

Aggregate Effects on γ -ray Shielding Characteristic and Compressive Strength of Concrete

콘크리트의 감마선 차폐특성 및 압축강도에 대한 골재의 영향

Jeong-Hwan Oh¹, Young-Bum Mun², Jae-Hyung Lee², Hyun-Kook Choi², and Sooseok Choi^{1*}

¹Jeju National University, 102, Jejudaehak-ro, Jeju, Republic of Korea

²Sungshin Cement Co., Ltd, 48-37, Bugang Oecheon-ro, Bugang-myeon, Sejong, Republic of Korea

오정환¹, 문영범², 이재형², 최현국², 최수석^{1*}

¹제주대학교, 제주특별자치도 제주시 제주대화로 102

²성신양회(주), 세종특별자치시 부강면 부강외천로 48-37

(Received August 3, 2016 / Revised November 4, 2016 / Approved November 28, 2016)

We observed the γ -ray shielding characteristics and compressive strength of five types of concrete using general aggregates and high-weight aggregates. The aggregates were classified into fine aggregate and coarse aggregate according to the average size. The experimental results obtained an attenuation coefficient of 0.371 cm^{-1} from a concrete with the oxidizing slag sand (OSS) and oxidizing slag gravel (OSG) for a γ -ray of ^{137}Cs , which is improved by 2% compared with a concrete with typical aggregates of sand and gravel. In the unit weight measurement, a concrete prepared by iron ore sand (IOS) and OSG had the highest value of $3,175 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Although the unit weight of the concrete with OSS and OSG was $3,052 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, which was lower than the maximum unit weight condition by $123 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, its attenuation coefficient was improved by 0.012 cm^{-1} . The results of chemical analysis of aggregates revealed that the magnesium content in oxidizing slag was lower than that in iron ore, while the calcium content was higher. The concrete with oxidizing slag aggregates demonstrated enhanced γ -ray shielding performance due to a relatively high calcium content compared with the concrete with OSS and OSG in spite of a low unit weight. All sample concretes mixed with high-weight aggregates had higher compressive strength than the concrete with typical sand and gravel. When OSS and IOS were used, the highest compressive strength was 50.2 MPa, which was an improvement by 45% over general concrete, which was achieved after four weeks of curing.

Keywords: High-weight concrete, Aggregate, γ -ray shielding, Attenuation coefficient, Compressive strength

* Corresponding Author.

Sooseok Choi, Jeju National University, E-mail: sooseok@jejunu.ac.kr, Tel: +82-64-754-3644

ORCID

Jeong-Hwan Oh <http://orcid.org/0000-0003-2040-6561>

Jae-Hyung Lee <http://orcid.org/0000-0003-1641-7460>

Sooseok Choi <http://orcid.org/0000-0002-3957-8956>

Young-Bum Mun <http://orcid.org/0000-0002-3114-1303>

Hyun-Kook Choi <http://orcid.org/0000-0002-9568-3961>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

일반골재인 자갈, 모래와 중량골재인 산화 슬래그 및 자철광을 이용하여 5 종류의 콘크리트를 제작하여 감마선 차폐특성과 압축강도를 살펴보았다. 골재는 평균적인 크기에 따라 비교적 작은 크기의 잔 골재와 큰 크기의 굵은 골재로 구분하여 사용하였다. 실험 결과 산화 슬래그 잔 골재와 굵은 골재를 사용한 콘크리트가 일반 골재만을 이용하여 배합한 콘크리트 시편보다 ^{137}Cs 감마선에 대해 2% 향상된 감쇠계수인 0.371 cm^{-1} 을 기록하였다. 각 시편들의 단위중량을 측정한 결과 자철광 잔 골재와 산화 슬래그 굵은 골재로 배합한 조건의 단위중량이 가장 높은 $3,175\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 이었다. 산화슬래그를 잔 골재와 굵은 골재로 배합한 조건의 단위중량은 $3,052\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 으로 최대 단위중량 조건보다 $123\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 낮았지만 감쇠계수는 오히려 0.012 cm^{-1} 향상되었다. 골재들의 화학성분 분석결과 산화 슬래그는 자철광에 비해 마그네슘의 비율은 낮고 칼슘의 비율은 높아 구성에 있어서 차이를 보였다. 따라서 산화슬래그 만을 골재로 사용한 경우 자철광을 잔 골재로 사용한 경우보다 단위중량은 낮았지만 마그네슘과 비교하여 원자번호가 큰 칼슘의 비율이 높아서 감마선 차폐성능이 향상된 것으로 생각된다. 중량골재가 배합된 모든 시편들은 일반 골재를 이용한 콘크리트보다 압축강도가 높았고, 산화슬래그와 자철광의 잔 골재만을 사용한 경우 4주 양생 후 압축강도가 일반 콘크리트에 비해 45% 향상된 50.2 MPa 을 기록하였다.

중심단어: 중량 콘크리트, 골재, 감마선 차폐, 감쇠계수, 압축강도

1. 서론

방사성 핵종을 이용하는 의료, 비파괴검사, 원자력발전 같은 산업 활동 및 각종 연구활동에서는 각종 방사성 폐기물이 발생하는데, 이들로부터 나오는 대표적인 방사선 종류로는 알파선, 베타선, 감마선, 중성자선이 있다. 방사선을 차폐하기 위해서는 일반적으로 방사선의 종류에 따라 차폐 재료를 다르게 사용한다. 알파선과 베타선은 투과율이 낮아 종이나 알루미늄으로도 쉽게 차폐를 할 수 있지만, 감마선의 경우에는 원자핵의 높은 에너지 상태에 의해 생성된 고 에너지의 전자기파 형태이기 때문에 원자번호가 높은 금속물질인 납, 철, 텅스텐 화합물 또는 혼합물 같은 밀도가 높은 재료들을 이용하여 차폐해야 한다. 또한, 중성자선은 정전기적 영향을 거의 받지 않아 이를 차폐하기 위해서는 원자핵과 충돌로 에너지를 감쇠시켜야 한다[1-2]. 특히, 콘크리트는 구성재료의 배합과 밀도를 다양하게 변화시킴으로써 방사선 차폐성능을 개선할 수 있어 원자력 관련 시설물의 기본적인 구조 재료로서 일정부분 방사선차폐에도 기여한다[3].

콘크리트는 시공의 편리성과 경제적인 요인으로 원자력 산업에 광범위하게 사용되면서 원자력 발전소의 원자로 격납용기와 건물 구조체로 사용되고 있다. 원자력 산업에 사용되고 있는 콘크리트는 일반 콘크리트뿐만 아니라 밀도가 높은 중량 골재를 사용하여 만든 중량 콘크리트를 사용할 수도

있다. 시멘트와 혼합되어 콘크리트를 구성하는 주요 물질인 중량 골재로는 자철석, 중정석, 전기로 산화 슬래그 등이 통상 사용되고 있다. 콘크리트 제조에 있어서 하나의 장점은 다양한 재료를 혼합할 수 있으므로 재료의 밀도나 골재 배합 변화를 통해 구조적 안정성을 반영하는 압축강도뿐만 아니라 재료의 특성에 따라 방사선 차폐 효과도 향상시킬 수 있는 것이다. 그러나 중량 골재에는 철 성분이 일반 골재보다 많은 양이 함유되어 있어 중성자선에 의한 방사화 문제로 이차적인 방사성 폐기물을 발생시킨다는 단점을 가지고 있다 [4-8]. 따라서 다양한 중량골재의 개발 및 특성평가를 통한 콘크리트의 성능 향상이 필요하지만, 이들에 대한 연구개발 활동 및 산업적 응용이 제한적이어서 수급 가능한 골재 재료의 종류가 한정되어 있다.

본 연구에서는 콘크리트에 들어가는 골재 배합을 달리하여 방사선 차폐성능의 정량적인 평가와 압축강도 측정을 진행하였다. 특히, 중량골재의 주 성분인 철 이외의 성분이 차폐성능에 미치는 영향에 대한 분석도 함께 진행하였다. 우선 국내에서 수급 가능한 다양한 골재의 성분을 분석하고 서로 다르게 조합하여 중량 콘크리트를 제작하였다. 이후 정량적인 감쇠계수 값을 구하기 위해서 두께 증가에 따른 투과율을 ^{137}Cs 감마선원을 이용하여 측정하였다. 그리고 방사선 차폐 성능 향상과 함께 압축강도도 뛰어난 중량 콘크리트 개발을 위하여 KS 기준을 따른 양생 일차별 압축강도 실험도 같이

Table 1. Material property of cement and aggregate

Type		Density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Diameter (mm)
Binder	Cement	3.15	0.01
Reference Aggregate	Sand	2.60	1.2
	Gravel	2.65	20
High-Weight Aggregate	Oxidizing Slag Sand (OSS)	3.77	2.5
	Oxidizing Slag Gravel (OSG)	3.62	20
	Iron Ore Sand (IOS)	3.98	5
	Iron Ore Gravel (IOG)	3.60	12

Table 2. Concrete mixing conditions

No.	Type			Unit Weight ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)			Total Unit Weight ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
	F.A	C.A	Water	Cement	F.A	C.A	
1	Sand	Gravel			889	906	2320
2	Sand	OSG			889	1238	2652
3	IOS	Gravel	175	350	1361	906	2792
4	IOS	OSS			1361	1289	3175
5	OSS	OSG			1289	1238	3052

* F.A=Fine Aggregate, C.A=Coarse Aggregate

진행하였다. 이러한 실험들을 종합하여 중량 콘크리트의 구성성분이 방사선 차폐에 미치는 영향과 중량 골재의 종류가 압축강도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 콘크리트 배합 조건

본 연구에 사용된 재료는 일반 포틀랜드 시멘트, 일반 골재 그리고 국내에서 수급 가능한 중량 골재를 사용하였다. 중량 골재는 천연 및 산업부산물물의 두 가지 종류를 사용하였다. 산업 부산물 골재는 철을 이용한 전기로 공정에서 발생하는 산업 폐기물 슬래그로서 다량의 철, 석회석, 탄소가

함유되어 있으며, 폐기물을 콘크리트 원료로 이용한다는 점에서 자원순환과 경제적인 측면에서 장점이 있다. 반면, 천연 골재로 사용된 자철광은 일반 광석에 채취가 가능한 중량 골재이다. 아래 Table 1에는 본 연구의 콘크리트 배합에 사용된 시멘트와 골재들의 밀도와 대략적인 크기를 나타내었다. 중량 골재들의 경우 일반 골재인 모래나 자갈 보다 $0.95 \sim 1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 높은 밀도를 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

Table 2에는 감마선 차폐 실험과 압축강도 측정에 사용된 중량 콘크리트를 제작한 골재 배합 조건을 나타내었다. 각 샘플에 사용되는 물과 시멘트양은 동일하게 하였고, 골재배합만을 다르게 하여 콘크리트를 제작하였다. 4번 시편을 제외한 콘크리트의 배합에서는 잔 골재와 굵은 골재를 각각 사용하였으며, 4번 시편의 경우 자철광 잔 골재와 산화 슬래그 잔 골재를 혼합하여 골재로 사용하였다. 각 샘플에 대한

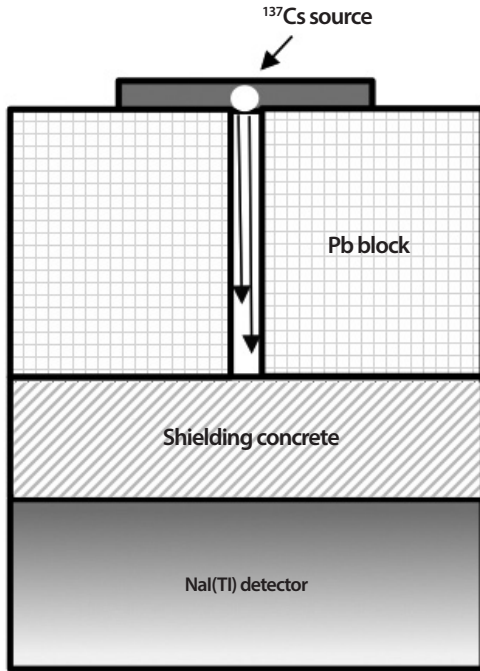


Fig. 1. Measurements device of concrete shielding for transmission rate of the γ -ray.

단위중량은 골재 배합 시 혼합한 재료들 각각의 단위중량들의 합으로 결정된다. 콘크리트 샘플의 지름은 50 mm로 일정하게 하였으며 두께는 30, 40, 50 mm로 10 mm씩 증가시키면서 각 배합조건에 대해 3개의 샘플을 제작하였다. Fig. 2에는 본 연구에 사용된 자철광과 자갈을 골재로하여 제작한 콘크리트 시편을 두께별로 비교한 사진을 나타내었다.

2.2 방사선 차폐 특성 평가

중량 콘크리트의 감쇠계수를 구하기 위해서 식 (1)을 이용하였다. 식 (1)을 살펴보면 어떠한 차폐체에 I_0 의 강도를 가진 방사선이 입사한다고 가정할 때, 이 차폐체를 투과한 후의 감마선의 강도는 I 라고 나타낼 수 있다. 이때 D 는 차폐체의 두께이며, μ 는 감쇠계수로 감마선이 물질내의 단위길이당 상호작용을 일으킬 확률을 나타낸다[9-11]. 방사선이 차폐물질을 1차원적으로 투과하는 정량적인 투과율(T)와 감쇠계수를 구하기 위해서 Fig. 1과 같이 좁고 긴 형태의 통로가 있는 납블록을 방사선원과 콘크리트 사이에 설치하여 실험 장치를



Fig. 2. Concrete samples in different thicknesses.

구성하였다. 즉, 방사선의 세기는 방사선이 진행되는 방향과 거리에 따라 변화하므로 일정한 방향으로 충분한 직진성을 가지고 있는 방사선만 콘크리트에 입사시켜 정확한 차폐실험을 진행할 수 있도록 하였다. 사용된 납블록에서 감마선이 지나가는 통로의 내경은 5 mm이고 길이는 25 mm이다. 방사선 차폐 실험에 사용된 계측기로는 Canberra사의 NaI(Tl) 검출기를 사용하였다. 계측기에 인가된 전압은 800 V로 측정시간은 600초였으며, 시편 내 골재 분포의 불균일성이 감마선 차폐에 영향을 미칠 수 있으므로, 단일 시편에 대해 10분씩 3번 반복측정을 하였고, 같은 재료에 대해 두께를 증가시키면서 반복적으로 감마선 투과율을 측정하여 실험결과를 분석하였다. 계측결과와 정확성을 정량적으로 평가하기 위하여 1분당 측정회수(cpm)을 기준으로 하여 표준편차를 구하였다. 계측값으로부터 투과율, 반가층, 감쇠계수 등의 값을 구하였는데, 모든 시편에 대하여 ^{137}Cs 의 662 keV 감마선에 대한 계측을 하였으며 산란된 감마선의 영향도 비교하기 위하여 가장 두꺼운 50 mm 두께의 시편을 대상으로 전체 에너지 영역에 대한 계측도 수행하여 결과를 비교하였다. 계측값으로부터 산출된투과율의 평균값을 이용하여 선형회귀분석을 통해 차폐체 두께증가에 따른 중량 콘크리트의 감쇠계수를 구하였다.

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\mu D) \quad (1)$$

2.3 콘크리트 압축강도 측정

콘크리트의 압축강도 측정을 위한 기본 시편은 KS F 2403 규격에 따라 직경 100 mm 길이 200 mm로 3개씩 제작하였다. 제작 후 1일 이후에 몰드를 제거하였으며, 이후

Table 3. Transmission rate, half-value layer and standard deviation for 662 keV γ -ray in different concrete mixing conditions

No.	Type		Transmission rate (%)	Half-value layer (cm)	Standard deviation (cpm)
	F.A	C.A			
1	Sand	Gravel	21.74	2.24	1.71
2	Sand	OSG	20.49	2.14	2.23
3	IOS	Gravel	17.82	1.99	1.62
4	IOS	OSS	16.74	1.93	3.30
5	OSS	OSG	15.93	1.86	3.62

20±1°C에서 수중 양생시켰다. 양생 이후에 1일, 3일, 7일, 28일의 일자에 맞추어 압축강도를 측정하였다. Fig. 3는 제작 직후의 콘크리트 샘플과 압축강도를 측정하는 실험 모습을 보여주는 사진이다. 콘크리트 압축강도 측정은 KS F 2405을 따라 진행하였으며, 압축강도 (σ_c)는 최대하중 (P)와 면적 (A)의 비로 다음의 식 (2)에 의해 산출하였다[12-14].

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \tag{2}$$



Fig. 3. (a) Preparation of concrete samples and (b) compressive strength measurement.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 방사선 차폐성능 측정 결과

콘크리트에 들어가는 중량골재의 변화와 두께 증가에 따른 감마선에 대한 투과율을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 콘크리트의 두께 증가에 따른 투과율이 감소하였으며, 각 골재별로 10 mm씩 두께가 증가할수록 6~9% 정도로 투과율이 감소하였다. 산화슬래그 잔 골재와 굵은 골재가 배합된 5번 시편의 경우 가장 낮은 투과율을 보여주었고, 가장 높은 투과율을 보여준 시편은 일반 잔 골재인 모래와 일반 굵은 골재인 자갈이 배합된 1번 시편이다. 콘크리트에 들어간 골재의 크기에 비해 시편의 크기가 크지 않아 골재의 불균일 분포에 따른 실험 오차가 생길 수 있다. 그런 결과로 산화 슬래그 잔골재와 자철광 잔골재가 함유된 시편이 30 mm일 때 철 부산물 잔골재와 산화 슬래그 굵은 골재가 함유된 시편 30 mm일 때 보다 투과율이 0.53% 더 낮은 값이 나왔다. 이는 방사선이 입사되어 지나가는 영역에 골재들이 비교적 많이

분포되어 있어 방사선 투과율이 낮게 나온 거라 판단된다.

Table 3에는 골재 종류별로 모든 두께에 대하여 662 keV 감마선에 해당하는 채널에서 측정하여 얻은 데이터를 바탕으로 투과율과 반가층을 도출하여 나타내었고, 측정에 있어서 표준편차도 함께 나타내었다. Table 3에서 일반골재를 사용한 경우 감마선의 투과율이 두께 50 mm에서 21.74% 였으나, 중량골재를 활용할 경우 동일한 두께에서 감마선의 투과율이 15.93%까지 떨어져 방사선 차폐효율이 향상된 것을 알 수 있다. 그리고 콘크리트에 들어가는 골재에 따라 방사선 차폐에 영향을 주고 있는 것을 알 수 있었다. 산화슬래그 잔 골재와 굵은 골재를 사용한 경우가 0.371 cm⁻¹로 가장 높은 감쇠계수를 보였다. 또한 입사된 감마선의 산란에 의한 영향을 비교분석하기 위하여 Table 4에는 두께 50 mm의 시편에 대해 골재종류별로 측정된 모든 에너지 영역에 해당하는 채널 들에서 측정된 값을 이용하여 투과율, 반가층 그리고 표준편차를 나타냈다. 전체 채널에 대하여 구한 투과율이 662 keV에 해당하는 채널 범위의 투과율보다 9~10% 높게 측정된

Table 4. Transmission rate, half-value layer and standard deviation of concrete with 50 mm for total channel

No.	Type		Transmission rate (%)	Half-value layer (cm)	Standard deviation (cpm)
	F.A	C.A			
1	Sand	Gravel	30.11	2.88	0.85
2	Sand	OSG	29.39	2.82	0.94
3	IOS	Gravel	28.15	2.73	1.03
4	IOS	OSS	26.82	1.58	
5	OSS	OSG	25.87	2.56	0.64

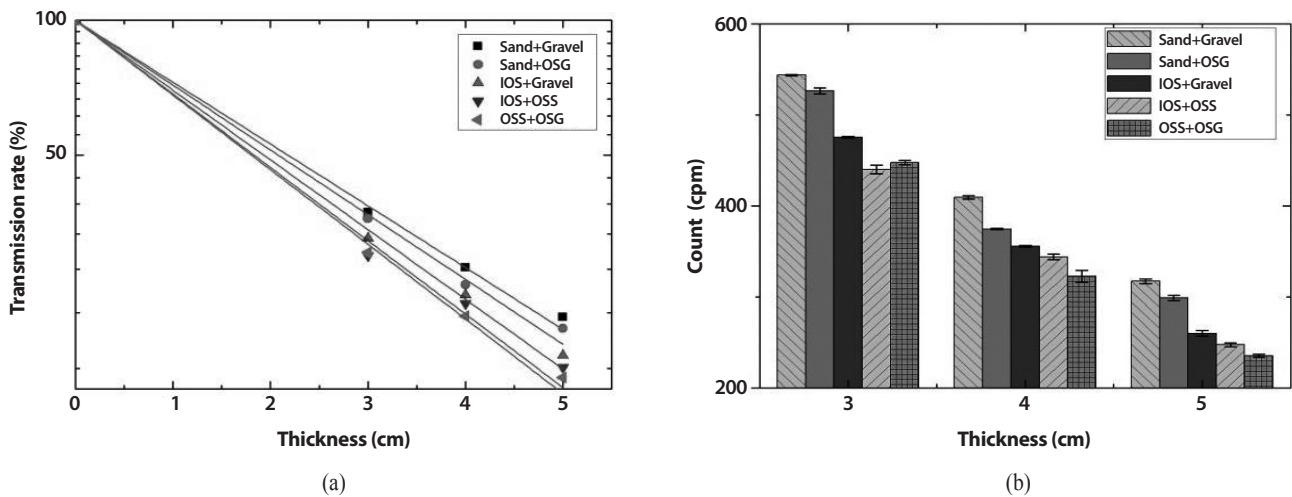


Fig. 4. Transmission rate of 662 keV γ -ray for concretes with different thicknesses and aggregates: (a) transmission rates with linear regression lines and (b) measured counts with standard deviations.

결과가 나왔다. 그리고 콘크리트들의 차폐 특성을 비교하기 위해 반가층을 계산한 결과 최대 0.7 cm정도 차이 나는 것을 Table 3과 4의 비교를 통해 확인할 수 있다. 이러한 차이는 Table 4에 나타낸 결과는 ^{137}Cs 에서 나오는 662 keV 감마선이 콘크리트를 투과하면서 산란 등을 통해 에너지가 변화한 경우를 포함하였기 때문이다.

Fig. 4에는 감마선 에너지 662 keV에 따른 시편 별 투과율 그래프와 측정 카운트 값 및 표준편차를 함께 나타내었다. 우선 Fig. 4 (a)에서는 세로축을 투과율에 대한 로그 스케일로 하고 가로축을 두께에 대한 선형 스케일로 하여 투과율 값을 바탕으로 선형회귀분석을 통해 감쇠계수를 도출하였다. 또한 Fig. 4 (b)에는 오차를 분석하기 위해 골재 종류별 및

두께별로 계측에 있어서 평균값과 표준편차를 그래프로 나타내었다. 각 시편별로 계측을 통해 측정된 값은 수백 cpm 수준이었는데 반복측정을 통한 이들의 표준편차는 1.62~3.62 cpm으로 비교적 낮은 값을 보임을 확인할 수 있다. 각 시편의 단위 중량과 감쇠계수를 함께 Fig. 5의 그래프로 나타내었다. Fig. 5를 보면, 단위중량 증가에 따라 감쇠계수도 함께 증가는 경향을 확인할 수 있다. 이는 중량 골재의 사용으로 콘크리트의 평균적인 밀도 증가와 중량 골재에 다량 함유하고 있는 금속 물질들로 인해 방사선 차폐 성능이 향상되었다. 흥미로운 점은 4번과 5번 시편을 비교하였을 경우 단위 중량이 각각 $3,175 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 와 $3,052 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 으로 5번 시편의 단위 중량이 다소 낮은 수치를 갖고 있지만 감쇠계수에서는

Table 5. Chemical property of high-weight aggregates

Type	Chemical composition (%)						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Etc.
Sand	5.75	86.17	0.02	0.47	0.54	0.18	6.87
Gravel	12.97	66.07	0.15	5.6	3.19	2.17	9.85
Oxidizing Slag Sand	4.04	26.21	0.11	28.43	33.14	7.86	0.21
Oxidizing Slag Gravel	7.71	23.97	0.57	31.69	27.83	8.01	0.22
Iron Ore Sand	5.39	12.97	0.24	6.28	45.57	23.26	0.19
Iron Ore Gravel	7.99	36.93	0.04	15.40	13.11	26.28	0.25

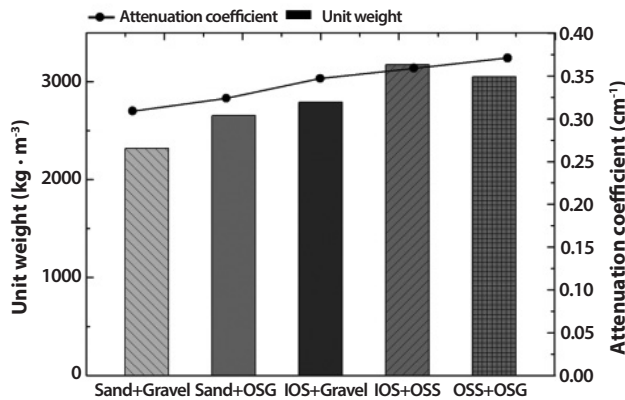


Fig. 5. Attenuation coefficient and unit weight for concretes with different aggregates.

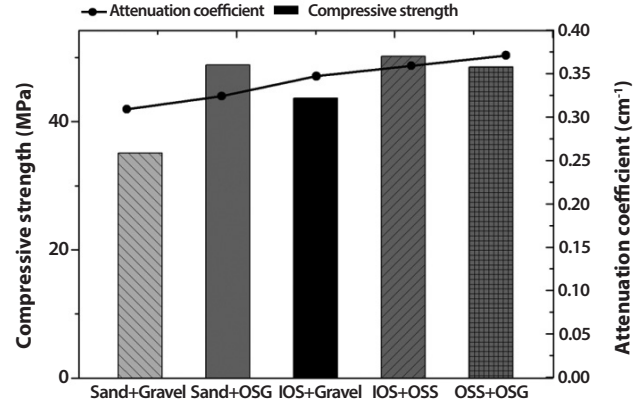


Fig. 6. Attenuation coefficient and compressive strength for concretes with different aggregates.

오히려 4 시편보다 높은 값을 가진다는 것이다. 이는 골재를 구성하고 있는 화학성분의 차이에 따른 영향으로 판단된다.

Table 5을 보면 골재 별 화학적 성분에 있어서 차이가 있음을 확인할 수 있다. 중량 골재는 여러 종류의 화학성분들이 산화물 형태로 함유하고 있다. 이 중 방사선 차폐에 큰 영향을 미치는 원소인 철이 산화물 형태의 Fe₂O₃로 다량 함유되어 있으며, 자철광 잔 골재에서 최대 45.57%로 모래의 0.54%나 자갈의 3.19%에 비해 훨씬 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 기본적으로 일반 골재와 비교해서 중량 골재는 방사선 차폐에 효과적일 것이라 판단된다. 이외의 성분으로 Al₂O₃, SiO₂, SO₃, CaO, MgO 등 기타 여러 산화물이 함유되어 있는데, 산화슬래그 잔 골재와 굵은 골재에서 CaO의 성분은 각각 28.43%와 31.69%로 자철광의 6.28%와

15.40%에 비해 훨씬 많은 양이 포함되어 있다. 반면에, MgO의 경우 자철광에서 함유량이 잔 골재와 굵은 골재에서 각각 23.26%와 26.28%로 산화슬래그의 7.86%와 8.01%에 비해 많은 양이 함유되어 있음을 Table 5에서 알 수 있다. 4번 시편은 자철광 잔 골재와 산화슬래그 잔 골재를 혼합하여 제작한 반면에, 5번 시편은 산화슬래그 잔 골재와 산화슬래그 굵은 골재를 배합한 조건이다. 따라서 5번 시편의 경우 4번 시편보다 상대적으로 Ca의 양은 많고 Mg의 양은 적은 중량 콘크리트이다. 따라서 원자번호가 상대적으로 높은 Ca를 많이 함유한 5번 시편이 4번 시편보다 상대적으로 낮은 단위중량에도 불구하고 우수한 감마선 차폐 특성을 보이고 있다. 따라서, 중량 콘크리트를 이용하여 감마선을 차폐하는 데 있어 콘크리트의 밀도도 중요하지만, 콘크리트 배합 시 들어가는

Table 6. Compressive strength with concrete mixing conditions

No.	Type		Compressive strength (MPa)			
	F.A	C.A	1 day	3day	7 day	28 day
1	Sand	Gravel	4.6	17.4	23.7	35.1
2	Sand	OSG	8.0	24.7	33.3	48.85
3	IOS	Gravel	14.1	27.0	34.5	43.7
4	IOS	OSS	13.7	33.5	45.3	50.2
5	OSS	OSG	9.8	25.5	38.1	48.5

골재의 화학성분도 감마선 차폐에 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.2 압축강도 측정 결과

방사선 차폐에 효과적이며 압축강도 또한 뛰어난 중량 콘크리트를 개발하기 위해 제작된 시편에 대한 KS 규격의 압축강도 실험도 진행하였다. 압축강도 실험은 1, 3, 7, 28일 수중 양생시킨 콘크리트에 대하여 진행하였고, 실험 결과를 Table 6에 나타내었다. Fig. 6에는 28일 기준으로 한 압축강도와 감쇠계수를 함께 나타내었다. 실험결과 중량 골재가 함유된 콘크리트가 일반 골재만 들어 있는 콘크리트보다 압축강도가 최대 45% 향상된 50.2 MPa로 측정되었다. 이는 중량 골재의 표면이 일반골재보다 거칠어 페이스트와 골재 사이의 부착력이 향상되면서 골재 입자 간의 결합력이 향상되어 압축강도가 증가한 것으로 분석된다[15]. 특히, 자철광이 함유된 콘크리트 시편이 양생 1일부터 압축강도가 14.1 MPa로 다른 시편들 보다 높은 값을 보여주고 있다. 이는 자철광이 페이스트와의 부착력이 다른 골재들보다 높은 특성이 있다는 것을 확인할 수 있는 실험 결과라고 판단된다. 따라서, 골재의 변화를 통해 콘크리트 강도도 제어할 수 있음을 확인하였다. 콘크리트의 압축강도는 골재의 화학성분과 보다는 골재의 표면 거칠기에 따른 페이스트와의 부착력으로 결정된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 일반적으로 수급이 가능한 중량 골재를

포함한 중량 콘크리트에 대해 정량적인 감쇠계수를 도출하였고, 콘크리트 배합 시 들어가는 골재의 화학성분이 방사선 차폐에 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 중량 골재의 이용으로 일반 골재를 사용한 콘크리트보다 압축강도가 최대 45% 향상될 수 있음을 확인하였다. 방사선 차폐 효과를 향상 시키기 위해서는 차폐체의 두께를 증가시키는 방법 이외에도 밀도가 높은 중량 골재를 이용하여 콘크리트를 배합해야 한다. 그러나 중량 골재의 큰 단점은 철 함유량이 일반 골재보다 높아 중성자선에 의한 방사화로 인해 방사성 폐기물이 추가로 발생한다는 것이다. 이러한 단점을 보완하기 위해 중량 콘크리트 배합 시 방사화를 시키는 중성자선을 차폐할 수 있는 붕소 또는 탄소 같은 중성자선 차폐에 효과적인 물질들을 함께 혼합하거나 방사화 우려가 없는 새로운 중량 골재를 개발하는 후속 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] Q.H. Hu, J.Q. Weng, and J.S. Wang, "Sources of Anthropogenic Radionuclides in the Environment: A Review", *J. Environmental Radioactivity*, 101(6), 426-437 (2010).

- [2] J.R. Choi, J.H. Yoon, H.Y. Kang, H.Y. Lee, and S.W. Chung, "Radiation Shielding Analysis of CANDU Spent Fuel Transport Cask", *J. Radiat. Protection and Res.*, 18(2), 27-35 (1993).
- [3] H.G. Byeon and J.B. Lee, "Construction of High Density Concrete for Radiation Shield", *Korea Concr. Inst.*, 6(6), 42-50 (1994).
- [4] H.S. Lim, H.S. Lee, and J.S. Choi, "Experimental Study on the Development of X-Ray Shielding Concrete Utilizing Electronic Arc Furnace Oxidizing Slag", *Architectural Inst. Korea*, 27(7), 125-132 (2011).
- [5] S. K. Yang, T. S. Um, J. R. Lee, Y. H. Kim, S. I. Wu, and T. B. Kim, "In-Site Application of Heavyweight Concrete for Radiation Shielding", *Proc. of Korea Concr. Instit. Conference*, 20(2), 577-580, November 7, 2008, Korea.
- [6] S. K. Yang, T. S. Um, J. R. Lee, Y. H. Kim, S. I. Wu, and T. B. Kim, "Properties of Heavyweight Concrete for Radiation Shielding", *Proc. of Korea Concr. Instit. Conference*, 20(2), 561-564, November 7, 2008, Korea.
- [7] C.Y. Boo, C.I Chang, and C.Y. Song, "A Study on the Radiation Shielding of Heavyweight Concrete using Magnetite aggregate", *Architectural Inst. Korea*, 14(3), 345-352 (1998).
- [8] M.H. Kharira, M. Takeyeddin, M. Alnassar, and S. Yousef, "Development of Special Radiation Shielding Concretes Using Natural Local Materials and Evaluation of Their Shielding Characteristics", *Prog. Nucl. Energy*, 50(1), 33-36 (2008).
- [9] W.J. Jeong, "A Study on Measurement of Mass Attenuation Coefficient of Gamma-Ray", *Dong-A Univ.*, (2000).
- [10] J.H. Hubbell, "Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 KeV to 20 MeV", *Int. J. Appl. Radiat. Isotop.*, 33(11), 1269-1290 (1982).
- [11] J.H. Hubbell and S. M. Seltzer, "Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetrist Interest", *Radiat. Phys. Division, PML, NIST* (1995).
- [12] Korean Industrial Standards. December 26 2005. "KS F 2405, Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete." Korean Standards Service Network. Accessed July 1 2016. Available from: http://www.kssn.net/StdKS/ks_detail.asp?k1=F&k2=2405&k3=5.
- [13] Korean Industrial Standards. November 28 2000. "KS F 2409, Standard Test Method for Unit Weight and Air Content of Fresh Concrete." Korean Standards Service Network. Accessed July 1 2016. Available from: http://www.kssn.net/StdKS/ks_detail.asp?k1=F&k2=2409&k3=7.
- [14] Korean Industrial Standards. October 30 2007. "KS F 2402, Method of Test for Slump of Concrete." Korean Standards Service Network. Accessed July 1 2016. Available from: http://www.kssn.net/StdKS/ks_detail.asp?k1=F&k2=2402&k3=5.
- [15] C.Y. Song, "A Study on the Radiation Shielding Properties of Heavy Weight Concrete Using Magnetite Aggregate", *Korea Concr. Inst.*, 10(2), 251-258 (1998).