

방사선 차폐용 고밀도 콘크리트 시공에 관한 연구

A Study on the Construction of High Density Concrete for Radiation Shield

이 제 방 조 용 복 변 형 균 유 건 철 임 병 대
Lee, Jay Bang Cho, Yong Bok Byun, Hyung Kyun Yu, Kun Chul Lim, Byung Dae

ABSTRACT

Heavyweight(or High density) concrete, which is generally for shielding structures, differs from normal weight concrete by having a higher density and special compositions to improve its attenuation properties. There are setting 7 Beam Ports around the reactor of the KMRR Project(Korea Multi-purpose Research Reactor) conducted by the KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute). High density($\rho=5.0t/m^3$) and Heavyweight($\rho=3.5t/m^3$) concrete were placed around the Beam Ports in order to shield radiation. This paper was discussed about construction of High density concrete. High density concrete was placed with the method of Preplace Aggregate. Coarse metallic aggregate(steel shot) was used. Boron, boron carbide(B_4C), was used to capture effectively the neutron. The mock-up test was carried out. And the construction of High density concrete was performed successfully.

1. 서론

원자핵의 상태가 불안정하여 안정된 상태를 찾기위하여 방사선을 방출하는 핵종으로서 방사선 종류로는 α , β , γ , X, 중성자선 등이 있다. 이와같은 방사선은 물질을 투과하는 성질을 가지고 있는데 α 선, β 선과 같은 전하입자는 X선, γ 선과 같은 전자파

나 중성자선과 같은 무전하입자에 비교하면 투과력이 적다. 전자파나 무전하입자는 상당히 두꺼운 물체를 투과하는 성질이 있어 결국 콘크리트로 방사선을 차폐하는 대상은 X선과 γ 선 및 중성자선이다.

일반적으로 방사선의 차폐효과는 비중과 두께의 곱에 비례하며, 두께가 동일하면 비중이 클수록 차폐효과는 우수한 것으로 알려져 있다. 따라서 차폐용 구조물에는 보통 중량콘크리트가 쓰이는데, 이 때 이것은 고밀도화와 방사선 감쇠능을 향상시키기 위한 특별한 구성성분을 갖게된다. 중량콘크리트가 감마선을 흡수하는데 사용될

- * 현대건설·기술연구소, 연구원
- ** 정회원, 현대건설·기술연구소, 선임연구원
- *** 현대건설·한국원자력연구소현장, 소장
- **** 현대건설·한국원자력연구소현장, 차장

때는 밀도와 재료비가 가장 중요한 문제가 된다. 또한 중량 차폐콘크리트가 중성자를 감쇠하는데 사용될때는 수소를 발생시킬 수 있는 가벼운 원자량을 가진 재료가 충분히 콘크리트 혼합물에 포함되어야만 한다.

한편 한국원자력연구소(Korea Atomic Energy Research Institute : KAERI)에서는 현재 다목적연구용원자로(Korea Multipurpose Research Reactor : KMRR Project)건조사업이 진행중에 있다. 그 중에서 연구용 원자로 주변에 7개의 중성자 조사 장치(Beam Port)가 설치되는데, 그 공정에서 ①Beam Tube Housing과 Casing사이 및 ②Ring Plate와 Door Guide Plate사이(그림 1, 2 참고)에 방사선 차폐 콘크리트를 타설하게 되어 있다. 그런데 시방요구 조건은 ①은 밀도는 $5.0t/m^3$, 90일 압축강도는 $210kg/cm^2$ 의 고밀도콘크리트(High Density Concrete)를, ②는 밀도 $3.5t/m^3$, 90일 압축강도는 $210kg/cm^2$ 의 중량콘크리트(Heavy Weight Concrete)를 타설하게 되어 있다. 또한 콘크리트 타설방법은 두 종류 다 골재 선 타설(Preplaced Aggregate : PA) 방법을 제시하고 있다. 그에 따라 현대건설 기술연구소에서는 93년 11월부터 94년 7월 까지 고밀도 및 중량 콘크리트의 재료 및 기본 배합시험 그리고 모형시험을 통하여 각각의 물성을 검증하고 최종 현장 타설을 성공리에 수행하였다.

본 연구는 그 중에서 고밀도 콘크리트에 관한 부분에 대해서 보고하고자 한다.

2. 고밀도 콘크리트

한국원자력연구소의 Beam Port 주변 고밀도 콘크리트 생산 및 타설요건은 밀도 $5.0t/m^3$, 90일 압축강도 $210kg/cm^2$ 이상이

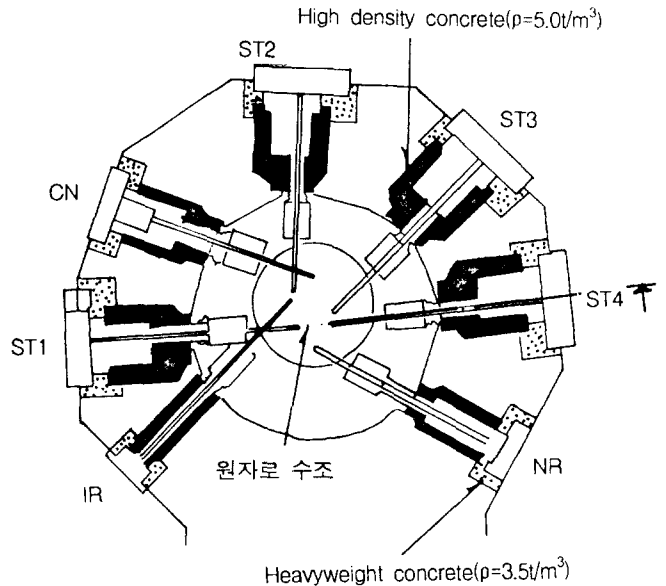


그림 1. Beam Port 설치 평면도

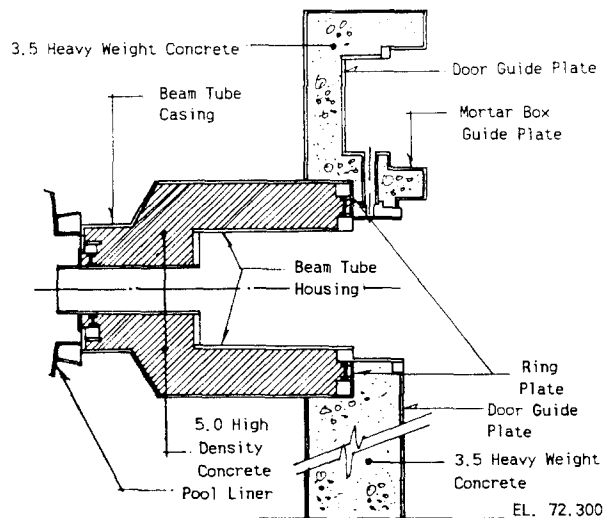


그림 2. Beam Port Assembly Section

다. 그리고 중성자 차폐를 위한 Boron과 콘크리트의 건조수축으로 인한 균열을 방지하기 위한 팽창성 혼화제를 반드시 포함하도록 되어있다. 또한 타설방법은 PA방법으로 하도록 되어있다.

3. 사용재료

3.1 시멘트

시멘트는 시방조건에 따라 ASTM C 150의 TYPE II(또는 KS L 5201)의 중용열 시멘트(국내 H사)를 사용하였다.

3.2 잔골재

잔골재는 입도가 0.3mm이하인 공업용 규사(충북제철산)를 사용하였다.

3.3 굵은골재

굵은골재는 금속조골재의 하나로서 Steel Shot을 만들고 난 부산물(이하 Steel Shot이라 함.)을 사용하였다. 이것의 입도는 4.76~9.5mm이고, 입형은 구형에 가까운 부정형이다. 비중은 7.3~7.5이었다. 또 필요에 따라서 Ball bearing(탄소강)을 소량 혼합하여 사용하였는데 이것의 입도는 9.5mm, 입형은 가운데 Rib가 있는 구형이고 비중은 약 7.8이었다.

3.4 혼화제

중성자 차폐를 효과적으로 하기 위해서는 붕소(Boron)가 필요한데, 이를 위해서 Boron Carbide(B_2C , 독일산)를 사용하였으며 그 양은 전체 콘크리트 중량의 1.3 %를 사용하였다.

3.5 혼화제

골재 전 타설 방법에 의한 콘크리트 타설이 밀실히 채워지기 위해서는 시멘트의

건조수축 등을 보상할 수 있는 정도 이상의 팽창성이 필요하게 된다. 본 연구에서는 시방의 요구조건에 따라서 국내 H사의 Grout용 팽창제를 사용하였다.

4. Grout의 배합설계

PA 방법으로 콘크리트를 타설하려면 골재사이의 공극에 시멘트 페이스트나 모르타르로 제조된 주입재(Grout)의 결정이 가장 중요한 문제가 된다. Grout는 재료분리가 일어나지 않으면서, 빈틈이 없이 골재내부의 공극에 밀실히 채워져야 하며 또한 충분한 접착력으로 각골재와 결합되어야 한다. 이러한 상반된 성질을 겸비한 Grout 재료의 선정을 위해서는 Grout의 최적 배합비를 구하는 것이 PA콘크리트 타설의 결정적인 요소가 된다.

또한 Grout의 배합설계요건은 굵은 골재의 공극사이로 재료가 분리 되지않고 충분히 채워져야하기 때문에 그 유동성과 블리딩 및 팽창성 등이 배합결정요인에 포함된다. 그리고 Grout의 사용가능한 밀도는 먼저 사용될 굵은골재의 비중과 그것의 실적율로부터 그 범위가 한계지어지게 된다. (표 1 참조) 본 연구에서 사용한 굵은골재는(Steel Shot) 그 비중이 약 7.3~7.5정도였다. 그리고 실적율은 굵은골재 단위용적 중량시험방법에 의하여 측정된 결과 약 58~60%정도였다.

한편 최종 콘크리트의 밀도 $5.0t/m^3$ 를 만족시키기 위해서, 콘크리트의 경화시 수분증발 등에 의한 중량감소를 고려하여 콘크리트 배합밀도를 $5.2t/m^3$ 로 하였다. 이러한 골재조건하에서 Grout의 밀도는 최소 1.75에서부터 최고 $2.3 t/m^3$ 이내가 된다.

본 연구에서는 Grout 배합설계의 기본목표를 밀도 $2.0t/m^3$ 로 하고 각각의 물성이

표 2. 고밀도 콘크리트용 Grout의 배합시험결과

No	분류 기호	배합설 계밀도 (kg/m ³)	단위중량 (kg/m ³)					물/시 멘트 비	Flow (초)	팽창 율 (%)	블리 이딩 (%)	압축강도 (kg/cm ²)	
			물	시멘트	잔골재	B ₄ C	혼화제					7일	28일
1	G94-007	2,012	502	1,174	194	142	5.87	0.43	45	4.7	0.7		
2	G94-008	2,000	500	1,164	176	160	5.83	0.43	50	4.1	0.6		
3	G94-009	2,000	500	1,164	176	160	11.64	0.43	34	1.4	0.3		
4	G94-014	2,000	512	1,278	50	160	6.40	0.40	68	6.5	0.8		
5	G94-015	2,000	493	1,097	250	160	5.50	0.45	37	3.0	0.7		
6	G94-005	1,981	466	690	690	135	3.45	0.68	43	2.4	2.3		
7	G94-011	1,970	515	1,256	36	163	6.29	0.41	54	4.6	0.2		
8	G94-002	1,963	529	1,229	42	163	11.72	0.43	20	2.5	1.2		
*9	G94-003	1,963	529	1,229	42	163	5.86	0.43	17	5.7	0.7		
10	G94-012	1,960	531	1,236	33	160	6.19	0.43	25	6.4	1.1		
11	G94-010	1,956	532	1,181	91	152	5.90	0.45	28	4.5	1.2		
*12	G94-013	1,950	536	1,218	36	160	6.10	0.44	16	6.6	1.3	193	321
13	G94-001	1,946	480	680	652	134	3.40	0.70	36	2.0	1.8		
14	G94-006	1,944	542	1,268	0	134	6.34	0.43	32	3.5	0.7		
15	G94-004	1,921	538	1,078	162	143	5.40	0.50	13	4.5	1.1		

표 1. 굵은 골재의 비중과 실적율에 따른 Grout의 밀도 결정표

(단위 : t/m³)

비중 실적율 (%)	비중					
	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8
53	2.83	2.72	2.61	2.49	2.38	2.27
54	2.73	2.62	2.50	2.38	2.27	2.15
55	2.63	2.51	2.39	2.27	2.14	2.02
56	2.53	2.40	2.27	2.15	2.02	1.89
57	2.42	2.28	2.15	2.02	1.87	1.75
58	2.30	2.16	2.02	1.89	1.75	1.61
59	2.18	2.03	1.89	1.75	1.60	1.46
60	2.05	1.90	1.75	1.60	1.45	1.30

규정에 맞는지를 검토하는 방식으로 진행하였다. 표 2는 이러한 여러요인을 포함하여 최종배합비를 선정하기까지의 Grout 배합시험결과를 보인 것이다. 여기서 Grout 설계요건 중에서 Flow는 유하시간이 21초 이내, 팽창율은 5%이상, 블리이딩은 2%이내로 되어있다. 표에서 보는 바와같이 위의 조건을 만족하는 배합비는 No.9와 No.12이다. No.9는 약간 더 되기 때문에 주입성을 고려하여 No.12를 최종배합비로 선정하였다.

5. 모형실험 (Mock-up Test)

실 시공에 앞서 발생할 수 있는 시공상의 모든 문제점을 파악하기 위해 현장조건

과 거의 동일한 조건으로 모형실험을 수행하였다. 이때 모형의 부피는 0.46m^3 , 굵은 골재의 실적율은 60.95%였다.

주입Grout는 위의 배합시험에서 최종선정한 No.12을 사용하였다. 주입은 Mixer의 용량이 약 0.33m^3 이어서 전체 Grout량을 두번에 나눠서 주입하였고, 주입펌프의 압력은 약 5.0kg/cm^2 이었다. 이때 소요된 시간은 약 20분 이었다. 주입 후 약 7일만에 모형 거푸집을 제거하고 내부 주입여부를 육안으로 관찰했다.(사진 1 참고) 사진에서 보는 바와 같이 빈틈이 없이 밀실하게 채워졌다.

6. 실 시공

모형시험을 기준으로 하여 총 7개의 Beam Port에 고밀도 콘크리트를 성공적으로 타설하였으며 그 결과는 표 3과 같다. 그 시공 순서는 먼저 굵은 골재를 계량한 후 각 Beam Port의 타설부위에 채워넣는다. 그리고 주입파이프와 배기파이프를 제외한 전면을 철판으로 용접하여 밀봉한다. 주입파이프를 통해서 물을 강제로 주입하여 누수되는 부분이 있는지를 검사하고, 주입된 수량을 계량하여 공극부피를 산정한다. 그리고 먼저 채워진 굵은골재의 양으로부터 타설부위의 총 부피를 산정한다. 산정된 공극부피(Grout 타설부피)로부터 Grout 배합량을 결정하여 각 재료를 준비한다. 그리고 굵은골재와 함께 채워진 물은 Grout를 타설하기전에 하단 주입 파이프의 밸브를 열고 모두 빼낸다. Grout의 배합은 물, 보론, 혼화제, 시멘트, 잔골재의 순서로 Mixer에 넣고 약 5분간 교반한뒤 애지테이터로 이송시킨다. 이송된 Grout는 다시 가압펌프로 주입파이프를 통하여 강제 주입된다. 이 때 각 주입 및 배출파이프, Air

표 3. 고밀도 콘크리트 타설현황

Beam Port Type	총 부피 (m^3)	Grout 타설 부피 (m^3)	주입 시간 (분)	주입 압력 (kg/cm^2)	28일 압축강도 (kg/cm^2)	콘크리트 밀도 (t/m^3)
ST1	1.14	0.44	36	3-5	289	5.2
ST2	1.16	0.46	37	2-4	280	5.2
ST3	1.21	0.49	42	2-4	284	5.1
ST4	1.19	0.48	39	2-6	280	5.3
NR	0.41	0.16	16	2-4		
CN	0.61	0.27	26	2-3	283	5.0
IR	0.24	0.08	8	2-4		

Vent의 직경은 3/4" 이고, 각각의 위치는 주입은 하단에, 배출 파이프 및 Air Vent는 상단에 설치하여 밑에서부터 위로 점점 차오르게 하였다. 배출파이프는 전체 높이의 약 2/3지점에 두개, 최상부에 한개를 설치하여 공기 배출 및 주입상황을 알 수 있도록 하였으며 최종적으로 상단에 설치된 배출 파이프를 통해서 주입할 때와 거의 유사한 상태의 Grout가 배출될 때까지 충분히 배출시킨후 밸브를 잠그고 양생시킨다.(사진 2 참고) 주입속도는 분당 0.014m^3 정도로 추정되었다. Mixer의 용량한계로 ST1, ST2, ST3 및 CN+IR은 3회 분할배합을 하였고, ST4+NR은 4회 분할배합을 하여 주입하였다. 표 3에서 볼 수 있듯이 채령 28일 강도는 모두 280kg/cm^2 이상이고, 밀도는 5.0t/m^3 이상으로 모두 시방조건을 만족하고 있다.

4. 결론

이번에 한국원자력연구소 현장의 다목적 연구용 원자로에 타설된 고밀도 콘크리트는 국내에서는 찾아보기 어려운 재료 및 시공방법으로써, 추후 밀폐된 공간의 특수

Grout 시공 및 방사선 차폐 콘크리트의 특수시공에 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

또한 밀폐된 공간에 타설되는 이러한 고밀도 콘크리트는 타설된 후에는 그 내부를 살펴 볼 수가 없기 때문에 모형시험이 반드시 필요하게 되는데, 이 때 모형시험은 육안관찰 뿐만 아니라 다양한 물성을 알아 볼 수 있도록 시험 방법이 고안되어야 할 것으로 생각된다.

그리고 Steel Shot 이외의 다른 금속부산물을 이용하는 것에 대해서도 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. ACI 304.3R, 'Heavyweight Concrete : Measuring, Mixing, Transporting, and Placing', 1989.
2. ACI 304.1R, 'Guide for the Use of Pre-placed Aggregate Concrete for Structural and Mass Concrete Applications', 1992.
3. ANSI N 101.6, Concrete Radition Shields, 1972.

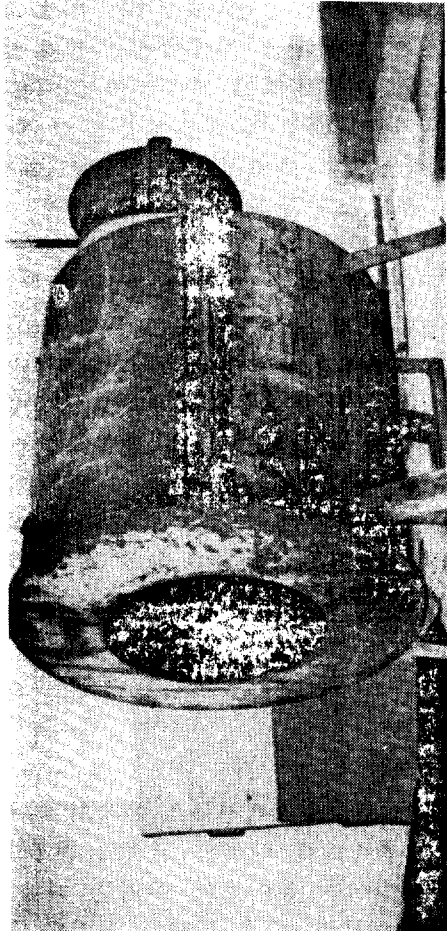


사진 1. 고밀도 콘크리트의 모형시험(Mock-up Test)

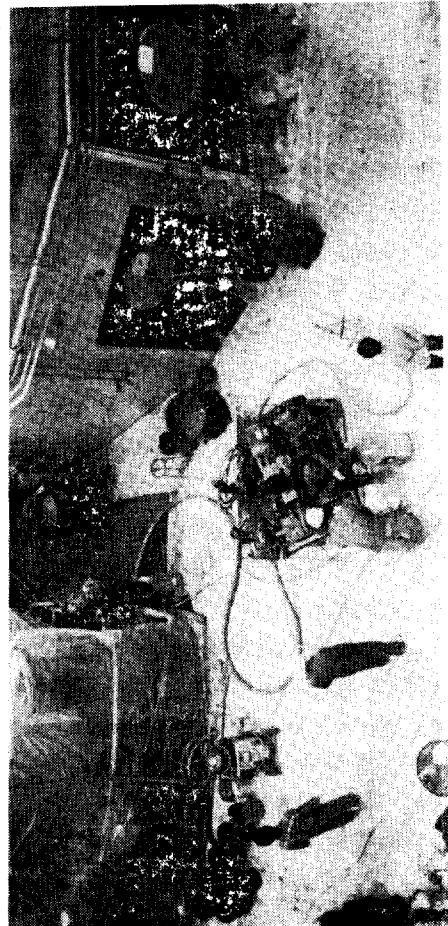


사진 2. 고밀도 콘크리트의 모형시험