

## 민감도분석을 통한 지진하중을 받는 CFRD 정상부 침하량 예측

### Estimation of Settlement on the Crest of CFRD Subjected to Earthquake Loading Using Sensitivity Analysis

하 익 수<sup>1</sup> Ha, Ik-Soo

#### Abstract

In this study, quantitative sensitivity analysis on rockfill material influencing the dam crest settlement of CFRD (Concrete-Faced Rockfill Dam) subjected to earthquake loading was carried out. The purpose of this study is to indicate the most important input parameter from the results of sensitivity analysis, to show the quantitative variation of settlement at the crest of CFR type dam during earthquake with this input parameter, and to recommend the approximate estimation method of the settlement on the crest of CFRD subjected to earthquake loading. The statistic characteristics of rockfill parameters which were obtained from large triaxial tests were evaluated. The total 108 dynamic numerical analyses (2 input earthquake, 2 magnitudes for each earthquake, 27 rockfill material property combinations) on CFRD were conducted. The global sensitivity analysis was carried out using the results of numerical analysis. From the sensitivity analysis, It was found that the crest settlement of the CFRD subjected to earthquake was absolutely affected by the shear modulus of rockfill material irrespective of the input earthquakes and the magnitude of input acceleration. On the contrary, it was found that the effect of cohesion and friction angle of rockfill was negligible. From the results of sensitivity analysis and numerical analysis, the approximate estimation method of the settlement on the crest of CFRD subjected to earthquake loading was recommended on condition that the rockfill shear modulus and simple dam information was known.

#### 요 지

본 연구의 목적은 수치해석을 이용한 정량적 민감도분석으로부터 지진하중을 받는 CFRD 정상부 침하량 변화의 주 영향인자를 찾고, 주 영향인자 변화에 따른 침하량의 변화양상을 고찰하고, 이로부터 지진하중을 받는 CFRD 정상부 침하량을 근사적으로 추정하는 방법을 제안하는 데 있다. 대형삼축압축시험으로부터 얻어진 사력재료 물성을 통계 분석하여 사력재료 물성 통계특성값을 산정하고, 산정된 통계특성값을 이용하여 작성된 27개 해석단면에 대해 해석조건을 달리한(2개 지진파, 각 지진파별 2가지 가속도 크기) 총 108개 CFRD 해석단면에 대한 동적수치해석을 수행, 그 결과를 이용한 정량적 민감도분석을 수행하였다. 민감도분석 결과, 지진하중 작용 시 CFRD 정상부 침하량은 입력 물성 중 전적으로 사력재료의 전단탄성계수에 의존하는 것으로 나타났고 점착력과 마찰각의 영향은 미미하였다. 민감도분석 결과와 전단탄성계수 변화에 따른 CFRD 동적해석 결과로부터, 사력재료의 전단탄성계수와 간단한 댐 정보를 이용하여 지진하중 작용시 CFRD 정상부 침하량을 근사적으로 추정하는 방법을 제안하였다.

**Keywords :** CFRD, Dam, Dynamic analysis, Earthquake, Sensitivity analysis

<sup>1</sup> 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, geodoc@kwater.or.kr, 교신저자)

## 1. 서론

콘크리트 표면차수벽형 석괴담(Concrete-Faced Rockfill Dam, 이하 “CFRD”라 한다)이란 그림 1과 같이 댐 단면이 물과 접하는 상류부에 차수를 위한 프린스(plinth) 및 콘크리트 표면차수벽과 차수벽을 지지하는 차수벽 지지존 및 암석존으로 구성되는 댐을 말한다(댐설계기준, 2003). CFRD는 콘크리트를 차수벽으로 이용하기 때문에 차수재로 점성토를 사용하는 락필댐에 비해 상대적으로 제체 강성이 크고, 차수가 댐 상류부 표면에서 이루어져 제체가 건조상태이므로 액상화나 과잉간극수압 증가에 따른 제체 재료의 강도저하가 없고, 규모가 큰 지진에 대해 차수벽에 균열이 발생하여 누수량이 증가할 수 있으나 차수벽 지지존과 선택존을 통해 누수가 안전하게 처리되기 때문에 일반적으로 지진에 안정된 형식의 댐으로 알려져 있다(Seed 등, 1985). CFRD는 이러한 이유와 함께 시공성과 경제성이 우수하다는 이유로 최근 들어 대댐(높이 15m 이상) 시공 시 가장 많이 적용되는 댐 형식이다.

현재 흙댐 및 사력댐의 내진성능 및 안정성을 수치해석을 통한 변형해석으로 판단하고자할 때, 댐 정상부 응답 침하량을 기준값(댐 높이의 1% 이하, 한국시설안전기술공단, 2004)과 비교함으로써 내진 안정성을 판단하고 있다. CFRD의 경우, 아직까지 내진안정성을 평가하는 침하량 기준에 대해서는 명확히 보고된 바는 없으나, CFRD 제체 대부분이 사력재료로 구성되어 있기 때문에 위의 기준을 따른다 하더라도 큰 무리는 없을 것으로 여겨지고 있다. 따라서 현재, 지진하중에 대한 댐 정상부의 응답침하량이 CFRD 내진안정성을 판단하는 가장 중요한 기준이라고 할 수 있다. 일반적으로 CFRD의 동적거동을 평가하는 경우, 콘크리트 표면차수벽의 구조적 역할은 무시된다(Uddin 등, 1992). 따라서 CFRD의 거동은 제체 구성재료의 대부분을 차지하는 사력재료

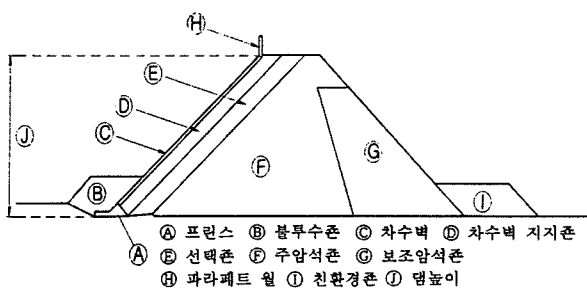


그림 1. CFRD 표준단면도(댐설계기준, 2003)

의 공학적 특성에 의존한다고 할 수 있다.

CFRD의 지진하중에 대한 안정성을 평가하는 대표적인 방법으로는 지진하중을 예상 활동 토체에 등가의 정적하중으로 치환하여 한계평형해석 등에 기초한 사면 안정해석을 수행하는 방법과 댐을 수치모형화하여 해석면 바닥에 지진하중을 입력하여 댐 전체 응답을 고려하는 시간이력해석에 기초한 동적변형해석 방법이 있다. 동적변형해석의 경우, 등가정적해석에 비해 댐의 전반적인 거동을 파악할 수 있고, 각 존별 응력전이나, 입력지진하중의 주파수 특성 등을 반영한 안정성 평가가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 안정성 여부를 판단하는 데까지는 많은 절차와 시간이 소요되므로, 최초 설계 단계나 안정성 평가여부를 결정하는 단계에 있어서 실무 기술자들에게 직관력을 제공하기에는 부족하다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 동적변형해석을 이용한 정량적 민감도분석으로부터 지진하중을 받는 CFRD 정상부 침하량 변화의 주 영향인자를 찾고, 주 영향인자 변화에 따른 침하량의 변화양상을 고찰하고, 이로부터 지진하중을 받는 CFRD 정상부 침하량을 근사적으로 추정하는 방법을 제안하고자 하였다. 민감도분석을 위한 신뢰성 있는 물성 확보를 위해 2001년 이후 현재까지 22개 현장, 34개 사력 및 사석재료에 대해 수행된 대형삼축압축시험으로 얻어진 물성을 활용하였다. 시험결과로부터 획득한 물성자료를 통계 분석하여 물성범위, 분포특성, 물성간 상관성과 같은 통계특성치를 산정하였다. 산정된 통계특성치를 바탕으로 Latin Hypercube 표본추출기법(Mckay 등, 1979)에 의해 27개의 물성조합을 구성하고, 각 물성조합으로 구성된 단면에 대하여 동적수치해석을 수행하여 지진하중에 의한 댐 정상부 침하응답을 고찰하였다. 해석 대상댐은 가장 최근에 축조된 CFRD 형식의 경상남도에 위치한 D댐으로 하였고, 해석 시 입력 지진동의 주파수 특성을 고려하기 위하여 일본 향만에서 실제측된 장주기 특성이 지배적인 Hachinohe 지진파와 단주기 특성이 지배적인 Ofunato 지진파를 해석 입력지진동으로 이용하였다. 입력지진동으로 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파를 최대가속도의 크기를 0.11g와 0.154g로 규모 조정하여 사용하였는데, 이러한 이유는 국내에 기 축조된 모든 CFRD의 설계진도를 계산해보면 이 두 값 중 하나이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 2가지 지진파, 각 지진파에 대해 2가지 설계진도, 물성값이 다른 해석단면 27개, 총 108개 해석단면에 대

한 동적 수치해석을 수행하고 CFRD 정상부 침하량을 산정하였다. 산정된 결과를 이용하여 민감도분석을 수행하였고, 민감도분석 결과로부터 얻어진 사력재료 주 영향인자에 대한 침하량의 변화 양상을 고찰하고 이로부터 지진하중을 받는 CFRD 정상부 침하량을 근사적으로 예측하는 방법을 제안하였다.

## 2. 민감도분석 조건 및 입력자료

### 2.1 민감도분석 개요

한번에 하나의 변수에 대한 값을 변화시켜가며 표본을 추출하고 그 결과들에 대한 잔차를 비교하여 분석하는 선별적 민감도분석 기법(screening)과 달리, 대역적 민감도분석(global sensitivity analysis)은 각 입력변수의 불확실성이 출력변수의 불확실성에 미치는 영향이 평가되며 각 입력변수에 대한 분포특성값이 해석을 위한 입력값으로 사용된다(배규진 등, 2003). 모든 변수들을 동시에 변화시키고, 각 입력변수의 전체 범위에 대해 민감도를 평가할 경우 대역적 민감도분석 기법을 적용해야 한다(Saltelli 등, 2000).

본 연구에서는 입력변수들 분포 특성을 고려하여 출력 결과들의 중요도와 불확실성을 유용하게 분석할 수 있는 대역적 민감도분석을 수행하였다. 본 연구에 적용된 민감도분석 절차는 다음과 같다.

- ① 사력재료 각 입력변수에 대한 범위와 분포특성을 산정
- ② 1단계에서 산정된 범위와 분포로부터 표본을 발생하여 물성조합 작성
- ③ 작성된 물성조합을 입력값으로 한 동적수치해석을 수행하여 정상부 침하량 출력
- ④ 입력값과 출력값을 이용하여 민감도지수를 산정, 민감도 분석

민감도분석 시 각 변수 표본추출은 Latin Hypercube 표본추출기법(LHS)을 사용하였다. 효율적으로 표본을 추출하기 위해서는 무작위성을 유지하면서 입력변수들의 값이 전 범위에서 가급적 고르게 추출되도록 함이 중요하다. LHS란 입력변수의 범위를 동일한 확률을 가진 N개의 간격으로 나누고 각 간격에서 입력변수의 대표값을 추출하는 기법이다. Mckay 등(1979)이 제안한 이 기법은 출력결과가 입력변수들 가운데 단지 몇가지 요소들에 의해 지배될 때 매우 우수하다. 또한, 출력결

과의 평균과 분포함수를 추정하는데 있어 기존의 랜덤 추출기법보다 우수하다고 알려져 있으며 입력변수 개수의 1.5배 이상 표본을 추출할 것이 제안되고 있다(Saltelli 등, 2000).

출력값의 입력변수값에 대한 민감도는 민감도지수로 정량적으로 표현된다. 대표적인 민감도지수로는 SRC(Standard Regression Coefficient)와 PCC(Partial Correlation Coefficient)가 있다. SRC는 각 입력변수별로 각각 입력값과 출력값 자료에 최소자승법을 적용하여 각 입력변수의 변화로 인한 영향을 정량적으로 나타내는 민감도지수이다. 그러나 이 값은 대상 입력값과 출력값과의 관계 외에 제 3의 변수에 의한 영향들도 함께 포함한다. 반면에 편상관계수(PCC)는 두 변수간의 상관관계의 정도가 다른 제 3의 변수들에 의해 영향을 받지 않는 순수한 상관관계 정도만을 표시하는 민감도지수이다. 즉, PCC가 SRC와 비슷하면 한 변수와 출력값과의 상관관계는 제 3의 변수에 영향을 받지 않음을 의미한다. 또한, PCC의 절대값이 1에 근접하면 한 변수와 출력값은 제 3의 변수에 상관없이 영향도가 큼을 의미하며, PCC의 절대값이 0에 근접하면 한 변수와 출력값은 제 3의 변수가 출력값에 영향도가 크거나 제 3의 변수들이 이 변수와 출력값의 상관관계에 지대한 영향을 가지기 때문에 상관성이 전혀 없음을 의미한다.

본 연구에서는 편상관계수를 민감도분석을 위한 민감도지수로 사용하였고, 편상관계수의 절대값을 이용하여 절대적인 민감도 순위를 결정하였다.

### 2.2 민감도분석 입력 물성

민감도분석 시 수치해석을 위한 사력재료 해석모델은 복잡한 모델을 사용하는 경우 변수가 많아지는 점과 선정된 모델에 사용된 입력변수들의 물리적 의미를 쉽게 짐작할 수 있어야 한다는 점을 감안하여 본 연구에서는 Mohr-Coulomb 모델을 해석모델로 선정하였다.

통계분석 시 사용된 사력재료 물성은 2001년 이후 현재까지 댐 축조재료와 직접 관련한 6개 현장, 성토 사석재료와 관련한 8개 현장, 항만구조물 사력재료와 관련한 4개 현장, 지하철공사 사력재료 3개 현장, 광산폐기물관련 사력재료 1개 현장, 총 22개 현장의 34개 사력재료에 대해 한국수자원공사에서 수행한 대형삼축압축시험 결과로 도출된 물성값을 이용하였다(표 1 참조, 한국수자원공사, 2005). 표 1에서 전단탄성계수값은 대형 삼

표 1. 사력재료 물성 대형삼축압축시험 결과(한국수자원공사, 2005)

시료번호	재 료	건조단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	마찰각 (°)	점착력 (kg/cm <sup>2</sup> )	전단탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )
1	댐 필터	19.4	40.6	0.76	353.8
2	댐 트렌지션	20.9	41.9	1.15	318.5
3	댐 트렌지션	19.0	37.5	0.90	141.5
4	댐 트렌지션	19.9	39.4	1.10	308.9
5	락필	19.2	38.2	0.73	120.6
6	락필	19.9	40.3	0.77	248.8
7	베딩	21.3	40.6	0.71	313.7
8	베딩	22.4	38.4	1.62	430.7
9	Selected Rock	20.6	40.1	0.50	223.0
10	Selected Rock	21.8	40.2	1.01	371.4
11	락필	20.4	45.6	0.14	538.1
12	락필	20.0	38.7	0.44	146.7
13	락필	21.5	39.7	0.52	230.0
14	락필	21.3	42.1	0.66	470.8
15	락필	21.3	38.6	0.63	234.8
16	락필	19.0	39.0	1.00	154.6
17	락필	20.0	38.5	0.33	152.0
18	락필	21.5	39.7	0.44	247.7
19	락필	21.1	39.4	0.53	250.4
20	락필	21.4	39.9	0.41	193.0
21	락필	16.0	35.7	0.65	199.6
22	모래자갈	19.3	39.4	0.93	437.7
23	락필	19.3	37.0	1.22	337.0
24	석산골재	18.8	40.5	0.53	174.8
25	저밀도 사력	15.1	35.3	0.47	102.3
26	중밀도 사력	16.1	36.4	0.80	88.46
27	고밀도 사력	17.0	38.5	0.90	152.3
28	저밀도 사력	18.7	43.0	0.21	627.3
29	고밀도 사력	20.5	41.4	0.76	557.3
30	석산골재	19.4	34.1	0.12	-*
31	석산골재	19.0	34.8	0.50	-
32	석산골재	19.5	37.9	0.99	-
33	사력재료	17.8	36.1	0.55	-
34	사력재료	19.6	39.4	0.35	-

\* 응력-변형을 자료 탐색 중

축압축시험결과, 구속압별 응력-변형을 관계곡선의 평균 초기 접선탄성계수값으로부터 산정된 결과이다.

Mohr-Coulomb 모델 적용시 필요한 입력정수로는 단위중량, 전단탄성계수, 마찰각, 점착력 등이 있으며 이 중 단위중량은 밀도변화에 따른 강도정수 변화를 보기 위한 시험을 제외하고는 대부분의 경우 시험 시 단위중량이 거의 비슷하여 민감도분석 시 일정한 값으로 하였고, 마찰각, 점착력, 전단탄성계수는 통계분석을 통해 산정한 통계특성값(범위, 분포특성, 변수간 상관성)을 민감도분석에 이용하였다. 댐 기초지반과 콘크리트차수

벽의 입력물성은 모든 CFRD에서 편차가 작고 거의 일정하므로 댐 공사지에서 제시하는 고정된 입력정수를 민감도분석시 고정값으로 사용하였다.

### 2.3 사력재료 물성 통계특성값 산정

대형삼축압축시험으로 얻어진 사력재료 물성을 통계 분석한 결과, 마찰각의 분포는 90% 신뢰도로 평균 39.0°, 표준편차 2.35°의 정규분포를, 점착력의 분포는 90% 신뢰도로 평균 66.9kN/m<sup>2</sup>, 표준편차 33.0kN/m<sup>2</sup>의 정

구분포를, 전단탄성계수의 분포는 90% 신뢰도로 평균 24700kN/m<sup>2</sup>, 표준편차 15483kN/m<sup>2</sup>의 대수정규분포를 이루는 것으로 나타났다. 마찰각은 34.1°~45.6°, 점착력은 9.81~158 kN/m<sup>2</sup>, 전단탄성계수는 8679~61488 kN/m<sup>2</sup>의 범위 값을 가졌다. 마찰각, 점착력, 전단탄성계수의 분포 특성은 그림 2와 표 2에 나타나 있다. 또한, 변수별 변동 크기는 점착력, 전단탄성계수, 마찰각 순으로 나타났다. 각 변수 간 상관성을 평가해 본 결과, 마찰각과 점착력 상관계수는 -0.059, 점착력과 전단탄성계수 상관계수는 0.202, 마찰각과 전단탄성계수 상관계수는 0.575로 나타났다(그림 3 참조). 이상의 결과는 각 변수는 상관

성이 작긴 하나 세 변수가 완전한 독립적 변수가 아닌 것으로 분석되어, 본 연구에서는 변수 상호간의 상관성을 고려하고 모든 변수들을 동시에 변화시켜 각 입력변수의 전체 범위에 대한 민감도를 평가하는 대역적 민감도분석법을 적용하였다.

### 2.4 해석대상

민감도분석을 위한 수치해석 대상댐은 경상남도 지역에 위치해 있으며 댐 높이는 52m이고 총저수량은 28.5백만m<sup>3</sup>인 D댐이다. 그림 4는 대상댐의 해석단면이

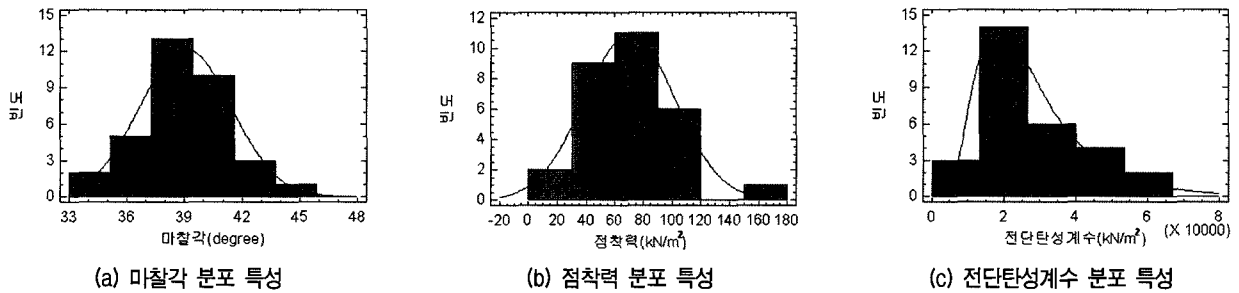


그림 2. 사력재료 주요 물성 분포 특성

표 2. 사력재료 주요 물성 분포 특성치

입력변수	분포	범위	평균	표준편차
마찰각(degree)	정규분포(90% 신뢰도)	34.1~45.6	39.04	2.35325
점착력(kN/m <sup>2</sup> )	정규분포(90% 신뢰도)	9.81~158	66.90	33.0270
전단탄성계수(kN/m <sup>2</sup> )	대수정규분포(90% 신뢰도)	8679~61488	24700	15483

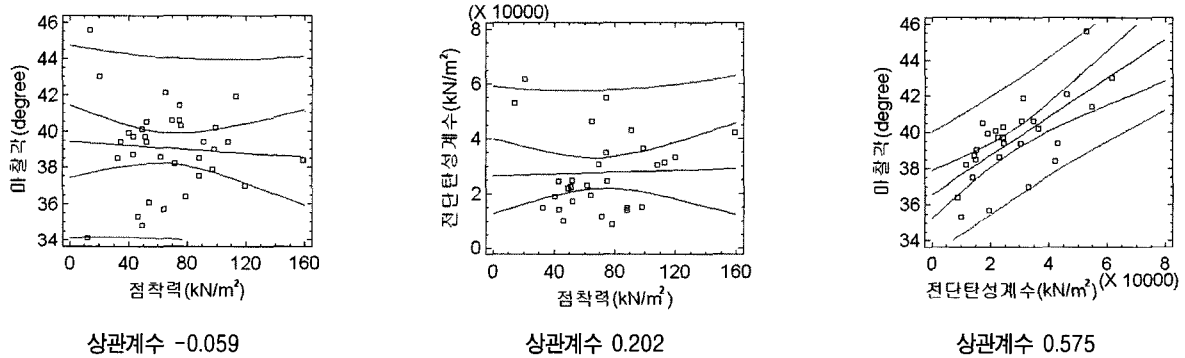


그림 3. 사력재료 주요 물성 간 상관성

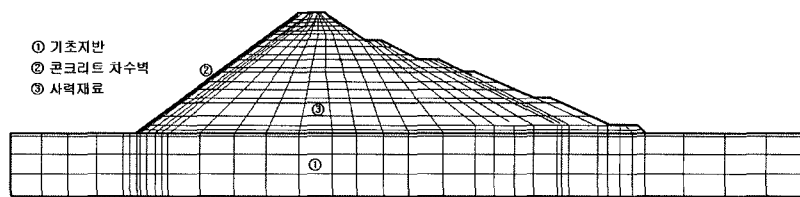


그림 4. CFRD 해석요소망 및 물성 구분

다. 수치해석 적용 시 물성은 그림에서 보는 것처럼 기초지반, 콘크리트차수벽, 사력재료로 구분하였다.

### 2.5 사력재료 물성 표본의 추출

본 연구에서는 민감도분석시 각 변수 표본추출은 Latin Hypercube 표본추출기법(LHS)을 사용하였다. 각 변수별로 산정된 물성분포곡선(그림 2 참조)에서 같은 확률을 갖도록 물성 분포곡선을 3등분하고 각 등분된 곡선 내에서 평균확률을 가지는 표본을 각각 1개씩 추출하였다. 이를 통해 추출된 각각의 변수 표본값은 표 3과 같다. 수치해석 시 표 3에서 추출된 각각의 값을 조합하여 27개의 물성조합을 만들었다.

### 2.6 CFRD 동적수치해석 개요

본 해석에서는 댐의 상시만수위를 저수위조건으로 하는 정적해석을 선행하고, 변위값과 속도를 초기화한 후, 해석면 바닥에 지진하중을 가하여 댐 정상부 침하량 응답을 살펴보았다.

27개 물성조합에 2가지 지진파, 각 지진파별 2가지 설계진도(0.11g와 0.154g)에 해당되는 총 108개 단면에 대한 수치해석을 수행하여 지진하중 작용 시, 정상부의 최대침하량을 산정하였다.

수치해석은 범용 유한차분해석 프로그램인 FLAC4.0을 사용하였고, 사력재료의 해석모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 상시만수위의 수위조건은 정수압을 차수벽 표면에 하중으로 작용시키는 것으로 구현하였다.

수치해석 시 해석요소망 및 물성구분은 그림 4와 같다.

동적해석시 입력하중은 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파를 규모 조정된 가속도 시간이력을 사용하였고 해석면 바닥에 댐체 바닥에서 최대가속도 크기가 두 지진파 모두 0.11g와 0.154g가 되도록 하였다. 그림 5와 그림 6은 각각 댐체 바닥에서 최대가속도 0.11g, 0.154g가 발현되도록 조정되어 해석면 바닥에 입력된 Hachinohe 지진파 시간이력을 나타낸 것이다. 마찬가지로, 그림 7

표 3. 변수의 추출 표본 물성값

민감도 분석에 사용된 사력재 입력물성	추출 표본 물성값		
	1	2	3
마찰각(degree)	36.8	39.0	41.3
점착력(kN/m <sup>2</sup> )	34.4	66.9	99.6
전단탄성계수(kN/m <sup>2</sup> )	14900	24700	40900

과 그림 8은 각각 댐체 바닥에서 최대가속도 0.11g, 0.154g가 발현되도록 조정되어 해석면 바닥에 입력된

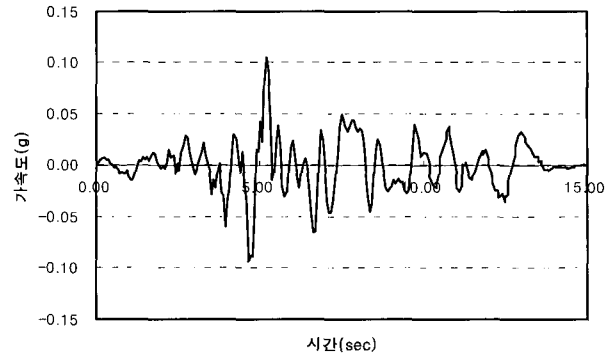


그림 5. Hachinohe 가속도 시간이력(댐바닥 0.11g 발현)

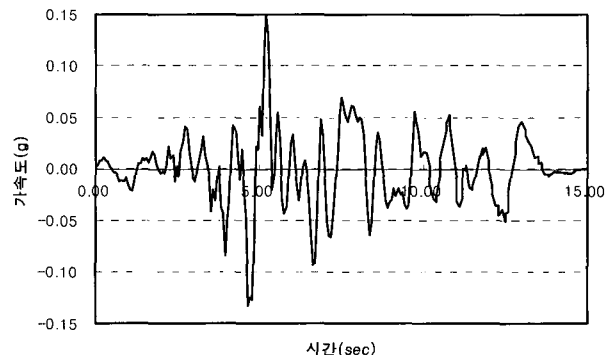


그림 6. Hachinohe 가속도 시간이력(댐바닥 0.154g 발현)

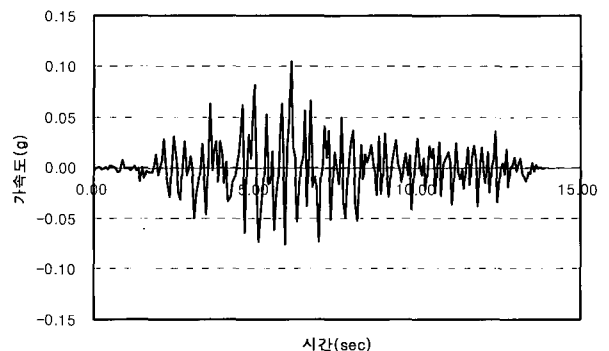


그림 7. Ofunato 가속도 시간이력(댐바닥 0.11g 발현)

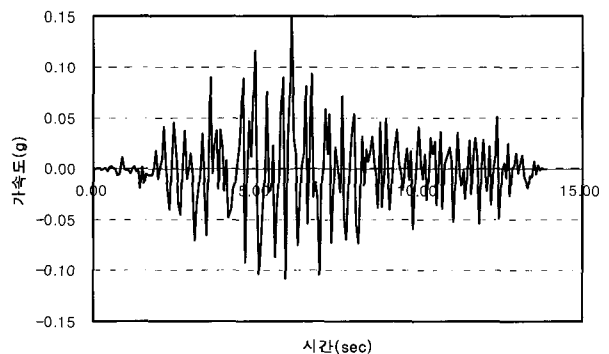


그림 8. Ofunato 가속도 시간이력(댐바닥 0.154g 발현)

Ofunato 지진파 시간이력을 나타낸 것이다.

물성구분은 그림 4에 나타낸 것과 같이 기초지반, 콘크리트 차수벽, 사력재료로 구분하였다. 사력재료의 경우, 표 3에서 추출한 각각의 값을 조합하여 27개의 물성 조합을 작성하였고 기초지반과 콘크리트 차수벽의 물성은 공사지에 제시된 값을 사용하였다. 표 4는 동적수치해석에 사용된 단면별 축조재료 입력물성을 나타낸 것이다.

### 3. CFRD 민감도분석 결과

#### 3.1 CFRD 동적수치해석 결과

그림 8은 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파 작용 시 동적 수치해석 결과 나타난 댐 정상부의 침하량 응답

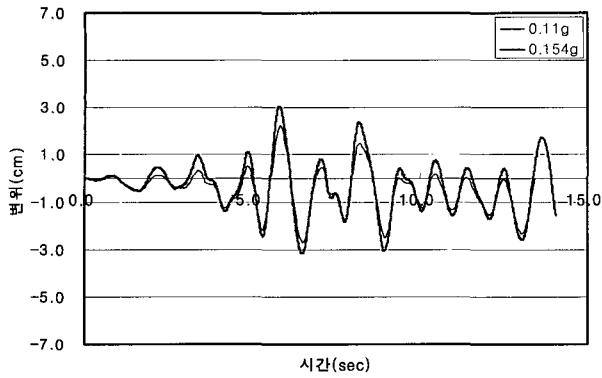
시간이력을 예(표 4의 단면 1 해석결과)로써 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 침하량의 응답특성은 입력지진의 주파수 특성에 따라 다름을 알 수 있고 본 단면(단면 1)의 경우에는 장주기 주파수특성이 탁월한 Hachinohe 지진파 작용시 정상부 침하 응답이 더 크게 나타났다. 표 4는 수치해석결과 나타난 지진파별, 가속도 크기별 각 물성조합에 따른 동적해석 결과 나타난 댐 정상부 최대침하량을 나타낸 것이다.

#### 3.2 지진하중 작용 시 CFRD 정상부 침하량의 사력재료 물성에 대한 민감도분석 결과

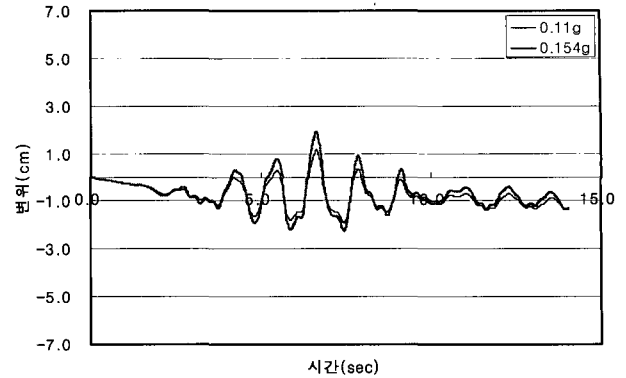
그림 9는 지진하중 작용 시 CFRD 정상부 침하량의 사력재료 입력물성에 대한 상대적 민감도를 정량적으로 나타내기 위하여 댐 정상부 최대 침하량에 대한 각 입력

표 4. CFRD 수치해석 입력물성

구분 단면#	기초지반			Face Slab			사력재			
	c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (°)	G (kN/m <sup>2</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (°)	G (kN/m <sup>2</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (°)	G (kN/m <sup>2</sup> )	γ (kN/m <sup>3</sup> )
1							34.4	36.8	14900	
2							34.4	36.8	24700	
3							34.4	36.8	40900	
4							66.9	36.8	14900	
5							66.9	36.8	24700	
6							66.9	36.8	40900	
7							99.6	36.8	14900	
8							99.6	36.8	24700	
9							99.6	36.8	40900	
10							34.4	39	14900	
11							34.4	39	24700	
12							34.4	39	40900	
13							66.9	39	14900	
14	100.0	45	8.3E6	1000	60	8.3E6	66.9	39	24700	20
15							66.9	39	40900	
16							99.6	39	14900	
17							99.6	39	24700	
18							99.6	39	40900	
19							34.4	41.3	14900	
20							34.4	41.3	24700	
21							34.4	41.3	40900	
22							66.9	41.3	14900	
23							66.9	41.3	24700	
24							66.9	41.3	40900	
25							99.6	41.3	14900	
26							99.6	41.3	24700	
27							99.6	41.3	40900	



(a) Hachinohe 지진파 작용



(b) Ofunato 지진파 작용

그림 8. 지진하중 작용 시 정상부 응답 침하량 예(단면 1)

표 5. 동적 수치해석 결과 댐 정상부 최대침하량(단위: cm)

단면#	구분	Hachinohe 지진파		Ofunato 지진파	
		0.11g	0.154g	0.11g	0.154g
1		2.71	3.13	1.89	2.24
2		1.86	2.17	1.39	1.81
3		1.01	1.31	0.605	0.87
4		2.67	3.26	1.73	2.14
5		2.04	2.39	1.36	1.80
6		1.09	1.44	0.60	0.90
7		2.68	3.31	1.75	2.10
8		2.03	2.40	1.37	1.82
9		1.09	1.44	0.61	0.91
10		2.69	3.12	1.82	2.21
11		1.89	2.21	1.39	1.82
12		1.02	1.34	0.61	0.90
13		2.67	3.26	1.72	2.13
14		1.94	2.42	1.37	1.80
15		1.09	1.44	0.61	0.91
16		2.62	3.27	1.75	2.13
17		1.93	2.39	1.36	1.81
18		1.09	1.45	0.61	0.91
19		2.68	3.17	1.76	2.17
20		1.95	2.26	1.38	1.81
21		1.03	1.36	0.61	0.90
22		2.63	3.28	1.70	2.13
23		1.94	2.39	1.36	1.82
24		1.10	1.45	0.61	0.90
25		2.64	3.31	1.70	2.09
26		1.94	2.41	1.38	1.81
27		1.09	1.44	0.61	0.91

변수의 편상관계수(PCC) 절대값을 지진파별(Hachinohe/Ofunato), 설계진도별(0.11g/0.154g)로 나타낸 것이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 지진하중을 받는 CFRD의 정상부 침하량은 사력재료의 전단탄성계수에 전적으로 영

향을 받는 것으로 나타났다. 그림 9에서 정상부 침하량의 사력재료 전단탄성계수에 대한 PCC의 절대값이 지진파 종류(Hachinohe와 Ofunato)와 설계진도 크기(0.11g와 0.154g)에 상관없이 0.98 이상으로서 사력재료 전단



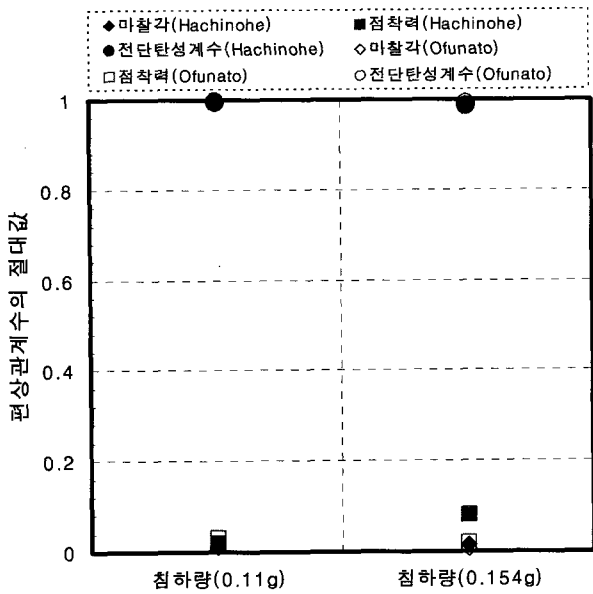


그림 9. 지진하중 작용 시 CFRD 정상부 침하량 민감도

탄성계수가 지대한 영향을 미치는 것으로 나타났고, 반면 사력재료 점착력과 마찰각에 대한 PCC의 절대값은 0.1이하로서 90%이상의 불확실성이 포함되는 것으로 나타나 정상부 침하량에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 사실로부터, 지진하중 작용 시 댐 정상부 침하량은 입력지진의 종류와 설계진도 크기에 상관 없이 입력물성 중 사력재료 전단탄성계수에 절대적인 영향을 받음을 알 수 있다. 또한, 본 연구결과에 한해 CFRD 정상부 침하량의 사력재료 마찰각에 대한 PCC의 절대값은 모두 0.03이하로 97% 이상의 불확실성이 포함되는 것으로 나타나 마찰각은 지진하중에 의한 CFRD 정상부 침하량에는 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

#### 4. 지진시 사력재료 전단탄성계수의 CFRD 정상부 침하량에 미치는 영향

3장의 민감도분석 결과를 바탕으로 본 장에서는 사력재료 전단탄성계수 변화에 따른 댐 정상부 침하량의 정량적인 변화정도를 파악하였다. 침하량에 미치는 영향이 미미한 점착력과 마찰각은 표 2를 참조하여 평균값을 사용하고 전단탄성계수는 표 3에서 표본추출된 3개 값 외에 표 2의 최소값과 최대값 2개를 추가, 총 5개 단면에 대한 결과로부터 사력재료 전단탄성계수 변화에 따른 CFRD 댐 정상부 침하량의 변화 정도를 살펴보았다.

그림 10은 지진하중 작용 시 사력재료 전단탄성계수

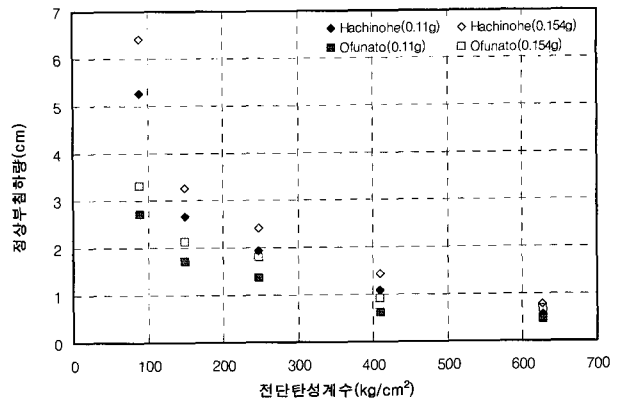


그림 10. 지진 시 CFRD 정상부 침하량 전단탄성계수 영향

에 따른 CFRD 정상부 최대침하량의 변화를 입력지진 파별, 입력지진파의 최대가속도 크기별로 나타낸 것이다. 그림에서 전단탄성계수가 커짐에 따라 정상부 침하량은 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 전단탄성계수가 작은 경우, 침하량은 입력지진파와 입력지진파의 가속도 크기에 따라 편차가 크게 나타났고 이러한 편차는 전단탄성계수가 커지면 감소하여, 본 해석상의 전단탄성계수 최대값(627kg/cm²) 정도에서는 입력지진파와 입력파의 최대가속도 크기에 영향 없이 정상부 침하량은 비슷하게 나타났다(0.4cm~0.8cm). 해석결과, Hachinohe 지진파를 입력한 경우가 Ofunato 지진파를 입력한 경우보다 사력재료의 전단탄성계수 차이로 인한 침하량의 편차가 큰 것으로 나타났다. 즉, Hachinohe 지진파를 입력지진파로 사용한 경우, 사력재료의 전단탄성계수가 약 7배 증가하면 CFRD 정상부 침하량은 최대 약 8배 감소하는 것으로 나타났고, Ofunato 지진파를 입력지진파로 사용한 경우, 사력재료 전단탄성계수가 약 7배 증가하면 CFRD 정상부 침하량은 최대 약 5배 감소하는 것으로 나타났다.

그림 11은 해석 시 입력값으로 정한 사력재료 전단탄성계수, G를 입력값 중 가장 작은 값,  $G_{min}$ (88.5kg/cm², 표 2 참조)으로 나는 값( $G/G_{min}$ , 이하 전단탄성계수비로 정의)의 변화에 따른 해석결과 나타난 정상부의 침하량, S를 해석결과 중 가장 큰 값,  $S_{max}$ (Hachinohe 0.11g 작용시 5.26cm, Hachinohe 0.154g 작용시 6.42cm, Ofunato 0.11g 작용시 2.71cm, Ofunato 0.154g 작용시 3.31cm)로 나는 값( $S/S_{max}$ , 이하 침하량비로 정의)의 변화를 나타낸 것이다. 따라서 그림 11에서 x축의 '1' 값에 대응되는 y축 값은 전단탄성계수 하한값을 입력했을 때의 침하량 결과를, '7.06'에 대응되는 y축 값은 전단탄성계수 상한값일

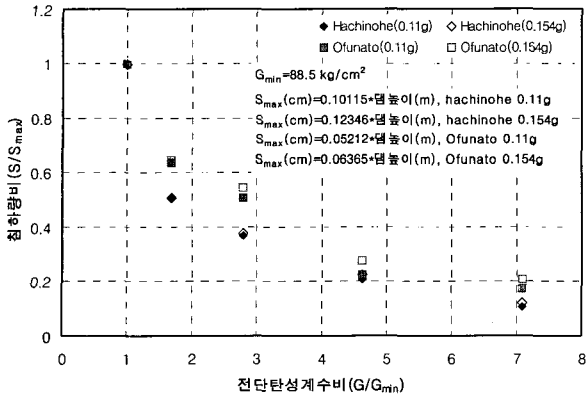


그림 11. 지진 시 CFRD 정상부 침하량 추정

때의 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 그림에서 지진파가 다른 경우에는 감소 경향선에 차이를 보이나 각 지진파 별로는 입력가속도의 크기에 상관없이 거의 일치된 경향선을 볼 수 있는데, 이로부터 전단탄성계수 변화 폭에 따라 발생하는 정상부 침하량의 변화폭은 입력지진파의 종류에는 영향을 받으나 같은 입력파를 사용하는 경우 입력파 가속도 크기에는 변화폭은 거의 없는 것을 알 수 있다.

일반적으로 CFRD의 단면은 그림 1에서 보여주는 표준단면을 따르며, 국내 대부분의 CFRD 댐 상류면의 경사 구배는 1:1.4이고, 하류면의 경우에는 대부분 1:1.4~1:1.8 범위 내에서 거의 일정하다. 이러한 점에서 그림 11은 최초 내진설계 단계나 지진 안정성 평가여부를 결정하는 단계에서 지진하중 작용 시 CFRD 정상부 침하량을 사전에 가늠해 볼 수 있는 실마리를 제공한다. 예를 들어, CFRD 내진설계 단계에서 사력재료 전단탄성계수에 대한 정보를 가지고 있다면 그림 11에서 x축에 해당되는 전단탄성계수비를 산정할 수 있고, 경향선을 이용하여 이 값에 대응하는 y축 상의 침하량비를 추정할 수 있다. 추정된 침하량비와 예측 대상댐의 댐 높이를 본 연구 결과로 얻어진 그림 11 상에서 보여주는 최대침하량 산정식에서 최대침하량을 산정하게 되면 각 지진파별, 입력가속도 크기별 CFRD 정상부 침하량, S를 추정할 수 있다.

CFRD 지진 시 안정성을 평가하는 방법 중, 수치해석을 이용한 동적변형해석의 경우 등가정적해석에 비해 댐의 전반적인 거동을 파악할 수 있고, 각 준별 응력전이나, 입력지진하중의 주파수 특성 등을 반영한 안정성 평가가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 안정성 여부를 판단하는 데까지는 많은 절차와 시간이 소요되므로, 최초 설계단계나 안정성 평가여부를 결정하는 단계에 있

어서 실무 기술자들에게 직관력을 제공하기에는 부족하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 점에서 본 연구에서 제안하는 지진 시 CFRD 정상부 침하량 추정방법은 사력재료의 전단탄성계수에 따라 발생할 수 있는 댐 정상부의 침하량을 사전에 추정해 볼 수 있는 실무적 견지에서 유용한 정보를 제공할 수 있다. 다만, 제안된 추정법은 대형삼축압축시험 결과로 얻어진 전단탄성계수와 이 값을 통계분석하여 얻은 통계특성치를 입력치로 이용하고, 사력재료 해석모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하여 얻어진 결론임에 유의해야 한다. 또한, 제안된 추정방법은 예측 대상댐의 높이를 본 해석결과로 얻어진 최대침하량,  $S_{max}$ 를 산정하는 식에 직접 대입하여 얻게 되는데 이는 댐 높이 차이에 따른 댐 고유진동수 영향을 반영하지 않는 방법이라고 할 수 있다. 향후, 다른 CFRD에 대한 추가해석을 수행하여 이에 대한 영향을 보정하고, 사력재료에 대한 현장시험결과나 보다 정확한 문헌제시 값들의 보충으로 물성 통계값의 정확도를 향상시킨다면 간단한 댐 정보(설계진도, 댐 높이 등)만을 가지고도 댐 정상부의 침하량을 예측할 수 있는 유용한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 동적변형해석을 이용한 정량적 민감도분석으로부터 지진하중을 받는 CFRD 정상부 침하량 변화의 주 영향인자를 찾고, 주 영향인자 변화에 따른 침하량의 변화양상을 고찰하고, 이로부터 지진하중을 받는 CFRD 정상부 침하량을 근사적으로 추정하는 방법을 제안하고자 하였다. 연구결과로부터 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대형삼축압축시험으로 얻어진 사력재료 물성을 통계 분석한 결과, 모두 90%의 신뢰도로 마찰각의 분포는 평균  $39.0^\circ$ , 표준편차  $2.35^\circ$ 의 정규분포를, 점착력의 분포는 평균  $66.9\text{kN/m}^2$ , 표준편차  $33.0\text{kN/m}^2$ 의 정규분포를, 전단탄성계수의 분포는 평균  $24700\text{kN/m}^2$ , 표준편차  $15483\text{kN/m}^2$ 의 대수정규분포를 이루는 것으로 나타났다.
- (2) 지진하중 작용 시 CFRD 정상부 침하량은 제체 구성 재료의 대부분을 차지하는 사력재료의 전단탄성계수에 전적으로 의존적이며 마찰각과 점착력의 영향은 미미하였다. 또한, 본 연구결과에 한해 마찰각은

지진하중에 의한 CFRD 정상부 침하량에는 전혀 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

- (3) 지진하중 작용 시 CFRD 정상부 침하량은 사력재료의 전단탄성계수가 커짐에 따라 지수 함수적으로 감소하였다. 사력재료의 전단탄성계수가 작은 경우, 침하량은 입력지진파와 입력지진파의 최대가속도 크기에 따라 편차가 크게 나타났고 전단탄성계수가 커질수록 그 편차는 감소하였다.
- (4) Hachinohe 지진파를 입력지진파로 사용한 CFRD 동적해석결과, 사력재료의 전단탄성계수가 약 7배 증가하면 CFRD 정상부 침하량은 최대 약 8배 감소하였고, Ofunato 지진파를 사용한 결과, 사력재료의 전단탄성계수가 약 7배 증가하면 CFRD 정상부 침하량은 최대 약 5배 감소하였다.
- (5) 본 연구에서는 민감도분석 결과와 전단탄성계수 변화에 따른 CFRD 동적해석 결과로부터, 사력재료의 전단탄성계수와 간단한 댐 정보(설계진도, 댐 높이 등)를 이용하여 지진하중 작용시 CFRD 정상부 침하량을 개략적으로 추정하는 방법을 제안하였다.
- (6) 제안된 추정법은 향후, 다른 CFRD에 대한 추가해석을 수행하여 댐 높이 차에 따른 댐 고유진동수 영향을 보정하고, 사력재료에 대한 현장시험결과나 보다

정확한 문헌제시 값들의 보충으로 물성 통계값의 정확도를 향상시킨다면 최초 CFRD 내진설계 단계나 안정성 평가 여부를 결정하는 단계에 있어 보다 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 배규진, 이두화, 장수호, 김영근 (2003), 슛크리트 라이닝의 거동해석에 영향을 미치는 입력변수들에 대한 민감도분석, *대한토목학회 논문집*, 제23권 제15C호, pp.345-356.
2. 한국수자원공사 (2005), *해석 및 조사를 통한 지반의 정적·동적물성치 산정기법 개발*, 한국수자원공사 연구보고서, KIWE-GG-05-05, pp.63.
3. 한국수자원학회 (2003), *댐설계기준*, pp.453-471.
4. 한국시설안전기술공단 (2004), *기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령*, pp.50-99.
5. McKay, M.D., Beckman, R.J. and Conover, W.J. (1979), "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code", *Technometrics*, Vol.21, No.2, pp.239-245.
6. Saltelli, A., Chan, K., and Scott, E.M. (2000), *Sensitivity analysis*, John Wiley & Sons Ltd., England.
7. Seed, H.B. and Seed, R.B. (1985), "Seismic Design of Concrete Faced Rockfill Dams", *Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, *Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Michigan, 1985, pp.459-478.
8. Uddin, N. (1992), "Seismic analysis of earth-core and concrete-face rockfill dams." PhD thesis, State Univ. of New York at Buffalo.

(접수일자 2006. 8. 2, 심사완료일 2006. 12. 23)