

고주파 방사에 대한 수신 안테나로 작용하는 구조물에서의 전격 및 점화 위험성 평가

최상원^o · 이형수 · 이관형
한국산업안전공단 산업안전보건연구원

An Evaluation on Electrical Shock and Ignition Hazards in Metallic Structures Acting Receiving Antennas of Radio-frequency Radiation

Sang-Won Choi^o · Hyung-Soo Lee · Gwan-Hyung Lee
Industrial Safety and Health Research Institute, Korea Industrial Safety Corporation

Abstract - Close to high power radio/radar transmitters, there is a possibility that electrical sparks may occur at discontinuities in metallic structures. If these structures are in an area where flammable mixtures are present, there is a danger that fire or explosion may happen by these sparks. Voltage may be induced on these metallic structures by the radio-frequency transmitter. In this case, a person who comes into contact with these structure may be undergone a severe electrical shock. In this paper, assessment of the these hazards was investigated through experimental and evaluation for actual tower cranes near AM radio transmitters.

- 방사되는 전자파의 세기
- 수신 안테나로서 작용하는 구조물의 특성
- 수신된 에너지 (또는 전력)의 크기 및 스파크 발생 메커니즘
- 통전 경로와 가연성 물질의 특성

2.1 수신 안테나로 작용하는 구조물

두 개의 도전성 물체가 고주파 방전의 간헐적 접촉을 가질 때 전자장에서 금속물체에 전압과 전류가 유기된다. 방전에 의한 점화의 고주파 전력원은 전자장안에 위치한 안테나이다. 안테나 형태는 그림 2.1과 같이 금속물체 또는 파이프라인, 크레인의 로프로 형성될 수 있다. 구조물은 크게 루프형과 수직형(Monopole 안테나)으로 나누어 진다.

1. 머리말

고주파에 의한 점화 위험성은 전기기기가 갖는 고주파 회로의 단선 또는 단락시에 발생하는 전기불꽃과 고주파 방사에 의해 방폭지역 구조물이 고주파의 수신 안테나로 작용하여 발생되는 전기불꽃에 의한 위험성으로 나눌 수 있다.

고주파 방사에 의한 점화 위험성 실험은 수신 안테나로 작용하는 금속성 구조물의 종류가 다양하기 때문에 이에 따른 전기적인 동가회로도 각각 달라 현장에서 일일이 측정된 데이터를 사용하는 시뮬레이션 및 실험이 필요하다. [1]~[6]

본 논문에서는 고주파 방사에 의한 수신 안테나로 작용하는 구조물에서 감전 및 점화 위험성을 평가할 목적으로 AM 방송대역의 주파수에 의해 타워 크레인과 같은 루프형 구조물에 유기된 전압에 의한 감전 및 점화 위험성을 조사·평가하였다.

타당성을 입증하기 위하여 현장에서 측정된 데이터와 실험을 통하여 상호 비교·분석하였으며, 또한 전원 주파수의 변화에 따른 가연성 물질을 점화시키기 위한 최소 점화전압을 구하였다.

2. 고주파 방사에 의한 감전 및 점화 위험성

고주파 방사에 의한 감전 및 점화 위험성은 무선주파수 송신기에 의해 발생하는 전자파가 금속성 도체 구조물과 충돌하여 전류를 유기시키는데 이때 유기된 전류의 진폭은 송신된 신호의 파장 및 전자장의 파장에 관련된 구조물의 형상과 크기에 의존하게 된다. 정상적으로 접속된 구조물이 진동 등에 의하여 순간적으로 차단 및 분리될 때 유기되는 전압 또는 전류가 충분히 큰 경우 스파크가 발생된다. 이러한 상황에서 신체적인 접촉이 이루어진다면 감전의 재해로 진행되며, 또한 가연성 물질이 존재하는 장소에서 발생된다면 화재·폭발의 위험상태가 초래될 수 있다. 그러나 감전 및 점화 가능성은 아래와 같은 여러 가지 요건에 의존한다.

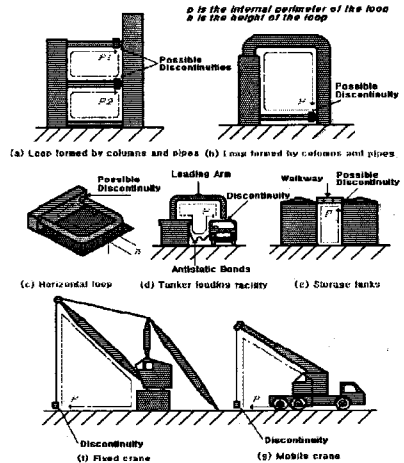


그림 2.1 루프형 구조물의 예

30 MHz 이하 주파수에서는 그림 2.1과 같은 루프 형태의 구조물이 다른 형태의 구조물보다 수신 안테나로서 아주 효과적이라는 것은 널리 알려진 사실이다. 루프의 내부길이가 약 반 파장일 때, 구조물은 자기공진을 일으켜 그 효율은 최대로 된다. 그러나 최적값보다 짧은 루프길이를 갖는 루프 구조물은 불연속 지점을 지나는 표류 커패시턴스에 의해 공진을 일으킬 수 있다. 파장에 대한 루프길이의 비율이 0.5보다 이하일 때 효율은 급격히 감소하며, 이 비율이 0.5보다 큰 값일 때 효율은 일정하게 유지된다. 구조물의 어느 잠재적 불연속 지점에서 다음과 같은 파라미터를 이용할 수 있다면 최대 유기전력을 계산할 수 있다.

- 구조물의 내부길이
- 전송 주파수

· 구조물 장소에서 발생하는 장세기

2.2 실효 장세기의 계산

실효 장세기의 계산은 주파수와 전송극성에 따라 나뉜다. 30 MHz까지의 주파수에서는 수직극성 (식 2.1)과 수평극성 (식 2.2)에서, 또한 30 MHz 이상에서는 식 (2.3)을 이용하여 실효 장세기를 구할 수 있다.

$$E = F(\phi) E_o m \sqrt{PG_o} \quad [V/m] \quad (2.1)$$

여기서

$F(\phi)$ = 수평방사 패턴율
 E_o = 육로 또는 해로의 장세기
 m = 변조율
 P = 안테나에 공급하는 반송전력 [KW]
 G_v = 안테나 이득

$$E \approx \frac{2.7hmF(\phi)\sqrt{PG}}{d^2 \sin \theta \times 10^4} \quad [V/m] \quad (2.2)$$

여기서

h = 안테나 높이 [m]
 m = 변조율
 $F(\phi)$ = 수평방사 패턴율
 P = 안테나에 공급하는 반송전력 [KW]
 G = 안테나 이득
 d = 송신 안테나와 구조물사이의 거리 [km]
 θ = Main Lobe의 정면 각도

$$E = \frac{0.173mF(\phi)\sqrt{PG}}{d} \quad [V/m] \quad (2.3)$$

여기서

m = 변조율
 $F(\phi)$ = 수평방사 패턴율
 P = 안테나에 공급하는 반송전력 [KW]
 G = 안테나 이득
 d = 전송 안테나와 구조물사이의 거리 [Km]

2.3 유기전력(에너지)의 계산과 측정방법

유기전력 또는 에너지의 계산은 주파수에 따라 나뉜다. 식 (2.4)은 30 MHz까지 주파수, 식 (2.5)은 30 MHz 이상의 주파수에서 구조물로부터 추출할 수 있는 최대 전력 P_{max} 을 나타낸 것이다.

$$P_{max} = 702 \frac{E^2}{f^2} \left(\frac{d}{\lambda} \right)^{3.5}, \quad \frac{d}{\lambda} < 0.4 \text{ 일 때} \quad (2.4)$$

$$= 28.4 \frac{E^2}{f^2}, \quad \frac{d}{\lambda} \gg 0.4 \text{ 일 때}$$

여기서

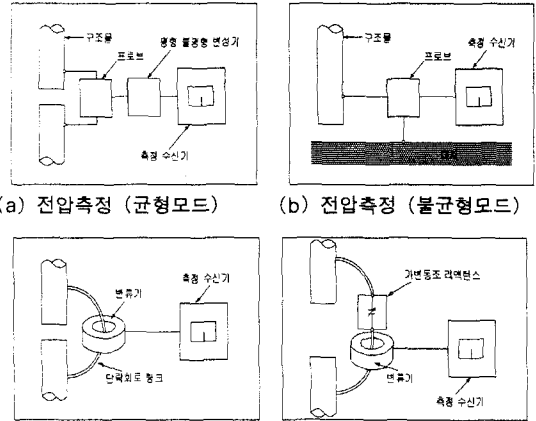
p = 루프형태 구조물의 내부길이 [m]
 E = 실효 장세기 [V/m]
 f = 주파수 [MHz]
 $\lambda = \left(\lambda = \frac{300}{f} \right)$ 에 의해 주어진 파장 [m]

$$P_{max} = \frac{311E^2}{f^2 + 9000} \quad (2.5)$$

여기서 E 와 f 는 식 (2.4)의 정의와 같다.

구조물에 대한 현장실험은 유기전력의 측정과 점화실험을 포함하며, 현재 구조물로부터 추출할 수 있는 전력의 최대 주파수는 30 MHz이다. 무선파장에 의해 조사된 구조물의 불연속 지점에서 추출할 수 있는 전력은 직접측정에 의해 결정할 수 있으며, 그림 2.2는 이들의

측정방법에 대한 것을 나타낸 것이다.



(a) 전압측정 (균형모드) (b) 전압측정 (불균형모드)

(c) 전류측정 (단락회로이용) (d) 전류측정 (리액턴스이용)

그림 2.2 유기전력의 측정방법

3. 실험 및 고찰

3.1 타워크레인 현장실험

대다수 크레인의 기하학은 지브선과 대지가 복귀에 의해 큰 루프가 쉽게 형성되는 것이며 수신 안테나로 작용할 때 아주 효율적인 구조물이고, 또한 일반적으로 고정된 구조물 보다 높은 전원 임피던스를 갖는다.

최상의 경우 크레인 기하학이 지브길이와 상수 변화에 의해 조절될 수 있기 때문에 크레인이 전송 주파수의 하나의 최적 길이로 접근할 수 있는 가능성은 무시할 수 없다. 더욱이 크레인은 집과 대지 또는 구조물 사이의 거리변화에 의해 사용 중에 동조될 수 있다. 스파크를 야기시킬 수 있는 루프의 불연속 지점은 크레인 축과 짐사이 또는 짐과 대지 또는 인접 구조물 사이의 간헐적인 접촉에 의해 쉽게 형성된다.

본 논문에서는 다음의 사례를 적용하여 타워크레인에서의 감전 및 점화 위험성을 평가코자 하였다.

그림 3.1은 수신 안테나로 작용하는 타워크레인 (높이: 70m, 붐대길이: 100m, 용량: 최대 6ton)의 사진을 나타낸 것이며, 그림 3.2는 AM 방송을 송출하는 송신탑을 나타낸 것이다. 크레인과 송신탑과의 거리는 약 200(m) 정도이므로 근거리장에 속한다. 이때 루프면의 방사 면극성의 최대 수신에 기인한 루프에서 식 (3.1)과 같이 전계성분, 식 (3.2)와 같이 자계성분에서 유도된 전압 V 를 구할 수 있다.

$$V = \frac{2\pi ENA}{\lambda} \quad [V] \quad (3.1)$$

여기서

E = 장세기 [V/m]
 N = 루프의 수
 A = 루프의 단면적 [m²]
 λ = 측정된 방사파장

$$V = \frac{Ed}{2} \quad [V] \quad (3.2)$$

여기서

E = 장세기 [V/m]
 d = 다이폴의 길이 [m]

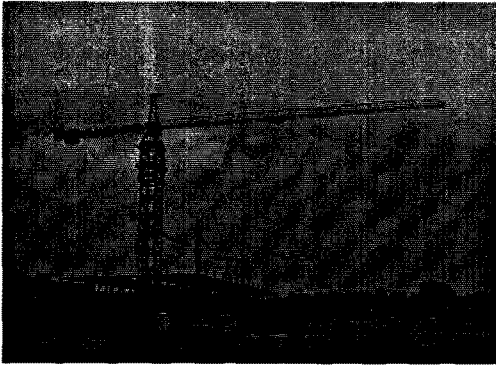


그림 3.1 타워크레인 사진

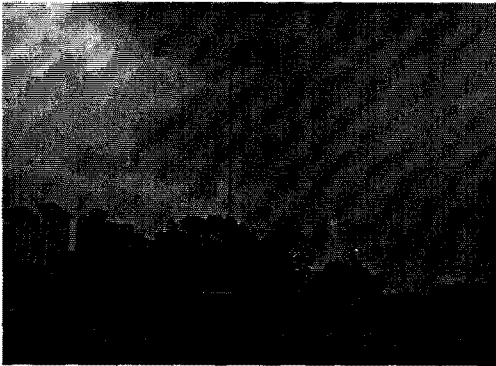


그림 3.2 AM 방송용 송신타워

타워크레인 부근 즉, 송신소로부터 약 200 m 떨어진 지점에서의 측정 주파수는 1.549 MHz, 파장은 약 200 m, 전계의 세기는 0.0427 V/m이었다. 그림 3.3 및 그림 3.4는 그림 2.2의 유기전력 측정방법에 의해 측정한 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 부하로는 백열전구 200 V, 100 W를 연결하였다.

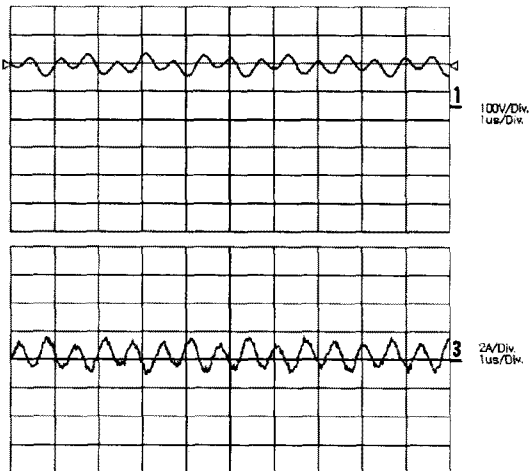


그림 3.3 추출전력 측정-1 (루프길이≒340 m)

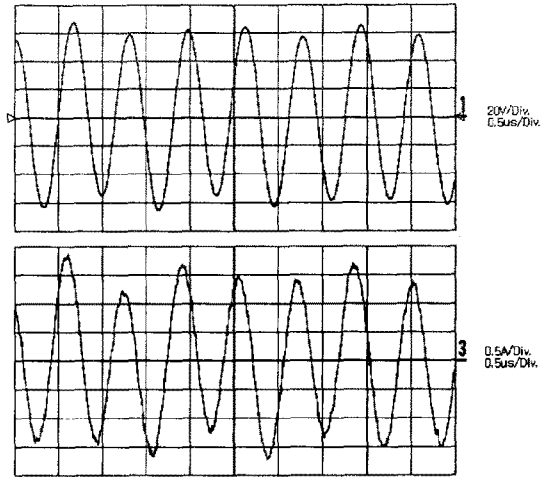


그림 3.4 추출전력 측정-2 (루프길이≒200 m)

3.2 최소 점화전압

3.1절에서 측정한 현장의 데이터를 이용하여 가연성 물질이 존재하는 장소에서 고주파 방사에 의한 타워크레인에서의 점화 위험성을 평가하기 위하여 그림 3.5의 실험회로도를 이용하여 실험가스는 아세틸렌 15±1%/공기, 에틸렌 7.8±0.5%/공기, 메탄 8.3±0.5%/공기를 사용하였고, 고주파 전원은 50 MHz까지 가변 공급하여 최소 점화전압을 구하였다. 이때 사용한 불꽃점화 실험장치는 그림 3.6의 IEC (International Electrotechnical Committee)형을 사용하였다. 본 실험장치는 현재 10 MHz까지의 고주파 방사에서의 개폐 불꽃에 의한 점화실험을 하는데 널리 사용되고 있다.

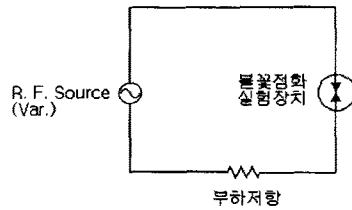


그림 3.5 실험장치 구성도

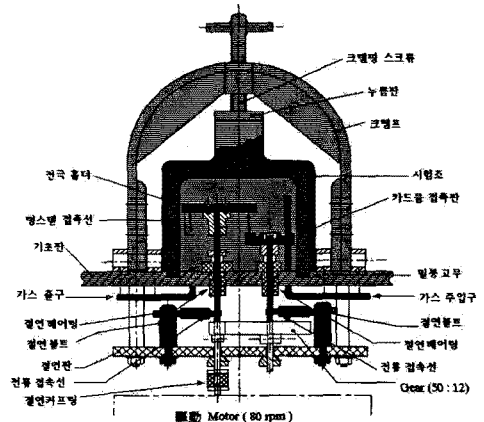


그림 3.6 IEC 형 불꽃점화 실험장치

그림 3.7은 그림 3.5의 회로와 그림 3.6의 실험장치를 이용하여 최소 점화전압을 측정된 결과를 나타낸 그래프이다. 또한, 그림 3.8은 개폐불꽃 발생시의 전압 및 전류 파형을 타워크레인의 현장에서 측정된 것이다.

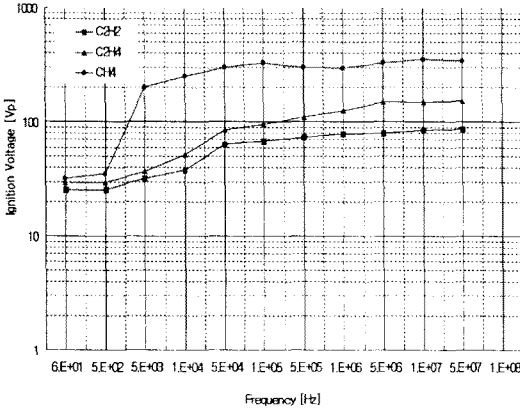


그림 3.7 최소 점화 에너지 측정결과

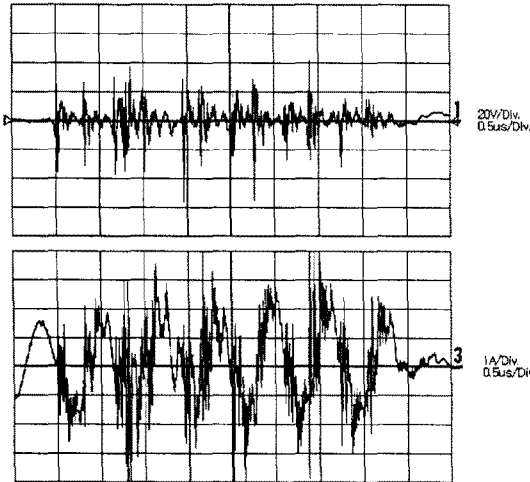


그림 3.8 고주파 개폐시의 전압 및 전류 파형

3.3 실험결과 및 검토

- (1) 그림 3.3과 그림 3.4로부터 타워 크레인에 유기된 전압이 200 V이고, 전구 부하시에 흐르는 전류가 1.5 A이기 때문에 인체 저항 1000 Ω을 고려하면 약 200 mA의 전류가 흘러 수 초 내에 심실세동을 일으켜 루프가 불연속 상태에서 인체에 접촉시 감전에 의한 사망이 될 수 있다는 것을 알 수 있다.
- (2) 그림 3.7 및 그림 3.8로부터 다음의 것들을 알 수 있었다.
 - 주파수가 높게 됨에 따라 아세틸렌, 에틸렌, 메탄의 순서로 점화전압은 크게 되나 500 Hz 이하의 범위에서는 점화에 필요한 전압은 거의 동일하였다.
 - 점화에 필요로 하는 시간은 아세틸렌의 경우 20 μs, 에틸렌의 경우는 40 μs 정도이기 때문에 대략 10 kHz까지는 1회 방전에 의해 점화가 발생한다. 또한, 50 kHz 이상에서는 각각의 20 μs와 40 μs 이내에 발생한 2회 이상의 방전이 점화에 관계한다. 그러나 메탄은 점화에 필요로 하는 시간은 100 μs이므로 500 Hz를 경계로 하여 점화전압이 아주 높아지

게 된다.

점화에 필요로 하는 시간 이상의 주파수에서는 전류가 0으로 될 때에도 전극의 냉각이 충분하게 진행되지 않으므로 진극간에서 방전의 재발생 조건이 유지되어 방전 에너지를 증대시키는 영향이 나타난다고 예상된다.

4. 맺음말

고주파 방사에 의한 수신 안테나로 작용하는 타워 크레인에서 감전 및 점화 위험성을 평가할 목적으로 현장에서 측정된 데이터와 실험 등을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 논문에서 적용한 현장에서, AM 방송용 송신탑으로부터 타워 크레인에 유기된 전압이 200 V이고, 전구 부하시에 흐르는 전류가 1.5 A이기 때문에 인체 저항 1000 Ω을 고려하면 약 200 mA의 전류가 흘러 수 초 내에 심실세동을 일으켜 루프가 불연속 상태에서 인체에 접촉시 감전에 의한 사망이 될 수 있다.
- (2) 주파수가 높게 됨에 따라 아세틸렌, 에틸렌, 메탄의 순서로 점화전압은 크게 되나 500 Hz 이하의 범위에서는 점화에 필요한 전압은 거의 동일하였다.

향후, 타워크레인의 작업현장에서 좀더 정확한 파라미터의 측정된 후 이를 이용한 전자파 차폐실에서 고주파 방사에 의한 감전 및 점화 위험성에 관한 이론 정립과 실험이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] D.P. Howson and G.H. Butcher, "Coaxial breakflash for R.F. ignition of flammable vapours", Proc. IEE(UK), Vol. 122, No. 12, pp. 1453-1454, December 1975.
- [2] S.I. Ghobrial, M.K. Verma and D.P. Howson, "Hazards to inflammable fuels and vapours due to induced microwave radiation", The Radio and Electronic Engineer, Vol. 46, No. 2, pp. 64-68, February 1976.
- [3] D.J. Burstow, R.J. Leland, R. Tomlinson and D.W. Widdington, "Radio frequency ignition hazards", The Radio and Electronic Engineer, Vol. 51, No. 4, pp. 151-169, April 1981.
- [4] J.L.J. Rosenfold, D.C. Strachan, P.S. Tromans and P.A. Searson, "Experiments on the incendivity of radio-frequency, breakflash discharges (1.8-21 MHz c. w.)", The Radio and Electronic Engineer, Vol. 51, No. 4, pp. 175-186, April 1981.
- [5] D.P. Howson, P.S. Excell and G.H. Butcher, "ignition of flammable gas/air mixtures by sparks from 2MHz and 9MHz sources", The Radio and Electronics Engineers, Vol. 51, No. 4, pp. 170-174, April 1981.
- [6] BS 6656, Prevention of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation", 1991.
- [7] 산업안전연구원, 고주파 전기회로에 의한 가연성가스의 점화 위험성 분석 및 방지 대책에 관한 연구, 연구보고서 기전연 95-6-7, 1995. 12.
- [8] 최상원, 이관형, 문정기, "고주파 스파크에 의한 가연성 혼합가스의 점화위험성에 관한 연구", '96 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1913~1916, 1996. 7.
- [9] 산업안전보건연구원, 방폭지역의 불꽃점화 시험을 위한 장치의 개발, 안전분야-연구자료, 연구원 99-25-95, 1998.12.