

카본계 재료 및 산업부산물을 활용한 EMP 차폐 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Development of EMP Shielding Concrete Using Carbon-Based Materials and Industrial By-Products

김민성¹ · 윤철현² · 변승호³ · 민태범^{4*}

Min-Sung Kim¹ · Cheol-Hyun Yoon² · Seung-Ho Byun³ · Tae-Beom Min^{4*}

(Received January 16, 2023 / Revised January 26, 2023 / Accepted January 27, 2023)

In this research, The basic physical properties and EMP shielding performance by thickness were evaluated for optimum composition of EMP shield concrete that can be applied on-site by mixing carbon-based materials with high conductivity into concrete that uses electric furnace oxidized slag (EOS). As a result of the evaluation, it was confirmed that the slump decreased as the amount of mixed carbon fiber (CF) increased, and increased when milled carbon (MCF) was mixed. As for the compressive strength, it was confirmed that EOS enhanced the strength compared to NA, and it was confirmed that the strength decreased when CF and MCF were mixed. As the thickness of the EMP shielding measurement increases, the shielding rate increases, and it was confirmed that the type of conductive material and the thickness of the test specimen have a greater influence on the shielding rate than the Amount of conductive material added. As a result of a comparative evaluation, EOS CF 0.2 is considered suitable for EMP shield concrete formulation.

키워드 : EMP차폐, 전기로산화슬래그, 카본섬유, 밀드카본섬유

Keywords : EMP shielding, Electric furnace oxidized slag, Carbon fiber, Milled carbon fiber

1. 서론

현재 대한민국은 북한과 휴전중인 분단국가로 군사적 대치상황에서 핵무기에 위협을 받고있는 상황이며, 북한은 2006년 1차 핵실험 이후 5차례 이상 핵실험을 실시한 것으로 보고되고 있다(Chun 2016). 또한 2017 ~ 18년 사이 '핵무력 완성'을 선언하였으며 2017년 6차 핵실험에서 50 ~ 250 kt 급 폭발력의 실험을 성공했다고 보고되고 있다(Gu and Park 2022). 2022년에 들어서 탄도미사일을 비롯한 미사일 시험발사를 30여회 이상 감행하였으며 실존적으로 핵무기 고도화 및 핵전략에 대한 대응이 매우 필요한 실정이다(Suh and An 2022).

핵무기의 경우 일반적으로 폭발에 의한 열, 폭발, 방사능이 주피해 요인으로 작용하지만 1950년대 미국의 핵폭발 시험에서 폭발시 발생하는 고출력의 전자기파(Electro Magnetic Pulse, 이하 EMP)에 의해 전자기기가 파괴되는 것이 확인되었다(Shurenkove and

Pershenkov 2016). 이를 통해 핵폭발을 통한 NEMP(Nuclear-EMP), 40 km 이상의 고고도 핵폭발인 HEMP(High-altitude EMP) 및 전자폭탄을 사용한 EMP 공격은 전자기기, 통신 및 전력망을 마비시켜 IT기반의 사회인프라를 무력화하며 2차적으로 인명피해를 유발한다고 보고되고 있다(Guan et al. 2006; Kim and Lee 2008; Lee 2013).

EMP 공격의 위협이 인식되면서 대응하기 위한 EMP 방호시설의 중요성이 부각되었으며, 2013년 'EMP 방호시설 개념정립 및 구축계획'을 수립하였다. 2051년까지 군사시설 중요도, 작전성 순위, 지휘통신체계 요소 등을 고려하여 55개소를 선정해 EMP 방호 적용을 목표로 하고 있다. 그러나 EMP 방호시설은 Fig. 1과 같이 외부 구조물 내부에 도전성이 우수한 금속 패널을 활용하여 밀폐형 차폐실을 제작하는 공법이 주를 이루고 있으며, 이는 건축시 시공비용이 높고 내부공간의 활용도가 저하되는 문제점을 가지고 있다. 패널 방식을 보완하고자 금속용사 및 고분자 합성물을 벽체에 분사하여 코팅하는 기술들이

* Corresponding author E-mail: tbmin@ark.re.kr

¹성신양회(주) 기술연구소 연구원 (R&D Center, Sungshin Cement, Bugang-Myeon, Sejong, 30074, Korea)

²성신양회(주) 기술연구소 수석연구원 (R&D Center, Sungshin Cement, Bugang-Myeon, Sejong, 30074, Korea)

³성신양회(주) 기술연구소 연구소장 (R&D Center, Sungshin Cement, Bugang-Myeon, Sejong, 30074, Korea)

⁴한국골재산업연구원 책임연구원 (Korea Aggregates Research Institute, Songpa-Gu, Seoul, 05621, Korea)

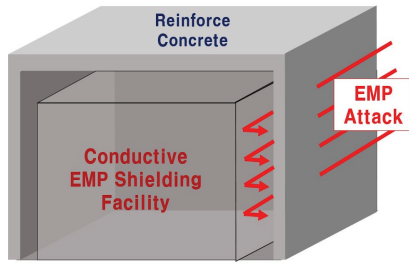


Fig. 1. EMP shielding room schematic

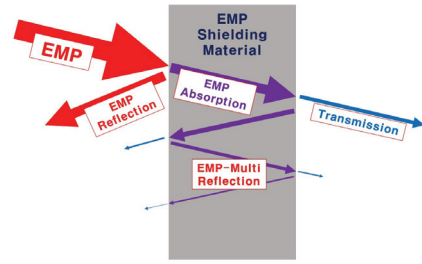


Fig. 2. EMP shield mechanism

개발되고 있으며, 코팅된 재료들의 연결성이 일정하지 않아 균일한 품질의 방호능을 확보하는데 어려움을 겪고 있다. 때문에 현재 EMP 방호를 필요로 하는 금융, 통신, 전력 등의 민간분야에 적용을 하지 못하고 있는 실정이다(Seo et al. 2014; Jung et al. 2020).

현재 EMP 차폐에 관한 연구동향은 차폐성능(Shielding Effectiveness, 이하 SE)을 향상시키는 물질개발로 도전성이 높은 탄소복합체(Carbon Fiber, Graphite 및 Graphene 등)와 EMP 반사손실을 유발하는 금속성 물질(Metal Fiber, Cu, Ni 등)의 재료가 주를 이루고 있으며 단일재료보다 두가지 이상의 재료를 활용하는 것이 SE를 향상시킨다고 알려져 있다(Kim and Yi 2015; Choi et al. 2019; Ozturk and Chung 2021). EMP 차폐 시멘트 복합체는 시멘트계 물질에 전도성 재료를 혼입할 시 EMP 다중반사에 의한 SE와 시멘트계 재료의 파동 흡수손실에 의한 SE 증진효과를 확인하는 연구들이 주를 이루고 있다(Li et al. 2022; Yan et al. 2022). 그러나 시멘트 복합체 연구들은 대다수 페이스트와 모르타르 수준에서 진행되고 있으며 실제 구조물에 적용하기 위해 콘크리트에 관한 연구가 필요불가결하다.

따라서 본 연구에서는 금속성 산업부산물이 전기로산화슬래그(Electric furnace oxidized slag, 이하 EOS) 골재의 EMP 차폐 콘크리트 개발 가능성을 확인한 Min and Cho(2021)의 연구를 바탕으로 도전성이 높은 카본계 재료 혼입시의 기초적인 물성과 SE 증진 특성을 복합적으로 평가하여, 현장적용이 가능한 EMP 차폐 콘크리트의 최적배합을 도출하고자 하였다.

2. 실험개요 및 방법

2.1 실험개요

EMP 차폐 콘크리트 개발을 위한 일반적인 EMP 차폐원리는 Fig. 2와 같이 세가지로 반사손실(EMP가 재료의 임피던스 차이에 의해 반사), 흡수손실(카본계, 자성계 재료를 대상으로 EMP가 통과되며 저항에 의해 흡수), 다중반사손실(차폐재 내부로 EMP가 반사 및

산란)이 있으며, 도전성 물질의 혼입량이 증가할수록 차폐효과는 증가한다고 보고되고 있다(Kim and Yi 2015; Choi et al. 2019).

본 연구에서는 일반 골재(Normal Aggregates, 이하 NA)와 EOS 골재 콘크리트에 카본계 재료를 혼입하여 구조체 적용 가능한 EMP 차폐 콘크리트의 SE 증진효과를 확인하고자 역학적 특성 및 두께에 따른 SE 특징을 비교평가하였다.

2.2 실험재료

2.2.1 시멘트

본 실험에서는 KS L 5201에 적합한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of cement

Specimen	Chemical composition (wt.%)						
	Ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC	2.53	21.78	4.72	3.6	63.21	1.83	2.33

2.2.2 골재

본 실험에 사용한 골재의 화학성분은 Table 2와 같으며, EOS 골재의 경우 국내 D사에서 생산한 EOS를 골재 치수에 따라 잔골재와 굵은 골재로 사용하였다. EOS의 경우 Ca 함량이 높아 골재의 팽창으로 인한 균열을 야기할 수 있으므로 Free-CaO 함량을 측정

Table 2. Chemical composition of industrial by-product aggregates

Specimen	Chemical composition (wt.%)							
	Ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Free-CaO
Fine aggregate	0.83	72.82	14.92	1.79	0.99	0.56	0.03	0.14
Coarse aggregate	1.10	63.55	17.43	4.19	3.75	1.19	0.10	0.11
EOS	2.14	19.69	10.67	25.15	28.70	5.85	0.40	0.13

한 결과 EOS의 함량이 NA 골재 수준으로 함량이 낮아 팽창에 의한 균열이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

2.2.3 카본계 재료

콘크리트의 도전성을 부여하기 위해 사용한 카본계 재료는 CF와 MCF로 특성은 Table 3과 같다.

Table 3. Characteristics of carbon materials

Characteristic	CF	MCF
Filament diameter (μm)	7	
density (g/ml)	1.80	0.22 ~ 0.28
Tensile strength (MPa)	4,900	3,150
Youngs modulus (GPa)	230	210
Strain at failure (%)	2.1	1.1 ~ 1.4
Carbon content (%)	>93	> 90
Sizing content (5)	>1.0	0.5 ~ 1
Mean fiber length	6 mm	100 μm

2.3 실험 방법

2.3.1 실험 인자 및 수준

실험 인자 및 수준과 배합은 Table 4, Table 5에 나타내었으며 배합의 표기법은 Fig. 3과 같다. 보통 콘크리트 EMP 흡수손실 유도 실험체 평가는 NA를 적용한 콘크리트에 카본섬유를 0.4 vol % 외할치환한 콘크리트의 물리적 특성(슬럼프, 공기량 및 압축강도) 및 SE 특성을 확인하였다.

EOS를 적용한 EMP 차폐 콘크리트는 카본섬유 0.2, 0.4 vol % 외할치환과 MCF 바인더 대비 5 % 내할치환시의 물리적 특성 및 SE 특성을 확인하였으며, 각각의 배합들을 비교평가 후 EMP 차폐 콘크리트의 최적배합을 도출하고자 하였다

Table 4. Measurement items

Items	Factors		
Compressive strength	W/B : 42.5 %		
	Slump : 200 ± 10 mm		
	Air : 3 ± 1.5 %		
EMP shielding performance evaluation	Series 1 (NA)	Non add.	
		CF mixing amount (vol %)	0.4
		Thickness (mm)	100, 200
	Series 2 (EOS)	Non add.	
		CF mixing amount (vol %)	0.2, 0.4
		MCF mixing amount (%)	5
		Thickness (mm)	100, 200



Fig. 3. Notation type

2.3.2 콘크리트 물리적 특성평가 실험

콘크리트 물리적 특성평가는 슬럼프 200 mm를 목표로 10 mm의 오차범위를 두어 CF 혼입에 따른 슬럼프 저하 시 배합수 중량의 1 ~ 2 %를 가수하여 실험을 진행하였으며, 슬럼프 및 공기량은 각각 KS F 2402, KS F 2409의 KS 규격에 의거하여 측정을 진행하였다. 압축강도는 KS F 2405에 의거하여 진행하였으며, ϕ 100*200 mm² 시험체를 재령 3, 7, 14, 28일에 맞춰 각 배합의 3개 시험체 평균값을 평가하였다.

2.3.3 차폐율(SE) 측정 실험

SE 측정 실험은 MIL-STD-188-125-1의 실험방법에 의거하여 300*300*(100,200) mm³의 실험체를 제작하였다. SE 측정용 실험체는 Min and Cho(2021) 연구와 동일하게 증기양생으로 진행하

Table 5. Mixing design of EMP concrete

Specimen	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)								
			W	C	MCF	CF	S	G	EOSS	EOSG	A.D.(%)
NA	42.5	49	182.8	430	-	-	856	29.8	-	-	1.0
NA CF 0.4			182.8	430	-	6.8	856	29.8	-	-	
EOS			182.8	430	-	-	-	-	1153	1174	
EOS CF 0.2			182.8	430	-	3.4	-	-	1153	1174	
EOS CF 0.4			182.8	430	-	6.8	-	-	1153	1174	
EOS MCF 5			182.8	409	21.5	-	-	-	1143	1162	

NA : Normal Aggregates, EOS : Electric Furnace Oxidized Slag, MCF : Milled Carbon Fiber, CF : Carbon Fiber

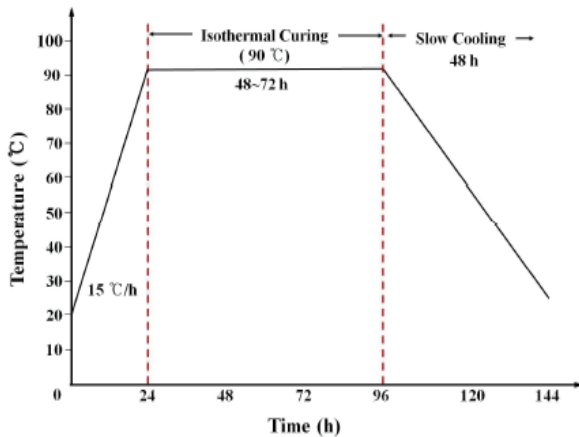


Fig. 4. Steam curing method

였으며, Fig. 4에 나타난 바와 같이 타설 2시간 정지 이후 승온속도 15 °C/h로 24시간 승온, 90 °C 72시간 유지, 48시간 동안 양생기 내에서 서냉하였다. 실험체 내 수분은 측정에 영향을 주기 때문에 양생이 종료된 실험체를 건조기에서 60 °C로 2주간 건조한 후 SE 측정을 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 콘크리트 물리적 특성평가 결과

굳지않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 측정결과는 Fig. 5와 같다. NA과 EOS 배합의 유동성은 Min and Cho(2021)의 연구에서 보고된 바와 유사하게 NA의 경우 슬럼프 측정 시 슬럼프 콘의 모양으로 주저앉았으나 EOS 배합의 경우 높은 비중으로 인해 슬럼프 콘의 모양을 유지하지 못하고 상부부터 무너지는 경향을 보였다. MCF을 혼입한 경우 유동성이 좋아지는 것을 확인할 수 있었으며, CF의 경우 Safiuddin et al.(2018), Dehghani and Aslani(2020)의 연구와 동일하게 섬유입형으로 인하여 유동성이 저하된 것을 확인할 수 있었다.

공기량 측정결과는 EOS 배합의 공기량이 NA 배합대비 낮은 것을 확인할 수 있었으며, CF 혼입량 증가시 연행공기가 발생하여 공기량이 증가한다는 Donnini et al.(2018)의 연구결과와 유사하게 섬유혼입에 따라 공기량이 증가하는 경향을 보였다.

압축강도 측정결과 Fig.6과 같이 EOS > EOS MCF 5 > EOS CF 0.2 > EOS CF 0.4 > NA > NA CF 0.4순으로 압축강도가 높게 측정되었으며, 28일 기준 64.7, 59.5, 57.7, 54.2, 39.5, 21.7 MPa의 수치를 나타내었다. 압축강도의 경우 Faleschini et al.(2016),

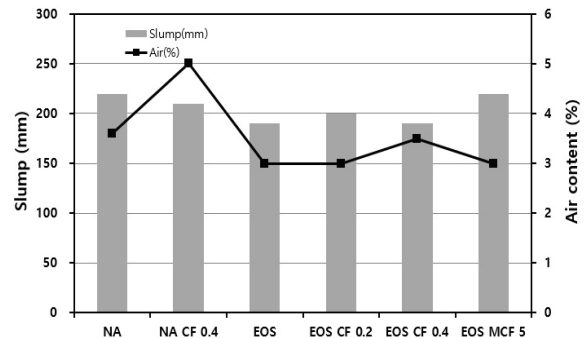


Fig. 5. Slump and Air content

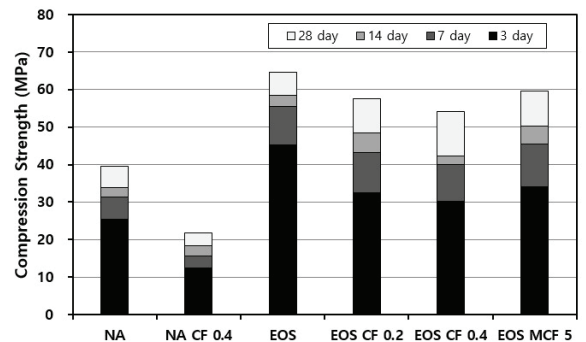


Fig. 6. Compressive Strength

Sosa et al.(2022)의 연구에서 나타난 바와 같이 EOS 골재의 경우 NA 대비 기계적인 특성이 높으며, 시멘트 페이스트와 골재의 결합력이 우수한 천이대를 생성하여 품질이 개선됨으로 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다.

CF 혼입배합의 경우 CF의 소수성 성질로 인하여 시멘트 페이스트와의 결합력이 저하되며, 섬유 증가에 따라 연행공기에 의해 공기량 증가 및 섬유응집체에 발생증가로 압축강도가 저하된다는 Song et al.(2019), Dehghani and Aslani(2020)의 연구와 유사한 경향을 확인할 수 있었다.

3.2 차폐율(SE) 측정 결과

미군 시방서 MIL-STD-125-1의 실험 방법을 준용하여 SE를 측정 한 결과는 Table 6, Fig. 7과 같다. 600 ~ 2000 MHz 주파수 범위 영역에서 차폐성능을 보유하지 않은 NA를 제외한 배합별 SE 평균은 100 mm 실험체가 약 24 dB, 200 mm 실험체 약 52 dB 값을 보였다.

시험체 두께에 따른 배합별 SE는 100 mm 실험체의 경우 EOS CF 0.4 > NA CF 0.4 > EOS CF 0.2 > EOS MCF 5 > EOS > NA 순으로 SE가 높게 측정되었으며, EOS 배합을 기준으로 각각 9.6

dB, 6.1 dB, 3.8 dB, 0.85 dB, -15.7 dB 의 SE 변화값을 확인할 수 있었다. 이는 섬유 혼입이 증가할수록 SE가 증가한다는 기존 연구동향과 동일한 결과값을 나타내었다(Dehghani and Aslani 2020).

반면, 200 mm 실험체는 EOS CF 0.4 > NA CF 0.4 > EOS CF 0.2 > EOS > EOS MCF 5 > NA 순으로 SE가 높게 측정되었으며, EOS 배합 기준 각각 10.1 dB, 7.8 dB, 4.95 dB, -1.1 dB, -38.7 dB 의 변화값을 나타내었다. 100 mm 실험체와 비슷한 경향을 보였으나 EOS와 EOS MCF 5 배합의 SE가 미비하게나마 역전되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 100 mm 두께에서도 차이가 크지 않아 측정시 환경조건의 영향인 것으로 판단된다.

또한 시험체 두께 증가시 배합별 SE가 비례하여 변화하는 것이 아닌 일정한 수치로 변화하는 경향을 보아 도전성 재료의 혼입율 증가보다 부재 두께를 증가시키는 것이 SE 성능증가에 효과적인 것으로 사료되며, 추후 연구에서는 SE 성능검증과 전기적 특성평가를 복합적으로 수행하여 SE 특성을 분석할 필요성이 있다고 판단된다.

Table 6. Shielding effectiveness

Type	Average of shielding effectiveness (dB)					
	NA	NA CF 0.4	EOS	EOS CF 0.2	EOS CF 0.4	EOS MCF 5
100 mm (h)	4.5	26.2	20.4	24.0	29.8	21.3
100 mm (v)	4.2	26.1	19.7	23.7	29.5	20.5
200 mm (h)	8.8	56.0	47.2	52.8	57.8	46.3
200 mm (v)	8.4	54.3	47.5	51.8	57.1	46.3

Range of Average: 600 MHz ~ 2000 MHz

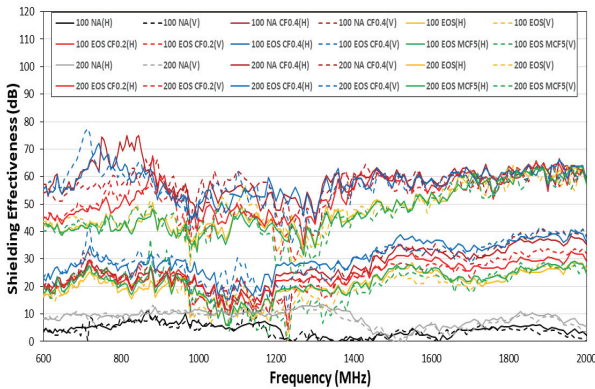


Fig 7. EMP shield effectiveness

4. 결론

본 연구에서는 산업부산물, 카본계 도전체를 활용한 EMP 차폐 콘크리트 개발을 위해 역학적 특성평가 및 SE를 평가하였으며, 비교평가를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. NA 골재 대비 EOS 골재를 사용한 배합의 유동성이 증가하였으며, 공기량은 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.
2. CF 혼입량이 증가할수록 유동성 감소 및 공기량 증가를 확인할 수 있었으며, 이는 CF의 섬유응집에 따른 것으로 판단된다.
3. NA 배합 대비 EOS 배합의 경우 골재의 기계적 특성이 더 우수하여 압축강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, CF 및 MCF는 유동성 증가를 위한 추가수량 및 소수성 입자에 의한 페이스트와의 결합력 감소로 혼입량 증가에 따라 압축강도 감소가 확인되었다.
4. SE는 NA 배합보다 EOS 배합의 SE 성능이 우수하고 CF의 혼입량이 증가할수록 SE가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. MCF 배합의 경우 EOS 배합과 SE 차이가 미비하여 EOS 활용 EMP 차폐 콘크리트에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 또한 SE의 성능증가는 혼입재료의 종류와 시험체의 두께의 영향이 크며, 도전성 재료의 혼입량 증가에 따른 SE 증가는 비례하지 않은 것을 확인할 수 있었다.
5. 유동성, 압축강도 및 SE 특성을 종합적으로 비교평가한 결과 CF를 0.4 vol % 혼입할 시 SE는 가장 우수하나 0.2 vol %와 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있었다. 또한 시공성을 확보하기 위해 믹싱 시 가수가 필요하였으며, 섬유 혼입량의 영향 및 가수에 따른 압축강도 저하를 확인하였다. 따라서 현장 적용이 가능한 EMP 차폐 콘크리트의 최적배합은 EOS CF 0.2로 도출하였다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호 : 22SCIP-C146649-05)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 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, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **19(3)**, 209–217 [in Korean].
- 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].
- Dehghani, A., Aslani, F. (2020). The effect of shape memory alloy, steel, and carbon fibres on fresh, mechanical, and electrical properties of self-compacting cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, **112**, 103659.
- Donnini, J., Bellezze, T., Corinaldesi, V. (2018). Mechanical, electrical and self-sensing properties of cementitious mortars containing short carbon fibers, *Journal of Building Engineering*, **20**, 8–14.
- Faleschini, F., Brunelli, K., Zanini, M.A., Dabalà, M., Pellegrino, C. (2016). Electric arc furnace slag as coarse recycled aggregate for concrete production, *Journal of Sustainable Metallurgy*, **2**, 44–50.
- Gu, B.Y., Park, S.H. (2022). Duality of Kim Jong Un's nuclear strategy: assured retaliation posture and bluffing strategy, *Korean Unification Studies*, **26(2)**, 157–198 [in Korean].
- Guan, H., Liu, S., Duan, Y., Cheng, J. (2006). Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials, *Cement and Concrete Composites*, **28(5)**, 468–474.
- Jung, J.S., Cho, H., Hong, S.H., Han, K.S. (2020). A study on factors influencing the establishment of EMP countermeasure system, *Journal of The Korea Society of Information Technology Policy & Management*, **12(5)**, 2043–2049 [in Korean].
- 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, 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].
- Li, X., Qu, Y., Wang, X., Bian, H., Wu, W., Dai, H. (2022). Flexible graphene/silver nanoparticles/aluminum film paper for high-performance electromagnetic interference shielding, *Materials & Design*, **213**, 110296.
- Min, T.B., Cho, H.K. (2021). An experimental study on the development of EMP shielding concrete using electric furnace oxidized slag aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **9(4)**, 514–520 [in Korean].
- Ozturk, M., Chung, D.D.L. (2021). Enhancing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon-fiber reinforced cement paste by coating the carbon fiber with nickel, *Journal of Building Engineering*, **41**, 102757.
- Safiuddin, M., Yakhlaf, M., Soudki, K.A. (2018). Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete, *Construction and building materials*, **164**, 477–488.
- Seo, M.J., Chi, S.W., Kim, Y.J., Park, W.C., Kang, H.J., Huh, C.S. (2014). Electromagnetic wave shielding effectiveness measurement method of EMP protection facility, *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, **25(5)**, 548–558 [in Korean].
- Shurenkov, V.V., Pershenkov, V.S. (2016). Electromagnetic pulse effects and damage mechanism on the semiconductor electronics, *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, **29(4)**, 621–629.
- Song, W., Yi, J., Wu, H., He, X., Song, Q., Yin, J. (2019). Effect of carbon fiber on mechanical properties and dimensional stability of concrete incorporated with granulated-blast furnace slag, *Journal of Cleaner Production*, **238**, 117819.
- Sosa, I., Thomas, C., Polanco, J.A., Setién, J., Sainz-Aja, J.A., Tamayo, P. (2022). Durability of high-performance self-compacted concrete using electric arc furnace slag aggregate and cupola slag powder, *Cement and Concrete Composites*, **127**, 104399.
- Suh, B.H., An, S.Y. (2022). The pattern and characteristics of the 10 years Kim Jong-un regime's nuclear policy: focused on the strategic triangle between North Korea-South Korea-the united states, *Discourse201*, **25(3)**, 73–102 [in Korean].
- Yan, A., Liu, Y., Wu, Z., Gan, X., Li, F., Tao, J., Li, C., Yi, J. (2022). RGO reinforced Cu foam with enhanced mechanical and electromagnetic shielding properties, *Journal of Materials Research and Technology*, **21**, 2965–2965.

카본계 재료 및 산업부산물을 활용한 EMP 차폐 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구

본 연구에서는 금속성분을 다량 함유한 전기로산화슬래그(EOS)를 골재로 활용한 콘크리트에 도전성이 높은 카본계 재료를 혼입하여 현장적용이 가능한 EMP 차폐 콘크리트의 최적배합을 도출하고자 기초적인 물성과 두께별 EMP 차폐성능을 평가하였다. 평가결과 슬럼프는 카본섬유(CF)의 혼입량이 증가할수록 저하, 밀드카본(MCF) 혼입시 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 압축강도는 EOS가 NA에 비해 강도를 증진시키는 것을 확인할 수 있었으며, CF 및 MCF 혼입시 강도가 저하되는 것을 확인할 수 있었다. EMP 차폐 측정결과 두께가 증가할수록 차폐율이 증가하였으며, 도전성 재료의 첨가량보다 도전성 재료의 종류 및 시험체의 두께가 차폐율 증가에 영향력이 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 종합적으로 비교평가를 진행한 결과 EMP 차폐 콘크리트 배합으로 EOS CF 0.2가 적합한 것으로 사료된다.