

Study on the Magnetic Shield Effect of Carbon-based Materials at Extremely Low Frequency

탄소계 소재를 이용한 극저주파 영역에서의 자기 차폐효과 연구

Seong Moon Oh, Dong Su Kang, Sang Min Lee, Un Gyeong Baek, Jae Seung Roh†
오성문, 강동수, 이상민, 백운경, 노재승†

School of Materials and Systems Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Daehakro 61, Gumi, 730-701, Korea
†jsroh@kumoh.ac.kr

Abstract

To examine the magnetic shielding effect for carbon-based materials at extremely low frequencies (60 Hz), two types of carbon black (Super-P and Denka Black) and a natural graphite (HC-198) were mixed into organic binder at 10 wt.% to produce a coating solution, and a powder coating with varying thickness was applied on an aluminum disk measuring 88 mm in radius. A device was developed to measure the shielding effect at extremely low frequencies. A closed circuit was achieved by connecting a transformer and a resistor. The applied voltage was fixed at 65 V, and the magnetic field was measured to be the range of 4.95~5.10 mG. Depending on the thickness of the coating layer, the magnetic field showed a decreasing trend. The maximum decrease in the magnetic field of 38.3% was measured when natural graphite was coated with specimens averaging 455 μm . This study confirmed that carbon-based materials enable magnetic shielding at extremely low frequencies, and that the magnetic shielding effect can be enhanced by varying the coating thickness.

Keywords : Magnetic field, magnetic shielding, carbon-based materials, extremely low frequency

I. 서론

최근 산업 문명의 급격한 발전에 따라 민간 및 군사용으로 전기, 전자 및 통신기기의 사용이 확대되고 있다. 그러나 이러한 기기들은 인류에게 편의를 제공하면서도 기기로부터 발생하는 전자파가 여러 유해요소들을 유발시킨다고 알려져 있기 때문에 이를 방지하기 위한 전자기파 차폐에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]-[5].

전자계란 전계와 자계가 영향을 미치는 공간으로 전자기장이라고도 하는데 전자계에는 여러 종류가 존재하고 주파수에 따라 미치는 성질과 영향이 매우 다르다. 특히 30 kHz 이상의 영역을 전자기파(EMI: Electromagnetic interference)라 하며, 방사되는 전자기파를 재료에 의해 반사 및/또는 흡수에 의해 차폐하는 것을 전자기파 차폐(EMI shielding)라고 한다 [6]. 전자기파 차폐는 극저주파(ELF: Extremely low frequency, 즉 60 Hz)의 자기장(magnetic fields) 차폐인 자기 차폐(magnetic shielding)와 구별되며 [7], 자기 차폐가 극저주파 영역에서의 자기장을 감소시키는 방법으로 인식되고 있다 [8].

전자기파 차폐 소재에 대한 연구는 2000년대 이후 활발하게 보고되고 있다. 일반적으로 차폐 소재로서 전도성이 좋은 금속 재료들이 사용되고 있으며, 탄소소재 등이 폴리머 수지와와의 복합재료로 고주파 영역의 전자기파 차폐 소재로서 건축외장재, 시트, 도료 등의 형태로 연구되고 있다 [9]-[17].

극저주파 영역의 자기 차폐는 직업적 노출, 생물학

적 효과 등 인체의 유해성과 연관성을 두고 연구가 진행되고 있지만 [18] 국내외에서 논문 형태로 보고된 사례를 찾기 어려우며, Ni계 합금(MuMETAL®, MAGNETIC SHIELD사, U.S.A.)나 퍼멀로이 등 일부 금속재료들이 상품으로 판매되고 있다 [19]. 그러나 이러한 금속계 재료는 가격이 비싸고 무겁다는 단점이 있어 [20], 모바일 등의 휴대용 기기, 가전제품, 통신설비 및 자동차 등 생활용품 등에 이용되기에는 한계가 있을 것으로 사료된다.

특히 탄소소재를 이용한 극저주파 차폐 연구 사례는 보고된 적이 없으며, 상용품 또한 찾아볼수 없다. 따라서 본 연구에서는 극저주파 영역에서, 경량이며 비교적 저렴한 탄소소재의 자기 차폐 가능성을 알아보고자 하였다. 추후 적용 가능성을 생각하여 코팅방법으로 시편을 제작하였다. 대표적인 탄소소재인 분말 형태의 카본블랙과 천연흑연을 금속기판에 코팅하였고, 코팅 층 두께에 따른 자기 차폐 변화율을 측정하여 그 효과를 분석하였다

II. 실험

A. 원료

본 연구에서 2종의 상용 카본블랙 분말과 천연 흑연 분말을 원료로 사용하였다. 카본블랙은 상용 전도성 카본블랙인 Super-P와 Denka Black을 사용하였으며, 천연 흑연은 HC-198을 사용하였다. 각 원료에 대한 공급회사의 정보 및 입자 형상은 각각 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 입자형상은 본 대학이 보유한 전자현미경(FE-SEM

Table 1. Information of raw materials

Raw Materials	Manufacturers	Density(g/cm ³)	Particle Size(μm)
Super-P	Timcal(Swiss)	0.16	0.040
Denka Black	DENKI KAGAKU KOGYO K.K.(Japan)	0.25	0.035
HC-198	Hyundai Coma (Korea)	1.73	25.0

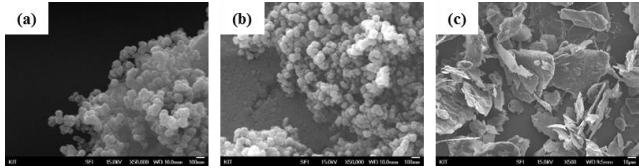


Fig. 1. SEM Images : (a) Super-P. (b) Denka Black. (c) HC-198

6500F. Jeol)을 이용하여 관찰하였다. 입자형상 관찰 결과 Super-P와 Denka Black는 약 20~40 nm 크기를 갖는 구형의 1차 입자들이 응집되어 2차 입자를 이루고 있음을 확인하였다. 천연흑연 HC-198은 판상이 잘 발달된 형상임을 확인하였다.

B. 시편제조 및 기초분석

우선 분말 형태의 원료를 금속기판에 코팅하기 위하여 코팅액을 제조하였다. 코팅액은 각 원료 분말을 필터로 하여 유기계 바인더에 무게비로 10 wt.% 첨가하여 제조하였다. 직경 88 mm, 두께 0.36 T의 원형의 알루미늄 원판에 수지로 절연 코팅 한 제조된 코팅액을 분체도장하였다. 코팅 층의 두께에 따른 자기 차폐효과를 알아보기 위하여 두께변화를 주었다. 분체도장 시 분사시간을 변화시켜 코팅 층 두께 변화를 주었으며 원료별로 각각 세 개의 시편을 제조하였다. 두께운 시편 제조 시에도 분사는 연속분사로 한번에 실시하였다. 분체도장 실시 후 건조기를 이용하여 60°C에서 1 시간 경화시켰다. 경화 시 분위기는 공기중에서 실시하였다.

제조된 시편의 두께 측정은 마이크로미터로 다섯 지점의 두께를 측정하여 평균을 구하였다. 다섯 지점은 각각 상좌하우 끝에서부터 20 mm 내부와 정 중앙의 두께를 측정하였다. Fig. 2는 코팅시편의 예를 보여주고 있다. 코팅은 Denka Black이고, 맨 오른쪽에 두께 측정 예를 보여주고 있다.

또한 기하학적인 방법으로 코팅 층의 밀도를 구하였으며, 원료 별 코팅 상태를 분석하기 위하여 코팅 층의 표면을 SEM으로 100 배에서 관찰하였다.

C. 극저주파 자기장 측정

극저주파 영역대의 자기장을 측정하기 위하여 Fig. 3 과 같은 소형 장치를 고안하였다. 자기장 측정은 지구 자기 등의 외부 자장에 민감하므로 시편의 자기장 측정에 영향을 주지 않도록 소형 차폐 몸을 제작하여 측정하였다.

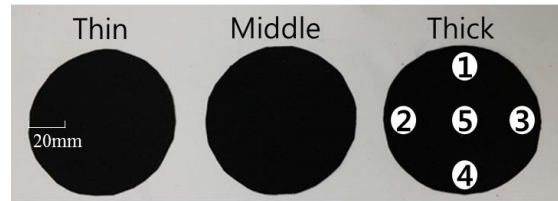


Fig. 2. Denka Black Coated samples and thickness measuring positions

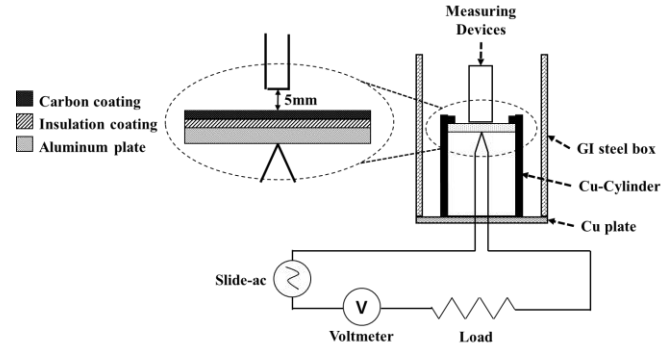


Fig. 3. Apparatus for magnetic field measurement

우선 외부 자기장이 인가 전류-시편-측정기기 사이의 자기장 흐름에 영향을 주지 않도록 Cu-원통을 사용하였다. 원통 내 전선으로부터 나오는 자기장은 넓은 산포로 측정되었다. 이를 안정화하기 위해 원판형 알루미늄 기판을 단자에 고정함으로써 4.95~5.10 mG의 자기장을 얻을 수 있었다. 자기장은 거리에 따라 감소하므로 본 연구는 높은 값의 자기장을 기준으로 코팅 종류에 따른 자기장 변화값을 분석하고자 하였다 [21]. 극저주파 영역대의 자기장 측정장비는 시편의 탄소소재 코팅부위 상단 5 mm 위에 설치하였다. 또한 외부 자기장 영향을 최소화 하기 위하여 Cu-원통 및 측정 기기 전체를 감싸는 용융아연도금강판(Galvanized Iron plate, 이하 GI강판)으로 된 상자를 설치하였으며, 이 모든 장치를 Cu-판 위에 설치하여 바닥 자기장을 차폐하였다. 누설전류가 발생하지 않도록 Cu-원통, Cu-판 및 GI강판 상자 모두 접지하였다.

전선, 교류전압인가장치(60 Hz) 및 저항체를 이용하여 폐회로를 만들고, 전선 한 가닥을 알루미늄 기판에 연결시켜 전압을 조정하여 알루미늄 기판의 상단에서 측정되는 인가 자기장 세기를 변화시킬 수 있다. 측정 기기는 TENMARS사(Taiwan)의 GTM-190을 사용하였으며, 50~60 Hz의 극저주파 영역대 전용 자기장 측정 기기(측정범위; 0.02~2000 mG)이다.

III. 결과 및 고찰

A. 코팅 층 두께 및 밀도

시편의 코팅 층 두께 및 밀도 측정 결과를 Table 2 와 Fig. 4에 나타내었다. Table 2에는 각 원료 분말 종류에 따른 두께 변화 시편에 대하여 S1, S2...등의 시편 명으로 표기한 것을 함께 나타내었다.

코팅 시 분사시간을 변화시키면서 두께 조절을 하

Table 2. Average thickness and density values of the coating layers

Samples / Notation	Average thickness (μm)	St. Deviation of thickness	Average Density (g/cm ³)
Super-P	S1	143	19.4
	S2	165	50.5
	S3	343	109.6
Denka Black	D1	130	7.0
	D2	254	43.4
	D3	599	12.8
HC-198	H1	180	13.4
	H2	244	12.3
	H3	455	42.8

려 하였다. HC-198의 코팅 시 500 μm를 목표로 분사한 시간을 기준으로 100 μm 및 250 μm의 두께 조절 시간을 정하였고, Denka Black과 Super-P의 코팅에도 같은 조건을 적용하였다. 그러나 분사시간을 일정하게 조절하였음에도 분말 종류에 따라 코팅 층의 평균 두께는 다르게 측정되었다. HC-198의 최고 두께는 평균 455 μm로써 목표 두께에 근접하게 코팅 되었다. 그리고 Denka Black은 코팅 층의 최고 두께는 평균 599 μm이고, Super-P의 최고 두께는 평균 343 μm을써 목표 두께와는 매우 큰 차이를 나타냈다. 또한 두께 표준편차는 최소 7.0에서부터 최대 109.6까지 시편에 따라 그 차이가 컸다.

밀도 변화 또한 Table 2에서 볼 수 있듯이 원료 분말에 따라 그 변화 값이 다를 수 있다. Super-P는 전반적으로 가장 작은 밀도 값을 보이며, 분사 시간이 증가할수록 밀도는 증가하다가 감소하는 경향을 보여 가장 오래 분사시킨 시편의 밀도는 0.35 g/cm³를 나타내었다. Denka Black은 분사시간이 증가할수록 밀도가 초기에 급격히 감소하는 경향을 보인다. HC-198은 분사 시간에 따라 밀도가 증가하는 경향을 보인다.

이렇게 동일 조건에서 분사된 코팅 층의 두께 및 밀도 변화는 원료 분말의 평균입도와 밀도 등의 분말 특성에 기인한 것임을 추측할 수 있다.(Table 1 참조)

B. 코팅 층 표면형상 관찰

Fig. 5는 SEM으로 관찰한 코팅 표면의 형상을 관찰한 결과를 정리한 사진이다. Super-P의 경우, S2는 S1에 비하여 조밀한 표면 구조를 보인다. 그러나 S3는 S2에 비하여 요철이 크게 증가하여 표면 밀도가 감소하는 것처럼 보이며 노출된 크랙이 관찰되었다. Denka Black은 분사시간이 길어질수록(D1, D2 및 D3)로 갈수록 분말이 응집되면서 표면의 요철 증가 및 밀도 감소를 관찰할 수 있다. HC-198은 H1, H2 및 H3로 갈수록 표면의 요철이 감소하고 치밀해 지는 것을 관찰할 수 있다.

동일 분사 조건에서 원료 분말 종류에 따른 코팅 층의 두께 변화 및 밀도 차이는 코팅 층의 표면 형상 변화 관찰함으로써 그 해석에 도움을 받을 수 있다. 코팅 층의 두께변화 차이를 밀도 및 SEM 표면형상 관찰 결과와 함께 해석하면 아래와 같다.

Super-P의 경우 표면의 두께 산포가 매우 심하여 S1

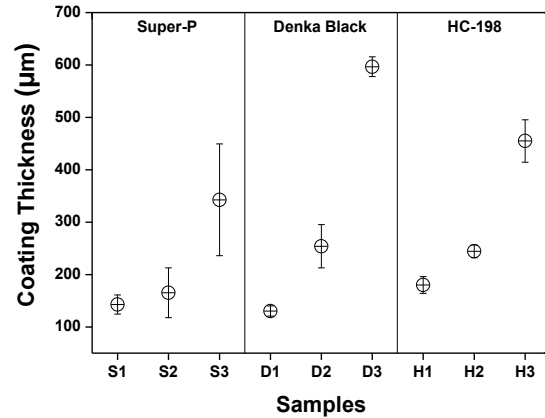


Fig. 4. Coating thickness data plots of samples

의 산포는 52 μm로써 평균 표준편차는 19.4였고, S3의 산포는 259 μm에 달하여 그 표준 편차는 109.6이었다. 밀도 변화 측정에서도 분사 시간이 증가할수록 치밀해지다가 밀도가 떨어짐을 알 수 있으며, 이는 SEM 관찰 결과와도 일치한다. 이는 원료 분말의 낮은 밀도 때문인 것으로 판단된다. 분체도장 시 분말은 공기압력으로 기관에 점착되게 된다. 분사 초기에 기관에 점착된 원료 분말은 계속 이어지는 공기의 압력과 추가로 점착되는 분말의 타격 때문에 코팅 층에서 떨어져 나간 것으로 상상할 수 있다.

Denka Black은 연구에 사용한 원료 분말 중 가장 작은 1차 입자로 구성되어 있다. 따라서 매우 작은 1차 입자들이 2차 입자로 응집되면서 분사되어 요철이 생성된 것으로 설명할 수 있다. Denka Black은 Super-P에 비해 원료 분말의 밀도가 더 크다. 점착된 응집분말 주위를 잡고 있는 유기계 바인더가 경화 되면서 응집된 분말이 코팅 층의 두께를 증가시키고, 따라서 밀도는 최저 값을 나타내었다고 판단된다. 이는 SEM 관찰 결과와 일치한다.

HC-198의 경우 분말 밀도 및 입자 크기 또한 때문에 분사 시 코팅 기관에 잘 점착 될 것이고, 따라서 코팅 층 두께 산포가 작은 안정적인 코팅층을 형성한 것으로 판단된다.

C. 코팅 두께에 따른 자기 차폐 효과 분석

Fig. 3의 고안된 측정장치를 이용하여 코팅 층의 유류 및 종류에 따른 자기장을 측정하였고, 그 데이터를 이용하여 탄소물질에 의한 자기 차폐효과를 분석하였다. 장치에 의한 자기장 측정 순서는 다음과 같았다.

- (1) 코팅이 되지 않은 알루미늄 기관을 Cu-원통의 상단의 시편 거치대에 고정,
- (2) 일정 전압에서 알루미늄 기관의 상단 5 mm 지점에서 자기장 측정(레퍼런스 자계),
- (3) 코팅이 되지 않은 알루미늄 기관을 Cu-원통의 시편 거치대에서 제거,
- (4) 탄소소재가 코팅된 알루미늄 기관을 Cu-원통의 시편 거치대에 고정

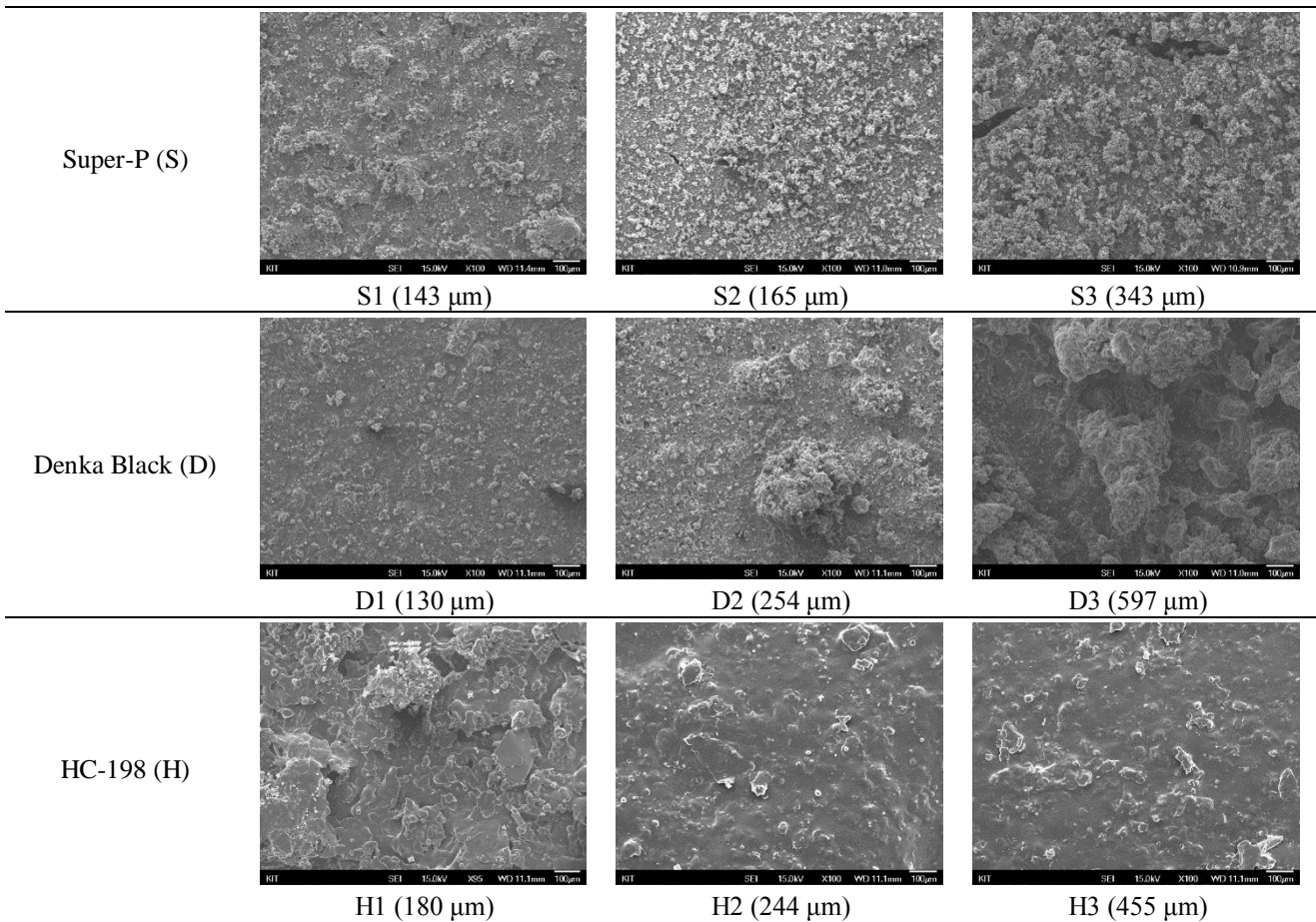


Fig. 5. Surface morphologies of the coated surfaces using SEM (X100)

- (5) 동일 전압에서 탄소소재가 코팅된 알루미늄 기판의 상단 5 mm 지점에서 자기장 측정,
- (6) 코팅 전-후의 자기장 변화 분석

코팅이 안 된 알루미늄 기판을 거치대에 고정하고, 65 V의 전압을 인가하였을 때 측정된 자기장 값은 4.95~5.10 mG를 나타내었다. 이 값은 측정 시점을 바꾸어도 안정적이었고, 6 시간 지속적으로 측정하여도 안정적으로 나타내었다. 이 때의 조건을 레퍼런스 자기장으로 정하였다.

원료 종류별 코팅 두께에 따른 자기장값 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 탄소소재를 코팅하였을 때 모두 자기장이 감소하는 경향을 보임으로써 극저주파 영역대에서 탄소소재의 차폐 가능성을 확인하였다. 또한 코팅 층 두께가 증가할수록 자기장이 감소하여 두께 효과가 있음을 확인하였다.

천연흑연인 HC-198로 코팅된 시편이 자기장 감소율이 가장 높게 측정되었고, 두께에 따라 각각 4.07 mG, 4.04 mG, 3.10 mG로 감소하여 최대 38.3%의 자기장 감소율을 보였다. HC-198의 경우 두께를 더욱 증가시킨다면 자기장 감소율을 더욱 증가시킬 것으로 기대된다. Super-P와 Denka Black의 경우 HC-198에 비해 자기장 감소율이 낮게 측정되어 S3는 16.9%, D3는 18.0%를 나타내었다. 또한 Table 2와 Fig. 4에서 알아보았듯이 차폐 소재에 의한 자기장 감소율은 차폐소재 층의 두께, 밀도 등과

관계가 있음을 알 수 있다. 우선적으로 탄소소재를 이용한 자기 차폐를 위해서는 치밀화 및 두께 증가가 필요하다고 할 수 있다.

반면 탄소소재의 밀도를 크게 증가시키지 않아도 차폐효과가 있음을 데이터에서 알 수 있다. HC-198의 경우 H3의 밀도는 H2에 비하여 오히려 감소하였지만, 자기장 감소율은 직선적으로 증가하였다. 또한 Fig. 6에서 두 종류의 카본 블랙도 얇게 코팅된 시편(S1 및 D1)의 자기장 감소율은 H1에 비하여 크게 나쁘지 않았고, 두께가 증가하여 코팅 층의 품질이 나빠짐으로써 자기장 감소율이 크게 떨어졌다. 일반적으로 Super-P와 Denka Black와 같이 분말의 크기나 밀도가 너무 작으면 분체분사코팅은 어려운 작업이기 때문에 카본블랙 분말만을 이용하여 좋은 품질의 코팅 층을 제조하기는 어렵다.

따라서 탄소소재의 분사공정이 개발된다면 Super-P와 Denka Black과 같이 저렴한 재료로 가벼운 코팅 막을 만들 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 가장 우수한 특성을 나타낸 HC-198과 Super-P 및/또는 Denka Black과의 하이브리드 분말공정을 개발한다면 더 가볍고 우수한 성능의 자기 차폐 소재를 개발할 수 있을 것을 기대된다.

IV. 결론

탄소소재를 이용하여 극저주파에서의 자기차폐효과

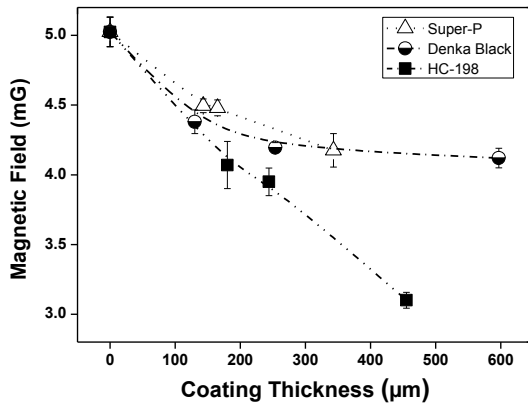


Fig. 6. Magnetic field changes as a function of coating thickness

Table 3. Summary of the magnetic field shield effectiveness

Samples / Notation / Thickness(μm)		Ave. Magnetic Field (mG)	Rate of Decrease (%)	St. Deviation	
Super-P	None	0	5.025	0.0	0.106
	S1	143	4.495	10.5	0.050
	S2	165	4.480	10.8	0.057
	S3	343	4.175	16.9	0.120
Denka Black	None	0	5.025	0.0	0.106
	D1	130	4.380	12.8	0.085
	D2	254	4.195	16.5	0.035
	D3	597	4.120	18.0	0.071
HC-198	None	0	5.025	0.0	0.106
	H1	180	4.070	19.0	0.170
	H2	244	3.950	21.4	0.099
	H3	455	3.100	38.3	0.057

를 확인하기 위하여 카본블랙 2종(Super-P, Denka Black)과 천연흑연(HC-198)을 Al 기판에 두께를 변화시키면서 코팅하였다. 두께변화에 따른 자계변화를 밀도 및 표면형상 변화와 함께 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

극저주파 영역대의 자계차폐 효과 측정장치를 제작하여 안정적인 자계측정이 가능하였다. 측정장치 제작시 Cu 및 GI 강판을 이용하여 외부의 전자파 영향을 차단시킴이 증명되었다.

카본블랙 및 천연흑연 소재로 코팅된 시편을 놓았을 때 자계가 감소하였다. 상기 결과를 통해 극저주파 영역대에서 탄소소재의 자계 차폐 가능성을 확인하였다.

코팅층의 두께가 증가할수록 차폐효과가 증가하는 것을 확인하였으며, 천연흑연인 HC-198이 455 μm로 코팅된 시편이 차폐효과가 가장 좋았으며, 그때의 자계 변화는 38.3%의 감소율을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Korea Electrical Engineering & Science Research Institute and Korea Electric Power Corporation (KEPCO).

REFERENCES

[1] P.Y. Park, "Preparation and Characterization of polymer

- nanofiber for EMI shielding", Department of Chemical Engineering Graduate School, Keimyung University, 2010
- [2] N. Li, Y. Huang, F. Du, X. He, X. Lin, H. Gao, Y. Ma, F. Li, Y. Chen and Peter C. Eklund, "Electromagnetic Interference (EMI) Shielding of Single-Walled Carbon Nanotube Epoxy Composites", Nano Letters, Vol. 6, 2006, pp.1141-1145
- [3] S.S. Tzeng, F. Chang, "EMI shielding effectiveness of metal-coated carbon fiber-reinforced ABS composites", Material Science and Engineering: A, Vol. 302, 2001, pp.258-267
- [4] K.B. Cheng, S. Ramakrishna, K.C. Lee, "Electromagnetic shielding effectiveness of Copper/glass fiber knitted fabric reinforced polypropylene composites", Composites A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 31, 2000, pp.1039-1045
- [5] S.B. Kim, J.Y. Soh, K.Y. Shin, J.H. Jeong and S.H. Myung, "Magnetic Shielding Performance of Thin Metal Sheets Near Power Cables", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.46, 2010, pp.682-685
- [6] Q. Liu, D. Zhang, T. Fan, J. Gu, Y. Miyamoto and Z. Chen, "Amorphous carbon-matrix composites with interconnected carbon nano-ribbon networks for electromagnetic interference shielding", Carbon, Vol.46, 2008, pp.461-465
- [7] D.D.L. Chung, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials", Carbon, Vol. 39, 2001, pp. 279-285
- [8] Kong S., Du Y., Bunnett J., "Experiment on Finite-width planar sheets for ELF Magnetic Field Shielding", 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1999, pp.524-527
- [9] N.C. Das, D. Khastgir, A. Chakraborty, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fiber filled EVA and NR based composites" composites part A, Vol.31, 2000, pp. 1069-1081
- [10] H.J. Park, "A Study of the Electromagnetic Shielding for CFRP in Electronic Devices", Department of Carbon Fusion Engineering Graduated School, Jeonju University, 2014
- [11] Y.Y. Kim, "Variation in electromagnetic interference shielding characteristics of polymer nanocomposites by surface treatment of carbon nanotubes", Department of Applied Chemistry and Biological Engineering, Graduated School, Chungnam National University, 2011
- [12] K.Y. Kim, "A Study on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Composites with Conductive Filler", Chosun University, 2011
- [13] D.H. Song, "A study on Electromagnetic interference shielding effectiveness of the Metal mesh/fiber reinforced composites", Department of Mechanical Engineering Graduated School, Chosun University, 2010
- [14] Xiangcheng Luo, Chung D.D.L., "Electromagnetic interference shielding using Composites part B: Engineering", Vol.30, 1999, pp. 227-331
- [15] H.M. Kim, K. Kim, S. Lee, J. Joo, H.S. Yoon, S.J. Cho, S.C. Lyu and C.J. Lee, "Charge transport properties of composites of multiwalled carbon nanotube with metal catalyst and polymer: application to electromagnetic interference shielding", Current Applied Physics, Vol.4, 2004, pp. 557-580

- [16] H.C. Chen, K.C. Lee, J.H. Lin, "Electromagnetic and electrostatic shielding properties of co-weaving-knitting fabrics reinforced composites," *Composites part A*, Vol. 35, 2004, pp. 1249-1256
- [17] Yang S., Lozano K., Lomeli A. Foltz H.D. and Jones R., "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites", *Composites Part A*, Vol 36, 2005, pp. 691-697
- [18] S.Y. Lee, Y.S. Lim, I.H. Choi, D.I. Lee and S.B. Kim, "Effective Combination of Soft Magnetic Materials for Magnetic Shielding", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.48, 2012, pp.4550-4553
- [19] "MOST RECOGNIZED BRAND OF MAGNETIC SHIELDING ALLOY WORLDWIDE", MAGNETIC SHIELD Corp.
- [20] G. Y. Han, J. S. Kim and D. G. Ahn, "A Study on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of the Metal Powders and Nano Carbon black / Fiber Reinforced Epoxy composites", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 23, 2006, pp. 100-107
- [21] William E. Feero, "Electric and Magnetic Field Management", *American Industrial Hygiene Association Journal*, Vol.54, 2010, p205-210