

# 지진하중을 받는 CFRD 정상부 변위에 영향을 미치는 사력재료 입력물성에 대한 민감도분석

## Sensitivity Analysis of Rockfill Input Parameters Influencing Crest Displacement of CFRD Subjected to Earthquake Loading

하익수<sup>1)</sup>

Ha, Ik-Soo

**국문 요약** >> 본 연구는 지진하중을 받는 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)의 정상부 변위에 대한 사력재료 주요물성의 민감도를 정량적으로 분석하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 현재 운영 중인 국내 CFRD 형식의 D댐에 대해 2가지 지진파, 각 지진파에 대해 2가지 설계진도, 사력재료에 대해 수행된 대형삼축압축시험 결과로부터 얻어진 물성값을 조합하여 만든 물성값이 다른 해석단면 27개를 작성, 총 108개 해석단면에 대한 동적 수치해석을 수행, 그 결과를 이용한 대역적 민감도분석을 수행하였다. 민감도분석 결과, 지진하중 작용 시 댐 정상부 침하량은 입력지진의 종류와 설계진도 크기에 상관없이 절대적으로 사력재료 전단탄성계수에만 영향을 받았으며 댐 정상부 횡변위의 경우에는, 사력재료 전단탄성계수의 영향이 크나 그 영향의 정도는 침하량에 미치는 정도에 비해 상대적으로 작으며, 침하량과는 달리 지진파의 종류와 크기에 따라 차이를 보였다. 본 연구결과에 한해 사력재료의 마찰각은 지진하중에 의한 CFRD 정상부 변위에는 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

**주요어** 민감도분석, 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐, 지진, 댐, 동적해석

**ABSTRACT** >> The purpose of this study is to carry out the quantitative sensitivity analysis on rockfill material influencing the dam crest displacement of CFRD(Concrete-Faced Rockfill Dam) subjected to earthquake loading. The total 108 dynamic numerical analyses (2 input earthquake, 2 magnitudes for each earthquake, 27 rockfill material property combinations obtained from large triaxial tests) on CFR type "D" dam in operation were conducted. The global sensitivity analysis was carried out using the results of numerical analysis. From the results of sensitivity analysis, It was found that the crest settlement of the CFR type dam subjected to earthquake was absolutely affected by the shear modulus of rockfill material irrespective of the input earthquakes and the maximum acceleration of each earthquake. Also, it was found that the horizontal displacement of the dam crest was highly affected by the shear modulus of rockfill material though the extent of effect on that was smaller than the settlement and the extent of effect depended on the input earthquakes and the maximum acceleration of each earthquake. On the contrary, it was found that the effect of friction angle was negligible.

**Key words** sensitivity analysis, concrete-faced rockfill dam, earthquake, dam, dynamic analysis

### 1. 서론

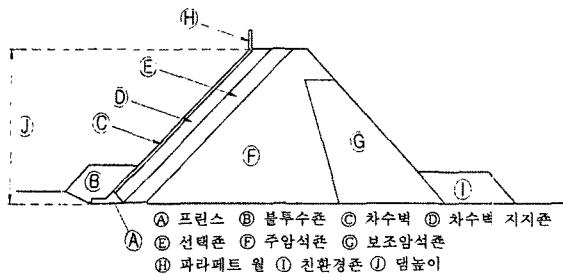
콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete-Faced Rockfill Dam, 이하 "CFRD"라 한다)이란 그림 1과 같이 댐 단면이 물과 접하는 상류부에 차수를 위한 프린스(plinth) 및 콘크

리트 표면차수벽과 차수벽을 지지하는 차수벽지지콘 및 암석콘으로 구성되는 댐을 말한다.<sup>(1)</sup> CFRD는 콘크리트를 차수벽으로 이용하기 때문에 차수재료 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 지지콘과 선택콘을 통해 누수가 안전하게 처리되기 때문에 일반적으로 지진에 안정된 형식의 댐으로 알려져 있다.<sup>(2)</sup> CFRD는 이러한 이유와 함께 시

<sup>1)</sup> 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원  
(대표저자: geodoc@kwater.or.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 7. 18 / 심사종료일 : 2006. 9. 26)



〈그림 1〉 CFRD 표준단면도<sup>(1)</sup>

공성과 경제성이 우수하다는 이유로 최근 들어 대댐(높이 기준 15m 이상, 국제대댐회 기준) 시공 시 가장 많이 적용되는 댐 형식이다.

현재 뿔댐(사력댐과 CFRD)의 내진성능 및 안정성을 수치해석을 통한 변형해석으로 판단하고자할 때, 댐 정상부 응답변위를 기준값(댐 높이의 1% 이하<sup>(3)</sup>)과 비교함으로써 내진 안정성을 판단하고 있다. 따라서 현재, 지진하중에 대한 댐 정상부의 변위응답이 뿔댐의 내진안정성을 판단하는 가장 중요한 기준이라고 할 수 있다. 일반적으로 CFRD의 동적거동을 평가하는 경우, 콘크리트 표면차수벽의 구조적 역할은 무시된다.<sup>(4)</sup> 따라서 CFRD의 거동은 제체 구성재료의 대부분을 차지하는 사력재료의 공학적 특성에 의존한다고 할 수 있다.

민감도분석은 여러 입력변수들 가운데 결과에 큰 영향을 미치는 주요 변수를 판정하기 위한 기법으로서 많은 불확실성을 가진 지반공학분야에서 널리 적용될 것으로 기대되고 있다.<sup>(5)</sup> 그러나 아직까지 지반공학 분야에서 민감도분석의 적용사례는 드물며 주로 정량적 분석이 아닌 정성적 분석에 머무르고 있는 실정이다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 정량적인 민감도분석을 적용하여 각 사력재료 설계변수들에 대한 중요도의 절대적인 차이를 비교하고자 하였다.

본 연구는 지진하중을 받는 CFRD의 정상부 변위에 대한 사력재료 주요물성의 민감도를 정량적으로 분석하는데 그 목적이 있다. 민감도 분석을 위한 사력재료 물성조합은 국내(한국수자원공사)에서 사력 및 사석재료에 대해 수행된 대형 삼축압축시험 결과로 산정된 물성을 참고하여 조사된 사력재료의 물성범위, 분포특성, 물성간 상관성과 같은 통계특성<sup>(6)</sup>을 바탕으로 Latin Hypercube 표본추출기법<sup>(7)</sup>에 의해 27개의 물성조합을 구성하고, 각 물성조합으로 구성된 단면에 대하여 동적수치해석을 수행하여 지진하중에 의한 댐 정상부 변위응답을 고찰하였다. 해석 대상댐은 가장 최근에 축조된 CFRD 형식의 경상남도에 위치한 D댐으로 하였고, 해석 시 입력지진동의 주파수 특성을 반영하기 위하여 일본 항만에서 실제측된 장주기 특성이 지배적인 Hachinohe 지진

파와 단주기 특성이 지배적인 Ofunato 지진파를 해석 입력 지진동으로 이용하였다. 입력지진동으로 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파를 최대가속도의 크기를 0.11g와 0.154g로 규모 조정하여 사용하였는데, 이러한 이유는 국내에 축조된 모든 CFRD의 설계진도는 이 두 값 중 하나이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 2가지 지진파, 각 지진파에 대해 2가지 설계진도, 물성값이 다른 해석단면 27개, 총 108개 해석단면에 대하여 동적 수치해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 민감도분석을 수행하였다.

## 2. 민감도분석 기법

### 2.1 민감도분석 기법 종류

민감도분석 기법은 크게 선별기법(screening), 국소적 민감도분석(local sensitivity analysis) 그리고 대역적 민감도분석(global sensitivity analysis)으로 구분할 수 있다.<sup>(8)</sup> 선별기법은 한번에 하나의 변수에 대한 값을 변화시켜가며 표본을 추출하고 결과들에 대한 잔차를 비교하여 분석한다. 그러나 입력변수들의 상호작용을 고려하지 못하며 해석에 많은 표본이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 또한 국소적 민감도분석에서는 입력변수들로 출력함수를 편미분하여 분석을 하는 해석적인 방법이다. 그러나 출력을 함수식으로 결정해야 하는 문제가 있으며 모델이 선형적이지 않고 상당한 불확실성이 입력변수들에 존재할 때 결과의 불확실성을 신뢰성 있게 추정할 수 없는 방법이다. 반면 대역적 민감도분석에서는 각 입력변수의 불확실성이 출력변수의 불확실성에 미치는 영향이 평가되며 각 입력변수에 대한 분포특성 값이 해석을 위한 입력값으로 사용된다. 모든 변수들을 동시에 변화시키고, 각 입력변수의 전체 범위에 대해 민감도를 평가할 경우 대역적 민감도분석 기법을 고려한다.<sup>(9)</sup>

### 2.2 민감도분석 절차 및 민감도지수

본 연구에서는 입력변수들의 분포에 따른 결과들의 중요도와 불확실성을 분석하는데 유용한 대역적 민감도분석을 수행하였다. 본 연구에서 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 변위 출력

④ 입력값과 출력값을 이용하여 민감도지수를 산정, 민감도 분석

민감도분석 시 각 변수 표본 추출은 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<sup>(7)</sup>이 제안한 이 기법은 출력결과가 입력변수들 가운데 단지 몇가지 요소들에 의해 지배될 때 매우 우수하다. 또한, 출력결과와 평균과 분포함수를 추정하는데 있어 기존의 랜덤추출기법보다 우수하다고 알려져 있으며 입력변수 개수의 1.5배 이상 표본을 추출할 것이 제안되고 있다.<sup>(9)</sup>

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 제3의 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.

예로써, 출력변수 y와 두개의 입력변수 x1, x2가 존재할 때, x2 변수에 영향을 받지 않는 출력변수 y와 입력변수 x1 간의 순수한 상관관계수(편상관계수)를 구하는 식은 다음과 같다.

$$r_{yx1.x2} = \frac{r_{yx1} - r_{yx2} \times r_{x1x2}}{\sqrt{(1 - r_{x1x2}^2)(1 - r_{yx2}^2)}} \quad (1)$$

여기서,  $r_{yx1.x2}$ 는 x2변수에 영향을 받지 않는 y와 x1간의 순수한 상관관계를,  $r_{yx1}$ 은 y와 x1간의 상관관계를,  $r_{yx2}$ 는 y와 x2간의 상관관계를,  $r_{x1x2}$ 는 x1과 x2간의 상관관계를 각각 나타낸다. 위와 같이 하나의 변수에 대한 다른 두 변수간의 상관계수를 1차 편상관계수라 칭하며, 두개 이상의 변

수에 대한 다른 두 변수간의 상관계수는 고차 편상관계수라 부른다. 고차의 편상관계수는 위의 1차 편상관계수를 구하는 절차와 동일하나 단순 회귀분석이 아닌 다중 회귀분석(multiple regression analysis) 절차가 추가로 필요하다.

PCC가 SRC와 비슷하면 한 변수와 출력값과의 상관관계는 제3의 변수에 영향을 받지 않음을 의미한다. 또한, PCC의 절대값이 1에 근접하면 한 변수와 출력값은 제3의 변수에 상관없이 영향도가 큼을 의미하며, PCC의 절대값이 0에 근접하면 한 변수와 출력값은 제3의 변수가 출력값에 영향도가 크거나 제3의 변수들이 이 변수와 출력값의 상관관계에 지대한 영향을 가지기 때문에 상관성이 전혀 없음을 의미한다.

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

3. 해석조건 및 입력자료

3.1 민감도분석 입력 물성

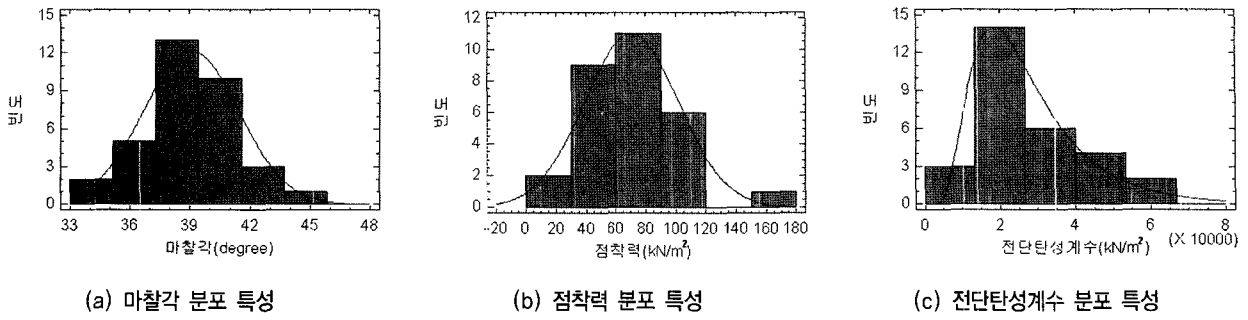
민감도분석 시 수치해석을 위한 사력재료 해석모델은 모델에 사용되는 변수의 수를 최소화하고, 선정된 모델에 사용된 입력변수들의 물리적 의미를 쉽게 짐작할 수 있는 모델을 선택해야 한다는 점을 감안하여 Mohr-Coulomb 모델을 해석모델로 선정하였다.

통계분석 시 사용된 사력재료 물성은 국내에서 사력 및 사석재료에 대해 수행된 대형삼축압축시험 결과값을 이용하였다. Mohr-Coulomb 모델 적용 시 필요한 입력정수는 단위중량, 전단탄성계수, 마찰각, 점착력 등이 있는데 이 중 단위중량은 모든 사력재료에 대해 시험 시 단위중량이 거의 일정하여 민감도분석 시 상수값으로 하였고 마찰각, 점착력, 전단탄성계수는 기 조사된 통계특성값<sup>(6)</sup>을 민감도분석에 이용하였다. 댐 기초지반과 콘크리트차수벽의 입력물성은 모든 CFRD에서 거의 일정하므로 사력재료의 단위중량과 마찬가지로 상수값으로 간주하고 댐 공사지 등에 제시된 값을 고정값으로 사용하였다.

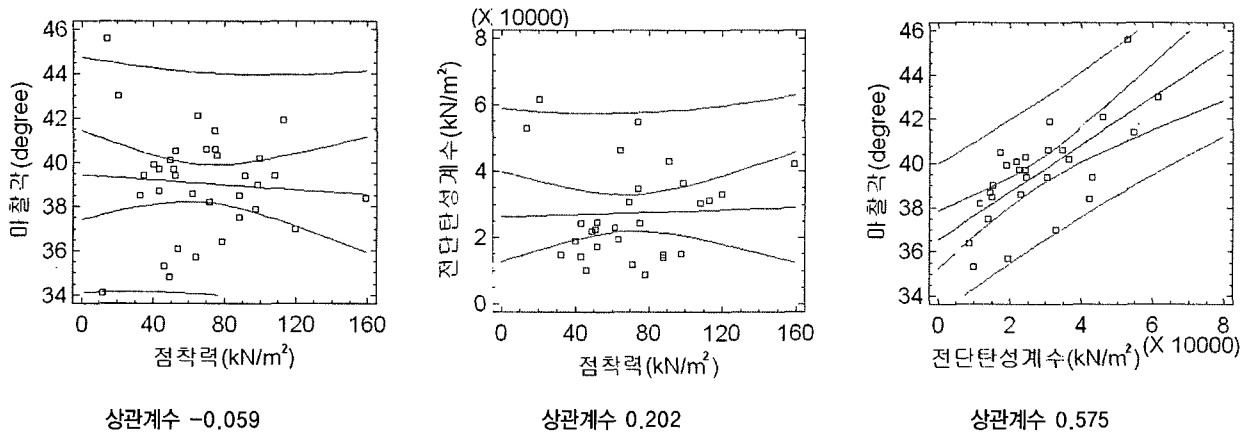
민감도분석에 사용된 사력재료 물성 통계특성값은 표 1과 그림 2~그림 3에 나타나 있다. 그림 3의 상관계수값에

<표 1> 사력재료 주요 물성 분포 특성값<sup>(6)</sup>

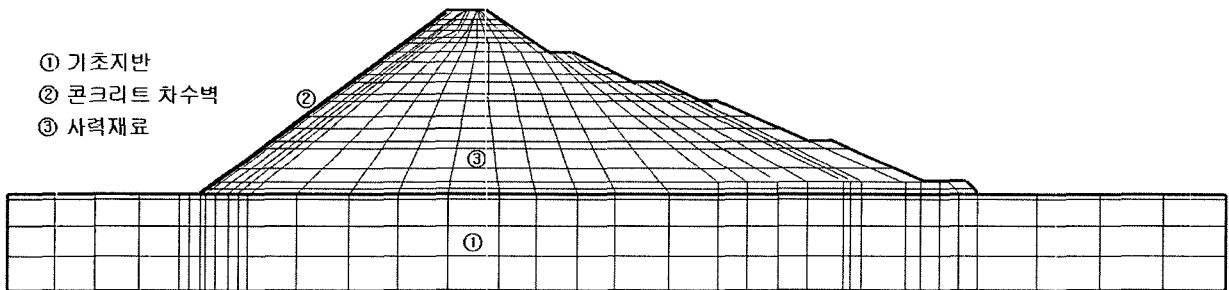
입력변수	분포	범위	평균	표준편차
마찰각(degree)	정규분포(90% 신뢰도)	34.1 ~ 45.6	39.04	2.35325
점착력(kN/m <sup>2</sup> )	정규분포(90% 신뢰도)	9.81 ~ 158	66.90	33.0270
전단탄성계수(kN/m <sup>2</sup> )	대수정규분포(90% 신뢰도)	8679 ~ 61488	24700	15483



〈그림 2〉 사력재료 주요 물성 분포 특성<sup>(6)</sup>



〈그림 3〉 사력재료 주요 물성간 상관성<sup>(6)</sup>



〈그림 4〉 대상 CFRD 해석단면 및 물성 구분

서 (+)는 양의 선형 상관관계 즉, 비례관계를 의미하며, (-)는 음의 선형 상관관계 즉, 반비례관계를 의미한다. 그림 3에서 각 변수 간 상관계수의 절댓값이 결코 작지 않게 나타나, 세 변수는 완전한 독립적 변수라고 볼 수 없다. 따라서 본 해석에서는 변수 상호간의 상관성을 고려하고 모든 변수들을 동시에 변화시켜 각 입력변수의 전체 범위에 대한 민감도를 평가하는 대역적 민감도분석 기법을 적용하였다.

### 3.2 해석대상

민감도분석을 위한 수치해석 대상댐은 경상남도 지역에 위치해 있으며 댐 높이는 52m이고 총저수량은 28.5백만 $m^3$ 인 D댐이다. 그림 4는 대상댐의 해석단면이다. 수치해석 적

용 시 물성은 그림에서 보는 것처럼 기초지반, 콘크리트차수벽, 사력재료로 구분하였다. 동적해석시 해석면 측면은 자유장 경계조건(free-field boundary condition)으로 설정하여 해석경계면에서의 반사파를 최소화하는 자유장 운동을 보장하였다.

### 3.3 사력재료 물성 표본 추출

본 연구에서는 2.2절에 설명하였듯이 민감도분석시 각 변수 표본 추출은 Latin Hypercube 표본추출기법(LHS)을 사용하였다. 각 변수별로 산정된 물성분포곡선(그림 2)에서 같은 확률을 갖도록 물성 분포곡선을 3등분하고 각 등분된 곡선 내에서 평균확률을 가지는 표본을 각각 1개씩 추출하

였다. 이를 통해 추출된 각각의 변수 표본값은 표 2와 같다. 수치해석 시 표 2에서 추출된 각각의 값을 조합하여 27개의 물성조합을 만들었다.

### 3.4 CFRD 동적수치해석 개요

본 해석에서는 댐의 상시만수위를 저수위조건으로 하는 정적해석을 선행하고, 변위값과 속도를 초기화한 후, 해석면 바닥에 지진하중을 가하여 댐 정상부 수평 및 수직 변위응답을 살펴보았다.

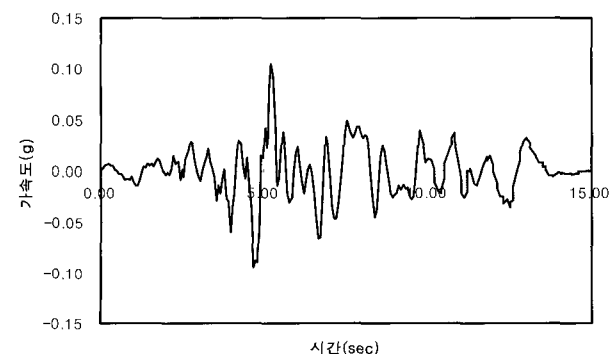
27개 물성조합에 2가지 지진파, 각 지진파별 2가지 설계진도(0.11g와 0.154g)에 해당되는 총 108개 단면에 대한 수치해석을 수행하여 동적하중 작용 시, 정상부의 횡방향 최대변위와 연직방향(침하량) 최대변위를 산정하였다. 수치해석 시 해석요소망 및 물성구분은 그림 4와 같다.

동적해석시 입력하중은 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파를 규모 조정한 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 발생하도록 조정되어 해석면 바닥에 입력된 Hachinohe 지진파 시간이력을 나타낸 것이다. 마찬가지로, 그림 7과 그림 8은 각각 댐체 바닥에서 최대가속도 0.11g, 0.154g가 발생하도록 조정되어 해석면 바닥에 입력된 Ofunato 지진파 시간이력을 나타낸 것이다.

물성구분은 그림 4에 나타낸 것과 같이 기초지반, 콘크리트 차수벽, 사력재료로 구분하였다. 사력재료의 경우, 표 2

〈표 2〉 변수의 추출 표본 물성값<sup>(6)</sup>

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



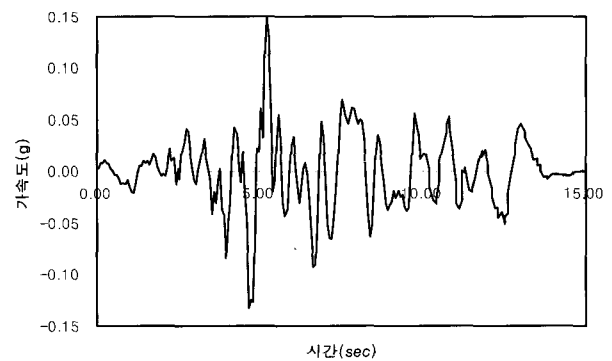
〈그림 5〉 Hachinohe 가속도 시간이력(댐바닥 0.11g 발현)

에서 추출한 각각의 값을 조합하여 27개의 물성조합을 작성하였고 기초지반과 콘크리트 차수벽의 물성은 공사에 제시된 값을 사용하였다. 표 3은 동적수치해석에 사용된 단면별 축조재료 입력물성을 나타낸 것이다.

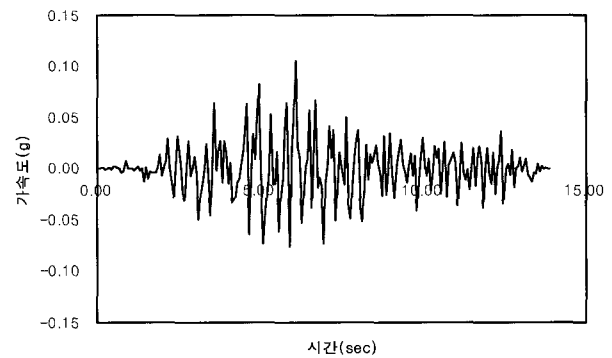
## 4. 민감도분석 결과

### 4.1 CFRD 동적수치해석 결과

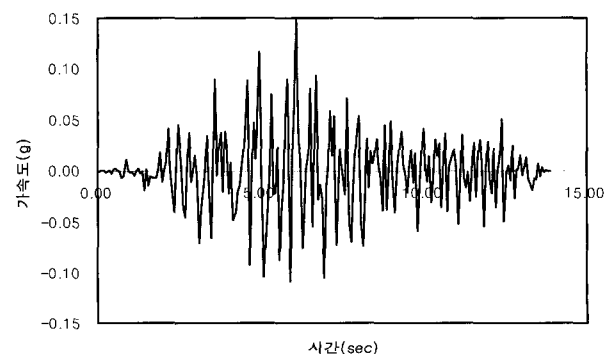
그림 9와 그림 10은 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파 작용 시 동적 수치해석 결과 나타난 댐 정상부의 횡방향, 연직방향 변위응답 시간이력을 예(단면 1 해석결과)로써 각



〈그림 6〉 Hachinohe 가속도 시간이력(댐바닥 0.154g 발현)



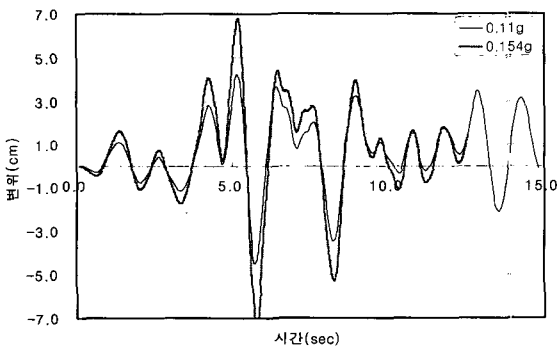
〈그림 7〉 Ofunato 가속도 시간이력(댐바닥 0.11g 발현)



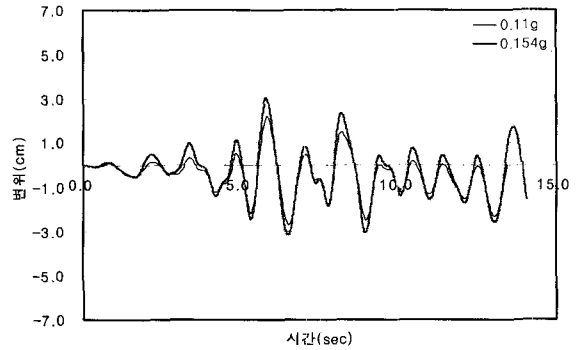
〈그림 8〉 Ofunato 가속도 시간이력(댐바닥 0.154g 발현)

〈표 3〉 CFRD 수치해석 입력물성

단면#	기초지반			Face Slab			사력재			
	c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (deg.)	G (kN/m <sup>2</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (deg.)	G (kN/m <sup>2</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (deg.)	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	

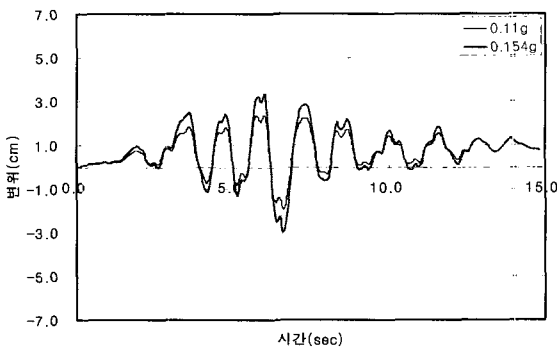


(a) 횡방향 변위이력

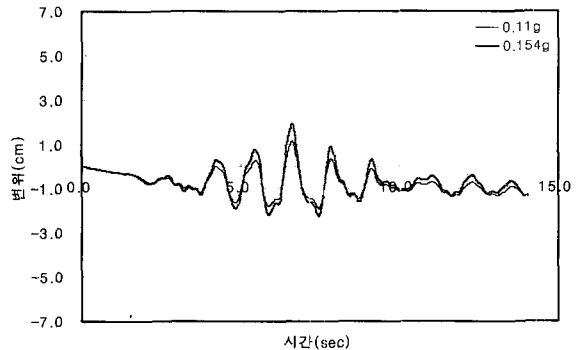


(b) 연직방향 변위이력

〈그림 9〉 Hachinohe 지진파 작용 시 정상부 변위응답(단면 1)



(a) 횡방향 변위이력



(b) 연직방향 변위이력

〈그림 10〉 Ofunato 지진파 작용 시 정상부 변위응답(단면 1)

각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 응답변위의 주파수 특성은 입력지진의 주파수 특성에 따라 다름을 알 수 있고 본 단면(단면 1)에서는 장주기 주파수특성이 탁월한 Hachinohe 지진파를 작용한 경우가 Ofunato 지진파를 작용한 경우보다 정부 변위응답이 더 크게 나타났다. 이러한 이유는 Hachinohe 지진파의 지배주파수가 대상 댐의 고유진동수에 더 가까운 값이기 때문인 것으로 판단되나 이에 대한 내용은 본 연구의 목적에 비추어, 추후 심도 있는 후속 연구로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 표 4는 수치해석결과 나타난 지진과별, 가속도 크기별 각 물성조합에 따른 동적해석 결과 나타난 댐 정상부 최대변위를 나타낸 것이다.

**4.2 지진하중 작용 시 CFRD 정상부변위에 영향을 주는 사력재 물성에 대한 민감도분석 결과**

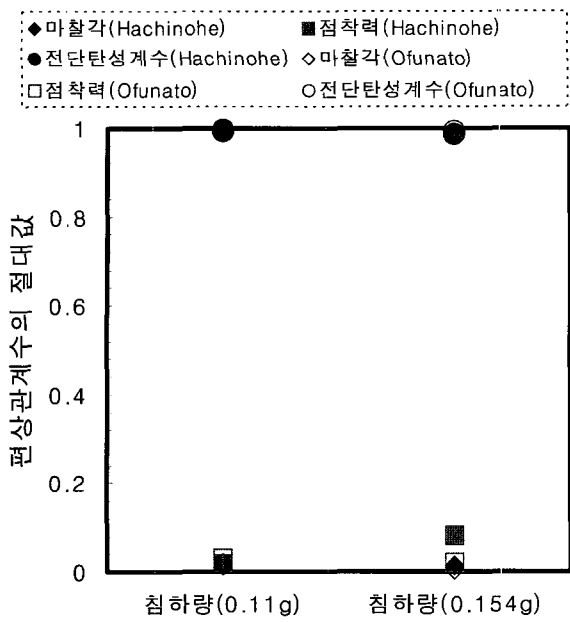
본 연구에서는 여러 변수를 사용하고 각 변수들을 동시에 변화시키기 때문에 민감도지수 중 편상관계수(Partial Corre-

lation Coefficient, PCC)의 절대값을 비교함으로써 민감도를 정량적으로 분석하였다. 여기서, 편상관계수란 두 변수간의 상관관계의 정도가 다른 제 3의 변수들에 의해 영향을 받지 않는 순수한 상관관계 정도만을 표시하는 민감도지수이다.

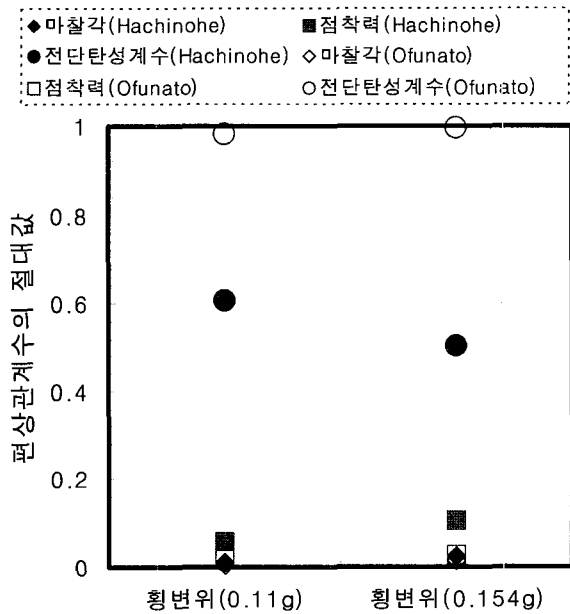
그림 11과 그림 12는 지진하중 작용 시 CFRD 정상부 변위의 사력재 입력물성에 대한 상대적 민감도를 정량적으로 나타내기 위하여 댐 정부 최대 침하량과 댐 정부 최대 횡변위 각각에 대한 각 입력변수의 편상관계수 절대값을 지진과별(Hachinohe/Ofunato), 설계진도별(0.11g/0.154g)로 나타낸 것이다. 본 해석에서 진동중의 정부 잔류변위보다는 진동중의 정부 최대변위값이 모든 경우에 대해 크게 나타났기 때문에 보수적 견지에서 진동중 최대변위값을 민감도분석을 위한 출력변수로 정하였다. 그림 11과 그림 12에서 알 수 있듯이 지진하중을 받는 CFRD의 정상부 최대변위는 사력재료의 전단탄성계수에 전적으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 그림 11에서 정상부 침하량의 경우, 사력재료 전단탄성계수에 대한 PCC의 절대값이 지진파 종류(Hachinohe

〈표 4〉 동적 수치해석 결과 댐 정상부 변위

구분 단면#	Hachinohe 지진파				Ofunato 지진파			
	0.11g		0.154g		0.11g		0.154g	
	최대수평변위 (cm)	최대연직변위 (cm)	최대수평변위 (cm)	최대연직변위 (cm)	최대수평변위 (cm)	최대연직변위 (cm)	최대수평변위 (cm)	최대연직변위 (cm)
1	4.67	2.71	7.39	3.13	2.38	1.89	3.35	2.24
2	5.48	1.86	8.37	2.17	2.18	1.39	3.14	1.81
3	5.26	1.01	7.93	1.31	1.81	0.605	2.76	0.87
4	4.49	2.67	6.94	3.26	2.35	1.73	3.40	2.14
5	5.48	2.04	8.34	2.39	2.24	1.36	3.17	1.80
6	5.21	1.09	7.88	1.44	1.82	0.60	2.75	0.90
7	4.48	2.68	6.94	3.31	2.36	1.75	3.40	2.10
8	5.48	2.03	8.34	2.40	2.25	1.37	3.15	1.82
9	5.23	1.09	7.88	1.44	1.82	0.61	2.75	0.91
10	4.61	2.69	7.31	3.12	2.35	1.82	3.37	2.21
11	5.47	1.89	8.36	2.21	2.20	1.39	3.15	1.82
12	5.26	1.02	7.92	1.34	1.81	0.61	2.76	0.90
13	4.49	2.67	6.97	3.26	2.34	1.72	3.39	2.13
14	5.48	1.94	8.32	2.42	2.24	1.37	3.17	1.80
15	5.22	1.09	7.87	1.44	1.82	0.61	2.75	0.91
16	4.48	2.62	6.93	3.27	2.38	1.75	3.40	2.13
17	5.46	1.93	8.35	2.39	2.21	1.36	3.15	1.81
18	5.22	1.09	7.89	1.45	1.81	0.61	2.74	0.91
19	4.58	2.68	7.28	3.17	2.33	1.76	3.36	2.17
20	5.48	1.95	8.36	2.26	2.25	1.38	3.14	1.81
21	5.25	1.03	7.81	1.36	1.82	0.61	2.76	0.90
22	4.50	2.63	6.92	3.28	2.33	1.70	3.40	2.13
23	5.46	1.94	8.33	2.39	2.25	1.36	3.17	1.82
24	5.23	1.10	7.90	1.45	1.82	0.61	2.76	0.90
25	4.50	2.64	6.93	3.31	2.34	1.70	3.42	2.09
26	5.48	1.94	8.32	2.41	2.23	1.38	3.18	1.81
27	5.22	1.09	7.89	1.44	1.82	0.61	2.75	0.91



〈그림 11〉 지진하중 작용 시 CFRD 최대 침하량 민감도



〈그림 12〉 지진하중 작용 시 CFRD 최대 횡변위 민감도

와 Ofunato)와 설계진도 크기(0.11g와 0.154g)에 상관없이 0.98 이상으로서 사력재료 전단탄성계수가 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 상관없이 절대적으로 전단탄성계수에만 영향을 받음을 알 수 있다. 그림 12에서 정상부 횡변위의 경우, Ofunato 지진파 작용 시 사력재료 전단탄성계수의 PCC의 절대값은 설계

진도 크기에 상관없이 0.98 이상으로 나타났고 점착력과 마찰력은 모두 0.1이하로 나타나 거의 절대적으로 전단탄성계수의 영향을 받고 그 영향의 정도는 설계진도 크기에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 반면에 Hachinohe 지진파 작용 시에는 사력재료 전단탄성계수의 PCC의 절대값은 설계진도에 따라 각각 0.61, 0.50값을 나타내고 점착력과 마찰력은 모두 0.1이하로 나타나 전단탄성계수의 영향이 크기는 하나 그 영향도는 Ofunato 지진파 작용 시에 비해 상대적으로 작고 설계진도 크기에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 지진하중 작용 시 전단탄성계수의 정상부 횡변위에 대한 영향의 정도는 지진파의 종류와 크기에 따라 차이를 보임을 알 수 있다. 또한, 본 연구결과에 한해 CFRD 정상부변위의 사력재료 마찰각에 대한 PCC의 절대값은 모두 0.03이하로 97% 이상의 불확실성이 포함되는 것으로 나타나 마찰각은 지진하중에 의한 CFRD 정상부변위에는 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

이상의 결과는 국내와 같은 중약진 지진구역에서 강성이 큰 댐체의 변형특성에 대한 연구결과로서, 국내 설계지진 조건하에서는 댐체가 탄성영역에서 거동하기 때문에 파괴 기준과 관련된 마찰각과 점착력에 대한 영향이 현저히 작게 나타난 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 사력재료 주요물성이 국내 설계지진 규모의 지진하중 작용 시 CFRD 정상부변위 거동에 미치는 영향도를 정량적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 현재 운영 중인 국내 CFRD 형식의 D댐에 대해 2가지 지진파, 각 지진파에 대해 2가지 설계진도, 사력재료에 대해 수행된 대형삼축압축시험 결과로부터 얻어진 물성값을 조합하여 만든 물성값이 다른 해석단면 27개를 작성, 총 108개 해석단면에 대한 동적 수치해석을 수행, 그 결과를 이용한 대역적 민감도분석을 수행하였다. 연구결과로부터 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지진하중 작용 시 CFRD의 정상부 침하량은 입력지진파 종류(Hachinohe와 Ofunato 지진파)와 설계진도 크기(0.11g와 0.154g)에 상관없이 절대적으로 사력재료 전단탄성계수에만 영향을 받는 것으로 나타났다. 반면에 사력재료 점착력과 마찰각의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
- (2) 지진하중 작용 시 CFRD의 정상부 횡변위는 사력재료 전단탄성계수의 영향이 크나 그 영향의 정도는 침하량



에 미치는 정도에 비해 상대적으로 작으며, 침하량과는 달리 입력지진과 종류와 설계진도 크기에 따라 차이를 보였다. 침하량의 경우와 마찬가지로 사력재료 점착력과 마찰각은 지진하중 작용 시 CFRD 정상부 횡변위에는 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

- (3) 본 연구결과는 국내와 같이 중약진 지진구역에서 강성이 큰 댐체의 변형특성을 고찰한 결과로써, 본 연구결과에 한해 사력재료의 마찰각은 국내 설계규모 지진하중을 받는 CFRD 정상부변위에는 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. 한국수자원학회, 댐설계기준, 2003.
2. Seed, H.B. and Seed, R.B., "Seismic Design of Concrete Faced Rockfill Dams," *Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, Geotech. Engrg. Div., ASCE, Michigan, 1985, pp. 459-478.
3. 한국시설안전기술공단, "기존 댐의 내진성능 평가 및 향상 요령", 보고서, 2003, pp. 50-99.
4. Uddin, N., "Seismic analysis of earth-core and concrete-face rockfill dams," PhD thesis, State Univ. of New York at Buffalo, 1992.
5. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., *Support of Underground Excavation in Hard Rock*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1995, pp. 8-19.
6. 하익수, 서민우, 정우성, 오병현, "단기적 락필댐 침하량에 영향을 미치는 사력재료 입력물성들에 대한 민감도분석", 2005정기 학술대회논문집, 대한토목학회, 2005, pp. 5512-5515.
7. Mckay, M.D., Beckman, R.J. and Conover, W.J., "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, 1979, pp. 239-245.
8. 배규진, 이두화, 장수호, 김영근, "숏크리트 라이닝의 거동해석에 영향을 미치는 입력변수들에 대한 민감도분석", 대한토목학회논문집, 제23권, 제15C호, 2003, pp. 345-356.
9. Saltelli, A., Chan, K. and Scott, E.M., *Sensitivity analysis*, John Wiley and Sons Ltd., England, 2000.