

X선 기기의 자동화를 위한 BLDC 모터 제어 장치

BLDC Motor Control Unit for Automation of X ray Equipment

김태곤*, 김영표*, 천민우**

Tae-Gon Kim*, Young-Pyo Kim* and Min-Woo Cheon*

요 약

진단용 X선 기기는 다양한 장치의 개발에 힘입어 보다 효과적이고 정밀한 진단이 가능하게 되었다. 정밀 진단이 가능하게 되면서 X선 기기는 임상의학에 있어 가장 기본적이고 핵심적인 진단 장치로 자리 잡고 있다. X선을 이용한 영상획득 분야에서는 영상의 획득 시간 단축과 전송이 용이하고, 조사선량의 감소가 가능한 DR(Digital Radiography)의 사용이 확대되고 있다. 하지만 DR은 1개의 디텍터를 이용하는 구조로 되어있어 기존의 X선 장치와는 달리 구조적인 변경이 필요하며 촬영위치에 따라 디텍터를 원하는 위치까지 움직여야하는 단점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 BLDC 모터와 PID 제어방식을 사용해 DR에서 가장 움직임이 많은 디텍터의 상하, 좌우, 회전 의 3축 위치자동 제어 시스템을 설계·제작하고 그 성능을 평가 하였다.

Abstract

X-ray device used in the diagnosis has made possible to have more effective and accurate diagnosis, powered by the development of various devices. Based on this, X-ray device has become the most basic and essential diagnostic equipment in clinical medicine. At present, in the image acquisition field using X-ray, the use of Digital radiography which is useful in the acquisition time reduction and transfer of images and is possible to have the dose reduction has expanded. With the structure using one detector, this DR device has disadvantages in that it needs structural changes unlike existing X-ray and the detector should be moved to the desired position depending on the shooting location. Therefore, in this study, using BLDC(Brushless direct current) motor and PID(Proportional integral differential) control method, the automatic control system of 3-axis which is upward and downward, left and right and rotation of detector where having the most movement in DR was designed and produced and its performance was evaluated.

Key words : BLDC motor, PID, Digital Radiography, Flat Panel Detector, PWM

I. 서 론

방사선 진단장치 중 하나인 X선 기기는 개발 초기에는 gas 관에 유도코일을 이용하여 X선을 발생시키

는 원리를 적용하였으며, 일정 두께 이상의 대상에 대한 촬영이 힘든 단점이 있었다[1]. 이후 X선 발생을 위해 X선관과 반도체 소자를 이용한 고효율의 고전압 발생장치 등을 개발함으로써[2,3] 효과적이고

* 동신대학교 대학원 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School, Dongshin University)

** 동신대학교 병원의료공학과(Department of Biomedical Engineering, Dongshin University)

· 제1저자 (First Author) : 김태곤

· 교신저자 (Corresponding Author) : 천민우

· 투고일자 : 2011년 8월 26일

· 심사(수정)일자 : 2011년 8월 27일 (수정일자 : 2011년 10월 7일)

· 게재일자 : 2011년 10월 30일

정밀한 진단이 가능하게 되었으며, 현재 X선 기기는 임상 의학에 있어 가장 기본적이고 핵심적인 진단 장치로 자리 잡고 있다.

진단용 X선 기기는 X선 발생장치 뿐 아니라 영상 획득 방식에도 많은 변화가 이뤄져 왔다. 가장 오랜 기간 사용된 증감지를 이용한 필름 형태의 영상 획득 방식은 조사선량의 경감과 양질의 의료정보 획득을 위해 다양한 종류의 X선 필름이 개발[4]되어 현재까지 사용되고 있다. 그러나 X선 필름은 진단에서 영상 획득까지 많은 시간이 소요되며 보관 과정에서 생기는 필름의 손상 및 분실, 인화에 따른 환경오염 물질의 배출 등 다양한 문제를 야기하므로 영상 획득 분야에 CR(Computed Radiography)과 DR(Digital Radiography)의 사용이 점차 확대되고 있다.

CR은 필름 대신 IP(Image Plate)를 사용하여 기존 X선 기기의 구조적인 변경 없이 그대로 사용할 수 있는 장점을 가지고 있으나 DR에 비해 영상획득에 많은 시간이 소요된다. 이러한 단점을 보완하고자 최근에는 광전도체(Photoconductor)와 박막 트랜지스터(Thin Film Transistor) 혹은 섬광체(Scintillator)와 광다이오드(Photodiode)를 활용하는 DR 기술을 사용하고 있다[5~7]. 하지만 DR의 경우 1개의 디텍터를 사용하는 구조로 구조적 변경이 필요하며 상황에 따라 디텍터를 원하는 위치까지 움직여야하는 단점이 있다. 특히 진단용 X선 기기는 정확한 진단을 위해 촬영 시 환자의 움직임 및 기구의 움직임이 최소화 되어야 하므로 구조적으로 무겁고 이동이 불편하다. 따라서 많은 환자의 진단이 이루어져야하는 중대형의 병원에서 효과적인 사용을 위해서는 자동화된 위치제어 장치가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 제어가 간단하고 넓은 범위의 속도 제어가 가능하며 효율이 매우 높은 BLDC (Brushless DC) 모터[8]를 사용하여 PID 제어방식으로 디텍터의 위치 자동제어 시스템을 설계·제작한 후 성능을 평가하였다.

II. BLDC 모터 제어 시스템

2-1 3축 제어시스템

의료용 X선 기기는 주로 흉부 촬영을 위한 vertical

형태와 누워서 촬영이 가능한 horizontal 형태로 사용되고 있다. 따라서 필름 및 CR 타입의 경우 2개의 카세트를 사용하여 측정 위치에 맞게 촬영이 이뤄진다. DR의 경우 CR과 비교하여 고품질의 영상과 고속의 응답 특성을 가지는 장점이 있으나 사용되는 디텍터의 가격이 매우 고가이므로 1개의 디텍터만 사용해 레일 형태로 구성하여 상하, 좌우, 회전 등을 수동으로 조작하고 있다.

본 연구에서 사용된 DR 시스템은 디텍터 위치의 표시를 위해 4개의 7 세그먼트 LED로 구성된 display와 사용자의 IR(Infrared ray) 신호 및 스위칭 신호를 받아 main controller에 제어 신호를 공급하는 remote control부로 구성되어 있다. 그림 1.에 본 연구에 사용된 모터제어 시스템의 구성도를 나타냈다.

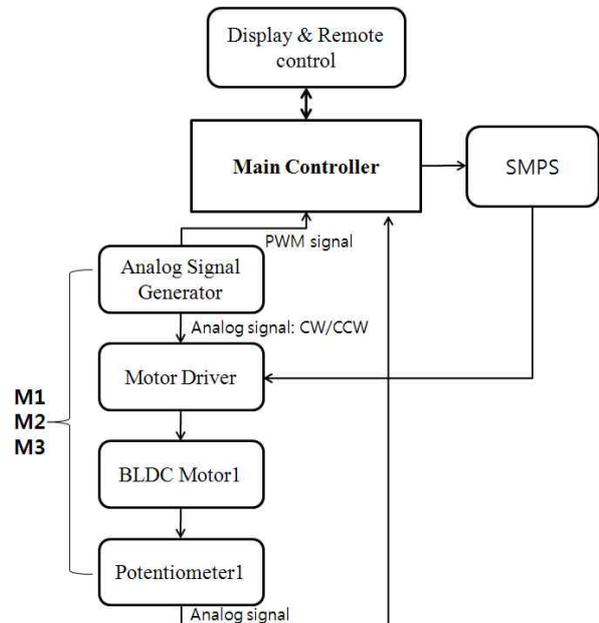


그림 1. 모터 제어 시스템의 구성

Fig. 1. Diagram of motor control system

상하, 좌우, 회전 등의 3축 운동을 위한 M1~M3까지 아날로그 신호발생기, 모터 driver(SPG Co., Ltd, XWD series, Korea), BLDC 모터(SPG Co., Ltd, XWM series, Korea), potentiometer를 각각 구성해 상하, 좌우, 회전의 정확한 동작이 이뤄지도록 하였다. 시스템의 전반적인 제어를 위해 사용된 main controller는 신속한 응답 특성을 가져 제어 시스템에 적합한 TMS320(DSP : Digital Signal Processor)를 사용하였으며 각각의 모터 driver가 가변속 운전 및 정속 운전을

하도록 PWM(Pulse Width Modulation) 신호를 공급한다. 또한 내부에 구성된 A/D converter를 이용해 potentiometer에서 인가된 아날로그 신호를 디지털 신호를 변환하고 이를 프로그램화된 기준 값과 비교하여 디택터 위치상태의 표시 및 제어가 가능하도록 하였다. 또한 설계제작한 모터 제어 시스템은 vertical, horizontal 형태의 촬영에 맞추어 자동으로 위치조절이 가능하도록 목표 값이 설정돼 있으며 PID (Proportional Integral Differential)제어를 통해 목표 값과 실제 위치가 비례 동작할 수 있도록 구성되어 있다. SMPS(Switched Mode Power Supply)는 시스템 IC(Integrated Circuit) 소자의 구동을 위한 전압과 BLDC 모터 구동을 위한 안정적인 직류 전압을 모터 driver에 공급한다. 본 연구에 사용한 BLDC 모터는 속도변동률이 $\pm 1\%$ 이하이며 100~2000 rpm의 속도 가변이 가능하다고 좌우 및 회전에 90 W, 상하의 경우 디택터 및 기구 장치의 무게를 고려하여 150 W 출력의 모터를 채택하였다. M1의 경우 디택터 장치의 0~1,500 mm까지 좌우 이동을 담당하며 M2는 디택터의 $\pm 95^\circ$ 의 회전, M3는 0~1,960 mm까지의 상하운동이 가능하도록 하였다.

2-2 아날로그 신호 발생기

제작한 시스템은 DSP에서 발생하는 디지털 신호를 아날로그 신호 변환기를 통해 직류전압으로 변환하여 모터 driver에 인가하는 구조로, 디택터 이동 시 흔들림 등에 의한 오차 발생 및 디택터에 가해지는 충격의 최소화가 필요하다. 따라서 사용된 BLDC 모터는 가속운전, 정속운전, 감속운전의 3단계로 나눠 구동되도록 설계하였다. BLDC 모터의 속도 조절은 DSP에서 발생된 PWM 신호의 duty rate 가변을 통해 제어하였다. 가변된 PWM 신호는 아날로그 신호 발생기를 거쳐 0~3 V까지의 직류전압을 생성하며 생성된 직류전압은 모터 driver의 외부 속도 조절단자에 인가되도록 구성하였다. 그림 2에 제작된 아날로그 신호 발생기를 나타냈다. 아날로그 신호 발생기는 전위차에 의해 발생하는 불필요한 영향을 최소화하기 위해 포토커플러(Photo Coupler)를 사용했으며 PWM 신호를 D/A 변환기에 입력한다. 입력된 PWM 신호는 D/A 변환기의 1차 콘덴서에 의해 맥동파형을 생성하

고 2차 콘덴서에 의해 실질적인 아날로그 파형을 생성하며 duty rate 증가에 따라 발생하는 아날로그 전압이 증가하도록 설계·제작 하였다. 모터의 정회전 및 역회전 제어는 모터 driver의 CW와 CCW 핀에 인가되는 전원에 의해 결정되며 모터에 필요 이상의 부하가 발생해 정상적인 동작을 하지 못할 경우 알람이 울리도록 구성하였다.

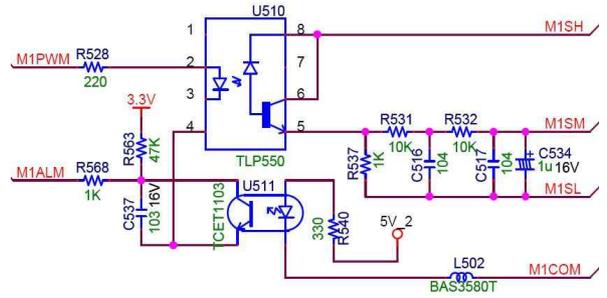


그림 2. 아날로그 신호 발생기의 구성도
Fig. 2. Diagram of analog signal generator

2-3 위치 제어기

시스템의 위치제어를 위해 potentiometer(3590S, BOURNS社)를 사용하였다. 제작한 자동 제어 시스템은 상하, 좌우, 회전 등의 위치제어 뿐 아니라 vertical 및 horizontal 형태의 촬영에 맞춰 디택터를 설정한 값으로 이동하는 auto mode의 동작이 가능하도록 하였다. 이를 위해 potentiometer에서 측정된 값과 제어하고자 하는 목표 값을 비교하여 오차가 발생할 경우 제어기가 출력 값을 조정하도록 비례동작(P), 적분동작(I), 미분동작(D)을 조합한 제어 방식을 적용했다. PID 제어는 디지털로 연산되므로 potentiometer에서 발생하는 아날로그 신호의 직접적인 사용이 불가능하다. 따라서 일반적으로 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜 주는 A/D 변환모듈을 별도로 사용해 디지털 신호로 변환하지만 본 연구에서는 DSP 자체에 구성된 16개 채널의 12비트 아날로그 디지털변환(ADC: Analog Digital Converter) 단자를 사용하였다. 제작한 위치제어기는 DSP의 DAC 변환 단자에 potentiometer에서 발생하는 아날로그 미세 전압을 직접 인가하도록 구성하였으며 그림 3에 위치제어기의 구성도를 나타냈다. DSP에 인가 가능한 미세 전압의

최대치가 3.3 V로 항상 균일하게 인가되도록 KA324를 레귤레이터로 사용하였다. 모터의 회전에 의해 potentiometer에서는 0~3.3 V의 미세 전압을 발생시킨 후 DSP에서 12 bit(4,096)의 분해능으로 디지털화하여 디택터의 위치제어를 담당하게 된다.

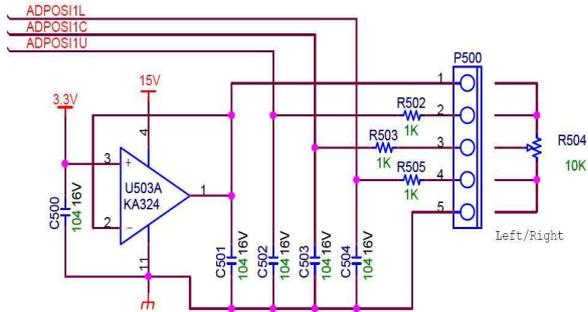


그림 3. 위치제어기의 구성도
Fig. 3. Diagram of position controller

III. 결과 및 고찰

3-1 PWM 신호에 의한 가변속 제어

가변속 운동에 대한 동작 신호는 오실로스코프 (Tektronix INC, TDS5000B, USA)를 사용하여 확인하였다. 제어에 사용된 PWM 신호와 모터 driver에 인가되는 직류전압을 측정하였으며 그 결과를 그림 4에 PWM 제어신호 및 아날로그의 변환 신호로 나타냈다. PWM carrier 주파수는 main controller인 DSP의 클럭(Clock)에 의해 결정되며, 본 연구에서는 18.31 kHz를 사용하였다. 디택터의 움직임에 따른 가속운동은 duty rate 0~99.99 %로 가변되도록 구성하였으며 그림 4의 (a)는 초기운동 시점을 측정한 결과로 duty rate는 4.389 %이며 이때 아날로그 신호변환기를 통해 발생하는 아날로그 신호는 200 mV였다. 정속운전이 시작되는 구간을 나타낸 그림 4의 (b)는 full duty에 가까운 98.99 %의 duty rate가 발생하였다. 사용된 DSP에서 발생 가능한 전압은 $3.0 \sim 3.6 \pm 0.3$ V 생성이 가능하지만 아날로그 신호 변환기에 사용된 포토커플러 등의 손실에 의해 full duty에 가까운 정속운전 구간에서 아날로그 data가 2.88 V가 되는 것을 확인하였다. 가속, 정속, 감속운동에 따라 발생하는 직류전압의 변화를 확인하여 그림 5에 나타냈다.

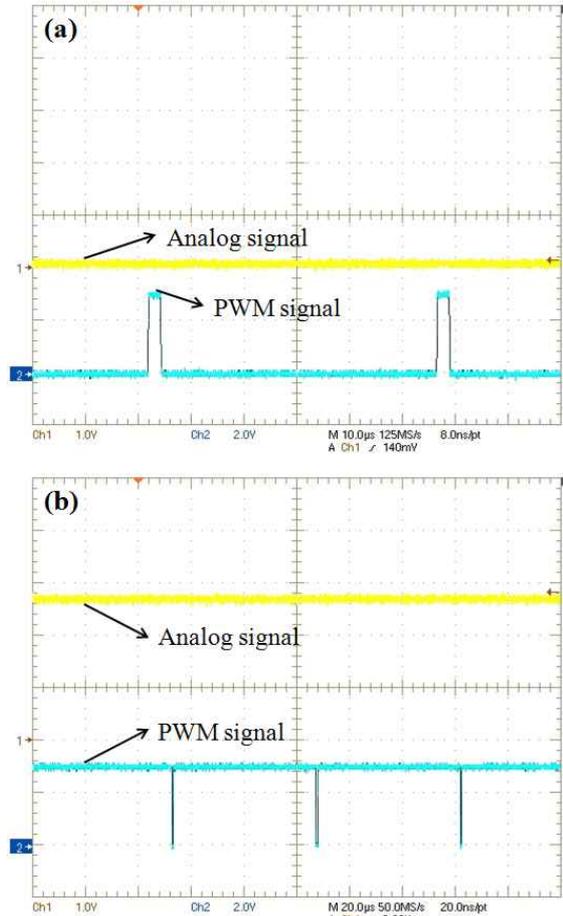


그림 4. PWM 제어신호와 아날로그 변환 신호
(a) 가변속 운전, (b) 정속 운전
Fig. 4. PWM control signal and analog transformation signal
(a) Variable speed operation
(b) Fixed speed operation

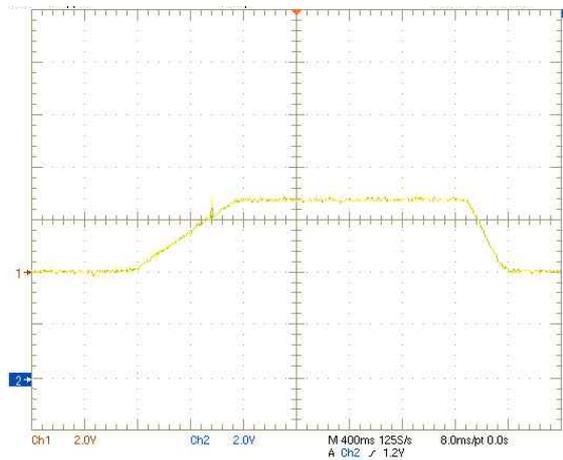


그림 5. 가속, 정속, 감속운동에 따라 발생하는 직류전압의 변화
Fig. 5. DC voltage change according to variable-speed device

사용된 모터 driver는 외부 입력 단자에 인가되는 0~5 V까지의 직류전압에 따라 100~2,000 rpm의 제어가 가능하다. 하지만 제작된 시스템에서는 아날로그 신호 변환기에서 발생한 0~2.88 V의 직류전압을 사용하여 최대 약 1,200 rpm까지 가변 및 정속 운전이 가능하도록 구성하였다. 모터 driver에 초기 가속에서 정속운전까지 소요되는 시간은 약 800 msec, 감속운전의 경우 빠른 종료율을 위해 약 320 msec 동안 감속이 이뤄지도록 하였다.

3-2 위치제어

본 연구에 사용된 시스템은 디텍터의 상하, 좌우, 회전이 가능하도록 하였다. 이송 거리가 긴 상하 및 좌우의 경우 BLDC 모터의 회전축과 potentiometer 사이에 감속기를 적용하였으며 모터의 구동이 적은 회전의 경우 증속기를 사용하여 potentiometer와 연결하였다. BLDC 모터 회전축의 감속 및 증속기를 통해 3축 각각의 위치 변화에 따라 potentiometer에서 0~3.3 V 범위의 직류전압을 발생한다. 발생한 직류 전압은 DSP의 ADC에 인가되어 0~4,095 범위의 디지털 값으로 변환되며 이 변환된 값을 이용해 현재 위치를 확인하도록 구성하였다. 특히 X선 촬영 형태에 따라 디텍터를 설정한 값으로 3개의 축이 자동으로 이동하는 auto mode의 경우 DSP에서는 설정된 연산 목표값과 현재 potentiometer에서 들어오는 실제 전압값을 비교하여 PID 제어를 통해 항상 동일한 위치를 찾아가도록 구성하였다. 그림 6에 DSP 분해능 변화에 따른 potentiometer의 아날로그 신호 변화를 나타냈다. potentiometer의 초기값은 0 V, 최대값은 3.3 V이지만 노이즈 및 세팅의 부정확성으로 오차가 발생할 경우 오작동으로 인해 소자의 파괴가 일어날 수 있다. 이러한 오작동에 의한 소자의 파괴 현상을 없애기 위해 본 연구에서는 실제 potentiometer의 아날로그 신호값의 범위를 0.08~3.08 V의 값을 사용하였다. 3축 각각에 대한 DSP 분해능의 최대값과 최소값 설정했으며 상하 운동의 경우 DSP 분해능을 기준으로 0 mm의 위치에서는 855, 1,500 mm의 위치에서는 2,800의 값을 지정해 초기 시작점에서 종료지점까지 0~1,500 mm의 이송이 가능하도록 하였다. 좌우 운동의 경우 DSP 분해능을 기준으로 한 data 값을 480~3,385로

지정해 총 1,960 mm 이송이 가능하도록 하였고 회전의 경우도 DSP 분해능의 2,000의 값을 기준으로 ± 350 의 값을 가지도록 하여 $\pm 95^\circ$ 의 회전이 가능하도록 설계·제작하였다.

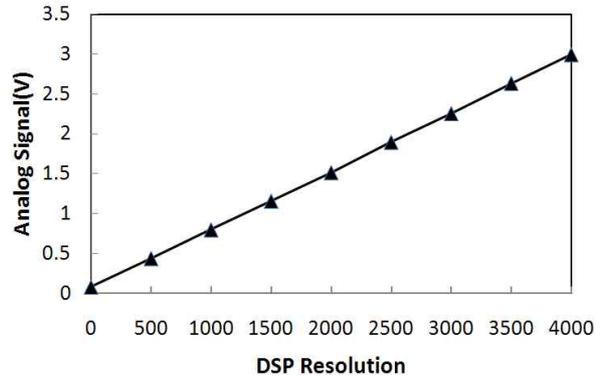


그림 6. DSP 분해능 변화에 따른 potentiometer의 아날로그 신호 변화

Fig. 6. Variation of analog signal according to DSP resolution

IV. 결 론

본 연구에서는 디텍터를 이용한 X선 장치인 DR 시스템에서 디텍터의 위치 자동제어를 위해 BLDC 모터를 이용한 PID 제어시스템을 설계·제작하였다. 제작된 시스템은 촬영 형태에 따라 디텍터의 상하, 좌우, 회전 등 3축 제어가 필요하므로 3개의 모터 driver와 BLDC 모터를 각각 사용하였다. 급격한 위치 이동에 따른 디텍터의 충격을 최소화하기 위해 PMW 제어방식을 이용해 가변속 제어를 하였고 초기 가속에서 정속운전까지는 약 800 msec가 소요되며 감속 운전 시 약 320 msec 동안 감속이 이뤄지도록 하였다. 위치 제어는 potentiometer의 출력 전압을 아날로그 입력으로 DSP의 ADC를 거쳐 4,096 단계의 분해능을 가지는 디지털 값으로 변환하게 되며 DSP에서는 연산을 통해 현재 위치 및 동작 상태의 확인이 가능하도록 구성하였다. 또한 vertical 및 horizontal 형태에 따른 측정 위치 변화에 의한 디텍터 위치 자동제어는 potentiometer의 출력 전압에 의한 설정값과 PID 연산에 따라 BLDC 모터가 설정값이 근접했을 때 감속하고 목표치에 도달하게 되면 정지하도록 하였다. 오작동에 의한 소자의 파괴 현상을 없애기 위해 본 연구에

서는 실제 potentiometer의 아날로그 신호 값의 범위를 0.08~3.08 V의 값을 사용하였으며 3축 각각에 대해 DSP의 분해능을 기준으로 최대값과 최소값 설정하여 디텍터 이송 시 접촉에 의한 안전성을 확보하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. G. Kim, M. W. Cheon and Y. P. Park, "Comparison of Output and Radiation Quality of X-rays according to the Full-Wave Rectification Method and Dual-Voltage Rectification Method of an X-ray Generator" *J. of KIIEE*. vol. 23, no. 7, pp. 534-538, July. 2010.
- [2] J. P. Moy, "Signal-to Noise Ratio and Spatial Resolution in X-ray Electronic Imagers: Is the MTF a Relevant Parameter?" *Med. Phys.* vol. 27, no. 1, pp. 86-93, Jan. 2000.
- [3] Y. P. Kim, M. W. Cheon and Y. P. Park "Characteristic Evaluation of Medical X-ray Using High-Voltage Generator With Inverter system" *J. KIEEME*. vol. 24, no. 1, pp. 36-41, Janu. 2011.
- [4] Y. G. Kim, H. B. Gu and K. S. Lee, "A Study on the Physical Properties of Intensifying Screens in the Region of Diagnostic Radiology" *J. of KIIEE*, vol. 12, no. 9, pp. 824-828, Sep. 1999.
- [5] Cowen A. R., Davies A. G., Sivananthan M. U., "The design and imaging characteristics of dynamic, solid-state, flat-panel x-ray image detectors for digital fluoroscopy and fluorography". *Clin Radiol.* vol 63, pp. 1073-1085, Oct. 2008.
- [6] M. Simon, K. J. Engel, B. Menser, X. Badel, and J. Linnros, "X-ray imaging performance of scintillator-filled silicon pore arrays", *Med. Phys.* vol. 35, no. 3, pp. 968-981, Mar. 2008.
- [7] Badel, X. et al., "Performance of Scintillating Waveguides for CCD-based X-ray detectors" *J. Sch. of Inf. & Commun. Technol.*, vol. 53, no. 1, pp. 3-8, Feb, 2006.
- [8] Floyd CE, Warp RJ, Dobbins JT, Chotas HG, Baydush AH, Vargas-Voracek R, and Ravin, CE,

"Imaging characteristics of an amorphous silicon flat-panel detector for digital chest radiography" *Radiology*. vol. 218, no. 3, pp. 683-688, March. 2001.

- [9] S. J. Park, H. W. Park, M. H. Lee and F. Harashima, "A New Approach for Minimum-Torque-Ripple Maximum-Efficiency Control of BLDC Motor", *IEEE Trans. on IE*, vol. 47, no. 1, 109-114, Feb. 2000.

김 태 곤 (金泰坤)



2005년 2월 : 동신대학교 전기전자 공학과(공학사)
 2007년 2월 : 동신대학교 전기전자 공학과(공학석사)
 2011년 02월 : 동신대학교 전기전자 공학과(박사수료)
 관심분야 : 의공학, 재료공학, 방사선공학, 의용생체공학

김 영 표 (金永杓)



2007년 2월 : 동신대학교 정보통신 공학부(공학사)
 2009년 2월 : 동신대학교 전기전자 공학과(공학석사)
 2011년 2월 : 동신대학교 전기전자 공학과(박사수료)
 관심분야 : 재생 의공학, 재료공학, 방사선공학, 고전압 발생장치

천 민 우 (千珉右)



2001년 2월 : 동신대학교 전기전자 공학과(공학사)
 2003년 2월 : 동신대학교 전기전자 공학과(공학석사)
 2006년 2월 : 동신대학교 전기전자 공학과(공학박사)
 2008년 8월 : 조선대학교 의학과

(의학박사)

2010년 1월~현재 : 대한의용생체공학회 교육위원
 2010년 3월~현재 : 동신대학교 병원의료학과 전임강사
 관심분야 : 의공학, CT, MRI