

## 표준간극비를 이용한 콘크리트 표면차수벽형 석피댐 축조재료의 다짐 관리

### Compaction Management of Fill Materials for Concrete Faced Rockfill Dam Using Standard Void Ratio

김 용 성\*

Kim, Yong-seong

#### Abstract

In this study, construction modulus, void ratio and settlement characteristics of 38 CFRD in domestic and foreign countries were investigated from monitoring data. The effect of field dry density and void ratio to dam body was analyzed. The standard void ratio of CFRD that can be easily used by dam designers and field engineers was proposed from the monitoring data. It was confirmed that we can get the degree of compaction needed for reasonable compaction of dam body by calculating the field dry density from inverse operation of the standard void ratio. It was thought that the void ratio of CFRD depends on shape coefficient and in case of a high shape coefficient, the void ratio was high with its void ratio 0.17~0.38.

*Keywords : Concrete faced rockfill dam, Compaction, Construction modulus, Settlement, Void ratio*

#### I. 서 론

2005년 현재, 우리나라에서 건설된 9개의 대형 댐들이 콘크리트 표면차수벽형 석피댐(Concrete Faced Rockfill Dam, 이하 'CFRD'라 약칭함)이며, 9개의 다목적댐 혹은 용수 전용댐들이 CFRD형식으로 건설중(또는 예정)이다. 암석자원이 풍부한 우리나라의 경우 축조 재료원 구득이 쉬워 다른 타

입의 필댐보다 CFRD는 경제적 설계가 가능하며, 댐체 축조시 기상의 영향을 적게 받고, 큰 입석재로 축조되므로 파이프 등 누수에 대해 저항력이 강한 장점을 가지고 있어 1990년대 후반부터 주요한 댐 형식의 하나로 급부상하였다(Korea Water Resources Corporation, 2005).

또한 CFRD는 댐 높이가 동일할 경우 사면경사를 급하게 할 수 있으므로 암석개발 물량을 줄여 환경훼손을 적게 할 수 있으며, 체체 내부에 간극수압이 걸릴 수 없는 구조이므로 지진 발생시에도 유효응력의 감소가 없고 암석재의 주 축조재료인 암피의 잇물림 작용으로 지진에 대한 안정성도 높

\* 소망방재청 방재대책팀 토목사무관  
\* Corresponding author. Tel.: +82-2-2100-5412  
Fax: +82-2-2100-5419  
E-mail address: nakisuna@nema.go.kr

은 특징이 있으며 이러한 이유로 인해 중국, 스페인, 미국, 호주, 루마니아, 칠레, 브라질 등 세계 각국에서도 많은 인기를 누리고 있다(Cooke, 1998).

CFRD가 널리 알려지게 된 것은 1955년 스코틀랜드의 Quoich댐에서 Rockfill 재료를 진동롤러로 다짐함으로써 누수량을 상당량 줄일 수 있음을 확인한 ‘다짐공법’이 계기가 되었으며, 1968년 호주의 Risdon Brook댐 건설 이후 CFRD의 다짐공법이 정착되었고, 1973년 Cethana댐에서의 슬립폼(slip form) 적용에 의한 차수벽의 수평이음 제거 방법의 도입으로 CFRD의 안전성 및 경제성의 탁월함이 확인되어, 이후 CFRD가 세계 도처에 속속 건설되기 시작하였다(Fitzpatrick, 1973).

한편, CFRD의 괄목할만한 양적(量的) 증가에도 불구하고 CFRD의 설계·시공·유지관리 기준은 경험적인 방법에 의존하는 경우가 많다. 일반적인 비점성토의 상대밀도 시험방법은 KSF 2345에 규정되어 있으나 댐 축조재료와 같이 입경이 큰 조립재료에 대한 표준상대밀도 시험방법은 없으며, CFRD 축조재료(통상 800~1500 mm 이하의 암석)는 경험에 의한 상대밀도 시험방법으로 다짐기준을 설정하고 있는 실정이다(Korea Water Resources Corporation, 2004). 그로 인해 다짐도 결정시 최대건조밀도 산정에 있어 다짐에너지, 다짐시간 선정 등에 실험자의 주관이 개입되고, 현장 건조밀도 측정시 상당한 시간과 노력이 요구되는 등 댐 현장에서

의 다짐관리 기준을 설정하는데 많은 어려움이 있다.

또한, 댐 축조재료는 암석재료로서 암중에 따라 비중이 다르므로 일률적으로 현장건조밀도만을 이용하여 다짐관리 기준을 설정하면 암중에 따라 각 댐 현장마다 체체의 간극비가 큰 차이를 나타낼 수 있으므로 침하양상도 많이 달라져 종합적인 유지관리에 문제가 발생할 우려가 있다. 간극비는 비중과 건조밀도의 비와 관련되므로 댐 체체 내부의 간극은 현장건조밀도 뿐만 아니라 암석 재료의 비중과도 밀접한 관련을 가지므로 종합적인 CFRD의 설계·시공·유지 관리를 위해서는 현행의 건조밀도를 이용하여 다짐도를 결정하는 것 보다 간극비를 이용하는 것이 타당성을 갖는다 할 수 있다.

본 연구에서는 국내·외 38개의 CFRD 계측자료를 분석하여 댐 건설 중 변형계수(Construction modulus, 이하 ‘변형계수’라 한다), 간극비, 침하량 관계를 고찰하고 현장건조밀도 및 간극비가 체체의 다짐에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 CFRD의 다짐관리 방법으로서 표준 간극비를 이용하는 방법을 제안하였으며, 향후 국내 CFRD의 설계·시공 및 장기적인 유지관리에 필요한 기초자료로서 제공하고자 하였다.

## II. CFRD의 계측자료 분석

CFRD는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 댐 단면이

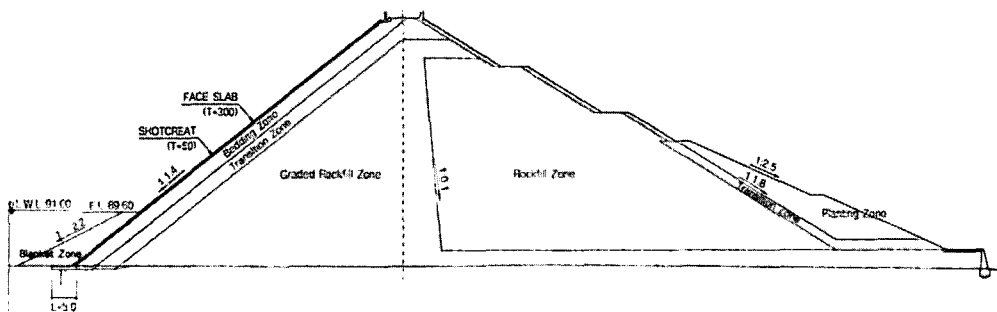


Fig. 1 A cross section of concrete faced rockfill dam

Table 1 The list of CFRD

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	Void ratio	Density (kN/m <sup>3</sup> )	Rock type
1	Cethana	Australia	1971	110	215	30	2.5	2.0	2.2	0.26	20,286	Quartzite
2	Alto Anchicaya	Colombia	1974	140	260	22.3	1.1	1.9	1.5	0.22	22,344	Hornfels
3	Little Para	Australia	1977	54	-	10	3.4	-	3.4	0.223	21.07	Shale
4	Sugaroaf	Australia	1979	85	1050	83	11.5	12.4	11.9	0.302	20,286	Siltstone
5	Foz do Areia	Brazil	1980	160	828	139	5.4	5.2	5.3	0.33	20,776	Basalt
6	Mackintosh	Australia	1981	75	465	27.5	4.9	6.2	5.5	0.23	21.56	Greywacke
7	Mangrove creek	Australia	1981	80	384	29	4.5	4.8	4.7	0.26	20,188	Siltstone
8	Tullabardine	Australia	1982	26	200	5.5	8.1	7.7	7.9	0.23	21,756	Greywacke
9	Murchison	Australia	1982	94	200	17	1.9	2.1	2.0	0.17	22,246	Rhyolite
10	Fortuna 1st	Panama	1982	60	1056	22	6.1	17.6	11.9	-	22.6	Andesite
11	Bastyan	Australia	1983	75	430	19	3.4	5.7	4.6	0.23	21.56	Rhyolite
12	Khao Laem	Thailand	1984	113	910	140	11	8.1	9.5	0.29	20.58	Limestone
13	Shiroro	Nigeria	1984	125	560	65	4.2	4.5	4.3	0.2	21,815	Granite
14	Kotmale	Sri Langka	1984	90	620	60	7.4	6.9	7.1	0.27	21.56	Gneiss
15	Dongbok	Korea	1985	44.7	188.1	7	3.5	4.2	3.9	-	18.87	Andesite
16	Lower Pieman	Australia	1986	122	360	37.8	2.5	3.0	2.7	0.24	22,413	Dolerite
17	Pyeonghwa(1st)	Korea	1988	80	410	45.7	7.1	5.1	6.1	0.4	19.6	Gneiss
18	Guanmenshan	China	1988	58.5	183.6	8.2	2.4	3.1	2.8	0.306	19,502	Andesite
19	Chengbing	China	1989	74.6	325	15.8	2.8	4.4	3.6	0.277	20,188	Tuff
20	White Spur	Australia	1989	43	146	4.3	2.3	3.4	2.9	0.215	22.54	Tuff
21	Xibeikou	China	1989	95	222	29.3	3.3	2.3	2.8	0.26	21,364	Limestone
22	Longxi	China	1990	58.9	140.5	7.07	2.0	2.4	2.2	-	19.22	Tuff
23	Zhushuqiao	China	1990	78	245	23	3.8	3.1	3.5	0.202	20.58	Limestone
24	Huashan	China	1993	80.8	160.4	13.03	2.0	2.0	2.0	0.283	20.09	Granite
25	Segredo	Brazil	1993	145	705	86	4.1	4.9	4.5	0.38	20,874	Basalt
26	Xingo	Brazil	1994	150	850	135	6.0	5.7	5.8	0.28	21.07	Granite
27	Wananxi	China	1995	93.8	210	18	2.0	2.2	2.1	0.257	20,874	Granite
28	Buan	Korea	1996	50	282	18.2	7.3	5.6	6.5	0.25	19.34	Rhyolite
29	Tianshenqiao	China	2000	178	1168	156	4.9	6.6	5.7	0.31	21,462	Limestone
30	Yongdam	Korea	2001	70	498	43	8.8	7.1	7.9	0.32	19.6	Schist
31	Miryang	Korea	2001	89	535	54	6.8	6.0	6.4	0.18	21.27	Granite
32	Namgang	Korea	2001	34	1126	41.8	36.2	33.1	34.6	0.27	20.58	Gneiss
33	Machadinho	Brazil	2002	125	700	77.3	5.0	5.6	5.3	-	-	Basalt
34	Sancheong(L)	Korea	2002	70.9	286.1	31.7	6.3	4.0	5.2	-	20,384	Granite
35	Sancheong(U)	Korea	2002	86.9	360	23	3.1	4.1	3.6	-	20,384	Gneiss
36	Tamjin	Korea	2005	53	403	30	10.7	7.6	9.1	0.28	20.22	Tuff
37	Yangyang	Korea	2005	72	347	26	5.0	4.8	4.9	0.28	20.35	Gneiss
38	Daegok	Korea	2005	52	190	10	3.7	3.7	3.7	0.25	21.07	Gneiss

물과 접하는 상류부에 차수를 위한 plinth 및 콘크리트 표면차수벽과 차수벽을 지지하는 차수벽 지지 존 및 암석존으로 구성되는 댐 형식을 말한다.

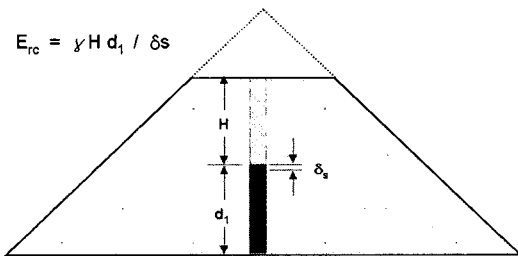
또한, 계곡형상계수(Valley shape factor)는 콘크리트 페이스 면적( $A, m^2$ )을 댐 높이의 제곱으로 나눈 값을 말하며, 계곡이 좁을수록 낮고 넓을수록 높은 값을 보인다(Pinto & Marques Filho, 1998). 유사 개념의 계곡형상비(Valley width ratio)는 댐 길이를 댐 높이로 나눈 값으로 계곡형상을 고려한 댐체 거동 분석에 사용되어 왔다(Giudici et al., 2000). 그러나 계곡형상계수와 계곡형상비는 Table 1에서 볼 수 있듯이 Fortuna 1st댐, Khao Laem 댐, Namgang댐, Tamjin댐의 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, 이하 '형상계수'라 한다)을 사용하는 것으로 하였다.

변형계수(Construction modulus)는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 침하계 상부 및 하부 록필의 높이, 록필의 단위중량 및 침하량으로부터 구하며 모암재료 및 록필의 간극비에 의존한다(Fitzpatrick et al., 1985).

$$E_{rc} = H \times \gamma \times d_1 / (1000 \times \delta s) \dots\dots (1)$$

여기서:  $E_{rc}$  = 변형계수 (MPa),

$H$  = 침하계 상부 록필의 높이 (m),



Modulus during construction  
Fig. 2 Modulus during construction

$\delta s$  = 침하량 (m),

$\gamma$  = 록필의 단위중량 ( $kN/m^3$ )

$d_1$  = 침하계 하부 록필의 높이 (m)

Fig. 3~Fig. 6은 국내·외 38개 CFRD 계측자료로부터 얻어진 간극비, 변형계수, 상대침하율, 형상계수, 현장밀도와의 관계를 나타내며, 그림에 표현된 숫자는 Table 1의 CFRD 번호를 의미한다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 형상계수 4를 기준으로 하여 간극비와 변형계수의 분포양상이 달라짐을 알 수 있으며, 간극비가 낮을수록 변형계수는 커지고 간극비가 높을수록 변형계수는 작아짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 4에서는 변형계수와 상대침하율(침하량/댐 높이\*100(%))의 대수관계에서는 반비례함을 알 수 있다. 특히 상대침하율이 낮을수록 간극비가 0.17~0.28정도로 상대적으로 낮게 나타났으며, 상대침하율이 높을수록 간극비가 0.28~0.38정도로 상대적으로 높게 나타났다. 따라서 간극비가 상대적으로 높으면 침하량이 큼을 예측할 수 있고, 간극비를 낮게 함으로 댐 체체의 침하량을 줄이고 압축강도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

또한 Fig. 3~Fig. 4를 이용하여 계곡형상에 따른 CFRD의 적정 다짐을 위한 표준 간극비가 결정될 수 있다면 암중에 따른 비중은 시험을 통해 알 수 있으므로 목표의 현장건조밀도는 쉽게 얻을 수 있다.

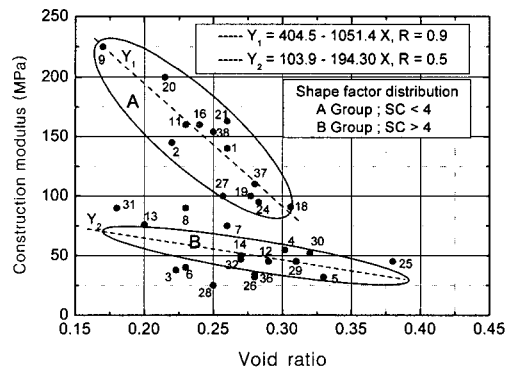


Fig. 3 Relationship between void ratio and construction modulus

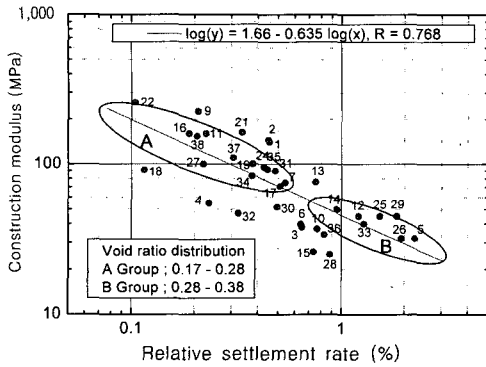


Fig. 4 Relationship between construction modulus and relative settlement rate

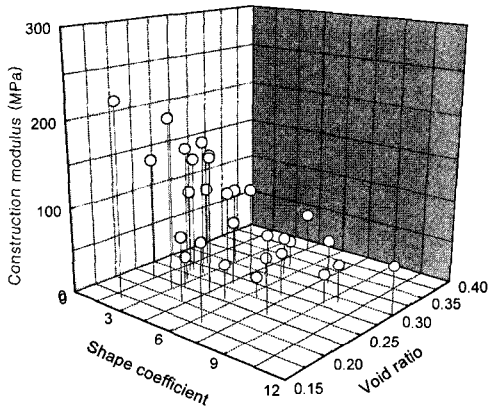


Fig. 5 Relationship between construction modulus, shape coefficient and void ratio

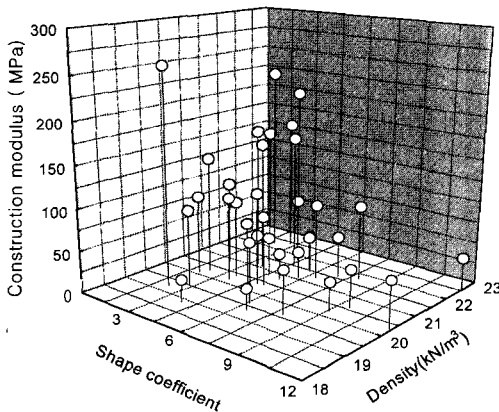


Fig. 6 Relationship between construction modulus, shape coefficient and density

Fig. 5는 간극비를 변형계수 및 형상계수와 비교한 결과를 나타낸 것으로 간극비는 다른 두 Factor와 비교적 직선 혹은 곡선적 관계가 smooth하게 나타나고 있다. 한편, 현장건조밀도는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 변형계수 및 형상계수와의 관계에서 다소 불규칙적인 양상을 나타내고 있다. Fig. 5와 Fig. 6을 통해 알 수 있듯이 동일한 건조밀도로 축조된 댐에서 모암의 비중이 다르면 간극비가 다르게 되어 변형-강도 특성이 달라지므로, 현재의 방법과 같이 실내시험 및 현장건조밀도시험을 통해 상대밀도를 구하고 그에 따라 다짐도를 구하는 방법은 모암의 영향을 고려할 수 없다. 비교적 시공 실적이 많지 않은 CFRD는 국내 및 외국의 타댐과의 상호 비교 분석을 통한 안정성 평가 및 종합적인 유지 관리가 필요하며 이 때 제체의 건조밀도 보다는 모암의 비중을 고려한 간극비를 기준으로 응력-변형 특성을 비교 분석하는 것이 보다 더 효과적일 것이므로 다짐관리도 간극비로서 하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

### III. 표준간극비를 이용한 CFRD의 다짐 관리 기준

#### 1. CFRD의 각 Zone별 포설 방법

CFRD는 Zone-1(Upstream blanket), Zone-2(Face slab bedding), Zone-3A(Transition), Zone-3B(Main rockfill) Zone-3C(Sub rockfill) 등으로 구분되며 CFRD의 축조재료별 포설 방법은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

#### 2. CFRD의 다짐관리 기준

댐 현장에서의 일반적인 다짐관리 기준은 상대다짐(Relative compaction), 즉 다짐도와 상대밀도에 의한 방법이 있다.

Table 2 Design status of fill materials for CFRD in Korea

Dam	Year	Hight (m)	Zone	Particle size (mm)	Density (kN/m <sup>3</sup> )	Friction angle (deg.)	Number of passes	Layer thickness (cm)	Roller weight (kg)	Driving speed (km/h)
Buan	1990	50.0	2	75	20.58	45	7	30	10,000	4
			3A	150	20.58	43	6	50		
			3B	800	19.60	43	4	100		
			3C	1,500	18.62	41	6	160		
Yongdam	1991	70.0	2	75	21.56	45	6	-	10,000	4
			3A	150	20.58	43	6	-		
			3B	800	19.11	43	6	100		
			3C	1,500	18.62	41	6	160		
Daegok	1996	52.0	2	75	20.58	45	6	-	10,000	4
			3A	150	19.11	43	6	-		
			3B	800	20.97	43	5	-		
			3C	600	19.21	40	4	-		

$$R = \frac{\gamma_d(\text{Field})}{\gamma_{d\max}(\text{Lab})} \times 100(\%),$$

$$Dr = \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min}} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

여기서,  $R$ 은 다짐도,  $\gamma_{d\max}$ ,  $\gamma_{d\min}$ 는 각각 최대, 최소건조밀도,  $\gamma_d$ 는 현장건조밀도

그러나 이 방법들은 전술한 바와 같이 동일한 다짐도일지라도 축조재료의 암중에 따라 간극비가 달라져 담 축조과정 및 축조완료 후의 유지 관리에 있어 변형 특성 분석에 어려움이 따르므로 다음의 식 (3)과 같이 간극비로서 다짐관리 하는 것이 타당성을 갖는다.

$$R = \frac{e(\text{Field})}{e_{\max}(\text{Lab})} \times 100(\%),$$

$$Dr = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \dots \dots \dots (3)$$

여기서,  $e_{\max}$ ,  $e_{\min}$ 는 각각 최대, 최소간극비,  $e$ 는 현장 간극비

한편, 실내시험으로 최대건조밀도와 최대간극비

를 구할 경우, 축조재료가 1,500 mm 이하로서 대형이며 표준 시험 방법이 없는 관계로 다짐시간 및 다짐에너지 등의 결정 및 실험결과에 실험자의 주관이 개입될 수밖에 없다. 이러한 실정에서 현실적 대안의 하나로서 CFRD의 표준 간극비를 Fig. 3~4로부터 참고하여 현장의 건조밀도를 역산하는 방법을 제안한다.

$$\gamma_d = \frac{G\gamma_w}{e_s + 1} \dots \dots \dots (4)$$

여기서,  $e_s$ 는 CFRD의 표준 간극비,  $G$ 는 축조재료의 비중,  $\gamma_w$ 는 물의 단위 중량,  $\gamma_d$ 는 현장건조밀도

### 3. 표준간극비 결정 방법

국내외 CFRD의 축조중 계측된 간극비와 형상계수의 관계를 Fig. 7에 나타내었으며 표준간극비는 식 (5)와 같은 방법으로 얻을 수 있다. 식 (5)에서 상관계수가 다소 낮은 경향이 있으나 추후 다른 담

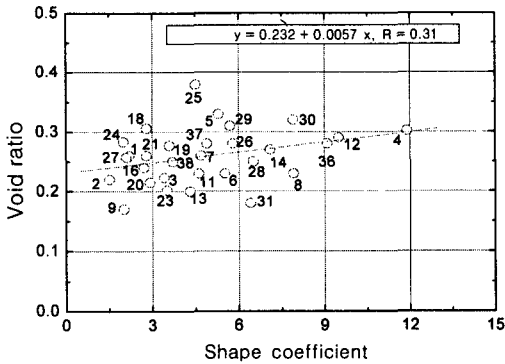


Fig. 7 Relationship between shape coefficient and void ratio

의 계측 값을 확보하여 상관계수 값이 높아지도록 수정·보완해 나가도록 하여야 할 것이다. Fig. 7에서 국내의 대표적인 CFRD인 부안댐 및 용담댐, 탐진댐, 양양댐, 대곡댐 등은 표준간극비와 근접한 곳에 분포되어 있음을 알 수 있다.

$$y = 0.232 + 0.0057 x, \quad R = 0.31 \dots \dots (5)$$

여기서, y는 표준간극비, x는 형상계수, R는 상관계수

Pinto 등(1998)은 록필의 간극비가 체체의 변형성에 미치는 영향은 명백하며 체체가 조밀할수록 변형계수는 커지고 계곡형상과도 관계가 있음을 보고한 바 있다. Hunter and Fell(2003)은 계곡부 형상과 양안부 사면경사가 댐의 응력분포에 미치는 영향을 검토하여 계곡부의 아칭현상이 좁은 협곡일수록 두드러지게 나타난다고 하였다. 또한 댐체 응력분포 영향인자로서 간극비를 비롯하여 입도분포, 균등계수, 일축압축강도, 건조밀도, 다짐두께, 롤러중량, 다짐횟수 등의 록필재료 물성 및 축조방법과 체체의 높이 및 길이, 상·하류면 경사 등의 체체의 형상 등이 있음을 보고하였다.

본 연구에서는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 CFRD의 간극비는 계곡형상에 의존하며 형상계수가 클수록 간극비는 커지고, 대략 0.17~0.38 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 국내·외 38개의 CFRD 계측자료를 분석하여 변형계수, 간극비, 침하량 관계를 고찰하고 현장건조밀도 및 간극비가 체체에 미치는 영향을 분석하였으며, CFRD의 다짐관리 방법으로서 표준 간극비를 이용하는 방안을 제안하여 향후 국내 CFRD의 설계·시공 및 장기적인 유지관리에 필요한 기초자료로서 제공하고자 하였다. 본 연구를 통해 제시된 주요한 결론은 다음과 같다.

1) 현재까지 시공 실적이 많지 않은 CFRD 분야에서 국내·외의 타댐과 상호 비교 분석을 통한 안정성 평가는 필수적이며, 이 때 건조밀도 보다 간극비를 기준으로 변형 특성을 비교 분석하는 것이 보다 더 효과적이므로 다짐관리도 간극비로서 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

2) 국내·외 38개 CFRD 계측자료로부터 댐 설계자 및 현장기술자들이 간편하게 이용할 수 있는 CFRD의 표준 간극비를 제안하였으며 이를 통해 현장건조밀도를 역산하여 체체의 적정 다짐에 필요한 다짐도를 효과적으로 구할 수 있다.

3) CFRD의 간극비는 계곡형상에 의존하며 형상계수가 클수록 간극비는 커지고, 대략 0.17~0.38 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다.

#### References

1. Cooke, J. B., 1998, Empirical Design of the CFRD, *The International Journal on Hydropower & Dams*, 5(6): 24-57.
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. Fitzpatrick, M. D., Liggins, T. B., Lack, L. T. and Knoop, B. P., 1973, Instrumentation and

- Performance of Cethana Dam, *Eleventh International Congress on Large Dams*, Madrid, pp. 145-164.
4. 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.
  5. Hunter, G. and Fell, R., 2003, Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Rockfill Dams, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(10): 909-917.
  6. International Water Power & Dam Construction, 2004, *Year Book 2004*, pp. 282-288.
  7. Korea Water Resources Association, 2005, *Dam design Criteria*. (in Korean)
  8. Korea Water Resources Corporation, 2004, *CFRD Design, Construction and Performance*. (in Korean)
  9. Korea Water Resources Corporation, 2005, *Dam Integration Information System*. (in Korean)
  10. Pinto, N. L. S. and Marques Filho, P., 1998, Estimating the Maximum Face Deflection in CFRDs, *The International Journal on Hydro-power & Dams*, 1(5): 28-31.