

자철광 骨材를 利用한 重量콘크리트의 放射線遮蔽에 關한 研究

A Study on the Radiation Shielding Properties of Heavy Weight Concrete Using Magnetite Aggregate

송 창 영* 김 명 재** 장 철 인*** 부 척 량****
Song, Chang-Young Kim, Myoung-Jae Chang, Cheol-In Boo, Cheong-Yang

ABSTRACT

Concrete is considered to be one of the excellent and versatile shielding material and is widely used for the radiation shielding materials. This paper aims to study mechanical properties of concrete by using normal cement, natural and heavyweight aggregate and their radiation shielding effects through radiation transmission tests.

1. 서론

우리 나라는 1978년 고리원전이 처음으로 건설되어 1998년 현재 14개 원전이 가동중이다. 이 원전에서 발생하는 각종 중·저준위 핵폐기물이 5만드럼에 달해 2010년대 중반이 지나면 포화상태에 이르게 된다. 또 사용 후 핵연료도 현재 3천3백65t에 달해 2006년 이후 이를 처리할 수 있는 방법이 없을 뿐만 아니라 2015년까지 16기의 원자력발전소를 추가 건설할 계획이어서 핵폐기물 처리문제는 심각한 문제이다. 이와 같은 추세에 비해 차폐에 대한 실험적 연구는 미비한 실정이며, 국내실정에 맞는 방사선차폐에 관한 참고자료가 많지 않은 것이 현실이다.

본 연구는 방사선차폐에 관한 연구의 일환의 하나인 콘크리트에 관한 연구로서 천연골재와 자철광 골재를 일정한 비율로 혼합 사용하여 조합한 중량콘크리트에 대하여 역학적 성질을 검토하고, 방사선 투과실험을 통해 방사선 차폐효과를 분석함으로써 중량콘크리트 연구에 참고자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트

- * 전남대학교 대학원 석사과정
- ** 전남대학교 대학원 박사과정
- *** 정회원, 서강정보대 전임강사
- **** 정회원, 전남대학교 교수, 공학박사

본 실험에서 사용한 시멘트는 국내 D사의 보통포틀랜드 시멘트이며, 이 시멘트의 물리적 성질과 화학적 성분은 다음 표1 및 표2와 같다.

표1. 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (cm ² /g)	응결시간(h-m)		압축강도(kg/cm ²)	
		초 결	종 결	7 일	28일
3.14	3395	3-27	5-47	290	381

표2. 시멘트의 화학적 성분

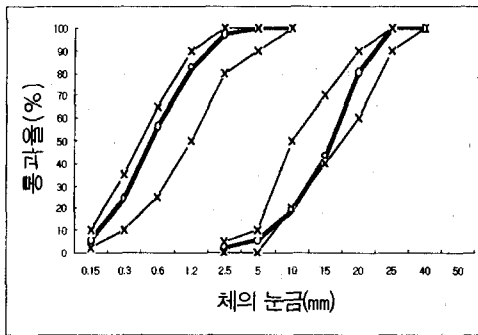
성분 종류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O
시멘트	20.75	5.57	61.93	3.69	3.09	2.25	1.62

2.1.2 골재

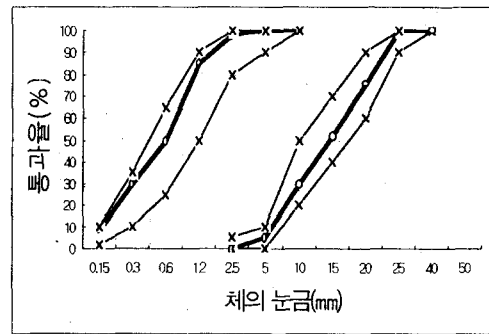
본 실험에서 사용한 천연골재는 전남 담양산이며, 중량골재인 자철광골재는 강원도 대한철광개발(주) 양양광업소에서 채취하여 분쇄한 것을 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 다음 표3과 같다.

표3. 골재의 물리적 성질

종 류	최대 치수 (mm)	비 중	흡수율 (%)	조립율 (%)	실적율 (%)	단위용적 중 량 (kg/m ³)	마모율 (%)	No.200체 통과율 (%)
잔골재	5	2.55	2.20	2.30	58.8	1,500	-	2.5
	5	4.49	0.20	1.80	66.1	2,971	-	6.9
굵은골재	25	2.46	8.80	7.10	62.0	1,536	29.0	-
	25	4.40	0.60	7.20	55.0	2,397	42.0	-



(a) 천연골재의 입도곡선



(b) 자철광골재의 입도곡선

그림1 골재의 입도곡선

2.2 배합설계

천연골재와 중량골재의 치환율에 따른 역학적 특성을 고찰하기 위하여 자철광 굵은골재의 치환율은 0%(NN), 20%(NF₂₀), 40%(NF₄₀), 60%(NF₆₀), 80%(NF₈₀), 100%(NF₁₀₀)와 순수자철광골재(이하FF라함)의 7개 변수로, W/C는 35%, 45%, 55%의 3개의 배합수준에 FF의 목표슬럼프치가 4.5±0.5cm가 되도록 배합설계하여 전체적으로 동일하게 적용하였다.

3. 실험방법

표4 배합설계

기호	w/c (%)	c/w	s/A (%)	W (kg/m ³)	중량배합(kg/m ³)		
					c	s	g
NN	35	2.85	42	198	564	666	883
NF ₂₀					564	666	706
NF ₄₀					564	666	530
							621
NF ₆₀					564	666	353
							932
NF ₈₀					564	666	177
							1243
NF ₁₀₀					564	666	1553
FF					564	1136	1553
NN	45	2.22	45.3	196	436	763	898
NF ₂₀					436	763	718
NF ₄₀					436	763	316
							529
NF ₆₀					436	763	632
							359
NF ₈₀					436	763	948
							179
NF ₁₀₀					436	763	1263
FF					436	1298	1579
NN	55	1.82	49.5	193	351	838	830
NF ₂₀					351	838	664
							292
NF ₄₀					351	838	498
							584
NF ₆₀					351	838	332
							876
NF ₈₀					351	838	166
							1168
NF ₁₀₀					351	838	1460
FF	351	1450	1460				

*※ 위 표의 중량배합에서 g의 위의 숫자는 천연골재인 경우이고, 아래의 숫자는 중량골재인 경우이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 굳지 않은 콘크리트 특성

4.1.1 슬럼프

그림2에서 보는바와 같이 NN의 슬럼프가 가장 컸고, 다음으로 NF₂₀, NF₄₀, NF₆₀, NF₈₀, NF₁₀₀, FF의 순이었다. 즉 천연골재(NN)만을 사용한 콘크리트가 자철광골재(FF)만을 사용한 콘크리트보다 슬럼프가 3~5cm정도 크게 나타났으며, 특히 NF₂₀에서 NF₆₀까지는 슬럼프 변화가 거의 없다가 NF₆₀에서 FF까지는 급격한 슬럼프변화를 보이고 있다.

3.1 굳지 않은 콘크리트 실험

콘크리트의 콘시스턴시를 측정하기 위한 슬럼프시험은 KS 2402에 의거 실시하였고, 공기량 측정시험은 KS F 2421에 의거 실시하였다.

3.2 경화 콘크리트 실험

3.2.1 시험체 제작

콘크리트의 압축강도와 인장강도를 측정하기 위한 공시체는 KS F 2403에 의거 ϕ 10×20cm의 몰드를 사용하여 7일, 28일 압축강도 및 28일 인장강도를 측정용을 각각 3개씩 총 189개를 제작하였다.

3.2.2 경화콘크리트 실험

KS F 2405, KS F 2423에 의거 유압식 만능시험기(Universal Testing Machine)를 사용하였다.

3.3 방사선 차폐 성능실험

차폐실험용 공시체는 골재의 종류(7)×W/C(3×배치당(2)) = 42개를 강도시험 공시체와 동일방법으로 제작 양생하였고, 방사선차폐율 실험은 재령 28일에 단위용적중량을 구한 다음 방사선누출량을 측정하는 방법으로 실시하였다. 차폐시험체는 방사선발생 장치의 장비규모를 고려하여 6cm×12cm×21cm의 목재몰드를 이용하였고, 차폐실험은 선원(Cs-137 γ 선 450Ci급)에서 발생한 방사선의 조사선량을 차폐체가 있는 경우와 없는 경우로 나누어 각각 선원으로부터 3.25m 떨어진 detector에 감지된 방사선의 누출량을 측정하여 그 값의 비로서 차폐율을 구하였다.

표 5 실험결과

구분 기호	굳지않은콘크리트성질			경화 콘크리트 성질		
	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	비빔 온도 (°C)	단위용 적중량 (kg/m ³)	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)
ANN	6.4	1.20	25	2,350	358	31.2
ANF ₂₀	6.2	1.25	25	2,465	374	33.0
ANF ₄₀	6.5	1.60	25	2,582	412	34.0
ANF ₆₀	5.5	1.69	25	2,743	447	34.6
ANF ₈₀	4.5	1.85	25	2,864	450	36.9
ANF ₁₀₀	4.5	1.80	25	2,951	457	36.9
AFF	4.0	1.60	25	3,447	410	35.9
BNN	9.0	0.90	25	2,350	315	28.5
BNF ₂₀	8.5	0.95	25	2,399	318	30.2
BNF ₄₀	9.0	1.00	25	2,598	325	31.2
BNF ₆₀	8.0	1.20	25	2,717	328	31.3
BNF ₈₀	7.5	1.55	25	2,847	350	32.0
BNF ₁₀₀	6.0	1.60	25	2,980	370	32.8
BFF	5.0	1.65	25	3,433	375	33.2
CNN	11	0.85	24	2,310	270	25.0
CNF ₂₀	10	0.80	24	2,480	276	28.0
CNF ₄₀	10	0.90	24	2,577	280	29.0
CNF ₆₀	9.8	1.10	24	2,734	290	30.4
CNF ₈₀	8.0	1.05	24	2,815	310	31.2
CNF ₁₀₀	7.0	1.35	24	2,976	320	32.4
CFF	5.0	1.50	24	3,552	330	33.0

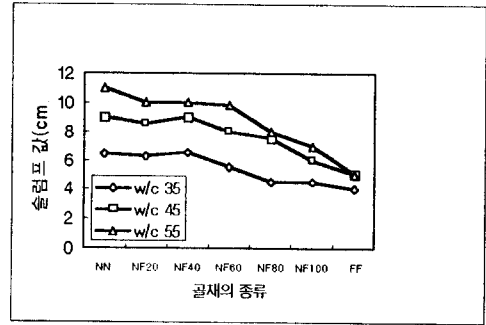


그림 2. 슬럼프 시험결과

4.1.2 공기량

표 5에서 보는바와 같이, 공기량은 W/C나 골재의 종류별로 일정한 경향은 없고, 전체적으로 0.85~1.92% 정도의 범위로 나타났다. 이러한 원인은 콘크리트 배합상의 요인이나 실험과정상의 오차 등으로 사료된다.

4.2 경화 콘크리트 특성

4.2.1 압축강도

그림3에서 보는바와 같이 압축강도는 W/C가 35%일 때 NF₁₀₀은 457kg/cm²로 가장 크게 나타났고, 그 다음으로 NF₈₀, NF₆₀, FF, NF₄₀, NF₂₀, NN의 순이었다. W/C비가 45%, 55%에서는 FF가 가장 컸고, 다음으로 NF₁₀₀, NF₈₀, NF₆₀, NF₄₀, NF₂₀, NN의 순으로 나타났다. W/C가 45%~55%인 경우 자철광골재(FF)를 사용한 콘크리트의 압축강도가 330~375kg/cm²의 크기로 크게 나타났다. 이것은 골재의 표면이 예각이고, 거칠어서 시멘트 페이스트와의 부착력이 커지고 골재입자간의 결합력이 커진 결과로 분석되어진다. 그러나, W/C가 35%에서 FF를 사용한 콘크리트의 압축강도보다 천연골재를 사용한 콘크리트의 압축강도가 크게 나타나는 것은 시험체의 파괴형태가 골재간의 부착력보다는 골재입자가 파쇄되는 강도에 의해 결정되므로 자철광골재의 특성상 쇄석이며 미립분이 천연골재보다 크게 나타나 먼저 파괴에 이르게 되는 것으로 분석된다. 압축강도의 경향은 W/C가 낮은 경우에 압축강도의 차가 크게 나타났으며, W/C가 큰 경우는 압축강도의 차이가 작게 나타났다.

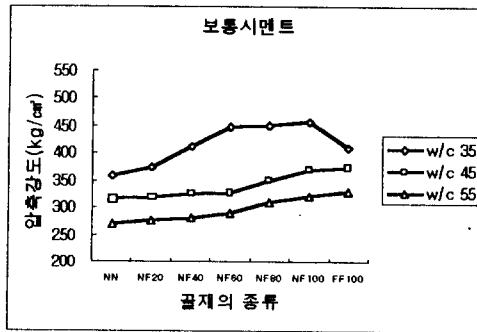


그림3 압축강도 시험결과

4.2.2 인장강도

그림4에서 보는바와 같이 인장강도는 전반적으로 W/C가 35%에서는 NF₁₀₀과 NF₈₀이 36.9kg/cm²로 가장 크게 나타났고, 그 다음으로 FF, NF₆₀, NF₄₀, NF₂₀, NN의 순이었다. W/C가 45%~55%에서는 FF가 33kg/cm² ~33.2kg/cm²로 가장 크게 나타났으며, NF₁₀₀, NF₈₀, NF₆₀, NF₄₀, NF₂₀, NN 순으로 나타났다.

4.2.3 단위용적중량

그림5와 같이 각 골재의 종류별 단위용적중량은 NN이 2,350kg/m³로 가장 낮고, NF₂₀, NF₄₀, NF₆₀,

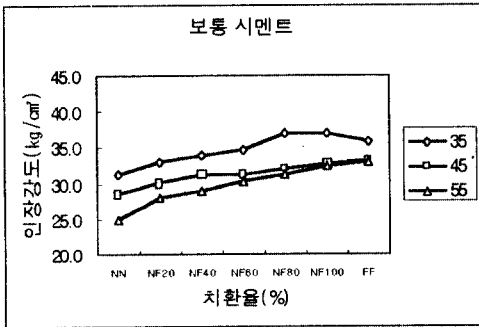


그림4 인장강도 시험결과

NF₈₀, NF₁₀₀, FF의 순이었다. NF₁₀₀은 NN에 비하여 24%, FF는 NN에 비하여 17%정도 크게 나타났다. 이와같은 결과는 콘크리트의 70~80%를 차지하는 골재의 비중에 따른 결과로 분석된다.

W/C 변화에 따른 단위용적중량의 변화는 자철광골재만을 사용한 경우, W/C가 클수록 단위수량 및 단위시멘트량은 작아지고 단위골재량이 많아지는 배합이므로 비중이 큰 골재가 콘크리트 중에 더 많은 용적을 차지하게 되어 전체적으로 단위용적중량이 증가하는 경향을 보였다. 또한 자철광은골재로 치환한 경우에서 단위용적중량은 W/C가 클수록 잔골재율을 높이는 배합이 되므로 천연골재량이 증가하고, 자철광은골재량이 감소하게 되므로 W/C가 클수록 감소하였다.

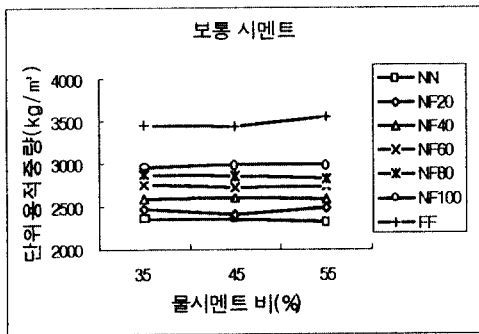


그림5 단위용적중량 측정결과

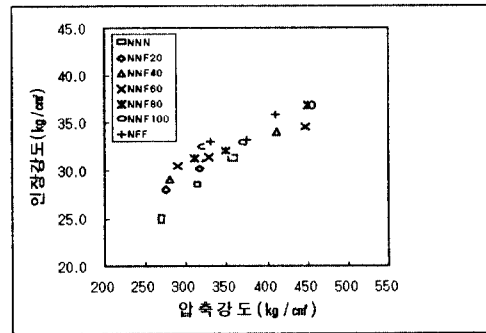


그림6 제 강도간의 관계

4.2.4 제 강도간의 관계

그림6은 콘크리트의 압축강도와 인장강도의 상호간의 상관성을 분석하기 위한 것으로 압축강도와 인장강도는 압축강도가 클수록 인장강도가 증가하여 상관계수가 92.4로 매우 양호하게 나타났다.

4.3 방사선 차폐성능

방사선차폐율의 실험결과는 표 6과 같다. 실험결과를 토대로 방사선차폐율에 영향을 미치는 인자인 W/C, 골재의 종류, 단위용적중량 등을 변수로 하여 방사선차폐율과의 영향정도를 고찰하면 다음과 같다.

표6에서 보는바와 같이 W/C변화에 따른 방사선차폐율은 W/C에 따라 1~2%정도 차이가 있으나 이것은 콘크리트의 중량변화와 누출량 측정시의 오차범위의 값으로 사료되며, 실제로 W/C와 방사선차폐율과는 관계가 없는 것으로 나타났다. 이에 대한 기존의 연구에서도 본 연구와 유사하게 W/C와 방사선차폐율과는 무관한 것으로 발표된 바 있다.

4.3.2 골재의 종류에 따른 영향

표6에서 보는바와 같이, 골재의 종류에 따른 방사선차폐율의 변화는 전반적으로 중량골재의 치환율이 클수록 차폐율도 일정하게 커졌다. W/C를 함께하여 평균한 차폐율은 NN이 60%, NF₂₀이 62.3%, NF₄₀이 67%, NF₆₀이 68.2%, NF₈₀이 69.8%, NF₁₀₀이 71.3, FF가 74.8% 이었다. 즉 중량골재를 사용한 콘크리트가 천연골재를 사용한 콘크리트보다 차폐효과가 크게 나타났다.

표 6. 차폐실험결과

구분	기호	W/C (%)	단위용적중량(kg/m ³)	방사선차폐율 (%)
35	ANN	35	2,440	61
	ANF ₂₀		2,559	63
	ANF ₄₀		2,681	67
	ANF ₆₀		2,848	68
	ANF ₈₀		2,974	70
	ANF ₁₀₀		3,064	71
	AFF		3,580	75
45	BNN	45	2,394	61
	BNF ₂₀		2,491	63
	BNF ₄₀		2,698	67
	BNF ₆₀		2,822	69
	BNF ₈₀		2,956	70
	BNF ₁₀₀		3,095	72
	BFF		3,565	75
55	CNN	55	2,398	60
	CNF ₂₀		2,574	61
	CNF ₄₀		2,676	67
	CNF ₆₀		2,839	68
	CNF ₈₀		2,923	69
	CNF ₁₀₀		3,091	71
	CFF		3,688	74

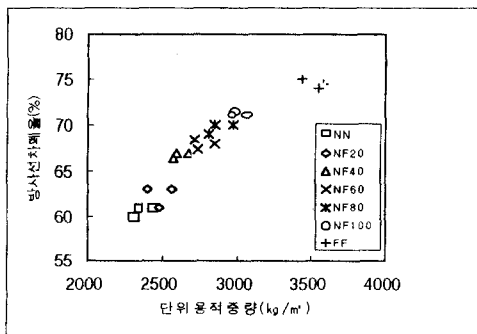


그림 7. 단위용적중량에 따른 차폐율

4.3.3 단위용적중량에 따른 영향

그림7에서 보는바와 같이 단위용적중량에 따른 방사선차폐율은, NN 단위용적중량이 2,410kg/m³의 경우 60%, NF₂₀ 2,541kg/m³의 경우 62.3%, NF₄₀ 2,685kg/m³의 경우 67%, NF₆₀ 2,836kg/m³의 경우 68.2%, NF₈₀ 2,951kg/m³의 경우 69.8%, NF₁₀₀ 3,083kg/m³의 경우 71.3%, FF 3,611kg/m³의 경우 74.8% 이었다. 이것은 단위용적중량이 비중에 비례하여 클수록 방사선차폐효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 이상과 같은 결과로 단위용적중량과 방사선 차폐율과의 관계식을 알아보기 위하여 회귀분석한 결과는 다음 (1)식과 같다

$$S_{28} = 34.812 + 0.0117W \quad (R=93.6) \text{----- (1)}$$

여기서, S₂₈ = 재령 28일 콘크리트의 방사선차폐율(%)

W = 콘크리트의 단위용적중량(kg/m³)

R = 상관계수

5. 결론

이상과 같이 천연골재와 자철광골재를 혼합하여 조합한 중량 콘크리트의 역학적 특성과 방사선 차폐효과를 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1) 자철광굵은골재는 비중이 4.40이고, 흡수율은 1%이며, 단위용적중량은 2,397kg/m³로 나타났으며, 골재의 마모율은 42%로 나타나 천연골재의 물리적 특성과 매우 다른 양상을 보였다.

2) 골재의 종류에 따른 슬럼프값은 NN의 슬럼프가 가장 컸고, 다음으로 NF₂₀, NF₄₀, NF₆₀, NF₈₀, NF₁₀₀, FF의 순이었으며, 천연골재(NN)만을 사용한 콘크리트가 자철광골재(FF)만을 사용한 콘크리트보다 슬럼프가 3~5cm정도 크게 나타났다. 또한 공기량은 0.85~1.92%정도의 범위로 나타났다.

3) 골재의 종류별 단위용적중량은 자철광골재가 가장 크고, 다음으로 NF₁₀₀, NF₈₀, NF₆₀, NF₄₀, NF₂₀, NN의 순이었다.

4) 압축강도는 W/C가 35%일 때 NF₁₀₀이 457kg/cm²로 가장 크게 나타났고, 그 다음으로 NF₈₀, NF₆₀, FF, NF₄₀, NF₂₀, NN의 순이었으며, W/C비가 45%~55%에서는 FF가 330~375kg/cm²로 가장 컸고. 다음으로 NF₁₀₀, NF₈₀, NF₆₀, NF₄₀, NF₂₀, NN의 순으로 나타났다

5) 방사선차폐에 대한 실험결과 물시멘트비와 방사선차폐효과는 상관이 없는 것으로 나타났다. 골재의 종류별 차폐율은 천연골재인 NN의 경우 61%, NF₂₀의 경우 63%, NF₄₀의 경우 67%, NF₆₀의 경우 68%, NF₈₀의 경우 70%, NF₁₀₀의 경우 71%, FF의 경우 75%의 차폐효과를 나타냈다.

6) 단위용적중량에 따른 방사선차폐율에는 매우 밀접한 관계가 있었다. 이 때의 단위용적중량과 방사선차폐율의 관계식은 다음과 같이 나타났다. S₂₈ = 34.812 + 0.0117W (R=93.6)

참 고 문 헌

- 1) 부척량, “건축구조물의 방사선차폐에 대한 연구(I)(콘크리트 배합에 따른 γ 선 차폐를 중심으로)”, 대한건축학회논문집, 제3권 6호, 1987.12
- 2) 이경진, “자철광골재를 이용하는 중량콘크리트의 비파괴 시험에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제7권 5호, 1991, pp.343~351
- 3) 고규철, “자철광골재를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구”, 청주대학교 산업경영대학원 석사학위논문, 1989,
- 4) 한국원자력연구소, “국내 방사선 차폐재료의 연구 개발”, 1970
- 5) 한국원자력연구소, “원자로차폐”, 1978,
- 6) 한국원자력연구소, “방사선차폐”, 1979
- 7) 한국원자력연구소, “중성자 차폐재”, 1993
- 8) 채희태, “건축구조물의 방사선 차폐에 관한 연구”, 전남대학교 대학원 석사학위논문, 1988
- 9) 과학기술처, “방사선차폐 구조연구”, 1984
- 10) 송하영, “고성능 감수제 사용에 의한 원전 시설용 콘크리트의 물성 개선에 관한 기초 연구”, 충남대학교 대학원 석사학위논문, 1989
- 11) 백용관, “자철광골재를 이용하는 중량콘크리트의 방사선차폐성상에 관한 연구”, 청주대학교 대학원 석사학위논문, 1990
- 12) Herman Cember, “Introduction to Health Physics”, Pergamon Press, 1983, pp.177~182
- 13) 이경진, “자철광골재를 사용한 중량콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구”, 충남대학교 대학원 석사학위논문, 1992
- 14) 부척량, “자철광골재를 사용한 중량콘크리트의 방사선차폐에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제14권 3호, 1998.3