

가공전선로에 의한 유도전압의 영향 평가

Evaluation of Induced Voltage by Overhead Power Lines

우 정 민 · 주 문 노 · 강 성 만

Jeong Min Woo · Mun No Ju · Sung-Man Kang

요 약

가공전선로에 의한 유도전압이 미치는 영향을 평가하기 위하여 장갑에 의한 접촉저항과 신발과 대지 간의 저항을 각각 변화시키면서 인체에 가해지는 유도전압과 전류를 측정하였다. 계산식을 통해 주요 파라미터를 추출하고, 해당 결과를 시뮬레이션 도구를 통해 비교하였다. 4 kV/m의 전기장에 노출되었을 때 인체와 대지 사이에 약 900 V의 유도전압이 발생하였고, 방전전류의 최대값과 지속시간은 장갑과 신발 저항의 변화에 따라 변화하였다. 또한 차폐선을 통한 유도전압 저감 효과를 확인하였다.

Abstract

The induced voltage and current were measured while changing the contact resistance of gloves and the resistance between the shoes and ground, respectively, to evaluate the human impact of the voltage induced by overhead power lines. The major parameters were extracted using a formula, and the results were compared using a simulation tool. When exposed to an electric field of 4kV/m, an induced voltage between the human body and the ground of approximately 600 V was generated. The maximum value and duration of the discharge current varied according to the change in the gloves and shoe resistance. In addition, the induced voltage-reduction effect through the shielding wire was also confirmed.

Key words: Induced Voltage, Overhead Power Lines, Contact Resistance, Shielding Wire

I. 서 론

가공전선로의 전압이 점점 높아짐에 따라 이에 따른 관심도 함께 고조되고 있다^{[1]~[3]}. 독일, 프랑스, 캐나다, 미국 등을 포함한 서방 여러 국가에서도 고전압의 유해성 여부를 연구하였으나, 근거를 찾지 못하였다. 전계 기준은 세계의 많은 국가에서 ICNIRP(국제 비전리방사선

보호학회)의 권고치를 따라 50 Hz 사용 국가는 일반인의 경우 5 kV/m, 직업인은 10 kV/m를 적용하고, 표 1과 같이 60 Hz 사용 국가는 일반인의 경우 4.16 kV/m, 직업인은 8.33 kV/m를 적용하고 있다. 우리나라의 기준은 ICNIRP에서 1998년에 발표한 가이드라인을 준용하여 기준을 도입하여, 전기설비기술기준에서 “특고압 가공전선로에서 발생하는 극저주파 전자계는 지표상 1 m에서 전계가 3.5

「본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030020290, 대규모 해상 풍력발전 단지 낙뢰대책 플랫폼 기술개발)」

한국전기연구원 전기환경연구센터(Electrical Environment Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute)

· Manuscript received November 23, 2022 ; Revised January 9, 2023 ; Accepted March 8, 2023. (ID No. 20221123-098)

· Corresponding Author: Jeong Min Woo (e-mail: woosjm@keri.re.kr)

표 1. 전자계 기준현황

Table 1. Electromagnetic field standards.

Nation	Electric field (kV/m) 60 Hz		Magnetic field (μ T) 60 Hz		Note
	Public	Worker	Public	Worker	
WHO	8.33		4.167		'87 EHC69
			83.3	416.7	'07.06.
ICNIRP	4.17	8.33	83.3	416.7	1998
	5	8.33	200	1,000	2010
IEEE ('02)	4.17	16.7	904	2,710	-
EU	4.17		83.3	416.7	ICNIRP
USA	25		-		-
Japan	3	-	200	1,000	-
Korea	3.5	-	83.3	-	ICNIRP

kV/m 이하, 자계가 83.3 μ T 이하가 되도록 시설하는 등 상시 정전유도 및 전자유도 작용에 의하여 사람에게 위험을 줄 우려가 없도록 시설하여야 한다. 다만, 논밭, 산림 그 밖에 사람의 왕래가 적은 곳에서 사람에게 위험을 줄 우려가 없도록 시설하는 경우에는 그러하지 아니하다.”라고 규정하고 있으며^[4] 한국전력공사의 특고압 가공송전선로의 설계기준에서 “정전유도전압을 고려하여 사람의 출입이 빈번한 곳에서는 지표상 1 m 지점의 송전선하 전계가 3.5 kV/m, 기타(산악지)는 7.0 kV/m 이하로 설계한다”라고 되어 있다^[5]. 또한 가공전선로 주변의 작업환경에 따라 전계 측정값이 5 kV/m를 초과하는 경우도 있으나, 이러한 측정값은 일반인이 접근할 수 없는 특수한 지역에서 나타나므로, 일반인이 아닌 직업인 전계기준(국내 한전전력공사 설계기준: 사람의 출입이 빈번하지 않은 기타 지역 7.0 kV/m, 국외 직업인 기준 8.33 kV/m)을 적용하게 되면 기준을 만족한다.

이와 같이 고전압에 의해 발생하는 전계에 의한 인체 영향은 기준값 이하에서의 영향은 거의 없지만, 기준값을 초월하는 경우 유도전압에 의해서 일반인 또는 작업인이 순간적으로 놀라거나, 일시적인 불쾌함을 느낄 수 있다^[6]. 본 연구에서는 가공전선로에서 유도되는 전압, 전류를 시뮬레이션을 통해서 계산하고, 실제 현장에서 측정된 데이

터와 비교하여 영향평가를 수행하였다.

II. 본 론

2-1 유도전압

고압 가공전선로 부근에 전압, 전선 배치, 전선의 구성 및 상배치 등에 의해 전계가 변화하며, 전력선과 절연된 물체와의 상호정전용량에 의하여 정전유도(靜電誘導) 현상이 발생한다. 선로 밑에서 절연된 물체(또는 절연화물신은 인체)가 접지된 물체와 닿게 되면 유도된 전압이 방전하여 순간적인 전격을 받을 수 있으며, 계속해서 단락 전류가 절연된 물체를 통해 전류가 계속 흐르게 된다. 가공전선로 직하에 대상물이 있는 경우의 전기적 등가회로는 그림 1과 같다^[7]. 인체의 전기적 특성은 표면적과 유전율에 의해서 결정되며, 인체높이 1.75 m로 가정하였다^[8].

2-2 인체와 접지 간의 접촉 저항이 작은 경우

인체와 지면과의 저항이 작은 경우, $\left(R_0 \ll \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)}\right)$

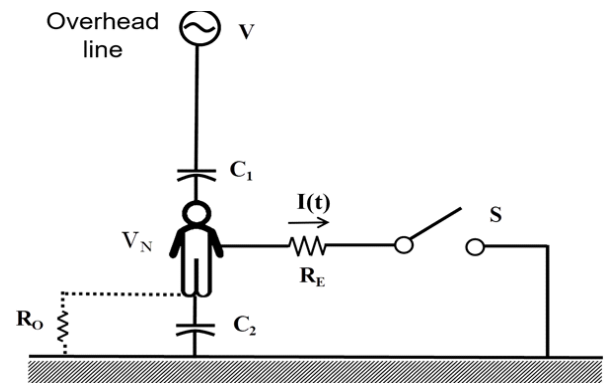


그림 1. 가공전선로 직하 대상물 모식도

Fig. 1. Schematic of object directly under overhead power lines.

- V : 전력계통의 대지전압
- C_1 : 전력선과 인체와의 정전용량
- C_2 : 인체와 대지 간의 정전용량
- R_0 : 인체와 대지 간의 저항
- R_E : 접촉시 인체와 대지 간 저항
- V_N : 정전유도전압

정전유도전압은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V_N = \frac{j\omega[C_1/(C_1+C_2)]}{j\omega+1/R_0(C_1+C_2)} V$$

$$= \frac{j\omega R_0 C_1}{1+j\omega R_0(C_1+C_2)} V = j\omega R_0 C_1 V \quad (1)$$

이때 가공전선로에서 접지측으로 흐르는 단락전류(I_S)는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_S = \frac{j\omega C_1}{1+j\omega R_0 C_1} V \quad (2)$$

일반적으로 R_0 에 비해 $1/\omega C_1$ 이 대단히 크므로, 단락전류는 식 (3)과 같다.

$$I_S = j\omega C_1 V = V_N/R_0 \quad (3)$$

2.3 인체와 접지 간의 접촉 저항이 큰 경우

인체와 지면에 거의 절연된 상태로 지면과의 저항이 큰 경우 $\left(R_0 \gg \frac{1}{j\omega(C_1+C_2)}\right)$ 정전유도 전압은 식 (4)와 같이 주파수와 무관하게 대상물의 정전용량의 함수로 표현된다.

$$V_N = \frac{C_1}{C_1+C_2} V \quad (4)$$

이때 가공전선로에서 접지 측으로 흐르는 단락전류는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_S = j\omega C_2 V_N \quad (5)$$

식 (5)를 물체에서 커패시턴스 C 와 전압 V 를 전계 E 로 표현하면 식 (6)과 같이 된다.

$$I_S = j\omega C_2 V_N = j\omega \epsilon EA \quad (6)$$

여기서 ϵ 는 상대유전율값, A 는 표면적이다.

2.4 인체가 접지된 물체를 접촉한 경우

그림 1에서 인체가 접지된 물체를 접촉하게 되면(S 를 닫는 경우, $R_0 > R_E$) 흐르는 과도전류는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$I(t) = \frac{V_N}{R_E} \exp\left(\frac{-t}{C_2 R_E}\right) \quad (7)$$

또한 계속 접촉하면 식 (8)과 같은 단락전류가 인체에 계속 흐르게 된다.

$$I_S = \frac{j\omega C_1}{1+j\omega R_E C_1} V \quad (8)$$

R_E 에 비해 $1/\omega C_1$ 이 대단히 크므로, 단락전류는 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$I_S = j\omega C_1 V \quad (9)$$

즉, 접촉순간 극히 짧은 시간에 파고치가 높은 펄스형태의 과도전류가 흐르고, 계속해서 C_1 을 통해서 상용주파수의 단락전류가 흐른다.

2.5 시뮬레이션

시뮬레이션은 그림 2와 같이 Cadence사의 Orcad Ver.17.2를 통해 수행하였다. 앞서 정리한 식에서 정전유도 전압 및 유도전류에 가장 큰 영향을 미치는 인체와 대지 간의 저항(R_0), 접촉 시 인체와 대지 간 저항(R_E)을 시뮬레이션에서 변화시키면서 인체에 유도되는 전압과 전류를 계산하였다. 인체와 대지 간의 저항(R_0)은 작업화의 절연특성, 접촉 시 인체와 대지 간 저항(R_E)은 작업장갑 유무에 따라 시험을 수행하였다. 전력선과 인체와의 정전용량(C_1)과 인체와 대지 간의 정전용량(C_2)은 인체높이 1.75 m로 가정하여 C_1 은 2.45 pF, C_2 는 100 pF로 설정하였다^[8].

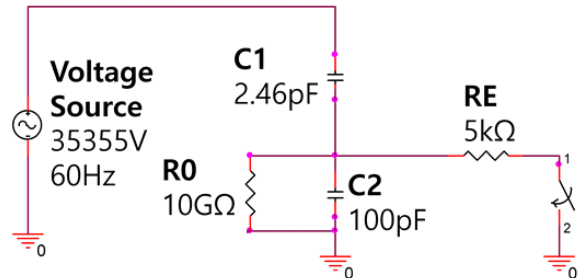


그림 2. 가공전선로 직하 대상물 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of object directly under overhead power lines.

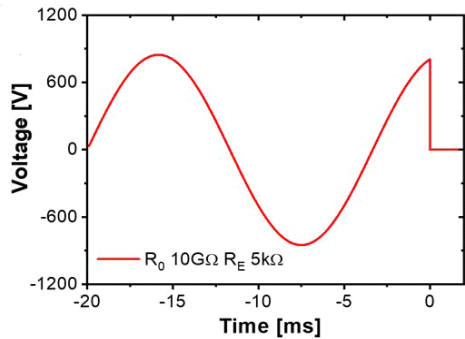
25 kV 가공전선로의 V_{pp} 값은 35,355 V로 계산되었다.

2-6 시험결과

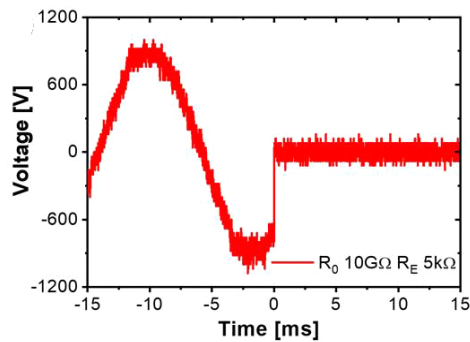
인체에 유도되는 전압과 전류는 전자계측기를 통해 측정하였다. 전류 파형은 수 mA 이하에서는 측정이 불가하여 시뮬레이션 결과와 비교하면서 진행하였다. 실험은 25 kV 가공전선로 하단에 마네킹을 위치하여 진행되었고, 계측기 프로브를 이용하여 유도전압과 전류를 측정하였다. 선로와 피사체 사이의 거리는 4.5 m이었으며, 전계는 4.0 kV/m로 측정되었다. 그림 3과 같이 전계 4.0 kV/m에 노출된 경우의 접촉 전 정전유도전압(V_N)은 저항값과 상

관없이 약 900 V로 나타났으며 일정한 시간 이후에 절연화를 신은 경우, 인체가 접지된 물체에 접촉 시 전압을 거의 0 V로 나타냈다. 이때 발생하는 방전전류(I_s)는 그림 4와 같이 나타났으며, 방전시간은 5 μ s 시간 이내에 방전되었고, 계산값은 최대 140 mA, 측정값은 최대 176 mA로 나타났다. 측정 시 접촉저항의 오차로 인해 계산된 방전전류에서 차이가 발생하였다.

인체와 대지 간 접촉저항(R_E)이 낮은 경우 방전전류(I_s)를 그림 5에서 확인할 수 있으며, 계산값은 1.1 A, 측정값은 2.7 A으로 나타났다. 전압위상에 따른 스위치 접촉 시작시간에 따라 방전전류의 최대 크기에서 차이가 발생하였지만, 모두 1 μ s 이내로 빠르게 방전되었다. 해당 결과



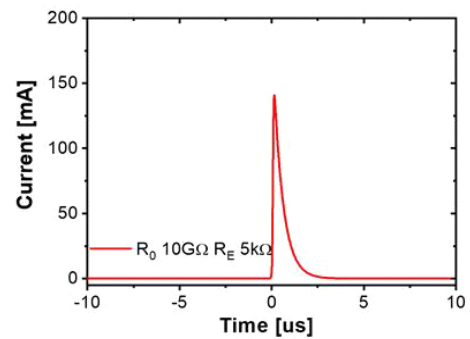
(a) 계산값
(a) Simulation result



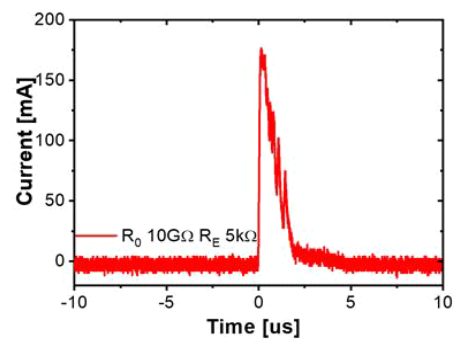
(b) 측정값
(b) Measurement result

그림 3. 가공전선로 직하에서 인체가 접지구조물 접촉 시 전압, $R_0=10$ G Ω , $R_E=5$ k Ω

Fig. 3. Contact voltage when the human body touches the grounding structure under the overhead power line, $R_0=10$ G Ω , $R_E=5$ k Ω .



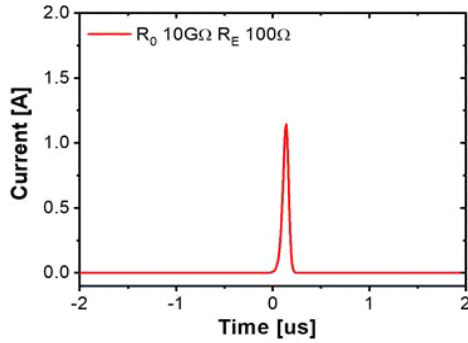
(a) 계산값
(a) Simulation result



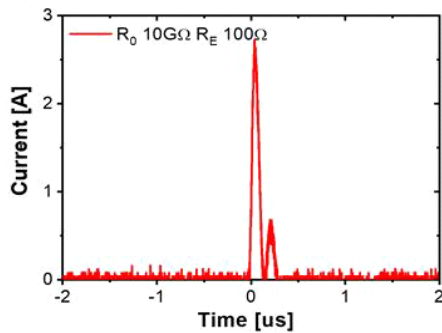
(b) 측정값
(b) Measurement result

그림 4. 가공전선로 직하에서 인체가 접지구조물 접촉 시 전류, $R_0=10$ G Ω , $R_E=5$ k Ω

Fig. 4. Contact current when the human body touches the grounding structure under the overhead power line, $R_0=10$ G Ω , $R_E=5$ k Ω .



(a) 계산값
(a) Simulation result



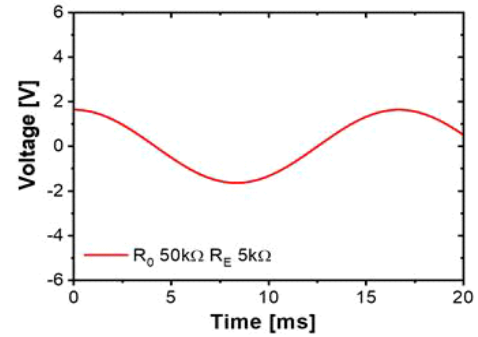
(b) 측정값
(b) Measurement result

그림 5. 가공전선로 직하에서 인체가 접지구조물 접촉 시 전류, $R_0=10\text{ G}\Omega$, $R_E=100\text{ }\Omega$

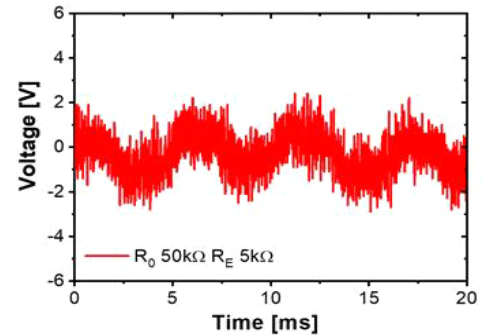
Fig. 5. Contact current when the human body touches the grounding structure under the overhead power line, $R_0=10\text{ G}\Omega$, $R_E=100\text{ }\Omega$.

를 그림 4와 비교하면 인체가 주변 접지된 구조물을 접촉하는 경우 R_E 에 따라서 방전전류의 최대값과 형태가 다르게 나타났으며, R_E 가 작을수록 피크치는 커지고 파형의 지속시간이 짧아졌다. 4.0 kV/m 전계에 노출된 인체가 주변 접지물을 접촉 시 발생하는 방전전류는 통전시간이 매우 짧기 때문에(1 ms 이하) 상황에 따라서 접촉 시 방전에 의한 약간의 놀람 또는 불쾌감을 인체가 느낄 수 있지만, 인체에 감전사고를 유발할 수 있는 값은 아니다^[9].

비가 오는 경우, 일반인 또는 작업자가 선로 직하에서 절연화를 신어도 인체와 접지 간의 저항(R_0)은 물 때문에 작게 된다. 또한 도전화를 착용하여 R_0 가 작게 되면 정전 유도전압은 낮게 나타나며, 해당 결과는 그림 6에서 확인



(a) 계산값
(a) Simulation result



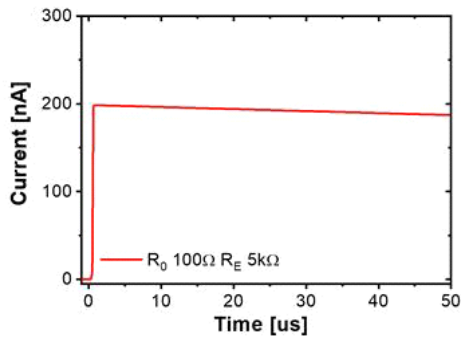
(b) 측정값
(b) Measurement result

그림 6. 가공전선로 직하에서 도전화 착용 시 정전유도 전압, $R_0=50\text{ k}\Omega$, $R_E=5\text{ k}\Omega$

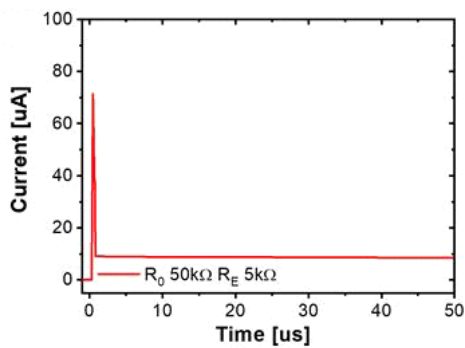
Fig. 6. Induced voltage when wearing conductive shoes under the overhead power line, $R_0=50\text{ k}\Omega$, $R_E=5\text{ k}\Omega$.

할 수 있다. 도전화를 신는 경우 유도전압(V_N)에 대한 영향은 매우 작아졌지만, 실제 현장에서는 감전의 위험을 차단하기 위해 적정 수준의 절연화를 착용해야 한다. 인체와 접지 간의 저항의 변화에 따라 유도되는 전류 변화는 그림 7에서 확인할 수 있다. 인체가 주변 접지된 구조물을 접촉하는 경우 R_0 가 커질수록 최대값은 증가하고 파형의 지속시간이 짧아졌다.

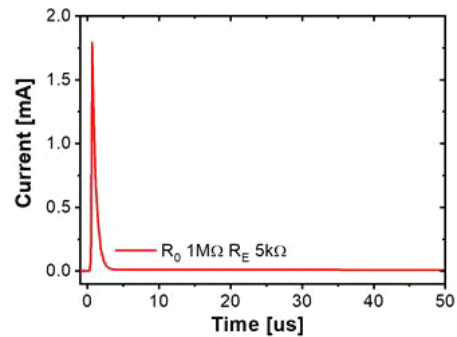
가공전선로 주변의 전계를 저감하기 위해 차폐선의 설치위치 및 방법에 대해서 검토하였다. 설치위치는 직하 또는 설치가 용이한 급전선 지지 첩탑에 설치하는 방안을 검토하고, 차폐선 2조 또는 3조를 설치 시 저감효과를 검토하였다. 전기장 시뮬레이션은 자체 개발한 맥스웰 방정식(Maxwell's equation)의 적분형태에 기반한 모멘트법



(a) $R_0=100\ \Omega$



(b) $R_0=50\ k\Omega$



(c) $R_0=1\ M\Omega$

그림 7. 가공전선로 직하에서 인체와 접지간의 저항의 변화에 따른 유도전류, $R_E=5\ k\Omega$.

Fig. 7. Induced current due to change in resistance between human body and ground under the overhead power line, $R_E=5\ k\Omega$.

(method of moments)을 사용하여 수치해석하였다. 그림 8과 그림 9에서와 같이 차폐선 3조 설치 시 차폐선이 없는 경우 대비 약 40 % 차폐효과가 있다.

▷계산조건

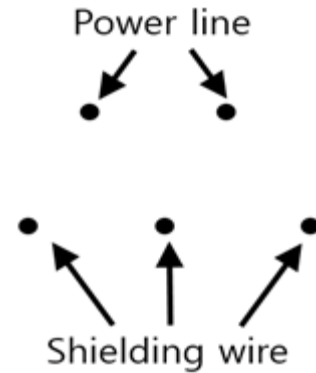


그림 8. 차폐선 설치 모식도

Fig. 8. Schematic of shielding wire installation.

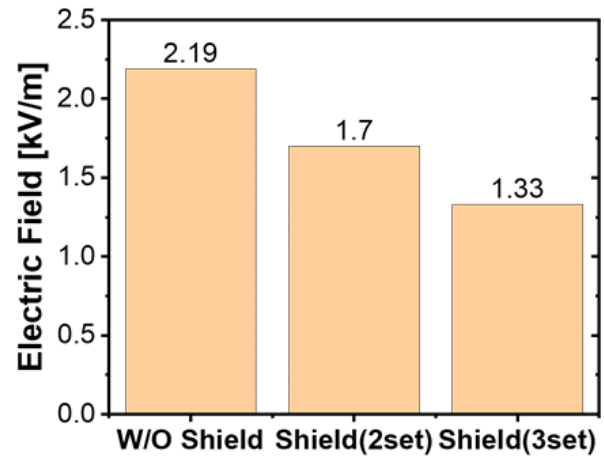


그림 9. 차폐선 설치에 따른 가공전선로 직하 전계값

Fig. 9. Electric field value directly under the overhead power lines according to the installation of the shielding wire.

- 측정지점 높이: 지상 1 m ▪ 급전선 높이: 5 m
- 급전선 간 거리: 4.4 m
- 급전선 전압: 27.5 kV_{rms}(단상)
- 급전선 개수: 2 ▪ 차폐선 직경: 2 mm
- 차폐선 높이: 3 m ▪ 차폐선 위치: 급전선 직하

III. 결 론

인체가 가공전선로 하단에 위치하는 경우, 접지된 물체에 접촉시 절연장갑 및 절연화 유무에 따라 인체에 가

해지는 영향에 대해서 비교하였다.

- (1) 4 kV/m 전계에 노출 시 절연화를 착용한 작업자에게 발생되는 정전유도전압은 약 900 V로 나타났으며 이때 인체가 주변 접지된 구조물을 접촉하는 경우, 방전에 의한 약간의 놀람 또는 불쾌감을 작업자가 느낄 수 있지만, 인체에 감전사고를 유발할 수 있는 값은 아니다.
- (2) 작업자가 절연화를 착용하고 비가 오는 경우 작업시, 작업자와 접지간의 저항은 물 때문에 감소한다. 또한 도전화를 착용하여 인체와 접지간의 저항이 감소하면 정전유도전압도 매우 작게 나타난다.
- (3) 가공전선로 주변의 전계를 저감하기 위한 방법으로 차폐선을 선로 직하에 설치하는 것이 가장 전계를 저감하는 방법이며, 차폐선을 추가로 선로 직하의 수평방향으로 설치하면 전계가 저감될 수 있다.

References

- [1] D. Wang, T. Lu, X. Li, B. Chen, X. Li, and L. Xie, et al., "Simulation and analysis of human body micro-shocks in the ion flow field near HVDC transmission lines," *Journal of Electrostatics*, vol. 93, pp. 10-16, Jun. 2018.
- [2] W. Pan, S. Miu, G. Yu, T. Wu, and B. Zhang, "Measurement and simulation of induced voltage and current on 110 KV crossing transmission lines under UHV AC transmission line," *Energy and Power Engineering*, vol. 9, no. 4B, pp. 635-643, Apr. 2017.
- [3] C. Wang, X. Liang, and E. Adajar, "Evaluation and mitigation of electromagnetic interference between railways and nearby power lines: A review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 149609-149618, Nov. 2021.
- [4] *Article 17 of the Electrical Equipment Technology Standards(Prevention of Inductive Disability)*, Notice No. 2014-25, Dec. 2014.
- [5] *Design Standard for Transmission Line Ground Clearance*, DS-1020, 2013.
- [6] J. D. Tranen, G. L. Wilson, "Electrostatically induced voltages and currents on conducting objects under EHV transmission lines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 90, no. 2, pp. 768-776, Mar. 1971.
- [7] J. P. Reilly, W. D. Larkin, "Human sensitivity to electric shock induced by power-frequency electric fields," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 221-232, Aug. 1987.
- [8] Electric Power Research Institute, *Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above*, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute, 1982.
- [9] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields(1 Hz to 100 kHz)," *Health Physics*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, Dec. 2010.

우 정 민 [한국전기연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3604-3147>



2011년 2월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)

2013년 8월: 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학석사)

2016년 8월: 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 (공학박사)

2016년 7월~현재: 한국전기연구원 전기기기연구본부 전기환경연구센터 선임연구원

[주 관심분야] EMP 대책 설계, HVDC 전기환경, 초고주파공학, 메타물질, 화합물반도체, 센서공학, 정전기

강 성 만 [한국전기연구원/센터장]

<https://orcid.org/0000-0001-8203-8042>



1998년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)

2004년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학박사)

2010년~현재: 한국전기연구원 전기기기연구본부 전기환경연구센터 센터장

[주 관심분야] LPS(Lightning Protection

System), HPEMP(High Power Electromagnetic Pulse), MVDC (Medium Voltage Direct Current)

주 문 노 [한국전기연구원/본부장]

<https://orcid.org/0000-0002-3782-1828>



1994년 2월: 인하대학교 환경공학과 (공학사)

1996년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학석사)

2007년 2월: 한국해양대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)

1996년~현재: 한국전기연구원 전기기기

연구본부 본부장

[주 관심분야] 초고압 전력설비의 친환경설계기술