산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제21권 A호, 2001.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Nat'l Univ.,Korea, No. 21 A, 2001.

유도전위 검출방식을 이용한 크레인의 고압 전선로 접근 경보장치 개발

Development of the Power Line Proximity Warning Apparatus for Mobile Crane using the Induced Voltage Measurement

최 삼 진* 박 찬 원** 김 일 환**
Choi, Sam-Jin, Park, Chan-Won, Kim, Il-Hwan

Abstract

This paper describes the power line proximity warning device for mobile crane by using the induced voltage measurement method.

A mobile crane worker can be easily exposed to dangerous electrical shock and the electrocution while this are working at near the high-voltage electrical lines. In this paper, the derivation electric-potential of the power lines are simulated and microprocessor-based detecting device and transmitter/receiver modules are introduced to show a solution for the dangerous mobile crane working environment.

키워드 : *유도 전위, 크레인, 고압 전선로, 경보장치*
Keywords : *mobile crane, induced voltage, electrocution, consistency, stable, warning device,*

1. 서론

산업사회의 기술의 발달에 따라 다양한 건설현장에서 건설 시공 작업 혹은 건설 자재의 운반작업등을 위해서 최근 건설용 크레인이 많이 사용되고 있다. 한편 에너지 사용의 증가에 따라 송전선, 배전선 등의 고압선이 도심부 혹은 건설현장에 인접하고 있어 이들 고압선 주위에서의 작업을 피할 수가 없다. 특히 크레인의 선단부가 단순히 활선에 접근하는 것 뿐만 아니라 활선보다 높은 상태에서 선회나 상하 기복 동작을 할 경우 크레인 축이나 크레인 와이어가 활선에 접촉하여 작업자의 감전이나 크레인의 파손, 그리고 활선의 단선에 의한 정전사고 등의 위험성이 있다. 이들 사고는 활선에 절연 방호 기구를 장치하거나 작업 감시인을 배치시킴으로서 방지할 수 있으나 그다지 효과적인 해결방안은 되지 못한다. 따라서 활선에 크레인 축이나 크레인 와이어가 근접하면 위험범위내일 경우 경보를 발생시켜 작업자 및 재산상의 피해를 방지하는 경보장치, 즉 고압선로 접근 검출 방법에 대한 연구의 필요성이 대두된다.

크레인의 활선 접근을 알려주는 경보장치는 원리적으로 유도전위방식과 적외선을 이용하는 방식, 화상처리를 이용하는 방식들이 보고되고 있으나 이들 모두 작업상황을 고려한 경보범위의 설정에 문제점들을 내포하고 있으며 제작비용이 경제적이지 못한 단점들이 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 실용성을 고려하고 상품성을 갖는 시제품 개발을 위한 전 단계로서의 크레인의 고압 전선로 접근 검출 방법에 대한 연구를 수행하고자 하였다.

* 강원대학교 전기공학과, 석사과정
** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 교수, 공학박사

2. 연구 배경

크레인의 고압 전선로 접근 검출 경보 장치를 그림 1과 같이 고압 활선에 근접함을 감지하는 센서부와 이들 작업자에게 경보를 표시하는 경보장치로 구성된다. 본 장치의 센서부는 작업환경의 물리적인 변화와 기후적인 것과 같은 화학적 변화 요소에 최대한 일관성 있게 안정하게 대응하여야 하며 어떠한 경우도 방호 경보 실패에 의한 오동작이 없어야 한다.

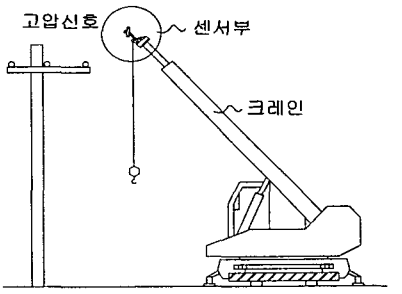

Fig. 1 The power line proximity warning apparatus for mobile crane

이상과 같은 조건을 만족하는 검출장치를 개발하는 것을 본 연구의 기본 내용으로 한다

3. 이론적 배경

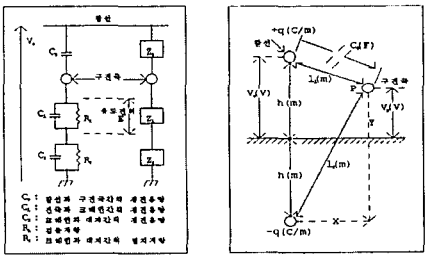

Fig. 2 The induced voltage measurement (Equivalence, Reflection)

본 연구에서는 크레인 선단에 붙여진 1개의 구전극에 유도된 전위에 의해 활선에의 접근을 판단한다. 그러므로, 그림 2의 equivalence measurement method 등가회로에 있어서, impedance Z_0^*, Z_1^*, Z_2^*는 각각,

$$Z_0^* = \frac{1}{j\omega C_0}(\Omega)$$
$$Z_1^* = \frac{R_1}{1+j\omega C_1 R_1}(\Omega) \quad \text{---------- (1)}$$
$$Z_2^* = \frac{R_2}{1+j\omega C_2 R_2}(\Omega)$$

이며, $Z_0^* >> Z_1^* >> Z_2^*$ 로 생각되어, 구전극에 유도되는 전위 $|V_c^*|$는, 활선의 전위를 $|V_o^*|(V)$ 라 하면,

$$|V_c^*| = \frac{|Z_1^*|}{|Z_0^* + Z_1^* + Z_2^*|}|V_o^*|(V)$$
$$\fallingdotseq \frac{|Z_1^*|}{|Z_0^*|}|V_o^*|(V) \quad \text{--- (2)}$$
$$= \frac{\omega C_0 R_1}{\sqrt{1+\omega^2 C_1^2 R_1^2}}|V_o^*|(V)$$

되어, 구전극과 활선간의 정전용량 $C_0(F)$ 에 비례한다.

또, 그림 2의 Reflection method 에 있어서, 활선을 단위길이의 원통(원기둥) 모델로 하면, 활선에 의한 거리 lm에서의 전계의 강도는,

$$|E^*| = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 l}(V/m) \quad \text{---------- (3)}$$

로 된다. 따라서, 구전극의 위치 P의 전위 V_p (V)는,

$$V_p = \int_{l_1}\frac{+q}{2\pi\varepsilon_0 l}dl + \int_{l_2}\frac{-q}{2\pi\varepsilon_0 l}dl(V)$$
$$= \frac{q}{2\pi\varepsilon_0}\log\frac{l_1}{l_2}(V) \quad \text{- (4)}$$
$$= \frac{q}{2\pi\varepsilon_0}\log\frac{\sqrt{X^2+Y^2}}{\sqrt{X^2+(Y-2h)^2}}(V)$$

이고, 같은 형태로 전선의 전위 $V(V)$ 는,

$$V = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0}\log\frac{2h}{r}(V) \quad \text{---------- (5)}$$

로 되어, 전선과 구전극간의 정전용량 $C_0(F)$ 는,

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\log\frac{2h}{r} - \log\frac{\sqrt{X^2+Y^2}}{\sqrt{X^2+(Y-2h)^2}}}$$
$$= \frac{2\pi\varepsilon_0}{\log\frac{2h}{r}\frac{\sqrt{X^2+(Y-2h)^2}}{\sqrt{X^2+Y^2}}} \quad \text{---- (6)}$$

이다. 이것은 크기를 고려하여 구전극을 점으로 취급하고, 보정계수 k를 고려하면 정전용량은 식 (7)로 표현된다.

$$C_0 = k\frac{2\pi\varepsilon_0}{\log\frac{2h}{r}\frac{\sqrt{X^2+(Y-2h)^2}}{\sqrt{X^2+Y^2}}}\ (F) \quad \cdots (7)$$

식 (7) 에 있어서, $C_0 = k\gamma\ (F)$ 로 되어 본문중의 γ (같은 형태로 α, β)에 대응된다. 또, 전선의 전압을,

$$v_s = \sqrt{2}\,|V_o|\sin(\omega t + \frac{4\pi}{3})(V) \quad \cdots\cdots (8)$$

라 하면, 구전극에 유도되는 순시전압은,

$$v_c = \frac{\sqrt{2}\omega k\gamma R_1}{\sqrt{1+\omega^2 C_1^2 R_1^2}}|V_o| \quad \cdots\cdots (9)$$
$$\times \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3})(V)$$

와 같이 되어, K는

$$K = \frac{k}{\sqrt{1+\omega^2 C_1^2 R_1^2}} \quad \cdots\cdots (10)$$

라 하면 아래의 식 (12)가 된다. 다른 두 배전선에 대하여도 같은 형태로 고려하면, 다음의 식 (11) ~ (15)가 유도된다. 본문 중에 있어서 $R_1 = b$ (Ω)이다.

본 경보장치는 그림 1에 나타낸 것과 같이, 센서부와 경보부로 크게 분류된다. 센서부에는 복수의 구전극이 crane boom 선단에 부착되어 있는데, 이들 구전극에는 활선으로부터의 거리에 따른 전위가 유도된다. 3상 배전선이므로 구전극에 유도되는 순시전위 v_a, v_b, v_c (V)는 영상법을 이용하여 구하는데, 각 활선과 구전극의 위치에 영향을 받는 정전용량 α, β, γ (F/m)가,

$$\alpha = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\log\frac{2h}{r}\frac{\sqrt{(X+2d)^2+(Y-2h)^2}}{\sqrt{(X+2d)^2+Y^2}}}$$
$$\beta = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\log\frac{2h}{r}\frac{\sqrt{(X+d)^2+(Y-2h)^2}}{\sqrt{(X+d)^2+Y^2}}} \quad \cdots (11)$$
$$\gamma = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\log\frac{2h}{r}\frac{\sqrt{X^2+(Y-2h)^2}}{\sqrt{X^2+Y^2}}}$$

일 때,

$$v_a = \sqrt{2}\omega K\alpha b|V_o|\cos(\omega t)$$
$$v_b = \sqrt{2}\omega K\beta b|V_o|\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad \cdots (12)$$
$$v_c = \sqrt{2}\omega K\gamma b|V_o|\cos(\omega t + \frac{4\pi}{3})$$

로 표시된다. 단,

b : 전위검출 저항 (Ω)
K : 구전극의 크기에 따른 계수
h : 전선 높이 (m)
d : 전선 간격 (m)
r : 전선 반경 (m)
X : 수평 거리 (m)
Y : 수직 거리 (m)

를 나타낸다.

이들 전위로부터 구전극에 유도되는 전위의 순간치 v_p (V)는,

$$v_p = \sqrt{2}\omega Kb|V_o| \times\sqrt{(\alpha-\beta)^2+(\beta-\gamma)^2+(\gamma-\alpha)^2} \times\cos(\omega t+\delta) \quad \cdots (13)$$

로 되고, 구전극에 유도되는 전위의 실효치 $|V_{xy}|$ (V) 는,

$$|V_{xy}| = \omega Kb|V_o| \times\sqrt{(\alpha-\beta)^2+(\beta-\gamma)^2+(\gamma-\alpha)^2} \quad \cdots (14)$$

로 구해진다.

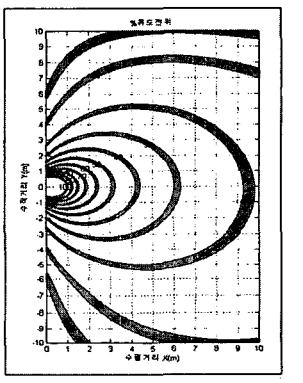

Fig. 3 The induced voltage distribution.

위 식의 유도전위는 계수 K가 포함되어 이론적으로 그 값을 구하는 것이 가능하나, 다음과 같이 규격화함으로써 계수 K에 영향을 받는 %유도전위가 구해진다. 즉, 규격화전위 $\%V_Z$는, 그림 2에 있어서 활선의 우측 끝단 전선의 수평거리 lm의 유도전위를 기준전위 $V_{s(V)}$ 라고 가정하면,

$$\% V_Z = \frac{V_{xy}}{V_s} \times 100 \text{----------(15)}$$

로서 구해진다. 이들 식으로 구해진 구전극의 유도전위는 그림 3에 나타낸 것과 같이 활선을 중심으로 한 평면상의 전위분포가 구해진다.

4. 본론

4.1 시스템 전체 구성

본 연구에서 개발된 장치는 그림 4와 같은 기본적인 하드웨어의 구성을 갖는다. 고압 접근에 따라 센싱된 신호는 impedance 변화 및 Analog amp 후 저역 통과 필터를 거친 후 one chip CPU에 의해 A/D 변환되고 변환된 디지털데이터는 일정 레벨 이상일 경우 송신부는 고압 접근 신호를 무선으로 전송하게된다. 이때 필요에 따라 송신부는 현재 battery양과 측정 유도 전압 등의 데이타를 전송하게 된다.

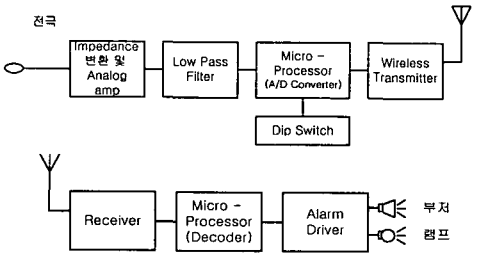

Fig. 4 The developed Hardware block

4.2.1 센서부 구성

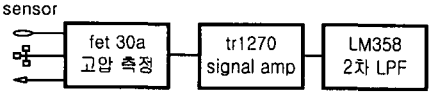

Fig. 5 The sensor part block

그림 5는 Sensor part의 블록도를 보여준다. 블록도는 크게 3부분으로 되어 있다. 고압 레벨 검출부는 FET K30A, impedence 변환 및 신호 증폭에 tr 1270과 신호의 노이즈 제거를 2차 저역통과필터로 구성되어 있다. 센서는 무접점을 기본으로 하고 사용가능 주파수는 50Hz ~ 60 Hz 범위, 현재 소비 전류는 20(㎃)이고 동작의 유무는 램프와 부저를 사용해서 실험했다.

본 연구에 사용한 센서는 전위센서이다. 부하에 따라 전류의 크기와 위치에 따라 분포가 다름으로써 앞의 그림 3과 같은 모양의 유도전위가 발생한다. 가상실험에서는 전류의 크기가 적어서 최대 반응거리가 2(m) 안팎이었다. 하지만, 실제 옥외전주를 대상으로 한 실험에서는 4~5(m)의 우수한 반응거리가 측정되었다. 센서가 반응 시 입력 단에 150(㎷) 값이 측정되었다. 그림 6은 실제 소자를 적용한 회로도이다. 전원은 9(V) battery를 사용한다.

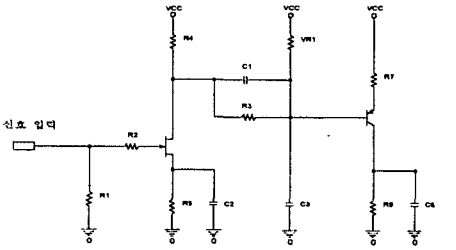

Fig. 6 The sensor part circuit

4.2.2 센서 simulation & measurement

본 연구에서는 그림 6의 회로 설계을 위해 OrCAD 사의 Pspice를 사용하여 최적의 회로를 구성했다. 그래서 회로의 시뮬레이션을 위해 실제 측정에서 나온 전압 150(㎷)를 실제 입력 값으로 적용시켰다. 그림 7은 이러한 여타의 근거로 실제 simulation한 최종 결과이다.

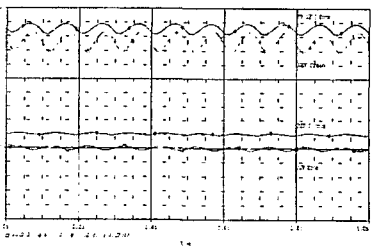

Fig. 7 The simulation result

그림 8은 입력단, 즉 구전극에 사람의 손이 접촉했을 경우의 tr1270의 base를 측정한 파형이다. k30A의 주변 r과 c의 영향으로 진동하는 것을 볼 수 있다.

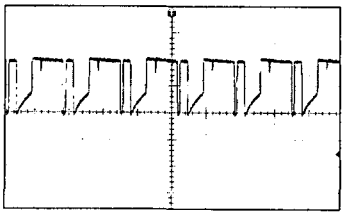

Fig. 8 TR1270 base measurement with hand

그림 9는 본 센서부의 회로에서 최종 결과에서

실제 작동 시 측정된 파형이다. 하지만 본 측정에 다소 문제점이 있었다. 실제 측정 시에 oscilloscope 측정 핀의 미세한 전류가 회로에 영향을 주는 것을 관찰할 수 있었다. 본 파형은 그 영향을 최소화하여 측정한 것이다.

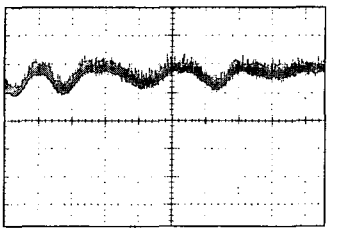

Fig. 9 The sensor wave on operation

그림 10과 그림 11은 저역통과필터 전·후의 파형으로 차단 주파수 영역은 58Hz ~ 60Hz로 $f_c = 2\pi/\sqrt{R_1R_2C_1C_2}$로 계산할 수 있다.

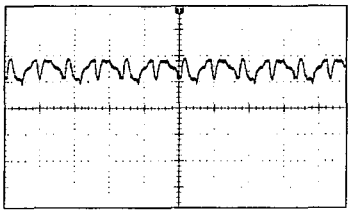

Fig. 10 Before pass low pass filter

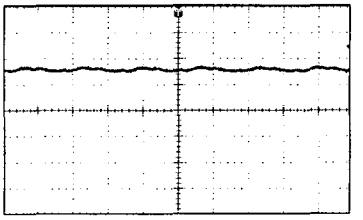

Fig. 11 After pass low pass filter

4.3 시스템 인터페이스의 구성

본 연구의 목적이 실장품의 소형화에도 있는 바 A/D converter 가 내장되어있는 PIC 16C7X 계열을 사용하였다. 센서의 반응 민감도는 송신부의 switch 조절 (10 단계)에 의해 가능하고 밧데리에 의한 구동이므로 밧데리 체크가 가능하도록 하였다.

무선통신에는 RFM사의 433.92㎒의 대역과 OOK 방식으로 송신부는 HX1000와 수신부는 RX1005를 사용하였다. 통신 프로토콜은 총 29비트에 의한 데이타 전송으로 표 1과 같다. 그림 14는 RF 대역을 보여준다

표 1. 통신 protocol

_startbit	장비번호	전송데이타	CRC check	_stopbit
1 bit	2byte	1byte	3 bit	1bit

그림 12는 송신부 프로그램의 순서도이다. 송신부는 sleep 모드 중 A/D 변환 값이 변할 경우 다시 A/D 변환을 하고 데이터를 전송하게 된다.

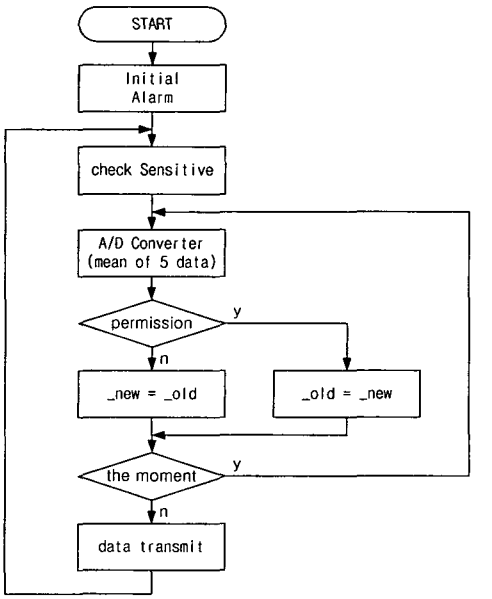

Fig. 12 Transmitter part flowchart

그림 13은 수신부 프로그램의 순서도이다. 수신부는 주기적으로 데이터를 체크해서 자신의 데이터 유무를 확인 후 LED와 부저로 고압 접근을 알리게 된다.

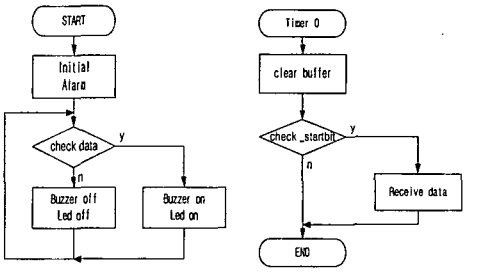

Fig. 13 Receiver part flowchart

본 연구가 고압 접근을 알리는 위험요소로 인해 그림 12(the moment, permission)와 같이 지능형 방호 판단 알고리즘과 여러 경우의 방호실패를 방지 할 수 있는 full redundancy를 확보하는데 주안점을 두고 하드웨어와 소프트웨어를 구현했다.

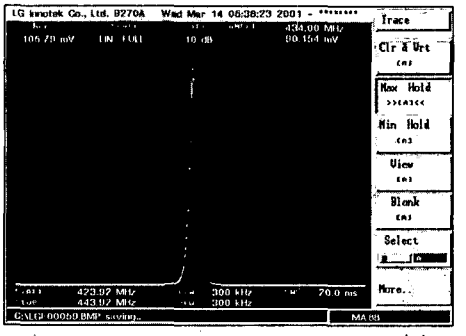

Fig. 14 The linear amplitude

4.4 고압 발생기

고압은 우리 일상 주변에서 흔히 볼 수 있는 전주에 흐르는 전압, 즉 22,900V를 대상으로 하였다. 그림 15는 가상 고압 실험의 블록도를 나타낸다. 가상 고압 선로에 부하전류를 흘려주기 위해서 2차측 부하로 램프를 사용하였다.

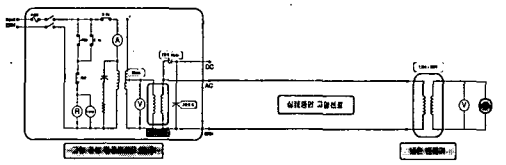

Fig. 15 The virtual power line proximity warning apparatus block

그림 16과 그림 17은 실험에서 실제 제작한 고압 발생기의 외부와 내부 구조로 30V에서 25,000V의 60 Hz 교류 및 직류전압을 무단으로 가변 시킬 수 있도록 제작하였다.

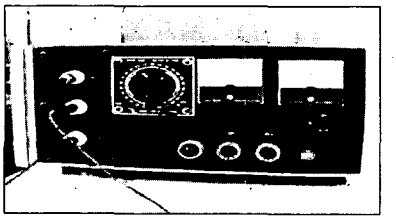

Fig. 16 The high voltage generator external

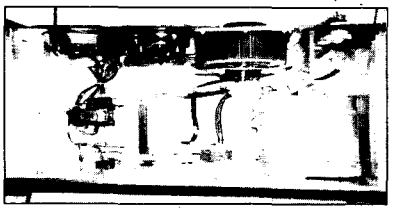

Fig. 17 The high voltage generator internal

5. 시제품의 제작

그림 18과 19는 송신부와 수신부의 실장 모습이다. 각 부의 전류소비는 송신부(데이터 전송 시)는 500mA, 수신부(알람 시) 700mA이다.

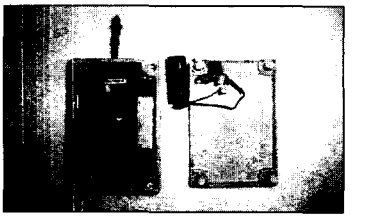

Fig. 18 Transmitter Part

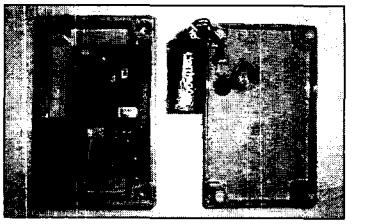

Fig. 19 Receiver part

그림 20은 실제 제작한 실장품을 가지고 실내에서 테스트한 결과이다. 실제와 근접한 테스트를 위해 22,900V를 출력하는 고압 발생기를 만들어 테스트를 수행했다. 센서의 민감도에 영향을 주는 tr1270의 이미터부분의 가변저항의 변화에 따른 센서의 반응거리를 나타낸다. 실장에서는 최적의 저항값을 결정했다.

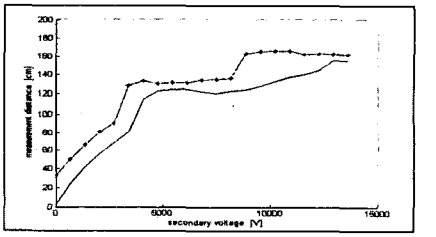

Fig. 20 The response distance

6. Test

그림 21과 22는 가상 고압 장치에 의해 실험실 내에서 모의 실험한 결과이다.

그림 20은 그림 21과 그림 22의 가상 실험 결과이다. 가상 실험 과정에서 부하로 단일 램프를 사용했다. 결국, 실제 22,900(V)보다 전류의 양이 작은 관계로 측정 결과를 보게되면 반응 거리가 짧다. 하지만 그림 22의 filed test 에서는 거리가 상대적으로 4~5m의 거리에서 반응을 보였다. 송수

신기간의 반응거리(RF 거리)는 100m이다.

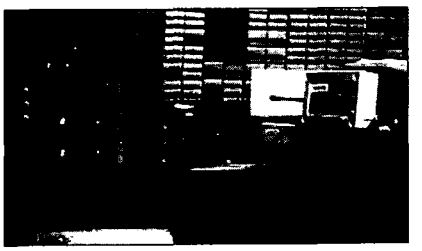

Fig. 21 The virtual measurement 1

Fig. 22 The virtual measurement 2

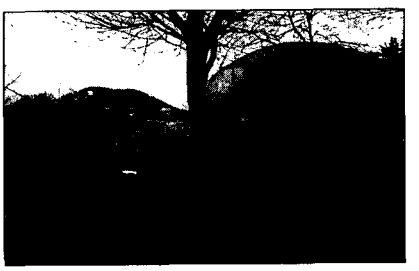

Fig. 23 The field test

표 2. The measurement data

1차전압	vr1	vr2
0	3.0000	33.0000
10	24.0000	50.0000
20	42.0000	65.5000
30	56.5000	81.0000
40	68.0000	90.5000
50	81.0000	128.5000
60	115.0000	133.0000
70	123.0000	130.0000
80	124.0000	131.5000
90	124.8000	131.5000
100	122.8000	134.0000
110	121.0000	135.0000
120	123.2000	136.0000
130	124.3000	163.0000
140	128.0000	165.0000
150	132.5000	166.0000
160	137.0000	166.0000
170	140.0000	162.0000
180	144.5000	163.0000
190	155.5000	162.0000
200	155.5000	162.0000

표 2는 가상 실험에서 얻은 데이터이다. Vr 가변저항의 값에 따라서 최고는 2m이상이 차이가 난다. 이 값은 주위의 영향에 민감하다. 정밀가변저항으로 변화가 가능하도록했다.

7. 결론

실제 고압 전선로 주위의 전위분포는 주위의 상황, 특히 복수의 전선로의 전기적 간섭에 의해 동심원 상으로 되지 않을 경우가 많다. 기존의 장치로는 전선로 주위의 한 곳의 전위만으로 크레인 붐이 전선로에 이상 접근하였다고 판단하는 것이 어렵고, 또한 크레인 붐과 전선로 사이의 거리는 검출 전극이 전선로에 접근하는 방향에 따라 달라질 가능성도 있다. 센서부와 경보장치가 유선으로 연결되어 있어 크레인 붐의 신축시 불편한 점이 있다. 또한, 센서를 크레인 붐에만 설치한 경우에 훅 블록과 붐의 선단과의 거리가 많이 떨어진 경우에는 크레인 작업 시에 와이어가 전선로에 접촉할 위험이 존재한다.

본 연구에서는 저주파 필터를 이용하여 전위 검출 신호에 포함된 노이즈를 제거하므로 검출 정도를 높이고, 마이크로프로세서에 내장된 아날로그 디지털 변환기를 이용하여 설정된 전압과 디지털 신호로 처리함으로 신뢰성을 높이고, 초소형 무선 송신부를 이용하여 센서부를 무선으로 분리설치함으로서 크레인 붐의 선단이나, 훅 블록에 손쉽게 부착이 가능하도록 하여 복수의 위치에서 고전압 전선로에의 접근 검출이 가능하도록 하여 실용화한 고압 전선로 접근 경보장치이다.

참 고 문 헌

[1] 早川 隆, 建設用クレーンの 活性接近シミュレーションモデル、日本電氣 設備學會, vol.14, No.2, pp110- 121, 1994

[2] 移動式クレーンの送配電線への接近の一檢出法,日本電氣設備學會 研究發表會, vol.11, F-4, pp159-160, 1993

[3] 活性接近警報裝置の開發, 日本電氣設備學會 研究發表會, vol.11, F-5, pp.161-164, 1993

[4] 高橋 清, センサ エレクトロニクス p.241, 昭晃堂, 1984

[5] Wills J. Tompkins & G. Wbster, 'Interfacing Sensors to the IBM PC' Prentice-Hall Inc., pp250-268, 1988

[6] Joseph J. Carr, 'Sensors and Circuits', Prentice-Hall Inc., pp1-37, 1993