

Ir-192 감마선투과검사의 작업자 피폭감소를 위한 자동화시스템 개발

Development of Automatic System for Reducing of Occupational Exposure Dose in Ir-192 Radiography

주광태, 송정호, 신진성, 김동연
고려공업검사주식회사
서울시 용산구 서계동 224-21

요 약

국내의 Ir-192를 이용한 감마선투과검사는 거의 수작업이고 오랫동안 기술개발이 이루어지지 않아 정량적 품질관리 및 작업자의 방사선피폭 감소에 어려움이 있었다. 본 연구에서는 54kgf·cm의 출력을 지닌 24V, 200W의 BLDC 모터와 원칩마이크로프로세서를 이용하여 Ir-192 선원 이동 속도, 위치, 조사시간을 조절할 수 있는 구동장치, RF모듈을 이용한 원격제어 장치, 방사선 자동경보기를 개발하였다. 개발한 시스템은 경제적 이점 등으로 활용도가 클 것으로 기대되며 원격제어가 가능하므로 작업자의 방사선 피폭 감소에도 큰 효과가 있을 것이다.

Abstract

Using Ir-192 gamma source for radiography, it is difficult to reduce occupational exposure and to do quantitative quality control because Radiographic Test is almost hand-operated and is not improved for a long time in domestic. In this study, a controller with BLDC motor of 24V, 200W which has output of 54 kgf·cm and one-chip microprocessor which can control of speed, position and exposure time of Ir-192 gamma source, a remote controller with RF module and a automatic radiation alarm monitor device have been developed. The developed system is predicted that the unit can be in many practical applications with benefits in economical advantage. Also, occupational exposure will be reduced because of remote controller of developed automatic system for Ir-192 radiographic test.

1. 서 론

1960년대에 도입되어 40여년간 산업발전에 기여해온 국내 방사선투과검사는 신뢰성 때문에 지속적으로 실시되는 실정이다. 특히 Ir-192와 Co-60이 내장된 감마선투과검사용 조사기 1,000여대를

2,500여명의 종사자가 전국에서 주야로 사용하는 실정이나 검사장비 기술 개발은 상대적으로 미약하다^[1]. 또한 감마선투과검사에 이용되는 종래의 장치는 간헐적으로 사고가 발생하여 공공의 불안감을 갖게 한바 있으며, 일반인과의 접할 수 있는 기회가 점점 많아짐에 따라 방사선 안전의 공공성도 높아지고 있다.

현재의 감마선투과검사는 작업환경과 경영환경이 열악할뿐더러 방사선피폭이 수반되는 3D 기술로서 종사를 기피하는 경향이 있다. 그리고 ICRP 60 권고 안을 준수하여야하는 현실에 방사선피폭 저감화 실적도 고려하여야한다^[2]. 따라서 감마선투과검사시에 방사선피폭이 수반되는 수동형 조작기를 RF 원격제어 시스템과 자동화 장치로 대체한다면 방사선작업자의 피폭감소와 더불어 검사공정 단축, 정확한 노출시간의 설정 등으로 투과검사의 품질, 방사선안전성 확보 및 작업능률 향상을 기대할 수 있을 것이다.

국내에 사용되는 1,000여대의 Ir-192 조사장치의 대부분은 미국의 Tech/Ops 제품으로 조사기는 수입^[3]하고 선원안내튜브와 수동형 조작기는 국산을 이용하여 왔다. Tech/Ops의 Ir-192와 Co-60에 대한 자동형 원격조작기는 AC 전원에 의한 버튼식 조작기가 상품화되어 있으나 DC전원에 의한 원격제어 자동화 장비는 개발하지 않아 기술 개발의 필요성이 있다.

본 연구에서는 종래에 사용 중인 감마선조사장치의 수동형 조작기를 바탕으로 모터에 의한 구동장치의 설계·제작, 와이어 이송 속도와 선원 위치 제어 기술, 노출 시간 제어, 무선 원격조작 시스템의 개발 및 자동 경보장치에 관련된 연구를 수행한 결과 수동과 자동을 겸용할 수 있는 Ir-192 감마선투과검사 장비 자동화기술의 실용성을 입증하였다.

2. 감마선투과검사의 자동화시스템 개발

Ir-192 선원을 내장한 감마선조사기의 종래 수동형 조작기를 자동제어하기 위하여 BLDC 모터를 이용한 구동장치, 선원의 위치·조사시간·이동속도를 제어하기 위한 원칩마이크로프로세서, 원격제어를 위한 RF 제어시스템, 일정 준위 이상의 방사선 누출여부를 확인하기 위한 방사선자동경보기를 개발 하였다.

2.1 구동장치 설계 및 제작

국내 감마선투과검사에 가장 많이 이용하는 Ir-192 감마선투과검사 장비는 그림 1에서와 같이 수동형 조작기, Ir-192 선원 Pigtail을 내장한 조사기와 선원 안내튜브로 구성되어있다. 수동형 조작기는 기어에 의한 와이어 추진조절기와 와이어 그리고 와이어 유도관으로 구성하여 길이는 약 7.6m이다. 조사기는 감손우라늄 차폐체로 중심에 S곡선의 선원pigtail 통로가 있으며 선원안내튜브의 길이는 보통 3.2m로 되어 있다.^[4,5] 감마선 투과검사장비의 자동화시스템을 개발함에 있어 현장에서 검증된 본 장비를 바탕으로 Reverse Engineering 기법을 사용하여 Ir-192 선원 추진장치를 설계하였다. 조사기(projector) 내부에 있는 선원 pigtail을 검사 대상물체로 이동시키기 위해 그림 2와 같이 구동 휠(driver wheel)과 제어 케이블(control cable)을 설계하였다. 이 장치는 기어와 풀리(Pulley)의 복합적인 구조로서 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 유용한 구동장치중의 하나이다. 그러나 구동시 소음이 발생하는 단점이 있는데, 물림률(contact ratio)의 증가, 축의 설치 오차·처짐을 보상 및 입력각 감소 등으로 줄일 수 있다^[6].

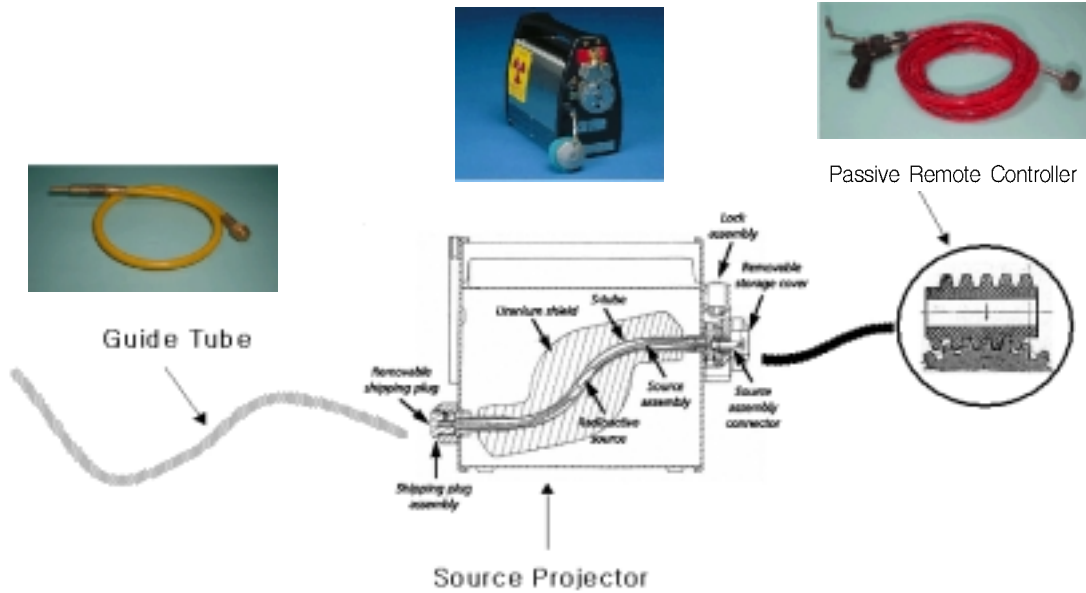


그림 1. The diagram of typical gamma radiography equipment

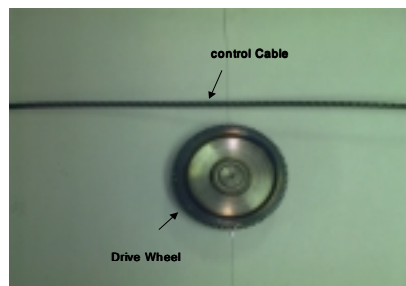


그림 2. The Diagram of Drive Wheel and Drive Cable

구동장치를 구동시키기 위한 모터선정을 위해서는 구동시 필요한 휠의 토크는 일반적으로 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} = r \cdot F \sin \phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, T = 토크 r = 거리 F = 힘

그러나 구동시스템의 효율, 구동부의 마찰계수 등의 변수가 많아 실제적으로 적용하기가 매우 어렵다^[7]. 또한 조사기의 상태와 위치, 추진장치의 형태, 선원을 검사 대상물체로 유도하는 선원안내 튜브(guide tube)의 기하학적 모양에 따라 소요토크는 변화하기 때문에 선원안내튜브의 상하 각도에 따라 소요토크를 측정하였다. 토크 측정은 구동 휠 중점 O에서 r 만큼 떨어진 곳에 힘 F를 가하는 방법을 이용하였으며, 그 결과는 표 1과 같다.

표 1. Required torque for operation of gamma radiography equipment

Geometry of Guide Tube	Max. Required Torque for Project (kgf · cm)	Avg. Required Torque for Project (kgf · cm)	Avg. Required Torque for Retract (kgf · cm)
Type A (the opposite direction of gravity, 30°)	20	10~15	10~12
	28	10~15	
	22	10~15	
Type A (the opposite direction of gravity, 60°)	26	10~15	10~12
	20	13~16	
	30	12~15	
Type A (the opposite direction of gravity, 80°)	20	13~20	10~12
	25	13~15	
	30	13~20	
Type B (the parallel direction of gravity, S形)	20	15~17	10~12
	22	13~15	
	30	13~15	
Type B (the parallel direction of gravity, semicircle)	28	9~10	10~12
	20	9~12	
	28	9~10	
Type B (the parallel direction of gravity, oval)	22	12~14	10~12
	20	10~12	
	25	10~14	
Type C (the direction of gravity)	22	10~12	10~12
	24	10~12	
	20	10~12	

* Maximum Required Torque for Retract : 30 kgf · cm

** Model of Torque measuring apparatus : No. 120DB3-S of Tohnichi company
(Measurement Accuracy ±3%)

표 1의 결과 중 최대 소요토크인 30kgf · cm에 모터의 안정적 구동 및 감마선 조사장치의 신뢰성 확보를 위한 안전계수를 1.8을 곱하여 54kgf · cm의 출력을 갖는 모터를 선정하였다. 안전계수의 산출은 감마선 투과검사현장의 조건을 고려하여 일일 연속운전 8시간, 주위 온도 40℃, 시간당 구동빈도수를 32회로 가정하여 식 (2)를 이용하였다^[8].

$$S_{f \text{ total}} = S_f \times S_A \times S_{\theta} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, S_f : 일반적 안전계수, S_{θ} : 주위 온도상승에 대한 안전계수

S_{θ} : 구동 빈도수에 대한 안전계수

일반적으로 모터의 분류방법은 여러 가지가 있지만 기능에 따라 제어용 모터와 동력용 모터, 전원방식에 따라 DC모터, AC모터로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는 현장 사용이 가능하고 Ir-192 감마선원 조사시 위치제어를 위해 DC 전원을 사용할 수 있고, 위치제어가 가능한 모터를 선별하였다. 그림 3은 본 연구에서 개발비용 등의 경제성을 고려하여 국내 상용 모터중에 선별한 54kgf · cm 출력을 갖는 24V, 200W BLDC 모터이다.

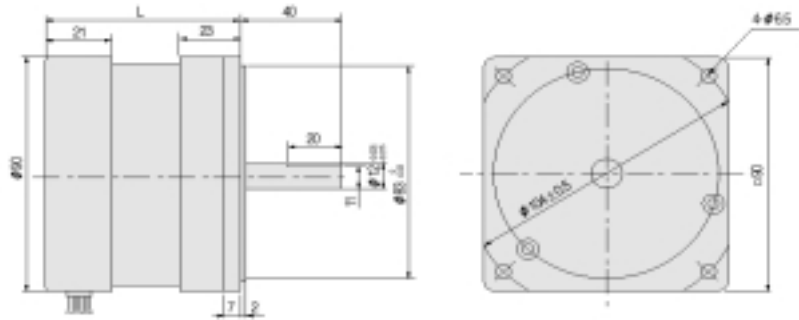


그림 3. BLDC (Brushless Direct Current) Motor

2.2 Ir-192 선원의 이동속도, 위치 및 노출시간 제어부 설계 및 제작

일반적인 DC 모터의 단점 중 하나는 모터의 회전을 위한 기본적인 구조인 브러쉬와 정류자의 유지보수가 필요하다는 것이다. 이와 같은 DC 모터의 단점인 브러쉬와 정류자에 의한 스위칭을 홀센서(Hall Sensor)와 트랜지스터를 이용하여 전자적인 스위칭으로 바꿔 개선한 BLDC 모터가 1980년대 중반부터 활발히 개발하여 현재 산업 전 분야에 골고루 적용하고 있고, 종래의 DC Geared모터를 점차적으로 대체하고 있는 추세이다. BLDC 모터의 주요 장점은 전기적, 기계적 노이즈가 작으며, 신뢰성이 높고, 유지보수가 필요 없으며 고속화, 준 서보급 모터제어가 가능하다는 것이다. BLDC 모터의 위치/속도/조사시간 제어를 위해 그림 4와 같이 엔코더를 이용하기도 하지만 최근에는 홀센서의 신호를 처리하여 다기능 제어가 가능한 BLDC 모터 제어용 드라이버(Driver)가 상용으로 보급되어 많이 쓰이고 있는 추세이다. 본 연구에서는 모토롤러사의 MC33035 BLDC 모터 컨트롤러 칩을 이용한 상용 드라이버를 이용하여 BLDC 모터를 제어하였다.

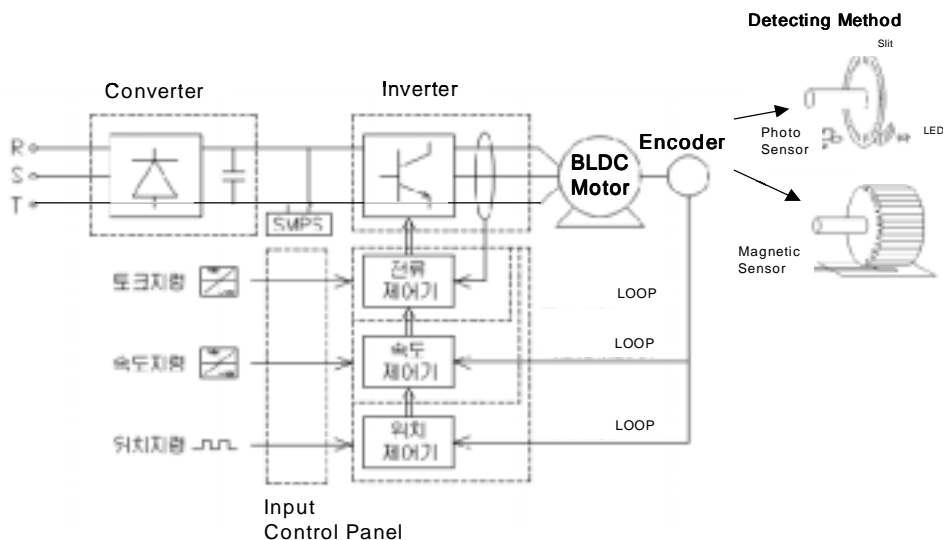


그림 4. The schematic diagram of encoder with BLDC motor

BLDC 모터 및 드라이버를 이용하여 Ir-192 감마선조사기의 선원을 제어하는 로직(Logic)은 시퀀스(Sequence)회로를 이용한 제어, PLC를 이용한 제어, 원칩마이크로프로세서를 이용한 제어 등이 있다. 그림 5는 광전센서, 모듈형 타이머 등을 사용하여 구현한 시퀀스 제어회로이다.

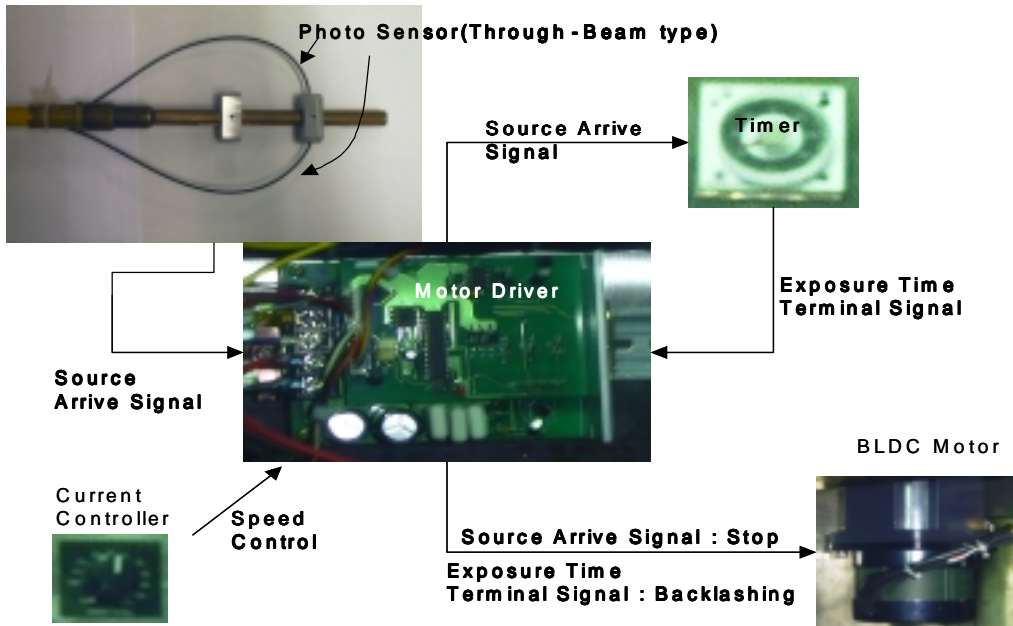


그림 5. The concept of controller by photo sensor, timer and BLDC motor

그림 5의 방법은 구현개념이 간단하고 개발기간이 짧다는 장점이 있으나 릴레이(Relay)소자 사용이 많아 회로 결선이 복잡하고, 회로검사가 어려우며, 제조시 많은 도면을 필요로 하며, 부품 입수, 조립, 시험에 시간이 걸리는 단점이 있었고 기능 개선시 기존 시스템 구성을 다시 해야 한다는 단점이 있었다. 또한 선원 도착 부위에 광전센서를 설치함으로써 기구적인 설계에 어려움이 있었다.

그림 6은 PLC를 이용하여 BLDC 모터 및 드라이버를 제어한 시스템의 전자회로도 이다. Ir-192 감마선 조사기 선원을 제어하기 위해 구현한 그림 6의 방법은 산업전반에 자동화 공정에 사용되고 있으며 마이크로프로세서로 구현한 제어 시스템에 비해 개발기간이나 개발비용에 있어서는 매우 경제적이며 기능면에서는 거의 비슷한 성능을 가짐을 알수 있었다. 하지만 어떤 임의의 시스템에 최적화 되지 못해 소비전류나 기구적구조, 개발 시스템의 부피 등에 있어 제약이 따르며 제어 로직이 복잡해질수록 제어가 어려워짐을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 그림 7과 같이 원칩 마이크로프로세서를 이용한 Ir-192 감마선투과검사 장비의 자동화시스템을 설계하였다. 본 연구에서 사용한 BLDC 모터 및 드라이버는 그림 7과 같이 홀센서부(Hall sensor)는 5V의 전원을 사용하며, 모터 구동부는 24V를 전원을 사용한다. 또한 Run/Stop, 정/역회전, 브레이크, 회전

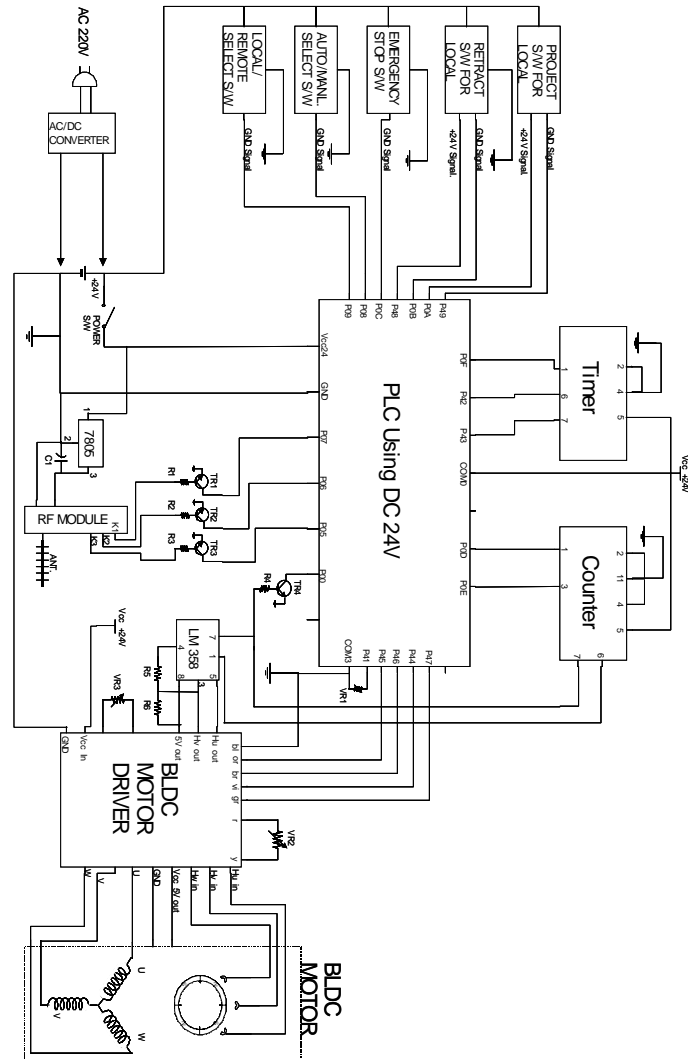


그림 6. The Electric Circuit of Developed System using PLC

속도조절 등은 외부신호를 입력 받아 MC33035 IC에서 처리한 후 구동된다. 따라서 BLDC 모터가 최대 RPM일때 홀센서 신호파형이 +5V, 3.4msec이므로 원칩마이크로프로세서(Microchip, PIC16F877) 고속펄스측정 가능포트(20kHz)에 입력시켜 계수 및 연산처리하여 위치제어를 하였으며 PWM과 출력 포트에 D/A 콘버터를 연결한 후 신호를 모터 드라이버로 전송하여 BLDC 모터의 속도조정을 디지털화 하였다. 또한 정/역회전, 브레이크, Run/Stop를 각각 I/O포트에 연결 후 포트 출력(High or Low)을 제어하여 Ir-192 선원의 구동방향, 조사시간을 제어하였다.

그림 8은 본 연구에서 개발한 Ir-192 감마선투과검사 자동화 시스템 구동로직 흐름도이다. 감마선투과검사시 개발한 자동화 시스템의 전원을 켜면 LCD에 메인메뉴가 나타나고 메인메뉴에서 키패드로 선원의 조사시간, 조사속도, 조사거리등을 입력한 후 감마선투과검사(Radiographic Test)를 선택하면 리모콘이나 키패드의 조사스위치의 입력신호를 판단하여 그림 8과 같은 흐름에 따라 감

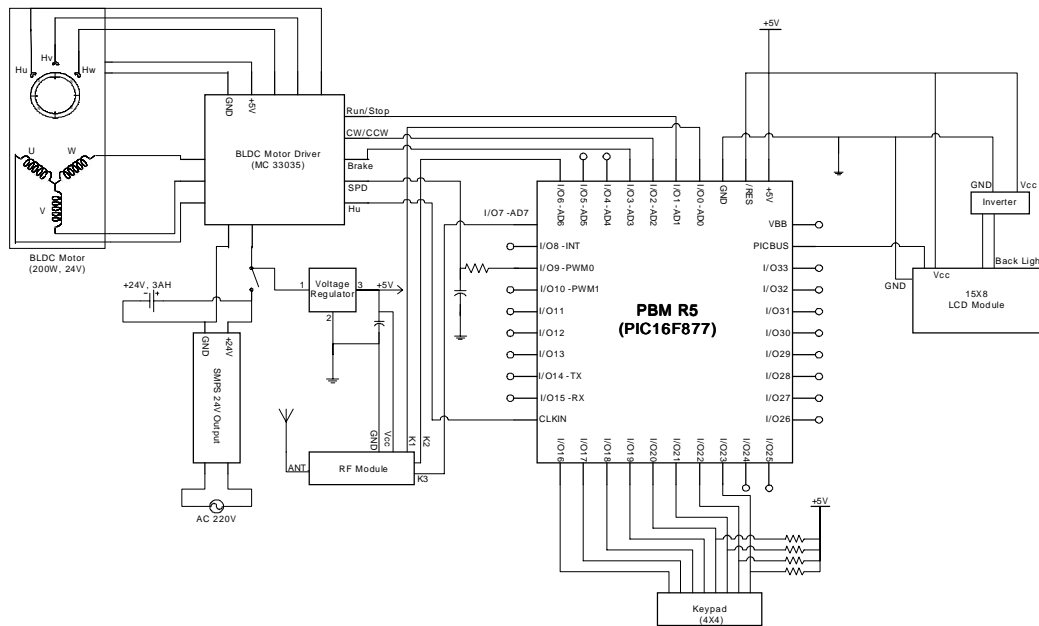


그림 7. The Electric Circuit of Developed System using Microprocessor

마선투과검사가 이루어진다. 또한 검사자의 잠재적인 방사선피폭을 최소화하기 위해 비상안전스위치 및 원격비상안전스위치의 신호가 발생하면 Ir-192 감마선원의 위치를 판단한 후 선원을 Ir-192 감마선 조사기 안으로 회수하도록 하였다. 본 연구에서는 선원 조사시 선원 및 감마선 투과검사장비의 물리적, 기구적 안정성을 확보하기 위해 선원 조사시나 회수시에 도착지점에서 일정거리가 되면 조사속도가 점차적으로 줄어들어 조사 또는 회수지점에 도착하도록 하였다.

2.3 방사선 자동 경보기

Ir-192 감마선투과검사중 빈번히 발생하는 안전사고는 선원 pigtail과 추진장치의 연결부의 기계적 노후화로 인한 선원pigtail과 추진장치의 분리이다. 즉, 감마선투과검사 후 선원회수시 추진장치와 분리된 선원이 검사대상물체에 남아있어 검사자의 방사선피폭이 일어나게 된다. 따라서 선원회수 여부를 빛과 소리로 검사자에게 알리는 장치를 자동화시스템에 포함하면 많은 방사선 안전사고로 인한 검사자의 방사선 피폭을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 개발비용이 비교적 많이 드는 방사선 검출회로를 개발하는 대신 종래의 방사선작업 현장에서 보조선량계로 널리 사용하는 휴대형 방사선 경보기(Radiation Alarm Monitor)를 이용하여 방사선 검출회로를 구성하였으며 작업자나 일반인에게 방사선 누출을 경보할 수 있는 발광/알람회로를 원칩 마이크로프로세서(ATMEL, ATMEGA 163)를 이용하여 개발하였다. 야외나 대형건물 내 철골, 배관 등을 검사하는 감마선투과검사현장에서 작업자나 일반인에게 확실하게 경보음이 들릴 수 있게 음원으로부터 1m 거리에서 90dB의 음량을 발하는 압전식 부저와 1000mcd

의 밝기를 가진 고휘도 적색/녹색 LED 및 부저를 원칩형 PLC로 제어하여 방사선이 일정준위 이상이면 적색 LED 및 경보음을 발하고 일정준위 미만이면 녹색 LED를 발하게 하였다. 그림 9는 본 연구에서 개발한 방사선 자동경보기 전자회로도 이다.

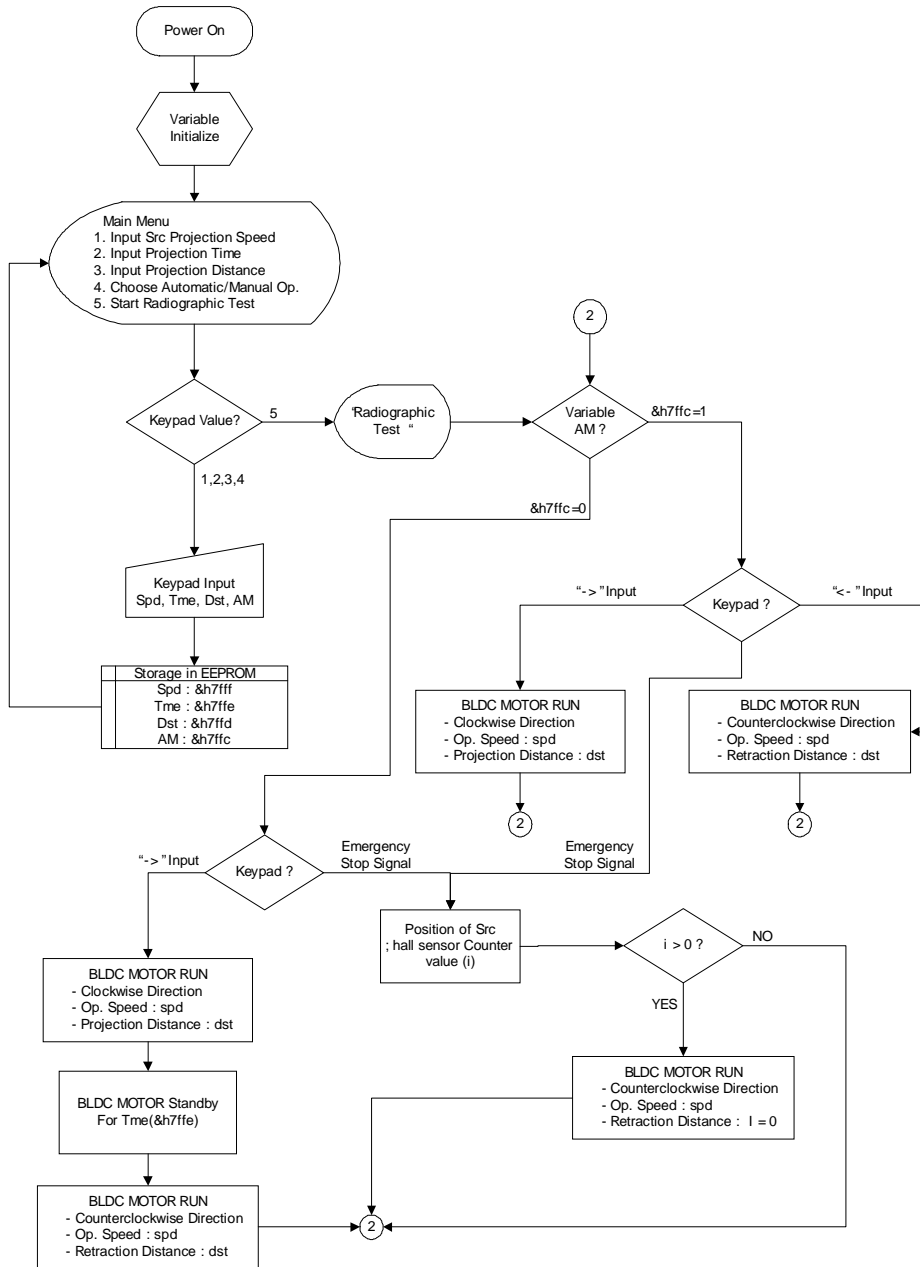


그림 8. The Flow Chart of Developed System for Projection of Ir-192 Source

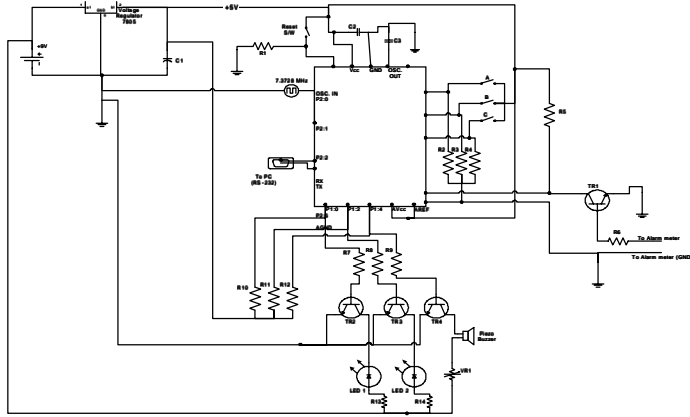


그림 9. The Electric Circuit of Radiation Alarm Device using Microprocessor



그림 10. RF Transmitter and Receiver

2.4 RF 원격제어 시스템

모터와 선원추진 구동장치가 부착된 감마선투과검사 자동화 시스템을 원거리에서 제어하기 위한 일반적인 방법은 적외선통신, RF통신을 이용하는데, 상용의 적외선 센서는 송신과 수신센서가 수직이어야 하고 이격 거리의 한계가 있는 반면 RF 통신은 별로 영향을 받지 않는다는 이점으로 상용의 RF 모듈을 이용한 무선 원격제어 시스템을 개발하였다. 본 연구에서는 개발된 시스템의 원격제어를 위해 PT2272 원격제어 디코더 칩을 이용하여 개발한 국내 상용 RF 모듈을 사용하였다. 이 RF 모듈은 AM 변조(311MHz)를 사용하여 송신부(RF Transmitter)에 스위치가 On 되면 5V의 신호가 출력된다. 또한 6521개의 조합 수가 가능한 충돌 방지 어드레스가 있어 한정된 공간에서 여러 개의 리모콘을 동시에 사용할 수가 있다. 송신부 3개의 스위치는 각각 선원의 조사, 회수, 비상정지 신호를 발생하게 하였다. 그림 10은 본 연구에 사용한 RF 모듈이다.

3. 개발 시스템의 성능평가

3.1 추진장치의 성능시험

감마선투과검사장비는 다양한 현장 환경에서 선원안내튜브가 상하좌우로 추진 사용됨으로 추진력의 차이가 있다. 선정된 모터의 추진력을 확인하기 위하여 추진 속도(rpm)와 출력토크와의 관계를 측정하였고, 그 결과는 그림 11과 같다. 그림 11에서 선원pigtail 추진에 필요한 최대 소요 토크인 54 Kgf·cm이상의 값을 275 rpm(추진속도 : 1.17m/s)이하에서 얻을 수 있으므로 다양한 작업

현장 조건에서 적용할 수 있는 모터라고 평가할 수 있다. 그리고 자동화시스템에 적용한 모터의 최대 출력토크는 50~120rpm(0.2~0.51m/s)이나, 최대 출력토크 지점에 지속적 부하를 주면 모터 성능 장애나 수명단축 등의 문제점이 발생된다. 또한 이 때의 소비전류가 커진다면 배터리 용량선정에 큰 문제점을 발생시킨다. 따라서 모터의 성능이 지속적, 안정적으로 사용될 수 있는 정격출력으로 최적 구동 조건을 결정해야 됨으로 BLDC 모터의 효율과 안전도를 고려하여 최적 구동 조건을 결정하였다.

일반적으로 DC모터의 출력파워와 입력파워의 값은 각각 모터 회전수와 출력토크의 곱과 입력전압과 소비전류의 곱으로 나타낸다. 그림 12는 모터의 출력파워와 입력파워의 비로써 구해지는 BLDC 모터의 효율을 모터의 구동속도(rpm)에 따라 나타낸 것이다. 그림 12에서 모터의 최적 구동 속도는 290~270rpm (1.23~1.15m/sec)로서 그림 11과 그림 12의 결과와 비교 할 때 자동추진 장치의 최적 구동 속도는 1.17m/sec (275rpm)로서 현장 적용에 지장이 없는 속도이다.

3.2 현장 적용성 검토

본 연구에서 개발한 Ir-192 감마선투과검사 원격제어 자동화시스템의 현장 적용성을 확

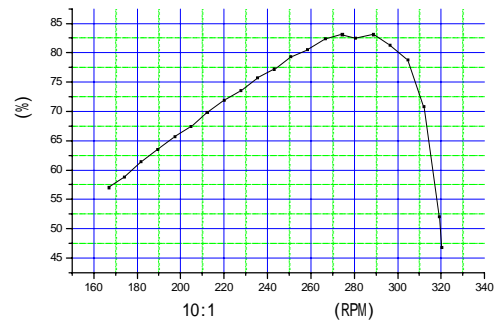
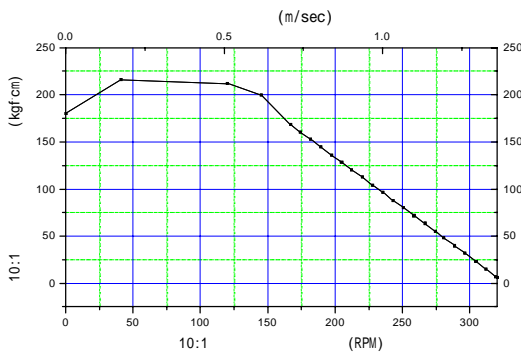


그림 11. Relation of Speed vs. Max. Torque 그림 12. Relation of motor efficiency vs. rpm

하기 위해 추진력, 선원 위치 정확성 및 RF 원격제어 시스템의 현장검증을 수행하였다.

선원 안내튜브의 기하학적 각도나 선원 안내튜브의 굴곡에 관계없이 추진속도 0.4m/sec ~ 1.2m/sec 범위에서 ±2.5mm 위치오차를 가지고 이동하였으며 기하학적 촬영인자에 영향을 주지 않았다.

그리고 작업자의 방사선 피폭감소 및 작업의 효율성 증대를 위해 설계한 RF 원격제어 시스템의 정상 작동여부를 확인하기 위해 그림 13과 같은 조건을 설정하여 평가한 결과 공간 장애물이 없을 시 20m까지, 그리고 10m 떨어진 콘크리트 차폐체 바로 뒤에서도 매우 신뢰성 있는 작동을 하였다. 그러나 차폐체 이후에 이격 거리가 1m씩 증가하면 급격히 신뢰성이 떨어지는 결과를 보였다. 더 큰 이격 거리에서의 제어는 용량이 큰 RF 모듈의 선정으로 해결 할 수 있으나 작업현장 사용에는 지장이 없었다.

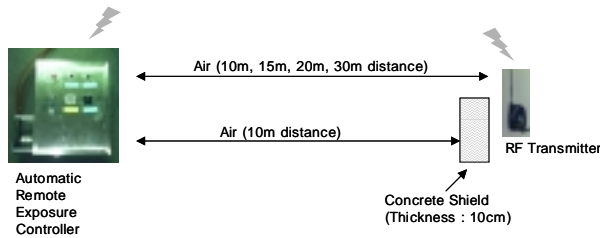


그림 13. The experimental diagram of RF remote controller

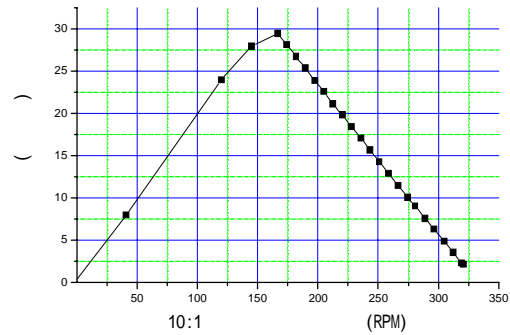


그림 14. Relation of consumable current vs. motor rpm at max. torque

개발한 자동화 시스템의 소비전력을 확인하기 위하여 최대 토크 상태에서 RPM에 따른 소비전력을 측정하였으며, 그 결과는 그림 14와 같다. 그림 14의 결과로부터 작업현장을 모사한 상황에서 선원 추진속도가 0.4m/sec~1.2m/sec일 때 평균 소비 전류는 3~5A 이었다. 그러므로 개발한 자동화 시스템의 적정한 DC 전원용 배터리의 용량을 결정하기 위해서는 최대출력 토크일 경우에 안정적으로 전원을 공급하여야 하고, 일일 평균 150회 구동한다는 가정을 설정하여 배터리의 용량을 결정하였다. 용량(Ah)은 배터리를 일정한 전류로 계속 방전시켰을 때 뽑아낼 수 있는 총 전기량이며 전류의 크기와 방전시간을 곱한 값으로 나타내므로, 개발한 자동화시스템에 적당한 배터리의 용량은 3~5Ah의 범위이다. 따라서 자동화 시스템의 중량은 3~5Ah 용량의 상용배터리 무게(2.5kg), 모터/구동부의 무게(2.5kg) 및 케이스/회로소자의 무게를 고려하면 총 중량을 8kg 이하로 제작할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후과제

국내 방사선투과검사에 이용되는 Ir-192 감마선투과검사 장비는 오랫동안 수동으로 조작하는 실정으로 본 연구에서 개발한 자동화 시스템을 적용하면 일반시계에 의한 노출시간 확인 오차, 수동 조작으로 인한 작업시간 지연 및 조사위치 오차등의 단점을 개선하여 투과사진의 품질 향상 및 작업효율화에 기여도가 높을 것이다. 또한 일정 준위 이상의 방사선 누출시 소리 및 빛을 발하여 선원 Pigtail 분리 등으로 인한 방사선 안전사고를 예방 할 수 있을 것이다.

국내 방사선투과검사 작업종사자의 연간 평균피폭선량은 2001년기준으로 3.22mSv로서 1998년 이후에는 피폭저감화 효과가 별로 없었다.^[9] 또한 방사선 투과검사 작업을 하지 않는 것으로 판단되는 연간 1mSv 이하의 피폭을 받는 작업자를 제외하면 작업종사자의 피폭 저감화는 이루어지지 않는 것으로 판단된다. 추후 본 연구의 결과물인 Ir-192 감마선투과검사의 자동화 시스템을 적용하였을 때의 실질적인 방사선투과검사 작업종사자의 피폭저감화의 효과에 대한 폭넓은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 한양대학교, 제2차 방사선 및 방사성동위원소 이용 진흥계획 수립에 관한 연구, 과학기술부, 2001. 12
2. 한국원자력연구소, 방사선 및 방사성동위원소 이용진흥 종합계획 수립, 과학기술부, KAERI/RR-1691/96, 1997. 5
3. 서울산업대학교 비파괴평가기술연구소, 비파괴검사기술 개발과 방사선안전성 제고 방안 연구, 과학기술부, 2001. 5
4. Joe Bush, "Gamma Radiation Safety Study Guide", ASNT, 2nd Ed., pp. 43-46, 2001
5. John J. Munro. III, Francis E. Roy. Jr., "Gamma Radiography Radiation Safety Handbook", Amersham Corporation, pp. 33-40, 1986
6. Dennis P. Townsend, "Dudley's Gear Handbook", McGraw-Hill, 2nd Ed., Section 14.5, 1992
7. Thomas G. Beckwith, "Mechanical Measurements", Addison-Wesley Publishing Company, 4th Ed., pp. 486~489, 1990
8. 日経 메커니컬, "메커 설계술", (주) 尖端, pp. 418- 441, 1994
9. 주광태, "NDT 분야 이용의 RT현황과 발전방안", 한국방사성동위원소 협회, 2002년도 방사선·방사성동위원소 이용진흥 연차대회, pp.107-139, 2002.11