

전국의 송전선로 전자계 측정치와 계산치와의 비교 분석

김상범, 조성배, 신구용, 이동일, 김정부
한국전력공사 전력연구원

An analysis of the measured electric and magnetic fields of transmission lines in Korea

S.-B.Kim, S.-B.Cho, K.-Y.Shin, D.-I.Lee, J.-B.Kim
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - A nationwide survey for electric and magnetic fields(EMFs) near overhead transmission lines has been conducted. The median values of the electric and magnetic fields of 208 transmission lines were 0.50 kV/m and 12.6 mG, respectively. The maximum values were 3.16 kV/m and 125 mG. The measured EMFs were compared with the calculated ones. The causes of the discrepancy between measured and calculated EMFs are also discussed.

1. 서 론

1970년대 후반 자계의 인체 영향에 대한 역학연구 결과가[1] 보고된 이래 선진국에서는 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 미국에서는 EMF RAPID(research and public information dissemination) 프로그램을 범국가적으로 수행하면서 5년간 6,500만불의 예산을 투입하고 있다. 세계보건기구에서도 23개국의 정부 및 학회와 공동으로 5년간 333만불을 투입하여 연구를 수행하고 있다. 이에 비해 국내에서는 최근 들어 전자계 영향에 대한 국민적인 관심이 크게 높아지고 있으나 국내에서 수행된 전자계 관련 연구는 공학적인 분야와 생체학적인 분야를 막론하고 극히 미미한 실정이었다.

그러나 최근 국내에서도 전자계의 노출량 평가를 위해 전국적인 규모의 송전선로 근처에서의 전자계 측정에 관한 연구와[2] 체계적인 동물연구로서 전자계가 양의 면역체계에 미치는 영향이[3] 조사된 바 있다. 특히 송전선로 근처에서의 전자계 측정은 인근에 거주하는 사람의 노출량 평가를 위해 필수적이라 할 수 있다. 하지만 운전 중인 송전선로에 대해서는 직접 측정하는 방식이 가장 정확하고 확실한 방법일 수 있으나 가설 중인 송전선로에 대해서는 전자계를 예측하는 기법이 더욱 중요하게 된다.

본 연구의 목적은 전자계의 이론적인 계산 수치를 실제 측정값과 비교하여 그 차이를 분석하고 신설 송전선로의 전자계 예측 방법으로서의 타당성을 확인하는 것이다. 이를 위해 무한 직선 선로를 가정한 송전선로 근처에서의 전자계 크기를 계산하고 이를 측정치와 비교하였다. 비교 방법은 특정 송전선로에서 특정 시간대에서의 횡방향 거리에 따른 비교와 전류 크기의 변화에 따른 비교, 그리고 전체 측정치의 선로높이 변화에 따른 비교로 구분하여 수행하였다.

2. 본 론

2.1 전자계 계산 이론

송전선로 근처에서의 전계 계산에는 공간에 자유 전하가 없고, 지면의 도전율은 충분히 커서 상용주파수의 전하량 변화보다 더 빠르게 전하 분포가 이루어지며, 공기와 진공의 유전율과 동일하다고 가정하였다. 이때 n 개의 도체로 이루어진 송전선로의 전압 V 와 전하 Q 의 관계는 전압계수(potential coefficient) P 를 사용하

여 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

$$V_i = \sum_j P_{ij} Q_j$$

이때

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2Z_i}{d_i}\right) \quad (i = j)$$

$$= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left[\frac{(Y_i - Y_j)^2 + (Z_i + Z_j)^2}{(Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (i \neq j)$$

이며, Y_i , Z_i 는 각각 i 번째 도체와 계산 위치와의 수평거리, 수직거리를 의미한다. d_i 는 도체의 직경, ϵ_0 는 진공의 유전율이다. 이제 각 도체의 전계 E_i 는 다음 식으로부터 계산된다. 여기서 R_i 는 i 번째 도체와 계산 위치와의 직선 거리이다.

$$E_i = \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0 R_i}$$

자계 계산에는 도체의 길이가 무한히 길고, 대지를 흐르는 회귀전류는 없다고 가정하였다. 자계 B_i 는 다음의 간단한 식으로부터 계산되며, 여기서 μ_0 는 진공과 공기 중의 투자율(Permeability Constant), I_i 는 i 번째 도체를 흐르는 전류이다.

$$B_i = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi R_i}$$

2.2 전자계 측정 방법

측정에 사용된 계측기는 미국의 EPRI와 Enertech Consultant사에서 공동으로 개발한 모델명 EMDEX II 였다. 계측기 내부에 3 방향의 자계 센서가 내장되어 3 축 합성치로서 액정화면에 표시된다. 전계를 측정하기 위해서는 두 개의 평행 금속판으로 구성된 센서를 별도로 연결하여야 하고 1 축 방향의 값을 측정한다. 이 계측기의 가장 큰 장점은 측정된 전계와 자계 수치가 계측기 내부에 있는 기억 소자에 저장되고 일반 컴퓨터와 연결하여 수치를 주고받을 수 있다는 점이다. 회사측에서 제시한 계측기의 정확도는 전계 $\pm 3\%$ 이내, 자계 $\pm 1\%$ 이내이며, 세부 사양은 다른 문헌에 잘 나타나 있다 [2].

송전선로 근처에서의 전자계 측정은 전력선의 횡방향으로 2 m 간격마다 측정이 이루어졌다. 전계는 주의 물체에 의해 그 크기가 변화할 수 있으므로 적절한 거리를 두고 측정을 요한다. 본 연구에서 사용된 계측기는 1.5 m 길이의 절연봉을 사용하도록 되어 있다. 지상 거리 기준은 인체의 중심이라고 할 수 있는 지표면 1 m 지점으로 하였다. 선로 높이의 측정은 SupaRule System사에서 제작한 전선높이 측정기를 사용하였는데, 이는 초음파를 이용하여 도체의 높이를 측정하는 것으로 제작사에서 제시한 정확도는 0.5% 이내였다. 선로를 흐르는 전류는 해당 선로를 관할하는 변전소의 전

류계에서 확인하였다.

2.3 전계 측정치와 계산치의 비교

2.3.1 특정 선로에서 횡방향 거리에 따른 비교

그림 1은 전형적인 345 kV 송전선로 근처에서 측정된 전계의 횡방향 분포도이다. 이때 선로 높이는 17.1 m였다. 그림에서 실선은 2 m 간격으로 측정된 수치, 점선은 계산 수치를 그래프로 표시한 것이다. 일반적으로 2회선 송전선로에서 전계의 최대치는 선로 중심에서 약 8~10 m 떨어진 지점에서 나타난다. 전계 측정 probe가 두 개의 평행 금속판으로 구성되어 있으므로 측정된 수치는 지면과 수직인 성분이 된다. 이로부터 측정된 전계는 계산된 것보다 작음을 알 수 있다.

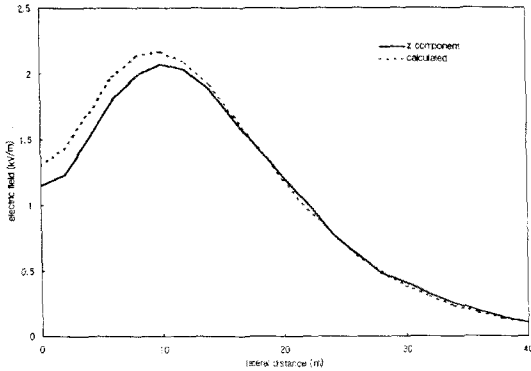


그림 1. 전형적인 345 kV 송전선로의 횡방향 전계

2.3.2 선로높이에 따른 비교

선로의 전압이 결정되면 전계의 크기를 주로 변화시키는 요인으로 선로높이가 있을 수 있다. 그림 2는 국내의 345 kV 송전선 중에서 소도체수가 4 개인 것들에 대하여 선로높이에 따른 전계의 크기 변화를 보여주는 것이다. 이는 여러 개의 송전선로에서 전계 크기를 측정하고 그때의 선로높이에 따라 최대치를 표현한 것이다. 여기서 실선은 계산으로부터 얻어진 곡선이고 ○는 실제 측정치이다. 점선은 계산으로 얻어진 곡선이 지수 함수를 따른다고 가정하고 실제 측정치를 가장 근사시키는 곡선을 얻은 것이다. 이 두 가지 곡선의 크기 차이는 약 40% 정도임을 알 수 있었다.

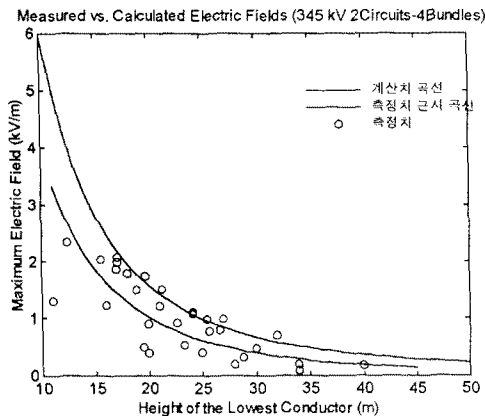


그림 2. 345 kV 2회선 4도체 선로의 높이에 따른 최대 자계 크기 변화

2.4 자계 측정치와 계산치의 비교

2.4.1 특정 선로에서 횡방향 거리에 따른 비교

그림 3은 전형적인 345 kV 송전선로 근처에서 측정된 자계의 횡방향 분포도이다. 마찬가지로 선로높이는

17.1 m이며 이때 선로를 흐르는 전류는 630 A였다. 그림 3에서 지표면과 수직인 방향(z-component)의 성분은 선로 중앙에서 최대이지만 선로 길이 방향과 수직하고 지표면과 평행한 방향(y-component)의 성분은 선로 중심으로부터 약 10 m 떨어진 지점에서 최대를 나타내고 있다. 선로의 길이 방향(x-component)의 자체 성분은 이론적으로 0이 되어야 하나 측정시 계측기의 길이 방향이 지표면에 수직인 방향과 정확히 일치하지 않고 약간 기울어져서 검출된 것이다.

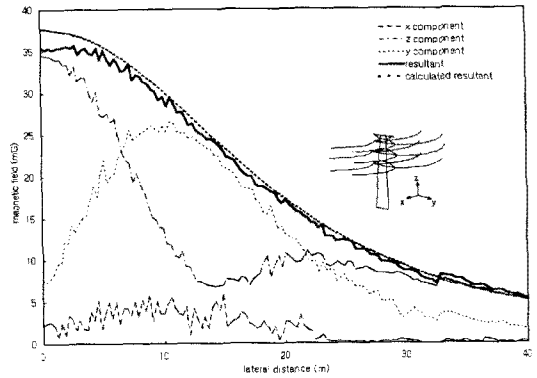


그림 3. 전형적인 345 kV 송전선로의 횡방향 자계

이들 세 가지 성분의 합성치는 선로 중심에서 최대를 나타내고 횡방향으로 멀어질수록 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러나 횡방향 거리에 따라 단순하게 감소하지 않고 증감을 반복하는 현상을 보이고 있는데, 이는 측정 당시 선로를 흐르는 전류가 일정하게 유지되지 않았기 때문으로 생각된다. 그림 3에서도 굵은 점선으로 표시된 것은 자계의 계산 수치로서 한국전력공사의 표준 철탑 형태를 기초로 한 것이다. 자계는 전계와 다르게 약 7% 정도 편차를 보이고 있다.

2.4.2 전류 변화에 따른 비교

자계의 크기는 전류에 직접 비례하기 때문에 전류의 변화에 따라 자계는 직선적으로 변화한다. 앞서 한 가지 특정 선로에서 횡방향 거리에 따른 비교는 전체적인 송전선로의 오차를 가늠하기 어렵다. 따라서 여기서는 한 가지 특정 선로라고 하더라도 여러 날에 걸쳐 측정하여 전류의 변화에 따라 자계의 변화를 관찰하여 이론적인 값과 비교하고자 하였으며 이를 그림 4에 나타내었다.

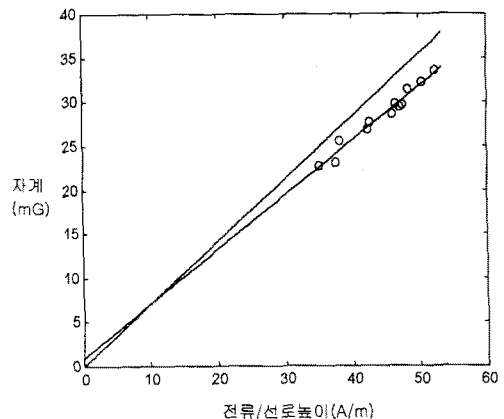


그림 4. 전류변화에 따른 자계 크기 변화

그림 4는 345 kV 송전선로의 경우에 전류변화에 따

른 자체 크기변화 양상을 보여주고 있다. 이 선로의 높이는 24.8 m였다. 그림의 점선은 계산치를 의미하며 기울기는 0.709이고, 실선은 측정치 근사 직선으로 기울기는 0.617이었다. 여기서도 측정치가 실측치보다 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

2.4.3 선로높이에 따른 비교

전계와 다르게 자체는 선로의 전압과 관계없고 전류와 거리에 의해서 결정된다. 또한 자체는 전류에 직선적으로 관계하기 때문에 선로높이만을 변수로 하려면 전류의 크기를 일반화할 필요가 있다. 따라서 여러 군대의 송전선로 자체 측정치를 당시 전류로 나눈 값을 선로높이에 따라 비교하였고 이를 그림 5에 나타내었다.

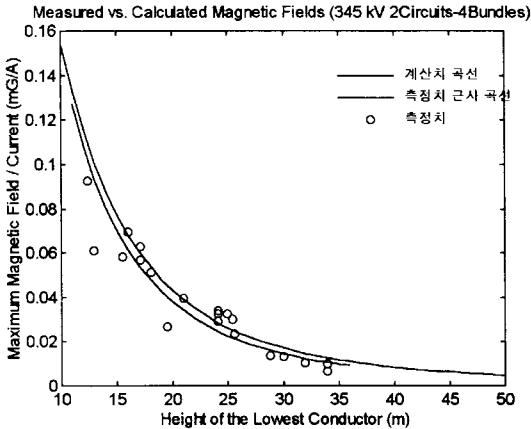


그림 5. 345 kV 2회선 4도체 선로의 높이에 따른 최대 자체 크기 변화

그림 5는 국내의 345 kV 송전선 중에서 소도체수가 4 개인 것들에 대하여 선로높이에 따른 자체의 크기 변화를 보여주는 것이다. 전계의 경우와 마찬가지로 여기서 실선은 계산으로부터 얻어졌고 점선은 실제 측정치를 가장 근사시키는 곡선이다. 측정치와 계산치의 차이는 송전선로 높이에 크게 관계없이 약 7% 정도임을 알 수 있었다. 여기서 근사 곡선을 크게 벗어나는 몇 가지 측정치는 그 차이를 볼 때 전류치의 편차인 것으로 추측된다.

2.5 측정치와 계산치 차이에 대한 고찰

이와 같이 측정치와 계산치의 차이에 대한 원인으로서 실제 송전선로의 도체배열이 표준 설계 형태와 다소 차이 나기 때문일 수 있다. 도체의 간격이 표준보다 더 가까이 모여 있다면 실제 측정치는 계산치보다 더 작게 나타난다. 그러나 이러한 오차는 매우 작으리라 예상되며 전계와 같이 40% 정도 차이나는 현상은 설명하기 어렵다. 또한 실제 선로에서 도체 간격의 차이는 작을 수도 있고 클 수도 있으므로 여러 개의 송전선로를 고려하여 근사화한 곡선에서는 이들의 영향을 무시할 수 있다. 그 밖에 선로의 전류도 변전소에서의 전류치를 읽은 것이므로 참값과 상당히 벗어날 수 있으나 도체 간격과 마찬가지로 여러 선로를 고려할 때 무시할 수 있다.

따라서 그림 2와 5의 경우처럼 여러 선로를 고려하여 실측치와 이론치를 비교한 것의 차이는 다른 원인으로 보아야 한다. 우선 전계의 경우 주위 물체에 의해 쉽게 차폐되는 성질이 있다. 이는 이들 물체로 전계가 집중되기 때문에 실제 측정치가 더 작게 나타남을 의미한다. 송전선로 근처에서 전계를 측정할 때 주위에 있었던 수목이나 건물들은 전계를 차폐시킬 수 있는 능력이 충분해 있으며, 따라서 이러한 물체의 전계 차폐 특성 때문에 이론치와 40% 가까이 비교적 큰 차이가 나타난 것으로 믿어진다.

한편, 자체는 전계와 달리 실측치가 계산치에 비해 작더라도 7% 정도 밖에 차이하지 않는다. 또한 자체는 주위 물체에 의해 쉽게 차폐되지 않으므로 그 원인은 다른 데서 찾아야 할 것이다. 가장 가능성이 있는 원인으로서 도체 자체 하중에 의해 나타나는 처짐 현상을 들 수 있다.

자체의 계산에는 무한히 긴 직선 선로를 가정하였으나 실제는 첩탑과 첩탑 사이에서는 도체 자체의 중량에 의해 직선 선로가 되지 않는다. 이를 그림으로 나타낸 것이 그림 6이다. 계산시에는 그림 6에서 선로높이 H를 적용하고 무한직선 선로를 가정하여 계산치를 얻는다. 그러나 실제 선로는 자체 하중에 의해 도체 중심부가 하부로 처지며 측정시 가장 선로높이가 낮은 위치에서 측정값을 얻었으므로 위로 굽어진 선로의 자체 측정치는 직선을 가정한 계산치보다 항상 크게 얻어진다.

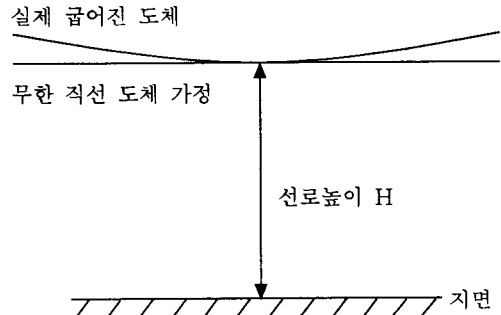


그림 6. 실제 선로와 계산 선로의 비교

이러한 도체의 처짐 현상에 의해 측정된 자체 크기는 계산된 것보다 7% 정도 차이나는 것으로 판단된다. 그 밖에 전계와 자체에 의해 가공전선에 유도된 전류의 영향도 고려할 수 있으나 이에 대한 고찰은 향후에 이루어질 것이다.

3. 결 론

송전선로 근처에서의 전계와 자체를 측정하고 이를 계산치와 비교하였다. 전계의 경우 측정치는 계산치보다 40% 정도 적었으며 이는 전계의 차폐 특성 때문으로 판단되었다. 자체의 경우 측정치는 계산치보다 7% 정도 밖에 차이 나지 않았는데 이는 도체 자체 하중에 의해 아래로 처지는 현상 때문으로 판단되었다. 간단한 이론적인 수식에 의해 송전선로 근처의 전자계 계산 방법은 실제 측정치와 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] N. Wertheimer and E. Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer", *Am. J. Epidemiol.*, 111(4), 273-284 (1979).
- [2] 김상범 외 4인, "송전선로 부근과 가전제품의 전자계 측정", 한국전자과학회논문지, 9(5), 687-697 (1998).
- [3] 한국전력공사 전력연구원, "송전선로 전자계 영향 연구 (I)", 최종중간보고서, '99전력연-단250, TR.96EJ29.J1999.243 (1999).
- [4] Electric Power Research Institute, "Transmission line reference book - 345 kV and above/second edition", Palo Alto, California (1982).