

1. 서론

전통적인 토질역학 강좌에서 댐의 침투 문제를 다루는 경우에는 아직까지도 대부분 균질형 흙댐(homogeneous earth dam)을 사례로 이용하고 있고, 국내 토목공학계 현실에서도 대부분의 기술자들에 있어 일반적인 댐의 범례로 사력댐 내지는 콘크리트댐 정도만을 기술하는 경우가 보편적이다. 그러나 1990년대 이후로 건설된 최근의 댐들은 이러한 단순한 구조를 취하고 있지 않으며, 대청댐과 같이 사력과 콘크리트가 복합된 댐이 등장하는가 하면, 최근의 높은 댐에 있어 주류를 이루고 있는 CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam)와 롤러다짐식 콘크리트댐에 대한 설계와 시공이 급증하고 있는 실정이다. 그러나 대부분의 토목기술자들에게 있어서 최근의 대형 댐 형식에 있어서 주류를 이루고 있는 CFRD에 대한 이해와 지식이 매우 빈약한 상태이

다. CFRD의 중요도를 보면 국내의 경우 특별히 1990년 이후로 현재까지 지어진 7개의 대형 댐들이 CFRD 형식을 취하고 있으며, 2004년 현재 기준으로 8개의 다목적댐, 혹은 양수댐들이 CFRD 형식으로 건설되고 있는 현실이다. 따라서 국내 댐에 보편적으로 사랑받고 있는 댐 형식인 CFRD에 대한 정확한 이해와 변천과정, 그리고 고유 특성들을 파악하는 일은 매우 뜻깊은 일이라 생각된다. 본고는 CFRD에 대한 개념적인 이해와 발달과정, 그리고 최근의 CFRD 설계와 시공에 도입되고 있는 최신 기술들을 개괄적으로 요약, 정리함으로써 토목기술자들의 이해와 지식 축적을 돕고자 한다.

2. CFRD의 정의 및 용어설명

2.1 CFRD의 정의

댐의 형식을 구분짓는 방법은 여러 가지가 있으나, 주요 축조재료에 따라 크게 필댐(fill dam)과 콘크리트댐으로 대별할 수 있다. 필댐은 재료의 구성에 따라 록필댐(rock-fill dam)과 흙댐(earth dam)

*1 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소 토목4급 (fulgent@kowaco.or.kr)

*2 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원

*3 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소 소장

*4 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원

*5 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 소장

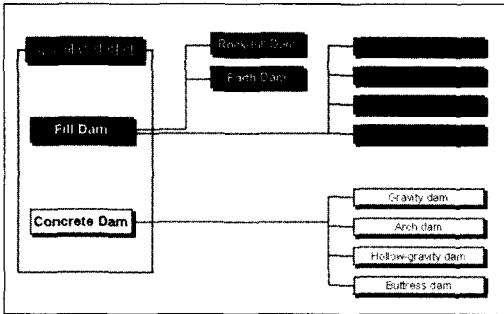


그림 1. 댐형식의 분류

으로 구별되며, 설계형식에 따라서는 균일형 (homogeneous type)과 코어형(중심코어형과 경사 코어형으로 분류), 그리고 존형과 CFRD 형태로 분

류된다.

CFRD는 바로 이 록필댐의 한 유형으로서 댐단 면이 물과 접하는 상류부에 차수를 위한 plinth 및 콘크리트 표면차수벽과 차수벽을 지지하는 차수벽 지지존 및 암석존으로 구성되는 댐 형식을 말한다. 표면 차수벽형 석괴댐은 댐 본체 상류면에서 저수를 차수하는 구조이기 때문에 차수벽의 역할이 중요하며, 차수재료로는 철근 콘크리트 또는 아스팔트 콘크리트, 철재, 목재 등이 사용된다.

콘크리트를 차수재료로 쓰는 CFRD 형식과는 달리 1930년대 독일에서 채택된 이래 유럽을 중심으로 축조되어 온 아스팔트 표면차수벽 형식이 있는

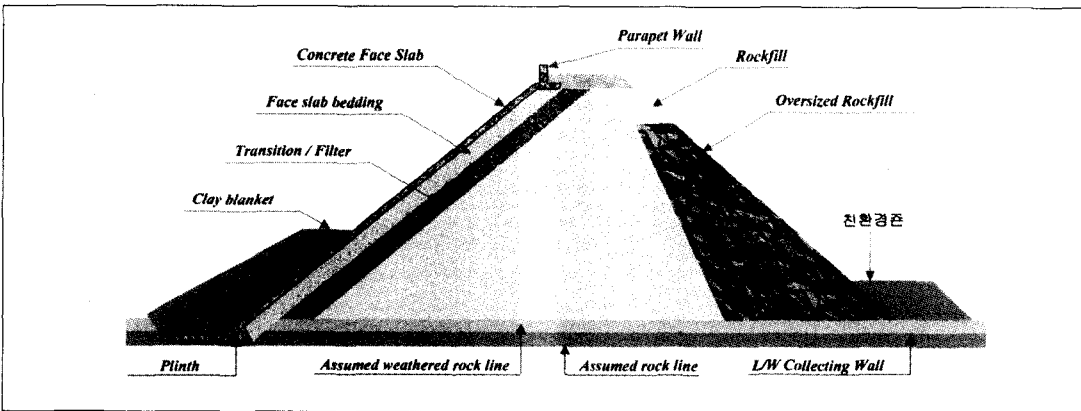


그림 2. CFRD 표준 단면

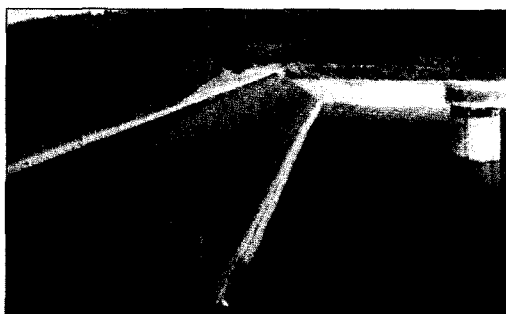
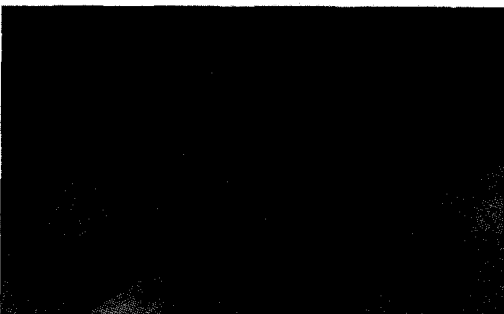


그림3. CFRD(좌, 용담댐)와 AFRD(우, Lichtenberg댐)의 비교사진

데, 요즘은 설계 및 다짐공법의 발전과 함께 아스팔트 표면차수벽형 석괴댐은 대부분 사라지고 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐을 채택하고 있다.

2.2 CFRD의 용어 설명

다른 댐 형식과 구분짓게 하는 CFRD에서 필수적으로 알아두어야 할 기본 용어들을 정리하면 다음과 같다.

- **Plinth** : 차수벽과 기초지반을 수밀상태로 연결시키는 철근콘크리트 구조물로 기초 그라우트를 가능하게 하는 cap 역할을 하며, 차수벽 및 제체에서 전이되는 하중을 지지하여 지반으로 전달하는 주춧돌 역할을 담당함
- **Face Slab(차수벽)** : 담수 후 저수지 물의 흐름을 차단하기 위해 상류측에 설치되는 철근 콘크리트 슬래브
- **Perimetric Joint(주변이음)** : 담수 후 차수벽을 수용하도록 plinth와 차수벽의 접합부에 설치되는 이음
- **Parapet Wall** : 저수지 수면의 파랑으로 인한 월파의 방지와 저수공간의 확보 목적으로 댐마루의 상류측 끝단에 설치되는 옹벽 구조물
- **댐높이** : 댐의 기초지반과 댐마루의 표고차, 즉 plinth 바닥에서 댐마루의 하류측 비탈머리의 표고차를 의미함
- **Curtain Grouting** : 암반내의 절리면을 따라 하류로 유출되는 침투수를 억제하고 침투수에 의한 양압력, 파이핑 현상으로부터 댐체의 안정성을 확보하기 위해 댐 기초부에 시행하는 그라우팅
- **Consolidation Grouting(압밀그라우팅)** : 기초 암반의 변형성, 강도, 수밀성 등을 개량하기 위한 그라우팅

- **Bedding Zone** : 차수벽을 직접 지지하고 있는 존으로 반투수성 벽을 만들어 줌으로서 차수벽의 균열이나 결함이 있는 지수관을 통한 누수를 댐체의 손상없이 안전하게 통과시키는 존
- **Transition Zone(선택존)** : 차수벽과 암석부체체의 강성차이로 응력이 차수벽이나 차수벽 지지존에 과도하게 전달되는 것을 방지하고, 공극의 크기를 제한하여 차수벽 지지존 재료가 암석 재료의 큰 공극 속으로 씻겨 들어가지 않도록 하는 존
- **Upstream Blanket Zone(불투수존)** : 주변이음이 변형, 확대되거나 차수벽에 균열이 생겨 누수가 발생할 경우 유입되는 물이 세립분을 함유토록 함으로서 누수차단 효과를 높이며, 담수 후 댐 기초부의 침윤선을 연장시켜 부가적인 안전확보를 위해 두는 존
- **Starter Bay** : 주변이음부로부터 슬립폼의 시작선을 결정하기 위해 설정되는 슬래브
- **Slip Form** : CFRD 표면차수벽 시공에 쓰이는 콘크리트 타설장비

3. CFRD 형식의 장점

CFRD는 매우 다양한 장점을 지니고 있으며, 특별히 우리나라에서 선호하는 주 원인은 다음의 세가지로 요약될 수 있다.

- 댐 특성상 날씨와 계절적인 영향이 적어 공사기간이 상대적으로 짧음
- 우리나라의 경우 주 축조재료인 암석자원이 풍부하여 공사비면에서 유리함
- 댐 축조재의 특성상 제체 내 간극수압이 발생하지 않으므로 누수 및 지진 저항성이 매우 높음



표 1. ECRD와 CFRD의 비교

구분	중양코아재 사벽댐 (ECRD)	콘크리트표면차수벽형사벽댐 (CFRD)
기 후	점토 코아재 축조로 기상 및 수문의 영향을 많이 받음 (강우시 공사 중지)	기상 및 수문의 영향이 적음 (전천후 공사 가능)
지 형	댐지점의 지형적 제약을 적게 받으므로 적용폭이 넓음	댐지점의 지형적 제약을 적게 받으므로 적용폭이 넓음
지 질	기초상태 제약이 비교적 적으나 중앙심벽 기초구간에 수밀성 압박상태 필요	기초상태 제약이 비교적 적으나 표면차수벽 기초구간에 수밀성 압박상태 필요
가 설 비	대용량의 가설비 및 타설설비가 필요치 않음	콘크리트 차수벽 타설에 필요한 Slip Form 및 부대설비 필요
유수전환	대상홍수 : 20~30년 빈도 유수전환 공사비면에서 불리. 공사기간중 월류시 치명적 손실 초래	대상홍수 : 5년 빈도 유수전환 공사비면에서 다소 유리
본 댐 사면경사	상류측 : 1:2.0~1:2.3 하류측 : 1:1.7~1:2.0	상하류측 : 1:1.3~1:1.5
안 전 성	제체를 통한 누수 및 월류에 대한 안전성이 낮음	저수지 수면변화와 제체를 통한 누수 등에 대해 안전성이 높음
품질관리	코아 및 필터재의 품질관리에 유의하여야 함	Plinth, Joint 및 Filter의 품질관리에 유의하여야 하며, ECRD의 코아 및 필터재의 품질관리보다 어려움
건설기간	기상 및 수문의 영향을 많이 받고 CFRD에 비해 큰 움직임으로 건설기간이 길	기상 및 수문의 영향을 적게 받고 기초처리 공사와 댐 축조 공사의 병행시공이 가능하여 건설기간이 짧음
건설경험	100m정도의 국내실적 (소양강댐 123m, 주암조절지댐 106m)이 있음	국내 실적상 100m 이상은 흔하지 않음(평화댐 125m, 밀양댐 89m, 웅담댐 70m), 외국의 경우 100m이상의 댐이 상당히 많이 있음(필리핀Agbulu 234m, 중국 Shui Bu Ya 237m, 라오스 Nam Ngum3 220m)

CFRD가 다른 유형의 댐 형식에 비해 우선적으로 고려되는 상세한 이유는 다음과 같다.

3.1 설계 특성

- 록필 콘은 침투수에 대해 효과적인 에너지 소산 기능을 수행한다. 따라서 콘크리트 차수벽이 불완전하여도 완전한 담수 하중에 의한 내적 불안정에 대해 안전을 유지시켜 준다.
- 다짐식 록필 댐에서 발생가능한 누수는 주변이음부 부분이다. 그러나 주변이음부에서 몇 m 구간을 양호한 필터 존으로 구성함으로써, 조인트 부위의 국부적 기능손상으로 인한 누수를 제

한하며, 세립질 모래(dirty fine sand)층으로 인해 수중에서 지수 역할을 가능하게 해 준다.

- 댐은 록필로 축조되고, 저수지 물에서 제체는 하류쪽이다. 따라서 수압이 제체를 눌러주는 역할을 하여 슬라이딩에 대해 높은 안정성을 제공한다. 수압은 댐축으로부터 상류쪽 기초에 전달되므로 본질적으로 안전한 구조이다.
- 양압이 걸리지 않는다.
- 시공후의 변형이 작으며, 몇 해가 지나면 수렴한다.
- 다짐축조된 록필의 빠르게 안정화되어가는 변형 때문에, 적정규모의 여수로를 안전하고 합리적으로 건설할 수 있다.

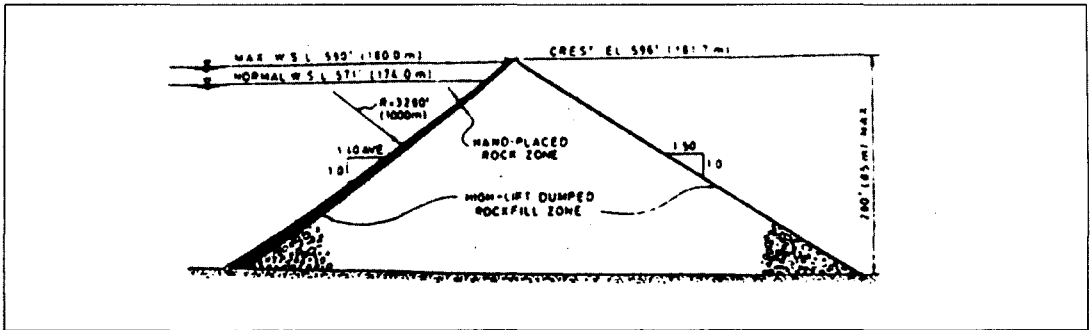


그림 4. 과거 바다질 공법의 CFRD 단면도(Cogot 댐)

- 모든 록필재료가 건조한 상태이기 때문에 지진동이 와도 간극수압이 유발되지 않는다. 지진하중하에서도 높은 전단강도와 간극수압이 작용하지 않는 점, 그리고 작은 침하량 특성으로 인해 지진하중에 저항력이 매우 강하다.

3.2 비용적인 측면과 공기적인 특성

- 램프(ramp)의 시공이 용이하다. 이것은 댐 진입로를 최소화하고 시공을 촉진시켜준다. 코어나 필터층으로 인해 나타나는 교통특성, 혹은 공기상의 제한점들을 해소시켜 준다.
- 상대적으로 제한받지 않는 록필 축조로 인해 재료에 대한 단위 비용을 절감할 수 있다.
- 기초부와 재료원, 시공성과 공기 측면에서 상관성을 최소화해준다.
- 강우로 인해 체체 축조나 콘크리트 차수벽 시공이 영향받지 않는다.
- 록필과 콘크리트 차수벽 모두 예정 속도로 시공 가능하며, 보다 빠른 공기도 충분히 가능하다.
- Plinth와 그라우팅 처리는 댐의 바깥쪽이므로 가장 비관적인 공정에도 영향이 없다.
- 댐의 짧은 저부 폭은 결과적으로 경제적인 구조

물 시공이라는 부가적 장점이 있다.

댐 프로젝트의 경우 초기 댐 형식의 선정시 록필 댐이 적합하다고 판단된다면 결과적으로 최종 결정은 차수 구조에 따라 ECRD(Earth Core Rock-fill Dam)와 CFRD(Concrete Face Rock-fill Dam) 사이에서 내려지게 된다. 이때 CFRD가 ECRD에 비해 상대적으로 갖는 유리한 점을 기술하면 다음 표 1과 같다.

4. CFRD 역사

4.1 해외 CFRD 역사

1) 1940년대 이전

CFRD의 역사는 미국 캘리포니아의 록필댐에서 상류사면 마무리 작업을 위해 목재를 대고 콘크리트 타설로 시행했던 20세기 초로 거슬러올라간다. 1850년대의 골드 러쉬로 상황을 이룬 미국 캘리포니아에서는 금을 채광하는데 있어 물이 절대적으로 필요하였다. 이 당시 저수지를 만드는 재료로 나무와 돌밖에 없었기 때문에 초창기에는 상류면을 목재로 차수하는 표면차수 록필댐이 세워졌다. 이후 목



재 차수벽이 콘크리트로 대체되면서, 최초의 CFRD 인 댐 높이 54m의 Morena댐이 1895년 캘리포니아에 건설되었다. 뒤이어 미국에서는 20세기 초 Strawberry댐을 비롯하여 Dix River댐, Salt Springs댐과 같이 높은 댐들이 잇달아 건설되었다. 높이 85m의 Cogoti 댐(1938년, 칠레)은 비다짐(dumped) 공법으로 이루어진 대표적인 댐이다. 그러나 초창기의 CFRD 대부분의 경우 담수시의 슬래브 파잉 변위로 인해 누수가 일어났다.

2) 1940~1970년대

1940년대는 제2차 대전의 여파로 댐건설이 위축되었다. 록필 Dam은 누수문제로 인하여 CFRD보다는 ECRD를 선호하였다. 일본에서는 1950년대 고부치(小淵)댐(1952년, 21m), 이시부치(石淵)댐(1953년, 53m), 노조리(野反)댐(1954, 44m)이 CFRD로 건설되었다. 중국에서 최초로 건설된 덩핑에 의한 CFRD는 Maotiaohe강을 가로질러 1966년 완공된 높이 48.7m의 Baihua Dam이다. 상류 사면의 차수벽 지지층은 1:0.6의 경사로 건다짐공법을 사용하였다. 이러한 형식의 몇몇 댐이 높이 50m 이하로 건설되었으나 큰 발달은 이루어지지 않았다.

1950년대 중반까지도 CFRD는 수직 및 수평이음을 갖는 콘크리트 차수벽을 포함하여 덩핑식 rock-fill 방식으로 축조되었다. 이 형식으로 지어진 초기 댐들은 록필의 정착을 포함하여, 특히 기초부의 빈약한 joint 및 face slab의 균질하지 않은 지지 등으로 상당한 누수현상을 보였다. 이러한 누수현상은 댐의 안정성에 직접적인 영향을 미치는 것은 아니며, 일부 권위자들에 의해 허용가능한 양으로 판명되었고, 일부에서는 이러한 초기의 CFRD 양상에 대해 부정적 반응을 보였다. 비다짐(dumped) 형식

으로 석피를 쌓아올려 축조된 초기의 록필댐은 75m 높이까지는 그럭저럭 만족스러웠으나, 그보다 높은 댐에 있어서는 비다짐 록필의 높은 압축성 때문에 표면부의 균열이 발달하고 과도한 누수가 발생하였다. 그 결과 높이가 높은 CFRD 형식은 얼마간 사용하지 않게 되었고 누수 문제와 표면부 보수 문제가 제기되어 비다짐식으로 시공되는 낮은 CFRD마저도 그 숫자가 감소하게 되었다. 이 기간에 얻은 성과는 CFRD 댐의 가파른 경사가 다짐식 록필재의 높은 전단강도를 입증해 주며 댐 축조재료로서 매우 유용함을 알게 해 준 것이었다.

그런 가운데 1950년대 중반부터 CFRD 설계에서 본질적인 개선이 이루어지게 된다. 최초의 개량형으로서 중요한 의미를 지닌 구조물은 1955년 스코틀랜드의 Invernesshire에 건설된 높이 38m의 Quoich댐으로서, 진동 롤러 다짐을 사용하였다. 건설후의 침하(沈下)는 19mm로 무시할 수 있는 수준으로 거동은 만족스러운 편이었다. 진동롤러는 초창기에 도로 시공상에 사용을 위해 제한적으로 개발되었으나, 1960년쯤에는 록필댐의 다짐에 대해서도 표준적인 기계로 발전하였다.

1960년대에 들어서면서 다짐 축조식 록필댐이 도입되기 시작하면서 많은 CFRD 형식의 댐이 다시 건설되기 시작하였다. 오스트레일리아에서 최초의 다짐식 rock-fill CFRD는 1968년 준공한 Tasmania 주의 Risdon Brook 댐인데, 이 댐은 거대한 압괴에 콘크리트로 표면처리하는 방법을 채택하였다. 이 두 개의 댐들은 누수량이 상대적으로 상당히 적음을 알게 되면서, 호주에서 1973년 완공한 110m 높이의 Cethana댐은 쇄석에 콘크리트 차수벽을 갖는 다짐식 CFRD로서 슬립폼을 사용하는 기술로 차수벽의 수평이음을 제거하는 혁신적 방법을 도입하였다. 이 실적은 향후 CFRD가 전세계적으로 널리 퍼질 수

있게 만든 계기가 되었고 1966년 이후의 CFRD는 모두 진동롤러 다짐방법이 적용되었다. Alto Antikaya (콜롬비아, 140m, 1974) Foz do Areia(브라질, 160m, 1980) 와 같이 높이가 높은 댐이 건설되어, 다짐된 CFRD의 누수에 대한 양호한 거동을 확인할 수 있었다.

결론적으로 1940년부터 1970년 기간 동안의 CFRD는 1940년 이전의 바다짐 공법과 다짐공법이 병행되어 축조되어 왔으며, 1970년 이후에는 다짐장비의 발전과 함께 다짐(compacted)공법이 정착되고 설계가 개선됨에 따라 face slab의 두께가 얇아지고, 댐의 단면이 기능별로 세분화된 기간이었다.

3) 1970~1985년

1960년대 중반에 스페인 Piedras댐에서 처음으로 슬래브 콘크리트가 연속 타설되어 수평이음이 생략된다. 또한 비슷한 시기에 슬래브를 지탱하는 bedding zone의 최대 입경이 보다 작아지는 것을 비롯하여 이음 지수판, plinth 등 현재 이루어지고 있는 설계의 원형이 만들어지게 된다. 이후 이러한 근대적인 공법이 개발·정착하면서 1970년대부터 대다수 CFRD가 건설된다. 따라서 이 시기는 CFRD

의 부활기라고 할 수 있을 것이다. 결국 성능과 경제성면에서 유리했던 CFRD 형식은 다시 주요한 댐 형식으로서 그 지위를 회복하게 되었다. 다짐식 록필(compacted rock-fill) 기술과 현대적인 CFRD 설계가 결합하여 본질적으로 안전하다는 점과 경제적이란 이유로 사랑받는 댐형식이 되었다.

4) 1985년 이후

1970년대는 오스트레일리아, 1980년대는 남미가 CFRD의 중심국이었으나 1990년대에 들어서부터는 주로 브라질과 중국으로 이동하게 된다. 특히 중국에서는 재료의 유효한 이용, 공기(工期), 시공의 간편화, 경제성의 측면에서 CFRD 형식이 많이 채택되었다. 1982년에 이르러 중국에서는 진보된 기술을 사용하여 높이 41.5m의 Kekeya 댐이 층적층 기초상의 사력지반에 건설되었다. 그 이후 중국은 1985년 현대적인 기법을 적용하여 CFRD를 도입하면서 현재까지 비약적인 기술의 발전을 이루었다. 최초로 건설된 이러한 형식의 댐은 높이 95m의 Xibeikou 댐이며, 최초로 운영된 댐은 1988년에 완공된 높이 58.8m의 Guanmenshan 댐이다. 중국에서 본격적으로 CFRD가 도입된지 불과 20년 정도가 지나고 있지만, 현재 40개가 넘는 CFRD 댐이

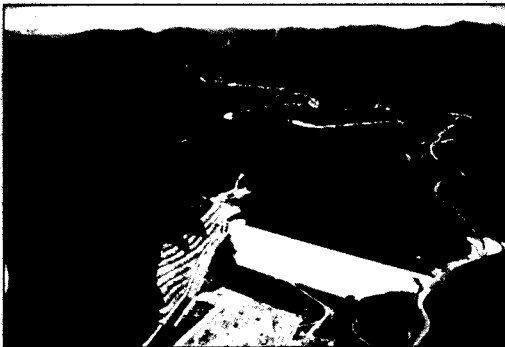


그림 5. 밀양댐(좌)과 건설중인 청송양수상·하부댐(우)



이미 준공되었고, 추가적으로 30개소에서 활발히 건설되고 있는 강국이 되었다. 2000년부터 시작된 Shuibuya CFRD의 경우 높이가 무려 232m나 된다. 중국은 현재 세계 최대의 댐 건설 및 보유국인데, 1982년 ICOLD 보고자료에 의하면 15m를 넘는 댐들은 전세계에 34,798개이며 그중 18,595개(53.4%)가 중국에 있다고 밝혔다. 현재 중국은 1999년에 자체적으로 정립된 기술과 국내, 국외의 최신 동향을 바탕으로 "Design code for CFRDs"를 만들어 활용하고 있다. 1989년에 완공되었고 1993년 파괴된 70m 높이의 Gouhou 댐(concrete face gravel dam)으로 인해 그러한 설계기준이 절실히 요청되었다. Gouhou댐의 주요 붕괴원인은 시공상의 결함과 함께 모래질 자갈로 축조된 댐체에 내부 chimney drain과 같은 침투수 억제 대책이 제대로 마련되지 않았기 때문이다.

Cooke에 따르면 1988년 이후에는 세계적으로 CFRD가 댐 건설의 주요한 댐 형식을 이루었다고 한다. CFRD는 그동안의 시공경험과 기술의 축적으

로 21세기에도 가장 주요하게 고려되어지는 댐 형식이 되어 있다.

4.2 우리 나라 CFRD의 역사

우리 나라에서 CFRD가 최초로 도입된 댐은 광주광역시 상수원으로 개발된 동북댐(1983년~1985년)이다. 1985년 건설한 전라남도 화순의 동북댐(높이 44.7m, 길이 188.1m, 총저수용량 99,530천 m^3)은 기존댐을 가물막이로 이용하고, 하류에 신댐을 확장 건설하였는데 최초의 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐을 건설함으로써 한국의 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐의 효시가 되었다. 국내에서 유일하게 홍수조절 목적으로 건설한 강원도 화천군의 평화의댐(높이 80m, 길이 414m)은 동북댐(높이 44.7m, 1985년준공)에 이어 두 번째의 콘크리트 표면차수벽형 록필댐인데, 댐축조량이 3,227천 m^3 에 달하는 암재료의 축조를 불과 6개월 공기내에 완성시키는 놀라운 실적을 보였다. 다목적댐으로는

표 2. 나라별 CFRD 보유 순위(전체와 100m 이상)

CFRD 수 (전체)			CFRD 수 (100m이상)		
국적	댐 수	비율	국적	댐 수	비율
China	109	31.9%	China	35	30.4%
Spain	23	6.7%	Brazil	9	7.8%
Australia	21	6.1%	Colombia	8	7.0%
US	17	5.0%	Peru	5	4.3%
South Korea	16	4.7%	Turkey	5	4.3%
Chile	14	4.1%	Chile	4	3.5%
Romania	14	4.1%	Malaysia	3	2.6%
Brazil	13	3.8%	Iran	3	2.6%
Colombia	9	2.6%	Laos	3	2.6%
Argentina	8	2.3%	Romania	3	2.6%
Peru	8	2.3%	Thailand	3	2.6%
Turkey	8	2.3%			

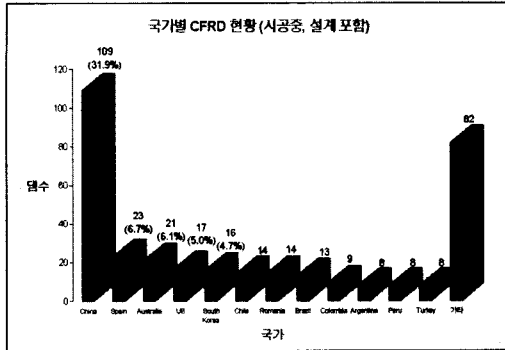


그림 6. 국가별 CFRD 현황(전체)

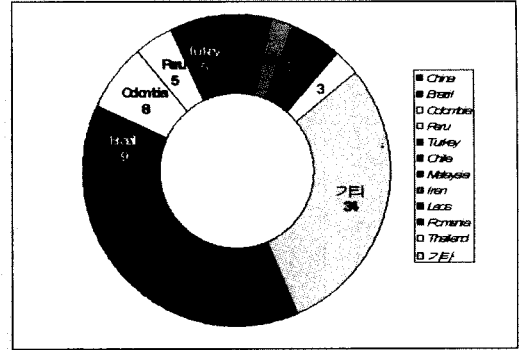


그림 7. 국가별 CFRD 현황(100m 이상)

전북 부안군의 부안댐 (높이 50.0m, 길이 282m)이 1997년 건설되었고, 경남 진주시의 남강보강댐 (높이 34.0m, 길이 1,126m), 전북 진안군의 용담댐 (높이 70.0m, 길이 498m), 밀양댐 (높이 89m, 길이 535m)이 건설되었다. 이들 다목적댐은 모두 콘

크리트 표면차수벽형식을 채택하고 있는데 용담댐의 경우는 차수벽 콘크리트를 섬유보강콘크리트를 적용함으로써 크랙발생으로 인한 차수벽의 약점을 보강하는 기술을 채택하였다. 이후 평화의 댐 2단계, 산청양수 상·하부댐, 양양양수 상부댐, 탐진댐,

표 3. 180m 이상의 CFRD 현황 (2004 기준)

이름	국가	길이 (m)	구조	높이 (m)	폭 (m)	Foundation (m)	Foundation type
Agbulu	Philippines	234	u/d	1.4	1.5	-	-
Shuibuya	China	232	2009	1.4	1.46	0.3+0.003H	Limestone
Morro de Arica	Peru	220	u/d	1.4	1.4	0.3+0.003H	Sandstone, quartzite
Nam Ngum 3	Laos	220	2005	1.4	1.4	0.3+0.003H	Sandstone
Bakun	Malaysia	205	u/c	1.4	1.4	0.3+0.003H	Greywacke
Xe Kaman (2nd)	Laos	200	Proposed	1.3	1.4	-	Mine tailings dam
Campos Novos	Brazil	200	2006	1.3	1.4	0.3+0.002H, 0.005H	Basalt
Basha	Pakistan	200	u/c	-	-	-	-
Barra Grande	Brazil	194	2005	1.3	1.4	0.3+0.002H)0.005H	Basalt
West seti	Nepal	190	u/d	1.45	1.65	0.3+0.003H	Gravel
Karahjukar	Iceland	190	u/d	1.3	1.3	0.3+0.002H	Basalt
Sogamoso	Colombia	190	2005	1.4	1.4	0.3+0.003H	Sandstone, gravels
El Cajon	Mexico	189	u/c	1.5	1.4	0.3+0.003H	Igimbrite
Xe Kaman	Laos	187	Proposed	1.3	1.3	0.3+0.002H	Sandstone
Aguamilpa	Mexico	187	1993	1.5	1.4	0.3+0.003H	Gravel/igimbrite
Mazar	Equador	185	2006	-	-	-	-
Hongjiadu	China	182	2007	1.4	1.4	0.3+0.003H	Limestone
Yaojiaping	China	180	u/d	-	-	-	-

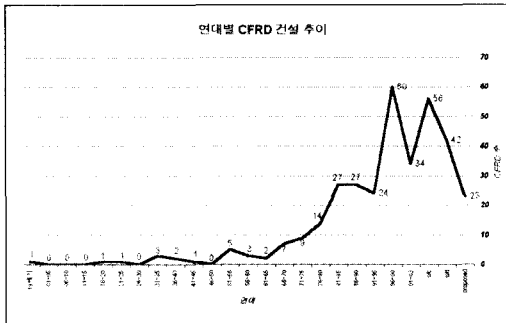


그림 8. 준공년도별 CFRD 현황

대곡댐, 청송양수 상·하부댐, 예천양수 상·하부댐, 화북댐 등 현재 시공중이거나 설계가 완료된 다수의 CFRD가 있다.

5. CFRD 현황

5.1 세계 CFRD 현황

International Water Power and Dam Construction 2004 Yearbook에 따르면, 전 세계적으로 CFRD는 시공중인 것과 설계중인 것들을 모두 포함하여 약 342개에 이르는 것으로 집계되었다. 이 가운데 현재 준공된 CFRD는 221개소에 달하며, 건설중인 것도 56개소나 되며 설계중이거나 제안된 CFRD도 65개소에 달한다.

국가별로는 중국이 109개의 CFRD를 보유, 혹은 설계, 시공중인 것으로 나타나 전체의 31.9%를 차

표 4. 국내 CFRD 현황(2004. 05 기준)

댐명	수계	하천명	저수 목적	댐 높이 (m)	댐 길이 (m)	댐 체적 (천m³)	유역 면적 (km²)	저수 면적 (천m²)	유효 저수용량 (천m³)	관리자	준공 년도	비고
동북	심진강	동북천	S	44.7	188.1		189		99,530	광주시	1985	
평화(1단계)	한강	북한강	CX	80	410	2,413	3,227		590,000	수공	1988	
평화(보완설계)	한강	북한강	CX	125	601	4,904	3,227		2,630,000	수공	2004	시공중
부안	직소천	직소천	SIHC	50	282	614	59	3,000	35,600	수공	1996	
밀양	낙동강	단장천	SIHC	89	535	3,943	95.0	2,200	69,800	수공	2001	
남강	낙동강	남강	SIHC	34	1,126	1,280	2,285	28,200	299,700	수공	2001	
산청양수상부	낙동강	무명천	H	90.8	360	2,165	2.1	240	5,650	한국동서발전	2001	
산청양수하부	낙동강	내대천	H	70.9	286.1	1,690	36.3	350	5,650	한국동서발전	2001	
용담	금강	금강	SIHC	70	498	2,198	930	36,240	672,000	수공	2001	
대곡	태화강	대곡천	SI	52	190	470	57.5	2,650	27,800	수공	2004	시공중
탐진댐	탐진강	탐진강	SIHC	53.0	403.0	1,506	193		171,000	수공	2005	시공중
양양양수상부	한강	방대천	H	95.5	360	1,398	0.5	200	4,276	한국중부발전	2006	시공중
청송양수상부	낙동강	길안천	H	97	430	2,189	0.76	230	6,510	한전	2006	시공중
청송양수하부	낙동강	용전천	H	52.5	270	725	7.51	520	6,510	한전	2006	시공중
화북	낙동강	위천	SIHC	48.0	395.0	950	87.5	2,650	40,100	수공	2009	대안설계완료
예천양수상부	낙동강	금곡천	H	79	740	1,900	0.63	230	6,848	남동발전(주)	2009	기본설계완료
예천양수하부	낙동강	용두천	H	65	535	1,590	0.57	520	8,964	남동발전(주)	2009	기본설계완료

주) 저수목적별 분류 : I(Irrigation, 관개용수댐), H(Hydroelectricity, 발전용댐), S(Water Supply, 생공용수댐), C(Flood Control, 홍수조절댐), X(others, 기타)

지하고 있으며, 스페인, 호주, 미국에 이어 우리나라도 현재 설계중인 것까지 포함하여 16개소에 이르는 CFRD 강국이 되었다.

전 세계적으로 CFRD의 댐 높이도 해마다 증가하여 342개 중 115개가 무려 100m를 넘고 있으며, 중국이 35개, 브라질 9개로 현재 CFRD 기술을 선도하는 나라들로 자리매김하였다. 현재 시공중인 가장 높은 CFRD는 중국의 Shuibuya 댐으로 댐높이가 무려 232m에 달하며, 설계중인 댐 중에는 234m의 Agbulu 댐이 필리핀에 들어설 예정이다. 이와같이 높은 댐들이 증가하는 추세에 있다는 사실에 비추어 보면, CFRD는 매우 높은 댐형식에 있어서도 매우 우수한 형태임을 반증해 준다.

연대별로 준공된 현황을 보면, 최근의 CFRD 열풍을 짐작할 수 있다. ECRD와의 경쟁과 전쟁의 여파로 미진하게 도입되었던 CFRD는 새로운 댐 형식으로서 1960년대 후반부터 그 숫자가 급증하기 시작하여 1996년~2000년 사이에는 5년동안 무려 60개의 CFRD를 완공하였으며, 그 이후 현재까지 가파른 상승세에 있어 CFRD 건설의 전성기를 맞이하고 있다.

5.2 국내 CFRD 현황

1990년대 이후로 국내에 주요 다목적댐 및 양수 댐 건설은 대부분 CFRD로 이루어지고 있어 CFRD가 국내 댐 건설의 표준으로 자리잡은 상태이다. 1985년 동북댐을 효시로 1990년대 이후 7개 CFRD 댐이 건설 완료되었고, 증고사업이 한창인 평화의댐을 비롯, 6개 CFRD 댐이 시공중이며, 실시설계가 끝난 댐도 3개소나 된다. 2004년 5월 기준으로 국내에 건설이 완료되었거나 설계 및 시공중인 CFRD 댐은 다음과 같다.

6. CFRD의 현재와 미래

지난 40여년간 CFRD는 수력발전, 용수공급과 최근의 tailings dam에 이르기까지 수많은 프로젝트의 해답으로 사용되어왔다. 새로운 프로젝트가 개발될수록 그때마다 새로운 설계와 시공상의 도전들에 직면하였으며, 이제까지의 축적된 경험을 바탕으로 과거로부터의 교훈과 미래에 대한 보다 나은 기술력을 보유하게 되었다. CFRD 발전에 있어서 중심무대는 최초 미국에서 호주로 옮겨갔고, 이제는 남미와 중국으로 이동하였다. CFRD 형식은 현재 50개의 다른 나라에서 채택되는 일반적인 댐 형식이 되었다.

CFRD는 특별히 정보 공유가 매우 중요한데, 이는 CFRD의 설계 자체가 매우 경험적이고 과거의 선례에 기초를 두기 때문이다. 특별히 조닝(zoning)된 특필이 물의 흐름에 대해 안전하다는 특성은 CFRD 댐의 경제성에 매우 중요하다. 누수(leakage)는 댐 안정성과 큰 연관이 없다는 CFRD 특성으로 인해 face slab 두께와 철근비를 댐 높이가 높아져도 감소시킬 수 있게 되었다. Face에서 발생하는 누수도 반투수성 특필 콘에 의해 제한되어지며, 또한 세립질 모래를 이용하여 상당부분은 지수시킬 수 있다. 1985년 ASCE 심포지움에서 Sherard와 Cooke은 이러한 본질적인 안정성을 다음과 같이 표현했다.

“CFRD는 미래의 매우 높은 댐들에 적절한 형식이다. 대부분 압으로 축조되는 300m 이상의 높은 CFRD에 대해서도 현존하는 댐들에 대한 합리적인 거동에 기초하여 만족할만한 댐 성능을 예상해 볼 수 있다.”

이제까지 CFRD가 발달되어 온 역사는 많은 권위자들과 실무자들에 의해 상세히 다루어져 왔다.



향후 CFRD는 현재의 추세와 더불어 자연지반과 가장 친숙하고 구하기 쉬운 재료적 특성으로 인해 앞으로도 가장 주목받는 댐형식이 될 것임에 틀림없다. 다만 향후의 CFRD는 환경적인 측면을 기술적인 발전과 더불어 고려되어야 할 것이다. CFRD의 친환경적 설계 및 시공은 이제 불가피한 시대적인 요청이 되었다. CFRD는 환경적인 측면과 함께, 기술적으로도 지속적인 발전을 이루어 21세기 댐 기술의 보고가 되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 최형식 (2000), CFRD형 댐의 최신기술(연재), 토목 제48권 제7호~제9호, 대한토목학회
2. 한국수자원학회 (2003), 댐설계기준
3. 坂本忠彦, 松本徳久, 福永和久의(2000), 海外のCFRD의動向, 댐기술 NO 162, 財 法人 댐技術センター
4. German Committee on Large Dams (2001), Dams In Germany
5. International Water Power & Dam Construction, Yearbook 2004, pp282~288
6. J. Barry Cooke (1984), Progress in Rockfill Dams, Journal of Geotechnical Engineering, 18th Terzaghi Lecture, Vol.110, No.10, ASCE
7. J. Barry Cooke (2000), special lecture, The High CFRD Dams, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
8. J. Barry Cooke (1991), The Concrete-faced Rockfill Dam, International Water Power & Dam Construction, Vol.43, NO1
9. Jiang Guocheng, Zhao Zengkai (2000), High Concrete Face Rockfill Dams in China, Proceedings: International Symposium on CFRDs, 18 Sep. 2000, Beijing, China
10. Jianzheng Pan, Jing He (2000), Large Dams in China: A Fifty - Year Review, China WaterPower Press
11. Korea National Committee on Large Dams & Korea Water Resources Corporation (2004), Korea & Dams, May 2004
12. The International Journal On Hydropower & Dams (2004), Special Issue: ICOLD Seoul 2004, Vol. 11, Issue 2

