

배수갑문 테인터 게이트(Tainter Gate)의 진동현상에 관한 모형실험(I) - 문비 밖에서 안으로의 흐름 -

Model Tests Study on Flow-induced Vibration of Tainter Gate in Estuary Sulices (I) - Flow from the Gate Outside to the Gate Inside -

이 성 행*

Lee, Seong Haeng

Abstract

A model test is carried out to investigate flow-induced vibration of a Tainter gate in estuary sulices. The gate model scaled with the ratio of 1:25 is made of acryl panel dimensioned 0.66m in width, 0.5m in height in the concrete test flume. Firstly, natural frequencies of the model gate are measured and the results are compared with the numerical results in order to verify the model.

The amplitudes of the vibration are measured under the different gate opening and water level conditions in flow from the gate outside to the gate inside. Also 5 revised gate models with bottom width increased 0.5 cm each are tested under the different gate opening and water level. The results are analyzed to study the characteristics of the gate vibration.

These test results are assessed in comparison with formerly test results, as a result, presents a design method of Tainter gate to reduce the gate vibration and a basic data for the guide manuals of gate management.

Keywords : Tainter gate, Amplitude of vibration, Opening height, Gate bottom width, Revised model test

I. 서 론

테인터 게이트의 수류의 흐름에 따른 진동은 같은 문비라고 하더라도 흐름의 방향에 따라 달라지며, 문비하부 단면의 형상, 가로보의 구성형태, 문비의 규격과 구조 등 여러 요인에 의하여 지배된다. 우리나라 서해안과 같이 조석간만의 차로 인하여 문비의 해측과 담수호측간의 수위차가 클 경우,

* 밀양대학교 토목공학과
* Tel.: +82-55-350-5314
Fax: +82-55-352-5399
E-mail address: lsh77@mun.ac.kr

문비가 바닥에서 처음 열릴 때나 작은 열림 상태에서 흐름에 의한 진동이 발생하게 되고, 이로 인하여 문비 하단부에는 피로파괴를 일으킬 수 있는 큰 응력범위를 갖는 응력이 빈번히 발생하게 되어 문비의 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 또한 문비가 많이 열린 상태에서는 문비 하단부에 설치된 가로보에서 뒤돌아 치는 와류현상이나 파랑으로 인한 진동의 영향이 크다.

국내 배수갑문에서 테인터 게이트는 서해안 대단위 간척지구와 낙동강 하구둑에 시공되었거나 공사중에 있으나, 아직도 국내에서의 장경간 테인터 게이트 설계는 기술축척과 경험부족으로 외국의 기술에 의존하고 있는 실정이며, 이에 대한 연구 및 실험자료가 부족한 상태이다. 테인터 게이트를 많이 사용하고 있는 외국의 경우 이러한 진동현상으로 인한 문비 하단부의 피로파괴에 의한 피해 사례가 미국 Arkansas river 프로젝트⁶⁾ 등 여러 경우에서 보고되었다.

본 연구의 대상문비는 1조로 구성된 테인터 게이트로서, 진동현상을 연구하기 위하여 모형이론에 따라 1:25의 축척으로 콘크리트 실험수조에 폭 66.4 cm 높이 50 cm의 아크릴 모형을 제작하였다. 모형의 검증을 위하여 제작된 모형의 고유진동수를 측정하고 전산모형에서 구한 고유진동수와 비교되었다. 호수쪽으로의 흐름(문비 밖에서 안으로의 흐름)에 대하여 각각 수위와 개방고에 따라 진동특성을 연구하기 위하여 진동 가속도 진폭을 측정하였다. 또한 문비 최하단 폭을 0.5 cm씩 증가시킨 5개의 수정 모형을 제작하여 진동 특성을 연구하고, 작은 개방고에서 문비진동에 영향을 거의 받지 않을 수 있는 문비 최하단 폭을 제시하였다. 측정된 결과를 앞서 연구된 실험결과⁴⁾와 비교하여 문비진동을 평가하고, 문비설계시 진동의 영향을 최소로 할 수 있는 방안을 도출하며, 또한 수문 조작시 관리지침 설정을 위한 기본 자료를 마련하고자 한다.

II. 모형의 제작 및 실험

1. 모형축척 및 재질

배수갑문 문비에서 흐름을 지배하는 주된 힘이 관성력과 중력 가속도이므로 이때의 모형축척은 Froude 상사법칙에 따르며, 본 실험에서는 모형의 축척을 $n_L = 25$ 로 결정하였다. 이 축척은 문비 세부의 적절한 재현이 가능하고 용이하게 실험할 수 있다.

모형의 탄성계수는 $n_L = n_E$ 의 조건이 요구되나 모형의 재료로 상기 조건을 만족시키는 것을 구하기란 쉽지 않다. 그러나, 복합구조물의 탄성은 판 두께에 직접 비례하므로 강성은 모형의 기하학적 형상을 변경하여 조정할 수 있고, 실제적으로 탄성계수 E의 값이 작은 모형 재료를 사용하면 그만큼 재료의 두께를 증가시킬 수 있다.³⁾ 따라서, 문비모형의 본체는, 탄성계수의 비 $n_E = 25$ 의 조건에 따라서 원형의 재료인 철과 탄성계수의 비가 약 1 : 75인 아크릴을 사용하여 두께를 3배로 증가시켜서 모형을 제작하고 납으로 질량을 각 요소 중심에 보정하였다. Froude 상사법칙에 따라 계산된 축척을 적용하였으며 Table 1에서 원형과 모형의 재료특성을 정리하였는데, 원형에서는 SI 단위계가 사용되었고, 모형에서는 CGS 단위계를 이용하여 실험을 수행하였다.

Table 1 Material properties in prototype and model of gate

Property	Model Prototype	Model	
		Requirement	Test results
Scale	1	1/25	
Density	$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	7.85 g/cm ³	1.20 g/cm ³
Weight	140,000 kgf	8,960 kgf	8,90 kgf
Modulus of elasticity	$2.00 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ (200 GPa)	$8.00 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$	$2.80 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$

2. 모형의 제작 및 설치

본 연구대상 문비의 원 설계는 폭 16.6 m, 높이 12.5 m의 원호형 게이트로서 축척 1 : 25를 고려하면 폭 0.664 m, 높이 0.5 m의 모형으로 제작된다. 모형은 크게 문비본체부, 문비팔, 권양기부 및 가설구대부로 구분된다.

아크릴 사용을 위한 두께 및 질량 보정을 거친 본체의 모형은 3개의 수평 가로빔, 23개의 세로 리브, 그리고 3개의 수직빔을 갖는 뼈대 구조물로 구성하였다. 또한 중량의 상사를 위하여 판과 가로보의 질량 중심에 납으로 질량을 보정하였다. 단면이 일정한 부재는 두께를 3배 증가시켰고, T형 부재는 단면 2차 모멘트가 같도록 두께를 환산후 보정하였다. 모형의 연결을 위하여 철제의 가설구대를 설치하였고 문비의 개폐를 위하여 감속기어를 설치하였다. 모형의 측면 및 정면도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험은 농업기반공사 수리시험장에서 수행되었다.

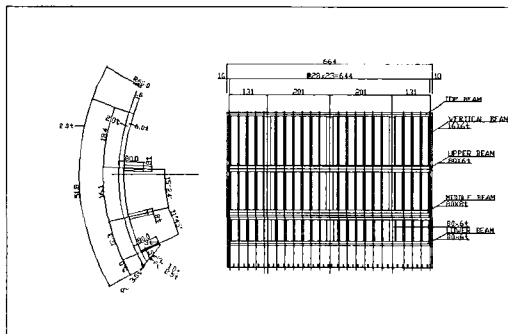


Fig. 1 Cross section and plan view of model

3. 실험시설

모형수조는 길이 20 m, 폭 0.67 m 높이 0.5 m의 콘크리트 블록으로 제작하였고 모형이 설치된 위치에는 길이 1.5 m, 두께 2 cm, 높이 0.5 m의 투명 아크릴 판을 설치하여 문비의 거동과 흐름현

상을 관측할 수 있게 하였다.

용수의 공급은 고수조로 펌핑된 물을 250 mm의 관로에 의하여 연결되어 지는데, 밸브 조정에 의해서 정수지와 모형수조를 통해 모형 설치부에 원하는 유량을 유입시키고 실험된 물은 다시 지하 저수조로 순환된다. 모형을 통과하는 흐름의 안정적 흐름을 위하여 정수지 상류부에 블럭을 일정한 간격으로 배치하고, 정류판을 설치하였다. 또한 모형수로 말단에 감속 기어를 부착한 웨어를 설치하여 모형 하류부의 수위와 유량을 조절하였다

4. 측정 시스템

실험에서 사용된 계측기와 수량은 Table 2와 같다. 증폭기(dynamic strain meter)는 8채널이 사용되었으며, 진동계는 수중에서 사용할 수 있는 1 g의 방수형 진동계 3조와 일반형 진동계 2조가 사용되었다. 정밀도는 0.0005 g이며, 로드셀의 측정범위는 0~20 kgf이다.

Table 2 Measuring equipment

Equipment	Set	Measuring item	Remarks
Amplifier (8 ch)	1	Amplify input data	
Load cell	2	Force	20kgf
Acceleration meter	5	Acceleration	3Set:1g, 1Axis, Waterproof type 1Set:1g, 1Axis, General type 1Set:2g, 3Axis, General type

5. 실험방법

본 실험에서는 모형의 고유진동수 측정, 모형의 상하류 수위와 문비의 개방고에 따른 수직 및 수평 방향의 진동진폭을 측정하였다. 문비하단부 내측판의 측면부와 중앙부에 2조의 진동계를 설치하였고, 아래에서 첫 번째 가로빔에 1조, 문비팔 힌지부에 1조, 문비상단 중앙부에 3축진동계 1조를 부착하

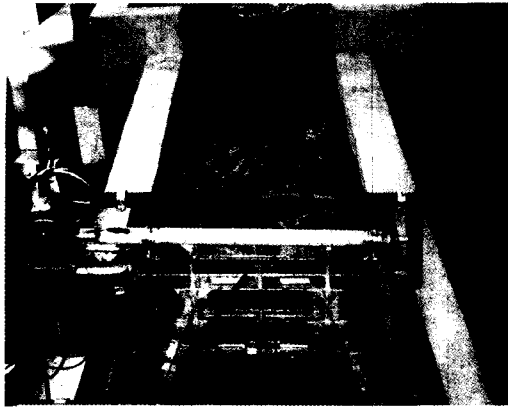


Photo 1 View of gate model test

였고, 1방향 진동계는 측정하고자 하는 방향에 따라서 진동계의 방향을 정하였다.

각 실험조건에 따라서 1초에 100개의 데이터를 10~20초 동안 측정하였다. 먼저 물이 없는 상태에서 영점조정을 맞추고 시험조건에 맞는 수위와 개방고에서 수직 및 수평방향의 진동진폭 측정하였다. Photo 1에 실험중인 문비를 나타내었다.

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

1. 문비의 고유진동수 검토

제작된 배수갑문 문비의 검증 및 동적 특성을 파악하기 위하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 최초로부터 3개의 모드를 범용 유한요소법 해석용 프로그램인 EMRC/NISAⅡ¹⁾를 사용하여 수행하였다. 문비의 각종 구조부재의 실 거동을 정확히 모델링하기 위하여 Skin plate, Vertical girder, Vertical main girder, Horizontal girder, Arm 등을 모두 고려하여 3차원 유한요소로 모델링하였다. Vertical main girder, Horizontal girder는 Rigid bar를 사용하고, Vertical girder는 사용프로그램인 EMRC/DISPLAYⅢ²⁾의 off set 기능을 이용하여 실제 구조계와 같이 거동 할 수 있도록 모델링하였다. 문비의 구조해석 모델은 Fig. 2와 같으며, 원형에서

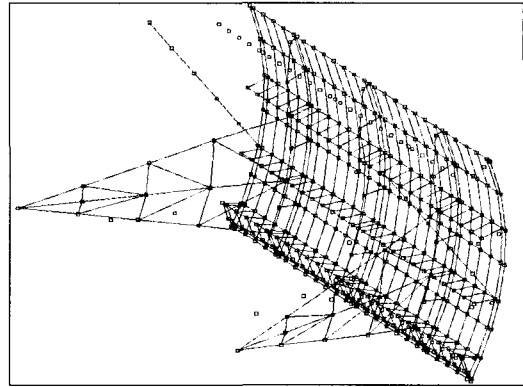


Fig. 2 Structural analysis model of prototype gate

의 고유진동수를 Table 3에 정리하였다.

두 번째와 세 번째 모드는 수직방향 진동을 나타내며, 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. 원형의 유한요소법 해석에 의한 고유진동수의 축척에 따른 계산 값과 실험에 의하여 측정된 값을 Table 3에 비교하였다. 모형의 고유진동수를 원형의 고유진동수를 축척에 의해 계산한 값과 비교해 보면, 모형 고유진동수의 최저값은 1모드, 2모드, 3모드에 대하여 0.93, 1.001, 0.98의 비(평균 0.97)을 보였으며, 모형 고유진동수의 평균값에 대하여는 각각 1.07, 1.17, 1.05의 비(평균 1.096)을 보였다. 이 값들은 평균 10% 이내로, 상당히 근접함을 보임으로 제작된 모형은 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다.

2. 수위 및 개방고별 진동측정

상류수위 32 cm, 하류수위 12 cm, 16 cm일 때 개방고에 따른 진동가속도 진폭을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 도표화하였다.

Table 3 Natural frequencies in prototype and model of gate

Mode		Prototype		Model	Ratio (2)/(1)	Remarks
		F. E. M.	Theoretic result by scale(1)	Test results(2)		
Scale		1	1/25	1/25		
Natural frequency (Hz)	1 mode	2.43	12.15	11.32~14.75	0.93~1.21 (1.07)*	Deformation of wire rope
	2 mode (Vertical)	3.47	17.35	17.5~23.27	1.001~1.34 (1.17)*	
	3 mode (Vertical)	6.40	32.00	31.2~35.60	0.98~1.11 (1.05)*	

Note: (): average value

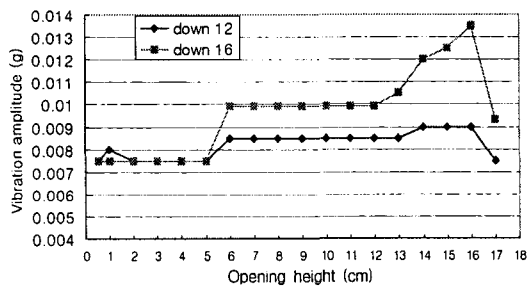


Fig. 3 Vibration amplitude due to opening height

측정결과 하류수위 12 cm에서 진동가속도 진폭은 개방고 5 cm 이상과 13 cm 이상에서 약간의 증가는 있지만 거의 일정한 진동진폭을 보이고 있으며, 1 cm~2 cm의 작은 개방고에서 큰 진동진폭을 보이지 않았다. 하류수위 16 cm에서는 개방고가 작을 때는 하류수위 12 cm와 거의 같은 진동진폭을 보이다가 개방고 12 cm 이상에서 진동가속도 진폭이 개방고가 높아짐에 따라서 점차 크게 측정되다가 개방고가 하류수위와 같아질 때 감소됨을 볼 수 있다. 이것은 문비 하단에서 개방고가 커짐에 따라서 수면이 크게 물결치고, 뒤돌아치는 수류가 문비하단 경사판에 부딪치는 충격의 영향으로 판단된다.

3. 수정모형의 진동측정

문비 하단 폭이 어느 값 이상일 경우 그 아래를 통과하는 수류의 불안정한 흐름으로 인한 전단층(Shear layer)의 불안전성과 와류의 영향으로 부압이 발생하여 진동이 발생하게 되는 것으로 연구되었다.^{7),8)} 앞서의 연구에 의하면 사각형 문비에서 문비 개방고가 문비 하단 폭의 0.7~0.9배일 때 최대 진동이 발생⁷⁾하고, 태인터 게이트의 모형실험에서는 0.6~0.8배의 개방고에서 최대진동이 발생⁵⁾하는 것으로 보고되었다.

원 설계모형의 문비 선단부 폭(두께)은 0.5 cm로, 상기에 의하면 개방고 0.5 cm 이하에서 최대진동이 발생해야 하는데 Fig. 3에서 이러한 현상은 발생하지 않았고, 여러번의 반복 실험에서도 이러한 진동은 발생하지 않았다. 본 연구에서는 이러한 의문을 해결하기 위하여 Table 4와 같은 최하단 문비하단폭을 변경한 수정모형들을 제작하여 진동현상을 실험하였다. 원 설계인 문비 하단폭 0.5 cm(D 5 모형)에서 아크릴 판을 사용하여 0.5 cm씩 문비하단폭을 증가 시켜서 1.0 cm(D 10 모형), 1.5 cm(D 15 모형), 2.0 cm(D 20 모형), 2.5 cm(D 25 모형), 3.0 cm(D 30 모형) 폭을 갖는 문비로 변경하여 제작하였다. 각 변경된 모형에 대하여 상류수위 32 cm, 하류수위 12 cm일 때

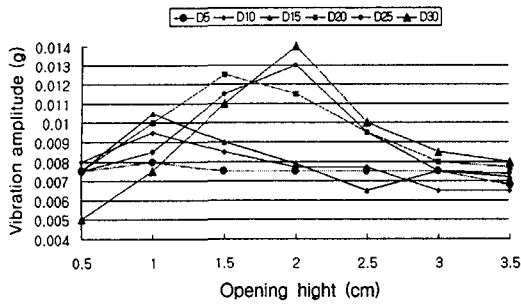


Fig. 4 Vibration amplitude due to opening height in each revised model

Table 4 Revised models

Model	Gate bottom width (mm)	Remarks
D 5	5	Prototype model
D 10	10	
D 15	15	
D 20	20	
D 25	25	
D 30	30	

개방고별 진동 가속도 진폭을 측정하였으며, Fig. 4에 개방고 4 cm까지의 진동진폭을 도시하였다.

D 5 모형에서는 개방고에 따른 진동이 거의 일정했으나 D 10 모형부터는 최대진동이 점점 크게 발생함을 볼 수 있으며, D 10 모형, D 15 모형에서는 1.0 cm, D 20 모형에서는 1.5 cm, D 25 모형, D 30 모형에서는 2.0 cm에서 최대진동이 발생함을 볼 수 있다. 이 결과를 개방고와 문비하단폭의 비로 나타내면 각각 1.00, 0.67, 0.75, 0.80, 0.67의 값을 보인다. 이 결과를 볼 때 문비하단폭 1 cm 이하에서는 개방고에 따른 진동진폭이 거의 없거나 작은 것으로 나타났다. 따라서 문비하단폭이 1 cm 이하에서는 전단층(Shear layer)의 불안전성과 부압으로 인한 진동현상은 발생하지 않는 것으로 판단된다. 문비하단폭 1.5~3.0 cm에서 최대진동진폭이 발생했을 때 개방고와 문비하단폭의 비는 0.67~0.80의 범위에 있게 되는데, 이는

Thang⁷⁾에 의한 사각형 문비에서 0.7~0.9, 이성행 등⁵⁾의 원호형 문비 모형실험에서 0.6~0.8과 거의 유사함을 알 수 있었다.

4. 개폐시의 진동 측정

Fig. 5는 상류 수위 40 cm, 하류 수위 12 cm일 때 닫혀있는 문비상태에서 4초부터 32초까지 문비를 3 cm 개방하였다가, 이후 64초까지 문비를 닫을 때 발생하는 진동의 가속도를 측정한 그래프다. 평균 진동 가속도 진폭이 개방할 때는 0.02 g, 닫을 때는 0.05 g로 문을 열 때보다는 닫을 때 진동이 2.5배 정도 훨씬 더 크다는 것을 알 수 있었다.

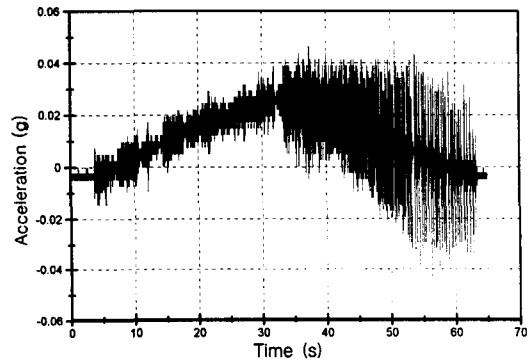


Fig. 5 Acceleration in gate opening and closing

IV. 문비 진동에 대한 평가

테인터 게이트의 진동은 문비의 규격과 구조, 문비하부의 형태, 가로보의 구성, 개폐장치의 구조 등 여러 요인에 의하여 지배된다. 본 장에서는 앞장에서 실험된 문비의 진동실험결과(Sea flow(D 5), Sea flow(D 20))와 이성행⁴⁾이 실험한 문비진동을 같은 그래프에 도시하여 문비진동을 평가하였다.

Fig. 6에서 M1, M3 모형 및 D 5, D 20 모형의 하부형상을 나타내었다. 여기서 M1 모형은 문비 양쪽 측면부(side part)를 문비하단 끝단에서 첫 번째 가로보까지 직선부재로 연결한 것이 M3 모형

과 구별되며, D 5, D 20 모형은 Table 4의 모형으로 문비하단폭이 5 mm와 20 mm이다. Fig. 7에서 Sea flow(M1)와 Sea flow(M3)은 이성행(1996)⁴⁾의 논문 Fig. 9의 M1, M3 모형의 실험 결과이다. 하부폭이 1.72 cm인 M1, M3 모형은 축척이 본 실험과 같은 1:25이고, 모형의 재질이 같은 아크릴로 제작되었으며, 수위조건은 상류 32 cm, 하류 11 cm의 수위에서 실험되었기 때문에 직접비교가 가능한 것으로 판단된다.

M1, M3 모형은 폭 1.2 m, 높이 0.5 m로 큰 강성을 유지하기 위하여 6개의 가로보와 이중판으로 구성되어 있고, 개폐시설은 유압 실린더로 이루어졌다. M1모형은 M3모형과 같은 구조와 강성을 같으나 문비 양쪽 측면부를 문비하단 선단에서 첫 번째 가로보까지를 직선으로 연결한 이중판 형태로 M3 모형보다 흐름에 유리한 형상을 갖는다. D 5 모형, D 20 모형은 폭 0.66 m, 높이 0.5 m로 3개의 가로보와 단판으로 구성되며, 개폐장치는 와이어 로프로 되어있다.

Fig. 7의 진동현상을 비교해 보면, 전체적으로 M 모형의 진동이 D 모형보다 훨씬 크다는 것을 볼 수 있는데, 이것은 문비하단의 형태, 문비구조, 강성, 개폐장치 등에 영향을 받는 것으로 판단된다. M1모형은 7 cm 이하 개방고에서 M3 모형보다 진동에 크게 유리함을 볼 수 있고, 문비하부의 형상이 문비진동에 상당한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. M1 모형을 D 5, D 20 모형과 비교해 보면 개방고 1.5 cm까지와 7 cm 이상에서 훨씬 큰 진동 현상을 보인다. 1.5 cm까지의 진동은 M1 모형의 하부형상이 이중판으로 구성되어 있어서 단판으로 이루어진 D 모형보다 큰 진동이 발생된 것으로 판단된다.

또한 7 cm 이상에서의 진동은 M1 모형은 폭 1.2 m, 높이 0.5 cm로 큰 강성을 유지하기 위하여 6개의 가로보로 구성되어 있고, D 모형은 폭 0.66 m, 높이 0.5 cm로 3개의 가로보로 구성되어 있는데, M1 모형의 최하단 가로보가 뒤돌아 치는 와류

와 접하는 낮은 위치에 있는 것이 원인으로 판단된다. 따라서 문비의 설계에 있어서는 하단부 가로보의 위치가 진동에 영향을 미칠 수 있으므로 설계시 주의가 요망된다.

특히 D 5 모형은 거의 진동의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있으며, 앞 절의 실험결과로부터 문비 최하단폭 1 cm 이하에서는 진동의 영향이 상당히 작게 되며, 이러한 정도의 문비 하단폭에서는 진동에 의한 영향을 거의 무시 할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 문비 설계시 테인터 게이트의 문비 형태라 할지라도 D 5 모형과 같은 형태는 낮은

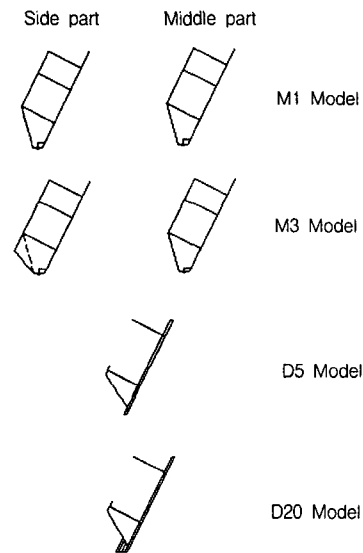


Fig. 6 Bottom cross section in each gate model

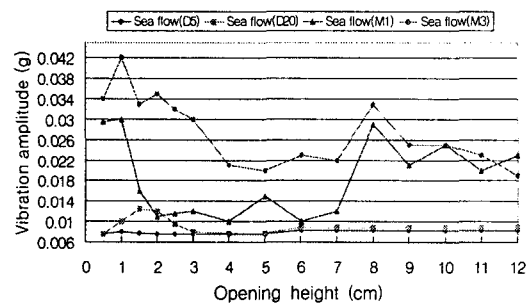


Fig. 7 Vibration amplitude due to opening height due to flow direction in each model

개방고에서의 진동 현상을 고려하지 않아도 되는 것으로 판단된다.

D 20은 문비하단 폭이 2.0 cm, M1과 M3는 1.72 cm로 이루어지는데 이 비에 따라서 최대진동을 일으키는 문비 개방고가 D 20이 M1 모형보다 0.5 cm 높게 실험된 것으로 나타났다.

V. 결 론

모형실험에 의하여 연구된 테인터 게이트의 진동 현상을 정리하면 다음과 같이 요약된다.

1. 모형을 변경하여 실험한 결과 문비하단폭 1 cm 이하에서는 작은 개방고에서 전단층(Shear layer)의 불안전성과 부압으로 인한 진동현상이 상당히 작게 측정되므로 이 범위에서는 이러한 진동의 영향이 거의 없는 것으로 판단된다. 이러한 진동현상은 주로 상하류 수위차에 따라서 큰 영향을 받는데 우리나라 서해안에 설치되는 게이트는 수위차가 일정한 범위안에 있으므로, 이 지역에 설치되는 테인터 게이트의 설계시는 문비 최하단폭을 25 cm(모형 1 cm)이하로 하는 것이 진동에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 것으로 판단된다.

2. 문비 가로보 설계에 있어서 문비최하단 가로보의 적절한 위치선정이 개방고 7 cm 이상에서의 진동을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 구조적 문제가 없다면 최하단 가로보가 문비 최하단에서 위쪽으로 최대한 위치하여 뒤돌아 치는 와류와 접하지 않도록 하는 것이 진동을 줄일 수 있었다. 따라서, 문비의 설계에 있어서는 하단부 최하단 가로보의 위치를 가능한 한 문비 최하단에서 최대한 위쪽으로 설치하는 것이 요망된다.

3. 수정모형 실험에서 최대진동 가속도를 발생하는 문비 개방고는 D 15 모형에서 1.0 cm, D 20 모형에서 1.5 cm, D 25 모형, D 30 모형에서 2.0 cm로 측정되는데, 이 결과를 개방고와 문비 하단폭의 비로 나타내면 각각 0.67, 0.75, 0.80, 0.67의 값을 보인다. 이 0.67~0.80의 비는 앞의 연구

결과^{5),7)}와 거의 유사함을 알 수 있었다.

4. 원설계모형(D 5)에서 개방고별 진동현상을 측정된 결과 하류수위에 관계없이 개방고 5 cm에서와 개방고 12 cm~13 cm에서 진동진폭이 증가됨을 알 수 있었다.

5. 문비 개폐시 진동현상은 문비를 열 때보다는 닫을 때 진동이 훨씬 크다는 것을 알 수 있었다.

References

1. EMRC, 1999, NISA II User's Manual, Center for Engineering and Computer Technology, Michigan, U.S.A., pp.1~50.
2. EMRC, 1999, DISPLAY III User's Manual, Center for Engineering and Computer Technology, Michigan, U.S.A., pp.1~100.
3. Kolkman, P. A., 1974, Flow-induced Gate Vibrations. Prevention of Self-excitation, Delft Hydraulics laboratory, Publ. No.164, pp.1~162.
4. Lee, S. H., 1996, Study on Self-excited Vibration of Radial Gate in Estuary Sulices due to Bottom Shape by Hydraulic Model Tests, *KCID Journal* 3(1), pp.10~19. (in Korean)
5. Lee, S. H. and K. S. Jung, 1996, Model Tests Study on Self-excited Vibration of Tainter Gate, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 16(1-2), pp.187~194. (in Korean)
6. Schmidgall, T. 1972, Spillway Vibrations on Arkansas River Dams, Proc. Journal of Hydraulics Division, ASCE, Jan., No. HY1, Proc. Paper 8676, pp.219~238.
7. Thang, N. D. 1990, Gate Vibrations due to Unstable Flow Separation, *Journal of Hydraulics Engineering* 116(3), pp.342~361.
8. Thang, N. D., and Naudascher, E. 1986a, Vortex-excited Vibrations of Underflow Gates, *Journal of Hydraulic Research* 24(2), pp.133~151.