



모형실험에 의한 장지간 트러스형 리프트 게이트의 진동 특성

Dynamic Characteristics of the Long Span Truss-Type Lift Gate by Model Test

이성행^{*,†} · 함형길^{*} · 유광식^{**}

Lee, Seong Haeng · Hahm, Hyung-Gil · Ryu, Goang Sik

Abstract

An experimental study of model truss-type vertical gate consisting of a truss and a plate was presented in this paper to examine the structural dynamics of the gates. A 1:61 scale model was constructed for the 95 m prototype gate using an acrylic truss and an acrylonitrile butadiene styrene plate. The scaled model was tested in a 1.6 m wide concrete flume for two orientations to determine the effects of gate orientation on structural vibrations. Natural frequencies of the model gate was measured and calibrated with FEM predictions. Vertical vibrations were measured under various operational conditions, including a range of bottom opening heights and different upstream and downstream water levels. The gate model with reverse direction was preferred due to its low overall vibrational response and flow level combinations. The test results also provide a basic dataset for development of operations guidelines that minimize flow-induced vibrations of the gates.

Keywords: Installation direction; 95 m gate; Truss-type lift gate; Model test; Vibration amplitude.

I. 서 론

트러스형 리프트 게이트는 길이방향에 따라 단면의 각도가 변하기 때문에 작용력이 일정하지 않아 해석이 어렵다. 장경간 수문에서 강제 량을 줄일 수 있으나 수문의 진동에 대하여 취약한 구조를 갖는다. 트러스형 리프트 게이트는 4대강 보의 여러 수문에 적용되었으며, 일반적인 진동특성 (Lee et al., 2011; Lee et al., 2012a)과 트러스의 형태에 따른 진동특성 (Lee et al., 2012b)이 연구되었다. 본 연구에서 고려되는 트러스형 리프트 게이트는 95 m로 우리나라에 설치되는 최대지간 수문이며, Fig. 1은 공사중인 95 m 수문을 보인다. 이 지구에는 중앙부에 95 m, 양측에 47.5 m의 트러스형 리프트 게이트가 설치된다. 이 게이트들의 설치는 지간 98 m와 49.3 m의 2개 수문으로 구성된 세계 최대지간인 네덜란드의 Hartel gate에 기초하여 설계되었다. Hartel gate는 평상시는 열려있고, 홍수 및 해일시 피해를 줄이기 위해 닫히는 storm surge barrier이다 (Deltawerken, 2012; Dircke et al., 2010). 본 연

구 게이트는 평상시 닫혀 있고 주로 홍수시에 열리는 운영체계를 갖기 때문에 Hartel gate에 비하여 수문 진동에 대하여 취약하다. 용접부나 취약한 부분에서 피로파괴가 발생할 수 있고, 특히 문비 하단부의 스킨플레이트와 주 트러스의 접합부에서 큰 응력범위를 갖는 응력이 발생하게 되어 피로파괴를 일으킬 수 있다.

수문의 설치 방향에 대하여 살펴보면 일반적인 수문은 스킨플레이트부가 수위가 높은 쪽으로 배치되나, 바다와 접하는 수문에서는 해수로 인한 수문매면의 부식과 어패류의 부착 등 여러 요인에 의하여 반대 방향으로 설치되는 경우가 있다 (Lee, 2004). 따라서 이러한 각 배치방향에 따른 진동의 특성과 강도가 어떠한지 검토가 요망된다. 본 연구에서는 경간 95m의 트러스형 리프트게이트를 모형이론에 따라 1/61의 축척을 적용하여 아크릴과 ABS (acrylonitrile butadiene styrene)재로 모형을 제작하고, 폭 1.6 m, 길이 24 m, 높이 0.8 m로 설치된 수로에서 상하류 수위와 문비 개방고에 따른 수위조건에서, 각 배치방향 설치에 따른 실험을 수행하여 진동 특성을 파악하고 수문의 각 설치방향에서 진동특성을 평가하며 95 m 장지간 수문의 진동특성을 규명한다.

II. 모형의 제작 및 설치

1. 대상 수문

본 트러스형 리프트 게이트는 Fig. 1과 같이 폭 95 m, 높이

* Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University

** General manager, Power & Energy Business Dep. Korea Water Resources Corporation

† Corresponding author

Tel.: +82-51-510-7645 Fax: +82-51-513-9596

E-mail: lsh77@pusan.ac.kr

Received: September 1, 2014

Revised: November 6, 2014

Accepted: November 9, 2015



Fig. 1 Truss-type lift gate under construction

8.5 m의 구성된 연직 게이트이다. 수문은 크게 전면 스킨부와 후면 트러스부로 구성된다. 전면 스킨부는 스킨부와 스킨을 직접 지지하는 수직 및 수평 보강재 그리고 보강재에 연결된 상하의 2개의 띠장 트러스 부로 구성된다. 후면 트러스부는 상하의 주트러스와 이를 연결하는 상하 각 7개의 스트럿 부재로 구성된다. 주트러스와 스트럿부재에는 각각 브레이싱이 설치된다. 전면부 스킨부는 47개의 세로 리브, 그리고 14열의 수평보강재를 갖는 뼈대 구조물로 구성된다.

2. 모형축척

수문의 모형 축척을 결정하기 위해서는 Froude, Reynolds, Weber, Cauchy 그리고 Strouhal 수가 고려되어야 한다(Hughes, 1993) 본 실험에서는 수문에서 흐름을 지배하는 주된 힘이 관성력과 중력 가속도이므로 모형축척은 Froude 상사법칙으로 적용하였으며 모형의 축척을 $n_L = 61$ 로 결정하였다. 이 축척은 수문의 모형실험에서 다소 큰 축척으로 평가되나, 수문의 모형실험에서 수조 및 실험실 규모와 공급유량, 경제성 등 여러 제약 조건을 고려하여 가능한 축척을 결정하였다.

3. 모형의 제작 및 설치

본 연구대상 수문은 축척 1 : 61를 고려하면 폭 1.573 m, 높이 0.193 m의 모형으로 제작된다. 모형에서 탄성계수의 축척 (n_E)과 길이의 축척 (n_L)이 같을 것이 요구되나 이러한 조건의 재질을 구하기는 어렵다. 복합구조물의 탄성은 판 두께에 비례하므로 강성은 모형의 두께를 변경하여 조정할 수 있다(Kolkman, 1976 ; Gajanan et al., 1983). 본 연구에서는 탄성계수의 비가 강재의 약 1/75인 아크릴과 ABS재를 사용하여 모형을 제작하였다. ABS재는 1 mm이하 두께가 가능하므로 얇은 부재는 아크릴을 대신하여 사용하였다.

가. 두께 및 부재단면의 결정

단면이 일정한 부재는 강재와 아크릴간의 탄성계수비가 약 75배인 점을 감안하여 상사법칙에 따른 소요탄성계수인

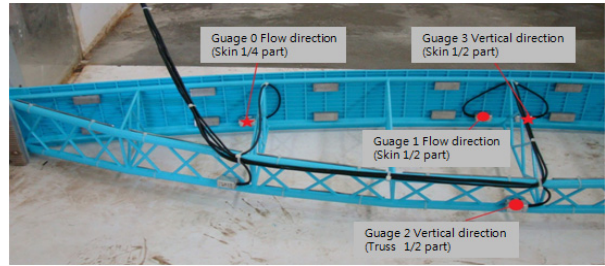


Fig. 2 Model gate with accelerometers and add leads

3.443 MPa을 만족하기 위하여 Scale 1/61의 모형을 제작할 경우에 탄성계수가 1.23배 (75/61) 더 커야 한다. 실제 모형제작에서는 이러한 차이를 고려하여 아크릴과 ABS재의 사용 두께를 1.23배 증가시켜 적용하였다. 스킨 플레이트부는 모형이론에 따라 0.5 mm가 필요하나 이 규격의 아크릴 부재는 생산되지 않으므로 이 규격이 가능한 ABS재를 사용하였고, 나머지 트러스부와 보강재는 아크릴을 사용하여 모형을 제작하였다. 또한 트러스부재의 경우, 진동특성에 대한 단면 형상의 영향이 클 것으로 판단되므로 기존의 원형단면 형상을 그대로 유지하고자 하였다. 실제 아크릴제품은 강재제품과 달리 품질관리면에서 차이가 발생되므로 생산규격과 달리 강도가 작게 되어, 유사단면 선정시에는 약간 더 강한 단면을 선택하였다.

나. 보정질량의 결정

대상구조물의 질량 상사를 맞추는 작업은 전면부 상자형 보강재를 포함한 스킨 및 스킨의 보강재부, 그리고 후면 트러스부로 크게 2개소로 나누어지며, 각 부에서 발생하는 질량의 차이는 전면부와 후면부를 잇는 스트럿 부재에 의해 나누어지는 8개소에 상부와 하부로 균등하게 나누어 보정하였다. 납 보정은 스킨부와 트러스부에 대하여 각각 상하단 총 16개소씩 32개소에 분배하여 Fig. 2와 같이 설치하였다.

4. 실험 시설

모형실험은 수조는 Fig. 3과 같이 길이 24 m, 폭 2.0 m 높이 0.8 m의 콘크리트 블록으로 제작된 수로에서 수행되었다. 관측창이 설치되는 구간에서는 총 2.0 m의 수로폭 중 약 1.6 m가 시험에 사용되고, 나머지 0.4 m 구간은 인양장치를 설치하기 위한 공간으로 사용된다. 용수의 공급은 300 mm와 400 mm의 2조의 관로에 의하여 공급되어지며, 밸브 조정에 의해 정수조와 실험수조를 통해 모형 설치부에 원하는 유량을 유입시키고 실험된 물은 하류정수조와 웨어를 통하여 순환된다. 모형을 통과하는 흐름의 안정적 흐름을 위하여 정수상류부에 불력을 일정한 간격으로 설치하고, 3조의 강판 정류판

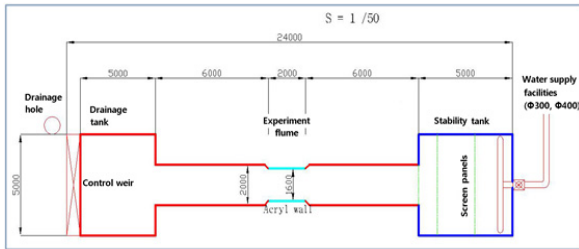


Fig. 3 Plan view of the test flume and water tanks

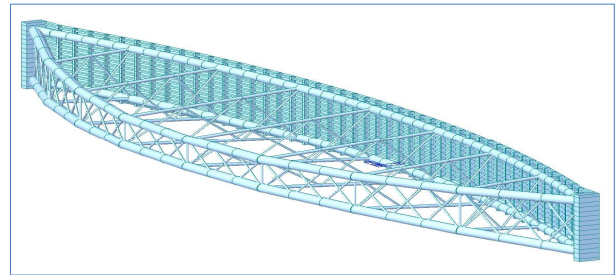


Fig. 4 FEM model of the 95 m gate

을 설치하였다. 또한 모형수로 말단에 감속 기어를 부착한 웨어를 설치하여 모형 하류부의 수위와 유량을 조절하였다.

5. 측정 장비

실험에서 사용된 증폭기는 8채널 동적 변형 측정기 (dynamic strain meter)가 사용되었으며, 진동계는 수중에서 사용할 수 있는 1g의 방수형 진동계 4조가 사용되었다. 정밀도는 0.0005g이며, 각 진동계의 부착위치는 Fig. 2와 같다. 진동계는 문비 중앙 하단에 2조 (상하 방향 1조, 앞뒤 방향 1조), 문비 1/4 지점에 1조 (상하 방향), 트러스 중앙부에 1조 (상하 방향), 트러스 1/4 지점에 1조 (상하 방향)를 부착하였고, 진동계는 측정하고자 하는 방향에 따라서 진동계의 방향을 정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

1. 문비의 고유진동수 검토

가. 원형수문에 대한 고유진동수 검토

95 m 연구 수문의 동적 특성을 파악하기 위하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 범용 유한요소 해석프로그램인 MIDAS CIVIL 2011 버전을 사용하여 고유치 분석 (Eigen value analysis)을 수행하였다. Fig. 4에 모델링된 수문을 보이며, 해석결과를 Table 1에 정리하였다. 총 해석된 고유진동수중, 주된 에너지를 갖는 저차모드 6개까지만에 대하여 분석하였다. 또한 1/61로 제작된 모형수문을 모델링하고 고유진동수를 계산하여 Table 1에 정리하여 같이 비교하였다.

나. 원형과 모형에 대한 고유진동수 비교

원형의 유한요소법 해석에 의한 고유진동수의 축척에 따른 계산값과 실험에 의하여 측정된 값을 Table 1에 비교하였다. 여기서 Model의 FEM은 모형수문을 유한요소 해석한 결과이며, Test results는 수문모형에서 실측된 측정결과이다. 원형과 모형에 대한 결과를 비교하면 모형의 고유진동수가 더 크게 나타내고 있다. 이러한 차이가 발생하는 이유는, 모형

Table 1 Comparison of natural frequencies in prototype and model gates

Mode	Model	Prototype		Model		Remarks
		FEM	Theoretic result by scale	FEM	Test results	
NF*	1st	1,694	13,231	16,481	14.65~15.87	RZ
	2nd	2,916	22,775	28,863	28.08	DX
	3rd	3,163	24,704	-	28.08	RY, DZ
	4th	3,854	30,101	39,722	30.52~31.74	DZ, RY
	5th	4,915	38,387	41,420	35.40~36.62	DX
	6th	5,284	41,269	50,963	43.95~46.39	RZ, DX

NF*: Natural frequency

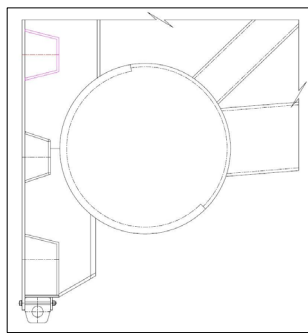
을 제작하면서 품질관리가 강재에 비하여 상대적으로 어려운 아크릴을 재료로 적용하면서 판두께나 접합부 처리, 탄성계수의 차이 등과 지점부 경계조건의 차이 등이 복합적으로 관여된 것으로 판단된다. 또한 수문의 모형 제작을 위한 부재의 치수가 작아지면서 선택치수의 선택이 제한되어 필요한 규격이 없을 시 한 치수 위의 규격이 선택되었기 때문이다. 이러한 사실은 실측 고유진동수가 상사된 이론적인 구조물의 고유진동수에 비하여 Table 1과 같이 크게 측정된 것으로부터 확인된다. 이러한 이유로 모형 수문에 대한 구조해석 결과는 원형의 상사법칙에 따른 고유진동수 보다 큰 값이 산정된다. 제작된 모형수문은 상대적으로 큰 강성을 갖는 것으로 판단된다. 그러나 측정된 모형의 고유진동수가 원형의 상사법칙에 따른 고유진동수와 모형수문 모델링에서 계산된 고유진동수와 큰 접합을 보임으로 제작된 모형은 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

2. 정 방향 배치 모형의 진동 검토

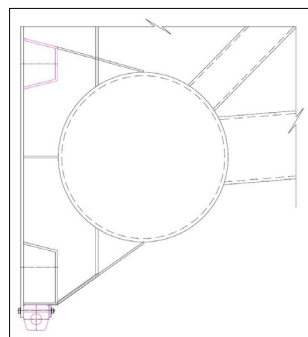
정 방향 배치는 수위가 높은 강측 (상류) 방향으로 스킨플레이트가 설치되고, 수위가 낮은 해측 (하류) 방향으로 트러스부가 설치되며, 역 방향 배치는 반대방향으로 설치되는 것으로 한다.

Table 2 Water levels conditions (m)

Classification	Water levels	EL (m)	Prototype water depth (m)	Model water depth f (cm)	Test water depth (cm)	Remarks
Upstream (Riverside)	Flood condition	3.11	9.11	14.9	13.5	Gate bottom: EL(-):6.0 m
	Operating condition	0.76	6.76	11.1		
	Lowest water	0.30	6.30	10.3		
	Gate upper		8.50	13.7		
Downstream (Seaside)	Highest high water	1.65	7.65	12.5	7.5	Seaside wave amplitude: ± 0.79 m
	Approximate lowest low water	(-)0.878	5.122	8.4 \pm 1.3 (wave amplitude)		



(a) Original shape



(b) Changed shape

Fig. 5 Gate bottom shapes

가. 고려되는 수위 및 수문하단 형상

실험에서 고려되는 95 m 수문의 상하류 수위는 원형수위를 축척에 따라 계산하면 Table 2과 같다. 수문 하단부의 형상을 Fig. 5에 도시하였다. (a) 수문은 네덜란드의 Hartel gate를 참고한 당초 수문하단 형상으로, 원형의 띠장 트러스가 단지 수직보강재와 부착되어 있다. 수류가 트러스 원형부재 상하로 통과할 수 있어 수문 진동이 클 것으로 예상되었다. 따라서 오른쪽의 (b) 수문은 가운데 수평보강재를 제거하고 상하에 수평 경사판을 부착하여 원형의 띠장 트러스에 용접하여 수문의 진동을 줄일 수 있는 형상으로 변경되었고, 이 형상으로 실험이 수행되었다.

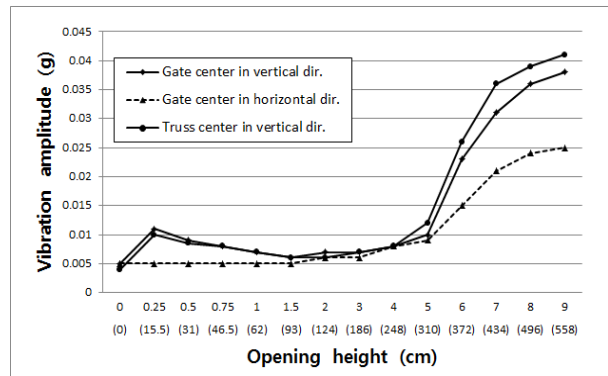


Fig. 6 Vibration amplitude due to opening height at upstream level 13.5cm and downstream level 7.5 cm

나. 개방고별 진동

실험 조건상 가장 불리한 상류 13.5 cm, 하류 7.5 cm에서 수문 하단부 개방고별 진동 가속도 진폭을 측정하여 Fig. 6에 정리 하였다. 개방고 0.25 cm에서의 0.01 g 정도의 진동이 측정 된다. 수문이 처음 열릴 때나 작게 열린 상태에서 수문 하단부의 압력변화로 인한 suction force나 부압에 의한 진동이 발생할 수 있고 (Kolkman, 1976) 이러한 진동은 수문의 피로와 내식을 발생시켜 수문의 안정성에 가장 안 좋은 진동으로 평가된다. 문헌에 따르면 이러한 진동은 수문 개방고와 수문 하단폭의 비가 0.6~0.8 (Hardwick, 1974), 0.7~0.90 (Thang, 1990)일 때 최대 진동이 발생하는 것으로 연구되었다. 본 연구 모형 수문의 하단 폭은 0.35 cm로, 상기의 비로 최대 진동발생 수문 개방고는 0.21~0.28 cm, 0.24~0.31 cm로 계산된다. Fig. 6의 개방고 0.25 cm에서의 진동은 수문 개방고와 수문 하단폭의 비가 0.714로 상기 이론에 의한 진동과 부합된다. 또한 이러한 진동은 상하 방향의 진동이며 점선으로 표시된 수평방향(흐름방향)에서는 이러한 압력변화에 의한 진동이 발생하지 않음을 확인 할 수 있다. 이후 개방고 5 cm까지는 거의 일정한 진동을 보이다가 그 이상에서는 진동이 크게 증가된다. 이것은 원형트러스 아래 부분과 연결된 경사부를 뒤돌아 치는 와류가

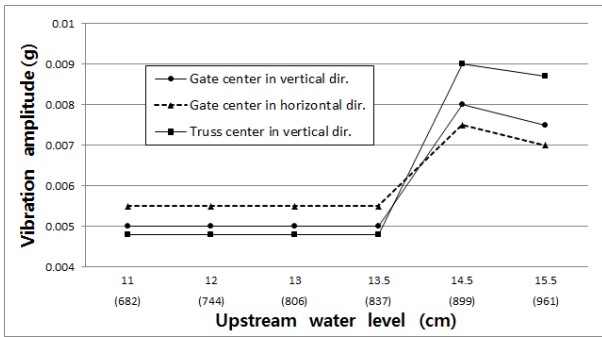


Fig. 7 Vertical vibration amplitude due to upstream water levels at opening height 0.5 cm, and downstream level 7.5 cm

부딪침으로 인한 큰 진동이 발생하며 0.03~0.04 g로 측정된다. 또한 후면의 트러스부도 같은 형태의 진동이 발생하는데 5 cm 이상에서는 트러스부의 진동이 문비본체 스킨부 보다 커짐을 볼 수 있다. 개방고 0.25 cm의 낮은 개방고에서의 진동과 5 cm 이상에서의 진동은 수문 하단의 형상 (Fig. 5(b))에 영향을 받는 것으로 판단된다.

다. 상류 수위별 진동

개방고 0.5 cm, 하류 7.5 cm 일 때, 상류 수위를 증가 시키면서 진동을 측정하여 Fig. 7에 도시 하였다. 월류가 발생하지 않는 개방고 13.5 cm 까지는 상류수위에 따라 진동의 영향이 없이 일정함을 보이고 있고 3채널에서 진동 가속도 차이가 별로 없다. 월류가 시작된 개방고 14.5 cm에서는 진동이 갑자기 증가된다. 그리고 개방고가 증가되어 15.5 cm가 되면 진동은 약간 줄어든다. 그 이유는 처음에 월류가 시작되면 월류수가 스킨부 배면을 타고 흐르기 때문에 진동이 커지고 이후 월류량이 많아지면 배면을 넘어서 통과하기 때문에 상대적으로 진동이 작아진다.

점선으로 표시한 수평 방향진동은 처음에는 약간 큰 값을 보이나 월류가 발생함에 따라서 다른 방향에 비교하여 상대적으로 작게 진동이 증가됨을 볼 수 있다.

3. 정 · 역 방향배치 모형의 진동 비교

정방향 모형 실험 후 모형을 180도 회전하여 반대방향으로 설치 후 정 방향과 같은 실험 조건에서 수위와 개방고에 따라 실험을 수행하고, 정방향 배치의 실험결과와 비교한다.

가. 개방고별 진동 측정

Fig. 8은 수문의 스킨중앙부와 트러스 중앙부에서 정방향 배치와 역방향 배치의 수문 개방고별 가속도 진폭을 비교한다. 문비 개방고 5 m 이상의 큰 개방고에서는 정방향 배치는

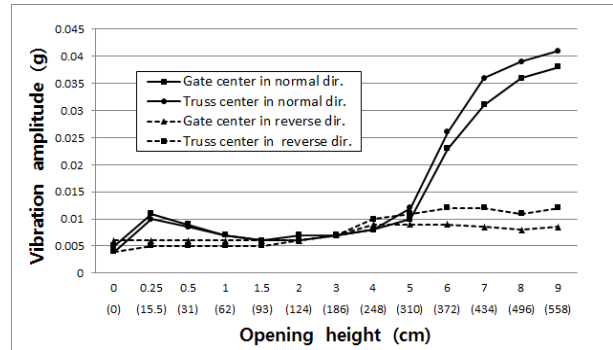


Fig. 8 Vertical vibration amplitude due to opening height at upstream level 13.5 cm and downstream level 7.5 cm

하류의 뒤돌아치는 와류에 의한 진동이 트러스부를 치게 됨으로 진동이 상당히 커지나, 역방향 배치에서는 트러스부가 상류부에 있으므로 이러한 현상이 발생하지 않으므로 진동의 변화가 미미하다. 또한 정방향은 0.25 cm의 개방고에서 압력 변화에 따른 진동이 발생하여 진동이 커지나, 역 방향에서는 이러한 현상이 발생하지 않고 일정한 진동을 유지한다. 따라서 역방향 배치가 더 바람직한 것으로 판단된다.

나. 상류 수위별 진동 측정

Fig. 9와 Fig. 10은 하류수위 7.5 cm 일 때, 개방고 0.5 cm와 3.5 cm에서 각 배치 방향에 따른 상류수위별 진동 가속도 진폭을 보인다. Fig. 9와 같이 개방고 0.5 cm의 작은 개방고에서 월류 수위 전까지 거의 같은 작은 진동을 보이며, 13.5 cm 이후 월류가 발생하면 정방향 배치 모형의 진동이 훨씬 커짐을 알 수 있다. 상류수위가 월류하여 약 0.5 cm~1.0 cm까지 월류할 때 스킨 플레이트부를 타고 흘러내리는 흐름에 의하여 진동이 크게 발생하는데, 역 방향 배치는 수문의 전면 스킨면이 매끈하기 때문에 (가로보 등은 배면에 설치되어 있음) 진동에 크게 영향을 미치지 않는다. 하지만 월류수위가 높아져 수문 배면부를 타고 흘러내리는 흐름이 배면을 넘어서 떨어지는 흐름으로 바뀌면 일시적으로 진동이 감소한다. 수문이 많이 열린 Fig. 10에서는 정방향 배치의 진동이 커지는데 이것은 정방향에서 뒤돌아 치는 와류가 후면에 있는 트러스부를 침으로 인한 진동이 추가되기 때문으로 판단된다.

다. 하류 수위별 진동 측정

상류수위 13.5 cm, 개방고 0.5 cm 일 때, 배치방향에 따른 하류수위별 진동 가속도 진폭을 Fig. 11에 도시한다. 양방향에서 하류 수위가 증가함에 따라서 진동이 거의 비례하여 작아짐을 볼 수 있으나 이 개방고에서는 정방향 배치가 역방향 보다 더 큰 진동을 보임을 알 수 있다. 이 실험의 경우는 Fig. 8

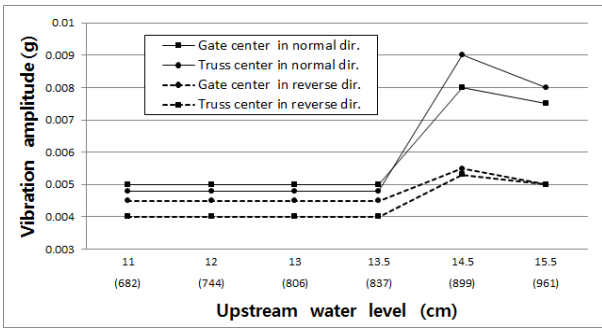


Fig. 9 Vertical vibration amplitude due to upstream water levels at opening height 0.5 cm and downstream 7.5 cm

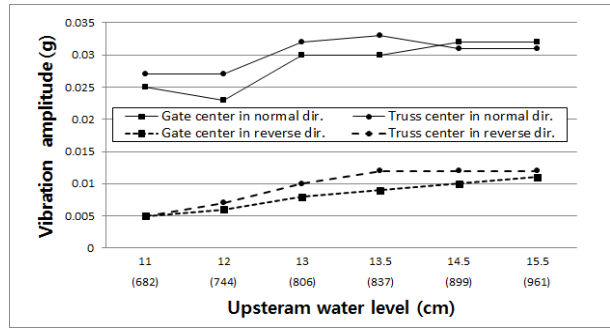


Fig. 10 Vertical vibration amplitude due to upstream water levels at opening height 6 cm and downstream level 7.5 cm

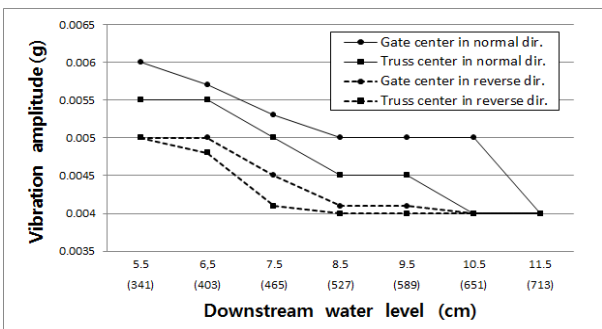


Fig. 11 Vibration amplitude due to downstream water levels at opening height 0.5 cm and upstream level 13.5 cm

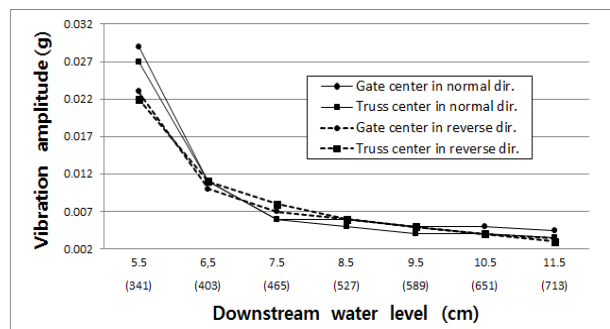


Fig. 12 Vibration amplitude due to downstream water levels at opening height 3.5 cm and upstream level 13.5 cm

의 개방고 0.5 cm 조건에서 하류수위를 여러 조건으로 실험한 경우로 Fig. 8의 값과 차이는 있으나 정방향 배치의 값이 확실히 크다. Fig. 12의 수문이 많이 열린 개방고 3.5 cm에서 진동현상을 살펴보면 6.5 cm 이상의 구간에서는 양방향 진동이 크게 차이가 없으나 와류가 발생하는 낮은 하류수위 구간(5.5~6.5 cm)에서는 정방향 모형이 큰 진동을 보인다.

IV. 결론

본 연구에서는 경간 95 m의 트러스형 리프트게이트의 모형을 아크릴과 ABS재로 제작하여 상하류 수위와 문비 개방고에 따른 수위조건에서 실험을 수행하고 진동특성을 정리하면 다음과 같은 결론을 얻는다.

1. 본 연구 모형 수문의 정방향 설치의 개방고 0.25 cm일 때 큰 진동이 측정되며 이때 수문 개방고와 수문 하단폭의 비가 0.714로 산정되어 앞선 연구와 유사한 값을 보인다 (0.6~0.8 (Hardwick, 1974), 0.7~0.90 (Thang, 1990)). 역방향에서는 이러한 현상이 발생하지 않는다.
2. 정방향 설치의 개방고 5 cm 이상에서는 0.03~0.04 g의 비

교적 큰 진동이 발생하게 되었으나, 역 방향에서는 트러스 부가 상류부에 위치함으로 진동의 변화가 작았다.

3. 정방향에서 월류가 시작되면 수류가 스킨부 배면을 타고 흘러 진동이 갑자기 증가되나, 역방향에서는 월류수가 스킨 전면으로 흐르게 되는데, 전면은 매끈하고 가로보가 배치되지 않기 때문에 상대적으로 진동이 작았다.
4. 하류수위의 영향을 살펴보면 낮은 개방고에서는 별 차이가 없으나, 수문이 많이 열린 상태에서는 정방향 배치가 역방향 배치보다 큰 진동현상을 보였다.
5. 일반적인 개도 범위에서 스킨 중앙부 상하진동이 가장 크게 발생하고, 상류 수위가 증가되어 월류가 시작되면 상대적으로 트러스부의 상하진동이 더 커짐을 확인할 수 있었다.
6. 1/61의 큰 모형축척에서 정확한 부재 재료선택에 어려움이 있어 비교적 강한 모형이 채택되었고, 모형의 고유진동수가 크게 측정되었으며, 측정 진동값은 상대적으로 작게 측정된 것으로 판단된다.

모형실험결과에 병행하여, 실제 수문에서 발생하는 진동 하중으로 인한 지점부를 포함한 전 구조물에서 정적 및 피로 평가에 관한 연구를 추가로 수행할 예정이다.

사 사

본 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Deltawerken on line. 2012. Hartel barrier. www.deltawerken.com/Hartel-barrier/331.htm.
2. Dircke, P. T. M, T. H. G. Jongeling, and P. I. M. Jansen, 2010. An overview and comparison of navigable storm surge barriers, *Innovative Dam Levee Design and Construction*.: 65-87.
3. Gajanan, M. S., G. H. Harry, N. W. Richard, and M. Saeed, 1983. Structural Modeling and Experimental Techniques. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series: 1-60.
4. Hardwick, J. D., 1974. Flow-Induced Vibration of Vertical Lift Gate, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 100(HY5), Proc. Paper 10546: 631-644.
5. Hughes, S. A., 1993. Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering, World Scientific, New Jersey.
6. Kolkman, P. A., 1976. Flow-induced Gate Vibrations. Prevention of Self-excitation. Delft Hydraulics laboratory, Publication no. 164: 1-162.
7. Lee, S. H., 2004. Model Tests Study on Flow-induced Vibration of Tainter gate in Estuary Sulices (I). *Journal of the korean society of agricultural engineers* 46(1): 27-34 (in Korean).
8. Lee, S. H., H. J. Kim, Y. J. Park, H. G. Hahm, and B. S. Kong, 2011. Model Tests Study on Flow-induced Vibration of Type Lift Gate, *Journal of the korean society of agricultural engineers*, 53(3), 35-41 (in Korean).
9. Lee, S. H., D. W. Shin, K. N. Kim, and K. S. Jung, 2012a. Dynamic Characteristic of Truss Type Lift Gate by Model Tests, *Journal of the korean society of civil engineers*, 32(6A), 337-345 (in Korean).
10. Lee, S. H., H. J. Kim, D. W. Yang, H. G. Hahm, B. S. Kong, and D. W. Shin, 2012b. Dynamic Characteristic of Lift Gate Supported by Plane Truss. *Journal of the korean society of agricultural engineers* 54(3): 133-139 (in Korean).
11. Thang, N.D., 1990. Gate Vibrations due to Unstable Flow Separation. *Journal of Hydraulics Engineering* 116(3): 342-361.