

감마선투과검사 장치의 자동 원격조작기 개발

Development of Automatic Remote Exposure Controller for Gamma Radiography

주광태*[†], 신진성*, 김동언*, 송정호*, 주승환*, 장흥근*
 Gwang-Tae Joo*[†], Jin-Seong Shin*, Dong-Eun Kim*, Jung-Ho Song*,
 Seung-Hwan Choo* and Hong-Keun Chang*

초 록 국내 감마선투과검사용 조사장치는 1,000여대로 2,500여명의 종사자가 대부분 수동으로 원격 조작하는 실정으로 작업의 효율화와 방사선평폭 저감화를 위하여 자동 원격조작기의 사용이 요구된다. 이에 연구팀은 실무에 적합한 토크와 안전계수로부터 54 kgf·cm의 출력을 지닌 24V, 200W의 BLDC모터를 이용하여 0.4~1.2m/s 범위의 선원 이동 속도를 조절할 수 있는 구동장치와 RF 센서로 구동 속도 조절, 광전센서에 의한 선원 위치 및 timer로 노출시간을 제어할 수 있는 무선 원격조작기를 개발하였다. 이와 같이 개발한 자동원격조작기는 AC와 DC 겸용, 그리고 기존의 수동 원격조작기에 탈착이 가능하여 자동과 수동을 겸용할 수 있는 경제적 이점 등으로 활용도가 클 것으로 기대된다.

주요용어 : 감마선 조사장치, 원격조작기, 선원안내튜브, 구동 장치, BLDC모터

Abstract Recently, gamma radiographic equipments have been used about 1,000 sets manually and operated by about 2,500 persons in Korea. In order for a radiography to work effectively with avoiding any hazard of the high level radiation from the source, many field workers have expected developing a wireless automatic remote exposure controller. The KITCO research team has developed an automatic remote exposure controller that can regulate the speed of 0.4~1.2 m/s by BLDC motor of 24V 200W which has output of 54 kgf·cm, suitable torque and safety factor for the work. And the developed automatic remote exposure controller can control rpm of motor, pigtail position by photo-sensor and exposure time by timer to RF sensor. Thus, the developed equipment is expected that the unit can be used in many practical applications with benefits in economical advantage to combine the use of both automatic and manual type because attachment is possible existent manual remote exposure controller, AC and DC combined use.

Keywords: gamma radiographic equipment, remote exposure controller, guide tubes, driver wheel, BLDC motor

1. 서 론

1960년대에 도입되어 40여년간 산업발전에 기여해온 국내 비파괴검사는 신뢰성 때문에 지속적으로 방사선투과검사가 주로 실시되는 실정이다. 특히 Ir-192와 Co-60

이 내장된 감마선투과검사용 조사기 1,000여대를 2,500여명의 종사자가 전국에 주야로 이용하는 실정이나 검사장비 기술 개발은 상대적으로 발전이 미약하다[1]. 또한 감마선투과검사에 이용되는 원격조사장치는 간헐적으로 사고가 발생하여 공공의 불안감을 갖게 한바 있으며, 일반

인파도 접할 수 있는 기회가 점점 많아짐에 따라 방사선 안전의 공공성도 높아지고 있다.

현재의 감마선투과검사는 작업환경과 경영환경이 열악 할뿐더러 방사선피폭이 수반되는 3D 기술로서 종사를 기피하는 경향이 있다. 그리고 ICRP 60 권고 안을 준수하여야 하는 현실에 방사선피폭 저감화 실적도 고려하여야 한다[2]. 따라서 감마선투과검사 조사장치를 조작 시에 방사선피폭이 수반되는 수동형 원격조작기를 무선 조정용 자동 원격조작기로 대체한다면 방사선작업자의 피폭감소와 더불어 검사공정 단축, 정확한 노출시간의 설정 등으로 투과검사의 품질, 방사선안전성 확보 및 작업능률 향상을 기대할 수 있을 것이다.

국내에 사용되는 900여대의 Ir-192 조사장치의 대부분은 미국의 Tech/Ops 제품으로 조사기는 수입[3]하고 선원안 내튜브와 수동형 원격조작기는 국산을 이용하여 왔다. Tech/Ops의 Ir-192와 Co-60에 대한 자동형 원격조작기는 AC 전원에 의한 버튼식 조작기가 상품화되어 있으나 DC전원에 의한 무선형 원격조작기와 자동·수동 겸용은 일반화 되지 않아 기술 개발의 필요성이 있다. 또한 국내에 직선상의 대구경 배관 용접부의 감마선 로봇 장비가 극소수 사용되고 있으나 사용범위가 매우 극한적이고 고가이다.

본 기술 개발 연구에서는 기존에 사용 중인 감마선조사장치의 수동형 원격조작기를 바탕으로 모터에 의한 구동 장치의 설계·제작, 와이어 이송 속도와 선원 위치 제어 기술, 노출 시간 제어 및 무선 원격조작 시스템의 개발에 관련된 연구를 수행한 결과 수동과 자동을 겸용할 수 있는 AC, DC용 무선 자동원격조작기 제작 기술의 실용성을 입증하였다.

2. 감마선조사장치의 자동 원격조작기 개발

Ir-192 선원을 내장한 방사선 투과 검사기의 기존의 수동형 원격조작기를 자동제어화 하기 위하여 모터를 이용한 자동 원격조작기, 선원의 정확한 위치 및 노출시간 제어 시스템, 원거리 RF 제어시스템의 설계 및 제작을 하였다.

2.1. 구동장치의 자동화 설계 및 제작

국내 방사선투과검사에 이용하는 Ir-192 감마선조사장치는 Fig. 1에서와 같이 수동형 원격조작기, Ir-192 선원 pigtail이 내장된 조사기와 선원 안내튜브로 구성되어 있다. 원격조작기는 수동조작 기어에 의한 와이어 추진조절기와 와이어 그리고 와이어 유도관으로 구성되어 길이는 7.6m이다. 조사기는 감손우라늄 차폐체로 중심에 S곡선

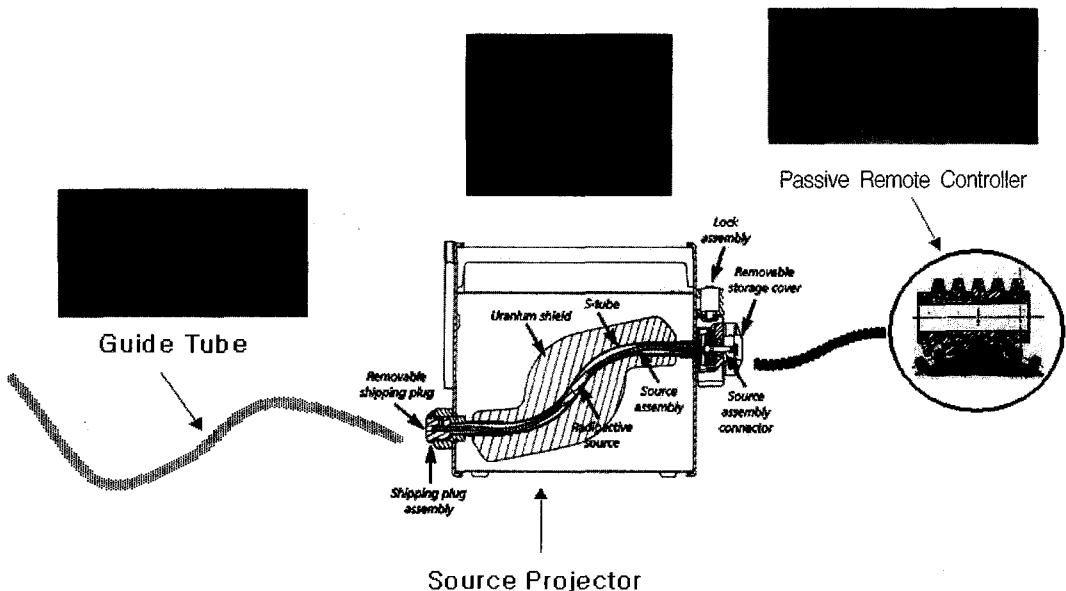


Fig. 1 The diagram of typical gamma radiography equipment

의 선원 pigtail 통로가 있으며 선원 안내튜브의 길이는 보통 3.2m로 되어있다[4,5]. 자동 원격조작기를 설계함에 있어 현장에서 검증된 본 장비를 바탕으로 reverse engineering 기법을 사용하여 감마선투과검사조사기의 자동 추진장치를 설계하였다.

조사기(projector) 내부에 있는 선원 pigtail을 검사 대상물체로 이동시키기 위해 Fig. 2와 같이 구동 휠(driver wheel)과 제어 케이블(control cable)을 설계하였다. 이 장치는 기어와 풀리(Pulley)의 복합적인 구조로서 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 가장 유용한 구동장치중의 하나이다. 그러나 구동시 소음이 많이 발생하는 단점이 있는데, 물림률(contact ratio)의 증가, 축의 설치 오차와 처짐을 보상 및 입력각 감소 등으로 줄일 수 있다[6].

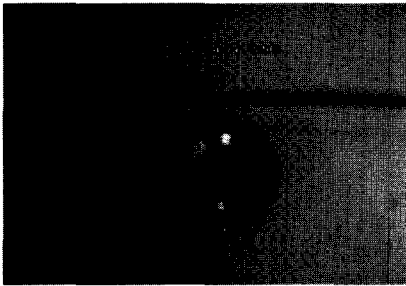


Fig. 2 The diagram of drive wheel and drive cable

구동장치를 구동시키기 위한 모터선정을 위해서는 구동시 필요한 휠의 토크는 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다[7].

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

여기서, T = 토크 r = 거리 F = 힘

그러나 구동시스템의 효율, 구동부의 마찰계수 등의 변수가 많아 실제적으로 적용하기가 매우 어렵다[8]. 또한 조사기의 상태와 위치, 추진장치의 형태, 선원을 검사 대상물체로 유도하는 선원안내튜브(guide tube)의 기하학적 모양에 따라 소요토크는 변화되기 때문에 Fig. 3과 같이 선원안내튜브의 상하 각도에 따라 소요토크를 측정하였다. 토크 측정은 구동 휠 중점 O에서 r 만큼 떨어진 곳에 힘 F를 가하는 방법을 이용하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

감마선조사장치의 안정적 구동을 위해 Table 1의 결과 중 최대 소요토크인 30kgf·cm를 추진장치의 모터선정을 위한 기초자료로 활용하였다. 그리고 감마선조사장치 내 구동 시스템의 신뢰성 확보를 위한 안전계수의 산출은 다음 식 (2)를 이용하였다[9].

$$S_f \text{ total} = S_f \times S_n \times S_p \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, S_f : 일반적 안전계수, S_n : 주위 온도상승에 대한 안전계수, S_p : 구동 빈도수에 대한 안전계수이다.

안전계수 S_f는 작업시 가동시간, 구동 및 정지 빈도수, 하중의 종류 주위온도 및 기타의 사항 등 모든 조작조건을 고려하여야 한다. 현재 사용 환경을 고려하여 일일 연속 운전시간을 8시간, 주위 온도를 40℃, 시간당 구동 빈도수를 32회로 가정하여 산출한 결과 안전계수는 1.8 이

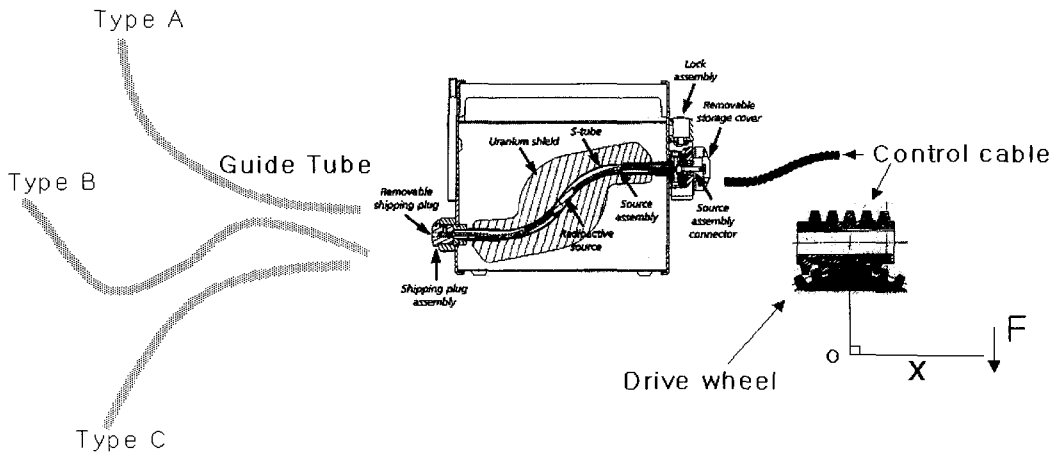


Fig. 3 The various position for measurement of consumable torque at guide tube

었다. 따라서 앞서 구한 최대 소요토크 30kgf·cm에 안전계수 1.8의 값을 곱한 54kgf·cm 출력 이상을 가지는 24V에 200W 용량의 모터를 채택하였다.

일반적으로 전원공급방식에 따라 모터는 AC와 DC 방식으로 크게 분류할 수 있다. AC는 DC방식에 비해 경량이고 경제적이지만 야외 현장에서는 외부 전원이 공급되어야하는 단점으로 DC모터가 활용성이 높다. DC 모터에는 보통 DC geared motor, DC servo motor, BLDC motor 등이 있으나 DC 모터의 단점을 보완한 BLDC 모터가 다목적으로 많이 쓰이고 있는 추세이다[10]. 제품의 경제성과 기능성을 비교하기 위해 24V, 200W를 지닌 Fig. 4(a)의 geared 모터와 Fig. 4(b)의 BLDC모터를 선정하였다.

DC geared 모터는 BLDC 모터보다 저렴하나 추진장치의 추진속도와 위치제어를 하기 위해서 Fig 5.1, Fig. 5.2

에 나타나듯이 제어시스템에 project, retract, stop relay가 내부회로에 결선 되어야 한다. 자동조작기의 최소화과 경량화를 위하여 BLDC 모터를 사용하여 추진 장치를 설계 제작하였다.

2.2. 감마선원의 이동속도, 위치제어 및 노출시간 제어부 설계 및 제작

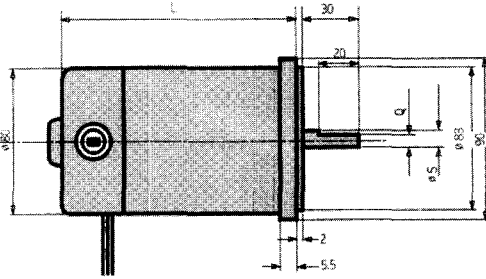
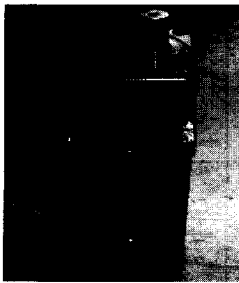
감마선투과 검사 할 때에 방사선원의 위치와 노출시간은 감마선투과 사진의 품질과 직결된다. 따라서 조사기안에 있는 방사선원을 요구하는 선정된 위치에 정해진 시간동안 위치시킨 후 조사기 내로 정확히 회귀시키는 시스템이 필요하다. 이의 방법으로 광학식 rotary encoder와 PLC(programmable logic controller)를 이용하는 방법과 광전센서와 BLDC motor driver를 이용한 방법을 적용하였다.

Table 1 Required torque for operation of gamma radiography equipment

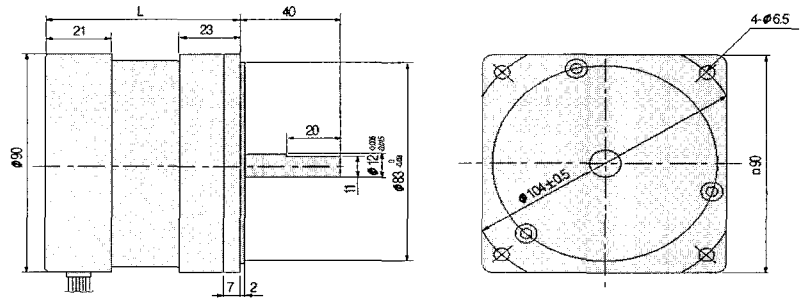
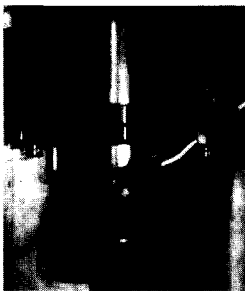
Geometry of Guide Tube	Max. Required Torque for Project (kgf·cm)	Avg. Required Torque for Project (kgf·cm)	Avg. Required Torque for Retract (kgf·cm)
Type A (the opposite direction of gravity, 30°)	20	10~15	10~12
	28	10~15	
	22	10~15	
Type A (the opposite direction of gravity, 60°)	26	10~15	10~12
	20	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%)



(a) DC geared Motor



(b) BLDC (brushless direct current) motor

Fig. 4 Used DC motors

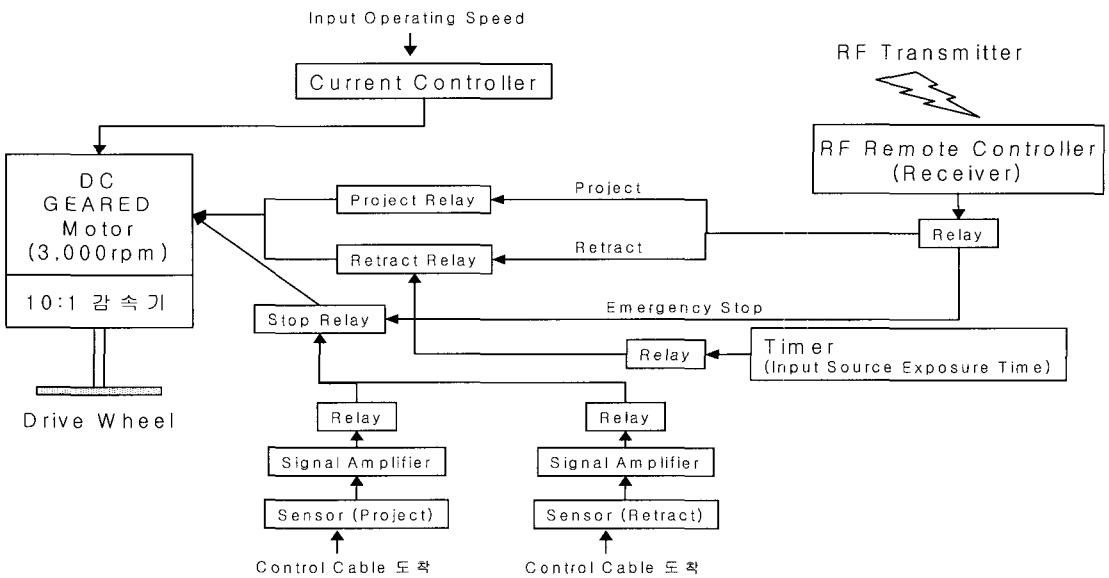


Fig. 5.1 Block diagram of automatic remote exposure controller by DC geared motor

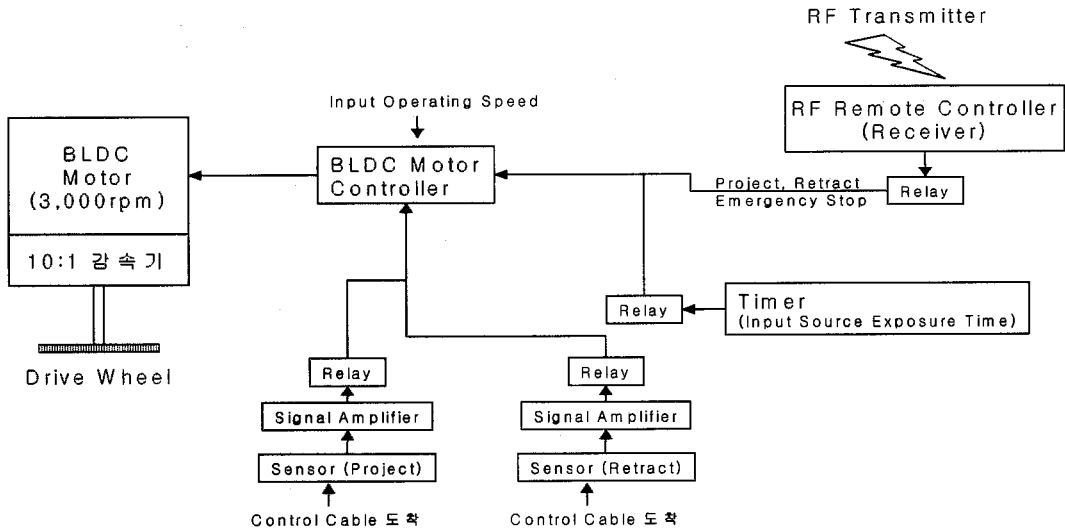


Fig. 5.2 Block diagram of automatic exposure remote controller with BLDC motor

2.2.1. Encoder와 PLC를 이용한 방법

광학식 rotary encoder와 PLC를 이용하여 제작한 자동 추진장치로서 PLC 내부에 저장한 프로그램에 따라 선원 pigtail의 추진과 위치를 제어하는 것이다. 선원 pigtail이 선원안내튜브로 이송 중 pigtail이 하중을 받아 추진되지 못할 때에는 모터에 과전류가 인가되어 회수되었다가 재 추진되고, 선원안내튜브 끝 부분에 도달 시에는 정지되었다가 정해진 노출시간 후에 조사기로 회귀되도록 프로그램을 제작하였다. 모터의 rpm에 따른 추진 거리의 설계 및 pigtail에 일정이상의 하중이 걸릴 때에 모터에 인가되는 과부하로 추진(project)과 회수(retract)를 반복하여 선

원의 도착유무를 판단한다. 즉 PLC에 저장한 프로그램으로 선원의 위치제어, 속도제어 및 노출 시간을 제어하는 것으로 Fig. 6과 같이 제작하였다.

2.2.2. 광전센서와 BLDC motor driver를 이용한 방법

감마선원을 정확한 위치와 노출시간의 조절은 BLDC 모터에 부착된 encoder의 신호 처리로 제어 할 수 있으며, 신호처리 구성도는 Fig. 7[11]과 같다.

그리고 감마선원의 위치를 제어하기 위해서 선원안내튜브 끝단에 유선의 투과형 광전센서를 부착하였고, 속도 제어는 BLDC motor driver를 이용하여 모터에 인가되는 전

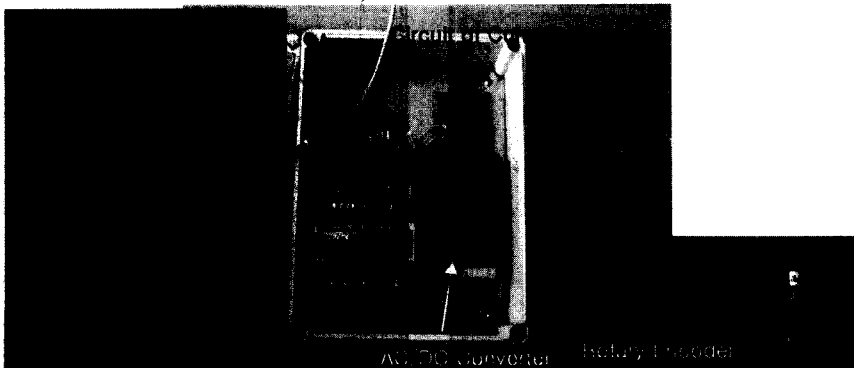


Fig. 6 Photograph of manufactured automatic controller system by encoder & PLC

류로 제어하였으며, 초 단위의 상용 timer를 부착하여 모터 드라이버에 신호를 보내고 입력한 시간이 지나면 선원이 회수되어 조사가기로 회귀할 수 있도록 하였다. Fig. 8은 감마선원의 위치제어를 하기 위해 설치한 광전센서와 선원의

노출 시간 그리고 속도제어를 하기 위한 timer, 전류제어 controller, BLDC motor driver의 구성도이다. 이 방법은 종래의 선원안내튜브의 끝단에 광전센서를 부착하여야 하는 단점이 있으나 원리적으로 단순하여 저렴하다.

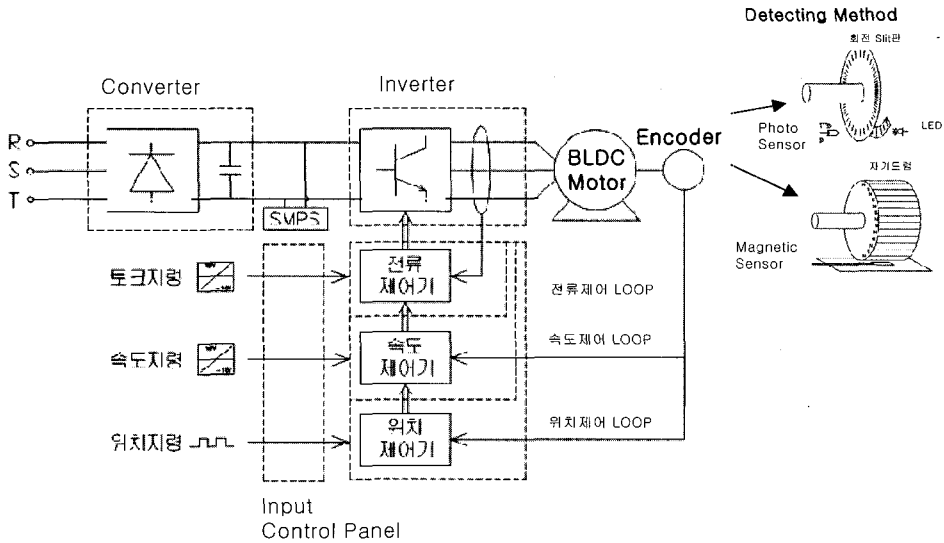


Fig. 7 The schemaic of encoder with BLDC motor

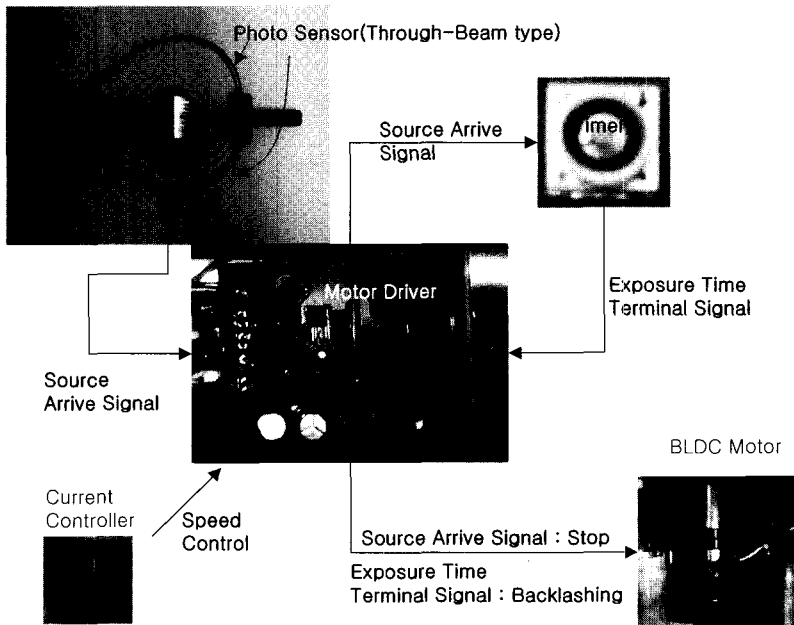


Fig. 8 The concept of controller by photo sensor, timer and BLDC motor

2.3. 무선 원격제어 시스템

모터와 와이어가 부착된 원격조작기를 원거리에서 조정하기 위해서는 무선 방법으로 제어하여야 방사선피폭을 감소시킬 수 있다. 일반적으로 적외선이나 RF가 이용되는데, 상용의 적외선 센서는 송신과 수신 센서가 수직이어야 하고 이격 거리의 한계가 있는 반면 RF센서는 별로 영향을 받지 않는다는 이점으로 상용의 RF센서를 선정하여 Fig. 9와 같이 무선 원격제어 시스템을 제작하였다.

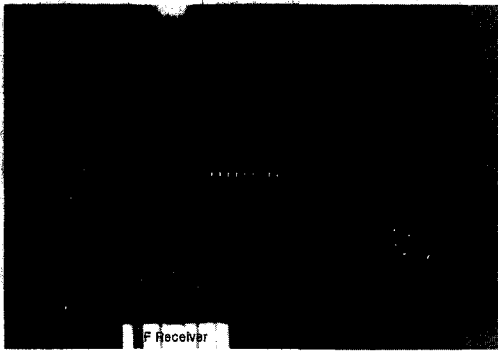


Fig. 9 The manufactured RF receiver/transmitter

3. 개발 시스템의 성능 평가 및 검토

3.1. 추진장치의 성능시험

감마선조사장치는 다양한 현장 환경에서 선원안내튜브가 상하좌우로 추진 사용됨으로 추진력의 차이가 있다. 선정된 모터의 추진력을 확인하기 위하여 추진 속도 (rpm)와 출력토크와의 관계를 측정하였고, 그 결과는 Fig. 12와 같다. Fig. 12에서 선원pigtail 추진에 필요한 최대 소요 토크인 54kgf·cm 이상의 값을 275 rpm(추진 속도 : 1.17m/s)이하에서 얻을 수 있으므로 다양한 작업 현장 조건에서 적용할 수 있는 모터라고 평가할 수 있다.

그리고 자동추진장치에 적합한 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. Fig. 12는 모터의 출력파워와 입력파워의 비로써 구해지는 BLDC 모터의 효율을 모터의 구동속도(rpm)에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 11에서 모터의 최적 구동 속도는 290~270rpm (1.23~1.15m/s)로서 Fig. 10과 Fig. 11의 결과와 비교 할 때 자동추진장치의 최적 구동 속도는 1.17m/s (275rpm)로서 현장 적용에 지장이 없는 속도이다.

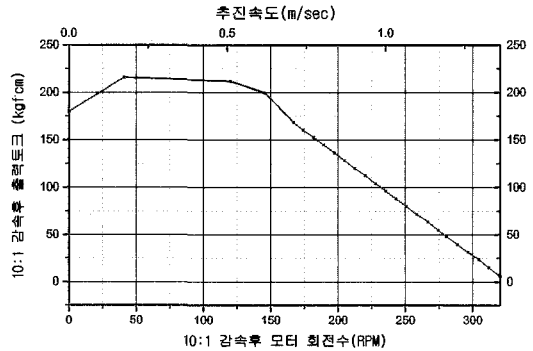


Fig. 10 Relation of speed vs. maximum torque of developed automatic exposure controller

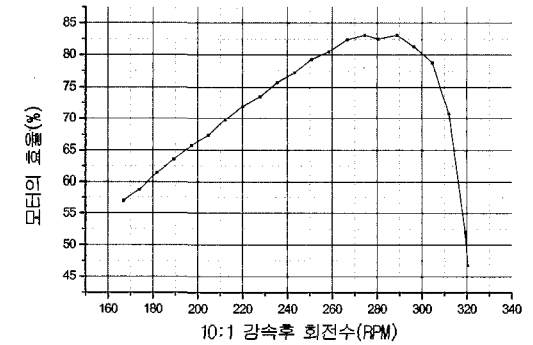


Fig. 11 Relation of motor efficiency(%) vs. rpm

3.2. 현장 적용성 검토

기술 개발한 무선 원격 자동조작기의 외형과 내부 구성도는 Fig. 12와 같으며, 이의 현장 적용성을 확인하기 위하여 추진력, 선원 위치의 정확성 및 RF 원격조절기의 현장 검증을 수행하였다.

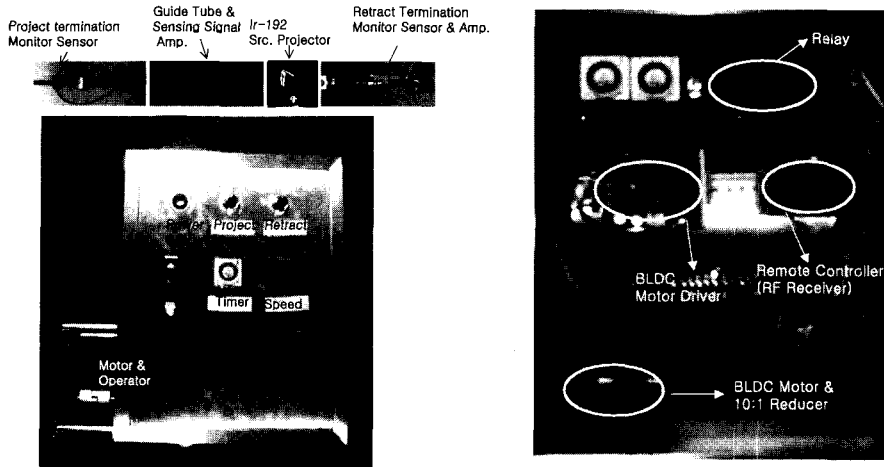


Fig. 12 Photograph of developed automatic remote controller

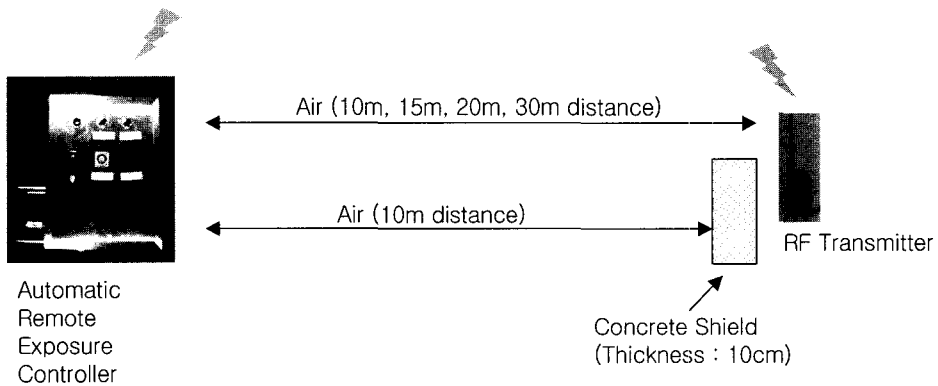


Fig. 13 The experimental diagram of RF remote controller

선원 안내튜브의 기하학적 각도나 선원 안내튜브의 굴곡에 관계없이 추진속도 0.4m/s ~1.2m/s 범위에서 선원이 정확한 위치로 이동하였고, 입력한 노출시간(0.1초 이하 오차) 후 조사기로 회귀하였다. 이 때의 선원 이동 위치오차는 수 mm 이내로서 기하학적 촬영 인자에 영향을 주지 않았다.

그리고 피폭 감소 및 작업의 효율성 증대를 위해 설계 및 제작한 RF 무선 원격 제어 시스템의 정상 작동여부를 확인하기 위해 Fig 13과 같은 실험조건을 설정하여 조작한 결과 공간 장애물이 없을 시 20m 까지, 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 많은 거리의 조절은 용량이 큰 RF센서의 선정으

로 해결할 수 있으나 작업현장 사용에는 지장이 없었다.

개발한 자동추진장치의 소비전력을 확인하기 위하여 최대 토크 상태에서 rpm에 따른 소비 전력을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 14와 같다.

Fig. 14의 결과로부터 작업현장을 모사한 상황에서 선원 추진속도가 0.4m/s~1.2m/s일 때 평균 소비전류는 3~5A이었다. 그러므로 자동추진장치의 적정한 DC전원용 배터리의 용량을 결정하기 위해서는 최대출력 토크일 경우에 안정적으로 전원을 공급하여야 하고, 일일 평균 8시간을 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 자동추진장

치에 적당한 배터리의 용량은 24~40Ah의 범위이다.

그러나 24~40Ah 용량의 상용 배터리의 무게가 약 10kg이므로 자동추진장치의 총 무게(추진장치+케이블+배터리)가 20kg 정도가 되어 다소 무겁다는 단점이 있으나 추후 모터의 출력과 원격조작기의 유도관 길이를 줄여 배터리 용량을 감소시키고, 회로 결선과 케이스를 재정리하여 실용화한다면 조작기의 총 중량을 10kg 미만으로 감소시킬 수 있을 것이다.

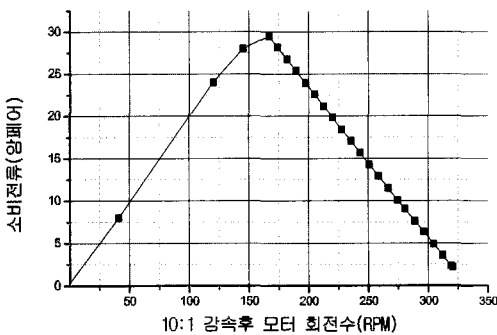


Fig. 14 Relation of consumable current vs. motor rpm at maximum torque

그리고 현재 산업계에 사용하는 1,000여대의 감마선 조사기에 이용되는 수동형 원격조작기에 개발한 무선형 자동원격조작기를 좌측에 탈착식으로 제작하여 조작할 수 있으므로 매우 경제적이고, 현장 여건에 따라 자동과 수동을 겸용할 수 있는 장점이 있다. 또한 본 연구에서 개발한 자동 원격 조작기의 사용은 기존의 수동형 원격조작기에서 발생하는 방사선 피폭, 일반시계에 의한 노출 시간 확인 오차, 조작기에 가서 수동 조작하는 작업 시간의 지연 등의 단점을 해결하여 방사선피폭 저감화, 투과사진의 품질 향상 및 작업 효율화에 기여도가 높을 것이다.

4. 결 론

국내 방사선투과검사에 이용되는 Ir-192나 Co-60 감마선조사장치는 오랫동안 수동으로 원격 조작하는 실정으로 감마선투과검사작업의 효율화와 방사선 피폭 저감화를 위하여 기존의 수동 원격조작장치를 바탕으로 자동 원격조작 장치에 대한 기술을 개발한 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 24V 200W의 BLDC모터 driver로 구동 속도를 0.4~1.2m/초 범위에서 조절할 수 있는 구동장치를 제작하였다.
- (2) RF 센서로 구동 속도 조절, 광전센서에 의한 선원 위치 및 timer로 노출시간을 제어할 수 있는 무선 원격 조작기를 제작하였다.
- (3) 개발한 자동원격조작기는 기존의 수동 원격조작기에 탈착이 가능하여 자동과 수동 그리고 AC와 DC를 겸용할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 2002년도 원자력연구개발사업의 일환으로 수행중인 과제의 일부입니다.

참고문헌

- [1] 한양대학교, "제2차 방사선 및 방사성동위원소 이용 진흥계획 수립에 관한 연구", 과학기술부, (2001. 12)
- [2] 한국원자력연구소, "방사선 및 방사성동위원소 이용 진흥 종합계획 수립", 과학기술부, KAERI/RR-1691/96, (1997. 5)
- [3] 서울산업대학교 비파괴평가기술연구소, "비파괴검사 기술 개발과 방사선안전성 제고 방안 연구", 과학기술부, pp. 99-100, (2001. 5)
- [4] Joe Bush, "Gamma Radiation Safety Study Guide 2nd ed.", ASNT, 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", Mc Graw-Hill, 2nd Ed., Section 14.5, (1992)
- [7] 현재경 외, "일반물리학", 형설출판사, pp. 124-125, (1992)
- [8] Thomas G. Beckwith, "Mechanical Measurements," Addison-Wesley Publishing Company, 4th Ed., pp. 486~489, (1990)
- [9] <http://www.gear.co.kr/html/kipworm/kload.htm>, (1998)
- [10] H經 메커니컬, "메커 설계술", (주) 尖端, pp. 408-432, 467-479, (1994)
- [11] 전자기술연구회, "센서와 전자회로", 기문사, pp. 143-144, (1993)