황산바륨을 이용한 친환경 X선 차폐체의 개발 및 성능평가

김성준[1] · 박혜민[1] · 나찬영[1] · 한태호[1] · 김승철[2] · 김정민[1,*]

[1]고려대학교 대학원 보건안전융합과학과, [2]고려대학교 보건과학연구소

Development and Performance Evaluation of Eco-Friendly X-Ray Shields using $BaSO_4$

Sung-Joon Kim[1], Hye-Min Park[1], Chan-Young Na[1], Tae-Ho Han[1], Seung-Chul Kim[2] and Jung-Min Kim[1,*]

[1]*Department of Health and Safety Convergence Science, Korea University, B-dong Hana-Science Building, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea*

[2]*Research Institute of Health Science, Korea University, B-dong Hana-Science Building, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu Seoul 02841, Republic of Korea*

Abstract - At present, the most common substance used in radiation protection is lead. However, lead is a heavy metal that is harmful to the human body and causes environmental pollution. $BaSO_4$ is an excellent material for X-Ray shielding because it has good X-Ray shielding ability and it is cheap. In this study, we fabricated Gypsum-$BaSO_4$ (G-B) shields with gypsum and $BaSO_4$ and Cement-$BaSO_4$ (C-B) shields with cement and $BaSO_4$ and conduct two tests (X-Ray shielding test, Strength test) to evaluate the performance of the shields. First of all, G-B, C-B Shields at 15 mm thickness were fabricated to evaluate X-Ray shielding performance, including 1.0, 1.5 mm thickness lead and IKEN Board. To achieve X-Ray shielding capability of 1.5 mm lead at 100 kV X-Ray tube voltage, $BaSO_4$ content 66% G-B shield and 68% C-B shield were required. Secondly, flexural strength test was conducted for G-B and C-B shields. Test results show that at the same $BaSO_4$ content, C-B shields were stronger than G-B shields. $BaSO_4$ content 68% C-B shield was 3.5 times stronger than 66% G-B shield.

Key words : $BaSO_4$, Gypsum, Cement, X-Ray shielding, Flexural strength

서 론

의료기관 또는 산업기관에서 X선 발생장치의 사용은 질병의 진단 및 비파괴검사에 도움을 주지만 X선이 과다할 경우 백내장, 암 등의 질병을 유발할 수 있다(ICRP 2001). 따라서 X선 발생장치를 사용하는 기관은 방사선 방어시설을 설치해야 한다(원자력안전위원회 2019). 현재 방사선 방어시설의 차폐체 재료로 가장 많이 쓰이는 재료는 납(Lead)이다. 그러나 납은 여러 문제점을 가지고 있다. 첫째, 납은 중금속으로 인체에 흡수될 경우 신경, 심혈관계에 문제를 일으킬 수 있다(Kim *et al*. 2015). 특히 납은 화재 시 높은 온도(300°C)에서 액체 상태가 되어 유독가스가 발생할 수 있다(예 등 2017). 둘째, 납 차폐체는 철거 시 환경오염을 일으킬 수 있다. 일반 건물에 입주해 있는 의료기관의 경우 폐업 또는 이전 개업 시 납 차폐체의 분리수거가 적절히 이루어지지 않고 있다(이 등 2004). 방치된 납은 토양오염을

* Corresponding author: Jung-Min Kim, Tel. +82-2-3290-5685, Fax. +82-2-916-5943, E-mail. minbogun@korea.ac.kr

일으킬 수 있으며, 빗물과 접촉 시 지하수를 오염시킬 수 있다. 이러한 납의 단점들을 대체하기 위해 친환경 X선 차폐체의 개발이 필요하다.

납의 단점을 보완하기 위한 대표적인 친환경 X선 차폐 물질로 황산바륨(화학식: $BaSO_4$), 텅스텐(W), 비스무트(Bi)가 있다. 세 물질 모두 인체에 무해한 친환경 물질이면서 동시에 우수한 X선 차폐 능력을 가지고 있다. 여기서 황산바륨은 X선 차폐 능력이 납보다 다소 떨어지나 두께를 증가시킬 경우 차폐 능력을 증가시킬 수 있으며, 가격이 텅스텐, 비스무트에 비해 매우 저렴하므로 친환경 X선 차폐체의 재료로 적합한 물질이다(김 등 2013). 그러나 황산바륨은 강도가 약한 물질로, 본 실험에서는 황산바륨에 석고(Gypsum)를 혼합하여 강도를 강화한 석고-황산바륨 차폐체(이하 G-B차폐체라 한다)와 황산바륨에 시멘트(Cement)를 혼합하여 강도를 강화한 시멘트-황산바륨 차폐체(이하 C-B 차폐체라 한다)를 개발하여 두 차폐체의 X선 차폐 능력과 강도를 평가하였다.

재료 및 방법

1. 실험 대상

본 실험은 건축 재료인 석고와 황산바륨을 혼합한 G-B 차폐체와 시멘트와 황산바륨을 혼합한 C-B 차폐체를 황산바륨 무게 비 0%, 25%, 50%, 75%로 하여 100×100×15 mm^3 크기로 제작했다. 차폐체는(Fig. 1)과 같이 실험 변수별 3개씩 제작하였으며, 실험 데이터는 3개 차폐체의 평균값을 사용하였다.

2. 실험 기기 및 재료

X선 차폐 실험을 위해 X선 발생장치(GXR-S, DRGEM, Korea)와 방사선 측정장치(Radiation Monitor Controller and 6 cc Ion Chamber, RADCAL, USA)를 사용하였다. 휨강도 시험은 한국에스지에스(주) 건설시험연구원에서 휨강도 시험장치(DH-DUT-C100, DAEHAN PRECISION, Korea)를 사용하여 실험하였다.

차폐체 제작 재료로 황산바륨(BaSO4 SOLVAY 99.9%), 시멘트(Portland Cement HANJU MAXTON) 석고($CaSO_4$ MUNKYO 99%)를 사용하였다. 제작한 G-B, C-B 차폐체의 X선 차폐 성능 비교를 위해 두께 1.0 mm, 1.5 mm 납(Lead 99.9%)과 두께 15 mm IKEN Board (Lead-free Board, IKEN ENGINEERING, Japan)을 사용하였다(Katoh *et al*. 2010).

3. X선 차폐 평가

완성된 G-B, C-B 차폐체와 차폐 기준으로 사용하는 두

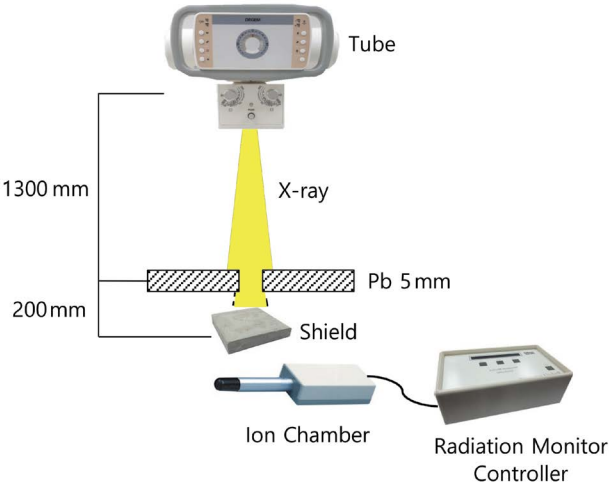

Fig. 2. Geometrical arrangement of X-Ray test.

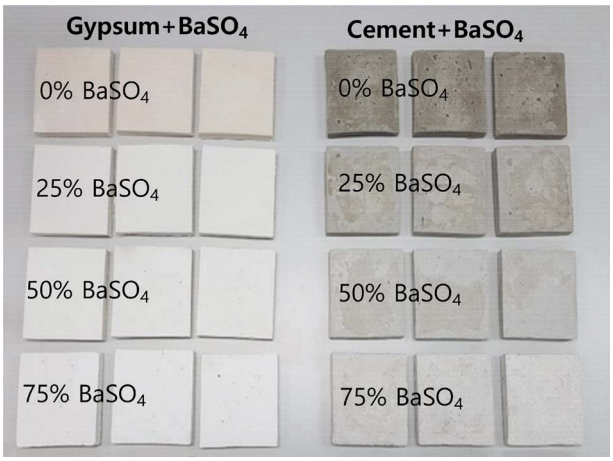

Fig. 1. G-B, C-B shields used in the test.

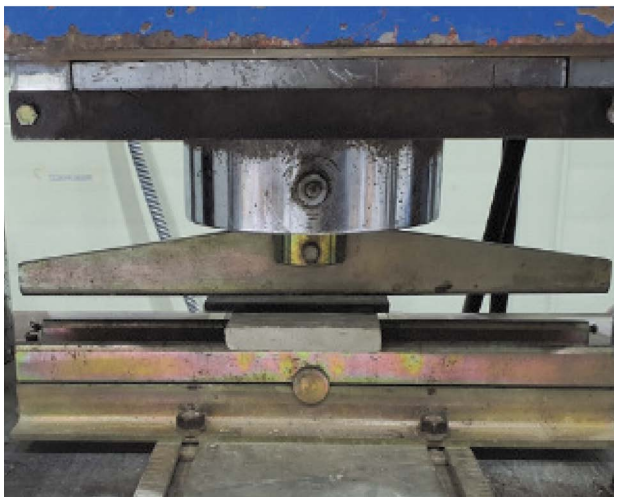

Fig. 3. Test method of flexural strength test.

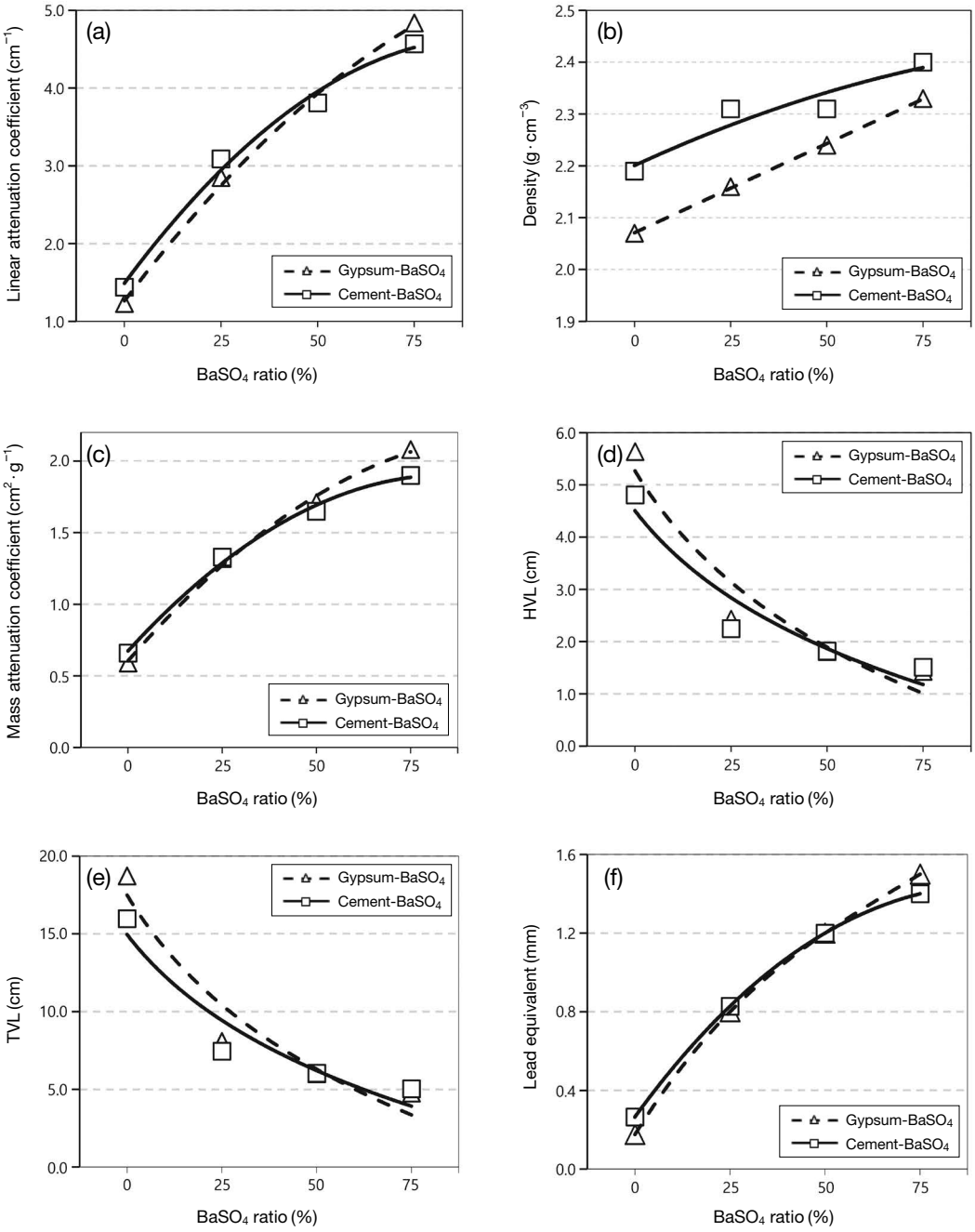

Fig. 4. Comparison of shielding characteristics for G-B, C-B shields. (a) Linear Attenuation Coefficient; (b) Density; (c) Mass attenuation coefficient; (d) Half value layer; (e) Ten value layer; (f) Lead equivalent.

께 1.0, 1.5 mm 납, IKEN Board를 관전압 80, 100 kV X선에 조사하여 차폐체의 X선 차폐율, 선감쇠계수, 질량감쇠계수, 반가층, 십분의 일가층, 납당량을 측정하였다. 차폐 실험의 기하학적 구조는 한국산업표준의 진단용 방사선에 대한 방어용구에 따라(Fig. 2)와 같이 구성하였다(한국산업표준 2013).

본 실험에서는 국내 의료기관에 사용하는 X선 관전압, 납 두께를 참고하여 두 가지 기준으로 G-B, C-B 차폐체를 평가하였다. 첫 번째로 X선 관전압 100 kV에서 1.5 mm 두께 납의 X선 차폐율로 측정된 99.84% 이상을 기준으로, 해당 X선 차폐율을 달성하려면 G-B, C-B 차폐체에 어느 정도 황산바륨을 투입하여야 하는지 확인하였다. 두 번째로 X선 관전압 80 kV에서 1.0 mm 두께 납의 X선 차폐율로 측정된 99.80% 이상을 기준으로 설정하여 첫 번째와 같은 방법으로 실험하였다.

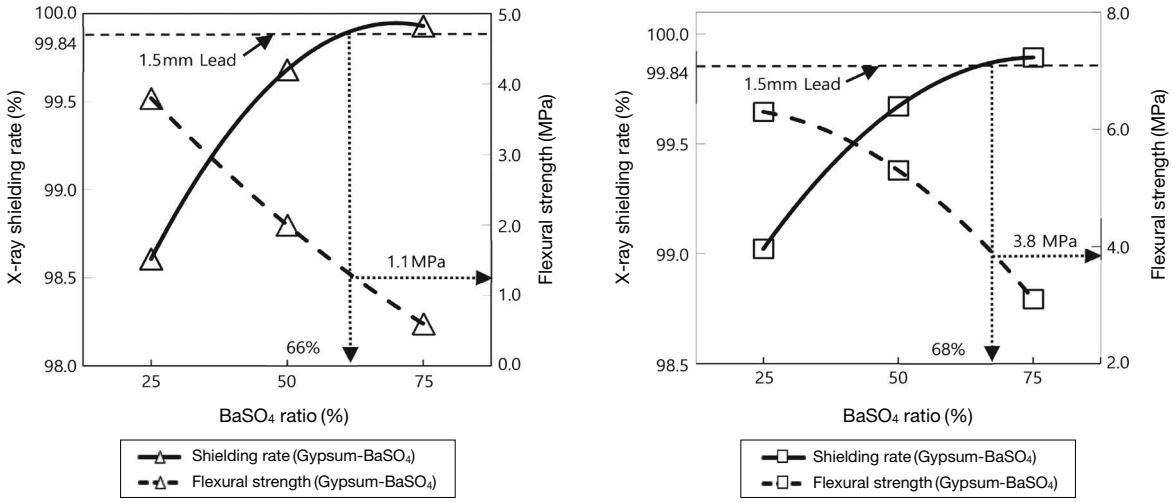

Fig. 5. Comparison of strength of G-B, C-B shields and X-ray shielding rate (100 kV).

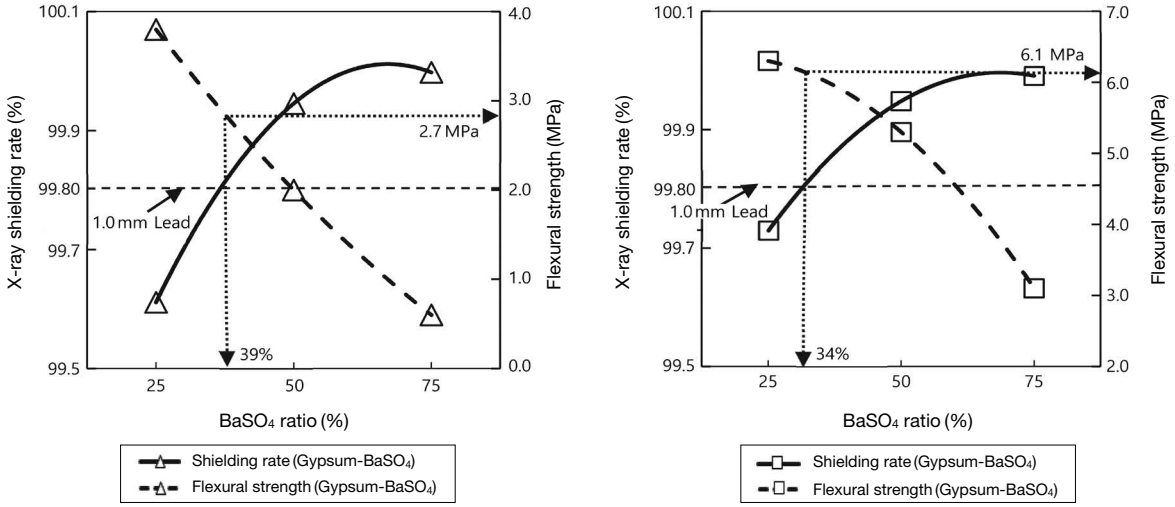

Fig. 6. Comparison of strength of G-B, C-B shields and X-ray shielding rate (80 kV).

3. 강도 평가

(Fig. 1)에서 제작한 G-B, C-B 차폐체의 강도를 평가하기 위해 휨 강도 시험을 실시하였다. 시험은 한국산업표준의 섬유강화 시멘트 판의 기준에 따라 한국에스지에스(주) 건설시험연구원에서(Fig. 3)과 같이 경간(span)을 60 mm로 설정하고 실시하였다(한국산업표준 2014). 휨 강도 시험에서 차폐체에 압력을 가하여 최대하중(N)을 구한 후 식(1)을 이용하여 휨 강도(MPa)를 구하였다.

$$R_f = \frac{3Pl}{2bt^2} \quad \text{(식 1)}$$

- Rf : 꺾임 강도(MPa)
- P : 꺾임 파괴하중(N)
- l : 시험 스팬(mm)
- b : 시험편의 너비(mm)
- t : 시험편의 두께(mm)

결 과

1. X선 차폐 평가

G-B, C-B 차폐체와 1.0 mm, 1.5 mm 납과 IKEN Board의 X선 차폐율, 선감쇠계수, 질량감쇠계수, 반가층, 십분의 일가층, 납당량을 80, 100 kV X선 관전압으로 측정하여(Fig. 4)와 같이 나타내었다. 실험 결과 황산바륨 함량이 증가할수록 두 차폐체의 X선 차폐율, 선감쇠계수, 밀도, 질량

감쇠계수, 납당량이 증가하며, 반가층, 십분의 일가층은 줄어들어 X선 차폐 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. IKEN Board는 100 kV에서 납당량 1.1 mmPb 수준의 X선 차폐 능력을 나타냈다.

X선 관전압 100 kV에서 G-B 차폐체는 황산바륨 함량 66% 이상, C-B 차폐체는 68% 이상에서 기준으로 설정한 99.84% 이상(납두께 1.5 mm 수준)의 X선 차폐율을 보였다. X선 관전압 80 kV에서 G-B 차폐체는 황산바륨 함량 39% 이상, C-B 차폐체는 34% 이상에서 기준으로 설정한 99.80% 이상(납두께 1.0 mm 수준)의 X선 차폐율을 보였다.

2. 강도 평가

G-B, C-B 차폐체의 강도 시험 결과(Figs. 5, 6)와 같이 두 차폐체의 황산바륨 함량이 늘어날수록 차폐체의 휨 강도가 감소하였다. X선 관전압 100 kV에서 황산바륨 66% 함량 G-B 차폐체, 황산바륨 68% 함량 C-B 차폐체의 휨 강도를 확인한 결과, (Fig. 5)에서 G-B 차폐체의 휨 강도는 1.1 MPa이며 C-B 차폐체는 3.8 MPa로 나타나, C-B 차폐체는 G-B 차폐체보다 휨 강도가 3.5배 강한 것으로 나타났다.

X선 관전압 80 kV에서 황산바륨 함량 39% G-B 차폐체, 황산바륨 함량 34% C-B 차폐체의 휨 강도를 확인한 결과, (Fig. 6)에서 G-B 차폐체의 휨 강도는 2.7 MPa이며 C-B 차폐체는 6.1 MPa로 나타나 C-B 차폐체는 G-B 차폐체보다 휨 강도가 2.3배 강한 것으로 나타났다.

고 찰

X선 발생장치를 사용하는 국내 의료기관 및 산업기관은 사용하는 X선의 강도에 따라 0.8~1.5 mm 두께의 납을 사용하고 있다(국토교통부 2016). 국내 의료기관의 X선 촬영실에서 사용하는 X선 관전압은 100 kV 이내 수준이며, 1.5 mm 두께의 납이 가장 많이 사용되고 있다(김 등 2005; 국립환경과학원 2011). 이 중 치과 X선 촬영실의 경우 X선 관전압은 80 kV 이내 수준이며 1.0 mm 두께 납이 가장 많이 사용되고 있다(국립환경과학원 2011; 질병관리본부 2019). 본 실험은 국내 의료기관에서 사용하는 X선 관전압, 납 두께를 참고하여 두 가지 기준으로 자체 제작한 G-B, C-B 차폐체를 평가하였다. 첫 번째로 X선 관전압 100 kV에서 1.5 mm 두께 납의 X선 차폐율로 측정된 99.84% 이상을 기준으로 설정하여 해당 X선 차폐율을 달성하려면 두께 15 mm의 G-B, C-B 차폐체에 어느 정도 황산바륨을 투입하여야 하는지 확인하였다. 두 번째로 X선 관전압 80 kV에서 1.0 mm 두께 납의 X선 차폐율로 측정된 99.80% 이상을 기준으로 설정하여 첫 번째와 같은 방법으로 실험하였다.

실험 결과 황산바륨 함량이 높아질수록 두 차폐체의 선감쇠계수, 밀도, 질량감쇠계수, 납당량이 증가하며 반가층, 십분의 일가층이 줄어들어 X선 차폐 성능이 증가하였다. 두 차폐체가 X선 관전압 100 kV에서 납 두께 1.5 mm 수준인 99.84% 이상의 X선 차폐율을 보이는지 확인한 결과, G-B 차폐체는 황산바륨 함량 66% 이상에서, C-B 차폐체는 황산바륨 함량 68% 이상에서 기준에 적합하였으며, 해당 황산바륨 함량에서 G-B, C-B 차폐체는 기존 의료기관의 X선 촬영실에서 사용하는 1.5 mm 납을 대체할 수 있는 X선 차폐율을 보이는 것으로 나타났다. X선 관전압 100 kV에서 납 1.5 mm의 차폐율인 99.84%는 자체 실험 결과로, 서호주 X선 차폐 시설 권고 자료의 같은 조건에서 X선 차폐율인 99.80%와 비교하여 0.04%의 오차가 있었다(Radiation Health Branch 2004). 제작한 차폐체가 X선 관전압 80 kV에서 납 두께 1.0 mm 수준인 99.80% 이상의 차폐율을 보이는지 확인한 결과, G-B 차폐체는 황산 바륨 함량 39% 이상에서, C-B 차폐체는 황산바륨 함량 34% 이상에서 기준에 적합하였으며, 해당 황산바륨에서 G-B, C-B 차폐체는 기존 치과 의료기관의 X선 촬영실에서 사용하는 1.0 mm의 납을 대체할 수 있는 X선 차폐율을 보이는 것으로 나타났다. X선 관전압 80 kV에서 납 1.0 mm의 X선 차폐율인 99.80%는 자체 실험결과로(McCaffery *et al*. 2007)에서 같은 조건의 X선 차폐율인 99.73 %와 비교하여 0.07%의 오차가 있었다.

G-B, C-B 차폐체의 휨 강도 시험 결과 두 차폐체의 황산바륨 함량이 증가할수록 차폐체의 휨 강도는 감소하였다. X선 관전압 100 kV에서 기준인 황산바륨 함량 66% G-B 차폐체와 68% C-B 차폐체의 휨 강도 비교 결과 C-B 차폐체는 G-B 차폐체보다 3.8배 휨 강도가 강한 것으로 나타났다. X선 관전압 80 kV에서 기준인 황산바륨 함량 39% G-B 차폐체와 34% C-B 차폐체의 휨 강도 비교 결과 C-B 차폐체가 G-B 차폐체보다 2.7배 휨 강도가 강한 것으로 나타났다. 황산바륨 함량 34% C-B 차폐체는 휨 강도는 6.1 MPa로 본 실험에서 석고(황산바륨 0%)의 휨 강도인 5.6 MPa와 시멘트(황산바륨 0%)의 휨 강도인 7.4 MPa 사이의 우수한 휨 강도를 나타내는 것으로 나타났다.

결 론

본 연구에서는 친환경 X선 차폐 물질인 황산바륨에 석고를 혼합한 석고-황산바륨(G-B) 차폐체와 시멘트를 혼합한 시멘트-황산바륨(C-B) 차폐체를 제작한 후 X선 차폐 실험과 강도 시험을 통해 기존의 납 X선 차폐체를 대체할 수 있는지 확인하였다. X선 차폐 실험 결과 두께 15 mm의 두 차폐체는 기존 의료기관 X선실에서 쓰이는 납을 대체하는 X선 차폐 능력을 가지고 있는 것으로 나타났으며, C-B 차폐

체는 G-B 차폐체보다 강도 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

국립환경과학원, 강원대학교 산학협력단. 2011. 국내 납, 카드뮴 유통 및 배출현황 기초조사.

국토교통부. 2016. X선 차폐공사, KS 41 70 06.

김선칠, 김교태, 박지군. 2013. 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 바륨화합물의 의료 방사선 차폐능 비교 분석. 한국방사선학회지 **10**(8):403-408.

김유현, 최종학, 김성수, 이창엽, 조평곤, 이영배, 김철민. 2005. 진단방사선영역에서 방사선장치의 이용실태 및 환자피폭선량 조사연구. 의학물리 **16**(1):10-15.

예신희, 김현주, 정최경희, 김지은, 박신원, 이유민, 하은희. 2017. 리뷰: 화재현장에서 노출될 수 있는 화학적 유해물질과 파킨슨병 간의 관련성. 생물정신의학지 **24**(1):19-25.

원자력안전위원회. 2019. 원자력안전위원회 고시 제2019-10호, 2019.5.10.

이익진, 안규동, 조광성, 김남수, 이성수, 이병국. 2004. 납 사업장 내 토양오염에 관한 연구. 한국산업위생학회지 **14**(3):290-300.

질병관리본부, 단국대학교 산학협력단. 2019. 환자 촬영종류별 진단참고수준 마련: 치과촬영장치.

한국산업표준. 2013. 진단용 X선 방사선에 대한 방어용구-제1부: 재료와 감쇠 특성 결정, KS C IEC 61331-1.

한국산업표준. 2014. 섬유강화 시멘트판, KS L 5114.

ICRP 2001. Radiation and Your Patient: A Guide for medical Practitioners, ICRP committee 3.

Katoh Y, Tsukada M, Mita S, Fukushi M, Nyui Y, Abe S and Kimura J. 2010. Shielding Evaluation of Lead-free Boards for Diagnostic X-Rays. *JSRT* **66**:1555-1560.

Kim HC, Jang TW, Chae HJ, Choi WJ, Han MN and Ye BJ. 2015. Evaluation and management of lead exposure. *Ann. Occup. Environ. Med.* **27**(30):1-9.

McCaffrey JP, Shen H, Downton B and Mainegra-Hing E. 2007. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. *Med. Phys.* **34**(2):530-537.

Western Australia Radiation Health Branch. 2004. General shielding requirement for diagnostic X-Ray facilities.

Received: 23 January 2020
Revised: 2 February 2020
Revision accepted: 15 February 2020