐장치 등 기계장치의 자중이 포함된다.

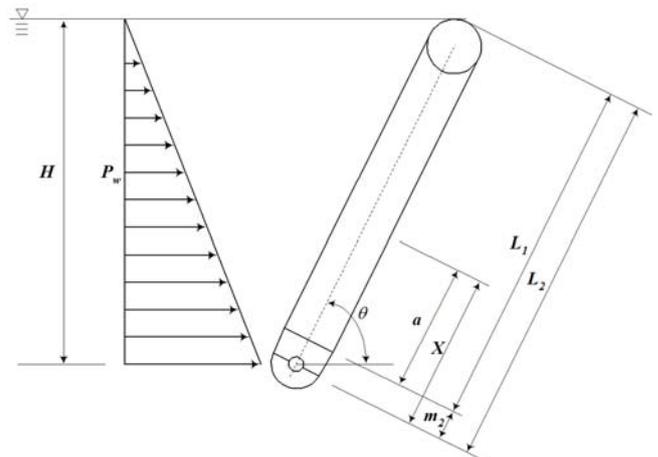


Fig. 7 Distribution of hydrostatic pressure

3.2 유한요소해석 모델

유한요소해석(The Finite Element Analysis, FEA)은 경기도 안성시에 설치된 높이 1m의 다단전도방식 가동보를 대상으로 수행하였으며, 범용 유한요소해석프로그램인 MIDAS Civil을 사용하였다^[8]. 유한요소해석 대상 구조물의 도면은 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 다단전도방식 가동보는 물에 의한 부식을 방지하기 위해 스테인리스 스틸(stainless steel)을 사용하며, 강종은 STS304를 적용하였다. 사용재료의 역학적 성질은 Table 1에 나타내었다.

유한요소해석모델은 판요소를 사용하여 구조물을 구성하고, 문비와 받침들의 회전축은 보요소를 사용하였다. 경계조

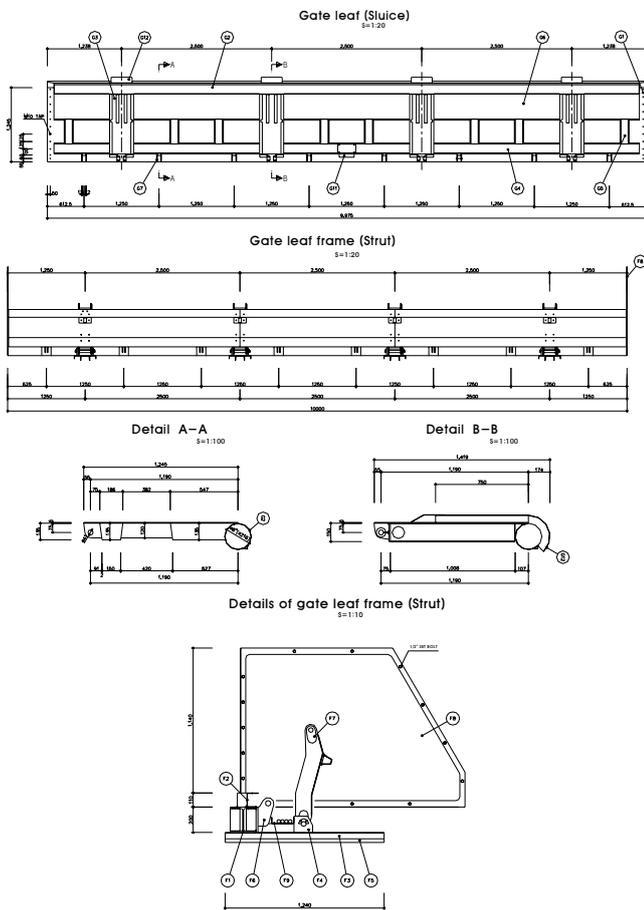


Fig. 8 Structural design details^[6]

Table 1. Material properties of STS304^[9]

Material	Yield Strength (f_y , MPa)	Ultimate Strength (f_u , MPa)	Modulus of Elasticity (E , GPa)	Density (γ , kN/m ³)
STS304	210.00	520.00 ~ 720.00	200.00	77.42

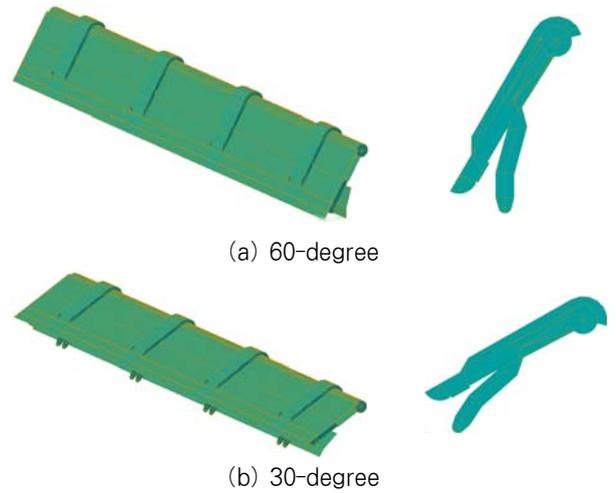


Fig. 9 FEA Models^[6]

건은 수문과 받침들의 하부 회전축을 단순지지로 가정하였으며, 유한요소해석은 최대 정수압이 작용하는 완전기립(기립각 60°)할 경우와 기립각 30°일 경우를 대상으로 수행하였으며, 유한요소해석모델은 Fig. 9에 나타내었다.

3.3 유한요소해석 결과

유한요소해석 결과 다단전도방식 가동보는 문비와 받침들이 트러스 형태로 구성되어 있기 때문에 기립각이 증가할수록 수문에 발생하는 응력은 증가하고, 받침들에 발생하는 응력은 감소하였다. 또한 판요소의 최대면내응력은 회전축 위치, 최대전단응력은 원형가로보와 수문의 접합위치에서 발생하였다. 이러한 현상은 수문에 재하되는 정수압이 받침들로 전달되면서 면내응력이 상대적으로 강도가 약한 연결축에 집중되기 때문이며, 접합부의 전단응력은 원형가로보를 판부재의 한 변에 접합하면서 가장 크게 발생한 것으로 판단된다.

해석결과 발생한 응력은 관련 설계기준^[9] 및 참고문헌^[10]에서 제시하고 있는 허용응력보다 작은 응력이 발생하였으며, 자중 및 정수압에 대하여 구조적 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 유한요소해석 결과는 Table 2에 나타내었

Table 2. FEA results of multistage overturning movable gate^[6]

Member	Angle (°)	Stress (MPa)						Remark
		Tension		Compression		Shear		
		f_{max}	f_{allow}	f_{max}	f_{allow}	f_{max}	f_{allow}	
Sluice	60	56.67	105.00	51.36	70.00	65.93	70.00	OK
	30	46.55		44.97		31.79		OK
Strut	60	9.36		16.05		5.24		OK
	30	16.59		21.63		7.47		OK

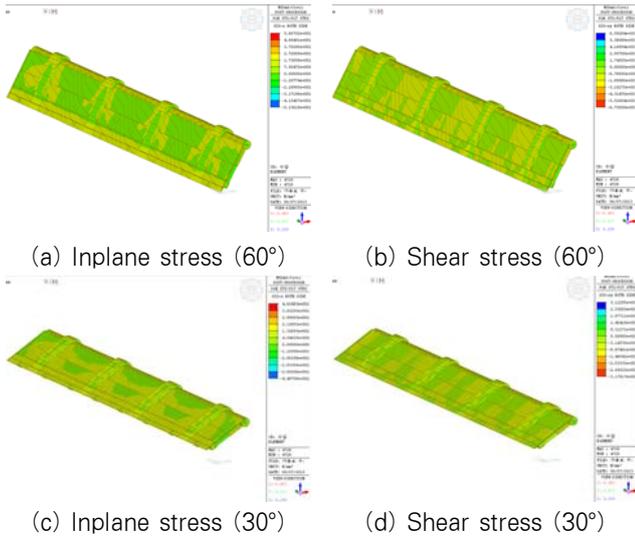


Fig. 10 Stress contour at the sluice^[6]

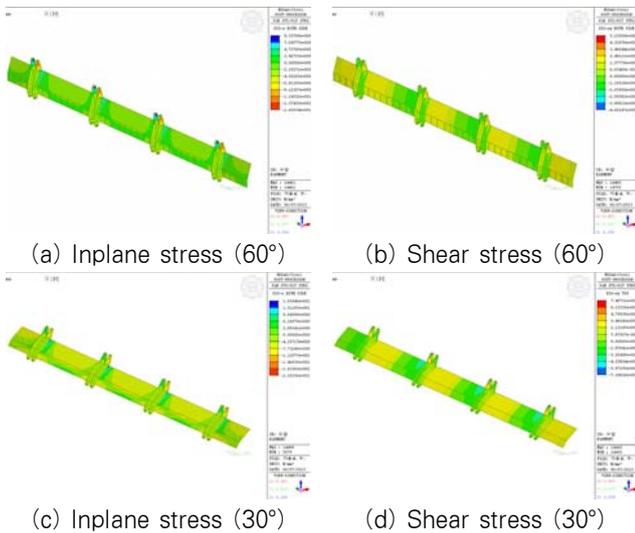


Fig. 11 Stress contour at the strut^[6]

며, 기립각 60°, 30°일 경우의 면내응력과 전단응력 분포는 문비와 받침틀로 구분하여 Figs. 10, 11에 나타내었다.

4. 연결부 강도 검토

이 연구에서 검토한 다단전도방식 가동보는 유압실린더와 다단전도개폐장치 및 문비, 받침틀에 설치된 힌지의 복합적인 작용을 통해 문비를 도복 및 기복시키는 시스템을 도입하고 있으며, 전체 구조물은 삼각트러스 형태로 구성되어 있다. 따라서 문비와 받침틀을 연결하는 연결부 및 문비, 받침틀의 하단부에 설치된 연결부에 대한 구조검토가 필요하다. 이 연구에서는 3장에서 수행한 유한요소해석으로부터 구한 연결부의 부재력 및 반력을 사용하여 연결부의 안전성을 검토하였다.

3장의 유한요소해석으로부터 구한 각 연결부의 부재력 및 반력의 최대값은 Table 3에 나타내었다.

연결부는 볼트의 전단파괴 및 연결판의 지압파괴에 대하여 구조검토를 수행하였으며, 구조검토는 관련 설계기준^[9]을 참조하였다. 각 연결부 위치별 볼트 및 연결판의 형태는 Table 4에 나타내었다.

다단전도방식 가동보의 볼트와 연결판은 내부식성을 고려하여 스테인리스 스틸을 사용하고 있다. 국외 설계자료에서는 스테인리스 스틸로 제작한 볼트 연결부의 전단검토를 극한한계상태설계법(Ultimate Limit State Design)에 근거하여 식 (2)와 같이 규정하고 있다^[9].

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \tag{2}$$

식 (2)에서 $F_{v,Rd}$ 는 연결재의 전단강도, f_{ub} 는 연결재의 인장강도, A 는 연결재의 단면적, γ_{M2} 는 강도감소계수(1.25)를 의미하며, α 는 연결재 형태와 관련된 변수로 나사산이 있는 연결재의 경우 0.5, 나사산이 없는 연결재의 경우 0.6을 적용하고 있다.

1개의 연결재로 구성된 연결부(single lap joint)의 지압강도 또한 극한한계상태설계법을 적용하며, 식 (3)과 같이 검토하고 있다.

$$F_{b,Rd} = \frac{1.5 f_{u,red} L t}{\gamma_{M2}} \tag{3}$$

Table 3. Member load or reaction at the connection

Connection	Member load or reaction at the connection		F (kN)
	F_x (kN)	F_y (kN)	
A	2.84	0.24	2.85
B	3.91	0.44	3.93
C	0.24	3.09	3.10

Table 4. Diameter of bolt and distance of connection

Connection	Diameter of bolt and distance of connection		
	A	B	C
D (mm)	36.0	41.0	41.0
L (mm)	24.5	49.0	78.0
t (mm)	10.0	22.0	22.0

Table 5. Analysis results of connection

Connection	P (kN)	Shear		Bearing	
		$R_{v,Rd}$ (kN)	$\frac{R_{v,Rd}}{P}$	$R_{b,Rd}$ (kN)	$\frac{R_{b,Rd}}{P}$
A	2.85	244.29	85.72	119.07	41.78
B	3.93	316.86	80.63	523.91	133.31
C	3.10	316.86	102.21	833.98	269.03

식 (3)에서 $F_{b,Rd}$ 는 연결판의 지압강도, L 은 연결판의 연단거리, t 는 연결판의 두께이며, $f_{u,red}$ 는 연결판의 항복강도와 극한강도에 계수를 각각 곱한 조합응력으로서 식 (4)와 같이 구한다.

$$F_{u,red} = 0.5f_y + 0.6f_u \leq f_u \quad (4)$$

각 연결부에 작용하는 하중에 대한 볼트의 전단 및 연결판의 지압 검토 결과는 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 볼트는 약 80.6배 이상, 연결판은 약 41.8배 이상의 높은 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 부식 및 반복하중에 의한 영향을 고려해야 하는 구조물인 점을 감안했을 때 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

5. 받침틀의 안정성 검토

다단전도방식 가동보는 유압실린더와 다단전도개폐장치 및 문비, 받침틀에 설치된 힌지의 복합적인 작용을 통해 문비를 도복 및 기복시키는 시스템을 도입하고 있으며, 전체 구조물은 삼각트러스 형태로 구성되어 있다. 이러한 다단전도방식 가동보의 구조적 특성상 받침틀은 정수압으로 인한 압축력에 저항하며, 이때 받침틀은 좌굴(buckling) 발생 여부에 대한 안정성(stability) 검토를 수행하여야 한다.

받침틀은 유압실린더에 설치된 다단전도개폐장치와 하부의 힌지에 얹은 판을 이용하여 연결하고, 각 판들을 보강판을 용접하여 제작하는 압축부재이다. 기존의 받침틀에 대한 구조검토는 다단전도개폐장치와 하부 힌지를 연결한 판부재를 대상으로 한 전체좌굴(global buckling)에 대하여 검토하고 있으나, 이러한 제작방식을 고려하여 국부좌굴(local buckling)에 대한 검토 또한 수행하여야 한다^[6]. 따라서 이 연구에서는 외부하중에 대한 유한요소해석을 수행하여 받침틀의 좌굴형상(buckled mode shape)을 파악하고, 그에 대한 좌굴강도와 실제 작용하중을 비교하여 안전 여부를 검토하였다.

받침틀의 안정성 검토를 위한 유한요소해석 모델은 3장에

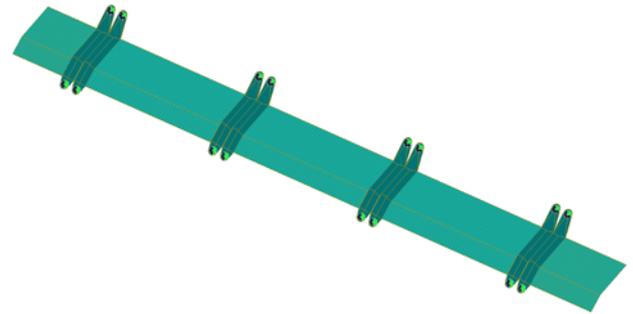


Fig. 12 FEA model for the stability analysis of strut^[6]



Fig. 13 Buckled mode shape of strut^[6]

Table 6. Buckling analysis results of strut^[6]

Compressive load (A) (kN)	Buckling load (B) (kN)	(B)/(A)	Buckling mode shape	Remark
18.08	21.96	1.22	Local Buckling (Stiffened Plate)	OK

서 언급한 구조해석 모델과 동일하며, 3장의 해석결과를 참고하여 받침각의 면내압축응력이 크게 발생한 기립각 30°인 경우에 대하여 수행하였다. 받침틀의 안정성 해석을 위한 유한요소해석 모델은 Fig. 12에 나타내었다^[6].

유한요소해석 결과 받침틀의 좌굴형상(buckling mode shape)은 상대적으로 폭두께비(width-thickness ratio)가 큰 보강판이 좌굴하는 것으로 나타났으며, 좌굴하중은 받침틀에 작용하는 하중에 비해 크게 나타났다. 따라서 받침틀은 정수압과 자중에 의한 하중상태에서 좌굴은 발생하지 않는 것으로 판단된다. 받침틀의 안정성 해석결과는 Table 6에 정리하였으며, 좌굴형상은 Fig. 13에 나타내었다^[6].

6. 보강재의 보강효과

또한 다단전도방식 가동보는 문비의 상부에 강재로 제작한 저층수 배출장치와 원형가로보를 이용하여 문비를 보강하였다. 이 연구에서는 받침틀의 안정성 및 저층수 배출장치와 원형가로보의 보강효과를 검증하기 위한 구조해석을 수행하였다.

6.1 저층수 배출장치의 보강성능 평가

저층수 배출장치는 문비 전면의 저층수 오염을 방지하기 위해 설치하며, 받침틀 위치에 설치하여 보강판 대신에 문비의 강성을 증가시킨다. 이 연구에서는 유한요소해석을 통해 저층수 배출장치의 보강성능을 검토하였다.

유한요소해석 모델 및 해석방법은 3장에서 언급한 수문 문비에 대한 해석모델 및 해석방법과 유사하지만 저층수 배출장치의 보강효과를 비교, 평가하기 위하여 문비에서 저층수 배출장치를 제외한 나머지 요소들만 고려하였다. 유한요소해석은 전수압이 큰 기립각 60°일 경우에 대하여 수행하였으며, 저층수 배출장치를 제외한 가동보의 유한요소해석 모델은 Fig. 14에 나타내었다.

유한요소해석 결과 수문에 발생하는 최대인장응력 및 최대 압축응력은 강재의 허용응력과 비교하여 Table 7에 나타내었다. Table 7에서 문비에 발생하는 인장응력은 저층수 배

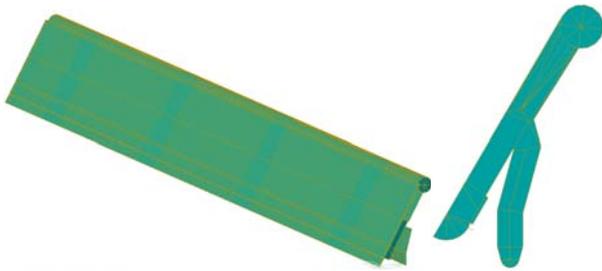


Fig. 14 FEA model for the estimation of strengthening effect for the bottom water discharge device⁽⁶⁾

Table 7. Strengthening effect of the bottom water discharge device⁽⁶⁾

Member	Stress (MPa)				Remark
	Tension		Compression		
	f_{max}	f_{allow}	f_{max}	f_{allow}	
Sluice	104.95	105.00	175.64	105.00	NG

Table 8. Comparison of results (Bottom water discharge device)⁽⁶⁾

Member	Stress (MPa)					
	Tension			Compression		
	A	B	B/A	A	B	B/A
Sluice	56.67	104.95	1.85	51.36	93.44	1.82

* A: Bottom water discharge devices are installed
 B: Bottom water discharge devices are not installed

출장치가 가동보 폭방향에 대해 일정간격으로 지지대 역할을 수행하기 때문에 저층수 배출장치를 설치한 경우에 비해 비교적 크게 발생하였으며, 이러한 현상은 저층수 배출장치가 수문 높이방향으로 응력을 분배시키지 못하고, 재하되는 하중에 대해 문비의 강판이 모두 저항하여 과도한 처짐이 발생하는 것이 원인인 것으로 판단된다. 또한, 수문에 발생하는 압축응력은 문비의 과도한 처짐으로 인해 문비와 받침틀의 연결부위의 지압에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

저층수 배출장치가 없는 가동보 문비의 구조해석 결과 최대인장응력 및 최대압축응력은 모두 허용응력을 초과하고 있어 저층수 배출장치의 구조적 보강효과는 매우 큰 것으로 평가되었다.

이 연구에서는 다단전도방식 가동보의 저층수 배출장치에 대한 구조적 보강효과를 검토하기 위해 저층수 배출장치를 설치한 경우와 설치하지 않은 해석모델에 대한 구조해석 결과를 비교하여 Table 8에 나타내었다. Table 8에서 최대인장응력은 저층수 배출장치를 설치한 경우에 비해 설치하지 않은 경우 약 1.85배 크게 나타났으며, 최대압축응력은 약 1.82배 크게 발생하는 것으로 나타나 저층수 배출장치의 보강효과를 확인할 수 있었다.

6.2 원형가로보의 보강성능 평가

이 연구에서 검토한 다단전도방식 가동보는 상부에 원형가로보를 설치하여 수문의 폭방향에 대한 강성을 증가시키고 문비의 변형을 억제하도록 구성되어 있다. 따라서 원형가로보의 구조적 보강성능을 검토하기 위한 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석 모델 및 해석방법은 3장에서 언급한 수문 문비에 대한 해석모델 및 해석방법과 유사하지만 원형가로보의 보강효과를 비교, 평가하기 위하여 문비에서 저층수 배출장치를 제외한 나머지 요소들만 고려하였다. 유한요소해석은 저층수 배출장치의 보강효과 검증 과정과 마찬가지로 전수압이 큰 기립각 60°일 경우에 대하여 수행하였으며, 원형가로보를 제외한 가동보의 유한요소해석 모델은 Fig. 15에 나타내었다.

유한요소해석 결과 수문에 발생하는 최대인장응력 및 최대 압축응력은 강재의 허용응력과 비교하여 Table 9에 나타내었다. Table 9에서 문비에 발생하는 인장응력은 원형가로보가 가동보 높이방향에 대한 직각방향으로 지지대 역할을 수행하기 때문에 가로보가 존재하는 경우에 비해 비교적 크게 발생하였으며, 이러한 현상은 원형가로보가 폭방향으로 응력을 분배시키지 못하고, 재하되는 하중에 대해 문비의 강판이 모두 저항하며, 받침대 또는 저층수 배출장치 사이에서 과도

한 처짐이 발생하는 것이 원인인 것으로 판단된다. 또한 수문에 발생하는 과도한 압축응력은 문비의 과도한 처짐으로 인해 문비와 받침틀의 연결부위의 지압에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

원형가로보가 없는 가동보 문비의 구조해석 결과 최대인장응력 및 최대압축응력은 모두 허용응력에 가까운 결과를 나타냈으며, 원형가로보의 구조적 보강효과는 매우 큰 것으로 평가되었다.

이 연구에서는 다단전도방식 가동보의 원형가로보에 대한 구조적 보강효과를 검토하기 위해 원형가로보를 설치한 경우와 설치하지 않은 해석모델의 구조해석 결과를 비교하여 Table 10에 나타내었다. Table 10에서 최대인장응력은 원형가로보를 설치한 경우에 비해 설치하지 않은 경우 약 1.64배 크게 나타났으며, 최대압축응력은 약 1.55배 크게 발생하는 것으로 나타나 원형가로보의 보강효과를 확인할 수 있다.

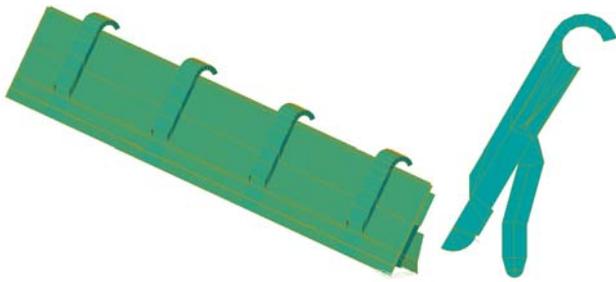


Fig. 15 FEA model for the estimation of strengthening performance of the circular section cross-beam⁽⁶⁾

Table 9. Strengthening effect of the circular section cross-beam⁽⁶⁾

Member	Stress (MPa)				Remark
	Tension		Compression		
	f_{max}	f_{allow}	f_{max}	f_{allow}	
Sluice	92.98	105.00	79.36	105.00	OK

Table 10. Comparison of results (Circular section cross-beam)⁽⁶⁾

Member	Stress (MPa)					
	Tension			Compression		
	A	B	B/A	A	B	B/A
Sluice	56.67	92.98	1.64	51.36	79.36	1.55

* A: Circular section cross-beam is installed
 B: Circular section cross-beam is not installed

7. 결 론

이 연구에서는 다단전도방식 가동보의 수리학적, 구조적 특징을 분석하고, 구조적 거동 평가를 위한 해석적 연구를 수행하였다. 이 연구에서 제시한 다단전도방식 가동보의 특징 및 구조적 성능을 분석한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 다단전도방식 가동보의 유한요소해석 결과 자중 및 정수압에 대하여 구조적 안전성을 확보한 것으로 나타났으며, 기립각이 증가할수록 문비에 발생하는 응력은 증가하고, 받침틀에 작용하는 응력은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 최대면내응력은 문비와 받침틀의 회전축, 최대전단응력은 원형가로보와 수문의 접합부에서 발생하였다.
- (2) 다단전도방식 가동보의 각 부재를 회전하여 도복 및 기복시키는 연결부는 전단강도 약 80.6배 이상, 지압강도 약 41.6배 이상의 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 부식 및 반복하중의 영향을 고려해야 하는 구조물인 점을 감안했을 때 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다.
- (3) 받침틀의 안정성 해석결과 좌굴형상은 폭두께비가 큰 보강판이 좌굴하는 것으로 나타났으며, 받침대의 좌굴강도는 재하되는 압축력보다 크게 나타났다. 따라서 받침대는 정수압 및 자중에 대해 좌굴안정성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- (4) 원형가로보는 정수압에 대하여 다단전도방식 가동보의 폭방향 강성을 증가시키는 역할을 하며, 유한요소해석 결과 원형가로보를 설치하지 않을 경우 최대인장응력은 약 1.64배, 최대압축응력은 약 1.55배 크게 발생하는 것으로 나타났다.
- (5) 저층수 배출장치는 받침틀 설치위치의 강도 및 강성을 증가시키는 역할을 하며, 유한요소해석 결과 저층수 배출장치를 설치하지 않을 경우 최대인장응력은 1.85배, 최대압축응력은 약 1.44배 크게 발생하는 것으로 나타났다.
- (6) 다단전도방식 가동보는 구조적 안전성, 수압에 대한 안정성 및 연결부의 안전성에 대한 구조검토 결과 우수한 구조적 성능을 확보하고 있음을 확인하였다. 또한 다단전도방식 가동보는 폭두께비가 큰 강판으로 제작된 문비의 구조적 성능을 확보하고 수리학적 장점을 확보할 수 있는 저층수 배출장치와 원형가로보를 적용하여 기존 보의 여러 가지 문제점 및 자체적인 문제점을 해결하였다. 그러나 연결부의 경우 상대적으로 높은 안전율을 확보하고 있기 때문에 상대적으로 경제적 측면에서 추가적인 검토가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 수리모형실험, 현장계측

등을 통하여 실질적인 구조적 거동 및 수리학적 특성에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 일성보산업(주), (주)삼안, 세진특허법률사무소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌(References)

[1] 한정호, 고대근, 임병진, 박종환, 안광국(2012) 죽산보의 어도에서 트랩 샘플링 기법을 이용한 하절기 일주기별 어류 이동성 평가, *한국영향평가, 한국환경영향평가학회*, 제 21권, 제6호, pp.879-891.
Han, J.H., Ko, D.G., Lim, B.J., Park, J.H., and An, K.G. (2012) Summer Patterns and Diel Variations of Fish Movements Using Fish Trap Sampling Technique in the Juksan Weir, *Journal of Environmental Impact Assessment, Environmental Impact Assessment*, Vol. 21, No. 6, pp.879-891 (in Korean).

[2] 여창건, 김영호, 서근순, 송재우(2009) 가동보 설치로 인한 수리학적 영향 분석, *대한토목학회 정기학술대회 논문집*, 대한토목학회 pp.2661-2664.
Yeo, C.G., Kim, Y.H., Seo, G.S., and Song, J.W. (2009) The Study for Hydraulic Influence by Installing Movable Weir, *Proceedings of Annual KSCE Conference*, KSCE, pp.2661-2664 (in Korean).

[3] 김용열, 김병호, 윤순중, 민대홍, 정지승(2013) 소양강댐 강제 수문의 현장계측 및 구조해석, *한국강구조학회 2013년도 학술발표대회 논문집*, 한국강구조학회 pp.143-144.
Kim, Y.Y., Kim, B.H., Yoon, S.J., Min, D.H., and Chung, J.S. (2013) Field Measurement and Structural Analysis of Soyanggang Dam Steel

Gate, *Proceedings of 24th Annual KSSC Conference*, KSSC, pp.143-144 (in Korean).

[4] 구민철, 현정재, 이갑수, 김창범(2013) 강제수문의 설계 적산지침 적용방안에 대한 연구, *한국강구조학회 2013년도 학술발표대회 논문집*, 한국강구조학회 pp.43-44.
Gu, M.C., Hyun, J.J., Lee, K.S., and Kim, C.B. (2013) A Study on the Application Method for Design Squaring Guideline of Hydraulic Gates, *Proceedings of 24th Annual KSSC Conference*, KSSC, pp.43-44 (in Korean).

[5] 이복환, 조태영, 김한주(2011) 성덕다목적댐 취수수문의 실린더게이트 기술검토사례, *한국강구조학회 2013년도 학술발표대회 논문집*, 한국강구조학회 pp.145-146.
Lee, B.H., Cho, T.Y., and Kim, H.J. (2013) Case Report on Technical Study for Cylinder Gate in Seong Duk Multipurpose Dam, *Proceedings of 24th Annual KSSC Conference*, KSSC, pp.145-146 (in Korean).

[6] 윤순중(2013) 다단전도방식을 적용한 개폐식 가동보의 구조적 안전성 검토, 연구보고서, *홍익대학교 부설 과학기술연구소*.
Yoon, S.J. (2013) *Structural Safety Evaluation of Retractable Multistage Overturning Moveable Weir*, Technical Report (in Korean).

[7] 송재우(2005) 수리학, 구미서관.
Song, J.W. (2005) *Hydraulics*, Goomibook (in Korean).

[8] MIDAS Information Technology Co., Ltd. (2012) *Analysis Reference*, MIDAS Civil.

[9] Euro Inox and The Steel Construction Institute (2006) *Design Manual for Structural Stainless Steel*, Third Edition, Luxembourg. pp.6, 13, 15.

[10] RIST강구조연구소(2012) 스테인리스강의 설계, 구미서관, pp.28.
RIST (2012) *Structural Design of Stainless Steel*, Goomibook (in Korean).

요약: 우리나라의 지형 특성상 많은 중소하천들이 생성되어 있으며, 이에 대한 치수 목적으로 다양한 보가 건설되고 있다. 그 중 가동보는 고정보에 비해 저수위를 자유롭게 조절할 수 있고, 상류부 저층수의 수질악화, 수변 생물 서식처의 변화 등 고정보의 문제점을 개선할 수 있기 때문에 그 적용빈도가 증가하고 있는 추세이다. 이 연구에서는 가동보의 종류 중 하나인 다단전도방식 가동보에 대한 특징을 조사하고, 시공된 구조물을 예로 구조적 성능을 확인하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 또한, 유한요소해석을 통해 얻은 결과로부터 다단전도방식 가동보의 우수한 구조적 성능을 확인할 수 있었다.

핵심 용어: 가동보, 다단전도방식 가동보, 스테인리스강, 유한요소해석, 구조적 거동