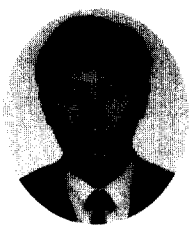
방사선 차폐용 고밀도 콘크리트의 시공

Construction of High Density Concrete for Radiation Shield



변 형 균* 이 제 방**

1. 서 론

1.1 방사선 차폐[3]

원자핵의 상태가 불안정하여 안정된 상태를 찾기 위하여 방사선을 방출하는 핵종으로서 방사선 종류로는 α, β, γ, X, 중성자선 등이 있다. 이와같은 방사선은 물질을 투과하는 성질을 가지고 있는데 α선, β선과 같은 전하입자는 X선, γ선과 같은 전자파나 중성자선과 같은 무전하 입자에 비교하면 투과력이 적다. 전자파나 무전하 입자는 상당히 두꺼운 물체를 투과하는 성질이 있어서, 결국 콘크리트로 방사선을 차폐하는 대상은 X선과 γ선 및 중성자선이다. 또한 γ선은 물질과 작용하면 광전효과, 전자쌍효과, Compton산란 등의 흡수와 산란을 거듭하여 에너지가 감소되므로, 방사선은 충분한 차폐체를 설치하게 되면 차단되어질 수 있고, 물질내에 입사된 중성자는 탄성산란이나 비탄성 산란에 의하여 점차 에너지를 잃어가는데 이러한 과정을 중성자의 감속(moderation)이라 하고 감속시키기 위해 사용하는 물질을 감속재(moderator)라 한다. 중성자의 감속이 중요시 되는 이유는, 일반적으로 원자핵이 중성자를 흡수하는 단면적이 에너지가 낮을수록 증가하는 경향이 있기 때문에, 감속받은 중성자는 공명흡수 영역이나 열중성자 영역에서 물질의 원자핵이 보호되어 γ선이나 다른 입자방사선을 방출하면서 증식된다. 따라서 중성자의 차폐에는 우선적으로 감속이 필요한데, 감속재로서는 원자번호가 낮고 중성자를 보호할 확률이 낮은 물질 즉, 물, 중수(D_2O), 파라핀, 흑연 등의 보호 단면적이 작고 산란 단면적이 큰 물질이 사용된다. 일반적으로 방사선의 차폐효과는 비중과 두께의 곱에 비례하며, 두께가 동일하면 비중이 클수록 차폐효과는 우수한데, 그림 1은 벽에 입사된 방사선의 거동을 나타낸 것이다. 최초의 방사선 선속의 세기를 절반으로 감소시키는 어떤 흡수체의 두께를 반가층이라 하여 식 1과 같은 관계가 있으며, 대표적인 물질의 질량감쇠계수는 표 1과 같고 표 2는 각 재료별 반가층의 두께를 나타낸 것이다. 또한 차폐체의 두께와 방사선 투과

* 정회원, 현대건설 기술연구소 선임연구원
** 현대건설 기술연구소 연구원

율과의 관계는 감쇠곡선이라 하여 그림 2와 같다.

$$t_{1/2}(HVL)=\frac{0.693}{\mu} \quad (1)$$

여기서 $t_{1/2}$(HVL)=반가층
(Half Value Layer)
μ =선형감쇠계수=질량감쇠계수×비중

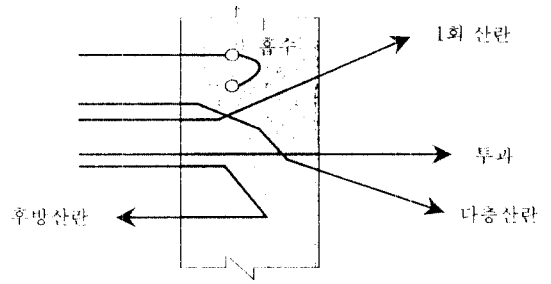


그림 1 벽에 입사된 방사선의 거동

표 1 질량감쇠계수

에너지(Kev)	공 기	물	콘크리트	납	비고
1	3.617	4.090	3.666	5.210	
10	5.016	5.223	26.19	130.6	
100	0.1541	0.1707	0.1781	5.55	
500	0.08712	0.09686	0.08767	0.1613	
1,000	0.06359	0.07071	0.06381	0.07103	
1,500	0.05176	0.05755	0.05197	0.05222	
2,000	0.04447	0.04941	0.04482	0.04607	
5,000	0.02751	0.03034	0.02895	0.04272	
10,000	0.02045	0.02218	0.02311	0.04972	
20,000	0.01705	0.01811	0.02105	0.06205	

표 2 γ선에 대한 재료의 반가층

γ에너지 (MeV) / 재료	0.1	1.2	0.5	1.0	2.0	5.0	비고
	반 가 층 (cm)						
알루미늄	1.60	2.14	3.05	4.17	5.92	9.11	
철	0.26	0.64	1.07	1.49	2.09	2.84	
구 리	0.18	0.53	0.95	1.33	1.86	2.47	
납	0.012	0.068	0.42	0.90	1.34	1.44	
물	4.14	5.10	7.17	9.82	14.05	23.02	
공 기	35.50	43.6	61.90	84.50	120.50	195.80	
보통콘크리트	1.75	2.38	3.40	4.65	6.60	10.28	

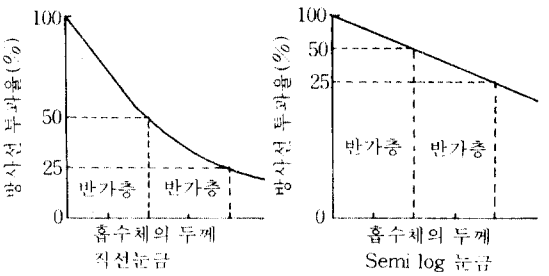


그림 2 감쇠곡선

1.2 중량콘크리트[5]

콘크리트의 중량이나 비중은 주로 사용할 골재에 의해 변화된다. 일반적으로 보통콘크리트의 단위중량은 2.3 ton/m^3 정도이고, 2.0 ton/m^3 이하를 경량, 2.5 ton/m^3 이상의 밀도를 갖는 것을 중량(고밀도)콘크리트라고 한다. 중량 콘크리트는 앞서 언급했던 이유때문에, 방사선 차폐를 주목적으로 사용되고 있으며, 대상 콘크리트 구조물로서는 원자력 발전시설 구조물 등을 들 수가 있다. 이러한 차폐콘크리트는 보통콘크리트에서 필요한 강도나 내구성 이외에도 다음과 같은 성질이 추가로 요구된다.

(1) 어느 부분에서든지 고품질의 소요밀도를 보유한 콘크리트이어야 하며, 건조수축이나 온도응력에 의한 균열이 없어야 한다.

(2) 방사선 조사에 의한 유해물질 발생이 없고 열전도율이 크고, 열팽창율이 적어야 한다.

2. 공사개요

한국원자력연구소(Korea Atomic Energy Research Institute : KAERI)에서는 전 세계적으로 몇개 되지 않은 다목적연구용원자로(Korea Multi-purpose Research Reactor : KMRR) 건조사업을 수행하고 있다. 원자로 및 그것을 둘러싸고 있는 구조물 그리고 대부분의 관련 실험동은 격벽이 설치되고 중량콘크리트(ρ=3.5 ton/m^3)로 되어있다. 그 중에서 핵심 부분인 원자로 주변에 중성자조사 실험을 위한 장치(Beam Port)가 7개 설치되는데 그 부분은 방사선에 노출될 우려가 더

욱 큰 부분이어서 밀도(ρ)가 5.0 ton/m^{3}인 콘크리트(이하 '고밀도 콘크리트'라 함.)로 밀폐하게 되어있다. 그리고 다시 바깥부분은 밀도(ρ) 3.5 ton/m^{3}의 콘크리트(이하 '중량 콘크리트'라 함.)로 최종 밀폐하게 되어있다.(그림 3,4 참조) 더우기 콘크리트가 타설될 부분은 원통형의 밀폐된 곳이어서 골재 선 타설방법(preplaced aggregate)이 요구되고 있다. 이에따라 현대건설 기술연구소에서는 1993년 11월에 이 작업을 착수하여 1994년 7월 최종타설을 모두 마쳤다. 본 논고에서는 그 중에서 고밀도 콘크리트에 관한 부분에 대해서 콘크리트의 배합, 제조 및 특수시공 등을 보고하고자 한다.

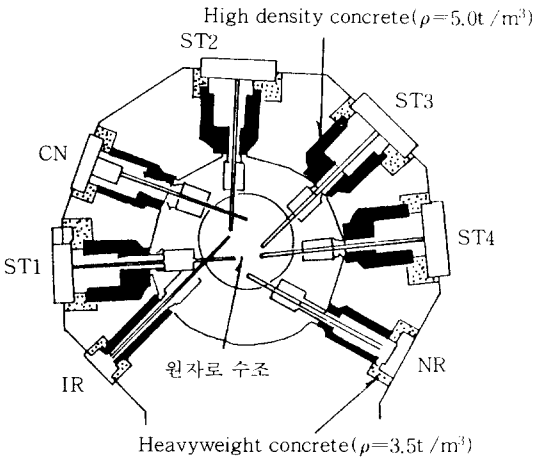


그림 3 Beam port 설치 평면도

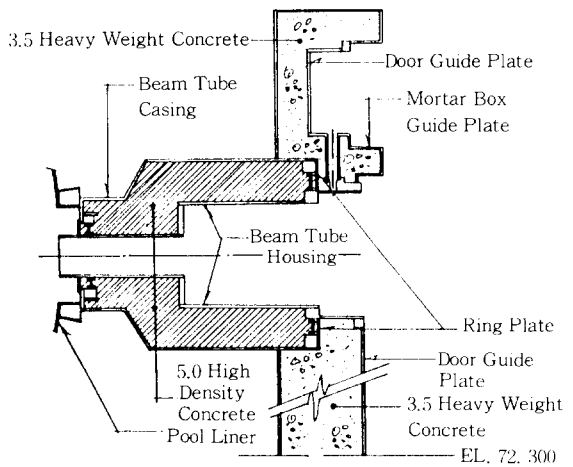


그림 4 Beam port assembly section

3. 고밀도 콘크리트의 배합 및 제조

고밀도 콘크리트의 품질 요구조건은 90일 압축강도는 210 kg/cm^{2}이고 밀도는 5.0 ton/m^{3}이다.

또 중성자 차폐효과를 높이기 위해서, 전 콘크리트 중량의 1%에 해당하는 붕소(boron)를 반드시 포함하게 되어있다.

3.1 사용재료

3.1.1 시멘트

Preplaced Aggregate(PA) 콘크리트에 사용되는 시멘트는 강도는 높일 수 있고 수화열의 발생이나, 경화 건조수축을 최소화하는 것이 중요한 선정요인이 된다. 그래서 중용열, 내황산염 포틀랜드 시멘트 등을 사용하는 것이 권장된다. 그러나 이러한 시멘트를 구입하기가 곤란한 경우에는 보통 포틀랜드 시멘트, 고로 시멘트, 실리카 시멘트, 플라이 애쉬 시멘트 등도 이용할 수 있다.

본 공사에서 사용한 시멘트는 ASTM C 150(또는 KS L 5201)의 Type II, 중용열 시멘트를 사용하였다. 그 물성은 다음 표 3,4 와 같다.

표 3 중용열 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (cm^2/g)	응결시간(h-m) 초결	응결시간(h-m) 종결	압축강도(kg/cm^2) 3일	압축강도(kg/cm^2) 7일	압축강도(kg/cm^2) 28일	수화열(cal/g) 7일	수화열(cal/g) 28일
3.15	3,730	4-30	7-50	242	309	381	86.2	93.1

표 4 중용열 시멘트의 화학성분 및 조성광물

(단위 : %)

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ig. loss	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
21.67	3.16	4.21	62.11	3.93	2.03	1.11	49.5	24.9	5.8	9.6

3.1.2 굵은골재

본 공사에서는 콘크리트의 요구밀도를 달성하기 위해 금속 조골재로서 steel shot(steel shot을 만들고 난 부산물)과 부분적으로 steel ball bearing(탄소강)을 사용하였다. 각각의 물성은 다음 표 5와 같다.

표 5 금속 조골재의 물성

종류	비중	입도	입형	단위용적중량 (kg/m^3)
Steel Shot	7.3~7.5	4.76~9.5mm	구형에 가까운 부정형	4,300
Steel Ball Bearing	7.8	9.5mm	rib가 있는 구형	4,500

3.1.3 잔골재

잔골재의 선별요건은 무엇보다도 grout의 주입성에 의해 좌우된다. 현재 사용될 굵은골재요건을 보면 그 입도가 작기 때문에 실적율을 낮춘다 해도 단위 공극의 부피는 아주 작게 된다. 따라서 이런 조건의 공극을 뚫고 재료분리가 없이 또 막힘이 없이 주입되기 위해서는, 시멘트 페이스트도 묽게 되어야 하겠지만, 잔골재의 입도가 더욱 작아져야 하고 차지하는 비율이 상대적으로 작아질 수 밖에 없게 된다. 이러한 점들이 고려되어 여러 실험을 통하여 본 공사에서는 0.3mm 이하의 입도를 가진 공업용 규사(충북 제천산)를 잔골재로 사용하였다. 그리고 그것의 비중은 2.65 였다.

3.1.4 혼화재(잔골재)

중성자를 효과적으로 차폐하기 위해서는 붕소(Boron)가 필요하게 되는 데, 이를 위해서 본 공사에서는 Boron Carbide(B_4C ; 독일산)를 콘크리트 중량의 1.3%의 비율로 혼화하였다. B_4C의 비중은 2.5이었고, 입도는 역시 0.3mm 이하였다.

3.1.5 혼화제

콘크리트의 건조수축 등에 의한 균열이나 타설되지 않고 들뜬부분이 없도록 grout 배합물에 팽창성 혼화제를 사용해야만 한다. 본 공사에서는 알루미늄 분말을 기제로한 grout용 팽창제를 이용하였다.

3.1.6 물

배합에 사용한 물은 유해물을 함유하지 않은 수도수를 이용하였다.

3.2 Preplaced Aggregate(PA) 콘크리트[7]

3.2.1 개요

골재 선 타설 방법(preplaced aggregate : PA)에 의한 콘크리트 시공법은 수중 구조물, 보강철근이 조밀하게 배근된 부분의 타설, 윗부분까지 빈실하게 채워져야 하는 폐인곳의 타설, 응력을 분담하는 콘크리트나 조적조의 보수, 중량콘크리트(고밀도 콘크리트), 적은 분량의 콘크리트 치환이 필요한 부분 등에 이용된다. 이러한 PA 콘크리트는 1937년 캘리포니아주의 산타페(Santa Fe) 철도 터널의 보수작업을 하는 중에 Lee Turzillo 와 Louis S. Wertz에 의해 고안되었다. 그 후 Raymond E. Davis 교수가 그라우트의 배합과 실질적인 시공절차를 발전시켰다. 이러한 과정을 통하여 Davis교수는 PA콘크리트만의 독특한 성질들의 대부분을 규명하였다. 1940년에 이런한 방법과 - 'Prepakt'라는 상표로 - 그라우트에 주로 사용하는 유동화제 등에 대해서 특허를 얻었다. 또한 이 방법에 의한 콘크리트 타설 공법은 grouted-aggregate, injected-aggregate, Prepakt, Colcrete, Naturbeton, Arbeton 등의 여러 이름으로 불리운다. 초기에는 주로 교량이나 터널 라이닝의 보수에 사용되었다. 미 개척국에서는 많은 실험을 바탕으로 Hoover Dam의 대규모로 부석된 방수로의 뒷채움 콘크리트에 이용하였다. 그 다음은 1946년에 Barker Dam(콜로라도주 소재)에 응용되었다. 또한 미 공병단에서는 1951년에 turbine scroll case의 뒷채움에 PA콘크리트를 사용하는 것을 허용하기 시작했다. 1954년에서 1955년사이에 미국 Mackinac Bridge의 34개의 피어(Pier)를 건조하는데 약 380,000m^3의 PA콘크리트가 사용되었다. 일본 건설회사들은 1950년대에 특허권을 사들였고 몇몇의 교량 피어를 이 방법으로 건조하였다. 1970년대에 혼슈-시코쿠 교량 건조 관계당국은 대규모 교량 복합구조물을 건조하는데 있어서, 절정에 달할만큼 광범위한 연구를 수행하였다. PA콘크리트는 또한 핵반응로나 X-Ray 설비 주변의 생물학적인 차폐를 위한 타설에 다양하게 이용되고 있다.

3.2.2 성질

PA콘크리트를 사용한 구조설계는 일반타설콘크리트와 동일한 방법으로 적용시킬 수 있다. PA콘크리트는 일반타설 콘크리트에 비해 굵은골재의 비율이 아주 높은데 이는 직접 각 부위에 골재를 채워넣기 때문이다. 따라서 PA콘크리트의 물성은 굵은골재에 더 많은 영향을 받는다. 그리고 일반타설 콘크리트에 비해 탄성계수는 약간 높고 건조수축은 약 1/2정도 이하이다. PA 콘크리트의 강도는 각 재료의 품질, 배합비, 그리고 시공방법 등에 달려있다. 보통 28일 또는 90일 압축강도는, 물-결합재비에 따라 다르지만, 410kg/cm^2 정도를 얻을 수 있다. 어떤 것은 90일 압축강도가

620kg /cm², 1년에는 약 900kg /cm²를 발현하는 것도 보고된바 있다. 거친 기성콘크리트와의 PA 콘크리트의 부착특성은 뛰어나다. 거기에는 두 가지 이유를 들 수 있는 데, 첫번째는 grout가 먼저 타설된 골재 사이사이에 침투하여 불규칙적인 표면과 공극을 초기에 접착하여 강화하고, 두번째는 PA콘크리트의 낮은 건조수축 특성으로 콘크리트가 건조될때 내부응력이 최소화되기 때문이다. PA콘크리트는 수년동안 공기연행제 없이 제조되었으며, 단지 리그닌과 그라우트용 유동화제가 첨가되었다. PA콘크리트는 일반적으로 심한 기후에 노출된 곳에서도 뛰어난 내구성을 보이고 있다. 그러나 미국 공병단이 수행한 일련의 시험에 의하면, 연행공기가 있는 일반타설 콘크리트에 비교할만한 내구성을 얻기 위해서는, PA콘크리트에서도 공기연행제를 사용하는 것이 필요하다고 한다. 최근 미국 공병단 시방규정에서는 ASTM C 231의 시험방법에 따라 그라우트의 비빔이 끝난 뒤 15분에 측정한 연행공기량이 9±1%가 되도록 하고있다. 또한 PA콘크리트는 기푸집내의 골재를 차게하는 것이 용이하다. 그래서 냉각된 그라우트의 주입으로 타설초기온도를 4.5~7℃까지 낮출 수 있다.

3.3 고밀도 콘크리트의 배합설계

3.3.1 Grout의 배합설계조건

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 각 골재와 결합되어야 한다. 이러한 상반된 성질을 겸비한 grout재료의 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 블리이딩 및 팽창성 등이 배합결정요인에 포함된다. 그리고 grout의 사용가능한 밀도는 먼저 사용될 굵은골재의 비중과 그것의 실적율로부터 그 범위가 한계지어지게 된다. (표 6 참조) 본 연구에서 사용한 굵은골재는(steel shot) 그 비중이 약 7.3~7.5 정도이고, 실적율은 굵은골재의 단위용적중량 시험방법에 의하여 측정한 결과 약 58~60% 정도였다.

한편 최종 콘크리트의 밀도 5.0 ton /m³를 만족시키기 위해서, 콘크리트의 경화시 수분증발 등에 의한 중량감소를 고려하여 콘크리트 배합밀도를 5.2 ton /m³로 하였다. 이러한 골재조건하에서 grout의 밀도는 최소 1.75에서부터 최고 2.3 ton /m³ 이내가 된다.

본 연구에서는 grout 배합설계의 기본목표를 밀도 2.1 ton /m³로 하고 각각의 물성이 규정에 맞는지를 검토하는 방식으로 진행하였다. 표 7은 이러한 여러요인을 포함하여 최종배합비를 선정하기까지의 grout 배합시험결과를 보인 것이다. 여기서 grout의 설계조건을 보면, flow는 유하시간이 21초 이내, 팽창율은 5% 이상, 블리이딩은 2% 이내로 되어있다. 표 7에서 보는 바와같이 위의 조건을 만족하는 배합비는 No.9와 No.12이다. No.9는 약간 더 되기 때문에 주입성을 고려하여 No.12를 최종배합비로 선정하였다.

3.3.2 Grout의 배합설계 절차

Grout의 배합설계는 먼저 굵은 골재의 비중과 실적율에 따라 좌우된다. 따라서 최종 콘크리트의 배합밀도 5.2 ton /m³를 맞추기 위해서, 그라우트의 배합설계는

$$\rho_g = \frac{\rho_c - G \cdot X}{1 - X} \qquad (2)$$

표 6 굵은 골재의 비중과 실적율에 따른 grout의 밀도 결정표

(단위 : t /m³)

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

표 7 고밀도 콘크리트용 Grout의 배합시험결과

No	분류기호	배합설계밀도 (kg/m³)	단위중량(kg/m³)					물/시멘트비	Flow (초)	팽창율 (%)	블리이딩 (%)	압축강도 (kg/m³)	
			물	시멘트	잔골재	B4C	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		

여기서,

ρ_g : 그라우트의 밀도(ton/m³)

ρ_c : 콘크리트의 밀도(ton/m³)→5.2 ton/m³

G : 굵은 골재의 비중

X : 굵은 골재의 실적율

만일 굵은 골재의 비중이 7.5이고 그 실적율이 59%라고 가정하면 윗 식에 의해 필요한 grout의 최소밀도는 1.89 ton/m³가 된다. 또 여러가지 문헌조사를 토대로 굵은골재의 비중과 실적율은 7.6에 57% 정도가 적절할 것으로 판단되었다. 이 때 grout의 요구밀도는 2.02 ton/m³ 이다.(표 6참조) 여기에 약간의 할증을 고려하여 grout의 배합설계밀도를 2.1 ton/m³으로 하였다. 그런데 steel ball은 비중이 7.5 이하이기 때문에 위의 조건 중에서 비중을 만족시킬 수가 없다. 그래서 비중이 7.8인 탄소강의 steel ball bearing을 약 50%까지 혼용할 계획이었다. 이와같은 방법으로 grout의 배합설계를 진행하면,

$$Wg = Ww + Wc + Ws + W_{B4C}$$
$$Vg = Vw + Vc + Vs + V_{B4C}$$

여기서, Wg : 그라우트의 중량(ton)

Ww : 물의 중량

Wc : 시멘트의 중량

Ws : 잔골재의 중량

W_{B4C} : B4C의 중량

Vg : 그라우트의 부피(m³)

Vw : 물 부피

Vc : 시멘트의 부피

Vs : 잔골재의 부피

V_{B4C} : B_4C의 부피

또한 W_{B4C}는 총 콘크리트의 1.3 %로서 67kg이고, Ww=x(물·시멘트비)·Wc이므로,

$$Wg = (x+1)Wc + Ws + 0.067$$
$$Ws = Wg - 0.067 - (x+1)Wc \qquad (3)$$

또, 각 재료의 부피는 무게를 그 비중으로 나눈 값 이므로,

$$Vg = \frac{Ww}{1} + \frac{Wc}{3.15} + \frac{Ws}{2.65} + \frac{0.067}{2.50}$$
$$Vg = \frac{Wc}{1} + \frac{Wc}{3.15} + \frac{Ws}{2.65} + \frac{0.067}{2.50}$$

이 식을 변환하면,

$$Wc = \frac{Vg - 0.0014 - 0.3774Wg}{0.6226 \cdot x - 0.0599} \qquad (4)$$

한편, 굵은 골재의 유형이 비중 7.6, 실적율 57% 일때, grout의 부피(Vg)는 0.43 m^3($1m^3$의 단위용적 콘크리트에서)가 되고, 밀도를 2.1 ton / m^3로 맞추기 위해서는 grout의 무게(Wg)가 903 kg이 된다. 따라서 위의 식(3),(4)에서,

$$Wc=\frac{0.0878078}{0.6226\cdot x-0.0599}$$

$$Ws=0.836-(1+x)Wc$$

와 같이 x(물·시멘트비)의 함수가 된다. 만일 x=0.5 로 하면,

Wc=349 kg	Vc=0.111 m^3
Ws=312 kg	Vs=0.118 m^3
Ww=175 kg	Vw=0.175 m^3
W_{B4C}=67 kg	V_{B4C}=0.0268 m^3
Wg=903 kg	Vg=0.43 m^3

가 된다.

이와같은 방법으로 하면 한가지의 물·시멘트비에 의한 배합비가 한가지씩 고정된다. 따라서 물·시멘트비를 변화시켜 가면서 배합을 조정하여 최적배합비를 찾아 나갔다. 그러나 처음 목표치인 2.1 ton /m^3 에서는 배합조건을 만족시킬 수가 없어서, 점점 그 밀도를 낮추면서 실험을 진행하여(표 6, 7 참조) 최종적으로 grout의 배합밀도가 1.95 ton /m^3(No. 12)일때, 모든 배합조건을 만족시킬 수 있었다. 이 때 굵은골재의 유형은 비중 7.6에 실적율은 58% 이었다. 이것을 기준으로 한grout의 배합비를 물·시멘트비에 따라 정리하면 다음 표 8 과 같다.

이렇게 해서 최종적으로 구한 배합비는 밀도 1.95 ton /m^3 범주에서 물·시멘트비가 44% 일때였다. 이 배합비는 밀도개념으로 봤을 때 표 6의 굵은선으로 표시된 영역에서 모두 사용할 수 있다. 그리고 굵은 고딕체로 된 대각선상의 5개 부분은 동일계열의 밀도(1.90)를 나타내고 있다. 엄밀히 말하면, 굵은골재의 비중과 실적율에 따라, 동일계열의 밀도라 하더라도 그 배합비는 조금씩 차이가 난다. 그러나 그러한 차이는 미미하기 때문

표 8 각종 물 시멘트비에 따른 grout

(밀도 : 1.95 ton /m^3)의 배합비

굵은 골재의 TYPE	물·시멘트비 x	콘크리트의 단위중량(kg /m^3) 굵은 골재	물	시멘트	잔골재	B_4C	혼화제 (kg)	비고
	0.41		230	361	-39		2.805	
	0.42		228	543	-19		2.715	
	0.43		227	527	- 2		2.635	
76-58	0.44		225	512	15		2.560	혼화제:
(비중7.6	0.45		224	497	31		2.485	팽창제,
실적율	0.46	4.408	222	483	47	67	2.415	시멘트의
58%)	0.47		221	471	60		2.355	5%
	0.48		220	458	74		2.290	
	0.49		219	447	86		2.235	
	0.50		218	436	98		2.180	

에 무시할 수 있고, 한 배합비로서 동일계열은 모두 적용시켜도 무방하다. 위의 배합비를 grout 만의 단위용적($1m^3$)중량으로 환산하면,

물 : 536 kg
시멘트 : 1,218 kg
잔골재 : 36 kg
B_4C : 160 kg
혼화제 : 6.10 kg

이 된다. 이것을 현장타설에 적용시켜 각 타설부분의 실적율에 따라 grout 타설용적에 맞게 산정하면 된다.

4. Mock-up Test

실 시공에 앞서 발생할 수 있는 시공상의 모든 문제점을 파악하기 위해 현장조건과 거의 동일한 조건으로 모형실험을 수행하였다. 이때 모형의 부피는 0.46m^3, 굵은 골재의 실적율은 60.95%였다.

주입 grout는 위의 배합시험에서 최종선정한 No.12을 사용하였다. 주입은 믹서의 용량이 약 33m^3 이어서 전체 grout량을 두번에 나눠서 배합하여 연이어 주입하였고, 주입펌프의 압력은 약 5.0 kg /cm^2 이었다. 이 때 소요된 시간은 약 20분이었다. 주입 후 약 7일만에 모형 거푸집을 제거하고 내부 주입여부를 육안으로 관찰했다.(사진 1,2

사진 1 mock-up test

사진 2 mock-up test

참조) 사진에서 보는 바와 같이 빈틈이 없이 밀실하게 채워졌다.

5. 고밀도 콘크리트의 시공

모형시험을 기준으로 하여 총 7개의 beam port에 고밀도 콘크리트를 성공적으로 타설하였으며 그 결과는 표 9와 같다. 그 시공 순서는 먼저 굵은골재를 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)로 부터 grout 배합량을 결정하여 각 재료를 준비한다. 그리고 굵은골재와 함께 채워진 물은 grout를 타설하기 전에 하단 주입 파이프의 밸브를 열고 모두 빼낸다. grout의 배합은 물, boron, 혼화제, 시멘트, 잔

표 9 고밀도 콘크리트 타설현황

Beam Port Type	총부피 (m^3)	Grout 타설부피 (m^3)	주입시간 (분)	주입압력 (kg/cm^2)	28일 압축강도 (kg/cm^2)	콘크리트밀도 (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		

사진 3 grout 주입장면

사진 4 grout 주입 및 배출 Pipe

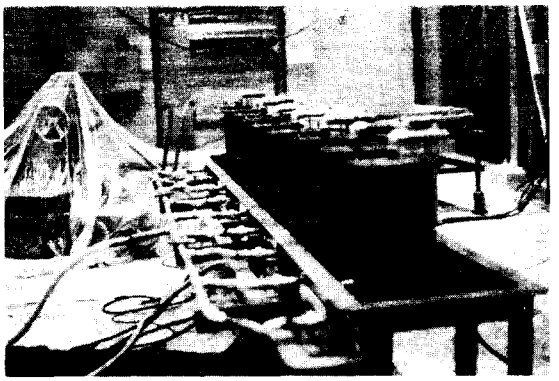


사진 5 시험용 공시체 제작

골재의 순서로 믹서에 넣고 약 5분간 교반한뒤 애지테이터로 이송시킨다. 이송된 grout는 다시 가압펌프로 주입파이프를 통하여 강제 주입된다. 이때 각 주입 및 배출파이프, air 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 배출시킨 후 밸브를 잠그고 양생시킨다.(사진 3~5 참조) 주입속도는 분당 0.014m^3 정도로 추정되었다. 믹서의 용량한계로 ST1, ST2, ST3 및 CN+IR은 3회 분할배합을 하였고, ST4+NR은 4회 분할배합을 하여 주입하였다. 표 9에서 볼 수 있듯이 재령 28일 강도는 모두 280kg/cm^2 이상이고, 밀도는 5.0t/m^3 이상으로 모두 시방조건을 만족하고 있다.

6. 결 론

이번에 한국원자력연구소 현장의 다목적연구용 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 알아볼 수 있도록 시험 방법이 고안되어야 할 것이다.

그리고 steel shot 이외의 다른 금속부산물을 이용하는 것에 대해서도 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 한국원자력연구소, 다목적 연구용 원자로 Beam Port 주변 차폐를 위한 차폐콘크리트(P.A. Concrete)의 기술 사양서.
2. 한국원자력연구소, 방사선 차폐용 고밀도 콘크리트 타설방법, 1993.
3. 백용관, 자철광 골재를 이용하는 중량콘크리트의 방사선 차폐성상에 관한 연구, 청주대학교 대학원 석사학위논문, 1990.
4. 장성훈, 고밀도 중량 콘크리트의 방사선 차폐효과에 관한 연구, 명지대학교 산업기술대학원 석사학위논문, 1994.
5. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학, 1992.
6. ACI 304.3R, "Heavyweight Concrete : Measuring, Mixing, Transporting, and Placing", 1989.
7. ACI 304.1R, "Guide for the Use of Preplaced Aggregate Concete for Structural and Mass Concrete Applications", 1992.
8. ANSI N 101.6, Concrete Radition Shields, 1972.
9. ACI SP34, Concrete for nuclear reactors, Vol. 1, 1972.