

탄소나노튜브(CNT)를 혼입한 초고성능 콘크리트(UHPC)의 고고도 전자기파(HEMP) 방호성능 평가

정명준¹⁾ · 홍성걸^{*,1)}

¹⁾ 서울대학교 건축공학과

Evaluation on High Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection Performance of Carbon Nanotube(CNT) Embedded Ultra-High Performance Concrete(UHPC)

Myungjun Jung¹⁾ · Sung-gul Hong^{*,1)}

¹⁾ Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Korea

(Received 5 November 2018 / Revised 8 February 2019 / Accepted 25 February 2019)

ABSTRACT

In this study, to evaluate the High Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) protection performance of UHPC/CNT composites by the content of Carbon nanotubes(CNTs), Electromagnetic Shielding Effectiveness(SE) test was performed based on MIL-STD-188-125-1. And the results were verified by applying the Antenna theory. In the case of UHPC with a thickness of 200 mm mixed with 1 % CNT of cement weight, the SE was 28.98 dB at 10 kHz and 45.94 dB at 1 GHz. Then the Scabbing limit thickness for bullet proof was computed based on the result of compressive strength test which was 170 MPa, and it was examined whether it satisfied the HEMP protection criteria. As a result, the required HEMP shielding criteria were satisfied in all frequency ranges as well as the scabbing limit thickness was reduced by up to 43 % compared with that of ordinary concrete.

Key Words : High Altitude Electromagnetic Pulse(고고도 전자기파), Ultra-High Performance Concrete(초고성능 콘크리트), Carbon Nanotube(탄소나노튜브), Shielding Effectiveness(차폐효과), Conductive Concrete(도전성 콘크리트)

1. 서론

일반적으로 핵무기의 공중폭발로 인해 발생될 수 있

는 가장 큰 피해요인은 열, 폭발, 방사능이지만 이외에도 고고도 전자기파(High-altitude Electromagnetic Pulse, HEMP)에 의한 전력망, 통신망, 전자 장비 등의 피해로 국가 및 군사 중요시설의 마비가 예상된다^[1]. 최근에는 핵무기를 사용하지 않고도 이와 유사한 효과를 발휘하는 NNEMP(Non-Nuclear-EMP) Bomb이 개발되어 사

* Corresponding author, E-mail: sghong@snu.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

용되고 있으므로 HEMP 방호는 매우 중요하다. HEMP 방호는 금속과 같이 도전율(Conductivity)이 높거나 자석과 같이 투자율(Permeability)이 높은 물질을 이용해 외부에서 가해지는 전자파를 반사 또는 흡수시키는 것으로 전자파 차폐 원리와 동일하나 전자파의 강도(Intensity)가 매우 크기 때문에 일반 차폐시설에 비해 높은 성능이 요구된다. 기존에 시공되는 HEMP 방호 시설은 Fig. 1과 같이 외부에 콘크리트 구조물 시공 후 내부에 밀폐된 도체의 격실로 구성된다. 이 중 차폐판의 경우 금속판(강판, 아연도금 판 등)을 제작 후 볼트 조립이나 용접으로 결합하는데 가공의 어려움, 접합부에서의 전자파 누출가능성, 높은 시공비용 등이 문제시 되고 있다²⁾. 또한 차폐판의 유지 및 보수 등을 위해 일정한 공간(3 m 이상)을 확보해야 하므로 실내 면적의 축소 및 비효율성도 큰 문제점 중의 하나이다.

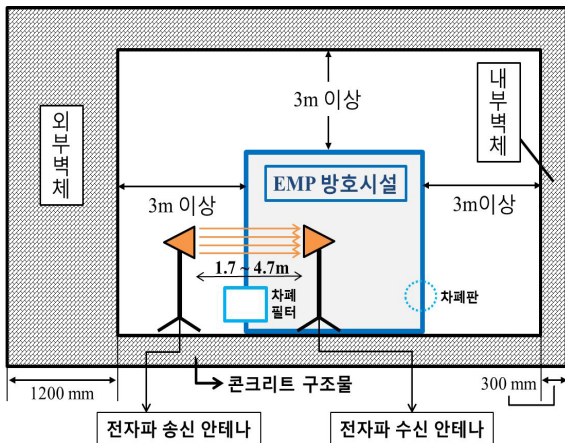


Fig. 1. Concept of HEMP shielding facilities^[3]

Table 1. Scabbing limit thickness for SAP500 bomb by concrete compressive strength

Compressive strength(MPa)	24	28	32	36
Scabbing limit thickness(m)	3.87	3.68	3.51	3.37

Velocity : 600 m/s, Angle of fire : 15°

HEMP 방호시설은 EMP 방호뿐만 아니라 방탄/방폭성능도 만족해야 한다. 방호시설은 화생방 방호시설 설계지침에 의거 방호등급에 따라 콘크리트 강도를 고려하여 소요 두께를 산정한다. 접촉 폭발 또는 탄체

가 직접 타격하는 경우 소요 두께가 Table 1과 같이 3 m 이상이 소요되므로 과중량으로 인해 구조물의 형상 및 층수의 제약, 공간의 비효율성 등의 한계점이 지적되고 있다. 따라서 HEMP 방호성능을 보장하면서 시공성 및 경제성을 개선할 수 있는 방호소재 개발이 필요하다.

시멘트질 재료(Cementitious material)는 일반적으로 가장 많이 사용되는 건설재료이나 전기저항률이 높아 ($10^6 \sim 10^9 \Omega \cdot m$ for ordinary concrete^{[4])} 전자파 차폐재로 사용하기에는 부적절하다. 하지만 여기에 고전도성 나노물질인 탄소나노튜브(Carbon nanotube, CNT)를 적용하는 연구가 다년간 수행되어 시멘트 매트릭스의 기계적 및 전기적 특성을 개선하는 것으로 알려졌다^[5]. 그러나 대부분의 연구들이 시멘트 페이스트 또는 모르타르를 이용하여 수행되었으므로 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, UHPC)와 같이 배합과 기계적 성질이 확연히 다른 특수한 재료에 동일한 결과를 적용하는 것은 제한된다. UHPC는 160 MPa 내외의 압축강도를 발현하여 차세대 방폭용 건설재료로 인식되고 있다^[6]. 하지만 전기저항률이 일반 시멘트질 재료보다 더욱 높기 때문에(약 $10^{11} \Omega \cdot m$) 별도의 도전성 물질이 혼합되지 않는 한 그 자체로서 차폐재로의 적용은 제한된다.

따라서 이 연구에서는 CNT를 적용한 UHPC의 차폐 효과(Shielding Effectiveness, SE)를 확인하고 이를 이론적으로 검증하여 차폐재로서의 적용가능성을 평가함과 동시에 방탄/방폭성능을 만족하기 위한 최소두께를 산정하여 HEMP 방호기준에 대한 만족여부를 확인한다.

2. 실험

2.1 사용재료 및 배합

이 연구에 사용된 CNT는 MWCNT(Multi-wall CNT)이며 그 특성은 Table 2와 같다. 결합제로는 백시멘트와 실리카폼이 사용되었으며 그 특성은 Table 3과 같다.

실리카폼은 입자크기가 CNT와 유사하여 배합과정에서 볼 밀링(Ball Milling)과 같은 기계적 분쇄효과로 인해 CNT의 분산에 도움이 된다고 보고된 바 있다^[9]. 실험변수를 고려한 배합은 Table 4에 나타나 있다.

Table 2. Properties of CNT

Purity(wt%)	Avg. diameter(nm)	Length(μm)	Density(g/m ³)	Specific surface area(m ² /g)
>95	10~20	10~70	100,000~150,000	165~205

Table 3. Properties of cement and silica fume

Materials	Density (g/m ³)	Specific surface area(m ² /g)	Chemical composition(%)									
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
Cement	3,150,000	0.3492	21.18	5.88	0.23	2.46	3.89	53.07	0.15	0.90	0.06	0.40
Silica fume	2,200,000	20	96.90	0.29	0.01	0.15	0.18	1.54	0.16	0.64	0.03	0.05

Table 4. Mix proportion

Denotation	Weight composition(mass ratios of cement weight)							Sonication method	Sonication time/pulse	Target slump
	Water	Cement	Silica fume	Silica quartz	Silica sand	Super plasticizer	CNT			
CNT0(Ref.)	21	100	25	35	110	4	0	-	-	210±10 mm
CNT0.2							0.2	Sonication + Magnetic stirring	0.5H/720W	
CNT0.5							0.5		1H/720W	
CNT0.8							0.8		3H/720W	
CNT1.0							1.0		4H/720W	
CNT2.0							2.0		7H/720W	

2.2 실험체 제작

2.2.1 CNT 분산액 제조

CNT는 소수성 물질로서 수계 분산이 어렵다. 또한 강한 반데르발스 힘(Van der waals forces)으로 인해 응집하여 번들(Bundle)을 형성하는 경향이 있다^[10]. 불충분한 분산은 CNT의 보강효율을 감소시킬 뿐만 아니라 높은 투입량이 요구된다. 그리고 CNT 응집체는 균열 또는 공극형태로 작용하여 콘크리트의 성질을 약화시킨다^[11]. 따라서 시멘트질 재료에 CNT를 결합시키기 위한 효과적인 분산은 해결해야 하는 중요한 과제 중 하나이다.

대부분의 연구에서 공통적으로 CNT의 분산성 문제를 해결하기 위해 초음파 처리(Sonication)를 수행하고 폴리 카복산계(Polycarboxilic) 고성능 감수제(Super Plasticizer, SP)를 함께 사용하는 경우 효과적임을 보이고 있다^[12].

따라서 이 연구에서는 증류수에 CNT를 실험 배합

별로 혼입량을 투여하고 초음파 처리를 실시한 다음, SP를 혼입하여 5분 동안 자기교반(Magnetic stirring)하는 형태로 분산액을 제조하였다. CNT 혼입량이 증가할 경우 배합 과정에서 워킹빌리티(Workability)가 감소하거나 타설이 불가능할 수 있으므로 기준배합인 CNT0(Ref.)와 동일한 목표 슬럼프 플로우(Slump flow)를 만족하도록 추가수(Extra-water)를 혼입하였다. 처리 시간은 초음파 처리가 종료된 시점에 입도분석기(Particle size analyzer)를 사용해 측정된 CNT 분산액의 평균입도가 1~10 μm를 만족할 때까지 수행하였다.

2.2.2 실험체 제작

각 실험체는 Fig. 2에 제시된 과정에 의해 제작되었다. 앞서 언급한 방법대로 Fig. 2-1 절차에 의해 제조된 CNT 분산액에 사전 건비빔된 UHPC 배합재료(Premix)를 투입하고 5분간 충분히 믹싱하였다(Fig. 2-2). 그런

다음, 각 실험체를 제작하기 위한 몰드에 믹싱된 모르타르를 타설하였다(Fig. 2-3). 압축강도시험을 위한 실험체는 KS L 5105 규격에 따라 50(W)×50(L)×50(H) mm³ 크기로 제작하였다. 이때, 전기저항을 측정하기 위한 실험체는 폭 20 mm 깊이 20 mm 구리판 2개를 전극으로 활용하기 위해 정작하였다. 차폐효과 측정을 위한 실험체는 1,200(W)×200(L)×1,200(H) mm³ 크기로 제작하였다. 실험체는 타설이 종료된 시점에서 24시간 기건양생(온도 20 °C 상대습도 60 %) 후 몰드를 제거하고 48시간 고온양생(온도 90 °C 상대습도 95 %)한다음, 다시 25일간 기건양생 하였다(Fig. 2-4). 전기저항 측정 및 전자파 차폐시험용으로 제작된 실험체는 내부에 잔존하는 수분에 의한 이온 전도의 영향을 완전히 배제하기 위하여 90 °C 오븐에서 2시간 동안 고온 건조한 다음, 충분히 식힌 후에 실험에 사용하였다.

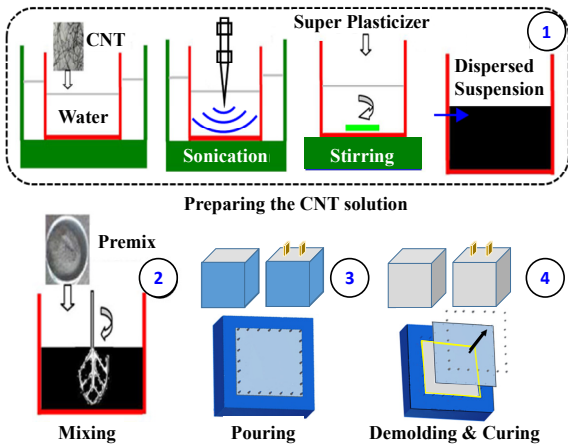


Fig. 2. Mixing process

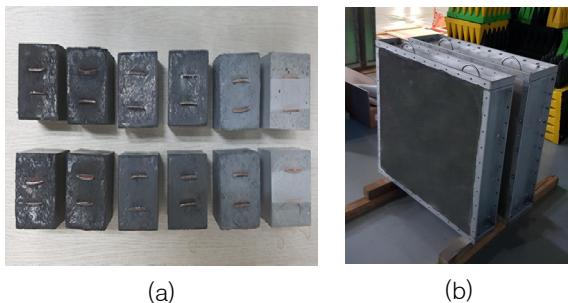


Fig. 3. Geometry of specimens: (a) for electrical resistance test; (b) for electromagnetic shielding effectiveness test

2.3 실험 방법

2.3.1 전기저항 측정

전기저항(Electrical resistance)은 휴대용 DC전원공급기를 이용해 2점법(two-probe method)을 적용하여 측정하였다. 실험 배합별로 각각 3개의 실험체를 3회 측정된 평균값으로 전기저항 값을 결정하였다. 그리고 그 값을 이용해 수식 (1)을 사용하여 도전율을 계산하였다.

$$C = \frac{L}{RA} \quad [\text{U/m}] \quad (1)$$

C : conductivity

R : electrical resistance [Ω]

A : cross-sectional area in contact with the electrode [m²]

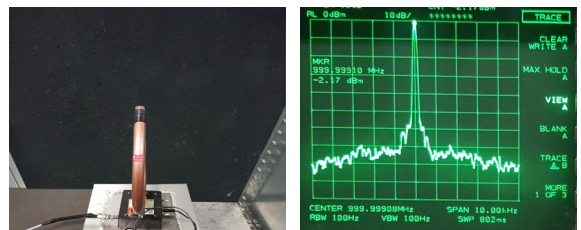
L : distance between the electrode [m]

2.3.2 전자파 차폐시험



(a) Calibration

(b) Specimen setup



(c) SE test

(d) Test result

Fig. 4. SE test procedure

전자파 차폐시험은 MIL-STD-188-125-1(High-Altitude EMP Protection for Fixed Ground-Based Facilities, 2005)에 의거 10 kHz ~ 1.5 GHz 주파수 범위에서 Fig. 4와 같이 실시하였다. 시험은 한쪽 면에 1,200(W)×1,200(H) mm² 규격의 개구부(Opening)가 있는 2,400(W)×2,400(H)×3,000(L) mm³ 크기의 아연도금판으로 조립된 차폐실

(Shielding Room)에서 진행되었다. 먼저 free space 상태에서 교정(Calibration)을 실시한 다음, 차폐실의 개구부에 실험체를 고정하였다. 차폐실과 실험체간의 틈은 전도성 가스켓을 부착하여 전자파가 틈새를 최대한 통과하지 못하도록 하였다. 그리고 외부에 설치된 안테나를 통해 전력을 송신하고 차폐실의 내부에 설치된 안테나에 실험체를 투과해 수신된 전력량을 측정하였다. 안테나는 실험 주파수 영역에 맞춰 LP 안테나(10 MHz ~ 1 GHz), Loop 안테나(< 10 MHz), 그리고 Horn 안테나(> 1 GHz)가 사용되었다. 안테나간의 이격거리는 실험체를 기준으로 외부 안테나는 1.8 m, 내부 안테나는 1 m를 적용하여 전체 이격거리는 실험체 두께를 포함해 3 m가 되도록 하였다. 차폐효과는 실험체가 없는 교정 상태에서의 전력 수신량 대비 실험체가 설치된 상태에서의 전력 수신량의 차로 식 (2)에 의해 계산되며 주파수 범위에 따라 각각 3회씩 측정 후 평균값을 해당 실험체의 차폐효과로 하였다.

$$SE = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \text{ [dB]} \quad (2)$$

P_1 : field strength without specimen [mW]

P_2 : field strength with specimen [mW]

2.3.3 압축강도시험

압축강도는 UTM(Universal Testing Machine)을 이용해 변위제어 방식으로 0.02 mm/sec의 속도로 측정하였으며 배합별로 6개씩 시험해 산술평균값을 표준강도로 하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 UHPC/CNT 복합재료의 전자파 차폐효과

3.1.1 CNT 혼입량에 따른 도전율

침투임계점(Percolation threshold)이란 인접한 전도성 입자간의 접촉으로 연속적인 도전경로가 확보된 상태의 혼입량을 말한다¹²⁾. 실험결과 CNT 혼입량이 0.8 %까지는 도전율이 급격히 증가하다가 1 %를 초과하면서 섬유간의 연결성이 높아져 함량이 증가함에도 불구하고 증가율은 점차 감소하였다(Fig. 5). 따라서 이 실험에 사용된 CNT의 경우 침투임계점이 0.8 ~ 1 % 정도라고 할 수 있다.

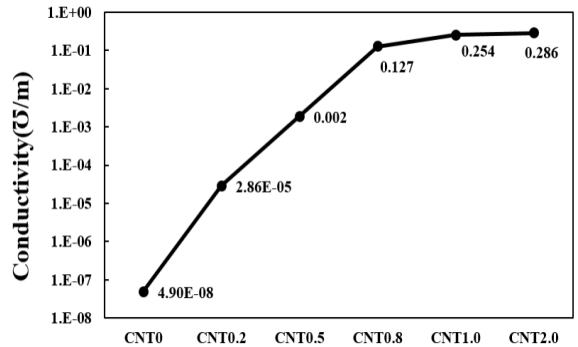


Fig. 5. Conductivity

3.1.2 CNT 혼입량에 따른 전자파 차폐효과

전자파 차폐시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 기준 배합인 CNT0(Ref.)과 CNT0.2는 실험 주파수에서 차폐효과가 모두 3 dB 내외로 작은 값이 측정되었다. 이는 해당 실험체들의 도전율이 매우 낮기 때문에 차폐효과를 가지지 못한 것으로 판단된다. 하지만 CNT 혼입량이 0.5 % 이상 증가할수록 동일 주파수에서의 차폐효과는 점차 증가하였다. 그러나 침투임계점을 지나면서 증가율은 감소하여 CNT2.0의 경우 CNT1.0 대비 2배의 CNT가 혼입되었음에도 불구하고 차폐효과의 뚜렷한 차이는 없었다. 전체적으로 차폐효과는 자계영역인 10 kHz에서 주파수가 증가할수록 점점 증가하다가 평면파 영역인 1 GHz에서 일부 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보였다. CNT가 가장 많이 혼입된 CNT2.0 실험체의 경우 10 kHz에서 29.55 dB, 1 GHz에서 48.75 dB의 차폐효과를 가졌다.

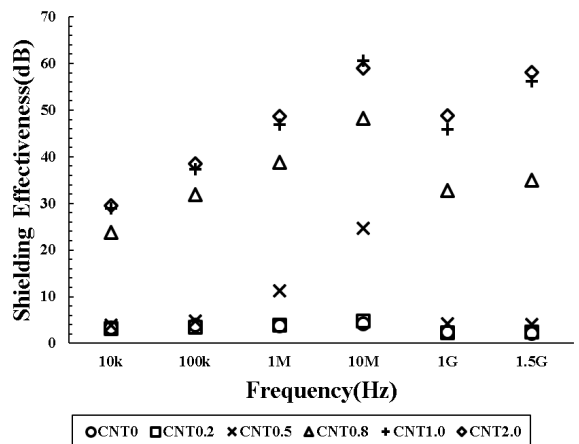


Fig. 6. SE test result

3.1.3 UHPC/CNT 복합재료의 전자파 차폐효과 해석 실험결과를 바탕으로 UHPC/CNT 복합재료의 전자파 차폐효과를 해석하기 위해 무한히 큰 금속 차폐면에서 전파신호의 송수신 부분을 구분하여 생각하는 쉘쿠노프(Schelkunoff)의 전송선 이론(Antenna Theory)을 적용했다. 그리고 UHPC/CNT 복합재료는 금속 대비 손실이 작은 유전체(Dielectric substance)로 가정하였다. 또한 비유전율(Relative permittivity)은 '4.94'로서 주파수에 독립적이며 비투자율(Relative permeability)은 '1'로 가정하였다^[13].

에너지 보존법칙에 의거 입사되는 에너지의 일부는 차폐재의 표면에서 반사되거나 내부로 흡수되면서 열 에너지로 전환된다. 그리고 나머지 에너지가 재료를 통과하는데 이때 차폐재 반대쪽 표면에서 일부가 다시 반사된다. 따라서 전자파가 차폐재에 도달하여 투과하면서 일어나는 차폐효과는 이론상 흡수손실(Absorption loss, A), 반사손실(Reflection loss, R), 다중반사손실(Multiple loss, M)의 합으로써 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$SE = A + R + M \tag{3}$$

반사손실은 차폐재의 고유 임피던스(Intrinsic Impedance, Z_m)와 입사파의 파동 임피던스(Wave Impedance, Z_w)의 부정합에 의해 발생한다. 파동 임피던스는 $\lambda/2\pi = r$ 을 기준으로 그 미만은 근역장(Near field)으로, 그 이상은 평면파 또는 원역장(Plane wave / Far field)으로 구분된다. 그리고 근역장은 다시 자기영역[Magnetic(H) field]과 전기영역[Electric(E) field]으로 구분된다. 따라서 반사손실은 해당 영역별로 구분하여 계산하는데 각각의 임피던스 값은 다음 식에 의해 결정된다^[14].

$$Z_m = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \quad \text{for dielectric } [\Omega] \tag{4}$$

$$Z_w = k \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 120\pi k \quad [\Omega] \tag{5}$$

$$k = \begin{cases} 1 & \text{for plane wave} \end{cases} \tag{6a}$$

$$k = \begin{cases} \frac{2\pi r}{\lambda} & \text{for magnetic(near) field (H-field)} \end{cases} \tag{6b}$$

$$k = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\pi r} & \text{for electric(near) field (E-field)} \end{cases} \tag{6c}$$

$$\lambda = c/f \quad [\text{m}] \tag{7}$$

μ_0 = space permeability [H/m]

ϵ_r = relative permittivity (Ref. : space)

ϵ_0 = space permittivity [F/m]

r = distance between sending antenna and specimen [m]

λ = wave length [m]

c = velocity of light [m/s]

f = frequency [Hz]

손실별 차폐효과는 다음 식들을 적용하여 계산한다^[15].

$$A = 131.4t \sqrt{\sigma_r \mu_r f} \tag{8}$$

$$R = \begin{cases} 20 \log \frac{(1+K)^2}{4K} & \text{general eq.} \end{cases} \tag{9a}$$

$$R = \begin{cases} 74.6 - 10 \log \left(\frac{\mu_r}{f \sigma_r r^2} \right) & \text{for H-field} \end{cases} \tag{9b}$$

$$R = \begin{cases} 322 - 10 \log \left(\frac{\mu_r f^3 r^2}{\sigma_r} \right) & \text{for E-field} \end{cases} \tag{9c}$$

$$M = 20 \log \left[1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\pi t} \right] \tag{10}$$

t = thickness of material [m]

σ_r = relative conductivity of material (ref. : copper)

μ_r = relative permeability of material (ref. : copper)

K = impedance ratio (Z_w/Z_m)

반사손실에 의한 차폐효과를 계산할 때 전기영역의 차폐효과는 $\lambda/2\pi = r$ 이 될 때까지 자기영역의 차폐효과보다 항상 크기 때문에 일반적으로 고려하지 않는다. 따라서 이 연구에서는 실험결과를 해석함에 있어 자기영역과 평면파 영역에 한해 각각 해당되는 식을 적용하여 차폐효과를 해석하였다.

다중반사손실에 의한 차폐효과는 흡수손실이 약 10 dB 이상이면 상대적으로 무시할 수 있다^[16]. 하지만 이 연구에 적용된 실험체는 손실이 매우 작은 유전체로 가정하였으므로 낮은 흡수손실에도 불구하고 다중반사손실에 의한 차폐는 일어나지 않는다고 가정하였다.

제시한 이론과 가정, 실험조건, 그리고 계산된 도전율을 바탕으로 UHPC/CNT 복합재료의 전자파 차폐효과를 예측하고 그 값을 실험결과와 비교하였다. 흡수손실은 식 (8)을 이용하여 계산하였다. 반사손실은 자계영역의 경우 식 (9b)를 적용하고 평면파 영역은 식 (4 ~ 6a)에 의거 임피던스 비를 구한 다음, 식 (9a)를 적용하여 계산하였다. 그리고 흡수손실과 반사손실을 더해 전체 차폐효과에 대한 예측값을 실험값과 함께 Fig. 7에 나타냈다.

수치계산 결과를 보면 예측값이 자계영역인 10 kHz에서부터 주파수가 증가할수록 차폐효과가 증가하다가 평면파 영역인 1 GHz에서 일부 감소한 뒤 다시 증가한다. 이는 실험결과와 그 경향이 매우 유사하다. 또한 차폐효과는 자계영역에서는 주로 반사손실에 의해 이루어지며 평면파 영역에서는 흡수손실이 대부분을 차지함을 알 수 있다. CNT0(Ref.), CNT0.2 실험체의 경우 자계영역에서 대부분 음(-)의 값이 계산되었는데 이는 전자파가 손실 없이 투과됨을 의미한다. 그럼에도 불구하고 100 kHz 이하의 주파수에서 약 3 dB의 차폐효과가 측정된 이유는 실험체의 전기적 크기(실험체의 크기를 송신 주파수의 파장으로 나눈 크기)

가 송신 주파수의 파장보다 작아서 신호의 일부가 실험체 외부의 금속 차폐판에 의해 반사되어 차폐효과가 발생한 것으로 판단된다. 이를 뒷받침하는 결과로 10 MHz 이상의 주파수에서는 차폐효과가 감소하는 것을 볼 수 있다. 파장은 주파수가 증가할수록 작아지므로 이때부터 파장이 실험체의 전기적 크기보다 작아져 반사손실 없이 실험체를 투과함으로 인해 차폐효과가 감소한 것이라고 할 수 있다. 따라서 3 dB 이하의 실험값은 측정오차로 실제 차폐효과는 없다고 보는 것이 타당하며 해당 값을 가지는 실험체는 오히려 절연체에 가깝다고 볼 수 있다. 또한 더욱 정확한 실험을 위해서는 실험체를 충분히 크게 만들어야 할 것으로 판단된다. 실험값은 대부분 예측값보다 작게 측정되었으나 오차율은 CNT 혼입량이 증가할수록 점점 감소하였다. 혼입량이 0.8 % 미만인 경우에는 오차율이 30 %를 초과하였으나 그 이상인 경우에는 20 % 이하였다. 이는 CNT 혼입량이 침투임계점을 지나면서 충분한 도전경로 생성으로 인해 유전체 성질을 띄게 되어 예측값의 정확도가 향상된 것으로 판단된다. 따라서 침투임계점 이상의 CNT가 혼입된 UHPC/CNT 복합재료의 경우 손실 있는 유전체로 간주할 수 있

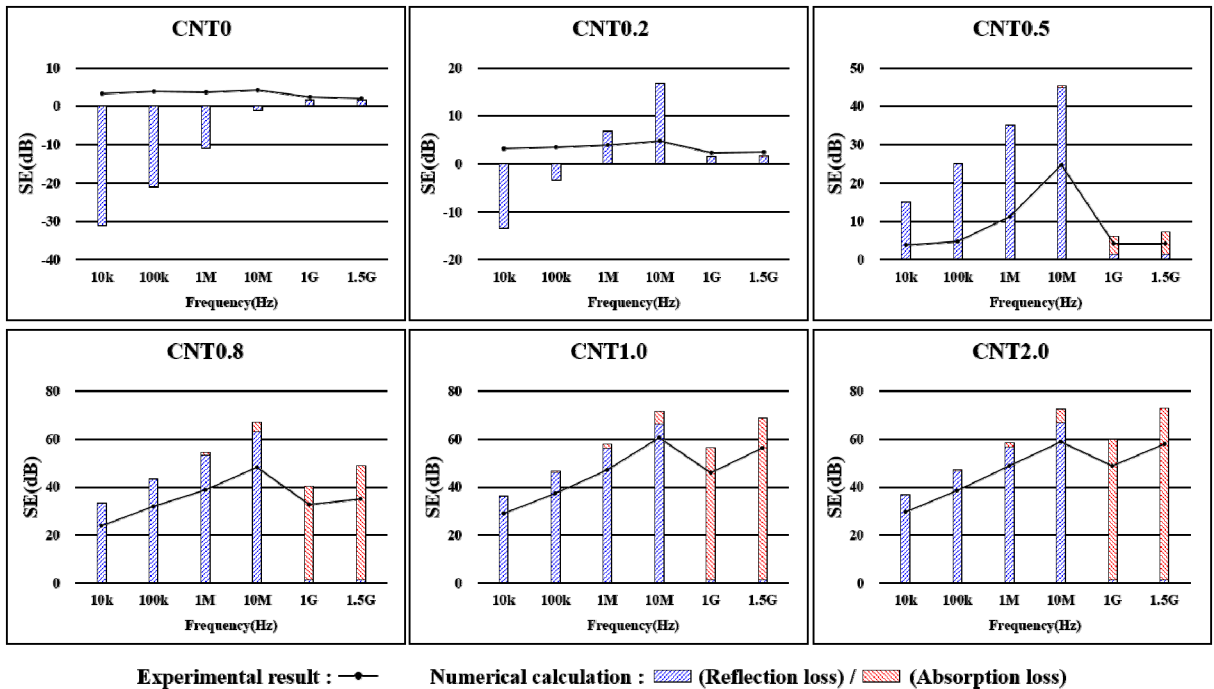


Fig. 7. Comparison between experimental result and numerical calculation

며 차폐재로 충분히 적용할 수 있다. 그리고 해당 재료로 구축된 실제 구조체가 동일한 차폐효과를 가진다고 간주할 수 있으며 이 연구에서 적용된 전자파 차폐효과 예측방법은 MIL-STD-188-125-1에서 제시하는 방법에 의거 수행된 유전체의 차폐효과를 대략적으로 예측하는데 사용될 수 있다.

3.2 UHPC/CNT 복합재료의 압축강도

UHPC/CNT 복합재료의 압축강도 시험결과는 Fig. 8 과 같다. 실험체별 압축강도의 오차범위는 ±6 % 이내로 하나의 배치(Batch)에서 타설된 실험체들이 균일하게 제작되었다고 할 수 있다. 시험결과를 보면 기준배합인 CNT0(Ref.)의 압축강도는 170.3 MPa로 나타났다. CNT0.2 실험체는 171.83 MPa로 기준배합 대비 일부 증가하였으나 오차범위 내의 결과로서 큰 영향은 없었다. 하지만 CNT0.5 실험체는 압축강도 192.2 MPa로 약 13 % 향상된 결과가 나타났다. 이는 CNT 고유의 성질과 나노입자의 공극 충전 효과(Filler effect)에 의한 것으로 판단된다. 반면에 CNT0.8 및 CNT1.0 실험체의 경우 물-시멘트비(Water-cement ratio, W/C)가 커졌음에도 불구하고 기준배합의 강도를 유지하거나 일부 증가하였다. 그 원인은 공극의 크기 및 개수의 증가 대비 CNT의 충전 효과가 더욱 컸거나 또는 매트릭스의 미세균열 생성 및 진전을 억제하도록 CNT가 적절한 가교 효과(Bridging effect)를 발휘한 것으로 판단된다. 균열 면에서의 SEM(Scanning Electron Microscope)촬영으로 확인된 CNT의 가교효과를 Fig. 9에서 볼 수 있다. 하지만 CNT2.0 실험체는 과도한 W/C로 인해 압축강도가 대폭 감소한 것으로 나타났다.

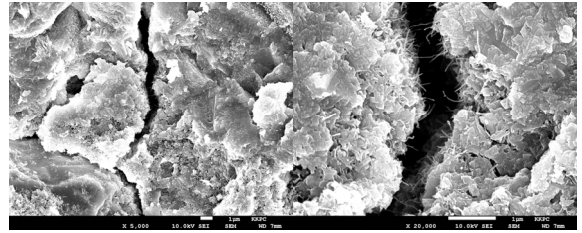


Fig. 9. Bridging effect of CNT on cracked surface

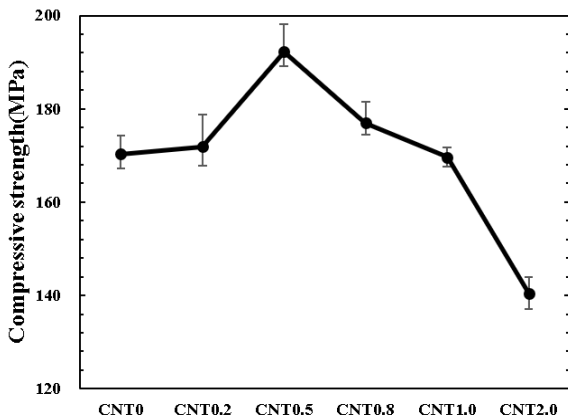


Fig. 8. Compressive strength

4. UHPC/CNT 복합재료의 방호성능 평가

UHPC/CNT 복합재료의 전자파 차폐시험 결과와 압축강도 시험결과를 종합적으로 판단했을 때 차폐효과를 극대화 하면서 기계적 성질을 최대한 유지하는 경우는 CNT1.0 실험체로 판단된다. 따라서 해당 실험체의 시험결과를 바탕으로 방호성능 평가를 실시하였다.

4.1 방탄 / 방폭성능 평가

방호시설은 화생방 방호시설 설계 / 시공지침에 의거 방호등급에 따라 콘크리트 소요두께를 산정한다. 특히 인원 / 장비를 방호해야 하는 경우 구조체의 최소 소요 두께를 입사각에 따른 배면파쇄한계두께(Scabbing limit thickness, T_s)로 산정할 수 있는데 그 값을 구하는 절차는 다음과 같다^[7].

먼저 탄체의 관입깊이(Penetration depth, T_0)를 식 (11)을 사용하여 계산한다.

$$T_0 = \left(\frac{2.216 W_T V^{1.5}}{D^{1.785} \sigma_{ck}^{0.5}} + 0.5D \right) \times c \tag{11}$$

- T_0 : penetration depth(cm)
- W_T : weight of missile(kg)
- D : diameter of missile(cm)
- σ_{ck} : compressive strength(MPa)
- V : velocity ratio[velocity/305(m/s)]
- c : correction factor for angle of fire

다음, 탄체 관입 후 폭발에 의해 발생하는 추가 관입깊이(Penetration depth by explosion, T_e)를 식 (12)를 적용하여 계산한다.

$$T_e = (1.04 \times 10^{10} (W/D^3)^4) \times D \tag{12}$$

X_e : additional penetration depth(cm)

W : weight of charge(kg)

따라서 전체 관입깊이는(Total penetration depth, T)는 $T_0 + T_e$ 이며 이 값을 이용해 식 (13)에 적용하여 배면파쇄한계두께(T_s)를 구할 수 있다.

$$T_s = \begin{cases} 7.91T - 5.06T^2/D, & T < 0.65D \\ 1.36T + 2.12D, & T \geq 0.65D \end{cases} \quad (13)$$

식 (11-13)을 이용해 CNT1.0 실험체에 대해 SAP500 폭탄에 대한 배면파쇄한계두께를 Table 5에 제시되어 있는 조건으로 계산하였다. 그 결과 2.2 m로 압축강도 24 MPa 콘크리트의 소요두께 3.87 m 대비 약 43 %가 감소하였다.

Table 5. Properties of SAP500

Total weight	Diameter	Charge weight	Velocity	Angle of fire
231.3(kg)	30.48(cm)	83.3(kg)	600(m/s)	15°

4.2 HEMP 방호성능 평가

MIL-STD-188-125-1에 제시된 HEMP 방호기준을 만족하기 위해서는 14 kHz에서 최소 20 dB 이상이 요구되며 주파수가 증가함에 따라 요망기준도 점점 증가하여 1 GHz에서 80 dB를 만족해야 한다. 앞서 계산된 CNT1.0 실험체의 배면파쇄한계두께인 2.2 m를 차폐재 두께로 가정하여 차폐효과를 예측하고 HEMP 방호기준과 비교하였다. 그 결과 Fig. 10과 같이 방호기준에서 요구하는 14 kHz ~ 1.5 GHz 주파수 범위에서의 최소 차폐효과를 모두 상회하였다. 또한 오차율을 고려하여 예측값의 80 %를 적용한 결과도 모든 기준에 부합되었다.

결론적으로 해당 실험체로 방호시설을 균일하게 구축할 경우 별도의 차폐시설을 구축하지 않아도 HEMP 방호성능을 보장하고 방탄/방폭성능을 만족 수 있다. 뿐만아니라 구조체 두께도 감소하여 시공비용 절감 및 실내 공간 활용의 효율성을 극대화 할 수 있다. 기존 HEMP 방호시설의 경우 차폐시설 설치공사가 전체 시공비용의 35 % 이상을 차지한다. UHPC의 재료비가 일반 콘크리트 대비 다소 고가이지만 기존 방식보다

는 적은 비용이 소요될 것이다. 또한 구조체의 내구성 강화, 실내면적의 확보 등을 종합적으로 고려한다면 이는 더욱 큰 장점으로 작용될 수 있다.

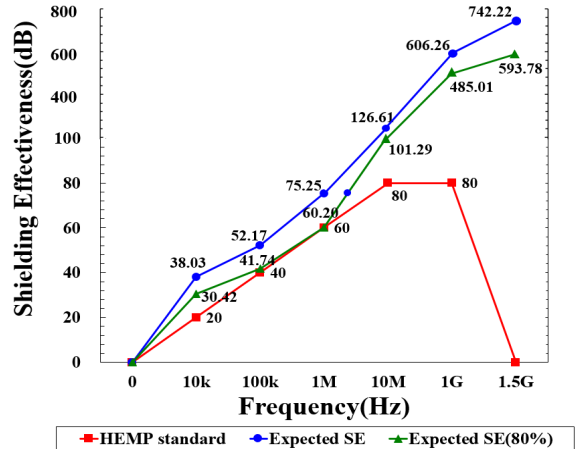


Fig. 10. Comparison between HEMP-Std. and Expected SE

5. 결론

이 연구에서는 UHPC/CNT 복합재료의 HEMP 방호성능을 평가하기 위해 전자파 차폐시험을 실시하고 그 결과를 전송선 이론을 적용하여 해석하였다. 그리고 방탄/방폭성능을 만족하기 위한 배면파쇄한계두께를 구한 다음, 이를 차폐재의 두께로 가정하여 차폐효과를 예측하고 HEMP 방호기준 부합여부를 확인하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) CNT가 혼입되지 않은 UHPC의 경우 재령 28일차 도전율은 $4.9E-08\Omega/m$ 였다. 하지만 CNT를 적용함에 있어 최대 $0.286\Omega/m$ 까지 도전율이 증가하였다. 실험에 사용된 CNT의 경우 침투임계점은 0.8 ~ 1.0 %로 판단된다.
- 2) 실험체 두께를 200 mm로 하고 MIL-STD-188-125-1에 의거 실시한 차폐시험 결과를 전송선 이론을 적용하여 해석한 결과, CNT가 혼입되지 않은 UHPC의 경우 낮은 도전율로 인해 전 주파수 영역대에서 차폐효과가 '0'에 가까웠다. 하지만 CNT 혼입량이 점점 증가할수록 동일 주파수에서의 차폐효과는 증가하였으며 특히 침투임계점 이상의 CNT가 혼입된

실험체의 경우 10 kHz에서 최대 29.55 dB, 1 GHz에서 최대 48.75 dB의 차폐효과를 나타냈다. 또한 차폐효과 예측값과 실험값의 오차율이 20 % 이하로서 해당 실험체는 유전체로 간주할 수 있으며 이 연구에 적용된 차폐효과 예측방법은 동일 실험방법으로 수행된 유전체의 차폐효과를 대략적으로 예측하는데 충분히 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 압축강도 시험결과 CNT는 충전 및 가교 효과로 인해 시멘트 매트릭스의 기계적 성질을 개선하는 것으로 나타났다. 하지만 목표 슬럼프를 일정하게 하기 위해 투입한 추가수의 영향으로 W/C가 증가한 실험체는 기준배합의 압축강도를 유지하거나 저하되었다.
- 4) 전자파 차폐효과를 극대화하면서 기계적 성질을 최대한 유지하는 것으로 판단되는 CNT1.0 실험체를 대상으로 HEMP 방호성능 평가를 실시하였다. 배면파쇄한계두께를 산정한 결과 2.2 m로서 동등한 방탄/방폭성능을 구비한 가운데 일반 콘크리트 소요 두께 대비 최대 43 %가 감소하였다. 그리고 이 값을 차폐재 두께로 가정하고 차폐효과를 예측한 결과 HEMP 방호조건을 전 주파수 영역대에서 모두 만족하였다. 따라서 해당 실험체로 방호시설을 균일하게 구축할 경우 방탄/방폭성능을 구비한 가운데 별도의 차폐시설 없이 HEMP 방호가 가능할 뿐만 아니라 구조체의 두께도 감소하여 시공비용을 절감할 수 있다.

결론적으로 적정량의 CNT가 혼입된 UHPC/CNT 복합재료는 차폐재로 적용가능하며 기존 HEMP 방호시설 시공방법의 단점을 보완할 수 있는 대안으로 적용될 수 있다. 하지만 이를 적용하기 위해서는 해당 복합재료를 현장에서 대량으로 타설함에 있어 재료의 균질성을 확보하고 재령일수에 의한 영향(Aging effect), 내구성 변화 등 다양한 요인들로부터 그 성능을 유지시키기 위한 연구들이 지속적으로 이루어져야 할 필요가 있으며 더욱 정확한 차폐효과 예측을 위해 전자기장 해석을 통한 실험값 비교 등의 연구가 수행되어야 한다.

References

- [1] Chun C. S., "North Korean Nuclear Crisis after the

Fifth Nuclear Test and South Korea's Future Strategy," *The Journal of Strategic Studies*, 23(3), pp. 7-38, 2016.

- [2] Choi H. J., Kim H. C., Lim S. W., and Lee H. S., "An Experimental Study on the Development of Electromagnetic Shielding Concrete Wall for Shielding High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP)," *Journal of the Korea Concrete Institute*, 29(2), pp. 169-177, 2017.
- [3] DMFC 4-40-70, "Defense and Military Facility Standards: Design Criteria for Electromagnetic Protection," Ministry of National Defense, p. 75, 2012.
- [4] Baoguo Han, Liqing Zhang and Jinping Ou, "Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures," Springer Singapore, pp. 242-282, 2017.
- [5] Kim G. M., Yang B. J., Cho K. J., and Lee H. K., "Influences of CNT Dispersion and Pore Characteristics on the Electrical Performance of Cementitious Composites," *Composite Structures*, 164, pp. 32-42, 2017.
- [6] Kim H. K., Nam I. W., and Lee H. K., "Microstructure and Mechanical/EMI Shielding Characteristics of CNT/Cement Composites with Various Silica Fume Contents," In: *UKC 2012 on Science, Technology, and Entrepreneurship*, California, USA; August 8-11, 2012.
- [7] B. Wang, Z. Guo, Y. Han, T. Zhang, "Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube/Cement Composites," *Construction and Building Materials*, 46, pp. 98-103, 2013.
- [8] Yi N. H., Kim J. H., Han T. S., Cho Y. G., and Lee J. H., "Blast-Resistance Characteristics of Ultra-High Strength Concrete and Reactive Powder Concrete," *Construction and Building Materials*, 28, pp. 694-707, 2012.
- [9] Nam I. W., Kim H. K., and Lee H. K., "Influence of Silica Fume Additions on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Multi-Walled Carbon Nanotube/Cement Composites," *Construction and Building Materials*, 30, pp. 480-487, 2012.

- [10] Kim H. K., Nam I. W., and Lee H. K., "Enhanced Effect of Carbon Nanotube on Mechanical and Electrical Properties of Cement Composites by Incorporation of Silica Fume," *Composite Structures*, 107, 60-69, 2014.
- [11] Zhitao Chen, Jacob Lok Guan Lim, and Yang En-Hua, "Ultra High Performance Cement-based Composites Incorporating Low Dosage of Plasma Synthesized Carbon Nanotubes," *Materials and Design*, 108, pp. 479-487, 2016.
- [12] Lee B. Y., and Lee J. S. "Evaluation of Dispersion of Activated Carbon Fiber in Mortar Using Electrical Resistivity Method," *Journal of the Korea Concrete Institute*, 29(3), pp. 283-290, 2017.
- [13] Hyun S. Y., Lee K. W., Kim M. S., and Yook J. G., "Electromagnetic Modeling of Shielding Effectiveness of Reinforced Concrete Walls," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 23(3), pp. 384-391, 2012.
- [14] Henry W. OTT, "Electromagnetic Compatibility Engineering," John Wiley & Sons Inc. Canada, pp. 238-256, 2009.
- [15] Park B. K., "Study on Measurement Methods of Electromagnetic Shielding Materials in the Frequency Band of 1 GHz ~ 18 GHz," pp. 11-18, 2010.
- [16] Surendra Loya, and Habibullakhan, "Analysis of Shielding Effectiveness in the Electric Field and Magnetic Field and Plane Wave for infinite Sheet Metals" *International Journal of Electromagnetics and Applications*, 6(2), pp. 31-41, 2016.
- [17] Kim S. B., "A Study on Protective Design Standards for Military Facilities" *Ministry of Defense*, Ch. 3 pp. 3-13, 2012.