



소아촬영의 방사선 피폭과 저감화 방법

정 아 영* | 강남성심병원 영상의학과

Medical radiation exposure in children and dose reduction

Ah Young Jung, MD*

Department of Radiology, Kangnam Sacred Heare Hospital, Seoul, Korea

*Corresponding author: Ah Young Jung, E-mail: jeanjung@medimail.co.kr

Received September 26, 2011 · Accepted October 10, 2011

Medical imaging is an indispensable diagnostic tool in modern medicine enabling fast and accurate diagnosis. However, recent technological advances in medical equipment and increased utilization of the imaging modality have resulted in a significant increase in the exposure to ionizing radiation. The risk from radiation must be carefully considered in all examinations using ionizing radiation, especially in children. The risk of cancer in children from radiation exposure is higher than adults because pediatric patients are more radiosensitive and have more years ahead in which cancerous changes might occur. Therefore, pediatric protocols specifically designed for children must be used. However, many exams are still conducted using inappropriate adult protocols, which can result in excessive radiation. The most efficient way to reduce radiation is to avoid the examination if not justified. It has been suggested that one third to one half of pediatric CT exams are unnecessary or replaceable by other imaging modalities. If the exam is justified, then the parameters must be optimized to the imaging indication, scan area, body size, age, or weight of the patient according to the “as low as reasonably achievable” (ALARA) principle. The physician should always assess the radiation risk-benefit for each patient before ordering an examination using radiation.

Keywords: Radiation; Child; Computed tomography; Justification; Optimization

서론

최근 과학기술의 발달과 새로운 기계의 등장으로 영상을 통한 빠르고 정확한 진단이 가능해졌으며 의료영상은 현대의학에 없어서는 안되는 중요한 도구가 되었다. 하지만 이온화 방사선을 사용하는 검사(X-ray, computed tomography [CT], 핵의학검사, 혈관조영술, 투시)의 검사건수의

증가와 더불어 환자가 진료과정에서 받게되는 의료피폭도 급격히 증가하였다. 특히 CT는 본질적으로 피폭선량이 높은 검사방법으로 전체 방사선 검사건수에서 차지하는 비중은 대략 15%로 작지만 상대적으로 의료피폭에서 차지하는 비중이 70% 가까이 높아 가장 중요한 의료피폭의 원인으로 특별한 관리가 필요하다[1-3]. CT는 검사시간이 짧고 임상적 유용성이 높아 촬영건수가 매년 증가하고 있으며 특히 우리

© Korean Medical Association
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

나라는 사용빈도 증가 추세가 다른 선진국보다 높다. 소아에서도 CT의 이용이 증가하고 있는데 이는 CT기술의 발달로 영상의 질이 좋아졌고 몇 초만에 검사가 가능하여 진정(sedation)의 필요성이 감소하여 협조가 잘 되지 않는 소아 환자들에게도 촬영에 가능해졌기 때문이다. 미국의 경우 약 8-10%의 CT가 소아에서 시행되는 것으로 추정되며 이온화 방사선을 사용하는 전체 소아의 검사중 X-ray가 85%로 가장 차지하는 비중이 컸고 그 다음이 CT로 대략 12%를 차지했다[4,5]. 특히 소아의 응급실에서 CT 사용이 급격히 증가하였다[6]. Brenner 등[7]은 2001년 American Journal of Roentgenology에 약 60만 건의 CT가 연간 소아에서 시행되는데 이중 500명 정도가 CT피폭과 관련된 암으로 사망할 것으로 추정된다는 충격적인 보고를 하였고 같은해 USA Today지에 이 주제와 관련된 특집기사가 실린 이후 소아의 CT와 관련된 암발생에 대한 우려와 관심이 높아진 바 있다. 우리나라에서도 최근 후쿠시마 원전사고 이후 일반인들의 방사선에 대한 관심이 높아졌다. 의료피폭에 대한 질문과 민원을 종종 의료기관에서 접할 수 있다. 환자의 피폭을 줄이기 위해서는 무엇보다 의료진의 의료피폭의 잠재적 위험성에 대한 이해와 경각심을 높이는 것이 중요하다. 본 논문에서는 소아에서의 의료피폭의 문제점과 가장 문제가 되는 CT에서의 피폭 감소방법에 대해 살펴보고자 한다.

소아의 특수성

진단적 검사를 통해 받게 되는 수준의 저선량 피폭에 의해 과연 암 발생이 유발되는지에 대해서 논란이 있지만 현재 linear-non-threshold 가설이 받아들여지고 있다. 따라서 아무리 작은 피폭이라도 문턱선량이 없어 암 발생의 위험을 증가시킬 수 있다는 전제하에 의료 피폭을 최소화하려는 노력이 필요하다[1,2,3,8]. 특히 성장하고 있는 소아에서는 세포들이 활발하게 분열을 하고 있기 때문에 방사선에 더 민감하다. 또한 남은 생애가 길어 잠복기를 거쳐 암 발생이 나타날 가능성이 더 높고, 추후 성장과정 및 성인이 된 이후 외상, 건강검진, 질병으로 여러 차례 방사선에 더 피폭될 가능성이 높아 특히 유의해야 한다. 환자가 어릴수록 방사선에

의한 위험이 크며 여자아이들이 남자아이들보다 2배 정도 방사선에 민감하다. 더욱 문제가 되는 것은 어린이는 성인보다 체격이 작아 성인과 같은 촬영조건으로 검사를 시행할 경우 장기선량(organ dose)이 더 높고 피폭에 의한 위험이 어른보다 높기 때문이다[7]. 따라서 몸의 크기 따라 피폭량을 낮춘 소아전용 프로토콜이 필요하다. 또한 소아에서 복강 내에 지방이 적어 영상의 질을 높이기 위해 불필요하게 피폭이 높은 파라미터를 사용하게 되어 과다 피폭이 될 수 있는데 영상만 보았을 때는 이를 인지할 수 없어 특히 주의가 필요하다. 미국의 경우 미국 소아영상의학회가 주축이 되어 미국영상의학회를 비롯한 여러 관련단체들이 연합하여 소아 검사에서의 피폭을 줄이기 위해 2007년 'image gently' campaign을 시작하였고 현재 60개의 관련된 전세계 전문가집단의 동참으로 확대되었다. 이를 통해 소아의 CT검사 시 피폭량을 최소화하는 방법 및 의료피폭에 대한 교육자료를 의사, 방사선사, 환자 및 보호자에게 제공하고 있다. 이후 'pause and pulse, step ightly' campaign으로 확대되어 소아의 투시촬영과 중재적 시술에서도 피폭을 줄이려는 노력을 하고 있다[9-13].

정당화 측면에서 피폭감소방안

불필요한 검사는 시행하지 않는 것이 피폭을 줄이는 가장 최선의 방법이다. 최근 미국에서 발표된 바에 의하면 대략 10-30%이상의 소아 CT검사가 불필요하거나 다른 검사로 대체할 수 있었다고 한다[14]. 2010년 JAMA에는 약 9년의 기간 동안 응급실에서의 CT사용이 3배로 증가하였지만 이중 일부만 치명적인 손상이었다는 보고가 있다[15]. CT의 사용이 급격히 증가하였지만 과연 정당한 사용인지 돌아볼 필요가 있다.

이러한 검사의 증가와 불필요한 검사들의 원인들을 보면 짧은 검사시간, 진단적 목적에 맞지 않는 검사처방, 의사간 대화부재, 방어적 진료, 환자가 원해서, 보험 및 상대적으로 싼 CT수가, 병원의 인센티브제 도입에 따른 부작용 등이 있다. 처방을 낼 때 환자의 임상적 문제를 해결하기 위해서 정말 이 검사가 필요한지 다시 한번 생각하고 risk-benefit 분

석을 통해 진단적 이득이 방사선 피폭에 따른 위험보다 클 경우에만 검사를 시행하는 것이 무엇보다 중요하다. 특히 방사선의 위험에 취약한 소아에서는 방사선을 사용하지 않는 magnetic resonance imaging (MRI)나 초음파와 같은 검사방법으로 대체할 수 있는지 고려해야 한다.

초음파는 소아에서 많은 장점을 가지고 있는 검사이다. 소아는 체격이 작고 성인보다 지방이 작고 복벽이 얇아 초음파로 고해상도의 영상을 얻을 수 있다. 실시간 검사이기 때문에 말을 하지 못하거나 정확한 표현을 못하는 어린 아이들에서도 아픈 부위를 효과적으로 확인할 수 있어 복통이 있는 소아환자를 평가할 때 초음파를 일차적으로 사용하는 것이 좋다[16,17]. 표재성 병변의 경우 초음파를 이용하면 고해상도의 영상 및 도플러를 통한 혈류에 관한 정보까지 얻을 수 있어 임파선과 같은 경우 종괴, 만져지는 작은 사지의 병변 및 여러 근골격병변을 진정과 번거로운 조영제 주사 없이 빠른 검사를 할 수 있어 유용하다[18].

MRI는 연부조직해상도가 매우 높은 검사방법으로 근골격계 및 뇌신경계에서 유용하게 사용되고 있다. 최근 MR기법과 코일의 발전으로 검사시간이 단축되었고 전신 MRI도 가능해졌다. 요로감염이 있는 소아들에서 방광 요관 역류(vesicoureteral reflux)를 진단하기 위해 전통적으로 투시하에 배설성 방광 요도 조영술(voiding cystourethrogram)을 시행하는데 이때 방사선피폭이 문제된다. 최근에는 MR urography를 통해 해부학적 구조와 신기능, 역류까지 검사할 수 있게 되었다[19,20]. 악성종양이 있는 소아환자에서 병기결정과 주기적 추적관찰을 위해 CT가 흔히 사용되어왔다. 여러 장기를 동시에 침범하는 경우가 많아 한번 검사할 때 경부, 흉부, 복부 등 여러 부위를 검사해야 하고 검사를 주기적으로 반복하게 되어 상당히 높은 방사선에 피폭되게 된다[21]. 최근 Pediatrics에 실린 Ahmed 등[22] 논문에 의하면 신경아세포종과 악성림프종의 경우 5년간 축적된 방사선량을 계산했을 때 대략 200 mSv로 심각한 수준의 피폭이 될 수 있음을 시사한다. 최근에는 소아종양환자의 추적검사 에서 CT 대신 방사선피폭이 없는 MRI의 유용성이 입증되어 사용이 증가하고 있다[23].

기본적으로 반복된 검사를 피하기 위해 다른 병원에서 촬영

영한 CT가 있는지 확인하고 환자나 보호자에게 물어보는 과정이 도움이 될 수 있다. Picture Archiving and Communication System이나 의료정보시스템에서 환자의 검사 목록을 확인하여 중복되는 검사가 있는지 살펴야 하며 다른 과거 검사들에서 정보를 얻을 수 있는지 확인 해야 한다.

불필요한 검사를 줄이기 위해서는 각각 검사방법의 특성과 장단점을 알고 임상적 질문을 해결하기 위한 적절한 검사를 처방하는 것이 중요한데 이때 영상의학과 의사와 상의하는 것이 도움된다. 일부 나라들에서는 영상검사에 대한 가이드라인이나 의사결정지원시스템(decision-support system)을 통해 여러 가지 임상적 상황에 따라 가능한 영상의학적 검사들과 검사 별 상대적 피폭량을 알려주고 표준화된 경로를 제시하고 있어 결정에 도움을 줄 수 있다(예: 미국 미국영상의학회의 ‘Appropriateness Criteria’, 호주의 ‘Diagnostic Imaging Pathways’, 영국 Royal College of Radiologists의 ‘Making the best use of clinical radiology service’).

최적화 측면에서 CT피폭 감소방법

정당화된 피폭이라도 as low as reasonably achievable 원칙에 따라 진단적으로 유용한 범위 안에서 최대한 피폭을 줄이는 노력이 필수적이다. 불필요한 검사를 피하는 것만큼 중요한 것이 재촬영 및 불완전한 검사를 줄이는 것이다. 재촬영을 하면 검사회수에 비례하여 피폭이 증가된다. 따라서 소아환자의 경우 편안한 환경에서 두려움 없이 한 번에 검사를 받을 수 있게 미리 준비하는 것이 중요하겠다. 이를 위해서는 검사과정에 대해 보호자 및 환자에게 연령에 따라 적절한 설명을 해주거나 검사 시 옆에서 보호자가 같이 있도록 하는 것이 도움이 된다. 소아전용 촬영실일 경우 벽이나 천장에 아이들이 좋아할 만한 그림장식을 하거나 장난감 등을 비치하여 친근한 분위기 만드는 것도 두려움을 없애는 한 방법이 된다.

꼭 기억해야 할 점은 대부분의 경우 소아 CT검사는 단일 위상(single phase)으로 충분하다는 것이다[24,25]. 조영전 검사는 석회화를 확인하기 위한 목적으로 촬영하는데 소아에서는 조영 전 검사가 거의 필요하지 않다. 특별한 경우

가 아니면 조영증강 후 여러 차례 반복적으로 영상을 얻는 역동적 조영증강(multiphase) CT는 피해야 한다.

스캔범위는 방사선 피폭량과 비례하기 때문에 최소화하여 필요한 부위만 범위에 포함시켜야 하며 특히 인접한 여러 부위 검사시 불필요하게 겹치는 스캔부위를 줄여야 한다. 추적검사의 경우 관심부위만 좁게 검사하거나 검사 목적에 따라 높은 화질이 필요 없는 검사의 경우(예: 뇌실-복강 단락술을 추적하기 위한 두부 CT, 선천성 누두흉을 보기 위한 흉부 CT, 사지 CT 등)의 경우 파라미터 조절을 통해 피폭 선량을 상당히 낮추어도 진단에 크게 지장을 주지 않는다.

최적화된 검사를 위해서는 소아 전용 CT 프로토콜을 가지고 있어야 한다. 환자의 크기나 나이, 단면적, 검사하는 목적 및 검사부위에 맞게 상황에 맞추어 CT 프로토콜과 파라미터를 맞춤 조절해야 한다. 환자의 크기가 CT 파라미터를 결정하는 데 있어 가장 중요한 요소이다. 체격이 작은 환자에서는 더 작은 방사선으로 같은 영상의 질을 얻을 수 있기 때문에 어른에 비해 방사선량을 줄이는 게 필수적이다. 하지만 CT의 경우 일반 단순 촬영과는 달리 과다피폭이 되어도 화질의 감소가 없어 환자가 방사선에 과다하게 노출되어도 알아차리지 못할 위험이 있어 주의를 요한다.

관전류(mA)는 방사선 피폭과 직접 비례하므로 관전류 감소가 가장 쉽고 정확한 방법이다. 대신 잡음이 증가하는 단점이 있다. 따라서 판독에 지장이 없는 한도에서 소음을 허용하는 낮은 mAs사용해야 한다. 관전압(kVp)은 방사선 피폭과 비례하지만 정비례 하지 않으며 관전압의 경우 영상 소음뿐만 아니라 영상 대조도에도 영향을 미치기 때문에 영상 질에 미치는 영향이 관전류보다 복잡하다. 45 kg 미만의 소아에서는 대부분 80-100 kVp이면 충분하며 특히 조영제를 사용하는 검사의 경우 낮은 관전압 사용 시 조영제가 더 뚜렷하게 보이기 때문에 80 kVp까지 낮출 수 있다. 피치와 collimation을 증가시키면 피폭량은 줄지만 overranging이 증가하게 되는 부작용이 있다. 소아에서는 일률적인 프로토콜을 적용시킬 수 없고 진단적 요구, 환자의 나이 및 상태에 따라 한 건 한 건 적절한 검사 프로토콜 및 파라미터의 선택이 중요하다[24-31].

소아는 방사선에 더 민감할 뿐 아니라 스캔범위가 어른에

비해 짧기 때문에 overranging에 의한 영향이 더 크다. 검사범위에 포함되는 부위가 아니라도 피폭될 수 있다는 점을 기억해야 한다. 두부 CT를 촬영할 때 방사선에 민감한 수정체 및 갑상선에 피폭이 될 수 있고, 흉부 CT를 촬영 시 갑상선과 유방에 피폭될 수 있다[32].

최근 CT스캐너들에는 선량을 낮추는 여러 장치들이 내제되어 있다. 이러한 기능들을 적극적으로 활용해야 한다. 자동노출제어장치(automatic exposure control)를 이용하면 효과적으로 일관된 영상의 질을 유지하면서 해부학적 변이에 따라 방사선량을 조절하여 현저하게 방사선량을 줄일 수 있다[26,27,33]. 하지만 이미 최대로 저감화된 프로토콜을 사용 중이라면 효과가 크지는 않을 수 있다. 그 외에도 active z axis collimation을 통해 overscanning을 줄이는 방법이 있고 관심부위 밖에 있는 갑상선, 유방 등 방사선에 민감한 장치들이 흉부 CT 촬영 시 피폭이 많이 될 수 있는데 자동장기기준제어장치(automated organ based current modulation)을 통해 방사선에 민감한 조직의 주변을 돌아갈 때 X-ray가 나오지 않도록 하는 방법도 최근 개발되었다. 자신이 사용하는 CT 기종에 어떤 피폭 저감화 방법이 사용 가능한지 자신의 병원 프로토콜에 이러한 다양한 기능들을 사용하도록 설정해 놓았는지 확인하는 것이 꼭 필요하다.

선량한도 적용과 선량보고서

최근 생산된 CT기종들은 기계적으로 검사 후 computed tomography dose index와 dose length product 지표로 구성된 선량보고서(dose report)가 생성된다. 이 지표들은 검사를 시행하는데 사용된 피폭량을 나타낸다. 실제환자의 피폭량과 차이가 있지만 변환계수를 곱하여 대략적인 유효 선량을 구할 수 있다. 소아의 경우 체격, 나이 및 여러 가지 변수가 있어 선량보고서에 나오는 추정된 피폭량이 실제 피폭량보다 작다는 문제점이 있지만[34,35] 다른 검사 및 다른 환자와의 대략적인 비교에 도움이 되기 때문에 임상 및 영상의학과 의사 모두 관심을 기울일 필요가 있다.

같은 검사에서도 환자선량은 CT스캐너, 환자크기 및 나이, 검사부위, 프로토콜, 파라미터에 의해 결정되며 매우 넓

은 분포를 보인다. 의료피폭에 의해 환자가 받는 선량은 진단에 따른 이득이 많기 때문에 특수성을 인정하여 선량한도를 정하고 있지 않다. 그러나 국제방사선방어위원회(International Commission on Radiological Protection)에서는 환자의 방사선방어 최적화를 위하여 환자선량 권고량(diagnostic reference level)을 확립할것을 권고하고 있다. 이 수치는 의료기관에서 특정 검사 및 시술에서 환자선량이 비정상적으로 높은지를 확인하기 위해 사용된다[36]. 외국의 경우 환자선량 권고량을 정해놓은 곳이 많고 이후 기간을 두고 추적연구를 하였다니 피폭이 감소하는 효과가 나타났다는 보고들이 있다[37-39].

2009년 식약청에서 우리나라 성인 CT검사에서의 환자선량 권고량을 발표한 바 있으며 소아의 경우 흉부 방사선 검사에서의 환자선량 권고량을 $100 \mu\text{Gy}$ 로 설정하였다[40-42]. 소아 CT에서의 가이드라인과 환자선량 권고량 제정을 위한 작업이 진행 중에 있으며 추후 피폭이 감소하는 효과를 기대할 수 있겠다.

결 론

소아는 방사선에 민감하고 남은 생애가 길어 방사선피폭에 의한 영향이 나타날 확률이 높고 성장해 나가면서 일생 동안 여러 번의 검사를 받게 된다. 따라서 진단적 검사에 의한 피폭을 최소화시키는 것이 특히 중요하다. 검사의 시행으로 인한 이득과 방사선 피폭에 따른 위험을 고려하여 정당화될 때에만 시행해야한다. 방사선을 사용하는 검사이지만 시행해야 한다고 판단하였을 때에는 방사선피폭을 줄이기 위해 최적화된 방법으로 검사를 시행해야한다. CT 파라미터와 피폭량의 관계는 여러 가지 변수가 있어 복잡하기 때문에 환자의 나이, 크기, 검사부위, 임상적 적응증, 환자상태를 고려하여 개별화된 프로토콜 및 파라미터를 선택하는 것이 필요하다. 이러한 소아의 특수성에도 불구하고 아직도 소아 전용 프로토콜을 사용하지 않는 병원들이 있어 소아에서 과다피폭이 우려가 있다. 최근 미국에서는 1995년에서 2008년 사이 응급실에서 소아의 CT사용이 5배 증가하였으며 특히 소아전문시설이 아닌 병원들에서 이런 현상이 두드러졌

다고 한다[6]. 교육을 통해 소아에서의 피폭이 문제가 된다는 인식의 변화를 가져오는 것이 피폭저감화를 위한 첫걸음이 될 것이다. 방사선을 사용하는 검사의 처방과 시행에 관여하는 모든 의사 및 미래의 의사인 학생, 실제로 검사를 시행하는 방사선사들에 대한 피폭교육을 필수화 하는 것이 권장된다. 추후 임상에서의 적용으로 이어지기 위해서는 우리나라 실정에 맞는 검사 가이드라인과 저감화 프로토콜 개발이 필요하며 이를 위해 임상과의 영상의학과 의사들이 협력을 통한 연구가 요망된다.

핵심용어: 방사선; 소아; 전산화단층촬영; 정당화; 최적화

REFERENCES

1. National Council on Radiation Protection and Measurements. Ionizing radiation exposure of the population of the United States. Bethesda (MD): National Council on Radiation Protection & Measurements; 2009.
2. Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography: an increasing source of radiation exposure. *N Engl J Med* 2007;357:2277-2284.
3. Brody AS, Frush DP, Huda W, Brent RL; American Academy of Pediatrics Section on Radiology. Radiation risk to children from computed tomography. *Pediatrics* 2007;120:677-682.
4. Mettler FA Jr, Wiest PW, Locken JA, Kelsey CA. CT scanning: patterns of use and dose. *J Radiol Prot* 2000;20:353-359.
5. Dorfman AL, Fazel R, Einstein AJ, Applegate KE, Krumholz HM, Wang Y, Christodoulou E, Chen J, Sanchez R, Nallamothu BK. Use of medical imaging procedures with ionizing radiation in children: a population-based study. *Arch Pediatr Adolesc Med* 2011;165:458-464.
6. Larson DB, Johnson LW, Schnell BM, Goske MJ, Salisbury SR, Forman HP. Rising use of CT in child visits to the emergency department in the United States, 1995-2008. *Radiology* 2011;259:793-801.
7. Brenner D, Elliston C, Hall E, Berdon W. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. *AJR Am J Roentgenol* 2001;176:289-296.
8. National Research Council. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII phase 2. Washington DC: National Academies Press; 2006.
9. Goske MJ, Phillips RR, Mandel K, McLinden D, Racadio JM, Hall S. Image gently: a web-based practice quality improvement program in CT safety for children. *AJR Am J Roentgenol* 2010;194:1177-1182.

10. Hernanz-Schulman M, Goske MJ, Bercha IH, Strauss KJ. Pause and pulse: ten steps that help manage radiation dose during pediatric fluoroscopy. *AJR Am J Roentgenol* 2011; 197:475-481.
11. Sidhu M, Goske MJ, Connolly B, Racadio J, Yoshizumi TT, Strauss KJ, Coley BD, Utley T. Image Gently, Step Lightly: promoting radiation safety in pediatric interventional radiology. *AJR Am J Roentgenol* 2010;195:W299-W301.
12. Sidhu M. Radiation safety in pediatric interventional radiology: Step Lightly. *Pediatr Radiol* 2010;40:511-513.
13. Goske MJ, Applegate KE, Bell C, Boylan J, Bulas D, Butler P, Callahan MJ, Coley BD, Farley S, Frush DP, McElveny C, Hernanz-Schulman M, Johnson ND, Kaste SC, Morrison G, Strauss KJ. Image Gently: providing practical educational tools and advocacy to accelerate radiation protection for children worldwide. *Semin Ultrasound CT MR* 2010;31:57-63.
14. Ron E. Ionizing radiation and cancer risk: evidence from epidemiology. *Pediatr Radiol* 2002;32:232-237.
15. Korley FK, Pham JC, Kirsch TD. Use of advanced radiology during visits to US emergency departments for injury-related conditions, 1998-2007. *JAMA* 2010;304:1465-1471.
16. Newman B. Ultrasound body applications in children. *Pediatr Radiol* 2011;41 Suppl 2:555-561.
17. Strouse PJ. Pediatric appendicitis: an argument for US. *Radiology* 2010;255:8-13.
18. Nazarian LN. The top 10 reasons musculoskeletal sonography is an important complementary or alternative technique to MRI. *AJR Am J Roentgenol* 2008;190:1621-1626.
19. Leyendecker JR, Barnes CE, Zagoria RJ. MR urography: techniques and clinical applications. *Radiographics* 2008;28:23-46.
20. Grattan-Smith JD, Little SB, Jones RA. MR urography in children: how we do it. *Pediatr Radiol* 2008;38 Suppl 1:S3-S17.
21. Chong AL, Grant RM, Ahmed BA, Thomas KE, Connolly BL, Greenberg M. Imaging in pediatric patients: time to think again about surveillance. *Pediatr Blood Cancer* 2010;55:407-413.
22. Ahmed BA, Connolly BL, Shroff P, Chong AL, Gordon C, Grant R, Greenberg ML, Thomas KE. Cumulative effective doses from radiologic procedures for pediatric oncology patients. *Pediatrics* 2010;126:e851-e858.
23. Goo HW. Regional and whole-body imaging in pediatric oncology. *Pediatr Radiol* 2011;41 Suppl 1:S186-S194.
24. Strauss KJ, Goske MJ, Kaste SC, Bulas D, Frush DP, Butler P, Morrison G, Callahan MJ, Applegate KE. Image gently: Ten steps you can take to optimize image quality and lower CT dose for pediatric patients. *AJR Am J Roentgenol* 2010;194: 868-873.
25. Callahan MJ. CT dose reduction in practice. *Pediatr Radiol* 2011;41 Suppl 2:488-492.
26. McCollough CH, Bruesewitz MR, Kofler JM Jr. CT dose reduction and dose management tools: overview of available options. *Radiographics* 2006;26:503-512.
27. McCollough CH, Primak AN, Braun N, Kofler J, Yu L, Christner J. Strategies for reducing radiation dose in CT. *Radiol Clin North Am* 2009;47:27-40.
28. Kim JE, Newman B. Evaluation of a radiation dose reduction strategy for pediatric chest CT. *AJR Am J Roentgenol* 2010;194:1188-1193.
29. Nieuvelstein RA, van Dam IM, van der Molen AJ. Multidetector CT in children: current concepts and dose reduction strategies. *Pediatr Radiol* 2010;40:1324-1344.
30. Yu L, Bruesewitz MR, Thomas KB, Fletcher JG, Kofler JM, McCollough CH. Optimal tube potential for radiation dose reduction in pediatric CT: principles, clinical implementations, and pitfalls. *Radiographics* 2011;31:835-848.
31. Goo HW. Individualized volume CT dose index determined by cross-sectional area and mean density of the body to achieve uniform image noise of contrast-enhanced pediatric chest CT obtained at variable kV levels and with combined tube current modulation. *Pediatr Radiol* 2011;41:839-847.
32. Schilham A, van der Molen AJ, Prokop M, de Jong HW. Over-ranging at multisection CT: an underestimated source of excess radiation exposure. *Radiographics* 2010;30:1057-1067.
33. Lee CH, Goo JM, Ye HJ, Ye SJ, Park CM, Chun EJ, Im JG. Radiation dose modulation techniques in the multidetector CT era: from basics to practice. *Radiographics* 2008;28:1451-1459.
34. Frush DP. CT dose and risk estimates in children. *Pediatr Radiol* 2011;41 Suppl 2:483-487.
35. Strauss KJ, Goske MJ. Estimated pediatric radiation dose during CT. *Pediatr Radiol* 2011;41 Suppl 2:472-482.
36. Radiological protection and safety in medicine. A report of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP* 1996;26:1-47.
37. Verdun FR, Gutierrez D, Vader JP, Aroua A, Alamo-Maestre LT, Bochud F, Gudinchet F. CT radiation dose in children: a survey to establish age-based diagnostic reference levels in Switzerland. *Eur Radiol* 2008;18:1980-1986.
38. Yakoumakis E, Karlatira M, Gialousis G, Dimitriadis A, Makri T, Georgiou E. Effective dose variation in pediatric computed tomography: dose reference levels in Greece. *Health Phys* 2009;97:595-603.
39. Muhogora WE, Ahmed NA, Alsuwaidi JS, Beganovic A, Ciraj-Bjelac O, Gershan V, Gershkevitch E, Grupetta E, Kharita MH, Manatrakul N, Maroufi B, Milakovic M, Ohno K, Ben Omrane L, Ptacek J, Schandorf C, Shaaban MS, Toutaoui N, Sakkas D, Wambani JS, Rehani MM. Paediatric CT examinations in 19 developing countries: frequency and radiation dose. *Radiat*



- Prot Dosimetry 2010;140:49-58.
40. Kim DS. Guideline for diagnostic reference level of the radiation exposure of CT examination. Seoul: National Institute of Food and Drug Safety Evaluation; 2009.
41. National Institute of Food and Drug Safety Evaluation. Technical standard for the performance of pediatric radiography. Seoul: National Institute of Food and Drug Safety Evaluation; 2010.
42. Jung AY. Dose reduction strategies in pediatric CT. Radat Health Newsl 2011;18:1-4.



Peer Reviewers' Commentary

본 논문은 최근 그 중요성이 강조되고 있는 진단적 의료영상에 의한 방사선 피폭에 대한 이해를 높이는 데 도움이 될 것으로 예상된다. 특히 방사선에 민감한 소아에서는 그 중요성은 재론의 여지가 없을 정도이다. 또한 본 논문에서는 소아에서 방사선 피폭이 없는 영상(US, MRI)에 대한 유용성과 함께 CT를 시행하기로 결정했을 때 방사선량을 어떻게 최적화할 수 있는가에 대한 개요를 기술하고 있다. 필자도 언급했듯이 최근 후쿠시마 원전사고와 관련하여 해외뿐만 아니라 국내에서도 방사선 피폭에 대한 관심이 증가되고 있어 본 논문의 게재는 시의 적절하다고 생각한다. 마지막으로 본 논문은 앞으로 보다 개선된 소아영상프로토콜을 구축하는데 기폭제가 될 것이다.

[정리:편집위원회]