

EMP 방호용 철근콘크리트의 취약대역 보완을 위한 두께 및 도료 적용 방법 연구

Study of Thickness and Paint Application Methods to Supplement Vulnerable Areas of Reinforced Concrete for EMP Protection

장 홍 제 · 최 명 렬*

Hongje Jang · Myungryul Choi*

요 약

무선 제어, 자동화, 통신의 사용이 증가함에 따라 기반시설은 전자기 공격에 점점 더 취약해지고 있다. 기존에는 금속 차폐실을 설치하여 인프라를 보호하였다. 그러나 차폐실 구축은 비용이 많이 들고, 공간 비효율성, 유지 관리 등의 단점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 콘크리트에 차폐 재료를 첨가하는 방법이 연구되고 있다. 본 논문에서는 기존의 철근 콘크리트와 차폐 철근 콘크리트의 전자기적 특성을 비교하였다. 먼저 시뮬레이션으로 구조물에 대한 차폐효과를 예측하였다. 그 중 차폐 콘크리트는 자갈을 전기로에서 발생한 산화철 슬래그로 대체하였으며, 차폐효과를 측정하기 위해 MIL-STD-188-125-1을 참고하였다. 기존 콘크리트의 차폐효과는 100~300 MHz 주파수 대역에서 낮게 나타나며, 이러한 특성은 차폐 철근 콘크리트에도 영향을 미치게 되어 낮은 차폐효과가 나타난다. 따라서, 차폐 콘크리트 구조물의 취약 주파수 대역을 보완하는 방법이 제안되었다. 그 방법은 차폐 재료를 함유한 수용성 도료를 도포하고 콘크리트의 두께를 증가시키는 방법이다. 특히 제안된 보완 방법은 사람의 안전에 초점을 맞추고 건물의 건설 과정에 미치는 영향을 최소화하는 것을 목표로 한다. 그리고 보완 방법을 적용한 콘크리트 구조물의 차폐효과를 측정하였다. 제안된 보완 방법은 주요 인프라에 60 dB 이상의 차폐효과가 나타나는 것이 검증되었다.

Abstract

Building infrastructure is becoming increasingly vulnerable to electromagnetic attacks with increasing use of wireless control, automation, and telecommunication. Infrastructure can be protected by installing shielded rooms constructed of metal. However, such rooms are expensive to build and have disadvantages including space ineffectiveness and maintenance. Developing methods to add shielding materials to the concrete can help solve the problem. In this paper, we compare the electromagnetic properties of traditional reinforced concrete and shielding-reinforced concrete. Based on the simulation results, structures were built and the shielding effectiveness was measured. The shielding concrete was prepared by replacing the gravel with ferrous oxide slag from electric arc furnaces; MIL-STD-188-125-1 was referenced to measure the shielding effectiveness. The shielding effectiveness of traditional concrete and concrete reinforced with shielding is low in the frequency band of 100~300 MHz. Thus, methods to improve the shielding effectiveness of shielding-concrete structures were proposed. The methods include applying water-soluble paint containing shielding materials and increasing the concrete thickness, focusing on safety and minimizing the impact on building construction. The shielding effectiveness of concrete structures using these methods was measured. The proposed solution was determined to be realistic, with a shielding effectiveness exceeding 60 dB for major infrastructure.

Key words: Shielding Concrete, Electromagnetic Shielding, EMP Protection

「이 연구는 산업통상자원부 유망 시험서비스 개발 사업(과제번호: 20026049) 연구비의 지원으로 연구되었음.」

한양대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Hanyang University)

· Manuscript received November 9, 2023 ; Revised November 23, 2023 ; Accepted December 14, 2023. (ID No. 20231109-094)

· Corresponding Author: Myungryul Choi (e-mail: choimy@hanyang.ac.kr)

I. 소 개

현재 고출력 전자기파(EMP)의 위협이 우리에게 미치는 영향이 점차 확대되고 있다. 전자기기의 확산과 데이터의 산업화로 인류의 생활과 안전은 정보통신과 밀접한 관계를 가지게 되었다. 병원정보 및 금융정보, 개인정보, 군사정보 등은 암호화된 서버에 보관되어 있다. 이러한 정보들은 EMP의 영향으로 파괴될 수 있는데, 이 상황을 방지하고자 여러 방호 기술들이 사용되고 있다. 특히나 전자파 차폐실을 통한 공간 전체를 보호하는 것이 일반적인 방법으로 사용되고 있다. 하지만 차폐실의 건축은 많은 비용과 공간적 비효율성, 유지보수의 어려움 등의 문제가 있어, 민간에서는 차폐실 구축을 기피하는 경향이 있다. 이 문제의 해결방안 중 하나로 차폐용 철근 콘크리트(SRC)가 연구되고 있다^{[1]~[4]}.

따라서 본 논문은 차폐용 철근 콘크리트에 대해 전자파 해석과 제작 모형의 차폐효과 측정을 통하여 분석하였다. 특히 실현 가능한 재료를 기반으로 만들어진 차폐용 재료를 사용하였는데, 건축물에 적용하기에 충분한 양과 싼 비용, 인체 안전에 문제가 없는 재료를 필수조건으로 하였다. 이러한 제한적인 조건으로 만들어진 SRC 구조물은 전체가 금속인 차폐실에 비해 낮은 차폐효과를 가진다. 하지만, 건축물 전체를 차폐공간으로 만드는 장점으로 해당 한계를 극복할 수 있을 것이다. 본 논문에서 콘크리트 건축물의 차폐효과는 MIL-STD-188-125-1의 방법을 참고하여 측정하였으며, 측정 주파수는 10 kHz~1 GHz다.

II 장에서는 콘크리트의 유전율 및 전도율을 도출하는 방법에 대해 간략히 설명하였다. 이렇게 도출된 물성은 전자파 시뮬레이션에 활용된다. III 장에서는 일반 철근 콘크리트(GRC, generic reinforced concrete)에 대해 시뮬레이션과 측정결과를 비교하였다. IV 장에서는 차폐 철근 콘크리트(SRC, shielding reinforced concrete)에 대해 시뮬레이션과 측정결과를 비교하여, 취약 주파수 대역에 대해 확인하였다. V 장에서는 취약 주파수 대역을 극복하기 위한 보완방법에 대해 제안하였다. 보완방법은 실제 건축물에 적용할 수 있도록 안전하고 경제적이며, 가능한 추가적인 건축절차가 발생하지 않도록 제안하였다. 그리고 보완방법으로 인한 차폐효과 개선 결과에 대해 분석하였다.

II. 콘크리트 물성 추출

콘크리트 구조물 제작에는 많은 시간과 비용이 발생한다. 따라서 시뮬레이션을 통한 사전예측은 중요한 절차이다. 전자파 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 대상물체의 유전율, 투자율, 전도성과 같은 물성정보가 반드시 필요하다. 이러한 물성정보를 추출하는 일반적인 방법으로 NRW(nicolson-ross-weir) 방법이 있다. 도파관이나 안테나를 VNA(vector network analyzer)와 함께 사용하여 S-parameter 정보를 측정하고 식 (1)~식 (4)의 NRW 공식을 활용한다^{[5][6]}.

$$\epsilon_r = \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{4\pi^2}{A^2} + k_c^2 \right) \quad (1)$$

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1}, \quad X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (2)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (3)$$

$$\frac{1}{A^2} = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln(T) \right]^2 \quad (4)$$

ϵ_r 은 비유전율이고, μ_r 은 비투자율이며, 여기서는 비투자율을 1로 가정하여 계산한다^[7]. k_c 는 컷-오프 파수($k_c = \pi/a$ 구형 도파관), S_{11} , S_{21} 은 S-parameter 값이며, L 은 측정 시편의 길이, Γ 은 반사계수, T 은 투과계수이다. S-parameter 값은 그림 1과 같이 0.3 m×0.3 m×0.1 m의 콘크리트 블록을 제작하여 측정하였다.



그림 1. S-파라미터를 측정하고 콘크리트의 재료 특성을 추출하기 위한 실험 구성

Fig. 1. The experimental setup to measure the S-parameters and to derive the material properties of concrete.

NRW 식을 적용한 유전율 결과 값은 다음과 같다. GRC의 상대유전율은 X-band의 평균값으로 실수는 4.4이고 허수부는 0.072이다^[8]. 그리고 SRC는 상대유전율은 X-band의 평균값에서 실수부는 5.3이고 허수부는 1.9로 가정한다^[9]. CST에서 curve fitting으로 10 kHz~1 GHz 범위의 유전율을 계산하는 기능을 활용하였다. 철근의 경우에는 완전도체로 설정하였다. 이 정보를 활용하여 CST studio에서 시뮬레이션을 수행하였다.

III. 일반 철근 콘크리트 분석

3-1 철근 콘크리트의 철근 두께 및 간격

차폐용 철근 콘크리트(SRC)를 제작하기 이전에 일반 철근 콘크리트(GRC)에 대해 먼저 분석하였다. SRC는 추가되는 전도성 물질을 제외하고 구조적으로는 GRC와 동일하게 제작하여 비교할 것이다. GRC의 두께와 철근의 종류, 철근의 간격에 대한 선정은 일반적인 건축물에 사용되는 조건으로 철근의 지름은 16 mm이고 간격은 150 mm로 선정하였다^{[10],[11]}. 시뮬레이션에서 콘크리트 벽의 크기는 2 m×2 m×0.25 m로 설정하였다.

3-2 일반 철근 콘크리트(GRC)의 차폐효과 시뮬레이션 결과

앞의 콘크리트 물성과 구조정보를 CST Studio에 입력하였으며, 일반적인 철근, 콘크리트, 철근 콘크리트에 대한 각각의 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 그림 2와 같이 나타나며, 일반적으로 콘크리트의 경우 대부분의 차폐효과는 철근이 지배적인 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 그리고 약 100 MHz에서부터 차폐효과가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 해당 지점에서 전자파 차폐효과의 취약한 대역의 시작을 확인할 수 있다.

3-3 일반 철근 콘크리트(GRC)의 차폐효과 측정결과

GRC 구조물에 대해서 MIL-STD-188-125-1을 준용하여 차폐효과를 측정하였다. 10 kHz~20 MHz에서는 loop 안테나, 20 MHz~300 MHz에서는 biconical 안테나, 300 MHz~1 GHz에서는 log-periodic안테나를 사용하였다. 실

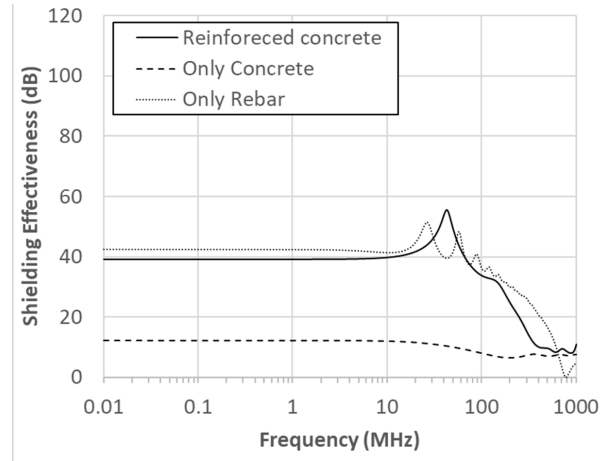


그림 2. GRC의 차폐효과에 대한 시뮬레이션의 결과
Fig. 2. Simulated shielding effectiveness of GRCs.

제 제작된 GRC 구조물은 최대한 시뮬레이션과 동일하게 제작되었지만, 건축물 제작 중에 발생하는 오차는 ± 2 cm 정도로 작지 않다. 또한, 시뮬레이션에서는 평면파를 입사하였고, 측정에서는 10 MHz 이하는 loop 안테나로 전자파를 방사하여 결과의 오차가 발생한 것으로 예상된다. 다만, 차폐효과의 경우 기준 값과 투과 값의 차이를 보기 때문에 송신신호의 차이를 감소시킬 수 있다.

GRC의 차폐효과는 그림 3과 같이 보여준다. 이 그래프에서는 비교를 위해 MIL-STD-188-125-1의 pass/fail 곡선도 함께 표시하였다^[12].

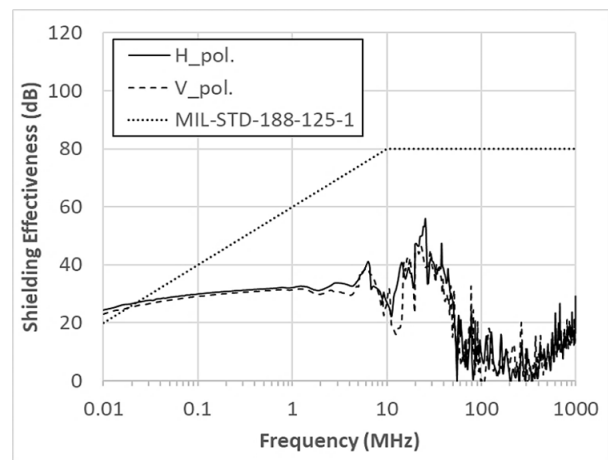
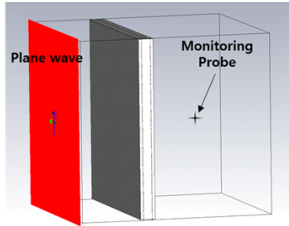


그림 3. GRC의 차폐효과 측정결과
Fig. 3. Measured shielding effectiveness of GRC.



(a) 시뮬레이션을 위한 GRC 구조
(a) GRC structure for the simulation



(b) 차폐효과 측정을 위해 제작된 GRC 구조 사진
(b) A photograph of the GRC structure that was constructed to measure the shielding effectiveness

그림 4. GRC의 차폐효과 시뮬레이션을 위한 모델링
Fig. 4. Modeling for the Simulation of the shielding effectiveness of GRC.

$$SE_{80dB} = \begin{cases} 20\log(f) - 60 & 10kHz \leq f < 10MHz \\ 80 & 10MHz \leq f < 1GHz \end{cases} \quad (5)$$

자기장이 지배적인 대역인 10 MHz이하에서는 약 20~30 dB로 큰 변화가 없는 차폐효과가 나타나지만 30 MHz 전후로 급격하게 차폐효과가 변화한다. 그리고 300 MHz 부터 차폐효과가 조금 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 측정결과는 그림 2의 GRC 시뮬레이션 결과와 유사함을 확인할 수 있다. 측정결과에서 취약 주파수 대역은 차폐효과가 거의 0 dB이고 약 100~300 MHz에 있다는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 시뮬레이션에 활용된 GRC의 모델과 제작된 콘크리트 벽의 차폐효과를 측정하는 사진이다. 시뮬레이션에서는 평면파를 입사하여 감쇄되어 투과된 전기장의 세기를 계산하였다.

IV. 차폐 철근 콘크리트 분석

4.1 차폐 철근 콘크리트(SRC)의 차폐효과 시뮬레이션 결과

제작하기 이전에 SRC에 대한 시뮬레이션도 수행하였

다. 본 논문에서 SRC는 전자파 차폐 재료로 전기로 산화 슬래그가 자갈 대신에 골재로 사용되었다^[12]. 전기로 산화 슬래그는 제철소에서 철을 가공하면서 발생하는 부산물로 산업폐기물이다. 하지만 철 성분을 포함하고 높은 전도성과 강도를 보유하여 자갈을 대체할 수 있다. 전기로 산화슬래그는 산업폐기물로 별도의 비용을 지불하고 버리는 것이 원칙이지만 차폐용 콘크리트에 재활용하는 것으로 다른 차폐물질과 비교하여 비용 절감과 환경적 이득을 취할 수 있다. 다만 하나의 차폐 재료만을 사용하는 SRC는 다른 비싸고 좋은 차폐 재료를 첨가한 경우와 비교하여 차폐효과가 낮을 수밖에 없다^{[12]~[14]}. 모델의 형상은 GRC와 동일하게 2 m×2 m×0.25 m이며, 콘크리트의 물리적 특성을 SRC에 맞게 변경하였다. 본 결과를 비교하기 쉽게 MIL-STD-188-125-1의 pass/fail 곡선을 참고하여 그래프에 함께 표시하였다.

그림 5의 시뮬레이션 결과와 같이 취약 주파수 대역에서는 GRC와 동일하게 차폐효과가 감소하는 것을 확인할 수 있다. SRC에 포함된 차폐재료는 특정 주파수 대역에서 전자파를 차단하는 것이 아닌 대체로 모든 주파수에서 일정하게 전자파를 차단한다. 그래서 취약 주파수대역의 차폐효과가 개선되었지만, 주변보다는 낮은 특성을 보여준다.

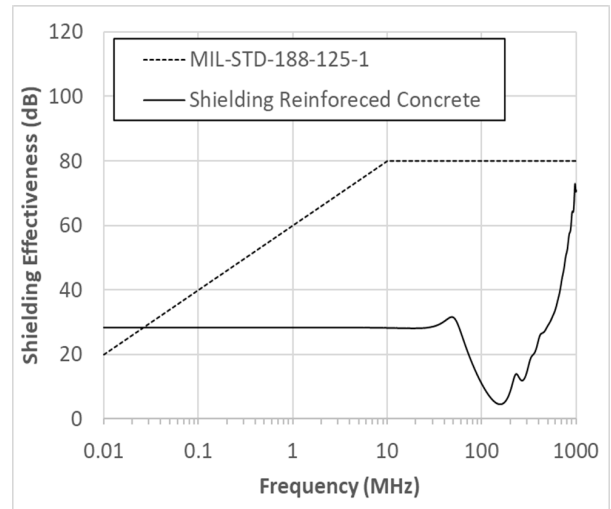


그림 5. SRC의 차폐효과에 대한 시뮬레이션의 결과
Fig. 5. Simulated shielding effectiveness of SRC.

4-2 차폐 철근 콘크리트(SRC) 구조물 설계

차폐용 철근 콘크리트(SRC) 구조물은 그림 6과 같이 설계되었다. SRC는 건축물 전체에 적용할 수도 있지만, 일부분에만 적용도 가능하기에 일반 콘크리트와 혼합되도록 설계하였다. 그림 6에서 어두운 부분이 SRC이며, 밝은 부분은 GRC이다. 건축물의 크기는 3.5(W) m×3.8(L) m×3.5(H) m이며, 출입을 위한 문과 환풍구 및 전원 출입구가 설치된다. 벽의 두께는 위치에 따라 250(전면, 측면), 500(천장), 550(후면) mm가 있다.

사람과 전원의 출입을 위해 설치되는 개구의 전자과 환경 영향을 최소화했다. 개구의 모서리에 사각 파이프를 설치하고 철근의 끝과 금속 파이프 면을 용접하였다. 사각 파이프 위에 철판과 가스켓, 허니컴을 설치하였다. 사각 파이프와 철근의 용접은 그림 7과 같다.

4-3 차폐 철근 콘크리트(SRC)의 차폐효과 측정결과

차폐용 철근 콘크리트(SRC) 구조물의 차폐효과를 측정한 결과는 그림 8과 같다. 저주파 대역에서는 변화가

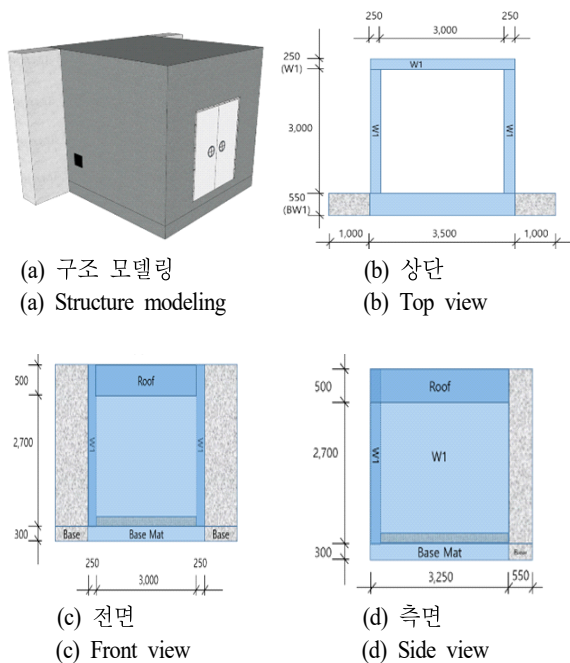
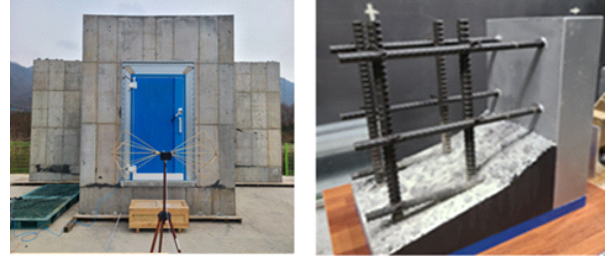


그림 6. SRC 구조물의 설계도
Fig. 6. Design of the SRC structure.



(a) 건축 완료된 SRC 구조물 (b) 철근과 금속 파이프 간의 용접 모델
(a) Final structure of SRC (b) The welded model of the rebars and rectangular pipes

그림 7. SRC 구조물과 철근의 전기적 연결 모델

Fig. 7. SRC structures and electrical connection model between rebars.

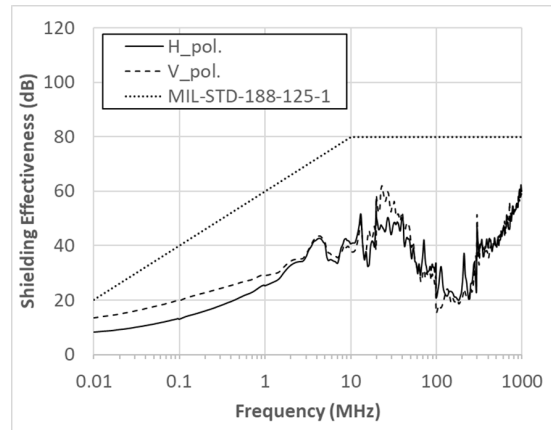


그림 8. SRC 구조물에서 250 mm벽의 차폐효과 측정결과
Fig. 8. Measured shielding effectiveness of the 200-mm-thick wall in the SRC structure.

적지만 10 MHz 이상에서 차폐효과가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5의 시뮬레이션 결과와 유사한 취약 주파수 대역(100~300 MHz)이 동일하게 나타난다. GRC를 측정한 결과인 그림 3과 비교하면 대체로 차폐효과가 상승한 것을 확인할 수 있다. 10 MHz 이하에서는 차폐효과가 감소하였지만, 30 MHz 이상에서는 차폐효과가 대체로 증가하였다. 100~300 MHz에서는 약 20 dB가 상승하였고, 300 MHz 이상에서는 40 dB 이상 상승하였다.

V. 보완을 위한 방법 연구

SRC를 사용하였지만, 전자과 차단 및 EMP 방호를 위

한 활용에는 부족함이 있다. 특히, 취약 주파수 대역이 큰 문제로 나타난다. 이것을 보완하기 위한 방법은 현재 다양한 기술이 존재하고 있다. 하지만 본 논문에서는 SRC 활용이 넓게 보급될 수 있도록 적절한 경제성과 안전성이 보장되는 방법 두 가지를 제안한다. 첫 번째는 수용성 차폐 도료를 사용하는 것이다^{[15]~[17]}. 콘크리트가 굳은 뒤에 마감으로 도료를 칠하는 것은 일반적인 절차로 건축물에 적용할 수 있다. 그리고 다양한 차폐 도료가 있지만, 지용성과 고분자 화합물을 포함한 도료는 화재 시 유독 가스를 배출하기 때문에 건축물에 바르는 것은 적합하지 않다. 따라서 전도성 물질을 포함한 수용성 도료를 제안한다.

두 번째 방법은 콘크리트 두께를 두껍게 하는 것이다. 제작된 SRC의 설계도인 그림 6을 보면 하나의 벽면 두께가 다른 것을 확인할 수 있다. 그것은 건축물의 외벽의 위치이며, 두께가 550 mm이다. 두꺼운 벽에는 더 많은 차폐 물질이 들어있으며, 자연스럽게 차폐효과가 상승하게 된다. 하지만 건축물의 모든 부분을 두껍게 만드는 것은 비효율적이다. 따라서 건축물의 가장 외각의 벽만을 두껍게 하는 방식이 추천된다. 고출력 전자파가 침투하면서 반드시 지나는 경로에서 많은 양의 에너지를 차단하도록 설계하는 것이 효율적인 것이다.

각각의 보완 방법이 차폐효과에 얼마나 영향을 주는지 측정을 통해 확인해 보았다. 두께가 550 mm인 벽의 차폐효과를 측정하였다. 그림 8 및 그림 9의 결과를 비교하면 두꺼운 콘크리트 벽의 차폐효과가 증가한 것을 확인할 수 있다. 두께로 인한 차폐효과 상승은 대부분의 주파수에서 나타났다. 두께의 영향으로 300 MHz 이후에는 약 40 dB가 상승하였는데, 반면에 10~30 MHz에서는 크게 개선되지 않은 결과를 보여준다.

기본 250 mm 두께의 벽에 수용성 도료를 약 0.2 mm로 바른 뒤 말린 후 2일 후에 차폐효과를 측정하였다. 사용된 도료의 상세한 정보는 참조논문 [16]에 있다. 차폐 도료만 적용한 차폐효과 결과는 그림 10과 같다. 그림 8과 비교하면, 자기장 대역에서는 차폐효과가 크게 개선되지 않았다. 반면에 약 5 MHz부터 차폐효과가 개선되었으며, 취약 주파수 대역에서도 차폐효과가 개선된 것을 확인할 수 있다.

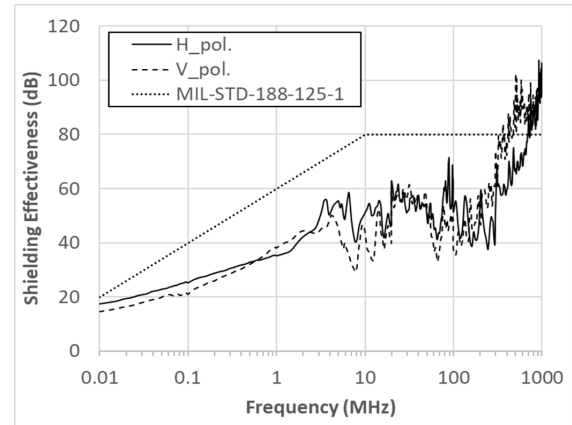


그림 9. SRC 구조물에서 550 mm벽의 차폐효과 측정결과
Fig. 9. Shielding effectiveness of the 550-mm-thick wall in the SRC structure.

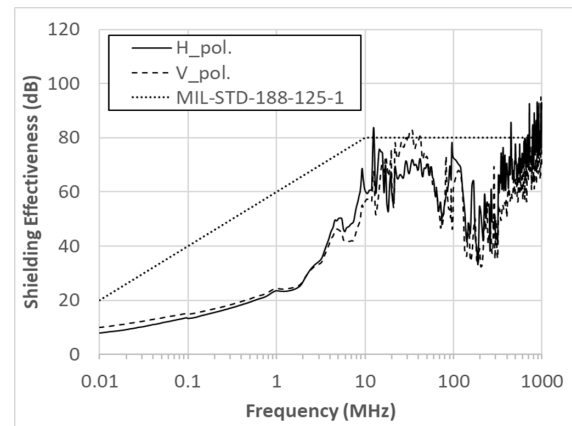


그림 10. SRC 구조물 내부에 차폐도료를 칠한 뒤 250 mm벽의 차폐효과 측정결과
Fig. 10. Shielding effectiveness of 250-mm-thick wall after applying shielding paint inside the SRC structure.

마지막으로 그림 11과 같이 두 가지 보완방법을 동시에 적용한 결과에 대해 측정하였다. 전 주파수 대역에서 차폐효과가 개선되는 것을 확인할 수 있다. 300 MHz 이상에서는 80 dB를 초과하는 수준으로 차폐효과가 증가하였다.

VI. 결 론

본 연구에서는 자갈 대신 전기로 산업폐기물인 재활용 가능한 산화물 슬래그를 포함한 차폐 콘크리트의 차폐효

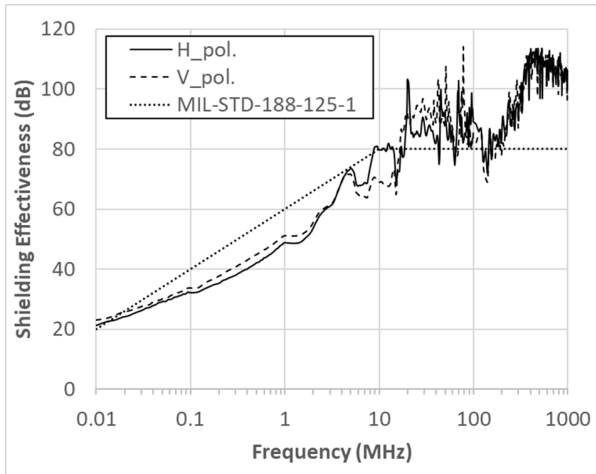


그림 11. SRC 구조물 내부에 차폐도료를 칠한 뒤 550 mm벽의 차폐효과 측정결과

Fig. 11. Shielding effectiveness of 550-mm-thick wall after applying shielding paint to the interior side of this wall of the SRC structure.

과를 분석하였다. 재료의 전기적 특성은 작은 콘크리트 블록에서 도출하여 시뮬레이션에 적용되었다. 그리고 동일한 철근 콘크리트 구조물을 시공하여 차폐효과를 측정하였다. 철근 콘크리트의 전자기적 특성에 따라 100~300 MHz 주파수 대역에서 낮은 차폐효과로 취약점이 나타났다.

따라서 제안된 보완 방법을 사용하면 이러한 부족한 차폐효과를 60 dB 수준으로 향상할 수 있다. 첫 번째로는 벽의 두께를 늘리게 되면 전체 주파수 범위에 걸쳐 차폐 효과가 향상된다. 그러나 군용 건물에 사용되는 차폐 구조물과 달리 민간 건물에는 두꺼운 벽을 사용할 수 없다는 단점이 있다. 두 번째로는 기존 페인트 대신 수용성 차폐 페인트를 벽에 적용할 수 있다. 지용성 도료나 고분자 도료 대신 수용성 도료를 사용해야 하며, 고분자 도료는 화재 시 유독가스로 인명에 위험을 초래할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 산화물 슬래그는 저렴한 비용으로 조달이 쉽고 구조물 전체 또는 구조물의 일부에 걸쳐 사용할 수 있다. 그리고 제안한 두 가지 보완 방법은 추가 공정이 필요하지 않으며, 건축물 제작의 공정과 동일하게 진행된다. 따라서 기존의 건축 비용 대비 약 20 %가 상승할 것으로 예상되지만, 수십 m급 금속 차폐실 비용인 수십억 원을 절약할 수 있고 유지보수 비용도 적게 든다는

점에서 이점이 있다. 이러한 제안된 차폐 방법은 널리 적용 가능하며 군사 또는 민간 구조물에 사용될 수 있을 것이다. 따라서 제안된 방법을 사용하면 미래의 전자전에서 발생할 수 있는 테러와 공격으로부터 공간을 확보하고 보호할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] H. Jang, M. Choi, T. Song, and S. Kim, "Method for optimization of a shielding effectiveness measurement system using shielding concrete blocks for IEMI," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 118278-118289, 2022.
- [2] L. Nguyen, A. Krause, C. Tuan, J. D. Blasey, J. P. Zemotel, and H. McNerney, et al., "Shielding effectiveness performance of conductive concrete structures," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity(EMCSI)*, Washington, DC, Aug. 2017, pp. 360-363.
- [3] L. Nguyen, "Conductive concrete structures for EMP protection of critical infrastructure facilities," *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 26-33, Mar. 2019.
- [4] S. Hyun, K. Lee, and J. Yook, "Modeling of shielding effectiveness of reinforced concrete walls for electromagnetic pulse," in *42nd European Microwave Conference*, Amsterdam, Oct.-Nov. 2012, pp. 779-782.
- [5] *Standard Test Method for Measuring Relative Complex Permittivity and Relative Magnetic Permeability of Solid Materials at Microwave Frequencies Using Waveguide*, ASTM D 5568-22, 2022.
- [6] A. N. Vicente, G. M. Dip, and C. Junqueira, "The step by step development of NRW method," in *2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference(IMOC 2011)*, Natal, Oct.-Nov. 2011, pp. 738-742.
- [7] A. L. de Paula, M. C. Rezende and J. J. Barroso, "Modified nicolson-ross-weir(NRW) method to retrieve the constitutive parameters of low-loss materials," in

- 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference(IMOC 2011), Natal, Oct.-Nov. 2011, pp. 488-492.
- [8] H. H. Lee, J. H. Lim, and J. W. Lee, "Estimation of electromagnetic field penetration into concrete buildings using a theoretical approach considering external environmental factors," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 3, pp. 212-223, May 2023.
- [9] K. Cho, S. Jo, Y. H. Noh, N. Lee, S. Kim, and J. G. Yook, "Complex permittivity measurements of steel fiber-reinforced cementitious composites using a free-space reflection method with a focused beam lens horn antenna," *Sensors*, vol. 21, no. 23, p. 7789, Nov. 2021.
- [10] *High Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions*, MIL-STD-188-125-1, 2005.
- [11] K. Lim, N. Lee, G. Ryu, K. Koh, and K. Kim, "Electrical characteristics of ultra-high-performance concrete containing carbon-based materials," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 15, p. 7858, Aug. 2022.
- [12] N. Lee, S. Kim, and G. Park, *Electromagnetic Shielding Characteristics of High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites*, Cham, Springer Cham, 2021, vol. 30.
- [13] H. J. Jang, H. H. Lee, H. S. Choi, T. S. Song, and W. S. Cho, "A study on validation of the shielding effectiveness measurement method of the concrete containing electric arc furnace oxidizing slag," *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, vol. 9, no. 4, pp. 478-482, Dec. 2021.
- [14] J. Kruželák, A. Kvasničáková, K. Hložeková, and I. Hudec, "Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding," *Nano-scale Advances*, vol. 3, no. 1, pp. 123-172, Jan. 2021.
- [15] K. P. Jang, S. H. Kim, "Evaluation of electromagnetic pulse shielding effectiveness and bonding performance of inorganic paint based on carbon material," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 22, no. 1, pp. 801-807, 2021. DOI. 10.5762/KAIS.2021.22.1.801.
- [16] I. V. Tudose, K. Mouratis, O. N. Ionescu, C. Romanitan, C. Pachiu, and M. Popescu, et al., "Novel water-based paints for composite materials used in electromagnetic shielding applications," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 3, p. 487, 2022.
- [17] C. Liang, Y. Du, Y. Wang, A. Ma, S. Huang, and Z. Ma, "Intumescent fire-retardant coatings for ancient wooden architectures with ideal electromagnetic interference shielding," *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 4, pp. 979-988, May 2021.

장 홍 제 [한양대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-2948-1525>



과 박사과정

[주 관심분야] RF, EMC, EMP 방호 등

2014년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2016년 2월: 광주과학기술원 기전공학부 (공학석사)
2016년 7월~현재: 한국산업기술시험원 선임연구원
2021년 3월~현재: 한양대학교 전자공학

최 명 렬 [한양대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4311-6241>



과 교수

[주 관심분야] RF, EMC, VLSI/SoC 설계 등

1983년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 2월: 미국 Michigan State University 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
1991년 2월: 미국 Michigan State University 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
1992년 9월~현재: 한양대학교 전자공학