

# Analysis of Eddy Current Distribution and Loss in Metal Sheath of 154 kV Single Power Cable

## 154 kV 단상 전력 케이블의 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 분포 및 손실 분석

Sang Hyeon Im, Kyoung Youn Kim, Ki Byung Kim, Gwansoo Park  
임상현, 김경윤, 김기병, 박관수

### Abstract

As interest in the reduction of energy loss has increased in recent years, analysis of losses in power cables is becoming more important. The overall loss in the transmission system can be measured, but there are many difficulties in researching the loss in each internal structure. There are various factors in the type of loss, and the loss of external factors by previous research has been studied. However, there is little research on the cable internal loss. Since the metal sheath inside the cable is made of aluminum having a high conductivity, an eddy current is generated due to the current flowing in the conductor, thereby causing an eddy current loss inevitably. In this paper, the eddy current loss in metal sheath of 154 kV Cable was researched through FEM (Finite Element Method) electromagnetic analysis.

최근 에너지 손실 저감에 대한 관심이 높아짐에 따라, 전력 케이블에서 발생하는 손실에 대한 예측이 중요해지고 있다. 송전 시스템에서 전체적인 손실은 측정이 가능하지만 각각의 내부 구조물에서 발생하는 손실에 대한 연구는 미비한 상황이다. 송전 손실에는 다양한 요인이 있고, 그 중 선행 연구에 의하여 주변 금구류와 같은 외부 요인들에 대한 손실은 연구가 진행되었지만 케이블 내부 손실에 대한 연구는 부족한 상황이다. 케이블 내부의 금속 Sheath는 높은 도전율을 가지는 알루미늄으로 제작되었기 때문에, 도체에 흐르는 전류에 의하여 와전류가 발생하게 되고, 이에 따라 와전류 손실이 필연적으로 발생하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 케이블의 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 손실에 대하여 연구를 진행하였다.

**Keywords:** Eddy Current Loss, FEM, Finite Element Method, Power Cable, Sheath

### 1. Introduction

최근 에너지 효율의 중요성이 높아지면서, 전력 케이블을 통한 송전 손실에 대한 관심이 높아지고 있다. 송전 효율은 입력단과 출력단의 전력을 측정함으로써 계산할 수 있고, 이를 통하여 전체 손실을 계산한다. 전체 손실 중 변압기 손실은 측정이 가능하지만, 전력 케이블의 내·외부 구조물에 의한 각각의 손실들은 히스테리시스 및 와전류 손실로 발생하기 때문에 예측하기에는 많은 어려움이 존재한다. 하지만 송전 효율을 높이기 위해서는 각 구조물들의 손실을 정확히 예측하고, 이를 토대로 저감 방안을 모색하여야 한다.

선행 연구에서는 케이블 주변 금구류에서 발생하는 히스테리시스 손실과 와전류 손실에 대하여 연구가 진행되었다 [1]-[5]. 하지만 케이블 내부에서 발생하는 손실에 대한 연구는 미비한 상황

이다. 케이블 내부에는 도체와 금속 Sheath에서 손실이 발생하는 데, 도체의 경우 저항과 전류를 통하여 동손 예측이 가능하다. 금속 Sheath의 경우, 도체에서 흐르는 전류에 의하여 와전류가 발생하게 되기 때문에 손실을 측정하기가 어렵다. 그러므로 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 손실에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 FEM 전자기 해석을 통하여 금속 Sheath에서 발생하는 와전류의 분포와 손실을 분석하였다. 154 kV 케이블의 치수와 재질 특성을 모두 고려하고, 실제 사용되는 전류를 인가함으로써 모델링을 진행하였다. 먼저, 2D 해석을 통하여 위상에 따른 와전류 분포를 분석하였다. 다음으로, 3D 모델링을 이용하여 파부형과 평활형 2가지 Sheath 형태를 모사하고, 각각에서 발생하는 와전류 분포를 해석하였다. 이를 통하여 와전류 손실을 예측하고, 파부형과 평활형의 손실을 비교 분석하였다.

### Article Information

Manuscript Received May 15, 2019, Revised April 16, 2020, Accepted April 17, 2020, Published online June 30, 2020

The authors are with Lab. of Applied Electromagnetics, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro 63beon-gil Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea.

Correspondence Author: Gwansoo Park (gspark@pusan.ac.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>  
This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

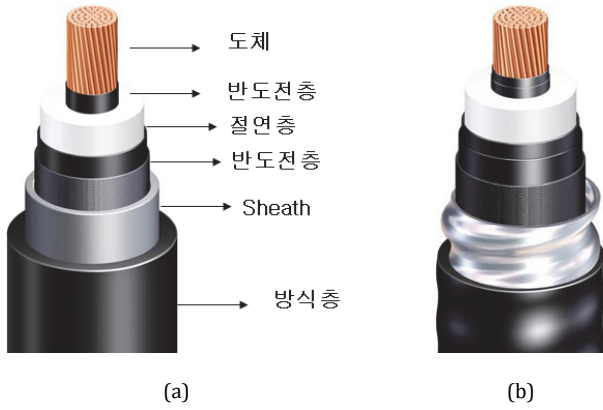


Fig. 1. 케이블의 구조. (a) 평활형 단상 케이블, (b) 파부형 단상 케이블.

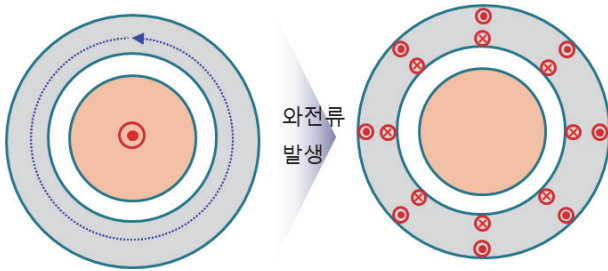


Fig. 2. Sheath 내에서 와전류 발생 원리.

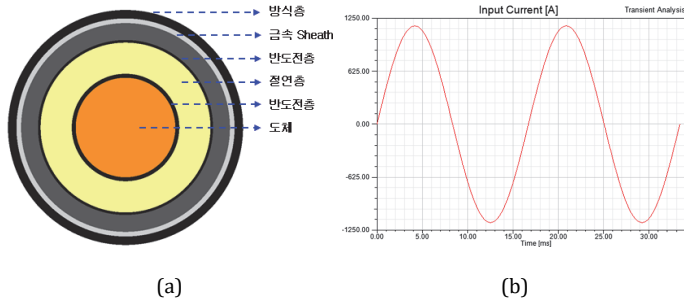


Fig. 3. 케이블 2D 모델링 및 입력 전류. (a) 2D 모델링, (b) 입력 전류.

II. 154 kV 케이블의 구조와 재질 특성

전력 케이블은 Fig. 1과 같은 구조를 가진다. 케이블의 중앙에는 전류가 흐르는 도체가 존재하고, 도체 외부에는 전계를 완화시켜 주는 역할을 하는 반도체층으로 둘러 쌓여 있다. 또한 절연층에 의하여 도체를 절연하게 된다. 다음으로는 금속 Sheath를 설치하여 단락전류를 흘려주게 함으로써 사고를 방지하게 한다. 금속 Sheath는 형태에 따라 평활형과 파부형 2가지가 존재한다. 마지막으로 방식층을 설치하여 케이블을 보호하고 금속 차폐를 절연한다.

이러한 구조층들은 TABLE 1과 같이 각각의 도전율을 가진다. 도체는 전류가 흐르기 위하여 높은 도전율을 가지는 구리로 제작 되고, 반도체층, 절연층, 방식층들은 절연이 목적이기 때문에 도전율은 1을 가진다. 금속 Sheath 또한 단락 전류를 흘리기 위하여  $3.8 \times 10^7$ 의 도전율을 가지는 알루미늄으로 제작되어 있다. TABLE 2

TABLE 1  
케이블 내부 구조 및 재질특성

	재질 종류	Conductivity [S/m]
도체	구리	$5.8 \times 10^7$
반도체층	컴파운드	$1.43 \times 10^{-7}$
절연층	폴리에틸렌	0
방식층	폴리에틸렌	0
Sheath	알루미늄	$3.8 \times 10^7$

TABLE 2  
케이블 내부 구조의 두께

도체 단면적 (mm <sup>2</sup> )	도체 외경 (mm)	내부 반도체층 두께 (mm)	절연층 두께 (mm)	외부 반도체층 두께 (mm)	금속 Sheath 두께 (mm)	방식층 두께 (mm)	케이블 외경 (mm)
2,000	54	2	17	1.3	2.6	4.5	127

에서는 케이블 내부 각 부위의 두께가 명시되어 있다.

III. 전력 케이블의 금속 Sheath 모델링 및 와전류 해석

본 논문에서는 154 kV 전력 케이블의 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 손실을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용한 전자기 해석을 수행하였다. 먼저, 2D 해석을 통하여 와전류의 분포에 대하여 분석하고, 3D 해석을 통하여 실제 모델에서의 와전류 손실을 분석하였다.

A. 2D FEM 와전류 분포 해석

케이블 내의 도체에 흐르는 교류 전류에 의하여 금속 Sheath 내부에서는 원주방향으로 회전하고 교번하는 자기장이 발생하게 된다. 변화하는 자기장에 의하여 금속 Sheath 내부에서는 변화를 저감하기 위한 방향으로 Eq. (1)에 의하여 역기전력이 발생하게 되고, 이에 따라 도전체인 Sheath에는 Eq. (2)에 의하여 Fig. 2와 같이 와전류가 흐르게 된다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \tag{2}$$

이와 같이 금속 Sheath 내의 와전류 발생을 분석하기 위하여 유한요소법을 활용한 전자기 해석을 수행하였다. 먼저, 전자기 해석을 수행하기에 앞서 Fig. 3(a)와 같이 전력 케이블 구조에 대하여 2D 모델링을 진행하였다. 각각의 구조물에는 앞 절에서 나타난 도전율과 투자율을 설정하여 실제 전력케이블을 모사하였다. 또한 Fig. 3(b)와 같이 실제 사용되는 전류를 입력함으로써 현장에서 발생하는 와전류 분포를 예측하고자 하였다.

Fig. 4는 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 분포에 대한 결과를 나타냈다. 도체의 전류에 의한 자기장을 저감하기 위하여, 금속 Sheath의 내경 위치에서는 들어가고 외경 위치에서는 나오는 방향으로 생성되게 된다.

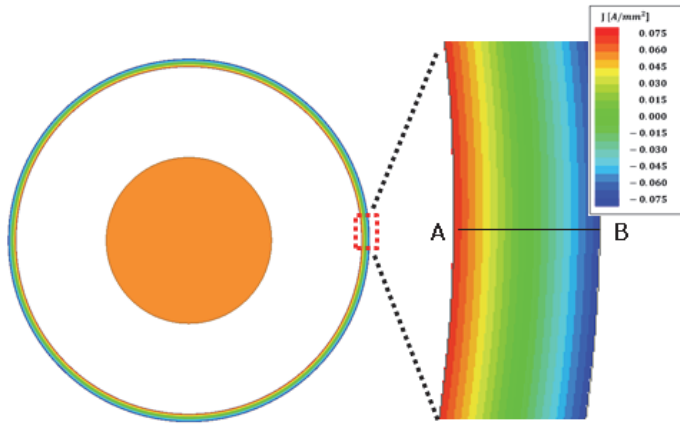


Fig. 4. 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 밀도 분포.

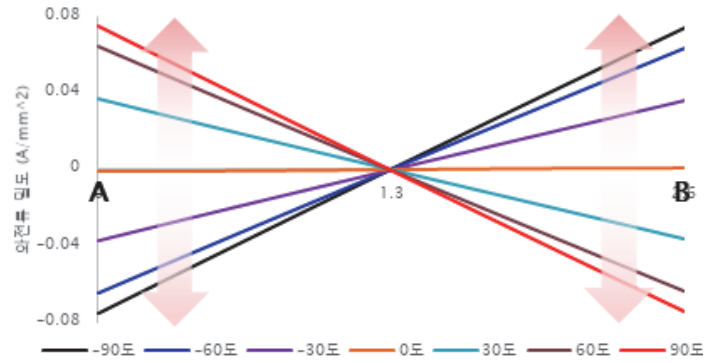


Fig. 6. 각 위상 별 위치에 따른 와전류 밀도

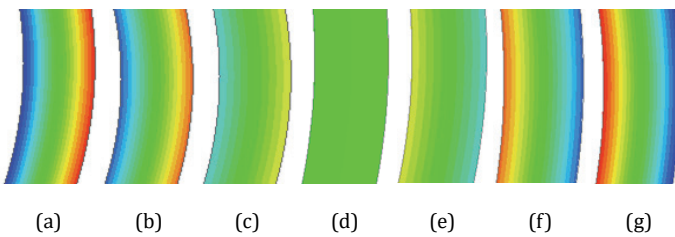


Fig. 5. 위상에 따른 금속 Sheath에서의 와전류 밀도 분포. (a) -90도, (b) -60도, (c) -30도, (d) 0도, (e) 30도, (f) 60도, (g) 90도.

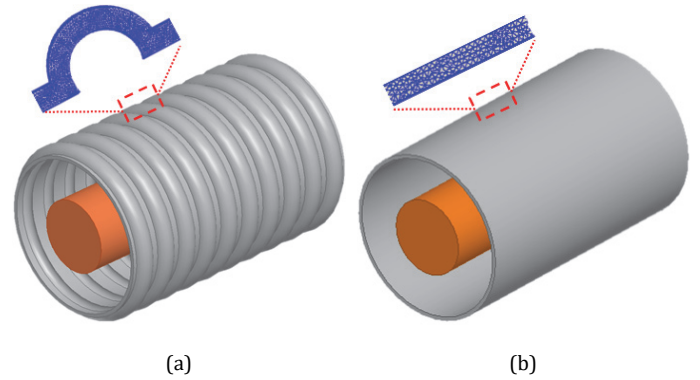


Fig. 7. 케이블 모델링 및 금속 Sheath mesh. (a) 파부형 Sheath, (b) 평활형 Sheath.

하지만 이처럼 일관된 방향으로 와전류가 발생하지는 않는다. 도체의 전류가 60 Hz의 주파수를 가지는 교류전류이기 때문에, 전류의 위상에 따라 금속 Sheath에서 발생하는 와전류의 방향 또한 변화하게 된다. Fig. 5에서는 도체 전류의 위상에 따른 와전류 밀도 분포를 나타낸다. 위상이 -90도 일 경우에는 외경 부위에서 나오는 방향의 와전류가 생성되고 반대로 내경 부위에서 들어가는 방향의 와전류가 발생한다. 위상이 0도로 가까워질수록 도체 전류의 폭이 적어지기 때문에 와전류 또한 줄어들게 된다. 위상이 다시 90도가 될수록 와전류 밀도의 크기는 커지며 -90도와는 반대의 방향으로 와전류가 흐르게 된다. 금속 Sheath에서는 도체의 전류에 따라 주기적으로 변화하는 와전류가 흐르게 된다. Fig. 6에서는 위상 별 위치에 따른 와전류 밀도 크기를 나타낸다.

B. 3D FEM 와전류 분포 해석

전력 케이블 모델을 정확히 모사하기 위하여 Fig. 7과 같이 파부형과 평활형 2가지 모델에 대하여 3D 모델링을 진행하였다. 와전류는 투자율과 도전율에 의하여 영향을 받기 때문에 투자율이 1이고 도전율이 0에 가까운 반도전층, 절연층, 방식층은 해석 모델에서 제외하였다. 전류는 2D 해석과 동일한 전류를 인가하였다.

일반적으로 와전류의 경우 Skin depth에 따라 영향을 받게 된다. 본 모델에서는 금속 Sheath에서 발생하는 skin Depth는 60 Hz의 주파수와 도전율  $3.8 \times 10^7$ 에 의하여 10.54 mm이다. 하지만, 금속 Sheath의 두께가 2.6 mm이므로 Skin depth의 25% 수준이기 때문에, 본 연구에서는 Skin depth의 영향을 무시하였다.

Fig. 8은 와전류 해석 결과를 나타낸다. 2D 전자기 해석 결과

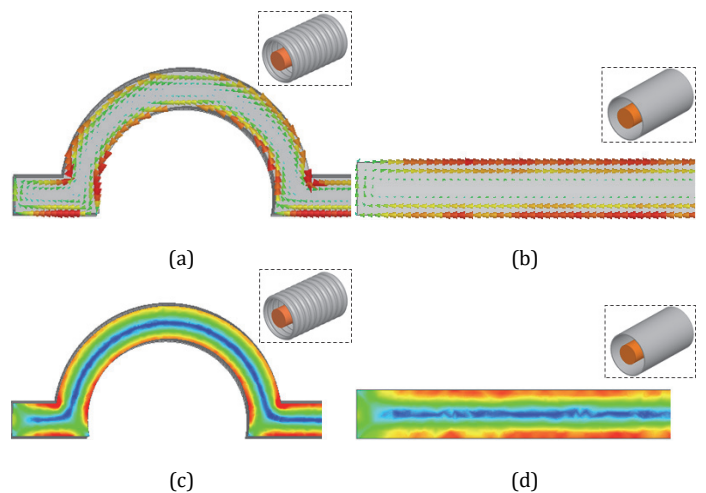


Fig. 8. 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 밀도 분포. (a) 파부형 와전류 벡터, (b) 평활형 와전류 벡터, (c) 파부형 와전류 밀도 분포, (d) 평활형 와전류 밀도 분포

와 마찬가지로 와전류는 쇠교 자속을 저감하기 위하여 Fig. 8(a) 및 Fig. 8(b)와 같이 도체 전류와 평행한 방향으로 발생하게 된다. 이에 따라 금속 Sheath의 중앙에서는 와전류 발생이 미비하고, 내측과 외측에서 와전류가 크게 발생한다.

TABLE 3  
금속 Sheath의 형태에 따른 와전류 손실

	파부형	평활형
와전류 손실	29.72 W/km	21.84 W/km

### C. 와전류 손실 분석

금속 Sheath는 도전율을 가지므로 도체에 흐른 전류에 의한 자기장 때문에 와전류가 생성된다. 이 때 발생하는 와전류에 의하여 손실이 발생하게 되고 이는 송전 효율을 저감하게 하는 요인이 된다. 그러므로 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 손실에 대한 예측이 필요하다.

와전류 손실은 각 mesh에서 도출된 와전류 밀도값과 mesh의 부피를 적분하여 Eq. (3)을 통하여 계산되어진다.

$$P_e = \frac{1}{\sigma} \int_{vol} J_e^2 dV \quad [W/km] \quad (3)$$

파부형 금속 Sheath의 경우 29.72 W/km가 발생하고, 평활형에서는 21.84 W/km의 손실이 발생하게 된다. 이러한 km 당 손실량을 이용하여 실제 케이블의 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 손실은 케이블의 길이를 곱하여 예측되어 질 수 있다.

두 모델에서 발생하는 손실의 차이는 전체 금속 Sheath의 부피에 의하여 발생한다. 파부형의 경우 케이블의 전체 길이는 동일하지만 굴곡진 형태를 가지기 때문에 실제 금속 Sheath의 부피는 평활형보다 크다. 따라서 파부형 금속 Sheath에서 더 큰 와전류 손실이 발생하게 된다.

## IV. Conclusion

본 논문에서는 154 kV 전력 케이블에서 표준 전류가 흐를 경우, 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 손실에 대하여 전자기 해석을 통하여 분석하였다. 금속 Sheath에서 발생하는 와전류는 도체의 전류에 의한 자기장을 저감하기 위하여 도체 전류와 평행한 방

향으로 발생하게 된다. 이에 따라 금속 Sheath의 중앙에서는 미비하고, 내측과 외측에 주로 와전류가 흐르게 된다. 파부형과 평활형 2가지의 Sheath에서 1 km 당 발생하는 와전류 손실을 계산하였고, 이를 이용하여 실제 케이블의 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 손실을 예측할 수 있게 되었다. 이에 따라 추후 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 손실을 저감하기 위한 연구에 활용될 뿐 아니라 전력 케이블의 송전 효율을 정확히 예측하기 위한 방안에도 활용될 수 있을 것이다.

## Acknowledgment

This work was supported by Korea Electric Power Corporation under Grant R17XA05-25.

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음 (과제번호: R17XA05-25)

## References

- [1] 한국전력공사 전력연구원, "변전소 근단고장시 고장전류에 의한 154 kV 지중 송전케이블 영향분석 및 방지대책 최종보고서", 2009.7.
- [2] 박홍석, 강지원, 장태인, 배주호, 김두진, 최경규, 홍동석, "유한요소법을 이용한 지중케이블 단락전자력 Modeling 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2009.7
- [3] 조현동, 신도식, 박위상, 이상화, 선종호, "지중 XLPE 전력케이블 직선 접속부 주변의 전계 해석" 포항공과대학교 전자전기공학과, 한국전기연구원, 대한전기학회 응용부분회 산하 연구회 공동 추계학술대회, 2012.11.
- [4] D. S. Hong, H. J. Kim, S. M. Park, W. S. Chang, H. S. Park, T. I. Jang, J. W. Kang, "The Analysis of the Electrical and Mechanical Effects for Underground Cable and Fittings by Electromagnetic Force," IEEE T&D Asia, pp. 1-5, 2009.
- [5] 송혜은, 임상현, 김경윤, 박관수, "Analysis of Eddy Current and Hysteresis Loss Distribution from Fixing Structure of 154 kV Underground Transmission Cable," KEPCO Journal on Electric Power and Energy, Vol. 4, No. 1, pp. 9-12, June 2018, DOI: 10.18770/KEPCO.2018.04.01.009.