

02

아스팔트 표면차수벽형 석괴댐(AFRD)의 설계기준 제안



김 경 옥 부사장 | (株)이산

표면차수벽석괴댐 형식은 크게 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete Face Rockfill Dam 이하 CFRD)와 아스팔트 표면차수벽형 석괴댐(Asphalt concrete Face Rockfill Dam 이하 AFRD)로 크게 대별된다. 국내에서 CFRD는 동북댐을 시작으로 최근에 영주댐까지 시공되어 많은 설계기술과 경험이 축적되어 있다. 그러나 AFRD는 국외에서는 오래전부터 시공되어 왔으나 국내에서는 시공한 사례가 없으며 최근에 K-water가 조지아 댐스크라댐 개발을 착수함으로써 AFRD에 대한 관심을 가지게 되었다. 또한 최근에 많은 건설사들이 수력발전에 대한 해외개발사업을 하고 있으며 파키스탄과 같은 국가에서는 대규모 Alluvium(충적층) Bed 지점과 지진 등을 고려하여 AFRD형식이 채택되는 경우가 많이 있다. 따라서 국내기업들의 해외 진출시를 대비해 AFRD형식의 기준, 장·단점을 살펴보고 설계 및 시공시 참조가 되었으면 한다.

1. AFRD 형식의 선정

차수벽을 선정할 시 요구되는 조건은 발생하는 응력에 대해 안정할 것, 수압의 변화에 대해 차수성을 가질 것, 파랑 및 그 밖의 기상조건에서 내구성을 가질 것 등이 있다. 일반적으로 AFRD는 CFRD와 형식선정에서 비슷한 조건을 가지고 있으나 장·단점을 비교하여 형식을 채택하여야 할 것이다.

장 점	단 점
저수지 수위가 급변하는 조건에 유리하며 상류 Riprap 불필요	강한 직사광선에 노출되는 지역에서는 열화발생으로 주기적인 유지보수 필요
표면형 차수벽이므로 코어형 차수벽에 비하여 유지보수지 접근이 용이함	댐 현장 고도와 기후에 따라 유지보수 주기가 20년~50년으로 차수벽 갱신필요
기초처리와 댐축조공을 별개 공정으로 수행 가능하여 공기 측면 유리(CFRD와 동일)	연성의 차수벽으로 외부 충격으로부터 파손이 용이함
지진시에도 댐기능 유지가능하고 경제적임	댐 시공중 중간담수가 어려움
하상 자갈류를 제체 일부로 활용 가능	수위강하가 어려운 운영조건에서는 유지보수 어려움

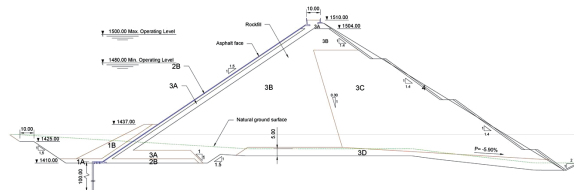
(표 1) AFRD 장·단점

구 분	CFRD	AFRD
기초지반	<ul style="list-style-type: none"> • “기초 처리된 연약한 풍화암 및 하천 퇴적층”에 시공 가능 • 대규모 하상 충적층(Alluvium)에 대담 시공사례 다수 	
재료원	<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 차수벽 형성 • 석산 및 하상 재료원 활용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 아스팔트 차수벽 형성 • 석산 및 하상 재료원 활용 가능
비탈면기울기	<ul style="list-style-type: none"> • 상류 : 1.3 ~ 1.6 • 하류 : 1.3 ~ 1.6 	<ul style="list-style-type: none"> • 상류 : 1.7 ~ 2.0 (축조재에 따라 1.5 ~ 1.6 가능) • 하류 : 1.3 ~ 1.5
지진 안정성	<ul style="list-style-type: none"> • 암석재의 주재료인 대형 암괴의 엷물림 작용으로 지진에 대한 안정성 비교적 높음 • 강성체 차수벽으로 변형에 상대적으로 불리 	<ul style="list-style-type: none"> • 암석재의 주재료인 대형 암괴의 엷물림 작용으로 지진에 대한 안정성 비교적 높음 • 연성체 차수벽으로 변형에 상대적으로 유리
유지보수	<ul style="list-style-type: none"> • 강한 직사광선에 노출되는 지역에서 상대적으로 유리 	<ul style="list-style-type: none"> • 강한 직사광선에 노출되는 지역에서는 열화발생
시공성	<ul style="list-style-type: none"> • 공사중 초기 담수 가능 • Slip Form에 의한 타설로 시공성 양호 	<ul style="list-style-type: none"> • 공사중 초기 담수 불가능 • 진동롤러 및 아스팔트 피니셔에 의한 포설 (사면경사가 급할 경우 사용 곤란)

〈표 2〉 CFRD와 AFRD 비교

2. AFRD의 표준단면 설계

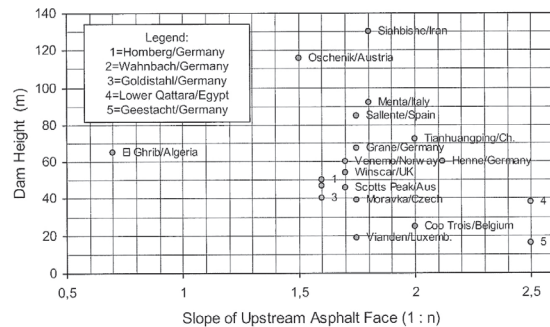
AFRD의 제체단면은 표면차수벽구간을 제외하고 CFRD의 제체단면과 유사하므로 아스팔트 표면차수벽에 대해 선만 기술한다.



〈그림 1〉 파키스탄 Kaigah HPP 댐 표준단면도

2.1 표면차수벽의 사면경사

AFRD는 아스팔트의 시공방법과 변형특성을 고려하여 주로 100m 이하의 댐에 설치한다. 또한 아스팔트를 포설하여 다질 때 용이하게 시공할 수 있도록 하고 설치한 차수벽이 장기간 서서히 미끄러져 파행(creep)하지 않도록 상류사면의 경사를 1:1.7 ~ 1:2.0으로 완만하게 한다. 그러나 연암 및 풍화암을 암석 축조재로 제외하고 축조할 경우에는 단면을 1:1.5 ~ 1:1.6으로 축소가 가능하다.



〈그림 2〉 세계의 주요 AFRD의 상류사면경사

2.2 아스팔트 표면차수벽의 두께 및 구조

① 두께

AFRD와 CFRD 표면차수벽의 두께를 비교 하면 AFRD의 두께가 CFRD보다 훨씬 얇은 것을 알 수 있다.

댐형식	차수벽 계산식	댐높이 90m일 경우 두께
AFRD	$T = 5 + H/25$	12cm
CFRD	$T = 0.3 + 0.003H$	55cm

*T = 차수벽의 두께(cm), H = 댐 높이(m)
<표 3> AFRD와 CFRD의 표면차수벽 두께 비교

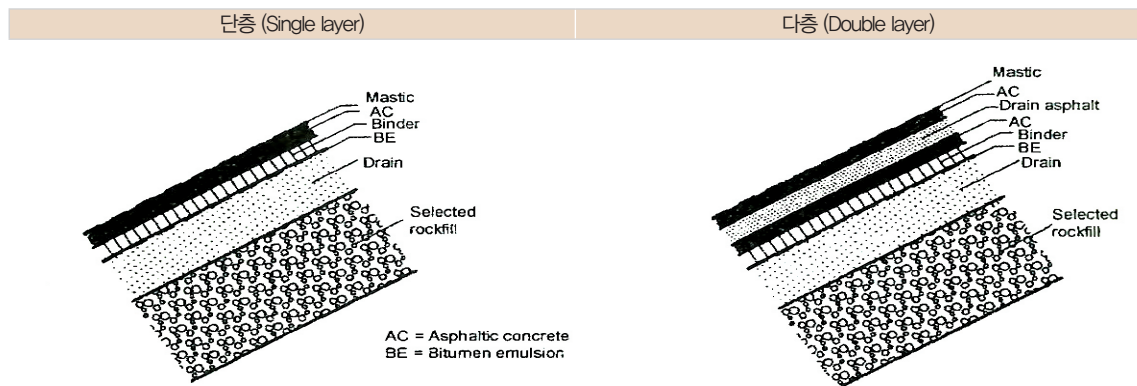
② 구조 및 주요기능

아스팔트 차수벽은 <그림 3>과 같이 단층(Single layer)과 다층(Double layer) 구조로 이루어진다. 다층구조는 상층(차수층 : 보통 2층 구조, 배수층(중간층), 하층(차수층)으로 되어 있고 하층의 하부에 포설을 용이하게 하기 위한 기층을 설치한다. 기층은 1~2층 아스팔트 콘크리트층이 되고 2층을 설치한 경우에는 아래층을 마카담 층, 위층을 레벨링 층 또는 바인더 층이라 한다. 또한 차수벽 표면에는 내구성을 크게 하기위해 보호막을 설치한다. 상층 및 하층에는 밀입도 아스콘을 이용해 상층에서의 균열 등이 발생하여 누수가 생기면 이것을 감사람으로 유도할 목적을 가진다. 마카담 및 레벨링 층은 빈배합 아스콘을 이용해 1층으로 완성하기도 한다.

아스팔트 차수벽의 필요조건과 각층의 구조 및 주요기능은 다음과 같다.

<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 투수성 • 각종 구조물 연결부위의 수밀성 확보 • 충분한 유연성 • 인장변형을 작용시 높은 신장력 • 역청재와 골재의 양호한 부착력 • 페이싱과 지지층 사이의 양호한 부착력 	<ul style="list-style-type: none"> • 페이싱을 통과하는 누수에 대한 침식과 파이핑 방지 • 누수시 수압조절을 위한 페이싱 시스템의 배수능력 • 시공중 지지층 표면 안전성 • 특수환경에서 노화에 대한 저항성 • 갤러리 접근성, 파랑 및 지진력에 대한 저항성
--	---

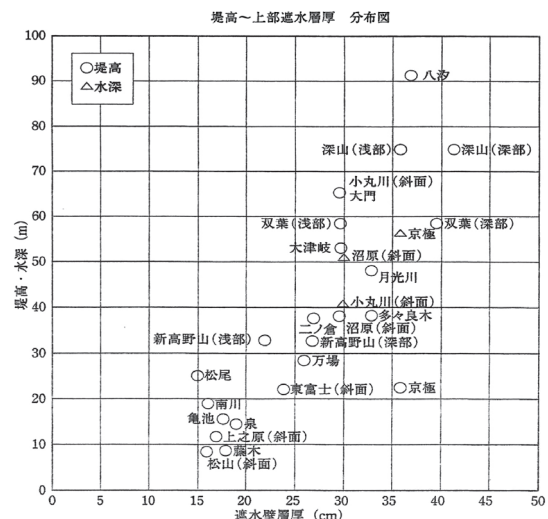
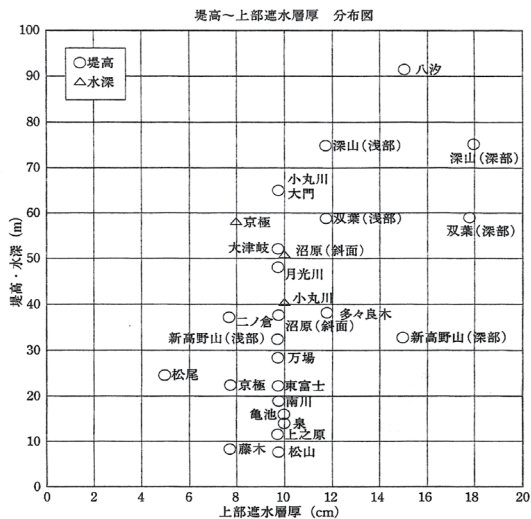
<표 4> 아스팔트 차수벽의 필요조건



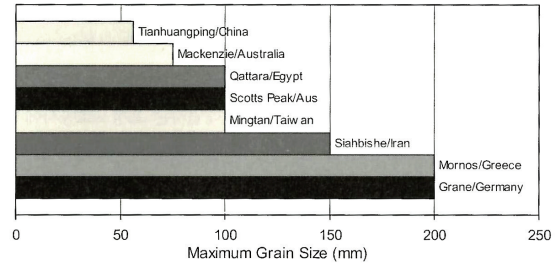
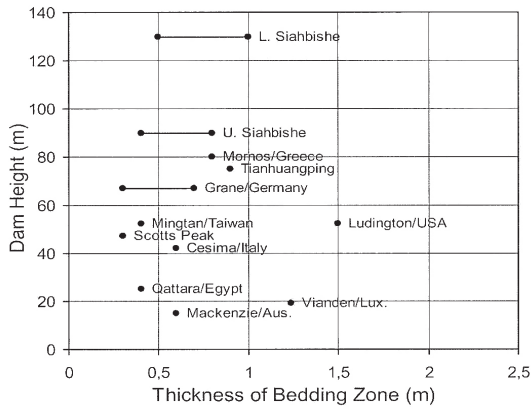
<그림 3> 아스팔트 표면차수벽의 구조

명 칭	주요 기능 및 목적	두께 (mm)									
표면보호층(Mastic)	• 아스팔트 표면차수벽의 표면보호용으로 전용기계를 이용하여 도포하거나 뿌려서 시공하여 자외선으로부터 아스팔트 콘크리트의 열화방지	1 ~ 3									
상부차수층(Upper AC)	• 차수목적 • 강한 태양열과 겨울에 동결융해에 대한 내구성 확보	(50~60) X 2									
배수층(Drain)	• 차수벽을 통해 스며들어오는 물을 즉시 배수해서 양압력을 제거하여 차수벽 파손 방지 • 누수량 측정으로 차수벽의 지수효과 규명 • 배수층의 두께(독일시방서)										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>담높이(m)</th> <th>아스팔트 배수층</th> <th>자갈 배수층</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>< 50</td> <td>60 ~ 100mm</td> <td>200 ~ 500mm</td> </tr> <tr> <td>> 50</td> <td>80 ~ 100mm</td> <td>500 ~ 1,000mm</td> </tr> </tbody> </table>	담높이(m)	아스팔트 배수층	자갈 배수층	< 50	60 ~ 100mm	200 ~ 500mm	> 50	80 ~ 100mm	500 ~ 1,000mm	
	담높이(m)	아스팔트 배수층	자갈 배수층								
< 50	60 ~ 100mm	200 ~ 500mm									
> 50	80 ~ 100mm	500 ~ 1,000mm									
하부차수층(Lower AC)	• 제체로의 누수침투 방지(차수)	40 ~ 60									
Binder 층	• Mccadam 및 Leveling 양 층으로 구성 • Leveling 층 : 차수층과 담체 사이의 변형성 및 차수성의 천이구간, 차수층의 포설 및 다짐을 위한 지지층(면고르기) • Mccadam 층 : 트랜지션과 결합, 포설기반	50 ~ 100									
Transition 층	• 차수벽을 설치하기 위해서 담체에 포설하는 쇄석층 • 아스팔트 차수벽에 가해지는 수압을 담체에 전달 • 지지력, 투수성, 열화에 대한 내구성(동결·융해), 평탄성 확보 필요	300 ~ 1,000									

〈표 5〉 아스팔트 차수벽 각 층의 주요 기능



〈그림 4〉 담높이에 따른 차수벽 두께 및 차수벽 층 두께(일본사례)

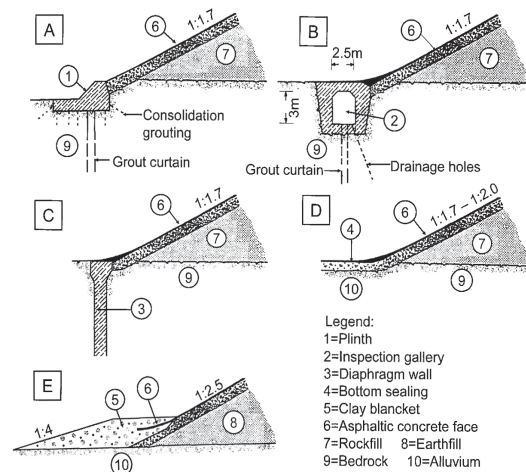


〈그림 5〉 세계 주요 AFRD에 설계한 Transition 층의 두께 및 최대입자

2.3 아스팔트 표면차수벽을 연결하는 방법

AFRD의 상류사면에 설치하는 아스팔트 표면차수벽은 지반에 잘 연결시켜 제체 내부로 크게 누수가 생기는 것을 방지해야 한다. 일반적으로 아스팔트 표면차수벽을 연결하는 방법은 다음과 같이 5종류가 있다

종류	연결방법 및 적용
A	<ul style="list-style-type: none"> • 그라우팅을 위해서 기반암에 설치한 콘크리트 프린스 또는 저부 블록(toe block)에 연결 • 일반적으로 댐높이가 20~30m이하로 낮은 AFRD에서 적용
B	<ul style="list-style-type: none"> • 그라우팅과 누수량을 측정하는 등 댐의 안전을 주기적으로 점검하기 위해 기반암 위에 설치하는 검사공(Gallery) 정부에 연결 • 높이가 50m 이상의 높은 AFRD에 적용
C	<ul style="list-style-type: none"> • 그라우팅 하기 어려운 지반을 차수하기 위해 지중에 설치한 격벽의 정부에 연결
D	<ul style="list-style-type: none"> • 양수발전소의 상부댐과 같은 인공저수지의 바닥에 수평 아스팔트 차수벽을 설치할 때 적용
E	<ul style="list-style-type: none"> • AFRD 저부에 불투수성의 점토층을 성토해서 그 내부에 아스팔트 차수벽을 연결



〈표 6〉 아스팔트 표면차수벽 연결방법

3. AFRD 설계기술의 적정성

3.1 아스팔트 차수벽의 요구성능

AFRD의 구성요소 중에서 가장 중요한 부분은 아스팔트 차수벽으로 투수성, 휨강도 및 휨강성, 사면에서의 안정성 (slope flow에 대한 저항성), 온도변화에 대한 저항성 및 내구성 등이다. 특히 투수성은 골재의 입도, 아스팔트의 혼합량, 배합된 아스팔트 복합재에 포함된 공기의 양 등이 매우 중요한 요소이다.

항 목	요 구 성 능
투 수 성	<ul style="list-style-type: none"> 차수층 : 투수계수 $k < 10^{-9}$ m/s, 간극율 $n < 3\%$ 배수층 : 투수계수 $k < 10^{-4}$ m/s, 간극율 $n < 20\sim 30\%$
역 학 적 성 질	<ul style="list-style-type: none"> 휨강도 및 변형율 : 12MPa, $\epsilon = 10^{-3}$ 변형계수 : 300~20,000 MPa(온도 및 재하속도에 의존)
사 면 에 서 의 안 정 성	<ul style="list-style-type: none"> 전단파괴에 대한 저항성 Slope flow에 대한 안정성
온 도 변 화 에 대 한 저 항 성	<ul style="list-style-type: none"> 저온시의 온도응력
내 구 성	<ul style="list-style-type: none"> 피로내구성, 내동결융해성, 내후성, 내마모성

(표 7) 아스팔트 차수벽의 일반적인 요구성능(JSCE, 2012)

3.2 설계시 고려사항

제체안전성	바인더층
<ul style="list-style-type: none"> 페이싱과 제체 설계는 한계상태 접근법 추천 제체 페이싱 안전성은 무한사면 해석법 적용 아스팔트 혼합재 안전성은 Van Asbeck방법 적용 제체 자중 및 기초침하 변위시 페이싱 수용여부 검토 페이싱-댐-기초시스템의 역학적 거동 모사필요 	<ul style="list-style-type: none"> 바인더층 포설 전 Tack Coat 위해 제체 표면 역청 유제 또는 고온의 역청재 분사(2~5kg/m²) 바인더층은 수포방지를 위해 간극을 함유해야함
배수층	불투수층
<ul style="list-style-type: none"> 다공질의 역청재 및 세립골재 혼합물 최소 골재 크기는 5~8mm 역청재 성분은 무게비로 2~5% 수준 배수층 안전성은 높은 간극비와 낮은 다짐도로 크리프 거동에 취약하며 주의깊은 설계 필요 배수층이 구별로 분할되면 누수위치 파악용이 	<ul style="list-style-type: none"> 복층 또는 단일층 라이닝 구조 적용 높은 댐, 지진대, 압축성 지반에서 복층구조 적용 상부층만 차수층으로 간주하며 내부 불투수층은 제체 포화와 침식방지 및 중간 배수층 지지용 복층 라이닝 구조 적용시 누수의 조기탐지 유리 복층구조시 침투수 조건은 갤러리까지로 짧은 유로

마감코팅	역청재료
<ul style="list-style-type: none"> • 차가운 역청유제 또는 뜨거운 역청 매스틱 (역청재 30%, 필러 70%, 세립모래, 화이버) • 아스팔트 페이싱의 노화를 지연시키는 필수요소 • 코팅 슬립핑 방지를 위해 2mm이하로 이층시공 	<ul style="list-style-type: none"> • 관입등급, 점성등급, 고온 혼합시 점성등급으로 분류 • 아스팔트재료는 관입등급으로 구별(80-100등급) • 최근 아스팔트 재료를 라텍스, 화이버, 폴리머 등을 추가하여 사용
아스팔트 골재 혼합물 배합	토사기초, 댐마루 연결방법
<ul style="list-style-type: none"> • 불투수성은 양입도 골재와 필러, 6-8%역청재로 배합, 골재 단위중량 2.1-2.5t/m³, 높은다짐도, 간극비 3% 미만 • 배수층은 빈입도골재, 충분한 역청재(2-5%) 간극율 10-30%, 투수계수는 10-2cm/s이상 • 바인더층은 빈입도-중간입도 골재배합, 역청재는 4-6%, 간극율 약 7-12% 	<ul style="list-style-type: none"> • 댐마루 접속부는 표면부 물이 내부 침투 방지와 파랑에 의한 파라펫 기능 • 토사기초에서 Cut-Off로서 다이어프램 월 채택 • 페이싱과 프린스, 컷오프 월 연결부는 침투수와 파이핑에 취약하므로 지수판 필수 • 갤러리는 접속부에 시공되므로 댐의 수평, 연직변형을 기초에 안전하게 전달해야 함

4. 일본의 AFRD의 손상 및 보수 사례

일본의 누마하라 조정지(전원개발(주)) 및 아시오댐(주)동경전력)의 아스팔트 차수벽의 손상원인 및 개소는 다음과 같이 정리할 수 있다

- (1) Blustering(상부차수층 및 표면보호층)
- (2) Crack(상부차수층 및 표면보호층)
- (3) Slope flow(도포 두께가 두꺼운 표면 보호층)
- (4) 빙설에 의한 박리마모, 자외선 등에 의한 열화(표면 보호층)

누하라 조정지는 완성 후 30년이 지난 지금까지 물을 빼 전면적인 조사를 수차례 실시하였다. 그 결과 표면 보호층은 자외선에 의한 열화, 겨울철 빙설 낙하에 의한 손실(마모)이 일부 보였지만 차수벽 본체에 대한 열화 현상은 일어나지 않았고 차수벽의 누수는 없었다.

그러나 표면 보호층은 차수벽 본체 보호 관점에서 중요한 역할을 다하고 있기 때문에 마모현상이 보이는 범위(거의 정상부에서 중간 수위까지)에 보수를 실시하여 장수화를 도모하였다.

이것은 표면 보호층을 정기적으로 점검, 조사하고 열화, 손상개소 보수를 적절하게 실시하여 아스팔트 차수벽 전체 기능이 장기간에 걸쳐 확보할 수 있는 것을 시사한다.

5. 건의

지금까지 기술한 내용들은 관련 문헌과 학회 발표자료를 취합한 정도이다. 현재 K-water에서는 Hybrid Dam의 일환으로 AFRD에 대한 연구개발이 계속되고 있다.

한국의 댐기술자들이 새로운 댐형식을 접할 수 있는 기회를 확보하기 위해서는 이런 연구개발 결과와 외국의 설계 및 시공사례를 종합하여 국내 “댐설계기준”과 “표준시방서”에 대한 제정이 시급하다.

이를 바탕으로 체계적인 기술력을 확보함으로써 해외 댐개발사업에서 좋은 성과를 이룰수 있을 것이라 의심치 않는다.



참고문헌

- 필댐의 설계(최형식, 2014, 기문당)
- 多目的ダムの建設(社団法人 ダム技術センター, 平成17年)
- 대댐회지(사단법인 한국대댐회, 2015, 39호)-새로운 댐형식, 아스팔트차수벽형 석괴댐(신동훈, 박동순)
- AFRD 댐의 설계외 시공기술(2015 닥터컨퍼런스, K-water 연구원)