

셸타입 로울러 게이트의 회피개도량 산정 방법

정지승 · 정해욱*

동양대학교 철도건설안전공학과 · *다음기술단
(2016. 12. 22. 접수 / 2017. 4. 10. 수정 / 2017. 4. 18. 채택)

A Method on Estimation of Avoiding Open Range on Shell-type Roller Gate

Jee-Seung Chung · Hae-Wook Jung**

Department of Railroad Construction & Safety Engineering, Dongyang University

*Daum Engineering and Construction

(Received December 22, 2016 / Revised April 10, 2017 / Accepted April 18, 2017)

Abstract : When the shell-type roller gate is partly open, at a certain height the large vibration is caused due to resonance and the vibration can cause damage to the gate. In this study, the review on amplitude of vibration and the possible resonance occurring at the time of opening or closing of gate is performed. Throughout the natural frequency analysis, the installation location of the measuring instrument was selected. On opening or closing of gate, the measurement of gate vibration is performed. The natural frequencies according to the opening range of the gate is analyzed. As a result of measurement and analysis, we proposed ranges in which vibration occurs largely and resonance is predicted as an avoiding open ranges, or the safe opening or closing of the shell-type roller gate. The application of this paper's avoiding open range estimation method of shell-type roller gate can be utilized as the basic data for the systematic and rational maintenance management of dams and submerged weirs in the future, and it is expected that this study can bring forth.

Key Words : shell-type roller gate, avoiding open range, natural frequency, additional mass, resonance

1. 서론

수위조절이 가능한 가동보에 설치되는 수문은 홍수 위 조절 및 수자원활용을 위한 보의 주요 구조물이며, 최근 4대강 수중보의 신설로 셸타입 로울러 게이트, 트러스형 로울러 게이트, 2단 셸 게이트, 라이징섹터 게이트 등 다양한 형식의 가동보 수문이 설치되어 운영되고 있다. 이러한 수문의 문비에서 상하류 수두차가 있는 경우, 개도 초기에서는 불안정한 흐름으로 인한 전단층의 불안전성과 와류의 영향으로 부압이 발생하여 진동이 발생하게 된다¹⁾. 또한 문비가 어느정도 개도된 후에는 하류로부터의 와류현상이나 역류로 인해 강한 진동현상이 발생할 수 있다. 이러한 진동은 문비의 피로파괴를 야기시킬 수 있는 피로응력을 유발하여 문비의 안전성에 중대한 영향을 미칠 수 있으며 문비의 진동으로 인한 영향은 문비팔을 통하여 콘크리트 교각

에 연결된 힌지 지점으로 연결되어 콘크리트 구조물에 피로 파괴를 발생시킬 수 있다. 테인터 게이트, 트러스형 리프트 게이트의 진동특성에 관한 연구는 많이 진행되었지만, 진동특성 중 가진진동수와 문비의 고유진동수를 고려하여 공진에 대한 영향을 검토한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 가동보 수문 중 셸타입 로울러 게이트에 대한 개도 시 진동 계측과 고유진동해석을 통해 개도율에 따른 문비의 진동특성을 평가하고 공진 영역을 고려한 문비의 회피개도량 산정기법을 제안하고자 한다.

2. 기존의 수문 진동평가 연구

일반적으로 수문의 공진 등 진동에 관한 해석에서는 Westergaard의 동수압해석으로부터 파생된 부가질량법에 의한 상세 진동해석이 이루어지고 있다²⁾.

* Corresponding Author : Hae-Wook Jung, Tel : +82-31-698-2288, E-Mail : ajussen@naver.com
Daum Engineering and Construction, 240, Pangyoyeok-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13207, Korea

기존의 관련 연구로 2009년에 Bae³⁾는 수문의 정밀 해석을 위하여 부가질량을 보정하여 적용하는 방안을 제시하였고, 2009년에 Kim⁴⁾은 고유진동수의 현장계측과 수치해석을 통해 수문의 부가질량을 산정하고 그 결과를 내진성능평가에 적용하였다. 1996년부터 2005년까지 Lee⁵⁾는 원호형 수문의 동적 특성에 관한 실험 연구를 수행하였으며, 수문의 개방높이에 대한 하면 폭의 비와 수문의 진동특성 및 부가응력에 대한 연구를 수행하였고, 2012년에는 트러스형 리프트 게이트의 진동특성을 모형실험을 통해 분석하였다⁶⁾. 2013년에는 Lim⁷⁾은 쉘타입 로울러 게이트의 안전성 평가 방법을 제시하였다. 그러나 기존 연구는 모형실험에 의한 문비에 대한 진동특성 및 문비에 형상에 따른 거동 분석에 대한 연구가 주로 이루어졌으며 실제 수문 문비에 대한 진동평가와 회피개도 등 수문 운영조건에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 실제 수문 문비의 개폐 시 계측을 통해 진동을 분석하고, 동적해석을 통한 문비의 동적특성을 평가하고, 회피 개도량을 산정하는 연구가 필요하다.

3. 쉘타입 로울러게이트의 회피개도량 산정

3.1 개요

본 연구의 대상 수문은 국내 4대강 수중보에 설치되어 있는 000수문으로, 형식은 쉘타입 로울러 게이트이며, 높이에 비해 길이가 길고, 양 끝단에서 와이어로프에 의하여 인양시키는 방식이다⁸⁾. 대상 수문의 현황은 Table 1과 같으며, 대상 문비의 형상은 Fig. 1과 같다.

Table 1. Shell-type roller gate overview

Section	Facilities overview
Form	Shell-type roller gate
Standard	45.0 m(W) × 3.0 m(H) × 6 EA Windlass : 320 Ton(160 TON+160 TON) × 6 EA

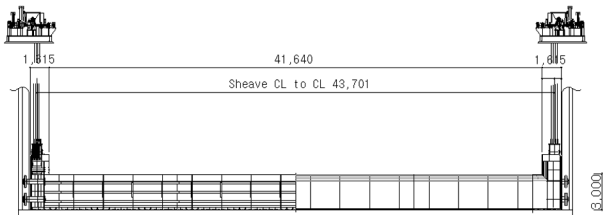


Fig. 1. Shell-type roller gate.

3.2 유체유발 진동

수문이 완전히 닫혀있고 물이 정지상태에 있을 때, 수문에 작용하는 압력은 정수압 법칙을 다르며, 쉽게

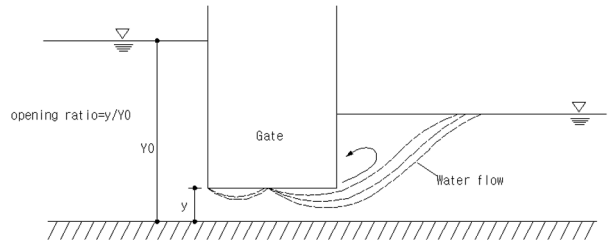


Fig. 2. Gate vibration induced by vortex.

계산이 가능하다. 또한 유체의 흐름이 없을 때 수문에 작용하는 수압의 연직분력성분은 수문 본체의 부력을 포함하고 있다. 수문이 개방되면 정수압의 균형이 무너지게 되고, 수문 수변 내압수두의 불균형한 분포가 발생하게 된다. 수문 하단에서의 빠른 유체 흐름은 국부적인 압력 감소를 유발한다. 따라서 수문 개도 시 유체 흐름에 의한 압력차에 의해 유수방향으로 문비에 진동이 발생하게 된다.

또한 문비의 개도율에 따라 개도 시에 문비 하단에서의 유체흐름(Fig. 2)과 하류로부터의 와류현상이나 역류하는 물결로 인해 유수방향과 연직방향으로 진동 현상이 발생한다⁹⁾.

3.3 부가질량

수문의 고유진동수 산정을 위한 구조해석 시 수문과 접하고 있는 물의 부가질량을 고려하여 해석을 수행하였으며, 물의 부가질량은 Westergaard가 제안한 식을 이용하며 단위면적당 작용하는 부가질량의 밀도(m_v)는 식 (1)과 같고, 부가질량의 분포형상은 Fig. 3과 같다.

$$m_v = \frac{7}{8} \rho \sqrt{H \cdot h} \quad (1)$$

앞서 구한 부가질량 밀도를, 수심 h_1 과 h_2 사이에 위치하는 유한요소 절점에 작용하는 하중과 부가질량

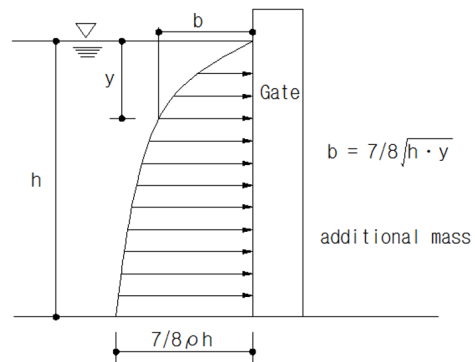


Fig. 3. Additional mass by westergaard.

(M_v)으로 전환하면 식 (2)와 같다.

$$M_v = \int_{h_1}^{h_2} \left(\frac{7}{8} \rho \sqrt{H \cdot h} \right) dh \quad (2)$$

여기서, m_v : 수면에서 수심 h 에 작용하는 질량 밀도
 M_v : 수심 h_1 과 h_2 사이 존재하는 질량밀도의 합

3.4 공진 및 고유진동수 해석

고유진동수해석은 구조물이 갖고 있는 고유진동수와 각 고유진동수에서의 변형형상을 파악하여 구조물의 공진여부와 진동에 의한 변형 형상을 예측하는 해석이다. 구조물 자체의 고유진동수와 외부하중의 가진진동수가 일치하게 되면 구조물에 공진(resonance)이 발생하게 되며, 구조물에 공진이 발생하면 진동과 소음이 급격하게 커지고 궁극적으로 구조물이 파괴될 수도 있다. 고유진동수는 질량의 제곱근에 반비례하기 때문에 Fig. 4와 같이 개도율이 증가함에 따라 부가질량을 고려한 수문 문비의 질량은 감소하게 되며 고유진동수는 증가하게 된다.

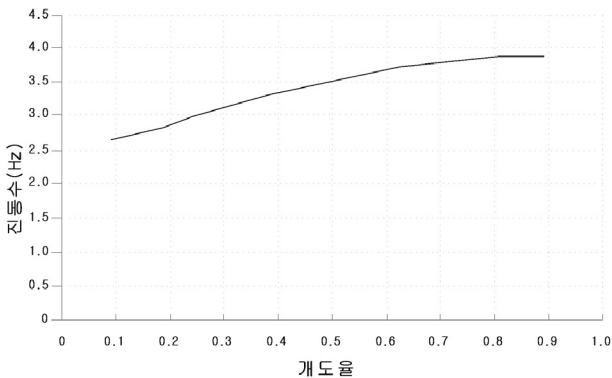


Fig. 4. Natural frequency according to the gate opening.

구조물의 고유진동수가 구조물에 가해지는 하중의 가진진동수의 근처에 있게 되면 구조물에 공진이 발생하게 되며 큰 진동이 발생하게 된다. 공진의 검토는 작용하중의 가진진동수와 구조물의 고유진동수의 일치여부와 더불어 각 진동모드에서의 질량참여율을 검토하여 산정할 수 있다.

즉, 구조물의 고유진동수와 가진진동수가 일치하고, 그 모드에서의 질량참여율이 높을 때 공진에 의해 구조물의 큰 진동이 발생하며, 따라서 본 연구에서는 부가질량을 고려한 해석 고유진동수 및 질량참여율과 진동계측에 의한 구조물 진동수를 비교하여 구조물의 공진을 평가한다.

수문 개도 시 진동 계측을 위해 Skin plate, 보강재 등 문비의 주요부재에 가속도계를 설치하고 수문이 물에 잠긴 상태에서 수문을 열어 방류상태로 계측을 수행한다. 가속도 계측으로 유체의 진동수, 가속도 진폭 데이터를 획득하여 공진에 대한 안정성평가와 회피개도량을 산정한다.

4. 회피개도량 산정

4.1 개요

기존의 수문에 대해 각종 구조부재의 실제거동을 정확히 나타낼 수 있도록 Skin plate, 수직 보조빔, 다이아프램 및 기타 부재를 Plate 요소로 3차원 모델링하여 고유진동수를 산정하고, 문비 개도 시 개도율별 가속도를 측정하여 가속도 진폭 및 가진진동수를 측정하여 이를 비교함으로써 문비의 개도 시 안정성을 확보할 수 있는 영역인 회피개도량 산정방법을 제시하였다.

4.2 고유진동수 해석

4.2.1 해석조건 및 방법

개도 높이에 따른 문비의 고유진동수는 수치해석을 이용해서 구하였으며, 물과 접하는 문비 전면부에는 Fig. 8과 같이 수위에 따른 부가질량을 고려하였다. 문비의 고유진동수 해석 시 경계조건으로 수문 양측면에 있는 로울러는 유수흐름방향 변위와 보의 축방향 변위를 고정하였으며, Fig. 9에서처럼 케이블 로우프 연결

Table 2. Water level conditions

Section	Level	Elevation(m)
Upstream	Flood level	36.240
	Overtopping level	28.730
	Management level	28.000
Downstream	Management level	25.000
	Floor level	25.000

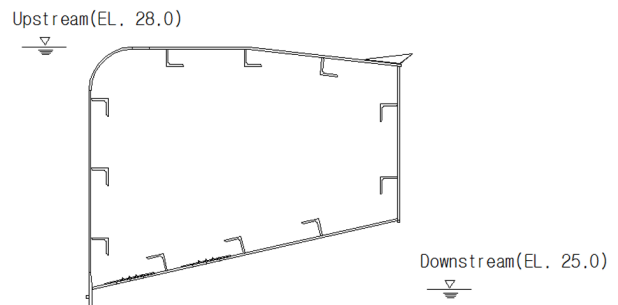


Fig. 5. Water level condition applied on analysis.

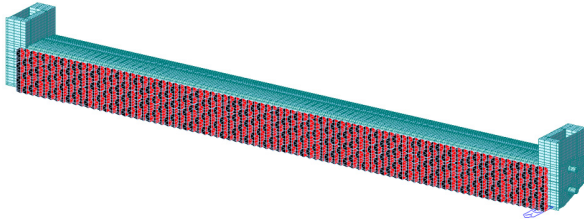


Fig. 6. Additional mass.

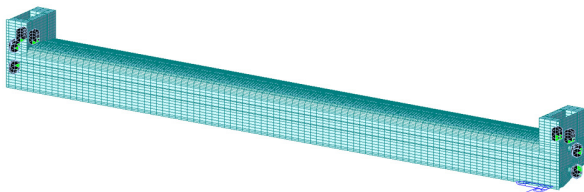
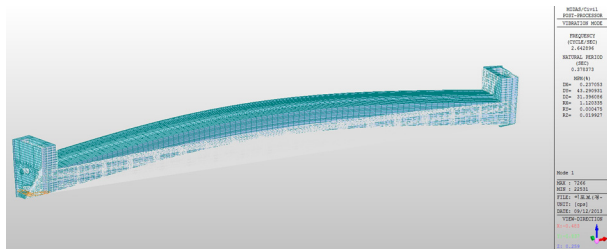


Fig. 7. Natural frequency analysis modeling and boundary conditions.

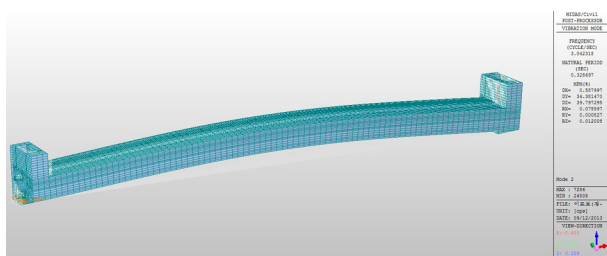
부도 연직방향 변위를 고정하였다. 문비 상류, 하류 수위조건은 Table 2와 같으며 관리수위를 적용하였고, 해석프로그램으로는 MIDAS CIVIL를 사용하였다.

4.2.2 해석결과

개도율별 수위조건에 따른 부가질량을 고려한 고유진동수 해석결과는 Fig. 8, Table 3과 같다.



(a) Stream direction mode 2.642 Hz(질량참여율(M.P.F):43.29%)



(b) Vertical direction mode(질량참여율(M.P.F):39.80%)

Fig. 8. Natural frequency results.

개도율별 유수방향(1차모드) 고유진동수는 2.643~3.896 Hz, 연직방향(2차모드) 고유진동수는 3.042~ 4.489 Hz로 나타났으며, 질량참여율은 37~43%정도 모드에 기여하는 것으로 나타났다.

Table 3. Natural frequency results.

No.	Opening rate	Analyzed natural frequency(Hz)	Direction
1	0.090	2.643	stream
		3.042	vertical
2	0.188	2.823	stream
		3.253	vertical
3	0.245	2.992	stream
		3.447	vertical
4	0.314	3.149	stream
		3.628	vertical
5	0.382	3.303	stream
		3.804	vertical
6	0.451	3.432	stream
		3.952	vertical
7	0.529	3.555	stream
		4.093	vertical
8	0.624	3.711	stream
		4.272	vertical
9	0.719	3.804	stream
		4.380	vertical
10	0.809	3.863	stream
		4.450	vertical
11	0.893	3.896	stream
		4.489	vertical

4.3 진동계측

4.3.1 개요

Skin plate에 가속도계를 부착하고 수문이 물에 잠긴 상태에서 수문을 열어 방류상태로 계측을 수행한다. 가속도 계측으로 유체의 진동수, 가속도 진폭 데이터를 획득하여 공진에 대한 안정성평가와 회피개도량을 추정한다.

계측장비로는 Data Logger(NETPOD 4003)와 가속도계(AC310-002)를 사용하였고, Data 분석 프로그램은 Daq-View를 사용하였다.

진동센서 설치위치는 고유진동해석결과 최대응답이 발생하는 문비 중앙부에 설치하였다. 해석결과 질량참여율이 최대가 되는 진동모드는 셀박스가 하나의 강체로 거동하는 모드이며 하중이 직접작용하는 문비 전면부와 하면부 중앙 Skin plate에 진동센서를 설치하여 진동계측을 실시하였다. 하면부에 연직방향 진동 계측 센서는 연직방향과 수직한 면에 설치하여야 하나 본 연구에서는 문비여건에 따라서 하부 경사면에 설치하여 계측하였으며 Fig. 10에 방류 시 진동 계측 센서 위치를 표시하였다.

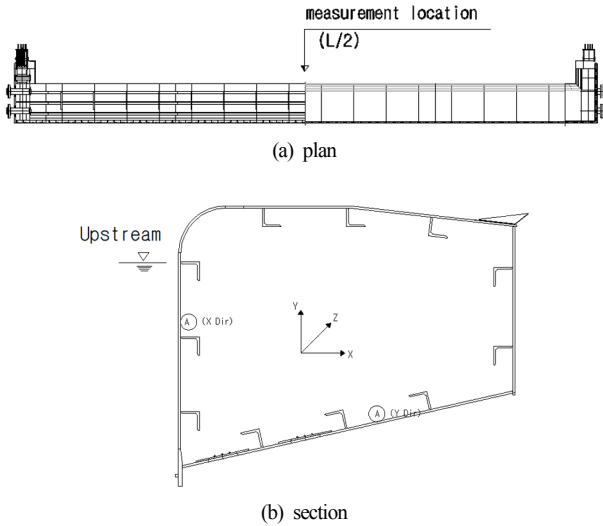


Fig. 9. Sensor location for measurement.

4.3.2 계측결과

가속도 측정은 문비의 운영조건인 0.3 m/sec의 속도로 문비를 연속개도방식으로 들어올리면서 측정하였으며, 2회 측정하여 그 결과를 분석하였다. 계측빈도는 고유진동해석결과(2.64~4.489 Hz)와 연속개도 시 측정시간과 계측기 저장용량을 고려하여 30 Hz를 적용하였다.

1) 가속도 진폭

진동측정은 관리수위상태에서 문비의 개도를 전체 높이에 대하여 연속으로 작동하면서 가속도를 측정하였다. 진동측정결과 진폭이 상대적으로 크게 발생하는 구간은 Fig. 11과 같이 개도율 0.0~0.10, 0.95~1.0 구간이다. 개도초기인 개도율 0.0~0.10구간에서는 유수방향과 연직방향에서 개도율 0.95~1.0구간에서는 연직방향의 가속도 진폭이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 개도초기에는 유수흐름이 빠르고 문비하부와 후면부에서 와류가 발생하여 진폭이 크게 발생하고, 개도율 0.95~1.0구간에서는 문비에 작용하는 수압이 작아져서

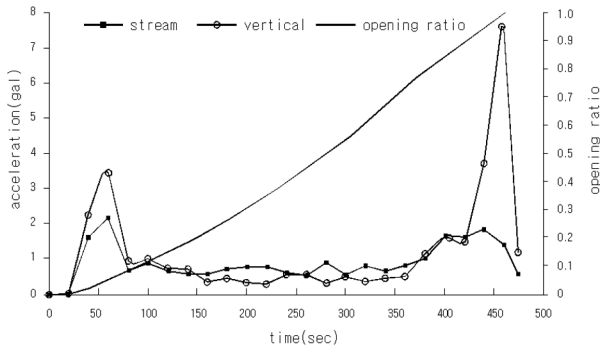
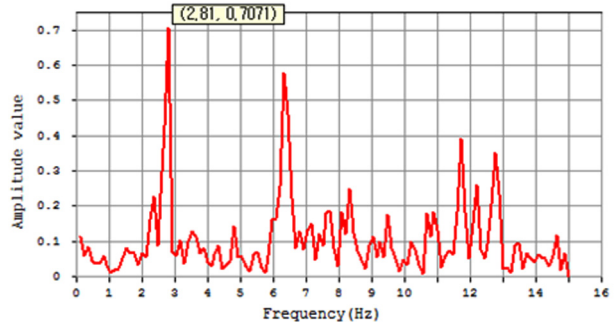


Fig. 11. Amplitude measurement results.

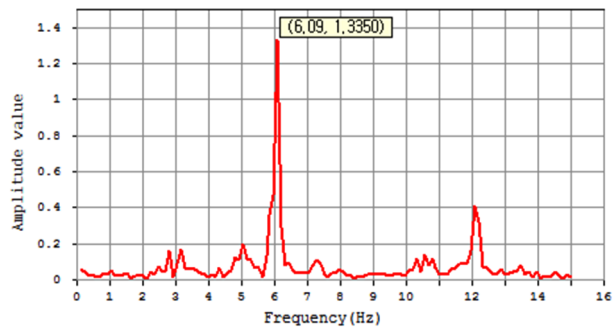
문비 양단 헌지에서 유격에 의해 진동이 크게 발생한 것으로 판단되었다.

2) 개도율별 가진진동수

문비 개도높이에 따른 유체진동수(문비에 작용하는 가진진동수)는 유체흐름에 의해 문비에 작용하는 진동수이며, Fig. 12와 같이 측정에 의해서 구하게 되는 값이다.



(a) Stream direction measured frequency 2.81 Hz(opening range:25.0%)



(b) Vertical direction measured frequency 6.09 Hz(opening range : 10.0%)

Fig. 12. FFT analysis.

이 때 측정값은 유체 고유의 진동수가 아니라 구조체와 유체가 함께 움직인 진동수이며 개도율별 유체진동수 측정결과는 Table 4와 같다. 본 연구대상문비는 하루 수위가 문비하단면보다 낮은 조건에서 운영되는 문비로 개도초기 이후에는 연직방향으로 하중이 작용하지 않는다. 따라서 개도를 0.3 이후에 연직방향 진동은 하중이 가려지지 않는 자유진동조건 상태이므로 개도율 0.3 이후에 연직방향 공진검토는 고려하지 않았다.

4.4 회피개도량 산정

진동측정은 관리수위상태에서 문비의 개도를 전체 높이에 대하여 연속으로 작동하면서 가속도를 측정한다. 문비를 개도하면 어느 특정 개도율 구간에서 큰 진동이 발생하게 된다. 그러나, 큰 진동이 발생하는 모든

Table 4. Measured frequency results

No.	Opening rate	Measured natural frequency(Hz)	Direction
1	0.090	2.34	stream
		6.09	vertical
2	0.188	2.34	stream
		5.98	vertical
3	0.245	2.81	stream
		6.09	vertical
4	0.314	2.81	stream
		6.33	vertical
5	0.382	2.70	stream
		-	vertical
6	0.451	2.81	stream
		-	vertical
7	0.529	2.34	stream
		-	vertical
8	0.624	2.34	stream
		-	vertical
9	0.719	2.81	stream
		-	vertical
10	0.809	2.81	stream
		-	vertical
11	0.893	2.70	stream
		-	vertical

구간에서 구조물에 안정성에 영향을 미치는 진동이 발생하는 것은 아니므로, 공진안정성을 검토하여 공진가능성이 있는 경우 그 구간은 수문 운영 시 회피하여야 하는 구간으로 선정하여야 한다.

문비의 진동, 부가응력의 영향을 미치는 요인은 문비의 형상과 개방높이, 수위 등이다. 문비의 회피개도 구간은 수문 개도 시 개도율에 따라 진폭이 큰 진동이 발생하며, 공진가능성이 높은 두 조건을 동시에 만족시키는 구간이 수문 운영 시 피해야 하는 개도높이 구간이라고 할 수 있다. 다만, 진폭이 크게 발생하고 공진가능성이 적은 구간의 경우 구조물에 안정성에 큰 영향을 미치지 않더라도 큰 진동과 소음발생 등을 고려하였을 때 되도록 회피해야 하는 개도구간이라고 할 수 있다.

시험결과, 문비의 개도 초기구간과 완전 개방 직전 구간에서 큰 진폭에 진동이 발생하였는데, 개도 초기의 큰 진폭은 빠른 유속과 와류의 영향인 것으로 판단되며, 완전 개방 구간에서의 큰 진폭은 문비에 작용하는 수압이 상대적으로 저감되어 문비 양단의 힌지에서 유격으로 인해 큰 진폭의 진동이 발생하는 것으로

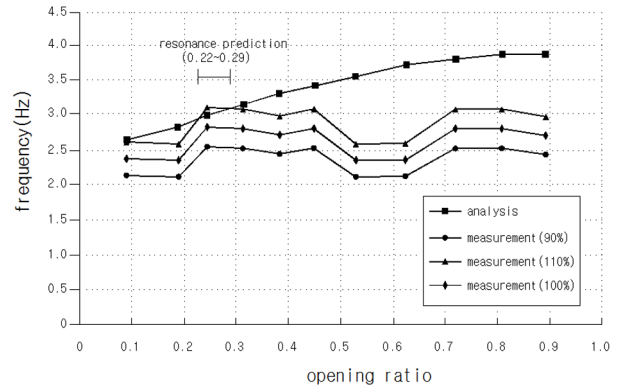


Fig. 13. Resonance prediction range (stream direction vibration).

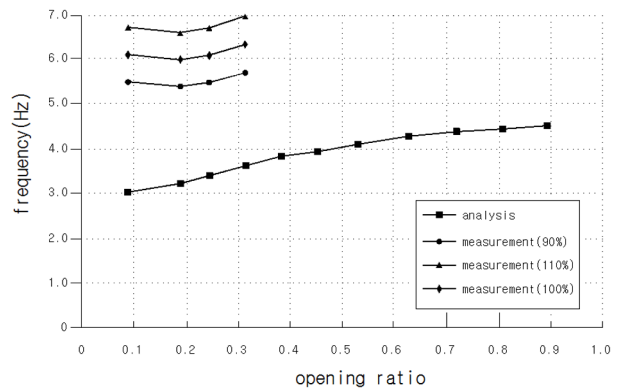


Fig. 14. Resonance prediction range (vertical direction vibration).

판단하였다. 개도율에 따른 공진 검토는 고유진동해석에서의 고유진동수와 개도율에 따른 예측치에서 측정된 가진진동수를 비교하여 검토하였다. 이때 예측된 가진진동수는 유체 고유의 진동수가 아니라 구조체와 유체가 함께 움직인 진동수이고, 측정 오차를 고려하여 측정된 가진진동수의 $\pm 10\%$ 영역과 구조물의 고유진동수를 비교하여 공진 구간을 검토하였으며, 그 결과 Fig. 13, 14와 같이 공진 발생구간은 개도율 0.22~0.29 (유수방향진동 구간임을 알 수 있다.

Table 5. Avoid open range estimation criteria

Section	Amplitude	Resonance
Avoid open range	○	○
Avoid open range(warning)	○	○

Table 6. Avoid open range estimation results

Division	Open range	Remarks
Avoid open range	0.00-0.10	Avoid open range (warning)
	0.22-0.29	
	0.95-1.0	

본 연구에서는 진폭이 크게 발생하고, 공진발생가능성이 높은 구간을 회피개도구간으로 제시하였다. 다만, 진폭이 크게 발생하나 공진발생가능성이 적은 구간과 진폭은 작으나 공진발생가능성이 높은 구간은 회피개도주의구간으로 제시하였으며 문비의 운영 및 유지관리에 기초자료로 제공하고자 한다. 본 연구대상 문비의 계측 및 해석결과를 통한 회피개도 구간은 존재하지 않았으며, 회피개도 주의구간은 진동이 크게 발생하거나, 공진가능성이 있는 구간으로 Table 5, 6과 같이 개도율 0.0~0.10, 0.22~0.29, 0.95~1.0 구간으로 선정되었다.

5. 결론

본 연구에서는 셸타입 로울러 게이트의 안전 운영을 위한 문비 개도 시 회피개도량 산정방법을 제안하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. 문비의 회피개도량을 산정하기 위해 현장계측 및 현장계측조건에 부합하는 고유진동해석을 실시하였으며, 문비의 개도 시 발생하는 진동의 진폭과 공진가능성을 검토하여, 이를 바탕으로 회피개도량 산정 방법을 제안하였다.

2. 문비의 공진가능성은 개도 시 계측을 통해 구조물에 작용하는 가진진동수를 계측하였고 계측된 가진진동수와 개도율에 따른 유체의 부가질량을 고려한 구조물의 고유진동수를 비교하여 공진발생가능구간을 산정하였다.

3. 수문 문비의 회피개도량 산정방법으로 진폭이 크게 발생하고, 공진발생가능성이 높은 구간을 회피개도구간으로, 진폭이 크게 발생하나 공진발생가능성이 적은 구간과 진폭은 작으나 공진발생가능성이 높은 구간은 회피개도 주의구간으로 제시하였으며, 본 연구대상 문비의 해석 및 계측 분석결과 진동이 크게 발생하고 공진이 예측되는 회피개도구간은 없는 것으로 확인되었다. 다만, 진동이 상대적으로 크게 발생하는 개도초기구간과 공진이 예상되는 개도율 0.2~0.3구간은 회피개도주의구간으로 판단되었다.

4. 현재 국내에서는 수문에 대한 안전성 검토에 대한 연구는 다수 진행되고 있으나, 수문의 운영에 기초자료가 되는 진동 및 회피개도구간에 대한 연구는 부족한 실정이며, 본 연구에서는 수문 진동 계측 및 고유진동수 해석을 이용한 수문 문비의 회피개도량 산정방법을 제시하였으며, 향후 문비의 운영 및 유지관리에 기초연구자료로 제공하고자 한다.

References

- 1) Thang, N. D. and Naudascher, E. (1986a) Vortex-excited Vibrations of Underflow Gates. Journal of Hydraulic Research, Vol. 24, No. 2, pp. 133-151.
- 2) H. M. Westergaard, "Water Pressure on Dams During Earthquake", ASCET, No.1835, pp418-433, 1931.
- 3) J. J. Bae, "Development of Added Mass Calculation Methodology for The Dynamic Analysis of Dam Gate During Earthquake", pp. 98-99, 2009.
- 4) H. S. Kim, J. J. Bae, Y. G. Kim and J. H. Lee, "An Aded-mass Modification Method using Experimental and Numerical Frequency Analysis for Floodgate Subjected to Hydro-dynamic Loading", Journal of Korea Society of Civil Engineers, pp.607-616, 2009.
- 5) S. H. Lee, and K. S. Jung, "Model Tests Study on Self-Excited Vibration of Tainter Gate", Journal of Korea Society of Civil Engineers, pp. 187-194, 1996.
- 6) S. H. Lee, H. J. Kim, Y. J. Park, H. G. Ham, and B. S. Kong, "Model Tests Study on Flow-induced Vibration of Truss Type Lift Gate" Journal of Korea Society of Agricultural Engineers, pp.35-41, 2011.
- 7) H. T. Lim, "A Study on Safety Assessment of Shell-type Roller Gate", DongYang University, 2013.
- 8) Paulo. C. F. Eridti, "Design of Hydraulic Gates", Taylor & Francis, 2007.
- 9) D. Husain, Abel-Aim M. Negm, and A. A. Alhamid, "Criteria for Dynamic Flow Behavior below the Vibrating Sluice Gates", JKAU:Eng.Sci., Vol. 10, No 2, pp. 79-91, 1998.