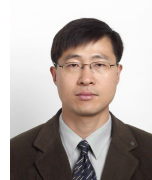


# 한탄강댐의 RCD 배합설계 및 시험시공

## Field Application of Roller Compacted Dam concrete in Hantan river Flood Control Dam



임진강건설단 공사차장  
이종연(Jong-Yean Lee)

### I. 한탄강홍수조절댐 건설사업

수도권에 인접하고 있는 임진강 유역은 수자원개발의 잠재력이 매우 큰 지역이나 지리적, 군사적, 정치적 특성으로 인해 유역현황 및 수자원에 대한 조사와 개발이 낙후되어 있다. 또한 유역내 홍수조절을 위한 댐이 전무하고 국지성 집중호우에 의한 하천의 소통능력이 부족하여 홍수피해가 반복하여 발생하고 있는 실정이다. 따라서 정부에서는 임진강 유역의 수해방지종합대책으로 한탄강홍수조절댐 건설사업을 추진하게 되었다.

한탄강홍수조절댐의 형식은 지형 및 지질조건, 재료원조건, 댐 안전성, 여수로 설치조건, 친환경조건, 경제성 등을 종합적으로 고려하여 콘크리트 중력식댐으로 결정하였으며, 타설공법으로 Layer 공법을 채택하였다. 또한 한랭지역으로 연간 타설기간이 짧다는 점, 댐 길이(690m)가 길어 고정설비가 증가할 수 있다는 점 등을 고려하면서 신기술 도입을 통한 기술축척을 도모하고자 일본에서 적용하고 있는 RCD공법을 채택하였다. 한탄강홍수조절댐의 조감도는 그림 1, 표준단면도는 그림 2과 같다.



그림 1. 한탄강홍수조절댐 조감도(한국수자원공사, 2008)

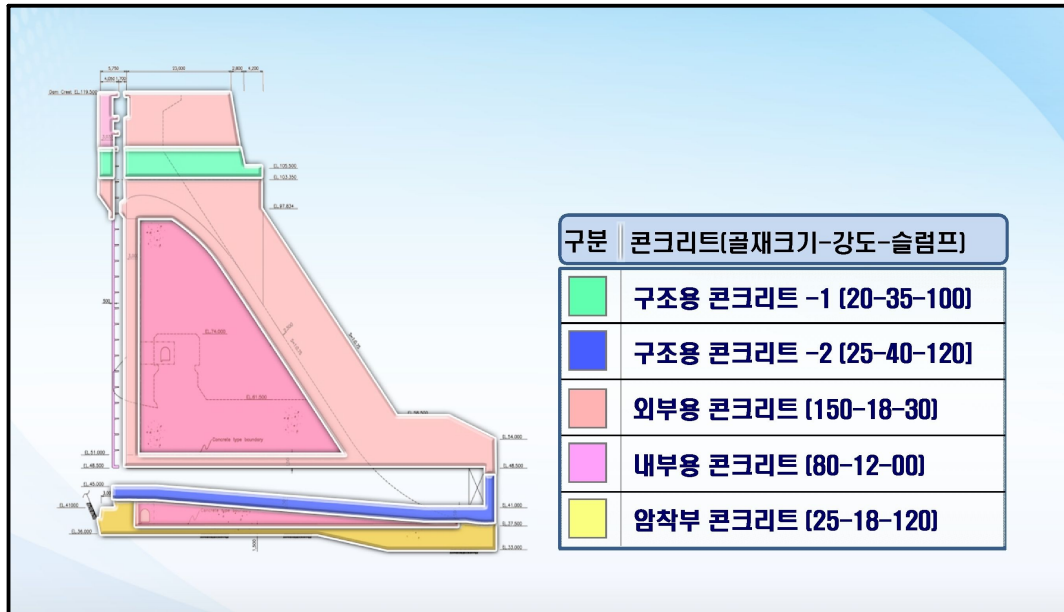


그림 2. 한탄강홍수조절댐 표준단면도(한국수자원공사, 2008)

## II. 한탄강댐의 RCD공법 추진현황

한탄강홍수조절댐은 RCD공법을 국내 최초로 적용하였으나, 현재 국내 시공실적 및 관련 품질기준이 미흡한 상태이며, 해외선진국가의 기술자료를 기초하여 작성된 RCD의 시공 및 품질관리를 위한 가이드 수준의 관리지침을 근거로 시공을 수행할 실정이었다.

따라서, 외국의 자료를 근거로 하여 계획되어 있는 한탄강홍수조절댐 RCD공법에 대하여 현장 적용에 앞서 RCD용 콘크리트 배합의 확인 및 시공기술 습득을 위한 시험시공을 실시하여 설계의 적정성을 도출하였다.

‘09.7월에서 12월까지 현장 골재를 이용하여 건국대학교와 합동으로 RCD용 내·외부 콘크리트의 배합설계를 실시하였다. 배합설계 결과 선정된 시방배합에서 시공성에 미치는 영향이 큰 단위수량과 잔골재를 변화시켜 최적의 배합을 확인하고 전압횟수를 변화시켜 RCD 시공시 최적의 포설방법과 전압사양을 결정하는 시험시공을 ‘10.3월에서 9월까지 6차에 걸쳐 실시하였다.

또한, 처음 시행하는 시험시공에 대하여 자문을 받고자 1개월 동안 일본 수자원기구의 댐 기술감(명장, 야마구치)을 초청하여 오퍼레이터 교육 등 RCD 시공능력 배양을 위한 교육을 실시하였고, 임진강건설단·시공사(대림산업)·협력사(상일토건)·장비제작업체 등 10명이 일본 홋카이도에 있는 유바리슈바로댐을 ‘10.5.18~5.22간 현장체험을 실시하여 RCD 댐 축조에 대한 Know-how를 확보하였다. 기술자문 및 현장견학은 그림 3과 같다.

이러한 노력의 결과로 ‘11.4.27 본댐 우안에서 RCD의 첫 타설을 시작하여 9.30일 현재 19.3천<sup>㎡</sup>를 타설중으로 본댐 축조물량 742천<sup>㎡</sup>중 319천<sup>㎡</sup>를 RCD공법으로 시행할 계획에 있다. 평균적으로 축조물량 1,000<sup>㎡</sup>를 12시간에 걸쳐 작업을 실시하므로 시간당 80 ~ 90<sup>㎡</sup>의 타설속도로 원활히 추진하고 있다.



그림 3. 기술자문 및 현장견학

### Ⅲ. 롤러다짐콘크리트의 배합설계

#### 1. RCC 배합설계 방법

RCD(Roller Compacted Dam concrete) 공법에 사용되는 콘크리트는 극도로 된 반죽이며, 단위시멘트량이 매우 적은 빈배합이다. 따라서 건조수축 저감 및 균열발생 억제 등의 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 RCC(Roller Compacted Concrete) 배합설계에 사용되는 대표적인 방법으로는 미국과 일본에서 사용되고 있는 방법을 들 수 있으며, 그 특징은 다음과 같다(원종필 등, 2003).

- 미국 : 미국 공병대에서 정립된 방법으로 배합의 기본량에 대한 다양한 표와 그래프를 만들어 배합설계에 직접 적용하는 방법이다. 이 방법은 매우 신속하고 간편하지만 사용되는 재료의 특성이나 현장의 특성이 반영되지 않는다는 단점이 있다.
- 일본 : 지진에 취약한 지질조건을 감안하여 기후조건과 배합설계에 사용되는 재료에 적합하도록 반복시험을 통해 배합을 결정하는 방법이다. 이 방법은 배합 결정 후 현장에서 시공성과 적용성이 뛰어나지만 무수한 반복시험으로 시간이 오래 걸리며, 초기시험을 위한 기본범위를 결정하는데 있어 적절한 기준이 정해져 있지 않다는 단점이 있다.

따라서 한탄강홍수조절댐에 적용할 RCC의 배합설계를 위해 두 방법의 장점을 극대화하고 단점을 보완하기 위하여 미국 공병대의 방법 및 과거 시공실적을 참고로 주요변수의 초기값을 산정하고 일본과 같이 반복시험을 실시하여 적정 배합비를 도출하고자 하였다. 배합설계방법은 그림 4와 같다.

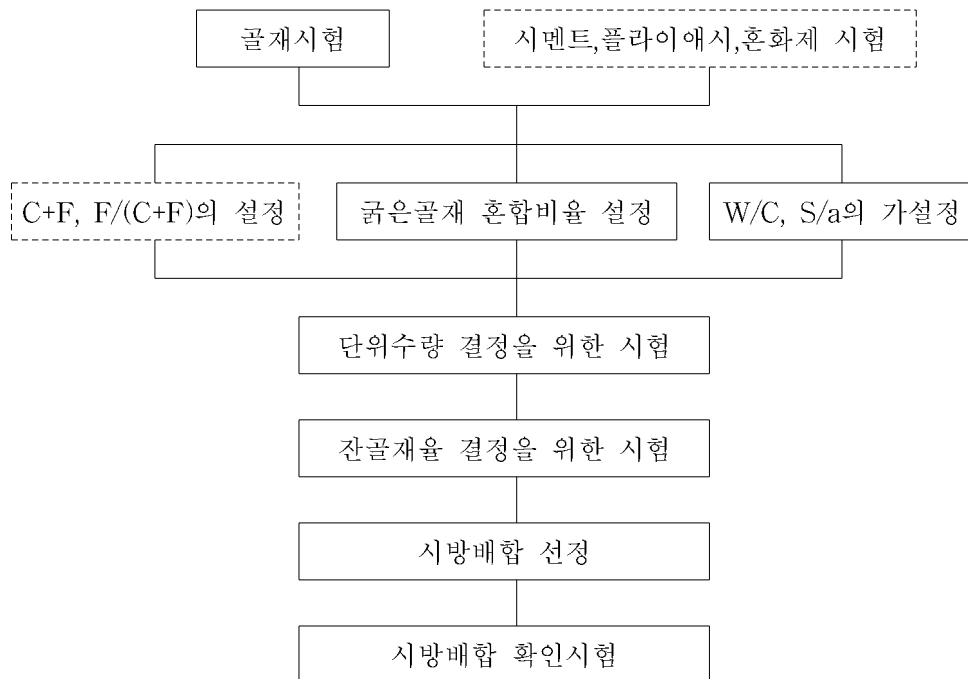


그림 4. 배합설계방법

## 2. 배합설계의 실시

### (1) 배합조건

RCD 공법에 적용되는 콘크리트는 일반적으로 파이프 쿨링(Pipe-cooling)을 실시하지 않으므로 수화열을 감소시키기 위하여 되도록 단위시멘트량을 적게 사용한다. 이처럼 시멘트 페이스트량이 적은 RCC는 적절한 워커빌리티(Workability) 또는 다짐성(Compactability)을 확보하기 위한 배합설계가 필요하고, 이를 고려하여 결정한 배합조건은 표 1과 같다. 콘크리트의 배합강도는 관용해석을 통해 안정성이 확보된 본댐부에 대하여 FEM 응력해석을 실시한 후 제체 내에서 발생하는 응력이 허용응력 내에 있는가를 확인하여 12MPa를 적용하였으며, 굵은골재 최대치수는 재료분리 발생 및 시공성을 감안하여 일반적으로 사용되는 80mm를 적용하였다. RCD용 콘크리트는 슬럼프가 0인 빈배합 콘크리트이므로 일반적인 슬럼프 테스트가 아닌 진동대 다짐시험(VC test)에 의하여 반죽질기를 측정하여 적용한다. 따라서 RCD용으로 개발된 진동대식 소형 VC시험기를 이용하여 트래피커빌리티(Trafficability)와 진동롤러 다짐에 적합한 반죽질기를 만족시킬 수 있는 VC값인  $20 \pm 10$ 초를 관리목표치로 적용하였다.

표 1. 배합조건

$f_{ck}$ (MPa)	$G_{max}$ (mm)	Slump (mm)	VC값 (sec)	Air (%)
12	80	0	$20 \pm 10$	$1.5 \pm 1$

## (2) 사용재료

시멘트는 소요강도가 얻어지는 범위 내에서 수화열이 저감될 수 있도록 초기 재형에서 낮은 발열량과 상대적으로 긴 응결시간이 필요하기 때문에 RCD용 콘크리트에서 가장 많이 사용되는 국내산 2종(중용열) 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 골재는 굵은골재와 잔골재 모두 한탄강댐 인근의 석산에서 채취하여 제조한 것으로 일본 토목학회 콘크리트 표준시방서(멤편) 및 한국수자원공사 공사시방서(롤러다짐 콘크리트공)의 입도분포 규정을 적용하였으며, 굵은골재는 3종류(80mm, 40mm, 20mm)의 골재가 생산되므로 개별 골재의 입도조건을 관리하는 것이 아니라 전체 골재에 대한 입도조건에 만족할 수 있도록 골재 크기별 혼합비율을 설정하여 사용하였다. 또한 수화열 저감, 장기강도 증가 및 워커빌리티 개선을 목적으로 시멘트량의 30%를 플라이애시로 치환하여 사용하였으며, 댐 구조물의 동결융해 저항성 확보, 워커빌리티 개선 및 경시변화 저감을 위하여 폴리카르본산계의 AE 감수제를 사용하였다.

## (3) 배합시험

다른 댐의 시공실적을 바탕으로 단위수량 5종류, 잔골재율 5종류를 조합하여 총 10가지의 콘크리트 배합을 실시하여 물-시멘트비 75.6~79.7%, 잔골재율 34%로 가설정하였다. RCD용 콘크리트의 단위수량은 진동롤러로 쉽게 다짐할 수 있는 범위 내에서 적게 할 필요가 있지만, 그 한도를 벗어나면 충분한 다짐이 되지 않아 콘크리트 안에 공극이 남게되어 콘크리트의 품질이 저하되므로 단위수량을 변화시켜 VC시험을 통하여 시공성이 좋은 단위수량을 찾는 것이 중요하다. 따라서 가설정된 잔골재율인 34%를 고정하고 단위수량을 5kg/m<sup>3</sup>씩 변화시켜 VC값의 관리목표치인 20초가 되는 단위수량을 찾은 결과 94kg/m<sup>3</sup>임을 알 수 있었다.

다시 단위수량을 94kg/m<sup>3</sup>으로 고정하고 잔골재율을 2%씩 변화시켜 가장 다짐하기 쉬운 상태가 되는 최적 잔골재율을 확인하기 위해 VC값이 최소가 되는 양을 찾은 결과 32%임을 알 수 있었고, 육안관찰에서도 재료분리가 적고 워커빌리티가 양호하므로 32%를 최적 잔골재율로 선정하였다. 단위수량과 VC값의 관계 및 잔골재율과 VC값의 관계는 그림 5와 같다.

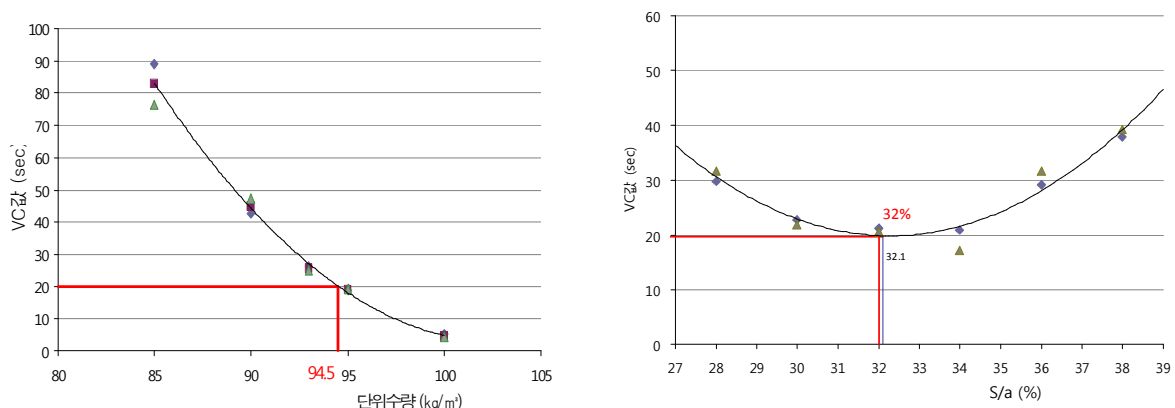


그림 5. 단위수량과 VC값의 관계 및 잔골재율과 VC값의 관계

### 3. 배합설계 결과

배합시험 결과 단위수량 94kg/m<sup>3</sup>, 잔골재율 32%일 때 최적인 것으로 밝혀졌으며, 이를 시험한 결과 표 2와 같이 시험항목의 목표치를 모두 만족했음을 알 수 있다. 따라서 표 3의 배합을 시방배합으로 결정하였으며, 시간의 경과에 따른 VC값의 측정 결과와 일본 유바리 슈바로담 사례 및 문헌을 참고하여 콘크리트 펴고르기 이후 다짐 전까지 적정 VC값은 60초, 작업 한계시간은 230분으로 결정하였다.

표 2. 배합시험 결과

시험항목	시험결과	목표치
소형 VC값	20 ~ 22 sec	10 ~ 30 sec
공기량	1.4 %	1.5 ± 1 %
단위 중량	2.44 t/m <sup>3</sup>	2.30 t/m <sup>3</sup> 이상
압축강도	15.8 MPa	12 MPa 이상

표 3. 시방배합

W (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	F/A (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )			AE제 (kg)
						80mm	40mm	20mm	
94	76.4	86	37	32.0	737	783	211	571	0.369

- 주) 1. 굵은골재 합성 혼합비율 : 80~40mm 32%, 40~20mm 31%, 20~5mm 37%  
 2. 배합조건 비중 : 시멘트(중용열) 3.17, 플라이애시 2.24  
     굵은골재(합성) 2.72, 잔골재 2.72  
 3. 혼화제 : 폴리카르본산계[(C+F)×0.3%]

## IV. 롤러다짐콘크리트댐의 시험시공

### 1. 시험시공의 규모

RCD용 콘크리트는 일반적인 댐 콘크리트에 비하여 단위시멘트량이 적고, 된 비빔이기 때문에 재료분리가 일어나기 쉽고, 약간의 단위수량 변화만으로도 컨시스턴스가 크게 변동하여 다짐의 정도가 시공품질을 크게 좌우하게 되므로 RCD용 콘크리트의 다짐 및 배합특성을 파악하고자 시험시공을 실시하였다. RCD 시험시공에 사용한 콘크리트량은 1,531m<sup>3</sup> 정도로 현장 B/P를 이용하여 생산하고 시험시공은 B/P Stock Pile 기초에서 실시하였다. RCD용 콘크리트의 1Lift 높이는 콘크리트의 제조설비 능력, 운반능력, 타설능력 및 콘크리트 표면에서의 다짐효과 등의 시공능력과 콘크리트의 충분한 품질확보가 가능한 높이를 고려하여 75cm를 기준으로 하였다.

## 2. 시험시공 배합의 종류

RCD 시험시공은 6차에 걸쳐 실시하였는데 5차까지는 배합시험 결과 선정된 시방배합에서 시공성에 미치는 영향이 큰 단위수량과 잔골재율을 변화시켜 최적의 배합을 결정하였으며, 6차의 시험시공에서는 전압횟수를 변화시켜 RCD 시공시 최적의 포설방법과 전압사양의 변화 및 각종 시공기술을 습득할 수 있도록 하였다. 시험시공 배합의 종류는 표 4와 같다.

표 4. 시험시공 배합의 종류

종류	단위수량(kg/m³)			잔골재율(S/a)			전압횟수(왕복)			
	W +5kg	최적치	W -5kg	S/a +2%	최적치	S/a -2%	2	4	6	8
1		◎			◎				◎	
2			◎		◎				◎	
3	◎				◎				◎	
4		◎		◎					◎	
5		◎				◎			◎	
6-1		◎			◎		◎			
6-2		◎			◎			◎		
6-3		◎			◎				◎	
6-4		◎			◎					◎

## 3. 시험시공 결과

레벨에 의한 침하량 측정, RI시험, VC시험, 압축강도시험 등과 더불어 육안관찰을 실시한 결과 단위수량 94kg/m³은 양호하였으나 (최적치±5kg)의 경우 시공성이 불량한 것으로 밝혀졌으며, 잔골재율 32%에서 (최적치±2%)의 경우 시공성에 미치는 영향이 적은 것으로 나타나 시방배합이 적절하다는 것을 확인하였다. 시험시공 중에 실시한 시험항목 측정치에 대한 결과는 표 5와 같다.

5차의 시험시공 결과를 토대로 최적 배합을 결정하였고 이에 따른 설계기준치를 만족할 수 있는 전압횟수를 결정하기 위하여 왕복운행의 무진동 2회를 기본으로 진동 2회, 4회, 6회, 8회로 전압횟수를 변동시켜 시험시공을 실시하였고, 시험시공을 통하여 타설된 콘크리트의 외관평가 및 압축강도, 단위체적중량을 측정하기 위하여 ϕ200mm의 코어를 채취하였다.



표 5. 시험시공 측정치 결과

구 분			VC값 (sec)	공기량 (%)	공시체 단위중량 (t/m³)	공시체 압축강도 (MPa)				코 어 단위중량 (t/m³)	코어 강도 (f56) (MPa)	침하량 (mm)	RI (t/m³)	코어외관 평 가 점
Case	W (kg/m³)	S/a (%)				f7	f28	f56	f91					
1	94	32	22	1.5	2.52	5.8	9.2	12.3	15.6	2.50	16.4	42	-	4.52
2	89	32	33	1.4	2.50	4.2	10.2	13.3	16.3	2.48	14.2	39	-	3.54
3	99	32	11	1.6	2.51	4.1	8.6	12.7	14.3	2.50	12.3	35	-	3.84
4	94	34	26	1.7	2.48	4.6	10.8	13.6	15.1	2.46	12.4	41	-	4.46
5	94	30	25	1.6	2.51	5.4	11.1	14.3	16.0	2.50	12.6	43	-	4.18
6	94	32	19	1.2	2.47	5.2	11.9	14.9	16.5	2.55	13.1	36	2.376	3.97

시험결과에 의하면 진동 6회, 8회의 경우 밀도(2.3t/m³) 및 압축강도(12MPa)가 설계기준치 이상이었으며, 표면의 재료분리 여부 및 공동의 생성여부를 판단하기 위한 코어의 외관평가도 B급(양호) 이상으로 나타나 적당한 전압횟수가 6회 이상임을 확인하였다. 전압횟수 변동에 따른 시험결과를 표 6에 나타내었다.

표 6. RI test 및 코어 시험결과

구 분		측 정 결 과				평균값	비 고
전압횟수	시험항목						
2회	RI	2.185	2.221			2.203	
	단위중량	2.552	2.453			2.503	
	압축강도	10.79	9.56			10.18	
	외관평가	3.00	2.60			2.80	
4회	RI	2.284	2.247			2.266	
	단위중량	2.515	2.542			2.529	
	압축강도	10.83	10.22			10.53	
	외관평가	3.20	3.20			3.20	
6회	RI	2.333	2.360	2.373	2.327	2.376	
		2.422	2.411	2.408			
	단위중량	2.604	2.493	2.556	2.539	2.554	
		2.574	2.550	2.564			
	압축강도	12.03	12.66	13.20	14.80	13.17	
		13.78	12.47	13.22			
	외관평가	3.90	4.10	3.80	3.80	3.97	
		4.10	4.00	4.10			
8회	RI	2.396	2.331	2.376		2.367	
	단위중량	2.548	2.603	2.641		2.597	
	압축강도	14.57	11.31	12.21		12.70	
	외관평가	4.20	4.10	4.00		4.10	



또한, RCD 시공중 다짐밀도를 얻을 수 있도록 다짐관리가 필요한데 코어채취는 타설 후 최소 56일 정도의 양생기간이 필요함에 따라 타설 중 일정한 빈도를 갖고 코어채취를 하기에는 어려움이 있어 현장시험으로 삼입봉 끝에 위치한 저준위 방사선이 측정부에 도달하는 전달속도를 측정하여 콘크리트의 다짐정도(밀도) 판단하는 RI시험을 도입하였다. 시험시공을 실시할 때 동일한 위치에서 코어채취와 RI시험을 실시하여 RI값이 2.3t/m<sup>3</sup> 이상인 경우 코어의 압축강도와 단위체적중량이 품질기준을 만족하는 것으로 확인되었고, 실제 시공시 기준치 이상이 되도록 관리하고 있다. 금년도 RCD공법에 의한 댐 축조가 처음이므로 축조 1차년도(2011년)에 RI값과 코어 밀도간의 관계를 확인하기 위하여 코어 채취를 통한 시험 데이터를 축적하여 축조 2차년도(2012년) 부터는 RI시험으로 RCD 품질관리가 가능토록 준비할 계획이다. 전압횟수 변동에 따른 압축강도 및 RI시험 결과는 그림 6, 채취한 코어의 외관은 그림 7과 같다.

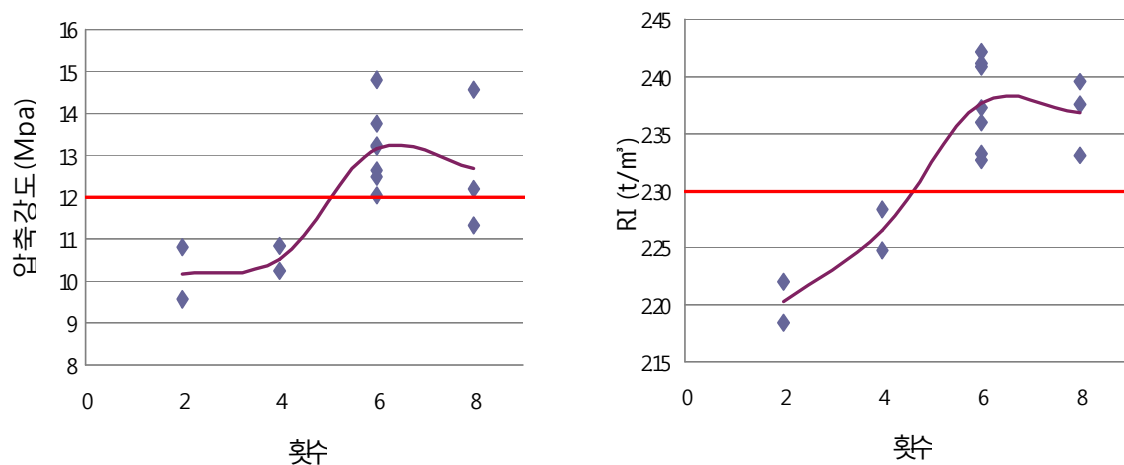


그림 6. 전압횟수에 따른 압축강도 및 다짐밀도(RI값)



그림 7. 시험시공 후 채취한 코어

## V. 결론

한탄강홍수조절댐은 RCD공법을 적용하기 위하여 국내 실정에 적합하도록 배합설계 및 시험시공을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 미국 공병대의 방법과 일본에서 사용되고 있는 방법을 혼용하여 최적의 배합비를 도출한 결과 단위수량  $94\text{kg}/\text{m}^3$ , 잔골재율 32%, 단위시멘트량  $123\text{kg}/\text{m}^3$ , 플라이애시 치환율 30%로 RCD용 콘크리트의 배합설계를 완료하였다.
- 2) RCD용 콘크리트의 다짐 및 배합특성을 파악하고자 단위수량, 잔골재율, 전압횟수를 변화시켜 시험시공을 실시한 결과 시방배합이 적절한 것으로 확인하였다. 또한 다짐횟수는 6회 이상에서 밀도( $2.3\text{t}/\text{m}^3$ ), 코어의 압축강도( $12\text{MPa}$ )가 설계기준치 이상이며, 코어의 외관평가도 양호한 값으로 나타나 적정 전압횟수가 6회임을 확인하였다.

임진강 유역의 홍수피해 경감을 위하여 건설 중에 있는 한탄강홍수조절댐은 국내 최초로 RCD 공법을 적용하였으나, 국내 시공실적 및 품질관리 기준이 미흡한 상태이기 때문에 시공에 앞서 설계의 적정성 확인을 위하여 시험시공을 실시하였다. 앞으로 한탄강홍수조절댐에 적용된 배합설계 및 시험시공 사례가 국내 타 댐의 설계에 반영되어 시공성 및 경제성이 우수한 RCD 공법이 국내에 많이 적용되었으면 한다.

## 참고문헌

1. 원종필, 윤종환, 황금식, 장필성, 김완영, 정우성 (2003), “RCC 댐 콘크리트의 배합비 도출에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 997-1002.
2. US Army Corps of Engineers (1995), "Seismic design provisions for roller compacted concrete dams", EP 1110-2-12.
3. 한국수자원공사 (2008), “한탄강홍수조절댐 기본 및 실시설계보고서”