

Research Paper

아크 금속 용사 공법에 의해 코팅된 콘크리트의 전자기파 차폐 성능 확보를 위한 실험적 연구

An Experimental Study to Secure Electromagnetic Pulse Shielding Performance of Concrete Coated by an Arc Metal Spraying Process

장종민¹ · 정화랑² · 이한승^{3*}

Jang, Jong-Min¹ · Jeong, Hwa-Rang² · Lee, Han-Seung^{3*}

¹Doctor's Course, Department of Smart-city Engineering, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15588, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, 38430, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15588, Korea

*Corresponding author

Lee, Han-Seung
Tel : 82-31-400-5181
E-mail : ercleehs@hanyang.ac.kr

ABSTRACT

In this study, an electromagnetic pulse shielding effect was obtained by applying the arc metal spraying method to the ordinary concrete. For this study, to evaluate the electrical properties in the thickness of the metal sprayed coating, 8 types of metals(Cu, CuAl, CuNi, CuZn, Al, Zn, ZnAl, AlMg) were sprayed as coatings with a thickness of 100, 200 and 500 μ m. The electrical conductivity on the surface was measured with a 4-pin probe, and an electromagnetic wave shielding effect test was performed according to KS. Based on the test results, 200 μ m was proposed as an optimal metal coating thickness for electromagnetic pulse shielding, and it was thermally sprayed on a 300 \times 300 \times 100mm concrete specimen to analyze the electromagnetic wave shielding performance. However, in the area of adhesion strength, the maximum was 1.11MPa, which was found to be less than 74% of the target performance.

Keywords : metal sprayed coating, conductivity, electromagnetic pulse shielding, bonding strength

Received : October 22, 2021

Revised : November 4, 2021

Accepted : November 9, 2021

1. 서론

전자기파는 자연상태나 또는 사회적 혼란을 야기하기 위한 목적으로 발생되어지며 50 - 100kV/m의 전자기파를 방출하여 사회 기반 시설에 막대한 피해를 초래한다. 이러한 이유로 전자기파 차폐에 대해 전세계적으로 연구되고 있으며[1-4], 이에 전기 전도성이 높은 구리와 같은 금속을 활용한 전자기파 차폐물을 제작하여 전자기파 차폐성능을 확보하고 있다[5]. 하지만 이는 기존의 콘크리트 구조물 내부에 추가적인 설비를 시공하는 것으로 경제적 · 공간 활용 측면에서 많은 단점이 발생하고 있으며, 특히 금속 접합부에서의 시공 불량 또는 용접부의 부식으로 인하여 전자기파 차폐 성능 확보에 문제점이 지적되고 있다[5-7]. 따라서 전기 전도도가 낮은 콘크리트의 전자기파 차폐 성능을 개선하기 위해 전기 전도성 물질을 콘크리트 배합에 혼입하는 재료적인 측면에서의 연구들이 수행되고 있다[8]. 대표적인 물질로 CNT(Carbon Nano-Tube), Carbon black, 강섬유 등을 콘크리트에 첨가할 경우 1GHz에서 최대 50dB의 차폐 성능을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 콘



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

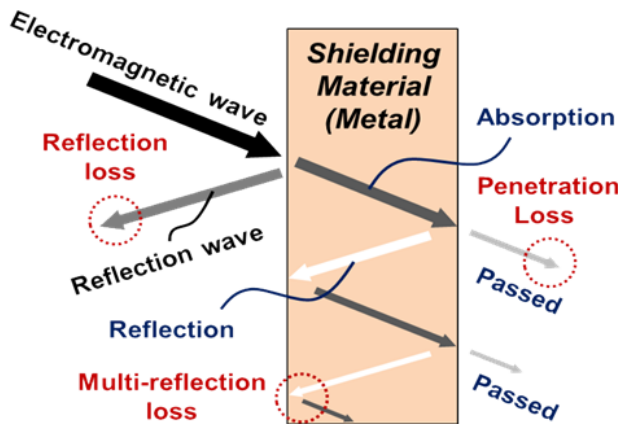
크리트 배합에 따라 차이가 있으나 이러한 전도성 재료들이 첨가될 경우 작업성 저하 또는 배합수 증가로 인한 강도 저하 등의 문제가 보고되고 있다[8-10]. 다른 연구에서는 전도성 물질을 혼합한 콘크리트 표면에 100 μ m 두께로 금속 용사를 실시하여 전자기파 차폐 성능을 평가한 결과, MIL-STD-188-125-1에서 요구하는 차폐 성능 80dB 이상 확보됨을 보고하였다[11]. 기존의 연구들의 경우 전도성 재료를 혼합한 콘크리트를 대상으로 전자기파 차폐 성능을 평가하여 기존의 콘크리트에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 금속 코팅과 금속 용사한 콘크리트의 전자파 차폐 성능을 검토하여 기존의 낮은 전기 전도도를 갖는 콘크리트를 대상으로 전자기파 차폐 성능을 확보하고자 한다.

2. 전자기파 차폐 원리

전자기파는 차폐물질을 지나며 반사와 흡수 과정을 통해 그 세기가 감소하거나 소멸되는 것을 전자기파 차폐라고 하며, 이러한 전자기파 차폐 성능은 입력한 전자기파(P_{in}) 대비 전자기파 차폐 재료를 투과한 전자기파(P_{out})의 비로 나타낸다.

$$SE = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{1}$$

전자기파 차폐재는 10⁵ Ω 이하의 전도성을 지닌 금속계 재료들을 주로 활용하며, 전기 전도성이 높은 재료일수록 차폐 성능이 우수한 것으로 알려져 있다. 이러한 차폐재는 발생한 전자기파에 대해 반사 손실(Reflection loss, SE_R), 흡수 손실(Penetration loss, SE_P), 다중 반사손실(Multi-reflection loss, SE_M)의 과정을 통해 Figure 1과 같이 전자기파를 차폐한다.



$$SE = SE_R + SE_P + SE_M \text{ [dB]} \tag{2}$$

$$SE_R = 50 + 10 \log(\rho \cdot f)^{-1} \text{ [dB]} \tag{3}$$

$$SE_P = 1.7t \left(\frac{f}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \text{ [dB]} \tag{4}$$

$$SE_M = 20 \log \left| 1 - \frac{(k-1)^2}{(k+1)^2} e^{-2t(1+f)\sqrt{\pi f \mu \alpha}} \right| \text{ [dB]} \tag{5}$$

Figure 1. Mechanism of EMP shielding by shielding materials

ρ 는 고유 체적 저항(Ω cm)으로 전기 전도도와 역수이며, f 는 측정된 전자기파의 진동수(MHz), μ 는 차폐 재료의 비투자율(H/m), σ 는 도전율(S/m), k 는 전자기파 임피던스와 재료와 특성 임피던스의 비이고, t 는 전자기파 차폐재의 두께(cm)이다. 이때, SE_P 가 10dB 이상일 경우에는 SE_M 은 고려하지 않으며, 전자기파 차폐 성능은 식 (6)와 같이 정리될 수 있다. 따라서 전자기파 차폐 성능은 차폐재의 전기 전도도($1/\rho$)와 차폐재의 두께에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$SE = 50 + 10 \log\left(\frac{1}{\rho \cdot f}\right) + 1.7t \left(\frac{f}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

3. 실험 개요

3.1 실험 인자 및 수준

본 연구에서는 금속 코팅과 금속 용사한 콘크리트의 전자기파 차폐 특성을 평가하기 위하여 Table 1과 같이 변수를 설정하였다. 본 실험에서는 아크 금속 용사 공법(Arc Thermal Metal Spraying Method)을 적용하여 Figure 2과 같이 두 개의 금속 선재에 전류를 흘려 만들어진 전기적 아크를 활용하여 용융된 금속을 압축공기로 하지판 표면에 용사하였다. 아크점에서 용사된 금속은 공기중에서 냉각되며 운반되고, 하지판 표면에 충돌하여 고화되어 코팅이 적층된다. 이를 통해 다공질의 금속 코팅이 형성되는데, 사용한 금속의 종류와 금속 코팅의 두께에 영향을 받는 것으로 알려져 있다[12]. 본 연구에서는 직경 1.6mm의 금속 선재를 사용하여 총 8 종류의(Cu, CuAl, CuNi, CuZn, Al, Zn, ZnAl, AlMg) 금속 코팅을 제작하여, 금속 코팅의 전기 전도도와 전자기파 차폐 성능을 평가를 통해 금속 코팅의 최적 두께를 도출한 후 콘크리트 표면에 금속 용사하여 전자기파 차폐 특성과 부착 성능을 평가하였다.

Table 1. Experimental variables

Experimental Variables	Experimental Parameters	
EMP Shielding materials	Cu, CuAl, CuNi, CuZn, Al, Zn, ZnAl, AlMg	
Specimens Type	Metal Coating	Coating on Concrete
Coating Thickness	100, 200, 500 μ m	200 μ m

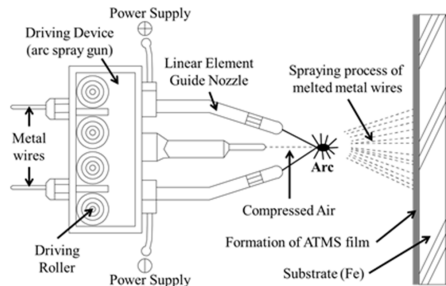
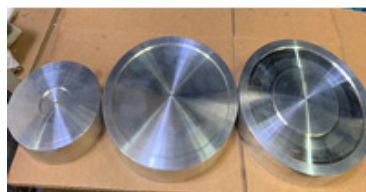


Figure 2. Arc thermal metal spraying method

3.2 시험체 제작

금속 코팅 실험체의 제작 과정은 Figure 3와 같다. 금속 코팅은 KS C 0304에 의거하여 직경 133mm의 부하 시료(Load specimen)과 외경 133mm, 내경 76mm과 직경 33mm의 2개로 이루어진 기준 시료(Reference specimen)을 코팅 두께 100, 200, 500 μ m로 제작하여 금속 종류와 두께에 따른 전기 전도 특성 및 전자기파 차폐 성능을 평가하였다.



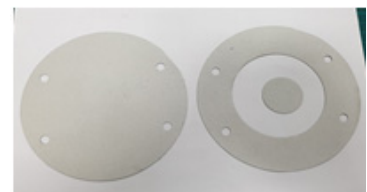
(a) Metal coating specimen jig



(b) Metal spraying



(c) Thickness measurement



(d) Metal Coating specimen

Figure 3. Metal coating specimen manufacturing process

콘크리트 시험체에 사용된 배합표는 Table 2와 같으며 W/C는 50%이며, 사용한 재료는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 최대 치수 25mm의 굵은 골재, 최대치수 5mm의 잔골재와 유동성 확보를 위해 폴리카르본산계(polycarboxylic) 감수제를 시멘트 무게 대비 0.8% 사용하였다. 배합된 콘크리트는 300×300×100mm 크기의 시험체로 제작하여, 타설 직후 양생 온도 20±2°C, 상대습도 60±2%, 24시간 양생 후 스팀 양생기를 통해 최대 온도 90 °C에서 24시간 동안 양생하였다. 이후 콘크리트 표면의 레이턴스를 제거한 후 200µm 두께로 금속 용사를 실시하였다.

Table 2. Mix proportion of concrete

W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight(kg/m ³)				Admixture (%)
			Water	Cement	Sand	Gravel	
50	52	4.5	175	350	905	835	0.8

3.3 실험방법 및 측정 항목

아크 금속 용사된 콘크리트의 전자기파 차폐 성능을 확보하기 위해서, 금속 코팅을 대상으로 코팅 두께에 따른 전기 전도도 및 전자기파 차폐 성능을 평가하여 최적의 두께를 선정하여 콘크리트 시험체를 제작하였다. 콘크리트 시험체는 도출된 최적 두께로 금속 용사를 실시한 후 금속 종류에 따른 전자기파 차폐성능 및 부착 성능을 평가 수행하였다.

3.3.1 금속 코팅의 전기전도도 평가

금속 코팅 두께에 따른 시험체의 전기적 특성을 확인하기 위해서 4pin probe로 시험체 표면의 9개소를 대상으로 비저항과 전기 전기전도도를 측정하였으며 이때 측정 기기로는 Loresta-GX MCP-T700을 이용하였다.

3.3.2 금속 코팅의 전자기파 차폐 성능 평가

금속 코팅의 전자기파 차폐 성능을 평가하기 위해서 KS C 0304에 의거하여 플랜지형의 원형 전송선로 홀더를 이용하였다. 이 측정방법은 동축케이블을 따라 임의의 전자기파 주파수를 조사하여 기준 시편과 부하 시편을 통과한 후 수신된 전자기파의 세기를 통해 전자기파 차폐 성능을 평가하는 방식으로 실험에 사용된 장비는 Agilent에서 제조한 E5071C 네트워크 분석기와 ATM에서 제조한 PNR2205-10 동축 고정 감쇠기이며, 시험 전 시험편은 23±2°C였다. 상대습도 50±5%의 조건에서 48시간 방치한 후 100~1,000MHz 주파수 영역대에서 전자기파 차폐 성능을 평가하였다.

3.3.3 콘크리트의 전자기파 차폐 성능 및 부착 성능 평가

본 실험에 사용한 콘크리트의 압축 강도는 평균 27.72 MPa로 양생이 종료된 콘크리트 시험체의 표면의 레이턴스를 완전히 제거한 이후 24시간 이상 건조한 다음 금속 용사를 실시하였다. 금속 용사된 콘크리트의 전자기파 차폐 성능은 Figure 4와 같이 MIL-STD-188-125-1(High-Altitude EMP Protection for Fixed Ground-Based Facilities)에 의거하여 측정하였다. 금속 차폐룸의 개구부에 금속 용사한 콘크리트 시편을 고정하고, 실험체로부터 30 cm 이격한 외부 안테나에서 전자기파를 방출하여 차폐룸 내부의 안

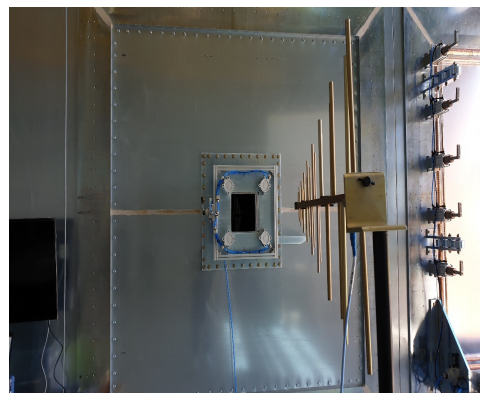


Figure 4. Concrete specimen shielding effectiveness test room

테나에서 수신되는 전력량을 측정하여 전자기파 차폐 성능을 평가하였다. 이 후 금속 코팅과 콘크리트의 부착 성능을 평가하기 위해서 KS F 4716을 준용하여 40×40mm의 정사각형 어테치먼트를 9개소에 대해 부착 강도를 측정하고 그 값의 평균을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 금속 코팅의 전기전도도

식 (6)에 의해 1GHz에서 전자기파 차폐성능 80dB를 만족하기 위한 금속 코팅 두께별 전기전도도 최소값은 100 μm 에서 0.238E+04S/cm, 200 μm 에서 0.082E+04S/cm, 500 μm 에서 0.019E+04S/cm이며, Figure 5는 금속 코팅의 두께에 따른 전기전도도 측정값을 나타낸다. 전기전도도 측정 결과, 금속의 종류와 상관없이 금속 코팅의 두께가 증가할수록 전기전도도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 용사된 금속 입자가 하지판과 충돌하며 냉각되어 적층되는 과정에서 필연적으로 발생하는 금속 입자들 간의 물리적인 공극으로 인한 결합에 기인한 것으로, 금속 코팅의 두께가 증가할수록 용사된 금속 입자 간의 결합이 증가하여 보다 밀실한 구조가 형성되어 전기전도도가 높아지는 것으로 알려져 있다[12]. 이에, 금속 코팅의 두께가 100 μm 인 경우 CuNi과 CuAl의 전기전도도는 같은 금속 코팅 두께 200 μm 의 전기전도도 대비 0.1% 정도로 매우 낮으며, 다른 금속들의 경우에도 전기전도도가 평균 40% 낮았다. 200 μm 에서 500 μm 로 금속 코팅 두께에 비례하여 전기전도도가 증가하였으며, 코팅 두께 500 μm 에서 모든 금속에서 가장 높은 전기전도도를 보였다. 이러한 결과는 금속 코팅의 두께가 증가할수록 용사 횟수가 증가함에 따라 용사된 금속 입자가 코팅 표면에서 적층되는 시간이 증가되고, 용사된 금속 입자의 총량이 증가하여 금속 코팅에서의 물리적인 공극이 감소하여 입자간의 결합이 향상되어 전기 전도성이 향상되는 것으로 사료된다. 또한 Zn-Al 금속의 경우 Zn, Al 단독 금속 사용과 비교하여 코팅 두께에 따른 전기전도도 차이가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이는 녹는점이 서로 다른 Zn(410°C)과 Al(660°C)을 사용함에 따라 적층되어 냉각되는 과정에서 녹는 점이 높은 Al이 고화되며 생긴 공극에 녹는 점이 낮은 Zn 금속이 스며들어가 고화됨에 따라 두께에 따른 전기전도도의 변화가 작은 것으로 나타났다.

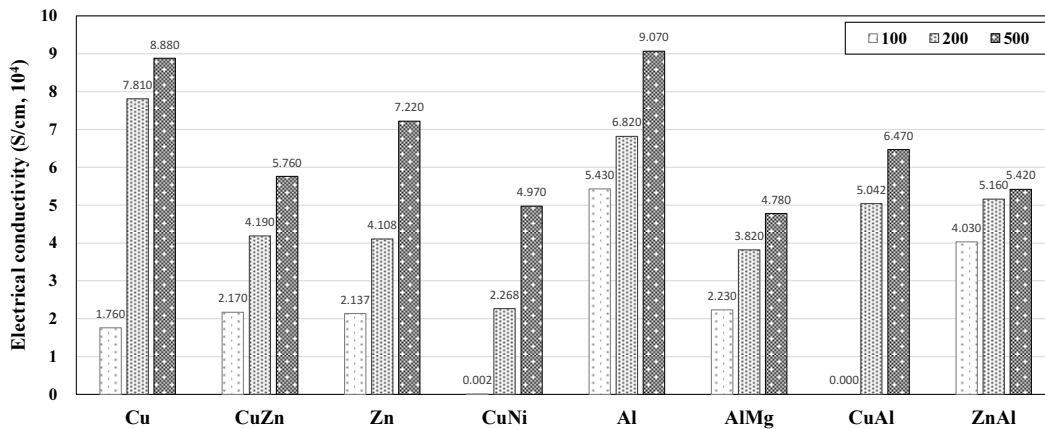


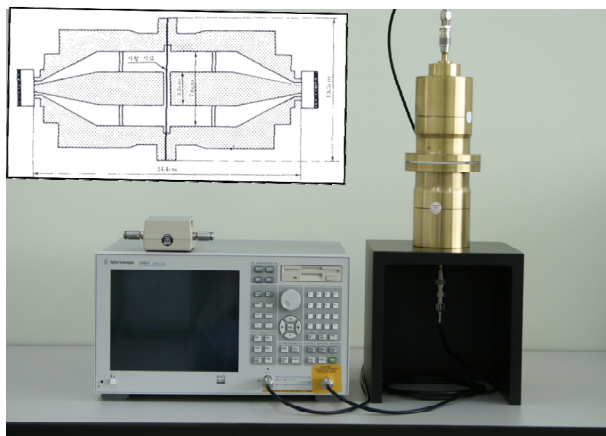
Figure 5. Conductivity measurement of metal coatings

4.2 금속 코팅의 전자기파 차폐 성능

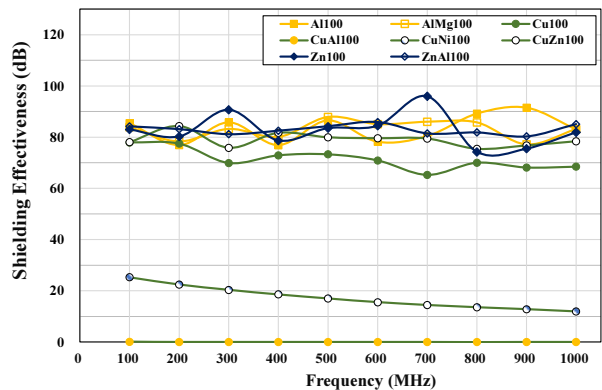
금속 코팅의 코팅 두께 및 용사 금속에 따른 전자기파 차폐 성능은 KS C 0304에 의해 진행되었으며 사용한 장비는 Figure 6(a)와 같으며, 실험 결과는 Figure 6(b)~(d)와 같다. 전자기파 차폐 성능은 전자기파의 주파수에 따라 변화하며, 주요 시설에

대해 1GHz에서 최소 전자기파 차폐 성능 80dB로 요구되어지고 있다[5]. Figure 5(b)는 금속 코팅 두께 100 μ m 시험체의 전자기파 차폐성능을 나타내며, 1GHz에서 대부분의 금속에서 80dB의 성능을 만족하였다. 하지만 전기전도도가 가장 높은 Cu의 경우 68dB의 차폐 성능을 보였으며 CuAl 및 CuNi 금속은 10dB 이하로 차폐 성능이 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 전기전도도 시험 결과에서 나타났듯이, CuNi 0.002E+04S/cm, CuAl 0.000E+04S/cm의 낮은 전기전도도로 인하여 반사 손실 및 투과 손실로 인한 전자기파 차폐 성능을 확보할 수 없다. Cu의 경우 1.760E+04S/cm 전기전도도를 보였으나, 200 μ m 두께의 Cu 코팅의 전기전도도와 비교할 경우 약 22.5%로 낮다. 이는 100 μ m에서 발생된 공극으로 전자기파가 차폐되지 않고 그대로 투과되어 전자기파 차폐 성능이 감소한 것으로 판단된다. 반면 금속 코팅 두께가 200 및 500 μ m로 증가할 경우 모든 시험체에서 1GHz에서 80dB의 전자기파 차폐 성능을 보였으며, 두께 증가에 따른 성능 차이는 관찰되지 않았다.

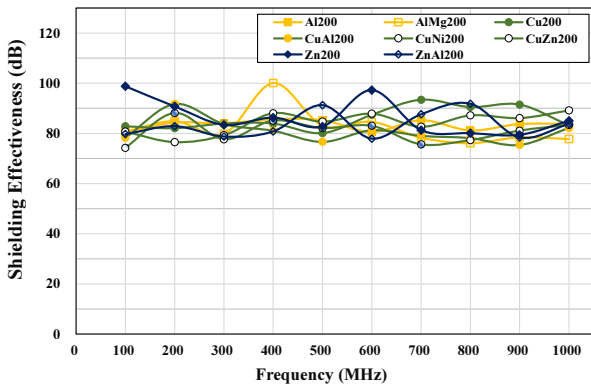
금속 코팅 두께에 따른 전자기파 차폐 시험 결과 100 μ m 두께에서도 요구되는 전자기파 차폐 성능 80dB를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, Cu, CuNi 및 CuAl 금속과 같이 녹는 점이 높은 금속을 사용할 경우 요구되어지는 전자기파 차폐 성능을 만족할 수 없는 것으로 나타났다. 이는 용사된 금속 입자가 적층되는 과정에서 발생하는 공극으로 기인한 것으로, 용사 과정에서 발생하는 공극으로 인한 성능 저하를 방지하기 위해서는 200 μ m 이상의 금속 코팅 두께가 유효하다. 한편, 금속 코팅 두께 200 μ m와 500 μ m의 경우 1GHz에서 전자파 차폐 성능은 80dB 이상을 모두 만족하기 때문에 금속 용사 과정에서 용사 횟수와 사용되는 금속 선재의 소모량을 고려하였을 경우 최적의 전자파 차폐를 위한 금속 코팅의 두께는 200 μ m로 판단된다.



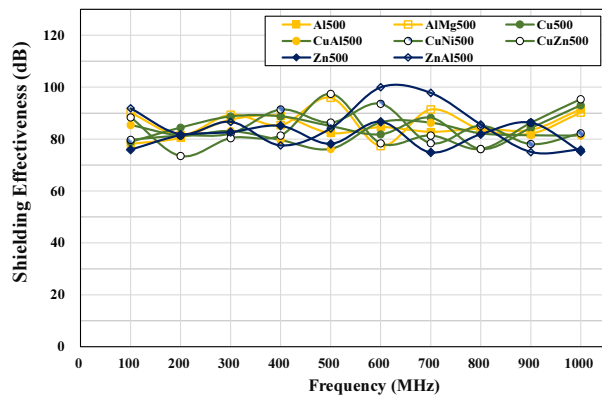
(a) KS C 0304 test equipment



(b) EMP shielding effect result : 100 μ m



(c) EMP shielding effect result : 200 μ m



(d) EMP shielding effect result : 500 μ m

Figure 6. EMP shielding effect measurement of metal coatings

4.3 콘크리트의 전자기파 차폐 성능 및 부착 성능

Figure 7은 200 μm 두께의 금속 코팅을 용사한 콘크리트 시험체의 전자기파 차폐 결과를 나타낸다. 용사를 하지 않은 Plain 콘크리트의 경우 전자기파 차폐 성능은 10dB 이하로 차폐 성능을 기대할 수 없었다. 반면 200 μm 금속 용사를 실시한 경우, 1GHz에서 모든 시험체가 80dB 이상의 전자기파 차폐 성능이 확보된 것을 확인할 수 있었으며, 이는 앞선 금속 코팅의 전자기파 차폐 시험 결과와도 일치한다. 따라서 콘크리트 구조물을 대상으로 전자기파 차폐 성능을 확보하기 위한 방안으로 200 μm 두께로 금속 용사를 실시할 경우 요구되어지는 전자기파 차폐 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 콘크리트와 금속 코팅의 부착 시험은 KS F 4716을 준용하여 9개소에 대해 부착강도를 평가하였다. ZnAl 금속의 경우 1.11MPa로 가장 높은 부착 강도를 보였으며, Cu 금속은 0.25MPa로 가장 낮은 부착 성능을 보였다. 이는 콘크리트와 금속 코팅의 계면에서의 파리가 발생하여 목표 성능인 1.5MPa를 만족하지 못한 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트와 금속 코팅간의 부착 성능 향상을 위해서는 콘크리트 표면의 전처리 과정(샌드 블라스트, 치핑, 화학적 처리 등)을 통해 표면의 미세한 요철을 형성하여 콘크리트와 금속 코팅 간의 기계적인 부착을 유도하는 연구가 필요할 것으로 판단되어진다.

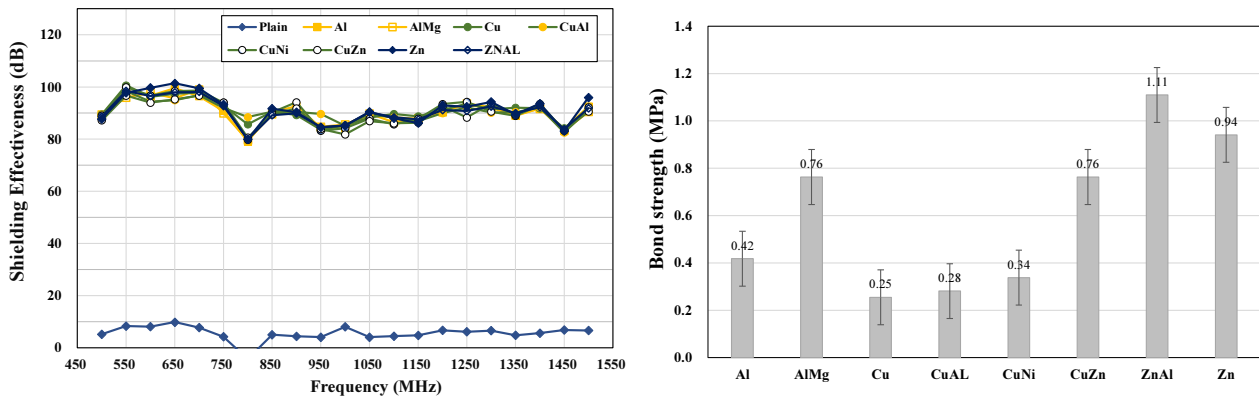


Figure 7. EMP shielding effect and bond strength measurement of concrete : 200 μm metal sprayed

5. 결론

본 연구에서는 전기 전도성이 낮은 콘크리트의 전자기파 차폐 성능을 확보하기 위해 아크 금속 용사 공법을 적용하였다. 금속 코팅 두께에 따른 전기 전도도 시험 결과 200 μm 이상의 코팅 두께의 경우 사용한 모든 금속에서 식 (6)에 의거하여 목표한 전기 전도도 0.082E+04S/cm을 만족하는 것을 확인하였으며, KS C 0304에 의거한 전자기파 차폐 시험 결과에서도 200 μm 이상의 코팅 두께에서 1GHz에서 전자파 차폐 성능 80dB이상 확보하였다. 이는 용사된 금속 입자가 표면에 충돌하여 냉각되고 적층되는 과정에서 필연적으로 발생하는 물리적 결함을 고려할 때 200 μm 이상의 코팅 두께 확보가 필요하다. 또한 금속 코팅 두께 200 μm 와 500 μm 의 금속 코팅 시험 결과에서 모두 목표한 전자파 차폐 성능을 만족하였으나, 500 μm 의 경우 용사 과정에서 용사 횟수와 소비되는 금속 선재량을 고려하였을 경우 동일한 성능을 보이는 200 μm 두께가 전자기파 차폐를 위한 최적의 금속 코팅 두께로 판단된다. 콘크리트 시험체에 200 μm 두께의 금속 용사 코팅할 경우 1GHz에서 80dB 이상의 전자기파 차폐 성능을 확보하여 전기 전도도가 없는 보통의 콘크리트의 전자기파 차폐를 위해 아크 금속 용사 공법이 유효한 것을 확인하였다. 한편 부착 성능이 최대 1.11MPa로 목표 성능 대비 74% 이하로 콘크리트와 금속 코팅 계면에서의 파리가 발생하는 문제점이 발견되어 향후 추가적인 연구를 통해 콘크리트 표면의 처리 방법에 따른 부착 성능 및 전자기파 차폐에 미치는 영향에 대한 검토가 필요할 것으로 판단되어진다.

요약


본 연구에서는 기존의 전자기파 차폐 성능이 없는 콘크리트를 대상으로 아크 금속용사 공법을 적용하여 전자기파 차폐 성능을 확보하고자 한다. 이를 위해 금속 코팅의 두께에 전기적 특성을 평가하기 위해서 8 종류의(Cu, CuAl, CuNi, CuZn, Al, Zn, ZnAl, AlMg) 금속들을 두께 100, 200 및 500 μ m의 금속 코팅으로 제작하여 4pin-probe로 표면에서의 전기전도도를 측정하였고, KS C 0304에 의거하여 전자기파 차폐 성능 시험을 실시하였다. 금속 코팅 시험 결과를 토대로 전자기파 차폐를 위한 최적의 금속 코팅 두께 200 μ m를 제안하였으며, 이를 300×300×100mm 콘크리트 시험체에 용사하여 전자기파 차폐 성능을 분석한 결과 목표 성능 1GHz에서 80dB의 전자기파 차폐 성능이 확보됨을 확인하였다. 하지만 부착 강도의 경우 최대 1.11MPa로 목표 성능 대비 74% 이하로 확인되어 추후 콘크리트 표면에 미세한 요철을 형성하여 부착 성능을 향상시키는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

키워드 : 아크 금속 용사, 전기전도도, 전자기파 차폐, 금속 코팅 부착 강도


Funding

This research was supported by a grant(20S CIP-B146646-03) from Construction Technology Research Project funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korea government.

ORCID

Jong-Min Jang,  <https://orcid.org/0000-0002-6965-6994>

Hwa-Rang Jeong,  <https://orcid.org/0000-0002-1503-4962>

Han-Seung Lee,  <https://orcid.org/0000-0001-9776-5859>

References

1. Broad WJ. Nuclear pulse (I): Awakening to the chaos factor. *Science*. 1981 May;212(4498):1009-12. <https://doi.org/10.1126/science.212.4498.1009>
2. Wilson C. High altitude electromagnetic pulse (HEMP) and high power microwave (HPM) devices: Threat assessments. Library of Congress Washington DC Congressional Research Service; 2008. p. 1-19.
3. Lee WJ, Lee H, Kim YJ. Literature review on material development and performance evaluation method for EMP shielding concrete. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*. 2020 Dec;21(12):67-76. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.12.67>
4. Chung DDL. Materials for electromagnetic interference shielding. *Materials Chemistry and Physics*. 2020 Nov;255:123587. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123587>
5. MIL-STD-188-125-1. High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) protection for ground-based C41 facilities performing critical, time-urgent missions - part 1 fixed facilities. USA: Department of Defense Interface Standard; 1998. p. 1-96.
6. Jeong YC, Yuk JG. Design and construction of high-power electromagnetic pulse protection facilities. *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*. 2021 Jul;23(4):3-15.
7. Choi HJ, Park JH, Min TB, Jang HO, Lee HS. 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*; 2019 Jun; 19(3):209-17. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2019.19.3.209>
8. González M, Mokry G, Nicolás M, Baselga J, Pozuelo J. Carbon nanotube composites as electromagnetic shielding materials in GHz range. London: Carbon Nanotubes chapter 11; 2016. p. 297-321. <https://doi.org/10.5772/62508>
 9. Jung M, Hong SG. Evaluation on high altitude electromagnetic pulse (HEMP) protection performance of carbon nanotube (CNT) embedded ultra-high performance concrete (UHPC). *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*. 2019 Apr;22(2):151-61. <https://doi.org/10.9766/KIMST.2019.22.2.151>
 10. Lee NK, Park GJ, Park JJ, Kim SW. 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*. 2019 Mar;23(2):37-43. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.2.37>
 11. Lee HS, Park JH, Sing JK, Choi HJ, Mandal S, Jang JM, Yang HM. Electromagnetic shielding performance of carbon black mixed concrete with Zn – Al metal thermal spray coating. *Materials*. 2020 Feb;13(4):1-16. <https://doi.org/10.3390/ma13040895>
 12. Jang JM, Lee HS, Sign JK. Electromagnetic shielding performance of different metallic coatings deposited by arc thermal spray process. *Materials*. 2020 Dec;13(24):1-15. <https://doi.org/10.3390/ma13245776>