



고고도 전자기파(HEMP)차폐를 위한 전자파 차폐 콘크리트 벽체 개발에 관한 실험적 연구

최현준¹⁾ · 김형철²⁾ · 임상우³⁾ · 이한승^{4)*}

¹⁾한양대학교 일반대학원 ²⁾(주)성신양회 기술연구소 ³⁾국방시설본부 경기북부시설단 ⁴⁾한양대학교 ERICA캠퍼스 건축학부

An Experimental Study on the Development of Electromagnetic Shielding Concrete Wall for Shielding High-altitude Electromagnetic Pulse (HEMP)

Hyun-Jun Choi,¹⁾ Hyung-Chul Kim,²⁾ Sang-Woo Lim,³⁾ and Han-Seung Lee^{4)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Sangrok-Gu, Ansan, 15588, Rep. of Korea

²⁾R&D Center, Sungshin Cement, Bugang-Myeon, Sejong Special Self-Governing City, Rep. of Korea

³⁾Defense Installations Agency, Deokyang-Gu, Goyang, 10556, Rep. of Korea

⁴⁾School of Architecture, Hanyang University, Ansan 15588, Rep. of Korea

ABSTRACT Rather than causing damage from heat, blast, and radiation of a regular nuclear weapon, recently, it is predicted that North Korea has been inventing high altitude electromagnetic pulse (HEMP) missile in order to incapacitate electronic equipment. HEMP shielding facility is used for military purpose today. Despite the electromagnetic shielding effects from high quality compression plates, problems may include such as the possibility of electromagnetic influx resulting in the welding of the compression plates, and difficulties and high cost of construction. Therefore, in this study, a high electrical conducting material was added to the concrete experimental subject to ensure the shielding effect through electromagnetic waves to for the concrete structure, instead of building a shielding facility separately for the structure. Also, among the experimental subjects, 100 μm of Iron-Aluminum alloy metal spraying coat was applied to two types with the highest shielding effect, and to two types with the lowest shielding effect. The result of the experiment indicates that experimental subjects added with a high electrical conductivity material did not meet the minimum shielding criteria of MIL-STD-118-125-1 standard, but all the experimental material applied to the metal spraying coating satisfied the minimum shielding criteria. In conclusion, it is considered that 100 μm of Iron-Aluminum alloy metal spraying coat contains high efficiency in the HEMP shielding.

Keywords : high-altitude, electro magnetic pulse, shielding effectiveness, concrete, arc-thermal metal spraying method

1. 서 론

1.1 연구 배경

현재 대한민국은 북한과 군사적 대치 상황에 놓여있으며, 북한은 2006년 1차 핵실험을 한 이후 총 5차례의 핵실험을 단행하였고 수차례에 걸친 미사일 발사 실험으로 북핵 문제가 더욱 심각해졌다.¹⁾ 일반적으로 핵무기의 공중폭발로 인하여 발생할 수 있는 가장 큰 피해요인은 열, 폭발, 방사능이

지만 최근 북한에서 개발 중인 핵무기는 변형된 핵무기, 즉 고고도 전자기파(High-altitude Electromagnetic Pulse: HEMP)를 통한 EMP (Electro Magnetic Pulse)공격을 통한 전력망, 통신망 전자 장비 등 국가 기간 시설들의 마비가 그 목적으로 예측되고 있다.²⁾

기존 차폐실은 Fig. 1과 같이 외부 구조물 내부에 밀폐된 도체의 격실로 구성되며, 이 중 차폐 판의 경우 도전성이 우수한 금속 판(강판, 구리판, 아연 도금 판 등)을 제작 및 가공 후 볼트 조립이나 용접을 통해 결합하고 있지만 이는 제작 시 가공의 어려움, 용접 및 볼트 결합 부위에서의 전자파 유입 가능성, 높은 시공비용 등이 문제시 되고 있다. 그러나 이를 개선하기 위한 차폐 공법이나 차폐재 개발을 위한 연구는 아직까지 부족한 실정이다.^{3,4)}

*Corresponding author E-mail : ercleehs@hanyang.ac.kr
 Received November 25, 2016, Revised February 13, 2017,
 Accepted February 15, 2017
 ©2017 by Korea Concrete Institute

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험 계획

2.1.1 사용 재료

본 연구에서는 전자파 차폐 성능을 높이기 위한 목적으로 철 함유량이 높은 재료를 선정하였다. 사용한 강섬유의 경우 직경 0.02 mm, 길이 19.5 mm의 직선형을 사용하였다. 자철광 굵은 골재와 전기로 산화 슬래그 굵은 골재는 굵은 골재를, PS Ball (Precious Slag Ball)의 경우 잔골재를 대체하여 사용하였다. Table 1은 사용 골재의 화학적 조성을 나타내며, 사용 골재의 성분 측정 결과 PS Ball은 33.1%, 산화슬래그 골재는 27.8%, 자철광 골재는 26.1%, 자철광 미분은 52%의 높은 Fe 함유량을 나타내었다. Table 2는 사용 골재의 비중을 나타낸다.

2.1.2 실험 인자 및 수준

Table 3은 전도성 재료를 혼입한 콘크리트의 전자파 차폐 성능 평가를 위한 콘크리트 배합사항을 나타내며, Table 4는 전자파 차폐성능을 평가하기 위한 콘크리트 벽체 개발에 관한 실험 인자 및 수준을 나타낸다.

실험 인자는 콘크리트 차폐재와 금속용사 차폐재이고, 이중 콘크리트 차폐재의 경우 Table 4와 같이 7수준으로 설정하였다. 강섬유의 경우 전도성이 높은 금속 성분이 주를 이루고 있어 전자파 차폐에 효과가 있다고 판단되어 혼입하였고, 예비 실험을 통하여 최적의 혼입 비율을 정하였다. 방사선의 경우 중량콘크리트를 사용하여 차폐를 하게 되는데,¹⁸⁾ 방사선은 에너지가 매우 높은 전자파이므로, 전자파 차폐 또한 중량 콘크리트를 사용하고자 중량골재인 산화슬래그 골재와 자철광 골재를 혼입하였다. PS Ball 또한 중량 및 차폐효과를 높이기 위해 사용하였으며, 자철광 미분은 강섬유

Table 1 Chemical composition of used materials

Type	Chemical proportion (%)						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Etc.
Fine aggregate	5.75	86.20	0.02	0.47	0.54	0.19	6.80
Coarse aggregate	13.00	64.00	0.16	5.66	3.19	2.17	11.80
PS ball	4.10	21.20	0.11	23.40	33.10	5.60	12.50
Oxidizing slag	7.70	20.90	0.60	28.60	27.80	5.70	8.70
Magnetite powder	2.30	21.20	0.40	3.70	52.00	18.40	2.00
Magnetite	3.00	37.00	0.04	9.38	26.10	21.70	2.80

Table 2 Density of used materials

Type	F·A	C·A	Steel fiber	PS ball	Oxidizing slag	Magnetite powder	Magnetite
Density	2.61	2.65	7.65	3.77	3.62	3.79	4.40

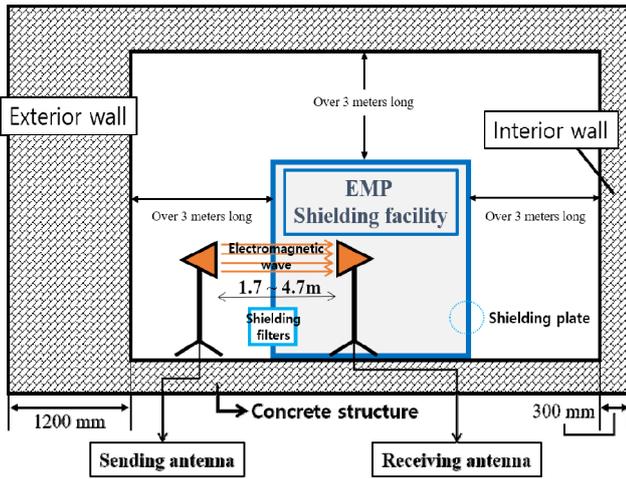


Fig. 1 Concept of existing EMP shielding room

국의 건설 분야의 전자파 차폐 관련 연구는 주로 카본계 물질(Carbon fiber, Graphite 등), 반사성이 큰 금속계 물질(Metal fiber, Metal powder, silver 등)을 이용하여 그 특성을 실험적으로 검증한 바 있다.⁵⁻¹⁰⁾ 하지만 이러한 연구는 고가의 신소재를 사용하여 상용화 측면에서는 다소 무리가 있다고 판단되며, 또한 콘크리트가 아닌 모르타르 시편을 이용하여 실험을 진행하였기에 실제 벽체에 적용하기에는 어려움이 있을 것으로 보인다.

국내 건설 분야에서는 전도성 재료인 금속섬유, 동슬래그를 혼입한 모르타르와¹¹⁾ 금속용사 공법을 적용한 콘크리트의 전자파 차폐 효과(Shielding Effectiveness : SE)를 확인하는 연구가 수행되었고,¹²⁾ 시멘트 복합체 이외의 재료로는 건축용 판유리,¹³⁾ 탄소계 도전성 재료를 이용한 무기도료의 전자파 차폐 성능을 확인한 바 있다.¹⁴⁾ 그러나 국내에서 수행한 시멘트 복합체의 전자파 차폐 성능에 관한 연구는 국외 연구와 마찬가지로 모르타르 시편을 이용하여 실용화에 어려움이 있을 뿐만 아니라 차폐성능을 단순히 차폐율(%)로 산출하는 등 전자파 차폐에 관한 연구 수준이 해외 및 국내 타 분야와 비교해 상대적으로 미비한 실정이다.

1.2 연구 목적

본 연구에서는 콘크리트에 도전성이 우수한 금속 재료를 혼입함과 동시에 차폐 효과를 높이기 위해 시공이 용이한 아크 금속용사 공법(Arc Thermal Metal Spraying- Method : ATMSM)을 적용하여 14 kHz~18 GHz 범위의 영역에서 IEEE-STD-299 및 MIL-STD-188-125-1, DMFC 4-40-70 규격을 참고하여 전자파 차폐 성능을 평가하였다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 또한, 혼입 재료를 달리한 콘크리트의 차폐 성능과 표면에 금속용사 처리를 하였을 시 차폐 성능을 비교·평가하고자 하였다. 이를 통하여 차폐시설을 따로 구축하지 않고, 구조체 자체로서 전자파 차폐 성능을 충족시키는 차폐 벽의 적용 가능성을 제시하고자 하였다.

Table 3 HEMP shielding concrete mixing proportion

Classification	Unit weight (kg/m ³)										(%)	
	W	C	Sea sand	River sand	Gravel	Steel fiber	PS Ball	Magnetite powder	Oxidizing slag	Magnetite	AD	AE
											Superplasticizer	Air entraining agent
OPC	158.4	350.0	441.0	445.2	924.0	-	-	-	-	-	0.85	0.1
0.5S1	158.4	350.0	441.0	445.2	924.0	39.2	-	-	-	-	0.60	
0.8S2	158.4	350.0	441.0	445.2	924.0	62.8	-	-	-	-	0.60	
0.5S-P303	158.4	350.0	441.0	445.2	924.0	39.2	-	105.2	-	-	0.85	
0.8S-P304	158.4	350.0	441.0	445.2	924.0	62.8	-	105.2	-	-	1.10	
E-PS5	175.2	350.0	-	-	-	-	1263.2	-	1256.0	-	0.60	
M-PS6	175.2	350.0	-	-	-	-	1263.2	-	-	1256.0	0.60	

0.5S1 : 0.5% steel fiber / 0.8S2 : 0.8% steel fiber / 0.5S-P303 : 0.5% steel fiber + 30% magnetite powder / 0.8S-P304 : 0.8% steel fiber + 30% magnetite powder / E-PS5 : Electric arc furnace oxidizing slag + PS Ball / M-PS6 : Magnetite + PS Ball

Table 4 Experimental factors and levels

Factors	Cases	Levels
Concrete Shielding	OPC	7
	0.5% Steel fiber	
	0.8% Steel fiber	
	0.5% Steel fiber + 30% Magnetite powder	
	0.8% Steel fiber + 30% Magnetite powder	
	Magnetite + PS Ball	
	Electric Arc Furnace Oxidizing Slag + PS Ball	
ATMSM Shielding	Zn - Al (100 μm)	1

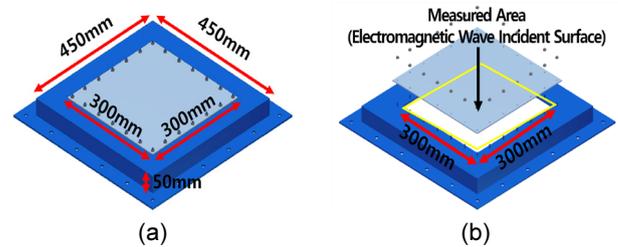


Fig. 2 Concrete mold for shielding effectiveness test

혼입 시 나타날 수 있는 블리딩 현상을 방지하기 위하여 배합 이외로 30% 추가 혼입하였다.

ATMSM의 경우 혼입 재료에 따른 전자파 차폐 성능 측정 후, 결과 값에 따라 하위 2가지 수준, 상위 2가지 수준 총 4가지 수준에 가장 상용화된 Zn-Al 금속용사를 최소 두께인 100 μm을 적용하여 전자파 차폐 성능 측정을 하였다.

2.1.3 전자파 차폐 실험용 실험체 제작

Fig. 2는 전자파 차폐 실험을 위한 콘크리트용 몰드의 모식도이다. 전자파의 특성 상 약간의 틈이 생길 경우 그 틈으로 전자파가 유출되어 결과 값에 큰 오차가 생기게 되어 강판을 이용하여 냉각 압연 방식으로 전자파 차폐용 콘크리트 몰드를 제작하였다.

Fig. 2(a)에서 나타낸 바와 같이 가로, 세로의 길이는 450 mm, 높이는 50 mm이며, 측정 면적의 경우 전자파가 주사되는 방향의 가로, 세로의 길이는 300 mm이다. 전자파 차폐용

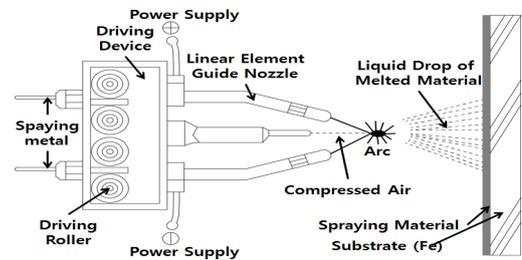


Fig. 3 Arc thermal metal spraying method

실험체는 온도 20±2°C, 상대습도 60±2%의 조건 하에서 체령 28일간 기건 양생을 실시하였다. 전자파 차폐 성능 측정을 위하여 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 300 mm × 300 mm의 앞 판을 탈거한 후 전자파를 주사하고, 그에 따른 수신 값을 측정하였다.

2.1.4 아크 금속 용사(ATMSM)

아크식 금속 용사 방법은 Fig. 3과 같이 아크 점에서 용융된 금속 선재가 압착공기를 내뿜는 용사건의 노즐에 의해 운반되어 피복 대상의 표면에 분산·냉각되면서 용사 대상에 도달해 급랭되어 고화, 적층된다. 이는 피복재 표면에 대해서 극단적인 열 영향을 주지 않으며 견고하고 안정한 피막을 형성하게 되고, 또한 종이나 목재에도 금속 용사 피막을 형

성시키는 것이 가능하다.¹⁹⁾

2.2 실험 방법 및 범위

2.2.1 콘크리트 기본 물성

콘크리트의 슬럼프는 150 ± 25 mm, 공기량은 $4.5 \pm 1.5\%$ 로 설정하였다. 콘크리트 믹싱 직후 슬럼프, 공기량, 단위 용적 질량을 측정하였고, 경화 콘크리트에서 단위 용적 질량, 압축강도, 휨 강도를 측정하였으며, 강도 측정은 재령 3, 7, 28일에 KS F 2405,²⁰⁾ KS F 2408²¹⁾에 의해 수행되었다. Fig. 4는 강도시험 장면을 보여준다.

2.2.2 전자파 차폐 성능

Fig. 5는 본 연구의 전자파 차폐 성능 평가 실험 모식도를 나타낸 것이다. 실험체가 설치 될 차폐 벽의 경우 아연 도금 판으로 이루어져 있고, 차폐 실 외부에서 안테나를 통해 송신된 전자파는 차폐 실 내부에서 차폐재를 투과한 전자파가 수신되고 결과 값이 측정된다. 전자파 차폐 성능은 재령 28일에 실시하였으며, 차폐재가 없는 Free space 상태에서 교정(Calibration)을 실시한 후 Fig. 5와 같이 실험체를 설치한 후 외부에 송신 안테나, 내부에 수신 안테나를 위치시켜 실험을 실시하였다.

Fig. 6의 (a)~(d)는 실험 과정을 나타낸 것이다. 안테나는 E사의 제품을 사용하였으며, 자계영역에서 Loop안테나(Model 6502), 공진범위·평면파 영역에서 LP (Log Periodic) 안테나(Model 3148B), 평면파 영역에서 Horn (Double-Rigid Wave guide Horn) 안테나(Model 3115)를 사용하였다. 신호 발생기는 9 kHz~3.2 GHz 사이의 신호를 발생시키는 A사의 8648C 모델과 10 MHz~50 GHz 사이의 신호를 발생시키



(a) Compressive strength (b) Bending strength

Fig. 4 Strength measurement test

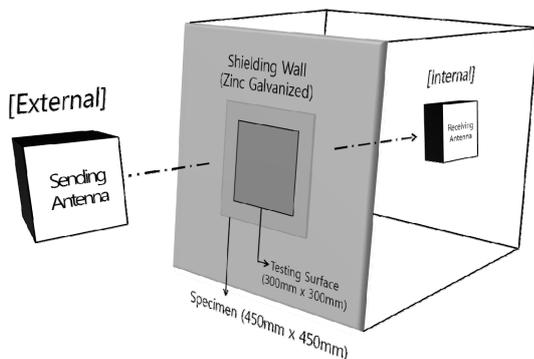


Fig. 5 Concept of shielding effectiveness test

는 H사의 83620A 모델을 사용하였다. 수신기는 M사의 5990-7421EN 모델을 사용하였다. 증폭기의 경우 9 kHz~1 GHz에서 S사의 310 모델을 사용하였으며 1~26.5 GHz에서는 A사의 8449B 모델을 사용하였다.

Fig. 7은 전자파 차폐 실험체의 설치 단면도를 나타낸다. 기존 차폐 벽에 실험체를 고정하기 위해 차폐 벽의 내부 및 외부에 실험체 고정판을 덧대어 볼트로 체결하여 실험체가 움직이지 않도록 한 후 실험을 실시하였다. 볼트로 결합하는 부분에서 전자파가 누출될 수 있기 때문에 가스켓(Gasket)

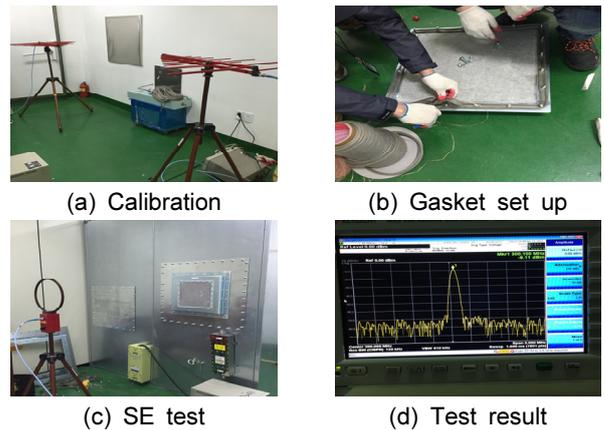


Fig. 6 SE test procedure

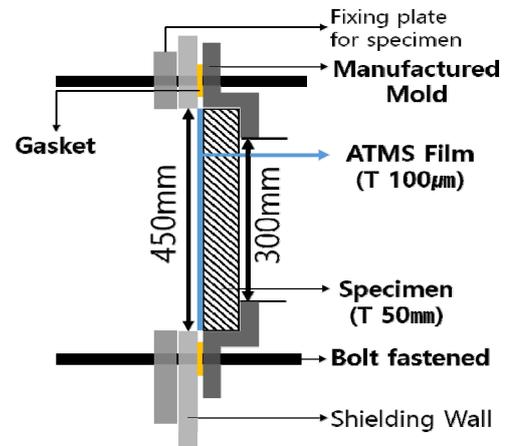


Fig. 7 Cross section of shielding effectiveness test

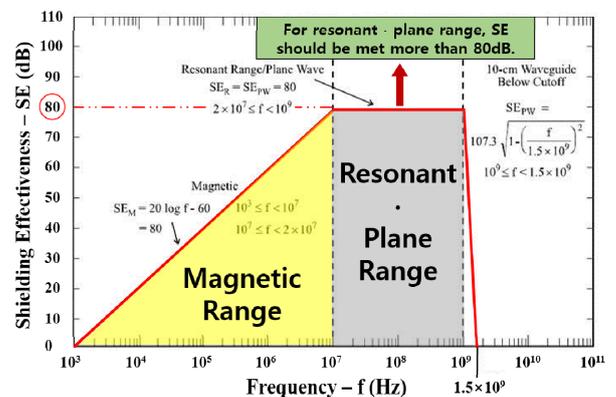


Fig. 8 Minimum standard of MIL-STD-118-125-1

Table 5 Frequency domain

No.	Tested frequency domain	Applied area	Electromagnetic wave type	Number of testing
1	14 kHz	Civil · Military facilities (HEMP)	Magnetic range (10 ³ ~2×10 ⁷ Hz)	3
2	140 kHz			3
3	14 MHz			3
4	300 MHz		Resonant · Plane range (2×10 ⁷ ~10 ⁹ Hz)	3
5	1 GHz			3
6	10 GHz	Civil facilities (EMC ¹)	Plane range (10 ⁹ ~10 ¹⁰ Hz)	3
7	18 GHz			3

EMC¹: Electromagnetic Compatibility

처리를 하여 누출을 방지하였다.

Fig. 8은 MIL-STD-118-125-1의 HEMP 차폐제에 대해 요구되는 각 주파수 영역에 대한 전자파 차폐 효과 기준을 나타내며, 저 주파수(자계 영역)에서 고 주파수(공진범위 · 평면파)까지 요구되는 최소 차폐 효과(SE)를 확인할 수 있다.

SE의 단위는 데시벨(dB)로써 나타내고, 이는 전자파 유입 시 차폐제에 의한 전자파 감쇠량을 알 수 있다. 이 차폐 효과는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있는데, 이는 차폐제가 없는 교정(Calibration) 상태에서 전력 수신량 대비 차폐제가 설치된 상태에서의 전력 수신량의 비를 나타낸 것이다.²²⁾

$$SE[dB] = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1)$$

여기서, P1은 차폐제 설치 전 측정 점에서의 전력 밀도(mW)이고, P2는 차폐제 설치 후 측정 점에서의 전력 밀도(mW)이다. SE 10 dB는 인입되는 전자파 전력세기의 90%를 차폐한다는 뜻이고, 20 dB는 99%, 30 dB는 99.9%의 차폐 효율을 가진다는 것을 의미한다.

Table 5는 실험 주파수 대역을 나타낸다. 실험 주파수 대역은 민간, 군사 시설에 적용되는 낮은 범위인 자계 영역에서 높은 범위인 평면파 영역에 걸쳐 MIL-STD-118-125-1에 의거하여 선택하였다. 측정 횟수는 전자파 실험의 경우 송수신 안테나의 높이 및 주변 환경 등에 의해 많은 영향을 받으므로 각각 3회씩 측정 후 평균값을 도출해 신뢰성을 확보하고자 하였다.²³⁾

3. 실험 결과 및 분석

3.1 혼입 재료에 따른 굳지 않은 콘크리트의 기본 물성

Table 6은 혼입 재료에 따른 굳지 않은 콘크리트의 기본 물성 측정 결과를 나타낸다. 모든 실험체가 설정 기준을 만족하는 결과로 나타났으며, 단위용적질량은 중량 골재인 산

Table 6 Physical properties of fresh concrete

Classification	Slump (mm)	Air contents (%)	Density (ton/m ³)	
			premise	practice
OPC	160	6.2	2.33	2.27
0.5S	140	4.5	2.37	2.36
0.8S	125	4.0	2.39	2.37
0.5S-P30	145	3.6	2.47	2.38
0.8S-P30	145	3.9	2.49	2.44
E-PS	145	5.5	3.04	3.13
M-PS	150	6	3.04	3.0

Table 7 Strength of Hardened Concrete

Classification	Compressive strength (MPa)			Bending strength (MPa)		
	days			days		
	3	7	28	3	7	28
OPC	22.9	29.8	34.6	4.9	5.4	6.1
0.5S	22.3	30.7	36.9	5.4	5.6	6.9
0.8S	15.4	22.3	29.9	4.0	5.4	6.8
0.5S-P30	22.3	30.6	38.0	4.0	5.6	6.3
0.8S-P30	19.4	27.2	35.2	4.0	5.2	6.1
E-PS	31.6	41.0	50.1	5.9	6.2	6.6
M-PS	22.9	31.4	42.3	4.6	4.8	5.7

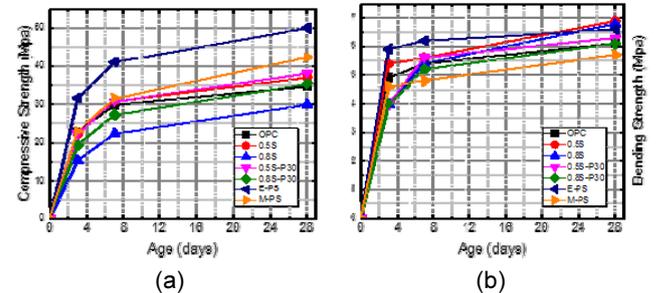


Fig. 9 Results of Compressive and Bending strength

화슬래그 굵은 골재와 자철광 굵은 골재를 사용한 E-PS 실험체와 M-PS 실험체의 결과 값이 높게 나타났다.

Table 7과 Fig. 9는 혼입 재료에 따른 재령 3, 7, 28일에 따른 콘크리트의 압축강도 및 휨강도 결과를 나타낸다. 0.8S 실험체의 압축 강도 및 휨 강도는 0.5S 실험체의 강도에 비해 낮은 값을 보이는데, 이는 0.8S 실험체의 강섬유 혼입량이 적정량을 넘어섰다는 것을 의미하며, 콘크리트에 강섬유를 0.8% 혼입 할 경우 뭉침 현상(Fiber Ball)로 인해 강도가 발현되지 않은 것으로 판단된다.

자철광 미분에 의한 강도 증진 효과는 0.8S-P30 실험체에서 나타났다. 이는 자철광 미분의 물 흡수에 따른 블리딩 억제로 인한 결과라고 판단된다.

또한, E-PS 실험체와 M-PS 실험체의 강도는 타 실험체에

비해 높은 값을 보였는데, 이는 단위용적질량에 의한 영향으로 판단된다.

3.2 콘크리트 차폐재의 전자파 차폐 성능 평가

3.2.1 혼입 재료에 따른 콘크리트의 전자파 차폐 효과

Fig. 10은 혼입 재료에 따른 콘크리트의 전자파 차폐 성능 실험 결과 값을 나타낸 것이다. 실험 결과 7개 실험체 모두 14 kHz 대역의 주파수를 제외한 영역에서 최소 차폐기준을 만족하지 못하였다.

그래프의 경향성을 보면 자계영역인 14 kHz, 140 kHz, 14 MHz에서는 모든 실험체가 동일한 경향성을 보이는 반면 공진범위·평면파영역, 평면파 영역인 300 MHz, 1 GHz, 10 GHz, 18 GHz에서는 실험체마다 차폐 효과의 차이가 나타났다.

이에 주파수에 따라 자계영역, 공진범위·평면파 영역, 평면파 영역으로 나누어 송신할 때의 전력(P_1)과 수신할 때의 전력(P_2) 두 가지로 나누어 분석을 실시하였다.

3.2.2 자계 영역에서 전자파 차폐 효과

자계 영역에서는 Loop안테나를 사용하였다. Fig. 11은 식 (1)에서 차폐재 설치 전 측정 점에서의 전력 밀도인 P_1 을 나타낸 그래프이다.

주파수가 높아짐에 따라 전력밀도는 낮아지는 경향을 보이는데, 이는 주파수가 높아질수록 외부 요인에 의한 신호

감쇠율이 높아 전력밀도가 낮아지는 경향을 나타내는 것으로 판단된다. 이같은 경향은 공진범위·평면파영역, 평면파영역에서도 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 식 (1)에서 차폐재 설치 후 측정 점에서의 전력 밀도인 P_2 를 나타낸 그래프이다. 이 또한 주파수가 높아짐에 따라 신호 감쇠로 인한 전력밀도의 저하 경향이 나타났다.

앞의 식 (1)을 풀어 쓰면, $10 \log P_1 - 10 \log P_2$ 이고, P_2 가 작을수록 SE 결과 값은 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12에서 주파수 14 kHz의 0.8S-P30 실험체의 P_2 값이 0.0003855 mW로 가장 낮으며, SE는 Fig. 10에서 34.16 dB로 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 자계영역에서 P_2 값은 14 kHz~140 kHz에서 99.92% 감소하였고, 140 kHz~14 MHz에서 99.99% 감소하였다. 이는 Fig. 10의 자계영역에서 모든 실험체의 SE 값이 비슷한 경향성을 설명한다. 또한 이는 7개 실험체 모두 자계 영역에서 전도성이 높은 혼입재료가 전자파 차폐 성능에 미치는 영향이 미비하다는 것을 의미한다.

이는 낮은 주파수인 자계 범위의 파의 형상에 기인하며, 주파수가 높아질수록 파장이 짧아지는데, 상대적으로 파장이 긴 자계 영역의 저주파는 회절성이 강해 전자파가 혼입재료가 고르지 못한 영역을 따라 유출된 것으로 판단된다.

3.2.3 공진범위·평면파 영역에서 전자파 차폐 효과

공진범위·평면파 영역에서는 LP안테나를 사용하였다. 전자파 차폐 성능은 300 MHz에서 최소 차폐 기준의 평균

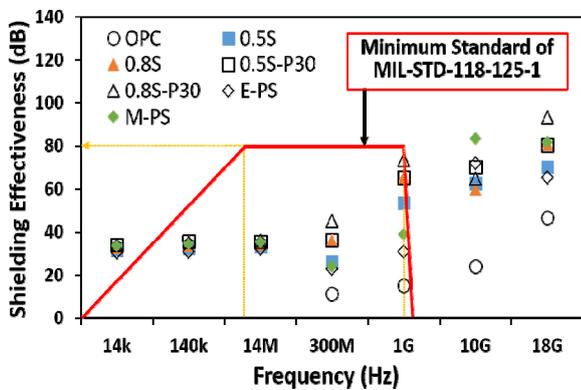


Fig. 10 Shielding effectiveness of all specimens

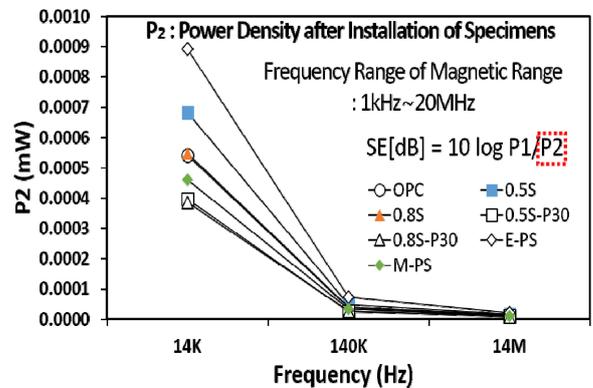


Fig. 12 P_2 (mW) in magnetic range

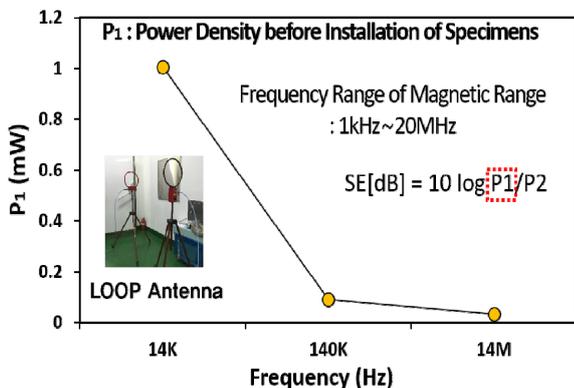


Fig. 11 P_1 (mW) in magnetic range

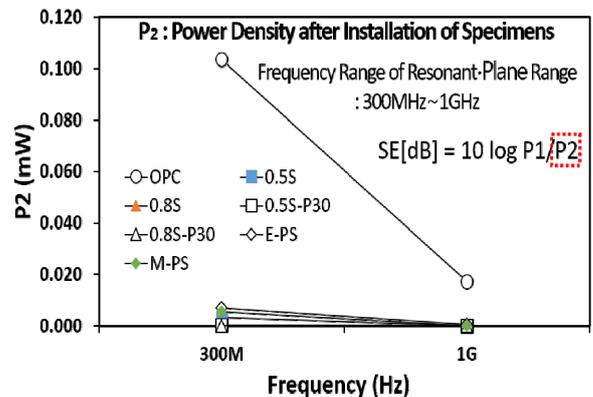


Fig. 13 P_2 (mW) in Resonant-Plane Range

63.87% 감소된 성능을 나타내었고, 1 GHz에서는 평균 38.84% 감소된 성능을 나타내었다.

Fig. 10에서 주파수가 증가할수록 전자파 차폐 성능이 증가하는 경향을 나타내었는데, OPC 실험체와 타 실험체를 비교했을 시 전도성 재료를 혼입한 실험체가 상대적으로 차폐 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

공진범위·평면파 영역에서의 P2인 Fig. 13을 고려했을 때 300 MHz 영역에 비해 1 GHz 영역이 상대적으로 파장이 짧아 직진성이 강하기 때문에 혼입 재료에 의한 차폐 효과 증진이 있다고 판단된다.

OPC 실험체의 P2 범위는 0.02~0.1 mW인 반면 나머지 실험체의 범위는 0~0.01 mW로 극히 낮았으며, 소수점 둘째 자리에서 넷째 자리까지의 결과 값을 나타내었다.

강섬유 0.5% 혼입 시 차폐 효과는 최대 1 GHz 영역에서 38 dB(전력 밀도 약 6309배 차이) 증가하였으며, 0.8% 혼입 시 48 dB(전력 밀도 약 63095 배 차이) 증가하였으나 작업성 저하 및 블리딩이 발생하여 0.5% 강섬유 혼입이 적정 수준이라고 판단된다.

3.2.4 평면파 영역에서 전자파 차폐 효과

평면파 영역에서는 Horn 안테나를 사용하였다. MIL-STD-118-125-1 규격 상 1.5 GHz 이후로는 최소 차폐 기준이 없기에 차폐 성능만을 평가하였다.

Fig. 14의 P₂값 또한 자계 및 공진범위·평면파 영역과 마찬가지로

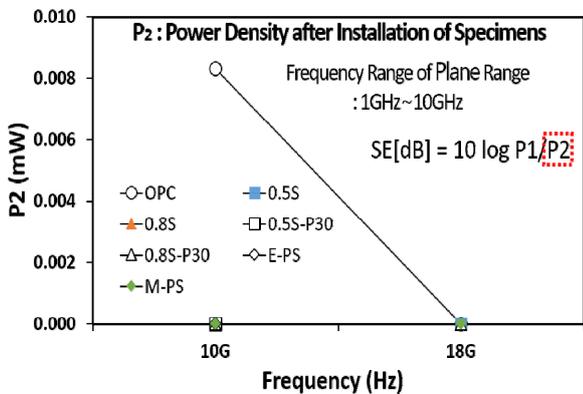


Fig. 14 P₂ (mW) in plane range

가지로 주파수가 증가할수록 신호 감쇠에 의한 전력밀도의 저하가 나타났으며, 전도성 혼입 재료에 의한 차폐 효과가 공진범위·평면파 영역에서의 차폐 효과보다 증진되었다.

OPC 실험체의 P₂ 범위는 약 0.000003~0.008 mW이고, 나머지 실험체의 범위는 소수점 12번째 자리에서 8번째 자리까지의 분포를 나타내었다.

3.2.5 자철광 미분의 전자파 차폐 효과

Fig. 15는 0.8S 실험체와 자철광 미분이 30% 혼입된 0.8S-P30 실험체를 비교한 결과를 나타낸다.

차폐 성능은 자계 영역에서 약 4.8%, 공진범위·평면파 영역에서 약 14.38%, 평면파 영역에서 약 11.47%로 자계영역보다는 공진범위·평면파, 평면파 영역에서 효과가 증가하는 경향을 보였다.

자철광 미분 사용 시 전자파 차폐 효과는 약간 증가하는 반면, 흡수율이 52%로 매우 높아 분체에 혼입하여 사용하기 어려워 차폐 재료로서의 가능성은 없다고 판단된다.

3.3 ATMSM 적용 유·무에 따른 차폐 성능 비교

Figs. 16~17은 100 μm Zn-Al 아크 금속용사를 적용한 실험체(OPC*와 0.8S-P30*)와 적용하지 않은 실험체의 비교 결과를 나타낸다.

ATMSM을 적용하기 전의 차폐 효과 하위 2가지 수준은 OPC, E-PS 실험체이고, 상위 2가지 수준은 0.5S-P30, 0.8S-P30

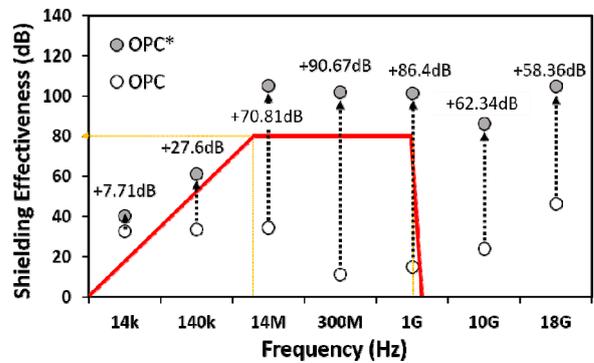


Fig. 16 Comparison of OPC before and after ATMSM

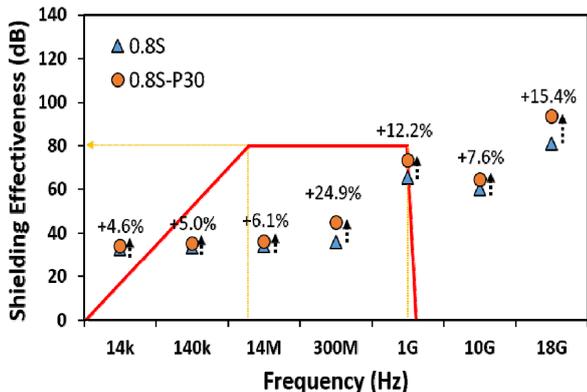


Fig. 15 Comparison between 0.8S and 0.8S-P30

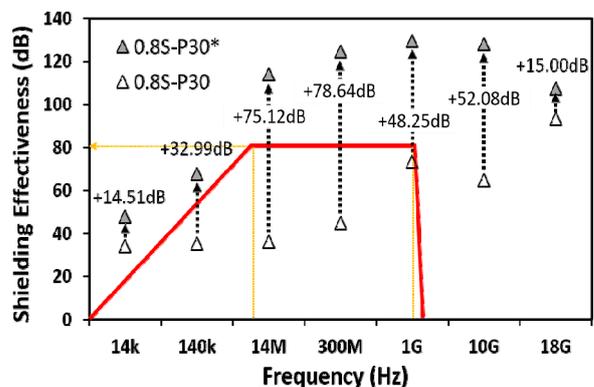


Fig. 17 Comparison of 0.8S-P30 before and after ATMSM

실험체로 나타났다.

총 4가지 수준에 Zn-Al 아크 금속용사 피막을 적용한 후 SE test를 실시한 결과 4가지 수준 모두 기준 차폐 성능을 만족하는 결과를 나타내었다. 이는 콘크리트 표면의 금속 용사 피막에 의한 반사 손실에 의한 것으로 판단되며, 최소 두께인 100 μm 로도 전자파 차폐 효과를 볼 수 있다는 것을 의미한다.

ATMSM 적용 전 가장 낮은 차폐 효과를 보인 OPC 실험체의 경우 최대 300 MHz에서 102.04 dB로, 797.4% 증가된 차폐 성능을 나타냈다.

가장 높은 차폐 효과를 보인 0.8S-P30 실험체의 경우 최대 1 GHz에서 129.37 dB로, 약 65.7% 증가된 차폐 성능을 나타냈다.

자계 영역인 14 kHz, 140 kHz에서는 각각 평균 11.57 dB, 72.89 dB만큼 증가하였다. 공진범위·평면파 영역인 14 MHz, 300 MHz, 1 GHz에서는 각각 평균 73.3 dB, 85.78 dB, 72.89 dB만큼 증가한 결과 값을 나타냈다. 평면파 영역인 10 GHz, 18 GHz에서는 각각 평균 54.08 dB, 37.71 dB만큼 증가하였고 이를 통해 Zn-Al ATMSM을 적용할 경우 최소 두께만으로 충분한 차폐 효과를 볼 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 HEMP 차폐실을 따로 구축하지 않고 혼입 재료, 아크 금속용사 공법을 실험 인자로 하여 구조물 자체로써 차폐 성능을 충족시키는 전자파 차폐 벽체 시스템의 적용 가능성을 평가를 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 혼입 재료에 의한 전자파 차폐 효과는 0.8S-P30 > 0.5S-P30 > 0.8S > M-PS > 0.5S > E-PS > OPC의 순으로 나타났다. 이는 주파수가 낮을 시 상대적으로 긴 파장의 영향으로 인해 혼입 재료에 의한 효과를 보지 못하였기 때문으로 판단되며, 주파수가 높을 경우에는 상대적으로 짧은 파장으로 인해 혼입 재료에 의한 차폐 효과를 볼 수 있었으나 모든 시험체가 최소 요구 차폐 수준에는 미치지 못하였다.
- 2) 강섬유 혼입 시 블리딩 현상으로 인하여 52%의 높은 흡수율을 가진 자철광 미분을 30% 추가 혼입하였으나 이로 인한 전자파 차폐 성능의 증가분은 자계 영역에서 약 4.8%, 공진범위·평면파 영역에서 약 14.38%, 평면파 영역에서 약 11.47%로 그 폭이 미미하였다. 따라서, 자철광 미분은 높은 흡수율 및 차폐 효과에 큰 영향이 없어 콘크리트 혼입용 전자파 차폐 소재로써는 부적합할 것으로 판단된다.
- 3) 콘크리트에 적용한 Zn-Al 금속용사 피막의 경우 최소 피막 두께인 100 μm 로 반사 손실에 의한 모든 영역대의 최소 요구 차폐 수준을 만족하였다. 특히 OPC에 적용한 금속 용사 피막의 차폐성능 결과 100 dB 이상의 값을 나타내었다. 이는 따로 전도성 재료를 혼입하지

않고, 일반 콘크리트에 금속 용사 피막 적용 시 높은 수준의 전자파 차폐 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

- 4) 본 실험방법에서 외부 요인에 의한 전자파 손실이 있었고, 이를 보완하기 위해서는 도파관 이용을 해야 하지만 실험체 제작에 어려움이 있어 이를 해결할 적절한 방법이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A5A1037548)

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*, Vol.23, No.3, 2016, pp.7-38.
2. Lee, W.G., “EMP Protecting Measurements and Required Technology”, *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, Vol.24, No.1, 2013, pp.79-96.
3. Kim, H. S., “Reality and Developmental Methods of EMP Threats”, *Defense & Technology*, Vol.414, 2013, pp.98-103.
4. Kim, H.G., and Lee, H.K., “Development of Electromagnetic Wave Absorbing/Shielding Construction Materials”, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.6, 2008, pp.70-74.
5. Chung, D.D.L., “Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Materials”, *Carbon*, Vol.39, No.2, 2001, pp.279-285.
6. Chen, B. and Wu, K. and Yao, W., “Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Cement-based Composites”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.26, No.4, 2004, pp.291-297.
7. Dai, Y., Sun, M., Liu, C., and Li, Z., “Electromagnetic Wave Absorbing Characteristics of Carbon Black Cement-based Composites”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.32, No.7, 2010, pp.508-513.
8. Xu, Z., and Hao, H., “Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Aluminum Foams with Different Porosity”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.617, 2014, pp.207-213.
9. Dou, Z., Wu, G., Huang, X., Sun, D., and Jiang, L., “Electromagnetic Shielding Effectiveness of Aluminum Alloy-Fly ash Composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.38, No.1, 2007, pp.186-191.
10. Jin, L., Haiyan, Z., Ping, L., Xijiang, Y., and Guoxun, Z., “The Electromagnetic Shielding Effectiveness of a Low-cost and Transparent Stainless Steel Fiber/Silicone Resin Composite”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol.56, No.2, 2014, pp.328-334.
11. Kim, Y.J., and Yi, C.K., “The UHF Wave Shielding Effectiveness of Mortar with Conductive Inclusions”,

- Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol.31, No.4, 2015, pp.103-110.
12. Lee, S.M., and Lee, H.S., “An Experimental Study on the Electromagnetic Shielding Efficiency of Concrete Applying Metal Spraying Finishing Method”, *The Proceedings of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol.25, No.1, 2005, pp.225-228.
 13. Lee, M.B. and Roh, J.S., “A Study on the Electromagnetic Shielding Effects of the Metal-coated Window-glass in Architecture”, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.9, No.7, 1993, pp.101-106.
 14. Lee, S.H., Shim, J.W., Park, D.C., and Jung, M.Y., “Properties and Shielding Efficiency of Electromagnetic Wave Absorbing Inorganic Paint Using Carbon”, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol.19, No.1, 2003, pp.69-76.
 15. IEEE Std 299, “IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997, 39pp.
 16. MIL-STD-188-125-1, “High-altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-based C4I Facilities Performing Critical, Time-urgent Missions Part 1 Fixed Facilities” Department of Defense Interface Standard, 1998, 98pp.
 17. DMFC 4-40-70, “Defense and Military Facility Standards: Design Criteria for Electromagnetic Protection”, Ministry of National Defense, 2012, 75pp.
 18. Lee, H.K., Park, C.K., and Lee, S.H., “High-Density Concrete for Nuclear Shielding and Submarine Pipelines Protection”, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.18, No.1, 2006, pp.71-74.
 19. Park J.H., and Lee, H.S. and Shin, J.H., “An Experimental Study on Evaluation on Bond Strength of Arc Thermal Metal Spraying According to Treatment Method of Water Facilities Concrete Surface”, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.16, No.2, 2016, pp.107-115.
 20. KS F 2405, “Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete”, Korea Industrial Standards, 2010, 6pp.
 21. KS F 2408, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete”, Korea Industrial Standards, 2016, 11pp.
 22. Nhan, H.N., Jean-Louis, M., and Jean-Luc, W., “Modeling of Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multilayer Conducting Composites in the Microwave Band.” *Communications and Electronics, ICCE'06. First International Conference on*, IEEE, 2006, pp.482-485.
 23. Baek, I.Y., “An Experimental Study on the Electromagnetic Shielding Performance of Arc Thermal Metal Spraying Film as Shielding Material for High-altitude Electromagnetic Pulse(HEMP)”, Hanyang University Graduate School of Engineering, 2015, 46pp.

요 약 북한은 최근 핵무기의 일반적인 열, 폭발, 방사능 피해가 아닌 전자 장비를 무력화시키기 위한 고고도 전자기파 탄을 개발 중인 것으로 예측되고 있다. 현재 군용 목적으로 사용되고 있는 HEMP 차폐 시설 중 차폐 판의 경우 전자파 차폐 효과가 뛰어난 금속 판이 사용되고 있으나 이러한 금속판들은 차폐 시설 제작 시 용접 부위에서의 전자파 유입 가능성 등 시공상의 어려움과 높은 비용이 문제시 되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서 차폐 시설을 따로 구축하지 않고 콘크리트 구조물 자체로써 전자파 차폐 효과를 확보하기 위하여 콘크리트 실험체에 전기전도성이 높은 재료를 혼입하였다. 또한, 실험체 중 가장 높은 차폐 효과를 보인 2가지 수준과, 가장 낮은 차폐 효과를 보인 2가지 수준에 100 μm 아연-알루미늄 합금 금속용사 피막을 적용하였다. 실험 결과 전기전도성이 높은 재료를 혼입한 실험체는 MIL-STD-118-125-1 규격 최소 차폐 기준을 만족하지 못하였으나, 금속용사 피막을 적용한 실험체에서는 모두 최소 차폐 기준을 만족하였다. 결론적으로, 100 μm 아연-알루미늄 합금 금속용사 피막이 HEMP 차폐에 높은 효율성을 가지고 있다고 판단된다.

핵심용어 : 고고도, 전자기파, 차폐 효과, 콘크리트, 금속 용사