

배수갑문 테인터 게이트(Tainter Gate)의 진동현상에 관한 모형실험(Ⅱ) - 문비 안에서 밖으로의 흐름 -

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

이 성 행* · 우 상 익**

Lee, Seong Haeng · Woo, Sang Ik

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 0.66 m in width, 0.5 m 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.

In the flow from the gate inside to the gate outside, the amplitudes of the vibration are measured under the different gate opening and downstream water level conditions. Also revised gate models with 20 mm bottom width are tested under the different gate openings and water levels. The results are analyzed to study the characteristics of the Tainter gate vibration in the sea ward flow.

These test results are assessed in comparison with the results in the lake ward flow, as a result, presents the dynamic characteristics of the Tainter gate and a basic data for the guide manuals of gate management.

Keywords : Amplitude of vibration, Opening height, Downstream water level, Revised model test

I. 서 론

배수갑문의 문비는 형태에 따라서 수직형 문비와 테인터 게이트(원호형 문비)로 구분되는데 기술의 발전에 따라서 유지관리, 비상 대처능력, 미관 등을 고려하여 테인터 게이트의 사용이 증가하고 있다.

초대형 배수갑문에 설치된 2조로 구성된 테인터 게이트나 댐에서 설치된 테인터 게이트는 수류가

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

문비 밖에서 안으로 흐르는 경우(호수쪽으로의 흐름)에 대하여 설계되고 설치되며, 진동현상도 이 방향에 대하여 연구되었다. 배수갑문에서 1조의 테인터 게이트가 설치된 경우 담수호의 수위조절 시나, 2조로 설치된 테인터 게이트에서 호수쪽 게이트가 고장이나 들어올린 상태에서 해측 게이트만으로 조작하는 경우 게이트의 안쪽에서 바깥쪽으로 수류가 흐르게 된다(바다쪽으로의 흐름). 이 경우 테인터 게이트는 상류수위와 접하는 면이 문비 외측의 스킨 플레이트가 아니고, 문비 내측면이 되므로 호수쪽으로의 흐름과는 다른 진동현상을 보일 수 있다. 이러한 흐름에서 문비 개방도가 클 경우 수류가 문비 하단부에 설치된 가로보나 문비 선단부에서 가로보로 연결되는 경사판을 치게 되어 진동현상이 크게 발생할 수 있고, 용접부나 취약한 부분에서 피로파괴가 발생할 수 있다.^{2),5)} 바다쪽으로의 흐름에 대한 문비진동에 대하여 국내에서는 실험 및 연구된 실적이 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 테인터 게이트의 바다쪽으로의 흐름에 따른 진동현상을 연구하기 위하여 모형이론에 따라 1:25의 축척으로 아크릴 모형을 제작하였다. 모형의 검증용을 위하여 제작된 모형의 고유진동수를 측정하고 전산모형에서 구한 고유진동수와 비교되었다. 검증된 모형에 대하여 여러 수위조건에서 개방도와 하류수위에 따라 문비의 진동특성을 연구하기 위하여 진동 가속도 진폭을 측정하였다. 또한 문비 최하단 폭을 20 mm로 변경시킨 수정 모형을 제작하여 원 설계 모형과 비교하였으며, 문비 개폐시의 진동 현상을 측정하였다. 실험된 결과를 호수쪽으로의 흐름 결과와 비교하여 바다쪽으로의 흐름에 대한 문비진동을 평가하고, 문비의 동적 특성을 연구하며, 또한 수문 조작시 관리지침 설정을 위한 기본 자료를 마련하고자 한다.

II. 모형의 제작 및 실험

1. 탄성상사 모형이론²⁾

탄성 조건을 만족시키기 위하여 동확대계수(dynamic magnification factor) $\frac{kA}{F}$, 진동수의 비 ω_r / ω , 감쇠율 ξ 의 비가 원형과 모형에서 같아야 한다.

질량-스프링계 모형의 탄성은 Cauchy 수에 따르며, 복합구조물에 대하여 아래의 식이 유도된다.

$$n_\epsilon = n_F / (n_L^2 n_E) = n_\rho n_L^2 n_V^2 / (n_L^2 n_E) = 1 \dots\dots\dots (1)$$

자유수면을 갖는 흐름에서는 Froude 상사법칙이 적용되므로 유속의 축척은 다음과 같다.

$$n_V = (n_g n_L)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하고 정리하면 식 (3)을 얻는다.

$$n_\rho n_g n_L / n_E = 1 \dots\dots\dots (3)$$

여기서, 원형과 모형에서 사용한 유체가 동일한 경우 $n_\rho = n_g = 1$ 이 되고, 다음 식이 성립한다.

$$n_L = n_E = 1 \dots\dots\dots (4)$$

2. 모형축척 및 재질

배수갑문 문비에서 흐름을 지배하는 주된 힘이 관성력과 중력 가속도이므로 이때의 모형축척은 Froude 상사법칙에 따르며, 본 실험에서는 모형의

Table 1 Scale factors in Froude similarity

Physical item		Scale	Result	Physical item		Scale	Result
Length	n_L		25	Discharge	n_Q	$n_L^{2.5}$	3,125
Mass	n_m	n_L^3	15,625	Modulus of elasticity	n_E	n_L	25
Specific density	n_ρ	1	1	Linear stiffness	n_K	n_L^2	625
Velocity	n_V	$\sqrt{n_L}$	5	Bending stiffness	n_{EI}	n_L^5	9,765,625
Acceleration	n_a	1	1	Shear modulus of elasticity	n_G	n_L	25
Time	n_t	$\sqrt{n_L}$	5	Torque stiffness	n_{GI}	n_L^5	9,765,625
Frequency	n_f	$1/\sqrt{n_L}$	1/5	Impulse	n_{PI}	$n_L^{3.5}$	78,125
Force	n_F	n_L^3	15,625	Pressure	n_p	n_L	25

Table 2 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)	$8.00 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$	$2.80 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$

축척을 $n_L = 25$ 로 결정하였다. 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.^{2),3)}

Froude 상사법칙에 따라 계산된 축척을 적용하여 Table 1에 정리하였으며, Table 2에서 원형과 모형의 재료특성 값을 나타내었는데, 원형에서는 SI단위계가 사용되었고, 모형에서는 CGS 단위계를 사용하였다.

3. 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. 모형의 연결을 위하여 철재의 가설구대를 설치하였고 문비의 개폐를 위하여 감속기어를 설치하였으며, 제작된 모형의 배면을 Photo 1에 나타내었다.

4. 측정 시스템

실험에서 사용된 계측기와 수량은 Table 3과 같다. 증폭기(dynamic strain meter)는 8채널이 사용되었으며, 진동계는 수중에서 사용할 수 있는 1g의 방수형 진동계 3조와 일반형 진동계 2조가 사용되었다. 정밀도는 0.0005 g이다.

Table 3 Measuring equipment

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

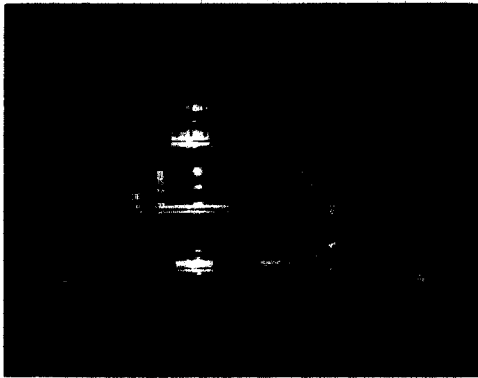


Photo 1 Back view of fabricated model



Photo 2 View of gate model test

180° 돌려서 문비 내측이 상류측이 되도록 모형을 설치하고, 모형의 고유진동수 측정, 상하류 수위와 문비의 개방고에 따른 수직 및 수평방향의 진동진폭을 측정하였다. 먼저 물이 없는 상태에서 영점조정을 맞추고 시험조건에 맞는 수위와 개방고에서 수직 및 수평방향의 진동진폭을 측정하였으며, Photo 2에 설치된 문비를 나타내었다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 문비의 고유진동수 검토

제작된 배수갑문 문비의 검증 및 동적 특성을 파악하기 위하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 최초로 3개의 모드를 범용 유한요소법 해석용 프로그램인 EMRC/NISA II⁹⁾를 사용하여 수행하였다. 원형의 유한요소법 해석에 의한 고유진동수와 고유진동수의 축척에 따른 계산 값과 실험에 의하여 측정된 값을 Table 4에 비교하였으며, Fig. 1에 제 1모드의 변형(mode shape)을 나타내었다. 모형의 고유진동수와 원형의 고유진동수를 축척에 의해 계산한 값과 비교해보면, 모형 고유진동수의 최저값에서는 1모드, 2모드, 3모드에 대하여 0.93, 1.001, 0.98의 비(평균 0.97)를 보였으며, 모형 고유진동수의 평균값에 대하여는 각각 1.07, 1.17, 1.05의 비(평균 1.096)를 보였다. 이 값들은 평균

5. 실험방법

본 측정에서는 해측 방향으로 설치된 가설구대를

Table 4 Natural frequencies in prototype and model of gate

Mode		Model	Prototype		Model	Ratio (2)/(1)	Remarks
			F. E. M.	Theoretic result by scale(1)			
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

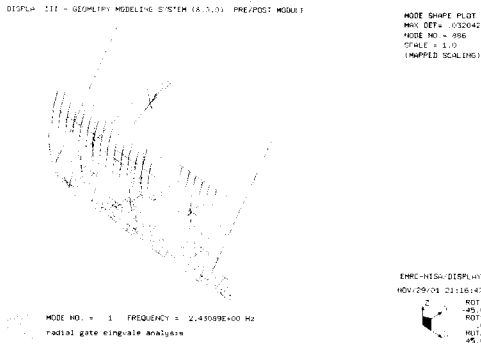


Fig. 1 1st mode shape of gate

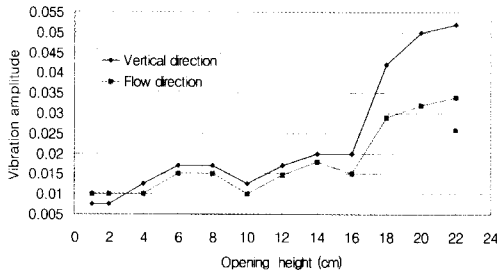


Fig. 2 Vertical and flow vibration amplitude due to opening height

10% 이내로, 상당히 근접함을 보임으로 제작된 모형은 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다.

2. 개방고별 진동 측정

바다쪽에서의 흐름에서는 가장 불리한 수위인 상류수위 24 cm, 하류 6 cm일 때 개방고별 수직 및 수류방향 진동 진폭을 측정하여 Fig. 2에 그래프로 나타내었다. 문비 진동이 개방고 1 cm~2 cm에서는 0.0075 g~0.01 g로 작고 4 cm~16 cm에서는 0.01 g~0.02 g로 증가된 진동 진폭을 보이다가, 16 cm이상에서는 진동이 더 커져서 0.02 g~0.055 g의 비교적 큰 진동가속도 진폭을 보인다. 따라서 본 연구대상 문비는 문비 개방고를 16 cm (원형에서 400 cm)이하에서 작동한다면, 문비의 진동을 최소화 할 수 있을 것으로 판단되었다.

바다쪽 수류방향에서 개방고가 클 때 진동이 호

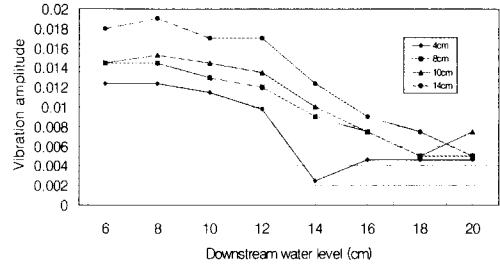


Fig. 3 Vibration amplitude due to downstream water level

수쪽보다 크게 발생하는 이유는 원호형 문비의 형상관계로 하단부에 설치된 가로보나 문비 선단부에서 가로보로 연결되는 경사판을 방류수가 치게 됨이 원인으로 판단되었다.

3. 하류 수위별 진동 측정

Fig. 3에 상류 24 cm일 때 개방고별 하류수위에 따른 진동진폭을 나타내었다. 하류수위가 6 cm~12 cm범위에서 0.01 g~0.02 g의 진동진폭을 보이고 있으며, 12 cm이상의 수위에서 진동이 줄어들기 시작하여 16 cm이상의 수위에서는 모든 개방고에서 0.01 g이하의 진동현상을 보인다. 따라서 연구대상 문비에서 담수호의 유량을 배제할 때 하류 수위가 12 cm(원형에서 250 cm)이상에서 문비를 개방하면 진동을 최소한 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 수정모형의 진동 측정

문비하단폭을 2.0 cm로 변경한 수정모형인 D 20모형에 대하여 상류수위 24 cm, 하류수위 6 cm일 때 개방고별 진동 현상을 측정하여 문비 하단폭이 0.5 cm인 원 설계모형과 비교하였다. 실험 결과를 Fig. 4에 도시하였으며, 호수쪽 방향 흐름실험과 비교할 때 바다쪽 방향흐름은 작은 개방고에서 문비하단폭이 증가하여도 진동이 거의 증가하지 않았으며, 3 cm이상의 개방고에서도 두 모형은 거

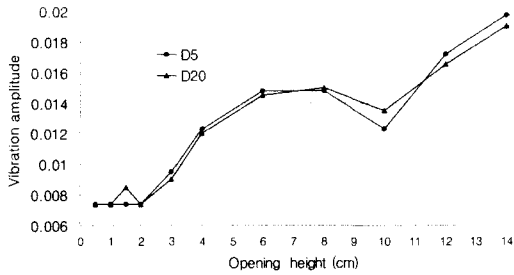


Fig. 4 Vibration amplitude due to opening height in prototype model(D5) and revised model(D20)

의 같은 진동현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 바다쪽 방향흐름일 때 상류수위가 24 cm로 호수쪽 방향 흐름의 32 cm보다 낮고, 큰 개방고에서는 문비진동이 문비하단의 폭 보다는 문비 가로 보와 형상에 기인하기 때문인 것으로 판단되었다.

5. 개폐시의 진동 측정

Fig. 5는 상류 수위 40 cm, 하류 수위 12 cm일 때 닫혀 있는 문비상태에서 문비를 개방하였다가, 이후 문비를 닫을 때 발생하는 진동의 가속도를 측정한 그래프다. 진동 진폭이 개방할 때는 평균 0.01 g, 닫을 때는 평균 0.05 g로 큰 차이는 없으나 문을 열 때가 닫을 때보다 진동이 약간 크게 발생하는 것으로 측정되었다.

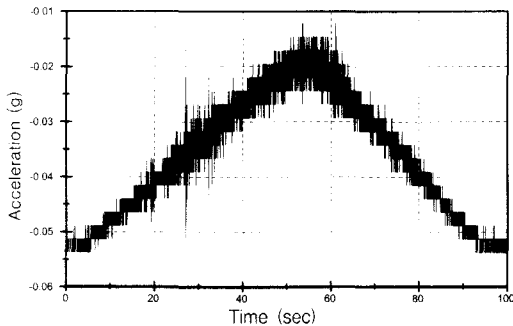


Fig. 5 Acceleration in gate opening and closing

IV. 문비 진동에 대한 평가

양방향 흐름에 대한 문비진동을 비교 평가하기 위하여 호수쪽으로의 흐름 모형실험 결과인 Sea flow (D 5), Sea flow(D 20)와 바다쪽으로의 흐름 모형실험 결과인 Inner flow(D 5), Inner flow(D 20)을 Fig. 6에 같이 도시하였다. 여기서 Sea flow(D 5)은 문비 하단폭이 0.5 cm인 원설계의 문비모형이며, Sea flow(D 20)는 문비 하단폭이 2.0 cm인 수정모형으로 호수쪽 방향 흐름에서 상류 32 cm 하류 12 cm의 수위로 개방고를 변경하여 진동 가속도진폭을 측정한 결과이다. Inner flow(D 5)와 Inner flow(D 20)는 바다쪽 방향에서 상류 24 cm, 하류 6 cm의 수위에서 개방고별 진동측정 결과로 호수쪽 방향 흐름 경우와 직접적으로 비교하기는 수위조건이 맞지 않으나 바다쪽 수류방향에서 문비를 평가하기 위하여 가장 근접한 자료로 평가되어 같이 도표화하였다.

Sea flow와 Inner flow의 진동을 비교 해보면 개방고 2.5 cm까지 호수쪽 방향 흐름인 Sea flow (D 20)에서 진동이 크게 발생함을 알 수 있고, 3 cm이상 이상의 개방고에서는 바다쪽 방향 흐름에서 훨씬 큰 진동이 발생함을 알 수 있었다.

개방고 3 cm이상에서는 낮은 수위차에도 불구하고 Inner flow에서 더 큰 진동이 발생함을 볼 수 있는데, 이것은 테인터 게이트의 형상관계로 하단부에 설치된 가로보나 문비 선단부에서 가로보로

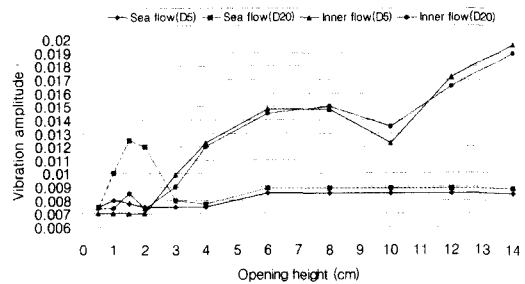


Fig. 6 Vibration amplitude due to opening height due to flow direction in each model

연결되는 경사판을 방류수가 치게됨이 원인으로 판단된다.

Inner flow(D 5)와 Inner flow(D 20)을 비교해 보면, 바다쪽 흐름에서는 호수쪽 방향 흐름과는 달리 문비하단 쪽에 따라 낮은 개방고에서 발생하는 큰 진동현상은 발생하지 않고 거의 근접하게 진동이 발생하는데 이것은 낮은 상하류 수위차와 문비하부 형상에 기인한 것으로 판단되었다.

V. 결 론

바다쪽으로의 흐름일 때 모형실험에 의하여 연구된 테인터 게이트의 진동현상을 정리하면 다음과 같이 요약되었다.

1. 바다쪽으로의 흐름과 호수쪽으로의 흐름의 진동을 비교해 보면 개방고 2.5 cm까지는 호수쪽 방향 흐름에서 진동이 크게 발생함을 알 수 있고, 3 cm 이상의 개방고에서는 바다쪽 방향 흐름에서 큰 진동이 발생함을 알 수 있었다. 3 cm(원형에서 75 cm)이상의 개방고에서 점점 커지는 진동은 테인터 게이트의 형상관계로 방류수와 하단부에 설치된 가로보 또는 문비 선단부에서 가로보로 연결되는 경사판과의 충격으로 판단되었다.

2. 바다쪽 방향흐름에서 수정모형의 문비진동은 호수쪽 방향흐름과는 달리 1 cm~2 cm의 작은 개방고와 3 cm 이상의 큰 개방고 모두에서 문비 하단쪽에 거의 영향을 받지 않는 것으로 측정되었다. 이것은 문비의 형상과, 바다쪽 방향흐름일 때 상류 수위가 24 cm로 호수쪽 방향흐름의 32 cm보다 훨씬 낮은 것에 기인하는 것으로 보이며, 3 cm 이상의 개방고에서 문비진동은 문비 하단의 쪽 보다는 문비 가로보와 형상에 기인하기 때문인 것으로 판단되었다.

3. 1항과 2항의 결과를 볼 때 바다쪽 방향의 흐름은 호수쪽 방향흐름에서 발생할 수 있는 1 cm~2 cm의 작은 개방고에서 전단층의 불안전성과 부

압으로 인한 진동현상은 고려하지 않아도 되는 것으로 판단되었다.

4. 바다쪽 방향흐름에서의 진동은 하류 수위에 따라서 크게 영향을 받으며, 하류수위가 높아짐에 따라서 진동이 크게 감소함을 알 수 있었다. 연구 대상 문비일 경우 하류 수위가 12 cm(원형에서 250 cm) 이상에서 문비를 개방하면 진동을 최소한 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

5. 문비 개폐시 진동현상은 열 때와 닫을 때 큰 차이는 없었으나 열 때가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

References

1. EMRC, 1999, NISA II User's Manual, Center for Engineering and Computer Technology, Michigan, U.S.A., pp.1~50.
2. Kolkman, P. A., 1974, Flow-induced Gate Vibrations. Prevention of Self-excitation, Delft Hydraulics laboratory, Publ. No.164, pp.1~162.
3. 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)
4. 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(I-2), pp.187~194. (in Korean)
5. Thang, N. D. 1990, Gate Vibrations due to Unstable Flow Separation, *Journal of Hydraulics Engineering* 116(3), pp.342~361.
6. Thang, N. D., and Naudascher, E. 1986a, Vortex-excited Vibrations of Underflow Gates, *Journal of Hydraulic Research* 24(2), pp.133~151.