

# CFRD의 담수 후 정부침하량 예측

## Crest Settlement Prediction of Concrete Faced Rock-Fill Dam After Initial Impounding

김용성\*·박한규 (한국수자원공사)·임희대 (충남대학교)  
Kim, Yong Seong\*·Park, Han Gyu·Lim, Heui Dae

### Abstract

In this study, settlement characteristics of 23 CFRD was investigated from monitoring data and the method to estimate the crest settlements considering internal settlement during constructions was proposed. Moreover, crest settlement smaller than 20cm and deflection of face slab smaller than 20cm are not considered to be critical to the stability of large dam whose height is over 40m. Therefore, we assigned the region as safe zone that can be used as a guideline of maintenance of dam. These estimated data can be used in the design, construction and long-term maintenance in domestic CFRD hereafter.

### I. 서론

현재 우리나라의 댐 및 저수지의 총수는 약 18,000개소이며, 그 중 대댐 기준에 속하는 댐(높이 15.0m 이상, 높이 10m~15m로서 길이가 2,000m 이상과 저수용량이 300만 $m^3$  이상)은 1,214개소로 조사되었다. 이들 댐의 형식별 분포는 필댐이 1,171개소(96.5%)로 가장 많았으며, 코아형 필댐(65.5%), 균질형 필댐(26.6%), 락필댐(3.5%), CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam)(0.9%) 순으로 건설되었다. 1970년대 이전까지의 필댐의 형식은 주로 균질형 필댐과 코아형 필댐이 주류를 이루며 1970년 이후부터는 코아형 필댐과 더불어 락필댐이 주류를 이루게 되는데 1973년 소양강댐을 필두로 현재까지 42개의 락필댐이 건설되었다. 한편 1990년대 이후에 건설된 또는 설계중인 댐들은 점차 CFRD와 같이 기존의 댐 보다는 복잡하지만 좀 더 탁월한 성능을 보이는 댐 형식이 주류를 이루고 있다. 1985년 동북댐을 효시로 평화, 부안, 밀양, 남강, 산청양수 상·하부, 용담, 대곡, 탐진, 양양양수 상부댐 등 최근 10년간 CFRD가 다수 건설되었고 우리나라의 주요한 댐 형식으로 자리매김하였다.

한편, CFRD의 비약적인 양적(量的) 증가에도 불구하고 CFRD의 설계·시공·유지관리에 있어서 경험에 의존하는 경우가 많으며, CFRD의 거동 특성에 관한 연구도 미미한 실정이다. 특히 댐 건설 후의 침하량과 관련하여, 설계단계에서 장기침하량은 재료의 압축성과 축조시 다짐의 불균등에서 오는 간극 등을 고려하여 축조 완료 후로부터 댐 높이의 통상 0.1%~0.35% 정도로 추정하고 있다(댐 설계기준, 2005). Rockfill댐의 침하거동 연구에 있어, Soydemir & Kjaernsli(1979)는 초기 담수시와 10년 동안의 운영시의 정상부 최대 침하량 예측기법을 제안하였으며, Clements(1984)는 최량적합기법에 의해 Soydemir & Kjaernsli의 예측기법을 수정·보완하였고, Liu 등(1993)은 댐 건설 완료시점에서 축조재료에 기초한 CFRD의 락필 변형 특성을 연직변형을 및 압축계수로서 담수 후 CFRD 침하분포 추정식을 제안하였다. 그러나 Soydemir & Kjaernsli(1979) 및 Clements(1984)의 예측기법은 Membrane-Faced Rockfill댐을 대상으로 한 것으로 CFRD는 정작 3개의 댐만을 포함하였고, 상관계수도 초기 담수시 0.274, 10년 운영시 0.437로서 매우 낮아 적용성에 한계를 지닌다. 또한 Liu 등(1993)의 예측식은 대형압축시험을 통한 수직압축계수의 산정이 별도로 필요하여 활용성이 낮으며, 예측식의 검증이 1개의 댐 이외에 확인되지 않아 별도의 검증절차가 요구된다.

본 연구에서는 국내의 23개 CFRD의 건설중 및 건설후 침하 계측자료를 바탕으로 CFRD의 담수후 변형 거동 특성을 분석하고, CFRD 담수후 침하량 예측기법을 제안하였으며, 향후 국내 CFRD의 설계·시공 및 장기적인 유지관리에 필요한 기초자료를 제시하고자 하였다.

## II. CFRD의 침하 거동 특성

CFRD의 장기 침하량을 예측하는 다양한 식들이 현재까지 연구되어 왔으나 정확하게 침하량을 예측하는 데에는 많은 어려움이 있으며 이러한 어려움은 댐체의 침하에 직·간접적으로 영향을 미치는 다음의 <표 1> 같은 다양한 영향인자들에 기인한다. <표 2>는 각국의 CFRD 중에서 축조 중의 층별침하량 및 담수후의 정부 침하량 계측자료가 확보된 CFRD 현황을 나타낸다.

<표 1> 댐체 응력분포 영향 인자(Hunter and Fell, 2003)

구 분	영향 인자
축조제 사이즈	높이(H), 정상부 길이(L), L/H, 상류사면경사
Rockfill 재료의 물성 및 축조방법	지질, UCS, 입경, 균등계수, 입도분포 건조밀도, 간극비, 다짐층 두께, 롤러 중량, 다짐장비 통과횟수, 살수량

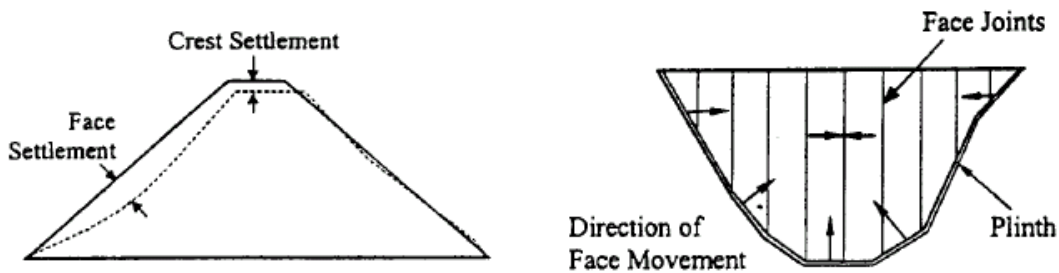
<표 2> CFRD 현황

No.	Dam	Country	Year	Height (m)	Length (m)	Face Area (10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	Shape Factor (A/H <sup>2</sup> )	Valley width ratio	Shape Coefficient	Slopes	Rock Type
1	Cethana	Australia	1971	110	215	30	2.5	2.0	2.2	1.3, 1.3	Quartzite
2	Alto Anchicaya	Colombia	1974	140	260	22.3	1.1	1.9	1.5	1.4, 1.4	Hornfels
3	Sugaroaf	Australia	1979	85	1050	83	11.5	12.4	11.9	1.5, 2.2	Siltstone
4	Foz do Areia	Brazil	1980	160	828	139	5.4	5.2	5.3	1.4, 1.4	Basalt
5	Mackintosh	Australia	1981	75	465	27.5	4.9	6.2	5.5	1.3, 1.3	Greywacke
6	Mangrove creek	Australia	1981	80	384	29	4.5	4.8	4.7	1.5, 1.6	Siltstone
7	Murchison	Australia	1982	94	200	17	1.9	2.1	2.0	1.3, 1.3	Rhyolite
8	Bastyan	Australia	1983	75	430	19	3.4	5.7	4.6	1.3, 1.3	Rhyolite
9	Khao Laem	Thailand	1984	113	910	140	11	8.1	9.5	1.4, 1.4	Limestone
10	Kotmale	Sri Langka	1984	90	620	60	7.4	6.9	7.1	1.4, 1.45	Gneiss
11	Dongbok	Korea	1985	44.7	188.1	7	3.5	4.2	3.9	1.5, 1.5	Andesite
12	Lower Pieman	Australia	1986	122	360	37.8	2.5	3.0	2.7	1.3, 1.3~1.5	Dolerite
13	Chengbing	China	1989	74.6	325	15.8	2.8	4.4	3.6	1.3, 1.3	Tuff lava
14	Xibeikou	China	1989	95	222	29.3	3.3	2.3	2.8	1.4, 1.4	Limestone
15	Segredo	Brazil	1993	145	705	86	4.1	4.9	4.5	1.3, 1.2~1.4	Basalt
16	Xingo	Brazil	1994	150	850	135	6.0	5.7	5.8	1.4, 1.3	Granite
17	Wananxi	China	1995	93.8	210	18	2.0	2.2	2.1	1.4, 1.4	Granite
18	Buan	Korea	1996	50	282	18.2	7.3	5.6	6.5	1.4, 1.4	Rhyolite
19	Tianshenqiao	China	2000	178	1168	156	4.9	6.6	5.7	1.4, 1.25	Limestone
20	Yongdam	Korea	2001	70	498	43	8.8	7.1	7.9	1.4, 1.4	Schist
21	Miryang	Korea	2001	89	535	54	6.8	6.0	6.4	1.4, 1.4	Granite
22	Sancheong(L)	Korea	2002	70.9	286.1	31.7	6.3	4.0	5.2	1.4, 1.4	Granite
23	Sancheong(U)	Korea	2002	86.9	360	23	3.1	4.1	3.6	1.4, 1.4	Gneiss

계곡부의 형태는 양안부 사면에 나타나는 아칭현상 때문에 댐체 내의 연직응력에 상당한 영향을 미친다(Pinto and Marques Filho 1998, Giudici et al., 2000). 계곡부 아칭 현상(cross-valley arching)은 댐 하부 1/3~1/2 의 범위에 걸쳐, 가파른 양안부 사면경사(50°이상, 하쪽에 따라)를 가진 좁은 협곡 (하폭이 댐높이의 30~40% 이하인 경우)일수록 두드러지게(연직응력 20% 이상 감소) 나타난다(Hunter and Fell, 2003). 계곡형상계수(Valley shape factor)는 콘크리트 페이스 면적(A, m<sup>2</sup>)을 댐 높이의 자승으로 나눈 값을 말하며, 계곡이 좁을수록 낮고 넓을수록 높은 값을 보인다(Pinto & Marques Filho, 1998).

또한 유사 개념의 계곡형상비(Valley width ratio)는 댐 길이를 댐 높이로 나눈 값으로 계곡형상을 고려한 댐체 거동 분석에 사용되어 왔다(Giudici et al., 2000). 그러나 계곡형상계수와 계곡형상비는 다음의 <표 2>에서 Khao Laem댐의 경우처럼 댐 길이가 긴 경우 다소 차이를 나타낸다. 또한 두 계수 중 어떤 계수가 좀 더 정확한 계곡형상을 나타내는지에 대한 정의를 내릴 수 없으므로 본 연구에서는 두 계수의 평균값(shape coefficient)을 사용하는 것으로 하였다.

CFRD의 담수 후 변형 특성을 나타내는 주요한 인자는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 정부침하량과 Face slab의 처짐이다. Giudici 등(2000)은 CFRD 축조 후 담수가 진행됨에 따라 <그림 1>과 같은 변형양상을 나타냄을 보고하였다.



<그림 1> 담수 후 제체의 변형과 face 면의 거동

CFRD의 정부 침하량과 Face slab의 처짐량을 정확하게 예측하는 것은 댐 설계자의 주된 관심사였으며, 이는 비단 시공시 더썩기 문제뿐만 아니라, 정상 운영시나 지진과 같은 특수한 환경을 겪을 때, 댐의 거동특성을 대표적으로 손쉽게 표현할 수 있는 항목이기 때문이다.

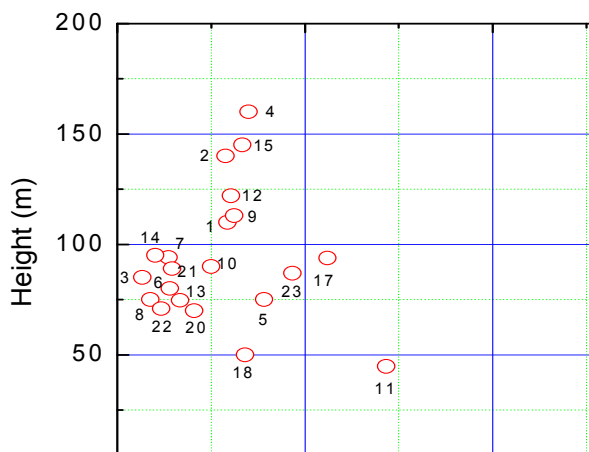
<표 3> CFRD의 건설중과 건설후의 침하량 비율

No.	Dam	Height (m)	settlement(%)		s/H(%)		No.	Dam	Height (m)	settlement(%)		s/H(%)			
			Internal	Crest	Internal	Crest				Internal	Crest	Internal	Crest		
1	Cethana	110	74.0	26.0	0.455	0.160	13	Chengbing	74.6	73.8	26.2	0.378	0.134		
2	Alto Anchicaya	140	78.5	21.5	0.450	0.124	14	Xibeikou	95	84.0	16.0	0.337	0.064		
3	Sugaroaf	85	83.3	16.7	0.235	0.047	15	Segredo	145	91.7	8.3	1.531	0.138		
4	Foz do Areia	160	94.5	5.5	2.238	0.131	16	Xingo	150	75.7	24.3	1.933	0.621		
5	Mackintosh	75	67.1	32.9	0.640	0.313	17	Wananxi	93.8	38.0	62.0	0.220	0.358		
6	Mangrove creek	80	83.7	16.3	0.538	0.105	18	Buan	50	68.3	31.7	0.880	0.408		
7	Murchison	94	70.4	29.6	0.207	0.087	19	Tianshenqiao	178	75.6	24.4	1.843	0.596		
8	Bastyan	75	76.2	23.8	0.227	0.071	20	Yongdam	70	73.8	26.2	0.496	0.176		
9	Khao Laem	113	88.0	12.0	1.212	0.165	21	Miryang	89	83.0	17.0	0.483	0.099		
10	Kotmale	90	85.1	14.9	0.956	0.167	22	Sancheong(L)	70.9	79.2	20.8	0.375	0.099		
11	Dongbok	44.7	43.3	56.7	0.736	0.962	23	Sancheong(U)	86.9	58.0	42.0	0.444	0.322		
12	Lower Pieman	122	55.8	44.2	0.189	0.149									
										<i>Mean</i>		74.0	26.0	0.899	0.482

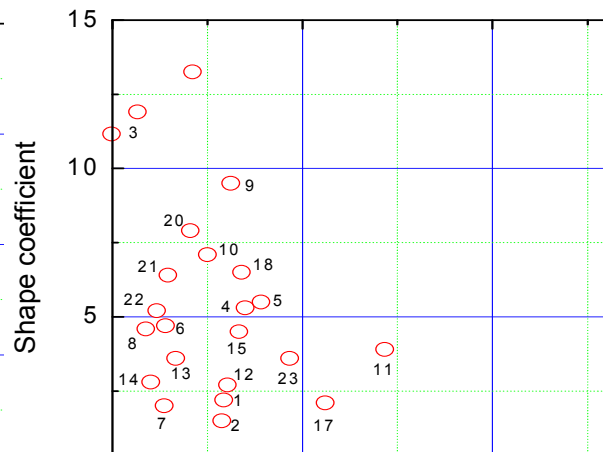
<표 3>은 <표 2>에 기재된 23개 CFRD의 건설중과 건설후의 침하량 비율을 나타낸 것으로, 전체 평균 결과, 건설 과정에서 총 침하량의 74%가 발생되고 나머지 26%는 담수 후에 발생함을 알 수 있다. 또한 댐 높이와 건설중의 최대층별침하량의 비를 구한 결과 전체적인 평균치의 경우 약 0.9%이며, 정부침하량의 경우는 약 0.48%로 나타나 댐 축조 완료후의 장기침하량도 상당 부분 발생함을 알 수 있다.

일반적으로 CFRD는 최소한 풍화암층 위에 축조하게 되므로 기초의 압축에 의한 침하는 크지 않다고 볼 수 있으며, 경험적으로 댐체 대부분의 침하는 공사기간 중에 발생하는 것으로 알려져 왔다. 그러나 <표 3>에서 보는 바와 같이 담수 후의 변형도 댐 높이의 약 0.05~0.96%에 이르는 등 상당량의 침하가 발생되므로 건설중의 침하량을 근간으로 담수후의 침하량을 예측하는 방법을 개발하여 담수 시점에서 충분한 대비를 할 수 있도록 하는 방안이 요구되고 있다.

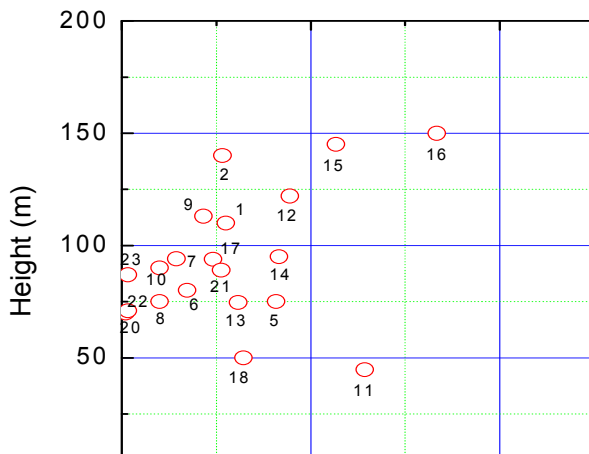
<그림 2>~<그림 5>는 <표 2>에 기재된 23개 CFRD 계측자료의 댐 높이, 계곡형상계수에 따른 정부침하량과 Face slab의 처짐량과의 관계를 도시한 것이다. <그림 2> 및 <그림 3>에서 보는 바와 같이 다소 댐 높이가 높아짐에 따라 정부침하량도 증가하는 경향이 있기는 하지만 정부침하량과 댐 높이는 밀접한 관련은 없는 것으로 나타났으며, 계곡형상계수도 정부침하량과 큰 관련은 없는 것으로 조사되었고 다만 계곡형상계수가 5 내외에서 정부침하량은 약간 큰 값을 나타냈다. 이러한 것은 댐 축조중의 침하량이 계곡형상계수와 비례하는 것과는 다른 양상으로 <표 1>에서 언급한 인자들의 상호 복잡한 관련성 이외에, 댐 축조중의 다짐은 계곡의 형상과 일치하는 중력방향이나, 담수 후의 정부침하량은 물하중은 Face slab의 경사방향에 직각으로 작용하는 점도 그 원인 중의 하나로 생각된다.



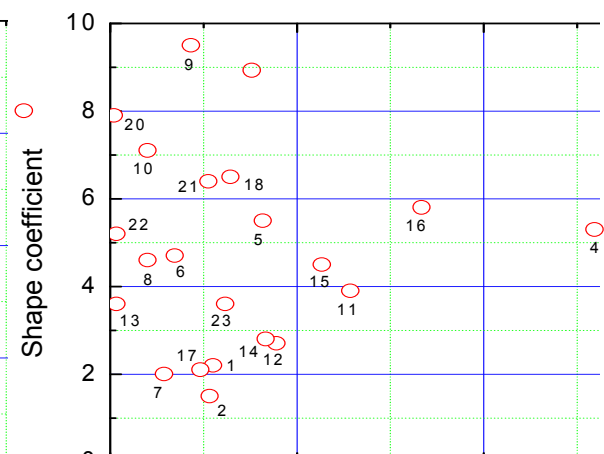
<그림 2> 댐 높이와 정부 침하량 관계



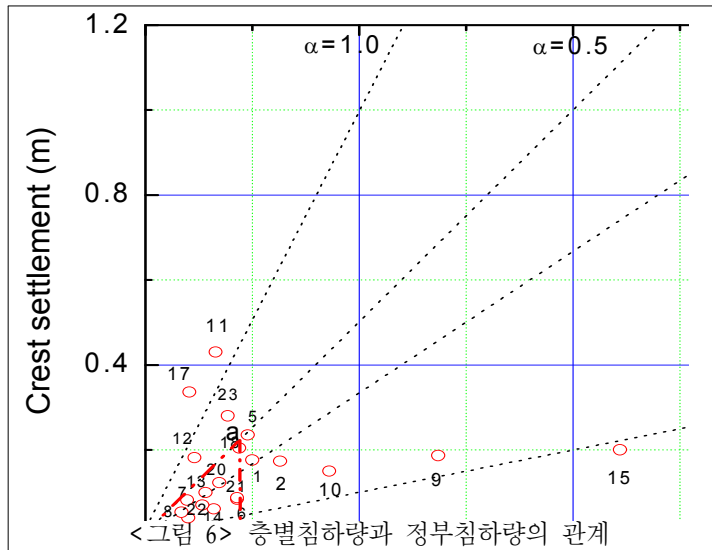
<그림 3> 형상계수와 정부 침하량 관계



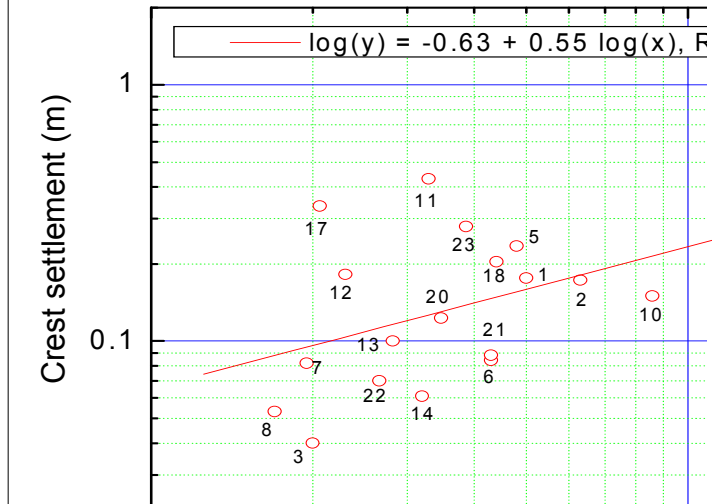
<그림 4> 댐 높이와 Face slab의 처짐과의 관계



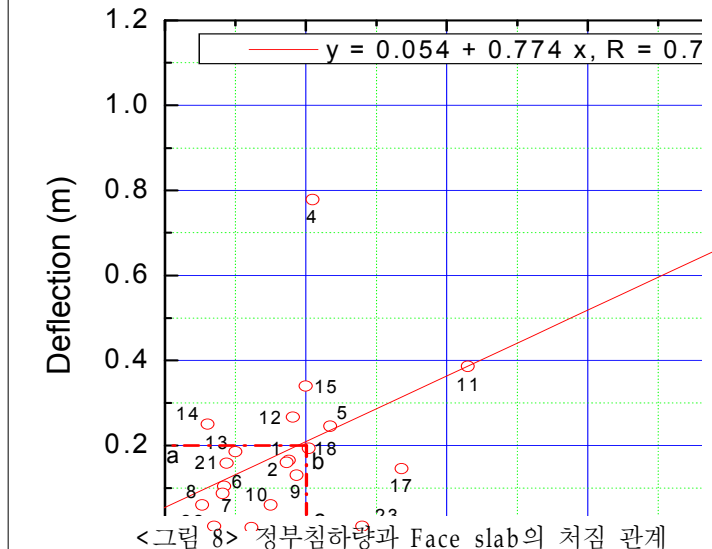
<그림 5> 형상계수와 Face slab의 처짐과의 관계



<그림 6> 증별침하량과 정부침하량의 관계



<그림 7> 증별침하량과 정부침하량의 대수 관계



<그림 8> 정부침하량과 Face slab의 처짐 관계

<그림 4> 및 <그림 5>는 Face slab의 처짐과 댐 높이 및 계곡형상계수와의 관계를 나타낸 것으로 댐 높이가 높아질수록 Face slab도 길어지므로 Face slab의 처짐량은 댐 높이와 상호 관련성이 있으나, 계곡형상과는 크게 관련이 없음을 알 수 있다.

### III. CFRD의 정부 침하량 예측

CFRD에서의 침하관리를 위한 예측은 주로 시공시의 설계조건의 확인과 건설후 댐의 안전관리를 목적으로 실시한다. 일반적으로 댐체의 정부침하량은 시험담수 개시일로부터 측정된 사례가 많다. 실제로 댐체의 침하(정부침하)는 성토 완료시점부터 진행됨으로 댐체의 거동해석에 대한 정밀도를 높이기 위해서는 초기 침하량을 고려하는 것이 중요하다.

<그림 6>은 증별침하량과 정부침하량의 관계를 나타낸 것으로 정부침하량은 증별침하량의 0.1~0.5배 정도로 나타났다. 특히 <그림 6>에서 40m 이상 대부분의 CFRD가 원점과 a, b점을 연결하는 삼각형(증별침하량 40cm, 정부침하량 20cm 이내)에 위치하였다. 이들 댐은 안정성에 크게 문제가 있음이 보고된 바 없으므로 증별침하량 40cm와 정부침하량 20cm이내는 댐의 안정성에 크게 문제가 될 만한 수준이 아닌 것으로 판단할 수 있으며 따라서 이러한 삼각형 Zone을 소위 '안전구역(Safety Zone)'으로 제안하고자 한다. 현재 CFRD에 대한 안전관리 기준이 따로 마련되어 있지 않은 상황에서 이러한 근거들은 추후 CFRD 유지·관리 기준에 안전성 판정방법에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

<그림 7>은 최량적합기법에 의해 층별침하량으로부터 정부침하량을 구하는 방법을 도시한 것으로서 다음의 (1)식과 같다.

$$\log(y) = -0.63 + 0.55 \log(x), \quad R=0.63 \quad (1)$$

여기서, y는 정부침하량, x는 층별침하량, R는 상관 계수

한편, <그림 8>은 정부침하량과 Face slab의 처짐 관계를 나타낸 것으로 다음의 (2)식과 같은 상관 관계를 보인다.

$$y = 0.054 + 0.774 x, \quad R=0.752 \quad (2)$$

여기서, y는 Face slab의 처짐, x는 정부침하량, R는 상관계수

또한, <그림 8>에서 원점과 a, b, c점을 연결하는 사각형(정부침하량 20cm, Face slab 처짐량 20cm이내)도 안전구역(Safety Zone)으로 판단하여도 좋을 것으로 사료된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 국내·외 23개 CFRD의 건설중 및 건설후 침하 예측자료를 바탕으로 CFRD의 담수후 변형 거동 특성을 분석하고, CFRD 담수후 침하량 예측기법을 제안하였으며, 향후 국내 CFRD의 설계·시공 및 장기적인 유지관리에 필요한 기초자료를 제시하고자 하였다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 댐 높이가 높아짐에 따라 정부침하량도 증가하는 경향이 있기는 하지만 정부침하량과 댐 높이는 밀접한 관련은 없는 것으로 나타났으며, 계곡형상계수도 정부침하량과 큰 관련은 없는 것으로 조사되었고, 다만 계곡형상계수가 5 내외에서 정부침하량은 약간 큰 값을 나타냈다.
- 2) 40m이상의 CFRD에서 층별침하량 40cm, 정부침하량 20cm이내이고 정부침하량/층별침하량의 비가 0.5이하인 경우 및 정부침하량 20cm, Face slab 처짐량 20cm이내인 경우는 댐의 안정성에 크게 문제가 될 만한 수준이 아니므로 안전구역(Safety Zone)으로 설정하여 댐의 유지·관리 기준에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) 최량적합기법에 의한 층별침하량으로부터 정부침하량을 구하는 방법을 제안하였으며 향후 국내 CFRD의 설계·시공 및 장기적인 유지관리에 필요한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 한국수자원학회(2005), 댐설계기준, pp.169-277.
2. Fitzpatrick, M. D., Cole, B. A., Kinstler, F. L. and Knoop, B. P. (1985), Design of Concrete-Faced Rockfill Dams, *Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction, and Performance*, Cooke, J. B and Sherard J. L., ed., pp.410-434.
3. Giudici, S., Herweynen, R. and Quinlan, P. (2000), HEC Experience in Concrete Face Rockfill Dams - Past, Present and Future, *Proc. of International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams*, Beijing, pp.29-46.
4. International Water Power & Dam Construction (2004), *Year Book 2004*, pp.282-288.
5. Korea Water Resources Corporation (2005), *Dam Integration Information System*.
6. Pinto, N. L. S. and Marques Filho, P. (1998), Estimating the Maximum Face Deflection in CFRDs, *The International Journal on Hydropower & Dams*, Vol.5, Issue 6, pp.28-31.