

강섬유의 구조적 파라미터에 따른 콘크리트의 전자파 차폐효과 분석

Electromagnetic Shielding Effectiveness of the Concrete Composite as a Function of Structural Parameters of Steel Fibers

조성희 · 조경용 · 노영훈 · 이남곤* · 김성욱* · 육종관

Sunghui Jo · Kyeongyong Cho · Yeong-Hoon Noh · Namkon Lee* · Sungwook Kim* · Jong-Gwan Yook

요 약

강섬유는 콘크리트에 함유될 경우, 다양한 건축학적 장점이 있어 자주 쓰이는 소재이며, 이는 도전율이 큰 물질이기에 건축물의 전자파 차폐효과를 증가시키는 역할을 한다. 이에 본 논문에서는 강섬유 보강 콘크리트의 차폐효과를 강섬유의 구조적 파라미터에 따라 분석하였다. Jonscher 모델을 이용하여 콘크리트의 등가 유전율을 추출하였고, 전자기 시뮬레이션 툴을 이용하여 해당 콘크리트를 모델링하였으며, 강섬유의 방향, 개수, 길이에 따른 전자기적 특성을 분석하였다. 그 결과, 강섬유의 구조적 파라미터에 따른 입사파의 편파, 차폐효과의 레벨, 그리고 공진 주파수의 인과관계를 도출하였다.

Abstract

Steel fiber is a material frequently used when contained in concrete because of its various architectural advantages, and it plays a role in increasing the electromagnetic shielding effectiveness (SE) of the building owing to its high conductivity. Thus, this study analyzed the SE of the steel fiber reinforced concrete (SFRC) according to the structural parameters of the steel fiber. The equivalent permittivity of concrete was extracted using the Jonscher model; The concrete was modeled using the electromagnetic simulation tool, and the electromagnetic properties were analyzed according to the orientation, number, and length of the steel fiber. Thus, depending on the structural parameters of the steel fiber, the causal relationship of the polarization of the incident wave, level of the SE, and resonance frequency was derived.

Key words: SE(Shielding Effectiveness), Steel Fiber, Concrete, Jonscher Model, EMP(Electromagnetic Pulse)

I. 서 론

EMP(electromagnetic pulse)는 순간적으로 높은 에너지를 가지는 고출력 전자기파이며, 전자 장비 혹은 시스템 전체에 원치 않는 동작이나 치명적인 고장 및 파괴를 볼

러울 수 있다. 이에 따라 EMP 방호와 관련된 다양한 연구가 진행되고 있으며, 이와 함께 방호 성능을 평가하고 검증하기 위한 기준 및 방법 또한 연구되고 있다. EMP 방호 시설에 대한 성능 지표로는 차폐효과(shielding effectiveness, SE)가 사용되며, MIL-STD-188-125-1&2에 근거

「본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 (과제번호:21SCIP-B146658-04)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*한국건설기술연구원(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

· Manuscript received April 12, 2021 ; Revised April 23, 2021 ; Accepted May 24, 2021. (ID No.20210412-005S)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

하여 준용되고 있다. 특히 국가 주요 시설물의 경우, 최대 80 dB 이상의 차폐효과가 요구되며, 이를 위한 전자파 차폐 시설이 요구된다^{[1]~[4]}.

기존의 차폐 시설은 EMP 방호 대상 장비를 철판과 같은 전도성 재료로 둘러싸 전자파를 차단하는 방식으로 차폐실을 구축한다. 이 경우 문, 환기구와 같은 틈새 또는 이음새에서의 복사성 침투, 그리고 차폐 시설 내부 장비에 전력 공급 또는 통신을 위한 케이블 및 인입반과 관련한 전도성 침투에 대비하여야 한다.

최근 EMP 차폐가 가능한 콘크리트 구조물이 연구되고 있으며, 그 경우 상기 문제를 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이는 건축물 자체의 콘크리트에 복합 목적의 철근 및 전도성 재료가 포함되면 전자파 차폐 성능이 향상됨을 활용한 것이며, 콘크리트에 포함되는 전도성 재료로는 강섬유, 탄소나노튜브 등이 있고, 강섬유는 콘크리트에 함유될 경우 인성, 내구성, 인장 강도 등을 크게 향상시키기 때문에 건축 분야에서 자주 쓰이는 소재이다^[5].

강섬유는 도전율이 큰 물질이기에, 콘크리트에 강섬유를 함유시키는 것은 손실이 있는 유전체에 도체를 추가한 것으로 볼 수 있다. 따라서 강섬유 보강 콘크리트의 경우 일반 콘크리트에 비해 차폐효과가 증가하게 될 것임을 알 수 있고, 이에 강섬유 보강 콘크리트에 대한 차폐효과를 측정하고자 하는 연구들이 진행되고 있다^{[6]~[8]}. 그러나 기존의 연구는 강섬유가 함유된 양, 즉 콘크리트 부피 대비 함유된 강섬유의 부피비에 따른 차폐효과의 변화에 집중하고 있기에, 강섬유의 구조적 특성이 차폐효과에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하는 데에 한계가 있다.

이에 따라 본 논문에서는 강섬유의 어떠한 구조적 요인이 전자파 차폐 성능에 어떠한 영향을 미치는지 전자기적 관점에서 분석하였으며, 분석 결과를 토대로 차폐효과에 영향을 미치는 주요 요인과 그 효과에 대해 정리하였다.

II. 콘크리트의 등가 유전율 모델링

본 절에서는 먼저 강섬유를 포함하지 않은 일반 콘크리트를 모델링하기 위해 콘크리트의 등가 유전율을 추출하였다. 해석하고자 하는 주파수 대역은 0.1 GHz~5 GHz

로 설정하였으며, 최근 연구되는 콘크리트의 차폐 성능을 고려하여 10 dB의 차폐효과를 갖는 콘크리트를 표적으로 삼았다^[9].

콘크리트는 시멘트, 물, 굵은 골재, 잔골재 등 다양한 재료의 배합에 의해 설계되며, 이때 콘크리트의 배합은 건축 분야에서 중요한 이슈로 다루어진다. 이를 전자기적 관점에서 보게 되면 콘크리트의 배합을 어떻게 하느냐에 따라 콘크리트의 물질상수가 변하고, 그에 따른 차폐효과가 변하게 된다. 콘크리트는 상기 배합으로 인해 비균질한 매질이지만, 비균질성을 띄는 물질 즉, 시멘트나 골재 등이 파장에 비해 충분히 작으므로 균질한 매질로 간주할 수 있다^[10]. 따라서 콘크리트의 배합에 의해 달라지는 차폐 특성은 동일한 차폐효과를 내는 등가 유전율로써 표현을 할 수 있게 되며, 일반적으로 콘크리트는 자성을 띄는 재료를 포함하지 않으므로 콘크리트의 비투자율은 1로 가정하였다.

이때 유전율은 앞서 설명한 콘크리트의 배합에 의해 결정되므로 그에 맞는 물리적 특성을 나타낼 수 있어야 한다. 유전체에 외부 전계가 가해질 경우, 해당 물질의 고유한 특성으로 인해 P (분극)와 E (전계) 간의 시간 지연이 발생하고, 이는 주파수 영역에서 다양한 분극 현상으로 나타내어진다. χ (전기 감수율)는 이러한 분극 현상과 전계와의 관계로 나타내어질 수 있으며, Jonscher의 universal dielectric response에 의하면 대부분의 고체 물질이 따르는 전기 감수율의 조건이 존재한다^{[11],[12]}. Jonscher 모델은 이를 유전율로 표현한 것이며 식 (1)에 나타내었고, 이는 콘크리트의 분산 특성을 나타내기 위해 적합하다^{[10],[13],[14]}.

$$\epsilon_c(\omega) = \epsilon_0 \chi_r \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[1 - j \cot \left(\frac{n\pi}{2} \right) \right] + \epsilon_\infty \quad (1)$$

이때 ϵ_0 는 자유공간에서의 유전율이고, ϵ_∞ 은 등가 유전율의 실수부가 고주파에서 수렴되는 수치이다. n 은 단위가 없으며 경험적인 수치이다. 0과 1 사이의 값을 가지며, 0인 경우, 높은 유전 손실, 1인 경우 유전 손실이 없음을 의미한다. ω_r 은 기준 주파수라 하며 임의로 선택된다. χ_r 은 기준 주파수에서의 전기 감수율의 실수부이다^[13]. 상기 계수들의 값이 정해지면 주파수에 따른 등가 유전율을 구할 수 있으며, 본 논문에서는 10 dB의 차폐효과를

값도록 하는 계수를 구하는 방식으로 등가 유전율을 추출하였다.

차폐효과는 입사파와 투과파의 비율로 나타낼 수 있고, 식 (2)를 통해 계산할 수 있으며, 해석하고자 하는 구조의 두께와 물질상수에 의해 결정된다^{[15],[16]}.

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{E^i}{E^t} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{1 - qe^{-2\gamma l}}{pe^{-\gamma l}} \right|$$

$$= 20 \log_{10} |e^{\gamma l}| + 20 \log_{10} \left| \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \right| + 20 \log_{10} |1 - \Gamma_1^2 e^{-2\gamma l}| \quad (2)$$

이때, γ 는 전파상수, l 은 물질의 두께, p 는 $\tau_1 \tau_2$ 로 각 경계면에서의 투과계수의 곱, q 는 $-\Gamma_1 \Gamma_2 = \Gamma_1^2$ 로 각 경계면에서의 반사계수의 곱이다. 본 절에서 다루는 콘크리트의 차폐효과 해석 구조는 그림 1에 나타내었고, 앞서 설명한 등가 유전율을 가지며, 해석하고자 하는 콘크리트의 두께는 100 mm이다.

일정 정도의 차폐효과를 갖는 등가 유전율을 추출하기 위해, 즉 방정식에서의 미지수 $n, \chi_r, \epsilon_\infty/\epsilon_0, \omega_r$ 를 구하기 위해 최소자승법(least square method, LSM)을 이용하였다. 이때 $\epsilon_\infty/\epsilon_0$ 는 비유전율로써 고려하기 위해 자유공간의 유전율로 나누어준 것이다. 최소자승법을 진행하기 위한 손실함수(loss function)는 목표치인 10과 현재 계수에 의한 유전율로 계산되는 SE의 차이를 평균제곱오차(mean squared error, MSE)로 설정하였고 식 (3)에 나타내었다. 이때, N 은 총 주파수 포인트 개수를 의미하고, i 는 현재 주파수 포인트의 인덱스를 의미하며, SE_i 는 i 번째 주파

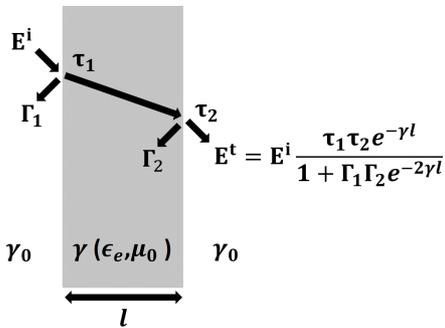


그림 1. 콘크리트의 차폐효과 해석 구조
Fig. 1. Geometry of concrete's shielding effectiveness.

수에서의 차폐효과 계산값을 의미한다. 해당 손실함수를 최소로 만드는 $\epsilon_e(\omega)$ 의 계수를 도출하는 방식으로 10 dB의 차폐효과를 갖는 등가 유전율을 모델링하였다.

$$SE = f(\epsilon_e(\omega))$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SE_i - 10)^2 \quad (3)$$

상기 과정을 거쳐 도출한 Jonscher 모델의 미지수는 $n = 0.0028, \chi_r = 9.9958, \epsilon_\infty/\epsilon_0 = 7.6394, \omega_r = 6.4638 E06$ 이며, 해당 유전율을 그림 2에 나타내었다. 또한 해당 유전율을 통한 차폐효과의 analytic 계산 결과는 그림 3에 나타내었으며, FEM 방식의 전자기 시뮬레이션 툴인 HFSS를 이용하여 해석한 결과와 일치하는 것을 확인하였다.

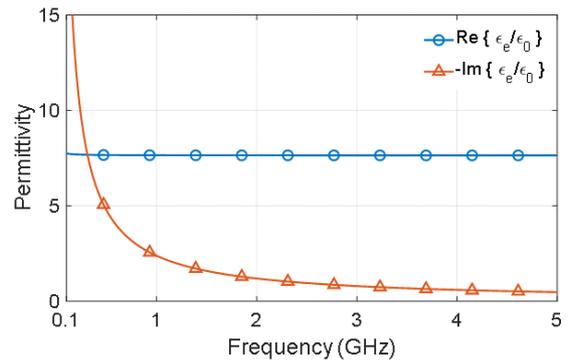


그림 2. Jonscher 모델을 이용한 콘크리트의 등가 유전율
Fig. 2. Equivalent permittivity of concrete using Jonscher model.

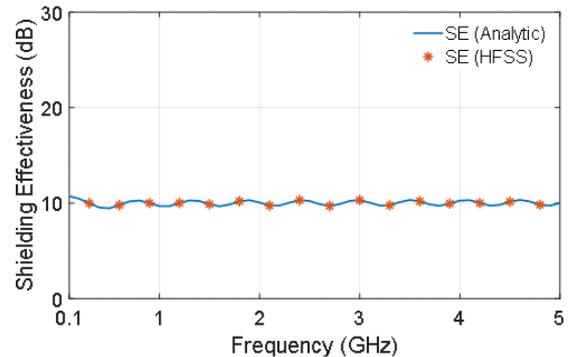


그림 3. 등가 유전율에 의한 차폐효과
Fig. 3. Shielding effectiveness by equivalent permittivity.

III. 강섬유의 구조적 변수에 따른 차폐효과 분석

3-1 강섬유 보강 콘크리트 해석 방법

강섬유가 함유된 콘크리트의 전자파 차폐효과를 분석하기 위해 본 연구에서 해석한 과정을 그림 4에 정리하였다. 먼저 콘크리트의 등가 유전율은 2장에서 설명을 토대로 MATLAB을 이용하여 추출하였다. 해석하고자 하는 주파수 대역 및 차폐효과의 레벨을 고려하여 평균제곱오차를 손실함수로 설정하고, 최소자승법을 이용하여 Jonscher 모델의 계수를 얻는 방식으로 콘크리트의 등가 유전율을 도출하였다. 이후 HFSS를 이용하여 콘크리트의 구조를 모델링하였으며, 앞서 도출한 등가 유전율을 해당 구조에 할당하였고, 도전율을 갖는 강섬유를 분포시켜 시뮬레이션하는 방식으로 진행하였다.

차폐효과 시뮬레이션을 위해 플로케 모드(Floquet mode) 해석을 진행하였고, 해석에 사용된 콘크리트는 100 mm의 두께를 가지며, 단면적의 가로 및 세로 길이는 해석 시간을 고려하여 30 mm로 설정하였다. 전파의 진행 방향은 $\hat{k} = -\hat{z}$ 방향, 전계의 편파 방향은 $\vec{E} = \hat{y}$ 방향으로 설정하였고, 상기 사항들은 그림 5에 나타내었다. 해석에 사용된 강섬유의 구조 및 제원은 표 1에 나타내었으

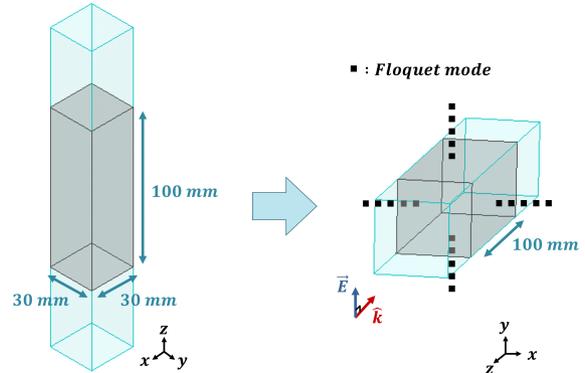


그림 5. 콘크리트의 구조 및 시뮬레이션 환경
Fig. 5. Structure of concrete and setup for simulation.

표 1. 강섬유의 구조 및 제원

Table 1. Structure and specification of steel fiber.

Structure	Specification	
		Length (h)
	19.5 mm	0.1 mm

며, 강섬유는 도전율이 매우 큰 물질이므로 PEC(perfect electric conductor)로 설정하였다^[17].

3-2 강섬유 구조에 따른 차폐효과 해석 결과

본 절에서는 3-1절의 해석 방법을 토대로 강섬유의 어떠한 구조적 요인이 차폐효과에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 구조적 변수로 설정한 파라미터는 방향, 각도, 개수, 길이이며, 각 변수에 따른 차폐효과의 변화를 확인하였다.

그림 6은 강섬유가 놓인 방향에 따른 차폐효과를 분석한 결과이며, Case 1은 강섬유가 포함되지 않은 일반 콘크리트, Case 2는 강섬유가 입사파의 편파와 수직한 경우, Case 3은 강섬유가 입사파의 편파와 평행한 경우이다. Case 2의 경우, Case 3과 같이 강섬유 1개가 함유되었음에도 불구하고 강섬유가 함유되지 않은 Case 1과 거의 동일한 결과가 나타났다. Case 3의 경우, 2.6 GHz 지점에서

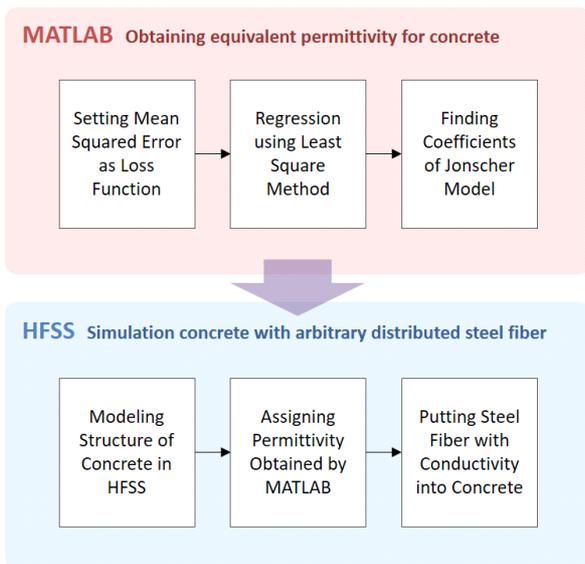
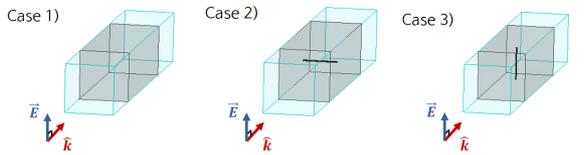
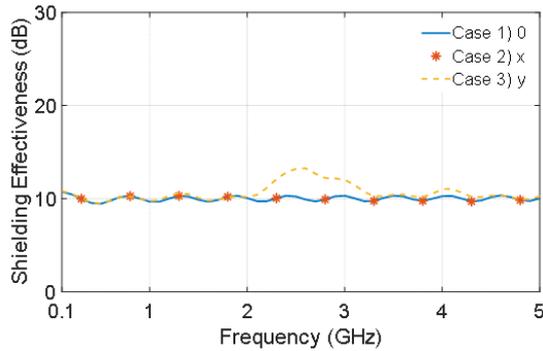


그림 4. 해석 방법의 개념도
Fig. 4. Conceptual diagram of analysis method.



(a) 각 상황별 강섬유가 놓인 방향 정보
(a) Information on the orientations of steel fiber in each case



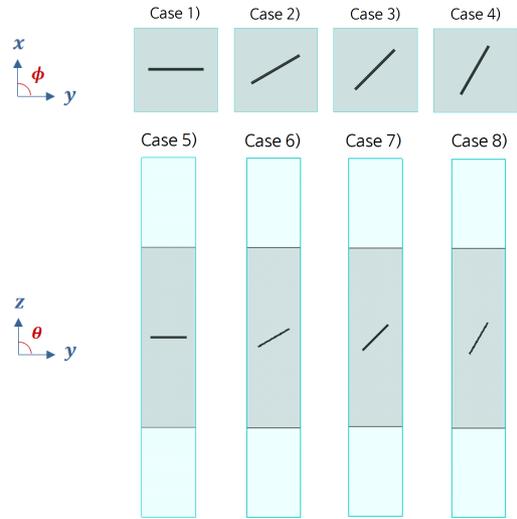
(b) 강섬유의 방향에 따른 차폐효과
(b) Shielding effectiveness in terms of orientations of steel fiber

그림 6. 강섬유의 방향에 의한 영향

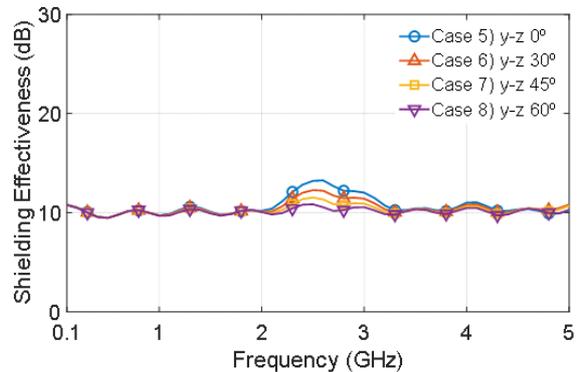
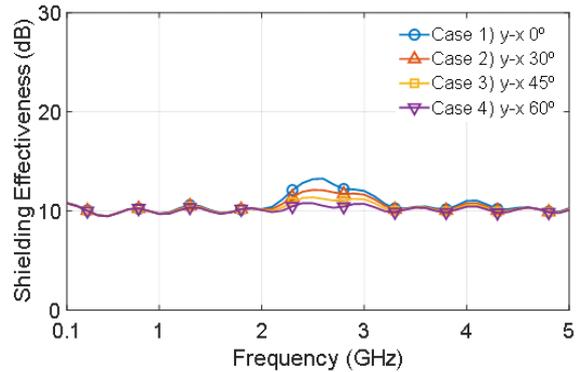
Fig. 6. The effect of orientations of steel fiber.

강섬유의 길이에 의한 반파장 공진이 발생하여 내부 산란이 일어나, 입사파 대비 투과되는 전자파의 양이 감소하여 차폐효과가 증가함을 알 수 있다. 이는 입사파의 편파와 강섬유가 놓인 방향이 차폐효과에 주요한 요소로 작용함을 의미하고, 이를 통해 실제 강섬유 보강 콘크리트와 같이 강섬유를 랜덤하게 분포시키는 것이 다양한 편파의 전자파를 차폐하는 방법임을 알 수 있다.

그림 7은 강섬유가 기울어진 각도와 차폐효과와의 관계를 분석한 결과이며, Case 1 - Case 4는 y축과 x축 사이의 각도를 증가시켜본 경우이며, Case 5 - Case 8은 y축과 z축 사이의 각도를 증가시켜본 경우이다. 앞선 결과와 같이, 강섬유가 놓인 방향이 전계의 편파 방향과 일치할 때 강섬유의 반파장 공진에 의해 발생하는 내부 산란이 가장 크게 나타나 가장 큰 차폐 성능을 보였으며, 강섬유가 기울어진 각도와 전계의 편파 방향이 일치하지 않을수록 편파 손실이 발생하여 내부 산란 레벨이 낮아져 공진 지점에서의 차폐효과가 적게 나타나는 것을 확인하였다. 이를 통해 공진 지점에서의 차폐효과는 강섬유가 기울어진



(a) 각 상황별 강섬유가 기울어진 각도 정보
(a) Information on the angles of steel fiber in each case



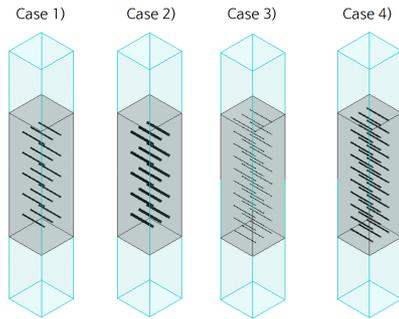
(b) 강섬유의 각도에 따른 차폐효과
(b) Shielding effectiveness in terms of angles of steel fiber

그림 7. 강섬유의 각도에 의한 영향

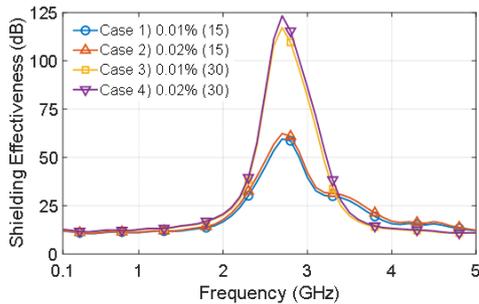
Fig. 7. The effect of angles of steel fiber.

각도와 입사파의 편파 방향이 일치할수록 증가함을 알 수 있다.

그림 8은 강섬유의 개수 및 부피에 따른 차폐효과 변화를 분석한 결과이며, Case 1은 콘크리트 부피 대비 강섬유 부피비가 0.01 %이며, 강섬유의 개수는 15개인 경우, Case 2는 부피비가 0.02 %이며, 강섬유의 개수는 15개인 경우, Case 3은 부피비가 0.01 %이며, 강섬유의 개수는 30 개인 경우, Case 4는 부피비가 0.02 %이며, 강섬유의 개수는 30개인 경우이다. 이때 개수가 동일하고 부피비가 다른 경우는 강섬유의 반지름 길이로 부피비를 조절한 것이다. Case 1과 Case 3을 비교해 보면, 두 경우 모두 콘크리트 대비 강섬유의 부피비가 0.01 %로 동일하지만, Case 3의 경우에 반지름 두께를 얇게 하고 개수를 2배로 늘린 상황이며, Case 3의 차폐효과가 훨씬 크게 나타남을 알



(a) 각 상황별 강섬유의 개수 및 부피 정보
(a) Information on the numbers and volumes of steel fiber in each case

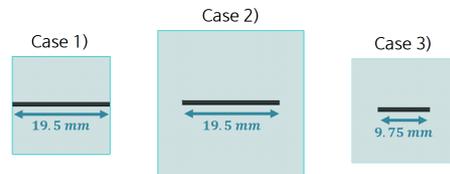


(b) 강섬유의 개수 및 부피에 따른 차폐효과
(b) Shielding effectiveness in terms of numbers and volumes of steel fiber

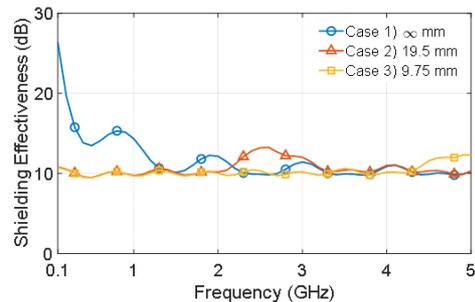
그림 8. 강섬유의 개수에 의한 영향
Fig. 8. The effect of numbers of steel fiber.

수 있다. 이와 반대로, Case 1과 Case 2를 비교해 보면 둘은 부피비는 서로 다르지만 강섬유의 개수는 동일한 상황이며, 차폐효과는 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이는 앞서 강섬유에 의한 차폐효과는 강섬유의 길이 공진에 의해 나타났음을 근거로 하여, 강섬유의 반지름 두께가 달라지더라도 강섬유의 길이는 동일하기 때문에, 강섬유가 함유된 부피비보다는 강섬유의 개수가 차폐효과에 주요한 영향을 미치게 된 것임을 알 수 있다.

그림 9는 강섬유의 길이가 달라짐에 따른 차폐효과 변화를 분석한 결과이며, Case 1은 강섬유의 길이가 ∞ mm인 경우, Case 2는 강섬유의 길이가 19.5 mm인 경우, Case 3은 강섬유의 길이가 9.75 mm인 경우이다. 앞서 언급한 대로 플로케 모드 해석을 진행하고 있기에, Case 1의 경우 강섬유의 길이와 해석 단면적의 길이가 동일하므로 강섬유의 길이가 무한하다고 볼 수 있고, 그 경우에는 강섬유 길이에 의한 공진 주파수가 DC 부근에 나타남을 알 수 있다. Case 2의 경우에는 앞서 확인했듯이 2.6 GHz 부근에서 공진함을 알 수 있고, Case 3의 경우에는 강섬유의 길이가 절반으로 짧아짐으로써 공진 효과가 Case 2의



(a) 각 상황별 강섬유의 길이 정보
(a) Information on the lengths of steel fiber in each case

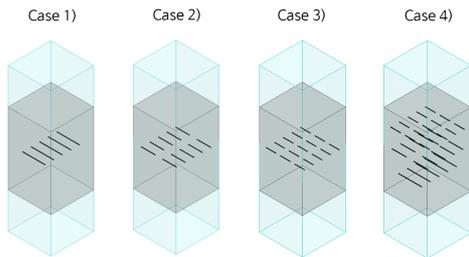


(b) 강섬유의 길이에 따른 차폐효과
(b) Shielding effectiveness in terms of lengths of steel fiber

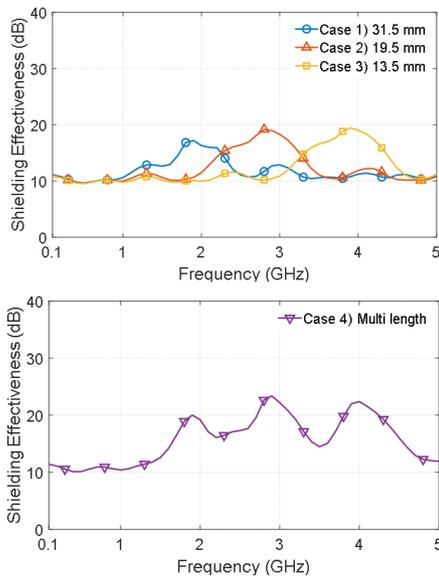
그림 9. 강섬유의 길이에 의한 영향
Fig. 9. The effect of lengths of steel fiber.

2배 주파수에 해당하는 5 GHz 부근에서 발생함을 알 수 있다. 이를 통해, 콘크리트에 함유된 강섬유의 길이에 따라 차폐효과의 공진 주파수가 달라짐을 알 수 있었고, 이에 다양한 길이의 강섬유를 동시 사용할 경우 광대역 차폐의 가능 여부를 분석하였다.

그림 10은 다양한 길이의 강섬유를 동시 사용한 경우에 대한 분석 결과이며, 콘크리트의 두께는 100 mm로 앞선 분석에서와 동일하고, 단면적의 가로 및 세로 길이는 다양한 길이의 강섬유를 포함할 수 있도록 60 mm로 설정하였다. Case 1은 31.5 mm 길이의 강섬유가 5개 함유된



(a) 각 상황별 강섬유의 길이 및 함유 정보
(a) Information on the lengths of steel fiber in each case



(b) 다양한 길이의 강섬유에 의한 차폐효과
(b) Shielding effectiveness according to multi length of steel fiber

그림 10. 강섬유의 길이에 의한 영향
Fig. 10. The effect of lengths of steel fiber.

경우, Case 2는 19.5 mm 길이의 강섬유가 10개 함유된 경우, Case 3은 13.5 mm 길이의 강섬유가 15개 함유된 경우, Case 4는 Case 1 - Case 3의 강섬유가 동시에 함유된 경우이다. 강섬유의 길이가 짧을수록 공진 현상에 의해 산란되는 세기가 적으므로 그로 인한 차폐효과는 상대적으로 작게 나타난다. 각 Case마다 유사한 레벨의 차폐효과를 갖는 상황에서 비교하기 위해, 강섬유의 길이가 짧은 경우는 개수를 추가하여 보완하였다. 앞선 결과와 같이, Case 1, Case 2, Case 3의 경우에는 각 강섬유 길이에 의한 반파장 공진으로 인해, 각 길이에 해당하는 공진 주파수에서의 차폐효과가 증가함을 알 수 있다. Case 4의 경우에는 다양한 길이의 강섬유가 동시에 함유되어, 각 길이가 관장하는 대역에 대한 차폐효과가 동시에 증가함을 알 수 있다. 이를 통해, 다양한 길이의 강섬유가 포함된 경우 또는 강섬유끼리 서로 붙어 유효한 길이가 서로 다른 경우, 광대역 차폐가 가능할 것임을 알 수 있다.

앞서 분석한 결과를 토대로 침투 지점에서의 차폐효과와 그 공진 주파수를 강섬유의 구조적 파라미터에 따라 표 2에 정리하였다. 또한, 강섬유의 주요한 구조적 파라미터에 따른 그 영향을 독립변수와 종속변수로 나누어

표 2. 강섬유의 구조적 파라미터에 따른 차폐효과 및 공진 주파수

Table 2. Shielding effectiveness and resonance frequency in terms of structural parameters of steel fiber.

Category		Shielding effectiveness (@ Peak)	Resonance frequency (@ Peak)
Orientation (Angle)	0°	≅ 13.26 dB	≅ 2.6 GHz
	30°	≅ 12.28 dB	≅ 2.6 GHz
	45°	≅ 11.53 dB	≅ 2.6 GHz
	60°	≅ 10.85 dB	≅ 2.6 GHz
Number	15 (0.01 %)	≅ 117.3 dB	≅ 2.6 GHz
	15 (0.02 %)	≅ 123.3 dB	≅ 2.6 GHz
	30 (0.01 %)	≅ 59.54 dB	≅ 2.6 GHz
	30 (0.02 %)	≅ 62.39 dB	≅ 2.6 GHz
Length	∞ mm	> 25 dB	≅ 0 GHz
	19.5 mm	≅ 13.26 dB	≅ 2.6 GHz
	9.75 mm	≅ 12.31 dB	≅ 5 GHz

표 3. 강섬유의 주요 구조적 요인과 그 영향
Table 3. Dominant structural factor and the effect according to steel fiber.

Independent variable	Orientation of steel fiber	Number of steel fibers	Length of steel fiber
Dependent variable	Polarization of incident wave	Level of shielding effectiveness	Resonance frequency

표 3에 정리하였다. 결과적으로, 다양한 편파의 전자파를 차폐하기 위해서는 강섬유가 놓여진 방향 및 각도를 고려하여야 하고, 공진 지점에서의 차폐효과 레벨을 증가시키기 위해서는 강섬유의 개수를 늘려야 하고, EMP 피해가 큰 저주파 대역 차폐효과를 증가시키기 위해서는 강섬유의 길이가 길거나 강섬유끼리 서로 붙어 유효한 길이가 길게 하여 공진 주파수를 이동시켜야 함을 도출하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 강섬유 보강 콘크리트의 전자파 차폐효과를 강섬유의 구조적 파라미터에 따라 분석하였다. 이를 위해 Jonscher 모델을 이용하여 콘크리트의 등가 유전율을 추출하였으며, 전자기 시뮬레이션 툴을 이용하여 콘크리트에 강섬유가 함유된 경우의 차폐효과를 해석하였다. 그 결과로 강섬유의 구조적 파라미터에 대비하여 입사하는 전자파의 편파, 차폐효과의 레벨, 공진 주파수와와의 인과관계를 도출하였다. 이를 토대로 임의의 강섬유 보강 콘크리트의 차폐효과 결과에 대한 원인을 유추할 경우 또는 임의의 차폐효과를 내기 위한 강섬유 보강 콘크리트 제작 시 도움이 될 수 있기를 기대하는 바이다.

References

[1] T. H. Jang, "EMP standardization trends," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 3, pp. 11-18, May. 2017.
[2] Y. C. Chung, J. G. Yook, "Design and construction of EMP protection facilities," *The Proceeding of the Korean*

Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol. 23, no. 4, pp. 3-15, Jul. 2012.
[3] *Department of Defense Interface Standard: High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions, Part 1 - Fixed Facilities*, MIL-STD-188-125-1, Jul. 1998.
[4] *Department of Defense Interface Standard: High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions, Part 2 - Transportable Systems*, MIL-STD-188-125-2, Mar. 1999.
[5] S. W. Kim, T. S. Song, "EMP protection technology for concrete structures," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 2, pp. 59-67, Mar. 2020.
[6] S. Wen, D. D. L. Chung, "Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 2, pp. 329-332, Feb. 2004.
[7] X. Zhang, W. Sun, "Electromagnetic shielding and absorption properties of fiber reinforced cementitious composites," *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science*, vol. 27, no. 1, pp. 172-176, Feb. 2012.
[8] T. B. Min, H. C. Kim, J. Y. Kim, D. H. An, and H. K. Choi, "Evaluation on the electromagnetic shielding performance of ultra-high strength concrete wall with steel fiber reinforcements," in *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Nov. 2018, vol. 30, no. 2, pp. 649-650.
[9] N. Lee, G. Pack, J. Pae, J. Moon, and S. Kim, "Relationship between three-dimensional steel fiber statistics and electromagnetic shielding effectiveness of high-performance, fiber-reinforced cementitious composites," *Materials*, vol. 13, no. 22, p. 5125, Nov. 2020.
[10] T. Bourdi, J. E. Rhazi, F. Boone, and G. Ballivy, "Application of Jonscher model for the characterization of the dielectric permittivity of concrete," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, no. 20, p. 205410,

Oct. 2008.

[11] A. K. Jonscher, "The 'universal' dielectric response," *Nature*, vol. 267, pp. 673-679, Jun. 1977.

[12] A. K. Jonscher, "Dielectric relaxation in solids," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 32, no. 14, pp. R57-R70, Feb. 1999.

[13] F. Hollender, S. Tillard, "Modeling ground-penetrating radar wave propagation and reflection with the Jonscher parameterization," *Geophysics*, vol. 63, no. 6, pp. 1933-942, Nov. 1998.

[14] C. A. Granados, H. E. Rojas, and F. Santamaria, "Evaluation of the electromagnetic shielding of concrete from high-frequency simulations and the application of the Jonscher model," *Ingeniería*, vol. 25, no. 2, pp.

162-178, May. 2020.

[15] S. A. Schelkunoff, *Electromagnetic Waves*, New York, NY, D. Van Nostrand Company, pp. 303-315, Jan. 1943.

[16] S. Y. Hyun, J. K. Du, H. J. Lee, K. W. Lee, J. H. Lee, and C. Jung, et al., "Analysis of shielding effectiveness of reinforced concrete against high-altitude electromagnetic pulse," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 6, pp. 1488-1496, Dec. 2014.

[17] S. V. Damme, A. Franchois, "A full-wave homogenization technique for steel fiber reinforced concrete," *Electromagnetics*, vol. 26, no. 3-4, pp. 301-314, Aug. 2006.

조 성 희 [연세대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-6518-1744>



2020년 2월: 서경대학교 전자공학과 (공학사)
 2020년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, EMP

노 영 훈 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-3479-2838>



2017년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정
 [주 관심분야] 전자기 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, EMP

조 경 용 [연세대학교/석·박사 통합과정]

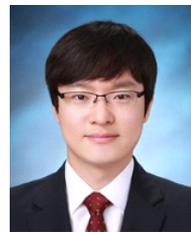
<https://orcid.org/0000-0002-5384-9409>



2018년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2018년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정
 [주 관심분야] 전자기 수치해석, EMP, 물질특성 측정

이 남 곤 [한국건설기술연구원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7389-8216>



2014년 8월: 한국과학기술원 건설및환경공학과 (박사)
 2017년 1월~2018년 2월: 싱가포르국립대 Research Fellow
 2018년 3월~현재: 한국건설기술연구원 수석연구원
 [주 관심분야] 건설재료 미시 구조 분석, 시멘트 수화물 열역학 해석, 기능성 콘크리트 개발

김 성 옥 [한국건설기술연구원/선임연구위원]

<https://orcid.org/0000-0002-8181-4473>



1984년 2월: 영남대학교 토목공학과 (공학사)
1998년 2월: 동국대학교 토목공학과 (공학박사)
1989년 5월~현재: 한국건설기술연구원
선임연구위원
2013년 11월~2019년 4월: 방호방폭연구

단장

2018년 4월~현재: EMP방호시설연구단장

[주 관심분야] 특수 콘크리트 구조물, 방탄 방폭 시설, EMP 방호 시설

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원
조교수
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자
공학과 교수
2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer
(EMC Society)

[주 관심분야] 수치해석, 바이오 센서, 마

이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막 공정 구조, EMI/EMC, EMP, 플라즈마 해석