

유한요소법을 이용한 Arc로의 자기장분포 해석연구

김 찬 옥[†] · 임 중 인

포항산업과학연구원 재료공정연구센터

Magnetic Field Analysis of Arc Furnace Using FEM.

C. W. Kim[†] and J. I. Im

Material Processing Center, Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST), Pohang 790-600

(2001년 월 일 받음, 2001년 월 일 최종수정본 받음)

Abstract Finite element analysis showed that strong magnetic fields were distributed around the arc furnace where the strongest magnetic field was generated around the three phase cables, and followed by the electrodes and the mast arm in decreasing order. Magnetic field decay patterns around the arc furnace could be fitted by introducing exponential formula, $Y = Y_0 + Ae^{-\frac{x}{\lambda}}$. These results showed that magnetic field intensities around the arc furnace could be estimated at any 3-dimensional positions using the finite element method (FEM).

Key words: FEM, arc furnace, magnetic potential, magnetic field distribution

1. 서 론

Arc로는 도체인 전극봉과 부도체인 용강 표면의 슬래그 층에서 전극봉 상호간 작용하는 Arc를 발생시켜 용강 표면의 온도를 높여주고 bottom bubbling에 의해 상승된 용강 표면의 온도를 용강 전체에 균일하게 퍼지게 함으로써 용강 전체의 온도를 상승케 하는 설비이다. 이러한 Arc로는 주로 제련공장이나 전기로공장 등에서 운용되는 주요한 설비로 수십 MVA급의 대전력을 사용함으로써 수백 Gauss에 이르는 강자기장을 발생시켜 대전력 설비에 근접한 철구조물을 자화시키거나 전자기유도 현상에 의해 철구조물 표면에 와전류를 유기시키게 된다. 특히 교류 강자기장으로 인하여 유기된 와전류로 인해 관련설비의 국부적 적열상태로 인한 설비손상, 철근 콘크리트 구조물의 열피로 현상에 의한 구조물강도 저하, 스파크 발생으로 인한 발화 위험성 등이 내포되는 등 교류 강자기장은 설비 고장 및 안전사고를 유발하는 주요한 요인으로 작용하고 있다. 이러한 자기장에 의한 피해를 최소화하고 향후 Arc로의 설계 엔지니어링 기준을 수립하기 위해서도 강자기장 발생원으로 작용하는 대전력 설비의 자기장 발생 패턴, 자기장해석 및 자기장 영향 영역 등에 대한 체계적인 연구가 요구되고 있으나 이에 대한 연구^{1~3)}는 극히 적은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대전력을 사용하는 제강공장의 Arc로 설비에서 발생하는 60Hz의 교류 강자계 분포를 알기 위하여 현장설비와 동일하게 묘사한 유한해석 모델을 제작하고 모델계산을 통해 3차원자기장 분포 해석을 행하였다. 또한 계산된 결과를 현장에서 실측한 결과와 비교 분석

합과 동시에 거리에 따른 L/F주변의 자기장 세기를 묘사할 수 있는 근사식을 도출하고 이에 대한 검토도 행하였다.

2. 자기장 분포해석

2.1. 해석모델 설계

Arc로의 자기장 해석 모델은 자기장 발생원인 3상 전극봉과 Mast arm, 3상 케이블, Ladle, 2층 및 3층 floor plate, 2층의 용탕 비산방지막 등의 구성부 등 되도록 현장 실물을 재현하도록 상세히 묘사하도록 하였으며 계산시간 및 계산결과 파일의 크기 등을 고려하여 지나친 곡면을 가지거나 크기면에서 너무 작은 부분에 대해서는 단순화하였다. (Fig. 1 참조).

먼저 모델 구성단계에서는 실제 현장의 도면을 최대한 활용하는 것을 원칙으로 하였으며 완성된 모델은 실제 현장상황을 잘 반영하도록 Arc로 설비와 이를 둘러싸는 공기층을 포함하여 가로 20m, 세로 30m, 높이 15m의 공간을 묘사하도록 하였다. 또한 ladle furnace(L/F) 설비는 중심축인 center arm을 기준으로 정확히 면대칭을 이루는 구조로 되어 있어 모델의 크기를 줄이기 위하여 모델은 전체의 절반만을 묘사하도록 할 수 있으나 본 연구에서는 투입전류의 위상차가 존재하므로 full model을 제작하였으며 계산 결과를 편의에 따라 full 혹은 half model로 출력할 수 있도록 하였다. 기하학적 모델이 완성된 후 유한요소 모델을 구성함에 있어 adaptive meshing 기법을 이용하여 곡률이 심한 부분에는 보다 조밀한 묘사가, 단조로운 부분에서는 상대적으로 덜 조밀한 묘사가 이루어지도록 하여 전체적으로 충분한 정확도를 유지하도록 하였다. 완성된 유한요소

[†] E-mail: cwkim@rist.re.kr

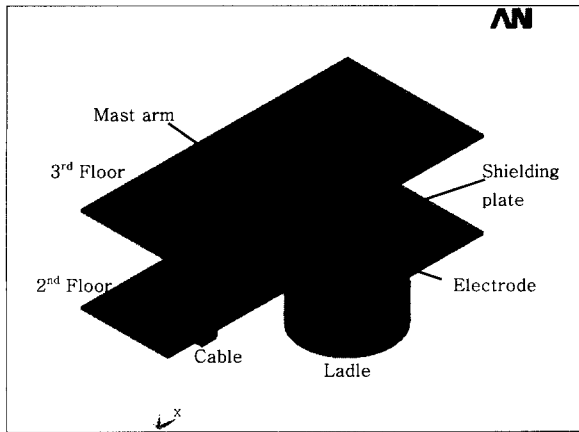


Fig. 1. Analytical model of the arc furnace.

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 arm	1.0×10^{-7}	200
Rubber Cable	1.0×10^{15}	1
Conduction wire	1.7×10^{-8}	1
Floor, shielding plate	1.0×10^{-7}	200
Air	1.0×10^{15}	1

mesh model은 약 40만개의 node와 15만개의 element로 구성이 되어 있다.

해석에 사용된 모델은 임의로 설정한 유한공간을 묘사하고 있으나 실제로는 이 모델의 외부 공간에도 공기층이 존재하므로 자장이 분포하도록 하는 조건을 부여해야 할 것이다. 즉 본 연구에서는 해석하고자 하는 공간영역을 임의로 가로 20m, 세로 30m, 높이 15m의 공간으로 한정하였을 뿐이고 이 공간은 무한공간의 일부분이라는 개념을 모델에 도입할 필요가 있다. 따라서 이러한 개념을 도입하기 위해 모델의 6면 각각에 대하여 무한경계 조건을 설정하였고, 이 조건은 Arc로에 의해 발생된 전자기파가 이 경계면을 만나더라도 경계면에서 반사가 이루어지지않고 계속 전파하여 무한대의 영역으로 계속 전파되도록 하는 개념을 나타낸다. 그리고 모델내의 ladle slag와 접촉하고 있는 용강과의 계면 및 ladle 철판은 전기적으로 접지가 되어 있으며 3상 케이블, mast arm 및 3상 전극봉을 따라 일정크기의 전류가 흐르도록 설정하였다.

2.2. 자기장 해석과정

Arc로 주위의 자기장 분포해석을 하기 위하여 상용 프로그램인 ANSYS를 이용하고, 교류 60Hz가 인가되는 조건에 대한 조화해석(harmonic analysis)을 행하였다. 이것은 정적 상태가 아닌 실제 교류 전류가 인가되고 있는 동적 상태에 대한 Maxwell 방정식을 유한요소법^{4,5)}으로 풀고, Arc로 주위의 자기장 응답특성을 구하는 방법을 이용한 것이다. 자기장 분석시, 입력한 투입전류는 45KA 이고, 3상 전류의 위상차는 120도이다. 또한 3차원의 분석

모델에 사용한 3상 케이블, Mast arm, 3상 전극봉, floor 등의 재료 물성치는 Table 1에 나타내었다. 해석결과로는 Arc로 주위의 3차원 공간에 대한 자기장 벡터 포텐셜(magnetic vector potential) 및 자기력선 밀도(magnetic flux density), 자기장(magnetic field) 분포 등을 구하고, 2차원 평면에 대한 자기 포텐셜의 등고선(Equi-potential contour line) 분포도 함께 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 자기장 분포의 도식적 해석

Fig. 2에 120도 위상차를 갖는 3상 45KA의 전류를 투입했을 때 Arc로 설비 주변의 3차원 자기장 분포 상황을 2차원 등고선 분포도로 나타낸다. Arc로 설비는 center arm을 중심으로 대칭이 되어 있으므로 Fig. 2에서는 자기장 분포 상황을 잘 파악할 수 있도록 half 모델로 출력하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 자장발생원인 3상 케이블, Mast arm 및 3상 전극봉을 중심으로 강자기장이 발생되고 있으며 그 발생패턴은 Mast arm을 축으로 하여 대칭적인 분포를 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3 및 4는 자기장 분포해석 결과인 2차원 평면에 대한 자기장 등고선 분포도(X-Y 단면)을 나타내는 것으로

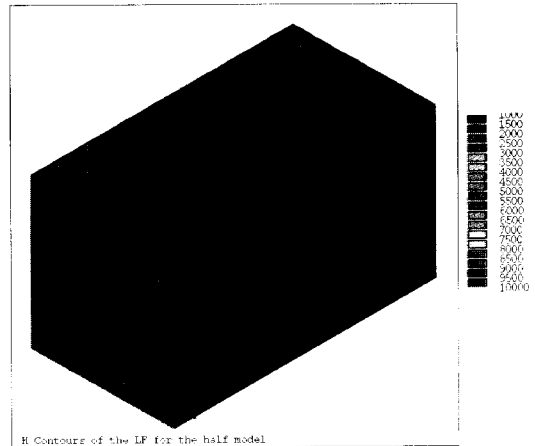


Fig. 2. 3-D equi-magnetic field contour lines in FEM half model (A/m).

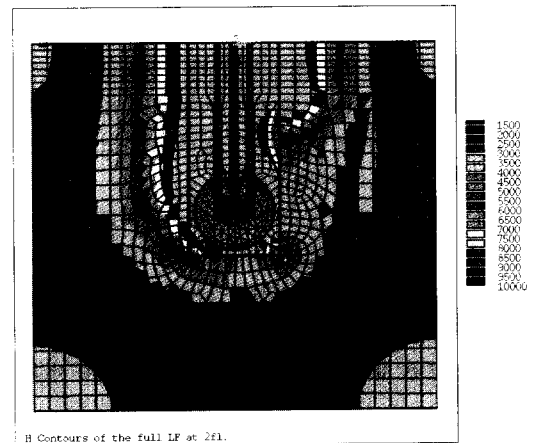


Fig. 3. 2-D equi-magnetic field contour lines (X-Y plane) at the 2nd floor of the arc furnace (A/m).

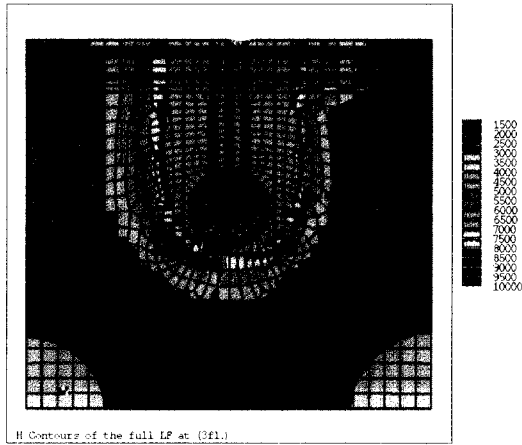


Fig. 4. 2-D equi-magnetic field contour lines (X-Y plane) at the 3rd floor of the arc furnace (A/m).

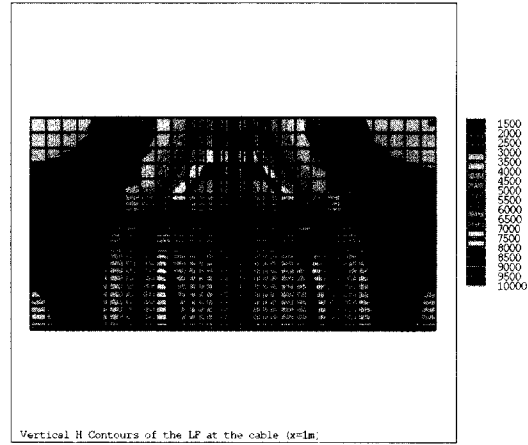


Fig. 6. 2-D equi-magnetic field contour lines (Z-Y plane) at the 3rd floor of the arc furnace (A/m).

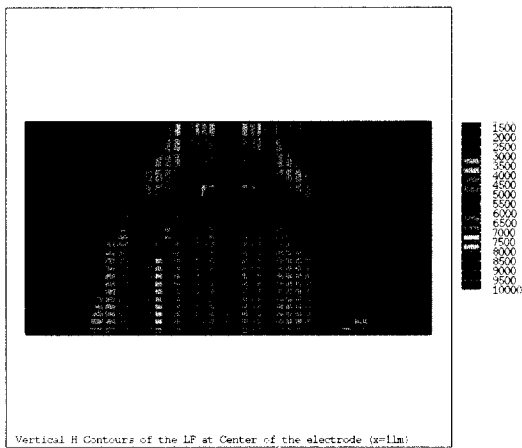


Fig. 5. 2-D equi-magnetic field contour lines (Z-Y plane) at the 2nd floor of the arc furnace (A/m).

각각 2층 ($Z=7\text{m}$) 및 3층 ($Z=12\text{m}$) 인 경우의 분포를 나타낸다. 그러나 2층 및 3층의 등고선 분포를 비교해보면 3층에서의 자기장 분포가 Mast arm을 그 중심축으로 하여 좌우가 대칭적인 분포를 하고 있는 반면에 2층에서의 분포는 우측이 왜곡된 형태를 취하고 있으며 3층의 분포형태와 비교하면 적색인 강자기장 등고선이 자기장 발생원측으로 이동하고 있음을 보여주고 있다. 이 결과는 Fig. 1의 모델 구조를 보면 알 수 있는 바와 같이 2층의 철구조물 구조가 Ladle의 용강 비산을 방지하기 위하여 차폐용 철판을 설치함으로 인하여 차폐효과를 가져온 것임을 알 수 있다. Fig. 5 및 6은 각각 3상 케이블 ($X=1\text{m}, Y=0\text{m}, Z=12\text{m}$) 및 3상 전극봉 ($X=11\text{m}, Y=0\text{m}, Z=12\text{m}$) 주위의 자기장 등고선 분포도 ($Y-Z$ 단면)를 나타낸 것으로 Fig. 5는 center arm 을 중심으로 등고선 분포가 대칭적인 패턴을 하고 있는 반면 Fig. 6은 등고선 분포가 우측이 왜곡된 형태를 보이고 있으며 이는 Fig. 4에서와 같이 2층에 차폐용 철판이 설치됨으로써 자기장세기 분포가 다르며 또한 자기장의 세기는 철 차폐용 철판의 영향이 없는 부위 (Fig. 4)에 비해 약 1/10로 감소되고 있음을 알 수 있었다. 이는 차폐체의 물리적 특성 및 자기장 발생원으로 부터의 거리 등에

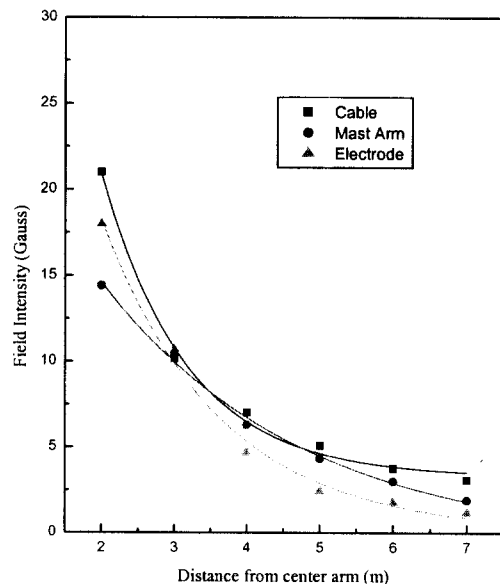


Fig. 7. Dependence of the measured field intensity on the distance from the magnetic source.

따라 유효 적절히 차폐할 수 있음을 의미하고 있다.

3.2. 자기장 분포의 정량화 과정

일정한 크기의 한 개의 도선에 흐르는 전류에 의해 발생되는 자기장의 세기는 전자기장 발생 이론^{6,7)}에 근거하여 유도된 수식에 의해 표현될 수 있으나 본 연구에서는 대상으로 하는 전류가 3상 전류이며 또한 전류흐름이 시간에 따라 그 위상이 120도 만큼 변하는 패턴을 갖기 때문에 고전적인 전자기장 발생이론을 적용할 수 없다. 즉, 3상 전류는 일정한 위상차로 투입되기 때문에 서로 상쇄되므로 이를 묘사할 수 있는 수식을 이론적으로 유도하기는 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 자기장 분포 해석을 통해 나온 결과를 정량화하기 위하여 계산결과와 본 연구 대상인 현장 (포항제철 Arc로 제강공장)에서 실측한 결과를 비교 분석하고 데이터를 fitting하는 방법으로 정량화를 시도하였다. Fitting은 되도록 수식을 단순화하기 위하여 감쇄하는 패턴을 표현하는 다음과 같은 exponential 형태의 1차식을 이

Table 2. Decay constants and amplitudes of the measured field profiles.

Variables	Position	Cable		Mast arm		Electrode	
		1차	2차	1차	2차	1차	2차
$Y_0(\text{offset})$		3.278	0	-0.706	0	0.0465	0
$A_1(\text{ampl.})$		96.53	84.47	31.43	30.1	62.54	62.45
$t(\text{decay const.})$		1.174	1.515	2.776	2.801	1.619	1.625

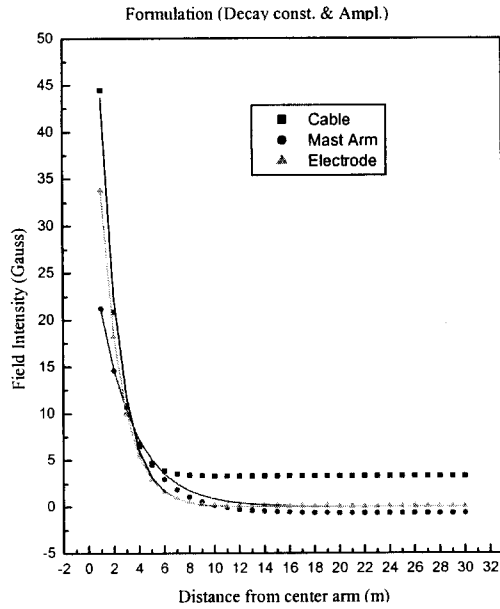


Fig. 8. Formulation profiles of the measured field intensity.

용하여 행하였다.

$$Y = Y_0 + Ae^{-\frac{x}{t}} \quad (1^{\text{st}} \text{ order}) \quad (1)$$

여기서 Y_0 는 offset, A 는 감쇄크기를 나타내는 진폭 (amplitude) 및 t 는 감쇄 민감도를 나타내는 감쇄상수 (decay constant) 를 나타낸다.

Fig. 7에 Arc로 공장 3층에서 3상 케이블 ($X=1\text{m}$, $Y=0\text{m}$), Mast arm ($X=7\text{m}$, $Y=0\text{m}$) 및 3상 전극봉 ($X=11\text{m}$, $Y=0\text{m}$) 으로부터 1m 간격으로 3축 자기장 센서를 이용하여 자기장 세기를 측정된 결과와 식(1)을 이용하여 fitting한 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 데이터에 대해 신뢰도를 향상시키기 위하여 3상 케이블, Mast arm 및 3상 전극봉 각 부위별로 임의의 거리에 따른 높이별 ($Z = 12.5, 13.5, 15\text{m}$) 자기장 분포를 산술 평균하여 각 부위별로 도시하고 이에 대해 각각 fitting을 행하였다.

그림에서 보는 바와 같이 자기장 발생원으로부터 거리가 멀어질수록 자기장이 일정한 패턴으로 감쇄하고 있음을 알 수 있으며 자기장 발생원 근접 위치에서는 3상 케이블, 3상 전극봉, Mast arm 순으로 자기장이 세기가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 자기장 분포는 Table 1에서 보는 바와 같이 도선이 통과하는 구조물의 전자기 물성에 의해 달라지고 있으며 Mast arm인 경우는 그 구조물 자체가 강구

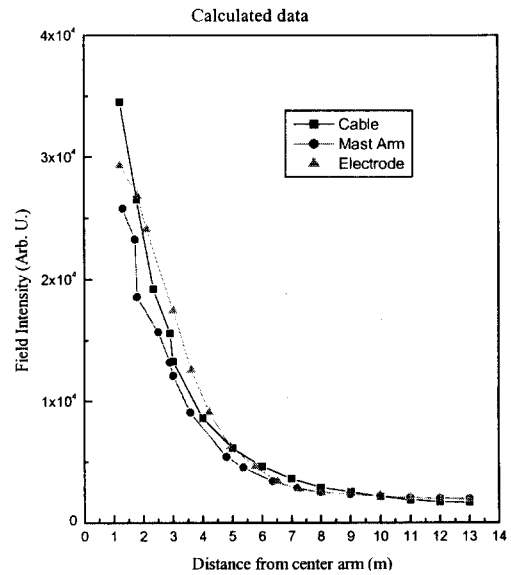


Fig. 9. Dependence of the calculated field intensity on the distance from the magnetic source.

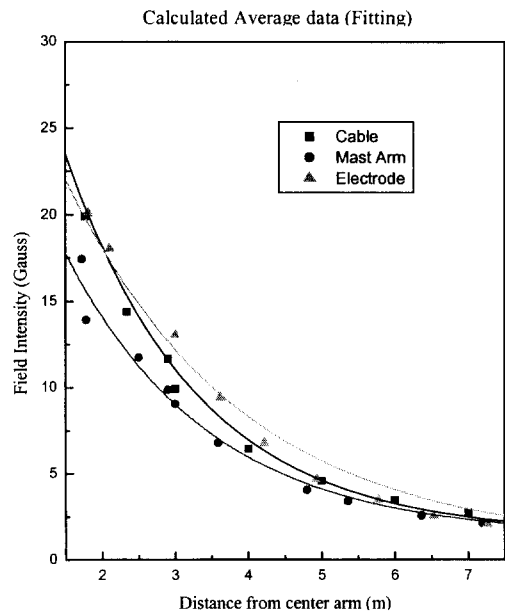


Fig. 10. Fitting profiles of the calculated field intensity around the arc Furnace.

조물로 이루어져 구조물에 의한 차폐효과로 인해 자기장 세기 분포가 가장 낮은 것으로 판단된다. 식 (1)은 물리적인 측면을 고려하지 않고 단순히 fitting을 행하였으나 데이터를 수식화 하는 데는 물리적인 의미를 부여하는 것이 중요

Table 3. Comparison between the decay constants and amplitudes of the calculated results and those of the measured data.

Variables	Position	Cable		Mast arm		Electrode	
		Meas.	Cal.	Meas.	Cal.	Meas.	Cal.
$Y_0(\text{offset})$		0	1.427	0	0.753	0	1.306
$A(\text{ampl.})$		84.47	47.41	30.1	37.78	62.45	35.06
$t(\text{decay const.})$		1.515	1.829	2.801	2.441	1.625	1.983

하다. 즉, 자기장의 세기는 Biot-Savart 법칙⁸⁾에서도 예견 되듯이 거리가 무한대일 경우는 0에 수렴하여 완전히 소멸 하게 된다. 그러나 Fig. 7의 1차 fitting 결과는 offset이 0 값을 가지고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 1차 fitting 후 진폭 및 감쇄상수만을 조절하여 시행착오 방법으로 2차 fitting함으로써 offset이 0가 되는 최적의 결과를 도출하였다. 그 결과를 Table 2.에 나타낸다. 또한 Table 2.에서 구한 각 부위별 진폭 및 감쇄상수를 식 (1)에 적용하여 거리 별로 자기장 감쇄 패턴을 도시한 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 3상 케이블인 경우, 자기장 발생원으로 부터 약 5m까지는 1차 fitting한 결과와 잘 일치하고 있으나 거리가 자기장 발생원으로 부터 멀어지도록 일정한 값(3.278)으로 수렴하기 때문에 비현실적인 결과이며 2차 fitting한 결과가 보다 실측치에 접근할 것으로 판단된다. 실제로 자기장 발생원으로 부터 거리가 15m 정도일 때의 현장에서의 실측치는 약 50 mG로써 Fig. 8의 결과와 거의 일치함을 보였다.

Fig. 9는 계산결과를 실측치와 비교하기 위해 실측한 동일한 위치와 대응되는 유한요소 모델내의 위치에서의 계산된 결과를 나타낸다. 실측치와 마찬가지로 자기장세기가 자기장 발생원 근접 위치인 2m내에서 3상 케이블, 3상 전극, mast arm 순으로 크게 나타나고 있으며 자기장 발생원으로 부터 거리가 멀어 짐에 따라 급격히 감쇄하며 그 감쇄패턴 및 경향이 실측 데이터와 잘 일치 하고 있다. 따라서 계산결과를 적용시켜 거리별 자기장의 세기를 정량화하는 수식을 도출하기 위하여 Fig. 9의 계산결과를 실측치인 Fig. 7과 동일한 종축 scale로 전환하여 재plot하고 이에 대해 fitting하면 Fig. 10과 같은 결과를 얻었다. 또한 이때의 감쇄상수 및 진폭을 구하면 Table 3.과 같으며 측정치 및 계산치의 감쇄상수 및 진폭이 서로 유사함을 알 수 있다. 도출된 정량화 된 수식에 의한 데이터와 계산치의 오차정도 범위를 평가하면 3상 케이블, Mast arm 및 3상 전극봉 주위의 자기장 세기는 각각 10%, 14% 및 22% 내에서 잘 일치함을 알 수 있었으며 이는 계산을 통해서 Arc로 주위의 임의의 위치에서 자기장의 세기를 예측할 수 있음을 보여주는 결과로 생각된다. 또한 각 위치에서의 성분별(X, Y, Z, SUM) 자기장의 세기 및 소멸되는 경향까지 파악이 가능하므로 본 연구결과는 대전력을 사용하는 모든 Arc로 공장에서 발생하는 자기장 분포에 관한 정량적인 정보가 제공 가능하여 설비 엔지니어링 분야에서 설계기준 수립시의

가이드 라인으로 활용될 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Arc로 주변의 자기장 분포 해석 결과, 전반적으로 자기장 발생원인 Arc로 주위에 강자기장이 형성됨을 알 수 있었으며 자기장의 세기는 center arm 근방에서 3상 케이블 > 3상 전극봉 > Mast arm 순으로 분포되었으며 이 결과는 현장 실측 경우와 그 경향이 일치하였다.
- 2) Arc로 2층 바닥의 차폐체 유무에 따라 자기장 분포 상황이 크게 달라짐을 알 수 있었으며 이는 Arc로 주위의 강자기장 차폐시에 현장상황에 적합한 차폐방안을 도출함으로써 강자기장을 차폐할 수 있음을 보여주는 것이다.
- 3) 실측치를 분석한 결과, Arc로 주위의 자기장 감쇄패턴은 $Y = Y_0 + Ae^{-\frac{x}{t}}$ 형태로 잘 묘사 할 수 있었으며 이 수식을 이용한 계산결과와 FEM 해석결과를 비교할 경우, 3상 케이블, Mast Arm 및 3상 전극 주위의 자기장세기 분포는 각각, 10%, 14% 및 22% 내에서 일치하였으며 이는 계산을 통해 임의의 위치에서 자기장 세기를 예측할 수 있음을 보여주었다.

참 고 문 헌

1. C.W. Kim and D.C. Lee, Korean Journal of Materials Research, **9(3)**, 251(1999).
2. T. Keikko, J. Isokorpi and L. Korpinen, IEE Conference Publication, **2(467)**, 2.111(1999).
3. Y. Sakai and A. Yamasita, JSME Int. Journal Series A, **38(1)**, 52(1995).
4. J.L. Volakis, A. Cbatterjee and L.C. Kempel, p.157, Finite Elements Method for Electromagnetics, IEE Press, (1998).
5. E.R. de A. Oliveira, Int. Journal. solids Structures, **4**, 929(1968).
6. D.K.Cheng, Field and Wave Electromagnetics, 2nd ed., p. 307, Addison-Wesley, (1989).
7. J.A.Kong, Electromagnetic wave theory, p.44, John Wiley & Sons, Inc., (1985).
8. J.D. Kraus, Electromagnetics, 3rd ed., p.153, McGraw-Hill Int.ed., (1987)