

Evolution Strategy 알고리즘을 이용한 송전선로 주변에서의 최적 자계차폐 위치선정

論 文

51C-1-2

Decision of Optimal Magnetic Field Shielding Location around Power System Using Evolution Strategy Algorithm

崔世鎔* · 羅浣洙** · 金東勳*** · 金東洙*** · 李俊鎬*** · 朴日韓** · 申明澈§ · 金炳成§§
(Seyong Choi · Wansoo Nah · Dong-Hun Kim · Dongsoo Kim · Joon-Ho Lee
Il-Han Park · Myung-Chul Shin · Byung-Sung Kim)

Abstract - In this paper, we analyze inductive interference in conductive material around 345 kV power transmission line, and evaluate the effects of mitigation wires. Finite element method (FEM) is used to numerically compute induced eddy currents as well as magnetic fields around power transmission lines. In the analysis model, geometries and electrical properties of various elements such as power transmission line, buried pipe lines, overhead ground wire, and conducting earth are taken into accounts. The calculation shows that mitigation wire reduces fairly good amount of eddy currents in buried pipe line. To find the optimum magnetic field shielding location of mitigation wire, we applied evolution strategy algorithm, a kind of stochastic approach, to the analysis model. Finally, it was shown that we can find more effective shielding effects with optimum location of one mitigation wire than with arbitrary location of multi mitigation wires around the buried pipe lines.

Key Words : Magnetic field shielding, FEM, Evolution Strategy, Eddy Current, Power Transmission Line, Optimization

1. 서 론

생활 수준의 향상과 산업의 발전으로 인한 전력수요의 증대로 점차 전력 설비들의 증가가 요구되고 있다. 하지만 이러한 상황에도 불구하고 전기 설비의 설치 공간은 점점 협소해지고 있으며, 대용량의 전기 설비에 따른 전기 환경의 문제는 이제 간과할 수 없는 사회 문제로 대두되고 있으며, 이에 대한 대책이 시급한 실정이다. 점차 문제화되고 있는 대용량의 전기 설비들에 의한 전자기장의 노출량에 대해서 사회적·법적인 규제가 강화되는 현재 전자기장을 정확하게 계산할 제반 사항이 부족한 실정이며, 실제 운영되고 있는 설비들에서의 정량적인 전자기장을 과학적인 근거로 해석해야 할 필요성이 절실하다.

여러 가지 전기 설비들 가운데 고전압 대전류로 운전되는 전력용 송전선은 그 주위에 전자기장을 발생시키고, 이 전자기장은 주위의 여러 설비들에 영향을 미칠 수 있다. 특히 송전선으로부터 발생하는 교류 자계는 주변에 도체로 된 구조물이 있을 경우 유도 전압과 전류가 유기 됨으로써 인체에 감전 사고를 유발시킬 수 있으며, 간섭을 받은 구조물 자체에

는 치명적인 손상을 입힐 수도 있다. 이러한 전자기장의 발생이나 이에 의한 유도장해의 원리는 수식적으로 잘 구현되어 있고 해석적으로도 쉽게 이해 될 수 있으나, 실제의 모델에 적용시켜 효과를 살펴는 때는 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 그러므로 이러한 해석 과정에는 수식적인 원리 이외에도 해석하고자 하는 대상에 대한 기하학적 또는 전기적인 지식을 필요로 한다. 본 논문에서는 수치적인 계산을 위해 유한요소법(Finite Element Method; FEM)을 사용하였으며, 기존의 해석적인 수식들에 비해 범용적이고 다양한 모델에의 적용이 가능하므로, 본 논문에서와 같이 다소 복잡한 주변 영역을 모두 고려하여 해석하기 위해서는 대상의 모델링이 비교적 수월한 유한요소법이 널리 사용된다. 유도 자계에 의해서 간섭을 받는 대상물은 차폐 대책을 세움으로써 유도 장해의 수준을 감소시킬 수 있으며, 또한 차폐물의 위치를 최적화함으로써 대상물의 유도 장해를 보다 적극적으로 최소화 할 수 있다. 또한 일련의 과정들이 설계 단계에서 이루어진다면, 송전선에서 발생하는 자계에 의한 장해를 미리 예측하여 그에 대한 적절한 대비를 하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

본 논문에서는 국내에서 운전중인 345 kV 송전선 시스템을 모델로 하여, 60Hz의 전력 주파수대역에서 발생하는 자계를 계산하고 이것들이 주위의 설비들에 미칠 수 있는 유도장해에 대하여 기술하였다. 해석 대상들은 송전선 주위에 존재할 수 있는 도선들을 가지는 도체들이며, 특히 송전선과 평행하게 가설된 매설 배관이 존재하는 경우에 대해서 배관에 유도될 수 있는 와전류를 수치적으로 계산하였다. 또한 배관부 주위에 차폐선(mitigation wire)을 도입하여 이것의 유무에 따른 유도 장해의 수준을 비교 분석하였다. 그리고 하나의

* 準 會 員 : 成均館大 電氣電子 컴퓨터工學科 博士課程

** 正 會 員 : 成均館大 電氣電子 컴퓨터工學科 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 成均館大 電氣電子 컴퓨터工學科 BK教授 · 工博

§ 正 會 員 : 成均館大 電氣電子 컴퓨터工學科 教授 · 工博

§§ 正 會 員 : 成均館大 電氣電子 컴퓨터工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2001년 2월 1일

最終完了 : 2001년 11월 15일

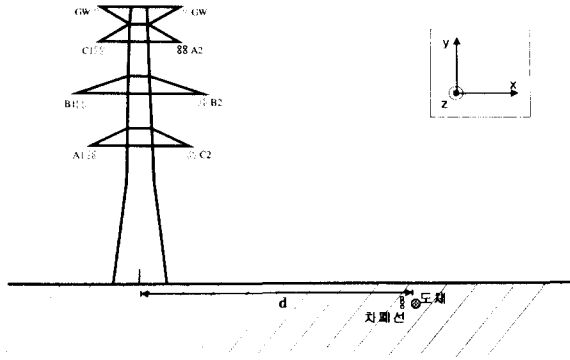


그림 1 해석 영역의 단면도

Fig. 1 Cross-section of the analysis model

차폐선으로 배관부에서의 자계를 최적으로 차폐할 수 있는 차폐선 위치를 계산하기 위해서 확률론적인 방법중의 하나인 Evolution Strategy 알고리즘을 이용해서 최적의 차폐선의 위치를 계산하였다. 마지막으로 계산된 최적의 차폐선 위치에서는 임의로 선정된 위치에서의 3개 차폐선들의 차폐의 효과보다 향상된 차폐 효과가 있음을 확인하였다.

2. 해석 영역의 정의

본 논문에서는 345 kV 송전선로의 부하 전류에 의해 발생하는 자계를 유한요소법을 이용하여 계산하였고, 이에 의해서 주위의 도체부에 유기되는 와전류의 분포를 해석하였다. 송전선의 주위에 존재하여 전류가 유기 될 수 있는 도체들은 상·하수관, 가스 배관, 송유관, 전력관, 통신 케이블 등이 있다. 특히 교류 자계에 의한 유도 전류는 매설된 배관에 부식을 야기하여 배관에 피해를 입힐 수 있으며, 특히 송유관이나 가스 배관과 같은 매설 배관의 경우는 이로 인해 누출 사고로 이어질 수도 있기 때문에 적절한 대책이 필요하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 그림 1에서와 같이 배관이 송전선을 따라서 평행하게 매설된 경우를 상정하여 해석을 수행하였다. 이들에 유도될 와전류를 해석하기 위해서는 해석 대상에 대한 여러 가지 정보들이 필요하다. 특히 각 설치물들의 설비 형식이나 배열 방식, 그리고 각각의 물질 정보 등을 필요로 한다. 이번 절에서는 해석 대상 영역인 전력용 송전 시스템과 이에 평행하게 설치된 매설 배관 등의 해석 대상 영역에 대한 특징에 대해서 기술하였다.

2.1 해석 영역의 개요

그림 1은 해석 대상 영역의 단면도를 보이고 있다.[1] 전형적인 형태로 가설된 345 kV 송전선로와 송전선로를 따라서 일정한 거리만큼 떨어져 송전선로의 진행방향과 평행하게 매설된 배관이 존재하는 경우이다. 유도 장애의 문제의 경우에 있어서 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 의하면 전류가 흐르는 도선과 도체 사이에는 전류에 의해서 발생하는 자계와 쇄교하는 도체의 면적이 클수록 유도성 전류는 커지게 되므로 송전선로의 진행 방향과 평행하게 설치된 금속 배관의 경

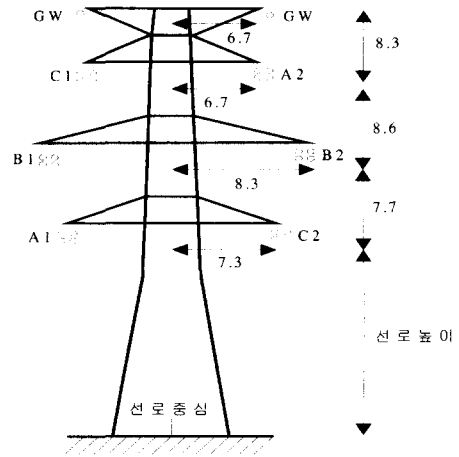


그림 2 345 kV 송전 시스템의 설치도[2], 단위(m)

Fig. 2 The setup of 345 kV transmission line

우 유도장애의 수준이 가장 높다고 할 수 있다. 이러한 유도장애로부터 배관을 보호하기 위하여 배관 주위에 그림 1과 같이 차폐선을 설치할 수 있다.

2.2 해석 영역의 부분별 정의

그림 2에서는 국내에 실제로 가설되어 운전중인 2회선 4도체 방식의 345 kV 송전선로의 설치도를 보이고 있다. 그림 2에서의 송전선은 2회선 4도체로 구성된 345 kV 송전 시스템의 경우이며 각 도체들의 크기와 소도체 사이의 간격 및 설치 규격은 그림 2와 표 1에서 보이는 바와 같이 실제 345 kV 계통에 사용되는 경우의 자료를 이용하였다.[2]

해석에 사용된 전원 전류의 주파수는 표준 전력 주파수인 60 Hz이며, 각 선로의 상 전류는 전국 송전선로의 전류에 대한 통계적 수치를 이용하였다. 국내 345 kV 송전 선로의 58 개소에서 측정된 전류 중 최대치가 1880 [A]이고 최소치가 25 [A]이며, 456 [A]의 표준편차 일 때의 평균값으로 조사된 656 [A]를 해석 영역의 각 상의 실효치로 사용하였으며, 표 2에 통계적인 수치를 제시하였다[2,9]. 지표면으로부터 송전선로의 선로 높이는 철탑이 가설된 경우와 주변의 상황에 따라 달라지며, 표 3에서는 국내에 실제로 가설된 송전선로의 평균적인 지상고를 나타냈다. 해석의 경우에 있어서 적용된 모델의 송전선로 높이 역시 평균적으로 가장 많이 존재하는 14 [m]를 이용하였다.

표 1 345 kV 표준 송전선의 사양[2]

Table 1 Specification of 345 kV transmission line

구분	가공지선		도체			선로높이 (m)
	개수	직경 (mm)	개수	직경 (mm)	소도체 간격 (mm)	
2회선4도체 345kV	2	9.779	4	29.61	400	14

표 2 전국 송전선로의 전류에 대한 통계적 수치[2]

Table 2 Statistical data for current of transmission line

345 kV	측정 개수	평균치 [A]	표준편차 [A]	최대치 [A]	최소치 [A]
전류	58 개소	656	456	1880	25

표 3 국내 송전선로의 전선 지상고 기준[2]

Table 3 The height of the transmission line

구분	4도체 345 kV
일반 평지	14
농경지	14
절도	16
도로	14
산악지	10
가공 약전류 전선로	8

본 연구에서는 유도 자계에 의해서 전류가 유기 되는 매설 배관은 송전 선로의 철탑 중심으로부터 25 [m]의 거리만큼 떨어져서 지하 1.5 [m]에 매설되어 있는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 매설된 배관은 그림 3과 같이 금속부와 코팅부를 보호하는 코팅부로 이루어져 있다. 일반적으로 배관의 금속부는 절연성 물질로 피복하는 것이 일반적이며, 코팅부는 전기적으로 절연된 물질로 금속부의 외곽을 둘러싸서 금속 배관의 부식을 막는 역할을 한다. 계산에 이용된 매설 배관 금속부의 전도도(σ_m)는 7.0×10^6 [S/m]이며, 비투자율(μ_m)은 250, 배관 코팅부의 전도도(σ_c)는 1.0×10^{13} [S/m], 비투자율(μ_c)은 1로 하였다.[1] 또한 매설된 배관 진방부에서 배관의 금속부에 유기되는 자계 및 전류를 유도할 차폐체는 3.82×10^7 [S/m] 전도도와 1의 비투자율을 갖는 전기전도도가 매우 큰 알루미늄선으로 가정하였으며 매설 배관 및 차폐선의 형상은 참고 문헌 [3]에서의 자료를 모델로 하여 적용하였다.[3]

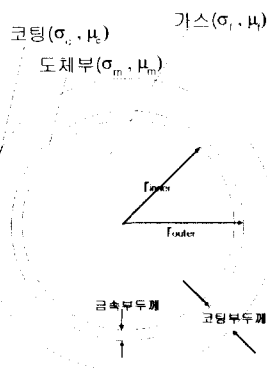


그림 3 매설 배관의 단면도

Fig. 3 Cross-section of the buried pipe line

표 4 매설 배관의 사양

Table 4 Specification of the buried pipe line

배관의 내경 (r _{inner} :mm)	배관의 외경 (r _{outer} :mm)	코팅의 두께 (mm)	도체 배관의 두께 (mm)
195	200	100	5

본 논문에서 대지는 적지만 전자기장에 변화를 일으키는 도전율을 가지는 부분으로 가정하여 해석하였다. 일반적으로 대지는 일정한 도전율을 보이지 않고, 그 값은 실험적인 측정을 통해서만 알 수 있다. 또한 대지의 도전율의 측정에 있어서도 토양의 습기 함유 여부, 기온 등에 따라 같은 부분의 토양이라도 상황에 따라 다른 전도도를 보이며, 이러한 전방적인 상황을 모두 고려하여 해석에 적용하기는 매우 어려운 문제이다. 게다가 대지는 일정한 성분으로 구성되어 있는 것이 아니라 수많은 토양 성분으로 이루어져 있고, 이들이 각각의 도전율을 가지고 있기 때문에 매우 비균질적인 특성을 보이며, 대지 형태 및 도전율의 모델링 또한 하나의 큰 연구 분야로 존재한다. 표 5에서는 일반적인 대지의 전도율을 나타내었다. 본 해석과정에서는 토양의 도전율 측정시 기준이 되는 비저항 값을 기준으로 토양의 도전율을 가정하였으며, 송전선의 선로높이에 적용된 일반 평지 및 농경지에서의 비저항율을 이용하여 해석을 수행하였다.

3. 유한요소 해석을 위한 지배방정식 도출

2장에서 제안된 해석영역에서 시간적으로 변하는 전류 밀도 J_0 에 의해서 공간적으로 분포하는 사변 자계는 매설 배관의 금속부에 와전류 J_e 를 유도시킨다. 송전선로의 전류로부터 발생되어 공간적으로 분포하는 자계를 계산하기 위해서는 일반적으로 포텐셜을 이용하여 구하는 방법이 널리 쓰인다.[5,6]

이 방법을 통해서 구해진 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)로부터 자계 분포 B 를 구할 수 있다. 변위 전류를 무시할 수 있는 준 정상상태(Quasi-electromagnetics)에서의 전자기 현상은 다음과 같은 맥스웰 방정식과 보조 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\nabla \times H = J_0 + J_e \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (2)$$

$$J = \sigma E \quad (3)$$

$$B = \mu H \quad (4)$$

여기서 H 는 자계의 세기, B 는 자속 밀도, E 는 전기장의 세기, J_0 는 전류 밀도, J_e 는 와전류 밀도이다. 자속 밀도 B 와 자기 벡터 포텐셜 A 와의 관계는 식 (5)와 같이 표현되므로, 식 (1)은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

표 4 일반적인 토양의 비저항
Table 4 Resistivity of the ground

토양의 형태	토양의 비저항 [Ωm]
습성부식토, 습지토양	30
농경지, 릫질 토양	100
사질 점토양	150
사질 습토양	300
건성 사질토	1000
콘크리트	400
습성 사력층 토양	500
건성 사력층 토양	1000
암반질 토양	30000
암석층	10000000

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (6)$$

식 (6)은 식 (7)과 같은 벡터 연산식에 의해서 정리되어 쿨롱 게이지(coulomb's gauge)를 적용하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = -(\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e) \quad (8)$$

이때 유도되는 와전류 밀도 \mathbf{J}_e 는 식 (9)와 같고 식 (10)에 의해서 와전류를 흐르게 하는 원인이 정의될 수 있다. 와전류는 전자계의 영향을 받으며, 계 전체의 전자기량은 이렇게 유기된 와전류에 의해서 영향을 받으므로 와전류와 전자계는 동시에 해석되어야 한다.

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \quad (10)$$

식 (9)와 (10)으로부터 유도 전류는 식 (11)과 같이 정리되며, 와전류는 전류 밀도로부터 해당 영역을 면적에 대해서 전체 적분함으로써 얻을 수 있다.

$$\mathbf{J}_e = -j\omega \sigma \mathbf{A} \quad (11)$$

한편, 그림 1에서와 같이 정의된 2차원장의 해석 대상 영역에서는, 지배방정식 역시 2차원으로 자기벡터 포텐셜 A_z 와 전류 밀도 J_z 의 z 방향의 요소를 갖는 문제로 대체될

수 있으므로, 최종적으로 시스템의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left[\frac{\partial A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial A_z}{\partial y^2} \right] - j\omega \sigma A_z = -J_0 \quad (12)$$

4. Evolution Strategy 알고리즘

송전선에서 발생하는 전자기량으로부터 매설 배관에의 노출량을 줄이기 위해서는 전자계를 차폐할 수 있는 대책이 수립되어야 하며, 일반적으로 전기 전도도가 큰 차폐선을 배관 주변에 설치함으로써 배관의 금속부에 유도되는 자계 및 전류를 줄일 수 있다. 만약 최적의 위치에 차폐선을 설치한다면 경제적인 면에서는 저 비용의 설비를, 공학적인 면에서는 고 효율적인 결과를 얻을 수 있을 것이다. 본 논문에서는 evolution strategy 알고리즘을 이용하여 일정한 영역 내에서 차폐선의 최적의 위치를 결정하는 방법을 제안하고, 그 타당성을 수치해석의 결과로 설명하고자 한다.

고전적 방법을 이용한 최적화 기법은 오랜 기간에 걸쳐서 전기적인 문제들을 포함해 공학의 전 분야에 걸쳐서 적용되어 왔다. 이러한 최적화의 방법들은 거의 결정론적인 방법을 통해 이용되어왔으나 종종 국부해(local solution)로 수렴하는 경향이 있으므로 목적함수의 양상에 대한 지식이 충분치 못하다면 확률론적 방법(stochastic methods)을 사용하는 것이 좋다. 확률론적 접근법은 임의의 요소를 이용해서 해석의 경로를 선택하므로, 해석의 시작점에 관계없이 높은 확률을 가지고 전역해(global solution)를 찾을 수 있게 한다. 이 방법은 구현이 다소 쉽고, 안정적으로 수렴하며, 희망하는 해를 구하는데 가능성이 있음에도 불구하고 평가해야 하는 함수의 수가 많다는 단점이 있지만 이러한 문제점은 계산용 컴퓨터의 성능의 비약적인 발전에 힘입어 더 이상 큰 문제가 되지 않으며, 앞으로의 적용분야는 더욱 더 확대될 것이다.[7]

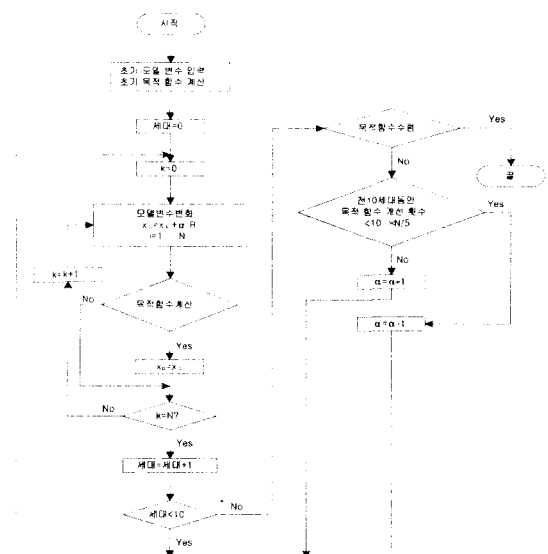


그림 4 Evolution Strategy 알고리즘의 흐름도
Fig. 4 Flow chart of the evolution strategy algorithm

비 결정론적인 최적화법인 확률론적인 방법에는 Genetic Algorithm(GA), Simulated Annealing(SA), Evolution Strategy(ES)등이 있다. 이 중 ES법은 환경의 변화에 적응하여 생존하는 생명체의 적응 진화 과정을 모사한 GA와 급속의 체련 과정 중 풀림 과정을 통해 급속이 최대한 안정된 에너지 상태가 되는 과정을 본 뜬 SA를 합성한 방법으로, 빠른 수렴특성을 가지고 있는 장점을 가진다[8].

ES법은 일정한 구속 범위 내에서 다음 세대를 복제하는 재생산 과정, 외부 요인에 의한 변이가 과정, 그리고 전술한 두 과정이 반복되며 서서히 변화된 환경에 적응해나가는 과정을 갖는다. 이 과정이 실제 설계에 적용되면, 우선 미리 정해진 설계 변수 집합인 첫 번째 부모세대로부터 일정한 범위 내에서 확률 변수를 발생하여 다음 세대를 생성시킨다. 생성된 세대는 부모세대와 구분하여 자식세대라 하는데 부모세대와 자식 세대 전체를 통해 원하는 목적함수 값에 가장 근접한 변수 집합을 택하여 다음의 부모세대를 구성한다. 이 과정을 변이와 재생산의 과정이라 하며, 이 과정 후에 이어지는 것은 재생산 결과에 따라 변이의 변화 폭을 조절하는 과정이 진화의 전개를 조정하여 절대최소치를 찾으려 하는 적응 과정이다. 위의 과정들이 반복되면서 변이의 변화 폭이 점차적으로 감소하여 결국 설계 목표에 가장 부합하는 설계 변수들을 찾을 수 있게 된다. 이와 같은 적용방법을 $(a+b)$ Evolution strategy라고 하며, 이 중 $(1+1)$ Evolution strategy는 여러 변수에 대해서 수학적 규명이 잘 되어있고 알고리즘이 간단하면서도 수렴 속도도 빠른 편이어서 널리 사용되고 있다.

임의로 선정된 부모 세대의 변수 벡터 X_p 에서 자식 세대의 변수 X_c 를 발생시키는데, 이는 난수 함수 $R(i)$ 에 의해서 다음 식과 같이 이루어진다.

$$X_c(i) = X_p(i) + \alpha_{(i)} \cdot R(i) \quad (13)$$

여기서 $\alpha_{(i)}$ 는 부모세대 변수 $X_p(i)$ 를 중심으로 한 변화 가능 폭을 나타내고 i 는 세대를 의미하며, 부모세대의 총 개체수인 N 개까지의 개체를 발생시킨다. 부모세대 변수 $X_p(i)$ 와 자식세대 변수 $X_c(i)$ 에 대한 목적함수를 각각 $F_p(i)$, $F_c(i)$ 라고 하면, 다음 부모세대인 $X_p(i+1)$ 은 식 (14)와 같이 정해진다.

$$X_p(i+1) = \begin{cases} X_c(i) & , \text{if } F_c(i) < F_p(i) \\ X_p(i) & , \text{if } F_c(i) \geq F_p(i) \end{cases} \quad (14)$$

이 과정은 전술했던 재생산과 변이의 과정이며, 한편 SA법을 모사한 과정은 변화 가능 폭의 적절한 조정을 통해서 이루어지는데 이전 10세대 동안의 재생산 과정에서 변이가 일어난 횟수, 즉 목적 함수가 개선된 횟수를 계산하여 식 (15)와 같이 변화시킨다. 본 논문에서 최적화의 방법으로 채택한 $(1+1)$ Evolution strategy의 간단한 흐름도는 그림 4와 같다.

$$\alpha = \begin{cases} \alpha + 1 & , \text{if 변이횟수} > \frac{10 \times N}{5} \\ \alpha - 1 & , \text{if 변이횟수} < \frac{10 \times N}{5} \end{cases} \quad (15)$$

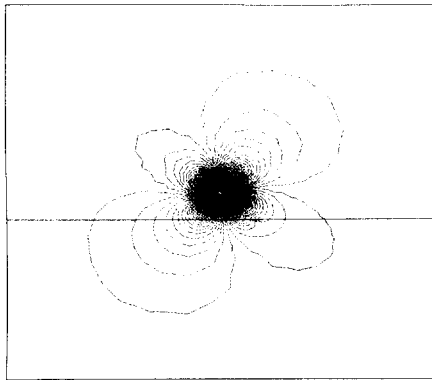
5. 수치해석 적용사례

2장에서 해석 대상 영역을 가정한 바와 같이 제안된 모델에 대해서 수치적인 계산을 수행하였다. 송전선 주위의 넓은 영역에 비해서 효과를 살펴려는 매설 배관 주위의 영역은 전체에 비해서 극도로 작은 영역을 차지하고 있어서 요소 분할 과정에서 주의가 필요하고, 특히 와전류가 유기 되는 매설 배관의 급속부는 도체의 물성치를 고려해서 자계의 침투 깊이 내에서 많은 수의 요소를 분할하여야 정확한 결과를 도출할 수 있다. 본 절에서는 차폐선이 없을 때 매설 배관 주위의 자계 분포와 매설 배관의 와전류 크기를, 차폐선이 1개 그리고 3개 있을 때 매설배관 주위의 자계 분포와 매설 배관의 와전류 크기를 비교하였다. 또한, 앞에서 도입한 evolution stratdgy 알고리즘을 이용하여 차폐선이 한 개일 때의 최적 차폐선 위치를 산출했으며, 그때의 차폐 효과와 임의의 위치에 3개의 차폐선이 존재할 때의 차폐 효과를 비교 분석하였다.

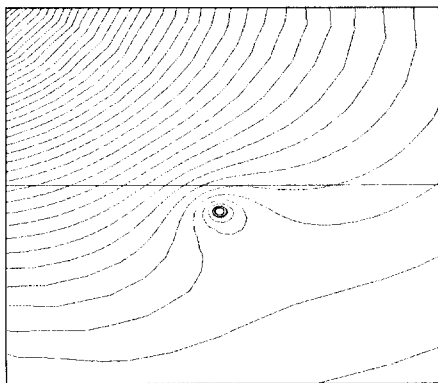
5.1 차폐 대책의 유무에 따른 해석 결과

제안된 해석 영역에 대해서 차폐 대책의 유무에 따른 해석 결과를 도시하였다. 차폐선은 매설 배관의 중심으로부터 1 [m] 전방에 1개와 이로부터 상하 20 [cm] 간격을 갖도록 수직으로 2개를 추가하여 3개의 차폐선이 위치하도록 설치하였고[1], 이들의 결과를 차폐 대책이 없는 해석 모델과 비교하였다. 그림 5, 6, 7의 (a)는 전체 영역에 대한, (b)는 매설 배관 주변을 확대하여 나타낸 등포텐셜도이다. 그림 6, 7에서 볼 수 있듯이 차폐선이 존재하는 경우에는 차폐선 쪽으로 자계가 집중되는 것을 알 수 있다.

이들의 자계 분포를 정량적으로 살펴보기 위해서 그림 8, 9, 10에 각각의 경우에 대한 자계의 크기를 도시하였다. 송전철탑의 중심($x=0$ [m])과 대지면($y=0$ [m])을 기준으로 하여 각각의 (a)에서는 해석 영역 중 우 반평면, (b)에서는 송전선의 주변의 지표 부분과 지상 1[m] 그리고 매설배관이 존재하는 지중에서의 자계 분포를 나타내었다. 각 그림의 세부 영역의 그림에서와 같이 차폐선이 없는 경우에는 자계의 크기가 점점 증가되다가 배관이 위치하는 부분($x=25$ [m] 근방)에서 자계의 위치가 최대가 되지만, 차폐선이 존재하는 경우에는 차폐선이 존재하는 부분($x=24$ [m])에서 큰 자계가 유도됨을 알 수 있고, 이로 인한 차폐 효과로 인해서 차폐선의 후방에 존재하는 매설 배관의 부분에 유도되는 자계의 크기가 작아짐을 확인할 수 있다.



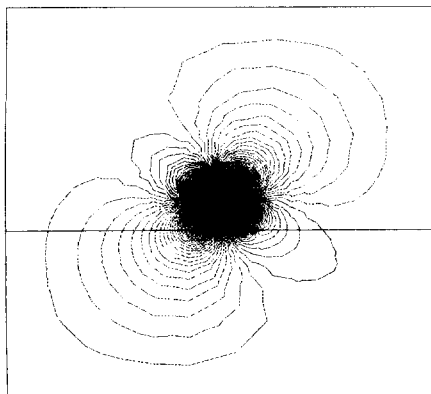
(a)



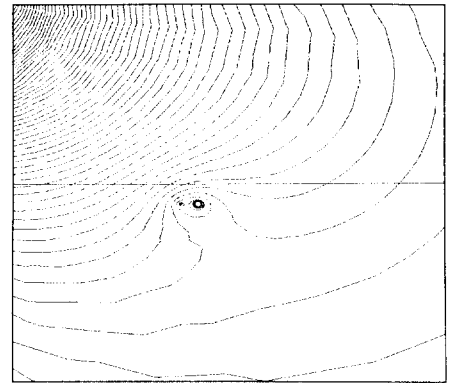
(b)

그림 5 차폐선이 없을 때의 등포텐셜도
(a) 전 해석 영역, (b) 매설배관 주변

Fig. 5 Equi-potential line for 0-mitigation wire (a) all area of the analysis model, (b) around buried pipe line



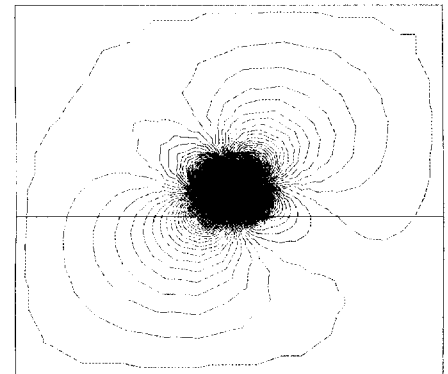
(a)



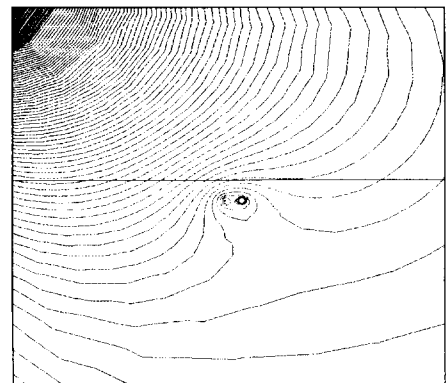
(b)

그림 6 차폐선이 1개일 때의 등포텐셜도
(a) 해석 영역의, (b) 매설배관 주변

Fig. 6 Equi-potential line for 1-mitigation wire (a) all area of the analysis model, (b) around buried pipe line



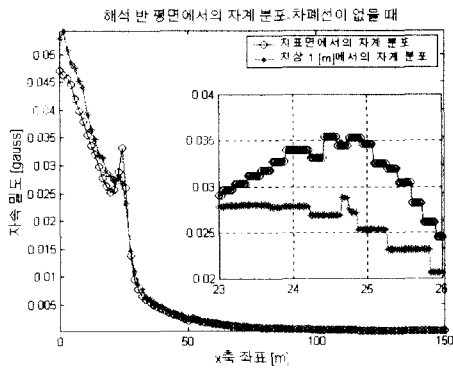
(a)



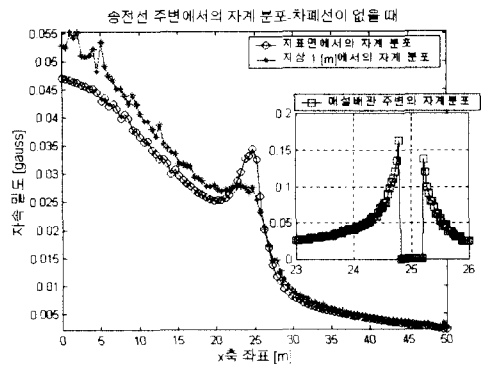
(b)

그림 7 차폐선이 3개일 때의 등포텐셜도
(a) 전 해석 영역, (b) 매설배관 주변

Fig. 7 Equi-potential line for 3-mitigation wire (a) all area of the analysis model, (b) around buried pipe line



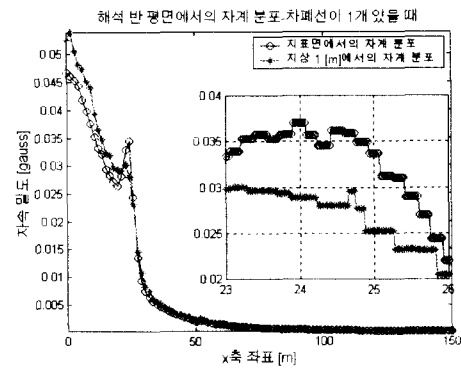
(a)



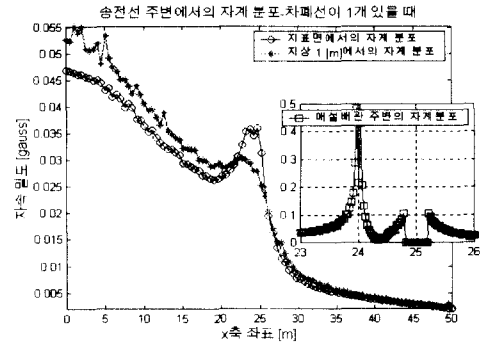
(b)

그림 8 차폐선이 없을 때의 자기 분포 (a) 해석 영역 중 우 반평면, (b) 송전선 주변

Fig. 8 Magnetic field distribution for 0-mitigation wire (a) half-area of the analysis model, (b) around the power transmission line



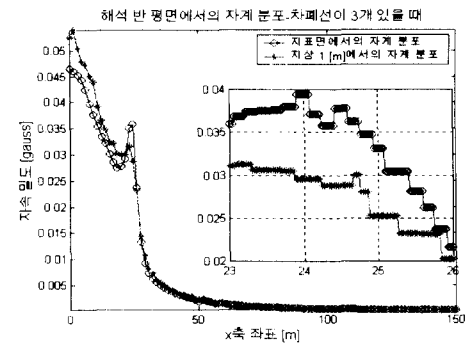
(a)



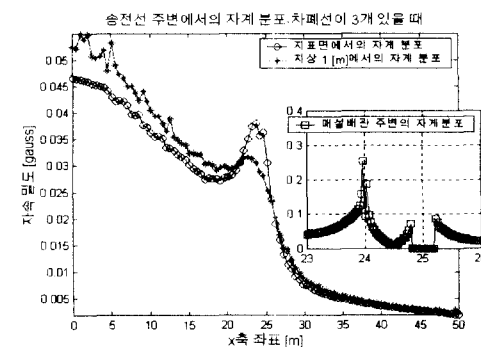
(b)

그림 9 차폐선이 1개일 때의 자기 분포 (a) 해석 영역 중 우 반평면, (b) 송전선 주변

Fig. 9 Magnetic field distribution for 1-mitigation wire (a) half-area of the analysis model, (b) around the power transmission line



(a)



(b)

그림 10 차폐선이 3개일 때의 자기 분포 (a) 해석 영역 중 우 반평면, (b) 송전선 주변

Fig. 10 Magnetic field distribution for 3-mitigation wire (a) half-area of the analysis model, (b) around the power transmission line

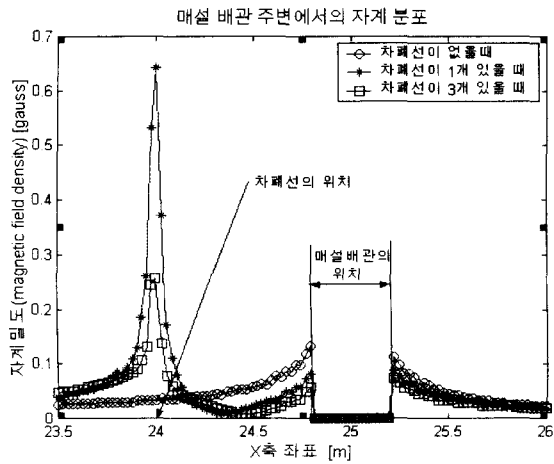


그림 11 차폐선의 유무에 따른 매설배관 주변의 자계 분포
 Fig. 11 Magnetic field distribution by number of the mitigation wire around buried pipe lime

매설 배관 존재하는 지중 영역 ($x=24.7\sim 25.3$ [m]) 에서의 좀더 자세한 자계의 분포를 그림 11에 도시하였다. 차폐선의 유무에 따른 효과는 차폐선이 존재하는 경우에 차폐선 쪽으로 큰 자계가 유기 되어 매설배관을 보호할 수 있으며, 이로 인해 배관의 금속부에서는 자계가 작아짐을 알 수 있고, 그림에서 차폐선의 개수가 1개인 경우보다 3개인 경우에 차폐선에 유도되는 자계의 크기가 작은 이유는 차폐선의 개수가 많아지면 주변에 유도되는 자계를 나누어 차폐시키므로 일정한 지하고에서의 자계 분포는 차폐선이 1개일 때가 더 큰 것처럼 보이는 것으로 사료된다.

그리고 차폐선의 유무에 따른 매설 배관부의 와전류는 배관의 금속부에서의 전류 밀도를 금속부 영역의 면적에 대해서 적분함으로써 구할 수 있다. 해석 결과 차폐선이 없는 경우와 1개, 3개일 때, 각각의 와전류는 19.58 [A], 13.85 [A], 10.57 [A]가 유도됨을 확인할 수 있었다. 그림 11의 자계 분포에서도 예측할 수 있듯이 차폐선 쪽으로 큰 자계가 유도되어 배관 쪽에는 상대적으로 작은 자계가 유도되었고, 이러한 사실로부터 많은 수의 차폐선이 도입 될 수 있다면, 충분한 차폐 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 하지만 차폐선이 없을 때와 1개의 차폐선이 있을 때에 약 30% 정도의 차폐 효과가 나타난 반면에 3개의 차폐선을 설치했을 경우에는 1개인 경우와 비교할 때 17% 정도의 개선 효과만을 관찰 할 수 있었다. 이 결과는 임의의 위치[1]에서는 차폐선의 수를 늘리더라도 경제적인 면이나 공학적인 면에서도 그다지 효율적인 개선을 보이지는 못하는 것으로 판단되며, 1개의 차폐선으로도 효과적인 배관 보호를 위한 최적화의 과정이 필요함을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 1개의 차폐선 만으로도 3개의 차폐선 이상의 효과가 나타나는 최적의 차폐선 위치를 결정하기 위해 최적화 기법중의 하나인 evolution strategy 알고리즘을 적용하였으며 3.2절에서는 적용된 알고리즘을 통하여 결정된 위치에서 차폐 효과를 분석하였다.

5.2 최적의 차폐선 위치 결정

전술한 바와 같이 최적의 차폐위치 선정에 사용된 evolution strategy 알고리즘은 확률론적인 이론에 바탕한 것으로 구현이 다소 쉽고, 초기 점의 위치에 관계없이 목적함 값에 잘 수렴하는 장점을 갖는다. 적용된 알고리즘을 이용해서 최적화된 해석 과정에서는 3.1절의 경우 중 1개의 차폐선 위치에서의 와전류를 초기 목적 함수로 하였고, 최종 목적 함수는 3개의 차폐선을 설치했을 때보다 배관부의 자계를 차폐시켜 와전류를 감소시키는 차폐선의 위치를 일정 구간 내에서 차폐선의 위치를 이동시키며 계산하였다.

그림 12는 적용된 알고리즘을 이용하여 계산하였을 때 차폐선의 이동에 따른 와전류 값의 개선 여부를 나타내고 있다. evolution strategy 알고리즘에 의해서 초기 위치의 목적 함수인 와전류에서 계산이 시작되어 일정 확률 변수에 의해서 차폐선이 이동되고 이동된 위치에서의 와전류를 계산하여 와전류를 감소시키는 방향으로 차폐선이 계속 이동되게 된다. 계산 과정에서 차폐선이 이동할 수 있는 범위는 초기의 차폐선의 위치를 중심으로 좌측으로 가로 4[m], 위쪽으로 세로 1.45 [m]의 영역 내로 하였으며, 그림 13에 도시하였다.

그림 12에서와 같이 최종적으로 21번째 반복과정에서 3개의 차폐선이 존재할 때의 와전류 값인 10.57 [A] 보다 적은 10.14 [A]만의 와전류가 유도되는 차폐선의 위치를 계산할 수 있었으며, 그 위치를 그림 13에 나타내었다. 이때 차폐선의 위치는 초기 차폐선의 위치에서 x 방향은 송전선쪽으로 1.6825 [m], y 방향은 지표면 쪽으로 1.4328 [m] 이동하여, 초기 차폐선의 위치인 (24[m], -1.5[m])에서 이동된 (22.3175[m], -0.0732[m]) 일 때가 최적의 차폐 위치이다. 이를 통해서 본 논문에서 제안된 최적화의 방법을 통해 3개의 차폐선이 존재 할 때보다 최적화 된 1개의 차폐선으로 보다 경제적이고 효과적인 차폐 대책의 수립이 가능함을 확인할 수 있다.

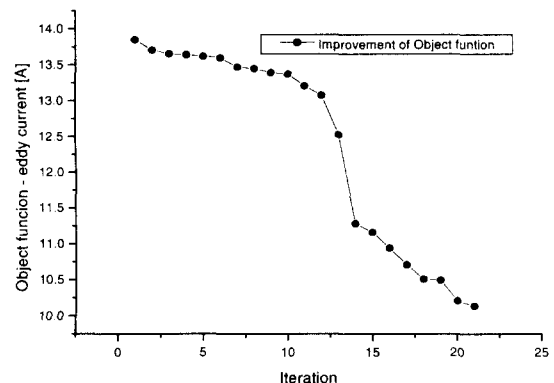


그림 12 차폐선 위치 최적화 과정에 따른 와전류 감소
 Fig. 12 Reduction of the eddy current by optimal calculation of the mitigation wire location

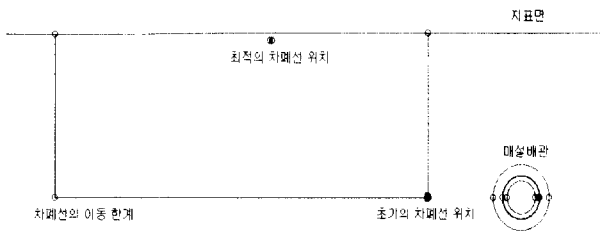


그림 13 해석 결과에 따른 최적의 차폐선 위치
 Fig. 13 Optimal shielding location of the mitigation wire by suggested results

6. 결 론

본 논문에서는 345 kV 전력용 송전선로를 모델로 하여 주변의 자계 분포와 매설된 배관에 간섭을 일으키는 유도 자계를 계산하였고 이에 의해 발생하는 와전류를 해석하였다. 배관에서의 유도 장애 수준은 와전류의 크기로 나타내었으며, 차폐 대책이 있을 때가 없을 때에 비해서 그 수준이 낮아짐을 확인할 수 있었다. 또한 evolution strategy 알고리즘을 이용하여 최적의 자계 차폐위치를 결정할 수 있었고, 이에 의해서 보다 경제적이고 효과적인 차폐 대책이 가능성이 확인되었다. 전자기적인 영향을 통한 매설 배관의 간섭 정도는 송전선과의 거리, 송전선의 위상관계, 송전 능력 등에 따라 달라지지만, 본 논문에서는 일종의 사례 해석을 통해 결과를 도출하였으며, 이 결과들로부터 어떤 임의의 형상이나 형태의 장애 예측 및 해석, 또한 최적의 차폐 대책의 설계에도 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원에 의해 수행된 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K.J. Satsios, D.P. Labridis, P.S. Dokopoulos, "Finite Element Computation of Field and Eddy Currents of a System Consisting of a Power Transmission Line Above Conductors Buried in Nonhomogeneous Earth", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No 3, July 1998
- [2] 전력연구원, "송전선로 전자계 영향연구 (1) 최종보고서", 1999
- [3] F.P. Dawalibi, R.D. Southey, "Analysis of Electrical Interference from Power Lines to Gas Pipelines Part II : Parametric Analysis", IEEE Transactions of Power Delivery, Vol. 5, No. 1, January 1990
- [4] UniLap GEO Manual, pp. 45.
- [5] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1986
- [6] S.J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, 1995
- [7] Pier Giorgio Alotto, Cela Eranda, Bernhard Bernhard Brandstatter, Gunter Furntratt, Christian Magele, Giorgio Molinari, etc., "Stochastic Algorithms in Electromagnetic Optimization", IEEE Transactions of Magnetics, Vol. 34, No. 5, September 1998
- [8] David V. Fogel, "Evolutionary Computation, 2nd edition Toward a New Philosophy of Machine Intelligence" IEEE Press, 2000
- [9] 조성배, 이은웅, "초고압 송전선로의 자계 크기 해석과 실측 비교", 전기학회 논문지, Vol 48A, No 7, 1999

저 자 소 개



최 세 용(崔世鎔)

1974년 10월 9일 생. 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기전자 컴퓨터 공학부 졸업(공학석사) 현재 동 대학원 전기전자 컴퓨터 공학부 박사과정

Tel : 031-290-7172, Fax : 031-290-7177
E-mail : conny1@nature.skku.ac.kr



나 완 수(羅浣洙)

1962년 6월 14일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1991년~1993년 미국 Superconducting Super Collider lab. Guest Collaborator, 1991년~1995년

한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원, 1995년~현재 성균관대학교 전기전자 컴퓨터 공학부 부교수
Tel : 031-290-7136, Fax : 031-290-7179
E-mail : wsnah@yurim.skku.ac.kr



김 동 훈(金東勳)

1968년 2월 26일생. 1992년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1998년~2001년 LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 선임연구원, 2001년~현재 성균관대학교 전기전자 컴퓨터 공학부 연구교수

Tel : 031-290-7136, Fax : 031-290-7177
E-mail : dh29kim@dreamwiz.com



김 동 수(金東洙)

1964년 7월 29일생, 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2000년~현재 성균관대학교 전기전자 컴퓨터 공학부 박사 후 연구원

Tel : 031-290-7172, Fax : 031-290-7177
E-mail : dongskim@yurim.skku.ac.kr



이 준 호(李俊鎬)

1967년 9월 13일생. 1992년 단국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2000년~현재 성균관대학교 전기전자 컴퓨터 공학부 박사 후 연구원

Tel : 031-290-7948, Fax : 031-290-7177
E-mail : jhlee@nature.skku.ac.kr



박 일 한(朴日韓)

1960년 5월 7일 생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1990. 8~1991. 12 서울대 공학연구소 연구원, 1991. 7~1992. 8 프랑스 Grenoble 공대(INPG, ENSIEG) Post-doc., 1992. 10~1993. 8 기초전력공학공동연구소 선임연구원, 1993. 9~1998. 2 숭실대 전기공학과 조/부교수, 1998~현재 성균관대 전기전자 컴퓨터 공학부 부교수

Tel : 031-290-7146, Fax : 031-290-7179
E-mail : ihpark@yurim.skku.ac.kr



신 명 철(申明澈)

1947년 4월 3일생. 1970년 성균관대 전기공학과 졸업. 1973년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학부 교수

Tel : 031-290-7103,
Fax : 031-290-7179
E-mail : mcshin@yurim.skku.ac.kr



김 병 성(金炳成)

1965년 9월 26일생, 1989년 서울대 공대 전자공학과 졸업, 1991년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 1997년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사), 1997년~현재 성균관대학교 전기전자 컴퓨터 공학부 조교수

Tel : 031-290-7143
E-mail : bskim@ece.skku.ac.kr