

안전고리 체결 감지를 위한 자기장 시뮬레이션 및 분석

이후성* · 허준** · 박용배***

Magnetic Field Simulation and Analysis for Monitoring Safety Hook Fastening

Hoo-Sung Lee* · Jun Heo** · Yong-Bae Park***

요 약

본 논문에서는 공사 현장에서 안전고리를 체결하지 않고 일을 하다가 일어나는 추락사고를 방지하기 위해 두 개의 코일을 이용해서 안전고리의 체결 여부를 감지하는 방법을 제안하였다. 상용 전자파 해석 시뮬레이터인 Ansys사의 Maxwell을 이용해서 안전고리 체결 전, 후의 자기장을 분석했고, 상호 인덕턴스 변화와 그로 인한 수신 코일에 유도되는 전류의 차이를 이용해 안전고리의 체결을 확인할 가능성을 보였다.

ABSTRACT

In this paper, in order to prevent a fall accident that occurs while working without fastening the safety hook at a construction site, a method to detect whether the safety hook is fastened using two coils is proposed. Ansys' Maxwell, an electromagnetic wave analysis simulator, was used to analyze the magnetic field before and after the safety hook fastening, and the possibility of confirming the fastening of the safety hook using the difference in the mutual inductance change and the resulting current induced in the receiving coil was shown.

키워드

Coil, Magnetic field, Mutual inductance, Safety hook
코일, 자기장, 상호 인덕턴스, 안전 고리

1. 서 론

2019년에 발생한 사망 사고 중에서 전체의 50.1%를 차지하는 업종은 건설업이고, 사고의 이유는 떨어짐이 40.6%로 가장 큰 비중을 차지하고 있다[1]. 이러한 사고를 방지하기 위해서 건설업자들은 안전고리를 체결한 채로 작업을 해야 하고 관리자가 이를 실시간으로 관찰할 수 있어야 한다. 안전고리가 금속으로 된 봉에

알맞게 체결이 되었는지 아닌지를 확인하는 방법으로 자기장을 활용할 수 있다. 자기장을 이용하는 기존의 연구들은 무선 충전[2-6], 자기장 통신[7-10], 자기 센서[10-15] 등이 있다. 자기장을 이용한 무선 충전 방식에서는, 송신 코일과 수신 코일 사이의 금속 물체의 유무에 따라서 결합 특성이 변하게 된다[2]. 이러한 특성을 이용해서, 안전고리가 금속으로 된 봉에 체결이 된다면 송신 코일과 수신 코일 사이의 자기장을 분석

* 아주대학교 전자공학과 (roy1996@ajou.ac.kr)

** 아주대학교 시융합네트워크학과(gjwns2440@ajou.ac.kr)

"이후성과 허준은 공동 제1저자임."

*** 교신저자 : 아주대학교 전자공학과, 시융합네트워크학과

• 접수 일 : 2020. 10. 21

• 수정완료일 : 2020. 11. 18

• 게재확정일 : 2020. 12. 15

• Received : Oct. 21, 2020, Revised : Nov. 18, 2020, Accepted : Dec. 15, 2020

• Corresponding Author : Yong-Bae Park

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University,

Dept. of AI Convergence Network, Ajou University

Email : yong@ajou.ac.kr

하여 체결 여부를 확인할 수 있다. 본 논문에서는 상용 전자파 해석 시뮬레이터인 Ansys사의 Maxwell을 사용하여 안전고리와 두 개의 코일이 위치한 경우를 모델링 하였고, 코일 사이의 상호 인덕턴스 변화를 이용해 안전고리의 체결을 확인하는 방법을 제안하였다. II에서는 시뮬레이션에 필요한 안전고리와 코일의 모델링을 제시하였으며, III에서는 수신 코일의 유도 전류를 계산하는 방법과 코일의 감는 횟수와 위치에 따른 변화를 분석하였고 이를 통해 자기장의 변화로 체결 여부를 감지할 수 있음을 보인다. 마지막으로 결론에서는 코일의 최적 설계를 위한 계획을 제시한다.

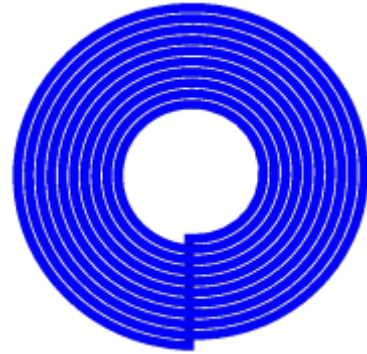


그림 2. 분석에 사용한 코일 모델
Fig. 2 Coil model

II. 안전고리, 코일 모델링

Maxwell 시뮬레이터를 이용하여 안전고리의 체결 전, 후의 경우를 모델링 하였다. 안전고리는 알루미늄으로, 체결되었을 때의 봉은 철로 모델링 하였다. 그림 1은 안전고리의 체결 전, 후의 모델링 결과이다. 또한, 안전고리에 부착할 코일을 그림 2와 같이 모델링 하였다.



(a) 체결 전
(a) before fastening



(b) 체결 후
(b) after fastening



(c) 체결 전 모델



(d) 체결 후 모델

(c) before fastening model (d) after fastening model

그림 1. 안전고리 모델
Fig. 1 Safety hook model

III. 안전고리 체결에 따른 자기장 변화 분석

3.1 코일에 대한 등가회로 및 수신 코일 전류

송신 코일과 수신 코일이 있을 때, 송신 코일에 전류를 인가하게 되면 두 코일 사이의 상호 인덕턴스에 의해 수신 코일에도 전류가 유도되게 된다. 그림 3은 두 개의 코일이 있을 때 LC 매칭을 사용한 자기 공진 방식의 등가회로를 나타낸다[2]. V_r , I_r , R_r , L_r , C_r , M 은 각각 전압, 전류, 저항, 인덕턴스, 커패시턴스, 상호 인덕턴스를 의미하며 아래 첨자의 T , R 은 각각 송신 코일과 수신 코일을 의미한다.

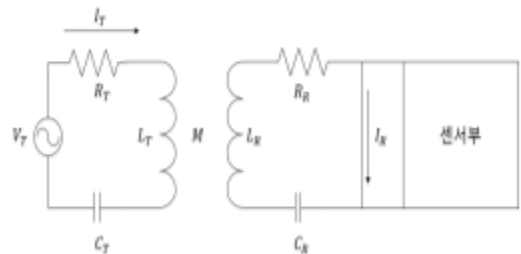


그림 3. 자기 공진 방식 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit for magnetic resonance

두 코일이 같은 공진 주파수를 갖도록 설계했을 때, 수신 코일에 유도되는 전류의 크기는 식 (1)로 결정된다.

$$I_R = j2\pi f M I_T \tag{1}$$

f 는 주파수, I_T , I_R 은 각각 송신 코일과 수신 코일의 전류를 의미한다. 시뮬레이션을 통해서 두 코일 사이의 상호 인덕턴스의 크기를 확인한 뒤, 수식 (1)을 이용해서 수신 코일에 유도되는 전류의 크기를 계산하였다.

3.2 코일의 감는 횟수와 위치에 따른 분석

먼저 안전고리의 중간 높이에 위치시킨 두 코일의 감는 횟수를 증가시키며 안전고리 체결 전, 후에 수신 코일에 유도되는 전류의 크기를 분석하였다. 분석 주파수는 $0 \sim 100kHz$ 범위에서 진행하였고, 코일의 감는 횟수는 2회에서 15회까지 증가시키며 분석하였다. 분석 모델과 코일의 구조는 각각 그림 4, 5와 같다.

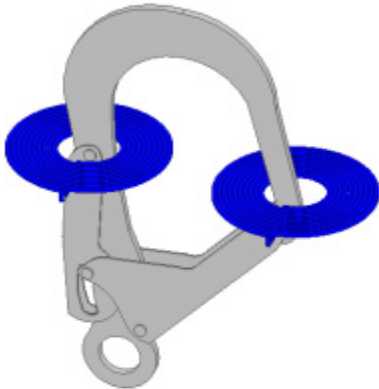
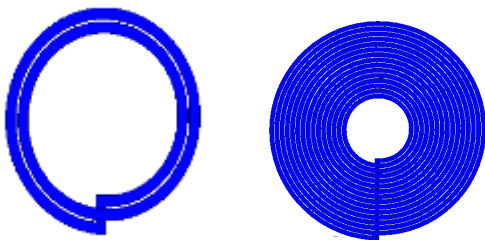


그림 4. 코일이 안전고리 중간 높이에 있는 구조
Fig. 4 Model which two coils are in the center of the safety hook



(a) 코일을 2회 감은 구조 (b) 코일을 15회 감은 구조
(a) Structure of coil with 2 turns
(b) Structure of coil with 15 turns

그림 5. 감는 횟수 변화에 따른 코일 구조
Fig. 5 Structure of coil with various winding

송신 코일에서 주파수가 $100kHz$ 이고 크기가 $1A$ 인 전류가 흐를 때, 안전고리 체결 전, 후의 수신 코일에 유도되는 전류의 차이를 표 1에 나타내었다.

표 1. $100kHz$ 기준 코일의 감는 횟수에 따른 체결 전 후 상호 인덕턴스 차이
Table 1. Difference of mutual inductance before and after fastening in terms of the turns of coil at $100kHz$

Turns of coil	Difference of mutual inductance
2	$0.02nH$
3	$0.06nH$
4	$0.13nH$
5	$0.17nH$
6	$0.4nH$
7	$0.85nH$
8	$1.34nH$
9	$2.49nH$
10	$3.76nH$
11	$6.9nH$
12	$8.68nH$
13	$11.37nH$
14	$21.7nH$
15	$34.31nH$

표 1의 결과와 같이 안전고리의 체결 여부를 감지하기 위해서는 코일을 더 많이 감을수록 유리한 것을 알 수 있다. 하지만 코일이 안전고리의 중간 높이에 있어서 감는 횟수를 계속해서 증가시키기에는 물리적으로 한계가 있다. 이 한계를 극복하기 위해서 그림 6과 같이 송신 코일을 안전고리의 가장 윗부분에 위치시켰다. 코일의 감는 횟수는 10회로 하였으며, 안쪽 코일의 반지름은 $1.5cm$ 로 모델링 하였다. 송신 코일이 안전고리의 중간 높이에 있을 때와 위에 있을 때, 주파수 $100kHz$ 이고 코일을 10회 감았을 때의 체결 전, 후 상호 인덕턴스 차이를 비교한 결과가 표 2와 같다.

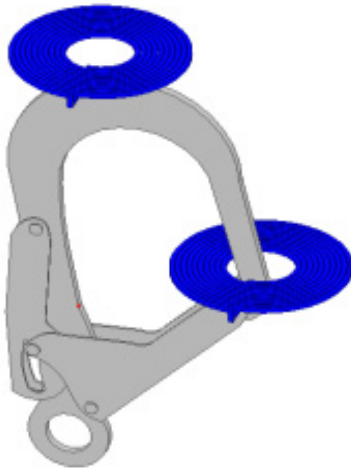


그림 6. 송신 코일이 안전고리 위에 있는 경우
 Fig. 6 Model which two coils are in the top of the safety hook

표 2. 코일 위치에 따른 체결 전후 상호 인덕턴스 차이
 Table 2. Difference of mutual inductance according to position of coil at 100kHz

Position of coil	Difference of mutual inductance
Upper of hook	22.0836nH
Middle of hook	3.7842nH

그림 7은 위의 결과를 토대로 송신 코일에 전류가 1A가 흐른다고 가정하여 수식 (1)을 이용해 안전고리 체결 전, 후의 수신 코일에 유도되는 전류의 차이를 구한 결과이다. 송신 코일이 안전고리의 중간 위치에 있는 경우와 안전고리의 위에 있는 경우의 체결 전후 유도 전류 크기 차이를 주파수 100kHz 기준에서 비교하면 코일이 안전고리 중간 위치에 있는 경우는 2.4mA, 송신 코일이 안전고리 위에 있는 경우는 13.9mA이다. 송신 코일이 안전고리 위에 있는 경우가 유도 전류 차이가 더 크기 때문에 체결 여부를 감지하는 것에 더 유리한 것을 알 수 있다.

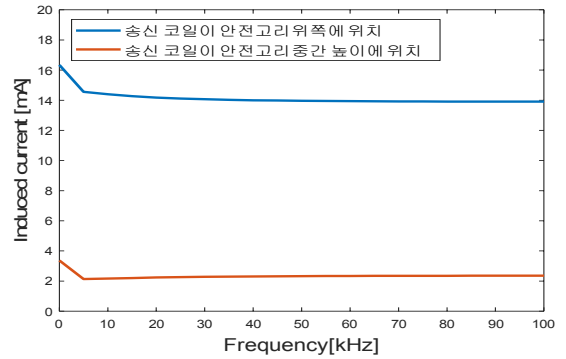


그림 7. 송신 코일의 위치에 따른 체결 전후 수신 코일 전류 크기 차이
 Fig. 7 Difference of the induced current before and after fastening according to the coil position

IV. 결론

본 논문에서는 두 개의 코일을 이용하여 자기장의 변화를 감지해 안전고리 체결을 확인하는 방법을 제안하였다. Ansys maxwell 시뮬레이터를 이용해 안전고리의 체결 전, 후의 자기장 변화를 시뮬레이션했으며, 상호 인덕턴스와 수신 코일에 유도되는 전류의 차이를 통해 안전고리 체결 감지 가능성을 확인하였다. 향후에는 안전고리의 체결 여부를 확인함과 동시에 코일의 물리적인 크기를 줄일 수 있도록 코일을 감는 방법이나 구조 변경에 대한 최적화를 진행할 계획이다. 본 논문에서 제안하는 방법을 통해 안전고리 체결 감지를 위한 코일의 위치, 감는 횟수 등의 최적 설계가 가능하고, 구현을 위한 하드웨어의 최적 설계에 응용될 수 있다.

감사의 글

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구 결과로 수행되었음“ (IITP-2020-2018-0-01424)

References

- [1] H. LEE, "Status of industrial accidents in 2019," *Ministry of Employment and Labor*, Apr. 2020.
- [2] Y. Kim, "A High-Efficiency Wireless Charger Having the Optimum Tx/Rx coils," *The J. of Korean Institute of Information Technology*, vol.13, no.5, May. 2015, pp. 11-18.
- [3] D. Cho, "Improved Antenna Performance and Electromagnetic Interference in Portable Wired/Wireless Rechargeable Battery," *J. of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol.56, no.2, Feb. 2019, pp. 116-120.
- [4] S. Kim, "Near-Optimal Wireless Powered Information Transfer Strategy for Multiuser MIMO Systems," *The J. of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.44, no.05, May. 2019, pp. 835~844.
- [5] J. Kim, "Design of the 1.5kVA Class Wireless Power Transfer Device for Battery Charging of Integrated Power Control System in MSAP," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol.15, no.3, June. 2020, pp. 413-420.
- [6] H. Jung, "Magnetic Beamforming for Optimum Efficiency Wireless Power Transfer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol.15, no.1, June. 2020, pp. 79-84.
- [7] K. Kim, "A Magnetic Signal Detection Scheme for Mobile Magnetic Induction Communication," *The J. of Korean Institute of Communications and Information Science*, vol.42, no.10, Oct. 2017, pp. 1969-1972.
- [8] S. Kim, "Design of Wireless Underground Sensor System Using Magnetic Field Communication," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol.49, no.11, Nov. 2012, pp. 97-102.
- [9] Y. Son, "HF-Band Magnetic-Field Communication System Using Bias Switching Circuit of Class E Amplifier," *The J. of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol.23, no.9, Sept. 2012, pp. 1087-1093.
- [10] H. Choi, "Vehicle Detection Condition Improvement Method Using Magnetic Field Shape," *The J. of Korean Institute of Communication and Information Sciences*, vol.42, no.10, Oct. 2017, pp. 2022-2029.
- [11] S. Yoon, "Magnetic Bead Signal Detection by Self-Field of PHR Sensor," *J. of the Korean Magnetic Society*, vol.29, no.5, Oct. 2019, pp. 166-170.
- [12] W. Lee, "Improvement of Plane Tracking Accuracy in AR Game Using Magnetic Field Sensor," *J. of Korea Game Society*, vol.19, no.5, Oct. 2019, pp. 91-101.
- [13] K. Yang, "The Development of Detection System of Conveyer Belt," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol.8, no.6, June. 2013, pp. 815-822.
- [14] K. Choi, "Magnetic Sensor Using Giant Magneto-Impedance Effect," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol.12, no.6, Dec. 2017, pp. 1057~1064.
- [15] Y. Kwon, "Low-power TDMA MAC protocol for WSN based Vehicle Detection System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol.13, no.5, Oct. 2018, pp. 1003-1010.

저자 소개



이후성(Hoo-Sung Lee)

2017년~현재 아주대학교 전자공학과 학사과정

※ 관심분야 : 자기장 해석



허준(Jun Heo)

2018년 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2018년 ~ 현재 아주대학교 AI융합네트워크학과 석박사통합과정

※ 관심분야 : 자기장 형성기술, 전자파 전파 모델링



박용배(Yong Bae Park)

1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학사)

2000년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)

2003년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)

2006년 ~ 현재 아주대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 전자장 해석, EMI/EMC