통증 치료에서의 방사선 노출에 의한 눈의 영향과 보호

김민정 · 김재현

건국대학교 의과대학 마취통증의학교실

Radiation exposure and protection for eyes in pain management

Min Jung Kim and Jae Hun Kim

Received September 4, 2017
Accepted October 11, 2017

Department Anesthesiology and Pain Medicine, Konkuk University School of Medicine, Seoul, Korea

Corresponding author

Jae Hun Kim, M.D., Ph.D.
Department Anesthesiology and Pain Medicine, Konkuk University School of Medicine, 120-1, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05030, Korea
Tel: 82-2-2030-5470
Fax: 82-2-2030-5449
E-mail: painfree@kuh.ac.kr

C-arm fluoroscopy is important device for pain management. However, pain physicians can be exposed to radiation during C-arm fluoroscopy-guided interventions. In the annual maximal permissible radiation doses, the dose of lens is lower than the doses of the thyroid and gonads. In the human body, the lens of eye is one of the most sensitive parts for radiation exposure. Cataract or opacity of lens is the most common complication of eye related to radiation. Several years ago, the threshold dose of a radiation induced cataract was changed to 0.5 Gy. In 2011, International Commission on Radiological Protection reduced the annual permissible radiation dose for the lens from 150 mSv to 20 mSv. According to the lower level of permissible radiation dose for lens, physicians should reduce their radiation exposure. This review presents the complications of the lens related to radiation exposure, permissible doses for the lens, radiation exposure of physicians, protective devices for the lens, and methods for radiation safety.

Key Words: Cataract, Eye, Lead glasses, Radiation, Radiation exposure, Radiation safety.

서 론

마취통증의학과에서 환자에게 통증을 유발하는 원인을 찾아내고 진단하기 위하여 X선 검사, CT, MRI, 초음파 등의 검사가 흔히 사용되고 있고, 환자의 통증 질환을 치료하기 위한 목적으로 투시영상을 이용하는 경우도 점점 늘고 있다. 특히 C자형 영상증강장치의 경우 마취통증의학과에서 환자의 통증을 치료하기 위해 시행하는 신경차단술, 경막외유착박리술, 내시경 등을 이용한 경막외 시술, 경피적척추성형술, 경피적풍선척추성형술, 고주파 등을 이용한 디스크감압술, 경막외카테터거치술, 척수자극기, 척수강내약물주입펌프 삽입술 등 다양한 통증치료에서 없

어서는 안될 중요한 장비라고 할 수 있다[1,2]. 이들 치료를 시행함에 있어 C자형 영상증강장치를 통해 더욱 정확하고 안전하게 환자를 치료할 수 있는 장점이 있지만, 반면 이를 사용하는 의사는 불가피하게 방사선에 노출되는 문제가 발생하게 된다[3,4]. 우리 몸은 장기별로 방사선 노출에 대한 민감도에 차이가 있는데, 눈, 특히 수정체는 신체 중 방사선에 가장 민감한 부위로 알려져 있고, 방사선 노출에 의한 수정체의 혼탁이나 백내장의 발병은 매우 흔하다고 한다[5]. 최근 방사선의 이용 범위가 통증 치료뿐 아니라 방사선을 이용한 질병의 진단이나 치료에도 널리 사용되면서 의료진이 방사선에 노출되는 기회도 늘어나고 있다. 따라서, 본문을 통해 방사선 노출과 관련해 눈에 발생할 수 있는

부작용을 살펴보고, 눈에 대한 방사선 노출 허용량, 눈을 보호할 방법과 이를 위한 장비를 소개하고자 한다.

방사선 관련 용어 및 단위

방사선과 관련해 여러 가지 용어와 단위가 사용되는데, 본문을 이해하기 위해서는 이러한 용어와 단위에 대한 이해가 선행되어야 할 필요가 있다. 대표적으로 사용되는 용어로는 조사선량(exposure dose), 흡수선량(absorbed dose), 등가선량(equivalent dose), 유효선량(effective dose)의 네 가지가 있다[6,7]. 조사선량은 엑스선이나 감마선이 조사되었을 때 공기가 이온화되는 정도를 말하는데 그 단위는 린트겐(R) 또는 C/kg을 사용한다. 쉽게 말해 방사선이 조사되는 세기를 말한다고 볼 수 있다. 흡수선량은 물질의 단위질량에 흡수된 방사선 에너지량을 말한다. 단위는 그레이(Gy)와 라드(rad)를 사용한다(1 Gy = 100 rad). 인체가 방사선에 노출되었을 때 동일한 흡수선량을 흡수했다더라도 방사선의 종류, 에너지 정도에 따라 그 영향이 다른데 이러한 방사선의 위험도를 나타내는 단위가 등가선량이다. 등가선량은 '흡수선량 X 방사선가중치'로 계산하는데, 방사선 가중치는 앞서 언급한 방사선의 종류와 에너지에 따라 다르고, X선의 경우 방사선가중치가 '1'로 흡수선량과 등가선량이 같은 값이 된다. 등가선량의 단위는 렘(rem)과 시버트(Sv)를 사용한다(1 Sv = 100 rem). 따라서, X선 1 Gy의 흡수선량에 노출된 경우 등가선량은 1 Sv가 된다. 우리 몸에서 부위별로 방사선이 미치는 영향은 차이가 있는데, 부위별로 등가선량과 가중치를 곱해서 인체 전체에 미치는 방사선의 영향을 나타낸 것이 유효선량이다. 유효선량도 등가선량과 마찬가지로 렘과 시버트를 사용한다. 특정 장기에 방사선이 피폭되었을 때에는 등가선량을 사용하고 몸 전체가 피폭되었을 경우에는 유효선량을 사용하게 된다. 그 외에 방사선 노출과 관련해 방사선에 의한 생물학적 효과가 나타나는 최저 한계의 선량을 한계선량(threshold dose)라고 한다. 한계선량은 방사선 방어의 관점에서 중요한 기준으로 사용되기도 하는데, 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서는 특정 조직이나 장기의 1%에서 이상반응이 나타나는 방사선량을 한계선량으로 정의 내린 바 있다[8].

방사선에 의한 부작용 및 눈의 합병증

인간의 신체가 방사선에 노출될 경우 신체 여러 장기가 영향을 받게 된다. 특히, 난소와 고환, 골수 및 눈의 수정체는 신체에서 방사선 감수성이 예민한 조직이며[2], 그 중 눈의 수정체는 가장 민감하다고 알려져 있다[3]. 우리 몸의 방사선 노출과 관련해 백내장, 녹내장, 고혈압, 신장 및 요관의 결석 등과 같은 질환이

발생할 수 있다[4]. 또한, 방사선은 대표적인 발암 물질로 암을 유발할 수도 있다.

방사선 노출에 의해 발생하는 부작용이나 질환의 발생은 크게 결정적 영향(deterministic effect)과 확률적 영향(stochastic effect)의 두 가지로 분류할 수 있다[8,9]. 결정적 영향은 방사선에 노출이 되었더라도 일정 용량(한계선량, threshold dose) 이하의 저용량에 노출되었을 경우에는 부작용이 발생하지 않다가 한계선량 이상의 노출부터 개개인의 감수성에 따라 부작용이 발생하기 시작해 노출량이 증가할수록 질환의 심각도가 증가하는 경우를 말한다. 결정적 영향의 경우 노출량을 한계선량 이하로 조절하면 부작용은 발생하지 않는다. 눈의 혼탁이나 백내장의 발생은 결정론적 영향에 의해 발생한다고 생각되어 왔다. 반면 확률적 영향은 방사선에 노출이 될 경우 한계선량이 없이 노출만 있으면 확률적으로 부작용이 발생할 수 있는 경우를 말한다. 이 경우 노출량이 증가할수록 부작용이 발생할 확률이 증가하게 되는데, 암이나 백혈병의 경우 확률적 영향에 의해 발생한다고 생각되고 있다. 확률적 영향에 의해 발생하는 질환이라도 노출량을 적게 유지하면 질환이 발생할 확률을 낮은 상태로 유지할 수 있으므로 노출량을 줄이는 것이 중요하다[8].

앞서 언급한 바와 같이 수정체에 발생하는 백내장이나 혼탁은 결정론적 영향으로 발생한다고 생각되어 왔다. 그러나 방사선 노출이 발생한 후 오랜 시간이 지난 뒤에 이러한 부작용이 발생하는 경우들이 보고되면서 확률적 영향에 의해 발생할 수도 있다는 가능성이 언급되고 있다[8-11]. 즉, 눈의 방사선 민감도에 대한 새로운 데이터는 한계선량이 상당히 낮거나 0 일수도 있음을 의미하는 것으로 보인다[12,13]. 결정론적 영향에 의해 부작용이 발생한다면 한계선량을 넘어서는 방사선 노출이 있어야만 백내장이나 수정체 혼탁이 발생한다. 그러나 현재는 오랜 시간이 지난 후에 발생하는 수정체의 혼탁과 관련해 전리 방사선 한계선량 값이 생각보다 낮으며 이에 따라 실제로는 결정론적 영향에 의해 수정체의 부작용이 발생하는 것이 아니라 확률적 영향에 의해 발생할 수 있다고 생각하는 연구자들이 있다. 확률론적인 영향의 심각성은 흡수율에 상관없이 소량의 방사선 노출에 의해서도 부작용이 발생할 수 있다는 것이다. 2016년, 미국방사선방호추진심의위원회(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)에서 발행된 Commentary No.26에서는 기존의 연구들에 대한 리뷰를 바탕으로 방사능에 의한 수정체 혼탁이 본질적으로 확률적일 수도 있다고 언급하고 있지만, 역학적으로 명확한 증거와 일치하지 않는 부분이 있기 때문에, 사실 방사선에 의한 백내장 발생이 절대적으로 확률론적인지 또는 결정론적인지는 아직 명확하지 않다[9]. 최근에는 방사선 조사 후 초기에 발생하는 백내장은 한계선량이 있지만(결정론적 영향), 뒤늦게 발현하는 백내장은 한계선량이 없다(확률론적 영향)는 이론도 제시되고 있다[5]. 최근까지의 연구 결과에 의

하면 저용량의 방사선에 오랜 시간 동안 노출된 경우 수정체 혼탁의 한계선량은 수백 mGy와 1 Gy사이로 생각되고 있으며, 저용량의 방사선에 노출되는 의학 및 직업 노출군에 대한 새로운 연구에서는 100 mGy 미만에 해당하는 선량에서의 방사선 노출은 백내장 발생의 위험성이 크지 않다고 한다[14].

방사선이 발암 물질이지만 사람의 수정체에 종양을 일으키지는 않는다. 이와 관련해, 아직 대부분의 동물과 사람에서 수정체에 원발성 종양이 발생했다는 보고는 없다[15,16]. 이는 수정체 혼탁의 기전이 항암 효과로 작용하고 있으며, 반대로 백내장 발생 기전에는 종양 관련 인자가 관여하고 있다는 사실과 관련이 있다[5,14]. 수정체에서는 손상된 DNA 복구가 일어나면서 백내장이 발생하게 되는데, 다시 말하면 눈의 수정체에는 조직 회전율이나 세포제거 기전이 없으므로, 손상된 세포가 수정체의 불투명도를 형성할 수 있고 이 과정에서 종양 발생이 강력하게 억제된다[5,14]. 한편, 방사선에 의해 수정체에 염증이 발생할 수 있으며 염증은 백내장 형성을 악화시키지만 백내장 형성 과정 전체에 대한 염증의 기여는 크지 않을 것으로 생각된다[5]. 이러한 수정체의 방사선 민감성은 방사선에 의한 세포 사멸, 불활성화, 손상된 세포의 불완전한 분화 및 수정체 단백질의 변성과 관련이 있는 것으로 보인다. 죽거나 비활성화된 수정체 세포는 수정체 내부에 머물러 빛의 산란 원인이 되는데, 고선량 방사선은 저선량 방사선보다 백내장을 더 많이 만들어 내며, DNA 손상 및 복구 모두가 방사선에 의한 백내장을 만들어 낼 수 있다[5,9].

백내장이나 수정체의 혼탁은 그 발생 부위에 따라 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 핵(nuclear), 피질(cortical), 후낭하백내장(posterior subcapsular cataract, PSC)으로 분류할 수 있는데, 이 중 PSC는 노화에 의해 발생하는 백내장 중에 가장 빈도가 낮고 방사선 노출에 의해 발생하는 경우가 많다[11,14]. 프랑스에서 이루어진 Occupational Cataract and Lens Opacities in Interventional Cardiology (O'CLOC) 연구는 심장내과 의사의 백내장 발생을 전국적으로 조사하였다[17]. 핵과 피질에 발생한 백내장이나 수정체 혼탁은 시술과 관련된 방사선 노출이 없는 대조군과 비교하여 유의할 만한 차이가 없었으나, 후낭하(PSC) 혼탁은 유의할 만하게 높았다(17% vs. 5%, Relative risk = 3.85, 95% CI: 1.3-11). 다행인 것은 수정체 혼탁이 발생한 대부분의 경우 낮은 등급(83% grade 1: Lens Opacity Classification System III:LOCS III)의 혼탁이었으며, 규칙적으로 납 안경(lead glasses)을 착용하는 경우 그 위험은 더 낮았다(Relative risk = 2.2, 95% CI: 0.4-13)는 것이다. 따라서, 방사선에 의한 수정체 부작용의 위험을 줄이기 위해 납 안경의 사용을 강하게 권하고 있다[17].

년간 피폭 허용 선량으로 본 눈에 대한 방사선 피폭 허용량

NCRP에서 1993년에 발표한 방사선 관련 업종에 종사하는 사람의 연간 방사선 피폭 허용량은 Table 1과 같다[18]. 일반적으로 갑상선이나 생식기의 방사선 피폭 허용량이 더 적을 것이라고 생각하기 쉽지만, 수정체의 경우 갑상선이나 생식샘의 연간 방사선 피폭 허용량의 30%로 더 낮다. 이는 눈의 수정체에 대해서는 다른 장기보다 방사선 피폭에 주의를 기울일 필요가 있다는 의미로 해석된다.

이처럼 수정체의 경우 방사선 노출에 민감한데[10,19], 5 Gy 이상의 높은 흡수선량에 한 번 노출된 이후 백내장과 같은 수정체의 혼탁이 발생하면서 실명에 가까울 정도로 심각한 시력 장애가 발생했다는 보고들이 있었다[9]. 그러나 이보다 적은 양의 방사선 노출이 있었다라도 수년이 지난 후에 수정체의 혼탁화가 발생했다는 보고들도 있다[20-23].

약 10년 전까지 ICRP와 NCRP에서 발표한 내용에 의하면, 방사선에 의해 수정체 혼탁이 발생하는 한계선량은, 지속적인 노출의 경우 흡수 선량 8 Sv 이상, 급성 노출의 경우 2-10 Sv였다[9]. 그러나 최근까지 밝혀진 조사를 통해, 조직 반응이 발생하는 한계선량은 이전에 생각했던 것보다 더 낮다는 것이 확인되었다[8,9]. 특히 방사선 노출이 있는 이후 수년이 지난 뒤에 조직에 이상이 발생하는 경우도 있었는데, 이를 포함하면 조직에 이상이 생길 수 있는 전리 방사선의 한계선량이 기존의 허용치보다 더 낮아질 수밖에 없었다.

최근의 연구 결과를 바탕으로, ICRP는 2011년에 수정체의 방사선 노출 한계선량을 흡수선량으로 0.5 Gy라고 발표하였다[8]. 0.5 Gy는 20년 이상 관찰하였을 때 1%에서 시야에 장애를 초래하는 백내장(vision-impaired cataract)이 발생하는 한계선량이다[5,8]. 또, 수정체와 관련해 직업적 노출의 경우, 계획된 노출이라고 하더라도 연간 최대 노출값은 50 mSv를 넘지 않도록 하였고, 5년 이상의 기간 동안 연평균 20 mSv/year를 넘지 않도록 권고하였다[8]. 이는 NCRP에서 기존에 권고했던 수정체의 연간 피폭허용선량 150 mSv와(Table 1) 비교하더라도 상당히

Table 1. Annual Maximal Target Area/Organ Permissible Radiation Doses before 2012

Area/Organ	Annual maximum permissible dose
Thyroid	50 rem (500 mSv)
Extremities	50 rem (500 mSv)
Gonads	50 rem (500 mSv)
Lens of the eye	15 rem (150 mSv)
Whole body	5 rem (50 mSv)
Pregnant women	0.5 rem (5 mSv)

낮아진 수치에 해당한다.

이렇게 낮아진 한계선량의 적용은 미국과 유럽을 포함하여 전 세계적으로 영향을 미쳤다[8,9,24]. ICRP 발표 후 변경된 수정체의 한계선량은 개정된 유럽 및 국제 기본 안전 표준(European and International Basic Standards BSSs)에 채택되었고, 유럽 연합 협의회 지침(European Union Council Directive)에서는 눈에 대한 선량 제한에 대해 방사선을 이용하여 치료적 시술을 하는 사람이 가능한 합리적으로 최소한의 노출만 하도록 하는 ALARP (As Low As Reasonably Practicable)의 원칙을 적용하도록 하였으며 유럽 및 영국에서도 관련 법안을 채택하였다[25]. 그 결과 영국에서는 눈에 대한 방사선량의 연간 피폭 허용 한도를 15 mSv로 제한하고 지키도록 하고 있다[26].

수술, 시술과 관련된 의료진의 방사선 노출

방사선 노출은 크게 세 가지 노출원으로 나누어 생각해 볼 수 있다[3,27]. 첫 번째는 직접 X선에 노출되는 것인데, 의료진의 입장에서선 시술 시 X선 조사영역에 손을 넣지 않는 이상 직접 X선(primary X-ray beam)에 노출될 위험은 없다. 두 번째는 산란 방사선(scattered X-ray)으로 X선이 조사되면서 환자 몸이나 테이블 등에 부딪혀서 튕겨져 나오는 방사선을 말한다. 마취통증의학과 의사를 비롯해 대부분 의료진의 방사선 노출원은 산란 방사선이다. 세 번째는 새어 나오는 X선(leakage X-ray)인데 이는 X선 발생 장치에서 X선이 발생할 때 새어 나오는 방사선이다. C자형 영상증강장치 등의 X선 장비는 X선을 조사할 때 한쪽 방향으로 조사되는데, 이때 조사 방향 외에는 X선이 나오지 않도

록 차폐가 되어 있다. 그러나 이 차폐된 부위로도 소량의 X선이 새어 나오는 경우가 있고 이를 새어 나오는 X선이라고 한다. 그러나 새어 나오는 X선의 양이 많지는 않으므로 실질적으로 의료진에게 크게 영향을 미치지 않는 편이다[27].

눈을 보호하기 위한 장비

수정체의 방사선 노출과 관련해 ICRP에서 권장하는 새로운 연간 한계치가 이전보다 7분의 일 이하에 달하는 정도로 급격히 낮아지고, 전리 방사선을 이용한 진단과 치료는 증가하는 현실로 인해 20 mSv의 연간 피폭 허용 한계를 넘거나 수정체의 혼탁 발생이 증가할 수 있는 우려가 있다[24]. 방사선에 취약한 수정체를 보호하기 위해 납 안경을 쓰는 것은 선택이 아닌 필수가 되어가고 있다[24]. 납 안경을 쓰는 것이 방사선을 완전히 차단하지는 못해도 이온화 방사선으로부터 눈을 보호할 수 있고, 이를 뒷받침할 수 있는 연구가 최근 늘어나고 있다.

납 안경을 사용하더라도 수정체가 방사선에 노출될 수 있는데, 눈에 대한 방사선 조사는 세 가지 경로를 생각해 볼 수 있다. 첫째, 납 안경을 직접 통과한다. 둘째, 시술자의 머리를 통과한 방사선이 눈 쪽으로 흩어진다. 셋째, 차폐가 없는 곳으로 들어가서 직접 눈에 조사되는 경우이다[28].

시중에 나와 있는 납 안경은 세 가지의 표준 유형을 가지고 있으며 제조사별로 다양한 디자인이 있다[29]. 측면 차폐가 없는 일반적인 안경 형태의 납 안경, 측면 차폐가 있는 납 안경(Figs. 1A and 1B), 그리고 측면 차폐는 없지만 안경 렌즈 부분이 얼굴을 감싸고 곡선을 이루며 측면으로 확장되는 랩어라운드형

Fig. 1. Lead glasses with side shields (A) and C-arm fluoroscopic image of lead glasses with side shields (B).

Fig. 2. Wraparound style lead glasses (A) and C-arm fluoroscopic image of wraparound style lead glasses (B).

(wraparound)의 낱 안경(Figs. 2A and 2B)이다. 뇌동맥류 치료를 위한 코일 삽입술이나 심혈관내과에서의 스텐트 삽입술 상황(Fig. 3)에서의 C자형 영상증강장치와 시술자의 위치에서는 랩어라운드형 안경이 측면 차폐가 있는 안경보다 효과적으로 방사선을 차단할 수 있었다[29]. 측면 차폐가 있는 낱 안경의 경우 측면의 크기는 특히 왼쪽 눈의 보호와 관련이 있으며, 큰 측면을 가진(4 cm) 안경이 작은 측면(1.5 cm)에 비해 20%정도 방사선 차폐 효과가 컸다[24]. 통증치료와 관련해 C자형 영상증강장치를 이용한 시술을 시행할 때에는 시술자가 C자형 영상증강장치 바로 옆에 위치하는 경우(Fig. 4A)가 대부분이고 X-선을 조사해서

Fig. 3. C-arm fluoroscopy and physician's position for intracranial and cardiologic interventions. X: X-ray generator, M: monitors.

영상을 확인할 때에는 고개를 모니터 방향으로 돌리게(Fig. 4B) 되므로 앞서 언급한 몬테카를로 연구처럼[29] 랩어라운드형 안경이 더 효과적이라는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 중요한 것은 옆에서 들어오는 방사선을 차폐할 수 있어야 하므로 랩어라운드형 안경이나 측면 차폐가 있는 안경을 사용해야 하고 측면 차폐가 없는 낱 안경은 실질적으로 방사선 차폐에 도움이 되지 않을 가능성이 크다.

또 다른 연구에서는 낱 안경이 없는 경우, 측면 차폐가 없는 낱 안경, 측면 차폐가 있는 낱 안경, 스포츠 랩어라운드형 낱 안경의 네 가지 비교한 연구가 있었다[30]. 이 연구에서는 시술자가 테이블에 대해 0°, 45°, 90° 각도로 위치한 세 가지 경우로 나누어 각각 테이블에 누워 있는 환자의 전후 영상(anteroposterior view)와 측면 영상(lateral view)을 촬영해 노출량을 비교하였다. 이 연구에서 세 가지 낱 안경 모두 낱 안경이 없는 경우보다 눈의 방사선 노출량을 줄여주는 효과가 있었다. 그중에서도 방사선 노출 감소 정도는 스포츠 랩어라운드형 낱안경이 가장 효과적이었다고, 완전히 동일하지는 않지만 Fig. 4B에서 시술자가 X선 발생장치보다 약간 뒤에 위치한 90°, 전후 촬영 영상에서는 측면 차폐가 있는 낱 안경과 스포츠 랩어라운드형 낱 안경의 차폐 정도에 별 차이가 없었다[30].

Fig. 4. C-arm fluoroscopy and physician's position for pain intervention (A). X: X-ray generator, M: monitors. C-arm fluoroscopy and physician's position during shooting fluoroscopic image (B). X: X-ray generator, M: monitors, arrows: scattered radiation.

Fig. 5. Facial mask (A) and the lead equivalent thickness of facial mask (B).

많은 경우, 납 안경을 비롯해 방사선 보호용 장비를 보면 'lead equivalent thickness' (납당량 두께)가 나와 있는데(Figs. 5A and 5B), 이는 해당 장비의 방사선 차폐력을 납으로 환산했을 때 그 숫자에 해당하는 mm 두께의 납의 차폐력과 같다는 의미가 된다. 즉, '0.5 mm lead equivalent thickness'의 장비라면 0.5 mm 두께의 납에 해당하는 차폐력이 있다는 의미이다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 납 안경의 납당량 두께가 0.5 mm라고 하면 이 수치가 안경렌즈의 납당량만 말하는 것인지, 측면에 차폐가 되는지, 아니면 램퍼라운드형 안경인지, 안경 프레임에도 차폐력이 있는지 등을 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

한편, 시술자의 방사선 노출과 관련해 방사선의 투영(projection)방향, 시술자의 위치, 시술자의 머리 방향, 영상 발생장치와 환자 간의 거리는 시술자의 눈과 전신 방사선량에 영향을 미치지만, 관전압(kVp)이나 안경의 납당량 두께는 크게 영향을 미치지 않는다고 한다[29]. 특히, 안경의 납당량 두께가 0.5 mm 이상이면 눈의 수정체 보호에 미치는 영향이 크게 차이나지 않았다는 보고도 있다[29]. 실제로 대부분의 납 안경은 0.5 mm나 0.75 mm의 납당량 두께를 가지는데 이 경우 안경 렌즈를 통해 들어오는 산란 방사선의 95% 이상 감소시킬 수 있다.

그러나, 안경 자체의 투과 특성에 의해 수정체에 대한 방사선 노출 감소량은 예상보다 적다. 이는 주로 머리에서 오는 후방 산란 방사선 때문이다[31,32]. 또한, 적절한 방사선 방어를 위해서는 납 안경의 옆면이나 아래에서 들어오는 방사선을 효과적으로 막는 것이 중요하며, 이것은 납 두께가 증가하는 것보다 더 큰 방사선 차단 효과를 가져올 수 있다[28]. 이러한 면에서, 측면 보호 장치가 없는 납 안경은 일반적으로 측면에서 들어오는 산란방사선을 막아주지 못하고 직접 노출되기 때문에 시술자에게 적절한 방사선 보호를 제공하지 못할 수 있다[27].

다른 결과를 보인 연구도 있는데, 측면 보호 장치가 없는 경우가 있는 경우보다 전리 방사선의 노출이 낮았다는 보고도 있다[30]. 저자들은 안경과 시술자의 얼굴 사이의 넓은 공간이 산란 방사선의 유입을 쉽게 하고, 또 이를 통해 들어온 방사선이 간헐 후 빠져나오지 못하고 반사되어 눈에 대한 방사선 노출이 높아진 것으로 보인다고 설명하였다[30].

눈을 보호하기 위해 납 안경을 선택할 때, 대부분의 연구에서는 측면 차폐가 있는 납 안경이나 램퍼라운드형의 납 안경을 추천하고 있다[24,26,28,33]. 이때 안경은 사용자의 얼굴 윤곽, 특히 눈 아랫부분이 잘 맞는지, 안경 렌즈가 너무 작지 않은지, 얼굴에 잘 밀착되는지 등을 고려해야 한다. 또한, 안경을 지속적으로 사용하기 위해서 안경이 너무 무거우면 쓰기 불편하므로, 편안함과 효율성 사이에서 균형을 맞춰야 할 것이다[33].

한편, 일부 납 안경의 경우 안경의 무게를 줄이기 위해 프레임의 납을 제거하여 보호 기능이 떨어지는 경우도 있다. 그 외에 안경 형태가 아닌 것으로 방사선을 막기 위한 안면 마스크가 있다

(Figs. 5A and 5B). 0.1 mm의 납당량 두께로 납 안경보다 납당량 두께가 낮지만 선량감소요소(Dose Reduction Factor, DRF) 4의 효과를 가지는데, 이는 안면 마스크를 착용하지 않은 경우에는 동일한 조건에서 방사선 노출량이 4배가 된다는 의미이다[26]. 이는 납 안경의 DRF가 3.2에서 7.6으로 조사된 결과와 비교해 볼 때 크게 떨어지지 않는 수준이다[26]. 납 안경의 경우 후방 산란으로 인한 눈의 노출이 있는데, 안면 마스크는 얼굴을 넓게 감싸는 형태로 눈 주위 두부 영역의 노출 감소를 가져올 수 있으므로 나타난 결과로 보인다. 반면, 안면 마스크는 납 안경보다 크기가 크고, 습기가 차서 시야가 나빠질 수 있는 단점이 있다[26].

납 안경과 함께 눈을 보호하기 위해 이용할 수 있는 장비로 천장에 설치한 스크린(ceiling suspended screen)이 있다[34]. 천장 스크린은 환자와 가깝게 위치시키는 것이 환자에서 멀리 떨어져 있는 것보다 효과적이며, 천장 스크린을 이용하면 양쪽 눈에 동일한 선량 감소를 가져올 수 있고, 이와 더불어 시술자의 상체도(50-80%) 방사선 노출에서 보호할 수 있다. 천장 스크린 효과에 대한 연구에서 DRF 19를 보고한 경우도 있고,[35] 몬테카를로 연구에서는 DRF 1.03에서 33의 다양한 범위로 나타났다[29]. 그러나 원칙적으로 천장 스크린이 뛰어난 수준의 보호를 제공할 수 있다고 하여도 중재적 시술에서 천장 스크린을 이용하는 경우 시술 내내 주의 깊게 스크린의 위치를 바꾸고 배치시키는 등의 지속적인 노력이 필요하므로 실용적인 면에서는 효과가 떨어질 수 있다[26].

눈에 대한 방사선 노출량을 줄이기 위한 노력

시술과 관련해 방사선 노출을 줄이는 주요 방법은 세 가지로 언급할 수 있다. 첫 번째 방사선장치를 이용하는 시간 줄이기, 두 번째 방사선 차폐용 장비 사용하기, 세 번째 방사선원으로부터 멀리 떨어져 있기의 세 가지가 주요 원칙이다[3,4,7,18].

먼저, 방사선 장치를 이용하는 시간을 줄이기 위해서는 시술자의 숙련도를 높여서 빠른 시간안에 적은 양의 X선 촬영으로 시술이나 수술을 끝낼 수 있어야 하고, 방사선 촬영자 역시 숙련도를 높여서 불필요한 영상 촬영을 줄이고, 필요한 영상을 적절하게 촬영하는 법을 익혀야 한다. 두 번째, 의료진이나 시술자는 본인의 신체를 보호하기 위해 각종 방사선 차폐용 장비를 착용해야 하는데, 수정체 보호를 위해서는 납 안경이나 안면 마스크 등의 방사선 차폐용 장비를 착용한 상태로 C자형 영상증강장치 등의 X선 장비를 이용할 필요가 있다[18]. 우리나라에서 조사된 연구에 의하면 마취통증의학과에서 통증 시술을 시행함에 있어 수정체를 보호할 수 있는 납 안경 등의 착용률은 38-40%에 지나지 않았다[3,18]. 이는 몸과 갑상선을 보호할 수 있는 앞치마(apron)와 갑상선 보호대(thyroid shield)의 착용률이 각각 93-

100%, 81-100%임을 감안할 때 수정체에 대한 차폐의 중요성이 간과되고 있는 현실을 나타낸다고 할 수 있다[3,18,36]. 앞서 언급한 바와 같이 ICRP의 권고에 따라 수정체의 연간 피폭 허용량이 20 mSv로 낮아졌으므로, 수정체에 대해서는 보다 적극적으로 보호 장비를 이용해야 한다. 영국에서는 위험을 통제하기 위한 적절한 개인 보호장비(personal protective equipment, PPE) [25]의 법조항을 만들어 보호 장구 이용을 법적으로 규제하고 있다. 세 번째로 시술자는 X선 촬영 시 방사선원으로부터 멀리 떨어져 있을 필요가 있다. 이는 앞서 언급한 두 가지 방법의 방사선 노출 감소 방법보다 더 효과적이고 중요한 방법일 수 있다[4,7]. 이는 방사선 노출원으로부터 떨어져 있을수록 그 거리의 제곱에 반비례해서 방사선 노출량이 감소하기 때문이다[4]. 즉, 방사선원에서 두 배 먼 거리에 위치하면 노출량은 1/2이 아니라 1/4로 급격히 감소하게 된다. 앞서 보고된 연구를 보면 C자형 영상증강장치를 사용하는 시술을 시행하면서 두 발자국 정도 방사선 노출원에서 떨어진 곳에 위치하게 되면 먼저 있었던 위치보다 방사선 노출량을 80%정도 줄일 수 있는 효과가 있었다[4]. 노출원에서 보다 먼 곳에 위치하는 방법은, 0.5 mm 납당량 두께의 앞치마를 사용할 때 산란 방사선의 90%정도를 차폐할 수 있다는 점을[36] 감안하면 추가적인 비용 없이 효과적으로 방사선 노출을 줄일 수 있는 좋은 방법이라고 할 수 있겠다. 심지어 납 장갑의 경우 방사선 노출량의 26%정도를 줄여주는 효과가 있는데, 손을 20 cm 뒤에 위치시키면 73.8%의 방사선 노출이 줄어들었다는 연구결과도 있으므로 방사선원으로부터의 거리가 얼마나 중요한지 짐작할 수 있을 것으로 생각한다[7].

본인의 방사선 노출량을 확인하기 위해 눈뿐만 아니라 방사선의 전신 조사량에 관해서도 모니터링이 필요하다[37]. 현재 우리나라에서 방사선 장치를 사용하는 의료진에서 측정하는 방사선 노출량은 전신의 방사선 노출량 뿐인데, 기본적으로 선량계를 방사선 보호용 앞치마 안에 넣어서, 앞치마에 의해 차폐된 몸의 방사선량을 측정하기 때문에 눈에 대한 보호 장비를 착용하지 않았다면 눈의 방사선 노출량은 측정된 값보다 더 높다고 보아야 한다. 눈의 방사선 노출량을 측정하기 위해, 선량계를 눈 옆에 부착하는 것이 가장 좋으나 시야를 방해할 수 있어 제한점이 있다[33]. 이마 중간에 선량계를 위치시키는 방법도 있는데, 안구 노출량보다 30%정도 더 적게 측정 될 수 있다고 하나 가장 일관된 값을 얻을 수 있는 안정적인 측정 방법이다[33]. 그 외에 안구에서의 노출량을 측정하기 위해 목 근처에 선량계를 위치시키는 방법도 있는데, 안구의 노출량과 비슷한 결과를 얻을 수 있다고 한다[33].

또, C자형 영상증강장치를 사용할 때 기본적인 촬영 모드를 사용하기보다는 펄스(pulsed) 모드나 저선량(low dose) 모드를 사용하면 C자형 영상증강장치에서 나오는 방사선량을 감소시켜 노출량을 줄일 수 있고[6], 콜리메이션(collimation)을 이용해

방사선이 투사되는 범위를 줄이는 방법 또한 방사선 노출량을 줄이는 데 도움이 된다[38]. 그 외에 C자형 영상증강장치에서 엑스선 발생장치가 시술대 위에 위치할 경우, 시술대 아래에 위치할 때에 비해, 안구 조사량이 2-15배까지 증가할 수 있으므로 엑스선 발생장치를 위쪽에 위치시키는 일은 없어야 할 것이다[39].

마지막으로 방사선 안전에 대한 교육과 지속적인 관리가 매우 중요한데, 통증치료를 하는 의사들의 방사선 안전에 대한 지식이 부족하고, 실질적인 교육도 부족하다는 연구 결과가 있다[3,18,24,40]. 따라서, 학회에서의 체계적인 방사선 안전 교육이 필요할 것으로 생각되며, 시간이 지나면서 조금씩 변하는 방사선 안전 권고사항 등 최신의 내용을 바탕으로 교육할 필요가 있다. 또, 개인은 자신에 맞는 방사선 보호 장비를 이용하며, 방사선 보호 장비의 손상여부를 지속적으로 확인해서 보다 안전하게 방사선 장비를 사용하기 위해 노력해야 할 것이다.

결론

C자형 영상증강장치를 비롯해 환자의 진단과 치료를 목적으로 많은 방사선 장비들이 사용되고 있다. 이들 장비를 사용하는 의료진은 방사선 노출을 줄이기 위한 여러 가지 노력을 기울일 필요가 있다. 특히 수정체는 우리 몸에서 방사선에 가장 민감한 조직으로 알려져 있고, 연간 피폭 허용량이 2011년 ICRP에 의해 20 mSv로 낮아져 수정체에 대한 방사선 보호에 주의를 기울일 필요가 있다. 방사선과 관련해 수정체에 발생할 수 있는 혼탁이나 백내장을 줄이기 위해 납 안경과 같은 보호장비를 사용하는 것이 좋고, 방사선 사용 시간을 최대한 줄이고, 가능하면 방사선원에서 멀리 떨어져서 장비를 사용하는 것이 추천된다. 또, 지속적으로 선량계를 착용하여 정확한 노출량을 모아 정기적으로 분석하고, 분석 결과에 따른 보완도 필요할 것이다. 마지막으로 마취통증의학과 의사들의 방사선 안전에 대한 교육과 실천을 강조하고 싶다. 방사선으로부터 자신을 보호하는 데는 본인의 관심과 노력이 무엇보다 중요하다. 따라서, 관련 교육에 관심을 가지고 적절한 보호 장비를 착용하며, 정기적인 안전 교육과 실천을 통해 환자의 치료뿐 아니라 본인의 안전과 건강에도 주의를 기울일 필요가 있다.

REFERENCES

- Jeong JS, Shim JC, Woo JP, Shim JH, Kim DW, Kim KS. Epidural contrast flow patterns of retrograde interlaminar ventral epidural injections stratified by the final catheter tip placement. *Anesth Pain Med* 2013; 8: 158-65.
- Kim MG, Choi DH, Kim H, Cho A, Park SY, Kim SH, et al. Prediction of midline depth from skin to cervical epidural space by

- lateral cervical spine X-ray. *Anesth Pain Med* 2017; 12: 68-71.
3. Kim TH, Hong SW, Woo NS, Kim HK, Kim JH. The radiation safety education and the pain physicians' efforts to reduce radiation exposure. *Korean J Pain* 2017; 30: 104-15.
 4. Chang YJ, Kim AN, Oh IS, Woo NS, Kim HK, Kim JH. The radiation exposure of radiographer related to the location in c-arm fluoroscopy-guided pain interventions. *Korean J Pain* 2014; 27: 162-7.
 5. Hamada N, Fujimichi Y. Role of carcinogenesis related mechanisms in cataractogenesis and its implications for ionizing radiation cataractogenesis. *Cancer Lett* 2015; 368: 262-74.
 6. Cho JH, Kim JY, Kang JE, Park PE, Kim JH, Lim JA, et al. A study to compare the radiation absorbed dose of the C-arm fluoroscopic modes. *Korean J Pain* 2011; 24: 199-204.
 7. Kim AN, Chang YJ, Cheon BK, Kim JH. How effective are radiation reducing gloves in C-arm fluoroscopy-guided pain interventions? *Korean J Pain* 2014; 27: 145-51.
 8. Stewart FA, Akleyev AV, Hauer-Jensen M, Hendry JH, Kleiman NJ, Macvittie TJ, et al. ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs--threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Ann ICRP* 2012; 41: 1-322.
 9. Dauer LT, Ainsbury EA, Dynlacht J, Hoel D, Klein BE, Mayer D, et al. Guidance on radiation dose limits for the lens of the eye: overview of the recommendations in NCRP Commentary No. 26. *Int J Radiat Biol* 2017; 93: 1015-23.
 10. Ainsbury EA, Bouffler SD, Dörr W, Graw J, Muirhead CR, Edwards AA, et al. Radiation cataractogenesis: a review of recent studies. *Radiat Res* 2009; 172: 1-9.
 11. Rehani MM, Vano E, Ciraj-Bjelac O, Kleiman NJ. Radiation and cataract. *Radiat Prot Dosimetry* 2011; 147: 300-4.
 12. Worgul BV, Kundiyeve YI, Sergiyenko NM, Chumak VV, Vitte PM, Medvedovsky C, et al. Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures. *Radiat Res* 2007; 167: 233-43.
 13. Klein BE, Klein R, Linton KL, Franke T. Diagnostic x-ray exposure and lens opacities: the Beaver Dam Eye Study. *Am J Public Health* 1993; 83: 588-90.
 14. Shore RE. Radiation and cataract risk: Impact of recent epidemiologic studies on ICRP judgments. *Mutat Res* 2016; 770: 231-7.
 15. Zeiss CJ, Johnson EM, Dubielzig RR. Feline intraocular tumors may arise from transformation of lens epithelium. *Vet Pathol* 2003; 40: 355-62.
 16. Graw J. Mouse models of cataract. *J Genet* 2009; 88: 469-86.
 17. Jacob S, Boveda S, Bar O, Brézin A, Maccia C, Laurier D, et al. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study. *Int J Cardiol* 2013; 167: 1843-7.
 18. Park PE, Park JM, Kang JE, Cho JH, Cho SJ, Kim JH, et al. Radiation safety and education in the applicants of the final test for the expert of pain medicine. *Korean J Pain* 2012; 25: 16-21.
 19. Brown NP. The lens is more sensitive to radiation than we had believed. *Br J Ophthalmol* 1997; 81: 257.
 20. Chylack LT Jr, Peterson LE, Feiveson AH, Wear ML, Manuel FK, Tung WH, et al. NASA study of cataract in astronauts (NASCA). Report 1: Cross-sectional study of the relationship of exposure to space radiation and risk of lens opacity. *Radiat Res* 2009; 172: 10-20.
 21. Hsieh WA, Lin IF, Chang WP, Chen WL, Hsu YH, Chen MS. Lens opacities in young individuals long after exposure to protracted low-dose-rate gamma radiation in 60Co-contaminated buildings in Taiwan. *Radiat Res* 2010; 173: 197-204.
 22. Vañó E, González L, Beneytez F, Moreno F. Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimized interventional radiology laboratories. *Br J Radiol* 1998; 71: 728-33.
 23. Ciraj-Bjelac O, Rehani M, Minamoto A, Sim KH, Liew HB, Vano E. Radiation-induced eye lens changes and risk for cataract in interventional cardiology. *Cardiology* 2012; 123: 168-71.
 24. Bertolini M, Benecchi G, Amici M, Piola A, Piccagli V, Giordano C, et al. Attenuation assessment of medical protective eyewear: the AVEN experience. *J Radiol Prot* 2016; 36: 279-89.
 25. Rivett C, Dixon M, Matthews L, Rowles N. An assessment of the dose reduction of commercially available lead protective glasses for interventional radiology staff. *Radiat Prot Dosimetry* 2016; 172: 443-52.
 26. Magee JS, Martin CJ, Sandblom V, Carter MJ, Almén A, Cederblad Å, et al. Derivation and application of dose reduction factors for protective eyewear worn in interventional radiology and cardiology. *J Radiol Prot* 2014; 34: 811-23.
 27. Schueler BA. Operator shielding: how and why. *Tech Vasc Interv Radiol* 2010; 13: 167-71.
 28. van Rooijen BD, de Haan MW, Das M, Arnoldussen CW, de Graaf R, van Zwam WH, et al. Efficacy of radiation safety glasses in interventional radiology. *Cardiovasc Intervent Radiol* 2014; 37: 1149-55.
 29. Koukorava C, Farah J, Struelens L, Clairand I, Donadille L, Vanhavere F, et al. Efficiency of radiation protection equipment in interventional radiology: a systematic Monte Carlo study of eye lens and whole body doses. *J Radiol Prot* 2014; 34: 509-28.
 30. Waddell BS, Waddell WH, Godoy G, Zavatsky JM. Comparison of ocular radiation exposure utilizing three types of leaded glasses. *Spine (Phila Pa 1976)* 2016; 41: E231-6.
 31. McVey S, Sandison A, Sutton DG. An assessment of lead eyewear in interventional radiology. *J Radiol Prot* 2013; 33: 647-59.

32. Moore WE, Ferguson G, Rohrmann C. Physical factors determining the utility of radiation safety glasses. *Med Phys* 1980; 7: 8-12.
33. Martin CJ. Eye lens dosimetry for fluoroscopically guided clinical procedures: practical approaches to protection and dose monitoring. *Radiat Prot Dosimetry* 2016; 169: 286-91.
34. Lian Y, Xiao J, Ji X, Guan S, Ge H, Li F, et al. Protracted low-dose radiation exposure and cataract in a cohort of Chinese industry radiographers. *Occup Environ Med* 2015; 72: 640-7.
35. Maeder M, Brunner-La Rocca HP, Wolber T, Ammann P, Roelli H, Rohner F, et al. Impact of a lead glass screen on scatter radiation to eyes and hands in interventional cardiologists. *Catheter Cardiovasc Interv* 2006; 67: 18-23.
36. Ryu JS, Baek SW, Jung CH, Cho SJ, Jung EG, Kim HK, et al. The survey about the degree of damage of radiation-protective shields in operation room. *Korean J Pain* 2013; 26: 142-7.
37. Vano E, Gonzalez L, Fernández JM, Haskal ZJ. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted. *Radiology* 2008; 248: 945-53.
38. Baek SW, Ryu JS, Jung CH, Lee JH, Kwon WK, Woo NS, et al. A randomized controlled trial about the levels of radiation exposure depends on the use of collimation c-arm fluoroscopic-guided medial branch block. *Korean J Pain* 2013; 26: 148-53.
39. Domienik J, Bissinger A, Zmysłony M. The impact of x-ray tube configuration on the eye lens and extremity doses received by cardiologists in electrophysiology room. *J Radiol Prot* 2014; 34: N73-9.
40. Wang RR, Kumar AH, Tanaka P, Macario A. Occupational radiation exposure of anesthesia providers: a summary of key learning points and resident-led radiation safety projects. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth* 2017; 21: 165-71.