

EMP 차폐 콘크리트 개발 및 성능평가 방법에 관한 문헌 연구

이웅종*, 이환, 김영진
(사)한국콘크리트학회 공학연구소

Literature Review on Material Development and Performance Evaluation Method for EMP Shielding Concrete

Woong-Jong Lee*, Hwan Lee, Young-Jin Kim
Korea Concrete Institute Research Center

요약 본 연구는 고출력 전자기파(EMP)를 차폐할 수 있는 콘크리트의 개발 방향과 차폐성능 평가방법의 표준화에 필요한 기술의 개발 방향을 도출하기 위한 목적으로 수행되었다. 콘크리트와 같은 복합재료를 대상으로 한 EMP 차폐 메커니즘은 아직 규명되지 않았고, 콘크리트 재료의 EMP 차폐성능에 대한 검증 방법도 아직 표준화가 되어 있지 않아, 연구자 간의 연구결과를 객관적으로 상호 비교분석하는데 어려움이 발생한다. EMP 차폐 콘크리트의 개발 방향은 금속 분야에서 널리 알려진 전자파 손실 메커니즘의 고찰로부터 도출하였다. 콘크리트의 EMP 차폐성능 검증을 위한 표준화 방향은 콘크리트의 전기적 성질과 그 동안 콘크리트를 대상으로 연구한 차폐성능 평가방법들의 고찰로부터 도출하였다. 연구결과, EMP 차폐 콘크리트 개발은 전기 전도성을 부여한 콘크리트의 재료개발이 우선하여야 하며, EMP 차폐 콘크리트의 재료개발 과정 중에는 전자파 손실 메커니즘별로 구분한 시험방법을 적용하고, 개발 제품의 최종 품질검증에는 일반화된 차폐성능 평가법(MIL-STD 등)을 준용한 시험법을 적용하면, 유효성이 입증된 콘크리트 차폐재 개발 및 성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

Abstract The purpose of this study was to derive the directionality of technology development of high-power electromagnetic pulse (EMP) shielding concrete and standardization of a shielding performance evaluation method. Because the EMP shielding mechanism of concrete has not been identified clearly, and the verification method for EMP shielding performance has not been standardized, it is difficult to compare the research results between researchers. The development direction of EMP shielding concrete was derived from a consideration of the electromagnetic wave loss mechanism of metal. The standardization direction for verifying the EMP shielding performance of concrete was derived from a consideration of the electrical properties of concrete and the shielding performance evaluation methods of previous studies. As a result, the development of electrically conductive concrete is required, and test methods classified by the electromagnetic wave loss mechanism should be applied. For quality verification, the development of EMP shielding concrete will be feasible and its performance can be evaluated if a test method referencing the generalized shielding evaluation method (MIL-STD, etc.) is applied.

Keywords : EMP, EMP Shielding, Electrical Resistivity of Concrete, Conductive Concrete

본 논문은 국토교통부 건설기술연구사업 연구과제로 수행되었음.(20SCIP-B150830-03)

*Corresponding Author : Woong-Jong Lee(Korea Concrete Institute Research Center)

email: woojon94@kci.or.kr

Received October 28, 2020

Accepted December 4, 2020

Revised December 1, 2020

Published December 31, 2020

1. 서론

고대 로마시대부터 현재에 이르기까지 요구되어 온 콘크리트의 성능은 강도, 시공성 및 내구성이었다. 현재, 강도면에서는 180 MPa급의 초고강도 콘크리트가 실현되었고[1], 시공성면에서는 고유동 콘크리트의 현장적용으로 콘크리트 타설공정에서 진동 다지기 작업의 간소화로 노동력의 절감이 가능하게 되었고, 새로운 혼화제의 개발 및 광물질 혼화재료의 적용으로 콘크리트의 내구성도 증진되어 왔다.

한편, 최근 경제 및 사회 시스템의 변화와 가치관의 다양화로 콘크리트에는 기존의 요구성능인 강도, 시공성 및 내구성 이외에, 전자파 차폐라고 하는 새로운 성능이 요구되고 있다.

고출력 전자기펄스(EMP: Electro-Magnetic Pulse)란 전자장비를 파괴시킬 정도의 강력한 전기장과 자기장을 지닌 순간적인 전자기적 충격파이다. 전자기펄스 현상은 1950년대에 실시된 미국의 핵폭발 시험에서 최초로 확인되었다[2].

한 국가의 인프라망은 전력망, 통신망, 금융망, 도로망 등으로 구성되어 있고, 이들 인프라망은 정보통신망(유무선 네트워크와 컴퓨터 체계)과 밀접하게 연결되어 운용되는데, 인위적(예를 들면 핵폭탄 등 EMP 무기) 또는 자연적(예를 들면 태양풍)으로 발생하는 순간적인 고출력 전자기파에 의해 피해가 발생할 경우, 사회 및 경제적으로 큰 혼란을 야기할 수 있으며, 실제로 인명 피해가 발생한 사고도 보고되어 있다.

보안 시설을 포함한 건축물은 국내의 경우 약 70~80%가 철근콘크리트로 구성되어 있으며, EMP 차폐성을 갖는 콘크리트용 소재, 재료 및 구조체 개발은 사회적, 경제적, 군사적, 정책적 필요에 부합하는 기술로서 떠오르는 차세대 기능성 콘크리트로서 기대를 모으고 있다.

현재, EMP 차폐성을 갖는 콘크리트의 복합재료 개발에 대한 대표적인 연구로는 강, 스테인리스, 니켈 등을 소재로 한 섬유를 혼입한 콘크리트[3,4], 카본블랙, CNT(carbon naotube), 산화그래핀 등의 탄소소재를 혼입한 콘크리트[5-7], Fe 함량이 높은 제강슬래그를 활용한 파우더, 잔골재 또는 굵은골재를 첨가한 콘크리트[8,9] 등이 있지만, EMP 차폐 메커니즘을 기반으로 한 콘크리트 복합재료의 개발 방법론 연구가 아니며, 전도성을 갖는 소재를 콘크리트에의 적용유무에 따른 차폐성능 향상 정도를 파악하는 연구결과들이 대부분이다. 또한 콘크리트의 EMP 차폐성능 평가방법에 대한 표준화가 아직

확립되어 있지 않아[10], 각 연구자가 채택한 시험법에 근거한 연구결과들은 차폐성능의 개선 정도를 객관적으로 상호 비교분석함에 있어 어려움이 있고, 유효성이 입증된 차폐 콘크리트의 개발 및 성능검증 단계로 진입하는데 아직 시간이 필요한 실정이다. 또한, 앞으로 개발될 EMP 차폐 콘크리트의 구성재료 및 물성이 차폐성능에 미치는 영향에 대한 연구도 후속적으로 진행시켜야 할 연구과제이다.

따라서 본 연구는 고출력 전자기파(EMP)를 차폐할 수 있는 콘크리트의 개발 방향과 차폐성능의 표준화에 필요한 기술개발의 방향성을 도출하기 위한 목적으로 수행되었다. EMP 차폐 콘크리트의 개발 방향은 금속재료 분야에서 널리 알려진 전자파 손실 메커니즘의 고찰로부터 도출하였고, 콘크리트의 EMP 차폐성능 검증을 위한 표준화 방향은 콘크리트의 전기적 성질, 그 동안 콘크리트를 대상으로 연구한 차폐성능 평가방법들의 고찰로부터 도출하였다.

2. 전자파 손실 메커니즘 및 EMP 차폐 콘크리트의 개발 방향 제언

과학 기술이 점차 발달함에 따라 무기체계에 최첨단 정보통신기술이 적용되고 있으며, 모든 정보통신 기반체계는 유·무선 네트워크와 컴퓨터 체계가 전기적으로 결합되어 있다[11]. 만일 순간적으로 큰 전력을 갖는 EMP 전자폭탄을 의도적으로 방사하면, 전자기기의 오작동을 유도하거나 심하게는 파괴에 이르도록 하여 적을 교란시킬 수 있는 무기가 된다. 따라서 EMP에 의한 방호대책이 없는 상태에서 EMP 공격을 받는다면 정보체계 운용이 마비되고 통신수단의 운용이 제한될 수 있다.

또한, 핵폭발 시 발생하는 감마선에 의해 대기 중의 원자가 이온화함으로써 발생하는 강력한 전자기 폭풍도 EMP이며, 아주 짧은(100 nsec) 길이를 갖는 초광대역의 단일펄스 전자기 에너지로 알려져 있다. EMP는 통상적으로 고출력 전자기파(HPEM: High Power Electromagnetic)를 통칭하는 용어으로써, 핵폭발로 인해 발생하는 핵EMP(NEMP: Nuclear EMP)와 전자 폭탄이나 고출력 전자파 발생기에 의해 직접적으로 전자파를 발생시키는 비핵EMP(NNEMP: Non-Nuclear EMP), 그리고 낙뢰와 같은 자연현상에 의해 발생하는 LEMP(Lighting EMP)로 분류되며[12], EMP 종류별 주요 특성값은 Table 1과 같다[11].

Table 1. Types and main characteristics of EMP

	EMI	HEMP	HPEM(IEMI)
Frequency range	30 Mhz~6 GHz(RE) 9 khz~30 MHz(CE)	~500 MHz	100 MHz~10 GHz
Electric field strength	3 V/m(50 V/m)	50 kV/m	hundreds of V/m~ hundreds of kV/m
Scope of impact	~ dozens of m	~ hundreds of km	~ hundreds of m
	electric·electromechanical equipment	power·communication network	IDC, nuclear power
Source	electric·electromechanical equipment	nuclear explosion, lightning	high-power radiator(E-bomb)

2.1 EMP 차폐 이론 및 차폐 메커니즘

EMP 차폐는 전자기파가 차폐물을 만나 전계 강도가 손실되는 효과를 말한다.

현재, 철근 콘크리트와 같은 복합재료를 대상으로 한 전자기파 차폐 메커니즘은 아직 이론적 및 실험적으로 명확히 규명되지 않은 영역이지만, 금속소재와 같은 균질한(homogeneous) 재료인 경우, 쉘쿠노프(Schelkunoff) 이론 등을 활용하여 전자파 차폐효과를 예측할 수 있다고 알려져 있다.

이 연구에서는 쉘쿠노프(Schelkunoff) 이론으로부터 유도된 전자파 차폐효과와 관련된 주요 관계식들을 KS C 0304[13]를 참조하여 이 절에서 일부 인용·기술하였으며, 이것으로부터 콘크리트가 전자파 차폐성능을 부여하기 위해 갖추어야 할 차폐소재에 대해 고찰하였다.

금속판에 의한 전자파 차폐효과와 가장 간단한 해석은 무한히 큰 차폐면에 의해 신호의 송수신 부분을 구분하여 생각하는 쉘쿠노프의 전송선 이론에 의해 계산될 수 있으며, 전자파가 차폐 벽면에 도달하여 투과하는 동안 일어나는 현상을 Fig. 1과 같이 모형화 할 수 있다.

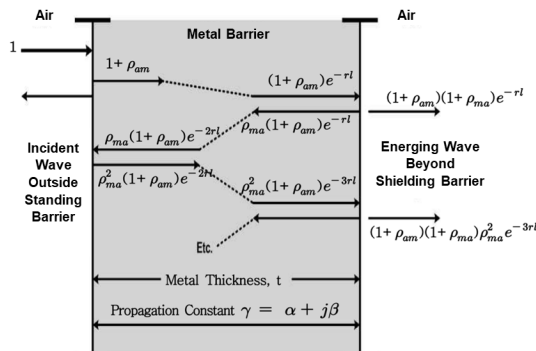


Fig. 1. Geometric model of metal plane explaining shielding effectiveness

입사하는 반대쪽 공간으로 전달되어진 전체 전자기장의 세기를 입사 전자파의 세기에 대하여 표준화하면 식 (1)과 같다.

$$\Gamma_T = e^{-\gamma t}(1-\rho_{am})(1-\rho_{ma})\left[1+e^{-2\gamma l}\rho_{ma}^2+e^{-4\gamma l}\rho_{ma}^4+\dots\right] = e^{-\gamma t}(1-\rho_{am})(1-\rho_{ma})\left(1-\rho_{ma}^2e^{-2\gamma l}\right)^{-1} \quad (1)$$

여기서, $\gamma=(\alpha+j\beta)$ 는 차폐재료 내부에서의 전자기파상수, α 는 감쇄상수이며, $\beta(=2\pi/\lambda)$ 는 위상상수이다, 그리고, ρ_{am} 는 공기에서 금속 경계면으로 입사하는 전자파의 반사계수(공기에서 금속으로 파가 전파)이고, ρ_{ma} 는 금속에서 경계면으로 입사하는 전자파의 반사계수(금속에서 공기로 파가 전파)이며, 각각 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$\rho_{am} = \frac{Z_m - Z_w}{Z_m + Z_w} = \frac{1 - K}{1 + K} \quad (2)$$

$$\rho_{ma} = \frac{Z_w - Z_m}{Z_w + Z_m} = \frac{K - 1}{K + 1} \quad (3)$$

여기서 $K(=Z_w/Z_m)$ 는 파동 임피던스(Z_w)와 재료의 특성 임피던스(Z_m)의 비이다. 식 (1)~식 (3)을 이용하여, 다시 정리하면, 식 (4)와 같이 된다.

$$\Gamma_T = e^{\alpha t} \frac{4K}{(1-K)^2} \left[1 - \left(\frac{K-1}{K+1}\right)^2 e^{-2\gamma l}\right]^{-1} \quad (4)$$

이것을 대수 단위로 변환하여 전자파 차폐효과(SE: Shielding effectiveness)로 표현하면, 식 (5)와 같이 된다.

$$SE(dB) = 20 \log \left(\frac{1}{\Gamma_T} \right) \quad (5)$$

$$= 20 \log \left[e^{\alpha t} \frac{(1+K)^2}{4K} \left\{ 1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\gamma l} \right\} \right]$$

식 (5)의 차폐효과(SE_{dB})는 Fig. 2에서 설명하는 바와 같이 3가지 메커니즘을 통해 이루어진다[14].

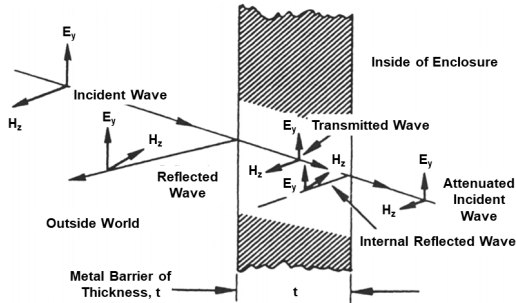


Fig. 2. Interaction between electromagnetic waves and metal barriers

첫 번째 메커니즘은 입사 에너지가 공기-금속 경계의 임피던스 불연속으로 인해 차폐의 표면에서 반사되는 반사손실(R_{dB}, 단일-반사손실)이며, 이것은 특정한 두께의 재료를 필요로 하지 않고, 임피던스의 불연속 조건만 있으면 된다.

두 번째 메커니즘은 차폐 표면을 통과하는 에너지(즉, 반사되지 않은 에너지)가 차폐 재료를 통과하면서 감쇠되며[도전손실(conductive loss), 유전손실(dielectric loss), 자성손실(magnetic loss)에 의해 전자파가 열에너지로 바뀌어 소실, 흡수 손실(A_{dB})이라 한다.

세 번째 메커니즘은 차폐의 반대쪽 면에 도달하는 에너지가 또 다른 공기-금속 경계를 만나게 되며, 그 중 일부는 차폐 방향으로 재반사되며, 다중-반사손실(B_{dB})이라 한다.

따라서 위의 메커니즘으로부터 식 (5)의 차폐효과는 흡수손실(A_{dB}), 단일-반사손실(R_{dB}), 다중-반사손실(B_{dB})의 합으로 표현될 수 있으며, 선택된 차폐 재료의 물리적 성질로부터 이들 값을 계산할 수 있다.

전자파 차폐에 이용되는 금속재료의 흡수손실(A_{dB})은 재료의 두께와 물리적 성질에 의존하지만, 입사하는 전자파의 성질에는 무관하며, 식 (6)과 같이 결정된다.

$$A_{dB} = 131.4t \sqrt{f\sigma_r \mu_r} \quad (6)$$

여기서, t는 재료의 두께(mm), f는 입사하는 전자파의 주파수(MHz), σ_r 는 재료의 비전도율(구리클 기준), μ_r 는 재료의 비투자율(구리를 기준)이다.

식 (6)으로부터 전자파 차폐를 위해 사용하고자 하는 재료의 흡수손실(A_{dB})은 주어진 두께에 대해 재료의 전도율과 투자율에 따라 결정됨을 알 수 있다. 대부분의 금속 재료는 높은 전도율을 가지지만 비교적 낮은 비투자율을

가지는 경우가 일반적이다.

흡수손실(A_{dB})에 비해, 반사손실(R_{dB})은 입사하는 전자파의 성질에 크게 의존하며, 원거리장에서의 평면파의 전자파 반사손실은 식 (7)과 같다.

$$R_p = 108.1 - 10 \log \left(\frac{\mu_r f}{\sigma_r} \right) \quad (7)$$

여기서, 원거리장의 조건을 만족하는 평면파 반사손실(dB)인 R_p는 차폐 재료의 비전도율에 비례하며, 낮은 주파수에서 크고 주파수가 증가함에 따라 줄어든다.

한편 근거리장에서의 전자파원의 종류에 따라 전기장 또는 자기장의 효과가 상대적으로 커지며, 이들 각각의 경우를 따로 구별해서 취급하여야 한다. 주어진 두께에 대해 차폐재료의 특성 임피던스는 재료의 도전율에 대한 비투자율의 비에 직접적으로 관계되며, 입사하는 전자파의 임피던스와 차폐 재료의 임피던스의 차가 커지면 커질수록 반사는 커지고 좋은 차폐성능을 가지게 된다. 낮은 임피던스를 가지는 근거리장의 경우와 높은 임피던스를 가지는 근거리장의 경우에 대한 반사손실은 KS C 0304 해설을 참조한다[13].

다중 반사손실(B_{dB})은 재료가 불균일하거나 두꺼운 경우 전자파 산란 등에 의해 전자파가 재료를 타고 전혀 다른 방향으로 전달되어 발생한다. 다중 반사손실은 재료의 흡수손실이 15 dB보다 클 때는 무시된다[15].

2.2 EMP 차폐 콘크리트 개발 방향 제언

전자파 손실 메커니즘에 근거하여 콘크리트에 차폐성능을 부여하기 위해서는 개념적으로 3가지를 고려해 볼 수 있다. 첫 번째로 전자파의 흡수손실은 재료의 두께, 전도율, 투자율에 밀접한 관계가 있으므로 콘크리트에 금속 소재, 탄소소재를 혼입하여 전도성을 부여한 콘크리트는 전자파의 흡수손실을 증가시켜 전자파의 차폐성능 향상을 도모할 것이다. 두 번째로 전자파의 단일-반사손실은 재료의 두께와 무관하고, 매질의 고유한 특성인 임피던스에 관계하므로, 단일-반사손실을 고려해 볼 때 콘크리트의 속성변화로 차폐성능을 향상시킬 가능성은 높지 않으나, 금속용사 코팅, 무기질 도장재 기술, 나노 고분자 합성물질 코팅기술을 이용하여 콘크리트 표면개질을 유도하면 차폐성능 향상을 도모할 수 있을 것이다. 세 번째로 전자파의 다중-반사손실의 경우, 두꺼운 콘크리트 구조체 내에서는 전자파 산란이 손실을 크게 발생시킬 것이며, 철근콘크리트 구조체 내에서의 시멘트 매트릭스와 철근 등과의 임피던스 차이로 손실이 또한 발생할 것이며, 게다가 철근의 양, 배근 방향 및 배근 층과 밀접하게 관계

하며 손실이 발생할 것이다. 그리고 강섬유 혼입 콘크리트 구조체내에서의 재료의 임피던스의 차이로 다중-반사 손실도 발생할 것으로 예상되지만, 이에 대한 영향에 대해 규명하는 연구결과는 앞으로도 기대가 된다.

3. 콘크리트의 EMP 차폐성능 평가방법의 고찰

3.1 콘크리트의 전기적 성질 고찰

전자파 손실 메커니즘에 근거하여 콘크리트의 흡수손실을 높이기 위해서는 콘크리트에 전도성을 부여하는 것이 중요하다는 것을 2장에서 알 수 있었다. 모르타르 혹은 콘크리트의 전기적 성질을 직접적으로 평가한 연구는 전혀 없지만, 간접적으로 전기적 성질을 다룬 연구로는 전기저항을 측정에 의한 콘크리트의 품질평가 또는 건전도 진단방법 연구분야 등에서 살펴볼 수 있다.

이 연구에서는 콘크리트를 대상으로 전기저항율의 측정방법 및 전기저항율에 미치는 각종 영향요인에 대한 선행 연구결과를 분석하여, 콘크리트의 EMP 차폐성능 검증을 위한 표준화 방향설정에 활용하고자 하였다.

3.1.1 콘크리트의 전기저항율 측정방법

전기저항율의 측정은 주로 2전극법(Fig. 3) 또는 4전극법(Fig. 4)이 이용되고 있다[16]. 4전극법의 측정에 관한 시험기준은 일본 토목학회에서 제정한 「4전극법에 의한 단면복구재의 체적저항률 측정방법(안)(JSC-E-K562)」[17]에 제시되어 있으며, 실 구조물의 단면복구재 및 콘크리트에 대해서도 준용하여 사용할 수 있으며, 콘크리트의 체적저항률의 측정 방법에 관하여 기술되어 있다.

또한, 등 간격으로 늘어선 네 개의 전극을 측정 대상면에 딱 눌러, 외부 전류 전극에서 교류 전류를 인가하여 측정 대상에 흐르는 교류전류와 전위차 전극 사이의 전위차를 측정하고 평가하는 방법(이하, 4프로브법)도 있다(Fig. 5)[18].

이들 전기저항율을 측정하는 방법에 대해 Kawanata 등은 기중양생의 동일 공시체를 이용하여 2전극법과 4전극법에서 얻은 전기저항률을 비교한 연구를 수행하였다[18]. 그 결과, 4전극법은 전극을 접촉시킨 직후부터 거의 안정된 측정 값을 얻은 반면, 2전극법에서는 전극 접촉 후에 상당히 큰 값을 보이고 약 10분 정도에서 4전극법과 동등한 값에 수렴하고 있다. 4전극법은 통전극 사이

의 중앙에서 측정 단자를 이용하여 전위차를 측정하기 때문에 통전극의 접촉 저항이 측정값에 미치는 영향은 작지만, 2전극법에서는 통전극 사이의 전위차에서 저항을 구하기 때문에 통전극의 접촉 저항이 영향을 준 것으로 보고하였다.

Mitsumoto 등은 고온조건 하에서 2전극법과 4전극법에 의해 얻어진 전기저항율의 값을 비교하고, 전기저항율은 간편한 시험법인 2전극법에 의해 측정 가능하다는 것을 제시하였다[19].

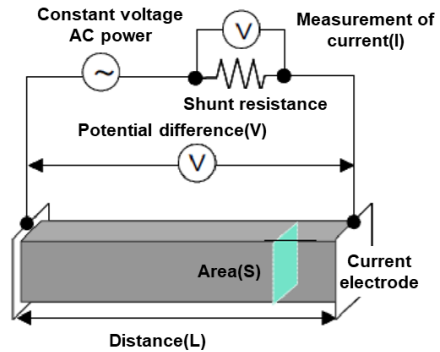


Fig. 3. Measurement by the two-electrodes method

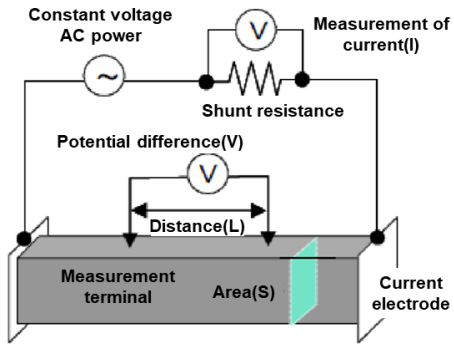


Fig. 4. Measurement by the four-electrodes method

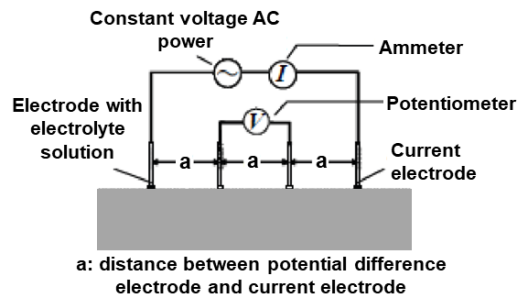


Fig. 5. Measurement by the four probe method

3.1.2 2전극법의 측정조건이 전기저항율에 미치는 영향

콘크리트의 품질평가나 내구성 진단의 한 방법으로 전기저항률의 측정을 수행한 연구는 4전극법에 비해 측정이 용이한 2전극법을 이용한 것이 많은 편이다. 그러나 2전극법은 4전극법과 달리 명확한 측정기준이 없어서 각 연구자간의 전류의 종류(직류, 교류), 전극의 종류, 측정단자간격, 통전 전극의 접촉방법, 주파수, 인가전압 등의 측정조건이 상이하다. 따라서 2전극법 대해 측정조건 차이가 전기저항율에 미치는 영향에 관한 연구를 비교하였다.

Kashima 등은 2전극법을 이용하여 콘크리트 공시체의 저항계측을 교류와 직류로 실시하였고, 그 결과, 전기저항율은 교류에서 측정시작 직후 거의 일정한 값에 수렴하는 반면 직류에서는 수렴 때까지의 시간이 지연되고, 또한 직류에서 측정한 전기저항률은 교류에서 측정한 것보다 크게 된다고 보고하였다[20]. Kitamine 등은 전극 부근의 전극 반응과 함께 분극에 의한 영향이 추가되기 때문에 직류에서 측정한 전기저항율은 교류에서 측정한 것보다 커진다는 비슷한 결과를 얻었다[21].

Noda 등은 주파수를 1~5 MHz 사이에서 변화시킨 시험을 실시하여, 주파수가 커질수록 비도전율(전기저항율의 역수)은 커지게 된다고 보고하였다[22]. Fukugami 등은 「4전극법에 의한 단면복구재의 체적저항률 측정방법(안)(JSCC- K562)」에 기재되어 있는 주파수대(60~100 Hz)를 포함한 5 MHz까지의 전기저항율을 측정한 결과, 주파수가 높을수록 전기저항률은 작아지고, 그 편차는 낮은 주파수 영역에서 크고 높은 주파수 영역에서 작아진다고 하였다[23].

3.1.3 콘크리트의 각종 물성이 전기저항율에 미치는 영향

모르타르 혹은 콘크리트의 전기저항율은 함수율 등의 외부 요인, 배합, 혼화재의 종류 등의 내적 요인에 의해 변화한다는 것이 선행 연구에서 규명되었다. 모르타르 및 콘크리트의 수분 함량이 전기 저항에 미치는 영향에 대해, Omoto 등은 4전극법을 이용하여 전기저항율을 측정하고, 전기저항율은 식 (8)로 정의되는 상대 함수율이 작을수록 커지고, 상대 함수율이 40 ~ 50 % 부근에서 급격하게 증가한다고 보고하였다[24].

$$w(\%) = \frac{m - m_s}{m_t - m_s} \times 100 \quad (8)$$

w : 상대 함수율 (%)

m : 시험시의 시험체 질량

m_s : 시험체의 절건질량

m_t : 침전 직후에 표면을 웨스로 가볍게 닦은 상태의 질량(상대 함수율 100 %)

Ikuta 등은 직류로 측정한 전기저항율과 함수율과의 관계를 세 가지 영역으로 분류하고 함수율 5~7 %는 수분 함량의 증가에 따라 전기저항율은 선형적으로 감소하고, 함수율이 전기저항율에 미치는 영향이 큰 영역, 함수율 7% 이상에서는 일정한 값을 나타내고, 함수율이 전기저항율에 미치는 영향은 작아지는 영역, 함수율 5% 이하에서는 약간의 함수율에 의해 전기저항이 크게 변화하는 영역이 존재한다고 보고 있다[25].

물 시멘트비가 전기저항율에 미치는 영향에 대해 Enohara 등은 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트가 포화상태에서 전기저항율을 측정하였으며, 전기저항율은 물결합재비의 증가에 따라 감소한다고 보고하였다[26].

잔골재, 굵은골재가 전기저항율에 미치는 영향에 대해, Kitamine 등은 20 ℃에서 수중에 침적한 시멘트 페이스트, 모르타르, 콘크리트의 전기저항율을 비교하여, 시멘트 페이스트보다 모르타르에서, 모르타르보다 콘크리트에서의 전기저항율이 커진다고 보고하였다[27]. 또한 Fukugami 등은 주파수 5 MHz에서 전기저항율은 시멘트 페이스트 보다 모르타르에서, 모르타르 보다 콘크리트에서 크고, 잔골재, 굵은 골재의 혼입에 의해 크게 영향을 받는다고 보고하였다[23].

결합재의 종류가 전기저항율에 미치는 영향에 대해, Enohara 등은 보통 포틀랜드시멘트의 일부를 혼화재료로 치환(여기에서는 50 % 치환)하는 것에 의해 전기저항율이 증가하고, 보통 포틀랜드시멘트 단독 < 플라이애쉬 (50 % 치환) < 고로슬래그미분말 (50 % 치환) < 실리카 폼 (50 % 치환)의 순으로 전기 저항율이 커지는 결과를 얻었다고 보고하였다[26].

이상의 결과로부터 전자파 흡수 손실에 관계하는 콘크리트의 전기적 성질은 결합재의 종류, 물결합재비, 함수율, 양생조건 등의 영향을 받으므로, 콘크리트 시편의 제작조건은 EMP 차폐 성능에 영향을 미칠 것으로 판단할 수 있다.

3.2 전자파 손실 메커니즘을 고려한 차폐성능 평가 방법

콘크리트를 대상으로 하는 전자파의 흡수손실을 평가할 수 있는 시험방법은 전자레인지에 의한 간이법 및 자유공간법이 알려져 있고, 전자파의 반사손실을 평가할 수

있는 평가방법은 투과법이 알려져 있다[28,29].

전자파의 흡수손실을 평가할 수 있는 간이법은 가정용 전자레인지(700 W, 2.45 GHz)를 사용하여 공시체에 전자파를 60초간 조사한 후, 방사온도계로 공시체의 표면을 측정하는 방법이다. 전자파 조사 후의 온도분포로부터 전자파의 흡수손실을 직접적으로 평가할 수 있는 방법이며, 콘크리트내에서 전자파가 열에너지로 바뀌어 손실되는 현상을 가장 간단하게 평가할 수 간이법이다[29]. 그러나 전자파의 주파수가 2.45 GHz인 특정주파수를 대상으로 하고 있어 불충분한 방법이다.

전자기학 시험법인 자유공간법을 이용하면, 전자파의 흡수성을 정량적으로 평가할 수 있으며, 시험장치의 개요는 Fig. 6과 같다. 자유공간에서 측정할 평판 공시체를 배치하고, 그의 평판공시체에 전자파를 조사할 때의 반사-투과파나 편파 특성을 측정하여 전자파의 흡수성을 평가하는 방법이다.

전자파의 반사손실을 평가할 수 있는 투과법은 전자파를 송신안테나로부터 평판 공시체를 투과시켜 수신안테나에서 수신하며, 이 때의 투과량을 측정하는 것으로 전자파의 반사손실을 측정할 수 있는 시험의 개요는 Fig. 7와 같다.

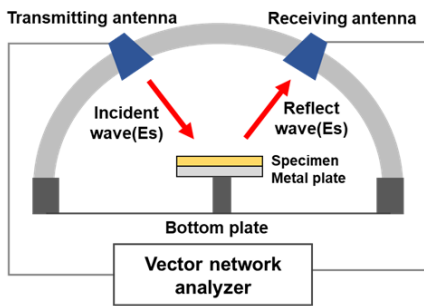


Fig. 6. Overview of the free space law[20]

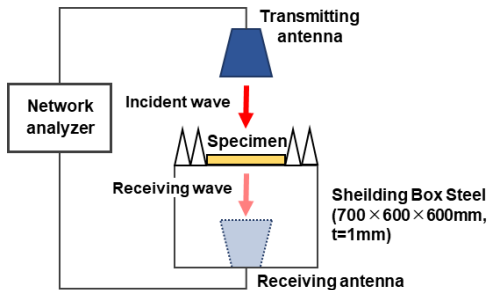


Fig. 7. Overview of the transmission test[20]

3.3 차폐재료의 표준화된 차폐성능 평가방법

표준화된 전자파 차폐효과 시험방법은 미 국립 표준기술연구원(NIST), 미국 국방성(MIL-STD) 그리고 미국시험재료협회(ASTM) 등에서 각각 제정한 IEEE STD 299 (차폐실 차폐효과 표준 측정방법), MIL-STD-188 그리고 ASTM D 4935(평면재료의 차폐효과 표준 측정 시험방법), ASTM E 1851(재배치구조물의 차폐효과 측정 시험방법) 등이 있으며, IEEE STD 299와 MIL-STD-188 시험 방법이 많이 활용되고 있다. 국내에서는 KS C 0304에서 30 MHz~1 GHz 주파수 범위에서의 평면형 재료의 전자파 차폐 측정 절차가 제정되어 있다.

이상의 차폐성능 평가방법에서 다루는 전자파 차폐효과는 식 (9)과 같이 동일 입사전력에 대해서 차폐 재료가 존재할 때와 존재하지 않을 때의 수신전력비 또는 수신전압비로 규정하고 있다.

$$SE(dB) = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) (dB) \tag{9}$$

$$\text{or}$$

$$= 20 \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right) (dB)$$

여기서, P_1 과 P_2 는 각각 차폐 재료가 존재할 때와 차폐재료가 존재하지 않을 때의 수신 전력이며, 수신기 지시값이 전력일 때 사용하는 식이며, V_1 과 V_2 는 각각 차폐 재료가 존재할 때의 수신 전압과 존재하지 않을 때의 수신 전압이며, 수신기 지시값이 전압일 때 사용한다.

식(9)로부터 알 수 있듯이 차폐효과 측정은 전자파의 손실 메커니즘별로 구분하지 않고 재료 자체의 차폐성능을 평가할 수 있는 방법이므로, 개발 재료의 품질검증용으로 활용하는 것이 바람직하다.

3.4 전자파 차폐 시험방법 고찰 결과

전자파 차폐성능을 부여한 콘크리트 재료개발 측면에서는 전자파의 손실메커니즘에 근거한 시험방법을 활용하면, 차폐 소재의 선정 및 최적의 사용량 선정이 가능할 것이다. 한편 이것으로부터 개발된 전자파 차폐 콘크리트의 성능평가는 표준화된 시험방법을 적용하여야 제품의 품질검증 및 현장 수요처의 신뢰성 제고(품질보증)에 활용할 수 있을 것이다.

따라서 전자파의 차폐성능을 부여한 콘크리트 개발에는 전자파 손실 메커니즘에 근거한 시험방법을 활용하여 평가할 필요가 있으며, 최종 개발된 전자파 차폐 콘크리트

트에 대해서는 표준화된 차폐성능 평가방법을 활용하는 것이 바람직하다.

4. 결론

이 연구에서는 EMP 차폐 콘크리트의 개발 방향과 이의 성능검증을 위한 시험방법의 표준화 방향을 도출하기 위해, 전자파 손실 메커니즘 및 성능평가 방법의 고찰로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 전자파 흡수 손실의 관점에서 전자파 차폐 콘크리트 재료의 개발 방향은 전도성을 부여한 콘크리트의 재료개발이 우선하여야 한다.
- (2) 전자파 단일-반사손실의 관점에서는 금속 용사 등을 이용하여 콘크리트 표면의 특성을 개질하면 전자파의 차폐성능을 부여한 콘크리트 개발이 가능할 것이다.
- (3) 전자파 다중-반사손실의 관점에서는 콘크리트 내에 포함되어 있는 강섬유 또는 철근콘크리트와 밀접하게 관계되어 있을 것으로 예상되며, 전자파 손실 메커니즘의 규명도 함께 진행되어야 할 연구 방향이다.
- (4) 전자파 흡수손실에 관계하는 콘크리트의 전기적 성질은 결합재 종류, 물결합재비, 함수율, 양생조건 등에 영향을 받으므로, 전자파 차폐 콘크리트의 개발 및 성능평가법의 표준화 시에는 이에 대한 영향도 반영할 필요가 있다.
- (5) EMP 차폐 콘크리트의 개발과정 중에는 전자파 손실 메커니즘에 근거한 시험방법의 활용이 필요하며, 개발 제품의 품질 검증 및 보증에는 표준화된 차폐시험방법(MIL-STD 등)을 준용하여 표준화하는 것이 바람직하다.

References

- [1] H. S. Woo, "Concrete Technology Innovation and Demand Creation in the Global Construction Markets", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.2, pp.6-8, Mar. 2013.
- [2] J. S. Choi, D. W. Lim, "Electromagnetic pulse generation and application", *Physics & high technology*, Vol.15, No.1/2, pp.36-41, 2006. DOI: <https://doi.org/10.22636/MKCI.2008.20.6.70>
- [3] X. Zhang, W. Sun, "Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.2, pp.329-332, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.014>
- [4] S. K. Lee, G. Y. Kim, E. C. Hwang, M. J. Son, J. W. Baek, J. S. Nam, "Evaluation of Electromagnetic Pulse Shielding Performance of Amorphous Metallic Fiber Reinforced Cement Composite", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, KIC, Vol.18, pp.50-51, Apr. 2010.
- [5] H. Guan, S. Liu, Y. Duan, J. Cheng, "Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials", *Cement and Concrete Composites*, Vol.28, No.5, pp.468-474, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.004>
- [6] B. Chen, K. Wu, W. Yao, "Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites", *Cement and Concrete Composites*, Vol.26, No.4, pp. 291-297, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00138-5)
- [7] B. Wang, Z. Guo, Y. Han, T. Zhang, "Electromagnetic wave absorbing properties of multi-walled carbon nanotube/cement composites", *Construction and Building Materials*, Vol. 46, pp. 98-103, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.006>
- [8] T. B. Min, H. K. Choi, CH. C. Kim, J. W. Kim, D. H. An, "A Study on the EMP Shielding Properties of Concrete Using Steel Slag", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.19, No.1, pp. 170-171, 2005
- [9] Y. J. Kim, C. K. Lee, "The UHF Wave Shielding Effectiveness of Mortar with Conductive Inclusions", *Journal of the architectural institute of Korea structure&construction*, Vol.31, No.4, pp.103-110, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.5659/JAIK_SC.2015.31.4.103
- [10] T. S. Lee, EMI, EMC, EMP shielding facility construction technology development planning final report, Korea Institute of Construction Technology, Korea, pp.1-8
- [11] Y. C. Chung, "A study on the introduction of legal EMP protection system", *the journal of Korean institute of electromagnetic engineering and science*, Vol.24, No.8, pp.781~790, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2013.24.8.781>
- [12] N. K. Lee, "EMP Sheilding Concept", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.31, No.4, pp.80-82, Jul. 2019.
- [13] KS C 0304, Method of measurement for the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials, Korean Standard Association, 2014
- [14] H. K. Kim, H. K. Lee, "Development of electromagnetic wave absorbing/shielding construction materials", *Magazine of the Korea*

- Concrete Institute*, Vol.20, No.6, pp.70-74, Nov. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.22636/MKCI.2008.20.6.70>
- [15] T. H. Jang, "Consideration on design and construction of shielded room for EMP protection", *The proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic engineering and science*, Vol.25, No.3, pp.48-57, 2014.
- [16] H. Minagawa, A. Enohara, M. Hisada, "Elementary study on the estimation method of chloride ion diffusion coefficient of mortar by electrical resistivity, Abstract of Cement Technology Conference, Japan Cement Association, No.62, pp.232-235, 2008
- [17] Standards of JSCE, "Measurement method of volume resistivity of cross-sectional restoration materials by four-electrode method(JSCE-K562)", 2015
- [18] K. Kawamata, S. Moriya, H. Naito, H. Minagawa, "Elementary study on electrical resistivity measurement method for cement materials", Annual Papers on Japan Concrete Institute, Vol.26, No.1, pp.1107-1112, 2004
- [19] S. Mitsumoto, Y. Yamazaki, M. Fukuma, R. Takada, "Electrical measurement of concrete using the two-terminal method", Ube College of Technology Research Report, No.49, pp.5-8, March 2003
- [20] T. Kashima, H. Kono, H. Watanabe, Y. Tanaka, "Elementary study on Durability Evaluation of Concrete by Electrical Resistance", Annual Papers on Japan Concrete Institute, Vol.21, No.2, pp.895-900, 1999
- [21] H. Kitamine, H. Seki, Y. Kaneko, "Experimental study on water content and resistivity of concrete", 45th Annual Scientific Lecture Meeting of Japan Society of Civil Engineers, Vol.374, pp.774-775, 1990
- [22] K. Noda, H. Kono, M. Hisada, K. Morihama, "Elementary study on the electrical properties of hardened concrete during alternating current, Annual Papers on Japan Concrete Institute, Vol.25, No.1, pp. 575-580, 2003
- [23] D. Fukugami, M. Mizukoshi, H. Tarao, K. Uematsu, "Examination of measurement method of electrical resistivity of concrete and its influencing factors", 67th Annual Scientific Lecture Meeting of Japan Society of Civil Engineers, Vol.37, pp.73-74, 2012
- [24] T. Omoto, K. Yokoseki, T. Hiraishi, S. Miyazato, "Electrochemical Study on Electrical Resistance Characteristics of Mortar", Annual Papers on Japan Concrete Institute, Vol.27, No.1, pp.907-912, 2005
- [25] S. Ikuta, T. Yamamoto, A. Hattori, T. Miyagawa, "Experimental study on the effects of various factors on the electrical resistivity of concrete", 59th Annual Scientific Lecture Meeting of the Japan Society of Civil Engineers, Vol.95, pp.187-188, 2004
- [26] A. Enohara, H. Minagawa, M. Hisada, "Elementary Study on the relationship between electrical resistivity of mortar and chloride ion diffusion coefficient", Annual Papers on Japan Concrete Institute, Vol.30, No.1, pp.789-794, 2008
- [27] H. Kitamine, H. Seki, Y. Kaneko, "Experimental study on water content and resistivity of concrete", 46th Annual Scientific Lecture Meeting of Japan Society of Civil Engineers, Vol.89, pp.194-195, 1991
- [28] S. Takai, T. Kumano, I. Seiichi, T. Hayashi, "A study on the electromagnetic characteristics of mortar added with conductive material", Annual Papers on Japan Concrete Institute, Vol.35, No.1, pp.1369-1374, 2013.
- [29] Y. Higashida, M. Ando, "Measurement of electromagnetic wave absorption by free-space method in high frequency range", *Ceramic* 37, pp.99~101, 2002

이 응 종(Woong-Jong Lee)

[정회원]



- 1992년 2월 : 충북대학교 구조공학 전공 (공학석사)
- 2002년 2월 : 충북대학교 콘크리트 재료 전공 (공학박사)
- 1994년 5월 ~ 2016년 4월 : 쌍용양회 기술연구소

- 2016년 6월 ~ 2018년 12월 : 성균관대학교 자기치유친환경콘크리트연구센터
- 2019년 7월 ~ 현재 : 한국콘크리트학회 공학연구소

<관심분야>

특수 시멘트 개발, 콘크리트 균열 및 품질관리

이 환(Hwan Lee)

[정회원]



- 2020년 2월 : 울산과학기술원 도시건설공학과 (공학석사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : 한국콘크리트학회 공학연구소

<관심분야>

콘크리트 재료, 미세구조 분석

김 영 진(Young-Jin Kim)

[정회원]



- 1986년 2월 : 연세대학교 콘크리트 전공 (공학석사)
- 1991년 8월 : 연세대학교 콘크리트 전공 (공학박사)
- 1992년 1월 ~ 2017년 12월 : 대우건설 기술연구원
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국콘크리트학회 공학연구소

<관심분야>

EMP 차폐 및 광축매 콘크리트