

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐 정상부 변위에 영향을 미치는 입력물성에 대한 민감도분석

Sensitivity Analysis on Rockfill Material Parameters Influencing Crest Displacement of Concrete-Faced Rockfill Dam

하의수¹⁾, Ik-Soo Ha, 서민우²⁾, Min-Woo Seo, 신동훈³⁾, Dong-Hoon Shin

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, geodoc@kowaco.or.kr

²⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

³⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

SYNOPSIS : In this study, quantitative sensitivity analysis on rockfill material influencing the dam crest displacement of Concrete-Faced Rockfill Dam(CFRD) was carried out. The purpose of this study is to indicate the most important input parameter and to show the quantitative variation of displacement at the crest of CFR type dam with this input parameter. The rockfill material properties for parametric study were obtained from the results of large scale triaxial tests on 34 rockfill materials in the 22 different sites. From the statistical analysis on these data, some statistical characteristics of rockfill material properties such as property range, distribution characteristics, and correlation between the properties were investigated. based on these characteristics, 27 property combinations were constituted by Latin Hypercube sampling method. Dam crest displacements after construction, impounding, and earthquake loading were evaluated by static and dynamic numerical analysis on each combination. From the sensitivity analysis, it was found that the crest displacement of CFR type dam was absolutely affected by the shear modulus of rockfill material and the effect of friction angle of it was negligible. This relative difference of sensitivity was more outstanding in case of crest settlement than in case of crest horizontal displacement. Also, it was found that the settlement and horizontal displacement of dam crest logarithmically decreased as the shear modulus increased and the difference between the maximum value and the minimum vale amounted to about 9.5 times in case of settlement and about 10 times in case of horizontal displacement.

Key words : Sensitivity analysis, Concrete-faced rockfill dam, Rockfill, Statistics, Shear modulus

1. 서 론

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete-Faced Rockfill Dam, 이하 "CFRD"라 한다)이란 그림 1과 같이 댐단면이 물과 접하는 상류부에 차수를 위한 프린스(plinth) 및 콘크리트 표면차수벽과 차수벽을 지지하는 차수벽 지지존 및 암석존으로 구성되는 댐을 말한다. 일반적으로 CFRD의 정적·동적 거동을

평가하는 경우, 콘크리트 표면차수벽의 구조적 역할은 무시된다. 따라서 CFRD의 거동은 제체 구성재료의 대부분을 차지하는 사력 및 사석재료의 공학적 특성에 의존한다고 할 수 있다.

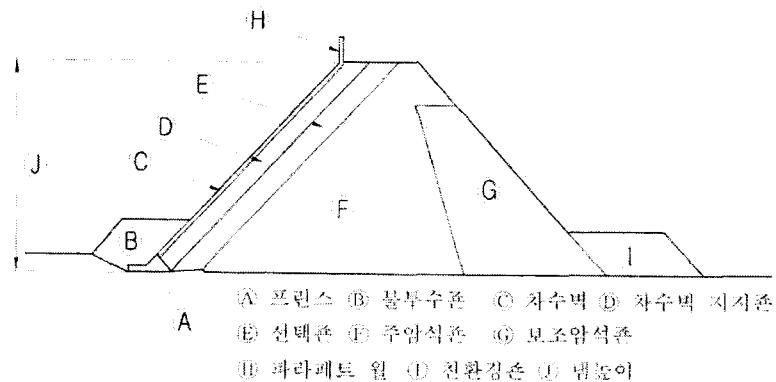


그림 1. CFRD 표준단면도(댐설계기준, 2003)

본 연구에서는 정량적인 민감도분석을 수행하여 사력재료 주요물성들에 대한 중요도의 차이를 비교하여 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete-Faced Rockfill Dam)의 정상부 변위에 주된 영향을 미치는 물성을 결정하고자 하였다. 이러한 민감도분석을 통해 사력재료 물성을 산정 시 중요하게 고려해야 할 물성을 제시하고, 중요물성 변화에 따른 CFRD 댐 정부 변위의 정량적 변화도를 보였다.

민감도분석을 위한 신뢰성 있는 물성 확보를 위해 2001년 이후 현재까지 22개 현장, 34개 사력 및 사석재료에 대해 수행된 대형삼축압축시험 결과 물성을 활용하였다. 시험결과로부터 획득한 물성자료를 통계 분석하여 합리적인 물성범위, 분포특성, 물성간 상관성을 조사하였고, 이를 바탕으로 Latin Hypercube 표본추출기법에 의해 27개 물성조합을 구성하고, 각각에 대해 수치해석을 통한 정적·동적 변형해석을 수행하여 댐 건설 후, 담수 후, 동적하중 작용 후 댐 정부변위를 산정하였다.

2. 사력재 물성 통계특성치 산정

물성의 통계특성치를 산정한다는 것은 조사된 물성값의 데이터베이스를 토대로 물성값의 분포특성과 물성간의 상관성을 조사하는 과정이다. 통계특성치 산정결과는 민감도분석방법 선정과 수치해석을 통한 민감도분석에 직접 이용된다.

2.1 사력재 물성 조사

사력재 물성 조사는 2001년 이후 현재까지 댐 축조재료와 직접 관련한 6현장, 성토 사석재와 관련한 8현장, 항만구조물 사력재료와 관련한 4현장, 지하철공사 사력재 3현장, 광산폐기물관련 사력재료 1현장, 총 22개 현장의 34개 사력재에 대해 한국수자원공사에서 수행한 대형삼축압축시험 결과로 나타난 물성값을 그 범위로 하였다.

삼축압축시험결과는 사용되는 해석모델의 요구에 따라 다양한 변수를 제공하나, 값을 얻기 용이하고 민감도 수행시 변수가 너무 많아지는 것과 모델에 사용된 입력변수들의 물리적 의미를 쉽게 짐작할 수 있는 모델을 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단되어 Mohr-Coulomb 모델을 해석모델로 선정하였고, 이 모델의 입력정수로 사용되는 변수를 민감도분석을 위한 입력변수로 정하였다. Mohr-Coulomb 모델 적용시 필요한 입력정수로는 단위중량, 전단탄성계수, 마찰각, 점착력 등이 있으며 이중 단위중량은 모든 사력재에 대해 시험시 단위중량이 거의 비슷하여 민감도분석시 일정한 값으로 하였고 마찰각, 점착력, 전단탄성계수는 그 통계특성치를 구해 민감도분석을 수행하였다.

사력재료의 입력변수에 따른 민감도분석 수행을 위해 댐 기초지반과 콘크리트차수벽의 입력정수는 댐 공사지에서 제시된 고정된 입력정수를 사용하여 민감도분석시 고정값으로 하였다. 조사된 사력재 물성값은 표 1과 같다. 대형삼축압축시험에 의한 사력 및 사석재료의 마찰각, 점착력, 전단탄성계수는 모암종류, 구속압조건, 입도특성 등 여러 현장조건에 대해 다양한 값을 가졌다.

표 1. 사력재 물성 대형삼축압축시험 결과

시료번호	주 재료	초기건조밀도 (t/m ³)	마찰각 (°)	점착력 (kg/cm ²)	포아송비	전단탄성계수 (kg/cm ²)
1	댐 펠터	1.94	40.6	0.76	0.3	353.8462
2	댐 트렌지션	2.09	41.9	1.15	0.3	318.4615
3	댐 트렌지션	1.9	37.5	0.9	0.18	141.5254
4	댐 트렌지션	1.99	39.4	1.1	0.35	308.8889
5	락필	1.92	38.2	0.73	0.19	120.5882
6	락필	1.99	40.3	0.77	0.21	248.7603
7	베딩	2.13	40.6	0.71	0.31	313.7405
8	베딩	2.24	38.4	1.62	0.4	430.7143
9	Selected Rock	2.06	40.1	0.5	0.22	222.9508
10	Selected Rock	2.18	40.2	1.01	0.38	371.3768
11	락필	2.04	45.6	0.14	0.3	538.0769
12	락필	2	38.7	0.44	0.2	146.6667
13	락필	2.15	39.7	0.52	0.3	230
14	락필	2.13	42.1	0.66	0.42	470.7746
15	락필	2.13	38.6	0.63	0.28	234.7656
16	락필	1.9	39	1	0.3	154.6154
17	락필	2	38.5	0.33	0.26	151.9841
18	락필	2.15	39.7	0.44	0.29	247.6744
19	락필	2.11	39.4	0.53	0.27	250.3937
20	락필	2.14	39.9	0.41	0.22	193.0328
21	락필	1.6	35.7	0.65	0.4	199.6429
22	모래자갈	1.93	39.4	0.93	0.38	437.6812
23	락필	1.93	37	1.22	0.35	337.037
24	석산골재	1.88	40.5	0.53	0.21	174.7934
25	저밀도 사력	1.51	35.3	0.47	0.3	102.3077
26	중밀도 사력	1.61	36.4	0.8	0.3	88.46154
27	고밀도 사력	1.7	38.5	0.9	0.3	152.3077
28	저밀도 사력	1.87	43	0.21	0.19	627.3109
29	고밀도 사력	2.05	41.4	0.76	0.3	557.3077
30	석산골재	1.94	34.1	0.12	-	-
31	석산골재	1.9	34.8	0.5	-	-
32	석산골재	1.95	37.9	0.99	-	-
33	사력재료	1.78	36.1	0.55	-	-
34	사력재료	1.96	39.4	0.35	-	-

2.2 사력재 물성 통계 특성값 산정

통계분석결과, 마찰각의 분포는 90% 신뢰도로 평균 39.04°, 표준편차 2.35325°의 정규분포를, 점착력의 분포는 90% 신뢰도로 평균 0.669429kg/cm², 표준편차 0.3368kg/cm²의 정규분포를, 전단탄성계수의 분포는 90% 신뢰도로 평균 282.439kg/cm², 표준편차 157.883kg/cm²의 대수정규분포를 이루는 것으로 나타났다. 마찰각은 34.1°~45.6°, 점착력은 0.10~1.61 kg/cm², 전단탄성계수는 88.5~627

kg/cm^2 의 범위 값을 가졌다. 마찰각, 점착력, 전단탄성계수의 분포특성은 그림 2와 표 2와 같다. 또한, 변수별 변동 크기는 점착력, 전단탄성계수, 마찰각 순으로 나타났다.

각 변수간 상관성을 평가해 본 결과, 마찰각과 점착력 상관계수는 -0.058, 점착력과 전단탄성계수 상관계수는 -0.202, 마찰각과 전단탄성계수 상관계수는 0.575로 나타났다(그림 3 참조). 이상의 결과는 그 상관성이 작긴 하나 세 변수가 완전한 독립적 변수가 아님을 보여준다. 따라서, 민감도분석시 변수 상호간의 상관성을 고려하는 대역적 민감도분석법이 요구된다.

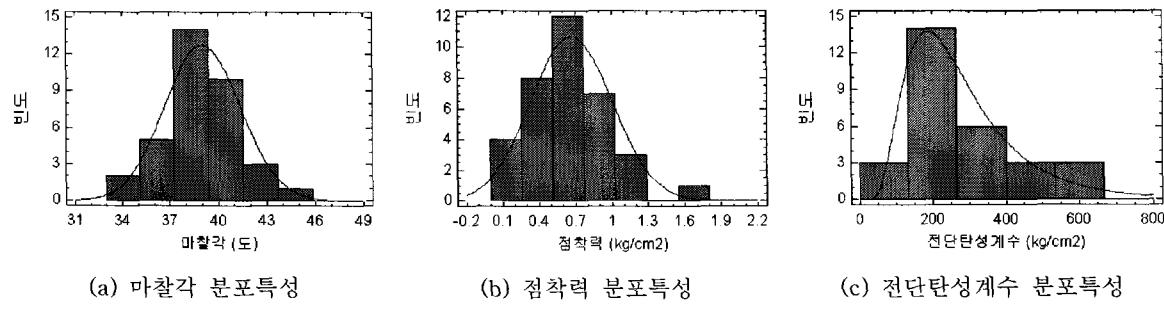


그림 2. 사력재료 주요 물성 분포 특성

표 2. 사력재료 주요 물성 분포 특성치

입력변수	분포	범위	평균	표준편차
마찰각($^\circ$)	정규분포(90% 신뢰도)	34.1~45.6	39.04	2.35325
점착력(kg/cm^2)	정규분포(90% 신뢰도)	0.10~1.61	0.669	0.33678
전단탄성계수(kg/cm^2)	대수정규분포(90% 신뢰도)	88.5~627	282.4	157.883

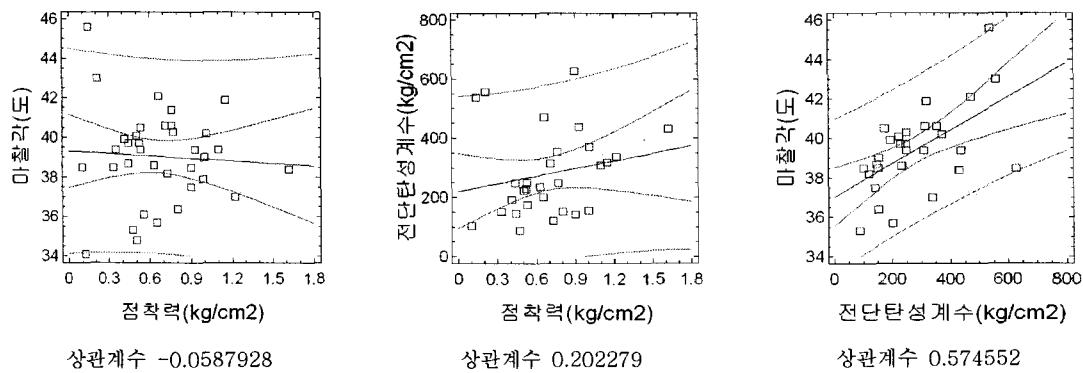


그림 3. 사력재 주요물성간 상관성

3. 댐 정상부 변위에 영향을 미치는 사력재 입력물성에 대한 민감도분석

범용 지반해석 프로그램인 FLAC4.0을 이용한 수치해석을 통한 민감도분석을 수행하였다. 해석모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 대상 CFRD는 최근에 국내에 축조된 대곡댐을 선택하였다. 수치해석시 해석요소망은 그림 4와 같다.

물성구분은 기초지반, 콘크리트 차수벽, 사력재료로 구분하였다. 즉, 그림 1에서 기초지반과 콘크리트 차수벽을 제외한 나머지 영역은 모두 동일한 사력재료로 구분하였다. 기초지반과 콘크리트 차수벽 입력물성은 표 3에 나타내었다.

고려하는 변수들(마찰각, 점착력, 전단탄성계수)간의 상관성을 앞 장 결과에 의하면 전혀 없다고 낙관할 수 없으므로 상호작용을 전혀 고려하지 않을 수 없기 때문에 선별기법에 의한 민감도 분석은 의미가 없으며 또한, 이러한 변수를 입력치로 해서 나온 해석결과(댐 정상부 수직 및 수평 변위) 역시 수식으로 표현되어질 가능성은 희박하므로 국소적 민감도 분석도 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 변수 상호간의 상호작용 고려가 가능한 대역적 민감도 분석을 수행하였다. 그림 2에 보여진 각 변수의 표본을 추출하기 위해서 분포곡선이 같은 확률을 갖도록 분포곡선을 3등분하고 각 등분된 분포곡선내에서 평균 확률을 가지는 표본을 각각 1개씩 추출하는 방법(Latin Hypercube 표본추출기법)을 사용하였다. 이를 통해 추출된 각각의 변수 표본값은 표 4와 같다. 표 4에서 추출된 각각의 값을 조합하여 27개의 물성조합을 만들었다.

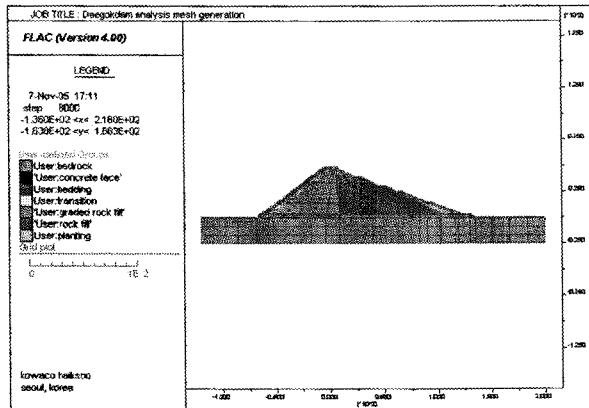


그림 4. CFRD(대곡댐) 해석요소망

표 3. CFRD 수치해석 입력물성

물성구분 모델	기초지반			콘크리트 차수벽		
	점착력(t/m^2)	마찰각(°)	전단탄성계수(t/m^2)	점착력(t/m^2)	마찰각(°)	전단탄성계수(t/m^2)
M-C 입력물성	10.0	45	8.3E5	100	60	8.3E5

표 4. 변수의 추출 표본 물성값

민감도 분석에 사용된 사력계 입력물성	추출 표본 물성값		
	1	2	3
마찰각(°)	36.8	39.0	41.3
점착력(kg/cm^2)	0.344	0.669	0.996
전단탄성계수(kg/cm^2)	149	247	409

3.1 CFRD 수치해석 결과

본 연구에서는 댐의 상시만수위를 저수위조건으로 하는 정적해석을 수행한 후, 이어 동적해석을 수행하였다. 27개 물성조합에 해당되는 27개 단면에 대한 수치해석을 수행하여 건설직 후, 담수 후 정상부 횡방향 변위 및 연직변위(침하량)를 산정하였고 동적하중 작용 후, 정상부의 횡방향 최대변위와 연직방향 최대침하량을 산정하였다.

그림 5는 CFRD의 정적수치해석결과 나타난 정상부 횡방향 변위이력 예를 나타낸 그림이다. 정상부 횡변위는 담수 후에 크게 증가하였다. 그림 6은 CFRD의 정적수치해석결과 나타난 정상부 침하량 이력 예를 나타낸 그림이다.

일반적으로 동적해석 수행시 입력치로 사용되는 댐체 고유진동수를 산정하기 위한 자유진동해석을 수행하였다. 자유진동 해석시 입력파는 0.2g, 5Hz의 사인 정현파를 해석영역 바닥에 작용시켰고 적용파는

3초간 입력하고 해석은 10초간 수행하여 3초 후의 자유진동에 따른 땅정부 수평변위 거동을 분석하여 댐체 고유진동수를 산정하였다(그림 7). 3초 진동 후 주 진동의 진동수를 자유진동시간 7초로 나눈 결과 고유진동수는 0.71Hz로 분석되었다(그림 8).

CFRD 동적해석시 입력가속도는 Hachinohe 지진파를 스케일 조정한 가속도 시간이력을 사용하였고 해석면 바닥에서의 가속도의 최대진폭은 0.105g로써 댐체 바닥에서 댐설계기준(2003, 수자원학회)에 근거한 대곡댐의 설계최대가속도 0.11g를 만족하도록 최대가속도 크기를 규모 조정하였다. 그림 9와 그림 10는 각각 동적수치해석결과 나타난 댐 정부의 횡방향, 연직방향 변위 시간이력 예를 나타낸 그림이다. 정부 횡면위의 경우 상류방향으로의 최대변위가 발생하였다.

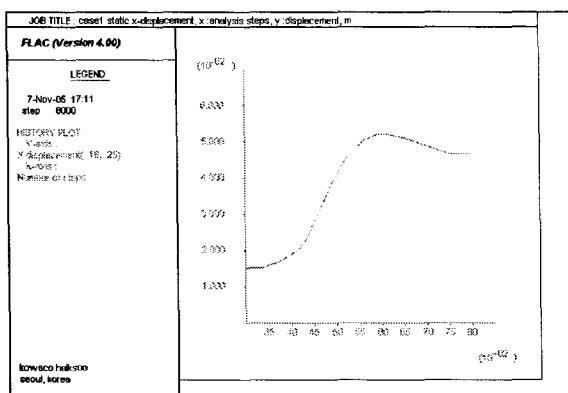


그림 5. CFRD 담수 후 정부 횡방향 변위 예

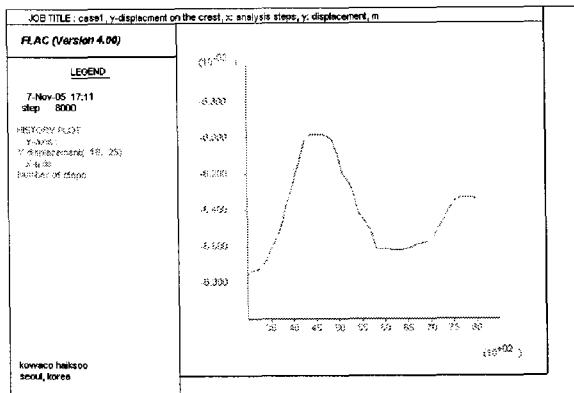


그림 6. CFRD 담수 후 정부 침하량 예

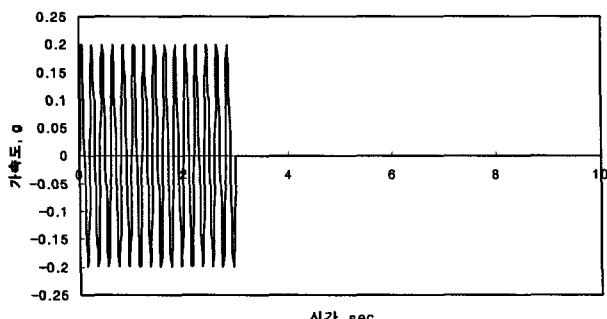


그림 7. 자유진동 해석시 입력파

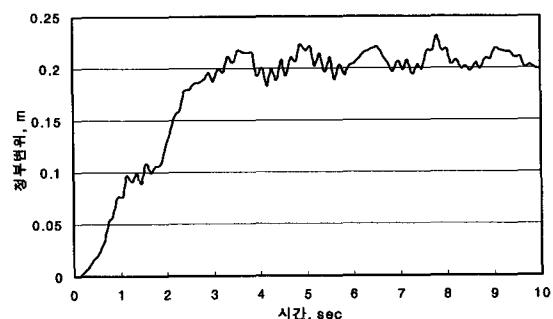


그림 8. 자유진동해석결과 정부침하 시간이력 예

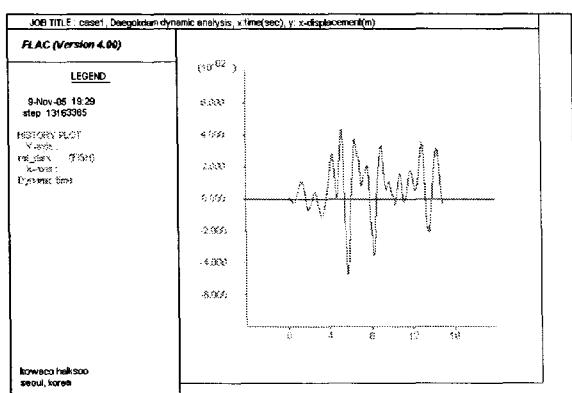


그림 9. 횡방향 변위시간이력 동적결과 예

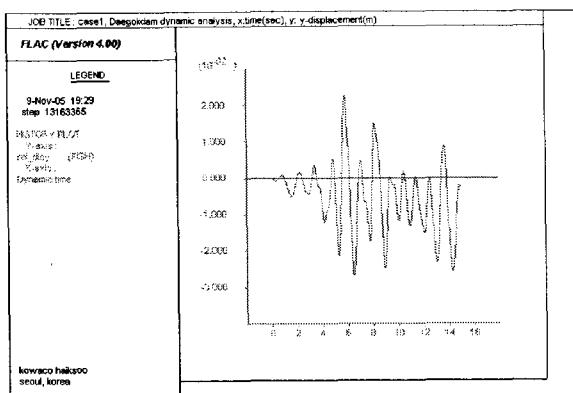


그림 10. 침하량 시간이력 동적결과 예

3.2 CFRD 정상부 변위 민감도분석 결과

본 연구에서는 민감도지수 중 편상관계수(Partial Correlation Coefficient, PCC)의 절대값을 비교함으로써 민감도를 정량적으로 분석하였다.

정적하중에 처한 댐 정부변위는 전단탄성계수에 크게 영향을 받는 것으로 나타났고 다음으로 점착력, 마찰각 순이었다. 이러한 경향은 침하량의 경우, 더욱 두드러지게 나타났다. 동적하중에 처한 댐 정부변위의 민감도는 정적해석결과와 마찬가지로 전단탄성계수의 영향이 단연 커다. 전단탄성계수의 영향도는 침하량이 횡방향변위 경우에 비해 더 크고 점착력과 마찰각에 비교해 상대적인 민감도 역시 침하량의 경우가 횡변위 경우보다 더 크게 나타났다. 즉, 동적거동 중 침하량은 전단탄성계수에 전적으로 의존하며 점착력과 마찰각에는 전혀 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

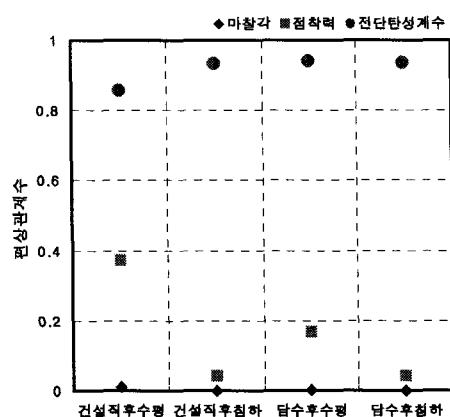


그림 11. CFRD 정적 정부 변위 민감도

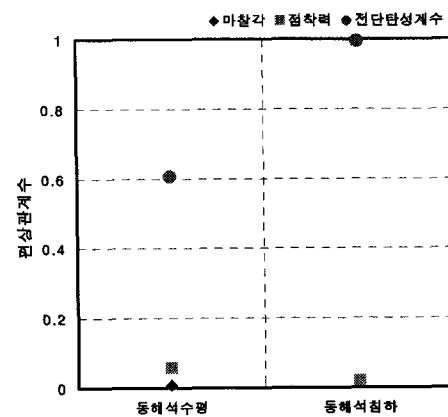


그림 12. CFRD 동적 정부 변위 민감도

3.3 전단탄성계수의 CFRD 정상부 변위 거동에 미치는 영향

그림 13은 전단탄성계수비, G/G_{min} 에 따른 정부침하량 비, d/d_{min} 의 변화를 도시한 그림이다. 여기서, G_{min} 은 사력재 통계특성치 중 전단탄성계수 하한값(88.5kg/cm^2 , 표 2)을, d_{min} 은 사력재 통계특성치 중 전단탄성계수 상한값(627kg/cm^2 , 표 2)을 입력치로 했을 때의 정부침하량 결과(건설직후 1.6cm, 담수 후 1.5cm, 동해석후 0.56cm)를 나타낸다. 따라서 그림 13에서 x축의 '1' 값에 해당되는 y축 값은 전단탄성계수 하한값일 때의 결과를, '7.06'에 해당되는 y축 값은 전단탄성계수 상한값일 때의 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 그림을 통해서 해석에 사용된 전단탄성계수 최대값은 최소값의 약 7배 정도이며 침하량의 결과는 최대 9.5배 정도의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 전단탄성계수가 커질수록 댐 정부 침하량은 로그함수적으로 감소함을 알 수 있고 건설직후, 담수후, 동해석시 모두 하나의 경향선으로 표현될 수 있었다.

그림 16은 전단탄성계수비, G/G_{min} 에 따른 정부 횡변위 비, d/d_{min} 의 변화를 도시한 그림이다. 여기서, G_{min} 은 사력재 통계특성치 중 전단탄성계수 하한값(88.5kg/cm^2 , 표 2)을, d_{min} 은 사력재 통계특성치 중 전단탄성계수 상한값(627kg/cm^2 , 표 2)을 입력치로 했을 때의 정부 횡변위 결과(건설직후 0.47cm, 담수 후 1.33cm, 동해석후 4.22cm)를 나타낸다. 따라서 그림 14에서 x축의 '1' 값에 해당되는 y축 값은 전단탄성계수 하한값일 때의 결과를, '7.06'에 해당되는 y축 값은 전단탄성계수 상한값일 때의 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 그림을 통해서 해석에 사용된 전단탄성계수 최대값은 최소값의 약 7배 정도이며 횡변위의 결과는 해석단계에 따라 1.7~9.7배 정도의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 전단탄성계수가 커질수록 댐 정부 횡변위는 로그함수적으로 감소하나 감소의 정도는 건설직후, 담수후는 하나의 경향선으로 나타났으나, 동해석시에는 달랐다.

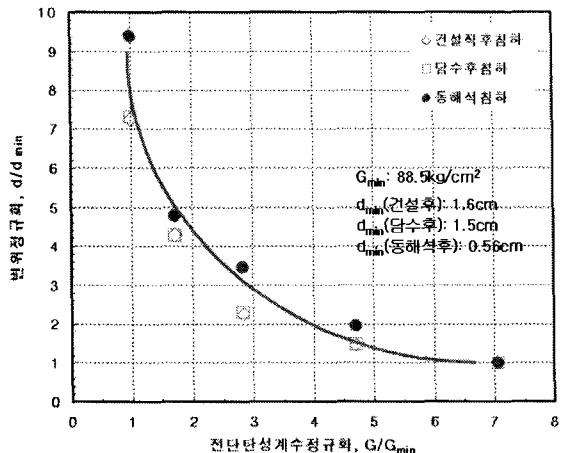


그림 13. 정상부 침하량 전단탄성계수 영향

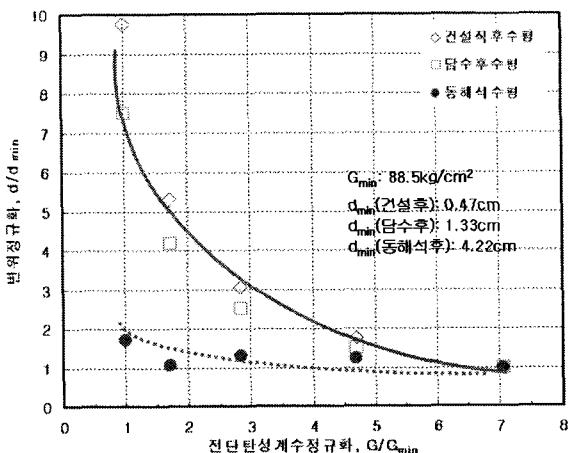


그림 14. 정상부 수평변위 전단탄성계수 영향

4. 결 론

본 연구에서는 정량적인 민감도분석을 수행하여 사력재료 주요물성들에 대한 중요도의 차이를 비교하여 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete-Faced Rockfill Dam)의 정상부 변위에 주된 영향을 미치는 물성을 결정하고자 하였다. 이러한 민감도분석을 통해 사력재료 물성 산정 시 중요하게 고려해야 할 물성을 제시하고, 중요물성 변화에 따른 CFRD 댐 정부 변위의 정량적 변화도를 보이고자 하였다. 민감도분석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 정적하중 하의 CFRD 정상부 변위는 사력재의 전단탄성계수에 크게 영향을 받는 것으로 나타났고 다음으로 겉보기점착력, 마찰각 순이었다. 이러한 경향은 침하량의 경우, 더욱 두드러지게 나타났다. 동적하중에 처한 CFRD 정상부 변위 민감도는 정적하중 상태와 마찬가지로 전단탄성계수의 영향이 단연 컸고, 특히 동적거동 중 침하량은 전단탄성계수에 전적으로 의존하며 점착력과 마찰각에는 전혀 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
2. 사력재의 전단탄성계수가 커질수록 댐 정상부 침하량은 로그함수적으로 감소함을 알 수 있고 건설직후, 담수 후, 동해석시 모두 하나의 경향선으로 표현될 수 있었다. 전단탄성계수 차로 인해 발생될 수 있는 침하량의 차는 약 9.5배 였다.
3. 사력재의 전단탄성계수가 커질수록 댐 정상부 횡변위는 로그함수적으로 감소하나 감소의 정도는 건설직후, 담수 후는 하나의 경향선으로 나타났으나, 동해석시는 달랐다. 전단탄성계수 차로 인해 발생될 수 있는 횡변위의 차는 약 10배 였다.

참 고 문 헌

1. 배규진, 이두화, 장수호, 김영근(2003), “숏크리트 라이닝의 거동해석에 영향을 미치는 입력변수들에 대한 민감도분석”, 대한토목학회논문집, 제23권, 제5C호, pp.345~356.
2. 하의수, 서민우, 정우성, 오병현(2005), “단기적 락필댐 침하량에 영향을 미치는 사력재료 입력물성 들에 대한 민감도분석”, 2005 대한토목학회 정기학술대회 발표논문집, pp.5512~5515.
3. 한국수자원공사(2001), 대형삼축시험기를 이용한 댐재료의 전단강도특성 연구, 한국수자원공사보고서
4. 한국수자원학회(2003), 댐설계기준, pp.453~471.