

# 댐 콘크리트의 최신 기술 동향

장 봉 석

<한국수자원공사 수자원연구원>

## 1. 서 론

세계적으로는 19세기 말경부터 콘크리트가 댐의 축조재료로서 사용되었고 설계이론도 정비되어, 본격적인 중력댐이 프랑스 등 유럽 여러 나라에서 발전·홍수조절·운송 등을 위해 건설되었다. 그 뒤 콘크리트를 절약하기 위해 중력댐 속에 빈 공간을 둔 중공중력댐이 고안되었다. 미국에서는 중서부 개척시 교통조건이 나쁜 곳에 댐을 건설함에 있어 콘크리트를 절약할 수 있는 아치댐의 건설이 추진되었다. 이 외에도 세계적으로 많은 콘크리트 댐들이 건설되었다.

본 고에서는 국내에서 시공 사례가 없으며 최초로 한탄강 댐의 설계에 채택된, 또한 세계적으로 콘크리트의 역사에서 있어서 상대적으로 최신기술이라고 할 수 있는 롤러다짐 콘크리트(Roller Compacted Concrete)에 대해서 소개하고자 한다. 또한, RCC(Roller Compacted Concrete Dam) 이외에 일본에서 많이 사용되고 있는, 건설비용 감축, 환경부하 경감에 유리한 CSG (Cemented Sand and Gravel) 공법에 대해서도 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 롤러다짐 콘크리트 (Roller Compacted Concrete)

롤러다짐 콘크리트 댐은 1964년 이탈리아의 Alpe Gera 댐에서 172 m 높이의 댐을 건설하면서 필댐 시공 장비인 덤프트럭과 도저, 트랙터를 이용하고 내부 진동을 통해 다짐을 실시하면서 시작되었다. 이 후 1970년 Jerome Raphael은 그

의 논문에서 롤러를 통한 다짐으로 단면을 줄이는 효과를 얻을 수 있고 흙댐에 적용되는 연속 타설 방법을 사용한다면 기존의 중력댐과 비교할 때 시간과 비용을 절감할 수 있을 것이라고 밝혔다. 이를 계기로 많은 연구들이 진행되었고 1970년대 초반 Time Ford 댐의 Tennessee Valley Authority와 Lost Creek 댐의 미국 공병대 기술진의 연구를 통해 롤러다짐 콘크리트 댐 공법의 경제적 적용 가능성이 밝혀졌고 타설 방법 역시 크게 발전하였다. 일본의 경우는 자체적으로 이를 Roller Compacted Dam(롤러 다짐 콘크리트 댐 ; RCCD)이라 명하고 지역적 특성에 맞는 RCCD 댐을 계속 적용·발전시켰다. 세계에서 최초로 현재 개념의 롤러다짐 콘크리트를 본 댐에 적용한 것은 1974년에 시작된 시마지가와[島地川] 댐이었으며, 댐의 높이는 89.0 m, 댐 마루의 폭은 240.0 m, 체적은 317,000 m<sup>3</sup>에 이른다. 이후 1980년대에 들어 미국과 일본 등지에서 많은 성공적인 시공이 이루어졌으며, 중국에서도 RCC 댐이 42개 건설되었고, 14개가 현재 건설 중에 있다. 이 중에서 적어도 8개가 100m 이상으로 건설되었다.<sup>7</sup>

### 2.1 롤러다짐 콘크리트의 일반

롤러다짐 콘크리트 댐은 콘크리트 댐의 장점을 살리고 필댐의 단점을 보완하면서, 콘크리트 댐의 시공상 문제점을 개선하여 건설공기의 단축과 경제성을 높이고 콘크리트 댐의 축조가 적합한 지점에서 댐 건설을 쉽게 하고 댐 지점의 지형, 지질 등의 폭넓은 조건변화에도 대응할 수 있는

합리적인 댐 시공법을 확립하기 위해서 개발된 공법이다.

롤러다짐 콘크리트 댐은 콘크리트 중력식 댐을 기초로 시공상의 문제점을 개선하고 경제성을 높이면서 공사기간을 단축시켜 댐 건설을 용이하게 하는 공법이다. 그러므로 일반 댐 콘크리트와는 다른 시공기계의 채용과 더불어 시공방법을 개량할 수 있고 이에 적합한 재료의 선택과 배합변경이 필요하다. 롤러다짐 콘크리트의 특징은 다음과 같다.<sup>1)</sup>

- ① RCC는 일반 콘크리트에 비해서 매우 된 배합이다.
- ② 일반적으로 단위시멘트량이 적다.
- ③ 콘크리트 타설능력과 수화열을 고려하여 제체 전면의 layer 타설방식에 의한 콘크리트 타설을 표준으로 한다.
- ④ 1 리프트의 높이는 다짐효과를 고려하여 정하지만, 제체 부분에서는 약 70cm 정도를 표준으로 한다.

- ⑤ 가로수축이음은 콘크리트 다짐 전·후에 아연도금철판으로 절단 또는 압입하는 방법으로 시공하며, 세로수축이음은 일반적으로 설치하지 않는다.
- ⑥ 파이프쿨링의 시공은 일반적으로 실시하지 않는다.
- ⑦ 댐 상·하류면은 콘크리트의 내구성 확보를 위하여 거푸집을 이용한 일반 콘크리트를 타설 한다.

롤러다짐 콘크리트는 세계적으로 1960년대부터 활발히 적용되어온 비교적 최신의 기술이고 국내에는 그 적용이 전무하였으며 현재 한탄강 댐이 롤러다짐 콘크리트를 사용한 콘크리트 중력식 댐으로 설계되어 시공될 예정으로 있다. 롤러다짐 콘크리트는 주로 콘크리트 중력식 댐의 본체 내부 콘크리트에 적용되거나, 또는 손상 받은 댐의 안정성 확보 또는 댐의 치수증력 증대를 위한 증고 등을 위한 댐의 재개발에 적용된 사례가 보고 되어있다.

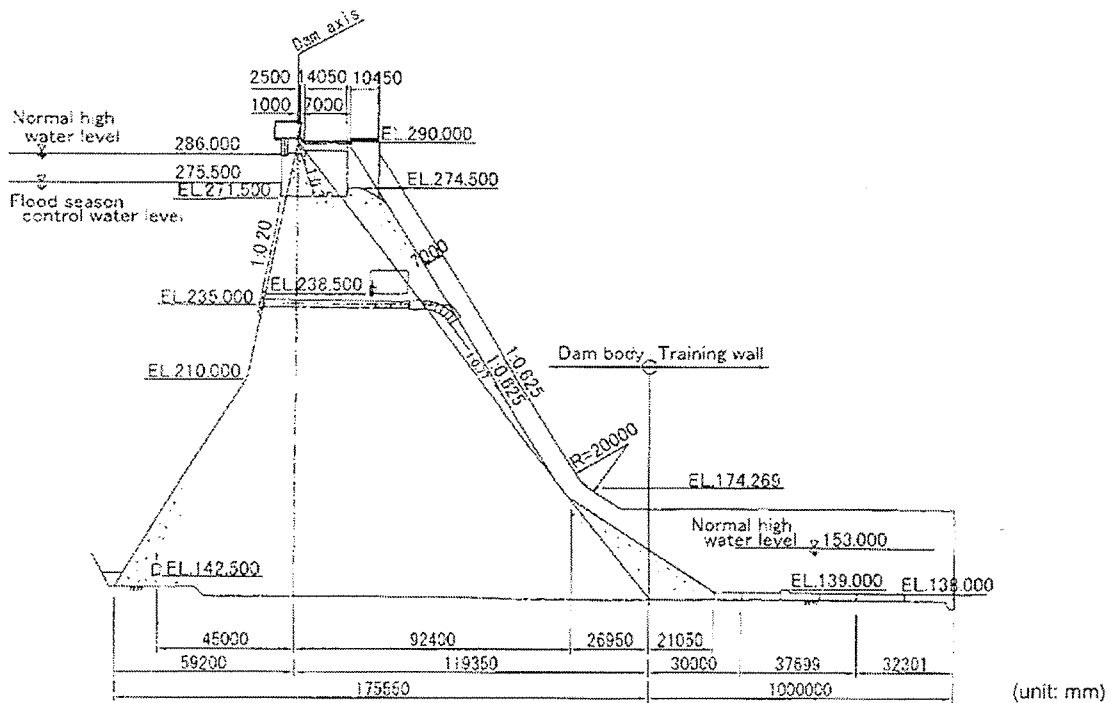


Figure 1. Typical Cross section of RCD (Miyagase Dam)

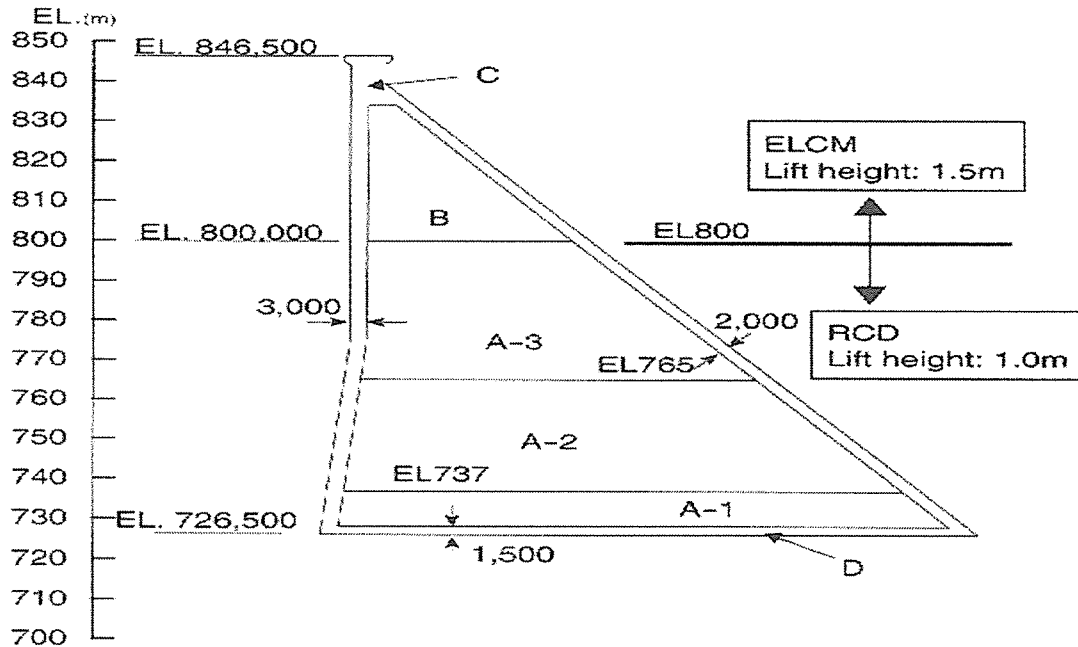


Figure 2. Mix design of RCD

롤러다짐 콘크리트의 가장 큰 장점은 일반 콘크리트를 사용하는 경우에 고려해야 하는 여러 가지 문제점들을 해결할 수 있고, 급속 시공이 가능하다는 점 등이 있다. 주지의 사실이지만, 일반콘크리트를 사용하는 경우의 문제점이라고 함은 일반콘크리트는 블록 형태의 매스콘크리트로 타설함으로써 많은 수화열이 발생하고 이를 제어하기 위하여 프리쿨링(pre-cooling), 포스트쿨링(post-cooling) 등을 고려하여야 하며, 파이프쿨링(pipe cooling)이 필수적으로 수반되어 공정이 복잡하고 한 리프트(lift)를 타설 한 후 파이프쿨링을 위한 일정한 시간이 소요된다. 또한 블록 경계에서의 지수처리 등의 추가 공정을 수반하게 된다.

이에 비해, 롤러다짐 콘크리트는 단위 시멘트 량도 매우 적으며, 슬럼프(slump)가 없는 빈배합의 콘크리트를 사용하여 수화열발생이 매우 적고, 흙다짐 장비를 이용하여 층 다짐 형태로 시공함으로써 필댐의 신속한 시공방법을 이용하여 축조할 수 있는 장점이 있다. 따라서 롤러다짐 콘크리트는 파이프쿨링이 필요 없고 블록 경계의 지수처리 공정 등이 없어서 공정이 단순하고 시공속도 또한 향상된다.

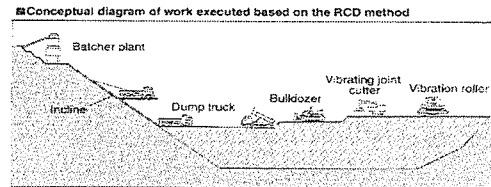
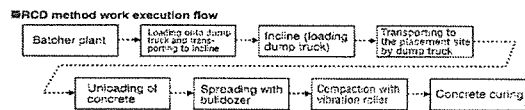


Figure 3. Schematic of RCD construction<sup>4</sup>

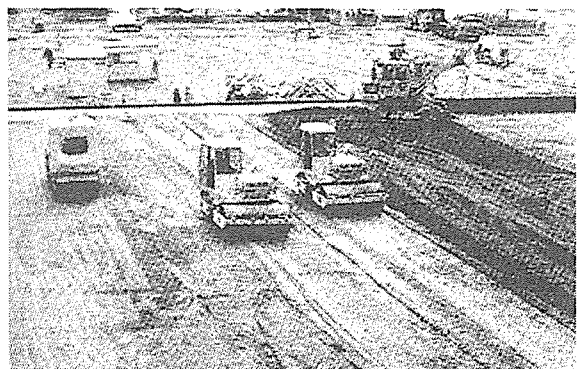
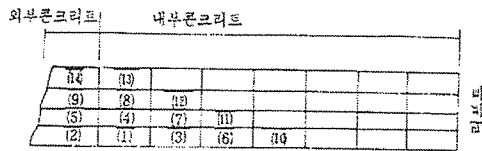
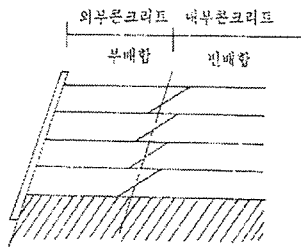


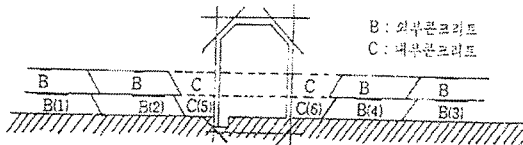
Figure 4. Overview of RCD construction<sup>4</sup>



(가) 콘크리트 치기순서의 예



(나) 내부콘크리트와 외부콘크리트의 접합부의 콘크리트 치기의 예



(다) 검사통로 주변의 콘크리트 치기순서의 예

Figure 5. Placing sequence of RCD

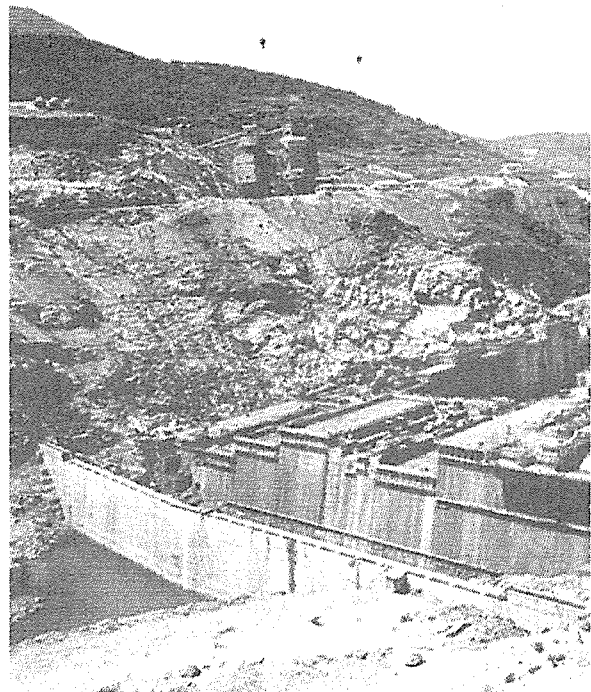


Figure 6. Placing sequence of CGD

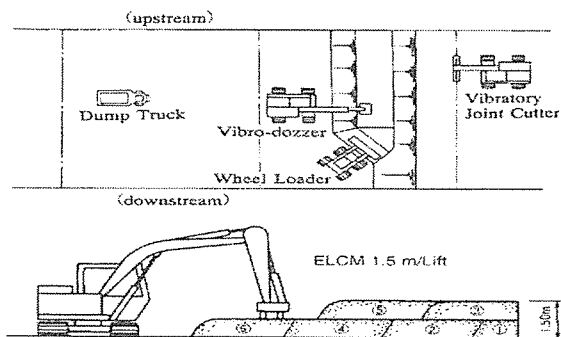


Figure 7. Extended layer construction method<sup>4</sup>

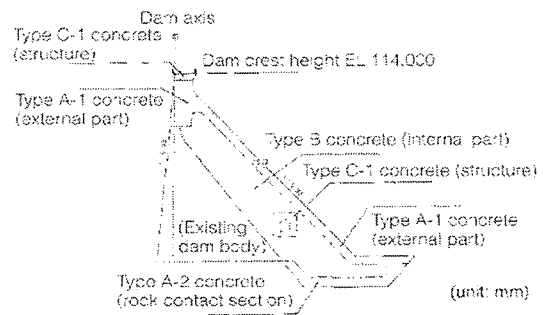


Figure 8. Redevelopment of Dam using RCD<sup>4</sup>

## 2.2 롤러다짐 콘크리트의 품질관리

롤러다짐 콘크리트는 단위수량이 매우 적은 무슬럼프 콘크리트를 사용함으로써 건조수축, 크리프 등 부피변화가 작아 물성 면에서 유리하고, 수화열이 일반 콘크리트보다 작아 큰 단면의 콘크리트 단면을 시공하는데 유리하다는 것이다.

롤러다짐 콘크리트는 적은 단위시멘트량을 사용하며 반죽의 질기(consistency) 즉, 슬럼프가 '0'인 콘크리트를 사용하여 롤러다짐을 통하여

소요의 품질을 확보한다. 이때 중요한 것은 반죽질기가 너무 된 경우에는 다짐횟수를 증가시키더라도 다짐이 잘 이루어지지 않아 콘크리트 강도 등 소요의 품질을 확보하기가 어려우며, 반죽이 너무 질 경우에는 다짐장비가 빠져서 다짐을 실시할 수 없는 문제가 발생한다. 따라서 롤러다짐 콘크리트의 가장 중요한 것은 효과적인 다짐을 실시하여 소요의 품질을 확보할 수 있는 컨시스턴시의 확보가 매우 중요하다.

적은량의 시멘트계 재료를 사용하는 롤러다짐 콘크리트는 페이스트양의 증가를 통하여 공극을 채우기 위하여 200번체(75 $\mu$ m)를 통과하는 재료의 요구량이 일반적인 콘크리트 보다 크다. 이를 위하여 미공병단, ASCE 등에서 페이스트량/모르타르량( $V_p/V_m$ )의 비를 0.42 이상으로 확보할 것을 규정하고 있다.

### 3. CSG(Cemented Sand and Gravel)

#### 3.1 CSG 일반

CSG란 cemented sand and gravel의 약자로, CSG 공법은 하상 사력 등의 암석질의 모재를 기본적으로 채가름 등의 조정을 실시하지 않고 물과 시멘트를 가하여 혼합 하는 것으로서, 1992년에 일본의 나가지마댐 상류가물막이에서 처음으로 실시된 이래, 일본에서 꾸준히 시공실적이 축적되어 왔으며, 1999년에 CSG 댐 연구회가 발족하여 2000년에 CSG 재료를 사용한 댐 해석 및 설계방법이 발표되었다.

한편 댐 사업뿐만 아니라 공공사업 전반에 있어서 보다 더 한층 건설비용의 감축, 사업실시에 따른 환경부하의 경감이 중요한 과제로 되었다. 이와 같은 상황에서 건설비용 감축, 환경부하 경감에 유리한 CSG 공법의 댐 본체에의 적용이 요구되어 「사다리꼴 CSG 댐」이 고안되었다.<sup>3</sup>

CSG를 이용한 댐 설계로서 제안된 것이 사다리꼴 형상의 단면을 갖는 댐, 「사다리꼴 댐」이다. 사다리꼴 댐은 종래의 직각 삼각형 단면의 댐(중력식콘크리트댐)에 비하여 제체적은 크나,

- ① 전도, 활동에 대하여 안정성이 높고
- ② 제체내부의 발생응력이 적은 등 특징을 갖고 있다.

또한 CSG 공법은

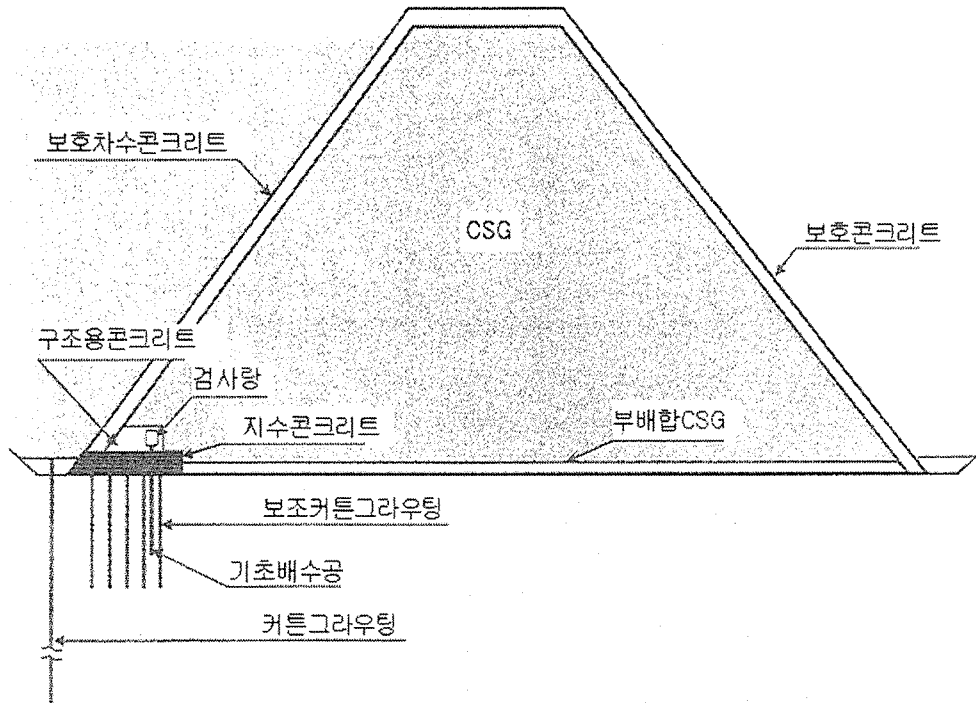
- ① 효율이 좋은 모재확보가 가능
- ② CSG 제조가 간편한 설비로 가능
- ③ 급속시공이 가능한 등의 특징을 가지며, 건설비용의 감축, 환경영향 감소가 가능하다.

이와 같은 「사다리꼴 댐」과 「CSG 공법」을 조합한 것이 「사다리꼴 CSG 댐」이다. 사다리꼴 CSG 댐은 사다리꼴 댐과 CSG 공법의 여러 특징을 살려, 「재료의 합리화」를 주로하여, 「설계의 합리화」 「시공의 합리화」의 3개의 합리화가 시도됨과 아울러 환경부하를 경감시킬 수 있는 새로운 형식의 댐이다.

CSG 공법은 댐 건설 예정지의 하상 재료를 그대로 사용하여 제체를 축조에 사용함으로써, 석산개발이 필요 없어 친환경적이며 사다리꼴 형의 제체를 적용하여 침하, 활동, 전도와 내진에 대한 안정성이 확보가 유리하다. 따라서, 일본에서는 CSG 공법의 적용 초기에는 상류 가물막이 또는 저사댐 등의 소규모에 댐체에 적용하였으나, 최근에는 댐 본체에도 적용하고 있는 최신기술이다.

Table 1. Example of CSG Dam<sup>3</sup>

댐명	사업주체	당초계획 댐 형식	댐 높이 (m)	사다리꼴 CSG댐 형식 대상모재
역수(億首)댐	오끼나와 종합사무국 (북부댐 사무국)	중력식 콘크리트댐	약 40	굴착암 (CL급 이상)
산루댐	홋카이도 개발국 (산루댐 건설사무소)	"	약 50	하상사력
본명천(本明川)댐	큐수지방정비국 (나가사키 하천국도 사무소)	Rcok Fill댐	약 70	굴착암 (CL급 이상)

Figure 9. Typical cross section of CSG dam<sup>3</sup>Table 2. Relationship of dam type and volume, strength of foundation and dam body<sup>3</sup>

	댐 체적	요구되는 기초압반 강도	필요한 체체강도
아치댐	少	大	大
직각삼각형댐	↓	↓	↓
사다리꼴댐	多	小	小

### 3.2 사다리꼴 CSG 댐의 특징

사다리꼴 형상을 갖는 댐은 일반적인 중력식 콘크리트댐 과 같은 직각 삼각형단면을 갖는 댐과 비교하여, 다음과 같은 특징이 있다.

- ① 하중조건의 변화에 대하여 발생응력의 변동이 적고, 지진시에 있어서도, 체체저면의 연직응력이 기본적으로 압축영역에 있다.

Figure 10 은 정적하중 및 지진시 하중을 고려한 경우의 체체 저면에 생기는 연직응력 분포를 나타낸 것이다.

사다리꼴 형상은 지진이나 홍수에 따라 급격한

하중변동에 대하여 체체 및 기초압반에 발생하는 응력의 변동폭이 적고, 지진시에 있어서도 체체저면의 연직응력이 기본적으로 압축영역에 있다.

- ② 전도 및 활동에 대한 안전성이 높다.

Figure 10 에 나타낸 것과 같이 사다리꼴 댐에서는 지진시에 있어서도 체체저면의 연직응력이 기본적으로 압축영역으로 되는 형상을 채택하고 있고, 폭넓은 체체형상 때문에 전도 및 활동에 대한 안전성이 높다.

- ③ 체체 내에 발생하는 응력이 적고 체체재료에 요구되는 강도가 적다.

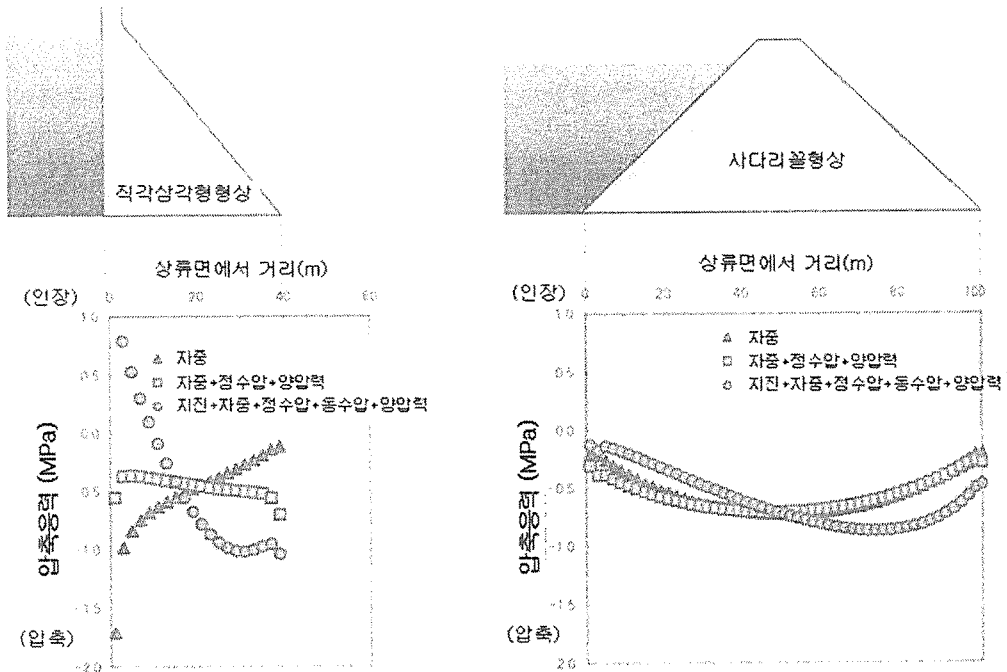


Figure 10. Distribution of vertical stress on dam<sup>3</sup>

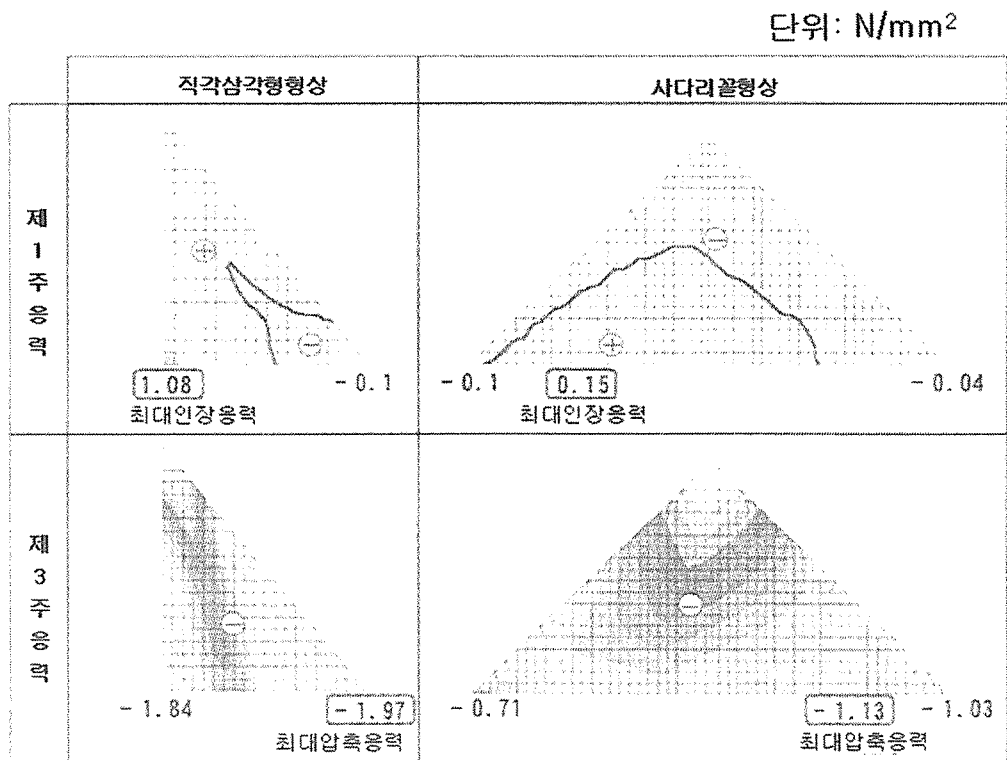


Figure 11. Distribution of stress in dam(h=50m, wl=45m, Ec/Er=2,sw+swp+sf.dwp, 250gal)<sup>3</sup>

Figure 11은 직각삼각형 형상과 사다리꼴 형상에 있어서 체체 내에 발생하는 최대 주응력 분포도(지진시)를 나타낸 것이다. 사다리꼴 형상은 직각삼각형 형상에 비하여 발생하는 응력이 적고, 특히 최대 인장응력은 약 1/7로 저감 된다.

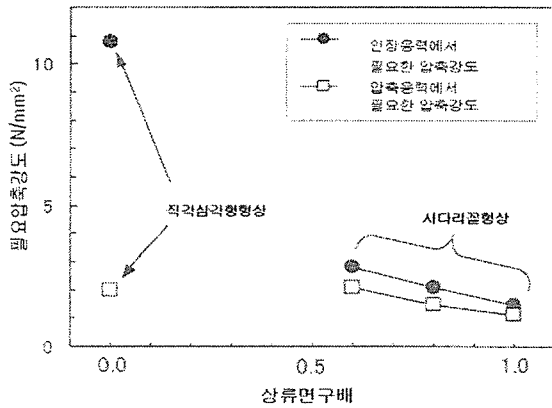


Figure 12. Dam shape and required strength of dam<sup>3</sup>

Figure 12 는 가정으로 체체재료의 인장강도가 압축강도의 1/10로 되었을 때 최대인장응력으로부터 필요로 하는 압축강도와 최대 압축응력으로부터 필요로 하는 압축강도를 사다리꼴 형상과 직각삼각형형상으로 비교한 결과이다.

사다리꼴 형상에서는 인장응력으로부터 필요로 하는 압축강도는 직각삼각형 형상에 비하여 훨씬 작다. 또한 사다리꼴 형상에서는 압축응력과 인장응력으로부터 필요로 하는 압축강도가 거의 같게 되며, 지진시에 체체 내에 발생하는 응력에 대하여 합리적인 체체 형상이라 말할 수 있다.

#### 4. 맺음말

이상에서 설명한 롤러다짐 콘크리트 및 CSG 를 적용한 콘크리트 댐의 시공은 콘크리트 댐의 안정성과 사력댐의 경제적인 측면을 모두 추구할 수 있는 공법으로, 국내에도 적극적으로 검토되어야 할 것이며 또한 다양한 분야에서 응용될 수 있는 기술이다.

#### < 참고 문헌 >

1. 한국수자원학회, “댐 설계기준”, 2003.
2. 한국수자원공사, “롤러다짐 콘크리트 댐의 국내 적용에 관한 연구”, 2003.
3. 사다리꼴 CSG 댐 기술자료 작성 위원회, “사다리꼴 CSG 댐 기술자료”, 2003.
4. JCOLD, “Current Activities on Dams in Japan”, 2003.
5. ASCE, “Roller-Compacted Concrete”, 1994.
6. 산업기지개발공사, “Rolled Concrete 공법에 의한 댐 시공”, 1985.
7. Baile Wang, Jianping Zhou & Guanfu Chen, “高RCC 중력식댐의 특별 설계 요구사항”