creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학전문석사 학위논문

자기장 차폐를 고려한 지중케이블의 구조 설계 방안에 관한 연구

A Study on the Structural Design Method of Underground Cable Considering Magnetic Field Shielding

2019년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

전 명 훈

자기장 차폐를 고려한 지중케이블의 구조 설계 방안에 관한 연구

지도교수 박 종 래

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
2019년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
전 명 훈

전명훈의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함
2019년 2월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록(16pt)

전력 수요의 증가와 환경적 문제로 인해 국내외 대도시 지역에서 초고압 지중 송전 선로가 계속적인 증가 추세를 보인다. 지중 송전케이블에서 발생하는 전자파는 전기장과 자기장으로 나눌 수 있다. 전기장은 대부분 케이블 자체 구조에서 차폐되어 외부에 끼치는 영향이 거의 없다. 그러나 자기장의 경우, 구조상 완벽한 차폐가 되어 있지 않으며, 케이블의 배열 및 지상과의 이격 등 또는 외부에 차폐판 설치 등을 통해 완화하고 있다. 자기장이 인체에 미치는 영향에 대해서는 1979년 미국 월트하이머의 논문과 1991년 스웨덴 피팅의 논문이 자계와 소아백혈병의 관련성을 시사함으로부터 주목 받고 있다. 이후 주요 국제기관에서의 조사와 연구가 진행되어 왔으며, 가이드라인 등이 제시되었으나 아직까지도 자계와 건강과의 관련성에 관하여 명백한 증명을 하지 못하고 있다. 국내에서도 이와 관련한 민원이 발생하고 있으나 구체적인 연구 자료가 부족하여 자계에 대한 명확한 기준을 제시하지 못하고 있는 실정이다. 유럽 등 선진국의 경우, 자기장에 대한 규제를 점점 더 강화하고 있는 형국이다. 국내의 경우 국제 비전리 복사방호위원회(ICNIRP) 기준을 적용하여 833mG의 기준을 삼고 있으나, 이 역시 최근 환경 및 안전에 대한 관심이 올라가면서 기준을 재정립해야 한다는 목소리가 나오고 있다. 이에 국내 기준 역시, 수 년 내 선진국의 그것에 준한 값으로 조정될 것으로 예상된다.

이태리 등 유럽에서는 이미 지중케이블의 자기장 차폐에 대한 기준이 제시되었거나 요구되고 있고 자기장 차폐를 위한 몇 가지 방법을 시행되고 있다. 그러나 현재까지의 방법은 제한된 공간에서의 설치 및 시공의 어려움 등의 문제를 안고 있다.

본 논문에서는 FEM 시뮬레이션을 통해 케이블 내부 구조 변경으로 자기장 차폐 가능성을 확인하였고, 최적의 구조안을 도출하였다.

주요어 : 지중케이블, 자기장 차폐, FEM 시뮬레이션, 투자율,
유도 전류

학 번 : 2017-25571

목 차

제 1 장 서론 ····· 1
제 1 절 연구 배경 ····· 1
제 2 절 연구 목적 및 필요성 ····· 4

제 2 장 이론적 배경 ····· 8
제 1 절 지중 선로의 자계 차폐 ····· 8
1. 자계 차폐 ····· 8
2. 자계 차폐 원리 및 기법 ····· 9
제 2 절 자기차폐해석 특성 방정식 ····· 15
1. 교류 정상상태 자계 해석 특성방정식 ····· 15
2. 과도상태 자계 해석 특성방정식 ····· 17

제 3 장 자계 해석 시뮬레이션 ····· 18
제 1 절 자기장 시뮬레이션 및 계산 방법 ····· 18
제 2 절 모델링 ····· 21
제 3 절 해석 및 결과 ····· 24

제 4 장 결론 및 시사점 ····· 38

참고문헌 ····· 40
Abstract ····· 41

표 목 차

[표 1-1] 국내 및 해외 자기장 규제 기준 ····· 5
[표 1-2] 국내 전기설비기술기준 17조 ····· 6
[표 3-1] Distant Field Equations for Different Line Configurations ····· 21
[표 3-2] 해석 조건 ····· 23
[표 3-3] 가혹한 해석 조건 (기준) ····· 25
[표 3-4] Case 02 해석 조건 ····· 28
[표 3-5] Case 03 해석 조건 ····· 28
[표 3-6] Case 04 해석 조건 ····· 28
[표 3-7] Case 05 해석 조건 ····· 28
[표 3-8] Case 06 해석 조건 ····· 28
[표 3-9] Case 07 해석 조건 ····· 28
[표 3-10] Case 08 해석 조건 ····· 28

그 림 목 차

[그림 2-1] 차폐율의 정의 ····· 9
[그림 2-2] 외부 field 를 자성체에 가한 후 제거하였을 때의 H, B field ····· 10
[그림 2-3] field 속에서 자성체 주위의 field ····· 11
[그림 2-4] 외부 자계 방향에 따른 permalloy 의 차폐 특성 ··· 12
[그림 2-5] 균일 자계 속에서의 원통형 차폐재의 shunt effect 12
[그림 2-6] 외부 자계 방향에 따른 구리 판재의 차폐 특성 ···· 13

[그림 2-7] 균일 교번 자계 속에서의 원통형 차폐재의Eddy current effect ····· 14
[그림 3-1] 케이블 구조 ····· 22
[그림 3-2] 평형 3상 회로의 모델링 ····· 23
[그림 3-3] 메쉬 설정 ····· 24
[그림 3-4] 자계 분포 ····· 25
[그림 3-5] 지표면에서의 자계 (매설깊이 0.4m) ····· 26
[그림 3-6] 지표면에서 0.2m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m) 26
[그림 3-7] 지표면에서 0.4m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m) 26
[그림 3-8] 지표면에서 0.6m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m) 27
[그림 3-9] 지표면에서 0.8m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m) 27
[그림 3-10] 지표면에서 1.0m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m) 27
[그림 3-11] 매설깊이 0.4m일 때, 지표면으로부터 0 ~ 1m 위치별 자계 ····· 28
[그림 3-12] 지표면에서 0.8m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.8m) 29
[그림 3-13] 매설깊이 0.8m일 때, 지표면으로부터 0 ~ 1m 위치별 자계 ····· 29
[그림 3-14] 매설깊이 0.4m, 투자율 100일 때, 지표면에서의 자계 30
[그림 3-15] 매설깊이 0.4m, 투자율 100일 때, 해석 위치별 자계

30
[그림 3-16] 매설깊이 0.4m, 투자율 10,000일 때, 지표면에서의 자계
31
[그림 3-17] 매설깊이 0.4m, 투자율 10,000일 때, 해석 위치별 자계
32
[그림 3-18] 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,000A, 지표면에서의 자계
33
[그림 3-19] 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,000A, 해석 위치별 자계
33
[그림 3-20] 투자율 10,000일 때, 유도전류 2,000A, 지표면에서의 자계
34
[그림 3-21] 투자율 10,000일 때, 유도전류 2,000A, 해석 위치별 자계
34
[그림 3-22] 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,400A, 지표면에서의 자계
35
[그림 3-23] 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,400A, 해석 위치별 자계
35
[그림 3-24] 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,999A, 지표면에서의 자계
36
[그림 3-25] 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,999A, 해석 위치별 자계
37

제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경

1972년 소련이 cigre에 제출한 논문에서는 전자계가 인체의 건강에 영향을 미칠지 모른다는 의견이 제시되었다. 변전소의 작업자에게서 피로감과 두통이 보인다고 말한 것이었다. 1979년 Wertheimer와 Leeper는 전력선 인근에 거주하는 어린이의 백혈병 발병 위험성이 높다는 역학연구 결과를 발표함으로써 자계에 대한 논란이 시작되었다. 이후 많은 연구가 수행되었으나 자계가 인체에 영향을 줄 수 있다는 확실한 근거를 찾지 못하고 아직까지 자계의 인체 영향에 대한 논란은 전 세계적으로 지속되고 있다.

미국의 경우 1994년부터 5년간 전자계의 생체 영향 규명 및 대중 정보 전달을 목적으로 EMF RAPID(Electric and Magnetic Field Research and Public Information Dissemination) 프로그램을 수행한 바 있다. 이 프로그램은 DOE(Department of Energy)와 NIEHS(National Institute for Environmental Health Science)가 주관하였는데, 전자는 주로 공학적인 측면, 후자는 주로 생체학적인 측면에서 관장하였다. 1998년에 NIEHS 워킹 그룹의 보고서가 일반인에게 공개되었는데 인체에 대한 영향은 미약하다는 결론을 내렸다. 그러나 그 과정에서 NIEHS 워킹 그룹은 투표를 통해 전자계를 발암 가능 2B 물질로 결정한 바가 있지만 미국의 최대 과학자 집단인 NAS(National Academy of Sciences)는 더 이상의 연구가 필요 없다고 할 정도로 미국 내에서도 전자계 생체 영향에 대한 견해가 엇갈리고 있다.

이와 같이 전자계에 대한 엇갈리는 견해는 국가 간에도 동일한 상황이 발생되고 있다. 즉 각 국가의 전자계에 대한 정책 결정 역시 엇갈리고 있는데 엄격한 법령을 제정하거나 가능한 회피한다는 원칙과 과학적인

증거가 없으므로 기준치 제정 불가라는 원칙 두 가지가 공존한다. 여기에는 그 나라의 경제적 수준에 따라 다르며 공업국인 경우 전력을 많이 사용하므로 엄격한 기준치가 제정되면 전체 산업에 미치는 파장이 매우 크기 때문에 기준치 제정에 반대하는 경향이 크지만 관광 위주의 국가들은 가능하면 회피한다는 경향이 크다.

한편, 국내 전력 계통은 산업의 발달 및 국민 생활의 질적 향상에 따른 부하 증가에 대처하기 위하여 전원 확충의 필요성이 증가하고 있다. 하지만, 가공 송전 시스템은 환경적인 문제 및 민원 야기로 인하여 경과지 확보가 어려운 반면, 도시화가 증가하고 있는 추세에 따라서 선로 건설에 상당한 어려움이 따르고 있다. 따라서, 건설비가 많이 소요되는 단점을 가지고 있음에도 불구하고 상기의 문제점을 해결하기 위하여 송전선의 지중화율이 증가하고 있다.

최근 국내에서는 전력설비에서 발생하는 전자계에 대한 주변 인식이 높아지고 있는 실정이다. 전자계는 0~300Hz 대역의 주파수를 사용하는 극저주파 중 송전선로, 변압기와 같은 전력설비 뿐만 아니라 우리가 흔히 사용하는 TV, 냉장고, 세탁기, 전자레인지 등 60Hz 전기를 사용하는 모든 가전제품에서 발생하는 전자파를 말한다. 주파수가 높을 경우에는 전계는 자계를 발생하고, 자계는 전계를 발생하는 상호작용으로 조합하여 공간을 전파해 나가는 특징을 가지게 되는데 전자계는 인체 내부에 자연 발생하는 전류보다 매우 약한 전류를 신체에 흐르게 할 수는 있으나 그 파장이 5,000km로 매우 길기 때문에 전계와 자계가 분리되어 먼 공간을 전파해 나가지 못하고, 발생원으로부터 제곱에 반비례하여 급격하게 감소하는 특징이 있어 전리효과나 열전효과가 없다. 지중송전선로의 경우 흙 또는 시멘트 등의 재료가 매립되어 전계는 대부분 차폐된다. 자계의 경우 인체 내부에 유기기전력을 발생시키기 때문에 대부분의 국가에서는 전력설비에서 발생되는 자계 인체 노출기준치를 설정하고 있으며, 친환경 설계를 통해 송전선로 건설 및 운영 시 이 기준치를 초과하지 않도록 규제하고 있다. 이로 인해, 기설 전력시스템(발전, 변전, 송전)은 이설 또는 지중화 등과 같은 요구를 받는 경우도 있고, 특히나 신설

전력시스템의 경우는 건설이 매우 어려운 실정이다. 앞으로 전력구나 관로를 통한 송배전 설비들의 지중화율이 높아질 것으로 예상된다. 그러나 지중화를 한다고 해서 문제가 해결되는 것은 아니다. 지중 송전선로에서 대전류로 인한 높은 자계가 발생할 수 있으며, 지중선로 순시자들도 높은 자계에 노출될 수 있으므로 지중설비에 대한 자계 저감 대책이 요구된다. 우리나라는 국민적 관심과 환경부 및 환경 단체의 활동을 고려할 때 현명한 회피 원칙이 도입될 가능성이 크며 이를 대비한 사전 준비가 필요하다.

본 논문에서는 지중케이블 매립 깊이에 따른 지상에서의 자기장을 계산하고 케이블 구조 변경을 통한 자기장 감소 정도를 확인하여 최적의 구조를 도출하고자 하였으며, 이를 위해 COMSOL MULTIPHYSICS 5.0을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

제 2 절 연구 목적 및 필요성

전력설비로부터 발생하는 50 ~ 60Hz 극저주파 자계의 유해성 논란은 지금까지도 지속되고 있으나 기준이 점점 엄격해 지고 있다. 전문가뿐만 아니라 텔레비전, 신문 등의 매스컴에서도 관심을 모으게 되었으며, WHO(세계보건기구)와 같은 주요 국제기관 등에서 종합적인 조사·평가가 행해지고 가이드라인 등도 발표되었다. 이러한 평가 결과를 보면 전자계가 건강에 미치는 영향을 인정하는 것은 아니지만 전자계와 건강과의 관련성에 관하여 완전히 명백해졌다고도 할 수 없기 때문에 과학적인 데이터의 축적이 불가결하고, 이후에도 계속적인 연구를 추진할 필요성을 역술하고 있다. 자기장으로부터 보호하기 위해 많은 국가에서 자계강도에 대한 엄격한 국가 표준을 제안하였다. 2002년 환경포럼 84호 “전자파의 건강위해성과 외국의 관리동향”에 따르면 국내 및 해외 자기장 규제에 대한 기준이 소개되어 있다. 현재 미국, 영국, 스위스, 스웨덴, 독일, 캐나다, 러시아, 체코, 폴란드 등의 여러 국가가 전자파에 대한 안전기준을 마련하고 있으며 미국을 비롯한 여러 나라들은 인체보호에 대한 지침에서 전자파 노출을 열적 장해라고 명확히 규정할 수 있는 현상을 해석하여 한계치를 안전기준으로 하고 있다. 한편 스웨덴, 스위스, 독일, 이탈리아 등은 열적 장해 뿐 아니라 극저주파에 의하여 발생하는 생물학적 영향인 비열적 작용의 가능성을 고려한 기준을 설정하였거나, 고려하고 있다. 미국 국립방사선 방호학회는 향후 10년 동안 학교 및 주택지 인근에 자기장 노출을 단계별로 감소시켜, 자기장이 2mG를 넘지 않도록 하는 것을 권고하였다. 특히 신규 보육원, 초등학교 등의 환경민감시설은 자기장이 2mG를 넘는 장소에 신축되어져서는 안되며, 새로운 주택은 고압선로 아래에 신축할 수 없고, 고압선로 인근일 경우에는 자기장이 2mG 이하이어야 한다는 방사선 방호기준치를 마련하는 계획서를 1995년에 발표하기도 하였다. 스웨덴 전력회사는 1990년 이래 에너지 관련 시설과 새로운 건축물 신축시에 최소한의 이격거리를 설정하였으며, 밀집지역에서는 30~50m의 이격거리를 유지하도록 하고, 도시지역에서는

7m의 이격거리를 설정하였다. 스위스는 50Hz의 220 ~ 380kV의 고압선 및 전력시설에서는 최대 자계 유효치를 1,000mG 이하로 제한하였으며 유치원, 초등학교, 병동, 침실 등은 시설한계치가 10mG 이하로 규정하였다. 최근에는 이탈리아를 비롯하여 유럽 여러 국가에서 특히 고압선로에서 발생되는 극저주파 자기장에 대하여 더욱 더 엄격한 노출 기준치를 제정하려는 움직임을 보이고 있다. 국내의 경우 국제 비전리 복사방호위원회(ICNIRP) 기준인 833mG를 따르고 있으며, 국내 전기설비기술기준 제 17조에 유도장해 방지 관련해서 표 2와 같이 기술되어 있으나, 점차 선진국 수준으로 자기장 규제 기준이 엄격해질 것으로 예상된다.

표 1-1 국내 및 해외 자기장 규제 기준

국가명	주요규제 내용
한국	833 mG
스웨덴	2 mG
미국국립방사선 방호학회	2 mG
네덜란드	4 mG
스위스	10 mG
이스라엘	10 mG
이탈리아	30 mG

표 1-2 국내 전기설비기술기준 17조 (유도장해 방지)

1항	특고압 가공전선로에서 발생하는 극저주파 전자계는 지표상 1M에서 전계가 3.5kV/m 이하, 자계가 833mG 이하가 되도록 시설하는 등 상시 정전유도(靜電誘導) 및 전자유도(電磁誘導) 작용에 의하여 사람에게 위험을 줄 우려가 없도록 시설하여야 한다. 다만, 논밭, 산림 그 밖에 사람의 왕래가 적은 곳에서 사람에 위험을 줄 우려가 없도록 시설하는 경우에는 그러하지 아니한다.
2항	특고압의 가공전선로는 전자유도작용이 약전류전선로(전력보안 통신설비는 제외한다)를 통하여 사람에 위험을 줄 우려가 없도록 시설하여야 한다.
3항	전력보안 통신설비는 가공전선로로부터의 정전유도작용 또는 전자유도작용에 의하여 사람에 위험을 줄 우려가 없도록 시설하여야 한다.

자기장 측정 및 평가방법 연구, 생물학적 영향연구, 직업인 노출에 대한 기준연구, 저감기술연구 등 다양한 분야에서 선진국을 중심으로 높은 자계를 저감시키기 위한 노력들이 진행되고 있는데, 케이블에서 발생하는 자계를 저감시키는 방법으로는 리액턴스를 최소화하는 도체의 배치, 루프를 활용한 자계 상쇄, 자성재료 또는 금속판을 활용한 자계차폐 등이 있다. 일반적으로 송배전선로의 자계 저감을 위해서는 수동루프, 능동루프를 설치하거나 상 분리를 하는 등 자계를 서로 상쇄시키는 기법을 주로 사용하고 있다. 이중에서 자성체를 이용한 자기차폐(magnetic shielding)기법은 주로 전기절연이 확보된 전력기기나 지중케이블 등에 있어서 국부적인 자계 저감에 효과적인 방법이다. 이를 위해서 사전에 지중송배전선로의 형태에 따른 자계 노출량을 해석하여 추후 민감한 지역에 설계되는 설비에 최적 차폐재를 적용하는 방법을 취할 수 있다. 그

러나 이 역시 지중선로가 설치되는 공간이 매우 제한적이라는 점에서 커다란 단점을 갖고 있다.

따라서 본 논문에서는 지중케이블 매립 깊이에 따른 지상에서의 자기장을 계산하여 국제 기준에 얼마나 부합한지를 확인하고 케이블 내부 구조 변경을 통한 자기장 감소 정도를 확인하여 최적의 구조를 도출하였다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 지중 선로의 자계 차폐

자계 저감 기술은 신규 송배전 선로 주변의 환경영향 검토 시 꼭 필요한 기술로서 기준치 이상의 전자계 발생이 예상되는 구간에 대하여 여러 가지 대안의 장・단점을 비교 분석하여 적용해야한다.

2.1.1 자계차폐

자기차폐란 공간의 특정한 부분을 도체 혹은 강자성체로 둘러싸서 내부가 외부 자계로부터 영향을 받지 않도록 하거나 반대로 내부에서 발생한 자계가 외부에 미치지 않도록 하는 것을 말한다. 자기차폐의 정량화를 위해 일반적으로 사용되고 있는 parameter는 차폐율(Shielding Factor), 저감율(Field Reduction), 감쇠율(Attenuation) 등이 있다.

차폐율(Shield Factor)는 차폐재를 적용하였을 때의 자계 크기와 적용하지 않았을 때의 자계 크기의 비율로 정의된다. 이때 자계의 부호는 의미가 없으므로 크기의 비율만으로도 충분하다. 차폐재 적용전의 자계방향을 기준으로 적용후의 자계 방향이 반대방향일 수가 있고 이때 음의 부호로 결과값이 나오게 되는데, 자계의 영향을 고려할 때 방향은 그다지 중요하지 않기 때문이다. 그림 2.1.1과 같이 점 p에서 원통형 차폐재를 적용하기 전의 자계크기를 원통형 차폐재를 적용하기 전의 자계 크기를 Bb, 적용 후의 자계 크기를 Ba라고 하면, 차폐율은 식(2.1)로 정의된다.

$$SF = \frac{B_a}{B_b} \quad (2.1)$$

따라서 차폐율이 0.1 이면 차폐재를 적용하기 전의 자계값에 비해 적용후에 1/10 크기가 된다는 뜻이다.

저감율(Field Reduction)은 차폐재를 적용한 후의 저감된 자계 크기 차와 적용하기 전의 자계 크기의 비율로 정의한다. 즉,

$$FR = \frac{B_b - B_a}{B_b} \quad (2.2)$$

차폐율이 차폐재 적용 후의 값에 기준을 둔 반면, 저감율은 차폐재 적용 전에 비해 얼마만큼 저감되는지를 쉽게 알려주는 척도가 된다.

감쇠율(Attenuation)은 dB 단위로 차폐율을 상용로그로 취한 후 20 을 곱해 준 값이다. 차폐율이 1/10 일 때 감쇠율은 20dB 이며, 40dB 이면 차폐율이 1/100 혹은 저감율이 -99%가 된다.

$$A = -20 \log_{10} SF \ (dB) \quad (2.3)$$

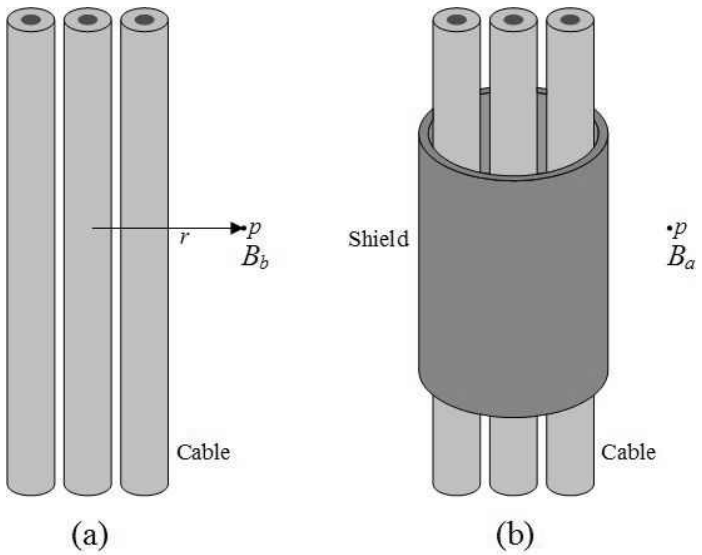


그림 2-1 차폐율의 정의

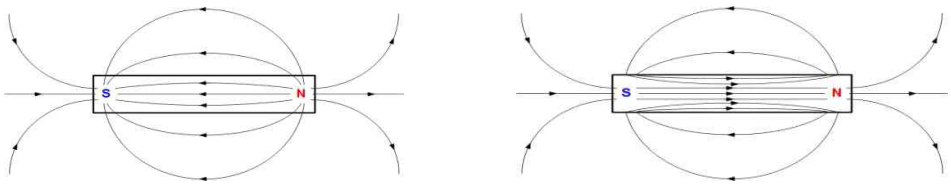
2.1.2 자계차폐 원리 및 기법

자기장의 차폐원리는 크게 회피(shunt) 효과와 와전류(eddy current)효과 두 가지로 구분된다. 회피 효과는 투자율이 높은 자성체가 있을 때 주위의 자속(magnetic flux)이 자성체로 몰림으로써 그 주위의 자속밀도가 작아지는 원리이며, 와전류 효과는 자성체 내의 와전류로 인해 생기는 2차 자속이 원래의 자속을 상쇄시켜 차폐되는 원리로서 교번 자속일 경우에 생긴다. 금속성 자성 재료를 교류 자기장의 차폐재로 사용할 경우에는 회피 효과와 와전류 효과가 동시에 나타나게 되며, 높은 투자율

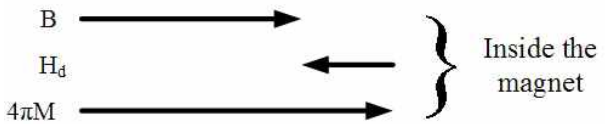
로 인해 큰 와전류가 생겨 차폐 효과도 커진다. 고주파 영역의 전자파와 달리 극저주파 영역의 자계는 재료의 전도도에 별 영향을 받지 않기 때문에 이 경우 투자율이 매우 높은 강자성 재료를 이용하여 자계를 차폐하는 것이 효과적이다.

(1) 회피효과(shunt effect)

어떤 자성체에 균일한 자계 강도(magnetic field strength) H를 가했다가 제거하였을 때 자성체는 자화(magnetization)된다. 이는 원자의 최외곽고립 전자의 자전(spin)으로부터 기인되는 자기 쌍극자(magnetic dipole)가 특정 부피 단위로(magnetic domain 이라고 함) 무질서하게 배열되어 있다가 H에 의해 일정한 방향으로 정렬되고 H를 완전히 제거한 후에도 정렬 상태가 남아 있기 때문이다. 이를 도식화한 것이 그림 2.1.2 이다. 그림 2.1.2(a)는 외부 자계 강도 H_0=4pM 을 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 가하고 제거하였을 때의 H field 를 보인 것이고 그림 2.1.2(b)는 B field 를 보인 것이다. 자성체의 오른쪽은 N 극, 왼쪽은 S 극이 되어 이로부터 자성체 내부에 H_d 가 생기게 된다. 따라서 자성체 외부에서는 B = H (투자율이 1 이므로)가 되고 자성체 내부에서는 그림 2.1.2(c)와 같이 B=4pM-H_d 가 되어 그림 2.1.2(b)와 같은 최종 자속 분포를 보인다.



(a) H field (b) B field

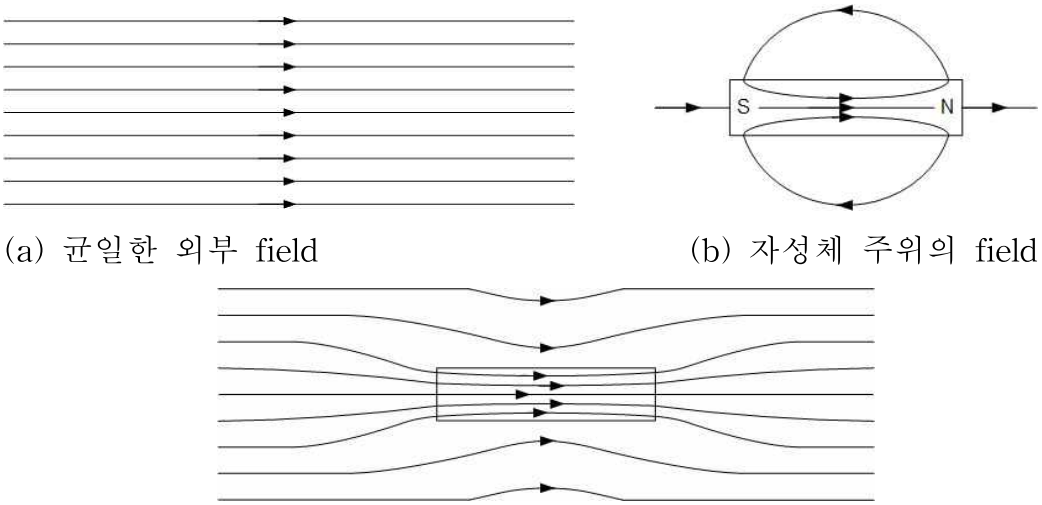


(c)

그림 2-2 외부 field 를 자성체에 가한 후 제거하였을 때의 H, B field

이러한 자성체가 외부 자계 B 속에 있을 때의 상황을 보인 것이 그림 2-3 이다. 즉, 균일한 외부 자계 그림 2-3(a)와 자성체 자체 주위의

자계 (b)를 벡터적으로 합성하면 그림 2-3(c)가 된다.

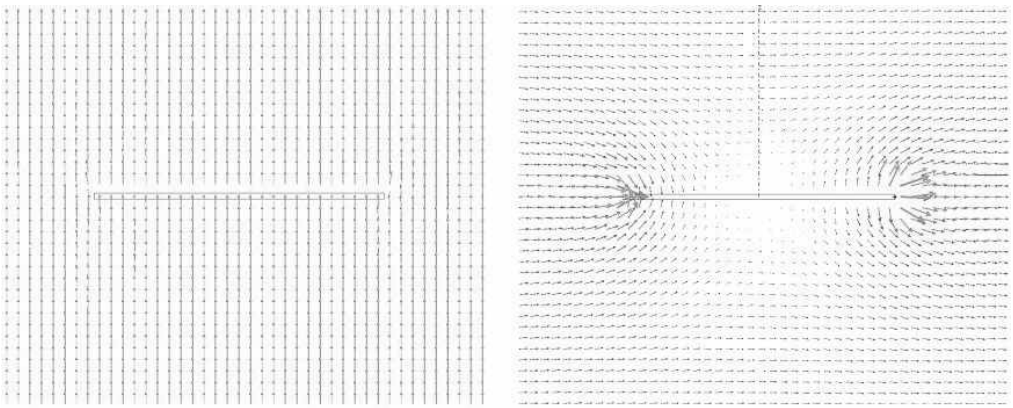


(a) 균일한 외부 field (b) 자성체 주위의 field

(c) 합성 field

그림 2-3 field 속에서 자성체 주위의 field

이러한 물리학적 고찰은 shunt(회피) 효과로써 좀더 이해하기 쉽게 설명할 수 있다. 즉, 투자율이 큰 자성체가 있을 때 주위의 flux 가 자성체로 몰림으로써 그 주위가 희박하게 되어 차폐되는 원리이다. 투자율의 의미가 진공 속의 자속밀도에 비해 자성체 내부의 자속밀도가 몇 배 되는지를 알려주므로 자성체 내부의 자속밀도가 증가하기 위해서는 외부의 자속을 끌어와야 하기 때문이다. 따라서 Shunt 효과는 자계의 방향과 자성체의 방향이 일치할 때 그 효과가 극대화된다. 그림 2-4(a)는 자성체 판재(투자율 10,000 인 permalloy, 두께 10 mm)가 균일한 자계 방향과 수직한 경우를 나타낸 것으로 자성체 근처의 자계 왜곡이 없고 차폐 효과는 거의 없음을 알 수 있다. 반면에 그림 2-4(b)는 자계 방향과 평행한 경우로써 자성체 판재의 중심부는 자계 크기가 작아졌음을 알 수 있다.



(a) 외부자계와 수직할 때 (b) 외부자계와 수평일 때

그림 2-4 외부 자계 방향에 따른 permalloy 의 차폐 특성
(두께 10 mm, 투자율 10,000)

그림 2-5 는 무한 원통 차폐재 근처에서의 shunt 효과를 보인 것이다. 자성체 내에서 자속은 길이 방향으로 궤적을 그리고 있다. Shunt 효과는 시간에 따라 자속이 변화하든 그렇지 않든 모두 적용되는 차폐 원리이다. 따라서 직류 자계를 차폐하고자 할 경우에는 반드시 투자율이 높은 재료를 사용하여야 하며, 구리와 같이 전기 전도도가 큰 재료이더라도 투자율이 진공과 같이 1 이면 차폐 효과는 기대할 수 없다.

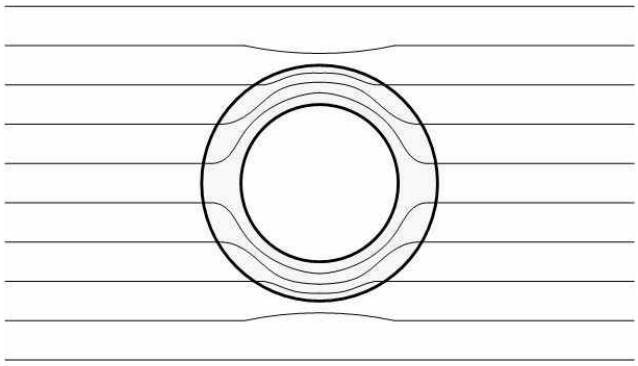
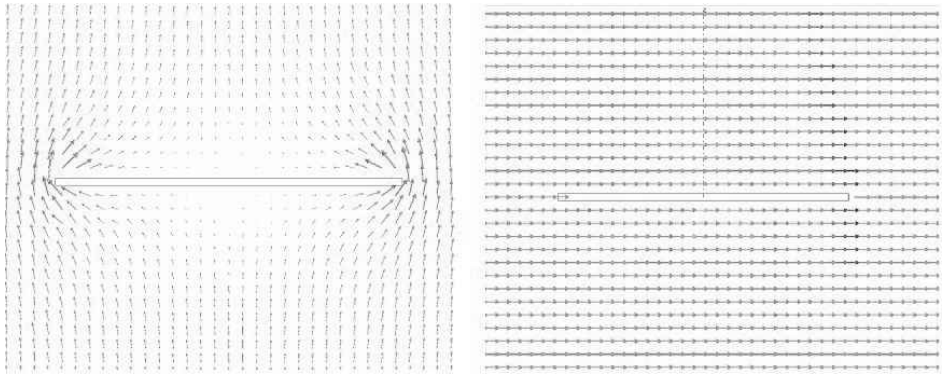


그림 2-5 균일 자계 속에서의 원통형 차폐재의 shunt effect

(2) 와전류효과(Eddy current effect)

교류 자속일 때 자성체에 발생하는 Eddy current 에 의해 생기는 2차 자속이 원래의 자속을 상쇄시켜 차폐되는 원리이다. 따라서 시간에 따라

변화하지 않는 직류 자계에 의해서는 유도 전류가 발생하지 않기 때문에 이러한 원리가 나타나지 않는다. 그림 2-6는 두께 10mm, 투자율이 1인 구리 판재의 외부 자계 방향과 차폐 특성을 보인 것이다. 그림 2-6(a)는 판재가 자계 방향과 수직한 경우로써 중심부의 자계가 매우 작아졌음을 알 수 있으나, 그림 2-6(b)와 같이 평행한 경우에는 차폐 효과가 거의 없음을 알 수 있다.



(a) 외부자계와 수직할 때 (b) 외부자계와 수평일 때

그림 2-6 외부 자계 방향에 따른 구리 판재의 차폐 특성
(두께 10 mm, 투자율 1)

Eddy current 효과는 교번 자계에 의해 유도되는 전류의 크기가 클수록 그 효과가 크며, 도체의 conductivity 가 클수록 효과가 큼을 알 수 있다. 이때 코일이 균일한 자계 B 와 수직할 때 자속이 가장 큼을 알 수 있고 이에 따라 유도전류가 크게 얻어진다.

이러한 관점에서 볼 때, 판재는 아주 얇은 코일의 무수한 집합으로 생각할 수 있으므로 그림 2-6(a)와 같이 외부 자계의 방향과 차폐재가 수직할 때 차폐 효과가 크게 나타나고, 그림 2-6(b)처럼 평행할 경우에는 차폐 효과가 거의 없게 된다.

그림 2-7은 무한 금속 원통 주위에 교번 자계가 있을 때 Eddy current 효과에 의한 자계의 왜곡 현상을 보인 것이다. 원통의 양 측면에서 자속밀도가 작아졌음을 알 수 있는데, 앞서와 마찬가지의 이유로 양 측면이 외부 자계와 수직한 부분이 넓기 때문이다. 이에 비해 위, 아래쪽

은 자속밀도가 저감되지 않거나 오히려 증가하였음을 알 수 있다.

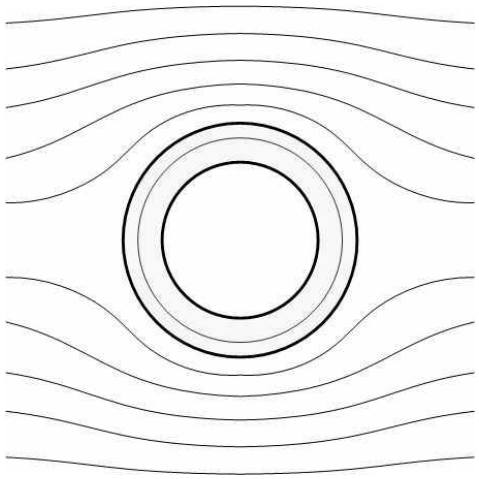


그림 2-7 균일 교번 자계 속에서의 원통형 차폐재의 Eddy current effect

제 2 절 자계해석 특성 방정식

2.2.1 교류 정상상태 자계 해석 특성방정식

전자장 및 유도전류의 분포는 맥스웰방정식과 경계조건을 이용하여 계산할 수 있다. 여기에서는 전자기 시스템의 기본 해석 이론을 전개하고 복소수를 이용한 정상상태해석 알고리즘을 유도한다. 모든 거시적인 전자기적 현상은 맥스웰방정식을 이용하여 표현 할 수 있다. 전원의 주파수가 상용주파수인 경우에 변위전류(Displacement currents)는 전도전류(Conduction currents)에 비하여 무시할 있으며 이러한 시스템을 준정적 시스템(Quasi-Static System)이라 하며 준정적시스템에서 맥스웰방정식을 기술하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (2.4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J_t} \qquad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \qquad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \qquad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{J_t} = 0 \qquad (2.8)$$

여기서,

$\vec{E}$: 전계의 세기 [V/m]

$\vec{H}$: 자계의 세기 [A/m]

$\vec{D}$: 전속밀도 [C/m^2]

$\vec{B}$: 자속밀도 {T}

$\vec{J_t}$: 총전류밀도 [A/m^2]

ρ_f : 체적전하밀도 [C/m^3]

식 (2.4)은 페러데이의 법칙, 식 (2.5)는 암페어의 법칙, 식 (2.6)은 가우스의 법칙 그리고 식 (2.7)는 자속의 연속성을 나타낸다. 위의 식들은

전자기 시스템에서의 네 가지 기본 방정식이며 이들은 재질의 비균질, 비선형 그리고 이방성의 성질을 가진 모든 물질에 대해서도 적용이 가능하다. 여기서 총전류밀도는 전류원에 의한 전류밀도와 도체 내의 자유전자가 전계와 관련되어 발생되는 전류로 구분되며 다음과 같다.

$$\overrightarrow{J_t} = \overrightarrow{J_s} + \overrightarrow{J_e} \qquad (2.9)$$

전계의 세기와 전속밀도, 자속밀도와 자계의 세기 그리고 전계에 의한 전류밀도와 전계의 세기는 매질의 특성과 관계가 있으며 다음과 같다.

$$\overrightarrow{D} = \epsilon \overrightarrow{E} \qquad (2.10)$$

$$\overrightarrow{B} = \mu \overrightarrow{H} \qquad (2.11)$$

$$\overrightarrow{J_e} = \sigma \overrightarrow{E} \qquad (2.12)$$

여기서,

ϵ : 유전율 $[F/m]$

μ : 투자율 $[H/m]$

σ : 도전율 $[S/m]$

맥스웰방정식을 풀기 위하여 식 (2.10)부터 식 (2.12)를 식 (2.4)부터 식 (2.8)에 대입하게 되면 두개의 Field quantities($\overrightarrow{E}$, $\overrightarrow{H}$)에 관련된 일계편미분방정식이 생긴다. 이 일개편미분방정식을 해석하기 위해서는 한개의 Field quantities($\overrightarrow{A}$)에 관련된 이계편미분방정식으로 바꾸게 된다. 이때 문제를 풀기 위한 사용할 변수를 결정해야 한다. 식 (2.7)로부터 다음과 같이 자기벡터포텐셜을 정의한다.

$$\overrightarrow{B} = \nabla \times \overrightarrow{A} \qquad (2.13)$$

식 (2.11)과 식 (2.13)을 식 (2.5)에 대입하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \overrightarrow{A} \right) = \overrightarrow{J} \qquad (2.14)$$

식 (2.14)에서 유일한 해를 얻기 위해서 다음과 같은 Coulomb's Gauge

조건을 사용한다.

$$\nabla \cdot \overrightarrow{A} = 0 \qquad (2.15)$$

도체에 유기되는 와전류는 식 (2.9), (2.4) 및 (2.13)으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\nabla \times \overrightarrow{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \overrightarrow{A}) = \nabla \times (-\frac{\partial \overrightarrow{A}}{\partial t}) \qquad (2.16)$$

$$\overrightarrow{E} = -\frac{\partial \overrightarrow{A}}{\partial t} - \nabla \phi \qquad (2.17)$$

$$\overrightarrow{J_e} = \sigma \overrightarrow{E} = -\sigma (\frac{\partial \overrightarrow{A}}{\partial t} + \nabla \phi) \qquad (2.18)$$

결과적으로 식 (2.9), (2.8) 및 식 (2.14)로부터 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times \overrightarrow{A}) + \sigma (\frac{\partial \overrightarrow{A}}{\partial t} + \nabla \phi) = \overrightarrow{J_s} \qquad (2.19)$$

2.2.2 과도상태 자계 해석 특성방정식

과도상태의 전자기 시스템을 유한요소법으로 해석하기 위하여는 전자기 시스템을 유한요소 정식화하고 전압방정식을 이산화한 다음 두 수식을 결합하게 된다. 전력선 케이블의 특성을 해석하기 위한 미지의 함수는 자기벡터포텐셜 , 전기스칼라포텐셜의 미분치 그리고 상에 흐르는 전류이다. 앞에서 유도된 이산화된 방정식들을 다음과 같이 표현된다.

$$[K + T \;\; E \;\; S] \begin{bmatrix} A \\ \phi \\ I_s \end{bmatrix}^{t+\triangle t} = [\, T \;\; 0 \;\; 0 \,] \begin{bmatrix} A \\ \phi \\ I_s \end{bmatrix}^{t} \qquad (2.20)$$

$$[S^T \;\; Z] \begin{bmatrix} A \\ I_s \end{bmatrix}^{t+\triangle t} = V^{t+\triangle t} + [\, S^T \;\; 0 \,] \begin{bmatrix} A \\ I_s \end{bmatrix}^{t} \qquad (2.21)$$

$$[E^T \;\; P] \begin{bmatrix} A \\ \phi \end{bmatrix}^{t+\triangle t} = [\, E^T \;\; 0 \,] \begin{bmatrix} A \\ \phi \end{bmatrix}^{t} \qquad (2.22)$$

식 (2.20) 식 (2.21)을 하나의 수식으로 결합하면 다음과 같이 전력선 케이블의 과도특성을 해석하는 최종적인 수식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K+T & E & S \\ E^T & P & 0 \\ S^T & 0 & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ \phi \\ I_s \end{bmatrix}^{t+\triangle t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V \end{bmatrix}^{t+\triangle t} + \begin{bmatrix} T & 0 & 0 \\ E^T & 0 & 0 \\ S^T & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ \phi \\ I_s \end{bmatrix}^{t} \tag{2.23}$$

제 3 장 자계 해석 시뮬레이션

제 1 절 자기장 시뮬레이션 및 계산 방법

공학 분야에서 제기되는 물리적인 제반 현상들은 일반적으로 복잡한 분포 특성을 갖는 연속적인 현상이라고 할 수 있는데, 이런 현상들은 그 물리장을 지배하는 지배방정식에 의해 표현되는 것이 보통이다. 또한 이와 같은 지배방정식을 만족하는 함수분포는 그 함수에 의해서 성립되는 지배방정식인 미분방정식의 해를 구함으로서 알 수 있게 된다. 본 논문에서 자계 해석 진행을 위해서 사용한 소프트웨어는 COMSOL Multiphysics이다. COMSOL Multiphysics는 유한요소법(FEM)을 기반으로 하여 유체, 구조, 전자기, 화학반응, 열 등 다중물리현상을 해석할 수 있는 배경을 갖고 있다. 이 중 전자기분야(Electrical and Magnetic)에 맞는 AC/DC 모듈을 이용하였다.

유한요소해석(Finite element analysis, FEA)은 공학분석에 사용되는 컴퓨터 시뮬레이션기술로서, 유한요소법(FEM)라고 불리는 수치적 기법을 사용한다. 유한요소법은 각각의 단어가 의미하듯이 대상이 되는 물체의 영역을 “유한(finite)”개의 “요소(element)”라 불리는 작은 영역들로 나누어 현상의 답을 근사적으로 구하는 “방법(method)”이다. 수치해석 기법은 그 현상을 지배하는 법칙과 조건들을 수학적인 표현으로 모델링하고, 근사해(approximate solution)를 구하기 위해 답을 보간함수(interpolation function)의 조합으로 표현하고 각 기저함수의 크기를 계산한다. 수치해석 기법은 기본적으로 수학적인 표현을 기저함수(basis function)의 계수를 계산하기 위한 행렬방정식으로 전환한다. 기저함수를 어떻게 정의하느냐에 따라 수치해석 기법의 종류가 결정된다. 유한요소법에서는 기저함수를 효과적이고 체계적으로 정의하기 위하여 대상이 되는 물체의 공간상의 영역을 유한요소(finite element)라고 불리는 작은

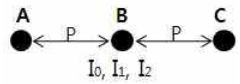
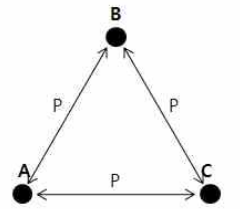
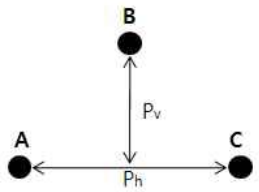
영역들로 나눈다. 유한요소법을 사용할 경우, 모델이 단순화되고 대수 연산만 남게 되어 계산이 쉬워지는 장점이 있다. 미지의 영역 값은 유한요소에 선형 보간법을 적용하여 얻을 수 있다. 즉, 단위 데이터 합계를 통해 원하는 해석값을 찾는 것이다.

경계 값 문제를 푸는 유한 요소 방법은 세 가지 과정을 거친다. 첫 번째 단계는 분석될 구조의 유한요소 모델링을 하는 것이다. 대부분의 FEA패키지에서는 구조의 기하학적 특징을 위상학을 사용하여 표시한다. 1D, 2D, 3D형태로 표현되며 각각, 선, 형상, 서피스로 나타낸다. 최근에는 3D 모델링 방법이 주가 되는 추세이다. 모델링의 가장 중요한 목적은 실제의 모델을 어떻게 하면 더 잘 표현할 수 있는가에 있다. 유한요소 모델링을 위해 설계데이터를 활용하는 것이 일반적이며, 대다수의 프로그램은 CAD데이터를 변환하여 유한요소 모델을 자동으로 생성하는 기능을 지원하고 있다. 개략적인 유한요소가 생성되면 크게 3개로 나눌 수 있다. 하나의 격자를 메시(영어: mesh)라고 하며 메시의 꼭짓점을 이루는 점을 절점(영어: node)이라 하고, 절점으로 연결된 메시의 영역을 요소(영어: element)라고 한다. 두 번째 단계는 해석이다. 모델링데이터가 정확하고 입력값이 정확하면 결과는 올바르게 도출될 것이다. 계산은 컴퓨터가 실시하므로 사용자는 자신이 보고자 원하는 값을 정확히 설정할 필요가 있다. 마지막 단계는 결과를 보는 것으로서, 해석결과는 주로 FEA프로그램내에서 확인이 가능하며 수치적나 그래프(색상지도)로 표현한다.

제 2 절 모델링

표 2은 다양한 회선 구성에 대한 원거리에서의 자기장 방정식이다. B는 자기장(mG), R은 발생지점 중심으로부터의 거리(M), P는 도체 사이의 간격(M), I는 전류(A)이다. B_M은 거리에 반비례하는 단극 성분에서의 자속밀도(mG)이다. 또한 B_D는 거리의 제곱에 반비례하여 변하는 쌍극자 성분(mG)이며, B_q는 장 타원의 장축을 따른 사분원 성분(mG)이고, B_{min}은 장 타원의 단축을 따른 성분(mG)이다.

표 3-1 Distant Field Equations for Different Line Configurations

Configuration	Field at distance R
Single Wire	$B = 2I/R$
Two wires, unbalanced	$B_M = 2(I_1 + I_2)/R$ $B_D = P(I_2 - I_1)/R^2$
 Symmetrical components	$B_M = 6I_0/R$ $B_D = 2\sqrt{3}(\tilde{I}_1 - \tilde{I}_2)/R^2$ $B_Q = 2P^2(\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 - 2\tilde{I}_0)/R^3$
 Three-phase, equilateral delta	$B = \sqrt{6}\,IP/R^2$ Circularly polarized $B_{MAX} = B_{MIN} = \sqrt{3}\,IP/R^2$
 Three-phase, non-equilateral delta	$B = \sqrt{3P_h^2 + 4P_v^2} \cdot I/R^2$ Elliptically polarized $B_{MAX} = \sqrt{3}\,P_h I/R^2$ $B_{MIN} = 2P_v I/R^2$

지중송전선로에서 자계 발생에 영향을 주는 요소들은 시스템적인 요소(전류의 크기, 상평형, 접지), 케이블 설치요소(매설깊이, 배열형태, 도체간격, 상배치), 케이블 구성요소(시스 저항, 케이블 재료), 기타요소(시스유도전류) 등이 있다. 본 논문에서는 이중 지중송전선로의 매설깊이, 시스유도전류, 자성체의 비투자율에 따른 자계를 해석하였다.

지중케이블의 자계 형성은 단상일 경우보다 삼상일 경우, 수평 배열 경우보다 삼각 배열 경우, 1회선보다 2회선일 경우 저감 효과가 크다. 실제 선로의 구성은 단상으로 구성되는 경우가 없으므로 삼상의 경우로 모델링 하였으며, 가혹한 조건에서의 모의를 위해 1회선, 수평 배열 조건으로 해석을 진행하였다.

케이블의 기본 구조는 그림과 같다. 중심도체 및 Metal sheath는 구리 또는 알루미늄으로 되어 있다. 절연체는 XLPE(Cross-linked polyethylene) 이며 Metal sheath와 자성체를 이격시키기 위해 사이에 자켓(PE 절연체)를 추가하였다.

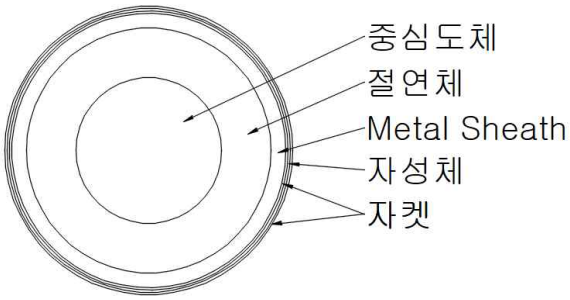


그림 3-1 케이블 구조

그 외, 해석 조건은 표 3-2와 같이 하였다. 해석의 편이를 위해 Metal sheath두께는 변경하지 않았으며 자성체의 두께는 1t로 고정하였다. 실제 Metal sheath유도 전류는 접지방식과 Metal sheath두께(면적)에 따라 상이하나 표의 조건을 만족하는 것으로 가정하였다. 지표면으로부터 0m, 0.2m, 0.4m, 0.6m, 0.8m, 1.0m에서 측정한 자계 값 및 그 평균치를 자계의 크기로 산정했다. 해석 대상 지중송전선로의 전압은 154kV,

선로전류는 2,000A, 평형 3상 회로(상간 간격 : 0.2m)로 정하였다.

표 3-2 해석 조건

항목	조건
중심도체 전류	2,000 A
상간 거리	0.2 M
Metal sheath유도 전류	0 ~ -2,000 A
자성체의 비투자율	1 ~ 10,000
매설 깊이	0.4 / 0.8 M
측정 위치	(지표면으로부터) 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0m

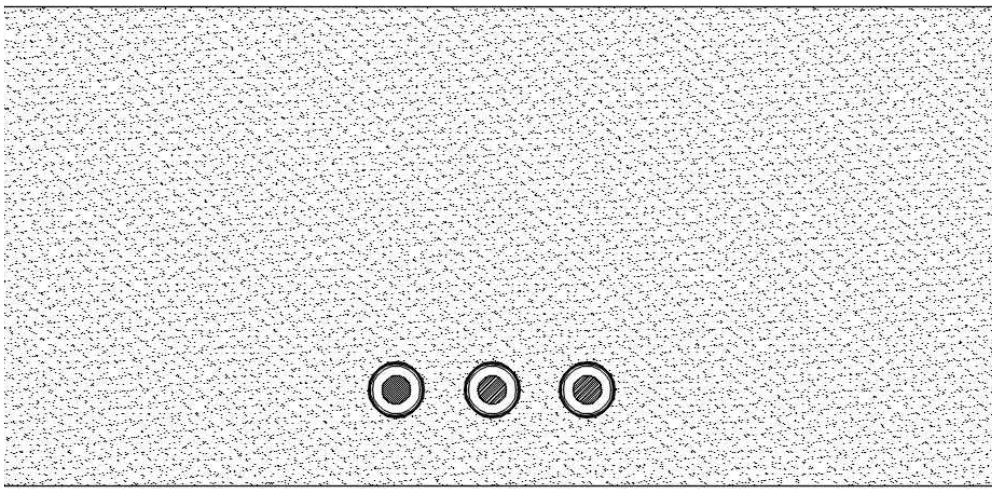


그림 3-2 평형 3상 회로의 모델링

제 3 절 해석 및 결과

공학 분야에서 제기되는 물리적인 제반 현상들은 일반적으로 복잡한 분포 특성을 갖는 연속적인 현상이라고 할 수 있는데, 이런 현상들은 그 물리장을 지배하는 지배방정식에 의해 표현되는 것이 보통이다. 또한 이와 같은 지배방정식을 만족하는 함수분포는 그 함수에 의해서 성립되는 지배방정식인 미분방정식의 해를 구함으로서 알 수 있게 된다. 본 논문에서 자계 해석 진행을 위해서 사용한 소프트웨어는 COMSOL Multiphysics이다. COMSOL Multiphysics는 유한요소법(FEM)을 기반으로 하여 유체, 구조, 전자기, 화학반응, 열 등 다중물리현상을 해석할 수 있는 배경을 갖고 있다. 이 중 전자기분야(Electrical and Magnetic)에 맞는 AC/DC 모듈을 이용하였다.

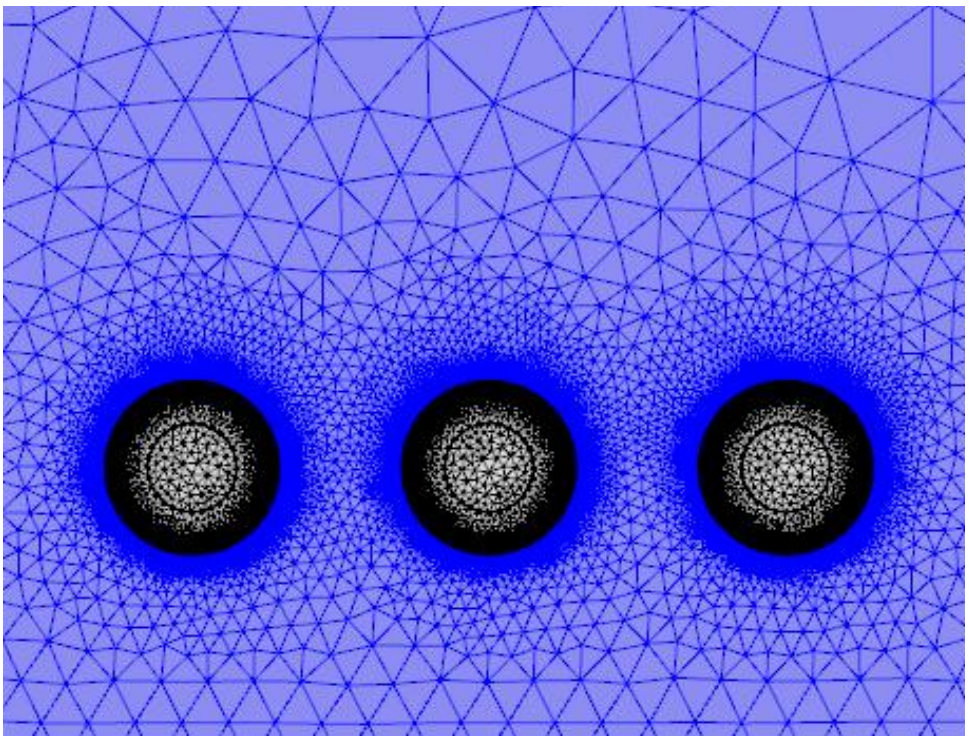


그림 3-3 메쉬 설정

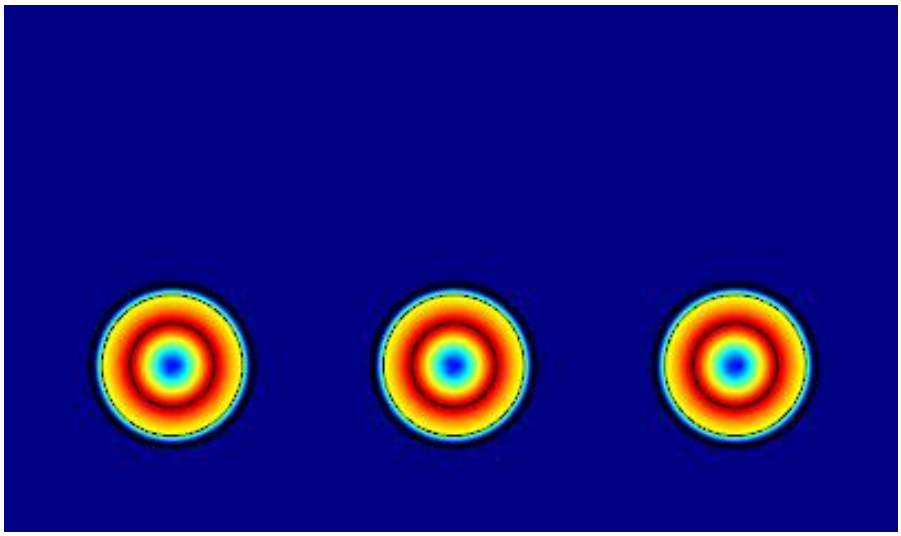


그림 3-4 자계 분포

3.3.1 Case 01

표 3-3 가혹한 해석 조건 (기준)

항목	조건
Metal sheath유도 전류	0 A
자성체의 비투자율	1
매설 깊이	0.4

가혹한 조건에서의 차폐재가 없는 경우에 대하여 해석을 먼저 진행하였다. 실제로는 국내의 경우, 이 정도로 얕게 매설되지 않으나 해외의 경우 최악의 조건에서 있을 법하다.

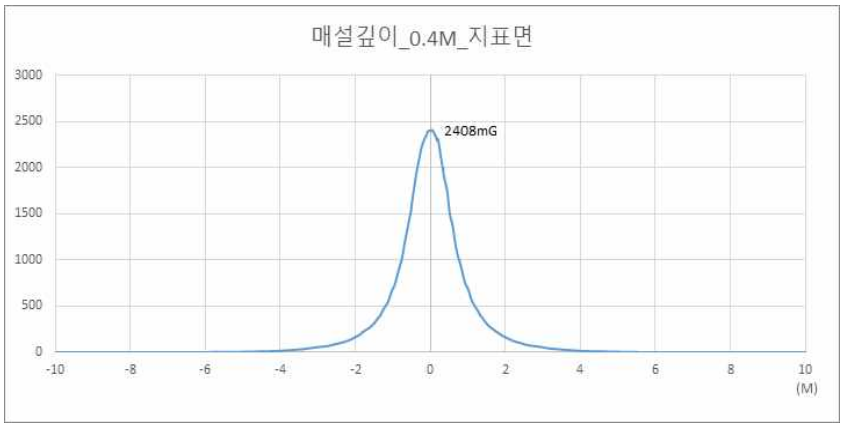


그림 3-5 지표면에서의 자계 (매설깊이 0.4m)

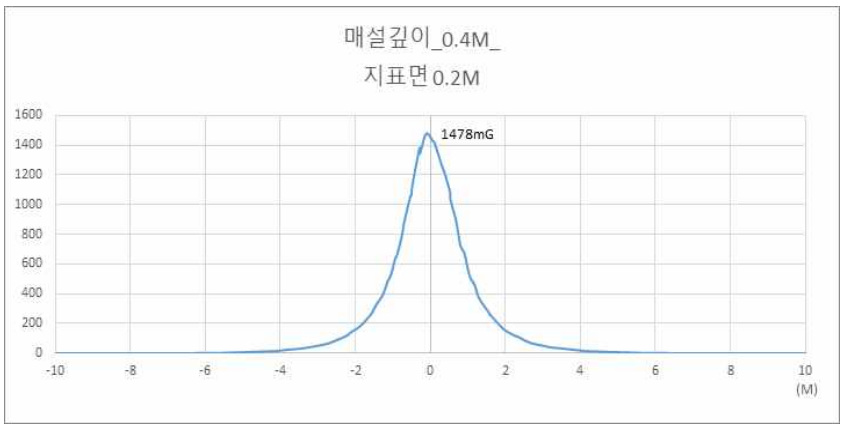


그림 3-6 지표면에서 0.2m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m)

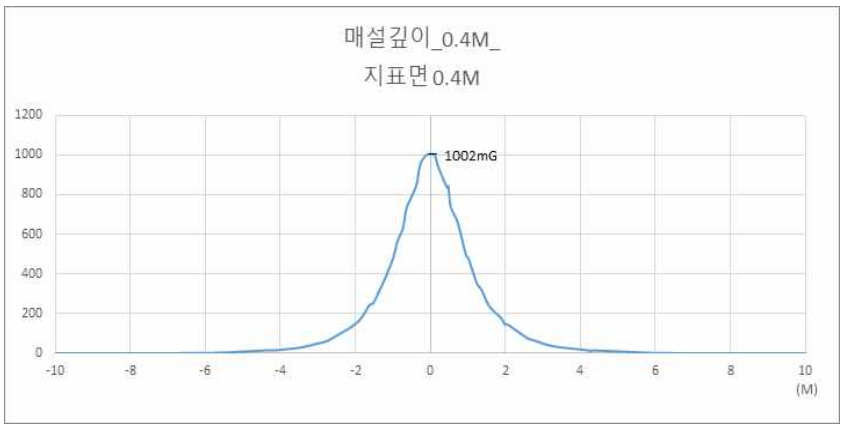


그림 3-7 지표면에서 0.4m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m)

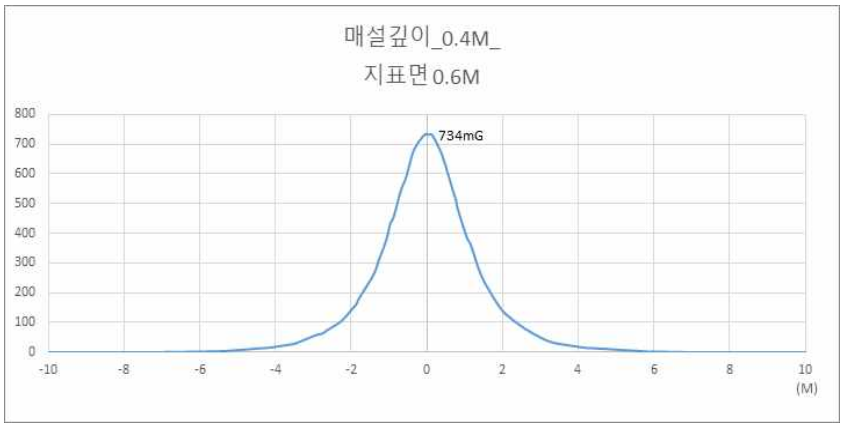


그림 3-8 지표면에서 0.6m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m)

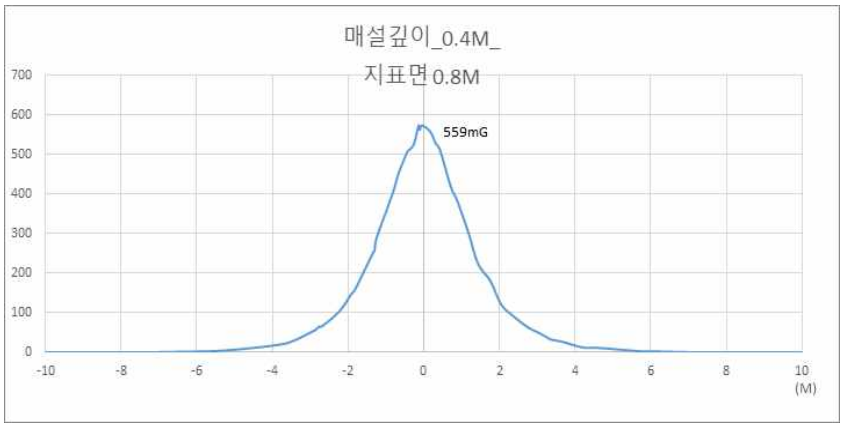


그림 3-9 지표면에서 0.8m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m)

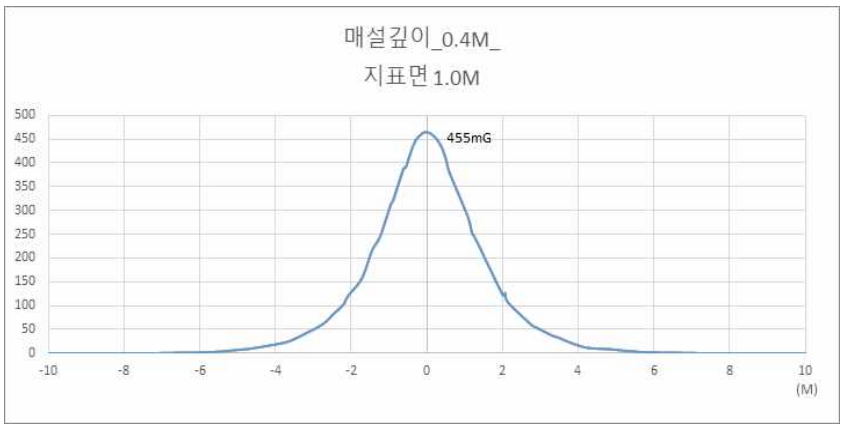


그림 3-10 지표면에서 1.0m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.4m)

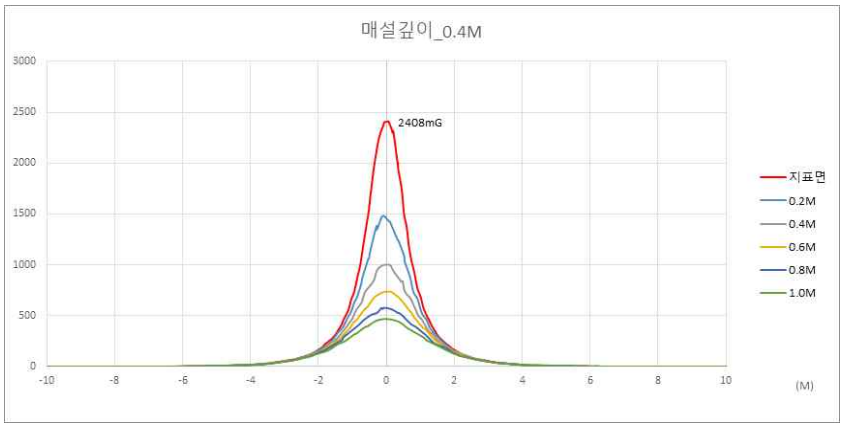


그림 3-11 매설깊이 0.4m일 때, 지표면으로부터 0 ~ 1m 위치별 자계

결과 그림으로부터 알 수 있듯이 가혹한 조건으로 해석을 진행했을 때, 지표면에서는 약 2,400mG 이상의 자계가 발생한다. 이는 현재 국내 기준인 833mG에 비해서도 약 3배 가량되는 매우 높은 수치이다. 이 결과값을 기준으로 하여, 동일 조건에서 지표면 측정값이 833mG의 국내 기준 및 2mG의 목표를 만족하도록 몇 가지 케이스를 진행하였다.

3.3.2 Case 02

표 3-4 Case 02 해석 조건

항목	조건
Metal sheath유도 전류	0 A
자성체의 비투자율	1
매설 깊이	0.8

앞서 해석한 조건에서 나머지는 동일한 상태에서 매설깊이만 0.8m로 변경하여 해석을 먼저 진행하였다.

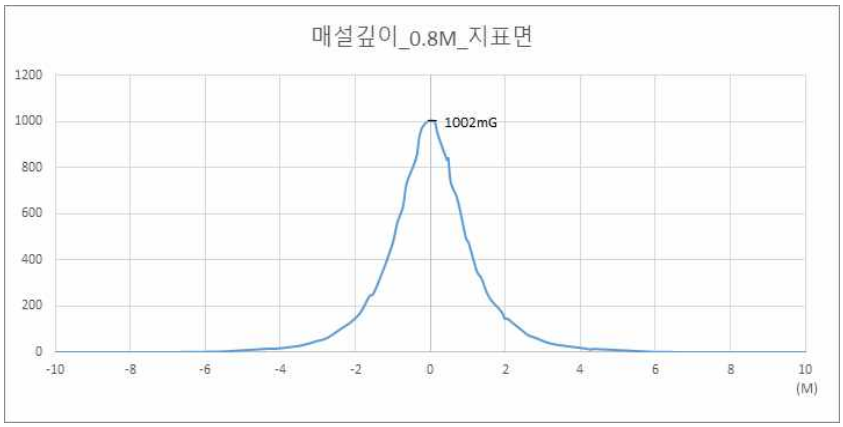


그림 3-12 지표면에서 0.8m 위치에서의 자계 (매설깊이 0.8m)

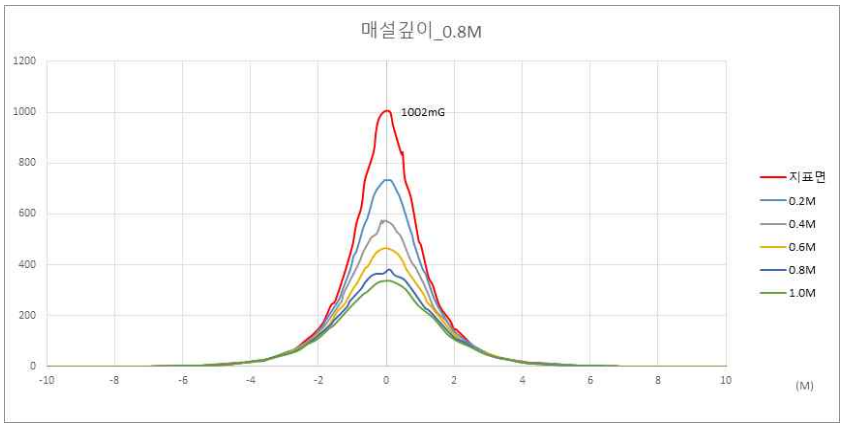


그림 3-13 매설깊이 0.8m일 때, 지표면으로부터 0 ~ 1m 위치별 자계

매설깊이를 0.8m로 변경하였을 때, 지표면에서의 자계값은 약 1,000mG 정도로 발생하였다. 매설깊이를 2배로 한 것만으로 자계값은 1/2이하로 줄어들어 매설깊이의 변경, 즉 전류원으로부터의 이격이 자계를 줄이는데 매우 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 매설 깊이에 따른 영향은 확인이 되었으므로 이후 해석은 0.4m 깊이에 대해서 진행하였다.

3.3.3 Case 03

표 3-5 Case 03 해석 조건

항목	조건
Metal sheath유도 전류	0 A
자성체의 비투자율	100
매설 깊이	0.4

이번에는 자성체의 투자율에 따른 영향을 확인하기 위해 먼저 투자율을 100으로 변경하여 해석을 진행하였다.

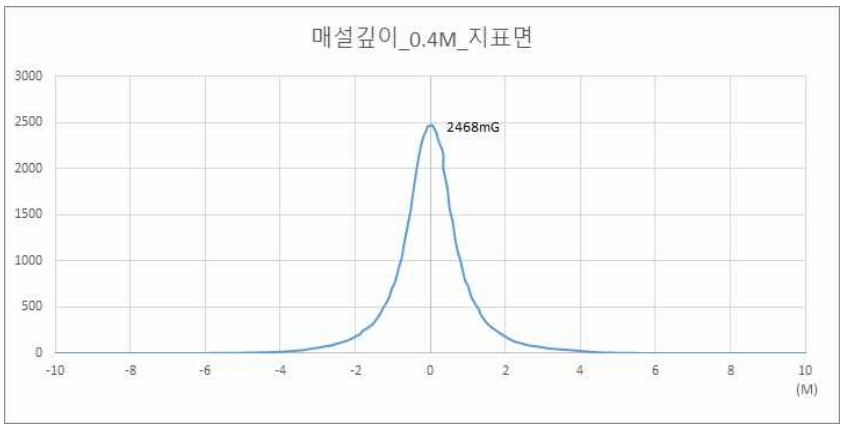


그림 3-14 매설깊이 0.4m, 투자율 100일 때, 지표면에서의 자계

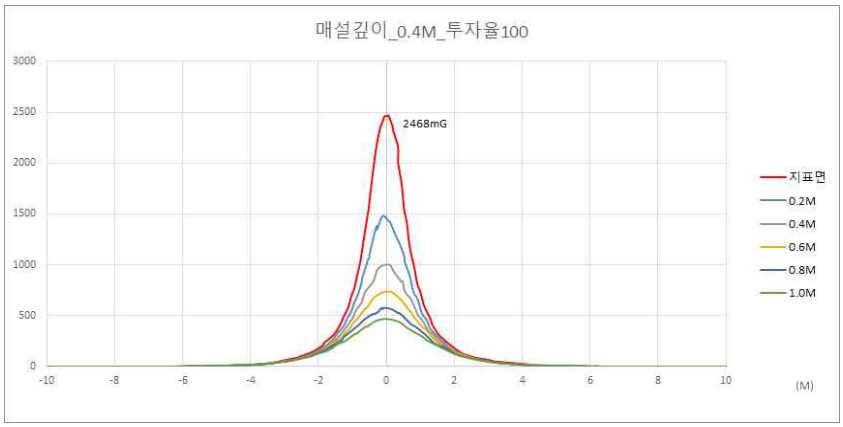


그림 3-15 매설깊이 0.4m, 투자율 100일 때, 해석 위치별 자계

자성체가 없는 경우보다 자계가 줄어들지 않았을 뿐 아니라 약

2,470mG로 오히려 약간 증가함을 확인하였다. 이는 투자율을 높이면 자계가 자성체 주위로 집중하여 측정지점에서는 자계값이 줄어들 것이라는 예상을 벗어난 것이다. 투자율의 영향을 확인하기 위해 더 높은 투자율에서 해석을 진행할 필요가 있다.

3.3.4 Case 04

표 3-6 Case 04 해석 조건

항목	조건
Metal sheath유도 전류	0 A
자성체의 비투자율	10,000
매설 깊이	0.4

이번에는 자성체의 투자율을 뮤메탈, 퍼멀로이 수준의 10,000으로 변경하여 해석을 진행하였다.

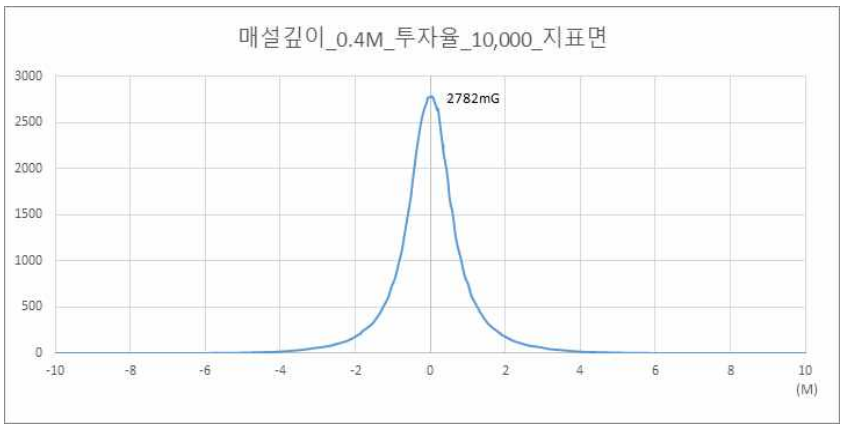


그림 3-16 매설깊이 0.4m, 투자율 10,000일 때, 지표면에서의 자계

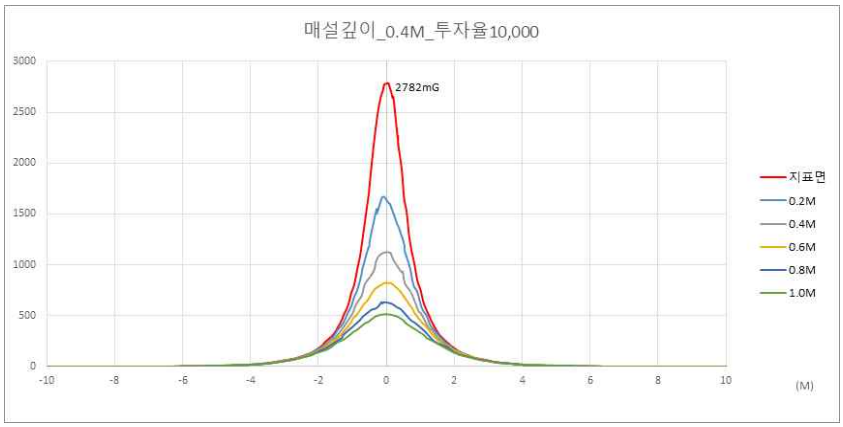


그림 3-17 매설깊이 0.4m, 투자율 10,000일 때, 해석 위치별 자계

투자율을 10,000으로 하였을 때 자계는 약 2,740mG로 확실하게 증가하였다. 강자성체가 지중케이블 구조 내로 들어갔을 때, 측정위치에서의 자계는 오히려 증가하여 나빠짐을 알 수 있었다. 이에 투자율만을 변경하는 것은 개선에 효과가 없으므로 유도전류의 변화를 통해 자기장 차폐 개선에 관한 해석을 시도하였다.

3.3.5 Case 05

표 3-7 Case 05 해석 조건

항목	조건
Metal sheath유도 전류	1,000 A
자성체의 비투자율	10,000
매설 깊이	0.4

이번에는 Metal sheath의 유도전류를 1,000A로 중심도체에 흐르는 전류의 1/2 크기로 변경하여 해석을 진행하였다.

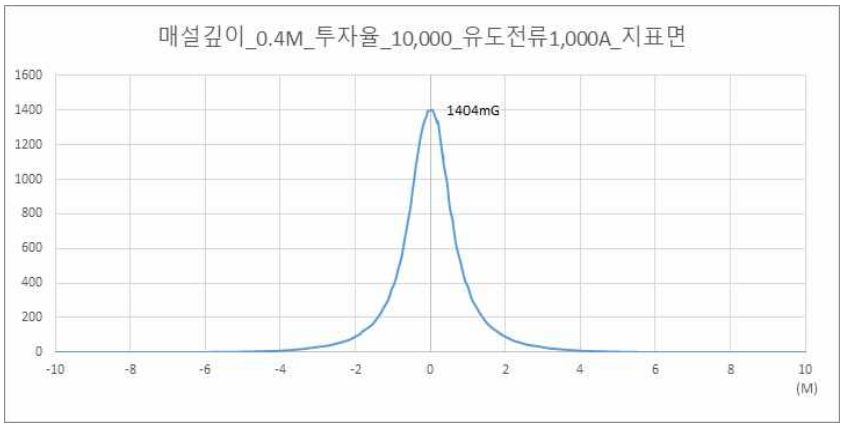


그림 3-18 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,000A, 지표면에서의 자계

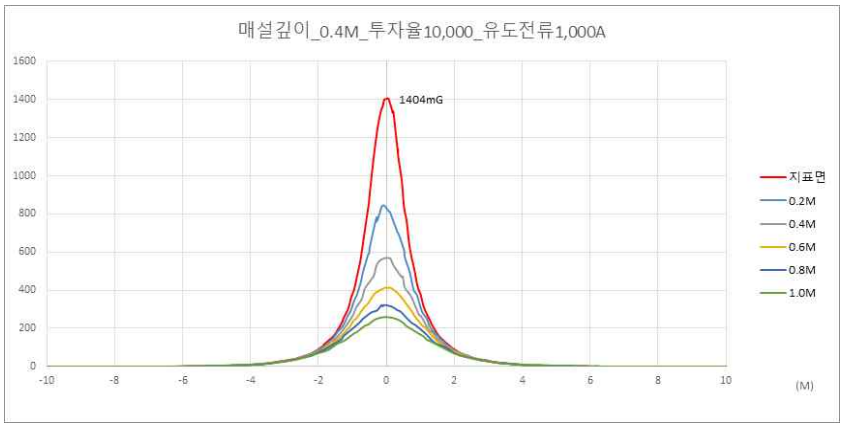


그림 3-19 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,000A, 해석 위치별 자계

Metal sheath의 유도전류를 1000A의 유의미한 값으로 하여 해석을 진행했을 때, 확실히 자계값이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 아직까지는 약 1,400mG로 기준치보다는 높았다.

3.3.6 Case 06

표 3-8 Case 06 해석 조건

항목	조건
Metal sheath유도 전류	2,000 A
자성체의 비투자율	10,000
매설 깊이	0.4

이번에는 Metal sheath의 유도전류를 2,000A로 중심도체에 흐르는 전류값과 동일한 크기로 변경하여 해석을 진행하였다.

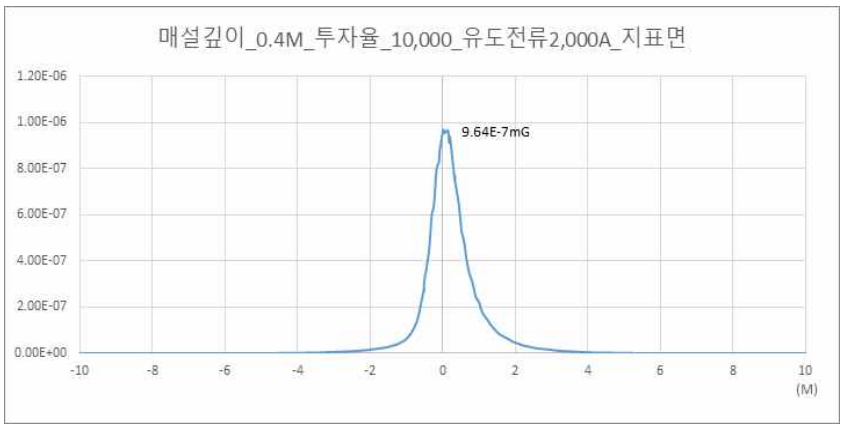


그림 3-20 투자율 10,000일 때, 유도전류 2,000A, 지표면에서의 자계

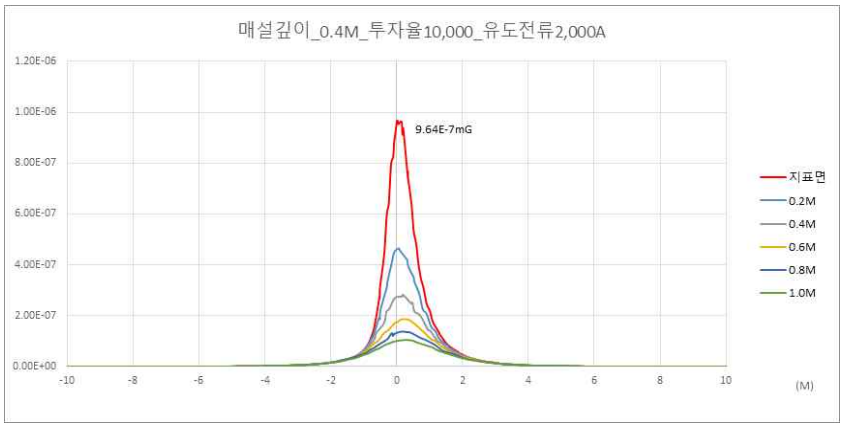


그림 3-21 투자율 10,000일 때, 유도전류 2,000A, 해석 위치별 자계

Metal sheath의 유도전류를 2,000A로 하여 중심도체에 흐르는 전류와

동일하게 하여 해석을 진행했을 때, 예상할 수 있듯이 자계값이 거의 'zero'에 수렴함을 알 수 있었다(9.64E-7mG). 전력효율적인 측면과 발열을 무시할 수 없겠으나, 유도전류와 자계와의 상관관계 파악 및 경향성을 파악함으로서 향후 케이블 구조 및 시스템 설계에 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3.7 Case 07

Metal sheath의 유도전류를 임의로 변경하며(parameter 조정) 어느 정도 수준에서 833mG 목표 기준을 만족하는지 해석을 진행하였다.

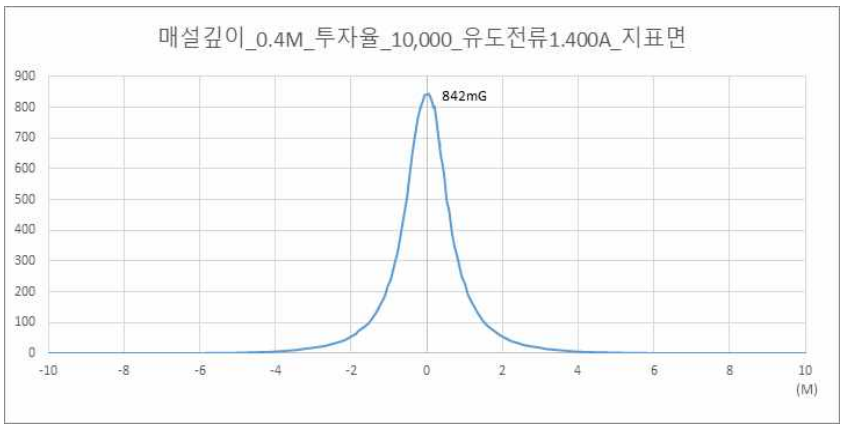


그림 3-22 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,400A, 지표면에서의 자계

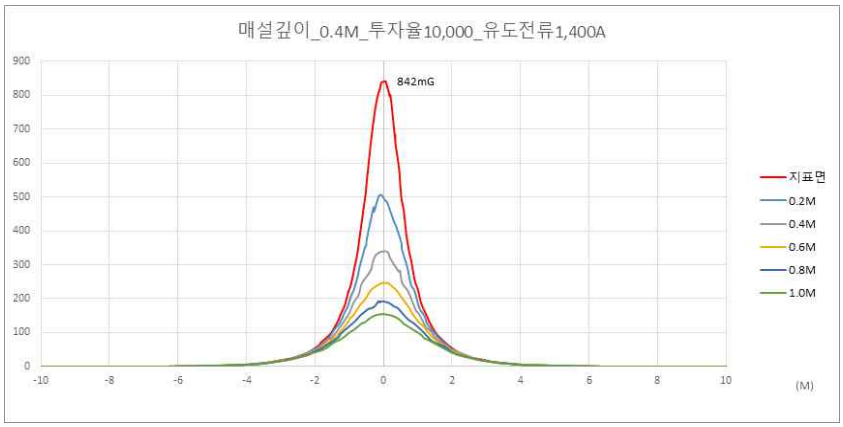


그림 3-23 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,400A, 해석 위치별 자계

표 3-9 Case 07 해석 조건

항목	조건
Metal sheath유도 전류	1,400 A
자성체의 비투자율	10,000
매설 깊이	0.4

Metal sheath의 유도전류를 1,400A로 하였을 때, 지표면에서의 자계값이 842mG로 현재의 국내 자계 기준을 만족함을 확인하였다.

3.3.8 Case 08

마지막으로 Metal sheath의 유도전류를 임의로 변경하며(parameter 조정) 어느 정도 수준에서 2mG 목표 기준을 만족하는지 해석을 진행하였다.

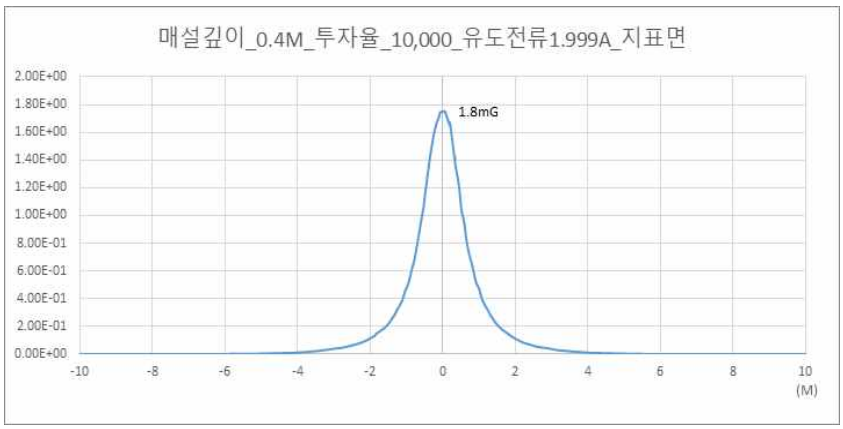


그림 3-24 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,999A, 지표면에서의 자계

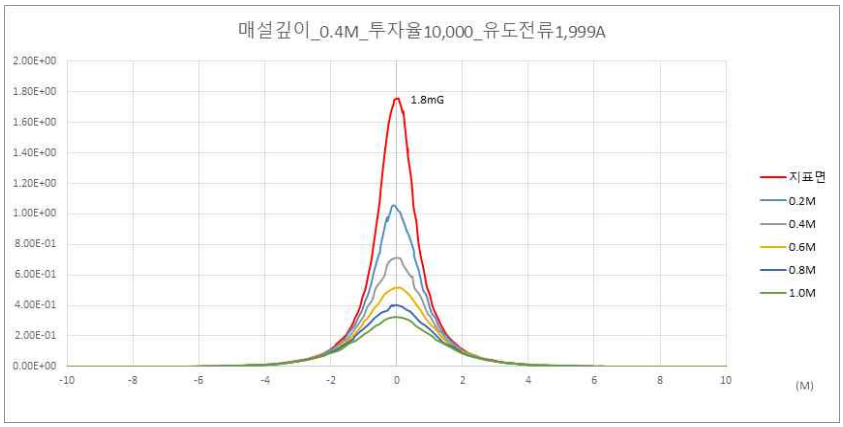


그림 3-25 투자율 10,000일 때, 유도전류 1,999A, 해석 위치별 자계

표 3-10 Case 08 해석 조건

항목	조건
Metal sheath유도 전류	1,999 A
자성체의 비투자율	10,000
매설 깊이	0.4

Metal sheath의 유도전류를 1,999A로 하였을 때, 지표면에서의 자계값이 2mG로 목표로 하는 자계 기준을 만족함을 확인하였다. 즉, 중심도체에 흐르는 전류값을 거의 상쇄하는 수준의 유도전류가 흐를 때, 2mG라는 목표 자계값을 가졌다.

제 4 장 결론 및 시사점

본 연구에서는 자계해석을 통해 지중 케이블에서 발생하는 자기장의 차폐를 위한 케이블 구조 설계를 검토하였다. 자계차폐의 원리 두 가지인 회피 효과와 와전류 효과를 모두 검토하기 위해 케이블 구조 내에 자성체를 추가하였다. 국내 및 선진국 수준의 자기장 제한 수준을 만족하기 위한 Parameter를 찾기 위해 자성체의 투자율과 metal sheath에 흐르는 유도전류의 값을 변화시켜 가며 지표면 및 지표면으로부터 1m에 이르는 위치에서의 자계값을 COMSOL MULTIPHYSICS를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 단, 이때 자성체의 투자율 영향에 따른 유도전류의 변화 부분은 무시하였다. 보다 가혹한 환경에서의 검토를 위하여 케이블을 3상 평형 배치조건으로 하였으며, 154kV, 2000A의 용량을 가지는 케이블을 가정하였다. 전력효율과 발열을 무시한 상태에서 해석을 진행하였으며, 대신 매우 가혹한 조건에서의 최대 자계값을 모의하기 위해 케이블을 지표면으로부터 0.4m 깊이로 매설하는 조건으로 하였다.

케이블 자체의 구조 변경을 통한 자계 감소는 회피 효과보다는 와전류 효과를 이용하는 것이 효과적임을 확인하였다. Metal sheath에 흐르는 유도전류의 영향이 없는 상태에서 자성체의 투자율만을 변경하였을 때에는 지표면에서의 자기장이 감소하지 않고, 오히려 강자성체에서 약간 상승하는 해석 결과가 나왔는데, 자성체의 투자율이 유도전류에 미치는 영향이 있다면 전혀 다른 결과를 보일 수도 있을 것으로 생각되어, 추가적으로 투자율에 따른 metal sheath의 유도전류도 연구해 볼 필요가 있겠다.

반면 유도전류를 변화시켜 와전류 효과를 확인하였을 때, metal sheath에 흐르는 전류의 값이 커질수록 측정위치에서의 자계값이 줄어듦을 확인할 수 있었다. 또한 중심도체에 흐르는 전류와 유사한 유도전류를 가질 때, 자계는 거의 ‘zero‘에 수렴함을 확인하였다. 현재 국내 자기

장 기준인 833mG 및 향후 목표인 2mG까지도 케이블 구조 변경을 통해서 가능함을 확인하는데 의의가 있었다.

전력효율을 고려했을 때, 유도전류를 크게 하는 것은 상업적으로 바람직하지는 않다. 하지만, 유도전류와 자계와의 상관관계 파악 및 경향성을 파악함으로서 향후 친환경적인 케이블 구조 및 시스템 설계가 필요한 시기를 준비하는 데 도움이 될 것으로 보이며, 경제적으로 적합한 자성체의 선택 및 케이블 매립 깊이, 케이블 구조 및 시스템 설계 최적화를 통한 유도 전류량 등의 상관 관계를 통한 최적 설계가 추후 과제로 남는다.

참 고 문 헌

[1] 전인수 “전자파의 건강위해성과 외국의 관리동향”, 환경포럼 84호 (2002)
[2] Im-Ho Cho, “Application study of high permeability metal Magnetic material for the magnetic field shielding underground cable”, Hanyang University (2017)
[3] Ho-Seong An “Magnetic Shielding using soft Magnetic Materials of Multi-circuit Underground Cable”, Chungnam National University (2014)
[4] 김상범, 한승호, 송택호, 정문규 “연자성 재료의 전력 케이블 인근 자계 차폐 효과”, 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1483-1484, July 2011.
[5] Tong Zi-Yuan, Dong Zhao-Yang, Tong Min-Ming “Analysis of magnetic field generated by overhead cables”Measurement 89 (2016) 166-170
[6] Electric Power Research Institute, “EPRI AC Transmission Line Reference Book-200kV and Above, Third Edition,” pp.7-24. Oct. 2009
[7] Young-Sun Kim “A Finite Element Technique using Analytical Solution for Region of Line Currents“, Dankook University (2005)
[8] Electric Power Research Institute, “EPRI AC Transmission Line Reference Book-200kV and Above, Third Edition,” pp.7-24. Oct. 2009

Abstract

A Study on the Structural Design Method of Underground Cable Considering Magnetic Field Shielding

MYUNG HUN JUN

The Graduate School of Engineering Practice

Seoul National University

Due to the increase in electric power demand and environmental problems, ultra high voltage underground transmission lines are continuously increasing in the metropolitan areas in Korea and abroad. Electromagnetic waves generated from underground transmission cables can be divided into electric field and magnetic field. The electric field is mostly shielded from the cable structure itself, so there is little influence on the outside. However, the magnetic field is not completely shielded in terms of structure, and it is alleviated through the arrangement of cables and the separation from the ground, or by installing a shield plate on the outside. The

effect of the magnetic field on the human body has been attracting attention from the 1979 paper by Waltheimer in the USA and the paper by the Swedish fitting in 1991 suggesting the relationship between the magnetic field and childhood leukemia. Since then, researches and studies have been conducted at major international institutions, and guidelines have been proposed, but still do not provide any clear proof of the relationship between the magnetic field and health. In Korea, there have been complaints related to this, but the lack of specific research data has not provided clear criteria for the magnetic field. In the case of advanced countries such as Europe, the regulations on the magnetic field are strengthening more and more. In Korea, the International Nuclear Radiation Protection Committee (ICNIRP) standard is applied to 833mG. However, there is a voice saying that the standard should be re-established as the concern about environment and safety is rising. The domestic standard is also expected to be adjusted to the value of advanced countries within a few years.

In Europe, such as Italy, the criteria for magnetic shielding of underground cables have already been proposed or required, and several methods for magnetic shielding have been implemented. However, the current method has problems such as difficulty in installation and construction in a limited space. In this paper, through the FEM simulation, we confirmed the possibility of shielding the magnetic field by changing the internal structure of the cable and deduced the optimum structure.

keywords : Underground cable, Magnetic shielding,
FEM simulation, Permeability, Inductive current

Student Number : 2017-25571