

산화철이 첨가된 방사선 차폐벽돌의 특성 분석
Performance Test for A Radiation Shielding Block Containing Iron Oxide

장지운, *고병령, 신희성, 이윤희, 김호동,
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

* 한국원자력기술 주식회사

요 약

기존에 방사선 차폐재로서 널리 사용되는 납 혹은 콘크리트의 대체품으로 개발된 방사선 차폐벽돌의 기본적인 특성 분석을 위해 수행하였다. 차폐재의 구성성분을 분석한 결과 산화철(Fe_2O_3)이 전체 구성원소의 90% 이상을 차지하고 있었으며, 최적 배합비 일때 밀도는 3.8 g/cm^3 , 압축강도는 46 N/mm^2 로 측정되었다. Cs-137과 Co-60에 의한 방사선 조사시험에서 선량률 값의 비로 결정되는 차폐율은 각각 94%, 90%로 나타났다.

ABSTRACT

Performance test for a radiation shielding block which can be substituted for the existing shielding material has been carried out. As the result of the chemical assay of the shielding material, the iron oxide composition ratio is detected to be more than 90% impurity composition elements. The density and compressive strength according to the optimum mixture is measured to be 3.8 g/cm^3 and 46 N/mm^2 . In the irradiation test with Cs-137 and Co-60 source, it is revealed that the shielding ratio on the basis of dose rate are 94% and 90% respectively.

1. 서 론

방사선 방호목적으로 사용되는 차폐재의 구성성분은 차폐재 선택이라는 측면에서 중요한 요소로서 작용한다. 또한 같은 재료의 차폐재라고 할지라도 구성에 따라 밀도가 달라지므로 방사선 감쇠에 영향을 미친다. 방사선차폐용으로는 납 등의 중금속과 콘크리트가 널리 사용되고 있다. 소형특수시설에는 납 차폐체가 사용되고 있는 반면에, 대형 구조물의 경우에는 콘크리트 차폐체가 사용된다. 그러나 납은 가격이 비쌀 뿐만 아니라 구조물의 건축에 한계가 있으며, 한편 콘크리트는 낮은 차폐능력 때문에 소형 또는 밀집된 지

역의 차폐체로는 부적합하다. 일반 콘크리트는 감마선(500 ~ 1300 KeV)의 투과율이 15 cm 두께에 대해서 30~40% 수준으로 5~10%의 투과율을 갖는 중금속 차폐재 보다 차폐 능력이 낮기 때문에, 에너지가 높은 방사선일수록 차폐벽 두께는 2~3 배 이상 차이가 난다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 경제적인 면에서도 차폐능력이 콘크리트 보다 우수한 차폐벽돌의 개발이 필요하다[1].

본 연구에서는 상기와 같은 문제점들을 개선의 일환으로 산화철을 첨가한 방사선 차폐 벽돌의 물리적 특성분석과 차폐능 분석을 수행하여 기존 차폐벽돌의 성능과 비교·분석 하였다.

2. 이론적 배경 및 방법

가. 방사선 차폐벽돌의 일반 요건

1) 차폐재

일반적으로 투과력이 큰 X-선이나 감마선의 차폐에는 원자번호가 크고 밀도가 높을수록 방사선의 감쇠가 커지므로 밀도가 큰 납, 철, 텅스텐 및 감손 우라늄이 쓰이지만 경제성 때문에 콘크리트가 널리 쓰인다.

베타선 차폐에는 원자번호가 낮은 물질(예: 플라스틱, 알루미늄, 등)을 쓴다. 그 이유는 베타선이 차폐재 구성 핵 또는 원자의 전자장과 작용하여 제동복사선(Bremsstrahlung X-선)을 방출하는데 베타선의 에너지가 X-선으로 전환되는 비율이 차폐재 구성물질의 원자번호 및 베타선 최대에너지의 곱에 비례하기 때문에 이의 전환율을 감소시키기 위하여 원자번호가 낮은 물질을 베타선 차폐재로 선택한다.

중성자는 원자번호가 작을수록 에너지를 잘 잃기 때문에 보통 물이나, 파라핀, 폴리에틸렌 및 탄소 등을 차폐재로 쓰지만 경제적 이점 때문에 콘크리트를 널리 사용하고 있다 [2-5].

2) 밀도

앞서 설명한 바와 같이 감마선이나 X-선의 차폐 경우에는 차폐재의 밀도와 깊은 관련이 있다. 아래에 제시한 표는 차폐재 별 비중을 나타내었다.

차폐재	세부 분류	비중 (g/cm^3)
철 광 석	적철광(Fe_2O_3)	5.24
	자철광(Fe_3O_4)	5.18
	황철광(FeS_2)	5.00
연 광 석	방연광(PbS)	5.24
	백연광($PbCO_3$)	5.24
산 화 납	산화납(PbO)	9.53
납	납 알갱이	11.35

3) 압축강도

방사선 차폐벽돌의 압축강도에 가장 영향을 주는 시멘트는 물과 함께 혼합사용되어 화학반응[6]을 통한 입자간 결합력을 부여한다[7]. 일정한 기간의 양생을 거치면서 수분은 기체로 변하여 차폐벽돌에서 이탈하게 됨으로 기공을 형성하고 이들의 존재가 차폐벽돌의 강도에 영향을 미친다[8]. 물이 적을 경우 혼합 시 작업성 문제와 미 반응 시멘트가 존재하게 되고, 물이 많을 경우는 Slump 문제[9]와 기공성이 커져 차폐벽돌의 강도 저하가 발생한다[10].

4) 균질도

방사선 차폐를 주목적으로 벽돌을 사용하는 경우, 일반 벽돌에서 필요한 강도나 내구성[11] 이외에도 여러 가지 성질이 추가로 요구되는데, 첫째 어느 부분에서든지 고품질의 소요밀도를 보유한 벽돌이어야 하며, 건조수축이나 온도·응력에 의한 균열이 없어야 한다. 두 번째, 방사선 조사에 의한 유해물질 발생이 없고 열전도율이 크고, 열팽창율이 적어야 한다.

일반적으로 차폐재의 경화재로서 시멘트와 물이 사용되며 이들이 혼합되고 고화되는 과정에서 발생할 수 있는 균질성 문제 및 다수의 기공형성에 대한 해결책이 강구되어야 한다. 일반적으로 고화공정은 시멘트와 물의 혼합비를 적절히 맞추고 균일한 혼합을 하는 조작만으로도 원하는 품질의 고화체를 얻을 수 있고 또한 혼합된 시멘트 반죽은 실온에서 경화가 일어나며, 덩어리가 생기는 경화시간까지 한두 시간이 걸리게 됨에 따라 진동에 의한 기포제거 등의 추가적인 조작으로 기공도를 상당히 줄일 수가 있다[12]. 다만 이러한 작업의 검증 및 품질보증을 위한 비파괴적 검사는 반드시 필요하다.

나. 방사선 차폐의 이론적 원리

방사선이 어떤 물질(또는 매질)을 통과하는 동안 그 매질의 구성원자 또는 원자핵과 반응할 때 방사선의 세기가 감쇠한다. 공간 중 두께가 x cm인 차폐체가 있을 때 차폐효과로 인하여 감쇠한 방사선의 세기(Monoenergetic Photons, Narrow Beam), Φ 를 다음식과 같은 지수감쇠 함수로서 표현한다.

$$\Phi = \Phi_0 \exp(\mu x) \quad (1)$$

식(1)에서 Φ_0 는 차폐체가 없을 때의 방사선 세기(또는 선속밀도)를 나타내며, μ 는 선형감쇠계수(cm^{-1})이며 동시에 방사선이 차폐재에서 단위길이 당 통과하는 동안 차폐물질과 상호작용을 일으켜 방사선 세기가 감쇠될 확률을 나타낸다.

$$\Phi = \Phi_0 \exp\left[-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x\right] \quad (2)$$

선형감쇠계수(μ)는 방사선의 에너지와 차폐재의 종류에 따라 달라진다. 같은 차폐재라도 재료의 조성에 따라 밀도가 달라질 수 있기 때문에 밀도와 관계없는 방사선의 감쇠를 나타내기 위하여 식(2)와 같이 질량감쇠계수(μ/ρ , g/cm^3)와 밀도두께(ρx , g/cm^2)를 도입하여 차폐계산에 쓰고 있다. 실제로 방사선 차폐 시에는 차폐재에서 방사선의 산란(Wide Beam 조건일 때)이 일어나기 때문에 인체로 들어오는 방사선의 산란기여분을 고려하여야 하는데 이것을 보통 축적인자(Build-up factor) B로 나타낸다. B는 차폐재의 두께 및

차폐재에서의 선형감쇠계수에 따라 달라진다. 방사선의 산란에 의한 축적인자를 고려한 참 선속밀도 Φ 는 다음 식과 같다.

$$\Phi = \Phi_0 B(\mu x) \exp \left[- \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \rho x \right] \quad (3)$$

식(3)에서 보는 바와 같이 방사선의 차폐효과는 차폐재의 비중과 두께의 곱에 비례하며, 두께가 동일하면 비중이 클수록 차폐효과는 우수하다.

최초의 방사선 선속의 세기를 절반으로 감소시키는 어떤 차폐재의 두께를 반가층이라 하여 다음 식과 같은 관계가 있다.

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (4)$$

식(4)는 차폐설계에서 중요한 부분이다.

3. 측정결과 분석

차폐재의 구성성분 분석은 공인분석기관에 의해서 수행되었으며, 초기 차폐벽돌의 개발 모델이 되었던 미국 Atomic International Inc 사의 벽돌과 비교 분석하였다. 최적의 배합비로 제작된 시험편을 이용한 물성시험은 밀도 및 압축강도의 균일성, 차폐재 입자성에 따른 압축강도의 변화, 차폐재 혼합시간에 따른 압축강도의 변화로 수행하였다. 차폐능 시험은 방사선 조사장치를 이용하여 차폐 전과 차폐 후의 선량률 값의 변화 비를 측정하여 차폐율을 산출하였다.

가. 성분분석

개발된 차폐벽돌과 Atomic International Inc사의 벽돌 성분분석 결과를 Table 1에 제시하였다. 이 결과에서 전체 구성 원소 중 Fe_2O_3 이 차지하는 비율이 전자의 경우는 94.3%, 후자의 경우는 90.1%임을 감안할 때 방사선 차폐의 주요 원소는 철(Fe)임을 알 수가 있다. 이외의 성분들은 시멘트의 주성분인 Si 및 Ca등으로 이루어져 있다.

Table 1. Comparison of Main Element of Radiation Shielding Block.

Element	Atomic International Inc (wt%)	KNT (wt%)
Fe_2O_3	94.26	90.1
Al_2O_3	0.49	0.81
SiO_2	1.70	2.5
MgO	0.40	0.43
CaO	5.33	9.0

나. 물성시험

최적의 배합비로 제작된 차폐벽돌의 시험편 사진을 Fig 2에 제시하였다. 이 시험편에 대한 밀도 및 압축강도의 경우 공인기관 측정 최대값을 기준으로 미국산은 3.80 g/cm^3 , 42 N/mm^2 로 측정되었으며, 개발품은 3.87 g/cm^3 , 46 N/mm^2 로 측정되어 개발품이 우수한 것으로 나타났다. 또한 개발품에 대한 밀도 및 압축강도의 자체 측정 결과는 3.76 ± 0.09

g/cm^3 , $46.54 \pm 1.13 \text{ N/mm}^2$ 로서 Table 2, 그리고 Fig. 3, 4에 제시하였다. 평균값에 대한 상대오차가 $\pm 2.5\%$ 이내로 측정되어 각 시험편의 균일성은 양호한 것으로 판단되었다.

차폐재 입자 크기에 따른 압축강도의 변화시험의 경우 Filter로 굵은 입자들만으로 이루어진 시험편과 굵은 입자와 작은 입자가 혼합된 시험편과의 압축강도 비교시험에서 예상대로 굵은 입자만 이루어진 시험편이 압축강도가 크게 감소함을 보였다. 파괴된 시험편의 단면을 육안으로 확인해 본 결과 굵은 입자로만 구성된 시험편의 기공도가 상대적으로 크게 관찰되었다. 기공도를 줄이기 위한 진동시간은 대략 20~30 초가 적정한 것으로 나타났다. Vibrator 적용시간을 더 길게 할 경우 차폐재가 밑으로 내려가는 현상을 보였고 압축강도 역시 감소하였다.



Fig. 2. Specimens for Test of Properties of Matter.

Table 2. Results of measurement of Density and Compressive Strength for KNT Block Specimens

No.	Density (g/cm^3)	Compressive Strength (N/mm^2)
1	3.78	45.9
2	3.75	47.2
3	3.64	47.8
4	3.71	46.0
5	3.84	46.3
6	3.87	46.2
7	3.84	47.8
8	3.86	44.5
9	3.64	48.0
10	3.70	45.7
Avg.	3.76	46.54
Std. Dev.	0.09	1.13
Rel. error(%)	2.35	2.43

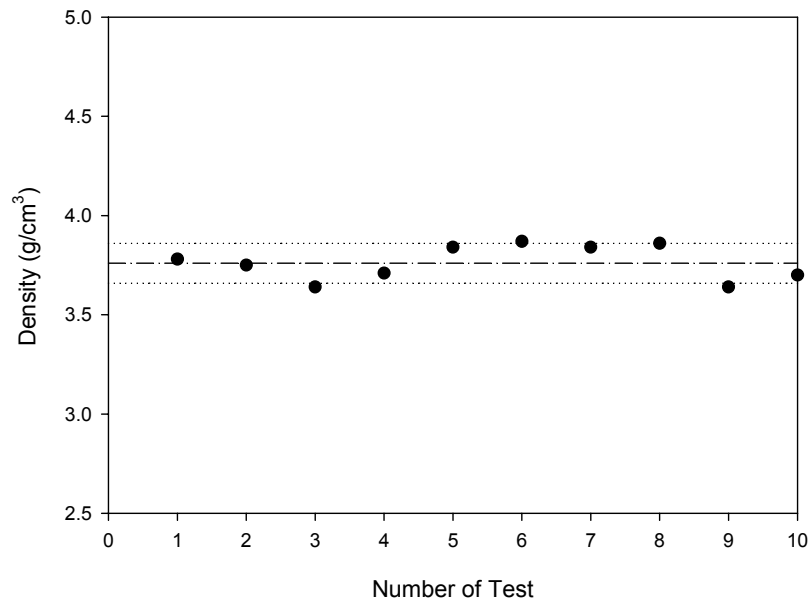


Fig. 3. Uniformity Test of Density for Specimens.

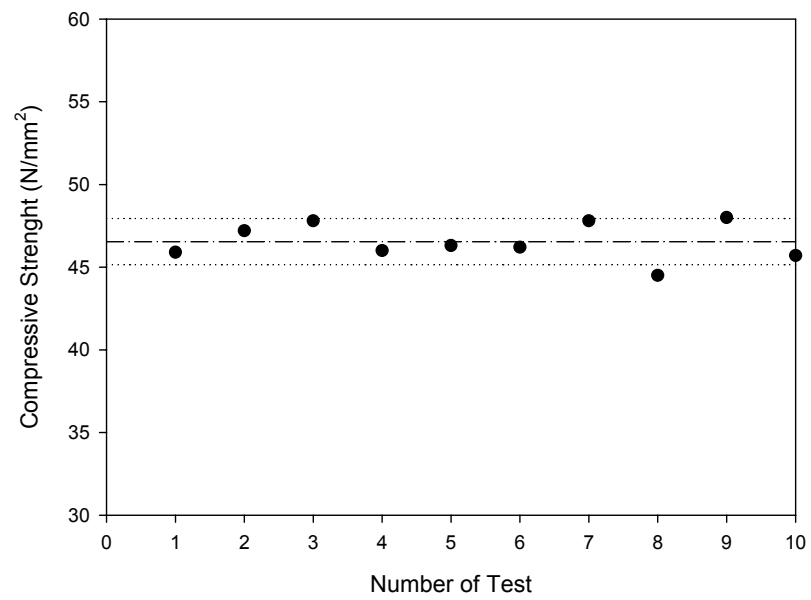


Fig. 4. Uniformity Test of Compressive Strength for Specimens.

다. 차폐능 시험

Fig. 5에는 Cs-137(2.34 Ci) 조사장치를 이용해 차폐율을 측정할 때의 장치 배치도를 나타내었다. 먼저 Collimated된 조사 빔의 중심에 Ion Chamber의 중심점을 정렬시켰다. 공간 선량률이 480 mR/h 되는 지점까지 Cart를 이동시켜 Ion Chamber(Victoreen Model 530)를 위치시키고 벽돌 차폐 전의 선량을 기록하였다. 다음으로 차폐벽돌을 Ion Chamber 앞에 위치시켜 차폐한 후의 선량 값을 기록하였다. 개발품의 경우 두 선량값을 비교한 결과 차폐 후의 선량 값이 28 mR/h로 감소하여 94%의 차폐율을 보였고, Table 3에 미국산 차폐벽돌과 개발품, 일반 콘크리트를 비교·분석한 결과를 제시하였다. 차폐율면에 있어서 미국산 차폐벽돌과 거의 동등한 수준이었으며, 일반 콘크리트보다는 5.5% 앞섰다.

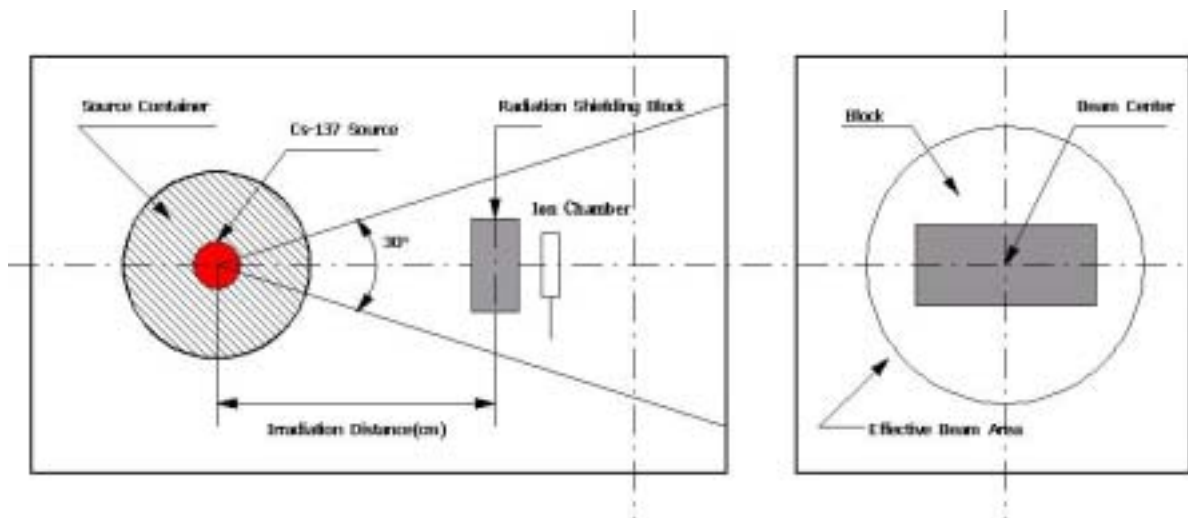


Fig. 5. Arrangement of Cs-137 source, Block and Ion Chamber using Irradiation System.

Table 3. Results of the Measured Dose rate Using Cs-137 Irradiator

Item	Measured Dose rate		Ratio of Shielding
	Before Shielding (mR/hr)	After Shielding (mR/hr)	
Atomic International	460	28	94%
KNT	460	28	94%
Normal Concrete	460	53	88.5%

Co-60(102336 Ci)를 이용한 실험에서는 Ceric-cerous surface Dosimeter를 이용하여 차폐 전과 후의 선량값을 비교하였는데 Dosimeter의 노출시간을 각각 차폐 전 3시간 차폐 후 19 시간으로 하여 누적선량으로부터 선량률을 산출하였다. 각 측정은 3회 반복 수행하였으며, 그 결과를 Table 4에 제시하였다. Fig. 6은 선량평가에 사용된 Ceric-cerous surface dosimeter를 배치한 모습이고, Fig. 7은 산란선의 효과를 배제하기 위한 벽돌배치를 보여주고 있으며, Fig. 8은 Co-60 Plate Source loading system을 보여주고 있다.

Table 4. Results of the Measured Dose Rate Using Co-60 Plate Source

Condition	No	Dose (Mrad)	Dose Rate (Mrad/hr)	Irradiation Time (hr)
Before Shielding	1	1.53	0.509	3
	2	1.50	0.500	3
	3	1.54	0.512	3
	Average	1.52	0.507	
After Shielding	1	0.96	0.051	19
	2	0.99	0.052	19
	3	0.99	0.052	19
	Average	0.98	0.052	



Fig. 6. Ceric-cerous Surface Dosimeter for Measurement of Dose Rate.



Fig. 7. Arrangement of Block for Exclusion of Scattering Radiation



Fig. 8. Loading System of Co-60 Plate Source.

4. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 새로 개발된 차폐벽돌의 특성을 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다. 차폐재를 이루고 있는 구성성분은 산화철(Fe_2O_3)이 주된 성분이었고 물성에 있어서 밀도와 압축강도가 3.8 g/cm^3 , 46 N/mm^2 로 나타났다. 방사선 차폐능은 Cs-137, Co-60 선원에 대해서 각각 94%, 90%의 차폐율로 나타났다. 앞으로 X-선 조사시험을 통해 X-선에 대한 차폐능 시험과 균질도(Uniformity) 시험을 추가적으로 수행하여 실제 차폐시설에 사용할 수 있도록 할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] ICRP보고서 No.60, Pergamon Press, Elmsford, NY, (1991).
- [2] 황선태 · 박태순 · 하석호, "방사선 ", KRSI-ET-80, 한국표준과학연구원, 대전, (1985).
- [3] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.10003, (1979).
- [4] UNSEAR, "Sources, Effects and Risks of Ionization Radiations", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988 Report to the General Assembly, UN, New York (1988).
- [5] J. E. Tuner, "Atom, Radiation, and Radiation Protection", John Wiley & Sons, New York (1995).
- [6] F.M. Lea, "The Chemistry of Cement and Concrete", Edward Arnold, Lodon, 158 (1970).
- [7] G. J. Verbeck and R. A. Helmuth, "Structures and physical properties of cement paste", Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Tokyo, Part III, pp.1-32 (1968).
- [8] W. H. Price, "Factor influencing concrete strength", ACI Journal, proceedings Vol.47, pp.417-32 (1951).
- [9] 金武漢, 辛鉉植, 金文漢, "建築材料學" 文運堂, pp.195-209 (1988).
- [10] P. Klieger, "Effect of mixing and curing temperature on concrete strength", ACI Journal, proceedings Vol.54, pp.1063-81 (1958).
- [11] A .M. Neville, "Properties of Concrete", Pitman Publishing Inc., Lodon (1981).
- [12] 오병환, 엄주용, "양질의 콘크리트 생산을 위한 배합설계 최적화", 한국콘크리트학회, 제3권 4호, pp.3-15 (1991).