

박판 자성 재료를 이용한 전력 케이블 인근의 자기장 차폐

Magnetic Shielding with Thin Magnetic Materials near Power Cables

김상범 · 소준영 · 신구용 · 정진혜* · 명성호**

Sang-Beom Kim · Joon-Young Soh · Koo-Yong Shin · Jin-Hye Jeong* · Sung-Ho Myung**

요 약

본 연구에서는 자기장 차폐를 위하여 3상 전력 케이블을 얇은 자성 판재로 둘러싸는 방법을 제안한다. 두꺼운 상용 뮤-메탈, 방향성 및 무방향성 규소 강판을 출발 재료로 하여 두께 0.1 mm의 차폐재 3종류를 제조하였다. 3상 전류일 때, 차폐재 위치의 자기장이 100 μ T 정도이면 뮤-메탈이(SF<0.1) 가장 효과적이었고, 500 μ T 이상이면 규소 강판이(SF 0.3~0.4) 더 효과적이었다. 또한, 안쪽에 방향성 규소 강판, 바깥쪽에 뮤-메탈을 함께 둘러쌀 경우 500 μ T까지도 SF를 0.1 이하로 할 수 있었다. 한편, 단상 전류에서는 고 투자율 소재의 적용은 오히려 자기장을 증가시키는 결과를 보였다. 이상의 결과는 자기장 강도 H 의 크기에 따라 각 소재의 투자율 우열이 서로 다른 점과 이로 인해 차폐재 내에 유도되는 자기장 벡터와 원래의 자기장 벡터의 상호 상쇄 및 중첩 작용으로 설명할 수 있었다.

Abstract

In this work, wrapping conductors with thin magnetic materials is proposed as a magnetic shielding method. The 0.1 mm thick metal sheets of mu-metal, grain-oriented electrical steel, and non-oriented electrical steel were produced from commercial alloy sheets through cold rolling and followed high temperature annealing. In case of 3-phase electric currents, mu-metal was the best in shielding performance at a B -field magnitude of about 100 μ T, whereas silicon steels were better than mu-metal at a B -magnitude over 500 μ T. In addition, wrapping with silicon steel(inner) together with mu-metal(outer) resulted in a shielding factor less than 0.1 even at 500 μ T. These results are due to changes in hierarchy of magnetic permeabilities of the materials with increasing magnetic field strength. In case of single-phase electric current, B -magnitude outside the magnetic shell was rather increased compared to the unshielded case. This result is explained by vector composition of B -fields near magnetic shielding materials.

Key words : ELF, Magnetic Shielding, Power Cable, Shielding Factor

I. 서 론

전력 설비로부터 발생하는 60 Hz 극저주파 자기장을 저감하고자 하는 노력은 자기장의 전자기 기기에 대한 간섭뿐만 아니라 인체 영향 가능성 때문에 비롯되었다. 전자기 기기에 대한 간섭의 대표적인 사례가 0.5 μ T의 미약한 자기장에서도 나타나는

CRT 모니터의 화상 떨림 현상이다^[1]. 자기장의 인체 영향에 대한 논란은 1979년 Wertheimer와 Leeper^[2]가 전력선 인근의 소아암에 관한 역학연구를 발표함으로써 시작되었다. 이를 검증하는 연구가 이후에도 다수 수행되었지만 상반된 결과가 공존함으로써 60 Hz 자기장의 인체 영향에 대한 논란은 지금까지 지속되고 있다^{[3]~[5]}.

한전 전력연구원(Korea Electric Power Research Institute)

*(주)키스타(KISTAR Co.)

**한국전기연구원(Korea Electrotechnology Research Institute)

· 논문 번호 : 20090527-051

· 수정완료일자 : 2009년 7월 20일

이러한 논란에 대처하는 방식은 국가별로 차이가 있으나, 선진국을 중심으로 ‘현명한 회피(prudent avoidance)’ 원칙에 입각하여 가능한 한 자기장 발생량을 저감시키자는 정책이 전개되고 있다. 저감 방법은 지금까지 다양하게 제시되어 왔는데, 가공선의 경우 근본적으로 역방향 자기장을 발생시키거나, 3상 혹은 역상의 전선을 서로 가깝게 배치하는 등 벡터 상쇄 원리에 근본을 두고 있다⁶⁾. 이와 다르게 전력 케이블은 절연성이 확보되어 밀접하게 배치되기 때문에 전선의 재배치에 의한 저감 효과는 더 이상 기대하기 어렵다. 또한, 작업자나 일반인이 근거리까지 접근 가능하여 자기장 노출 수준도 매우 클 것으로 예상되어 그 저감 대책은 시급하다고 하겠다.

본 연구의 근본적인 목적은 고투자율 재료를 사용하여 전력 케이블을 둘러싸으로써 자기장을 효과적으로 차폐하는 기법을 확립함에 있다. 차폐재의 차폐 효과는 재료의 투자율이 높을수록, 전기전도도가 클수록 커지므로, 본 연구에서는 현재 상용화된 금속판재 중 투자율이 높은 니켈계 무-메탈과 철계 규소 강판에 대한 차폐 효과를 비교하고, 자기장 저감 목표치에 따라 경제적인 저감 방법을 구현할 수 있도록 하는데 부가적인 목적을 둔다. 이미 잘 알려진 차폐재인 무-메탈은 규소 강판에 비해 최대투자율이 2배 이상 크지만 가격이 10배 정도 비싸기 때문에 좀더 경제적인 차폐재 개발이 필요하다. 더욱이 자기장 크기가 매우 큰 전력 케이블 근처에서는 최대투자율이 발현되는 자기장 강도 H 가 큰 규소 강판이 더 적격일 것으로 예상된다. 또한, 배전급 케이블 배관의 경우 직경 20 cm 정도로 좁기 때문에 통상 0.3~0.5 mm 정도의 두꺼운 상용 강판으로는 원활하게 감기 어려운 점이 있어서 본 연구에서는 차폐재의 두께를 0.1 mm까지 얇게 하여 이를 해결하고자 하였다.

II. 자기장 차폐 원리

자기장의 차폐 원리는 크게 회피(shunt) 효과와 와전류(eddy current) 효과 두 가지로 구분된다. 회피 효과는 투자율이 큰 자성체가 있을 때 주위의 자속(magnetic flux)이 자성체로 몰림으로써 그 주위의 자

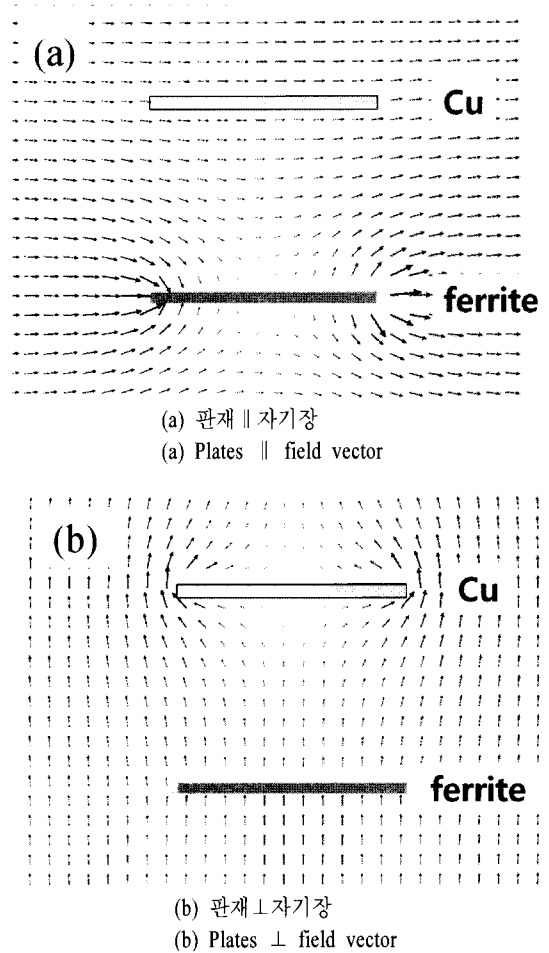


그림 1. 교류 자기장의 방향과 페라이트 및 동판의 차폐 양상

Fig. 1. Changes of magnetic flux near ferrite and copper plates.

속밀도가 작아지는 원리이다. 와전류 효과는 자성체 내의 와전류로 인해 생기는 2차 자속이 원래의 자속을 상쇄시켜 차폐되는 원리로서 교번 자속일 때에 생긴다. 그림 1은 투자율이 크지만 전기전도도가 매우 작은 페라이트와 진공의 투자율과 유사하지만 전기전도도가 큰 구리 판재에 있어서 회피 효과와 와전류 효과를 보인 것이다. 회피 효과는 자기장의 방향과 자성체의 길이 방향이 일치할 때 그 효과가 극대화되고, 와전류 효과는 서로 수직할 때 그 효과가 극대화된다. 금속성 자성 재료를 교류 자기장의 차폐재로 사용할 경우에는 회피 효과와 와전류 효과가 동시에 나타나게 되며, 높은 투자율로 인해 큰 와전

류가 생겨 차폐 효과도 커지는 것이 일반적이다.

III. 원통형 차폐재의 차폐 효과

본 고에서는 차폐 효과의 척도로써 다음 식 (1)과 같이 차폐재 적용 전과 후의 자기장 비로 정의하는 SF(Shielding Factor)를 사용한다. SF가 1일 때 차폐 효과는 전혀 없고, 0일 때 완벽하게 차폐한다는 의미가 된다.

$$SF = \frac{B_{\text{shielded}}}{B_{\text{unshielded}}} \quad (1)$$

그림 2와 같이 외경이 b , 내경이 a 인 긴 원통형 차폐재 속에 간격이 s 인 역상 관계의 두 도체가 있고, 각 상에 흐르는 전류를 i_0 라고 하자. 이때 차폐재의 투자율이 매우 크고 와전류 효과를 무시한다면 원통 바깥의 SF는 다음 식 (2)와 같이 표현된다^[7].

$$SF = \frac{4\mu_r}{(\mu_r + 1)^2 - \frac{a^2}{b^2}(\mu_r - 1)^2} \cong \frac{4}{\mu_r} \frac{1}{1 - \frac{a^2}{b^2}} \quad (2)$$

여기서 $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ 로써 진공에 대한 차폐재의 상대 투자율을 의미한다. 근사식은 투자율이 아주 클 때 유효하며, 원통의 외경 b 가 10 cm, 차폐재 두께 d 가 0.1 mm이면, 차폐재의 상대투자율이 100,000 이상일 때 오차 2% 이내이다. 여기서 SF는 거리에 대한 함수가 아니라 차폐재의 투자율과 크기, 두께에 대한 함수이며, 근사적으로 투자율과 반비례 관계에 있음을 알 수 있다.

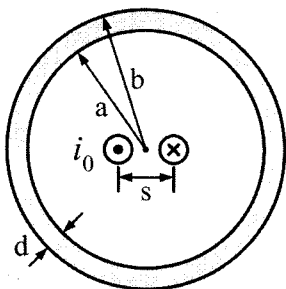


그림 2. 역상 관계의 두 도체를 감싸는 긴 원통형 차폐재 모식도

Fig. 2. End view of a long, circular cylindrical shell enclosing a dipole (two-wire) source.

한편, 투자율이 매우 작은 차폐재에 있어서 와전류 효과에 의한 원통 바깥의 SF는 다음 식 (3)과 같이 표현된다^[7].

$$SF = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (3)$$

여기서 ω 는 각속도, $\tau = \frac{\mu_0\sigma d(a+b)}{4}$ (σ : 전기전도도)이다. 이 역시 SF는 거리에 무관하고 차폐재의 전기전도도와 크기, 두께와 관련 있음을 알 수 있다.

금속성 자성 재료를 차폐재로 사용할 경우에는 회피 효과와 와전류 효과가 동시에 나타나게 되어 SF를 간단한 수식으로 표현하기 어렵다. 다만, 전형적인 금속 자성 재료의 상대투자율이 10,000, 전기전도도가 10^7 mho/m라고 가정한다면^[8], 원통 외경 10 cm, 차폐재 두께 0.1 mm일 때 식 (2)의 회피 효과로 인한 SF는 0.17, 식 (3)의 와전류 효과로 인한 SF는 0.9997 정도이어서 투자율이 더 주요한 인자임을 알 수 있다.

IV. 실험 방법

4-1 차폐재 제조

폭 20 cm인 상용 금속 판재를 출발 재료로 하여 압연 및 고온열처리 과정을 거쳐 두께가 0.1 mm 내외인 규-메탈, 방향성 규소 강판, 무방향성 규소 강판 등 3가지 종류의 차폐재를 제조하였다. 그 과정은 그림 3에 보였다. 방향성 규소 강판은 길이 방향과 자화용이축을 일치시켜 그 방향으로 매우 좋은 투자율 특성을 보이도록 한 것이다. 무방향성 규소 강판과 규-메탈은 모든 방향으로 등방적 투자율 특성을 갖는다. 또한 비교를 위하여 0.1 mm 두께의 동판을 직접 구매하여 사용하였다.

4-1-1 방향성 규소 강판(GO: Grain-Oriented Silicon Steel)

우선 시중에 판매되고 있는 두께 0.3 mm, 규소 함량이 3%인 방향성 규소 강판을 약 200 kg 코일 형태로 구입하여, 표면 절연 코팅층을 제거하였다. 냉간 압연은 압연 전문업체 위탁으로 수행하였으며, 5회의 압연 과정을 거쳐 최종 두께 0.08 mm에 도달하였

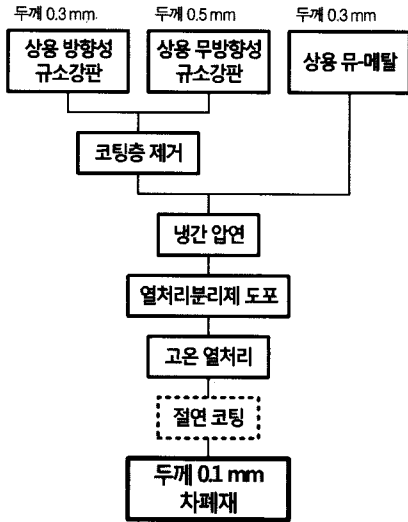


그림 3. 세 종류의 차폐재 제조 과정
Fig. 3. Schematic flowchart for manufacturing shielding materials.

다. 고온에서 강판끼리의 붙음을 방지하기 위하여 산화물 분말을 도포하고, 1,200 °C의 온도에서 batch 식 열처리를 수행하였다. 열처리 분위기로써 비환원성 기체를 사용하였고, 승온, 유지, 냉각 과정은 총 4일이 소요되었다. 열처리가 완료되면 도포된 열처리분리제를 다시 제거하였고, 필요에 따라 두께 2~3 mm 정도의 절연 코팅을 마지막으로 수행하였다.

4-1-2 무방향성 규소 강판(NGO: Non-Oriented Silicon Steel)

출발 재료와 고온 열처리 방법을 제외하면 방향성 규소 강판의 제조 공정과 매우 유사하다. 두께 0.5 mm 무방향성 상용 강판을 출발 재료로 하여 8회 내외의 압연 과정을 거쳐 0.1 mm까지 압연한 후 1,100 °C에서 2시간 비환원성 분위기에서 열처리한 후 사용하였다.

4-1-3 뮤-메탈(PC: μ -Metal)

표면 코팅층이 없는 폭 20 cm, 두께 0.3 mm의 Ni 이 78 % 포함된 상용 뮤-메탈 판재를 구입하여, 0.1 mm 두께까지 바로 냉간 압연을 수행하고, 열처리 분리제 도포 후 고온 열처리를 수행하였다. 열처리는 고순도 수소 분위기에서 승온속도 400 °C/h로 1,180 °C까지 온도를 올린 후 2시간 유지, 이후 167

°C/h의 속도로 냉각시켜 제조하였다.

4-2 차폐 시험 설비와 자기장 측정 방법

차폐재의 차폐 효과 확인을 위하여 그림 4에 보인 바와 같이 간이 실증시험 설비를 구축하였다. 폭과 깊이가 각각 1 m인 콘크리트 지중 공간을 만들고 길이 10 m, 직경 20 cm인 PVC 관 속에 3 가닥의 케이블을 배치하였다. 발생 자기장의 크기는 3상 도체에 흐르는 전류의 크기를 변화시킴으로써 조절하였다. 차폐재 적용 전과 후의 자기장을 측정하여 SF를 산출하였으며, PVC 관의 가운데 6 m 부분을 차폐재로 감았다. 이때 PVC 관의 중심에서 36 cm 떨어진 지면을 기준점으로 삼고, 지면을 따라 거리별로 자기장의 크기를 측정하였다. 자기장 측정기는 미국 Ener-tech사의 모델명 EMDEX II를 사용하였다.

표 1에 시험 조건을 요약하였다. 이때 차폐재가 위치한 곳의 계산 자기장 크기는 각 도체가 무한직 선임을 가정하고 가해진 전류 크기를 기준으로 관의 중심에서 측정 방향으로 10 cm 되는 점의 자기장을 계산한 값이다.

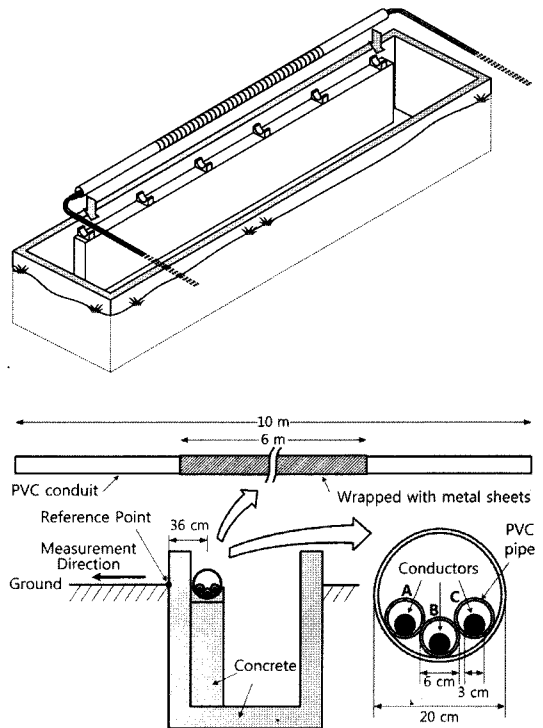


그림 4. 시험 설비 개념도와 도체 구성
Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setup.

표 1. 차폐 시험의 자기장 조건과 도체의 전류 크기
Table 1. Applied electric currents and measured B-field.

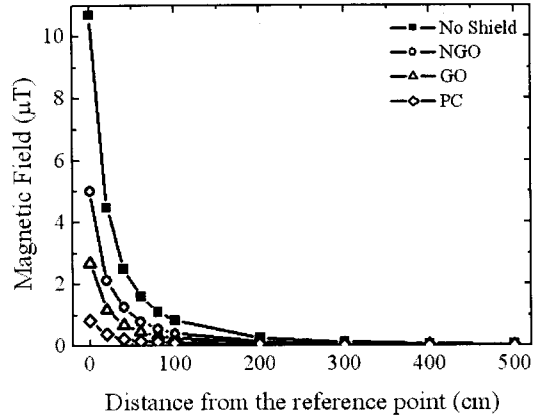
도체의 전류 크기(A)			기준점 위치 측정 자기장(μT)	차폐재 위치 계산 자기장(μT)
A	B	C		
63	61	74	10.7	90
328	346	344	50.9	490
660	647	650	99.8	1000
0	0	20	11.5	24
0	0	199	89.7	240

V. 결과 및 고찰

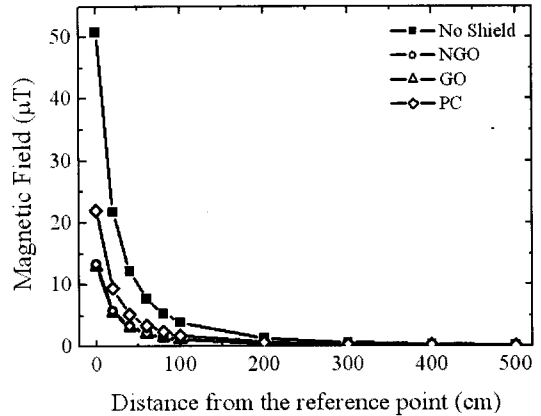
5-1 3상 전류에 의한 자기장의 차폐 효과

그림 5는 3상 전류일 때 차폐재 적용 전과 후의 거리에 따른 자기장 크기 변화를 보인 것이다. 이때 그림 5(a)~(c)는 각각 기준점에서의 자기장 10, 50, 100 μT 에 해당하며, 케이블 간격이 매우 인접한 연유로 자기장은 거리에 따라 급격히 감소하고 있다. 그림 5의 결과를 SF로 변환하여 그림 6에 나타내었다. 투자율이 높은 소재들은 자기장 저감 효과를 보이며, 거리에 따라 SF가 조금씩 증가하고 있으나, 동판의 경우는 저감 효과가 거의 없음을 알 수 있다.

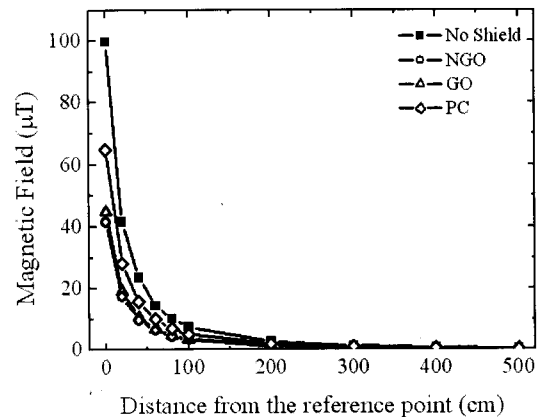
이와 같이 3상 배열에서 자기장 차폐 효과가 나타나는 것은 그림 1에 예를 보였듯이 차폐재와 수직한 자기장 변화량이 있기 때문이다. 3상 배열일 경우 수평 배열 혹은 델타 배열 등 전선 배치에 상관없이 자기장 벡터는 일반적으로 타원형의 궤적을 따라 회전하기 때문에 차폐재와 수직한 성분의 변화량이 존재하게 된다. 역상 배열인 경우 3상 배열과 다르게 자기장 벡터는 항상 평면에서 변화하지만, 이 역시 원통형 차폐재와 수직한 성분의 자기장 변화량이 일반적으로 존재한다. 한편, 투자율이 높은 소재들의 경우 거리가 멀어질수록 SF가 증가하는 것은 전선의 일부분만 차폐재를 적용하였기 때문이라 판단된다. 본 실험에서는 10 m 길이의 전선 가운데 부분 6 m만 차폐재로 둘러쌌기 때문에 차폐재로부터 거리가 멀어질수록 그 영향이 감소하여 SF는 1에 가까워감을 보이게 된다.



(a) 기준점에서의 자기장 10 μT
(a) 10 μT at the reference point



(b) 기준점에서의 자기장 50 μT
(b) 50 μT at the reference point



(c) 기준점에서의 자기장 100 μT
(c) 100 μT at the reference point

그림 5. 차폐재 적용 전후의 거리에 따른 자기장 크기 변화
Fig. 5. Changes in magnetic field with distance from the reference point.

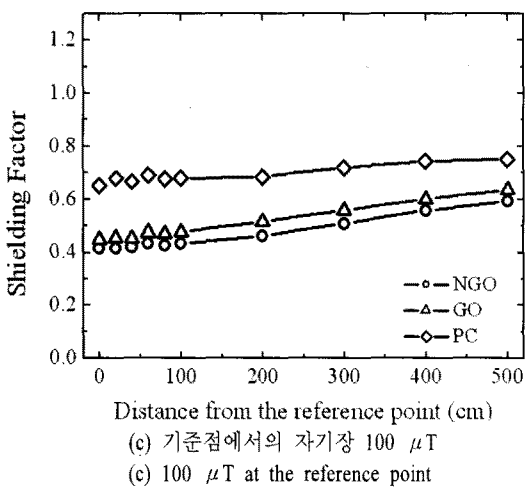
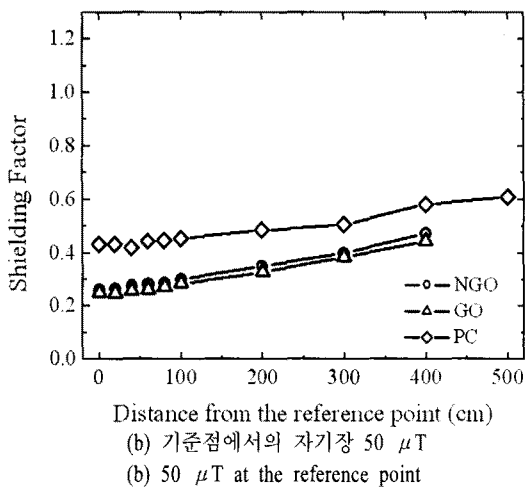
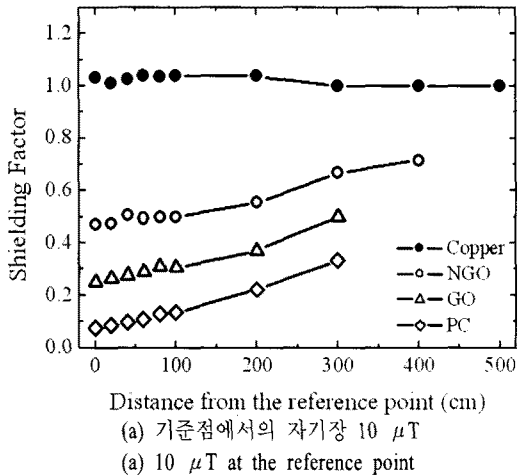


그림 6. 거리에 따른 차폐재별 SF 변화
Fig. 6. Changes in shielding factor with distance from the reference point.

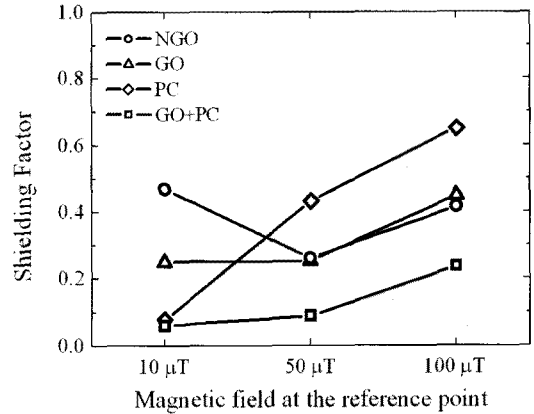


그림 7. 자기장 크기에 따른 차폐재별 SF 변화
Fig. 7. Changes in shielding factor with magnetic field at the reference point.

그림 7은 기준점 자기장 크기에 따른 각 차폐재별 SF를 보인 것이다. 기준점 자기장이 10 μT 일 때 PC는 SF 0.1 정도로 90% 이상 자기장을 차폐하고 있고, GO가 SF 0.3, NGO는 SF 0.5 정도의 차폐 효과가 있음을 알 수 있다. 하지만, 50 μT 이상으로 자기장이 커지면 GO와 NGO의 차폐 효과가 PC보다 좋아지며, 이 둘은 서로 비슷한 차폐 효과를 보인다. 또한, GO를 안쪽에, PC를 바깥쪽에 2중으로 차폐재를 둘러쌌을 경우에는 50 μT 에서도 SF가 0.1 정도로 매우 효과적인 차폐가 가능하였다.

이상의 결과는 자기장 강도에 따른 소재별 투자율의 차이 때문으로 설명된다. 코일형 차폐재에서 5

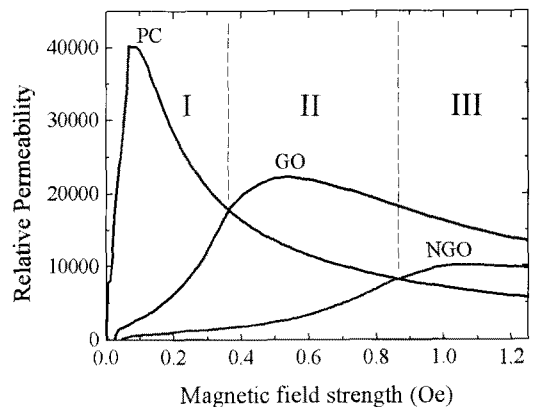


그림 8. 자기장 강도 H 에 따른 차폐재별 투자율 변화
Fig. 8. Changes in magnetic permeability with magnetic field strength.

×100 mm 크기로 각각 추출한 시편에 대하여 H 값에 따른 투자율 곡선을 그림 8에 보였다. I 영역에서는 PC의 투자율이 셋 중 가장 높게 나타나며, 최대투자율도 40,000 정도로 매우 크다. II, III 영역은 GO, NGO 등 규소 강판이 PC보다 투자율이 더 높은 영역이며, GO의 경우 최대투자율이 20,000을 상회하는 값을 보이고 있다.

이때 GO의 투자율은 자화 특성이 우수한 방향으로 측정된 것으로써 3차원적으로 효과가 적용되는 실제 차폐 상황을 대변하지는 못한다. 하지만, 기준점 자기장 $10 \mu T$ 에서 NGO보다 더 우수한 차폐 특성을 보인다는 점은 GO의 큰 장점이라고 할 수 있다. 판재의 방향에 따라 등방적 특성을 갖는 PC와 NGO에 대하여, 기준점 자기장 $10 \mu T$ (차폐재 위치 예상 자기장 $90 \mu T$)에서의 SF 0.1과 0.5를 이용하여 식 (2)로부터 역산하면 각각 20,000과 2,000의 투자율이 구해진다. 투자율의 크기만 고려하면 그림 8에서 H 가 0.3 Oe(공기 중의 B 로 환산하면 $30 \mu T$)일 때의 조건과 유사한데, 이는 $90 \mu T$ 와 다소 차이를 보인다. 그 원인으로서 여러 가지가 있을 수 있으나, DC에 의한 H 와 B 의 관계로부터 얻은 그림 8의 결과와 60 Hz 3상 AC에 의해 나타나는 실제 투자율과의 차이가 주된 요인으로 생각된다.

동일한 맥락에서 GO와 PC를 함께 둘러쌀 경우의 차폐 효과를 설명할 수 있다. 그림 7에서 기준점 자기장이 $50 \mu T$ 일 때, GO 단독으로는 SF가 0.25 정도이지만 바깥층에 PC를 한 겹 더 둘러싸면 SF는 0.1 정도로 차폐 효과가 대폭 향상된다. 이는 1차로 규소 강판에 의해 자기장이 약화되고, 약화된 자기장을 2차로 PC가 감소시키는 상황이 되어 자기장 강도 H 에 따른 각 소재의 차폐 효과를 극대화시키는 방법이 된다.

5-2 단상 전류에 의한 자기장의 차폐 효과

그림 9는 단상 전류일 때 거리에 따른 SF 변화를 보인 것이다. 동판의 경우 앞서 그림 6의 3상 전류의 경우와 마찬가지로 거리에 무관하게 SF는 1 정도이지만, PC의 경우에는 SF가 1 이상의 값을 보여 차폐재 적용 전에 비해 오히려 자기장이 증가함을 알 수 있다. 특히, 기준점 자기장 크기가 작을 때 증가 비율

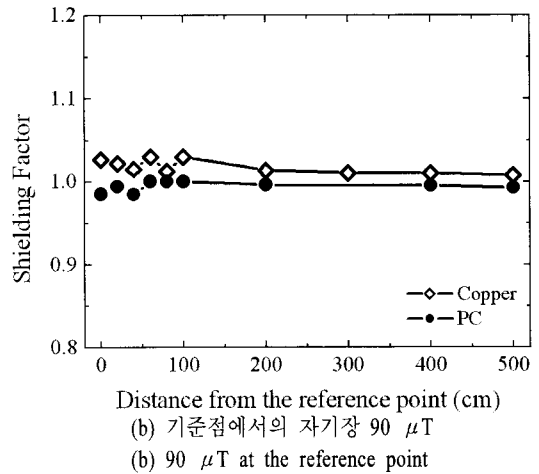
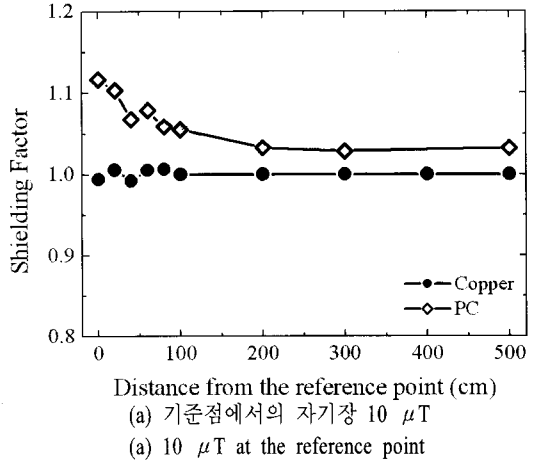


그림 9. 단상 전류일 때 거리에 따른 SF 변화. 기준점에서의 자기장

Fig. 9. Changes in shielding factor with distance from the reference point(single phase electric current).

이 더 큰 점이 두드러진다. 이는 차폐재에 의해 새로이 생긴 자기장과 원래의 자기장과의 중첩 효과로 설명이 가능하다.

단상 전류는 그림 4에서 C 도체에 주어졌기 때문에, 차폐재에는 일반적으로 표면과 수직인 자기장과 접선 방향의 자기장 성분이 함께 존재하게 된다. 이때 접선 방향의 자기장 성분은 원통의 축과 평행하게 자른 차폐재 단면에 와전류를 발생시키게 되는데, 차폐재 안쪽 표면과 바깥쪽 표면에는 크기가 같고 서로 반대 방향의 전류가 흐르게 되어 두께가 매우 얇은 경우에는 상쇄된 것으로 나타난다. 이에 비해 표면과 수직인 자기장 성분은 원통의 표면을 따

라 넓은 면적의 와전류를 발생시키게 되며 상당한 크기의 2차 자기장이 원래의 자기장과 중첩되어 나타나게 된다. 따라서 상대투자율이 1인 동판에 비해 PC의 경우가 더 큰 효과를 보이게 되며, 마찬가지로 기준점 자기장이 $90 \mu\text{T}$ 정도로 커지면 PC의 투자율은 $10 \mu\text{T}$ 때에 비해 작아지기 때문에 자기장 증가 효과가 둔화되어 SF는 1에 더 가까워지게 된다.

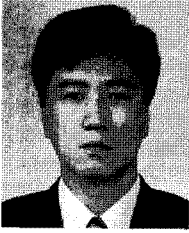
VI. 맺음말

두께 0.1 mm의 자성 금속 판재로 전력 케이블을 둘러싸는 방법을 통하여 자기장 차폐 효과를 조사하였다. 3상 전류일 때 자기장의 크기가 작을 경우에는 뮤-메탈의 차폐 효과가 가장 좋았으나, 자기장이 커질수록 규소 강판의 차폐 효과가 더 좋은 것으로 나타났다. 이는 H 가 작은 영역에서는 뮤-메탈의 투자율이 크지만, 큰 H 에서는 규소 강판의 투자율이 더 크기 때문이다. 이러한 점을 이용하여 안쪽에 규소 강판, 바깥쪽에 뮤-메탈을 함께 둘러싸으로써 강한 자기장에 효과적인 규소 강판과 약한 자기장에 효과적인 뮤-메탈의 차폐 특성을 동시에 기대할 수 있어 높은 H 값에서도 우수한 차폐 효과를 거둘 수 있었다. 단상 전류에 의한 자기장에 대해서는 동판의 경우 차폐 효과가 미미하였고, 고투자율 소재의 경우 자기장의 크기가 오히려 증가하는 결과를 얻었다. 이상의 결과는 와전류에 의해 발생된 자기장과 원래의 자기장 벡터의 상호 작용으로 설명할 수 있었다. 따라서 통상의 배전급 전력 케이블 부하 조건에서는 규소 강판이 저렴하면서도 더욱 효과적인 차폐제임을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] B. Banfai, G. G. Karady, C. J. Kim, and K. B. Maracas, "Magnetic field effects on CRT computer monitors", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 307-312, Jan. 2000.
- [2] N. Wertheimer, E. Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer", *Am. J. Epidemiol.*, vol. 111, pp. 273-284, 1979.
- [3] D. A. Savitz, H. Wachtel, F. A. Barnes, E. M. John, and J. G. Tvrdik, "Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hertz magnetic fields", *Am. J. Epidemiol.*, vol. 128, pp. 21-38, 1988.
- [4] S. London, D. Thomas, J. Bowman, E. Sobel, and J. Peters, "Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia", *Am. J. Epidemiol.*, vol. 134, pp. 923-937, 1991.
- [5] M. Feychting, A. Ahlbom, "Magnetic fields and cancer in people residing near Swedish high-voltage power lines", *Am. J. Epidemiol.*, vol. 138, pp. 467-481, 1993.
- [6] Electric Power Research Institute, "Magnetic field management for overhead transmission lines: potential options for low field designs", *TR-104413*, pp. 2-15-2-48, Sep. 1995.
- [7] Electric Power Research Institute, "Handbook of shielding principles for power system magnetic fields - volume 2: methods and measurements", *TR-103630-V2*, p. 2-40, Apr. 1994.
- [8] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*, IEEE press, p. 870, 1993.

김 상 범



1986년 2월: 서울대학교 무기재료 공학과 (공학사)
1988년 2월: 서울대학교 무기재료 공학과 (공학석사)
1994년 2월: 서울대학교 무기재료 공학과 (공학박사)
1994년 2월~1996년 9월: 대우자동차

차 선임연구원

1996년 10월~현재: 한전 전력연구원 책임연구원

[주 관심분야] 고효율 전력변환재료, Magnetic Shielding

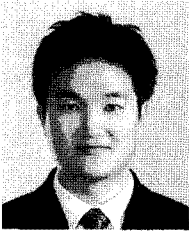
정 진 혜



2007년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
2009년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학석사)
2009년 2월~현재: (주)키스타 연구원
[주 관심분야] 변압기 Aging, 전자

기 해석

소 준 영



2004년 2월: 고려대학교 재료공학부 (공학사)
2006년 2월: 고려대학교 신소재공학과 (공학석사)
2006년 1월~현재: 한전 전력연구원 일반연구원
[주 관심분야] 고효율 전력변환재

료, Magnetic Shielding

명 성 호



1981년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1983년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
1995년 8월~현재: 한국전기연구원

전기환경송전연구센터장

[주 관심분야] EMI/EMC, ELF, EMF, 전기환경 등

신 구 용



1991년 8월: 동아대학교 전기공학과 (공학사)
1993년 8월: 경남대학교 전기공학과 (공학석사)
1988년 10월~현재: 한전 전력연구원 선임연구원
[주 관심분야] 초고압 송전 및 전기

환경