평면트러스로 지지된 리프트 게이트의 진동특성

Dynamic Characteristic of Lift Gate Supported by Plane Truss

이성행* · 양동운** · 함형길*† · 공보성*** · 신동욱***

Lee, Seong Haeng · Yang, Dong Woon · Hahm, Hyung Gil · Kong, Bo Sung · Shin, Dong Wook

ABSTRACT

Dynamic characteristic of lift gate supported by plane truss is studied by a model test scaled with the ratio of 1 : 31.25 in the four major rivers project. The vibrations of gate supported by the plane truss is assessed in comparison with those of gate supported by the space truss which was tested formerly. The gate model is made of acryl panel and calibrated by lead. A model test is conducted under the different gate opening and upstream water levels conditions in the concrete test flume dimensioned 1.6 m in width, 0.8 m in height and 24 m in length. In order to verify the model, natural frequencies of the model gate are measured, and compared with the numerical results. The vibrations of gate model supported by the plane truss in opening height of 1.0 cm~2.0 cm shows greater than one supported by the space truss. It is found that the gate model supported by the plane truss is less desirable than one supported by the space truss. thus, the latter type of gate model is requested to design.

Keywords: Lift gate; plane truss; vibration; opening height; model scale

1. 서 론

4대강 수문에 적용된 트러스형 리프트게이트는 미관이 수려하고 강재량 저감에 따른 경제성이 장점인 수문형식이다. 이 형식의 수문은 전면의 스킨플레이트 (가로축 방향으로 포물선 형상)와 후면의 트러스 부재가 연결된 구조로 이루어지며, 길이에 따라 단면의 각도가 변하기 때문에 작용력이 일정하지 않아 정확한 해석이 어렵고, 하중이 1/4부에서 양단 박스부로 집중되는 현상을 보인다.

후면 트러스는 전면에 작용하는 하중을 지지하는 구조로 공간트러스 형태 (사진 1)로 설계되는 경우가 많으나, 평면 트러스 형태 (사진 2)로 설계된 수문형태가 있다. 후면의 지지 트러스구조가 공간트러스가 아니고 평면트러스인 경우 수리현상이 달라져 와류현상과 뒤돌아 치는 파랑으로 진동이 크게 발생할 것이라 예상된다. 따라서 모형실험을 통하여 평면 트러스로 설계된 수문은 어떠한 진동특성을 갖고, 공간트러스 구조와 어떠한 진동

차이가 있는지 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 4대강의 한 지구에 설계된 경간 50 m, 높이 5 m의 평면트러스를 갖는 트러스형 리프트게이트를 축척 1 : 31.25를 적용하여 경간 1.6 m, 높이 0.16 m의 아크릴로 모형을 제작

Photo 1 Gate supported by space truss type

Photo 2 Gate supported by plane truss type

* 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수
** (주)한양 간월호준설공사 현장소장
*** 부산대학교 사회환경시스템공학부 대학원
† Corresponding author Tel.: +82-51-510-7644
Fax: +82-51-513-9596
E-mail: hghahm@pusan.ac.kr

2012년 3월 6일 투고
2012년 5월 14일 심사완료
2012년 5월 16일 게재확정

하였다. 폭 1.6 m, 길이 24 m로 설치된 수로에서 상하류 수위와 문비 개방고에 따른 진동현상을 실험하여 평면트러스를 갖는 트러스형 리프트게이트의 진동특성을 검토하고, 기 실험 (Lee et al., 2011) 된 공간트러스를 갖는 트러스형 리프트게이트의 실험 결과와 비교하여 진동특성과 설계의 장단점을 검토한다.

II. 모형의 제작 및 실험

1. 연구대상 수문

본 연구대상 문비의 원 설계는 폭 50.0 m, 높이 5.0 m의 곡을 갖는 스킨 플레이트 (curved skin)로 구성되며 평면트러스를 갖는 연직 리프트게이트이다. 수문은 크게 수문 본체부 (전면 스킨부, 후면 트러스 지지부), 측면 레일부, 권양기부로 구분된다. 전면의 스킨부는 47개의 세로 리브, 그리고 1열의 수평보강재를 갖는 뼈대 구조물로 구성되며, 주 트러스와 스트럿 부재에는 각각 브레이싱이 설치된다. 문비의 개폐를 위하여 감속기어를 이용하여 실제 구조물에서의 인양속도를 상사법칙에 맞추어 구현하였다. Fig. 1에 대상 수문의 평면도와 배면도를 나타내었다.

2. 모형축척 및 재질

본 실험에서는 모형의 축척 (n_L)을 31.25로 결정하였다. 상사 조건에 따르면 모형의 탄성계수는 $n_L = n_E$ 의 조건이 요구되나 모형의 재료로 상기 조건을 만족시키는 것을 구하기란 쉽지 않다. 수문은 탄성계수 비 $n_E = 31.25$ 의 조건에 따라서 원형의 재료인 강재와 탄성계수의 비가 약 1 : 75인 아크릴을 사용하여 두께를 2.4 (75/31.25)배로 증가시켜서 모형을 제작하고 납으로 질량을

각 요소 중심에 보정하였다. 복합구조물의 탄성은 판 두께에 직접 비례하므로 강성은 모형의 기하학적 형상을 변경하여 조절할 수 있다 (Kolkman, 1974). 수리구조물의 탄성모형에서 scale factor는 일반적으로 1/20~1/100 (Gajanan et. al., 1983)이 적용되므로 상기 모형의 축척은 적절한 것으로 판단된다.

3. 모형의 제작 및 설치

본 연구대상 문비는 축척 1 : 31.25를 고려하여 폭 1.6 m, 높이 0.16 m의 모형으로 제작된다. 스킨부에 보강되는 C형강과 상자형단면은 강축방향으로의 단면 2차모멘트를 상사법칙에 따라 일치시키고, 재료상의 차이를 추가적으로 고려하여 휨강성을 맞추는 것으로 하였다. 또한 트러스 부재의 경우, 진동특성에 대한 단면 형상의 영향 (항력계수 등)이 클 것으로 판단되므로 기존의 원형단면 형상을 그대로 유지하고자 하였다. 원형 및 모형의 중량에서 좌우측 경계의 박스부는 제외하였고, 원형의 중량은 구조해석의 결과로부터 227.683 tonf를 얻었다. 소요되는 모형의 중량은 7.461 kgf로 산정된다. 모형의 중량은 3.692 kgf가 되고 전면부 (상자형보강재 포함)의 중량이 2.018 kgf 그리고 후면부 트러스가 1.674 kgf로 측정되었다. 이에 따라 납 보정량을 계산하면 전면부 (상자형보강재 포함)의 중량이 2.899 kgf, 후면부 트러스가 0.870 kgf로 계산된다. 납보정 중량은 대상 모형이 전면부 스킨과 후면부 트러스를 잇는 스트럿 부재에 의하여 8개의 bay로 나누어져 있는 것을 고려하였다. Fig. 2는 각각 수문의 정면도, 평면도, 배면도이다. 여기서 작은 검은 사각형은 부착된 납의 위치를 나타내며, 전면부와 후면부에 16개소씩 32개소에 분배하여 부착하였다.

3. 실험시설 및 실험방법

본 연구대상 문비의 진동실험은 한국농촌공사 농어촌연구원 수리시험장에서 수행되었다. 모형수조는 길이 24 m, 폭 1.6 m, 높이 0.8 m의 콘크리트 블록으로 제작하였고 모형이 설치된 위치에는 길이 1.0 m, 높이 0.8 m의 투명 아크릴 판을 설치하여

Fig. 1 This study gate plan

Fig. 2 Model gate plan calibrated by lead

문비의 거동과 흐름현상을 관측할 수 있게 하였다. 증폭기는 8채널 dynamic strain meter가 사용되었으며, 진동계는 수중에서 사용할 수 있는 1 g의 방수형 진동계 4조가 사용되었고 진동계의 정밀도는 0.0005 g이다. 동적측정에서는 모형의 고유진동수 측정, 모형의 상하류 수위와 문비의 개방고에 따른 수직 및 수평방향의 최대 가속도 진동진폭을 측정하였다. 진동계는 문비 중앙 하단에 2조 (상하 방향 1조, 앞뒤 방향 1조), 문비 1/4지점에 1조 (상하 방향), 트러스 중앙부에 1조 (상하 방향), 트러스 1/4 지점에 1조 (상하 방향)를 부착하였고, 진동계는 측정하고자 하는 방향에 따라서 진동계의 방향을 정하여, 시험조건에 맞는 수위와 개방고에서 수직 및 수평방향의 진동진폭을 측정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

1. 문비의 고유진동수 검토

제작된 배수갑문 문비의 검증 및 동적 특성을 파악하기 위한 고유진동수 해석은 범용 유한요소법 해석용 프로그램인 MIDAS CIVIL 2009 Ver 2.0을 사용하여 수행하였다. 원형의 유한요소법 해석에 의한 고유진동수의 축척에 따른 계산 값과 실험에 의하여 측정된 값을 Table 1에 비교하였으며, 비교의 “DX”는 전후 방향 진동모드, “DZ”는 연직 방향 진동모드를 각각 나타내고 있다. 이 표에서 F.E.M은 전산해석을 통해 산정된 고유진동수 값이다.

모형의 제작 적정성을 평가에 있어서 고차모드에 대하여는 일반적으로 해당 진동에 의한 영향이 미미할 것으로 판단된다. 이에 비해 고유진동수에 차이가 크게 발생될 수 있는 6차 이하의 저차모드에 대하여만 평가하였다. 각 모드에 따른 F.E.M 값의 상사법칙에 따라 Frequency의 축척 ($1/\sqrt{n_L}=1/5.59$)을 적용하여 축척에 따른 모형에서 고유진동수를 산정한다. 산정된 이 값들과 모형에서 가진하여 측정된 고유진동수 값들이 서로 근접하면 제작된 모형은 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. Table 1에

Table 1 Natural frequencies in prototype and model of gate (Hz)

Section		Prototype		Model	Remarks
		F.E.M.	Theoretic result by scale	Test results	
Natural frequency (Hz)	1 mode	6.80	38.00	36.62~41.5	RY, (DX), DZ
	2 mode	9.21	51.46	45.17~51.27	DX, DZ, RY
	3 mode	9.43	52.70	53.71	DX, DZ, RY
	4 mode	11.59	64.79	72.02	RY (DX)
	5 mode	13.70	76.56	73.24~76.90	RX
	6 mode	17.17	96.01	83.01	DX

서 측정된 모형의 고유진동수가 원형에서 전산해석으로 얻어진 값을 상사법칙으로 환산한 고유진동수와 비교할 때 유사하거나 약간 크게 측정된다. 이러한 차이는 모형제작 시 품질관리가 상대적으로 어려운 아크릴을 사용하면서 판두께나 접합부의 처리, 탄성계수의 차이와 지점부 경계조건 등에 기인한 것으로 판단된다. 이 정도의 값은 상당히 근접함을 보임으로 제작된 모형은 신뢰성이 있음을 확인할 수 있다.

2. 수위 및 개방고별 진동측정

모형실험에서 고려되는 수문의 상하류 수위는 Table 2와 같다. Fig. 3은 상류 16 cm, 하류 3.5 cm 일 때 개방고별 최대 진동 가속도 진폭을 도표화한 것이다.

개방고 0 cm와 0.5 cm는 진동 가속도가 거의 일정하다. 개방고 1 cm에서는 진동 가속도가 급격히 증가하는데 이는 평면 트

Table 2 Water levels conditions (m)

Classification	Water levels	EL	Height from bottom	Model levels (cm)	Remarks
Upstream	Management level	7.5	5.0	16	Bottom height EL (m) : 2.5
	Flood level	11.61	9.11	-	
Downstream	Management level	3.5	1.0	3.2

Fig. 3 Vibration amplitude due to opening height (upstream 16 cm, downstream 3.5 cm)

Fig. 4 Vibration amplitude due to opening height (upstream 18 cm, downstream 3.5 cm)

리스 하단의 위치가 문비하단과 같기 때문에 하류로 빠져 나가 지 못한 수류가 뒤돌아 트리스부 하단을 치기 때문으로 관측된다. 개방고 1 cm~2 cm 범위에서 이러한 현상으로 트리스에서의 진동이 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 이러한 현상으로 인하여 상하진동 보다는 앞뒤 진동이 크게 발생함을 알 수 있다. 개방고 4 cm 이하에서는 진동 가속도가 상대적으로 작게 되는데 연구대상 수문의 경우 하류수위가 3.5 cm 낮기 때문에 사류 흐름이 발생하고, 하류의 수류가 직접 문비를 치는 현상은 관측되지 않는다.

Fig. 4는 상류수위가 18 cm로 약 2 cm 월류하고 있는 상태에서 개방고 0 cm일 때부터 측정이 시작된다. 개방고 0.5 cm일 때 월류수의 영향과 개방고로 인한 뒤돌아 치는 수류의 영향이 더해져 진동 가속도 진폭이 0.024 g로 가장 크게 측정된다. 또한 이후 개방고가 상승하면 뒤돌아 치는 수류의 영향이 줄어들어 진동 가속도는 작아지며, 개방고가 3 cm 이상이 되면 비교적 안정된 진동 가속도를 보인다.

3. 상류 수위별 진동측정

Fig. 5는 개방고 0 cm일 때 상류수위별 진동을 측정한 결과이며, 월류직전의 상류수위 16 cm에서 진동이 측정된다. 이후 월류수가 문비를 타고 내리며, 진동이 약간 증가되고, 상류수위 18 cm (월류수위 약 2 cm)에서는 월류수가 문비를 타고 떨어지지 않고, 월류하여 떨어짐으로 진동이 약간 줄어든다. 이후 개방고가 증가됨에 따라서 진동진폭이 서서히 증가한다.

트리스부의 진동이 개방고 18 cm 이후부터 상대적으로 크게 발생된다. 이는 평면트리스 구조로 공간이 작아서 수류의 하류 배출이 원활하지 않고, 이로 인하여 뒤돌아 치는 수류를 만들고 또한 월류수가 직접 트리스 부분을 치는 현상을 보여서 트리스부의 진동이 커짐을 볼 수 있다.

4. 하부 판부착 모형 진동측정

문비의 진동을 줄일 수 있는 하부형상을 검토하기 위하여 Fig.

Fig. 5 Vibration amplitude due to upstream water level

Fig. 6 Gate bottom shape

Fig. 7 Vibration amplitude due to opening height

6과 같이 문비하부에 판을 부착한 모형을 제작하여 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 상류 16 cm, 하류 3.5 cm 일 때, 문비 하단부에 판을 붙인 경우와 판을 붙이지 않은 경우의 개방고별 진동 가속도 진폭을 나타내며, 개방고 0.5 cm~1 cm에서 최대 진동 가속도를 보인다. 이 개방고에서 판을 부착하지 않은 경우와 판부착의 경우를 비교하여 보면 판을 부착한 경우의 진동 가속도가 확연히 작아지고, 최대진동도 1 cm가 아닌 0.5 cm에서 발생됨을 볼 수 있다. 이는 부착된 판이 뒤돌아 치는 와류의 진동을 차단하기 때문이다. 또한 두 모형 모두 트리스 상하의 진동 가속도가 크게 나타나는데, 이때는 하류 수류가 트리스부를 치는 것이 관찰된다. 판이 부착된 경우 중앙상하와 트리스 상하의 진동 가속도 값은 판이 부착되지 않은 경우보다 진동이 줄어들음을 볼 수 있다.

수류가 트리스부나 브레이싱을 직접 치지 않는 약 2 cm 이후의 개방고에서는 진동 가속도가 안정적이다. 따라서 하부에 판을 부착하는 것이 평면 트리스를 갖는 모형에서 발생하는 진동을 줄일 수 있는 하부 형상으로 판단된다.

IV. 트러스 형태에 따른 문비 진동 평가

1. 공간트러스로 연결된 리프트 게이트 실험

가. 앞서의 연구

앞서의 연구 (Lee et al., 2011)에서는 경간 40 m, 높이 7 m의 공간트러스를 갖는 리프트게이트를 모형이론에 따라 아크릴로 모형을 제작하고, 폭 1.6 m, 길이 24 m로 설치된 수로에서 상하류 수위와 문비 개방고에 따른 진동현상을 실험하여 트러스형 리프트게이트의 진동특성을 검토하였다.

나. 계속된 실험결과

실험결과 (Lee et al., 1998)에 의하면 하단 보강재의 각도가 클수록 진동이 작아짐이 예측된다. 따라서 문비의 진동을 줄일 수 있는 최적의 하부형상을 검토하기 위하여 Fig. 8과 같이 문비하부의 각도를 20 °에서 35 °와 50 °로 변경 제작하여 추가 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 상류수위 28 cm, 하류수위 11 cm에서, 문비하단 각도에 따른 개방고별 중앙상하 진동 가속도 진폭을 도표로 나타내며, Fig. 10은 트러스 상하의 진동 가속도 진폭을 보인다. 이를 분석해 보면, 하단부의 각도가 20 °에서 35 °에서는 거의 유사하나 50 °에서는 진동이 확연히 줄어들음을 확인할 수 있다. 이

Fig. 8 Models with each bottom shape

Fig. 9 Vibration amplitude due to opening height at center parts (upstream 28 cm, downstream 11 cm)

Fig. 10 Vibration amplitude due to opening height at truss parts (upstream 28 cm, downstream 11 cm)

러한 진동은 중간 개방고보다는 작은 개방고와 큰 개방고에서 영향이 큰 것을 보인다. 작은 개방고에서는 부압에 의한 영향으로, 큰 개방고에는 뒤돌아 치는 와류의 영향으로 진동에 영향을 주게 되므로, 가급적 수류와 작게 접하는 형상 (각도가 큰 형상)이 유리한 것으로 판단된다.

2. 트러스 형태에 따른 문비진동 비교 평가

연구대상인 평면트러스를 갖는 트러스형 리프트게이트의 진동특성을 검토하기 위하여, 기 실험된 공간트러스를 갖는 트러스형 리프트게이트의 실험 결과와 비교하고 진동특성을 검토하였다. Table 3과 같이 실험조건이 서로 다르기 때문에 직접적인 비교는 어려움이 있으나 대략적인 경향은 서로 비교할 수 있을 것으로 판단된다.

가. 작은 개방고에서 진동

Fig. 11은 평면트러스를 갖는 수문과 공간트러스를 갖는 수문의 개방고별 진동 측정 결과를 같이 나타내며, 여기서 점선은 본 연구에서 실험된 평면트러스를 갖는 수문의 중앙스킨부와 트러

Table 3 Test conditions in two models (cm)

	Scale	Upstream	Down stream	Model levels
Plane truss	1/31.25	16	3.5	16
Space truss	1/25	28	11	28

Fig. 11 Vibration amplitude due to opening height

Fig. 12 Vibration amplitude due to upstream water level

스부의 진동현상을 나타낸다. 평면트리스를 갖는 수문은 공간트리스를 갖는 수문과 비교하여, 개방고 1 cm (원형에서 31.25 cm)에서 진동 가속도가 급격히 증가하는데 이는 평면 트리스 하단의 위치가 문비하단과 같기 때문에 하류로 빠져 나가지 못한 수류가 뒤돌아 트리스부 하단을 치기 때문으로 판단된다. 개방고 1 cm ~ 2 cm (원형에서 31.25 cm ~ 62.5)범위에서도 이러한 현상으로 트리스에서의 진동이 크게 발생한다. 또한 이러한 현상으로 인하여 상하진동 보다는 앞뒤 진동이 크게 발생함을 알 수 있다. 개방고 4 cm (원형에서 125 cm) 이하에서는 진동 가속도가 상대적으로 작게 되는데 연구대상 수문은 하류수위가 3 cm (원형에서 93.75 cm)로 낮기 때문에 사류흐름이 발생하고, 하류의 수류가 직접 문비를 치는 현상은 관측되지 않는다.

2. 월류시 진동

Fig. 12는 개방고가 0 cm일 때 상류수위별 진동가속도를 앞에서 언급한 두 모형에 대하여 함께 비교하였다. 공간 트리스를 갖는 모형에서는 수문 중앙부의 진동과 트리스부의 진동을 비교할 때 트리스부의 진동이 약간 크게 측정되었으나, 평면 트리스를 갖는 모형에서는 트리스부의 진동이 훨씬 크게 측정되는데 이것은 평면트리스 하단부가 수문의 하단부와 같은 높이이기 때문에 수류의 배출이 원활치 않아 발생하는 진동으로 판단된다.

V. 결 론

트리스형 리프트게이트를 아크릴로 모형을 제작하여, 상하류 수위와 문비 개방고에 따른 진동현상을 실험하고, 기 실험된 공간트리스를 갖는 트리스형 리프트게이트의 실험 결과와 비교하여 평면트리스를 갖는 트리스형 리프트게이트의 진동특성을 정리하면 다음과 같은 결론을 얻는다.

1. 평면트리스를 갖는 수문은 모형에서 개방고 1 cm (원형에서 31.25 cm)부터 진동 가속도가 급격히 증가하는데 이는 평면 트리스 하단의 위치가 문비하단과 같기 때문에 하류로 빠져 나가지 못한 수류가 뒤돌아 트리스부 하단을 치기 때문으로 판단

된다.

2. 월류시 평면 트리스를 갖는 모형에서는 트리스부의 진동이 훨씬 크게 측정된다. 따라서 낮은 개방고의 진동 증가현상과 종합적으로 판단할 때, 평면 트리스를 갖는 수문은 공간트리스를 갖는 수문보다 바람직하지 못한 수문으로 판단되어 앞으로 이와 같은 수문의 형식의 설계는 지양되어야 할 것으로 판단된다.

3. 평면 트리스를 갖는 모형에서 판을 부착한 경우의 진동 가속도가 확연히 작아지고, 최대진동 가속도도 개방고가 1 cm (원형에서 31.25 cm)가 아닌 0.5 cm (원형에서 15.63 cm)에서 발생됨을 볼 수 있다. 따라서 하부에 판을 부착하는 것이 평면 트리스를 갖는 모형에서 발생하는 진동을 줄일 수 있는 하부 변경 모형으로 판단된다.

4. 공간 트리스를 갖는 모형의 각도를 변경한 추가실험에서 하단부의 35 ° 모형은 20 ° 모형과 거의 유사하나 50 ° 모형에서는 진동이 확연히 줄어들음을 확인할 수 있다.

5. 따라서 트리스형 리프트게이트의 설계 시 공간트리스를 갖는 것이 평면트리스를 갖는 것보다 진동 측면에서 더 좋을 것으로 판단된다.

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

REFERENCES

- Gajanan, M. S., Harry, G. H., Richard, N. W., and Saeed, M., 1983. *Structural Modeling and Experimental Techniques*. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series: 1-60.
- KARICO (Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation), 1995. A Report on Hydraulic Experiment and Wave Observations in Saemankeum project: 505-570.
- KARICO (Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation), 2001. A Report on Structural Safety Assessment of Sluice Gate in Hwaong Project: 14-46.
- Kolkman, P. A., 1976. Flow-induced Gate Vibrations. Prevention of Self-excitation. Delft Hydraulics laboratory, Publication no. 164: 1-162.
- 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).

6. Lee, S. H., 2004. Model Tests Study on Flow-induced Vibration of Tainter gate in Estuary Sulices (II). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(2): 41-48 (in Korean).
7. Lee, S. H., Kim, H. J., Park, Y. J., Hahm, H. G., and Kong, B. S., 2011. Model Tests Study on Flow-induced Vibration of Truss Type Lift Gate. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(1): 27-34 (in Korean).
8. Lee, S. H., Kim, K. N. and Jung, K. S., 2005. Dynamic Characteristic of Tainter Gate in Multi-Purpose Dam. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 25 (I -A): 173-181 (in Korean).
9. Lee, S. H. and Jung, K. S., 1996. Model Tests Study on Self-excited Vibration of Tainter Gate. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 16(I -2): 187-194 (in Korean).
10. Lee, S. H., Jung, K. S., Koo, B. K., and Kim K. H., 1998. Dynamic Analysis on the Flow-induced Vibration of Tainter Gate due to Bottom Shape. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 18(I -4): 399-409 (in Korean).
11. Schmidgall, T., 1972. Spillway Vibrations on Arkansas River Dams. Proc. *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Jan., No. HY1, Proc. Paper 8676: 219-238.
12. Thang, N. D., 1990. Gate Vibrations due to Unstable Flow Separation. *Journal of Hydraulics Engineering* 116(3): 342-361.