

## Evaluation of Approximate Exposure to Low-dose Ionizing Radiation from Medical Images using a Computed Radiography (CR) System

Minsun Yu, Jaeseung Lee, Inchul Im

*Department of Radiological Science, Dongeui University*

### 전산화 방사선촬영(CR) 시스템을 이용한 근사적 의료 피폭 선량 평가

우민선, 이재승, 임인철

동의대학교 방사선학과

#### Abstract

This study suggested evaluation of approximately exposure to low-dose ionization radiation from medical images using a computed radiography (CR) system in standard X-ray examination and experimental model can compare diagnostic reference level (DRL) will suggest on optimization condition of guard about medical radiation of low dose space. Entrance surface dose (ESD) cross-measuring by standard dosimeter and optically stimulated luminescence dosimeters (OSLDs) in experiment condition about tube voltage and current of X-ray generator. Also, Hounsfield unit (HU) scale measured about each experiment condition in CR system and after character relationship table and graph tabulate about ESD and HU scale, approximately radiation dose about head, neck, thoracic, abdomen, and pelvis draw a measurement. In result measuring head, neck, thoracic, abdomen, and pelvis, average of ESD is 2.10, 2.01, 1.13, 2.97, and 1.95 mGy, respectively. HU scale is  $3,276 \pm 3.72$ ,  $3,217 \pm 2.93$ ,  $2,768 \pm 3.13$ ,  $3,782 \pm 5.19$ , and  $2,318 \pm 4.64$ , respectively, in CR image. At this moment, using characteristic relationship table and graph, ESD measured approximately 2.16, 2.06, 1.19, 3.05, and 2.07 mGy, respectively. Average error of measuring value and ESD measured approximately smaller than 3%, this have credibility cover all the bases radiology area of measurement 5%. In its final analysis, this study suggest new experimental model approximately can assess radiation dose of patient in standard X-ray examination and can apply to CR examination, digital radiography and even film-cassette system.

Key Words : computed radiography (CR), diagnostic reference level (DRL), Hounsfield unit (HU) scale, entrance surface dose (ESD)

#### 요약

본 연구는 일반 X선 검사에서 CR 시스템을 이용한 환자의 근사적 피폭 선량을 평가할 수 있는 실험적 모델을 제시하고 저선량 영역에서 의료 피폭에 대한 방어책의 최적화 조건으로 환자의 선량 권고량(diagnostic reference level, DRL)을 비교하고자 하였다. 이를 위하여 기준선량계와 광자극발광선량계(optically stimulated luminescence dosimeters, OSLDs)를 이용하여 관전압(kVp) 및 관전류·노출시간의 곱(mAs)에 따른 입사표면선량(entrance

surface dose. ESD)을 교차 측정하였으며 CR 시스템에서 각 노출 조건에 대한 Hounsfield unit (HU) scale을 측정하여 ESD와 HU 스케일에 대한 특성 관계를 이용하여 근사적 피폭 선량을 구하였다. 또한 임상적으로 적용 가능한지를 알기 위하여 두부, 경부, 흉부, 복부, 골반부 노출 조건으로 물 팬텀에 모사하여 피폭 선량을 구하였다. 결과적으로 두 선량계의 평균 ESD는 각각 2.10, 2.01, 1.13, 2.97, 1.95 mGy 이었으며 CR 영상에서 측정한 HU 스케일은 각각  $3,276 \pm 3.72$ ,  $3,217 \pm 2.93$ ,  $2,768 \pm 3.13$ ,  $3,782 \pm 5.19$ ,  $2,318 \pm 4.64$  이었다. 이 때 ESD와 HU 스케일에 대한 특성 관계를 이용하여 근사적으로 구한 ESD는 각각 2.16, 2.06, 1.19, 3.05, 2.07 mGy이었으며 평균 측정값과 근사적으로 구한 ESD의 오차는 3% 미만으로 영상의학 분야의 측정 오차 5%를 감안한다면 신뢰할 수 있는 오차 범위라 할 수 있었다. 결론적으로 CR 시스템을 이용한 일반 X선 검사에서 환자의 피폭 선량을 근사적으로 평가할 수 있는 새로운 실험적 모델을 제시하였으며 CR 검사뿐 만 아니라 디지털 방사선촬영(digital radiography. DR) 시스템 및 필름-증감지 시스템에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

중심단어: 전산화 방사선촬영, 선량 권고량, 하운스필드 스케일, 입사표면선량

### I. 서론

최근 의료영상저장전송시스템(picture archiving and communication system. 이하 PACS)이 도입되면서 기존 필름-증감지 시스템을 대체할 수 있고 PACS 등의 디지털 의료 매체와 통합 연결하여 실시간 다른 위치에서 영상을 확인할 수 있으며 영구적으로 저장할 수 있다는 이점 때문에 전산화 방사선촬영(computed radiography. 이하 CR) 시스템이 보편적으로 이용되고 있다. CR 시스템은 필름-증감지 시스템 대신에 형광물질이 도포된 영상판(imaging plate. 이하 IP)을 사용하여 촬영한 후 X선 영상 정보가 축적된 IP에 레이저로 빔을 주사하여 영상 정보를 획득할 수 있는 영상 출력 시스템이다(Fig. 1). 이 과정에서 변환된 디지털 의료 영상은 일정 화소(pixel)에서 조직에 의해 흡수된 평균 방사선량에 상응하는 하운스필드(Hounsfield unit. 이하 HU) 스케일로 주어진다. 이 값들은 관전압의 영향을 받지 않은 물의 감쇠계수를 기준으로 많은 요인들에 의해 조직에 일정한 영향을 주는 감쇠계수에 대한 상대적인 값이며 CR 시스템에서 HU 스케일은 최소 0에서 최대 4,095까지 4,096 단계로 구성되어 있다<sup>[1]</sup>.

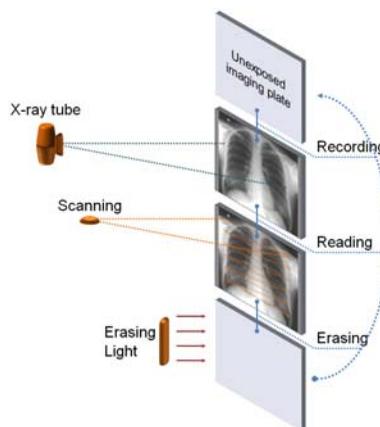


Figure 1. Block diagram shows the imaging plate (IP) processing of general computed radiography (CR) system.

그러나 이러한 디지털 의료 기술은 영상의 악화나 일그러짐이 없이 영상 처리를 할 수 있는 선량의 최대치와 최소치의 비로서 역동 범위(dynamic range)가 전통적인 필름-증감지 방식에 비하여 약 10,000 배 정도 증가되기 때문에 영상의 질이 저하되지 않으면서 과다 노출이 발생할 수 있고 환자의 피폭 선량을 증가시키는 원인이 되고 있다<sup>[2,3]</sup>. 또한 영상의학 기술의 발전과 더불어 첨단 방사선 의료기기의 사용과 디지털 의료 영상 기술이 도입되면서 환자의 방사선 피폭 환경이 급격하게 변화하고 있으며 국민의 삶의 질이 향상됨에 따라 건강 검진 등의 일반 X선 촬영 빈도가 점차 증가되고 있다. UN 방사선 영향 과학 위원회의(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic

Radiation. UNSCEAR) 2000 보고서에 따르면 전 세계적으로 일반 X선 촬영 빈도는 1985년에서 1990년 기준으로 약 16억 회, 1990년에서 1995년 기준으로 19억 회로 급격하게 증가되고 있으며 환자의 피폭 선량은 의료 기관에 따라 10배에서 20배까지 큰 차이를 나타내고 있다<sup>[4]</sup>. 또한 식품의약품안전청(Korea Food and Drug Administration. KFDA) 2010년 보도 자료에 의하면 진단용 방사선 발생장치의 이용에 관한 소비자 인식 조사에서 환자의 51.5%는 X선 검사에 대한 막연한 두려움을 갖고 있는 것으로 조사되었고 86.7%는 X선 검사에 대한 안전과 예방을 위하여 정확한 정보의 제공 및 교육의 필요성에 대하여 지지를 나타냈다<sup>[5]</sup>.

일반 X선 촬영에서 사용되는 저선량 영역의 전리방사선은 어떤 효과를 나타내는 문턱값(threshold)이 없는 확률적 영향으로 나타내고 있으며 LNT (linear-non threshold) 모델을 방사선 방어에 적용하고 있기 때문에 환자의 피폭 선량을 저감하는 것이 매우 중요하다<sup>[6]</sup>. 이와 관련하여 국제방사선방어위원회(International Commission on Radiological Protection. 이하 ICRP)는 2008년 신권고안을 최종 승인하면서 의료 피폭에 대한 방사선 방어 체계를 마련하였다<sup>[7]</sup>. 특히 의료 피폭에서 방어의 최적화 조건으로 진단 참고 준위인 환자의 선량 권고량(diagnostic reference level. 이하 DRL)을 적용하도록 권고하면서 환자에 대한 선량한도를 적용하지 않고 있다. 여기서 DRL은 X선을 이용한 검사에서 환자가 받는 피폭 선량을 측정하고 평가함으로써 진단에 참고할 수 있도록 권고하는 선량 준위로서 검사 빈도가 높고 정기적인 검사에 대하여 확립하고 있으며 임상적으로 문제가 되지 않는 적정 범위에서 사용하는 방사선 선량인 제3사분위수(3rd quartile)를 기준으로 설정하고 있다<sup>[7]</sup>. 또한 환자에 대한 방사선 방어의 최적화를 위하여 진단용 X선 장치의 성능 및 품질 관리에 관한 기준과 X선 검사에서 환자가 받는 기관 선량을 평가할 수 있도록 하였다. 그러나 DRL을 측정하기 위해서는 국제 교정 기구에서 교정된 이온함 및 유리선량계 시스템을 의료기관에서 보유해야 되며 측정 과정이 번거롭기 때문에 각 의료 기관에 따른 환자의 DRL을 마련하거나 환자의 신체적 조건 및 사용 장비의 물리적 특성에 따른 환자의 피폭 선량을 평가하는 것은 결코 쉽지 않다.

따라서 본 연구는 일반 X선 검사에서 CR 시스템을 이용한 근사적 피폭 선량 평가 방법을 임상에 적용하여 환자가 받는 피폭 선량을 효율적이며 간편하게 측정하고 평가함으로써 의료기관에서 환자의 피폭 선량 저감화 방안을 모색할 수 있고 저선량 영역의 의료 피폭에 대한 방어의 최적화 조건으로 DRL을 비교할 수 있는 실험적 모델을 제시하고자 하였다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 실험 장비

본 연구에 사용된 장비는 X선 영상 획득을 위하여 X선 발생 장치(REX-650R, LISTEM, Korea), CR 시스템(CR85-X, Agfa, Belgium), 영상관(MD 4.0, Agfa, Belgium)과 선량 측정을 위하여 물 팬텀(MP2, PTW, Germany), 기준 선량계(Unifors thinx RAD, Unifors, Sweden), 광자극발광선량계(optically stimulated luminescence dosimeters. 이하 OSLDs) 시스템을 사용하였다. Table 1과 2는 CR 시스템과 X선 발생장치에 대한 자세한 사양을 보여준다. CR 시스템은 조직의 X선 투과 정도를 영상으로 기록하는 IP 카세트 및 영상관독부와 영상처리부로 구성되어 있었다.

또한 기준선량계는 X선 발생장치의 기본 매개 변수인 순간 최대관전압, 선질, 관전류, 노출시간, 관전류·노출시간의 곱(이하 mAs), 조사선량 및 흡수선량, 그리고 선량률 등을 동시에 측정할 수 있도록 최적화되어 있었다. 측정 가능한 관전압의 범위는 45 kVp에서 150 kVp까지 측정할 수 있었으며 이 영역에서 측정할 수 있는 에너지 범위는 0.1 mGy에서 100 mGy까지 0.01 mGy의 분해능으로 측정할 수 있었고 기기의 측정 오차는  $\pm 5\%$  미만 이었다. 그리고 OSL 선량계 시스템은 판독기(Microstar reader, LANDAUER, USA)와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C 소자가 내장된 9 × 9 × 1.5 mm 규격의 플라스틱 패킷(Nano DOT, LANDAUER Inc., USA)으로 구성되어 있었다(Fig. 2). OSL 선량계는 LED 광원으로부터 540 nm의 광자극을 가할 때 방출되는 빛의 파장은 420 nm 이었다. 이 영역에서 측정할 수 있는 에너지 범위는 5 keV에서 20 MeV까지로 비교적 넓은 선량 영역의 측정이 가능하였고  $\pm 2\%$  미만의 감도변화를 가

지고 있었으며 1.6% 이내의 에너지 특성을 가지고 있어 본 연구에서 사용하기에 적합하였다.

Table 1. Specification of the image reader and imaging plate.

| Image reader | Image plate (IP) |                     |                         |                 |
|--------------|------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|
|              | Model            | Image size (inches) | Digital matrix (pixels) | Pixel size (μm) |
| Agfa CR85-X  | Agfa             | 14 × 17             | 2320 × 2828             | 150             |
|              | MD 4.0           | 08 × 10             | 1950 × 2460             | 100             |

Table 2. Specification of the X-ray generator.

| Properties of unit    | Specification          |
|-----------------------|------------------------|
| Model                 | REX-650R               |
| Focus size            | 1.2/0.6 mm             |
| Inherent filtration   | 2.4 mmAl               |
| Additional filtration | 1.0 mmAl               |
| Target material/angle | Rhenium-Tungsten / 12° |
| Maximum tube voltage  | 150 kVp                |
| Maximum tube current  | 640 mA                 |



Figure 2. InLight™ OSL system. The MicroStar reader is a compact, lightweight, portable reader. OSLDs are plastic discs infused with crystals of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C and little build-up in device itself.

## 2. OSL 선량계의 교차 교정

Figure 3은 본 연구에 사용된 기하학적 측정 방법을 보여준다. 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)는 OSL 선량계 등의 2차 선량계는 측정의 정확성을 향상시키기 위하여 국제 교정 기구에서 교정 받은 선량계를 기준으로 교차 교정(cross-calibration)하여 사용할 것을 권고하고 있다<sup>[8]</sup>. 따

라서 OSL 선량계의 교정을 위하여 먼저 OSLD 플라스틱 패키지의 고유번호를 바코드 시스템으로 인식시킨 후 판독기에 삽입하여 각 소자에 따른 배경 선량을 다음 식(1)으로 구하였다.

$$\text{MicroStar Automatic Correction Factor} = \frac{\text{PMT Counts}}{0.84 \times \text{Sensitivity}} \quad \dots \text{식(1)}$$

여기서 0.84는 X선에 대한 OSLD 선량계의 교정상수이며 Sensitivity는 판독기의 감도이다.

선원에서 촬영대 표면까지의 거리를 100 cm, 조사면의 크기를 20 × 20 cm<sup>2</sup>로 하고 한국인 표준 체형의 흉·복부 두께를 고려하여 물 팬텀에 16 cm의 증류수를 채운 후 X선 중심선속과 물 팬텀의 중심을 일치시켜 촬영대 위에 고정하였다. ICRP는 X선을 이용한 검사에서 환자가 받는 피폭 선량에 대한 참고 준위로서 입사표면선량(entrance surface dose, 이하 ESD)을 제시하였다<sup>[7],[9]</sup>. 따라서 본 연구에서는 ESD를 측정하기 위하여 물 팬텀 표면의 X선속 중심에 기준 선량계와 OSL 선량계를 각각 삽입하면서 측정하였다. 교차 교정에 사용된 노출 조건은 복부 촬영 조건인 78 kVp, 200 mA, 0.2 sec 이었으며 OSL 선량계의 교정상수는 물 팬텀의 표면 중심에서 측정된 선량계의 지시값에 대한 OSL 선량계의 판독값의 비로 다음 식(2)와 같이 정의하였다.

$$\text{Calibration factor}_{\text{OSLDs}} = \frac{\text{Reading value of OSLDs}}{\text{Reading value of dosimeter}} \quad \text{식(2)}$$

각 OSL 선량계의 고유번호에 따른 교정상수를 입력하였으며 동일한 방법으로 총 30개의 OSLD 플라스틱 패키지를 측정하였다. 또한 통계 분석 프로그램 SPSS Win 14.0을 이용하여 반복 측정된 결과가 서로 상관관계가 있는지를 분석하기 위하여 반복 측정 분산 분석(repeated measures ANOVA) 방법을 이용하였으며 이때 p 값이 0.05 미만일 때 통계적으로 유의한 것으로 판단하였다.

## 3. CR 시스템을 이용한 근사적 피폭 선량 평가

CR 시스템에서 재구성된 영상의 각 화소의 수치는 HU 스케일로 할당된다. HU 스케일은 조직의 단위 두

계(cm-1)당 선감약계수(linear attenuation coefficient)와 연관되며 여러 조직들의 상대적인 선감약계수를 물 기준으로 하여 나타낸 수치로서 식(3)과 같이 정의하였다<sup>[1]</sup>.

$$\text{Hounsfield unit} = K \times \frac{\mu_{\text{tissue}} - \mu_{\text{water}}}{\mu_{\text{water}}} \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

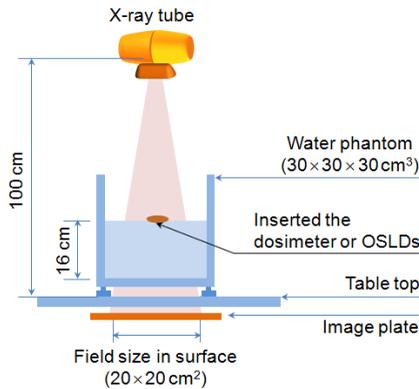


Figure 3. Illustration of experimental set-up for exposure dose evaluation of dosimeter, OSLDs, and CR images with Hounsfield unit scales.

여기서  $\mu_{\text{tissue}}$ 는 조직의 선감약계수,  $\mu_{\text{water}}$ 는 물의 선감약계수, K는 확대상수(scaling factor)로서 최근 사용 장비는 대부분을 1,000을 사용하며 HU 당 0.1%의 대조도 스케일을 나타내기 때문에 CR 영상이 정밀하게 표현되고 있다. 따라서 본 연구는 실험 조건에서 재구성된 CR 영상의 HU 스케일을 이용하여 노출 조건에 따른 ESD를 근사적으로 구하고자 하였다. 이를 위하여 노출 조건에 따른 ESD를 선량계와 OSL 선량계를 이용하여 교차 측정하고 CR 영상에서 HU 스케일과 비교·분석함으로써 노출 조건에 대한 HU 스케일과 ESD에 대한 특성관계 도표와 그래프를 작성하였다. 작성된 특성관계 도표 및 그래프를 임상에 적용하여 일반 X선 검사에서 환자가 받는 피폭 선량을 효율적이며 간편하게 평가할 수 있고 의료기관에서 환자의 DRL을 비교할 수 있는 실험적 모델을 제시하고자 하였다. 측정을 위한 기하학적 구조는 Figure 4와 같다.

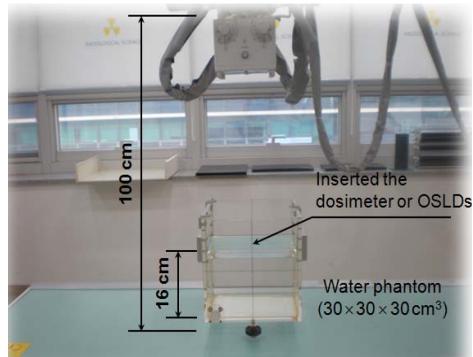


Figure 4. Measuring equipment of set-up for exposure dose. Source to surface distance was 100 cm, and the depth in water was 16 cm. Surface of the water phantom inserted the dosimeter and OSLDs, respectively.

노출 조건은 mAs를 고정한 후 X선 발생장치의 최소 노출 조건인 관전압 40 kVp에서 100 kVp까지 2 kVp씩 증가시키면서 IP 카세트를 촬영한 후 선량계와 OSL 선량계를 이용하여 ESD를 측정하였다. 동일한 방법으로 mAs를 1 mAs부터 40 mAs까지 조절 가능한 최소 단위로 증가시키면서 IP 카세트를 촬영한 후 선량계와 OSL 선량계를 이용하여 ESD를 측정하였다. 촬영한 IP 카세트는 영상 판독 시스템에서 영상을 기록한 후 영상 처리 시스템을 거쳐 PACS 시스템(INFINITT PACS, INFINITT, Korea)으로 전송하였다. Figure 5는 PACS 시스템에서 X축과 Y축 방향으로 조사면 중심에 대한 HU 스케일 프로파일 과정을 보여준다. 이 과정에서 측정에 대한 신뢰성을 향상시키기 위하여 각 노출 조건마다 X축과 Y축 방향으로 각각 5회씩 조사면 중심의 HU 스케일의 최소값, 최대값, 평균값을 기록하였고 단일 조사면에서 총 10회 측정된 HU 스케일에 대하여 평균 및 표준편차를 구하였다. 각 노출 조건에 대한 HU 스케일과 동일 조건에서 선량계의 지시치 및 OSL 선량계의 판독값을 각각 비교하여 특성관계 도표와 그래프를 작성하였다. HU 스케일과 측정된 ESD에 대한 특성관계 도표 및 그래프가 임상적으로 적용 가능한지를 확인하기 위하여 물 팬텀의 표면에 선량계와 교정상수를 부여받은 OSD 선량계를 중심점에 위치시키고 의료기관에서 일반적으로 검사 빈도가 높은 두부(skull), 경부(neck), 흉부(chest), 복부(abdomen), 골반(pelvis)에 대한 표준화된 검사 방법과 노출조건을 사용하여 환자의 피폭 선량을 모사하였다. 이 때 사용된 노출 조건은 Table 3과 같았다.

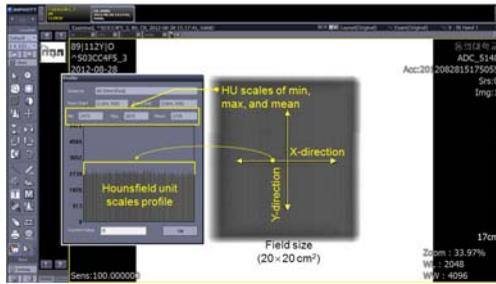


Figure 5. Illustration shows the reading of Hounsfield unit profile to the cross section of the field size center in INFINITT PACS system.

Table 3. Exposure and scan conditions base on the each examination.

|         | Tube voltage (kVp) | Tube current (mA) | Scan time (sec) | Tube current × Scan time (mAs) |
|---------|--------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|
| Skull   | 76                 | 200               | 0.2             | 40                             |
| Neck    | 74                 | 200               | 0.16            | 32                             |
| Chest   | 68                 | 200               | 0.1             | 20                             |
| Abdomen | 78                 | 200               | 0.2             | 40                             |
| Pelvis  | 74                 | 200               | 0.2             | 40                             |

### III. 결과

#### 1. OSL 선량계의 교정

Table 4는 선량계와 OSL 선량계를 교차 교정하여 식(2)에 의하여 구해진 교정 결과를 보여준다. 복부 표준 촬영을 기준으로 각 OSLD 플라스틱 패키지의 판독 선량은 최대 1.32 mGy, 최소 1.17 mGy 였으며 평균 선량은 1.23±0.05 mGy 이었다. 이 값은 선량계의 평균 선량 1.20±0.02 mGy 보다 약 2.5% 증가된 선량으로 측정되었다. 또한 OSL 선량계의 평균 교정상수는 1.02±0.04로 최대 1.11, 최소 0.95까지 균일한 분포를 이루었으며 반복 측정에 대한 각 선량계의 지시값이 서로 상관관계가 있는지를 분석하기 위하여 반복 측정 분산 분석을 시행한 결과에서 p 값이 0.05 미만이었으

며 통계적으로 유의한 값으로 신뢰할 수 있었다.

Table 4. Calibration factors of the optically stimulated luminescence dosimeters (OSLDs) used in this study.

|                     | Measurement values (mGy) |      |           | *p-value |
|---------------------|--------------------------|------|-----------|----------|
|                     | Max                      | Min  | Avg. ±SD  |          |
| Dosimeter           | 1.23                     | 1.18 | 1.20±0.02 | 0.000    |
| OSLDs               | 1.32                     | 1.17 | 1.23±0.05 | 0.016    |
| Calibration factors | 1.11                     | 0.95 | 1.02±0.04 | 0.018    |

SD: standard deviation, OSLDs: optically stimulated luminescence dosimeters, Unit: Measurement values of dosimeter and OSLDs used mGy unit.

\*: repeated measures analysis of variance (p-value < 0.05)

#### 2. CR 시스템을 이용한 근사적 피폭 선량 평가

Figure 6은 X선 발생장치의 최소 노출 조건에서 일정한 노출 조건까지 발생하는 양자 잡음(noise)을 보여준다. 일반적으로 X선 광자들은 임의의 패턴으로 표면에 충돌하는데 매우 낮은 노출 조건에서 불균등한 광자 분포 양상이 영상의 잡음으로 표현된 것으로 보인다. 그러나 양자 잡음이 심한 경우 HU 스케일의 분포가 매우 불균등하고 피폭 선량과의 비례성이 상실되었기 때문에 이러한 영상들은 본 연구에서 제외하였다.

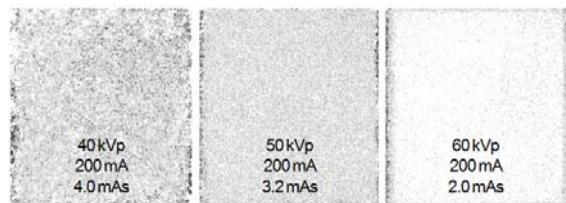


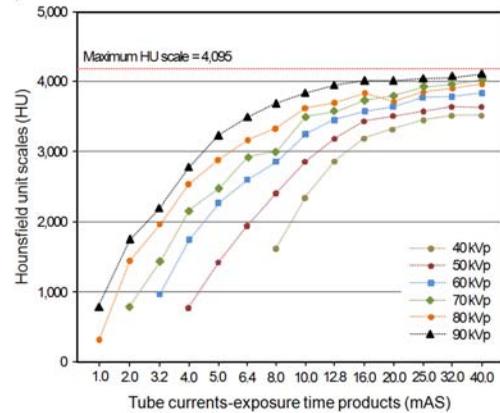
Fig. 6. Unable to read the Hounsfield unit value of images due to the noise of the CR imaging plate. These images were excluded in this study.

Figure 7은 노출 조건에서 mAs의 증가에 따른 HU 스케일과 ESD의 특성 관계를 보여준다. 이 특성 관계 그래프에서 mAs가 동일할 때 관전압의 변화에 대하여 HU 스케일의 관용 범위가 좁을수록 평가할 수 있는 선량 영역이 근사적으로 측정값에 근접함을 의미하며

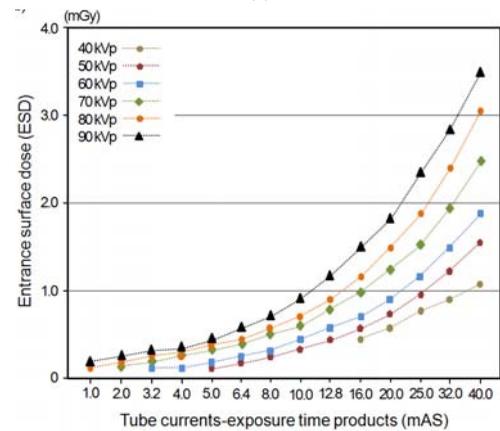
ESD의 관용 범위가 넓을수록 노출 조건의 변화에 대하여 ESD 측정값이 비교적 정확하게 반영한다는 것을 의미한다. 측정 결과에서 mAs의 증가에 따라 HU 스케일은 로그 함수적으로 ESD는 지수 함수적인 특성 관계를 보였다. 특히 12.8 mAs 이하에서 HU 스케일의 관용 범위는 최소 1,136으로 비교적 넓었으나 16.0 mAs 이상에서 최대 857로 mAs가 증가할수록 HU 스케일을 이용하여 평가할 수 있는 선량 영역이 측정값에 근접하였다. 이와 관련하여 ESD 측정값을 비교한 결과 10.0 mAs에서 측정 가능한 선량 영역은 0.37 mGy에서 0.91 mGy, 16 mAs는 0.53 mGy에서 1.48 mGy, 25.0 mAs는 0.88 mGy에서 2.35 mGy로 노출 조건이 증가할수록 다양한 선량 변화를 반영할 수 있었다.

Figure 8은 노출 조건에서 관전압의 증가에 따른 HU 스케일과 ESD의 특성 관계를 보여준다. 측정 결과에서 관전압의 증가에 따라 HU 스케일은 로그 함수적으로 ESD는 지수 함수적인 특성 관계를 보였다. 그러나 관전압의 증가에 따라 HU 스케일은 평균적으로 1,000 이내의 일정한 관용 범위를 보였으며 HU 스케일은 관전압보다는 mAs의 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 ESD 측정값을 비교한 결과 50 kVp에서 측정 가능한 선량 영역은 0.27 mGy에서 1.41 mGy, 70 kVp는 0.36 mGy에서 2.25 mGy, 90 kVp는 0.57 mGy에서 3.57 mGy로 노출 조건이 증가할수록 ESD는 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

노출 조건에 따라 측정한 ESD와 CR 시스템에서 HU 스케일을 비교·분석하여 특성 관계를 도표로 작성하였으며 측정할 수 없는 노출 조건에 대한 HU 값과 측정 선량은 보간삽입법(interpolation method)을 이용하여 구하였다. 작성된 도표는 엑셀 프로그램을 이용하여 입력하고 구하고자 하는 매개 변수에 따라 조건부 필터링을 시행하였으며 HU 스케일에 대하여 선량계와 OSL 선량계의 평균 ESD의 특성 관계 곡선을 Figure 9에 나타내었다. 보간삽입하여 작성된 도표와 특성 관계 그래프를 이용하였을 때 CR 영상에서 3,000 HU 스케일의 경우 동일한 조건으로 46 kVp일 때 12.73 mAs, 56 kVp일 때 10.67 mAs, 80 kVp일 때 8.00 mAs 등의 다양한 노출 조건을 구할 수 있었으며 이때 근사적으로 구할 수 있는 ESD는 292.8  $\mu$ Gy에서 348.2  $\mu$ Gy 이었다.

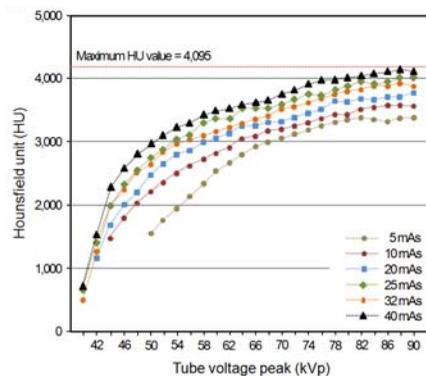


(a)

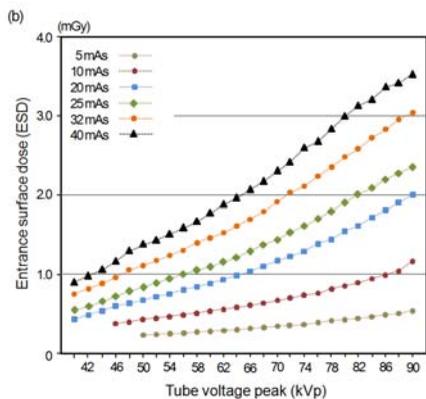


(b)

Fig. 7. Comparison results of Hounsfield unit scales (HU) and entrance surface doses (ESD) due to the tube currents-exposure time products (mAs). ESD values were average measuring values of dosimeter and OSLDs in surface of the water phantom.



(a)



(b)

Fig. 8. Comparison results of Hounsfield units (HU) and entrance surface doses (ESD) due to the tube voltage peak (kVp). ESD values were average measuring values of dosimeter and OSLDs in surface of the water phantom.

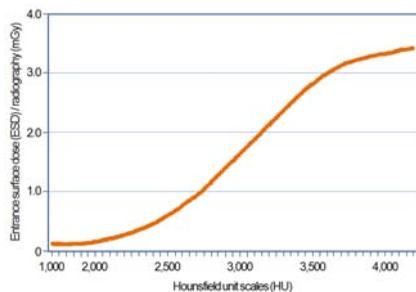


Fig. 9. Characteristic curve of entrance surface dose (ESD) on the Hounsfield units (HU).

그리고 임의의 노출 조건에서 CR 영상의 HU 스케일이 4,000 일 때 근사적으로 구할 수 있는 ESD는 980.4  $\mu$ Gy에서 1.18 mGy 관용 범위를 가지며 특성 관계 도표를 이용하여 80 kVp, 12.43 mAs의 최적화된 노출 조건을 구할 수 있었으며 다양한 방법으로 활용 가능하였다.

또한 HU 스케일과 측정된 ESD에 대한 특성관계 도표 및 그래프가 임상적으로 적용 가능한지를 확인하기 두부(skull), 경부(neck), 흉부(chest), 복부(abdomen), 골반(pelvis)을 측정된 결과를 Table 5에 나타내었다. 두부 촬영을 모사한 결과 물 팬텀의 표면에서 측정된 평균 ESD는 2.10 mGy 이었으며 CR 영상에서 3,276 $\pm$ 3.72 HU 스케일로 측정되었다. HU 스케일과 ESD에 대한

특성 관계 도표 및 그래프를 참조하여 근사적으로 구한 ESD는 2.09 mGy에서 2.23 mGy이었으며 평균 ESD는 2.16 mGy 이었다. 측정값과 근사적으로 구한 ESD를 비교한 결과 약 2.78%의 오차를 보였으나 영상의학 분야의 측정 오차 5%를 감안한다면 신뢰할 수 있는 오차 범위라 할 수 있었다. 또한 경부, 흉부, 복부, 골반을 모사한 결과 측정된 평균 ESD는 각각 2.01 mGy, 1.13 mGy, 2.97 mGy, 1.95 mGy 이었고 CR 영상은 각각 3,217 $\pm$ 2.93, 2,768 $\pm$ 3.13, 3,782 $\pm$ 5.19, 2,318 $\pm$ 4.64 HU 스케일 이었으며 HU 스케일과 ESD에 대한 특성 관계 도표 및 그래프를 참조하여 근사적으로 구한 ESD는 각각 2.06 mG, 1.19 mG, 3.05 mG, 2.07 mG로 측정 결과와 3% 미만의 오차를 범위 내에서 구할 수 있었다.

Table 5. Comparison results of measurement and approximately evaluated dose for entrance surface dose (ESD) pre radiography.

|                  | Entrance surface dose (ESD) / radiography (mGy) |            |            |            |            |
|------------------|---|------------|------------|------------|------------|
|                  | Skull   | Neck       | Chest      | Abdomen    | Pelvis     |
| Measurement      |   |            |            |            |            |
| Dosimeter        | 2.07  | 1.98       | 1.14       | 2.92       | 1.93       |
| OSLDs            | 2.13  | 2.03       | 1.17       | 2.99       | 1.97       |
| Average          | 2.10  | 2.01       | 1.16       | 2.97       | 1.95       |
| Evaluation       |   |            |            |            |            |
| Hounsfield unit  | 3,276   | 3,217      | 2,768      | 3,782      | 2,318      |
|                  | $\pm$ 3.72                                      | $\pm$ 2.93 | $\pm$ 3.13 | $\pm$ 5.19 | $\pm$ 4.64 |
| Approximate dose | 2.16  | 2.06       | 1.19       | 3.05       | 2.07       |

\*; values were average measuring values of dosimeter and OSLDs in surface of the water phantom.

Table 6. Comparison results of measurement and approximately evaluated dose for entrance surface dose (ESD) pre radiography.

|                    | Entrance surface dose (ESD) / radiography (mGy) |      |       |         |        |
|--------------------|---|------|-------|---------|--------|
|                    | Skull   | Neck | Chest | Abdomen | Pelvis |
| This study         |   |      |       |         |        |
| Measurements (ESE) | 2.10  | 2.01 | 1.16  | 2.97    | 1.95   |
| Approximate dose   | 2.16  | 2.06 | 1.19  | 3.05    | 2.07   |

International organizations

|                    |   |   |     |      |      |
|--------------------|---|---|-----|------|------|
| IAEA (BSS No. 115) | 5 | - | 0.4 | 10.0 | 10.0 |
| CROPD (ESE)        | - | - | 0.2 | 4.3  | 3.9  |
| IPSM (ESD)         | 5 | - | 0.3 | 10.0 | 10.0 |
| EC (ESD)           | 5 | - | 0.3 | 10.0 | 10.0 |
| NPPB (ESD)         | 5 | - | 0.3 | 10.0 | 10.0 |

| Countries         |      |   |      |      |      |
|-------------------|------|---|------|------|------|
| England (HPA)     | 2.04 | - | 4.08 | 4.22 | 3.73 |
| Japan (JART)      | 3.0  | - | 4.0  | 5.0  | 3.0  |
| U.S.A (FDA, CDRH) | -    | - | 0.14 | 2.73 | 4.0  |
| Australia         | -    | - | -    | 4.2  | 3.9  |

ESE: entrance surface exposure (mR, measurements in air, no phantom), ESD: entrance surface dose, IAEA: International Atomic Energy Agency, CROPD: The Conference of Radiation Control Program Directors, IPSM: Institute of Physical Sciences in Medicine, EC: European Commission, NRPB: National Radiological Protection Board.

#### IV. 고찰

CR 시스템은 영상의 질, 처리 능력 등에서 기존의 필름-증감지 시스템에 비하여 동일하거나 그 이상의 효율성을 가지고 있으며 기존의 X선 촬영 장치에 추가적 비용 없이 병행 사용할 수 있어 일반 X선 검사 및 투시 촬영 등에서 사용되고 있다. 이러한 디지털 의료 영상으로 전환은 환자의 피폭 환경을 변화시키면서 전통적인 필름-증감지 방식보다 역동 범위가 넓기 때문에 영상의 질이 저하되지 않으면서 과다 노출이 발생할 수 있고 환자의 피폭 선량을 증가시키는 원인이 되고 있다. ICRP는 신권고안을 발간하면서 행위와 개입에 대한 기존 방사선 방호체계를 계획·비상·기존 피폭 상황 중심으로 개편하였다<sup>[7]</sup>. 환자의 의료 피폭은 계획 피폭 상황을 의미하는 것으로 피폭이 사전에 충분히 예견되어 피폭에 대한 방사선 방호 준비를 시행하고 회망하는 수준의 방호를 용이하게 달성할 수 있도록 하고 있다. 이를 위하여 일반 X선 촬영에 대한 환자의 선량 권고량(DRL)을 참고 준위로 하여 의료 기관의 입사표면선량(ESD)을 측정하고 안전관리 및 피폭 선량에 대한 저감화 노력이 필요하다. 따라서 본 연구는 CR 시스템을 이용한 근사적 피폭 선량 평가 방법을 제시하고 이를 임상에 적용함으로써 의료기관에서 환자의 피폭 선량 저감화 방안을 모색하고 저선량 영역의 의료 피폭에 대한 방어적 최적화 조건으로 DRL을 비교할 수 있는 실험적 모델을 제시하고자 하였다.

환자의 피폭 선량을 측정하는 것은 무엇보다 측정 오차를 최소화하는 것이 매우 중요하며 선량계와 OSL 선량계를 교차 교정 및 교차 측정함으로써 측정 오차를 최소화 할 수 있었다. 각 30개의 OSL 선량계의 선량 변동률은 1.58%로 선량계의 선량 변동률 1.08%에

비하여 동일 조건에 대한 선량 변동률이 다소 높았으나 OSL 선량계의 평균 교정상수는  $1.02 \pm 0.04$ 로 최대 1.11, 최소 0.95까지 균일한 분포를 이루었다. 한국인 표준 체형의 흉·복부 두께를 고려하여 16 cm 두께의 증류수를 채워 넣은 물 팬텀에서 선량계와 교정된 OSL 선량계를 이용하여 ESD를 교차 측정하였으며 CR 시스템에서 HU 스케일을 구하여 특성 관계 도표 및 그래프를 작성하였다. 이 때 최소 노출 조건에서 불균등한 광자 분포 양상이 영상의 잡음으로 표현되는 양자 잡음은 본 연구에서 제외하였다(Fig. 6). 노출 조건에서 관전류·노출시간의 곱(mAs)의 증가에 따라 HU 스케일은 로그 함수적으로, ESD는 지수 함수적으로 증가하였으며 특히 16.0 mAs 이상에서 HU 스케일의 관용 범위가 좁고 ESD의 측정 가능한 선량 영역의 폭이 증가되기 때문에 HU 스케일에 대한 ESD의 특성 관계 그래프에서 평가할 수 있는 선량 영역이 근사적으로 측정값에 근접하였다(Fig. 7). 또한 노출 조건에서 관전압이 증가함에 따라 mAs와는 다르게 HU 스케일의 관용 범위가 비교적 일정하였으며 CR 영상에서 HU 스케일은 관전압에 의한 영향이 크지 않다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 ESD 측정값은 관전압이 증가할수록 ESD는 급격하게 증가하는 경향을 보였다(Fig. 8). 본 연구는 CR 시스템을 이용한 환자의 피폭 선량을 근사적으로 구하기 위한 실험적 모델로서 별도의 다른 연구가 진행되고 있지 않기 때문에 선행 연구와 비교할 수 없었다.

Table 6에서 노출 조건에 따라 측정된 ESD와 CR 영상에서 HU 스케일을 비교·분석하여 작성한 특성 관계 도표 및 그래프를 임상적으로 적용하기 위하여 임상 촬영 조건으로 물 팬텀에 모사한 결과와 다양한 국제기구 및 국가에서 권고한 환자의 선량 권고량을 비교하였다. 의료기관에서 보편적으로 시행되고 있는 촬영 조건으로 두부, 경부, 흉부, 복부, 골반을 각각 모사한 결과 HU 스케일과 ESD에 대한 특성 관계 도표 및 그래프를 참조하여 근사적으로 구한 ESD는 각각 2.16 mGy, 2.06 mGy, 1.19 mGy, 3.05 mGy, 2.07 mG 이었으며 두 선량계의 평균 측정값과 비교하여 3% 미만의 오차를 보였으며 영상의학 분야의 측정 오차 5%를 감안한다면 신뢰할 수 있는 오차 범위라 할 수 있었다. 이 값들은 국제원자력기구(IAEA) 등 6개 국제기구가

공동으로 전리방사선의 방어를 위한 국제기본 안전기준(Basic Safety Standards, BBS No. 115)을 마련하여 진단방사선 분야에서 각 촬영 부위별 환자의 선량 권고량 기준을 만족하였다. 또한 2003년 이후 의료 영상에서의 환자 선량 권고량을 각 국가에서 마련한 값을 최근 몇 년 동안 각 국가별 다수의 공인기관이 환자의 선량을 평가한 결과를 토대로 한 진단 참고 준위 값을 만족하였다. 다만 흉부 촬영의 경우 물 팬텀에 모사한 본 연구와는 달리 인체 표준 모형 팬텀으로 다른 촬영 조건을 기준하였기에 그 값의 차이는 비교할 수 없었다. 국내의 경우 식품의약품안전청 방사선 안전과에서 2006년부터 환자의 선량 평가를 통한 환자의 선량 권고량을 만족하였다. 또한 영국, 일본, 미국 등 각 국가별 환자의 선량 권고량을 평가한 결과 2000년 이전의 환자 선량 권고량보다 약 16% 저감하여 발표하였으나 본 연구의 결과도 이 기준에 만족하였다.

## V. 결론

최근 PACS의 도입과 더불어 디지털 의료 영상이 보급되면서 피폭 환경의 변화와 환자의 피폭선량이 증가하고 있으며 저 선량 영역에서 발생할 수 있는 확률적 영향을 고려하기 위한 환자의 피폭 선량을 저감하는 것이 매우 중요하다 할 수 있다. 또한 각 국제기구 및 국가별 방사선 방어의 최적화 조건으로 진단 참고 준위인 환자의 선량 권고량을 적용하도록 권고하고 있다. 따라서 본 연구는 영상의학 분야에서 시행하고 있는 일반 X선 검사에서 환자의 입사표면선량을 근사적으로 평가할 수 있으며 의료기관별 선량 권고량을 비교 및 분석할 수 있는 기틀을 마련할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 제시한 근사적 피폭 선량의 평가 방안은 일반 X선 촬영 조건에 대하여 팬텀에 모사함으로써 선량을 예측하고 CR 시스템에서 HU 스케일의 특성 관계를 이용하였다. 실험 결과에서 의료기관에서 일반적으로 시행되고 있는 표준 촬영을 모사하였을 때 근사적으로 구할 수 있는 입사표면선량은 3% 미만이었으며 이 값은 충분히 임상적으로 적용 가능할 것으로 판단되었다. 향후 임상적으로 보편화되고 있는 디지털 방사선촬영(digital radiography, DR)에서 HU 스케일을 이용한 환자의 피폭 선량에 적용할 수 있을 것으로 판단되

었으며 동일한 개념으로 필름의 광학농도(optical density, OD)를 이용한다면 기존 필름-카세트 시스템에서도 본 연구의 연구 방법을 활용할 수 있을 것으로 판단하여 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] W. De Vos, J. Casselman, G. R. Swennen, "Cone-beam computerized tomography (CBCT) imaging of the oral and maxillofacial region: a systematic review of the literature.", *Int. J. Oral. Maxillofac. Surg.*, Vol. 38, pp.609-625, 2009.
- [2] H. Precht, O. Gerke, K. Rosendahl, A. Tingberg, D. Waaler, "Digital radiography: optimization of image quality and dose using multi-frequency software.", *Pediatr. Radiol.*, Vol. 42, pp.1112-1118, 2012.
- [3] T. Sasagawa, J. Kunogi, S. Masuyama, S. Ogihara, Y. Takeuchi, Y. Takeshita, N. Kamiya, H. Murakami, H. Tsuchiya, "New computed radiography processing condition for whole-spine radiography.", *Orthopedics.*, Vol. 34, pp.906-910, 2011.
- [4] UNSCEAR, "Sources and Effects of Ionizing Radiation, Annex D: Medical Radiation Exposure", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2000 Report Vol. I, New York, United Nations, 2000.
- [5] KFDA, "Radiation Health Newsletter", Korea Food and Drug Administration (KFDA), Vol.17, PP.1-12, 2010.
- [6] ICRP, "Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk", International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 99, 2005.
- [7] ICRP, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.", ICRP Publication 103, 2007.
- [8] IAEA, "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. An International Code of Practice for dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water.", International Atomic Energy Agency (IAEA) report series No. 398, Vienna, MD, 2001.
- [9] ICRP, "Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values.", International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 89, 2002.