

3차원 자기장해석을 이용한 자기차폐 연구

김 찬 욱 · 이 동 창*

(재) 포항산업과학연구원

*포항제철(주) 제강부 1제강공장

Magnetic Shielding Study using 3-D Field Analysis

Chan Wook Kim and Dong Chang Lee

Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 790-600

*Steel Making Plant., Steel Making Dept., POSCO, Pohang 790-360

(1998년 11월 18일 받음, 1998년 12월 29일 최종수정본 받음)

초 록 대전력을 사용하는 제강공장의 L/F 설비에서 발생하는 강자계를 효율적으로 차폐하기 위하여 L/F 주위의 자기장 분포를 유한해석법을 이용한 상용해석도구인 ANSYS 5.3 3차원 자기장해석기를 통해 해석하고 그 결과를 평판형태의 차폐체에 적용시키고자 하였다. 분석결과, L1 및 L2가 각각 2.7 및 2.9m이며 높이가 3.5m인 2중차폐체 (1차측 차폐: 1mmt의 전기강판, 2차측 차폐: 1mmt의 Fe-Ni alloy sheet)를 설치하는 것이 최적의 차폐방안으로 도출되었다.

Abstract In order to analyze the magnetic shielding around L/F, the well-known ANSYS 5.3 S/W, 3-D magnetic field analyzer, which uses finite element method was applied in plate typed shields. Calculation results show that the optimum magnetic shield in L/F foundry could be obtained with multiple shields consisting of the following two magnetic walls: the first wall from the magnetic source is the plate typed shield of electrical steel sheets of which L1 and H1 are 2.7m and 3.5m, respectively, and the second one is that of high permeability material sheets of which L2 and H2 are 2.9m and 3.5m, respectively.

1. 서 론

최근에는 구조공학분야 외에도 전기·전자공학 분야에서 전기기기의 자기적 특성 해석에 유한요소법^{1,2)}을 이용한 응용연구가 활발히 진행되고 있다. 공학분야에서 제기되는 물리적인 제현상들은 복잡한 분포특성을 갖고 있는 연속적인 현상으로 이들 현상들은 물리적 해석을 가능케하는 지배방정식에 의해 표현된다. 이를테면 전자기현상을 해석하기 위해서는 잘 알려진 Maxwell 방정식을 이용하여 그 현상들이 발현되는 조건을 만족하도록 하는 해를 구함으로써 이루어진다. 그러나 그 해석방법은 용이하지 않으며 최근에는 유한요소 방법을 적용한 소위 전산모사^{3,4)}에 의해 해를 구하고 있다.

자기차폐의 정의는 단순히 직류자계(정자계) 차폐로 간주하는 경우가 많으나 전자차폐에 대해서 자기차폐를 정의하는 경우, 일반적으로 10KHz 미만의 주파수영역의 자계를 대상으로 하고 있다. 교류자계의 차폐특성은 차폐체가 금속인 경우 높은 도전율이 차폐도에 기여하므로 자계모드의 차폐특성은 주파수가 증가함에 따라 크게된다. 반면 저주파 자계 특히 극저주파차폐는 자성체를 사용해야 하므로 전자차폐보다 차폐효율이 낮아⁵⁾ 이를 개선하기 위한 연구가 행해지고 있으나, 그 연구에⁶⁾가 적고 또한 그 결과를 현장에 직접 적용한 예는 거의 알려진 바가 없다.

본 연구는 대전력을 사용하는 제강공장의 L/F(Ladle furnace) 설비에서 발생하는 교류강자계(60Hz) 분포를 전산모사를 통해 해석하고 그 결과를 강자계를 차폐하는 데 직접 반영시킴으로써 보다 효율적인 차폐방안을 제시하고자 하였다. 즉 현장상황을 재현하도록 자기장발생원의 기하학적 모델을 구성하고, 이 모델을 이용하여 자기장발생원인 L/F설비 주위의 3차원 자기장분포를 해석함으로써 현장에 설치할 차폐체의 최적 설치조건을 도출하였다. 또한 도출된 차폐방안에 따라 제작한 차폐체를 현장에 설치하여 차폐체 설치전후의 자기장의 세기 및 차폐효과에 대하여도 비교 검토하였다.

2. 자기장 분포해석

해석모델 설계

L/F설비주위의 자기장분포를 해석하기 위하여 3상 전극 봉과 MAST, 3상 전력케이블 등 일체의 L/F설비 구성부와 이들을 둘러싸는 공기층을 포함하는 3차원 모델을 구성하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 L/F설비는 가로방향의 중심축을 기준으로 면대칭을 이루는 구조로 되어 있으므로, 모델의 크기를 줄이기 위하여 실제의 모델은 설비의 절반만을 묘사하도록 하였으며 이때 모델의 중심면에 면대칭 조건을 부가하여 해석단계에서는 전체를 묘사한 것과 동일한 효과를 얻도록 하였다.

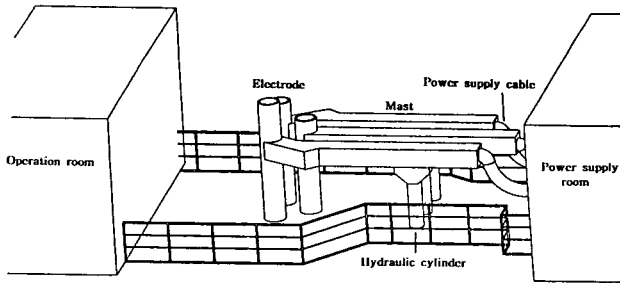


Fig. 1. Schematic daigram of L/F machine.

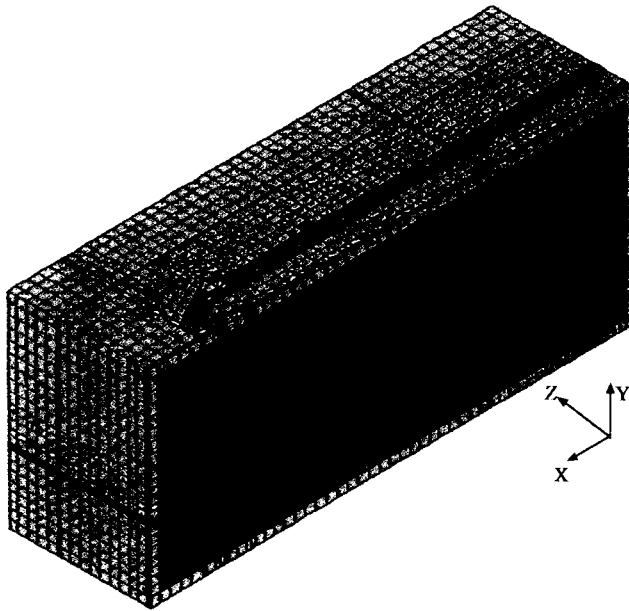


Fig. 2. 3-D FEM model of L/F machine.

완성된 모델은 실제 현장상황을 잘 반영하도록 가로 10.4m, 세로 3.2m, 높이 4m의 공간을 묘사하도록 하였으며 완성된 유한요소 mesh model은 총 36,600개의 node와 29,800의 element로 구성하였다. 그림 2에 완성된 유한요소 모델을 나타낸다.

또한 해석에 사용된 모델은 모델의 6면 각각에 대하여 infinite boundary condition을 설정하여 L/F설비에 의해 발생된 전자기장이 모델의 경계면을 만나더라도 경계면에서 반사가 이루어지지않고 계속 전파하여 무한대의 영역으로 계속 전파되도록 하는 개념을 도입하였다. 그리고 모델 내의 바닥면 즉, 차폐체를 설치할 바닥면에는 전기적으로 Ground가 되어 있으며 자기발생원으로는 3상 전력cable, Mast, 3상 전극봉을 따라 일정크기의 전류가 흐르도록 설정하였다.

자기장 분포해석은 ANSYS에 내장된 magnetic vector field analysis 기법을 이용하였으며, 특히 본 해석에는 입력이 주어지고 안정상태에 도달한 후의 상태에서 결과를 관찰하는 것으로써 동적 과도해석(dynamic transient analysis)에서 source frequency를 60Hz로 고정시킨 경우이다. 따라서 Maxwell equation의 static 형태에 해당하는

모든 potential 및 field 값은 배제한 상태에서 Helmholtz equation을 유한요소법으로 풀어서 해를 구하는 방법을 이용하였다. 전산모사 해석결과로는 3차원 magnetic vector potential, magnetic flux density 및 magnetic field 분포를 구하였으며 이와 더불어 계산시 마다 차폐효율을 비교분석하기 위하여 3개의 좌표축 각각에 평행한 방향에서 본 2차원적 magnetic potential 등고선의 분포도 함께 구하였다.

근접 자계차폐

본 연구의 해석대상 설비는 투입전력(40MVA)이 일정한 저전압 고전류(20KA) 패턴의 자계가 우세한 저과동임피던스 근접계(near field)에 해당되므로 자계를 우선적으로 차폐하는 방안을 고려해야 한다. 본 연구에서는 현장상황을 고려할 때 평판형태의 차폐가 가장 이상적이므로 무한 평판차폐의 경우 차폐체를 자기장 발생원에 근접시킬수록 근접전계는 과동임피던스가 증가하는 반면 근접자계의 경우는 그 반대로 감소되므로 차폐체의 임피던스와 과동임피던스는 거의 정합에 가까운 상태가 되어 반사에 의한 차폐효과는 기대할 수가 없게 된다.⁷⁾ 따라서 근접계에서의 자기차폐효과를 높이기 위해서는 반사에 의한 손실보다는 흡수에 의한 손실을 높이는 방안이 검토되었다.

Schelkunoff⁸⁾는 재료의 차폐효과(SE)를 반사손실(R), 흡수손실(A) 및 다중반사손실(M)을 동시에 고려하여 이들 항의 총화로써 다음과 같이 나타내었다.

$$SE=R+A+M \tag{1}$$

반사손실(R)은 차폐재의 표면에서 전자파 에너지를 반사하여 침입에너지를 감쇄시키며 흡수손실(A)는 차폐재내부를 전파하는 경로상에서 ohmic loss를 의미하고 있다. 다중반사손실(M)은 차폐재 내부에서의 다중반사로 통상 흡수손실이 10dB 이상인 경우는 무시하므로 저임피던스계에서의 반사손실(R) 흡수손실(A)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁹⁾

$$R(dB) = 354 + 10 \log \left(\frac{\sigma}{f \mu r^2} \right) \tag{2}$$

$$A(dB) = 3.34 \times 10^{-3} t \sqrt{f \sigma \mu} \tag{3}$$

여기서 σ , μ t 는 각각 차폐재의 전도율, 투자율 및 두께(mil)를 나타내며 f 및 r 은 주파수(MHz) 및 자장발생원으로부터의 거리를 나타낸다. 전술한 바와 같이 근접계의 자계차폐는 흡수손실이 차폐효율을 지배하므로 식(3)에서 알 수 있는 바와 같이 차폐효과를 높이기 위해서는 두께 t 및 $\sigma\mu$ 항이 큰재료를 사용하여 흡수손실을 높이는 방안을 고려할 수 있다. 그러나 실제로는 식(3)에서 나타낸 두께 t 와의 비례관계와는 달리 실제로는 두께 t 가 커질수록 흡수손실은 무한히 커지는 것이 아니며 주파수 f 또한 고주파대역으로 이동할수록 흡수손실이 커지는 않는다는 것이 실험결과에 의해 밝혀지고 있다.⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 현장 상황에 맞는 차폐체를 고안하기 위하여 차폐체의 두께는 현재 시판되고 있는 제품의 두께로 하고 $\sigma\mu$ 항이 큰 재료를

선택하여 3차원 전산모사를 통해 현장에서의 차폐체 최적 설치조건을 도출하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

자기장 분포 해석 및 차폐방안의 도출

자기장 해석은 차폐체의 설치위치 L (자기장 발생원으로부터의 거리) 및 높이 H를 변화시켜 계산되는 자기장의 세기 및 자기장 포텐셜을 분석하였으며, 강자기장과 직접 접촉하는 1차측에 포화자화가 큰 재질을 사용하고 2차측에 투자율이 큰 재질을 사용하는 소위 다중차폐방식¹⁰⁾을 적용하였다. 이때 차폐체를 설치함에 있어 경계조건으로서 차폐체에 Ground처리가 되어 일단 차폐체에 도달한 자장은 소멸되는 것으로 묘사하였다. 계산시 사용한 차폐체의 물성치는 실제로 차폐에 사용할 판재의 재질의 차폐효율실험을 통하여 선택하였으며, 재질의 종류로서는 포화자화는 크나 투자율이 작은 전기강판 및 고무자율재료인 퍼멀로이(PB, 45% Ni) 등을 대상으로 하였으며 판재의 두께는 공히 1mm로 계산하였다. 표 1에 계산시 사용한 재료의 물성치를 나타낸다.

차폐효율(= $20\log(H_o/H_i)$)은 현장에서의 작업자의 신장 및 작업공간을 고려하여 자기장 발생원으로부터 거리

Table 1. Input data for the 3-D analysis.

| components | resistivity (Ωm) | permeability |
|--------------------|----------------------------------|--------------|
| concrete wall | 1.0×10^{15} | 1 |
| graphite electrode | 4.0×10^{-4} | 1 |
| Mast | 1.0×10^{-7} | 200 |
| rubber cable | 1.0×10^6 | 1 |
| conduction wire | 1.7×10^{-8} | 1 |
| floor | 1.0×10^{-7} | 200 |
| air | 1.0×10^{15} | 1 |
| permalloy | 7.5×10^{-7} | 20000 |
| silicon steel | 4.5×10^{-7} | 1500 |

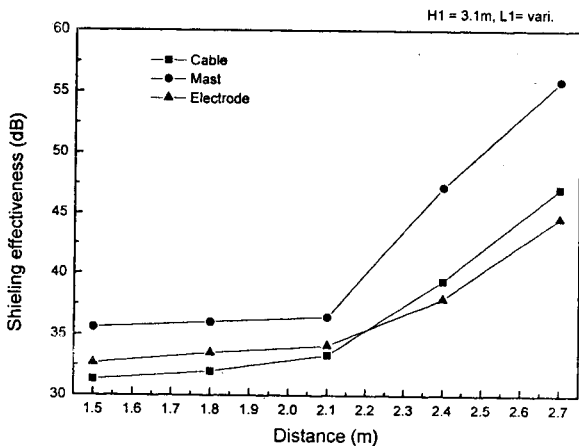


Fig. 3. Dependence of shielding effectiveness on the distance from magnetic source ($H_1 = 3.1\text{m}$).

3m이며 높이가 1.8m인 위치에 해당하는 3상 전력케이블, MAST, 3상전극봉 주변의 각각 3포인트에서 구해진 자기장의 세기가 H_o 에서 H_i 로 감쇄되는 비율로부터 산출하여 비교분석하였다. 차폐방안은 L/F현장의 실제 발생자장의 세기 및 IRPA (International Radiation Protection Association)에서 권장하는 노출자장 상한치⁹⁾(표 2 참조)를 고려하여 차폐효율이 최소 40dB이 되는 경우가 도출되도록 그 목표를 설정하였다.

그림 3은 차폐체의 높이를 3.1m로 고정하고 설치거리별 차폐효율을 3차원 전산모사를 통해 계산한 결과이다. 차폐체의 설치거리(L1)가 2.1m를 경계로 차폐효율이 단조로 증가하다가 급격히 증가함을 알 수 있으며 이는 차폐체를 자기장발생원에 근접하여 설치하는 경우는 강자기장으로 인하여 차폐효율이 저하되고 있음을 보여주고 있다.

그림 4 및 5는 각각 차폐체가 설치되어 있지 않는 경우

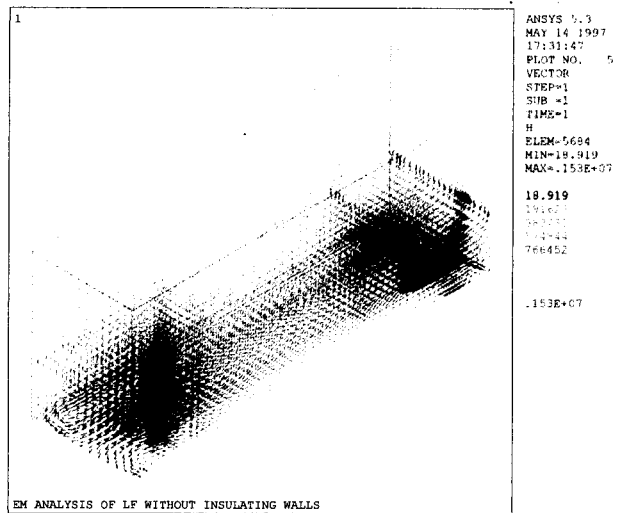


Fig. 4. 3-D magnetic field distribution without magnetic shields.

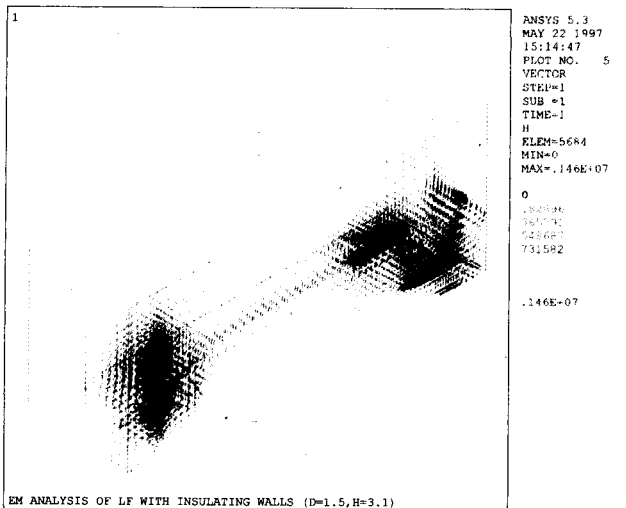


Fig. 5. 3-D magnetic field distribution for $L_1 = 1.5\text{m}$ and $H_1 = 3.1\text{m}$.

Table 2. Exposure limit of IRPA and shielding effectiveness goal.

| | Limit of exposure(G) | Magnetic source(G) | target of shielding effectiveness (dB) |
|--------------|----------------------|--------------------|--|
| Occupational | 5 | Max. 350 | 36 |

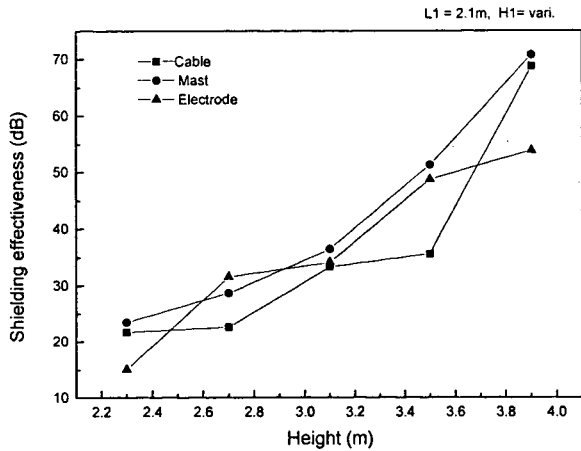


Fig. 6. Dependence of shielding effectiveness on shield height, H(L1=2.1m).

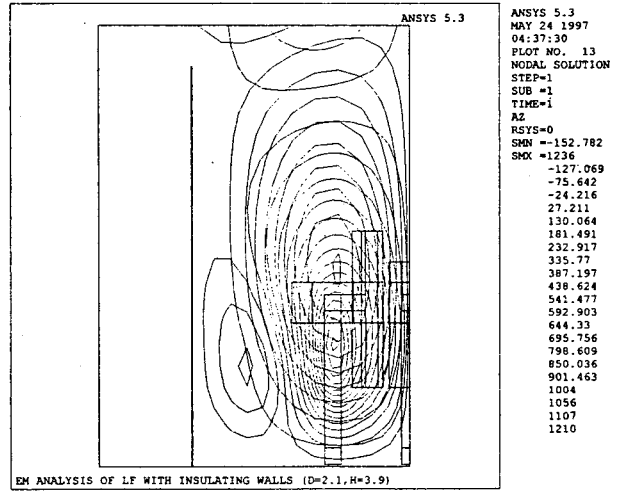


Fig. 8. Magnetic potential contour lines along the X axis of FEM model (L1=2.1m, H1=3.9m).

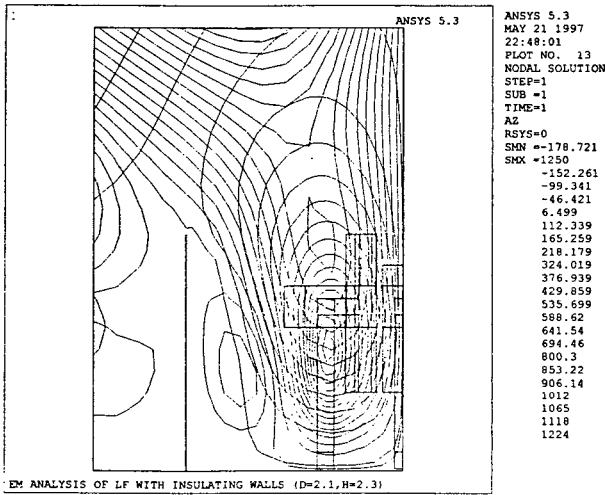


Fig. 7. Magnetic potential contour lines along the X axis of FEM model (L1=2.1m, H1=2.3m).

와 차폐체(L1=1.5m, H=3.1m)를 설치했을 때의 3차원 공간에서의 자기장분포의 일례를 나타낸다. 차폐체가 설치되어 있지 않는 경우 L/F설비 양단인 케이블 및 3상전극봉 주위에 강자기장이 발생되어 그 영향으로 모델내 전반에 걸쳐 자기장이 형성되고 있음을 알 수 있다. 반면에, 차폐체가 설치되어 있는 경우는 그림에서 보는 바와 같이 전반적으로 자기장 세기(vector 크기)가 약화되고 있으며 특히 차폐체가 설치된 배면에는 자기장이 상당히 감소되고 있음을 확인할 수 있다.

또한, 그림 6에는 설치거리를 2.1m로 고정하고 차폐체의 높이를 변화시켰을 때의 차폐효율을 계산한 결과를 나타낸다. 차폐체의 높이가 4m정도가 되면 강자기장을 발생하는 전극주위의 차폐효율이 55dB로 케이블 및 Mast주위의

70dB에 비해 저하되나 전반적으로 높은 차폐효율을 보이고 있다. 이는 차폐체의 높이가 차폐체 설치거리보다 민감하게 차폐효율에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

그림 7 및 8은 각각 차폐체 설치거리를 2.1m로 고정하고 높이를 각각 2.3m 및 3.9m로 하였을 시에 L/F설비와 평행한 X축방향에서 본 2차원적 자기포텐셜 투시도의 일례를 나타낸다. 차폐체가 존재하지 않을 시의 2차원적 자기포텐셜 투시도인 그림 9와 비교하면 차폐체가 존재하는 경우, 설치된 차폐체 부근의 magnetic field potential 패턴이 현저히 다름을 알 수 있다. 높이가 3.9m인 차폐체가 설치된 경우는 차폐체 배면의 magnetic field potential contour line이 거의 나타나지 않는 반면 차폐체의 높이가 2.3m의 경우는 차폐체 배면에 magnetic field potential contour line이 밀집되어 있어 차폐효과가 크지 않음을 알 수 있다. 이 결과는 차폐체의 높이를 되도록 높이는 것이 차폐효율을 향상시킬 수 있음을 의미하나, 현장상황을 고려할 때 차폐체는 L/F설비 보완 및 전극봉 교체 등의 작업이 가능하도록 그 높이를 가능한 낮추어야 하며 또한 작업공간을 보다 많이 확보하도록 차폐체를 발생원에 근접시키도록 하여야 하므로 현장상황에 적합한 최적의 차폐체 설치 방안을 도출하는 데는 어려움이 있다.

그림 10은 1차차폐체의 설치위치(L1)를 1.5m로 고정하고 2차차폐체의 거리(L2) 변화에 따른 2중차폐체의 차폐효율을 나타낸다. 차폐체의 높이는 1차 및 2차 차폐체 공히 3.1m로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 L2가 1차차폐체의 위치로부터 멀어질수록 차폐효율이 증가하고 있으며 L2가 2.5m인 경우 케이블 및 전극봉 주위의 차폐효율

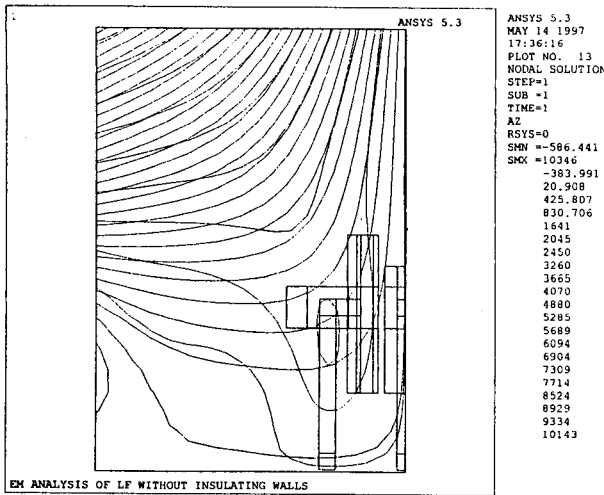


Fig. 9. Magnetic potential contour lines along the X axis of FEM model. (without magnetic shields)

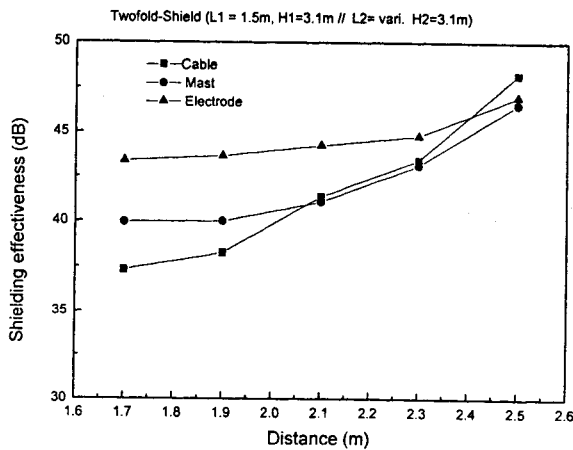


Fig. 10. Dependence of shielding effectiveness on the distance L2(L1=1.5m, H1=H2=3.1m).

이 최고 47dB 정도이다. 그러나 그림 10에서 L2=2.1m (H2=3.1m) 일때의 2중차폐시의 차폐효율은 40~43dB로써 단층차폐시(L1=2.1m, H1=3.1m)의 차폐효율(그림 6 참조) 33~36 dB과 비교하면 거의 차이가 없게되어 그림 10의 차폐방안은 효율적이지 않음을 알 수 있다. 이 결과는 1차차폐 설치위치를 자기장발생원에 너무 근접시킴으로써 1차차폐에서 충분히 감쇄되지 않는 강자계가 2차차폐로 전파되고 있음을 의미하고 있으며 그 효율면에서 1차차폐가 거의 지배적임을 알 수 있다. 따라서 효율적인 차폐를 행하

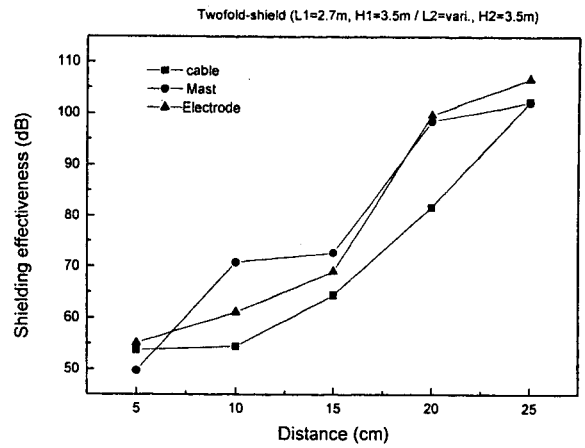


Fig. 11. Dependence of shielding effectiveness on the distance L2(L1=2.7m, H1=H2=3.5m).

려면 어느정도 작업공간이 제약을 받더라도 1차차폐체의 설치위치를 자장발생원으로부터 되도록 이격시키는 것이 바람직함을 알 수 있다.

그림 3 및 6의 차폐효율 결과로부터 단층차폐시 강자기를 발생하는 케이블 및 전극봉주위의 차폐효율이 40 dB을 상회하는 조건을 만족하는 차폐체 설치거리(2.7m) 및 높이(3.5m)를 2중차폐시의 1차차폐 L1 및 H1(=H2)로 고정하였을 때, L1으로부터의 거리에 따르는 차폐효율의 변화를 그림 11에 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 차폐체간의 거리가 멀어짐에 따라 차폐효율은 서서히 증가하다가 20cm(L2=2.9m) 이상이 되면 급격하게 향상되고 있음을 알 수 있으며 이때의 차폐효율은 3상케이블을 제외하고 100dB을 상회하여 극히 양호한 차폐효과를 나타냄을 알 수 있다.

차폐체의 성능평가

전절에서 도출된 차폐방안에 따라 L1 및 L2는 각각 2.7m, 2.9m, 높이 3.5m의 2중차폐체(1차차폐 : 1mmt의 전기강판, 2차차폐 : 1mmt의 Fe-Ni alloy sheet)인 평판차폐체를 설계·제작하여 제강공장의 L/F설비 주위에 설치한 후 차폐체의 성능을 평가하였다. 성능평가는 HOLADAY사제 model HI-3604 power survey meter를 이용하여 L/F현장주위에 설치한 2차차폐체의 직후방(L2=약 2.9m의 거리)에서 누설자장의 세기를 측정하였다. 표 3에 차폐체 설치전후의 자기장 세기를 비교분석한 결과를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 차폐체 설치방안에 따라 현장에 설치한 평판차폐체의 성능은 강자기장을 충분히 차폐할 수 있음을 알 수 있으며, 모든 위치에서 차

Table 3. Shielding effectiveness of plate-type shields.

| case | Before shielding(G) | After shielding(G) | Shielding effectiveness(dB) |
|-------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| Power cable | 370 | 4.5 | 38 |
| Mast | 150 | 2.1 | 37 |
| electrode | 70 | 1.8 | 32 |

폐효율이 전반적으로 30 dB을 상회함으로써 본 차폐체가 우수한 차폐성능을 나타냄을 확인할 수 있었다. 그러나 이 결과를 계산에 의하여 얻어진 결과와 비교해 보면 그 차폐효율이 낮음을 알 수 있는데 이는 실제 현장상황이 장애물로 인하여 이상적인 차폐체를 구성하는 데는 어려움이 있으며 또한 차폐체의 가공시에 따른 자기특성의 열화 등 복합적인 요인이 작용하기 때문으로 판단되었다.

4. 결 론

L/F주위에서 발생하는 자기장장을 효율적으로 차폐하기 위한 방안을 도출하기 위하여 3차원 전산모사를 통하여 현장에 적합한 최적의 차폐체설치 방법에 대한 연구를 행한 결과는 다음과 같다.

1) 차폐체의 높이를 고정하고 magnetic source로부터의 거리(L1)에 따른 차폐효율의 변화를 분석한 결과, 차폐체의 설치위치가 magnetic source로부터 멀어질수록 차폐효율이 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 2중차폐시에는 1차측 차폐체를 자기장 발생원에서 되도록 이격시켜야 차폐효율을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

2) magnetic source로부터의 거리를 고정하고 차폐체의 높이에 따른 차폐효율의 변화를 분석한 결과, 차폐효율이 최고 70dB까지 이르러 차폐체의 높이가 차폐효율에 미치는 영향이 거의 지배적임을 알 수 있었다.

3) 차폐효율은 1차측의 차폐체가 2차측의 차폐체보다 차폐효율에 대한 기여도가 크며, 1차측 차폐체의 설치방법에 따라 2중차폐의 효율이 좌우됨을 알 수 있었다.

4) 3차원 전산모사 해석을 종합한 결과, L/F현장상황에 적합한 최적의 차폐체는 L1 및 L2가 각각 2.7 및 2.9m이며 높이가 3.5m정도인 2중차폐체(1차측 차폐 : 1mmt의

전기강판, 2차측 차폐 : 1mmt의 Fe-Ni alloy sheet)를 설치하는 것이 가장 효율적인 방법으로 나타났으며, 이때의 차폐효율은 100 dB 정도로 평가되었다.

5) 전산모사결과를 통해 도출된 차폐방안을 현장에 적용하기 위하여 2중차폐체를 제작하여 현장에 설치한 후 차폐체의 성능을 검토한 결과, 3상 전력케이블 주위가 38dB, Mast 본체 주위가 37dB, 3상전극봉 주위가 32dB로 매우 양호한 차폐효율을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이는 차폐효율 목표치인 40dB에 근접한 수치로써 전산모사의 결과가 실제로 현장에 적용할 수 있음을 보여주는 것이다.

참 고 문 헌

1. 金子秀夫, 磁氣解析・遮蔽設計と磁性應用技術, 總合技術センター, 63, (1986)
2. 任達鎬, 電氣系の有限要素法, 東明社, 6, (1986)
3. Y.Okazaki, K.Ueno, J.Mag.Mag.Mat., 192, 112 (1992)
4. Y.Okazaki, Applied Electromagnetics in Materials, 3, 387 (1994)
5. 金子秀夫, 磁氣解析・遮蔽設計と磁性應用技術, 總合技術センター, 203, (1986)
6. 岡崎晴雄, 電氣學會 マグネテイクス研究會資料 MAG-92-149, (1992)
7. 友野理平, 關康雄, 電磁波シールドの基礎, CMC, 29, (1984)
8. 友野理平, 關康雄, 電磁波シールドの基礎, CMC, 210, (1984)
9. IRPA, Health Physics, 58(1) 113 (1990)
10. A.P. Wills, Phy.Rev., 9, 193 (1989)