접속방법에 따른 접지도체 굵기 제안식

최홍규 · 오정석 · 김충원 · 송영주*
홍익대학교

An Improved Method for Selecting the Grounding Conductor Size

Hong-Kyoo Choi · Jeong-Seok Oh · Chung-Won Kim · Young-Joo Song*
Hong-ik University

Abstract - 접지도체의 굵기를 결정하는 국외 규격은 재료의 특성값인 물리적 정수까지 적용하여 광범위하게 적용할 수 있는 반면 수식이 복잡한 문제점이 있고 JIS와 국내규격은 수식은 간단하나 제약조건이 많은 문제점이 있다. 또한, 접지도체의 접속방법에 따라 최대허용온도가 다르게 적용되므로 접지도체 굵기 산정 방식이 복잡하고 적용 방법이 상이하여 시공현장에서 엔지니어들이 적용하는데 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 새로운 접지도체 굵기 산정방식을 제시하고 접속방법에 따른 접지도체 굵기 산정 간이식을 제시한다.

1. 서 론

최근 건축물 시스템은 고층화, 대형화, 인텔리전트화를 통한 전력을 공급하는 전원설비, 변전·배전설비 및 정보통신설비, 전산시스템, OA기기 그리고 보안 및 방범설비, 빌딩관리 시스템, 통합 감시 제어 시스템등 다양한 설비가 혼재되어 설치 운영되고 있어 안전성과 신뢰성이 바탕이 되는 시스템을 구축하여야 한다. 이러한 시스템의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위하여 요구되는 것 중 하나가 접지 시스템 설비이다. 접지시스템 설비의 근본적인 목적은 내부고장이나 외부의 낙뢰 등에 의해 접지전류가 흐를 때 대지표면의 전위상승을 억제하여 감전사고와 기기의 손상을 방지하여 전기설비의 기능향상은 물론 안전성을 확보하는 것이다. 접지시스템의 안전하고 효율적인 구성을 위해서 필수적으로 요구되는 것 중 하나가 접지도체의 굵기 산정이다.[1]~[9]

접지도체의 굵기는 굵은 것이 이상적이나 실제적으로 불가능 하므로 접지도체에 접속된 장비나 설비에 영향이 미치지 않는 범위 내에서 접지도체의 굵기를 선정하는 것이 필요하다. 접지도체의 굵기를 결정하는 국외 규격은 재료의 특성값인 물리적 정수까지 적용하여 광범위하게 적용할 수 있는 반면 수식이 복잡한 문제점이 있고 JIS와 국내규격은 수식은 간단하나 제약조건이 많은 문제점이 있으므로 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 접지도체 굵기 산정 방식이 반드시 필요하다. 또한, 접지도체의 접속방법에 따라 최대허용온도가 다르게 적용되므로 접지도체 굵기 산정 방식이 복잡하고 적용 방법이 상이하여 시공현장에서 엔지니어들이 적용하는데 많은 어려움이 있다.[6][9][13][14]

따라서 본 논문에서는 먼저, 국내외 접지도체 굵기 산정방법을 비교 검토하여 새로운 굵기 제안식을 모델링하였고 모델링한 수식과 기존수식을 비교 검토한 다음 접속방법에 따른 접지도체 굵기 간이식을 제시하고 비교하여 접속방법에 따른 접지도체 굵기 간이식의 타당성을 입증·분석하며 사례연구를 통해 검증하여 국제화 추세에 부응하고 건설현장에서 엔지니어들이 쉽게 적용할 수 있는 새로운 접지도체 굵기 산출방식을 연구하는데 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 접지도체 굵기 계산식

2.1.1 국내·외 규격 비교

접지도체를 통해 지락전류나 뇌전류가 흐를 때 방전이 잘되지 않으면 열이 발생하게 되고 발생된 열로 인해 화재나 접지도체의 단선으로 인한 사고파급 범위의 확대 및 주위의 가연물 등에 위험이 미치게 되므로 접지재료는 이 온도에 견딜 수 있도록 도체의 단면적을 충분히 선정 하여야 하며, 자연부식이나 전식으로부터 충분히 견딜 수 있는 강한 내구성과 수명 그리고 접속이나 연결시 전기적으로나 기계적으로 문제가 없는 재료를 선정하여야 한다. 접지망을 구성하는 요소중 접지도체는 최대 고장전류가 고장지속시간동안 지속되어도 용단, 열화 되지 않아야 며, 접지망에서 위험한 전위차가 발생되지 않도록 충분한 도전율과 기계적 강도를 가져야 한다. 최대 고장전류 및 고장지속시간을 고려하여 접지도체의 굵기를 결정하는 국내·외 규격에는 ANSI/IEEE std. 80, IEC pub 60364-5, JIS, 전기설비기술기준(내선규정 포함) 등이 있고 각 규격의 접지도체 굵기 선정 조건은 표 1과 같다.

[표 1] 국내·외 접지도체 굵기 선정 조건
[Table 1] Internal and external ground wire size choice condition

계산 조건	ANSI/IEEE 80, IEC pub 60364-5	일본규격 국내규격(전기,내규)
피복 재료	PVC, XLPE, EPE등	IV 절연전선
물리적 정수	도전율, 열저항률, 열용량 계수 적용	적용하지 않음
최고허용온도	사용재질에 따라 적용 (피복과 도체 재질)	150[℃]
고장지속시간	계통조건에 따라 적용	0.1초(계통조건에 따라 다르게 적용가능)

2.1.2 ANSI/IEEE std. 80

ANSI/IEEE std. 80에서 사용하는 접지도체의 굵기는 고장전류크기, 고장지속시간, 온도, 재료의 특성값 등을 적용하여 수식 (1)과 같이 구한다.

$$A = I\sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^4}{TCAP}}{\ln\left\{1+\left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right)\right\}}} \qquad (1)$$

도체재료를 연동선으로 사용하고 최대허용온도를 250[℃], 주위온도를 30[℃]로 할 때 ANSI/IEEE 규격을 사용

하여 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지도체 굵기를 계산한 결과는 표 2와 같다.

[표 2] ANSI/IEEE 규격에 의한 접지도체 굵기 계산
[Table 2] The calculation of grounding conductor size by ANSI/IEEE

고장지속 시간[s]	고장전류 크기[kA]				
	10	20	30	40	50
0.1	18.07	36.15	54.22	72.30	90.37
0.5	40.41	80.83	121.24	161.66	202.07
1.0	57.15	114.31	171.46	228.62	285.77
2.0	80.83	161.66	242.49	323.32	404.15

2.1.3 IEC pub. 60364-5

IEC pub. 60364-5에서 사용하는 접지도체의 굵기는 ANSI/IEEE std. 80과 유사하며 수식 (2)와 같이 구한다.

$$A = \frac{I\sqrt{t_c}}{k}, k = \sqrt{\frac{Q_c(B+20)}{\phi_{20}}\ln\left(1+\frac{\theta_f-\theta_i}{B+\theta_i}\right)} \quad (2)$$

도체재료를 동으로 하고 최대허용온도를 250[℃], 주위온도를 30[℃]로 할 때 IEC 규격을 사용하여 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지도체 굵기를 계산한 결과는 표 3과 같다.

[표 3] IEC 규격에 의한 접지도체 굵기 계산
[Table 3] The calculation of grounding conductor size by IEC

고장지속 시간[s]	고장전류 크기[kA]				
	10	20	30	40	50
0.1	17.97	35.93	53.90	71.87	89.84
0.5	40.18	80.35	120.53	160.71	200.88
1.0	56.82	113.64	170.45	227.27	284.09
2.0	80.35	160.71	241.06	321.41	401.77

2.1.4 일본 규격(JIS)

일본 규격(JIS)에서 사용하는 접지도체의 굵기는 앞의 규격과는 달리 재료의 특성값을 제외한 고장전류크기, 고장지속시간, 온도 등을 적용하여 수식 (3)과 같이 구한다.

$$A = I\sqrt{\frac{t_c(8\times10^{-3})}{T_m - T_a}} \quad (3)$$

[표 4] IEC 규격에 의한 접지도체 굵기 계산
[Table 4] The calculation of grounding conductor size by JIS

고장지속 시간[s]	고장전류 크기[kA]				
	10	20	30	40	50
0.1	25.82	51.64	77.46	103.28	129.10
0.5	42.64	85.28	127.92	170.56	213.20
1.0	60.30	120.60	180.91	241.21	301.51
2.0	85.28	170.56	255.84	341.12	426.40

일본규격은 최대허용온도 150[℃], 주위온도 30[℃], 고장지속시간을 0.1[s]로 하고, 접지도체의 도체재질을 동선으로 제한하고 있어 최대허용온도를 250[℃]로 하는 것은 정확한 계산조건이 되지 않지만 앞의 다른 규격과 계산결과를 비교하기 위해 주위온도를 30[℃]로 하고 고장지속시간이 0.1[s]인 경우에는 최대허용온도를 150[℃], 0.5[s]에서 2.0[s]까지는 250[℃]로 할 때 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지도체 굵기를 계산한 결과는 표 4와 같다.

2.1.5 전기설비기술기준(내선규정포함)

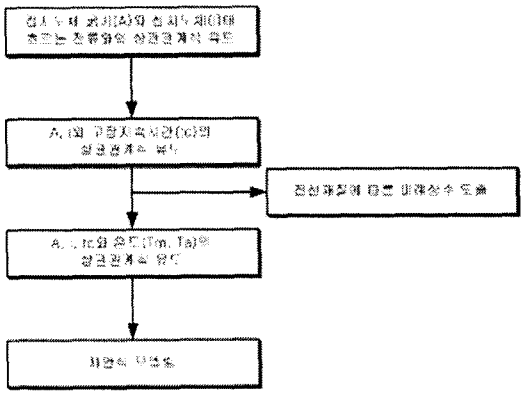
국내 규격에서 사용하는 접지도체의 굵기는 전원측에 시설한 과전류차단기의 동작특성과 관련하여 선정하며 각 접지공사마다 전류용량에 따라 접지도체 굵기를 규정하고 있다. 접지도체의 최소 굵기는 전기설비기술기준 제 22조에 명시되어 있고 세부내용은 내선규정 140조에 의하며 수식 (4)와 같이 구한다.

$$A = I\sqrt{\frac{0.008\times t_c}{T_m - T_a}} = 0.052I_n \quad (4)$$

도체재료를 동선으로 할 때 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지도체 굵기를 계산한 결과는 일본규격 표 4와 같다.

2.2. 접지도체 굵기 제안식 모델링

2.2.1 흐름도



[그림 1] 접지도체 굵기 제안식 흐름도
[Fig. 1] The flowchart of ground coductor proposed model

2.2.2 접지도체 굵기와 접지도체에 흐르는 전류

접지도체 굵기와 접지도체에 흐르는 전류와의 상관관계는 최소자승법을 이용하여 수식화 하였다. 최소자승법은 n개의 데이터 점을 지나는 최적의 직선은 편차의 제곱의 합이 최소가 될 때 최적이 되는 이론을 적용한 것으로 목적함수와 제약조건을 나타내면 수식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} &Min \sum_{i=1}^{N}[y_i-(bx_i+a)]^2 \\ &st.\ A=\sum_{i=1}^{N}x_i,\ B=\sum_{i=1}^{N}y_i,\ C=\sum_{i=1}^{N}x_i^2, \\ &D=\sum_{i=1}^{N}x_iy_i,\ N: number \end{aligned} \quad (5)$$

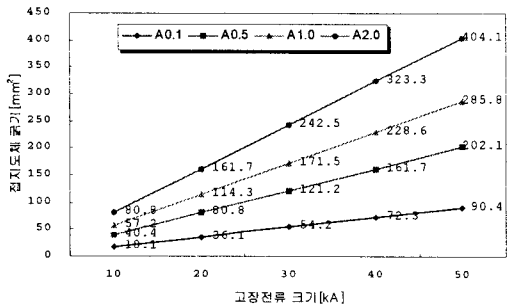
이때 기울기 b는 $b = AB - ND/A^2 - NC$로 , 절편 a는 $a = AD - BC/A^2 - NC$로 구한다.

본 논문에서는 표 2에 사용된 접지도체에 흐르는 고장전류 크기 I를 x로 접지도체 굵기 A를 y로 대치하여 각 고장지속시간에 대한 수식을 유도하였다. 유도된 수식은 수식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} A_{0.1} &= 1.807I, & A_{0.5} &= 4.041I \\ A_{1.0} &= 5.715I, & A_{2.0} &= 8.083I \end{aligned} \quad (6)$$

2.2.3 A, I와 고장지속시간

접지도체의 굵기와 접지도체에 흐르는 전류 그리고 고장지속시간과의 상관관계는 각 구간별 기울기를 비교하여 수식화 하였다.



[그림 3-2] 각 구간별 기울기 비교 그래프
[Fig. 3-2] The comparison graph of gradient by each section

[표 5] 각 구간별 기울기 비교
[Table 5] The comparison of gradient by each section

기울기 및 비율	각 구간별 기울기 및 비율				
	1구간	2구간	3구간	4구간	평균
$A_{0.1}$	0.5556	0.5525	0.5525	0.5525	0.5533
$A_{0.5}$	0.2475	0.2475	0.2469	0.2375	0.2474
$A_{1.0}$	0.1751	0.1748	0.1751	0.1748	0.1750
$A_{2.0}$	0.1236	0.1238	0.1239	0.1236	0.1237
$A_{0.1/0.5}$	2.2444	2.2320	2.2375	2.2320	$\sqrt{5}$
$A_{0.1/1.0}$	3.1722	3.1602	3.1547	3.1602	$\sqrt{10}$
$A_{0.1/2.0}$	4.4944	4.4641	4.4586	4.4696	$\sqrt{20}$

고장지속시간 0.1[s]를 기준으로 하여 지속시간이 길어지게 됨에 따라 접지도체의 굵기는 $\sqrt{10t_c}$배가 된다.

$$A_{t_c} = 1.807I \times \sqrt{10t_c} \tag{7}$$

2.2.4 도체 재질에 따른 비례상수

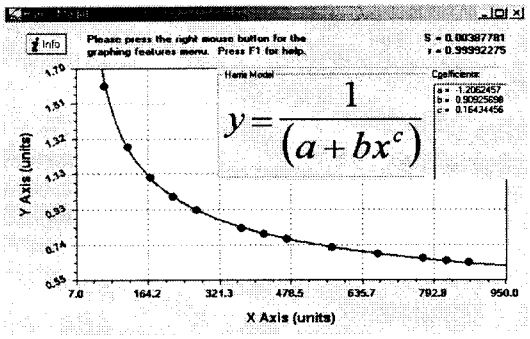
최소자승법과 각 구간별 기울기를 이용하여 사용도체 재질에 따른 비례상수 K를 구한다. 구해진 비례상수 K 값은 표 6과 같다.

[표 6] 도체재질에 따른 비례상수
[Table 6] The proportional constant of conductor's material

도체 재료	연동선	경동선	알루미늄선	동복강선	내식알루미늄 #5005	알루미늄복강선	아연도금강선	스테인레스강 #304
K	5.714	5.780	8.503	8.576	8.842	14.205	17.762	30.581

2.2.5 A, I, t_c와 최대허용온도, 주위온도

접지도체의 굵기와 접지도체에 흐르는 전류, 고장 지속시간과 최대허용온도, 주위온도와의 상관관계는 Curve fitting를 이용하여 수식화 하였다. Curve fitting에 사용된 모델에는 Harris 모델, Hocrl 모델, Vapor pressure 모델, Weibull 모델, Power fit 모델, Rational function 모델, Polynomial fit 모델, Quadratic fit 모델, Exponential fit 모델 등이 있으나 본 논문에서는 최대허용온도 250[℃]를 기준으로 하여 120[℃]에서 900[℃]까지 온도를 변화 시킬 때 상관계수가 0.99992275이고 표준오차가 0.00388[%]로 제일 적은 Harris 모델 $1/(a+bx^c)$를 사용하였다.



[그림 3] 온도변화에 따른 Harris 모델
[Fig. 3] The Harris model by a temperature change

2.2.6 접지도체 굵기 제안식

제안된 접지도체 굵기 수식은 ANSI/IEEE std. 80 수식과 IEC pub.60364-5 수식과 같이 고장전류크기, 고장지속시간, 최대허용온도, 주위온도, 접지도체 재료에 쓰이는 금속의 물리적인 정수를 고려한 도체 재질에 따른 비례상수 등을 적용하여 수식 (8)과 같이 구한다.

$$A = \frac{\alpha K I \sqrt{t_c}}{[a + b(T_m - T_a)^c]} \tag{8}$$

여기서,
상수 $a = -1.21, b = 0.91, c = 0.164$
α : 도체 전류 분류율
K : 도체 재질에 따른 비례상수
I : 접지도체에 흐르는 전류[kA]
t_c : 고장지속시간[s]
T_m : 최대허용온도[℃]
T_a : 주위온도[℃]

도체재료를 연동선으로 사용하고 최대허용온도를 250[℃], 주위온도를 30[℃], 도체전류 분류율을 1.0으로 할 때 제안식을 사용하여 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지도체 굵기를 계산한 결과는 표 7과 같다.

[표 7] 제안식에 의한 접지도체 굵기 계산
[Table 7] The calculation of grounding conductor's size by proposed formula

고장지속시간[s]	고장전류 크기[kA]				
	10	20	30	40	50
0.1	18.18	36.36	54.54	72.27	90.90
0.5	40.65	81.30	121.95	162.60	203.25
1.0	57.49	114.98	172.47	229.96	287.44
2.0	81.30	162.60	243.90	325.20	406.50

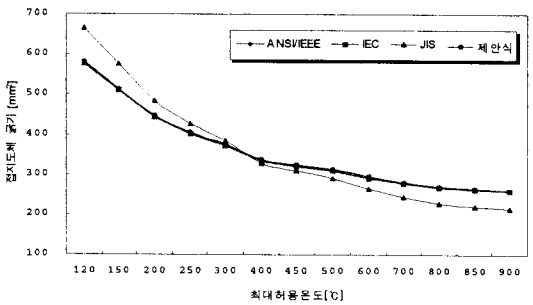
2.3. 접지도체 기존수식과 제안식과의 비교

2.3.1 온도변화에 따른 비교

고장지속시간 0.1[s], 주위온도 30[℃], 고장전류크기가 50[kA], 도체전류 분류율이 1.0이고 최대허용온도가 120[℃]에서 900[℃]까지 변할 때 각 규격을 비교한 것은 표 8과 그림 4와 같다.

[표 8] 온도변화에 따른 비교
[Table 8] The comparison of temperature change

최대허용 온도[℃]	I: 50[kA], t_c : 0.1[s], T_a : 30[℃], α : 1.0			
	ANSI/IEEE	IEC	JIS	제안식
900	260.62	259.29	214.42	260.46
850	264.75	263.40	220.86	265.01
800	269.29	267.91	227.92	269.98
700	279.92	278.50	244.34	281.47
600	293.37	291.89	264.91	295.72
500	311.16	309.59	291.73	314.17
450	322.48	320.86	308.61	325.72
400	336.16	334.48	328.80	339.52
300	374.89	373.03	384.90	377.90
250	404.15	402.16	426.40	406.53
200	446.28	444.10	485.07	447.62
150	514.03	511.54	577.35	514.47
120	580.94	578.15	666.67	582.70

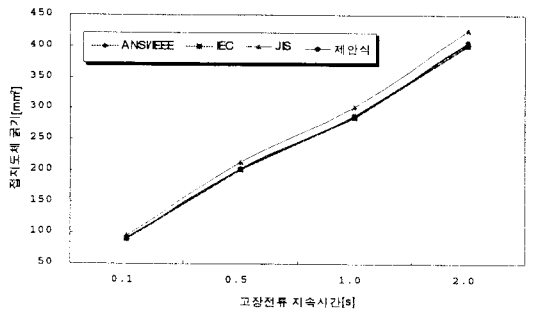


[그림 4] 온도변화에 따른 비교 그래프
[Fig. 4] The comparison graph of temperature change

2.3.2 고장지속시간변화에 따른 비교
고장전류크기가 50[kA], 최대허용온도 250[℃], 주위온도 30[℃], 도체 전류 분류율이 1.0이고 고장지속시간이 0.1[s]에서 2.0[s]까지 변할 때 각 규격을 비교한 것은 표 9와 그림 5와 같다.

[표 9] 고장지속시간변화에 따른 비교
[Table 9] The comparison of fault duration change

고장지속 시간[s]	I: 50[kA], T_m : 250[℃], T_a : 30[℃], α : 1.0			
	ANSI/IEEE	IEC	JIS	제안식
0.1	90.37	89.84	95.35	90.90
0.5	202.07	200.88	213.20	203.25
1.0	285.77	284.09	301.51	287.44
2.0	404.15	401.77	426.40	406.51

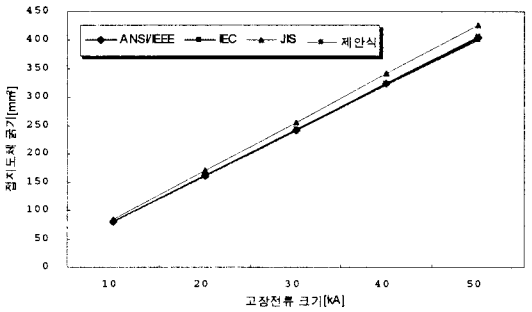


[그림 5] 고장지속시간변화에 따른 비교 그래프
[Fig. 5] The comparison graph of fault duration change

2.3.3 고장전류크기변화에 따른 비교
고장지속시간 2[s], 최대허용온도 250[℃], 주위온도 30[℃], 도체 전류 분류율이 1.0이고 고장전류크기가 10[kA]에서 50[kA]까지 변할 때 각 규격을 비교한 것은 표 10과 그림 6과 같다.

[표 10] 고장전류크기변화에 따른 비교
[Table 10] The comparison of fault current magnitude change

고장전류 크기[kA]	t_c : 2[s], T_m : 250[℃], T_a : 30[℃], α : 1.0			
	ANSI/IEEE	IEC	JIS	제안식
10	80.83	80.35	85.28	81.30
20	161.66	160.71	170.56	162.60
30	242.49	241.06	255.84	243.90
40	323.32	321.41	341.12	325.21
50	404.15	401.77	426.40	406.51



[그림 6] 고장전류크기변화에 따른 비교 그래프
[Fgi. 6] The comparison graph of fault current magnitude change

2.4 접속방식에 따른 접지도체 굵기 간이식

접지도체의 접속방법에 따라 최대허용온도가 다르게 적용되어 접지도체 굵기 산정 방식이 복잡하고 상이하여 시공현장에서 엔지니어들이 적용하는데 많은 어려움이 있다. 그러므로 본 절에서는 접속방식 중 시공현장에서 많이 사용되고 있고 최대허용온도가 각각 350[℃], 450[℃], 850[℃]인 압축접속방식, 경납땜방식, 발열용접방식에 대한 접지도체 굵기 간이식을 제안한다.

2.4.1 압축접속방식
압축접속방식의 접지도체 굵기 간이식은 수식 (8)에 최대허용온도 350[℃], 주위온도 40[℃]를 적용하여 수식 (9)와 같이 구한다.

$$A = \frac{\alpha K I\sqrt{t_c}}{[a + b(T_m - T_a)^c]} = \frac{\alpha K I\sqrt{t_c}}{[-1.21 + 0.91(350 - 40)^{0.164}]} = 0.892\alpha K I\sqrt{t_c} = \alpha K_w I\sqrt{t_c} \quad (9)$$

수식 (9)의 유도과정에서 두 번째 과정의 분모 역수값인 0.892에 제안식의 사용도체 재질에 따른 비례상수 K를 곱하여 압축접속방식의 사용도체 재질에 따른 비례상수 K_w를 구한다.

2.4.2 경납땜방식

경납땜방식의 접지도체 굵기 간이식은 수식 (8)에 최대허용온도 450[℃], 주위온도 40[℃]를 적용하여 수식 (10)과 같이 구한다.

$$A = \frac{\alpha K I\sqrt{t_c}}{[a + b(T_m - T_a)^c]} = \frac{\alpha K I\sqrt{t_c}}{[-1.21 + 0.91(450 - 40)^{0.164}]} = 0.812\alpha K I\sqrt{t_c} = \alpha K_b I\sqrt{t_c} \quad (10)$$

수식 (10)의 유도과정에서 두 번째 과정의 분모 역수 값인 0.812에 제안식의 사용도체 재질에 따른 비례상수 K를 곱하여 경납땜방식의 사용도체 재질에 따른 비례상수 K_b를 구한다.

2.4.3 발열용접방식

발열용접방식의 접지도체 굵기 간이식은 수식 (8)에 최대허용온도를 도체의 용융온도로, 주위온도를 40[℃]로 적용하여 수식 (11)과 같이 구한다.

$$A = \frac{\alpha K I\sqrt{t_c}}{[a + b(T_m - T_a)^c]} = \frac{\alpha K I\sqrt{t_c}}{[-1.21 + 0.91(T_m - 40)^{0.164}]} = \alpha K_e I\sqrt{t_c} \quad (11)$$

수식 (11)의 유도과정에서 두 번째 과정의 분모 역수 값인 각 도체의 적용된 상수에 제안식의 사용도체 재질에 따른 비례상수 K를 곱하여 발열용접방식의 사용도체 재질에 따른 비례상수 K_e를 구한다.

2.4.4 접속방식에 따른 사용도체 재질의 비례상수

수식 (9), (10), (11)을 유도하는 과정에서 구한 압축접속방식, 경납땜방식, 발열용접방식에 따른 사용도체 재질의 비례상수는 표 11과 같다.

[표 11] 접속방식에 따른 도체재질의 비례상수
[Table 11] The proportional constant of conductor's material by connection system

도체 재료	연동선	경동선	알루미늄선	동복강선	내식알루미늄 #5005	내식알루미늄 #6201	알루미늄복강선	아연도금강선	스테인레스강 #304
K	5.714	5.780	8.500	8.575	8.842	8.907	14.194	17.748	30.549
K_w	5.095	5.154	7.580	7.646	7.884	7.942	12.657	15.826	27.241
K_b	4.642	4.696	6.906	6.967	7.184	7.237	11.532	14.420	24.820
K_e	3.495	3.535	6.071	5.244	6.331	6.371	10.138	14.795	17.345

2.5 접속방식에 따른 접지도체 굵기 비교

ANSI/IEEE 정식, JIS 정식, 제안식의 정식과 접속방식에 따른 접지도체 굵기 간이식을 고장지속시간변화에 따라, 고장전류크기변화에 따라 비교하여 접속방식에 따른 접지도체 굵기 간이식의 타당성을 입증· 분석하였다.

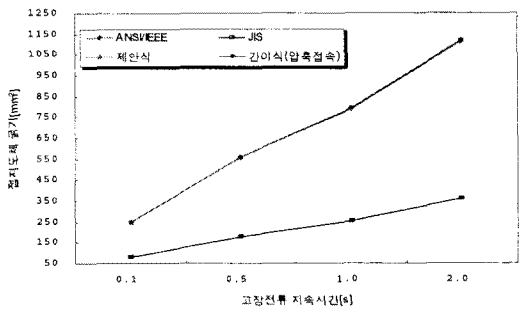
2.5.1 압축접속방식의 비교

1) 고장지속시간변화에 따른 비교

고장전류크기가 50[kA], 최대허용온도 350[℃], 주위온도 40[℃], 도체 전류 분류율이 1이고 고장지속시간이 0.1[s]에서 2.0[s]까지 변할 때 아연도금강선에 대해 각 규격을 비교한 것은 표 12와 그림 7과 같다.

[표 12] 압축접속방식의 고장지속시간변화에 따른 비교
[Table 12] The comparison of fault duration change by compression connection

고장지속시간[s]	I : 50 [kA], T_m : 350 [℃], T_a : 40 [℃], α : 1			
	ANSI/IEEE	JIS	제안식	압축접속
0.1	249.33	80.32	250.23	250.23
0.5	557.52	179.61	559.54	559.54
1.0	788.46	254.00	791.30	791.30
2.0	1115.05	359.21	1119.07	1119.07



[그림 7] 압축접속방식의 고장지속시간변화에 따른 비교 그래프
[Fig. 7] The comparison graph of fault duration change by compression connection

2) 고장전류크기변화에 따른 비교

고장지속시간 2[s], 최대허용온도 350[℃], 주위온도 40[℃], 도체 전류 분류율이 1이고 고장전류크기가 10[kA]에서 50[kA]까지 변할 때 아연도금강선에 대해 각 규격을 비교한 것은 표 13과 같다.

[표 13] 압축접속방식의 고장전류크기변화에 따른 비교
[Table 13] The comparison of fault current magnitude change by compression connection

고장전류크기[kA]	t_c : 2 [s], T_m : 350 [℃], T_a : 40 [℃], α : 1			
	ANSI/IEEE	JIS	제안식	압축접속
10	233.01	71.84	233.81	233.81
20	446.02	143.68	447.63	447.63
30	669.03	215.53	671.44	671.44
40	892.04	287.37	895.26	895.26
50	1115.05	359.21	1119.07	1119.07

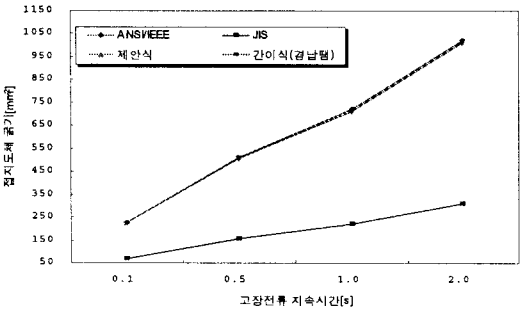
2.5.2 경납땜방식의 비교

1) 고장지속시간변화에 따른 비교

고장전류크기가 50[kA], 최대허용온도 450[℃], 주위온도 40[℃], 도체 전류 분류율이 1이고 고장지속시간이 0.1[s]에서 2.0[s]까지 변할 때 아연도금강선에 대해 각 규격을 비교한 것은 표 14와 그림 8과 같다.

[표 14] 경납땜방식의 고장지속시간변화에 따른 비교 (아연도금강선)
[Table 14] The comparison of fault duration change by brazed connection

고장지속	I: 50[kA], T_m : 450[℃], T_a : 40[℃], α : 1			
시간[s]	ANSI/IEEE	JIS	제안식	경납땜
0.1	225.76	69.84	227.99	227.99
0.5	504.82	156.17	509.81	509.81
1.0	713.93	220.86	720.98	720.98
2.0	1009.65	312.35	1019.61	1019.61



[그림 8] 경납땜방식의 고장지속시간변화에 따른 비교 그래프
[Fig. 8] The comparison graph of fault duration change by braved connection

2) 고장전류크기변화에 따른 비교
고장지속시간 2[s], 최대허용온도 450[℃], 주위온도 40[℃], 도체 전류 분류율이 1이고 고장전류크기가 10[kA]에서 50[kA]까지 변할 때 아연도금강선에 대해 각 규격을 비교한 것은 표 15와 같다.

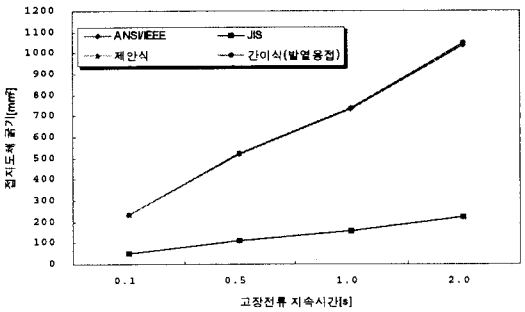
[표 15] 경납땜방식의 고장전류크기변화에 따른 비교
[Table 15] The comparison of fault current magnitude change by braved connection

고장전류	t_c : 2[s], T_m : 450[℃], T_a : 40[℃], α : 1			
크기[kA]	ANSI/IEEE	JIS	제안식	경납땜
10	201.93	62.47	203.92	203.92
20	403.86	124.94	407.85	407.85
30	605.79	187.41	611.77	611.77
40	807.72	249.88	815.69	815.69
50	1009.65	312.35	1019.61	1019.61

2.5.3 발열용접방식의 비교
1) 고장지속시간변화에 따른 비교
고장전류크기가 50[kA], 최대허용온도는 도체의 용융온도인 419[℃], 주위온도는 40[℃], 도체 전류 분류율이 1이고 고장지속시간이 0.1[s]에서 2.0[s]까지 변할 때 아연도금강선에 대해 각 규격을 비교한 것은 표 16과 그림 9와 같다.

[표 16] 발열용접방식의 고장지속시간변화에 따른 비교
[Table 16] The comparison of fault duration change by exothermic weld

고장지속	I: 50[kA], T_m : 419[℃], T_a : 40[℃], α : 1			
시간[s]	ANSI/IEEE	JIS	제안식	발열용접
0.1	232.01	49.69	233.94	233.94
0.5	518.79	111.11	523.10	523.10
1.0	733.67	157.13	739.77	739.77
2.0	1037.57	222.22	1046.19	1046.19



[그림 9] 발열용접방식의 고장지속시간변화에 따른 비교 그래프
[Fig. 9] The comparison graph of fault duration change by exothermic weld

2) 고장전류크기변화에 따른 비교
고장지속시간 2[s], 최대허용온도는 도체의 용융온도인 419[℃], 주위온도 40[℃], 도체 전류 분류율이 1이고 고장전류크기가 10[kA]에서 50[kA]까지 변할 때 아연도금강선에 대해 각 규격을 비교한 것은 표 17과 같다.

[표 17] 발열용접방식의 고장전류크기변화에 따른 비교
[Table 17] The comparison of fault current magnitude change by exothermic weld

고장전류	t_c : 2[s], T_m : 419[℃], T_a : 40[℃], α : 1			
크기[kA]	ANSI/IEEE	JIS	제안식	발열용접
10	207.51	44.44	209.24	209.24
20	415.03	88.89	418.48	418.48
30	622.54	133.33	627.72	627.72
40	830.06	177.78	836.95	836.95
50	1037.57	222.22	1046.19	1046.19

2.6 사례연구
사례연구는 IEEE Std. 80-2000 Annex B의 예제 1인 접지봉이 없는 등간격 접지Grid의 Mesh 접지전극을 대상으로 ANSI/IEEE 정식, JIS정식, 제안식의 정식과 본 논문에서 제안한 접속방식에 따른 접지도체 굵기 간이식을 비교 검토 하였다.

2.6.1 접지도체 굵기 제원
접지도체 굵기 계산에 필요한 기초적인 제원을 표 18과 같다.

[표 18] 접지도체 굵기 제원
[Table 18] The specification for grounding conductor size

접지설계의 제원	내용
접지공사 가능구역 (A)	63x84 [m^2]
대지 저항율 (ρ)	400 [Ω·m]
고장지속시간 (t_s)	0.5 [s]
압축접속방식의 최대허용온도(T_m)	350 [℃]
경납땜방식의 최대허용온도(T_m)	450 [℃]
발열용접방식의 최대허용온도(T_m)	경동선 -1084 [℃]
주위온도(T_a)	40 [℃]
최대 지락전류(I_F)	6.814 [kA]
분류계수 (S_f)	0.6
도체 전류 분류율 (α)	1.0

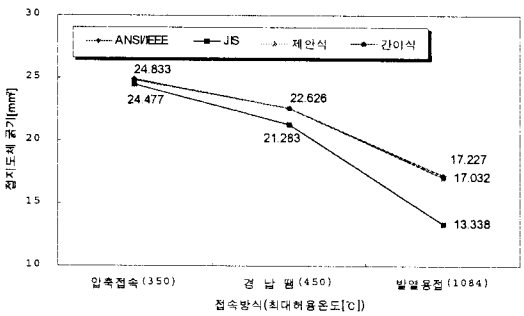
2.6.2 접지도체 굵기 계산 검토

도체재료를 경동선, 고장전류크기 6.814[kA], 고장지속시간 0.5[s], 주위온도 40[℃], 도체전류 분류율 1.0으로 하고 압축접속방식, 경납땜방식, 발열용접방식으로 접속할 때 ANSI/IEEE 정식, JIS 정식, 본 논문에서 제안한 정식과 접속방식에 따른 접지도체 굵기 간이식을 계산한 결과는 표 19와 같고 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

[표 19] 접속방식에 따른 접지도체 굵기의 비교

[Table 19] The comparison of grounding conductor size by connection method

접속 방식	I: 6.814[kA], t_c : 0.5[s], T_a : 40[℃], α : 1			
	ANSI/IEEE	JIS	정식	간이식
압축접속	24.889	24.477	24.834	24.833
경 납 땜	22.622	21.283	22.626	22.626
발열용접	17.227	13.338	17.031	17.032



[그림 10] 접속방식에 따른 접지도체 굵기의 비교 그래프

[Fig. 10] The comparison graph of grounding conductor size by connection method

표 19와 그림 10에서 보는바와 같이 접속방식에 따라 최대허용온도가 변화하여도 ANSI/IEEE 정식과 본 논문에서 제안한 정식, 간이식의 접지도체 굵기가 거의 일치하며 최대허용온도를 150[℃]로 제한하고 있는 JIS 정식은 최대허용온도가 커짐에 따라 오차도 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 최대허용온도가 낮은 접속방식 일수록 상대적으로 높은 접속방식에 비해 더 굵은 접지도체를 사용해야 하는 것을 알 수 있다.

압축접속방식일 때 ANSI/IEEE 정식과 제안식의 정식, 간이식의 접지도체 굵기는 24.889[mm^2]과 24.834[mm^2]로 거의 동일하며 JIS 정식은 24.5[mm^2]로 ANSI/IEEE정식, 제안식의 정식과 간이식에 비해 0.3 ~ 0.4[mm^2]의 오차가 발생한다. 경납땜방식일 때 ANSI/IEEE 정식과 제안식의 정식, 간이식의 접지도체 굵기는 22.6[mm^2]로 거의 일치하며 JIS 정식은 21.3[mm^2]로 ANSI/IEEE정식, 제안식의 정식과 간이식에 비해 1.3[mm^2]의 오차가 발생한다. 발열용접방식일 때 ANSI/IEEE 정식과 제안식의 정식, 간이식의 접지도체 굵기는 17.227[mm^2]과 17.031[mm^2]로 거의 동일하며 JIS 정식은 13.338[mm^2]로 ANSI/IEEE 정식, 제안식의 정식과 간이식에 비해 약 3.7 ~ 3.9[mm^2]의 오차가 발생한다.

적용된 실제 전선규격도 압축접속방식일 때 ANSI/IEEE 정식, JIS 정식과 제안식의 정식, 간이식에서는 모두 38[mm^2]을 적용하나, 경납땜방식일 때 ANSI/IEEE 정식과 제안식의 정식, 간이식에서는 38[mm2] 을 적용하고 JIS 정식은 22[mm^2]을 적용한다. 또한, 발열용접방식일 때 ANSI/IEEE 정식과 제안식의 정식, 간이식에서는 22[mm^2]을 적용하고, JIS 정식은 14[mm^2]을 적용한다.

상기의 결과에 따라서 접지도체 굵기에 대해 본 논문에서 제안한 정식과 간이식이 ANSI/IEEE 정식과 거의 일치하며 JIS 정식에 비해 정확한 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 안전하고 경제적이며 효율적인 최적의 접지시스템을 구축하기 위해 접지도체 굵기 산정 방법에 대한 국·내외 규정을 비교·검토하여 새로운 접지도체 굵기 산정 방법을 제시하고 타당성을 입증·분석 하였다. 또한, 압축접속방식, 경납땜방식, 발열용접방식과 같은 접속방식에 따른 접지도체 굵기 간이식을 제시하고 타당성을 입증·분석하였으며 사례연구를 통해 논문의 신뢰성을 검증 하였다. 본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 새로운 접지도체 굵기 산정방법 제시

국내·외 접지도체 굵기 계산식에 대한 비교·검토를 하고 최소자승법과 각 구간별 기울기, 도체전류 분류율을 이용하여 새로운 접지도체 굵기 산정방법을 제시하였다.

2. 새로운 접지도체 굵기 산정방법 타당성 입증·분석

모델링한 수식과 국외의 규정을 온도변화에 따라, 고장전류크기변화에 따라, 고장지속시간변화에 따라 비교하여 새로운 접지도체 굵기 산정방법의 타당성 입증하고 분석하였다.

3. 접속방식에 따른 접지도체 굵기 간이식 제시

압축접속방식, 경납땜방식, 발열용접방식과 같은 접속방식에 따른 접지도체 굵기 산정방법의 간이식을 제시하였다.

4. 접속방식에 따른 간이식의 타당성 입증·분석

본 논문에서 제안한 간이식과 ANSI/IEEE 정식, JIS 정식, 본 논문에서 제안한 정식을 고장전류크기변화에 따라, 고장지속시간변화에 따라 비교하여 접속방식에 따른 간이식의 타당성 입증·분석하였고 사례연구를 통해 검증 하였다.

[참 고 문 헌]

[1] ANSI/IEEE Std. 80-1986, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1986.

[2] ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2000.

[3] ANSI/IEEE Std. 81-1983, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1983.

[4] ANSI/IEEE Std. 142-1991, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1991.

[5] ANSI/IEEE Std. 367-1996, "IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage From a Power Fault", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1996.

[6] 송영주 "접지도체의 굵기 및 간격배치에 따른 새로운 접지설비 모델", 홍익대, 2002.

[7] 高橋建彦외, "接地設計入門", 東逸出版社, 1993.

[8] 최홍규외, "전력사용시설물 설비 및 설계", 성안당, 2001.

[9] 최홍규외, "접지설비 및 설계", 성안당, 2004.

[10] 이복희외, "접지의 핵심 기초 기술", 의제, 1999.

[11] 高橋建彦, "그림해설 접지시스템입문", 성안당, 2003.

[12] 최세하, "알기쉬운 접지 실무기술", 진한도서, 1999.

[13] "내선규정", 대한전기협회, 2000.

[14] "전기설비기술기준", 산업자원부, 2001.