

상시 진동을 이용한 댐 수문의 동특성 추정

Estimation of Dynamic Characteristics of Existing Dam Floodgate Using Ambient Vibration

김남규*, 이종재*[†], 배정주**

Nam-Gyu Kim*, Jong-Jae Lee*[†] and Jung-Ju Bea**

초 록 최근 전세계적으로 큰 지진이 빈번히 발생하고 있고, 국내에서도 지진 발생 빈도가 높아짐에 따라 노후화된 토목 구조물에 대한 내진 성능 평가 및 구조 건전성 평가의 중요성이 재조명되고 있다. 하지만 국내 기존 댐 수문에 대한 관련 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 댐 수문 내진 성능 평가 및 구조 건전성 평가의 기초자료가 되는 댐 수문의 동특성 추정을 위하여 댐 수문에 적용할 수 있는 실험기법을 정립하고, 정립된 실험기법을 통하여 두 종류의 댐 수문에 대한 현장 실험을 수행하였다. 동특성 추정에는 모드 해석 방법 중에 하나인 주파수영역분해기법을 이용하였다. 상시진동실험과 강제진동실험을 이용하여 댐 수문의 동특성을 추정함으로써 두 방법의 성능을 비교하였으며, 상시진동실험이 댐 수문의 동특성을 추정하는데 매우 효과적인 방법임을 확인하였다.

주요용어: 댐 수문, 상시진동실험, 동특성 추정

Abstract Recently, as the catastrophic disasters due to earthquake happen frequently all over the world, it draws lots of attention to seismic capacity evaluation and/or structural integrity assessment of deteriorated civil infra-structures. However, there have been few studies on the existing dam flood gates, especially in Korea. In this study, a proper vibration testing method applicable to a dam flood gate has been suggested, since the dynamic characteristics of a dam flood gate can be fundamental data for seismic capacity evaluation or structural integrity assessment. The frequency domain decomposition technique has been incorporated for modal parameter identification. Two kinds of vibration tests using an impact hammer and ambient vibration sources were carried out on two types of dam floodgates with different shapes. Through the field tests, the effectiveness of the ambient vibration tests were verified.

Keywords: Dam Floodgate, Ambient Vibration Test, Dynamic Characteristics

1. 서 론

최근 규모 9.0 이라는 큰 지진으로 인하여 일본에서 큰 피해를 입었다. 이 같은 지진의 위험성으로 인하여 우리나라에서도 구조물 내진성능 평가 및 구조 건전성 평가의 중요성이 재조명되고 있다. 그 중 댐의 경우 1979년 다목적 댐에

대한 내진설계 기준을 제정하여 연구 및 제도적 작업을 시행하고 있으며, 국내외적으로도 관련된 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 댐 본체의 경우에 비해, 댐 수문에 대한 연구가 상대적으로 적게 진행되어 댐 수문의 내진성능평가 및 구조 건전성 평가와 관련된 비교자료를 얻기 힘들다. 따라서 국내 기존 댐 수문에 대한 정확한 구조건

전성 평가를 하기 힘든 실정이다.

본 논문에서는 이와 같은 댐 수문에 대한 구조적 건전성 평가를 위한 기초자료가 되는 댐 수문의 진동 특성을 파악하는데 있어, 실험기법을 정립하고 상시 진동을 이용한 동특성 추정에 대한 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 실험대상 댐 수문의 특징

댐 수문은 문비 및 개폐장치로 구분하며 문비의 형식은 롤러(roller)식, 힌지(hinge)식, 슬라이드(slide)식 등으로 구분된다. 이와 같은 댐 수문의 형식은 설치조건, 작동형태, 개폐방식에 따라 구분된다. 특히 문비 외판에 가해진 수압이 롤러를 통해 콘크리트 피어로 하중이 전달되는 수문을 롤러 형식 중 롤러게이트, 문비의 암과 트러니언 고정부를 통해 콘크리트 피어로 하중이 전달되는 수문을 힌지형식 중 래디얼 게이트라고 한다.

본 연구에서는 국내 기존 댐 수문에 가장 널리 사용된 형식인 래디얼 게이트와 롤러 게이트에 대한 실험을 진행하였다.

2.2. 구조물 가진 기법

구조물의 동특성을 측정하기 위한 동적실험은 입력하중을 조정할 수 있는 경우와 조정할 수 없는 경우로 나눌 수 있다. 강제진동실험은 인위적으로 입력하중을 조정할 수 있는 경우로, 입력을 측정할 수는 없지만 인위적인 조절이 가능한 경우(폭발에 의한 충격시험 등)도 포함된다. 그러나 일반 토목구조물의 경우 대부분 대형 구조물이기 때문에 구조물 전체를 가진할 수 있는 장치는 드물고, 비용이 많이 들며 사용하기가 현실적으로 매우 어려운 것이 사실이다. 이와는 달리 입력하중을 조정 및 측정할 수 없는 상태에서의 풍하중 등의 주변 하중 요인에 의한 구조물의 응답을 계측하는 동적구조실험을 상시진동실험이라고 하는데, 상시진동실험은 강제진동실험에 비해 모드계수 추정의 정확도가 떨어지는 경향이 있으나 인위적인 하중을 가해줄 필요 없이 구조물이 사용하중상태에 있을 때에도 실험이 가능하다는 장점이 있다. 특히 최근 계측 자료의 취득과 저장기

술이 발달함에 따라 토목구조물 등의 대형구조물에 대한 동특성 추정 실험에서 많이 주목받고 있는 방법으로써, 여러 연구자들에 의해 활발히 연구되어 왔다[1].

2.3. 가속도 데이터를 이용한 모드계수 추정 기법

모드해석 방법 중에 하나인 주파수영역분해기법(frequency domain decomposition: FDD)을 통하여 실험 결과를 분석하였다. 주파수영역분해기법은 구조물 응답의 power spectral density(PSD)행렬을 특이치분해하여 구조물의 모드형상을 구하는 방법으로써 N 개의 계측자료($x(t) \in R^N$)에 대하여 구조응답의 spectral density function 행렬($S_{xx}(w) \in R^{N \times N}$)을 각 계측자료의 PSD와 cross spectral density(CSD)로부터 구할 수 있으며, 이를 다음 식(1)과 같이 특이치분해하여 대각행렬 $s(w)$ 와 unitary matrix $U(w)$, $V(w)$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{xx}(w) &= \begin{bmatrix} S_{11}(w) & L & S_{1N}(w) \\ M & 0 & M \\ S_{M1}(w) & L & S_{NN}(w) \end{bmatrix} \\ &= U(w)^T s(w) V(w) \\ &= U(w)^T \begin{bmatrix} s_1(w) & 0 & L & 0 \\ 0 & s_2(w) & L & 0 \\ M & M & 0 & M \\ 0 & 0 & L & s_N(w) \end{bmatrix} V(w) \end{aligned} \quad (1)$$

이 때, 첫 번째 또는 두 번째 특이치값($s_1(w)$ 또는 $s_2(w)$)의 peak이 발생하는 주파수 w_k 에서의 $U(w_k)$ 의 열벡터를 취함으로써 k 번째 모드형상을 구할 수 있다[7].

3. 댐 수문 구조물의 실험기법 정립

한 종류의 댐 수문에 대해 강제진동실험과 상시진동실험을 각각 수행하여 그 결과를 비교하였다. 주파수영역분해기법을 이용하여 모드해석을 수행하였고, 이를 통하여 댐 수문에 적합한 실험기법을 결정하였다.

3.1. 실험 개요

래디얼 게이트 형식의 A 댐 수문에 대하여 강제진동실험과 상시진동실험을 수행하였다.

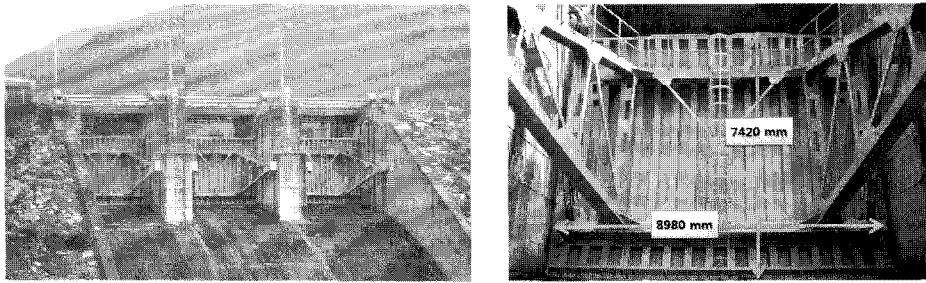


Fig. 1 Whole view of floodgate A

Table 1 Details of experimental equipments

장비명	장비사진	모델명	특징
Accelerometer		PCB 393B12	<ul style="list-style-type: none"> • 지진계측용 가속도계 • 10 V/g의 높은 Sensitivity • -1g~1g까지 계측 가능
Signal Conditioner		PCB 481A03	<ul style="list-style-type: none"> • 가속도계 신호처리 기능 • Tunable Anti-aliasing Filter • 0.01배부터 200배까지 신호증폭(감소) 가능
Terminal Block		NI BNC2090	<ul style="list-style-type: none"> • 최대 16ch의 가속도계 동시 연결
ADC		NI DAQCard 6036E	<ul style="list-style-type: none"> • 16bit의 높은 해상도
계측용 PC		ThinkPad lenovo R61	<ul style="list-style-type: none"> • 계측에 적절한 컴퓨터 사양
BNC cable		RG 58 A/U	<ul style="list-style-type: none"> • 노이즈 제거를 위한 shielding
고무망치		-	<ul style="list-style-type: none"> • 강제진동실험에 필요한 고무망치

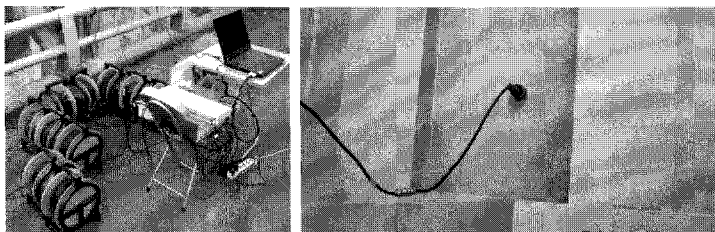


Fig. 2 Experimental setup

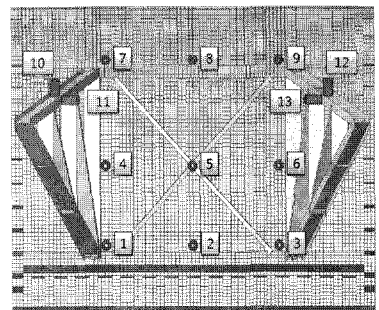


Fig. 3 Sensor locations

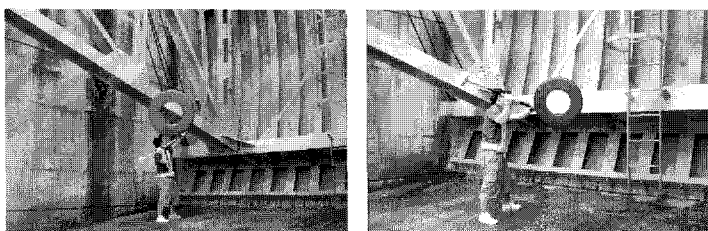
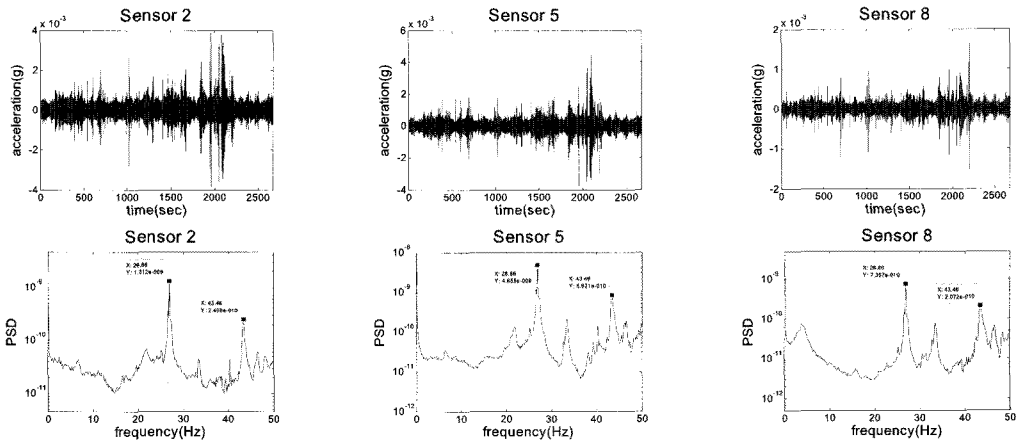
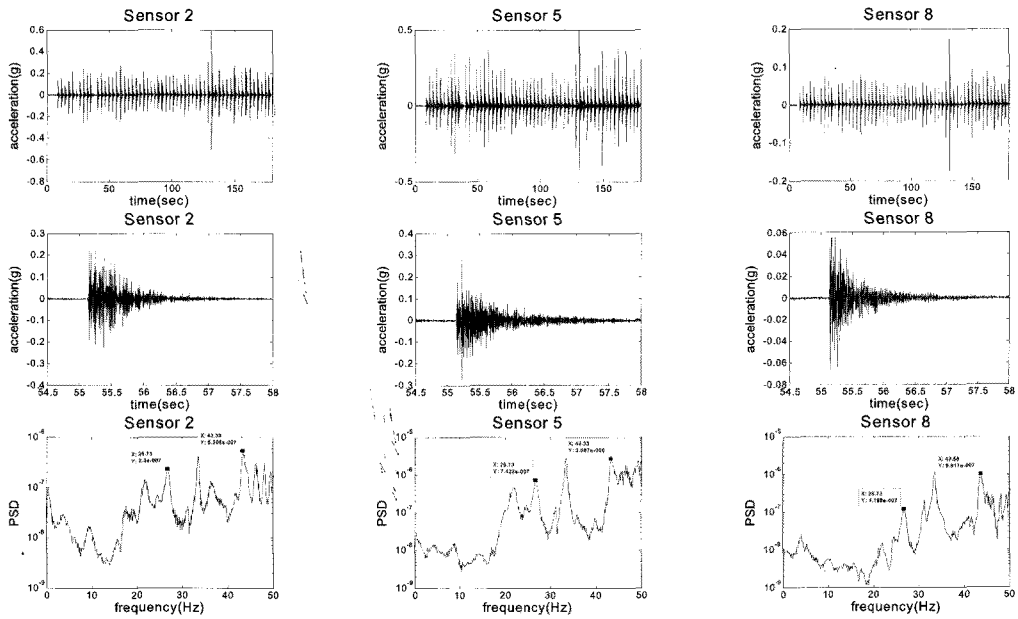


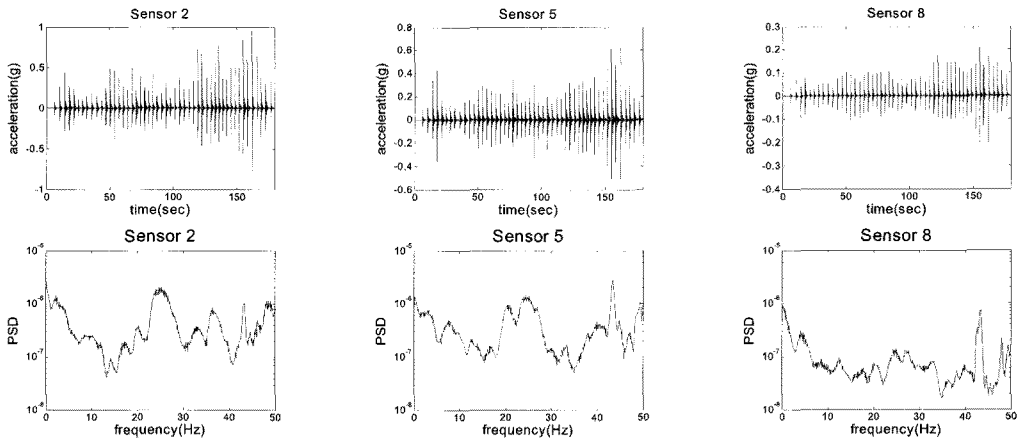
Fig. 4 Impact locations



(a) Ambient vibration test



(b) Forced vibration test (impact location : gate arm)



(c) Forced vibration test (impact location : cross beam)

Fig. 5 Acceleration data and power spectral density data

Table 2 Details of floodgate A

구조물명	A 댐 수문
수문형식	Radial gate
사용강재	SM400A
크기(가로x세로)	8980 mm x 7420 mm
준공년도(년)	1995

댐 수문의 모드계수 추정을 위하여 Fig. 3 과 같이 가속도계 총 13채널이 댐 수문의 판 부분과 댐 수문 암 부분에 각각 9개, 4개 설치되었다. Table 1에는 사용된 실험장비를 나타내었으며, Fig. 2~4에서는 실험장비 설치위치, 가속도 센서 부착 및 타격위치 등을 나타내었다. 총 3회의 실험 중 강제진동실험은 타격 위치(댐 수문 암, 가로보)를 달리하여 총 2회가 진행되었으며, 상시진동실험은 1회가 실행되었다. 강제진동실험에는 직경 8 cm, 길이 14 cm, 봉 길이 110 cm의 고무망치를 사용하여 300초간 진동을 계속하였고, 상시진동실험에서는 2400초간 미세진동을 계속하였다.

신호 획득을 위한 샘플링 주파수 500 Hz, 신호의 증폭 비 200배(상시진동실험)가 사용되었고, 실험당시 댐 수문에 가해지는 수위는 1 m 미만이었다.

3.2. 모드계수 추정

주파수영역분해기법 및 추계론적 부공간 규명법을 이용하여 A댐 수문의 모드계수를 추정하였다.

Fig. 6 상단의 그래프는 추계론적 부공간 규명법을 통해 추정된 상시진동실험의 stabilization chart를, 하단의 그래프는 주파수영역분해기법에 의해 추정된 3회의 실험에 대한 특이치 값들을 나타낸다.

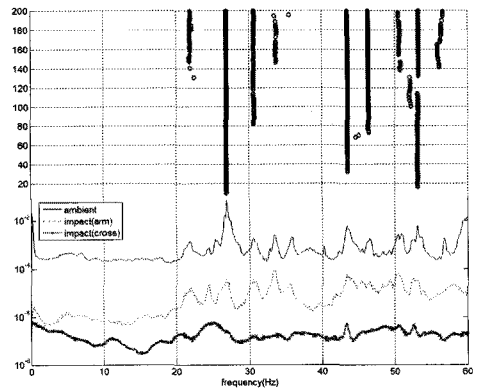


Fig. 6 Result for singular value decomposition & stabilization chart

Modes	3 rd mode	4 th mode	8 th mode
FE Model			
	26.83 Hz	30.90 Hz	43.379 Hz
Forced Vibration Test			
	26.73 Hz	30.52 Hz	43.46 Hz
Ambient Vibration Test			
	26.86 Hz	30.52 Hz	43.46 Hz

Fig. 7 Comparison of mode shapes

이 그림을 통하여 첫째, 추계론적 부공간 규명법의 결과와 주파수영역분해기법의 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있고, 둘째, 가로보를 타격한 강제진동실험의 첫 번째 특이치 값들은 주요한 첨두값을 갖고 있지 않음을 알 수 있다. 하지만 댐 수문 압 부분을 타격한 강제진동실험의 특이치 값들은 주요한 첨두값을 갖고 있으며, 상시진동실험의 특이치 값들과 일치하는 peak을 갖는 것을 알 수 있다.

3.3. 유한요소모델과 비교 및 실험기법 정립

도면을 바탕으로 ABAQUS를 사용하여 18,175개의 노드와 18,376개(beam: 30개, plate: 18,346개)의 요소를 갖는 유한요소모델을 작성하였다. 이 같이 작성된 유한요소모델에 대해 자유진동해

석을 수행하고, 현장실험을 통하여 추정된 모드계수 결과와 비교하였다. Fig. 7과 같이 상시진동실험, 댐 수문 압 부분을 타격한 강제진동실험, 유한요소모델의 모드해석결과의 주요 저차모드 중 국부적인 모드형상인 1, 2차 모드를 제외한 3, 4, 8차 모드를 비교한 결과, 동일한 고유진동수에서 동일한 모드 형상을 보임을 확인할 수 있다. 그 외의 모드에서도 동일한 고유진동수에서 동일한 모드 형상을 보임을 확인할 수 있었으나, 지면상 표현의 어려움으로 위의 모드 3개에 대해서만 나타내었다.

이와 같은 결과를 통하여 댐 수문에 대한 동특성 추정 실험에는 타격 위치에 영향을 받지 않는 상시진동실험이 매우 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다.

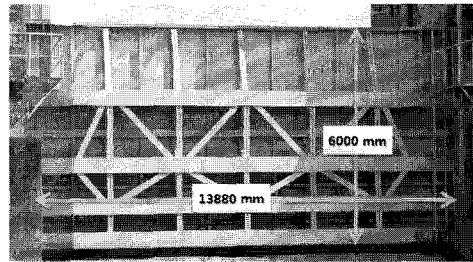
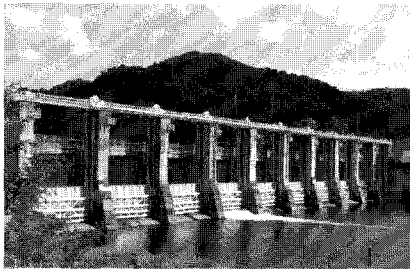


Fig. 8 Whole view of floodgate B

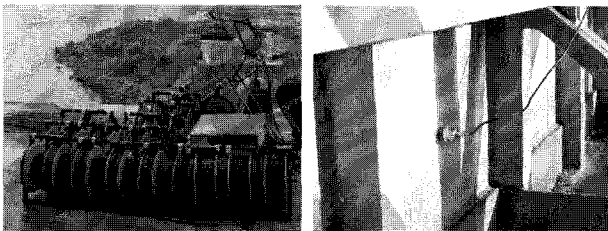


Fig. 9 Experimental setup

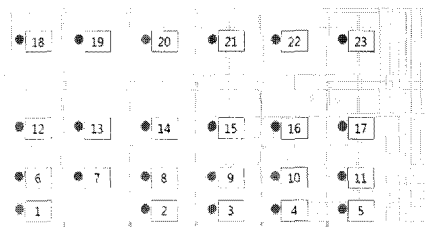


Fig. 10 Sensor locations

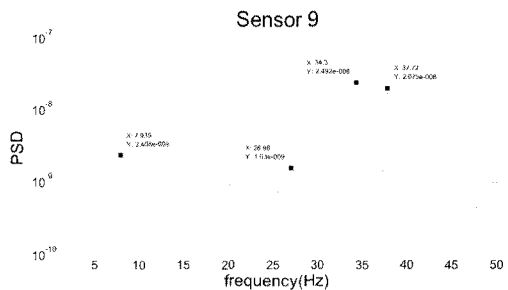
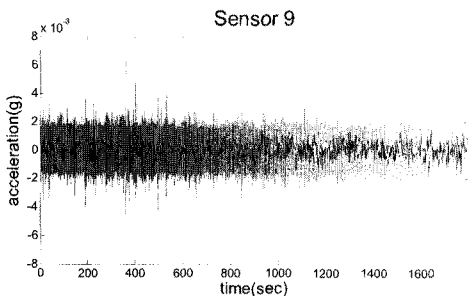


Fig. 11 Acceleration data and power spectral density data

4. 상시진동실험을 이용한 댐 수문의 동특성 추정

4.1. 실험개요

롤러 게이트 형식의 B댐 수문에 대하여 A댐 수문 실험을 통하여 검증한 상시진동실험을 수행하였다. 가속도계는 총 23채널이 사용되었고, 샘플링 주파수 500 Hz, 신호 증폭비 10배가 사용되었다. 총 1800초 동안 미세진동이 계측되었으며, 실험 당시 수위는 댐 수문 높이의 약 2/3에 해당하는 4 m였다. 사용된 실험장비는 Fig. 9와 같이 A댐 수문에 사용된 장비와 동일하다. 그 이외 댐 수문 및 실험에 관한 자세한 사항은 Fig. 8, 10, Table 3에 나타내었다.

4.2. 모드계수 추정

B댐 수문의 모드계수 추정을 위하여 상시진동 실험을 통하여 얻은 가속도 데이터를 주파수영역 분해기법을 이용하여 분석하였다. Fig. 12는 주파수영역분해기법을 통하여 구한 첫 번째 특이치를 나타낸다.

이 그림에서 상시진동실험을 통하여 얻은 특이치 값들이 주요한 첨두값을 갖고 있음을 알 수

Table 3 Details of the B floodgate

구조물명	B 댐 수문
수문형식	Roller gate
사용강재	SS41, SM41B
크기(가로x세로)	13880 mm x 6000 mm
준공년도(년)	1981

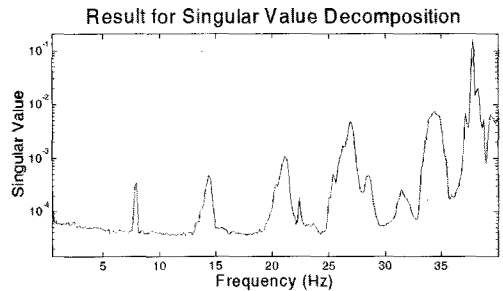


Fig. 12 Result for singular value decomposition

있다. Fig. 13에는 상시진동실험을 통하여 얻은 모드형상 중 구조물 전체가 움직이는 주요 모드에 대하여 나타내었다.

4.3. 유한요소모델과 비교

도면을 바탕으로 MIDAS를 사용하여 5,461개의

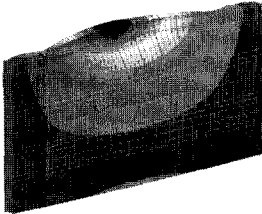
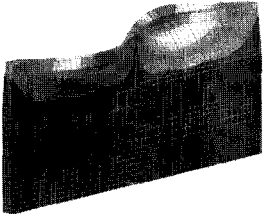
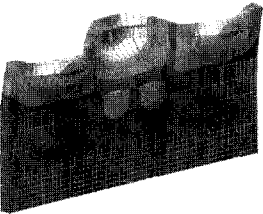
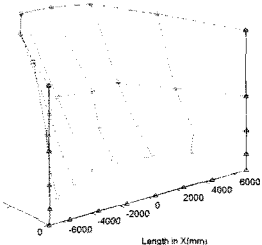
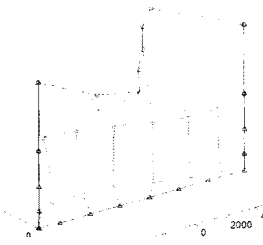
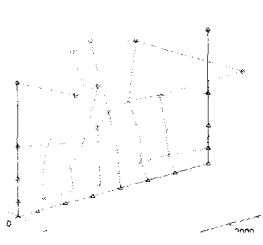
Modes	1 st mode	4 th mode	5 th mode
FE Model			
	13.50 Hz	22.61 Hz	29.04 Hz
Ambient Vibration Test			
	7.94 Hz	26.86 Hz	28.56 Hz

Fig. 13 Comparison of mode shapes

노드와 6,640개(Beam: 1,060개, Plate: 5,580개)의 요소를 갖는 유한요소모델을 작성하였다. 해당 유한요소 모델에는 댐 수문에 가해지는 유체에 대한 효과는 고려되지 않았다. 이 같이 작성된 유한요소모델을 이용한 모드해석 결과와 현장실험을 통하여 추정된 모드계수를 비교하였다. 모드계수 비교에는 명확한 비교를 위하여 국부적인 모드형상이 아닌, 구조물 전체가 움직이는 모드형상이 사용되었으며, Fig. 13에 해당하는 주요 저차모드 3개를 나타내었다. 그 결과 모드 형상은 유사하나 서로 다른 고유진동수를 가지는 모드들을 찾을 수 있었다.

이와 같은 결과는 MIDAS를 기반으로 작성된 댐 수문의 유한요소모델에 4 m의 수위에 해당하는 유체효과가 고려되지 않았기 때문이라고 판단된다. 따라서 이는 추후 유체에 대한 고려를 통하여 보완할 예정이다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 기존 댐 수문에 대한 구조건전성 평가의 기초자료가 되는 댐 수문의 동특성 추정을 위하여 댐 수문에 적용할 수 있는 실험기법을 정립하였고, 정립된 실험기법을 통하여 두 종류의 댐 수문에 대한 동특성 추정을 수행하였다. 이와 같은 과정을 통하여 구조물을 전반적으로 가진하기 어려운 대형 구조물인 댐 수문 구조물에 대한 진동실험에는 타격 위치에 따라 민감도가 큰 강제진동실험보다는 상시진동실험이 더 효과적임을 확인할 수 있었다.

이와 같이 검증된 상시진동실험을 두 종류의 댐 수문에 대하여 적용해본 결과 효과적으로 댐 수문 구조물의 고유진동수와 모드 형상을 얻어낼 수 있었고, 이를 통하여 댐 수문 구조물에 대한 상시진동실험 적용이 효율적이라는 것을 증명할 수 있었다. 그러나 댐 수문에 가해지는 유체의 영향이 큰 경우, 유한요소모델의 모드 해석 결과와 상시진동실험의 분석 결과를 일치시키기 위하여 댐 수문에 작용하는 유체 효과를 유한요소모델에 반영하는 과정이 필요하다고 판단된다.

따라서 추후 연구에서는 댐 수문에 가해지는 유체 효과에 대한 연구를 진행할 것이며, 이와 함께 기존 댐 수문에 대한 정확한 구조건전성 평

가를 위하여 노후화가 고려된 유한요소모델 개선에 관한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국시설안전공단 '기존수문의 내진 성능 평가 및 향상 요령 제정 연구'사업과 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20104010100520). 본 연구를 지원해준 한국에너지기술평가원(KETEP)과 한국시설안전공단(KISTEC)에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이종재, 이종원, 윤정방, "상시진동 데이터를 이용한 교량의 손상추정기법", *대한토목학회 학술지*, 제25권 제2A호, pp. 375-385 (2005)
- [2] 배정주, 김호승, 김용곤, 이지호, "보정된 부가질량을 이용한 댐 수문의 지진 해석", *한국지진공학회 논문집*, 제13권 제5호, pp. 31-40 (2009)
- [3] 김호승, 배정주, 김용곤, 이지호, "고유진동수 현장 계측과 수치해석을 이용한 수문의 부가질량보정법", *대한토목학회 학술지*, 제29권 제6A호, pp. 607-616 (2009)
- [4] D. H. Kim and J. J. Lee, "Vibration-monitoring of a real bridge by using a Moiré-fringe-based fiber optic accelerometer," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 6, pp. 556-562 (2007)
- [5] D.-D. Ho, D.-S. Hong and J.-T. Kim, "Nondestructive evaluation of railway bridge by system identification using field vibration measurement," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 6, pp. 527-538 (2010)
- [6] 전인하, "국가주요시설물에 대한 내진대책", *KISTEC 소식지*, 제51권, pp. 30-31 (2008)
- [7] R. Brincker, L. Zhang and P. Andersen, "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition." *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, pp. 441-445 (2001)