한국정보전자통신기술학회논문지(jkiiect)'24-10, Vol.17 No.5
논문 24-17-05-351 http://dx.doi.org/10.17661/jkiiect.2024.17.5.351

# 지상항법 로란-C 송신 안테나의 출력 처리 용량 분석

김장한*

# Analysis on the Power Handling Capability of Ground Navigation Loran-C Transmitting Antenna

Jang-Han Kim*

**요 약** 본 논문에서는 지상항법용 로란-C 송신 안테나의 전력 처리 용량을 분석하였다. 지상항법용 단축형 우산형 모노폴 안테나의 전력 처리 용량은 안테나 실효고 이외에 안테나에 사용된 기부 및 지선 애자의 절연 전압에 의해 결정된다. 본 논문에서는 송신 안테나 전력에 따른 기부 애자의 절연 전압과 안테나와 지선이 연결되는 지점의 절연 전압을 구하기 위해 안테나 높이에 대한 안테나 전압을 도출하여 사용된 애자들의 절연 전압과 비교하여 안테나의 전력 처리 용량을 분석할 수 있도록 하였다. 송신국 안테나를 대상으로 사용된 애자의 절연 특성과 비교 분석한 결과, 50[kW]~100[kW] 안테나 출력에 따라 지선 연결점들의 절연 전압은 약 69[kV]~128[kV]로 2개의 지선 애자를 직렬로 사용하는 방법이 적합하며, 안테나 기저부의 절연 전압은 64.8[kV]~91.7[kV]로 안테나 출력을 50[kW]에서 100[kW]로 운용할 수 있는 전력 처리 용량을 가질 수 있었다.

**Abstract** The power handling capacity of the Loran-C transmitting antenna for terrestrial navigation was analyzed in this paper. The power handling capacity of a shortened umbrella-type monopole antenna for terrestrial navigation is determined by the insulation voltages of the base and guy insulators used in the antenna in addition to the effective height of the antenna. In this paper, the insulation voltage of the base insulator according to the transmitting antenna power was derived, and in order to obtain the insulation voltages of the points where the antenna and the guy lines are connected, the antenna voltages for the antenna height were derived. By comparing with the insulation voltages of the insulators used, the power handling capacity of the antenna can be analyzed. As a result of comparative analysis of the insulation characteristics of the insulators used for the transmitter antenna, the guy line insulation voltages were approximately 69[kV]~128[kV] depending on the antenna output of 50[kW]~100[kW], so the method of using two guy insulators in series was appropriate, and the insulation voltages at the base of the antenna were 64.8[kV]~91.7[kV], so it was possible to have a power handling capacity that could operate the antenna output power from 50[kW] to 100[kW].

**Key Words** : Antenna voltages according to antenna height, Insulation voltage of base insulator, Insulation voltages of guy insulators, Loran-C transmitting antenna, Transmitting antenna output power.

## 1. 서론

지상항법시스템 중 로란-C 시스템은 장거리 무선항법시스템으로 1989년부터 우리나라에서 운영되고 있다[1]. 로란-C(eLoran포함)는 1개의 주국과 2개~4개의 종국 송신국으로 하나의 체인을 형성하여 주국과 종국으로부터 전파되는 신호의 도달 시간차를 이용하여 위치를 측정하는 쌍곡선 항법으로 선박, 육상 및 항공기 등 폭넓은 분야에서 이용되고 있다. 우리나라는 포

*Department of Electrical Engineering and Computer Science, DGIST
Received September 30, 2024 Revised October 10, 2024 Accepted October 15, 2024

항 송신국을 주국으로 하고 광주송신국 등을 종국으로 하는 체인을 형성하여 이용자들에게 위치정보를 제공하고 있다[1]. 우리나라의 해역과 육상을 서비스 영역으로 운용 중이며, 서비스 영역의 안정된 전파 송신을 위한 송신 안테나 및 송신기가 구축되어 운영 중이다. eLoran 항법시스템을 포함한 로란-C 지상항법시스템은 100[kHz] 대역의 장파대역을 사용하며, 출력 방사를 위한 단축형 우산형 상부장하소자(TLE:Top-loading wire) 모노폴 안테나를 구축하여 사용하며, eLoran 서비스 시스템으로 다양하게 확대 연구되고 있다[2][3][4]. 장파 대역을 사용하는 지상항법 송신 안테나는 1966년 미해군성에서 시험 모델로부터 도출된 시험 결과를 이용하여 현재까지 설계에 사용되고, 설계된 안테나를 운용하면서 검증되고 있다. 이러한 설계 방법은 수십 미터에서 수백 미터의 물리적 구조를 갖는 단축형 우산형 모노폴 안테나의 설계로서, 설계 및 구축시 발생되는 일정한 오차 범위 내에서 계속 활용되고 있다[5]. 시험 모델로부터 추출되는 안테나 설계는 안테나 높이에 대한 방사저항에 대한 전기적 특성을 주로 구현하도록 제시되고 있다. 그러나, 장파 대역의 지상항법시스템은 넓은 서비스 지역으로 확대되면서 안테나의 물리적 변화없이 수용 가능한 방사 전력에 대한 해석을 요구하고 있다. 안테나 방사 전력은 단축형 우산형 모노폴 안테나를 물리적으로 구성하는 절연 애자의 절연 전압에 의존하므로[6], 절연 전압에 대한 안테나 특성 해석이 필요하게 되었다.

이에 본 논문에서는 로란-C(eLoran 포함)이외에 지상항법시스템에서 주로 구축되어 운영 중인 단축형 우산형 모노폴 안테나와 송신기가 접속되는 기저부의 전압과 지선 연결점의 전압 즉, 송신 안테나 높이에 따른 안테나 전압을 도출하여 안테나 방사 출력에 대한 기부 및 지선 절연 전압을 산출하였다. 기부 및 지선 절연 전압은 안테나 방사 저항과 안테나 설계에서 활용하는 전력 처리 용량, 그리고 로란-C 전송 신호 특성에 대한 방사 전력으로부터 분석한다. 지선 절연 전압은 등가 전송선 이론으로부터 안테나 높이에 대한 안테나 전압을 유도하고 연결 지점에서의 절연 전압을 산출한다. 산출된 기부 절연 전압과 지선 절연 전압으로부터 안테나가 수용할 수 있는 전력 처리 용량을 분석 제시한다. 본 논문에서의 안테나 출력 처리 용량 분석은 기존 설치 운용중인 로란-C 송신 사이트의 안테나를 대상으로 수용 가능한 전력 특성을 일예로 제시한다.

## 2. 본론

### 2.1 대상 송신 안테나의 주요 제원

분석 대상인 50[kW]의 전력을 수용하는 광주 로란-C 송신국 안테나의 주요 제원과 안테나 지선 배치도는 다음과 같다[7].

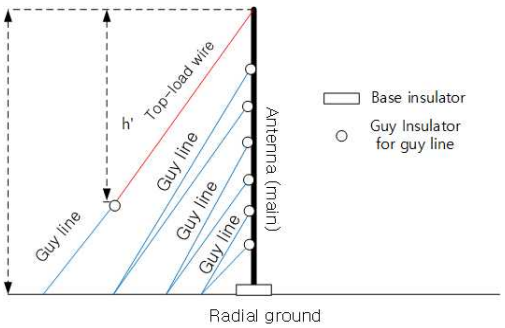


그림 1. 지지용 지선을 갖는 안테나 도(한쪽면)
Fig. 1. Lay-out of antenna with guy line(one-side)

표 1. 분석용 로란-C 송신 안테나 특성
Table 1. Characteristics of Loran-C transmitting antenna for analysis

| Parameters | Value | Remark |
|---|---|---|
| Height of antenna | 122[m] | |
| Height of base insulator | 1.5[m] | |
| Width of antenna | 1.3[m] | |
| Radius of radial ground | 140[m] | |
| Number of the Top-load-wire | 12 | |
| Top-load vertical length (h') | 86.45[m] | |
| Top-load ratio (h'/h) | 70[%] | ref. Fig. 1 |

| | | |
|---|---|---|
| Operating frequency | 100[kHz] | |
| Number of support wire (one-side) | 6 | |
| Radiation resistance | 0.802551 [Ω] | |
| Equivalent resonant inductance | 292.2[μH] | |
| Base insulator | 95[kV] | |
| Insulator for guy wire (TLE, 6th wire) | 70[kV]/ea | connection method : 2 in series |
| Insulator for guy wire(1st ~ 5th wire) | 75[kV]/ea | |

표 2는 그림 1의 안테나 구성에 사용된 기부 애자와 지선 애자의 전기적 특성과 구축시 사용된 지선 애자의 사용 방법이다[8].

## 2.2 송신 안테나 전기적 특성 분석

### 2.2.1 안테나 출력에 대한 기부 전압

본 논문에서는 표 1과 표 2의 안테나 특성과 애자 특성으로 구축된 기존 안테나의 수용 가능한 전력 특성을 분석한다. 지상항법 송신 안테나의 전력은 안테나 실효고에 의해 결정되지만, 안테나의 실효고에 대한 변화가 없는 경우에는 사용된 애자(기부 애자 및 지선 애자)의 절연 전압에 의해 안테나의 출력 처리 용량을 결정하여야 한다.

표 2. 로란-C 송신 안테나 애자의 특성
Table 2. Characteristics of insulators for Loran-C transmitting antenna

| Insulator | Insulation voltage | | Remark (Terms of use) |
|---|---|---|---|
| Base | 95[kV] | | High Voltage rainshield |
| Place of use | Primary insulator | | |
| | Connection method | Insulation votage/ea | |
| TLE wire | 2 in series | 70[kV] | |
| 6th wire | " | 70[kV] | |
| 5th wire | " | 75[kV] | |
| 4th wire | " | 75[kV] | |
| 3rd wire | " | 75[kV] | |
| 2nd wire | " | 75[kV] | |
| 1st wire | " | 75[kV] | |

지금까지 활용되고 있는 장파 대역 단축형 우산형 모노폴 안테나의 출력 처리 용량은 다음 식(1)과 같다[5].

$$P_m[kW] = \frac{0.64\pi^4 V_b^2 f^4 h_e C_e^2}{V^2} \quad (1)$$

여기서, he는 안테나 실효고[m], f는 주파수[Hz], V는 전파의 속도[m/s], $V_b$는 안테나 기부전압[V], $C_e$는 등가 안테나 용량[pF]이다.

$V_b$를 [kV], f를 [kHz], $C_e$를 [pF] 단위로 표시하면,

$$Pm[kW] = 6.91 \times 10^{-22} V_b^2 f^4 h_e^2 C_e^2 \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다.

식 (1)로부터 안테나의 출력 처리 용량(power handling capability)은 안테나 실효고, 정전용량, 주파수 및 기부 전압에 의해 결정되는 것을 알 수 있으며, 기존 안테나에서 안테나 실효고, 정전용량, 주파수 파라미터는 결정된 값이므로, 안테나의 기부 전압을 산출하여 기부 애자의 절연 전압과 비교하여 송신안테나의 출력 처리 용량을 산출할 수 있다.

다음 표 3은 표 1의 안테나 특성과 식 (1)로부터 안테나의 출력 처리 용량에 대해 산출된 기부전압이다.

표 3. 안테나 출력 처리 용량에 의한 기부 전압
Table 3. Base voltage according to antenna handling power

| Antenna handling power [kW] | Base voltage [kV] |
|---|---|
| 50 | 59.94 |
| 75 | 73.41 |
| 100 | 84.77 |
| 125 | 94.78 |

여기서, 안테나 지선 가닥수, 안테나 등가 반경 그리고 접지 반경과 안테나 높이 비에 의해 보강된 안테나 실효고는 222[ft] 이며, 등가 안테나 용량은 6,496[pF]이다.

또한, 로란-C 지상항법시스템에서 로란-C의 신호는 상대적으로 낮은 듀티 사이클을 갖는 펄스 신호이므로 로란-C 송신 신호의 방사 전력(peak radiated power : $P_R$)은

$$P_R = I^2 R_r / 2 \tag{3}$$

이다. 여기서, $I$는 안테나 peak 전류[A]이며, $R_r$은 방사 저항(Ω)이다.

다음 표 4는 방사 저항 0.802551[Ω]과 방사 전력 식 (3)으로부터 안테나 전류를 산출하고 기부 전압을 구한 것이다.

표 4. 안테나 방사전력에 의한 기부 전압
Table 4. Base voltage according to antenna radiation power

| Antenna radiation power [kW] | Antenna current [peak, A] | Base voltage [kV] |
|---|---|---|
| 50 | 352.991 | 64.81 |
| 75 | 432.324 | 79.38 |
| 100 | 499.205 | 91.66 |
| 125 | 558.128 | 102.48 |

표 4의 기부 전압은 안테나 동조를 위한 인덕턴스 양단의 전압으로 산출된다. 표 3과 표 4로부터 실측 모델로부터의 결과 값과 로란-C 방사 전력에 의해 검토된 기부전압 특성 값에 오차가 발생하였으나, 안테나의 안전한 운용을 위해 높은 기부 전압을 갖는 표 4의 안테나 출력 처리 용량을 반영한다.

2.2.2 안테나 높이에 따른 안테나 전압

지선 연결점의 절연 전압을 구하기 위하여 안테나 높이에 따른 전압 분포를 식 (4)와 같은 특성 임피던스를 갖는 전송선 라인으로부터 유도한다 [9][10].

$$Z_o = 60\ln\left(\frac{H'}{a}\right) \tag{4}$$

여기서, $H'$는 기부 애자 높이를 고려한 안테나 높이이며, a는 안테나의 등가 직경[m]이다.

따라서 전송선 해석에 따라 안테나 높이(h)에 의한 안테나 전압[V] 및 전류[A]는 다음과 같다.

$$V(h) = jI_o(X_a\cos(\beta h) - Z_o\sin(\beta h))$$
$$I(h) = I_o(\cos(\beta h) + \frac{X_a}{Z_o}\sin(\beta h)) \tag{5}$$

여기서, $X_a = Z_o\frac{Z_o\tan(\beta H') + X_t}{Z_o - X_t\tan(\beta H')}$ 이며, $\beta$, $I_o$는 위상 정수와 안테나에 인가되는 입력 전류이며, $X_t$는 안테나 끝단($h = H'$)에서의 리액턴스 ($X_t = V(H')/I(H')$)이다.

표 1의 안테나 특성과 식 (5)로부터 지선 애자가 결합되는 안테나의 높이($h$)에 대한 안테나의 전압을 구하기 위한 안테나의 파라미터는 표 5와 같이 요약할 수 있다.

표 5. 지선 연결점의 절연 전압 분석을 위한 안테나 특성
Table 5. Antenna characteristics for insulation voltage analysis of guy strained wire connection point

| parameter | value | remark |
|---|---|---|
| equivalent diameter of antenna | 0.751[m] | |
| $X_a$ | -183.6[Ω] | |
| $Z_o$ | 306.15Ω] | |
| connection point of 1st guy wire | 20m] | height of base insulator : 1.5[m] |
| connection point of 2nd guy wire | 38m] | |
| connection point of 3rd guy wire | 56m] | |
| connection point of 4th guy wire | 74m] | |
| connection point of 5th guy wire | 92m] | |
| connection point of 6th guy wire | 110m] | |
| connection point of Top load | 123.5 | |

여기서, $I_o$ 는 안테나 출력에 따라 변하며, 식 (3)에 의해 구한다.

표 5의 안테나 파라미터와 식 (5)로부터 산출된 안테나 출력 증가에 따른 지선 전압을 분석한 결과는 표 6과 같다.

표 6은 기부 절연 전압과 안테나 높이별 지선절연 전압을 설치된 애자의 절연 전압과 비교를 위하여 요약하여 제시하고 있다. 표 6으로부터 50[kW] 출력에서는 기부 전압이 64.8[kV]로 구축된 기부 애자의 95[kV] 절연 전압을 만족하고 있음을 알 수 있다. 지선 절연 전압은 최대 90.3[kV]로 70[kV] 또는 75[kV] 절연 전압을 갖는지선 애자 2개를 직렬로 연결하여 구축 운용되고 있음이 적합함을 알 수 있다. 아울러, 표 6으로부터 분석된 로란-C 송신 안테나 출력은 50[kW]에서 100[kW]로 전력을 증가한 안테나 출력 용량을 수용할 수 있음을 알 수 있다.

표 6. 안테나 높이와 안테나 전력에 따라 산출된 지선 연결점에서의 절연 전압 특성 분석 결과
Table 6. Results of insulation voltage characteristics of the guy strained wire connection point according to antenna power and antenna height.

| Power [kW] | Place of use for guy line | Voltage [kV] | Insulation voltage of insulator [kV] |
|---|---|---|---|
| 50 | Top load | 90.3 | 140 |
| | 6th wire | 87.8 | 140 |
| | 5th wire | 84.3 | 150 |
| | 4th wire | 80.7 | 150 |
| | 3rd wire | 77.0 | 150 |
| | 2nd wire | 73.2 | 150 |
| | 1st wire | 69.3 | 150 |
| | Base | 64.8 | 95 |
| 75 | Top load | 110.6 | 140 |
| | 6th wire | 107.5 | 140 |
| | 5th wire | 103.3 | 150 |
| | 4th wire | 98.9 | 150 |
| | 3rd wire | 94.4 | 150 |
| | 2nd wire | 89.7 | 150 |
| | 1st wire | 84.9 | 150 |
| | Base | 79.4 | 95 |
| 100 | Top load | 127.7 | 140 |
| | 6th wire | 124.2 | 140 |
| | 5th wire | 119.3 | 150 |
| | 4th wire | 114.2 | 150 |
| | 3rd wire | 109.0 | 150 |
| | 2nd wire | 103.6 | 150 |
| | 1st wire | 98.0 | 150 |
| | Base | 91.7 | 95 |

2.2.3 안테나 해석 프로그램에 의한 안테나 특성

지상항법 송신 안테나의 출력 용량 분석은 안테나의 방사 저항이 주요 분석 소자로 표 1의 방사 저항의 적합성을 위하여, 상용 안테나 분석 프로그램(EZ-NEC)을 사용하여 방사 저항을 분석하였다. 표 1의 단축형 우산형 모노폴 안테나의 수치해석 모델은 그림 2와 같으며, 그림 3은 분석된 안테나 모델의 방사 저항 및 방사 특성을 보여준다.

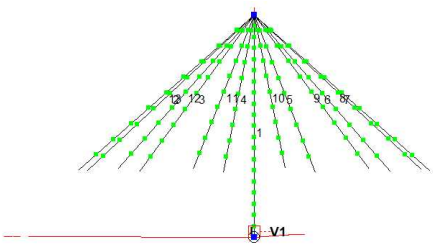


그림 2. 표1의 안테나 수치적 모델

Fig. 2. Numerical model of antenna with physical characteristics of table 1

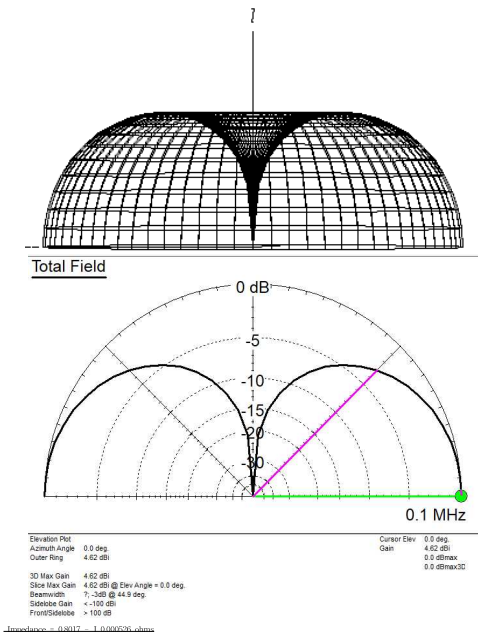


그림 3. 그림 2 안테나 모델의 방사 특성

Fig. 3. Antenna radiation characteristics of Fig. 2 antenna model

그림 3으로부터 안테나의 방사 저항은 0.8017 [Ω]으로 표 1의 방사 저항과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 장파 대역의 단축형 우산형 모노폴 안테나의 수용 가능한 방사 전력을 분석하였다. 기부 절연 전압은 로란-C 전송 신호 특성으로부터 산출하였고, 지선 연결점의 절연 전압은 안테나 높이에 대한 안테나 전압을 유도하여 도출하였다. 기부 절연 전압과 지선 절연 전압을 도출한 결과, 분석 대상인 송신 안테나는 50[kW] 출력에서 100[kW] 출력을 수용할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 분석은 송신 안테나의 물리적인 변화없이 가능한 송신 전력을 파악함으로서 적정한 지상항법 시스템을 운용할 수 있을 것이며. 보다 넓고 안정적인 서비스 운용에 활용할 수 있다.

## REFERENCES

[1] National Maritime PNT Office, Loran-C Introduction, Avaliable : https://www.nmpnt.go.kr/home/sub.do?menukey=4215

[2] Ki-Yeol Seo, "Development Status of eLoran System and Its Performance Analysis", *Proc. of 2018 conference of Korean Institute of Navigation and Port Research,* vol. 2018, pp. 95-96, 2018.

[3] Pyo-Woong Son, "Compensation Method of eLoran Signal`s Propagation Delay and Performance Assessment in the Field Experiment", *Proc. of JPNT*, vol 11, no. 2, pp. 169-171, 2022.

[4] Sang-Seo Kim, "eLoran Observatory Construction Status and Domestic Sea Service Construction Status", *Proc. of 2023 conference of Korean Institute of Navigation and Port Research*, vol 2023, no. 2, pp. 169-171, 2023.

[5] T. E. Devaney, R. F. Hall, and W. E. Gustafson, Low-Frequency Top-Loaded

Antennas, U.S Navy Electronics Laboratory, Califonia, 1966.
[6] Mahmud Riaz, A study LF top-loaded monopole antennas using numerical modeling techniques: comparison to scaled test model measurements, *M.S. Thesis*, U.S. Naval Postgraduate School, California, 1987.
[7] National Maritime PNT Office, Loran-C Facilities, https://www.nmpnt.go.kr/home/sub.do?menukey=4146
[8] Austin insulator, Base Insulators and Guy strained Insulator, https://www.austin-insulators.com/radio/gsbase.html, https://www.austin-insulators.com/radio/scguy.html#specifications
[9] E. Laport, *Radio Antenna Engineering,* McGraw Hill, pp. 102-158, 1952.
[10] IEIE, *Microwave Engineering,* Cheongmungak, pp. 188-208. 2002.

## 저자약력

**김 장 한 (Jang-Han Kim)** **[학생회원]**

- 2016 ~ 2022 충남대학교 전파정보통신공학부 졸업
- 2022 ~ 현재 DGIST 전기전자컴퓨터공학과 졸업

〈관심분야〉 SDN, Network, RF-Communication, 등