

탄소재료 기반 무기계 도료의 전자파 차폐성능 및 부착성능 평가

장경필*, 김상희
한국건설기술연구원 국민생활연구본부

Evaluation of Electromagnetic Pulse Shielding Effectiveness and Bonding Performance of Inorganic Paint based on Carbon Material

Kyong-Pil Jang*, Sang-Hee Kim
Department of Living and Built Environment Research,
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 전기 전자 부품을 기반으로 하는 통신장비, 컴퓨터, 이동 수단, 전산망, 군사용 장비 등 여러 산업 분야 및 사회기반시설에 있어 전자파 차폐의 필요성이 커지고 있다. 구조물의 전자파 차폐 방법은 차폐 콘크리트, 차폐 문, 차폐 창문과 같이 차폐성능을 가지고 있는 자재를 사용하여 시공하는 방법, 그리고 차폐성능이 없는 재료에 차폐 도료를 코팅하는 방법이 있다. 전자파 차폐 도료는 탄소나노튜브, 흑연, 카본 블랙, 탄소 섬유와 같은 전도성 물질을 사용하여 만들어지며, 일반적으로 사용되고 있는 수성도료에서 전자파 차폐 성능이 추가된 도료이다. 이 연구에서는 전자파 차폐 무기계 도료를 개발하기 위한 목적으로 전도성 흑연, 카본 블랙을 차폐원료로 사용한 도료의 차폐성능 및 부착성능을 평가하였다. 차폐 재료의 종류 및 사용량을 달리한 6개 배합에 대해 차폐성능과 부착강도를 평가하였다. 실험 결과, 전도성 흑연과 카본 블랙을 무게비 1:0.2로 혼합한 배합이 33.6 dB로 차폐성능이 가장 좋은 것으로 확인되었고, 부착성능은 전도성 흑연만 사용한 배합이 1.06 MPa로 가장 높은 것으로 확인되었다.

Abstract In various industrial fields and infrastructure based on electronic components, such as communication equipment, transportation, computer networks, and military equipment, the need for electromagnetic pulse shielding has increased. Two methods for applying electromagnetic pulse shielding are effective. The first is construction using shielding materials, such as shielding concrete, shielding doors, and shielding windows. The other is coating shielding paints on non-shielding structures. Electromagnetic pulse shielding paints are made using conductive materials, such as carbon nanotubes, graphite, carbon black, and carbon fiber. In this paint, electromagnetic pulse shielding performance is added to the commonly used water-based paint. In this study, the shielding effectiveness and bonding performance of paints using conductive graphite and carbon black as shielding materials were evaluated to develop electromagnetic pulse shielding inorganic paints. The shielding effectiveness and bonding performance were evaluated by applying six mixtures composed of different kinds and amounts of shielding material. The mixture of conductive graphite and carbon black at a weight ratio of 1:0.2 was the most effective in shielding as 33.6 dB. Furthermore, the mixture produced using conductive graphite only showed the highest bonding performance of 1.06 MPa.

Keywords : Electromagnetic Pulse, Shielding, Inorganic, Graphite, Carbon Black, Paint, Bonding Performance

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호: 21SCIP-B146646-04)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Kyong-Pil Jang(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
email: kyongpiljang@kict.re.kr

Received October 20, 2020

Revised December 23, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

1. 서론

전자파(EMP: Electro Magnetic Pulse, 이하 EMP) 피해에 대한 가능성은 1950년대 처음 거론되기 시작하였으며, 1960년대 초 미국에서 전자파에 대한 피해가 처음 발견되면서 이에 대한 연구가 본격적으로 이루어졌다. 전자파 공격이 발생할 경우 주위의 전자통신 시스템뿐만 아니라 수백 km 떨어진 지역까지 라디오, TV 등 전자기 기들이 고장 나는 피해가 발생하기 때문에 사회, 경제적으로 대혼란을 야기하게 되며, 복구에도 막대한 시간과 비용이 필요하다[1].

국내의 경우 2017년 기준으로 전자파 방호성능을 갖춘 시설물은 12개에 불과하며, 주요 정보통신 기반 시설물은 400여 개 중 2개에 불과한 것으로 보고된 바 있다 [2]. 또한 전자파 방호시설에 대한 명확한 설치 기준도 마련되어 있지 않은 것으로 나타났다[2]. 따라서 전자파 피해에 대비하여 차폐 부재/재료 개발, 정확한 평가 방법, 설계 및 시공 기술 전반에 대한 기술을 개발할 필요가 있다.

전자파 차폐는 공기 중으로 진행되던 전자파가 차폐물을 만나 흡수 및 반사 과정을 거치면서 전자파 강도가 손실 또는 소멸되는 현상을 말한다. 차폐성능은 전자파 차폐의 정도를 나타내는 기준이며, 데시벨(dB) 값으로 나타낸다. 시설물의 전자파 차폐가 이루어지려면 재료 자체의 차폐성능 뿐만 아니라 차폐 구조물 설계 기술과 시공 기술이 모두 갖추어져야 한다.

전자파 차폐가 요구되는 주요 정보통신 기반 시설의 경우 신규 건설 수요도 있겠지만, 앞에서 언급한 것처럼 현재 운영되고 있는 보안시설의 전자파 차폐 보강도 필요하다. 신규 건설 시에는 설계 단계에서부터 전자파 방호에 대한 부분을 고려하여 차폐성능이 있는 재료(차폐 콘크리트, 전도성 금속판)와 부재(차폐 문, 차폐 창문 등)를 사용한 시공을 통해 차폐성능을 확보하면 된다. 하지만 기존 시설물에 전자파 방호시설을 추가로 설치할 경우 건축 공간 비효율성 및 추가 비용이 발생하기 때문에 시설의 추가 설치보다는 도료 기반의 코팅 처리를 하는 게 더 효율적일 수 있다[3,4].

이미 알려진 바와 같이, 전자파 차폐 도료 원료로 CNT(carbon nano tube), 흑연(graphite), 카본 블랙(carbon black), 카본 파이버(carbon fiber) 등의 탄소 소재들이 많이 쓰인다[5-7]. 또한 차폐성능 향상을 위해 구리, 니켈 등과 같이 전기가 잘 통하는 금속재료와 혼합하여 사용하기도 한다[5,8]. 최근에는 맥신(MXene)이라는 전이금속 나노소재가 개발되어 약 10 μm 의 두께에서

차폐성능 60 dB 이상의 높은 전자파 차폐성능을 가지는 신소재도 개발된 바 있다[9]. 차폐도로 외에 금속을 용사(spraying)시켜 콘크리트 표면을 코팅하여 전자파를 차폐하는 기술도 최근에 개발되어 연구가 진행 중에 있다 [10].

이 연구에서는 전자파 차폐 무기계 도료 개발을 목적으로, 탄소재료를 차폐원료로 사용한 도료 배합 6종에 대해 전자파 차폐성능과 부착성능을 평가하였다. 전자파 차폐 무기계 도료는 일반적으로 사용되고 있는 수성도료에서 전자파 차폐성능이 추가된 도료라고 볼 수 있다. 도료의 차폐성능이 어느 정도를 만족해야 하는 지에 대한 규정은 아직까지 마련되어 있지 않으며, 현재 개발 단계에서 자체적으로 선정한 차폐성능은 주파수 1.5 GHz 이내의 범위에서 20 dB이다. 차폐성능 외에 일반 수성도료의 성능을 갖추는 것도 매우 중요하다. 코팅되는 재료의 표면과 도료의 부착성능은 가장 기본적인 도료의 성능이라고 할 수 있다. 이 연구에서 목표로 선정한 전자파 차폐 무기계 도료의 부착성능은 국내 수성도료 기준[11]인 0.5 MPa이다.

2. 사용재료 및 도료 제조

2.1 사용 재료

이 연구에서 차폐원료로 사용한 재료는 전도성 흑연, 카본 블랙이다. Table 1.에 이 연구에서 사용한 차폐 재료의 주요 물리적 특성을 나타내었다. 전도성 흑연은 SC 5, COND 5 두 종류를 사용하였다. SC 5와 COND 5의 차이점은 열전도성의 유무이다. SC 5만 열전도성을 가지고 있는 흑연재료이다. 또한 Table 1.에 나타냈듯이, COND 5가 SC 5보다 최대 입자 크기가 1.5 μm 정도 크고 탄소 함유량과 밀도는 동일하다. 카본 블랙은 흑연에 비해 입자 크기가 4 ~ 5 μm 정도 크며, 탄소 함유량은 95 % 이상으로 흑연과 비슷하다. 밀도는 112 g/l로

Table 1. Physical properties of carbon materials

Content	Graphite 1 (SC 5)	Graphite 2 (COND 5)	Carbon black
Carbon content (%)	96~99.9	96~99.9	> 95
Particle size (μm)	2.0~7.0	2.0~8.5	6.5~12.5
Bulk density (g/l)	2230	2230	112

흑연의 약 5 % 정도이다. 차폐원료 외에 기본적으로 도료 제조에 사용되는 바인더로는 칼륨계 물유리 (potassium silicate)를 개질한 무기질바인더를 사용하였다. 무기질바인더는 변성실리케이트 기반의 불연 무기질 재료이며, 주로 무기질 보드 성형, 샌드위치 패널, 고온 내열도를 요구하는 부품의 성형 등에 많이 사용되는 재료이다. Table 2.에 무기질바인더의 사양에 대해 나타내었다. PH는 11에서 12로 알칼리성에 속하며, 비중은 1.3에서 1.4, 비휘발분 함량은 중량비 약 37 %, 점도는 200에서 400 cps 범위이다.

그 밖에 카본 블랙과 물을 혼합하기 위한 계면활성제와 도료의 유동성 확보를 위한 분산제는 모두 폴리카르

본산계를 사용하였다. 본격적인 도료 개발 전에 재료들 간의 상용성을 확인하기 위해 기초 실험을 진행하여 결합재들을 선정하였다.

2.2 도료 배합 및 제조

차폐성능 및 부착성능 평가를 위해 총 6개 배합의 전자파 차폐 도료를 제작하였다. 이 연구에서 제작한 도료 배합 6종은 기본적으로 재료간의 상용성과 재료 혼합 순서, 그리고 제작 과정을 정립하기 위해 약 50가지 배합에 대해 실험을 진행한 후 선정된 것이다. Table 3.에 도료의 배합표를 정리하였다. Mix 1과 Mix 2는 기본 차폐원료인 흑연의 종류를 변수로 설계하였으며, Mix 3에서 Mix 6까지는 흑연과 카본 블랙의 무게비를 10 %, 15 %, 20 %, 30 %로 하여 설계하였다. 분산제는 차폐원료 무게의 15 %로 모두 동일하게 적용하였다. 카본 블랙을 사용한 배합에서는 물과의 혼합을 원활하게 하기 위해 계면활성제를 사용하였으며, 카본 블랙 무게의 약 1/3 정도로 모두 동일하게 적용하였다. Mix 6 배합 시, 카본 블랙의 양이 많아짐으로 인해 점도와 같이 흐름성이 전혀

Table 2. Specifications of inorganic binder

Product	PH	Specific gravity (20±1℃)	Nonvolatile content (wt%, 250±2℃, 1hr)	Viscosity (cps, 20±1℃)
Inorganic binder	11~12	1.3~1.4	37±1	200~400

Table 3. Paint mixture proportions

Mix.	Unit weight (g/L)						
	Graphite 1	Graphite 2	Carbon black	Inorganic binder	Water	Dispersant	Surfactant
Mix 1	220	-	-	220	560	-	-
Mix 2	-	220	-	220	560	-	-
Mix 3	200	-	20	200	580	33	6.7
Mix 4	200	-	30	200	580	34.5	10
Mix 5	200	-	40	200	580	36	13.5
Mix 6	200	-	60	200	600	39	20

Graphite 1=SC 5, Graphite 2=COND 5

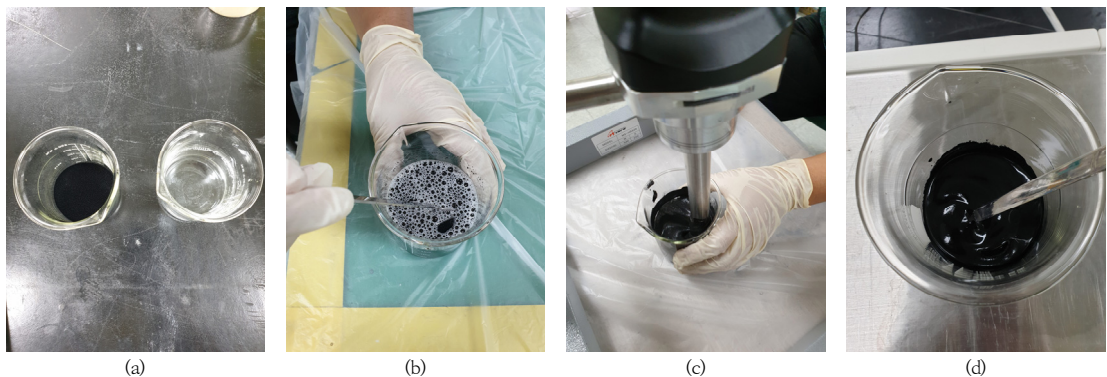


Fig. 1. Manufacture process of EMP shielding inorganic paint

(a) Material preparation and weighing (b) Hand mixing (c) Homogenizing (d) Product complete

없는 고체 상태였다. 따라서 물을 20 g 추가하여 유동성을 확보하였다.

Fig. 1.은 도료의 배합 과정을 나타낸 것이다. 차폐원료와 물, 무기질바인더를 계량한 후 실험용 시약 수저로 5분 정도 혼합한 후 균질기(homogenizer)를 이용하여 배합을 완료하였다. 카본 블랙의 경우 소수성으로 물과 잘 섞이지 않는다. 따라서 계면활성제를 소량 혼합한 후 균질기를 통해 분산이 잘 되도록 5분에서 10분 정도 교반을 수행하였다.

3. 차폐성능 및 부착성능 평가 방법

3.1 차폐성능 평가 방법 및 시편 제작

이 연구에서 수행한 전자파 차폐성능 평가는 ASTM D 4935에 의해 이루어졌으며, 규격[12]에 맞게 시편을 제작하여 도료 도장을 수행하였다. 시편은 2 mm 두께의 아크릴로 제작하였으며, 표면에는 도장을 원활하게 하기 위해 젯소(ghesso)를 프라이머(primer)로 사용하여 전처리 하였다. Fig. 2.는 도장이 완료된 차폐성능 평가 시편을 나타낸 것이다. 총 4차례 도장을 수행하였으며, 1회 도장할 때 건조시간을 1시간에서 2시간 정도 두고 육안으로 표면을 관찰하여 건조 상태를 확인하며 시편을 제작하였다.

3.2 부착강도 평가 방법 및 시편 제작

이 연구에서 제작된 6개 배합의 무기계 전자파 차폐도료에 대해 부착강도를 평가하여 현장 적용 가능성을 검토하였다. 실험은 KS M 6010의 부착강도 시험 방법에 의해 진행되었으며, 목표 강도는 KS M 6010 내수형 퍼티(putty) 기준인 0.5 MPa이다. Fig. 3.과 Fig. 4.는 각각 부착강도 시험 방법의 개략도 및 실험 장비 사진을 나타낸 것이다. 부착강도 시험 장비는 자동으로 하중 제어를 할 수 있으며, 최대 10 MPa까지 인장시험이 가능하다. 하중 제어 속도는 0.28 MPa/sec로 실험을 진행하였다.



Fig. 2. Shielding effectiveness evaluation specimens

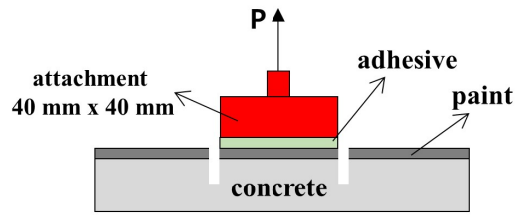


Fig. 3. Schematic diagram of the bonding strength test



Fig. 4. Bonding strength test equipment



Fig. 5. Specimens for bonding strength test

Fig. 5.는 제작이 완료된 부착강도 평가 시편을 나타낸 것이다. 부착강도 평가를 수행하기 위해 크기 30 cm × 30 cm, 두께 5 cm, 압축강도 24 MPa 콘크리트 패널 7개를 제작하였다. 콘크리트 패널은 14일간 양생하여 강도가 충분히 발현되게 하였다. 도장이 되는 콘크리트 패

널 표면을 와이어브러시(wire brush)로 전처리 하였으며, 차폐성능 평가 시험체 제작에서와 동일하게 젯소를 프라이머로 도포하여 도장이 원활하게 이루어지도록 하였다. 차폐 도료 도장 후 24시간 이상 건조한 뒤 접착제를 이용하여 40 mm × 40 mm 강제 어태치먼트를 부착하였으며, 어태치먼트 부착 후 다시 24시간 이상 건조하여 시험체 제작을 완료하였다.

Fig. 5.에 보이는 바와 같이 시편마다 각각 9개의 어태치먼트를 부착하였으며, 부착강도 시험은 KS M 6010 시험 방법에 따라 시편 당 6개씩 측정하여 평균하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 차폐성능 평가 결과

Fig. 6.은 이 연구에서 제작한 6개 배합의 전자파 차폐 무기계 도료의 차폐성능 평가 결과를 나타낸 것이다. 이 연구에서 목표로 정한 전자파 차폐성능은 1.5 GHz 범위 내에서 20 dB이다. Fig. 6.의 차폐성능 평가 실험 결과를 살펴보면, 흑연을 단독으로 사용한 배합인 Mix 1 과 흑연과 카본 블랙의 무게비 20 %인 Mix 5에서 목표로 정한 20 dB를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 나머지 배합에서는 낮은 주파수 영역에서는 20 dB를 넘어서는 배합도 있지만 주파수 대역이 높아지면서 점차 차폐성능은 떨어지는 것으로 확인되었다. 흑연과 카본 블랙을 혼합한 도장재의 차폐성능 평가를 조사한 기존의 연구에서도 카본 블랙 함량 10~20 %의 범위에서 차폐성능이 가장 좋은 것으로 보고된 바 있다[8]. 카본 블랙 함량 10~20 % 범위 내에서 최상의 성능을 발휘하는 배합에

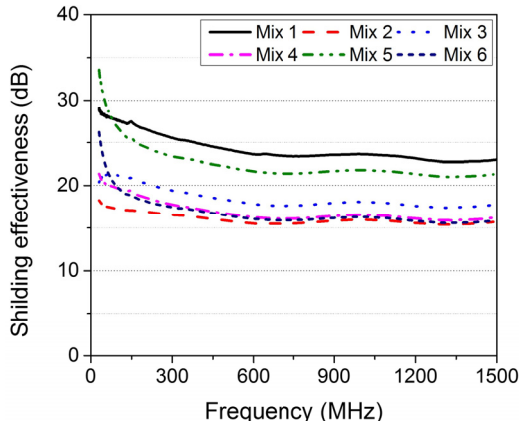


Fig. 6. Results of EMP shielding effectiveness tests

Table 4. Results of bonding strength

Mix.	Bonding strength (MPa)							S.D.
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	Ave.	
Mix 1	0.50	0.49	1.72	1.65	0.56	1.41	1.06	0.55
Mix 2	0.24	0.28	0.27	0.37	0.24	0.75	0.36	0.18
Mix 3	0.84	0.91	0.91	0.91	0.91	0.87	0.89	0.03
Mix 4	0.58	0.58	0.49	0.61	0.83	0.72	0.64	0.11
Mix 5	0.34	0.45	0.59	0.52	0.63	0.59	0.52	0.10
Mix 6	0.82	0.86	0.77	1.06	0.66	1.07	0.87	0.15

S.D.: Standard deviation

대한 검토와 차폐성능 향상을 위한 고형분 증가, 그리고 두께별 차폐성능 평가에 대한 부분은 추후 지속적으로 연구가 이루어져야 할 것이다.

4.2 부착강도 평가 결과

Table 4.는 부착강도 시험 결과를 나타낸 것이다. Mix 1의 경우 부착강도는 평균 1.06 MPa이며, 최대 1.76 MPa까지 측정되었다. Mix 1은 차폐성능 20 dB를 확보한 배합으로, 부착강도와 차폐성능 모두 이 연구에서 설정한 목표치를 확보하였다. Mix 2는 평균 0.36 MPa로 목표치를 확보하지 못하였다. Mix 2를 제외한 다른 배합들에서는 모두 목표치인 부착강도 0.5 MPa를 확보하였다.

총 6개 무기계 도료 배합에 대한 부착강도 시험 결과 중 Mix 1의 경우 최소 0.49 MPa에서 최대 1.72 MPa까지 다른 배합에 비해 측정값의 편차가 큰 것으로 나타났다. 표준편차 값도 0.55 MPa로 다른 배합에 비해 약 5배 정도 크다. Mix 1 시험체의 경우 흑연을 단독으로 사용한 배합이며, 시편 제작 당시 도료의 점도가 다른 배합에 비해 높았다. 이로 인해 콘크리트 표면에 도료 도장을 할 때 두께가 고르게 발라지지 않은 것으로 판단된다. 직접 두께를 측정하지 않았지만 실험이 완료된 어태치먼트 표면과 도장된 표면을 육안으로 관찰한 결과, 전체적으로 도막 두께가 얇은 부분에서 부착성능이 높게 평가되었다. 도막 두께가 두꺼울수록 콘크리트 표면과 도장면에서의 파괴보다는 도막 자체 내에서 파괴가 이루어지는 것으로 판단된다.

이 연구에서 제조한 6개 배합의 전자파 차폐 무기계 도료의 차폐성능과 부착성능 평가 결과, 전도성 흑연만 사용한 Mix 1과 흑연과 카본블랙 무게비 20 %로 배합한 Mix 5에서 목표로 정한 차폐성능 20 dB, 부착강도 기준 0.5 MPa를 확보하였다.

5. 결론

이 연구에서는 탄소 재료인 전도성 흑연과 카본 블랙을 차폐원료로 사용한 무기계 도료 6개 배합에 대해 차폐능과 부착강도를 평가하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

1. 전자파 차폐 무기계 도료 6개 배합 중 전도성 흑연을 단독으로 사용한 배합 1개, 흑연과 카본 블랙을 혼합한 배합 1개에서 목표로 설정한 차폐성능 20 dB(주파수 범위 1.5 GHz 이내)를 확보하였다.
2. 전도성 흑연과 카본 블랙을 차폐원료로 사용한 총 6개 배합에 대해 부착강도를 평가하였으며, 5개 배합에서 목표 수준인 0.5 MPa를 만족하였다.
3. 추후 차폐원료의 사용량 증가 및 두께 증가를 통한 차폐성능 향상, 그리고 수성도료의 품질을 갖추기 위한 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것이다.

References

- [1] V. V. Shurenkov, V. S. Pershenkov, "ELECTROMAGNETIC PULSE EFFECTS AND DAMAGE MECHANISM ON THE SEMICONDUCTOR ELECTRONICS", *Electronics and Energetics*, Vol. 29, No. 4, pp. 621-629. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.2298/FUEE1604621S>
- [2] Lee, N. K., Park G. J., Park, J. J., and Kim, S. W, "A Study on the Electrical Conductivity and Electromagnetic Shielding of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites(HPFRCC)", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.23, No.2, pp.37-43. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.2.37>
- [3] H. S. Lee, H. B. Choe, I. Y. Baek, J. K. Singh, M. A. Ismail, "Study on the Shielding Effectiveness of an Arc Thermal Metal Spraying Method against an Electromagnetic Pulse", *Materials*, Vol. 10, No. 10, 1155, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10101155>
- [4] M. J. Seo, S. W. Chi, Y. J. Kim, W. C. Park, H. J. Kang, C. S. Huh, "Electromagnetic Wave Shielding Effectiveness Measurement Method of EMP Protection Facility", *THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE*, Vol. 25, No. 5, pp. 548-558, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5515/KJIEES.2014.25.5.548>
- [5] Chung, D. D. L, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials", *Carbon*, Vol.39, No.2, pp.279-285, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00184-6)
- [6] Azim, S. S., Satheesh, A., Ramu, K. K., Ramu, S., and Venkatachari, G, "Studies on graphite based conductive paint coatings", *Progress in Organic Coatings*, Vol.55, No.1, pp.1-4. 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2005.09.001>
- [7] Vovchenko, K., Perets, Y., Ovsienko, I., Matqui, L., Oliynyk, V., and Launetz, V, "Shielding coatings based on carbon-polymer composites", *Surface & Coatings Technology*, Vol.211, pp.196-199. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.018>
- [8] Tzeng, S. S., and Chang, F. Y, "EMI shielding effectiveness of metal-coated carbon fiber-reinforced ABS composites", *Materials Science and Engineering*, Vol.302, No. 2, pp.258-267. 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01824-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01824-4)
- [9] Shahzad, F., Alhabeab, M., Hatter, C. B., Anasori, B., Hong, S. M., Koo, C. M., and Gogotsi, Y, "Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)", *Science*, Vol.353, No.6304, pp.1137-1140. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aag2421>
- [10] Lee, H. S., Park, J. H., Singh, J. K., Choi, J. H., Mandal, S., Jang, J. M., and Yang, H. M, "Electromagnetic Shielding Performance of Carbon Black Mixed Concrete with Zn-Al Metal Thermal Spray Coating", *Materials*, Vol.13, No.4, 895. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13040895>
- [11] KS M 6010, "Synthetic resin emulsion paints", *KS Standard*, Korea, 2014.
- [12] ASTM D 4935, "Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Plana Materials", 2018.

장 경 필(Kyong-Pil Jang)

[정회원]



- 2013년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2018년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2018년 3월 ~ 2019년 4월 : 명지대학교 산학협력단 연구원
- 2019년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

건설재료, 콘크리트 레올로지, 콘크리트 이송

김 상 희(Sang-Hee Kim)

[정회원]



- 2009년 5월 : University of New South Wales 건축학 (학사)
- 2012년 3월 : University of New South Wales 건축설계 (석사)
- 2016년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 신진연구원

〈관심분야〉

건설재료, 순환재료