모형실험에 의한 트러스형 리프트 게이트의 진동 특성

Dynamic Characteristic of Truss Type Lift Gate by Model Tests

이성행* · 신동욱** · 김경남*** · 정경섭****

Lee, Seong Haeng · Shin, Dong Wook · Kim, Kyoung Nam · Jung, Kyoung Sup

Abstract

A model test is performed to investigate the dynamic behavior of truss type lift gate which is being constructed by the four major rivers project. The gate dimensioned 40 m in width, 9m in height is scaled with the ratio of 1:25 and is made of acryl panel and supplemented weight by lead in the concrete test flume dimensioned 1.2 m in width, 0.5 m in height and 30m in length. Firstly natural frequencies of the model gate are measured and compared with the numerical results for the calibration. The amplitudes of the vibration are measured under the different gate opening, upstream water level conditions. Also models with bottom angle 20°, 35° and 50° are tested and compared to find out a proper shape of bottom structure which minimizes the gate vibration. These test results presents a basic data for the guide manuals of gate management and a design method to reduce the gate vibration of truss type lift gate.

Keywords : truss type lift gate, gate vibration, amplitude of vibration, opening height, natural frequency

요 지

본 연구에서는 4대강 사업으로 건설중인 트러스형 리프트의 진동특성을 검토하기 위하여 모형실험이 수행된다. 경간 40 m, 높이 9 m의 트러스형 리프트게이트를 축척 1/25로 모형이론에 따라 아크릴과 납으로 모형을 제작하고, 폭 1.6 m, 길이 25 m, 높이 0.8 m의 수로에서 실험된다. 먼저 모형의 고유진동수가 측정되고 모형을 검증하기 위하여 유한요소 해석결과와 비교된다. 검증된 모형에서 상하류 수위와 문비 개방고에 따른 진동가속도 진폭이 측정된다. 또한 문비의 진동을 줄일 수 있는 하부형상을 검토하기 위하여 문비 최하부의 각도가 20°, 35°, 50°인 모형을 제작하고 실험결과를 서로 비교한다. 실험 결과는 수문 조작 시 유지관리지침의 기본 자료를 제공하고, 수문의 진동특성과 진동을 줄일 수 있는 수문의 하부형상을 검토한다.

핵심용어 : 트러스형 리프트게이트, 문비진동, 진동진폭, 개방고, 고유진동수

1. 서 론

보, 댐, 배수갑문의 수위를 조절하는 문비에서 자주 발생하는 진동의 문제들은 많은 연구의 대상이 되고 있으며, 실제로 문비 진동을 일으키는 물리적 현상은 매우 다양하고 복잡하다. 4대강사업의 가동보에 설치되는 수문중 미관과 강재량 저감에 따른 경제성을 고려하여 트러스형 리프트게이트(Truss type lift gate)가 시공 중에 있다. 이 수문들은 4대강사업의 핵심구조물로 준공 후 100년 이상 안전하게 유지관리 되어야하며, 대부분이 폭 40 m이상으로 대형구조물이다.

이 형식의 수문은 전면의 스킨플레이트와 후면의 트러스 부재가 연결된 가로축 방향으로 포물선 형상(curved skin)을 갖는 게이트이며, 축방향에 따라 단면의 각도가 변하기 때문

에 작용력이 일정하지 않아 정확한 해석이 어렵고, 하중이 1/4부에서 양단 박스부로 집중되는 현상을 보인다. 이러한 현상 및 구조 특성상 모형실험을 수행하여 여러 가지 수위 조건과 문비 개방고에 따른 게이트의 진동현상을 검토하고, 진동의 강도를 줄이기 위한 형상을 검토하는 것이 필요하다. 또한 동적 특성을 파악하여 이에 따른 문비 유지관리 지침을 제정하는 것이 요망된다.

문비에서 상하류 수두차가 있는 경우, 문비가 바닥에서 처음 열릴 때나 작은 열림 상태 흐름에서 문비 하부의 형상에 따라서 불안정한 흐름으로 인한 전단층의 불안전성과 와류의 영향으로 부압이 발생하여 진동이 발생하게 된다(Thang, 1986a). 또한 문비하단부에는 강성을 보강하거나, 지지 프레임과 연결을 위하여 가로보가 설치되는데 특히 문비 하단부에 가까이 설치된 원형의 가로보 하단부에는 문비가 어느

*정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수 (E-mail : lsh77@pusan.ac.kr)

**부산대학교 대학원 사회환경시스템공학부 박사과정 (E-mail : sdw@pusan.ac.kr)

***교신저자 · 충북대학교 건설기술연구소 연구원 (E-mail : kkn74@chungbuk.ac.kr)

****정회원 · 충북대학교 토목공학부 교수 (E-mail : ksjung07@chungbuk.ac.kr)

정도 열려있는 상태에서 하류로부터 와류현상이나 뒤돌아 치는 물결로 인한 강한 진동현상이 발생할 수 있다. 4대강에 설치되는 트러스형 리프트게이트는 홍수시 수문을 열 기전에 수류의 월류가 허용되는데, 월류시의 진동현상과 진동특성을 파악하는 것이 필요하다. 이러한 진동의 영향으로 인하여 용접부나 취약한 부분에서 피로파괴가 발생할 수 있다.

국내에서 트러스형 리프트게이트는 처음 시도되는 게이트 형식이며, 높이에 따른 곡률을 갖는 원호형 게이트(tainter gate)의 시공 예는 낙동강 하구둑과 새만금지구 및 화옹지구 배수갑문 수문에 시공되었으며, 이 수문들은 수리모형실험을 통하여 문비의 진동현상을 검증 및 보완하였다(Netherlands Engineering Consultants, 1982; 이성행 등, 1996; 이성행 등, 2003).

본 연구에서는 경간 40 m, 높이 9 m의 트러스형 리프트게이트를 축척 1/25로 모형이론에 따라 아크릴로 모형을 제작하고, 폭 1.6 m, 길이 25 m, 높이 0.8 m로 설치된 수로에서 상하류 수위와 문비 개방고에 따른 진동특성을 실험한다. 또한 문비의 진동을 줄일수 있는 하부형상을 검토하기 위하여 문비 최하부의 각도를 20°에서 35°모형, 50°모형, 판 부착 모형으로 변경 제작하고 실험결과를 서로 비교한다. 현 설계된 수문의 안전성과 진동을 줄일 수 있는 형상을 검토하고, 수문 조작 시 관리지침 설정기준을 마련하고자 한다.

2. 모형의 제작 및 설치

2.1 연구 대상 수문

연구대상 수문은 폭 40.0 m, 높이 9.0 m의 그림 1과 같은 형상을 갖는 게이트이다. 모형은 크게 문비본체부(전면 스킨부와 보강재, 후면 트러스 지지부 그리고 끝단 상자형 지지부), 주롤러 및 측면롤러에 해당하는 레일부로 구분된다.

2.2 모형축척 및 재질

개수로의 수문에서 흐름을 지배하는 주된 힘이 관성력과 중력 가속도이므로 이때의 모형축척은 Froude 상사법칙에 따르며, 본 실험에서는 모형의 축척을 로 결정하였다. 이 축척은 문비 세부의 적절한 재현이 가능하고 용이하게 실험할 수 있다. Froude 상사법칙에 따라 축척을 적용하였다. 이 상사조건에 따르면 모형의 탄성계수는 의 조건이 요구되나 모형의 재료로 상기 조건을 만족시키는 것을 구하기란 쉽지 않다. 그러나 복합구조물의 탄성은 판 두께에 직접 비례하

표 1 원형과 모형의 재료특성

Property	Model	Prototype	Model	Remarks
			Requirement	
Scale		1	1/25	
Density		$7.85 \times 10^{+3} \text{ kg/m}^3$	7.85 g/cm^3	
Weight		1768.31 kN	113.171 N	좌우박스형 지지대 제외
Modulus of elasticity		$2.00 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ (200 GPa)	$8.00 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$	

로 강성은 모형의 기하학적 형상을 변경하여 조정할 수 있고, 실제적으로 탄성계수 E의 값이 작은 모형 재료를 사용하면 그만큼 재료의 두께를 증가시킬 수 있다(Kolkman, 1974). 본 실험에서는 원형의 재료인 철과 탄성계수의 비가 약 1:75인 아크릴을 사용하여 두께를 3배로 증가시켜서 모형을 제작하고 납으로 질량을 각 요소 중심에 보정하였다. 표 1에 원형과 모형의 재료특성을 정리하였다.

2.3 모형의 제작 및 설치

본 연구대상 문비의 원 설계는 폭 40.0 m, 높이 9.0 m의 Curved skin을 갖는 연직 lift 게이트로서 축척 1:25를 고려하면 폭 1.6 m, 높이 0.36 m의 모형으로 제작된다. 제작된 수로와 모형을 연결하기 위하여 스테인리스로 제작된 연직 레일(권양기와 주롤러의 역할을 함)이 사용되었으며, 2 m의 수로폭 중 시험에 사용될 1.6 m는 아크릴을 이용하여 유입로와 유출로를 구성하고, 나머지 0.4 m 구간은 인양장치를 설치하기 위한 공간으로 사용하였다. 문비의 개폐를 위하여 감속기어를 이용하여 실제 구조물에서의 인양속도를 상사법칙에 맞추어 구현하였다. 모형은 전면의 스킨부와 띠장트러스와 후면의 주트러스 그리고 이를 연결하는 8개의 스트럿 부재가 있으며, 주트러스와 스트럿부재에는 각각 브레이싱이 설치된다. 전면부 스킨부는 23개의 세로 리브, 그리고 12열의 수평보강재를 갖는 뼈대 구조물로 구성하였으며, 중량의 상사를 위하여 전면스킨에 부착된 띠장트러스와 후면 주트러스에 납을 설치하여 질량 보정하였다.

2.3.1 부재 단면의 결정

본 연구에서 사용된 아크릴의 탄성계수는 2800 MPa이다. 축척 1/25의 상사법칙에 따라 탄성계수는 8,400 MPa이 요

그림 1. 대상 수문의 평면도

표 2. 진동계 구분 및 부착위치

채널명	진동계 구분	부착 위치	진동측정 방향	비고
Ch 1	방수형(1 g, 1축)	하부내측판 중앙면	수직	
Ch 2	방수형(1 g, 1축)	하부내측판 중앙면	수류	
Ch 3	방수형(1 g, 1축)	하부내측판 1/4지점	수직	
Ch 4	방수형(1 g, 1축)	하부내측판 1/4지점	수류	
Ch 5	방수형(1 g, 1축)	트러스 중앙부 하단	수직	

되나, 이러한 재료를 구하기에는 어려움이 있다. 이크릴을 사용하면, 탄성계수가 3배(75/25) 더 커야하므로 실제 모형제작에서는 이러한 차이를 고려하여 이크릴의 사용 두께를 3배 증가시킨다. 스킨부에 보강되는 ㄷ형강과 U리브는 강축 방향으로의 단면 2차모멘트를 상사법칙에 따라 일치시키고, 재료상의 차이를 추가 고려하여 휨강성을 맞추는 것으로 하였다. 또한 트러스부재의 경우, 진동특성에 대한 단면 형상의 영향을 클 것으로 판단되므로 기존의 원형단면 형상을 그대로 유지하고자 하였다.

2.3.2 보정 질량의 결정

본 연구에서와 같이 구조물의 진동특성을 파악하는 실험에서는 구조물의 질량을 맞추는 것이 중요하다. 대상구조물의 질량 상사를 맞추는 작업은 전면부 떠장트러스를 포함한 스킨과 스킨부의 보강재, 그리고 후면부 트러스로 크게 2개소로 나누어지며, 각 부에서 발생하는 질량의 차이는 전면부와 후면부를 잇는 스트럿 부재에 의해 나누어지는 베이(Bay)의 개소에 따라 상부와 하부로 균등하게 나누어 보정된다. 원형의 중량은 구조해석의 결과로부터 180.256 tonf²로 산정되었고, 상사법칙에 따라 계산된 모형의 중량은 11.536 kgf(상사 중량)가 된다. 제작된 모형의 중량은 전면부(떠장트러스 포함)의 중량이 3.000 kgf 그리고 후면부 트러스가 3.080 kgf로 측정되어 납 보정량은 5.456 kgf로 산정된다. 이 납보정 중량은 대상 모형이 전면부 스킨과 후면부 트러스를 잇는 스트럿 부재에 의하여 5개의 bay로 나누어져 있는 것을 고려하여 상하단 총 10개소씩 20개소에 분배하였다.

3. 실험시설 및 실험방법

3.1 실험시설

모형수조는 길이 24 m, 폭 1.6 m 높이 0.8 m의 콘크리트 블록으로 제작하였는데, 가로 세로 5 m씩의 유입 정수조와 14 m의 실험수조, 그 뒤에 가로 세로 5 m씩의 하류 정수조가 설치된다. 모형이 설치된 위치에는 길이 1.0 m, 높이 0.5 m의 투명 이크릴 판을 설치하여 문비의 거동과 흐름현상을 관측할 수 있게 하였다. 용수의 공급은 300 mm와 400 mm의 2조의 관로에 의하여 공급되어지며, 밸브 조절에 의해 정수조와 실험수조를 통해 모형 설치부에 원하는 유량을 유입시키고 실험된 물은 하류 정수조와 웨어를 통하여 순환된다. 모형을 통과하는 흐름의 안정적 흐름을 위하여 정수지 상류부에 블럭을 일정한 간격으로 설치하고, 3조의 강판 정류판을 설치하였다. 또한 모형수로 말단에 감속 기어를 부착한 웨어를 설치하여 모형 하류부의 수위와 유량을 조절하였

사진 1. 제작된 수문모형

사진 2. 모형실험 전경

다. 수리조건에 대한 Froude의 상사법칙을 적용하면 유량은 $n_L^{2.5}$, 유속은 $n_L^{0.5}$ 의 축척이 고려되어 적용되어 진다.

3.2 실험방법

동적측정에서는 모형의 고유진동수 측정, 모형의 상하류 수위와 문비의 개방고에 따른 수직 및 수평방향의 진동진폭 측정하였다. 계측 시스템은 증폭기는 8채널 dynamic strain meter가 사용되었으며, 진동계는 수중에서 사용할 수 있는 0.0005 g의 정밀도를 갖는 1 g의 방수형 진동계 5조가 사용되었다. 문비 중앙 하단에 2조(상하 방향, 앞뒤 방향), 문비 1/4지점에 2조(상하 방향, 앞뒤 방향), 트러스 중앙부에 1조를 부착하였고, 진동계는 측정하고자 하는 방향에 따라서 진동계의 방향을 정하였다. 각 실험조건에 따라서 1조에 100개의 데이터를 20초 동안 측정하였다. 먼저 물이 없는 상태에서 영점조정을 맞추고 시험조건에 맞는 수위와 개방고에서 수직 및 수평방향의 진동진폭 측정하였다. 사진 1과

사진 2는 제작된 모형과 모형실험중인 수로를 보인다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 수문의 고유진동수 검토

4.1.1 원형에 대한 고유진동수 해석

연구대상 수문의 동적 특성을 파악하고, 모형의 신뢰성을 확인하기 위하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 범용 유한 요소 해석프로그램인 MIDAS CIVIL 2009 Ver 2.0.0을 사용하여 Eigen value analysis를 수행하였으며, 그 결과를 표 3에 정리하였다. 총 해석된 고유진동수는 20개이지만, 주된 에너지를 갖는 저차모드 6개에 대하여 결과는 나타내었다. 고유진동 해석 결과에 따르면, 대상구조물의 주된 거동은 수압에 의한 전후방향의 거동과 중력가속도에 의한 연직방향으로의 거동이 가능할 것으로 판단되며, 좌우측 콘크리트와 접촉하며 주물러 및 측면 보조물러에 의하여 지지됨에 따라 횡방향(문비 길이방향)으로의 거동은 저차모드에서 발생되지 않았다.

4.1.2 모형에 대한 고유진동수 분석

대상문비에 대하여 모형이 완성된 후, 제작된 수로에 알루

미늄 레일을 이용하여 고정시킨다. 모형은 장착된 레일을 따라 좌, 우측에 설치된 2개의 기어 모터를 이용하여 상, 하로 인양되며, 수리시험이 실시되기 전에 고유진동수 측정 시험을 하게 된다. 본 연구대상 문비는 실제구조물과같이 큰 강성을 갖고 있지 않으므로, 가진기를 사용하지 않고, 모형 표면에 손상이 가지 않도록 외부로부터 동적 충격을 가하고, 구조물에 설치된 가속도계로부터 가속도를 연속적으로 취득한다. 실제 데이터는 5000Hz rate로 취득하였고, 한번 측정에 약 10초간씩 측정하였으나, 가진의 영향을 배제하고 고유진동수를 분석하기 위하여 가진 후 진동가속도가 감소하는 구간에 대하여만 별도로 데이터를 구분하고 분석하였다. 이상과 같은 방법으로 분석한 고유진동수 결과를 전후방향 가진시와 연직방향 가진시로 분리하여 표 4에 정리하였다.

4.1.3 원형과 모형에 대한 고유진동수 비교

원형의 유한요소법 해석에 의한 고유진동수의 축척에 따른 계산 값과 실험에 의하여 측정된 값을 표 5에 비교하였다. 그리고 비교의 “DX”는 전후 방향 진동모드, “DZ”는 연직 방향 진동모드를 각각 나타내고 있다. 표 5의 결과 비교에서 모형의 실측 결과 중 6차 모드 이상의 결과가 제외되어 있는 것은 해당 진동에 의한 영향이 미미할 뿐 아니라 고차

표 3. 문비의 해석 고유진동수

Mode	구분	끝단 회전 가능시	끝단 회전 구속시		비고
		Natural frequency(Hz)	Natural frequency(Hz)	Mode shape	
1차 mode		4.698	6.835	RZ, (1/4점 DX)	DX:전후방향 (흐름방향) DY:횡방향 (좌우방향) DZ:연직방향
2차 mode		8.933	9.585	DX	
3차 mode		9.400	11.257	DZ	
4차 mode		9.597	12.614	DX	
5차 mode		12.326	13.189	RY, (DX), DZ	
6차 mode		13.891	16.504	DY, RZ, (DX)	

표 4. 모형에서의 측정 고유진동수

가진방향 및 게이지		전후방향 가진시				연직방향 가진시				비고
		0번 (연직)	1번 (전후)	2번 (연직)	3번 (연직)	0번 (연직)	1번 (전후)	2번 (연직)	3번 (연직)	
		스킨	스킨	트러스	스킨	스킨	스킨	트러스	스킨	
NF* (Hz)	1차 모드	-	-	-	-	36.62	34.18	-	34.18	
	2차 모드	-	53.71	-	-	-	56.15	-	-	
	3차 모드	53.71	-	53.71	53.71	56.15	-	56.15	56.15	
	4차 모드	-	-	58.59	-	-	68.36	-	68.36	
	5차 모드	73.24	73.24	73.24	73.24	75.68	-	70.80	-	

표 5. 원형과 모형에서의 고유진동수 비교

Mode		Model	Prototype		Model	Remarks
			F. E. M.	Theoretic result by scale	Test results	
NF* (Hz)	1차 모드		6.835	34.15	34.18~36.62	RZ (DX)
	2차 모드		9.585	47.95	53.71~56.15	DX
	3차 모드		11.257	56.30	53.71~56.15	DZ
	4차 모드		12.614	63.05	58.59~68.36	DX
	5차 모드		13.189	65.95	70.80~75.68	RY, (DX), DZ

*NF: Natural frequency

모드에 대하여는 일반적으로 고유진동수에 차이가 크게 발생할 수 있으며, 모형의 제작 적정성을 평가하는데 있어서는 일부 저차모드에 대한 평가로 충분할 것으로 판단되어 진동 분석 결과에서 제외된 것이다. 또한 모형으로 제작되면서 일부 영역대가 유사한 진동수는 실측에서 여러 진동형상이 동일 진동수대에서 겹쳐 발생되거나 반대로 동일 진동모드가 가진방향에 따라 특정 대역내에서 약간씩 오차를 갖고 측정되는 것으로 판단되었다. 이러한 차이들이 발생하는 이유는 모형을 제작하면서 품질관리가 강제에 비하여 상대적으로 어려운 아크릴을 재료로 적용하면서 판두께나 접합부 처리, 탄성계수의 차이 등과 지점부 경계조건의 차이 등이 복합적으로 관여된 것으로 판단된다. 그러나 모형의 고유진동수가 원형의 상사법칙에 따른 고유진동수와 유사하거나 약간 크게 측정되고 있었지만, 상당히 근접함을 보임으로 제작된 모형은 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다.

4.1.4 고유진동모드 검토

원형에 대한 고유치해석에 따른 고유진동모드는 그림 2와 같다. 그림 2(a)에 따르면, 1차진동모드는 X축방향(수류)의 비대칭 휨 모드이며, 표 4에서 스킨의 전후방향으로 설치된 1번 게이지에서 그림 3(a)와 같이 34.18 Hz가 측정되었다. 비대칭 휨 모드이므로 게이지가 경간 중앙부에 설치된 것을 감안할 때, 측정되는 진폭은 상당히 작은 값으로 나타나게 된다. 반면 2차 진동모드에 대하여는 그림 2(b)에 나타난 바와 같이, 대칭 휨 모드로서 경간중앙에 설치된 게이지 1번에서 큰 진폭이 예상되며, 그림 3(b)에서와 같이 56.15Hz의 진폭은 1차모드에 비하여 상당히 큰 값으로 나타나는 것이 확인된다. 3차모드는 측정에서 가진 방향에 따라 약간의 차이는 있으나, 53.71~56.15 Hz 대에서 나타나는 것으로 파악되며, 표 4에서와 같이 연직방향 게이지인 0번, 2번, 3번에서 고유진동수가 확인되고 있다. 그림 2(c)에서 3차모드 형상은 스킨부 및 트러스부 까지 연직방향으로 진동형상이 발생되는 것이 확인된다.

1차모드와 2차모드는 유수에 의한 진동방향과 같은 방향으

그림 2. 문비의 해석 고유진동 모드형상

로의 진동을 나타내며, 3차모드는 수직방향 진동을 나타낸다. 문비의 전체적인 거동이 개폐시 문비 하단에서의 불규칙한 흐름으로 인한 국부적인 진동과 같은 방향의 변형을 보인다. 따라서 수평진동을 구속시키는 것은 가능하나 문비 개폐 작동시 수직진동을 제어하는 것은 곤란하므로, 이러한 수직진동의 발생을 가능한 한 줄일 수 있는 것이 요망된다.

4.2 현 수문 진동 실험(최 하단부 각도 20°)

4.2.1 고려되는 수위

모형실험에서 고려되는 수문의 상하류 수위는 표 6과 같다.

4.2.2 개방고별 진동 측정

그림 4는 상류수위가 수문과 같은 36 cm의 수위와 하류측 관리수위에서 문비 개방고별 진동현상을 측정된 도표이다. 문비의 개방고가 처음 열림부터 0.5 cm까지 거의 일정하게 진폭이 측정되고, 4 cm까지 점차 증가됨을 볼 수 있다. 0.5 cm부근의 낮은 개방고에서 측정되었던 부압에 의한 진동은 측정되지 않았다. 개방고 약 6 cm~12 cm까지는 진폭이 급격히 커진다. 이는 이 구간에서 스킨플레이트부와 트러스부 사이에 와류로 인한 불규칙한 흐름이 발생된다. 특히, 중앙 트러

(a) 1차 고유진동수

(b) 2차 고유진동수

그림 3. Gauge 1번 측정 고유진동수

표 6. 고려되는 수위 조건(m)

구분	수위명	EL	바닥에서 높이	모형수위(cm)	비고
상류측	상류관리수위	10.50	9.00	36	수문하부 바닥고 EL(m):1.50
	계획 홍수위	19.33	17.83	-	
하류측	하류 관리수위	5.0	3.5	14

그림 4. 상류수위 36 m, 하류수위 14 cm 일 때 개방고별 진동 가속도 진폭

그림 5. 상류 38 cm, 하류 14 cm 일 때 개방고별 진동 가속도 진폭

스 하단의 진동은 개방고 5 cm~8 cm까지 진폭이 다른 채널에 비해 진폭의 증가 시점이 비교적 빨리 시작되는데, 이는 와류현상이 하류측에서 먼저 발생하므로 스킨부보다 하류측에 가까이 있는 트리스 중앙부에 와류의 영향이 먼저 미치기 때문인 것으로 판단된다. 또, 개방고 12 cm를 기점으로 개방고가 더 증가할수록 진폭이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 와류로 인한 돌아치는 현상이 사라지고 사류(射流, super-critical flow)가 발생되어 하류의 수류가 직접 문비를 치는 현상이 발생치 않으며, 수류가 유선형으로 하류로 빠져나가기 때문인 것으로 관찰된다. 중앙부 하단의 2개 채널의 경우, 비슷한 진폭의 양상을 나타내나 진동 가속도의 절대치는 상하진동이 앞뒤진동 보다 크다. 중앙 1/4부의 진동 가속도진폭은 중앙부에 비하여 작게 측정됨을 볼 수 있다.

그림 5는 상류 38 cm일 때 개방고별 진동을 중앙부 3개 채널에 대하여 도표화 하였다. 상류 38 cm는 2 cm 월류상태로 수문이 열리면서 개방고 0.5~1.5 cm범위에서 진동이 커지며, 2 cm이상에서는 수문이 개방됨에 따라서 월류가 중지되고 진동이 작아지다가 개방고가 커지면 하류의 와류로 인하여 진동이 커지다가 10 cm이상에서는 사류로 바뀌어 진동이 작아짐을 볼 수 있다.

4.2.3 상류 수위별 진동측정

개방고 0 cm, 하류 14 cm 일 때, 상류수위별 진동 가속도 진폭을 그림 6에 도표화하였다. 수문 높이인 상류 36 cm에서 수위가 증가되어 월류수가 문비를 타고 내리며 월류수위 2 cm전후로 스킨플레이트 뒤쪽을 타고 흘러내려 문비하단을 직접 칠 때 진동이 커진다. 상류수위가 점점 상승하여 월류수위가 2 cm~3 cm정도에서는 월류되는 물의 양이 증가되어

그림 6. 개방고 0 cm, 하류 14 cm 일 때 상류수위별 진동가속도 진폭

그림 7. 개방고 1 cm, 하류 14 cm 일 때 상류수위별 진동가속도 진폭

진폭이 클 것이라 예상되나, 문비를 타고 흘러내리는 흐름이 스킨플레이트를 넘어 흐르는 현상으로 변화되어, 발생하는 진동진폭이 오히려 감소한다. 계속하여 월류수위가 상승하게 되어 트리스부를 직접 치게 되는 월류수위가 되면(상류 약 41 cm~42 cm) 중앙 스킨부 보다 트리스부의 진동 가속도가 커지게 되고, 이후 선형적으로 계속하여 증가하게 된다. 이때 중앙 스킨플레이트 부분과 트리스 부분의 진폭을 비교하여 보면, 트리스 부분의 진폭이 약 1.2~1.5배 크다.

그림 7에서는 개방고 1 cm일 때 상류수위별 진동현상을 살펴보면 수위가 상승함에 따라서 월류가 발생하고 상류수위 40 cm에서 0.05 g 정도의 진동이 비교적 큰 진동가속도가 발생하고, 상류수위가 증가하면, 흘러내리는 흐름이 떨어지는 흐름으로 바뀌어 진동이 줄어들다가 다시 증가한다. 실제로는 문비가 1 cm 개방고에서 고장 등의 원인으로 멈추었을 때 발생할 수 있는 현상으로 문비가 정상 가동될 때는 발생하기 어려운 상황이다.

4.2.4 개폐시의 진동 측정

문비 개방시 진동의 영향을 파악하기 위하여 실험결과와 진동이 가장 크게 발생하는 범위인 개방고 0~2 cm에서 문비 개폐시의 진동 현상을 측정하였다. 원설계의 인양속도 0.3 m/min은 1/25 축척의 모형에서 6 cm/min의 속도로 상사되며, 모형수문의 개폐속도를 6 cm/min로 제작하였다. 상류 38 cm, 하류 14 cm의 수위에서 개방고 0~2 cm로 수문을 열고 닫을 때 스킨 중앙부 상하 및 스킨 중앙부 앞뒤 진동, 트리스 중앙 상하 진동을 여러 번 측정하여 표 7에 정리하였다. 전체적으로 폐쇄 시보다는 개방 시의 진동이 약간 크게 나타남을 확인할 수 있었으며, 진동 가속도의 크기는 스킨 중앙부 상하, 트리스 중앙 상하, 스킨 중앙부 앞뒤의 순으로

표 7. 문비 개폐시 최대진동가속도 진폭(g)

구 분	스킨 중앙부 상하	스킨 중앙부 앞뒤	트리스 중앙	비고
개방시	0.043 - 0.051	0.022 - 0.033	0.032 - 0.041	상류:38 cm 하류:14 cm
폐쇄시	0.036 - 0.044	0.016 - 0.030	0.025 - 0.036

그림 8. 각도변경 및 판부착 모형 형상

진동이 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

4.3 수문 하부각도 변경 및 판부착 실험

수문의 하단부의 형상에 따라 작은 수문 개방고에서 진동의 영향이 크게 변화 할 수 있어 수문하단 보강판의 각도를 20°, 35°, 50°로 변경제작하고, 또한 원형의 가로보와 보강판 사이에 판을 부착한 모형을 제작하여 수위조건에 따라 실험을 수행하고 그 결과를 서로 비교하였다. 연구대상 문비의 하단부의 형상은 문비 하단부의 경사각을 50°로 제작하여 실험하고, 이후 경사각을 35°, 20°로 변경하여 실험하였다.

4.3.1 개방고별 중앙상하 진동 비교

그림 9는 상류수위 36 cm, 하류수위 14 cm 일 때, 문비 하단 각도 변화 및 판 부착에 따른 개방고별 중앙상하 가속도 진폭을 도표화 한 것이다. 3가지 각도와 판 부착 모형에 대한 개방고별 흐름 형상을 살펴보면 개방고 1.5 cm 이하에서 큰 차이는 없으나 하단부 판의 각도가 증가 될수록 진동이 작아지는 현상을 보인다. 이후 개방고가 상승 할수록 조금씩 불규칙한 흐름이 나타나며 개방고 4 cm이상에서 진동 가속도는 커지게 된다. 이후, 개방고가 상승하면 와류의 현상이 심해져 개방고 8~10 cm에서 가장 큰 진동 가속도가 측정되며 20° 모형에서는 개방고가 10 cm에서 최대진동이 발생한다. 하지만 판부착의 경우 각도별 모형에 비해 전체적으로 진동 가속도가 작다. 개방고 0.5 cm의 작은 개방고에서는 다른 모형과 같으나 이후 개방고 6 cm까지 거의 일정한 진동 진폭을 보이다가 10 cm에서 최대진동을 보이나 다른 모형에 비하여 진동이 상대적으로 작다. 이것은 뒤돌아 치는 와류의 영향이 판에 의하여 차단되기 때문으로 판단된다. 이후 개방고가 14 cm 이상이 되면 모든 경우에서 거의 비슷한 진동 가속도를 나타낸다.

그림 10은 상류수위 38 cm, 하류수위 14 cm 일 때, 문비 하단 각도 변화 및 판 부착에 따른 개방고별 중앙상하 가속

그림 9. 중앙상하 가속도 진폭 (수위 36 cm)

그림 10. 개방고별 중앙상하 가속도 진폭 (수위 38 cm)

도 진폭을 도표화 한 것이다. 38 cm는 2 cm의 월류로 시작 되는 수위로 개방고 2 cm까지는 월류와 문비하류의 흐름에 의한 진동현상이 같이 측정된다. 0.5 cm 까지는 미소하지만 문비 보강재의 각도가 클수록 진동이 작게 나타났고, 1.5 cm에서 최대 진동을 보인다. 이후 월류하지 않는 개방고가 되면 전체적으로 진동 가속도가 줄어들며, 개방고가 5 cm 이후로 와류의 형상이 심해지면서 불규칙한 흐름이 발생하여 진동 가속도는 비교적 급격히 상승한다. 판부착의 경우 각도별 모형보다 진동 가속도 값이 상당히 작게 측정됨을 볼 수 있다.

4.3.2 개방고별 트러스상하 진동 비교

그림 11은 상류수위 36 cm, 하류수위 14 cm일 때, 문비 하단 각도 변화 및 판 부착에 따른 개방고별 트러스상하 가속도 진폭을 도표화 한 것이다. 개방고 0.5 cm까지 모든 경우에서 작은 진동 가속도를 나타내고, 개방고가 더 상승 할수록 불규칙한 흐름과 와류로 인한 수류가 트러스부를 직접 치게 되어 진동 가속도가 계속하여 커지게 된다. 20도, 35도, 50도의 경우, 진동 가속도 값이 크게 차이 없이 측정 되고, 판부착의 경우 와류의 흐름을 차단하여 진동 가속도의 값이 확연히 작게 측정된다.

4.3.3 상류수위별 중앙상하 진동 비교

그림 12는 개방고 0 cm, 하류수위 14 cm 일 때, 문비 하단 각도 변화 및 판 부착에 따른 상류수위별 중앙상하 가속도 진폭을 도표화 한 것이다. 모든 경우에서 진동 가속도의 증감 양상은 같으며, 월류수가 문비를 타고 내리는 월류수위

그림 11. 개방고별 트러스상하 가속도 진폭

그림 12. 상류 수위별 중앙상하 가속도 진폭

약 1 cm에서 비교적 큰 진동 가속도를 보인다. 20도와 35도는 거의 같은 진동 가속도를 보이지만 50도는 비교적 작은 진동 가속도를 보이며, 판부착의 경우 50도 보다 더 작은 진동 가속도를 보인다. 흐름이 월류에 의하기 때문에 문비 각도에 의한 영향향이 상대적으로 작은 것으로 판단된다.

4.4 문비의 진동에 대한 안전성 평가

4.4.1 작은 개방고에서 진동

문비에서 상하류 수두차가 있는 경우, 문비가 바닥에서 처음 열릴 때나 작은 열림 상태에서 문비 하부의 형상에 따라서 부압에 의한 진동현상(캐비테이션)이 발생할 수 있고, 이로 인하여 강재의 피로 및 내식을 발생시킬 수 있다. 따라서 이러한 진동의 발생을 검토하고, 이러한 진동이 발생하는 개도의 운전을 최소화해야 한다.

본 실험대상 수문의 경우 그림 4에서 개방고 0.5 cm의 개방고에서 진동진폭이 거의 일정하다. 지금까지의 연구에 의하면, 개방고에 따른 문비의 진동은 개방고(d)와 문비하단의 폭(b)의 비 즉 d/b가 0.7~0.9일 때 최대진동이 발생하는 것으로 보고되었다(Thang, 1990). 본 모형의 문비 선단부의 폭(두께)은 0.7 cm로, 상기 이론에 의하면 개방고 0.5 cm 전후에서 부압에 의한 최대진동이 발생해야 하는데 이러한 현상은 발생하지 않는다. 그림 5에서 상류 38 cm는 월류상태에서 실험이 시작되며 수문이 열리면서 개방고 0.5~1.5 cm범위에서 0.03 g까지 진동이 커지나, 이 범위의 진동은 부압에 의한 진동이 아니라 월류에 의한 진동으로 판단된다. 문비의 안정한 거동을 위하여 하부의 형태가 유선의 흐름과 부합하는 형태가 바람직하며, 날카로운 선단부나 국부적으로 둥근 형태가 요망된다. 본 연구대상 수문은 비교적 날카로운 선단부에 속하는 형태여서 작은 개방고에서 부압에 의한 진동이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

4.4.2 수문하부 각도에 따른 진동 현상

문비 최하단부 보강부재 각도를 달리한 모형을 제작하여 실험하고 결과를 분석하였다. 최하단부의 형상은 작은 개방고에서 문비진동에 영향을 크게 미치는 것으로 연구되었다. 중앙부재 진동(상하)은 각도별 차이에 따라 영향이 크지는 않았지만, 20도, 35도, 50도 순으로 각도가 커짐에 따라 진동현상이 작아지는 것으로 측정되었다. 전체적으로 수문의 진동이 작게 측정되기 때문에 각도별 모형에 따른 진동도 차이가 크지 않은 것으로 판단된다.

4.4.3 문비 개방고가 클 때 와류현상으로 인한 진동

단판으로 구성된 게이트의 경우 스킨플레이트를 세로보와 가로보로 지지하여 양끝단의 지지부와 연결된다. 가로보는 하단과 상단에 주로 설치되는데, 특히 문비 하단부 가까이 설치된 원형의 가로보와 문비 최하단 고무실을 포함하는 보강재 사이에서 뒤돌아 치는 와류현상으로 인한 진동이 크게 발생할 수 있다. 본 실험대상 수문의 경우 그림 4에서 개방고 8~10 cm 범위에서 뒤돌아 치는 와류현상으로 인한 진동 가속도 진폭이 최대 0.025 g~0.029 g로 측정되고, 판부착 모형에서 그림 9와 같이 진동 가속도 진폭 0.020 g 정도로 감소함을 볼 수 있다. 이것은 뒤돌아 치는 와류의 영향

이 판에 의하여 차단되기 때문으로 판단된다. 판 부착을 하였을 경우 중량증가와 유지관리 등의 부가적인 문제가 검토되어야 한다.

4.4.4 월류시 진동

수위가 문비 상단으로 overflow시 문비하부 형상과 문비 상단의 형태에 따라서 문비 진동이 크게 발생할 수 있다. 그림 5에서 상류 38 cm는 월류상태로서 수문이 열리면서 개방고 0.5~1.5 cm범위에서 0.03 g까지 진동이 커지는데 이는 주로 월류에 의한 진동으로 판단된다. 따라서 월류 발생시 0.5~1.5 cm의 개방고에서 월류에 의한 비교적 큰 진동이 발생하므로 개도의 운전을 최소화하고 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다. 또한 그림 6의 상류수위에 따른 진동현상에서 상류수위 42 cm, 월류수위 6 cm이내에서는 수문을 개방하는 것은 허용되며, 가급적이면 상류수위 40 cm, 월류수위 4 cm이내에서 수문을 개방하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

4.4.5 타 지구와 문비진동 비교

본 지구 수문의 진동 정도를 평가하기 위하여 모형실험과 실측에 의하여 측정자료가 있는 수문의 문비진동 값과 비교 하였다. 그림 13에서 비교 되는 대상은 본 지구 수문을 포함하여 새만금지구(농어촌진흥공사, 1995), 화옹지구(농어촌진흥공사, 2001), 충주댐(한국수자원공사, 2001), 4대강 보의 A수문(부산대학교 지진방재연구센터, 2010)의 5개 지구 수문이며, 낮은 개방고(모형에서 6 cm이하)에서 진동진폭을 비교한다. 이중 3지구는 수문의 형태가 테인터 게이트이고, 2개 지구는 트러스형 리프트 게이트로, 문비하부의 형상과 수위조건이 다르기 때문에 직접적으로 비교하기에는 제한이 있으나, 전체적으로 진동의 크기를 간접적으로 비교할 수는 있는 것으로 판단된다. 새만금 지구는 내측 수문에서 상류 32 cm, 하류 11 cm의 수위에서 개방고별 진동측정 결과로, 농어촌진흥공사(1995)의 537쪽 Table 6, 8의 M1모형에 대한 측정자료를 이용하였다. 화옹지구는 해측 수류방향 모형의 진동현상 결과로 상류 32 cm, 하류 12 cm의 수위에서 개방고별 진동측정 결과이며, 충주댐은 원형 수문의 실측자료로 50 cm 이상의 개방고에서 측정되었다. 그림 13에서 본 지구는 4대강의 A수문, 화옹지구 배수갑문의 진동과 거의 유사하게 작은 진동이 발생하고 있으며, 새만금지구 배수갑문 수문보다는 상당히 작은 진동 가속도 진폭을 보인다. 낮은 개방고에서 부압에 의한 진동은 2개 지구에서는 발생하나 본지구와 화옹지구는 발생하지 않음을 알 수 있다.

그림 13. 본 지구와 타 지구의 문비진동 비교

폭 40.0 m, 높이 9.0 m의 트러스형 리프트게이트에 대하여 모형을 제작하고, 상하류 수위와 문비 개방고에 따른 실험을 수행하여 진동특성을 정리하면 다음과 같다.

1. 상하 관리수위일 때 작은 개방고에서 진동측정 결과는 부압에 의한 진동(캐비테이션)은 발생되지 않거나 작은 것으로 측정되며, 타지구와 비교해서도 수문의 진동은 크지 않은 것으로 평가된다.
2. 개방고 8~10 cm(원형 200~250 cm)범위에서 뒤돌아 치는 와류현상으로 인한 진동이 발생하며, 이 범위에서도 주위를 기울일 것이 요망된다. 판부착 모형에서 이 범위의 진동 가속도 진폭이 크게 감소함을 볼 수 있었고, 이것은 뒤돌아 치는 와류의 영향이 판에 의하여 차단되기 때문으로 판단된다. 판 부착은 중량증가와 유지관리 등의 부가적인 문제가 검토되어야 한다.
3. 문비 하부 보강재의 각도(20°, 35°, 50°)에 따른 모형을 제작하여 실험한 결과 각도가 클수록 진동은 작아졌으나 그 정도는 크지 않은 것으로 평가된다.
4. 월류시 모형에서 0.5~1.5 cm, 실형에서 12.5~37.5 cm의 개방고에서 월류에 의한 비교적 큰 진동이 발생하므로 이 개도의 운전을 최소화하고 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다. 상류수위별 진동검토결과 월류수위 4 cm(원형 100 cm) 이내서 수문을 개방하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.
5. 수문의 개폐시에 진동을 측정한 결과 큰 차이는 없었지만, 수문을 열 때가 닫을 때 보다 약간 큰 진동현상을 보였으며, 문비중앙부의 상하 진동이 가장 크게 발생됨을 확인할 수 있었다.
6. 처음 월류가 시작되어 수류가 배면의 가로보를 타고 흐를 때(모형 월류 수위 0~1.5 cm, 원형 월류수위 0~37.5 cm)가 그 이상의 월류수위 보다 큰 진동이 발생함을 확인하였다.
7. 수문 고유모드 검토결과 수평진동을 구속시키는 것은 가능하나 문비 개폐 작동시 수직진동을 제어하는 것은 곤란하므로, 이러한 수직진동의 발생을 가능한 한 줄일 수 있는 것이 요망된다.

감사의 글

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

- 농어촌진흥공사(1995) 새만금지구 수리시험 및 파랑관측보고서, pp. 505-570.
- 농어촌진흥공사(2001) 화옹지구 우정단지 배수갑문 문비 구조안전성 검토용역 보고서, pp. 14-46.
- 부산대학교 지진방재연구센터(2010) 금강 살리기 7공구 수문(Lift gate) 수리모형 진동실험 보고서.
- 부산대학교 지진방재연구센터(2010) 낙동강 살리기 20공구 수문(Lift gate) 수리모형 진동 실험 보고서.
- 이성행(2003) 모형실험에 의한 테인터 게이트(Tainter Gate)의 동적특성 및 거동에 관한 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제23권 제1A호, pp. 129-138.
- 이성행, 김경남, 정경섭 (2005) 다목적 댐 테인터 게이트의 동적특성, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권 제1A호, 2005. 1, pp. 173-181.
- 이성행, 정경섭 (1996) 원호형 문비의 진동현상에 관한 모형실험 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제16권 제I-2호, pp. 187-194.
- 한국수자원공사(2001) 다목적댐 수문 강재설비 안정성 향상방안 연구용역 보고서, pp. 40-61.
- Cai, Y.Q. and Zhang, K. (2012) Study of modal parameter identification from ambient vibration on a deep radial gate, *Journal of Applied Mechanics and Materials*, Vol. 105-107, No. 1, pp. 511-517.
- ISO 10816-1 (1995) Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating Part I General guidelines.
- Kolkman, P.A. (1974) Flow-induced gate vibrations. prevention of self-excitation, Delft Hydraulics Laboratory, Publ. No. 164, pp. 1-162.
- Netherlands Engineering Consultants. (1982) Nakdong Estuary Barrage and Reclamation Project, Final Design Report (Annex 2. Gate Vibrations, Flow Forces and Wave Loads), pp. 1-84.
- Thang, N.D. (1990) Gate vibrations due to unstable flow separation. *Journal of Hydraulics Engineering*, Vol. 116, No. 3, pp. 342-361.
- Thang, N.D. and Naudascher, E. (1986a) Vortex-excited vibrations of underflow gates. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 24, No. 2, pp. 133-151.
- Wei, W. and Ren, H. (2011) Analysis on flow-induced vibration of underwater horizontal gate. *Journal of Advanced Materials Research*, Vol. 163-167, No.1, pp. 293-298.

(접수일: 2012.3.12/심사일: 2012.7.29/심사완료일: 2012.9.25)