

60Hz ELF 자계에 대한 고 도전율 및 고 투자율 재료의 차폐효과 분석

論 文
54C-4-6

Investigation of Shielding Effects of High Conductivity or High Permeability Materials on 60Hz ELF Magnetic Fields

閔錫源[†] · 宋棋鉉^{*} · 明聖鎬^{**}
(Suk-Won Min · Ki-Hyun Song · Sung-Ho Myung)

Abstract - Shielding methods on ELF(Extremely Low Frequency) magnetic fields may include the use of induced currents, modification of magnetic field flux patterns using high permeability and/or high conductivity materials, and others. The magnetic shielding properties of enclosures can be utilized to reduce the magnetic field of current carrying conductors. In this paper, to get a more practical understanding of shielding phenomena, we have investigated the magnetic field reduction by means of 3 dimensional numerical analysis and experiments. We found copper could reduce flux density more than permalloy in both cases of box shield and cylindrical shield. Iron under 10 μ T of 1 phase could reduce flux density about 20% more than silicon steel, but both of them under 50 μ T has a similar reduction rate of 10%. The 3 phase horizontal model gave the highest reduction rate and the 1mm thickness iron under 10 μ T of 3 phase lines did lowest.

Key Words : Shielding Effects, Conductivity, Permeability, ELF Magnetic Fields

1. 서 론

전자계 환경에 대한 인식이 날로 높아지면서 자계억제 방법에 대하여 기술적으로 가능한 방책과 효과에 관한 연구가 많이 행해지고 있다[1],[2].

자계 발생원으로 전력설비 형태를 분류하면 가공선, 지중선, 변전설비, 옥내배선 등으로 분류할 수 있으며 이들 각 형태에 대한 자계 저감방법으로는 전류 위상 조정에 의한 방법, 케이블의 twist선화, 평판 또는 원통형의 자성·비자성 자기 쉴드재를 이용한 차폐방법[3], 수동형 및 능동형 루프를 이용한 방법 등의 여러 방법이 제안되고 있다.

본 연구에서는 차폐현상을 조금 더 실제적으로 이해하기 위하여, 3차원 경계요소법을 이용한 수치계산과 실험을 통해 차폐재의 60Hz 극저주파 자계 저감효과를 조사하였다. 자계를 저감할 수 있는 차폐재로는 크게 투자율이 매우 높은 자성재료와 도전율이 높은 도전재료로 구분할 수 있다. 즉 투자율이 높은 자성재료는 자기저항을 변화시켜 차폐재로 자속이 집중하게 하여 다른 부분의 자속밀도를 낮추는 방법을 이용한 것이고 도전율이 높은 도전재료는 유도 와전류를 이용하여 자계를 저감시키는 방법이다. 따라서 본 연구에서는 고 투자율 물질로 실리콘 스틸, 철과 퍼멀로이를 선택하였고 고 도전을 물질로 구리를 선택하였다. 차폐형상은 원통형과 직육면체형으로 하였으며 차폐재 두께는 0.9mm부터 5mm까지 변화시켰다. 자계발생원은 단상과 3상의 수평배열과 삼각배열의 60Hz 교류 선전류원으로 하였다.

위와 같은 조건에서 차폐재의 특성과 형상에 따른 주변 자계의 저감효과를 계산하였다.

2. 차폐효과 계산 및 실험

2.1 차폐재의 특성 및 형상

본 연구에서 검토한 차폐재는 실리콘 스틸, 철, 퍼멀로이, 구리이며 재료의 특성은 표 1과 같다.

표 1. 검토 차폐재의 비투자율 및 비저항을
Table 1. Relative permeability and resistivity of tested shielding materials

	실리콘 스틸	철	퍼멀로이	구리
비투자율	8000 (10 μ T)	2000 (10 μ T)	38000 (10 μ T)	1 (10 μ T)
	18000 (50 μ T)	10000 (50 μ T)	8000 (50 μ T)	1 (50 μ T)
비저항	47 $\mu\Omega$ -cm	10 $\mu\Omega$ -cm	60 $\mu\Omega$ -cm	1.724 $\mu\Omega$ -cm

자계 발생원은 길이 1.5m의 단상과 3상 60Hz 전류원으로 그림 1과 같은 원통형과 직육면체형 차폐재가 없는 경우에 차폐재로부터 10cm 떨어진 지점에서 10 μ T와 50 μ T의 자속밀도가 발생할 수 있도록 전류의 크기를 조정하였다. 차폐재의 크기는 원통형은 직경을 100mm로, 직육면체형은 80mm x 80mm x 1500mm로 하였으며 두께는 0.9mm부터 5mm까지 변화시켰다. 자계발생원은 단상 선로일 경우는 그림 1과 같이 차폐재의 정중앙에 놓았으며, 3상 선로는 그림 2와 같은 수평배열과 삼각배열의 형태로 배치하였다.

그림 3은 직육면체형 차폐재의 실규모 실험장치로 자속밀도 값은 미국의 Enertec사 EMDEX II를 이용하여 측정하였으며 이 값을 수치계산에 의한 값과 비교하였다.

[†] 교신저자, 正會員 : 順天鄉大學 情報技術工學部 教授 · 工博
E-mail : swonmin@sch.ac.kr

^{*} 正會員 : 順天鄉大學 情報技術工學部 博士課程

^{**} 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 · 工博

接受日字 : 2004年 11月 2日

最終完了 : 2005年 2月 16日

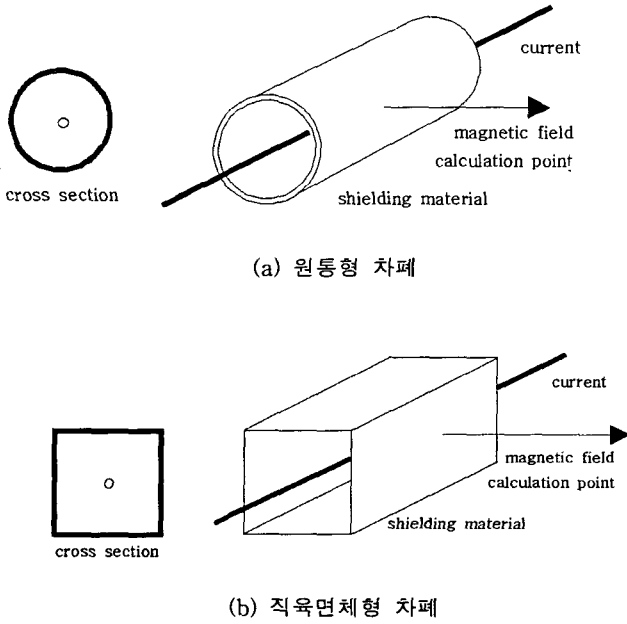


그림 1. 단상 선로의 차폐재 형상
Fig. 1. Shielding shapes of 1 phase line

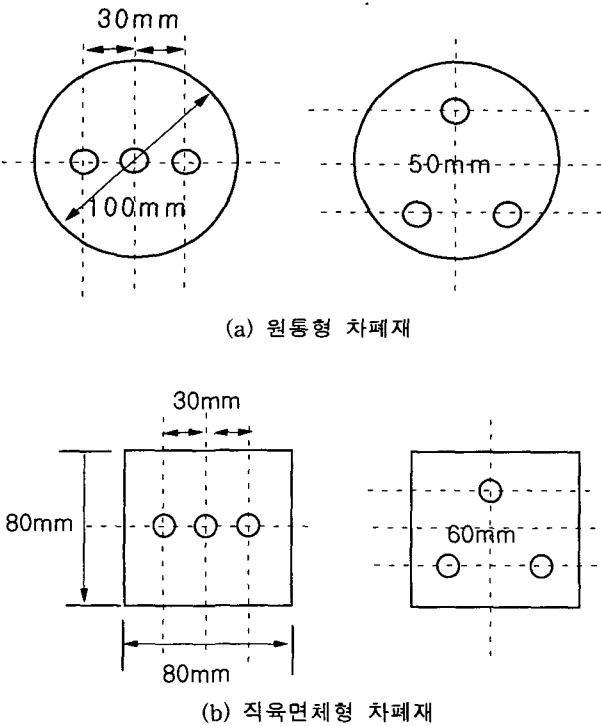


그림 2. 3상 선로의 차폐재 단면형상
Fig. 2. Shielding shapes of 3 phase line

2.2 계산 이론

차폐와 관련한 지배 방정식은 다음과 같다.

암페어의 법칙으로부터,

$$\nabla \times H = J + J_e$$

(1)

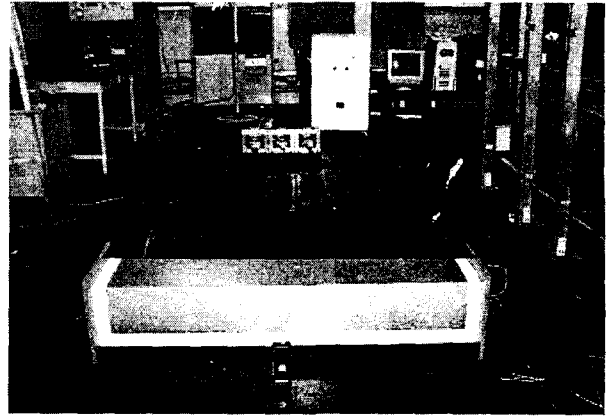


그림 3. 직육면체형 차폐재의 실규모 실험장치
Fig. 3. A full scale experimental setup of rectangular parallelepiped shielding

여기서 J 는 전원전류 밀도이고 J_e 는 와전류 밀도이다. 또한,

$$B = \mu H \quad B = \nabla \times A \quad (2)$$

$$E = -\nabla V - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3)$$

(3)식 에서 변위전류를 무시하면,

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t}, \quad J_e = \sigma E = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (4)$$

이상의 식을 종합하여 A 로 정리하면

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (5)$$

여기서 극저주파의 자계를 고려하면 $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$ 로 표현할 수 있고, 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J - j\omega \sigma A \quad (6)$$

따라서 지배 방정식은 다음식과 같다.

$$j\omega \sigma A + \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J \quad (7)$$

여기서 ω 는 전원전류의 각속도로 $2\pi f$ 이며 f 는 전원전류의 주파수이다. 또한 σ 는 차폐재의 도전율, A 는 벡터 포텐셜, μ 는 차폐재의 투자율이다.

이상의 방정식은 형상이 간단한 경우는 해석적으로 풀 수 있으나 복잡한 경우는 수치적으로 풀 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 경계 요소법을 이용하였다. 실제의 형상 그대로 3차원으로 계산하기 위해 경계 요소법 상용 패키지인 캐나다의 IES(Integrated Engineering Software)사에서 개발한 Faraday 3D 프로그램을 사용하였다.

차폐의 정도는 다음의 차폐계수를 이용하여 표현하였다.

$$S = \frac{B_0 - B_i}{B_0} \times 100 \quad [\%] \quad (8)$$

여기서, B_0 는 차폐를 하지 않았을 때의 자속 밀도이고, B_i 는 차폐를 했을 때의 자속 밀도이다.

2.3 실험 및 계산결과

그림 4는 단상 10 μ T의 자속밀도에서 투자율이 38000인 퍼멀로이와 고도전율의 구리로 차폐재료에 대한 원통형 차폐재의 차폐효과로 단상에서의 구리가 1.5mm 두께의 차폐재일 경우 거리에 상관없이 높은 차폐효과를 보이고 있으며, 퍼멀로이는 낮은 차폐 효과를 보이고 있다.

그림 5는 직육면체형 차폐재의 두께 1.5mm이며, 재료특성을 그림4에서와 같이 투자율이 38000인 퍼멀로이와 고도전율의 구리로 단상과 3상 선로 차폐한 경우이다. 이 그림의 계산결과에서 알 수 있듯이 단상이나 3상이나 고투자율의 퍼멀로이는 차폐효과가 거의 없었으며 두께 0.2mm의 실험결과는 계산결과와 유사한 패턴을 보였다. 따라서 고투자율의 차폐재로 자계를 차폐하는 것은 어려움을 알 수 있다. 이에 반해 구리는 단상의 경우는 두께를 증가함에 따라 거의 모든 범위에서 80%의 일정한 차폐효과를 보였으며 3상의 경우는 단상보다는 작은 20%의 일정한 차폐효과를 보였다.

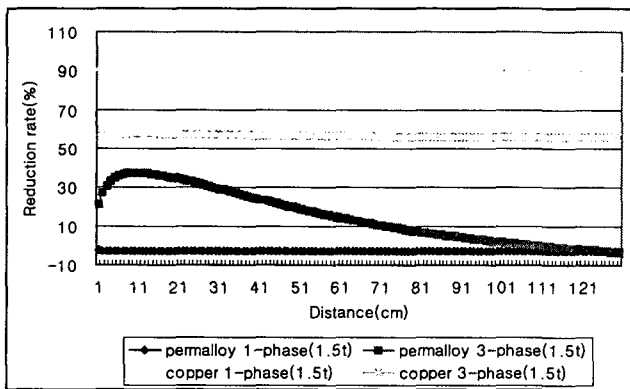


그림 4. 단상 및 3상 10 μ T 자속밀도에서의 퍼멀로이와 구리의 원통형 차폐 효과

Fig. 4. Cylindrical shielding effects of permalloy and copper type under 10uT

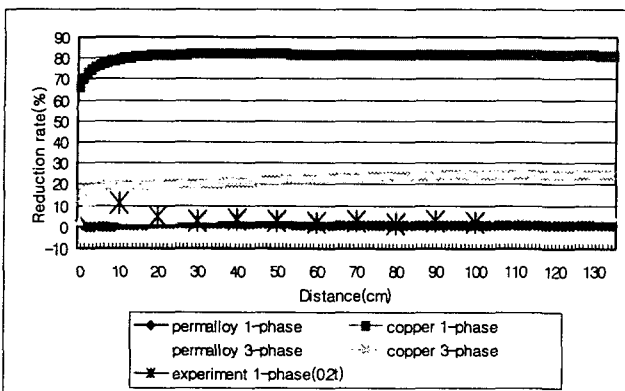


그림 5. 단상 및 3상 10 μ T 자속밀도에서의 퍼멀로이와 구리의 직육면체형 차폐 효과

Fig. 5. Rectangular parallelepiped shielding effects of permalloy and copper type under 10uT

그림 6은 단상 10 μ T 자속밀도에서의 직육면체형 실리콘 스틸의 두께 변화에 따른 차폐효과의 계산결과이다. 여기서

실리콘 스틸의 직육면체형 차폐재는 그림 4의 원통형보다는 높은 차폐효과를 보였고 두께 증가와 차폐효과는 뚜렷한 관계를 보이지는 않았다. 예로 두께가 가장 두꺼운 5mm는 차폐재로부터 10cm 떨어진 위치까지는 가장 얇은 0.9mm 차폐재보다 좋은 차폐효과를 보이고 있으나 그 보다 떨어진 거리에서는 두께 0.9mm의 차폐재의 평균효과는 약15%인 반면 두께 5mm의 차폐재의 평균효과는 약10%의 낮은 값을 보였다. 이에 반해 두께가 중간인 1.2mm 차폐재는 약3%의 가장 낮은 효과를 보였고 이 계산결과는 실험결과와 유사한 값을 보였다.

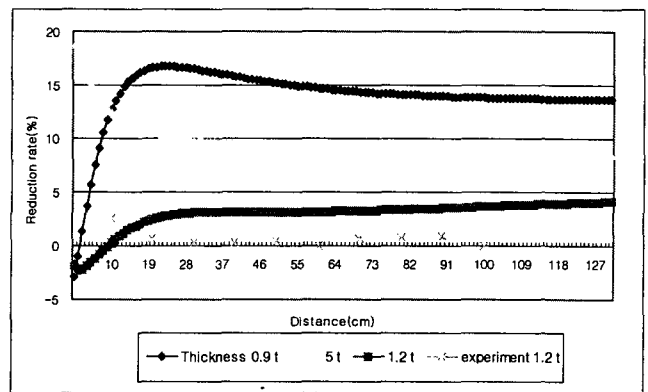


그림 6. 단상 10 μ T 자속밀도에서의 직육면체형 실리콘 스틸의 차폐 효과

Fig. 6. Rectangular parallelepiped shielding effects of silicon steel under 10uT of 1 phase

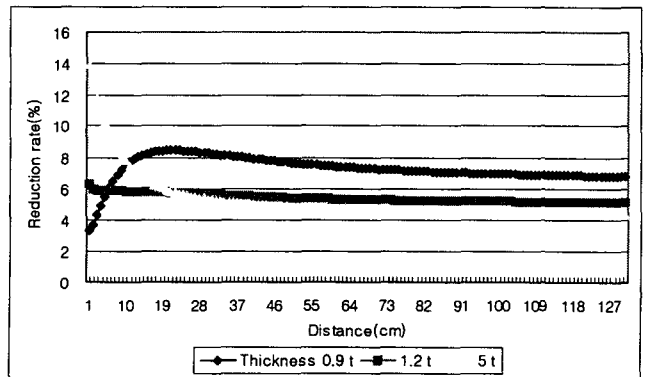


그림 7. 단상 50 μ T 자속밀도에서의 직육면체형 실리콘 스틸의 차폐 효과

Fig. 7. Rectangular parallelepiped shielding effects of silicon steel under 50uT of 1 phase

그림 7은 발생자계만을 50 μ T로 증가시키고 나머지 조건은 그림 6과 동일하게 한 경우로 차폐효과가 그림 6의 약 1/2로 감소하나 패턴은 유사함을 알 수 있었다.

그림 8은 차폐재를 철로 바꾸고 나머지 조건은 그림 6과 동일하게 한 경우이다. 여기서 철은 비투자율이 2000, 비저항이 10 $\mu\Omega$ -cm로 투자율은 실리콘 스틸보다 낮고 구리보다는 높고, 비저항은 구리보다는 높고 실리콘 스틸보다 낮아 철을 중간 정도의 투자율과 도전율을 갖는 물질의 모델로 검토하

였다. 이 그림으로부터 철의 차폐효과는 실리콘 스틸보다 2배 정도 높고 패턴은 실리콘 스틸과 유사함을 알 수 있었다.

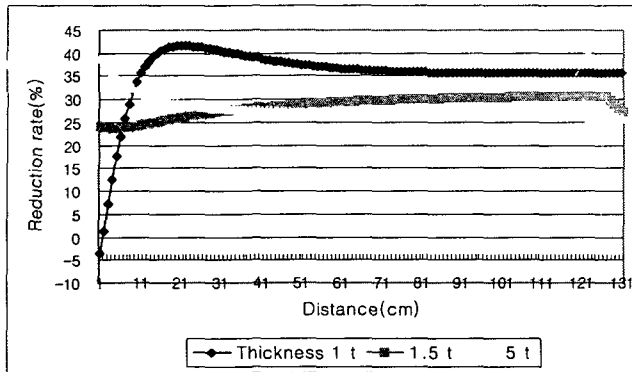


그림 8. 단상 10 μ T 자속밀도에서의 직육면체형 철의 차폐 효과

Fig. 8. Rectangular parallelepiped shielding effects of steel under 10 μ T of 1 phase

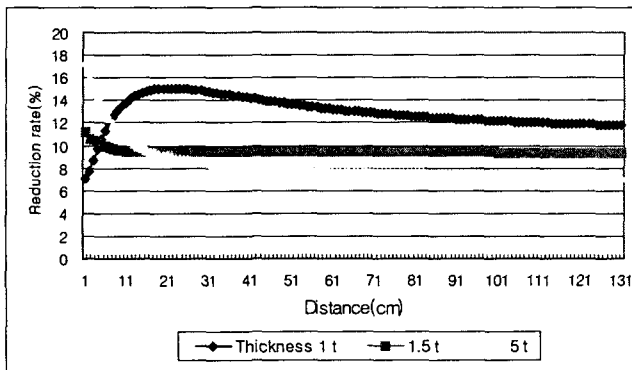


그림 9. 단상 50 μ T 자속밀도에서의 직육면체형 철의 차폐 효과

Fig. 9. Rectangular parallelepiped shielding effects of steel under 50 μ T of 1 phase

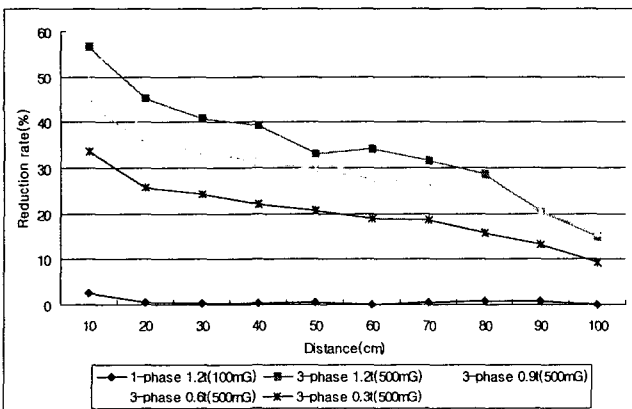


그림 10. 3상 50 μ T 삼각배열의 실리콘 스틸 직육면체형 차폐재의 효과에 대한 실험결과

Fig. 10. Experimental results on rectangular parallelepiped shielding effects of silicon steel under 50 μ T of 3 phase triangular arrangement

그림 9는 발생자계만을 50 μ T로 증가시키고 나머지 조건은 그림 8과 동일하게 한 경우로 차폐효과가 그림 8의 약 1/3로 감소하나 패턴은 유사함을 알 수 있었다. 그림 10은 발생자계를 50 μ T로 한 3상 삼각배열의 실리콘 스틸 차폐재의 효과에 대한 실험결과이다. 이 그림으로부터 실리콘 스틸은 두께를 0.3mm, 0.6mm, 0.9mm, 1.2mm로 증가시키며 따라 차폐효과가 증가하고 차폐재로부터 거리를 증가함에 따라 차폐효과가 일정하게 감소함을 알 수 있었다.

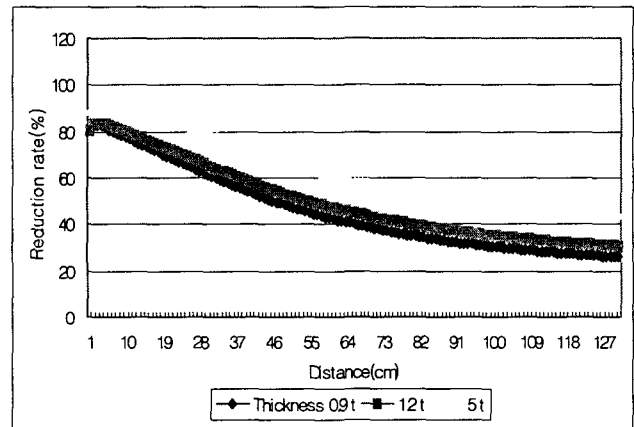


그림 11. 3상 50 μ T 삼각배열의 실리콘 스틸 직육면체형 차폐재의 효과에 대한 계산결과

Fig. 11. Calculation results on rectangular parallelepiped shielding effects of silicon steel under 50 μ T of 3 phase triangular arrangement

그림 11은 그림 10과 같은 조건의 실리콘 스틸 차폐재의 효과에 대한 계산결과로 그림 10의 실험결과와 동일한 패턴을 보이고 있다. 그림 12는 발생자계를 10 μ T로 하고 나머지는 그림 11과 동일하게 한 계산결과로 차폐효과는 발생자계를 50 μ T로 한 경우와 거의 유사함을 알 수 있다.

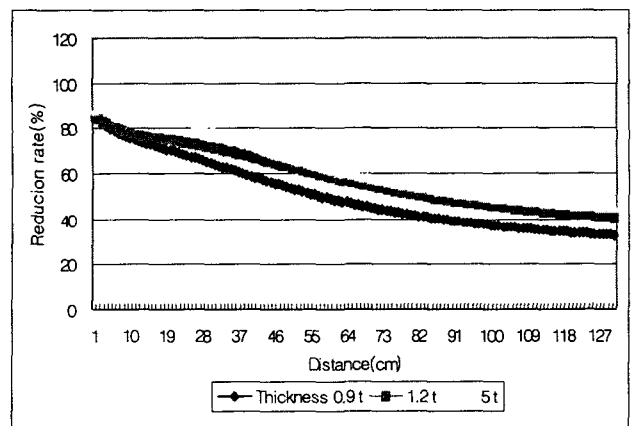


그림 12. 3상 10 μ T 삼각배열의 실리콘 스틸 직육면체형 차폐재의 효과에 대한 계산결과

Fig. 12. Calculation results on rectangular parallelepiped shielding effects of silicon steel under 10 μ T of 3 phase triangular arrangement

그림 13은 발생자계를 10 μ T로 한 3상 수평배열의 실리콘 스틸 차폐재의 효과로 그림 11의 삼각배열과는 다르게 차폐재 두께가 5mm로 가장 두꺼운 경우가 효과가 가장 낮았으며 차폐재로부터 거리가 멀어져도 효과가 크게 감소하지 않는 특성을 보였다.

그림 14는 발생자계를 50 μ T로 하고 나머지는 그림 13과 같은 조건으로 한 경우로 그림 13과 달리 차폐효과가 차폐재로부터 10cm 떨어진 지점에서 더 감소하는 특성을 보였다.

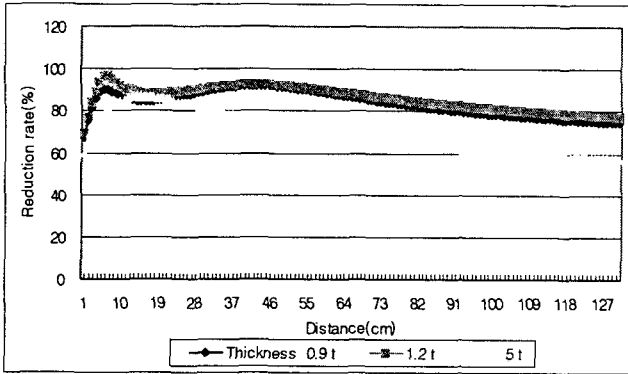


그림 13. 3상 10 μ T 수평배열의 실리콘 스틸 직육면체형 차폐재의 효과에 대한 계산결과

Fig. 13. Calculation results on rectangular parallelepiped shielding effects of silicon steel under 10 μ T of 3 phase horizontal arrangement

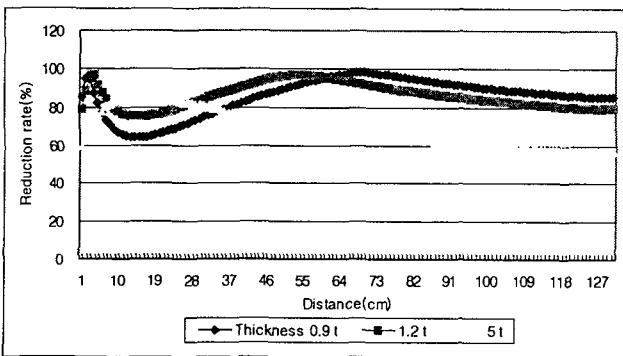


그림 14. 3상 50 μ T 수평배열의 실리콘 스틸 직육면체형 차폐재의 효과에 대한 계산결과

Fig. 14. Calculation results on rectangular parallelepiped shielding effects of silicon steel under 50 μ T of 3 phase horizontal arrangement

그림 15는 발생자계를 10 μ T로 한 3상 삼각배열의 철 차폐재의 효과로 두께 5mm와 1.5mm인 경우는 실리콘 스틸과 유사한 특성을 보였으나 두께가 1mm인 경우는 실리콘 스틸과 다르게 차폐재로부터 10cm 떨어진 지점까지 급격히 감소한 후 일정하게 되는 특성을 보였다. 그림 16은 발생자계를 50 μ T로 한 경우로 차폐효과는 그림 11의 실리콘 스틸과 유사한 특성을 보였다.

그림 17은 발생자계를 10 μ T로 한 3상 수평배열의 철 차폐재의 효과로 두께 5mm와 1.5mm인 경우는 그림 13의 실리콘 스틸과 유사한 특성을 보였으나 두께가 1mm인 경우는 실리

콘 스틸의 1/2인 45%의 저감율을 보였다. 그림 18은 발생자계를 50 μ T로 한 경우로 차폐효과는 그림 14의 실리콘 스틸과 유사한 특성을 보였다.

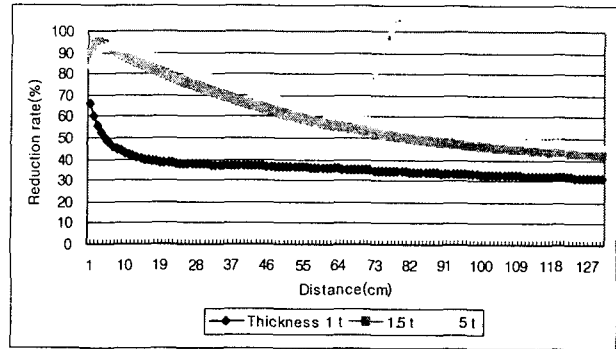


그림 15. 3상 10 μ T 삼각배열의 철 직육면체형 차폐재의 효과에 대한 계산결과

Fig. 15. Calculation results on rectangular parallelepiped shielding effects of steel under 10 μ T of 3 phase triangular arrangement

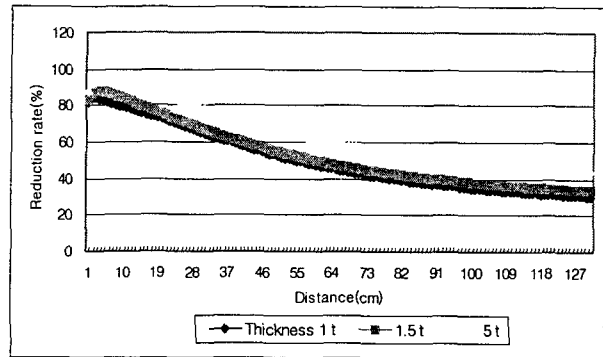


그림 16. 3상 50 μ T 삼각배열의 철 직육면체형 차폐재의 효과에 대한 계산결과

Fig. 16. Calculation results on rectangular parallelepiped shielding effects of steel under 50 μ T of 3 phase triangular arrangement

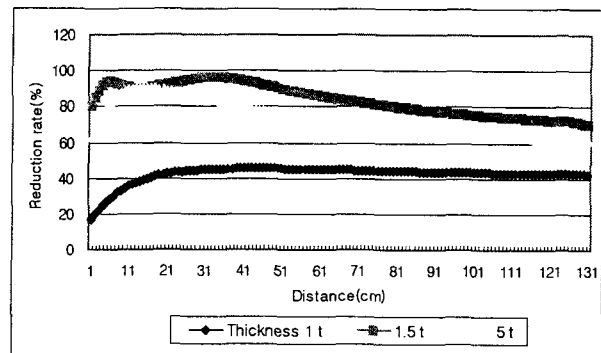


그림 17. 3상 10 μ T 수평배열의 철 직육면체형 차폐재의 효과에 대한 계산결과

Fig. 17. Calculation results on rectangular parallelepiped shielding effects of steel under 10 μ T of 3 phase horizontal arrangement

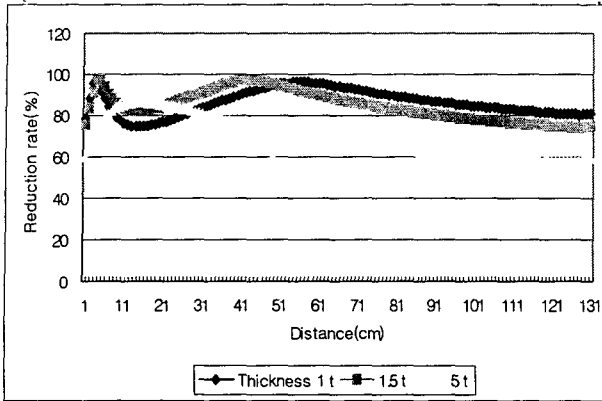


그림 18. 3상 50 μ T 수평배열의 철 직육면체형 차폐재의 효과에 대한 계산결과

Fig. 18. Calculation results on rectangular parallelepiped shielding effects of steel under 50 μ T of 3 phase horizontal arrangement

3. 결 론

본 연구에서는 3차원 경계요소법을 이용한 수치계산과 실험을 통해 차폐재의 60Hz 극저주파 자기 차폐효과를 조사하였다.

연구결과로, 퍼멀로이와 구리로 차폐를 한 경우 도전율이 큰 구리가 퍼멀로이 보다 더 높은 차폐 효과를 보이고 있으며, 원통형차폐와 직육면체형 차폐가 유사한 패턴을 가지고 있음을 알았다. 또한 단상 10 μ T의 발생자기 하에서 철은 실리콘 스틸보다 약 20% 자계를 더 감소시키지만 50 μ T의 발생자기 하에서는 철과 실리콘 스틸 모두 약 10%의 유사한 자기저감 특성을 보였다. 3상에서는 수평배열 모델이 가장 높은 자기저감 효과를 보였고 10 μ T의 발생자기 하에서 두께가 1mm인 철이 가장 낮은 차폐저감 효과를 보였다.

이상의 연구결과를 고려할 때, 차폐재를 설계할 때는 일반적인 규칙에 따라 설계하는 것은 가능하지 않을 것으로 생각되며, 케이스에 따라 사전에 검토를 하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 또한 차폐특성을 높이는 방법으로는 상황에 따라 자성재료 특성과 도전재료 특성을 복합적으로 적용하는 다매질 재료를 검토하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Magnetic Fields Task Force, "Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurement", IEEE Trans on Power Delivery, Vol 3, pp. 2127-2136, 1988.
- [2] Hayashi et al., "Examination of simple analytical method for calculation 60 Hz magnetic field in power substations", JIEE Japan, Vol 111-B, pp. 108-116, 1991.
- [3] K. Yamazaki, T. Iwamoto, T. Kawamoto, H. Fujinami, "Investigation of shielding method of ELF magnetic field generated from conductors", JIEE Japan, Vol 118-B, pp. 635-641, 1998.

저 자 소 개



민 석 원(閔錫源)

1958년 1월 3일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984년~1991년 한전기술연구원 계통연구실 근무. 1996년~1997년 일본 교토대학 방문교수. 현재 순천향대학교 정보기술공학부 교수
Tel : 041-530-1338, Fax : 041-530-1548
E-mail : swonmin@sch.ac.kr



송 기 현(宋棋鉉)

1974년 5월 27일생. 2000년 순천향대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 041-530-1338, Fax : 041-530-1548
E-mail : songkha@nate.com



명 성 호(明聖鎬)

1958년 3월 20일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경·송전연구그룹장, 책임연구원. 2001년도 KERI 대 상수상. KIEE, KEES 정회원.
Tel : 055-280-1320, Fax : 055-280-1390
E-mail : shmyung@keri.re.kr