

수리모형 실험에 의한 배수갑문 원호형 문비의 하부형상에 따른 진동현상 연구

Study on Self-excited Vibration of Radial Gate in Estuary Sulices due to Bottom Shape by Hydraulic Model Tests

李 晟 行*

Lee, Seong-haeng

Abstract

A hydraulic model test was performed for radial gate in estuary sulices to find out a proper bottom shape of gate which minimize the amplitudes of vibration.

Firstly natural frequencies were measured, and the results were compared with the numerical analysis in order to verify the model. In the radial gate models, vertical and horizontal vibrations were tested under the different gate openings and water level conditions. In order to investigate the vibration due to the bottom shape of gate, hydraulic model tests with various bottom type of gate were conducted, and flow phenomena due to opening height were observed and analyzed.

In this paper, the dynamic characteristics of radial gate were discussed, and bottom shape of gate to reduce the amplitudes of vibration were proposed through the hydraulic model tests.

I. 서 론

1970년대 부터 경제성장에 힘입어 대규모 간척 사업이 연속적으로 추진되어 오고 있으며, 배수 갑문과 같이 물을 관리하고 조절하는 대형 수리 구조물의 설계와 시공 및 유지관리에 있어서 충분한 안전성과 내구성이 요망되고 있다.

간척사업의 최대 구조물인 배수갑문은 구체와 문비로 구성되는데, 문비는 평시에는 내수면 측의 수위 유지와 해수 측으로부터의 염분 침투를

막으며, 홍수시에는 수위조절을 위하여 선택적으로 개폐되는 중요한 해안 구조물이다.

이러한 배수갑문에 설치되는 문비는 형태에 따라서 원호형과 수직형으로 구분되는데 최근, 기술의 발전에 따라서 유지관리, 비상 대처능력, 미관 등을 고려하여 원호형 문비의 사용이 증가하고 있다.

원호형 문비는 일정한 회전 반경을 갖는 문비 팔(Gate arm)의 힌지축에 의하여 지지되며, 유압장치에 의한 피스톤이나 권양기에 의한 케이블

* 농어촌진흥공사 농어촌연구원

키워드 : 원호형문비, 진동, 하부형상, 고유진동수, 상하류 수위, 개방고

(Cable)에 의해서 올려지고 내려지는 구조로 되어있고, 이러한 형태로 인하여 수직형 문비보다 진동현상이 발생하기 쉽고, 특히 수류가 통과하는 문비 하부 단면의 형상에 따라서 진동의 발생이 크게 달라진다.

문비에서 상하류 수두차가 있는 경우, 문비가 바닥에서 처음 열릴 때나 작은 열림 상태에서 수류에 의한 진동(Flow-induced vibration)이 발생하게 되고, 이로 인하여 문비 하단부에는 적은 반복 회수로서도 피로(Low cycle fatigue ; 일반적으로 피로수명 1×10^5 정도 이하의 피로현상을 의미) 파괴를 야기시킬 수 있는 큰 응력범위를 갖는 응력이 다발하게 되어 문비의 안전성에 중대한 영향을 미칠 수 있다.

단판으로 구성된 원호형 문비의 경우 강성을 보강하기 위하여 가로보가 설치되는데 특히, 문비 하단부에 설치된 가로보에서 와류현상이나 파랑으로 인한 진동영향으로 인하여 용접부 등 취약한 부분에서 피로 파괴가 발생하게 된다.

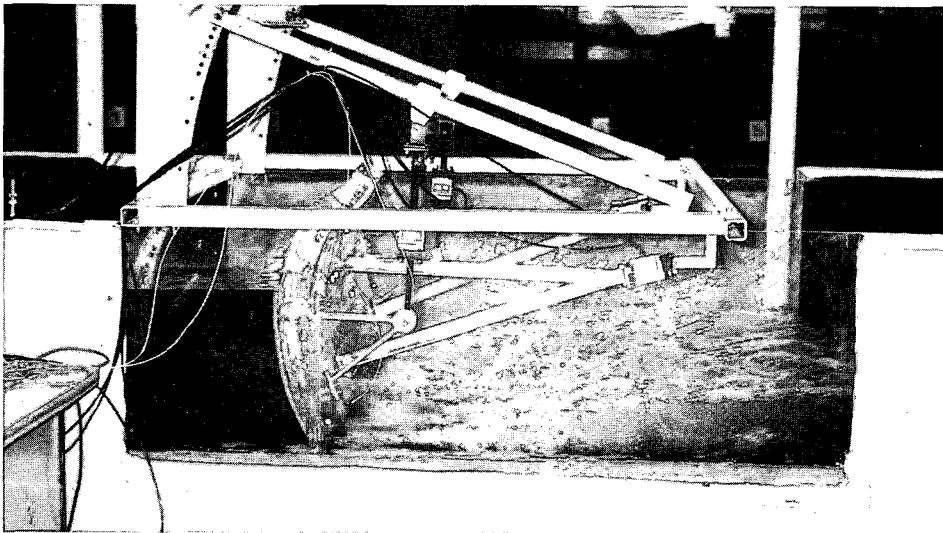
외국의 경우 이러한 진동 현상으로 인한 문비하단부의 피로 파괴에 의한 피해 사례가 미국 Arkansas river project(17개 댐, 갑문)⁸⁾등 여러 경우에서 보고 되었다.

또한 문비의 진동으로 인한 영향은 문비팔을 통

하여 콘크리트 교각이나 배수갑문 위를 통과하는 교량(주로 Box girder) 하단부에 연결된 힌지 지점으로 전달되어 콘크리트 구조물에 피로 파괴를 발생시킬 수 있으며, 교량상부 구조간의 구조적 상호작용으로 심한 비틀림현상이 발생할 수 있다.

하부의 형상이 L형이나 사각형인 경우 수류의 불안정한 흐름으로 인한 전단층의 불안전성과 와류의 영향으로 부압이 발생하여 진동이 발생하게 된다⁷⁾. 따라서 문비의 안전한 거동을 위하여 하부의 형태가 유선의 흐름과 부합하는 형태가 바람직하며, L형보다는 Sharp edge나 국부적인 Rounded edge의 형태가 요망되나 충분한 강성을 유지하고 바닥과 접하는 면에서 누수를 방지해야 하기 때문에 이러한 형태를 구성하기 어렵다. 문비의 설계는 Self-excited vibration의 방지와 구조적 강성, Hydro dynamic load에 견딜 수 있는 견고성을 충분히 고려하여야 하며, 특히 원호형 문비에서는 이러한 진동현상을 예측하여 진동의 강도를 줄이기 위한 하부의 형상과 이에 따른 동적 특성을 파악하는 것이 필요하다.

국내에서 원호형 문비의 실험은 1981년 낙동강 하구둑 Gate model 실험⁶⁾이 네델란드의 Delft 공대에서 수행되었을 뿐인데, 이 실험에서는 47m인 문비 경간중 10m를 축척 1 : 20으로 모형을 제작하



〈Photo 1〉 Side view of gate model test

여 폭 0.5m의 플랩 수조에서 실험하였다.

II. 모형의 설계 및 제작

1. 모형 축척 및 재질의 결정

배수갑문 문비에서의 흐름을 지배하는 주된 힘이 관성력과 중력 가속도이므로 이때의 모형 축척은 Froude 상사법칙에 따르며, 본 실험에서는 모형의 축척을 $n_L=25$ 로 결정하였다. 이 축척은 Gate 세부(Plate 두께, Gate 폭)의 적절한 재현이 가능하고 용이하게 실험할 수 있다.

Froude 상사법칙에 따라 계산된 축척을 요약하면 다음과 같다.

- 길이 Scale $n_L = 25$
- 질량 Scale $n_m = n_L^3 = 15,625$
- 비중 Scale $n_p = 1 = 25$
- 속도 Scale $n_v = \sqrt{n_L} = 5$
- 가속도 Scale $n_a = 1 = 25$
- 시간 Scale $n_t = \sqrt{n_L} = 5$
- 진동수 Scale $n_f = 1 / \sqrt{n_L} = 1/5$
- 힘 Scale $n_F = n_L^2 = 15,625$
- 유량 Scale $n_Q = n_L^{2.5} = 3,125$
- 탄성계수 Scale $n_E = n_L = 25$
- 선형 Stiffness scale $n_{K_s} = n_L^2 = 625$
- 휨 Stiffness scale $n_{E_I} = n_L^5 = 9,765,625$
- 전단 탄성계수 Scale $n_G = n_L = 25$
- Impulse scale $n_{p_I} = n_L^{3.5} = 78,125$
- 압력 Scale $n_p = n_L = 25$

이 상사 법칙에 따르면 구조물에서 $n_L=n_E$ 의 조건이 요구되나 모형의 재료로 상기 조건을 만족시키는 것을 구하기란 쉽지 않다. 그러나 복합 구조물의 탄성은 판 두께에 직접 비례하므로 강성은 모형의 기하학적 형상을 변경하여 조절할 수 있고, 실제적으로 탄성계수 E의 값이 작은 모형 재료를 사용하면 그만큼 재료의 두께를 증가시킬 수 있다.

따라서 문비모형의 본체는, 탄성계수의 비

$n_E=25$ 를 만족시키기 위하여 원형의 재료인 철과 탄성계수의 비가 약 1:75인 아크릴을 사용하여 두께를 3배로 증가시켜서 모형을 제작하고 철로 질량을 각 요소 중심에 보정하였으며, 문비팔 및 권양기부는 모형의 안정적 지지를 위하여 철로 제작하였다.

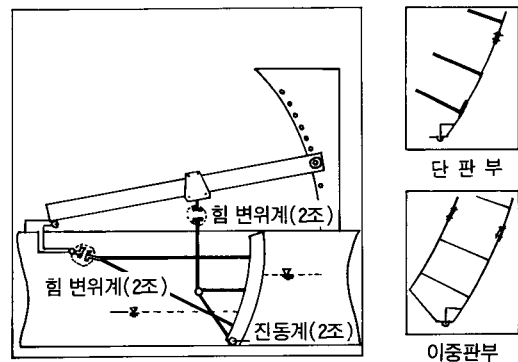
<Table 1> Material properties in prototype and model of gate

구 분	원 형	모 형	
		요구치	실험치
축척	1	1/ 25	
단위중량 (tonf/ m³)	7.85	7.85	아크릴 : 1.20 철 : 7.85
질량	320ton	20.48kg	20.90kg
탄성계수 (kgf/ cm²)	2.01×10^9	8.04×10^7	아크릴 : 2.80×10^7 철 : 2.01×10^9

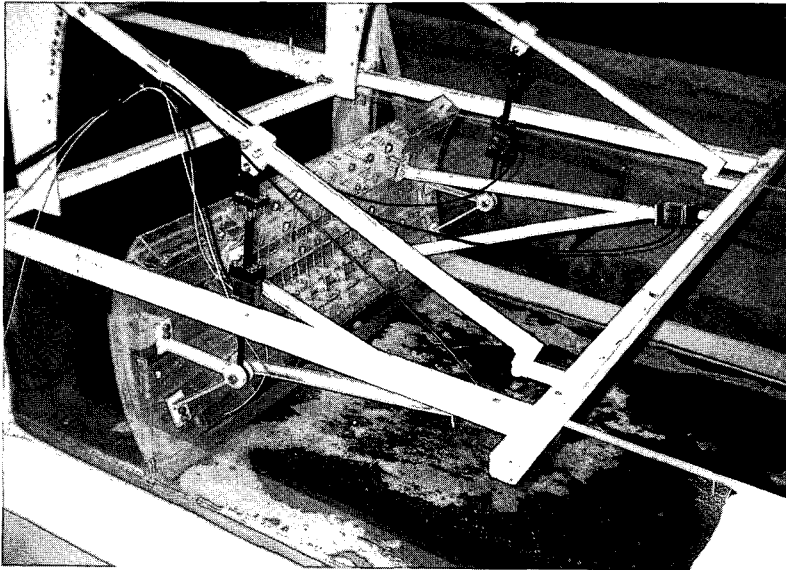
2. 모형의 제작 및 설치

본 연구대상 문비의 원 설계는 폭 30m, 높이 12.5m의 원호형 문비로서 축척 1:25을 고려하면 폭 1.2m, 높이 0.5m의 모형으로 제작된다. 모형은 크게 문비 본체부, 문비팔 및 권양기부, 가설구대부로 구분된다.

본체의 모형은 6개의 수평빔과 중앙부에 7개의 수직빔을 갖는 뼈대 구조물로 구성하고 중앙부에는 단판의 Skin plate, 양측 1/4부에는 이중판의



<Fig. 1> Cross section view of model



〈Photo 2〉 Rear view of gate model

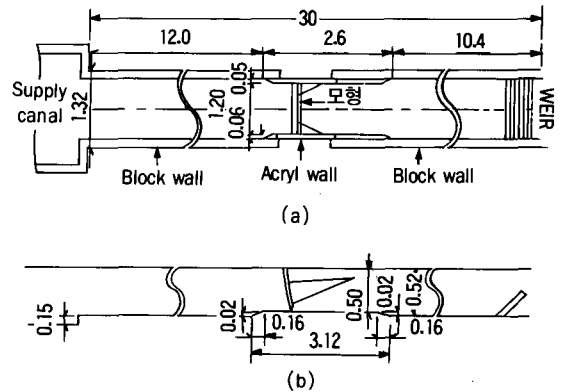
Skin plate로 구성하였다. 2개의 문비팔과 권양기부는 철로 제작되었다. 질량의 상사를 위하여 Skin plate와 가로보의 질량 중심에 철로 질량을 보정하였으며, 실험중 하부의 형상을 변경할 필요가 있음을 고려하여, 문비 하단부를 분리 가능한 구조로 조립하였다.

모형의 연결과 계측기 설치를 위하여 철제의 가설구대를 설치하였으며, 문비의 개폐를 위하여 속도를 조정할 수 있는 DC 모터를 부착하였다. 모형의 단면은 〈Fig. 1〉과 같다.

3. 실험시설 및 측정장치

가. 실험시설

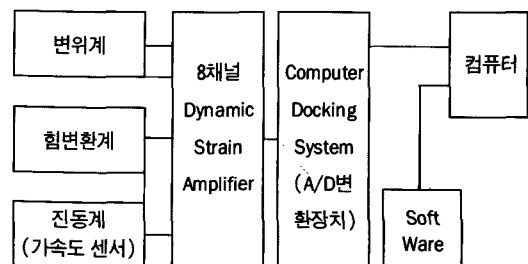
모형 수조는 길이 30m, 폭 1.2m, 높이 0.5m의 콘크리트 블럭으로 제작하였고, 모형이 설치된 위치에는 길이 1.5m, 두께 0.02m, 높이 0.5m의 투명 아크릴 판을 설치하여 문비의 거동과 수류현상을 관측할 수 있게 하였다. 용수의 공급은 고수조로 펌핑된 물을 수두차를 이용하여 밸브 조절에 의해서 정수지와 모형 수조를 통해 모형 설치부에 원하는 유량을 유입시키고 실험된 물은 다시 지하 저수조로 순환된다. 모형을 통과하는 수류의 안정적



〈Fig. 2〉 Plan view(a) and longitudinal cross section of channel(b)

나. 측정장치

(1) 계기의 구성도



흐름을 위하여 모형수로 상류부에 각목을 일정한 간격으로 부착하여 실험에 요구되는 정류를 얻을 수 있었다. 이 시험시설에서 펌프 1대가 가동될 때 최대 공급될 수 있는 용수는 0.3m³/s이며, 펌프는 3대가 가동될 수 있다. 또한 모형수로 말단에 감소기어를 부착한 웨어를 설치하여 모형 하류부의 수위와 유량을 조절하였다.

(2) 측정 계측기

실험에서 사용된 계측기와 수량은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Measuring equipment

계측기	대수	측정항목
증폭기(10ch)	2	입력자료 증폭
힘변위계(로드셀)	4	반력
진동계	2	진동(가속도)
변위계	1	진동변위
압력계	2	상하류 수위

III. 실험결과 및 고찰

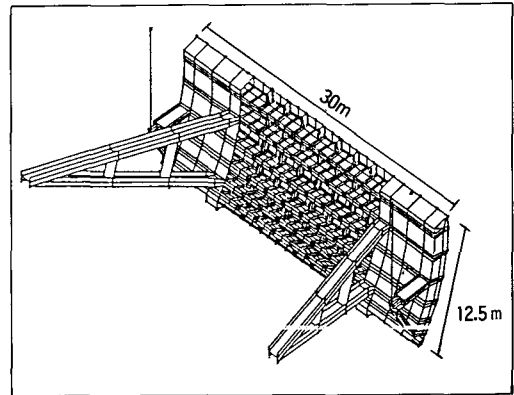
1. 문비의 고유진동수 검토

본 연구대상 구조물의 동적 특성을 파악하고 제작된 모형의 신뢰성을 검증하기 위한 고유진동수 해석에서는 최초로 부터 5개의 mode를 계산하였다. 원형과 모형의 문비에 대한 유한요소 해석 및 모형 실험에서 측정한 1~3 Mode의 고유진동수

를 <Table 3>에 정리하였다. 모형에서 유한요소 해석에 의한 고유진동수와 실험에 의하여 측정된 값은 상당히 근접함을 보인다. 그러나 모형에서의 고유진동수는 축척에 따라 계산된 고유진동수와 비교할 때 큰 값을 보인다. 이것은 모형의 제작에 있어서 문비팔 및 권양기부 모형 재료의 탄성계수가 원 설계된 철의 탄성계수 보다 1/25인 재료가 요망되는데, 실험에 필요한 강성을 유지하면서 이것을 만족시키는 재료를 구하기가 어려움이 있어 철로 제작했기 때문으로 사료된다.

제 1 Mode는 수평 방향 진동을 나타내는 형상으로, 원형에서 2.176Hz(축척 모형 이론치 10.882Hz) 모형에서 13.19Hz로 측정되는데, 이것은 실험대상 문비에서 가장 발생하기 쉽고 취약한 변형으로, 수평 방향으로 가능한 한 구속시키는 것이 요망된다.

제 2 Mode는 수직 방향 진동을 나타내며, 문비



<Fig. 3> Structural analysis model of prototype gate

<Table 3> Natural frequencies in prototype and model of gate

구 분	원 형		모 형	
	유한요소해	축척에 따른 이론해	유한요소해	실험치
축 척	1	1/ 25	1/ 25	
고유 진동수 (Hz)	1 mode(수평)	2.176	13.179	13.19
	2 mode(수직)	2.830	24.228	23.5
	3 mode(비틀)	4.066	20.330	33.069

의 전체적인 거동이 개폐시 문비 하단에서의 불규칙한 흐름으로 인한 국부적인 진동과 같은 방향의 변형을 보인다. 따라서 수평 진동을 구속시키는 것은 가능하나 문비 개폐 작동시 수직 진동을 제어하는 것은 곤란하므로, 본 연구에서는 이러한 수직 진동의 발생을 가능한 한 줄일 수 있는 문비하부 형상을 도출하기 위하여 3가지 형태의 문비하부 모형이 실험되어 진다.

2. 원 설계모형시험

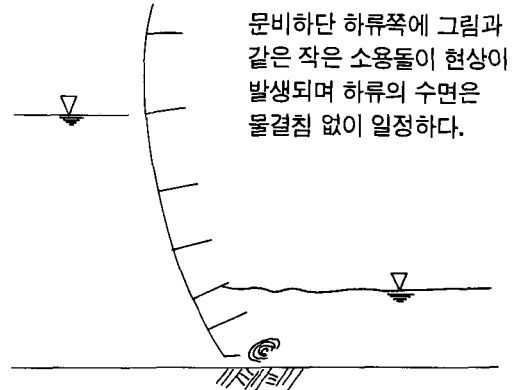
가. 개방고별 진동현상(수직, 수류 방향)

본 모형 실험의 결과 상류측(담수호)과 하류측(해측)의 가장 불리한 수위조건에서 문비 개방고에 따른 진동 가속도의 진폭을 <Table 4>에 보인다. 이 모형 실험 결과에 따르면 수직 진동 가속도의 진폭이 개방고 1cm 근방에서 큰 값을 보이고 개방고가 높아짐에 따라서 차츰 작아 지다가, 기존의 보고에서 언급한 바가 없는 개방고 8cm일 경우가 가장 큰 값을 나타내고 있음을 <Table 4>로 부터

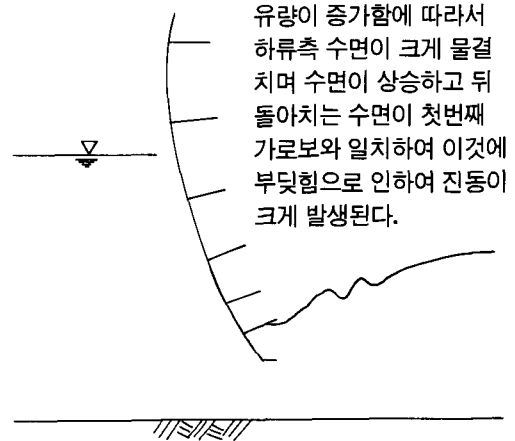
<Table 4> Vertical & horizontal vibration amplitude due to opening height

Opening height (cm)	Conditions		Vertical vibration amplitude(%)	Horizontal vibration amplitude(%)
	Water level(cm)			
	Up-stream	Down-stream		
0.5	32	11	0.07	0.065
1	32	11	0.08	0.050
1.5	32	11	0.075	0.050
2	32	11	0.06	0.035
3	32	11	0.05	0.020
4	32	11	0.05	0.023
5	32	11	0.05	0.032
6	32	11	0.06	0.060
7	32	11	0.08	0.060
8	32	11	0.20	0.070
9	32	11	0.11	0.06
10	32	11	0.09	0.060

확인할 수 있다. 개방고 8cm일때 발생하는 큰 진동은 모형 자체의 결함으로 판단되어 이를 수정한 문비하부의 형상을 제작하여 실험하였다. 개방고 1cm와 8cm일때의 흐름현상을 <Fig. 4>와 <Fig. 5>에 보인다.



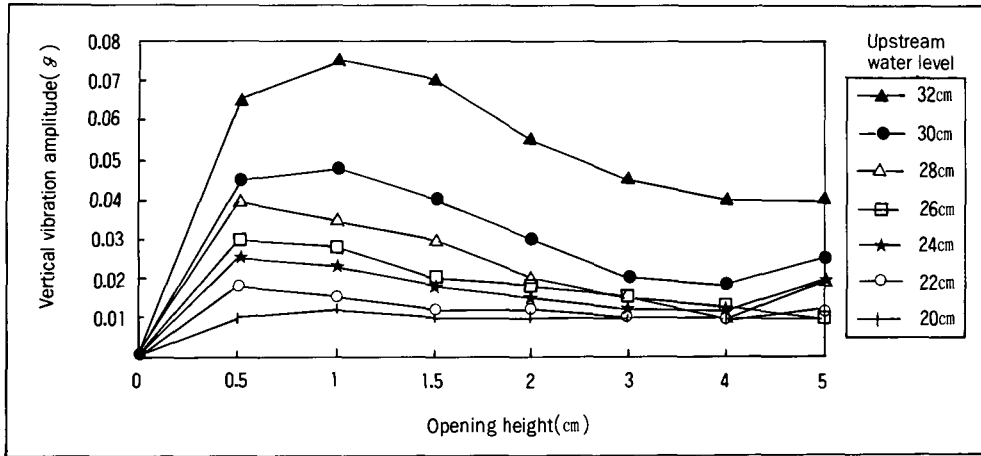
<Fig. 4> Flow phenomenon at opening height 1cm



<Fig. 5> Flow phenomenon at opening height 8cm

나. 상류 수위별 진동 현상

본 실험에 있어서 하류측의 가장 불리한 실험조건은 11cm이므로, 하류수위를 11cm에 고정시키고 상류수위를 32~20cm까지 변화시킬 때 문비 개방고별 수직 진동가속도 진폭을 측정하였으며 이들을 <Fig.6>에 나타낸다. 이 결과는 상하류 수두차가 크면 클수록 연직 방향 진폭이 큼을 알 수 있으며, 기존 문헌에서 지적했던 바와 같이 본 실험에



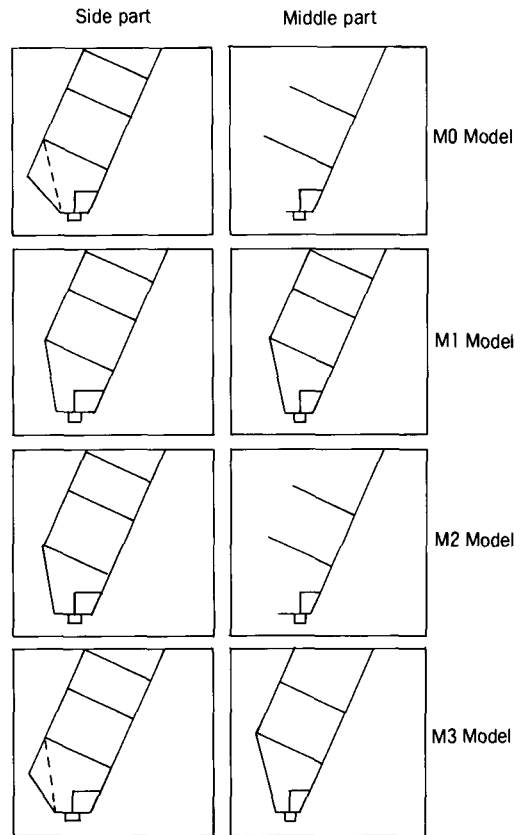
〈Fig. 6〉 Vertical vibration amplitude due to opening height with each upstream water level

서도 문비개방 초기에 상류수위 32~30cm에서는 개방고 1cm에서 진동현상이 가장 현저했고, 상류수위 28cm이하에서는 개방고 0.5cm에서 최대진동을 보인다.

〈Table 4〉와 〈Fig. 6〉의 결과에 의하면 문비 개방고 5cm(원형에서 125cm) 이하에서는 0.5~1.5cm(원형에서 12.5cm~37.5cm)의 개방고에서 최대 진동이 발생하며, 문비조작시 주의가 요망된다.

3. 하부변경 모형실험

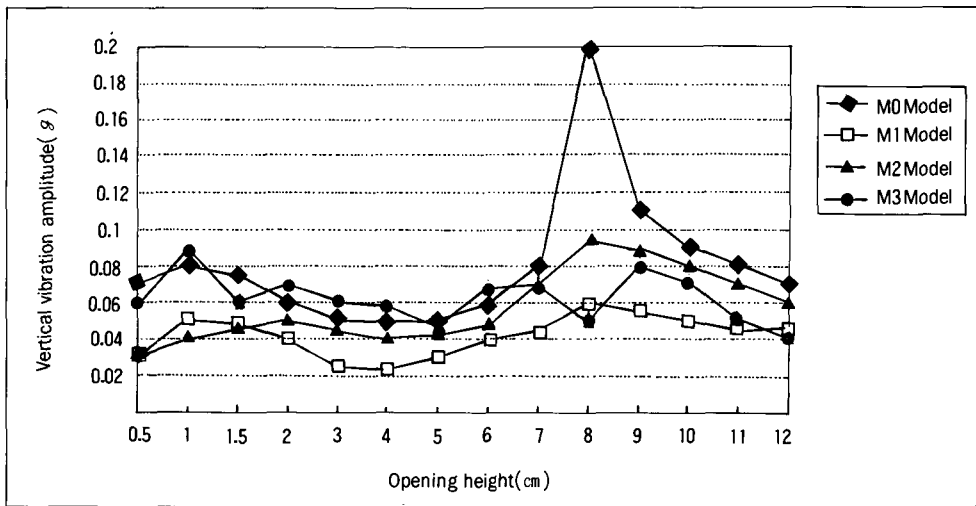
원 설계의 모형실험 결과에 의하면 개방고 7~9cm일 때의 진동현상을 관찰한 결과 문비중앙 단판의 하부 수평빔에 뒤돌아 치는 와류로 인하여 진동이 발생하며, 이러한 수평빔에 의한 진동을 방지하기 위하여 와류의 영향이 미치는 부위까지 이중 판으로 제작하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 문비 하단부를 통과하는 물은 일정한 수위차와 개방고에서 불완전한 흐름을 발생시키며, 이러한 불완전한 흐름에 의한 진동의 영향을 최소화시키는 문비 하단부의 형상을 도출하기 위하여 당초의 모형 M0를 수정한 〈Fig.7〉과 같은 M1, M2, M3의 3가지 형상을 갖는 문비하부 모형을 제작하였다.



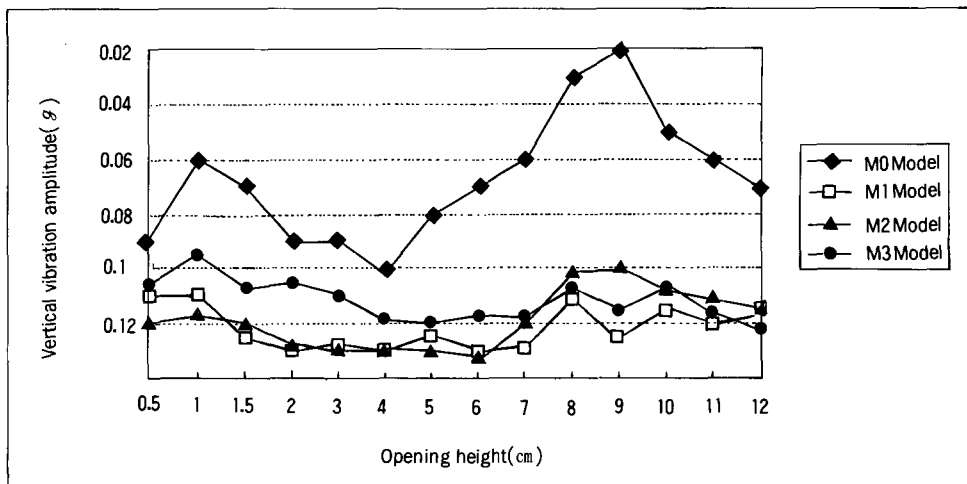
〈Fig. 7〉 Cross section in gate models with various bottom shape

M1 모형은 중앙부를 와류가 영향을 미치는 3번째 수평빔까지 이중판으로 제작하였으며, 양측 1/4는 M0 모형에서 점선부분을 줄인 단면 형상으로 제작하였다. M2 모형은 중앙부를 M0 모형과 같게 하고 양측 1/4부는 M1 모형, 즉 M0 모형의 점선부를 줄인 단면 형상은 같고, M3 모형은 중앙부를 M1 모형과 같이 3번째 수평빔까지 이중판으로 제작하고 양측 1/4부는 M0 모형과 같게 제작하였다.

실험조건은 상류측(답수호)과 하류측(해측)의 가장 불리한 수위조건, 즉 최대 상하류 수위차를 갖는 상류 32cm, 하류 11cm의 수위조건에서 문비 개방고에 따른 진동현상을 측정하였다. 각 모형에 따른 진동의 영향을 비교 검토하기 위하여 원 설계 모형 M0와 변경 모형 M1, M2, M3를 같은 실험 조건에서 교체 설치하여 실험하였다. 문비 하단 중앙부와 측면부에 진동계를 설치하여 각 문비 개방고 별로 0.01초의 Time step으로 10초간 Dy-



〈Fig. 8〉 Vertical vibration amplitude due to opening height at the center of gate



〈Fig. 9〉 Vertical vibration amplitude due to opening height at the side of gate

namic data를 측정하여 문비 개방고에 따른 진동의 진폭을 측정하였다. 문비 중앙에서 측정된 연직 진동 진폭의 값을 <Table 5>에 보이며 이것을 도표화한 것이 <Fig. 8>이고, <Fig. 9>는 문비 측면에서의 진동 진폭을 도표화한 것이다.

<Table 5> Vertical vibration amplitude due to opening height at center

Opening height	Vertical vibration amplitude(ρ)			
	M0 Model	M1 Model	M2 Model	M3 Model
0.5	0.07	0.03	0.03	0.06
1	0.08	0.05	0.04	0.089
1.5	0.075	0.048	0.045	0.06
2	0.06	0.04	0.05	0.07
3	0.05	0.025	0.044	0.06
4	0.05	0.023	0.04	0.058
5	0.05	0.03	0.042	0.046
6	0.06	0.04	0.048	0.067
7	0.08	0.045	0.07	0.07
8	0.20	0.06	0.094	0.05
9	0.11	0.055	0.088	0.08
10	0.09	0.050	0.080	0.07
11	0.08	0.045	0.070	0.05
12	0.07	0.045	0.060	0.04

문비 중앙부에서 측정된 <Table 5>와 <Fig. 8>의 결과에 의하면 3번째 수평빔까지 이중판으로 변경 제작한 M1과 M3 모형에서는 원 설계 모형의 개방고 7~9cm 일때의 큰 진동현상이 방지 될 수 있음을 볼 수 있다. 이것은 수평빔 부분을 이중판으로 제작하여 <Fig. 5>와 같이 뒤돌아치는 와류가 수평빔을 치는 현상을 차단했기 때문으로 판단된다.

또한 문비 측면에서 측정된 <Fig. 9>의 결과와 문비 하단부의 단면을 축소한 M1, M2 변경 모형이 6cm이하의 개방고에서 원설계 모형이나 M3 모형보다 진동의 영향이 작게 측정된다. 이러한 결과는 기존의 논문^{6),7)}들에서 언급된 문비하부 형상에

따른 진동현상의 결과와 부합한다. 따라서 진동현상을 가장 줄일 수 있는 문비의 형상은 M1 모형과 같은 형상이 바람직할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

원호형 문비의 진동현상에 관한 실험을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 실험결과 이중판부의 단면은 하부 단면을 축소하여 제작한 M1, M2 모형이 원 설계 형상인 M0, M3 모형 보다 진동의 영향이 작음을 알 수 있으며, 실험한 4형상의 모형중 M1 모형이 가장 진동현상을 줄일 수 있는 형상으로 판단된다.

2. 원설계 모형에서 개방고 7~9cm에서 큰 진동현상이 발생되는데 이 때의 진동현상은 문비중앙 단판의 하부 수평빔에 뒤돌아 치는 와류로 인하여 진동이 발생하는 것으로 판단되며, 이러한 와류의 영향이 수평빔으로 전달되지 않도록 차단하기 위하여 와류의 영향이 미치는 부위까지 이중판으로 제작하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

3. 문비개방고 5cm(원형에서 125cm)이하에서는 0.5~1.5cm(원형에서 12.5cm~37.5cm)의 개방고에서 최대 진동이 발생하며, 문비 조작성 이 범위에서는 주위를 기울여야 할 것으로 사료된다.

4. 모형에 대하여 구조 해석 및 실험 결과를 비교 검토한 결과 문비의 수평 진동을 가능한 한 구속시키는 것이 초기 진동 모드를 극복할 수 있는 가장 좋은 방법임을 확인하였다.

참고문헌

1. 농어촌진흥공사, 1988 “새만금지구 배수갑문 구조해석 연구(Ⅲ)”, pp. 407~421
2. 농어촌진흥공사, 1994, “새만금지구 수리시험 및 파랑관측 보고서”, pp. 277~318
3. ENRC, NISA II USER'S MANUAL, Center for Engineering and Computer Technology, Michigan, 1990

4. Hardwick, J.D., 1974 "Flow-Induced Vibration of Vertical Lift Gate", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 100, No. HY 5, Proc. Paper 10546, May 1974, pp. 631~644
5. Kolkman P.A, 1974 "Flow-induced gate vibrations. Prevention of self-excitation." Delft Hydraulics Laboratory, Publ. No. 164
6. Netherlands Engineering Consultants, 1982 "Nakdong estuary barrage and reclamation project" final design report(annex 2. gate vibrations, flow forces and wave loads)
7. Nguyen D. Thang.1990. "Gate vibrations due to unstable flow separation" Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 116, No 3, March, pp. 342~361
8. Schmidgall, T., 1972 "Spillway Vibrations on Arkansas River Dams", Proc. of Am. Soc. of Civil Eng. Journal of Hydraulics Division., Jan. HY 1, paper 8676, pp. 219~238
9. Thang, N.D. & E. Naudascher 1986a, "Vortex-excited vibrations of underflow gates". Journal Hydraulic Research, Vol. 24, No. 2, pp. 133~151.
10. Thang, N.D. & E.Naudascher 1986. "Self-excited vibrations of vertical gates". Journal Hydraulic Research, Vol. 24, No. 5. pp. 391~404

 약 력

이 성 행



1983. 충북대학교 공과대학 토목공학과 졸업
 1985. 서울대학교 대학원 공학석사
 1991. 충북대학교 대학원 박사과정
 현재 농어촌진흥공사 농어촌연구원 수리시험장 연구원