

라디오파 방사에 의한 점화위험성

An Evaluation on Ignition Hazards by Radio-frequency Radiation

한국산업안전공단 산업안전보건연구원 최 상 원

1901년도에 과학자들이 바라본 20세기의 과학기술의 예상은 탄환열차, 화상통신, 태풍제어 및 동물과의 대화를 예상하였으나 태풍제어와 동물과의 대화는 아직도 과학자들이 이루지 못한 과제이다. 금세기의 당면한 기술은 순수 자연현상의 해명에 의한 새로운 과학 서비스 산업 관련 기술(정보)이다. 이와 관련하여 금세기의 과학자들은 「자원 낭비에 의한 물질문명에의 영향」을 고려한 지구·자연환경의 개선, 폐기물 처리와 자원의 재활용, 정보통신·교통, 방재·안전, 의료기술(건강증진) 및 식료생산이라는 과제를 설정하여 연구를 수행하고 있다. 여기에 안전이 포함되어 있다는 것은 필자와 같이 안전 연구에 종사하는 연구원로서는 매우 고무적인 일이라 하겠다.

1. 머리말

자연성 물질을 점화시키는 점화원으로는 열, 전기적인 스파크 및 기계적인 스파크가 있다. 열적인 요소는 다시 적외선, 태양열, 초음파, 고온 표면, 화염, 고온가스 등이 있으며, 전기적인 스파크는 정전, 섬락, 단선, 단락, 접점 등이 있고, 기계적인 스파크는 충격과 마찰이 있다.

대부분의 점화원에 대해서는 그 메커니즘이 규명되어 있다. 그러나 라디오파(전자파를 포함)의 위험성으로 인체 유해성 문제, 기기의 오작동에 대해서는 널리 알려져 왔으나, 라디오파의 유기에 의한 점화위험성(감전위험성을 포함)에 대해서는 국내에서 그다지 인지하지 못하고 있는 실정에 있었다. 따라서, 송신 안테나 타워 인근의 건설현장이나 파이프 라인으로 구성된 화학공장에서 라디오파의 유기로 인한 감전 및 점화위험성에 대한 인식을 갖고 적절히 대처하여 화재·폭발

및 감전사고를 예방하는 것이 절실히 요망되고 있다.

본고에서는 라디오파에 의해서 구조물에 유기되는 전력에 의한 메커니즘을 제시하고 건축공사 현장 등에 설치된 타워 크레인에서 유기전압 등을 측정/확인한 그 결과 공사장 부근에 위치한 방송용 송신 안테나 타워에서 방사되는 라디오파에 의해 크레인에 인체가 접촉했을 때 감전사고로 이어질 수 있다는 것과 유기된 전력에 의해 화재·폭발이 발생 가능하다는 것도 알게 되었다.

그러나 라디오파 방사에 의한 점화위험성은 수신 안테나로 작용하는 금속성 구조물의 종류가 다양하기 때문에 이에 따른 전기적인 등가회로도 각각 달라 현장에서 일일이 측정된 데이터를 사용하는 시뮬레이션 및 실험이 필요하다.[1]~[5]

2. 라디오파 방사에 의한 점화위험성

라디오파 방사에 의한 이상 징후 사례는 아래와 같이 나타나고 있다고 보고되고 있다.[1]

- 고층 건설 공사장에서 작업자가 로드 혹 교환을 위하여 대기하고 있던 중 크레인 혹은 내려지고 있을 때 순간적으로 크고 생생한 라디오 소리가 라디오가 있지 않은 주변에서 흘러나오는 것을 들음.
- 항만에서 이동용 크레인으로 선박의 하역 작업을 하던 작업자가 전기 쇼크와 화상을 입고 호이스트 로프에서 화재나 폭발을 일으킬 수 있는 전기 아크가 발생하는 것을 목격함.
- 어느 고층 건설 공사장에서 야간 작업을 위하여 크레인 붐에 설치된 전구가 회로 스위치가 꺼져 있는 상태에서도 불이 들어온 적이 있음.

- 강 구조물 설치 작업자가 불안정하게 철타빔에 걸터앉아 있다가 떨어지거나 다른 철타빔에 손을 짚는 순간 앉아 있는 자리에서 떨어질 뻔한 전기 쇼크를 경험함.
- 바닥판과 고소작업에 사용하는 크레인 마스터의 횡 부재 사이에 임시로 설치되어 있던 와이어가 원인으로 모르게 별경게 변화더니 타버린 일이 있었음.

이러한 라디오파 방사에 의한 접화위험성은 고주파 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 상황이 가연성 물질이 존재하는 장소에서 발생된다면 화재·폭발의 위험상태가 초래될 수 있다. 그러나 접화가능성은 아래와 같은 여러 가지 요인에 의존한다.

- 방사되는 전자장의 세기
- 수신 안테나로서 작용하는 구조물의 특성
- 수신된 에너지 (또는 전력)의 크기 및 스파크 발생 메커니즘
- 가연성 분위기 존재

2.1 송신기 및 출력 파라미터

라디오파 방사에 의한 접화 위험성을 야기시키는 송신기 및 출력 파라미터에 관계되는 것으로는 주파수의 범위, 송신기의 출력, 안테나 이득, 변조방식이 있다. 고주파의 접화 위험성을 야기시키는 주파수 대역은 15kHz~35GHz 대역만 취급한다. 송신기의 종류는 아래의 것이 접화를 일으킨다고 보고 있다.

- 라디오 및 TV 방송 수신기
- 상업, 개인 등의 고정 및 이동 송신기
- 레이더
- 항해장비 등

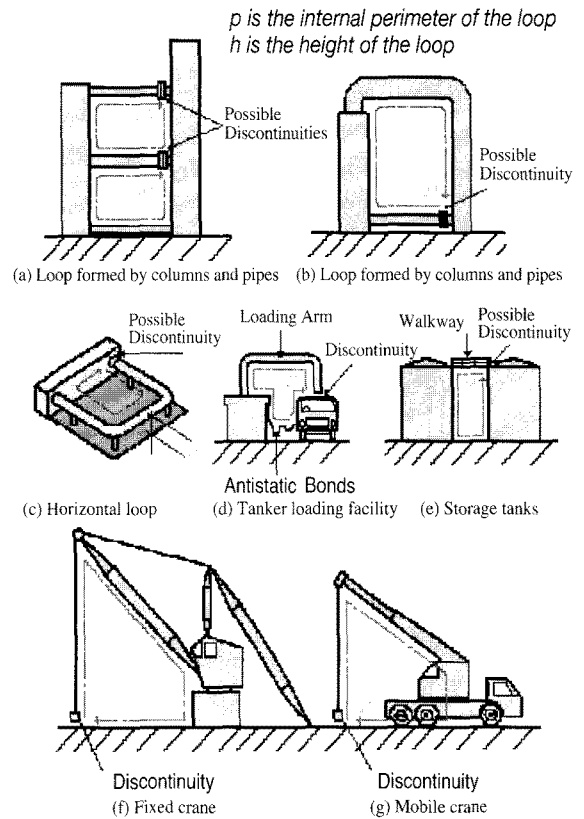
2.2 스파크 발생 메커니즘

비록 높은 고주파 전위가 두 개의 구조물 사이에 존재하더라도 갭의 성질과 스파크 발생 메커니즘은 불연속 지점 둘레에 존재하는 가스 또는 증기는 고주파 접화에 대하여 매우 크

게 관계된다. 만약 두 부분이 초기 접촉으로부터 떨어진다면 고주파 방전은 가장 쉽게 발생한다.

2.3 수신 안테나로 작용하는 구조물

두 개의 도전성 물체가 고주파 방전의 간헐적 접촉을 가질 때 전자장에서 금속물체에 전압과 전류가 유기된다. 이때 접화를 일으킬 수 있는 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 나뉘어 진다.



<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 구

구조물은 불연속 지점을 지나는 표유 커패시턴스에 의해 공진을 일으킬 수 있다. 파장에 대한 루프길이의 비율이 0.5 이하 일 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 유기 전력을 계산할 수 있다.

- 구조물의 내부길이
- 전송 주파수
- 구조물 장소에서 발생하는 장세기

2.4 가연성 분위기

스파크의 전력 또는 에너지를 발생하기 위한 스파크 점화는 가연성 가스 또는 증기의 성질과 농도에 의존하는 임계값을 초과하여야 한다.

2.5 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.

$$E = F(\theta) E_0 m \sqrt{(PGv)} \quad [V/m] \quad (2.1)$$

- 여기서 $F(\theta)$ = 수평방사 패턴율
- E_0 = 육로 또는 해로의 장세기
- m = 변조율
- P = 안테나에 공급하는 반송전력 [kW]
- G_v = 안테나 이득

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

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

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

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

2.6 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 Pmax을 나타낸 것이다.

$$P_{max} = 702 \frac{E^2}{f^2} \left(\frac{p}{\lambda}\right)^{2.5}, \quad \frac{p}{\lambda} < 0.4 \text{일때} \quad (2.4)$$

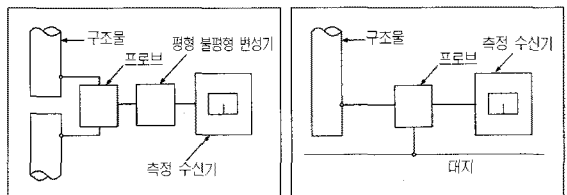
$$= 28.4 \frac{E^2}{f^2}, \quad \frac{p}{\lambda} \gg 0.4 \text{일때}$$

- 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]

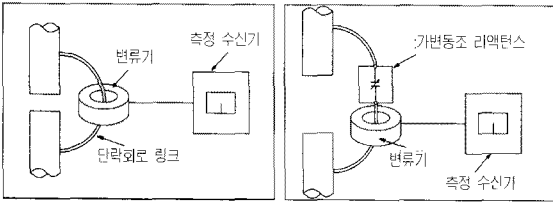
$$P_{max} = \frac{311E^2}{f^2 + 9000} \quad (2.5)$$

여기서 E 와 f 는 식 (2.4)의 정의와 같다.

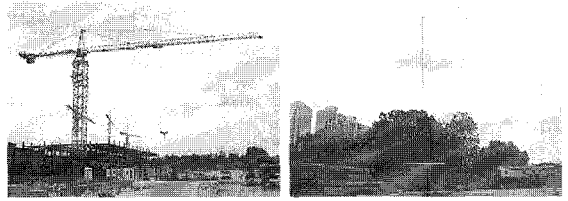
구조물에 대한 현장실험은 유기전력의 측정을 포함하며, 현재 구조물로부터 추출할 수 있는 전력의 최대 주파수는 30 MHz이다. 라디오파에 의해 조사된 구조물의 불연속 지점에서 추출할 수 있는 전력은 직접측정에 의해 결정할 수 있으며, 그림 2.2는 이들의 측정방법에 대한 것을 나타낸 것이다.



(a) 전압측정 (균형 모드) (b) 전압측정 (불균형 모드)



(c) 전류측정 (단락회로 이용) (d) 전류측정 (리액턴스 이용)
 <그림 2.2> 유기전력의 측정방법



<그림 3.1> 타워크레인 사진 <그림 3.2> AM 방송용 송신타워

3. 현장실험 및 고찰

3.1 조사현장 개요

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 상승 변화에 의해 조절될 수 있기 때문에 크레인이 전송 주파수의 하나의 최적 길이로 접근할 수 있는 가능성은 무시할 수 없다. 더욱이 크레인은 짐과 대지 또는 구조물 사이의 거리변화에 의해 사용 중에 동조될 수 있다. 스파크를 야기시킬 수 있는 루프의 불연속 지점은 크레인 훅과 짐 사이 또는 짐과 대지 또는 인접 구조물 사이의 간헐적인 접촉에 의해 쉽게 형성된다.

본고에서는 다음의 사례를 적용하여 타워크레인에서의 접화위험성을 평가코자 하였다.

조사현장	현장 개요
용산	· 타워크레인: 그림 3.1 참조(높이:70m, 볼대 길이:100m, 용량: 최대 60ton) · 송신소: 그림 3.2 참조(AFKN, 주파수:1549 MHz) · 송신소와 타워크레인 사이의 거리:약 200 m · 수신 전계강도: 0.0427 V/m
남가좌동	· 타워크레인(높이:80m, 볼대 길이:70m, 용량:최대 10 ton) · 송신소: 가시거리 밖에 위치 · 최대 수신 주파수: 793.7 kHz
신당동	· 타워크레인(높이:80m, 볼대 길이:70m, 용량:최대 10ton) · 송신소 위치: 남산으로부터 수 km · 최대 수신 주파수: 714 kHz
개봉동	· 타워크레인(높이: 60m, 볼대 길이: 55m, 용량: 최대 10ton) · 송신소(KBS 2, AM 송신타워, 송출 주파수: 639kHz, 송신 출력: 50kW) · 송신소와 타워크레인 사이의 거리: 약 2km

3.2 측정결과

타워크레인에서 수신된 전기적인 파라미터를 측정한 결과는 다음 표 3.1과 같다.

표 3.1 전기적인 파라미터를 측정한 결과

측정개소	주파수[kHz]	전압[V]	전류[A]	비고
용산	1549	200 (최대:400)	1.5 (최대:4)	
남가좌동	792	최대 60	-	
신당동	711	최대 25	-	
개봉동	639	200 (최대:400)	0.5 (최대:1)	

3.3 측정결과 검토

수신 안테나로 작용하는 타워크레인의 루프에서 식 (3.1) 과 같이 전계성분, 식 (3.2)와 같이 자계성분으로도 유도된 전압 V를 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 [m^2]
 λ = 측정된 방사파장

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

여기서 E = 장세기 [V/m]
 d = 다이폴의 길이 [m]

3.4 점화방지 대책

이와 같은 건설현장의 타워크레인, 화학공장의 파이프라인 등의 금속성 구조물로부터 라디오파의 유기전압, 전류 등에 의한 화재·폭발사고를 예방하기 위하여 화학공장 등의 사업

장에서는 다음과 같은 사항을 준수할 것을 권고한다.

- 본딩 이용 : 간헐적 접촉 가능성이 있는 두 부분을 금속성의 도체로 접속시켜 두 지점 사이의 전압을 현저하게 감소시킨다. 본딩 길이는 파장의 100분의 1 이하로 한다.
- 절연 이용 : 본딩을 이용할 수 없는 경우에는 간헐적 접촉 가능성이 있는 두 부분 사이에 절연체를 삽입하여 방전 가능성을 최소화시킨다.
- 구조물의 효율 감소 : 구조물의 루프길이를 최소화함으로써 점화위험의 가능성을 최소화시킨다. 전기적 루프를 파장의 1/4 이하가 되도록 분할한다.
- 구조물의 동조감소 : 구조물에 유도성 부품을 접속한 동조시스템에 의해 불연속 지점의 단자에서 추출전력을 감소시킨다.

4. 맺음말

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

(1) 타워크레인에 유기된 전력이 가연성 물질을 사용하는 화학공장 등에서 발생하는 경우는 루프의 불연속 지점에서 발생하는 스파크에 의한 화재·폭발을 유발시키는데 충분한 에너지가 됨을 확인하였다.

(2) 우리나라 주파수 분배에 따른 방송용 송신기 등의 위치를 파악하여 전자파에 의한 감전 및 점화 위험성을 나타내는 취약지역을 조사한 후, 지리정보시스템 (GIS)을 구축할 필요가 있다.

향후, 이 분야에 대한 연구는 계속 진행되리라 보며, 우리 연구원에서도 전자파 등과 같은 비전리 방사선에 의한 산업 기기로의 오동작, 인체에 대한 위험성을 연구하기 위한 연구 시설이 설치하여 이러한 시설을 이용하여 가연성 물질로의 폭발을 방지할 수 있는 연구를 계속적으로 수행할 예정이다.

■ 참고 문헌

- [1] E. W. Plischke and W. F. Wolff, "Tuned in or Turned on RF Radiation Study", ASSE Journal, pp. 12-15, June 1969
- [2] G. H. Butcher, P. S. Excell and D. P. Howson, "The Ignition Hazard Due to Radiation from Radio Transmitters", Postgraduate School of Electrical and Electronic Engineering, University of Bradford, UK., pp. 143-147, 1975.
- [3] A. J. Maddocks, and G. A. Jackson, "Measurements of Radio Frequency Voltage and Power Induced in Structures on the St Fergus Gas Terminals", The Radio and Electronic Engineers, Vol. 51, No. 4, pp. 187-194, April 1981
- [4] BS 6656, Prevention of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation", 1991.
- [5] 산업안전연구원, 고주파 전기회로에 의한 가연성가스의 점화 위험성 분석 및 방지 대책에 관한 연구, 연구 보고서 기전연 95-6-7, 1995. 12.