

# TN 및 TT 계통에서의 감전사고 분석 프로그램 개발

이석원<sup>\*</sup> · 류보혁 · 김형석 · 정원제

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원  
(2009. 7. 21. 접수 / 2009. 12. 14. 채택)

## The Development of the Analysis Program for the Electric Shock Accidents Occurred in the TN and TT System

Seokwon Lee<sup>\*</sup> · Bohyuk Ryu · Hyungseok Kim · Wonjae Jung

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

(Received July 21, 2009 / Accepted December 14, 2009)

**Abstract :** According to the statistics from the Ministry of labor, 70~80 people died by work-related electric shock accidents in the workplace and this number is about 10~20 times higher than those of the foreign countries such as Japan and the United Kingdom in frequencies and rates per 100,000. The electrocution deaths had decreased from several hundred in 1990s to 67 in 2002, since then there has been little change over the last 5 years. To reduce this number of the electrocution death, it is necessary to analyze the sources of the accidents and to implement the suitable measures for preventing the similar accidents from occurring. But there is not any consensus standard method or procedures for accident investigation yet. And the results solely depend on the ability of the investigator. Because of the demand of eliminating technical barrier for free trading, the IEC 60364 is adopted as a regulation for low voltage electrical installations in Korea. The facilities designed and constructed by IEC 60364 are increasing. The facilities by IEC 60364 have different features in comparison with the facilities by Korea eletro technical regulation, and these features combined with parameters of electric shock accident can greatly affect the consequences of the electric accidents. The accident analysis program for electric shock injuries in Terra Neutral(TN) and Terra Terra(TT) system was developed in this paper, which was based on KOSHA Electric Shock Analysis Program(ESAP).

**Key Words :** electric shock accident, accident investigation, TN system, TT system

### 1. 서론

노동부 현황 통계자료에 의하면, 감전으로 인한 업무상 사고로 인한 재해자는 대략 매년 70~80명 발생하고 있는데, 이는 일본, 영국 등 외국과 비교할 때, 감전사망 백만인율이 10~20배로 매우 높은 수준이다<sup>1-3)</sup>. 특히 사망자 수는 Fig. 1과 같이 '02년 67명으로 감소한 이후 약간 증가하여 답보 상태에 있다. 이러한 재해를 줄이기 위해서는 발생 원인을 정확하게 분석하고, 이에 따른 재해 예방대책을 강구하여 동종 또는 유사 재해의 재발을 방지하는 것이 필요하다. 하지만 아직까지 재해 예방의 기본이 되는 중대재해 조사에서 표준화된 절차 및 기법이 전무하며, 조사자 개인의 역량에만 의존하

는 실정이다.

또한 WTO/TBT 협정에 의거 국내 기술 표준인 KS의 IEC로의 부합화 및 국내 전기설비 기술기준에서의 IEC 60364 도입으로 인하여 향후 건축전기설비 분야에서의 많은 변화가 예측되고 있다. 성능

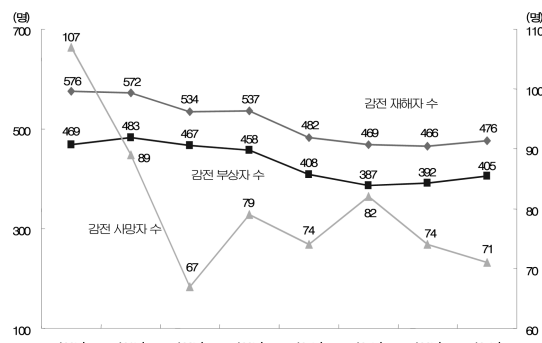


Fig. 1. Annual number of injuries by electric shock accident.

<sup>\*</sup> To whom correspondence should be addressed.  
lswon1@kosha.net

위주인 KS C IEC 60364에 의해 설계, 시공된 설비에서의 사고는 시방적인 성격의 기존 기술기준에 의한 설비와 상이한 특성을 가진다. 접지저항의 예를 들면 기존 기술기준의 경우 조건에 따라 고정된 값으로 규정되어 있으나, KS C IEC 60364의 경우 사고 발생시에도 사람에게 대한 유해가 없도록 접지저항을 갖도록 규정되어 있다. 이러한 차이점은 감전사고가 가지는 다른 많은 파라미터와 결합하여 감전사고의 결과에 많은 영향을 준다. 따라서 이 연구에서는 '06년 산업안전보건연구원에서 수행한 KOSHA ESAP(Electric Shock Analysis Program) 개발 연구에서 도출한 감전에 영향을 주는 파라미터를 바탕으로 TN 및 TT 계통에서 발생할 수 있는 감전사고를 분석하여, 사고 원인 및 대책을 수립할 수 있도록 감전사고 분석 프로그램'을 개발하고자 하였다<sup>4)</sup>.

## 2. 감전특성 및 인체에 영향을 주는 파라미터 도출

감전사고는 인체가 전위를 가진 부분에 접촉되어 회로의 일부가 됨으로써 발생한다. 전류가 인체를 통해 흐르면 에너지를 방출하고 인체에 열적 및 생리적 영향을 일으킨다. 이로 인한 인체의 상해 정도는 신체기관과 신체조직의 생리적 상태 및 통전전류의 특성 즉 전압, 통전시간, 주파수, 파형 및 통전경로와 같은 파라미터에 크게 영향을 받는다. 감전에 영향을 주는 파라미터는 감전 형태에 따라 크게 달라지게 되는데 본 연구에서는 KS C IEC 60479<sup>5)</sup>에 제시된 파라미터를 이용하여 프로그램을 개발하였다.

## 3. 감전사고시 접촉전압 및 통전전류 계산

### 3.1. 각 계통에서의 접촉전압 계산

전기설비는 전력계통의 접지와 노출도전부의 보호접지 형태에 따라 TN 및 TT계통으로 나뉘어진다<sup>6)</sup>. TN 계통은 보호도체 및 중성선 도체의 배치에 따라 TN-S, TN-C, TN-C-S 계통으로 나뉜다. 여기서 각 계통이름이 가지는 의미는 다음과 같다.

제 1문자는 전력계통과 대지의 관계

T : 한점을 대지에 직접 접속한다.

I : 모든 충전부를 대지로부터 절연시키거나 임피던스를 삽입 한점에 접속한다.

제 2문자는 설비의 노출도전부와 대지와의 관계

T : 노출 도전부를 전력계통의 접지와 별개로 직접 대지로 접속한다.

N : 노출 도전부를 전력계통의 접지점에 직접 연결한다.

그 다음 문자(해당시)는 중성선 및 보호도체와의 관계를 표시한다.

S : 보호도체와 중성선을 별도로 포설

C : 보호도체와 중성선을 겸용시킴

C-S : 보호도체와 중성선을 일부구간은 겸용 나머지 구간을 별도로 포설

계통내 기기의 절연 파괴 등으로 노출도전부에 전위가 나타날 때, 계통 종류에 따라 인체에 인가되는 접촉전압이 달라지는데, 본 프로그램에서는 TN 및 TT계통에서 고장상태시 인체가 접촉하는 경우를 아래와 같은 5가지 경우로 나누어서 인체에 인가되는 통전전압을 계산하였다<sup>7)</sup>.

- Case 1: 고장발생 노출도전부와 계통의 도전부간
- Case 2: 고장발생 노출도전부와 다른 회로의 기기의 노출도전부간
- Case 3: 고장발생 노출도전부와 동일 공급회로에 연결된 건전 기기의 노출도전부간
- Case 4: 고장발생 기기와 동일 공급회로에 연결된 건전 기기의 노출도전부와 계통의 도전부간
- Case 5: 고장발생 노출도전부와 대지간

### 3.1.1. TN-S 계통에서의 접촉전압

TN-S 계통은 Fig. 2와 같이 계통접지와 기기의 보호접지가 공통으로 되어 있으며, 기기 노출도전부는 중성선 도체와 별도로 포설된 보호도체로 연결되어 있다. TN-S 계통에서의 5가지 경우에 대한 접촉전압은 Table 1과 같게 된다. 사고시 통전경로

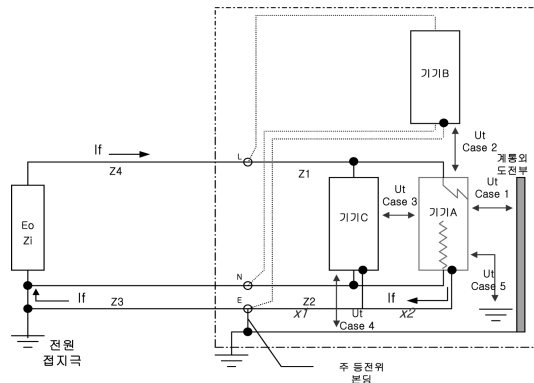


Fig. 2. TN-S system.

Table 1. Case by Touch voltages in TN-S system

| Case   | 접촉전압 $U_t$  |
|--------|---|
| Case 1 | $\frac{Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}$            |
| Case 2 | $\frac{Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}$            |
| Case 3 | $\frac{x_2 \times Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}$ |
| Case 4 | $\frac{x_1 \times Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}$ |
| Case 5 | $\frac{(Z_2 + Z_3) \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}$    |

의 경우 Case 1~Case 4는 손손, Case 5는 손발 경로가 주로 해당하게 된다.

여기서  $Z_1$ 은 인입점 이후 상도체의 임피던스,  $Z_2$ 는 주접지 단자 이후 보호도체의 임피던스,  $Z_3$ 는 전원 접지극에서 인입점 주접지 단자까지의 임피던스,  $Z_4$ 는 인입점 이전 전원선의 임피던스이다. 이 값은 통상 도체 단면적이  $35 \text{ mm}^2$  이하인 경우 임피던스가 아닌 저항 값을 사용할 수 있다.  $x_1$  및  $x_2$ 는 Fig. 2에서와 같이 기기 A와 기기 C의  $Z_2$ 에 대한 거리 비이다.

3.1.2. TN-C-S 계통에서의 접촉전압

TN-C-S 계통은 Fig. 3과 같이 계통접지와 기기의 보호접지가 공통으로 되어 있으며, 전원측 접지선은 중성선 도체와 공통인 PEN도체로 되어 있으나, 주접지 단자 이후에는 중성선과 별도로 포설된 보호도체가 기기의 노출도전부에 연결되어 있다. TN-C-S 계통에서의 5가지 경우에 대한 접촉전압은 Table 2와 같게 된다. 사고시 통전경로의 경우 Case 1~Case 4는 손손, Case 5는 손발 경로가 주로 해당하게 된다.

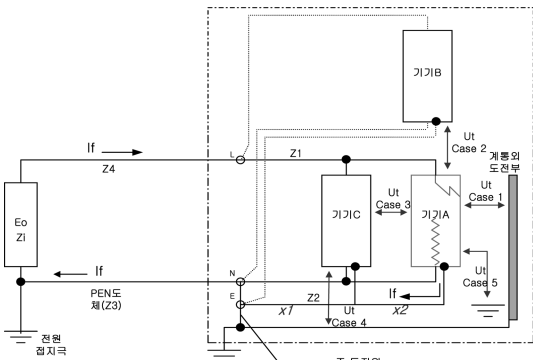


Fig. 3. TN-C-S system.

Table 2. Case by Touch voltages in TN-C-S system

| Case   | 접촉전압 $U_t$   |
|--------|--|
| Case 1 | $\frac{Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_{3(PEN)} + Z_4}$            |
| Case 2 | $\frac{Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_{3(PEN)} + Z_4}$            |
| Case 3 | $\frac{x_2 \times Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_{3(PEN)} + Z_4}$ |
| Case 4 | $\frac{x_1 \times Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_{3(PEN)} + Z_4}$ |
| Case 5 | $\frac{(Z_2 + Z_3) \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_{3(PEN)} + Z_4}$    |

여기서  $Z_1$ 은 인입점 이후 상도체의 임피던스,  $Z_2$ 는 주접지 단자 이후 보호도체의 임피던스,  $Z_{3(PEN)}$ 는 전원 접지극에서 인입점 주접지 단자까지의 PEN 도체의 임피던스,  $Z_4$ 는 인입점 이전 전원선의 임피던스이다. 이 값은 통상 도체 단면적이  $35 \text{ mm}^2$  이하인 경우 임피던스가 아닌 저항 값을 사용할 수 있다.  $x_1$  및  $x_2$ 는 Fig. 3에서와 같이 기기 A와 기기 C의  $Z_2$ 에 대한 거리 비이다.

3.1.3. TN-C 계통에서의 접촉전압

TN-C 계통은 Fig. 4와 같이 계통접지와 기기의 보호접지가 공통으로 되어 있으며, PEN 도체가 중성선 도체와 보호도체의 역할을 하고 있다. TN-C 계통에서의 5가지 경우에 대한 접촉전압은 Table 3과 같게 된다. 사고시 통전경로의 경우 Case 1~Case 4는 손손, Case 5는 손발 경로가 주로 해당하게 된다.

여기서  $Z_1$ 은 인입점 이후 상도체의 임피던스,  $Z_{2(PEN)}$ 은 주접지 단자 이후 PEN 도체의 임피던스,  $Z_{3(PEN)}$ 은 전원 접지극에서 인입점 주접지 단자까지의 PEN 도체의 임피던스,  $Z_4$ 는 인입점 이전 전원

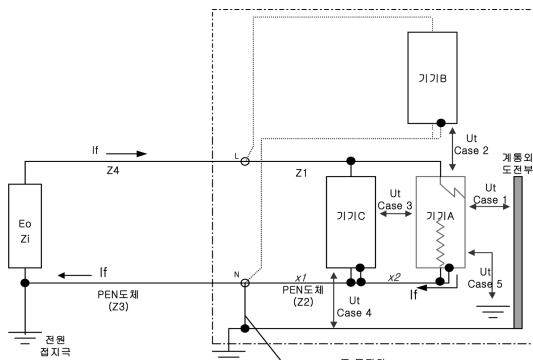


Fig. 4. TN-C system.

Table 3. Case by Touch voltages in TN-C system

| Case   | 접촉전압 UT   |
|--------|---|
| Case 1 | $\frac{Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2(PEN) + Z_3(PEN) + Z_4}$            |
| Case 2 | $\frac{Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2(PEN) + Z_3(PEN) + Z_4}$            |
| Case 3 | $\frac{x_2 \times Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2(PEN) + Z_3(PEN) + Z_4}$ |
| Case 4 | $\frac{x_1 \times Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2(PEN) + Z_3(PEN) + Z_4}$ |
| Case 5 | $\frac{(Z_2 + Z_3) \times E_o}{Z_1 + Z_2(PEN) + Z_3(PEN) + Z_4}$    |

선의 임피던스이다. 이 값은 통상 도체 단면적이 35 mm<sup>2</sup> 이하인 경우 임피던스가 아닌 저항 값을 사용할 수 있다. x<sub>1</sub> 및 x<sub>2</sub>는 Fig. 4에서와 같이 기기 A와 기기 C의 PEN 도체 Z<sub>2</sub>에 대한 거리 비이다.

3.1.4. TT 계통에서의 접촉전압

TT 계통은 Fig. 5와 같이 계통접지와 기기의 보호접지가 독립접지로 되어 있다. TT 계통에서의 5 가지 경우에 대한 접촉전압은 Table 4와 같게 된다.

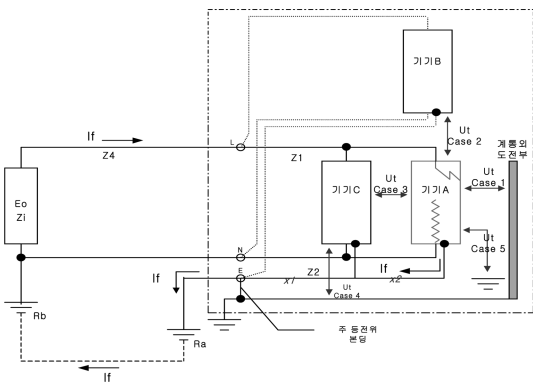


Fig. 5. TT system.

Table 4. Case by Touch voltages in TT system

| Case   | 접촉전압 UT   |
|--------|---|
| Case 1 | $\frac{Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_4 + R_a + R_b}$            |
| Case 2 | $\frac{Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_4 + R_a + R_b}$            |
| Case 3 | $\frac{x_2 \times Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_4 + R_a + R_b}$ |
| Case 4 | $\frac{x_1 \times Z_2 \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_4 + R_a + R_b}$ |
| Case 5 | $\frac{R_a \times E_o}{Z_1 + Z_2 + Z_4 + R_a + R_b}$            |

사고시 통전경로의 경우 Case 1~Case 4는 손-손, Case 5는 손-발 경로가 주로 해당하게 된다.

여기서 Z<sub>1</sub>은 인입점 이후 상도체의 임피던스, Z<sub>2</sub>는 주접지 단자 이후 보호도체의 임피던스, Z<sub>4</sub>는 인입점 이전 전원선의 임피던스이며, R<sub>b</sub>는 계통접지저항 값, R<sub>a</sub>는 기기접지 저항 값이다. 이 값은 통상 도체 단면적이 35 mm<sup>2</sup> 이하인 경우 임피던스가 아닌 저항 값을 사용할 수 있다. x<sub>1</sub> 및 x<sub>2</sub>는 Fig. 5에서와 같이 기기 A와 기기 C의 PEN 도체 Z<sub>2</sub>에 대한 거리 비이다.

3.2. 인체 임피던스 계산

인체 임피던스 값은 여러 요인에 의해 변하며, 특히 통전경로, 통전시간, 주파수, 피부의 습분정도, 접촉 면적과 주어진 압력 및 온도 등에 따라 변화하는데, 이번 개발 프로그램에서는 KS C IEC 60479-1의 인체 임피던스 값을 사용하였다.

Table 5. Formulas for total body impedance for a current path hand to hand, for a large surface areas of contact

| 접촉 상태 | 백분율 | 수식(Y = 총 인체 임피던스(Ω), X = 접촉전압), 결정계수 R <sup>2</sup> 값  |
|-------|-----|--|
| 건조    | 95% | Y=1050,8399.581965-113.0240547*X*0.9362769802*power(X,2)-0.004474393524*power(X,3)*1.249045923E-005*power(X,4)-2.008152074E-008*power(X,5)*1.720867543E-011*power(X,6)-6.080230287E-015*power(X,7), 0.999577 |
|       | 50% | Y=775,4310.267622-51.01477034*X*0.3604699317*power(X,2)-0.001339957848*power(X,3)*2.662868499E-006*power(X,4)-2.680993831E-009*power(X,5)*1.074304614E-012*power(X,6), 0.99966                               |
|       | 5%  | Y=2278,492037-25.41406002*X+0.1773996063*power(X,2)-0.0006353874061*power(X,3)+1.213222018E-006*power(X,4)-1.180484929E-009*power(X,5)+4.607640317E-013*power(X,6), 0.999352                                 |
| 습윤    | 95% | Y=4608.090091-21.13835331*X*0.0452820012*power(X,2)*1.248935305E-005*power(X,3)-2.387531349E-007*power(X,4)*3.971788534E-010*power(X,5)-2.096352818E-013*power(X,6), 0.999487                                |
|       | 50% | Y=775,2368.236829-7.46173707*X-0.00727888681*power(X,2)+0.0001695460724*power(X,3)-5.56687255E-007*power(X,4)+7.435835802E-010*power(X,5)-3.593033884E-013*power(X,6), 0.9993                                |
|       | 5%  | Y=575,1238.162073-2.233161705*X-0.01649415337*power(X,2)*0.0001518100019*power(X,3)-4.469281626E-007*power(X,4)*5.660941374E-010*power(X,5)-2.628552423E-013*power(X,6), 0.999318                            |
| 염분(땀) | 95% | Y=1774.105853-1.040799585*X-0.001327708359*power(X,2)+1.904305976E-006*power(X,3), 0.999231  |
|       | 50% | Y=1314.300603-0.7684411537*X-0.0009613705502*power(X,2)+1.364118375E-006*power(X,3), 0.9989  |
|       | 5%  | Y=958.3969121*0.5807999805*X-0.02467207654*power(X,2)*0.0001488887876*power(X,3)-3.931615993E-007*power(X,4)*4.761588576E-010*power(X,5)-2.158910282E-013*power(X,6), 0.999421                               |

KS C IEC 60479-1의 값은 살아있는 사람들에 대한 실험 측정치와 사체의 측정치를 이용하여, 다양한 접촉면적 및 접촉상태에서의 접촉전압에 대한 인체 임피던스 값이다. 개발 프로그램에서는 각 접촉면적 및 상태에서의 접촉전압에 대한 임피던스 값을 수식화하기 위해 Grapher 프로그램을 이용하여 통계적으로 curve fit하였다. 수식화된 Data의 신뢰도를 높이기 위해 결정계수인  $R^2$  값이 0.99 이상 이 되도록 Polynomial Degree 6으로 curve fit하였다.

Table 5, 6 및 7은 접촉면적 ‘대’, ‘중’ 및 ‘소’인 상태에서 각각 접촉상태 ‘건조’, ‘습윤’ 및 ‘염분(땀)’ 상태인 경우 95%, 50% 및 5% 백분위수의 손-손 경로의 임피던스를 구하는 수식 및  $R^2$ 값을 보여준다. Table 8은 손-손 경로의 임피던스 값을 이용하여, 손-손 경로 이외 경로의 임피던스 값 임피던스를 구하는 수식을 보여준다.

### 3.3. 인체 통전전류 계산

인체 통전 전류는 인체에 인가된 접촉전압에 비례하고, 통전경로 상에 위치한 인체 임피던스에 반비례한다. 개발 프로그램에서는 5%, 50%, 95% 백분위 접촉전압과 해당 통전경로의 5%, 50%, 95%

Table 6. Formulas for total body impedance for a current path hand to hand, for a medium surface areas of contact

| 접촉 상태  | 백분 위수 | 수식(Y = 총 인체 임피던스 (Ω), X = 접촉전압), 결정계수 $R^2$ 값  |
|--------|-------|--|
| 건조     | 95%   | $Y=3525.58987.5-952.3484848 \times X+5.719090909 \times \text{pow}(X,2)-0.01174545455 \times \text{pow}(X,3), 0.999455$  |
|        | 50%   | $Y=31014.28571-487.8095238 \times X+2.88952381 \times \text{pow}(X,2)-0.00586666667 \times \text{pow}(X,3), 0.999497$  |
|        | 5%    | $Y=16562.5-254.0638528 \times X+1.488311688 \times \text{pow}(X,2)-0.02993939394 \times \text{pow}(X,3), 0.999566$   |
| 습윤     | 95%   | $Y=8650.147268.75*1465.575699*X-111.9237145*\text{power}(X,2)*1.886971329*\text{power}(X,3)-0.01488410256*\text{power}(X,4)*5.618625641E-005*\text{power}(X,5)-8.149333333E-008*\text{power}(X,6), 0.99902$    |
|        | 50%   | $Y=2200.9718.75*75.91462704*X-5.507207848*\text{power}(X,2)*0.09160862471*\text{power}(X,3)-0.0007267008547*\text{power}(X,4)*2.785641026E-006*\text{power}(X,5)-4.124444444E-009*\text{power}(X,6), 0.999786$ |
|        | 5%    | $Y=5973.67-40.696429 \times X+0.0883333 \times \text{pow}(X,2), 0.998675$  |
| 염분 (땀) | 95%   | $Y=6750.10904.375-64.18275641*X*1.245839744*\text{power}(X,2)-0.01710948718*\text{power}(X,3)*0.0001235487179*\text{power}(X,4)-4.466051282E-007*\text{power}(X,5)*6.4E-010*\text{power}(X,6), 0.999987$       |
|        | 50%   | $Y=-1.428571429 \times X+2459.464286, 0.9997$  |
|        | 5%    | $Y=1350.2194.375-34.53942308*X*1.092817521*\text{power}(X,2)-0.01711615385*\text{power}(X,3)*0.0001378598291*\text{power}(X,4)-5.468717949E-007*\text{power}(X,5)*8.39111111E-010*\text{power}(X,6), 0.999305$ |

Table 7. Formulas for total body impedance for a current path hand to hand, for a small surface areas of contact

| 접촉 상태  | 백분 위수 | 수식(Y = 총 인체 임피던스 (Ω), X = 접촉전압), 결정계수 $R^2$ 값   |
|--------|-------|---|
| 건조     | 95%   | $Y=-51596.875+33465.15527 \times X-1032.39859 \times \text{pow}(X,2)+13.44191294 \times \text{pow}(X,3)-0.08923449573 \times \text{pow}(X,4)+0.0002974798 \times \text{pow}(X,5)-3.95164444E-007 \times \text{pow}(X,6), 0.999946$      |
|        | 50%   | $Y=-36462.5+18352.74254 \times X-558.5562681 \times \text{pow}(X,2)+7.22797249 \times \text{pow}(X,3)-0.04781046154 \times \text{pow}(X,4)+0.0001589874872 \times \text{pow}(X,5)-2.107733333E-007 \times \text{pow}(X,6), 0.999947$    |
|        | 5%    | $Y=-6434.375+8644.159586 \times X-258.8214676 \times \text{pow}(X,2)+3.257019464 \times \text{pow}(X,3)-0.02094735043 \times \text{pow}(X,4)+6.785682051E-005 \times \text{pow}(X,5)-8.782222222E-008 \times \text{pow}(X,6), 0.999986$ |
| 습윤     | 95%   | $Y=200876.7857-3121.296176 \times X+28.45045455 \times \text{pow}(X,2)-0.151810101 \times \text{pow}(X,3)+0.0003178181818 \times \text{pow}(X,4), 0.99965$  |
|        | 50%   | $Y=5400.73875*1098.353147*X-67.36540948*\text{power}(X,2)*1.110087646*\text{power}(X,3)-0.008692239316*\text{power}(X,4)*3.267282051E-005*\text{power}(X,5)-4.721777778E-008*\text{power}(X,6), 0.999874$                               |
|        | 5%    | $Y=56520.08929-852.9090007 \times X+8.472537879 \times \text{pow}(X,2)-0.04935252525 \times \text{pow}(X,3)+0.0001084242424 \times \text{pow}(X,4), 0.99955$  |
| 염분 (땀) | 95%   | $Y=-17.81190476 \times X+10204.46429, 0.996125$   |
|        | 50%   | $Y=-13.19047619 \times X+7558.928571, 0.996118$   |
|        | 5%    | $Y=3400.5441.25*12.3882634*X-0.8439229992*\text{power}(X,2)*0.01378620047*\text{power}(X,3)-0.000110434188*\text{power}(X,4)*4.240410256E-007*\text{power}(X,5)-6.257777778E-010*\text{power}(X,6), 0.999943$                           |

Table 8. Formulas for total body impedance for various current paths by using hand to hand total body impedance value

| 통전경로    | 각 통전경로의 총 인체 임피던스 (Zi : 인입측 임피던스, Zo: 인출측 임피던스) |
|---------|---|
| 왼손-한발   | $Zi/2+Zo \times 0.8-Zo/2$                       |
| 왼손-양발   | $Zi/2+Zo \times 0.4-Zo/4$                       |
| 왼손-오른손  | $Zi/2+Zo/2$                                     |
| 오른손-한발  | $Zi/2+Zo \times 0.8-Zo/2$                       |
| 오른손-양발  | $Zi/2+Zo \times 0.4-Zo/4$                       |
| 양손-한발   | $Zi/4+Zo \times 0.8-Zo/2$                       |
| 양손-양발   | $Zi/4+Zo \times 0.4-Zo/4$                       |
| 허리-오른손  | $(Zi/2+Zo/2)/2$                                 |
| 허리-왼손   | $(Zi/2+Zo/2)/2$                                 |
| 가슴-오른손  | $(Zi/2+Zo/2)/2$                                 |
| 가슴-왼손   | $(Zi/2+Zo/2)/2$                                 |
| 가슴-양손   | $(Zi/2+Zo/4)/2$                                 |
| 오른손-엉덩이 | $(Zi/2+Zo/2)/2$                                 |
| 왼손-엉덩이  | $(Zi/2+Zo/2)/2$                                 |
| 양손-엉덩이  | $(Zi/4+Zo/2)/2$                                 |
| 왼발-오른발  | $0.3 \times Zi+0.3 \times Zo$                   |

백분위 인체 임피던스를 이용하여 5%, 50%, 95% 백분위 통전전류 계산하였다. 또한 통전전류의 십

실세동의 상대적인 위험성을 알기 위해 KS C IEC 60479에서 제시한 심장-전류 계수를 감안하여 심실세동 등가 전류를 계산하였다.

$$\text{심실세동 등가 전류} = \text{통전전류} \times \text{심장-전류 계수}$$

심실세동 등가전류는 왼손 발 통전경로의 심실세동에 대한 민감도로 환산한 전류로, 이 전류 값 및 통전시간을 알면, KS C IEC 60479의 시간-전류 영역전류 곡선에 대입하여 위험성을 판별할 수 있다.

#### 4. 감전사고 분석 프로그램 개발 및 적용

##### 4.1. 프로그램 개발

프로그램은 중대재해 조사시 활용성을 높이고, 프로그램 내용의 원활한 수정을 위해 범용 프로그램인 Excel을 사용하였으며, Data 입력의 편의성 및 오류를 줄이기 위해, Data 입력은 VBA(Visual Basic Application)를 사용하였다.

프로그램은 시작창, 계통별 데이터 입력창, 결과창으로 단순화하여 사용을 편리하게 하였다.

Fig. 6은 TN-C계통의 데이터 입력창을 보여준다.

##### 4.2. 프로그램 적용

###### 4.2.1. 가상 사고 적용

프로그램의 작동을 확인하기 위해 Table 9와 같은 사고사항을 가정하였다.

프로그램 계산결과는 Fig. 7과 같다. 5% 백분위 접촉전압은 208.9V, 5% 백분위 통전전류는 410.3mA가 계산되었다. 통전경로가 왼손-양발이므로, 심장-전류계수는 '1'이며 심실세동 등가 전류는 410.3mA가 된다. 이 전류 값을 Fig. 8에서와 같이 KS C IEC 60479의 시간-전류 영역에 대입하면, 120ms 이상 통전시 심실세동의 위험이 있음을 알 수 있다.

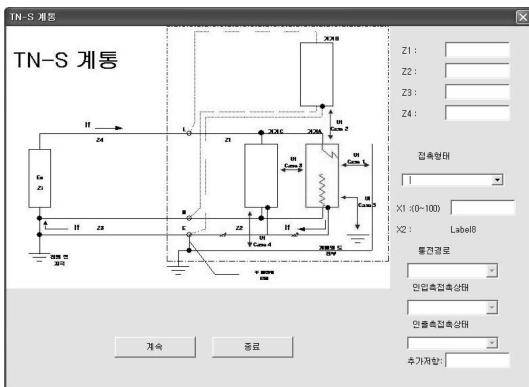


Fig. 6. TN-C system data entry window.

Table 9. Simulated electric shock accident

| 사고 가정 사항                                       |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 전원전압 :   | 대지전압 220V                            |
| 계통종류 :   | TT 계통                                |
| Z1(분전반~기기 전선 저항 IV 3.5mm <sup>2</sup> 20m) :   | $5.41 \times 20 / 1000 = 0.11\Omega$ |
| Z2(분전반~기기 접지도체 저항 IV 3.5mm <sup>2</sup> 20m) : | $5.41 \times 20 / 1000 = 0.11\Omega$ |
| Z4(전원~분전반 전선저항 DV 5.5mm <sup>2</sup> 30m) :    | $3.47 \times 20 / 1000 = 0.1\Omega$  |
| Ra(기기보호접지저항):                                  | 100Ω                                 |
| Rb(계통접지저항):                                    | 5Ω                                   |
| 인체 감전 상태 Case 5 :                              | 고장기기 노출도전부와 대지간                      |
| 통전경로 :   | 왼손-양발                                |
| 접촉상태 :   | 접촉면적 대, 염분상태                         |

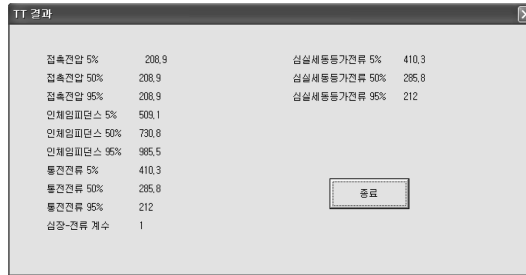


Fig. 7. Result window.

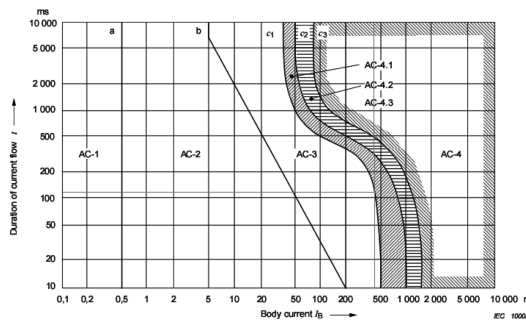


Fig. 8. Apply the result to time-current zone curve of IEC 60479.

Table 10. Simulated electric shock accident

| 사고 사항  |   |
|--|---|
| 사고내용:  | 누전된 전기히터(380V, 상전압 220V)에 피재해자가 접촉되어 사망함. |
| 계통종류 :   | TT 계통                                     |
| Z1(분전반~기기 전선 저항 IV 3.5mm <sup>2</sup> 30m) :   | $5.41 \times 30 / 1000 = 0.16\Omega$      |
| Z2(분전반~기기 접지도체 저항 IV 3.5mm <sup>2</sup> 30m) : | $5.41 \times 30 / 1000 = 0.16\Omega$      |
| Z4(전원~분전반 전선저항 DV 5.5mm <sup>2</sup> 30m) :    | $3.47 \times 20 / 1000 = 0.1\Omega$       |
| Ra(기기보호접지저항):                                  | $\infty \Omega$ (접지 연결 없음, 1,000Ω가정)      |
| Rb(계통접지저항):                                    | 5Ω  |
| 인체 감전 상태 Case 5 :                              | 고장기기 노출도전부와 대지간                           |
| 통전경로 :   | 왼손-양발                                     |
| 접촉상태 :   | 접촉면적 대, 염분상태                              |

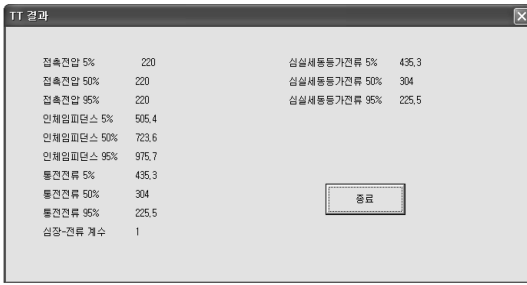


Fig. 9. Result window,

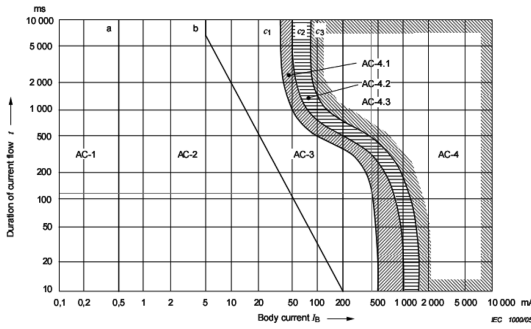


Fig. 10. Apply the result to time-current zone curve of IEC 60479.

#### 4.2.2. 기존 중대 재해에 적용

프로그램의 작동을 확인 및 검증을 위해 Table 10과 같이 기존 중대 재해 사례에 적용하였다.

프로그램 계산결과는 Fig. 9와 같다. 5% 백분위 접촉전압은 220V, 5% 백분위 통전전류는 435.3mA가 계산되었다. 이 전류 값을 KS C IEC 60479의 시간-전류 영역에 대입하면, Fig 10에서와 같이 120 ms 이상 통전시 심실세동의 위험이 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

이 연구에서는 TN 및 TT 계통에서 발생하는 감전 사고에 대하여 사고에 영향을 주는 각종 파라미터에 따라 인체의 임피던스 및 통전전류를 계산하여 사고원인 및 결과를 정확하게 분석하고, 각 분석결과를 이용하여 동종·유사 재해 발생을 방지할 수 있도록 재해 예방 대책을 제시할 수 있는 중대 재해조사 프로그램을 개발하고자 하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- TN 및 TT계통에서 발생할 수 있는 감전사고의 형태를 파악하여, 고장상태시 인체가 접촉하는 경우를 5가지 경우로 나누어서, 인체에 인가되는 통전전압을 계산하였다.
- 접촉상태, 접촉면적 및 통전경로 등에 따른 인체 임피던스를 계산하는 수식을 도출하였다.
- 계산된 접촉전압과 임피던스를 이용 통전경로에 따른 심실세동 등가전류를 계산하였다.
- 가상의 사고내용 및 실제사례를 적용하여 프로그램 작동을 확인하였다.

## 참고문헌

- 1) 산업재해현황통계자료('00~'07), 노동부.
- 2) Statistics of Fatal Injuries '06/'07, 영국 HSE.
- 3) 平成19年における労働災害発生状況, 일본 후생노동성.
- 4) 류보혁 등5명, "KOSHA-ESAP(Electric Shock Analysis Program)개발 연구", 산업안전보건연구원, 2007.
- 5) KS C IEC 60479-1 2005, 인체와 가축에 대한 전류의 영향 - 제1부 일반적인 양상.
- 6) IEC 60364-1 2005, Low-voltage electrical installations-Part1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions.
- 7) B.D. Jenkins, "Touch voltages in electrical installations", blackwell, pp. 128~129, 1993.