

The Evaluation of Eye Dose and Image Quality According to The New Tube Current Modulation and Shielding Techniques in Brain CT

Soonmu Kwon, Jungsu Kim*

*Department of Radiologic Technology, Daegu Health College,
Department of Radio-technology, Wonkwang Health Science University**

두부 CT에서 차폐기법과 새로운 관전류변조기법에 따른 눈의 선량과 화질평가

Abstract

The eye of human is a radiation sensitive organ and this organ should be shielded from radiation exposure during brain CT procedures. In the brain CT procedures, bismuth protector using to reduce the radiation exposure dose for eye. But protecting the bismuth always accompanies problem of the image quality reduction including artifact. This study aim is the eye radiation exposure dose and image quality evaluation of the new tube current modulation such as new organ based-tube current modulation, longitudinal-TCM, angular-TCM between shielding scan technique using bismuth and lead glasses. As a result, radiation dose of eye is reduced 25.88% in new OB TCM technique then reference scan technique and SNR new OB TCM is 6.05 higher than bismuth shielding scan technique and lower than reference scan technique. In clinical brain CT, new OB TCM technique will contribute to reduction of radiation dose for eye without decrease of image quality.

Key words : tube current modulation, radiation dose, shield material, eye lens, computed tomography

요 약

두부 CT 검사에서 눈의 수정체는 높은 방사선 감수성으로 보호되어야 할 장기 중에 하나이다. 두부 CT 검사에서 눈의 피폭선량감소 목적으로 사용되는 비스무스 차폐체는 현저한 선량 감소 효과가 있지만 화질저하의 문제점이 있다. 본 연구는 인체팬텀을 이용한 두부 CT 검사에서 피폭 선량을 줄이기 위해 사용되는 관전류변조기법인 new organ based-tube current modulation, longitudinal-TCM, angular-TCM과 차폐기법인 비스무스, 납 안경을 사용하여 눈의 선량과 화질의 변화 정도를 평가하였다. 연구결과, new OB-TCM에서 눈의 선량은 25.88% 감소되었으며 비스무스를 사용한 검사와 비교하여 CT number, 노이즈, SNR의 변화가 작은 것을 확인하였다. 따라서 new OB-TCM을 임상적 두부 CT 검사에 적용할 경우, 눈의 피폭선량을 감소시키면서 영상의 화질 저하를 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

중심단어: 관전류변조기법, 방사선량, 차폐물질, 수정체, 전산화단층촬영

I. INTRODUCTION

CT 검사에서 방사선량은 영상의 품질을 결정하는 가장 중요한 인자이며 적절한 방사선량 사용의 결과물로 진단능이 높은 우수한 영상을 제공한다^[1]. 일반적으로, 영상의 물리적 품질은 방사선량에 비례하므로 CT 검사에서 고품질 영상은 방사선량의 증가를 수반하게 된다^{[2],[3]}. 최근, CT 방사선이 환자에게 미치는 잠재적인 암 발생 위험에 대한 관심이 증가하고 있다^{[4],[5]}. 두부 CT 검사를 하는 동안 눈은 대략 50 mGy의 방사선량을 받게 되는 것으로 보고되고 있다^[6]. 눈에서 수정체혼탁, 백내장에 대한 한계선량은 한 번의 노출에 대해 0.5~2.0 Sv이며 반복된 노출에 대해서는 0.15 Sv/년으로 보고되고 있다^{[7],[8]}. 방사선 민감 장기인 눈에 대한 방사선 노출을 제어하는 것은 시각장애나 백내장, 소아 환자, 민감한 눈을 가진 환자, 반복적인 검사가 필요한 환자에서 특히 중요하다^[9].

CT 검사의 방사선에 대한 잠재적 위험의 증가와 함께 CT의 방사선량을 줄이기 위한 다양한 기술들이 개발되어 왔고 이러한 기술들을 사용한 최적화된 CT 영상기술은 위험 대비 이익의 비율을 극대화할 수 있다^{[10],[11]}. CT 검사의 피폭선량 감소를 위한 기술은 X선 빔의 여과와 선속의 제한, 관전류변조 (tube current modulation : TCM), 자동노출제어장치, 최대관전압의 최적화, 검출기의 효율개선, 노이즈 감소 알고리즘 등이 있다. TCM 기법에는 angular-TCM, longitudinal-TCM, organ-based TCM이 있다^[12]. Organ based tube current modulation (OB-TCM)은 유방, 갑상샘, 눈의 수정체와 같이 방사선에 민감한 표재성 장기 바로 앞에서 실시간으로 X선관 출력을 감소시키는 기술로 영상의 화질 저하 없이 선량감소 목적을 달성하기 위해 개발되었다^{[13],[14]}. 기존의 OB-TCM에서는 X선 tube의 회전반경 360°에 대해 전체 선량을 유지하기 위해 민감 장기가 위치한 전면에서 선량을 감소시키고 후면에서는 선량을 증가시켰다^[15]. 그러나 최근 개발된 new OB-TCM은 미리 정해진 전면위치에서 90° 회전반경에 걸쳐 30%의 관전류를 감소시키고 나머지 회전반경에서는 관전류의 증

가가 없도록 설계 되었다^[16]. CT 검사에서 비스무스 차폐체는 유방이나 눈의 수정체와 같이 환자의 표면에 위치한 장기의 선량을 감소시킬 목적으로 사용되었다^[17]. 비스무스 차폐체는 간편하게 선량을 감소시키는 반면 영상의 질을 저하시킬 수 있고 자동노출제어장치와 같이 사용될 경우 환자선량을 증가시킬 수도 있다^[18-23]. 따라서 본 연구에서는 다양한 TCM기법과 차폐기법을 사용한 두부 CT 검사에서 피폭선량과 영상평가를 통해 그 유용성을 확인하고자 한다.

II. MATERIALS AND METHOD

본 연구에서는 64-slice MDCT (Optima660; GE Healthcare)를 이용하여 인체 두부 팬텀 (PBU-60; Kyoto Kagaku)의 경추 고리뼈의 척추 고리판에서 머리뼈 끝까지 스캔하였다. 기준 스캔에서는 자동노출제어장치를 적용하지 않았으며 미국의학물리학회 (american association of physicists in medicine; AAPM)에서 권고하는 성인 두부 CT 검사법을 사용하였다. 스캔 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Reference scanning protocol parameters

Acquisition mode	Axial
Tube voltage	120 kVp
Tube current-exposure time product	300 mAs
Rotation time	0.5 sec
Pitch	0.531:1
Table feed	10.62 (mm/rot)
Detector configuration	32 × 0.625 mm
Slice thickness	5 mm
Interval	5 mm
Scan length	140 mm
Reconstruction algorithm	Standard
Noise index	8.4

비교군의 스캔에서 CT 장치의 갠트리에 각도를 주어 눈을 스캔 범위에 포함되지 않도록 한 스캔에서는 갠트리 각도를 제외한 모든 조건을 기준스캔 (reference scan)과 동일하게 적용하였다. 차폐기법을 사용한 스캔은 갠트리 각도가 지면과 수직인 상태에서 비스무스 차폐체 (14×3.5 cm², 0.06 mmPb

equivalence, 3.4 g/cm² of bismuth per layer; AttenuRad, F&L Medical Products, US)와 납 안경 (0.07 mmPb equivalence, XR-700, Toray Medical Co., Ltd.)을 팬텀의 눈 위에 위치시키고 스캔하였다. Longitudinal-TCM, angular-TCM, new OB-TCM 을 적용한 TCM기법은 기준스캔과 동일한 방법으로 스캔하였다. New OB-TCM에서는 눈의 수정체를 포함한 전면 72.3±7.1° 범위에서 관전류변조기법을 적용하였고 그때 선량분포는 Fig. 1에서 확인할 수 있다 [16].

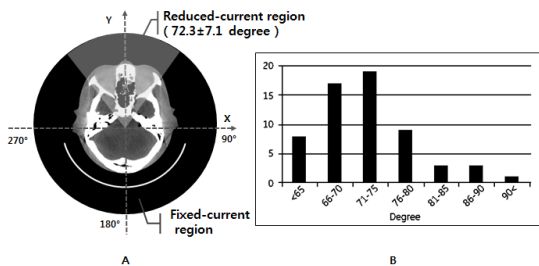


Fig. 1. A: Illustration of a new organ-based tube current modulation. B: Histogram of eye lens range.

눈의 선량 측정에는 ±5% 재현성을 가지는 10×10 mm 광자극형광선량계 (nanoDotTM, Landauer Inc. US)를 사용하였으며 선량의 관독은 동일사의 관독기 (microstar inlight system, Landauer Inc)를 사용하였다. 각 소자에 대한 감도와 에너지 보정은 120 kVp에서 보정계수, k 값은 1.12 이다. 각 스캔에서 광자극형광선량계는 각각의 눈 중앙에 위치시켜 스캔하였으며 특히, 차폐기법을 사용하는 경우 차폐체에 의해 눈과 선량계가 완전히 가려지도록 하였다[Fig. 2]. 눈의 선량 측정을 위한 스캔은 각 스캔에 대해 2회씩 실시하여 측정치의 평균값을 적용하였다.

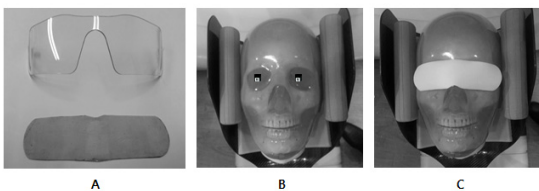


Fig. 2. A: Lead glasses and bismuth shield are used in this study. B: nanoDotTM dosimeter is placed the eye-lens surface of an anthropomorphic head phantom. C: Bismuth shield is placed over the eyes of an anthropomorphic head phantom.

영상 평가는 스캔 후 재구성된 영상에서 CT number, 노이즈, 신호 대 잡음비 (SNR)로 정량적인 영상평가를 실시하였다. 눈의 중심부와 z축을 따라 인접한 아래, 위 영상을 선택하여 영상 평가를 시행하였다. 선택된 영상에 400 pixels (20×20 pixels)의 사각형 관심영역 (ROI)을 설정하고 Image J (1.46r, national institutes of health, US)를 사용하여 pixel 값을 획득하였다. ROI는 ① anterior region (temporal lobe), ② mid-central region (pons), ③ posterior region (occipital lobe)에 설정하였다[Fig. 3]. 영상에서 설정된 각 ROI의 CT number는 signal이고 standard deviations (SD)은 노이즈이며, 그 비로 SNR을 계산하였다. 스캔 범위에서 눈을 제한 angle scan의 경우, 동일 위치에 ROI를 설정할 수 없으므로 영상평가에서 제외하였다.

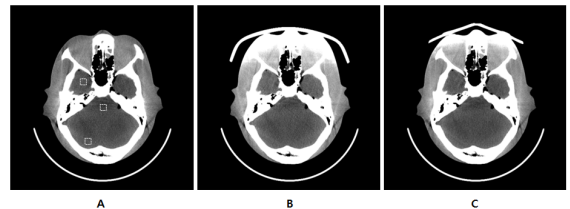


Fig. 3. A: Image illustrates the three ROIs used to measure CT numbers and image noise. B: Image from brain CT scan acquired using lead glasses. C: Image from brain CT scan acquired using bismuth shield.

III. RESULT

1. 선량평가

CTDI_{VOL}의 경우, 기준스캔과 차폐기법을 사용한 스캔에서 57.59 mGy, 스캔 범위에서 눈을 제외한 스캔에서 52.20 mGy를 나타내었다. Longitudinal-TCM, angular-TCM, OB-TCM은 각각 50.40 mGy, 50.26 mGy, 48.20 mGy로 기준스캔과 비교하여 CTDI_{VOL}이 12.48%, 12.73%, 16.31% 감소되었다.

광자극형광선량계를 이용한 눈의 선량 측정결과, 기준스캔 45.41 mGy를 기준으로 longitudinal-TCM, angular-TCM, new OB-TCM에서 43.11 mGy, 43.51 mGy, 33.66 mGy로 각각 5.06%, 4.18%, 25.88%의 선

량이 감소되었다. 비스무스 차폐체와 납 안경을 사용한 스캔에서는 28.65 mGy, 25.19 mGy로 각각 36.91%, 44.53% 감소하여 TCM보다 큰 선량 감소가 관찰되었다. 스캔 범위에서 눈을 제외한 스캔의 경우 눈의 선량이 4.61 mGy로 기준스캔과 비교하여 89.85%의 매우 큰 선량감소가 확인되었으며 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Dose to the eye with difference scan techniques

Scan techniques	CTDI _{vol} [mGy]	Eye dose [mGy]	Eye dose reduction(%)
Reference scan	57.59	45.41 ± 1.93	-
Longitudinal-TCM	50.40	43.11 ± 1.34	5.06
Angular-TCM	50.26	43.51 ± 0.11	4.18
New OB-TCM	48.20	33.66 ± 1.21	25.88
Lead glasses	57.59	25.19 ± 1.12	44.53
Bismuth	57.59	28.65 ± 1.08	36.91
Angle scan	52.20	4.61 ± 0.23	89.85

2. 영상평가

기준스캔 영상을 기준으로 new OB-TCM을 적용한 경우, anterior region, mid-central region, posterior region에서 CT number가 -29.69, -34.71, -26.33으로 3.66%, 3.95%, 1.23%의 증가가 관찰되었다. Longitudinal-TCM, angular-TCM에서는 이보다 작은 증가를 보였다. 비스무스 차폐를 사용한 영상에서는 기준스캔과 비교하여 3지점에서 18.81%, 11.31%, 7.65%의 증가를 보였고 납 안경을 사용한 영상에서는 37.31%, 19.51%, 15.07%의 증가를 보였다. TCM기법에 비해 차폐기법을 이용한 영상에서 CT number의 증가가 크고 anterior region에서 가장 큰 증가, posterior region에서 가장 작은 증가를 보였다.

영상의 노이즈를 나타내는 표준편차의 변화에서는 기준스캔 영상을 기준으로 new OB-TCM의 anterior region, mid-central region, posterior region에서 각각 4.50, 5.86, 4.64로 9.22%, 3.71%, 12.07%의 증가를 보였고 longitudinal-TCM, angular-TCM에서는 이

보다 작은 증가를 보였다. 비스무스 차폐 영상에서는 기준스캔과 비교하여 3지점의 ROI에서 12.62%, 1.41%, 8.45%의 노이즈 증가를 보였고 납 안경 영상에서는 16.26%, 4.24%, 15.45%의 증가를 보였다. 모든 영상에서 mid-central region이 가장 작은 증가를 보였으며 anterior region과 posterior region은 이보다 큰 증가를 보였다. CT number와 노이즈를 측정된 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. CT number and noise in brain regions with difference scan techniques Data are averages of CT number ± SD

Scan techniques	Anterior region	Mid-central region	Posterior region
Reference scan	30.82 ± 4.12	36.14 ± 5.65	26.66 ± 4.14
Longitudinal-TCM	30.11 ± 4.16	35.95 ± 5.77	26.33 ± 4.32
Angular-TCM	30.25 ± 4.28	35.46 ± 5.82	25.73 ± 4.25
New OB-TCM	29.69 ± 4.50	34.71 ± 5.86	26.33 ± 4.64
Lead glasses	19.32 ± 4.79	29.09 ± 5.89	22.64 ± 4.78
Bismuth	25.02 ± 4.64	32.05 ± 5.57	24.62 ± 4.49

영상의 SNR을 측정된 결과, 기준스캔 3지점의 ROI에서 평균 SNR인 6.77을 기준으로 longitudinal-TCM, angular-TCM, new OB-TCM에서 3.69%, 5.47%, 10.64%의 감소가 관찰되었다[Table 4]. TCM 기법을 적용한 경우에는 mid-central region이 가장 작은 감소를 보였으며 anterior region과 posterior region은 비슷한 정도의 감소를 보였다. 비스무스 차폐 영상과 납 안경 영상에서는 평균 SNR이 5.54, 4.56으로 TCM보다 큰 18.16%, 32.64%의 감소를 보였다. 특히, anterior region에 큰 감소를 보였으며 mid-central region과 posterior region은 비슷한 정도의 작은 감소를 보였다.

Table. 4. SNR in brain regions with difference scan techniques

Scan techniques	Anterior region	Mid-central region	Posterior region	Mean SNR
Reference scan	7.48	6.39	6.44	6.77
Longitudinal-TCM	7.23	6.23	6.09	6.52
Angular-TCM	7.06	6.09	6.05	6.40
New OB-TCM	6.59	5.92	5.63	6.05
Lead glasses	4.03	4.93	4.73	4.56
Bismuth	5.39	5.75	5.48	5.54

IV. DISCUSSION

눈의 수정체는 0.5~2 Gy 보다 작은 선량에서도 수정체 혼탁이 발생하며 4 Gy 이상의 선량에서는 백내장과 이차적인 시각장애를 유발한다^{[7],[8]}. 그러나 최근 연구에서 수정체의 방사선 감수성은 이전의 추정치보다 실질적으로 더 높다고 보고하고 있다^[22]. Wang 등의 연구 따르면 기존의 OB-TCM은 두부 CT에서 인공음영의 발생 없이 눈에서의 선량이 30.4% 감소되었다고 보고하였다^[24]. Reimann 등의 연구에서도 OB-TCM은 두부 CT에서 전체적인 선량감소 뿐 아니라 전면에서 46%~59%의 선량감소 효과를 가지는 영상을 제공한다고 하였다^[25]. 본 연구에서는 동일한 CT scanner에서 제공하는 다양한 TCM기법과 차폐기법을 적용하여 선량의 감소정도, 화질의 변화정도를 비교하여 방사선사들의 기법 적용 시 도움이 되고자 한다. 연구결과, CTDIvol의 경우, 기준스캔 (57.59 mGy)보다 모든 선량감소 방법에서 CTDIvol이 감소하였으며 특히, new OB-TCM에서는 48.20 mGy로 16.31%의 가장 큰 감소가 관찰되었다. 광자극형광선량계를 사용한 눈의 선량 측정결과, new OB-TCM에서 25.88%의 선량 감소가 관찰되었다. 차폐기법은 CT scan을 하는 동안, 장기 표면에 차폐체를 위치시켜 primary X-ray beam이 환자에 도달하기 전에 30~50% 정도를 감약시킨다^{[24],[26]}. 본 연구의 비스무스 차폐체를 사용한 스캔에서도 다른 연구와 유사한 36.91% 감소를 보여 new OB-TCM보다 큰 선량감소

효과가 있었으며 개인방어용구로 사용되고 있는 납 안경을 사용한 스캔에서는 비스무스 차폐체 보다 높은 44.53%의 선량 감소 결과를 얻었다. 그러나 캔트리에 각도를 부여하여 눈을 스캔 범위에서 제외시킨 경우 눈의 선량이 4.61 mGy로 기준스캔과 비교하여 89.85%의 매우 큰 선량 차이를 확인하였다. Hwang 등의 연구에서도 동일한 결과를 보고하였으며^[27] 눈의 선량 감소기법으로 스캔 범위에서 눈을 제외하는 것이 가장 효과적인 방법으로 판단된다. 또한 TCM기법 보다는 비스무스 차폐체나 납 안경을 사용하는 방법이 눈의 선량감소 효과가 큰 것을 확인하였다.

그러나 영상의 물리적 화질은 일반적으로 방사선량에 비례한다. 따라서 선량의 감소는 영상의 화질 저하를 최소화하고 진단적 가치를 유지하는 범위 내에서 행해져야 한다. 본 연구에서 new OB-TCM을 적용한 결과, CT number의 변화는 기준스캔 영상과 비교하여 anterior region, mid-central region, posterior region에서 각각 3.66%, 3.95%, 1.23%의 증가로 ROI 위치에 따른 차이가 작은 것을 알 수 있다. 그러나 비스무스 차폐체와 납 안경을 사용한 영상에서는 모든 TCM기법 보다 CT number 차이가 크고 특히, 선량감소가 큰 전면에서 그 차이가 더 큰 것을 알 수 있다. 노이즈의 경우, 기준스캔 영상과 비교하여 각 ROI에서 new OB-TCM은 9.22%, 3.71%, 12.07%의 증가를 보였다. OB-TCM에서 선량과 영상을 평가한 다른 연구에서 노이즈는 OB-TCM 적용 여부와 상관없이 통계적으로 유의한 차이가 없다($p=0.85$)고 하여^[28] 본 연구와는 차이를 보였다. 이는 기존의 OB-TCM과 달리 new OB-TCM은 후면에서 선량을 증가시키지 않으므로 전체 선량의 감소에 따른 노이즈 증가로 판단된다. 노이즈는 비스무스 차폐 영상에서 12.62%, 1.41%, 8.45%의 증가, 납 안경 영상에서는 16.26%, 4.24%, 15.45%의 증가를 보였다. CT number에 대한 노이즈의 비를 나타낸 SNR을 비교한 경우, 기준스캔 영상에서 각 ROI의 평균 SNR 6.77을 기준으로 했을 때, new OB-TCM에서 10.59%의 감소를 보였고 다른 TCM에서는 이보다 작은 감소를 보였다. 비스무스 차폐체와 납 안경을 사용한 경우, TCM보다 큰 18.17%, 32.59%의 SNR 감소를 보였다. 기존의 OB-TCM 연구에서도 눈의 선량 감소가 30% 정도로 비스무스 차

폐와 유사하지만 뇌의 전 영역에서 선량이 감소되었고 CT number의 정확도가 유지되어 더 우수한 화질을 제공한다고 하였다^[26]. 다른 두부 CT 연구결과, 뇌영역에서 영상의 노이즈는 모든 선량감소 방법에서 증가하였으나 CT number는 비스무스 차폐체를 사용하였을 때 더 많이 증가하였다고 보고하였으며^[24] 본 연구에서도 같은 결과를 나타냈다. 연구결과를 통해 두부 CT에서 기준스캔을 기준으로 눈의 선량은 비스무스 차폐체와 납 안경을 사용한 영상이 모든 TCM보다 우수한 선량감소 효과를 보이고 있다. 그러나 납 안경의 경우 화질저하가 커 임상에 적용할 경우 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

본 연구의 제한점은 특정 CT scanner에 한정되었고 CT number, 노이즈, SNR 측정의 경우 ROI의 설정 위치에 따라 차이를 보일 수 있다. 또한 인체가 아닌 인체팬텀을 대상으로 하였으므로 실제 눈의 수정체가 받는 선량과 차이가 있을 수 있어 인체에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

V. CONCLUSION

인체팬텀을 이용한 두부 CT에서 기준스캔과 비교하여 다양한 관전류변조기법과 차폐기법을 사용한 눈의 피폭선량과 영상평가를 실시하였다. 연구결과, new OB-TCM은 다른 TCM에 비해 눈의 선량 감소가 크고 차폐기법에 비해 CT number, 노이즈, SNR의 영상평가에서 화질저하가 적은 것을 확인하였다. 따라서 new OB-TCM을 임상에서 두부 CT에 적용할 경우, 화질저하를 최소화하고 표재성의 방사선 민감 장기인 수정체에 대한 선량을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

This work was supported by Wonkwang Health Science University's research fund in 2015.

Reference

[1] Yu, Lifeng, et al. "Radiation dose reduction in computed tomography: techniques and future perspective." *Imaging in medicine*, 1.1, pp. 65-84, 2009.

[2] Xia, W., et al. "CT angiography of the neck: Value of contrast medium dose reduction with low tube voltage and high tube current in a 64-detector row CT." *Clinical radiology*, 69.4, pp. e183-e189, 2014.

[3] Payne, J. T. CT radiation dose and image quality. *Radiologic clinics of North America*, 43(6), 953-962, 2005.

[4] Brenner, David J., and Carl D. Elliston. "Estimated Radiation Risks Potentially Associated with Full-Body CT Screening 1." *Radiology*, 232. 3 pp. 735-738, 2004.

[5] Smith-Bindman, Rebecca, et al. "Radiation dose associated with common computed tomography examinations and the associated lifetime attributable risk of cancer." *Archives of internal medicine*, 169. 22, pp. 2078-2086, 2009.

[6] Nishizawa K, Maruyama T, Takayama M, Okada M, Hachiya J, Furuya Y. "Determinations of organ doses and effective dose equivalents from computed tomographic examination." *Br J Radiol.*, 64, pp. 20-28, 1991.

[7] MacLennan AC, Hadley DM. "Radiation dose to the lens from computed tomography scanning in a neuroradiology department." *Br J Radiol.*, pp. 68:19-22, 1995.

[8] Henk, J. M., et al. "Radiation dose to the lens and cataract formation." *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 25.5, pp. 815-82, 1993.

[9] Hopper, Kenneth D., et al. "Radioprotection to the eye during CT scanning." *American journal of neuroradiology*, 22.6, pp. 1194-1198, 2001.

[10] Kalra MK, Maher MM, Toth TL, Hamberg LM, Blake MA, Shepard JA, et al. "Strategies for CT radiation dose optimization." *Radiology*, 230, pp. 619-62, 2004.

[11] Goo, Hyun Woo. "CT radiation dose optimization and estimation: an update for radiologists." *Korean Journal of Radiology.*, 13.1, 1-11, 2012.

[12] McCollough, Cynthia H., Michael R. Bruesewitz, and James M. Kofler Jr. "CT Dose Reduction and Dose Management Tools: Overview of Available Options 1." *Radiographics*, 26.2, pp. 503-512, 2006.

[13] Matsubara, Kosuke, et al. "Assessment of an organ-based tube current modulation in thoracic computed tomography." *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 13.2, 2012.

[14] Organ dose modulation whitepaper, GE Healthcare 3000 N. Grandview Blvd. Waukesha, WI 53188 U.S.A. www.gehealthcare.com

[15] Lai, N. K., et al. "Off-centre effect on dose reduction to

- anterior surfaces with organ-based tube-current modulation." *Radiation Measurements*, 59, pp. 155-159, 2013.
- [16] S. Kudomi, F. Yurino, A. Hashimoto, T. Yonezawa, C. Tanaka, Y. Ueda, K. Ueda; Ube/JP, "Usefulness of organ-based tube-current modulation with the orbital synchronized helical scan technique for subtraction 3D CT angiography." *European society radiology*. 10.1594/ecr2014/C-1356, 2014.
- [17] Hopper, Kenneth D., et al. "The breast: in-plane x-ray protection during diagnostic thoracic CT—shielding with bismuth radioprotective garments." *Radiology*, 205.3, pp. 853-858, 1997.
- [18] Mukundan Jr, Srinivasan, et al. "MOSFET dosimetry for radiation dose assessment of bismuth shielding of the eye in children." *American Journal of Roentgenology*, 188.6, pp. 1648-1650, 2007.
- [19] Hohl, C., et al. "Radiation dose reduction to breast and thyroid during MDCT: effectiveness of an in-plane bismuth shield." *Acta Radiologica*, 47.6, pp. 562-567, 2006.
- [20] Fricke, Bradley L., et al. "In-plane bismuth breast shields for pediatric CT: effects on radiation dose and image quality using experimental and clinical data." *American Journal of Roentgenology*, 180.2, pp. 407-411, 2003.
- [21] Leswick, David A., et al. "Thyroid Shields versus z-Axis Automatic Tube Current Modulation for Dose Reduction at Neck CT 1." *Radiology*, 249.2, pp. 572-580, 2008.
- [22] Chodick, Gabriel, et al. "Risk of cataract after exposure to low doses of ionizing radiation: a 20-year prospective cohort study among US radiologic technologists." *American journal of epidemiology*, 168.6, pp. 620-631, 2008.
- [23] Statement approved by AAPM Board of Directors, Feb 2012 – Policy Date: 02/07/2012 Full list of AAPM Policies: <http://www.aapm.org/org/policies/>
- [24] Wang, Jia, et al. "Bismuth shielding, organ-based tube current modulation, and global reduction of tube current for dose reduction to the eye at head CT." *Radiology*, 262.1, pp. 191-198, 2012.
- [25] Reimann, Anja Judith, et al. "Organ-based computed tomographic (CT) radiation dose reduction to the lenses: impact on image quality for CT of the head." *Journal of computer assisted tomography*, 36.3, pp. 334-338, 2012.
- [26] Raissaki, Maria, et al. "Eye-lens bismuth shielding in paediatric head CT: artefact evaluation and reduction." *Pediatric radiology* 40.11, pp. 1748-1754, 2010.
- [27] Hwang IC, Shin WJ, Kang EB, "A Comparative Study on the Lens Dose According to the Change of Shielding Material Used in Brain Computed Tomography", *Journal of the Korea radiological society*, Vol.9 no.1, pp. 31-37, 2015.
- [28] Duan, Xinhui, et al. "Dose reduction to anterior surfaces with organ-based tube-current modulation: evaluation of performance in a phantom study." *American Journal of Roentgenology*, 197.3, pp. 689-695, 2011.