

전기 안전을 위한 개별 접지시스템에 관한 연구

A Study on the Individual Ground System for Electrical Safety

양태승¹ · 어익수²

Tae-Seung Yang^{1*} · Ik-Soo Eo²

요 지

본 논문은 생산설비 회사에서 전기기계기구를 설치할 경우 전문가에 의한 전기설비 공사가 아닌 생산설비 제작 회사의 비전문가가 설치할 경우 발생할 수 있는 이상 접촉전압의 발생이나, 생산설비(전기설비의 금속제 외함)와 생산제품 사이에서 발생 가능한 충격과 전압의 원인으로 파악 되는 안전성 문제를 해결하기 위한 연구이다. 인체의 감전에 따른 2차 재해를 방지하기 위하여 이상 접촉전압의 원인을 분석하고 건축물의 개별 접지시스템과의 연계를 위해 접지 유무에 따른 대지 전압의 크기, 파형, 누설전류를 측정 분석 하였다. 그 결과 대지전압이 181.2V 누설 전류 21.9mA로 분석되어 교류(상용주파수 60Hz)에서 안전 전압 30V이하, 누설전류 값은 2mA이하 보다 높게 발생하였다. 이에 대한 대책으로 접지 시스템의 결정은 계절적 변화를 고려하여 접지봉을 설치하고 연속 접지가 아닌 개별 접지로 하였더니 대지전압은 0.2V 누설전류는 2mA이하로 감소되어, 감전으로 인한 재해를 방지할 수 있음이 확인되었다.

주요어: 접촉전압, 감전, 개별 접지시스템, 대지전압

Abstract

This paper is a study to solve the safety problem that ripples between the production equipment (metal ext. of electrical equipment) and the production product, or the occurrence of contact voltage that may occur when the non-professional of the production equipment production company, not the electrical equipment construction by professionals when installing the electro-mechanical equipment from the production equipment company. In order to prevent secondary disasters due to electric shock of the human body, the cause of the above contact voltage was analyzed and analyzed to measure the size, waveform, leakage current of the earth voltage according to the ground or not for the connection with the individual grounding system of the building.

As a result, the earth voltage is analyzed to 181.2V leakage current 21.9mA ac (commercial frequency 60Hz) at a safety voltage of 30V or less, the leakage current value was generated higher than 2mA or less. In response, the decision of the grounding system is installed in consideration of the seasonal change and the ground voltage is 0.2V leakage current is reduced to 2mA or more, it was confirmed that it is possible to prevent disasters due to electric shock.

접수 2020년 11월 13일, 수정 2020년 12월 11일, 게재확정 2020년 12월 17일

¹ 호남대학교 대학원 전기공학과 석사과정, Dept. of Elect, Honam Univ.

² 호남대학교 전기공학과, Dept. of Elect, Honam Univ.

* 교신저자 Corresponding author (ts2945@hanmail.net)

Key words: Touch voltage, Electric shock, individual ground system, Earth voltage

1. 서론

감전이란 절연 파괴 되고 있는 전기기계 기구 금속제 외함이나 전기(전류)가 흐르고 있는 충전부에 인체가 접촉하였을 때 전류가 인체를 통하여 대지로 흐르는 현상을 말한다. 절연 파괴 되어 전기가 흐르고 있는 물체나 전기기계 기구의 충전부에 사람이 접촉하였을 경우, 전류가 인체를 통과하는 정도(전류크기 I 와 통과시간 t)에 따라 화상, 호흡곤란 근육수축, 심장박동정지 등으로 부상을 입거나 사망하게 된다.

전기 안전 공사 전기재해 분석에 의하면 충전부 직접접촉에 의한 전기 재해 사고가 전체 감전사고의 48.8%이었으며, 아크에 감전 사고는 38.4%, 누전에 의한 감전 사고는 5.7%이었다.

산업현장 전기설비 관리 현황 직업별로 감전사고가 가장 많이 발생한 직종은 전기 기술자로 전체 감전사상자의 37.4%가 발생하였으며, 생산직의 경우는 감전사상자가 발생하여 전체의 6.7%를 점유하였고, 기계 설비종사자는 10.6%를 점유하였다[3].

전기설비의 전위 상승은 접지계통에 고장 전류가 흐를 때 발생 된다. 전위 상승을 억제하기 위해서는 옴의 법칙에($V=IR$)의해 결

정되는 고장전류, 접지계통의 전기저항을 저하시킴으로서 전위 상승을 억제할 수 있다. 즉, 인체에 위험이 없는 전위상승의 상한 값은 접지저항에 관계되므로 감전방지에 가장 기본적인 것이다.

접지는 전기 관련 설비기기(전기·전자·통신 기기 또는 설비)들과 대지 사이에 확실한 전기적 접속을 실현하려는 기술로 전기 관련 설비 기기에 부착된 금속 등의 도전성 물체를 대지와 전기적으로 접속하여 접지된 설비와 대지를 등전위화 시키거나 전위차를 최소화시키는 것이다[2].

2. 인체 특성 및 위험전압 발생 유형

2.1 인체의 전기적 특성

인체의 감전 시 그 위험도가 비교적 일치하고 있는 사항은 통전전류의 크기 통전시간 통전경로 전원의 종류 등이 있다. 그리고 인체에, 대한 전격의 영향은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 첫째는 전기신호가 신경과 근육을 자극해서 정상적인 기능을 저해하여 호흡정지 또는 심실 세동을 일으키는 현상이며 둘째는 전기에너지가 생체조직의 파괴 손상 등의 또는 구조적 손상을 일으키는 것이다.



<그림 1> 인체 임피던스 모형도

인체위험도는 인체에 흐르는 전류가 심장에 근접 했을때 위험도 1.5로 가장 높게 나타나면 심장에서 멀어질수록 위험도는 낮아지게 된다.

인체저항 (건조한 경우, 젖은 경우)은 손

에서 발로의 통전경로에 대한 인체 총 임피던스(Z)는 손에서 손으로의 경로에 대한 임피던스 보다는 다소 작다는 것을 나타내며, 생체에 대한 $Z \cdot t$ (Z :인체 임피던스, t :통전시간)의 값은 0.1초 동안의 통전전류에 해당하

는 값이다. 더 긴 통전 시간에 대한 Z_{st} 값은 감소할 수 있으며 (10~20%), 피부조직이 파열된 후의 Z_{st} 는 인체 내부임피던스에 근접 한다[2].

인체 임피던스<그림 1>에 의하여 발생하는 전압에는 위험 전압과 안전 전압이 있다.

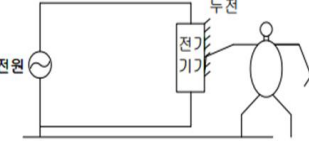
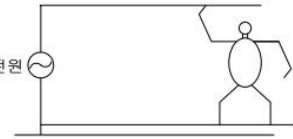
가. 위험전압 : 전원과 인체가 접촉함으로써 인체에 인가되는 전압 (접촉전압, 보폭전압)

나. 안전전압 : 인체에 접촉되어도 안전한 전압의 크기 (국내 30V이하)

<표 1> 인체위험도 [1]

통 전 경 로	위 험 도
왼손 - 가슴	1.5
오른손- 가슴	1.3
외손 - 한발 또는 양발	1.0
양손 - 양발	1.0
오른손 - 한발 또는 양발	0.8
한손 또는 양손 - 앉아있는 자리	0.7
왼손 - 등	0.7
왼손 - 오른손	0.4
오른손 - 등	0.3

<표 2> 인체의 감전 형태 [1]

형태별	세부사항	진행도
충전선로에 인체가 접촉되는 경우	일반적인 작업 중에 발생하는 대부분의 사고	
누전된 전기기기에 인체가 접촉되는 경우	절연불량 전기기기 등에 인체가 접촉되어 발생하는 경우 절연저하 전기설비가 시설된 금속 구조물 등에 인체가 접촉되어 발생하는 경우	
인체회로가 일부회로를 형성하는 경우	전압이 걸려 있는 두 도체 사이에 직접 또는 도전성 물체를 통하여 접촉될 경우 (AC 아크용접기 등)	

2.2 생산설비에서 위험전압 발생유형

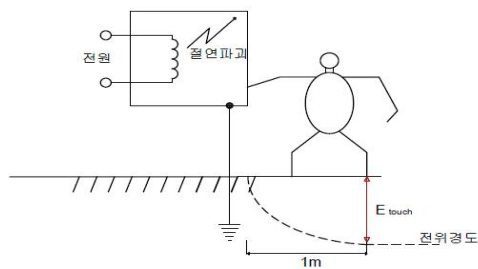
접촉전압(Touch voltage)은 접지를 한 구

조물에 고장전류가 흘렀을 때 접지전극 근처에 전위가 생긴다. 이 때 근처에 있는 인체가

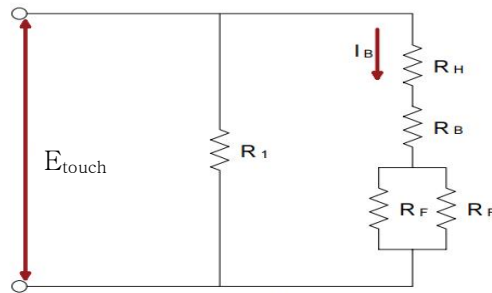
<그림 2 a> 와 같이 금속 구조물에 접촉했을 때의 전위차를 접촉전압(E_{touch}) 이라 한다. 이 전위차는 접지전류와 전극근처의 접지, R_1 의 곱으로 나타낸다. 인체가 금속 구조물에 접촉했을 때 인체에는 전류 I_B 이 흐른다. 이 상태를 등가회로로 나타내면 <그림 2 b>와 같다. 인체 내부저항 R_B , 손의 접촉저항 R_H , 다리의 접촉저항을 R_F 라 하면 접촉전압은 다음 (식 2)와 같이 된다. IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)의 정의에 의하면 접촉전압은 금속 구조물과 대지면의 거리 1m 의 전위차이다.

제1종은 인체의 대부분이 수중에 있는 상태로 허용 접촉전압이 2.5V 이하 이며, 이 탈전류기준은 5mA 이하이고, 인체임피던스는

500Ω 이다. 제2종은 인체가 심하게 젖은 상태 or 금속체의 전기기계장치나 구조물에 인체의 일부가 항상 닿아 있는 상태를 말하며 허용 접촉전압은 25V이하이며, 심실 세동 전류 기준 50mA 이하이고, 인체임피던스는 500Ω 이다. 제3종은 제1,2종 이외의 경우로 보통의 인체상태에서 접촉전압이 가해지면 위험성이 높은 상태를 말하며 허용 접촉전압은 50V 이하이며, 심실 세동 전류 기준 50mA 이하이고, 인체임피던스는 1000Ω 이다. 제4종은 제1,2종 이외의 경우로 보통의 인체상태에서 접촉전압이 가해지면 위험성이 적은 상태 이며 접촉전압이 가해질 우려가 없는 경우 상태를 말한다[6].



(a) 접촉전압 표현도



(b) 등가회로

<그림 2> 접촉전압 및 등가회로

R_1 : 구조물로부터 거리 1m 지점인 대지면 간의 저항

R_H 손과 구조물의 접촉저항

R_B : 인체저항 보통 1,000Ω 으로 간주함

R_F : 한쪽 발과 대지와와의 접촉저항

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t}} A \quad I_B \text{ 허용인체통과전류}$$

(단, 체중50kg)

(1)

$$E_{T50} = \frac{0.116}{\sqrt{T}} (R_H + R_B + \frac{R_F}{2}) \quad (2)$$

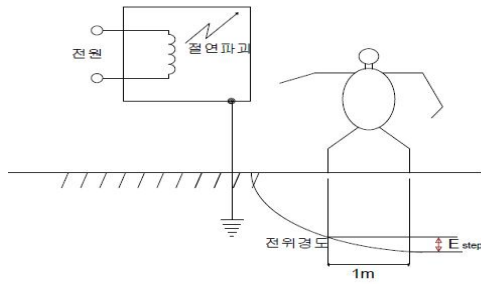
만약 0.5초 이내 차단 시 접촉전압 한계 값은 아래 (식 3)과 같이 계산된다.

$$E_{T50} = R I_B = 1000 \times \frac{0.116}{\sqrt{T}} = 1000 \times \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 164 V$$

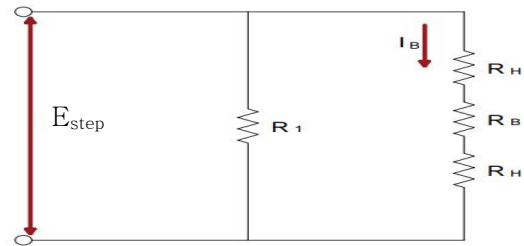
(3)

E_{touch} : 구조물과 대지면의 거리 1m인 점간의 전위차

보폭전압(Step voltage)은 접지된 철구에 사고(뇌격)전류 유입시 접지극 부근의 지표면 상에서 인체의 양발사이에 걸리는 2점간의(1m 기준)의 전위차를 말한다[6]



(b) 보폭전압 표현도



(b) 보폭전압 등가회로

<그림 3> 보폭전압 및 등가회로

그림에서 보폭전압을 계산하면 (식 4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{step} = IR = I_B(R_B + 2R_F) = \frac{0.116}{\sqrt{T}}(R_B + 2R_F) = 1,000 + 6C_S(h_s)\rho_s \frac{0.116}{\sqrt{T}} \quad (4)$$

차을 (식 5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_m = K_m K_i \rho \frac{I}{L} \quad (5)$$

R1: 대지면의 거리 1m 인 점간의

대지저항

Cs: 감쇠계수 ≤ 1.0

ρ_s :: 자갈층의 저항률

h_s :: 자갈층의 두께

메쉬 전압 E_m : 망상접지 전극에서 하나의
메쉬에서의 최대 전위와 최소 전위의 전위

K_m : 메쉬전압 계수

L: 메설 메쉬의 길이

K_i : 전류 불규칙 보정계수

<표 3> 통상적인 허용 접촉전압 한계

허용 접촉전압 구분	정상운전	단일고장	이중고장
1종	2.5 V	2.5 V	16 V a.c 35 V d.c
2종	16 V a.c 35 V d.c	33 V a.c 70 V d.c**	적용불가
3종	33 V a.c* 79 V d.c**	55 V a.c 140 V d.c**	적용불가
4종	제한 없음		

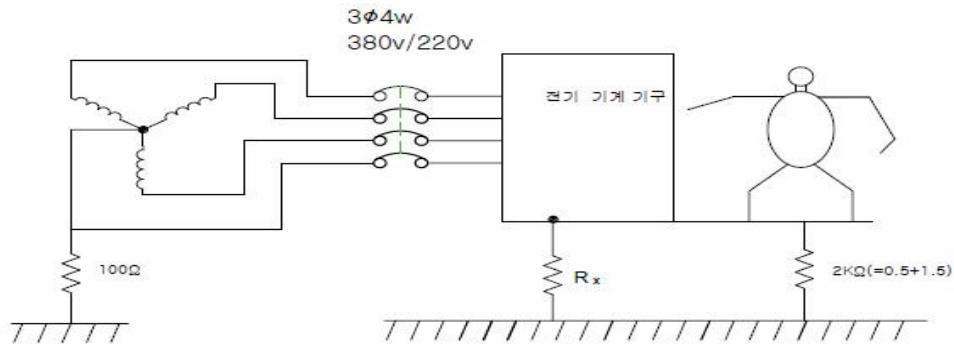
* E_t =인체 임피던스 ×인체 통과전류 ×경로별 심실세동 계수

** 접촉면적 1cm 미만의 잡을 수 없는 부분에 대해서 각각 66V 및 80V 로 상향

2.3 현장설비의 이상접촉전압 이론적 계산 고찰 [5].

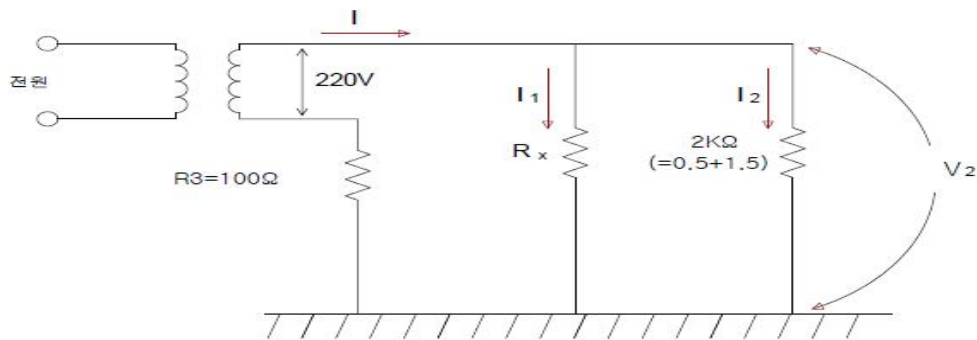
소규모 생산설비는 저압 전기 설비로서

보폭 전압에 의한 감전 현상 보다는 접촉 전압에 의한 전기 재해가 대부분을 차지하고 있다.



<그림 4> 접촉전압발생 현장 구성도

설비환경: 지락 접지저항 500Ω, 외함 과 손의 접촉저항 1500Ω, 인체저항 500Ω



<그림 5> 접촉전압발생 등가 회로도

$$I_2 = \frac{R_x}{R_x + 2000} \times I = \frac{R_x}{R_x + 2000} \times \frac{220}{100 + \frac{R_x \times 2000}{R_x + 2000}} = 15 \times 10^{-3} A \quad (6)$$

$$\text{접촉전압 } V_2 = I_2 \times 2000 = 15 \times 10^{-3} \times 2000 = 30 V \quad (7)$$

전압220V 환경에서 인체가 완전히 젖은 상태 500Ω인 경우 누전차단기 정격동작전류 30mA, 정격 동작시간 0.03초가 인체보호가능 여부를 아래와 같은 (식 8)이 된다.

$$I = \frac{220}{500} = 440mA \quad (8)$$

(식 8) 에서 누전차단기 동작시간 0.03초 이면 인체통과전류 $I=0.44 \times 0.33=13.2mA$ 초과됨을 알 수 있으며 외함을 100Ω으로 접지를 하면 인체통과전류로 (식 9)의 값은 이탈전류로 안정하다.

$$I = 30 \times \frac{100}{500 + 100} = 5mA \quad (9)$$

3 사례 결과 및 고찰

3.1 문제 의 원인

일부 생산설비(전기설비 금속제 외함)와 인체 접촉시 감전사고 발생하고 기기와 생산제품(동 파이프) 간에 충격과 전압 유발

및 계절에 따른 접지 저항값의 변동에 따른 기준 전위의 불안정, 전기설비의 절연저하, 전력 전자소자의 발전에 따른 용량성 누설 전류의 증가, 이동용 기계기구 사용에 의한 접지시스템 미적용등이 이상접촉 전압발생의 원인이다.

3.2 조사 내용

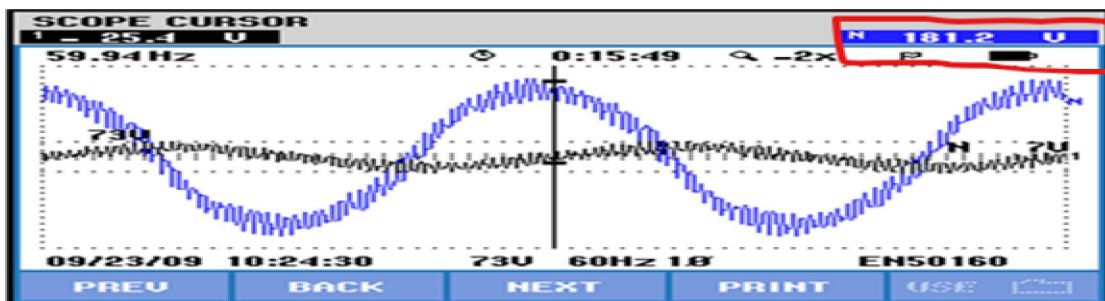
절연저항 측정결과 0.386MΩ 으로 전기설비 기술기준 사용전압 400V이하는 0.3MΩ으로 적합 하고, 대지전압측정은 <그림 6>과 같이 위험전압 발생하였고, 접지 저항값 측

정결과는 103 Ω으로 전기설비 기술기준 제3종 접지 저항값 기준 100Ω을 초과하여 부적합하다.

대지 저항률은 계절적 영향이 매우커서 여름은 낮고 겨울은 높아 두 개월 사이는 약 2배의 변동이 생긴다.

1) 정현파 + 리플 전압 발생: 181.2V 발생

2) 각 기기간에 위상차로 인하여 전위차 심화 발생 및 기기 1대당누설전류 약 7mA 발생으로 총 4대의 기기 21.9mA 측정됨.

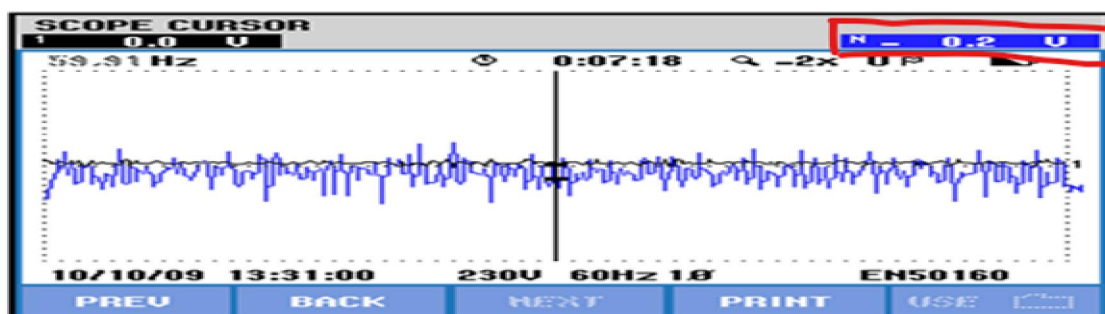


<그림 6> 접지시스템 개선 전 전력분석

3.3 측정 분석

생산설비 외함에 이상대지 전압 발생원인은 전력파형분석 결과 정현파 181.2V와 다량의 Ripple전압이 존재하며 누설전류 약 7mA 발생하는 것으로 보아 생산설비 내부 SMPS, 전

력제어소자, 인버터 등에서 발생하는 Noise 성분이 대지로 By-Pass되어 접지저항 값이 불량한 기기 외함에 충전되는 것으로 판단되며 이상 접촉전압 방지를 위한 접지계통 보완이 요구된다



<그림 7> 접지시스템 개선 후 전력분석

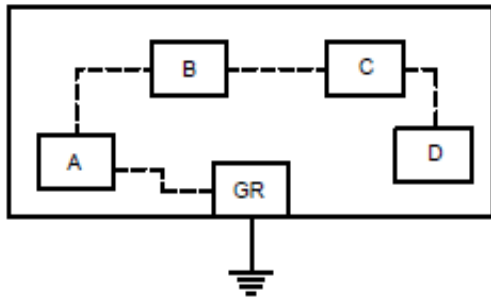
3.4 현장 문제 해소 방안

소규모 임대설비 에서는 접지시스템의 연접실시와 접지선의 부적절한 굵기 선정 전

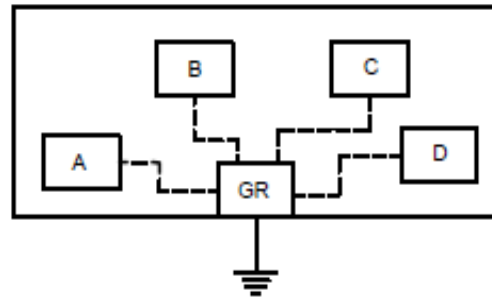
력 전자소자의 용량성 누설전류에 의하여 설비 간 순환전류 및 제품 설비사이의 전위차 발생으로 인체가 접촉 했을 때 감전현상

이 발생하였음을 알 수 있었고 접지시스템 개선 후 전력을 분석한 경우 대지전압은<그림 7>과 같이 0.2V로 저하되어 설비 간 순

환전류 및 누설전류가 발생되지 않았다. <그림 8>은 접지시스템 개선전후 비교 도면



(a) 개선 전 (연속접지)



(b) 개선 후 (개별접지)

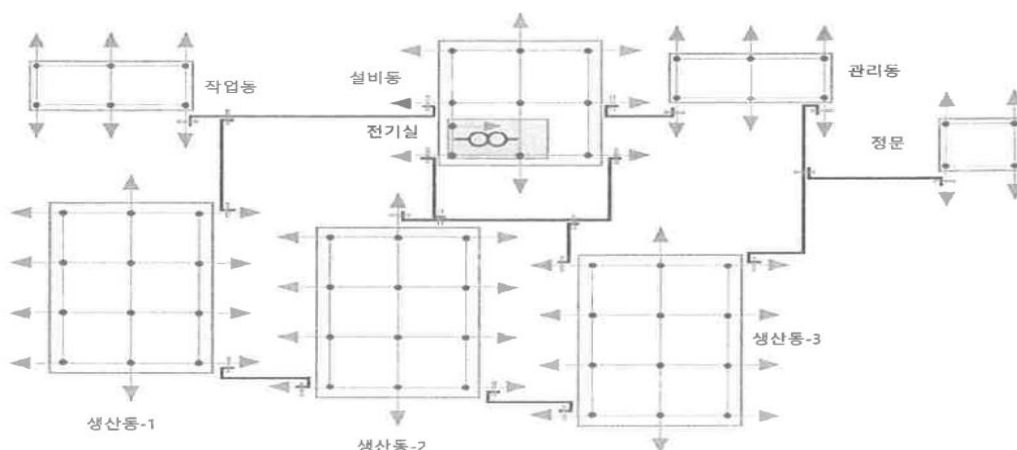
<그림 8> 접지시스템 개선 전후 비교

설비 간 순환전류와 인체의 감전방지를 위한 방안으로는 누설전류 증가의 원인은 제품 생산 기기의 연접에 의하여 순환전류가 중첩 증가됨으로 기기 간 연접이 아닌 접지 센터를 이용하여 접지한다.

기기 접지 센터 간 최소접지선 굵기의 산정은 다음과 같은 계산식에 의하여 선정하고 $A=0.0496I_n \text{ mm}^2$ (I_n :과전류 차단기 정격전류) 접지 저항값 최소 100Ω 이하 유지하며 (계절 영향 대비 동절기 기준) 건축물

설계부터 정밀기기 기준전위 안정을 위하여 건축물을 Mesh 접지하고 각 철골 구조에 접지 센터 마련 임대를 고려한 구획별 접지 시스템 구축한다.

저압전기 설비를 TN-S 계통이용 과전류 차단기로 지락 보호함으로 기기의 단독 접지가 아닌 계통과 연계된 접지 시스템을 적용하거나 KS C IEC 61936-1에 의한 글로벌(Global Earthing System)접지시스템 <그림 9>를 적용한다.[4]



<그림 9> 산업 시설물 글로벌 접지(GES) 예시도 - KECG1703-2019

KECG : Korea Electro-technical Committee Guidance

4. 결론

본 논문은 자가용 전기 설비가 아닌 일반 용 전기설비에서 제품생산을 위한 전기기계 기구를 설치하는 경우 전문가의 전기설비 공사가 아닌 생산 기계 설치 회사의 납품과 설치에 따른 이상접촉전압의 발생과 생산설비(전기설비 금속제 외함)와 생산 제품 사이에 충격과 전압 발생 및 인체의 감전에 따른 2차 재해를 줄이기 위하여 이상 접촉 전압의 원인을 파악하고 건축물의 접지시스템과의 연계 방안을 사례 조사를 통하여 도출하였다.

연속 접지가 아닌 접지센터를 이용한 개별 접지를 통하여 이상 접촉전압 및 누설전류를 감소시킴으로 감전 재해를 방지 할 수 있었다.

보호접지의 목적은 고장 시 감전에 대한 보호로 각 기기의 한 점 또는 여러 점을 접지하는 것을 말한다. 국내 접지규정에는 접지시스템에 직접 관련된 접지극, 접지도체, 보호도체, 감전보호용 등전위 본딩 등에 대해 규정하고 있으며 보호접지에 대한 별도의 상세한 규정은 없다.

KEC(Korea Electro-technical Code) 보호 접지는 계통접지 방식인 TN(Terra Neutra) TT(Terra Terra) 및 IT(Impedance Terra) 접지계통에 따른 사고 시 32A 이하 분기회로의 차단시간, 고장전류 차단시간, 인체의 허용접촉전압에 따른 기준이 적용되고 있다.

건축물에서 국내 접지규정은 2021년부터 기존의 제1종, 제2종, 제3종, 특별 제3종 접지공사 및 접지 저항값이 폐지되고 단지 단독접지, 공통접지, 통합접지로 적용될 예정으로 KEC 접지 저항값 기준은 고압이상 및 공통 접지는 접촉전압(보폭전압) $\leq$ 허용 접촉전압, 특고압과 혼촉 방지시설 및

피뢰기는 10Ω 이하, 변압기 중성점접지는 1선 지락전류 계산식에 의하고, 저압은 접촉전압 및 스트레스 전압을 만족해야 하며 저압계통 보호접지 개념으로 감전 보호를 만족 하여야 한다. 그러므로 재해를 감소시키기 위해서는 건축물의 설계 초기부터 개별 접지시스템 및 구조체 접지, 또는 국제기준의 글로벌 접지 시스템을 적용 설계가 필요하고, 또한 접지저항은 계절적 영향을 받기 때문에 기술기준에서 정하는 저항값 이하로 설계, 시공 하여야 한다. 더불어 생산 설비 전기 안전에 관한 패러다임도 변화가 필요하다.

전기는 눈에 보이지 않기 때문에 예방이 최우선이고, 예방의 경제성이 사고 후의 경제적 손실보다 대단히 적기 때문에 사전에 전기재해가 발생하지 않도록 전기 안전 관리 시스템을 개발하여 전기 재해를 예방하고 빠른 대처로 경제적 손실 및 안전사고에 대한 위험성을 최소화해야 한다.

참고문헌

- 1) 대한전기협회. 2019. KECG1703-2019, 접지시스템설계방법에 관한 기술지침, p3-13.
- 2) 송영길. 2016. 송전공학, 동일출판사, p585-586.
- 3) 이국찬. 2017. 마스터 발송배전 기술사, 엔티미디어, p779-789.
- 4) 임근하. 2010. 전기안전을 위한 대학교실협실에서의 접지시스템에 관한연구, 서울산업학교 산업대학원 석사학위 논문, p3-7.
- 5) 최용규외 3인. 2018. 최신 접지설비 설계, 성안당, p12-23.
- 6) 한국전기안전공사. 2020. 2019년도 전기 재해 통계분석, p44-48.