

산업부산물 골재 종류에 따른 EMP차폐 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Development of EMP Shielding Concrete According to the Types of Aggregates of Industrial By-products

민태범^{1*}Tae-Beom Min^{1*}

(Received August 10, 2020 / Revised August 31, 2020 / Accepted September 2, 2020)

In this study, the stability and EMP shielding performance of metal-based industrial by-products aggregates with excellent conductivity and easy procurement to be used as concrete aggregates for EMP shielding are evaluated.

The industrial by-products are electronic-arc-furnace oxidizing slag, copper smelting slag, and ferro-moldibdenum. The composition analysis of aggregates and aggregate stability are evaluated. As a result of the experiment, ferro-moldibdenum is shown to have low stability as an aggregate due to its high Free-CaO. The remaining aggregates are evaluated to be safe to use as aggregates for concrete. In addition, industrial by-products aggregate-specimens excluding ferro-moldibdenum are shown higher compressive strength than the plain specimen. The recycle aggregates, electronic-arc-furnace oxidizing slag and copper smelting slag, are shown excellent EMP shielding performance, the EMP shielding performance is expected to increase if the average particle diameter of the aggregate is small or evenly distributed.

키워드 : 산업부산물, 골재, 콘크리트, EMP 차폐

Keywords : Recycled resources, Aggregate, Concrete, EMP shielding

1. 서론

현재 대한민국은 세계유일의 분단국가이며 상대국은 핵무기를 보유중인 것으로 보고되고 있다. 북한은 2006년 1차 핵실험을 시작한 이후 현재까지 총 5차례 이상의 핵실험을 실시하였으며 이러한 국가 안보적 문제는 전 세계적으로 주목되고 있다(Chun 2016). 일반적인 핵무기는 공중에서 폭발하며 피해요인으로는 열, 폭발, 방사능이지만 최근 북한에서 개발 중인 핵무기는 변형된 핵무기로써 고고도 전자기파(High-altitude Electromagnetic Pulse: HEMP)를 발생 시킨다. 이는 EMP(Electro Magnetic Pulse) 공격을 통한 전력망, 통신망, 전자장비등 국가기반 시설들의 마비를 시킬 목적으로 예측되고 있다(Lee 2013).

이에 대비하고자 국가중요 시설물은 EMP 차폐시설을 구축하고 있거나 구축 중에 있다. 기존 차폐시설은 Fig. 1과 같이 구조물 내부

에 밀폐된 도체의 격실로 구성하고 있으며(Kim 2013) 이 중 차폐판의 경우 도전성이 우수한 금속판을 사용하여 가공 후 조립이나 용접을 통해 결합하고 있는 실정 이다(Kim 2013; Chung 2001). 그러나 이와 같은 방법은 시공 비용이 높아 경제성이 낮으며 가공의 어려움과 용접 및 볼트 체결 부위에서 EMP의 유입가능성 문제점을 가지고 있다(Chen et al. 2004; Dai et al. 2010). 따라서 이를 해결하기 위한 추가 연구가 필요한 실정이나 차폐공법이나 차폐재 개발을 위한 연구는 아직까지 부족한 실정이다.

국외 건설 분야의 전자파 차폐 관련 연구는 주로 카본계 물질(Carbon fiber, Graphite 등)과 반사성이 큰 금속계 물질(Metal fiber, Metal powder, Silver 등)을 사용하여 그 특성을 실험적으로 검증한 바 있다(Xu and Hao 2014; Dou et al. 2007). 그러나 이와 같은 연구는 고가의 신소재를 사용한 연구임으로 상용화 측면에서 무리가 있는 것으로 판단된다. 또한 콘크리트부재에 대한 실험이

* Corresponding author E-mail: tbmin@sscem.com

¹성신양회(주) 기술연구소 연구원(R & D Center, Sungshin Cement, Bugang-Myun, Sejong Special Self-Governing City 30074, Korea)

아니라 모르타르에 적용한 연구임으로 실제 콘크리트 구조물에 적용하기에는 어려움이 있을 것으로 판단된다.

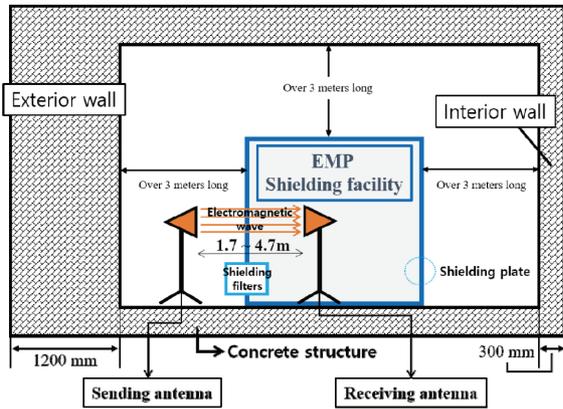


Fig. 1. Concept of existing EMP shielding room

이에 본 연구에서는 서론에서 언급한 문제점들을 해결하고자 도전성이 우수하고 조달이 쉬운 금속계열 산업부산물을 EMP차폐용 콘크리트 골재로 사용하기 위해 골재의 안정성 평가 및 EMP차폐 성능평가를 실시하였다. 이를 통하여 EMP차폐 건축구조물 구축시 구조체 자체로서 EMP차폐성능을 발현하는 콘크리트를 개발하기 위한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험개요 및 방법

2.1 실험개요

EMP 차폐는 일반적으로 반사손실, 투과손실, 다중반사 손실의 세 가지 원리에 의해 이루어진다. 첫 번째로 재료의 표면 공기층에서 전파가 통과하는 차폐재의 임피던스 차이에 의하여 발생하는 반사손실이며, 두 번째는 주로 탄소계 또는 자성계 재료를 대상

로 전자파가 차폐재를 통과하면서 저항성 손실에 의해 열로 변환되어 손실되는 흡수손실이 있다. 세 번째는 차폐재 내부로의 재반사와 EMP 산란 등에 의해 투과하지 못하고 전도성 재료를 타고 다른 방향으로 발생하는 다중반사 손실이 있다. 이 세 가지 손실중 가장 효과 적인 것은 세 번째 다중반사 손실이며 이는 재료내 전도성 물질의 함량이 증가 할수록 EMP 차폐 효과는 증가한다(Jin et al, 2014; Kim and Yi 2015; Choi et al, 2019). 또한 EMP 차폐에서 사용하는 ‘dB’의 단위를 사용하며 차폐성능을 나타내는 지표로 사용된다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 재료 중 가장 많은 비율을 차지하는 골재를 대상으로 EMP 차폐 재료를 선정하였으며 산업부산물 중 Fe성분을 많이 포함하고 있는 전기로산화슬래그(EOS)와 동재련 슬래그(CSS), 페로몰디브덴(FM)을 EMP차폐 골재로서 사용가능 여부를 평가하고자 하였다. 비교실험은 일반 골재를 비교대상으로 하였다.

Table 1은 실험 항목 및 실험 규격을 나타낸 표이다. 실험 항목은 실험에 사용한 산업부산물 골재에 대해 성분분석, 골재안정성 평가, Free-CaO분석을 실시하였으며 콘크리트 골재로 사용하여 콘크리트의 기본 물성 성능평가, EMP 차폐율 평가를 실시하였다.

Table 1. Experimental items

Item	Experiment	Standard method
Component analysis and safety evaluation	XRF	-
	Safety evaluation	KS F 2507
	Free-CaO	ASTM STP 985
Analysis of physical properties	Flow Test	KS F 2402
	Air content test	KS F 2449
	Compressive strength	KS F 2405
EMP shielding performance evaluation	Emp shielding test	MIL-STD-188-125-1

Table 2. Classification and Standards of Cement

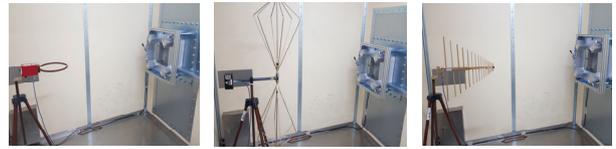
Specimen	W/C (%)	S/a (%)	W	C	S	G	EOSS	EOSG	CSS	FMS	FMG	AD (%)
Plain	31	46.0	167	539	750	897	-	-	-	-	-	1.2
EOS				539	-	-	1128	1324	-	-	-	
CSS				539	-	897	-	-	1096	-	-	
FM				539	-	-	-	-	-	837	983	
EOSG/CSS				539	-	-	-	1324	1094	-	-	

(Source) W: Water, C: Cement, S: Sand, G: Coarse Aggregate, EOSS: Electric Arc Furnace Oxidized Slag Sand, EOSG: Electric Arc Furnace Oxidized Slag Aggregate, CSS: copper slag sand, FMS: Ferro Molybdenum Sand, FMG: Ferro Molybdenum Aggregate

Table 2는 본 실험에서 사용한 콘크리트 배합을 나타낸 것이다. 콘크리트배합은 일반 Plain배합에서 골재만 산업부산물 골재로 치환하는 방식으로 골재종류에 따른 콘크리트의 성능평가를 하고자 하였다. 또한 산업부산물 골재중 동제련 슬래그는 5mm이상의 크기가 발생 또는 생산되지 않음으로 잔골재로만 사용하였으며 일반 쇄석 굵은골재와 혼합하여 콘크리트 배합설계를 하였다. 물리적 특성 목표치로는 고강도 콘크리트 물성을 기준으로 $220\pm 20\text{mm}$, 공기량 $3.0\pm 1\%$ 로 하였다. Plain 배합은 25-50-220으로 고강도 배합으로 설정하였다.

2.2 실험방법

실험방법은 앞서 설명한 바와 같이 4가지로 설정하였으며 산업 부산물의 성분분석은 XRF장비를 활용하여 성분 분석을 하였으며 및 안정성 평가는 KS F 2507에 의하여 무수황산나트륨(Na_2SO_4)를 사용하여 실시하였으며 Free-CaO 함량분석 실험방법은 ASTM STP 985에 따라 Ethylene glycol, Brom cresol green, N/10-HCl 용액을 사용하여 실시하였다. 또한 콘크리트의 기본 물성측정은 유동성 평가, 공기량 측정, 압축강도 측정을 실시하였으며 실험은 KS기준에 따라 실시하였다. EMP 차폐율 평가는 콘크리트내 수분이 EMP 차폐에 영향을 미치기 때문에 최대한 콘크리트



a) LOOP antenna a) Bi-Conical antenna a) Log periodic antenna

Fig. 3. EMP Shield test equipment layout conceptual diagram

내 수분을 제거하기 위해 재령28일이 경과한 실험체를 60°C 의 건조기에서 7일간 건조 후 미군 시방서 MIL-STD-188-125-1의 실험 방법을 준용하여 실시하였다. Fig. 2는 EMP차폐 시험기기 배치개념도를 나타낸 것이며 Fig. 3은 측정주파수에 따른 안테나를 나타낸 것이다. EMP차폐 측정시 주파수에 따라 교체해서 사용해야 한다. 이는 안테나의 측정 범위 주파수가 있기 때문이다. 주로 3가지의 안테나를 사용하며 LOOP 안테나의 경우 10kHz~20MHz 까지 측정하며 Bi-Conical 안테나의 측정 범위는20MHz~300MHz이다. 또한 Log Periodic 안테나는 300MHz~2GHz까지의 범위로 측정한다.

3. 시험결과 및 고찰

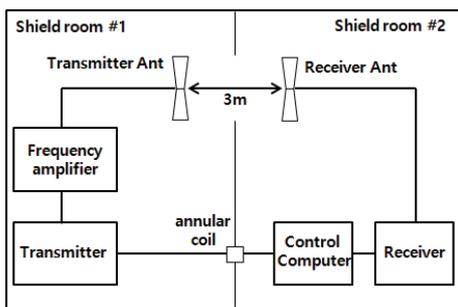
3.1 산업부산물의 성분 및 골재 안정도 평가

본 연구에서 사용한 전기로산화슬래그, 동제련슬래그, 페로몰리브덴 슬래그를 산업부산물을 골재로 사용하기 전 성분 분석 및 안정성 평가를 진행하였다.

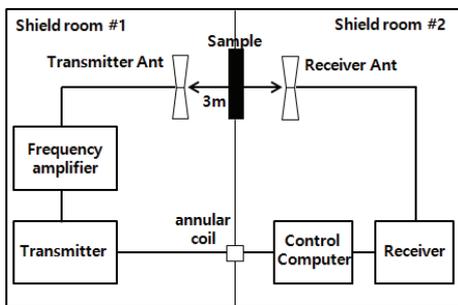
골재의 성분분석은 Fe_2O_3 함량에 따라 차폐율이 상이함으로 Fe_2O_3 함량 위주로 성분 분석을 실시하였으며 분석결과는 Table 3과 같다.

분석결과 동제련 슬래그(CSS)의 Fe_2O_3 함량이 51.05%로 가장 높았으며 전기로산화 슬래그(EOS)는 34.63%로 나타났다. 그러나 페로몰리브덴 슬래그(FM)는 11.88%의 Fe함량이 비교적 낮게 나타났다. 따라서 성분 분석을 통한 EMP 차폐율을 예측하면 동제련 슬래그 골재가 EMP차폐성능이 우수할 것으로 사료된다.

Table 4는 골재 안정성 실험결과를 나타낸 것이며 5회에 걸쳐



a) Reference Measurement Diagram



b) Sample Shielding Measured Configuration

Fig. 2. EMP shield tester layout concept

Table 3. Chemical composition of industrial by-product aggregates

Specimen	Chemical composition(wt.%)						
	lg-Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
EOS	2.71	17.08	13.19	34.63	21.44	4.84	0
CSS	2.84	32.76	3.14	51.05	3.25	3.11	0.77
FM	3.14	45.08	11.03	11.88	22.31	3.18	0

Table 4. Evaluation result of stability of industrial by-product aggregate

Specimen	Stability of aggregates(%)					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	Average
Coarse aggregate	3.4	3.5	3.6	3.5	3.5	3.5
sand	5.0	4.7	4.7	4.7	4.9	4.8
EOS	12.2	11.4	11.7	11.6	11.9	11.9
CSS	5.4	5.1	5.1	5.0	5.4	5.2
FM	5.5	5.1	5.1	5.1	4.9	5.0

Table 5. Free-CaO analysis of industrial by-product aggregate

Specimen	Free-CaO(%)
ESO	0.13
CSS	0.14
FM	1.12

평균값을 나타내었다. 또한 비교대상이 필요함으로 일반 굵은골재와 일반 잔골재의 안정성 또한 동일한 조건으로 실험하여 결과를 나타내었다. 실험결과 전기로 산화슬래그 골재는 KS F 2526의 굵은골재 안정성 기준인 12% 범위에는 만족하는 것으로 나타났으나 그러나 잔골재의 안정성 기준인 10% 이하에는 만족하지 못하는 것으로 나타나 EMP차폐 콘크리트 제조시 전기로 산화슬래그를 굵은골재와 잔골재를 모두 사용하는 것은 부적절할 것으로 사료된다. 따라서 전기로 산화슬래그를 EMP차폐 콘크리트 골재로 사용하기 위해서는 굵은골재로만 사용하여야 하며 잔골재는 동제련슬래그등을 복합적으로 사용하여야 할 것으로 판단되며 전기로 산화슬래그를 잔골재로의 사용을 위해 Again 기간에 따른 골재 안정성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 5는 산업부산물 골재의 Free-CaO 함량분석 결과를 나타낸 것이다. Free-CaO 함량 분석 결과 페로몰디브덴(FM)의 Free-CaO함량이 가장 많았으며 전기로 산화슬래그(EOS)와 동제련슬래그(CSS)의 Free-CaO의 함량은 극소량으로 나타났다.

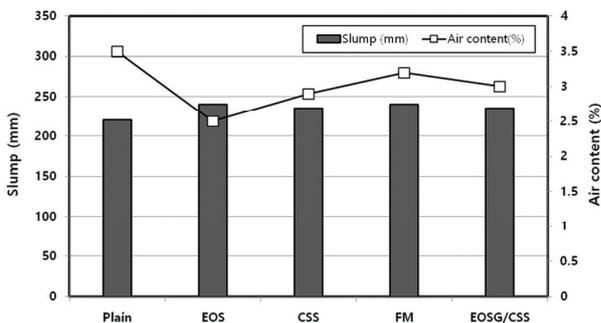


Fig. 4. Result of experiment on slump test and air content

Free-CaO 함량이 높으면 골재의 팽창으로 인해 균열을 야기시킬 수 있다. 하지만 전기로 산화슬래그(EOS)와 동제련슬래그(DJ)는 Free-CaO함량이 극소량임으로 팽창에 의한 균열은 없을 것으로 판단된다. 하지만 페로몰디브덴(FM)의 경우 1%가 넘는 결과를 나타내었다. Free-CaO 함량이 1%이상일 경우 팽창에 의한 균열이 발생할 수는 있지만 현재까지는 명확한 기준은 없다. 따라서 Free-CaO함량과 팽창균열과의 상관관계를 분석하기 위해서는 추후 길이변화시험, 건조수축시험등과 같은 비교 분석 연구가 필요하다.

3.2 콘크리트의 물리적 성능평가 결과

Fig. 4는 유동성 및 공기량측정 결과를 나타낸 그림이다. 유동성 측정 결과 산업부산물 골재를 사용한 콘크리트의 유동성은 Plain 실험체 비하여 소량 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전기로 산화슬래그 골재, 동제련슬래그 골재, 페로몰디브덴 골재의 경우 흡수율이 낮고 밀도는 높기 때문에 골재 자중에 의한 슬럼프 형상의 붕괴 및 콘크리트 배합수의 흡착이 세척사에 비해 상대적으로 작기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 공기량 실험결과 산업부산물 골재를 사용한 콘크리트는 Plain의 비에 공기량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 산업부산물 잔골재의 제조공정이 부순 모래의 제조공정과 흡사한 파쇄·분쇄 및 분급공정에 의해 제조되기 때문에 공기량이 감소되는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 콘크리트의 압축강도 결과를 나타낸 그림이다. 산업부산물 종류에 따른 압축강도 측정결과 페로몰디브덴을 사용한 실험체는 배합설계 강도기준에 만족하지 않았으며 페로몰디브덴 제외한 실험체는 배합설계 강도기준에 만족하는 것으로 나타났다. 이는 페로몰디브덴 골재의 강도가 시멘트 페이스트 경화체의 강도보다 낮기 때문에 골재에서 먼저 파단이 발생하여 압축강도가 낮게 발현되는 것으로 사료된다. 그러나 페로몰디브덴 골재를 제외한

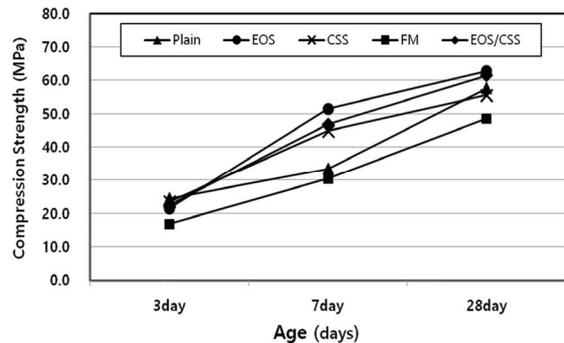


Fig. 5. Result of compressive strength

실험체는 Plain 실험체와 압축강도를 비교 하였을시 유사한 압축 강도를 나타내었으며 전기로산화슬래그 골재를 사용한 실험체는 일반 Plain시험체 보다 높은 강도를 나타냈다. 이는 전기로 산화슬래그의 잔골재는 골재의 입형이 부순모래의 특성을 가지고 있음으로 인해 골재의 부착강도 증진 효과이외에도 골재 밀도가 세척사에 비해 높기 때문에 Plain보다 압축강도가 높게 발현되는 것으로 사료된다. 또한 전기로 산화슬래그 굵은골재의 입형이 다공성에 의해 굵은골재와 시멘트 페이스트의 부착면이 거칠어짐에 따라 강도 증진 효과가 나타나는 것으로 사료된다.

3.3 EMP 차폐 성능 평가 결과

Fig. 6은 미군 시방서 MIL-STD-188-125-1의 실험방법을 준용하여 0.4GHz~2.0GHz 주파수 영역범위에서 산업부산물 골재의 종류에 따른 주파수 영역별 차폐성능 결과를 나타낸 그림이다. 차폐성능 실험결과 0.4GHz범위에서 가장 낮은 차폐율을 나타냈으며 1.6GHz 범위에서는 가장 높은 차폐성능을 나타냈다. 실험체 별로 차폐성능을 비교해 보았을시 Plain실험체와 페로몰리브덴을 골재로 사용한 실험체 FM은 차폐효과가 없는 것으로 나타났다. 이는 Plain 과 FM은 전자파를 차폐시킬 골재 내부의 Fe_2O_3 의 성분이 부족하여 차폐효과 미비하였기 때문에 주파수에 따른 변화가 없는 것으로 판단된다. 전기로산화슬래그 골재를 시험체 EOS와 전기로산화슬래그 굵은골재와 동제련슬래그 잔골재를 복합적으로 사용한 EOSG/CSS 시험체는 주파수 세기에 따라 차폐율이 변화하는 것으로 나타났다. 이는 주파수 세기에 따라 전자기 스펙트럼이 Fe_2O_3 의 함량에 따라 변화하기 때문에 차폐성능이 변화되는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 골재의 종류에 따른 0.4GHz~2.0GHz 주파수 영역범

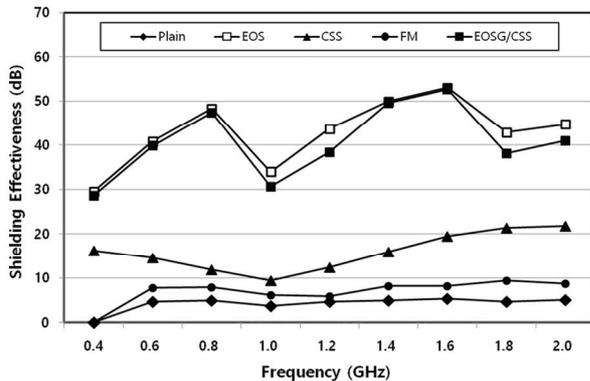


Fig. 6. EMP shielding performance test results by frequency domain

위에서 평균 차폐성능을 나타낸 그림이다. 차폐성능 평가 결과 전기로 Plain실험체는 차폐성능이 매우 낮았으며 페로몰리브덴 슬래그를 골재로 사용한 실험체 FM은 Plain보다는 차폐 성능은 높았지만 낮은 차폐성능을 나타냈다. 이는 페로몰리브덴의 Fe_2O_3 의 함량이 전기로산화슬래그나 동제련슬래그에 비해 낮았음으로 차폐효과가 미비한 것으로 판단된다. 또한 동제련슬래그를 잔골재로 사용한 CSS의 실험체는 10dB이상의 차폐성능을 나타내었다. 동제련슬래그가 50%이상의 Fe_2O_3 성분을 가지고 있음에도 차폐율이 낮은 이유는 CSS실험체는 잔골재는 동제련슬래그를 사용하였으나 굵은골재는 일반 파쇄석을 사용하였기 때문에 차폐성능이 낮게 나타난 것으로 사료된다. 또한 전기로산화슬래그를 골재로 100% 사용한 EOS 실험체는 42dB의 차폐성능을 나타내었으며 전기로 산화슬래그를 굵은골재로 동제련슬래그를 잔골재로 사용한 EOS/CSS 실험체 또한 41dB의 차폐성능을 나타냈다. 또한 전기로 산화슬래그를 잔골재와 굵은골재로 사용한 EOS와 전기로 산화슬래그를 굵은골재로 동제련슬래그를 잔골재로 사용한 EOS/CSS의 차폐성능을 비교하였을 경우 전체 Fe함량이 높은 JGDJ실험체가 JG실험체보다 낮은 차폐성능을 나타내었다. 이는 전기로산화슬래그 잔골재는 평균입경이 1mm이하 이고 동제련슬래그의 잔골재의 평균입경은 5mm임으로 동제련슬래그를 잔골재로 사용하여 실험체로 제작시 동제련 슬래그의 골재 입도분포가 좋지 않아 잔골재가 치밀하게 분포되지 않았고 이에 따라 골재와 골재사이로 전자기 스펙트럼이 투과 되었을 곳으로 사료된다.

산업부산물 골재의 종류에 따른 EMP차폐 실험결과 차폐성능이 높은 산업부산물 골재는 전기로산화슬래그와 동제련슬래그 이며 골재의 평균입경이 작거나 균일하게 분포되면 차폐성능은 증가할 것으로 사료된다.

본 연구는 산업부산물 골재중 차폐율이 가장 좋은 골재를 선정

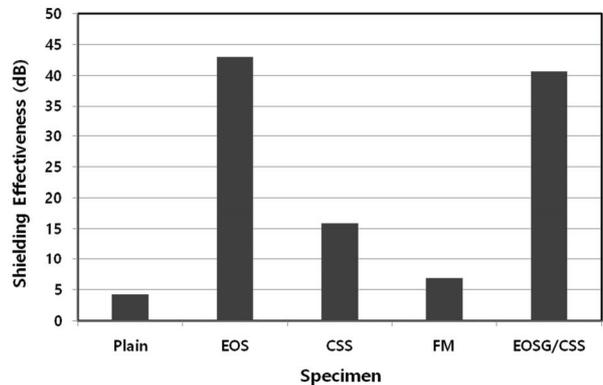


Fig. 7. Average EMP shielding performance

하는 기초적인 연구였으며 추후 연구에서는 차폐율이 가장 좋은 전기로 산화슬래그를 이용하여 두께에 따른(100mm~300mm) EMP 차폐성능 평가와 Test-Bad를 통하여 실물크기의 콘크리트의 차폐 콘크리트 개발 및 평가가 이루어 져야 할 것이다.

4. 결론

산업부산물 골재를 사용하여 EMP차폐콘크리트 개발을 위해 기초적인 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 산업부산물 골재의 Fe₂O₃ 함량 분석결과 동제련슬래그의 Fe₂O₃ 함량이 51%로 가장 높았으며 다음으로는 전기로산화슬래그가 34%로 높았다.
2. 산업부산물 골재의 안정성 평가결과 전기로 산화슬래그 잔골재는 안정성기준에 적합하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 전기로 산화슬래그를 EMP차폐 콘크리트 골재로 사용하기 위해서는 굵은골재로만 사용하여야 하며 잔골재는 동제련 슬래그등을 복합적으로 사용하여야 할 것으로 판단된다. 추후 전기로 산화슬래그를 잔골재로의 사용을 위해서는 Again 기간에 따른 골재 안정성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
3. EMP 차폐성능이 높은 산업부산물 골재는 전기로산화슬래그와 동제련슬래그 이며 골재의 평균입경이 작거나 균일하게 분포되면 차폐성능은 증가할 것으로 사료되며 산업부산물 골재의 성분중 Fe₂O₃함량이 높을수록 EMP 차폐의 성능이 증가하는 것으로 나타났다.
4. EMP 차폐율 효과가 가장 좋은 골재는 동제련슬래그 이나 동제련슬래그는 굵은골재로의 크기로는 발생되지 않기 때문에 실용화 측면에서는 전기로 산화슬래그 사용이 적합한 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None

감사의 글

본 논문은 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호: 20SCIP-B146649-03)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Chen, B., Wu, K., Yao, W. (2004). Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites, *Cement and Concrete Composites*, **26(4)**, 291–297.
- Choi, H.J., Park, J.H., Min, T.B., Jang, H.O., Lee, H.S. (2019). An experimental study on the evaluation of EMP shielding performance of concrete applied with ATMSM using Zn-Al alloy wire, *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, **19(3)**, 209–218.
- Chun, C.S. (2016). North Korean nuclear crisis after the fifth nuclear test and South Korea's future strategy, *The Journal of Strategic Studies*, **23(3)**, 7–38 [in Korean].
- Chung, D.D.L. (2001). Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials, *Carbon*, **39(2)**, 279–285.
- Dai, Y., Sun, M., Liu, C., Li, Z. (2010). Electromagnetic Wave Absorbing Characteristics of Carbon Black Cement-based Composites, **32(7)**, 508–513.
- Dou, Z., Wu, G., Huang, X., Sun, D., Jiang, L. (2007). Electromagnetic shielding effectiveness of aluminum ally-fly ash composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **38(1)**, 186–191.
- Jin, L., Haiyan, Z., Ping, L., Xijiang, Y., Guoxun, Z. (2014). The electromagnetic shielding effectiveness of a low-cost and transparent stainless steel fiber/silicone resin composite, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **56(2)**, 328–334.
- Kim, H.G., Lee, H.K. (2008). Development of electromagnetic wave absorbing/Shielding construction materials, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **20(6)**, 70–74 [in Korean].
- Kim, H.S. (2013). Reality and developmental methods of EMP threats, *Defense & Technology*, **414**, 98–103.
- Kim, Y.J., Yi, C.K. (2015). The UHF wave shielding effectiveness of mortar with conductive inclusions, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **31(4)**, 103–110 [in Korean].
- Lee, W.G. (2013). EMP protecting measurements and required technology, *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, **24(1)**, 79–96 [in Korean].
- Xu, Z., Hao, H. (2014). Electromagnetic interference shielding effectiveness of aluminum foams with different porosity, *Journal of Alloys and Compounds*, **617(25)**, 207–213.

산업부산물 골재 종류에 따른 EMP차폐 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구

본 연구에서는 도전성이 우수하고 조달이 쉬운 금속계열 산업부산물을 EMP차폐용 콘크리트 골재로 사용하기 위해 골재의 안정성 평가 및 EMP차폐 성능평가를 실시하였다. 산업부산물 골재는 전기로산화슬래그, 동제련슬래그, 페로몰디브덴을 선정하여 사용하였으며 골재의 성분 분석과 골재안정성 평가를 실시하였다. 또한 산업부산물 골재를 콘크리트 골재로 사용하여 기본 물성 평가 및 EMP 차폐 성능 평가를 실시하였다. 실험 결과 산업부산물 골재중 페로몰리브덴은 Free-CaO가 높아 골재로서의 안정성이 낮게 나타났으며 나머지 골재들은 콘크리트용 골재로 사용하기에 무방한 것으로 평가 되었다. 또한 압축강도 실험 결과 페로몰디브덴을 제외한 산업부산물 골재를 제외한 실험체는 Plain 실험체 보다 높은 압축강도를 발현하였다. EMP차폐 성능 평가 결과 EMP 차폐성능이 높은 산업부산물 골재는 전기로산화슬래그, 동제련슬래그 이며 골재의 평균입경이 작거나 균일하게 분포되면 차폐성능은 증가할 것으로 사료된다.