

비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성능 및 중성자 차폐성능 평가

Mechanical Properties and Neutron Shielding Performance of Concrete with Amorphous Boron Steel Fiber

이 준 철 김 화 중*

Lee, Jun Cheol Kim, Wha Jung*

School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University, Buk-Gu, Daegu, 702-701, Korea

Abstract

Mechanical properties and neutron shielding performance of concrete with amorphous boron steel fiber have been investigated in this study. The measurement of this investigation includes air contents, slump loss, compressive strength, flexural strength, flexural toughness and neutron shielding rate. Four different fiber volume fractions were selected ranging from 0.25% to 1.0% by volume for the amorphous boron steel fibers. The testing results showed that the flexural toughness and the neutron shielding rate were increase with the increase of volume fraction for amorphous boron steel fiber. Based on the result, it is concluded that the concrete with the amorphous boron steel fiber can be effectively applied to shield the neutron and to improve mechanical properties.

Keywords : amorphous boron steel fiber, neutron shielding rate, radiation shielding concrete, boron, fiber reinforced concrete

1. 서 론

콘크리트는 원전구조물 등 방사선 차폐구조물에 사용되고 있는 재료 중 하나이다[1,2]. 콘크리트의 차폐성능은 차폐물체의 두께가 동일하면 밀도에 비례하고, 밀도가 동일하면 두께에 비례를 하게 된다. 즉, 감마선의 차폐성능은 차폐물질의 단위면적당 질량에 대부분 비례를 하게 된다[1]. 이로 인해 원전건설에 있어서는 감마선을 차폐하기 위한 방안으로 단위중량이 큰 골재를 사용하여 중량의 콘크리트를 제조하여 사용하고 있다. 하지만 중성자선의 경우에는 이와는 조금 다른 경향을 나타내게 된다. 중성자선의 경우 콘크리트 내부에서 흡수됨과 동시에 에너지원에 따른 2차 감마선이 발생하기 때문에 감마선의 차폐성능과 같이 차폐재의

두께와 밀도에는 큰 영향을 받지 못한다[3]. 이로 인해 일반적으로 차폐콘크리트에 있어서 중성자선을 흡수하기 위해 2차 감마선을 발생시키지 않고 중성자선을 흡수하는 원소를 혼입하여 사용하게 된다. 이러한 원소의 대표적인 것이 붕소이다.

이와 같이 차폐콘크리트에 있어서 중성자선을 흡수하기 위해서 붕소계열의 파우더를 콘크리트의 혼화재료로 사용하는 연구가 다수 진행되고 있다[4]. 하지만 중성자 차폐 특성을 위해 붕소 파우더의 함량을 지속적으로 증가시킬수록 콘크리트 밀도의 감소로 인해 강도 등 역학적 성능이 급격하게 저하된다는 문제점을 가지고 있다[5,6]. 또한 콘크리트의 경우 장기간 방사선 조사 후에 탄성계수와 인장강도가 50% 이상 현저하게 저하되는 점을 감안할 때 중성자선을 흡수하기 위해 혼입되는 탄화붕소는 문제의 소지가 될 수도 있다 [7]. 특히 후쿠시마 원전과 같이 지진하중이 발생할 경우 설계 강도보다 현저히 저하된 인장강도로 인한 구조물의 균열 발생 등으로 방사선 유출 우려 및 구조물의 안전성 등에

Received : August 19, 2016

Revision received : October 20, 2016

Accepted : November 15, 2016

* Corresponding author : Kim, Wha Jung

[Tel: 82-53-950-5596 E-mail: kimwj@knu.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

큰 문제를 나타낼 수도 있다. 이러한 문제로 인해 차폐 콘크리트에 있어서 중성자를 효율적으로 흡수하는 동시에 콘크리트의 역학적 성질을 저하시키지 않은 새로운 소재 및 공법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 상기의 문제를 해결하기 위해 중성자 흡수능력이 높은 비정질 붕소강 섬유를 이용하여 콘크리트에 적용시킴으로써 콘크리트의 중성자 차폐성능을 높이는 동시에 역학적 성질을 개선시킨 차폐 콘크리트를 개발하고자 한다. 이를 위한 선행연구로 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성능 및 중성자 차폐성능을 평가하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 사용재료

본 실험에서는 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트를 제조하기 위하여 설계배합강도는 35MPa로 설정하였다. Table 1과 같이 물-시멘트비는 52%, 목표슬럼프 및 공기량은 각각 150 ± 20 mm, $3.5 \pm 1.0\%$ 를 만족하도록 배합설계를 실시하였다. Table 2는 Plain 콘크리트에 대한 단위용적 배합을 나타낸 것이다. 비정질 붕소강 섬유의 혼입비는 콘크리트 체적대비 각각 0.25vol.%, 0.5vol.%, 0.75vol.%, 1.0vol.%로 하였다.

Table 1. Experimental design

Type	Water to cement ratio (%)	Air contents (%)	Slump (mm)	Amorphous boron fiber (vol.%)
Plain				-
B-0.25	52	3.5 ± 1.0	150 ± 20	0.25
B-0.50				0.50
B-0.75				0.75
B-1.00				1.00

Table 2. Mixing proportion for plain concrete

W/C	S/a (%)	Unit weight (kg/cm ³)		
		OPC	G	S
0.52	49	360.58	840.47	857.15

NOTE : W/C= water to cement ratio, S/a=sand to coarse aggregate ratio, OPC=ordinary Portland cement, S=Sand, G=Gravel

Table 3. Physical properties of amorphous boron steel fiber

Type	Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Boron content (%)
Ribbon	0.021	1.0	10	2,219.2	4.88

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201의 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다[8]. 골재의 경우 경북 낙동산 강모래를 잔골재로 사용하였으며, 경북 칠곡산 25mm 부순골재를 굵은 골재로 사용하여 표준입도범위를 만족하도록 입도 조절하였다.

본 실험에 사용된 비정질 붕소강 섬유는 전해철, 페로붕소, 순금속(Gd, Mo, Cr)을 모합금으로 사용하여 Melt spinner를 통해 리본형태로 제조하였으며, $Fe_{72}-B_{24.55}-Mo_3-Gd_{0.5}$ 의 원자분율을 가지고 있다. Figure 1은 본 실험에 사용된 비정질 붕소강 섬유와 이를 제조하기 위한 장비를 나타낸 것이며, Table 3은 비정질 붕소강 섬유의 물리적인 성질을 나타낸 것이다.



Figure 1. Amorphous boron steel fiber

2.2 시편의 제조

콘크리트는 강제식 팬믹서를 이용하여 배합을 실시하였으며, 배합이 완료된 이후 공기량, 슬럼프 시험을 즉각 실시한 후 공시체를 제작하였다. 압축시편의 경우 지름 10cm, 높이 20cm의 원주형 공시체로 제작하였으며, 휨시편의 경우 가로 10cm, 세로 10cm, 길이 40cm의 각주형 공시체로 제작하였다. 중성자 차폐시험용 시편의 경우 지름 10cm, 높이 6cm의 원주형 공시체로 제작하였다. 제작된 공시체는 $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도에서 24시간 보관하였으며, 이후 탈형을 실시하여 각 실험 재령일까지 $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도로 습윤양생을 실시하였다.

2.3 실험방법

본 실험에서는 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성으로 KS F 2421 및 KS F 2594에 의거 공기량, 슬럼프를 측정하였다 [9, 10].

경화된 콘크리트의 역학적 특성으로 압축강도와 휨강도를 측정하였다. 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 의거 재

령 3일, 7일, 28일의 시편을 이용하여 측정하였다[11]. 콘크리트의 휨강도는 KS F 2408에 의거 재령 28일의 시편을 이용하여 측정하였으며, 하중-변위 곡선을 이용하여 ASTM C 1609에 의거 휨인성을 평가하였다[12,13].

콘크리트의 중성자 차폐실험은 중성자 방출률이 $2.334 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 인 $^{241}\text{Am-Be}$ 를 중성자 선원(확장불확도 2%, 신뢰수준 약 95%)으로 이용하였으며, 민감도가 3.163cm^2 인 $\text{SP}_9 \text{ } ^3\text{He}$ 비례계수기(확장불확도 2%, 신뢰수준 약 95%)를 이용하여 열중성자를 검출하였다. 중성자 선원에서 방출되는 중성자를 폴리에틸렌 감속재를 이용하여 열중성자로 변환시켰으며, 폴리에틸렌 감속재 주변은 납벽돌로 차폐하였다. 열중성자 검출기는 산란 중성자를 차단하기 위해 전면부를 제외한 나머지 부분을 카드뮴으로 차폐시켰으며, 중성자 선원으로부터 거리 13.5cm에 열중성자 검출기를 설치하였다. 이후 차폐시험 시료가 없는 대기상태에서 중성자 계수율을 측정하였으며, 이를 중성자 차폐율 제로상태로 설정하였으며, 이후 중성자 선원과 열중성자 검출기 사이에 재령 28일의 각 콘크리트 시편을 거치한 후 중성자 계수율을 측정하였다. Figure 2는 실험에 사용된 중성자 차폐시험장치와 중성자 선원을 나타낸 것이다.



Figure 2. Experimental setup for neutron shielding performance test

3. 실험결과 및 분석

3.1 공기량 및 슬럼프값

Figure 3은 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 공기량 및 슬럼프값을 나타낸 것이다. 공기량의 경우 Plain 시편은 3.2%로 나타났으며, 비정질 강섬유를 혼입한 시편은 3.0~3.3% 범위를 나타냈다. 콘크리트에 혼입되는 비정질 붕소강 섬유의 양이 1.0vol.%가 될 때까지는 콘크리트 공기량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 반면, 슬럼프

값의 경우 혼입되는 비정질 붕소강 섬유의 양이 증가할수록 저하되는 것으로 나타났으며, 이는 리본타입의 비정질 붕소강 섬유의 넓은 비표면적으로 인해 콘크리트의 부착면이 증가하여 워커빌리티를 저하시켰기 때문으로 판단된다.

비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 섬유 혼입율이 증가할수록 작업성이 다소 불리하지만, 혼입율 1.0vol.% 수준까지는 목표슬럼프를 만족하며 배합시 섬유 불 현상이 발생하지 않았다는 점에서 작업성은 문제가 없는 것으로 판단된다.

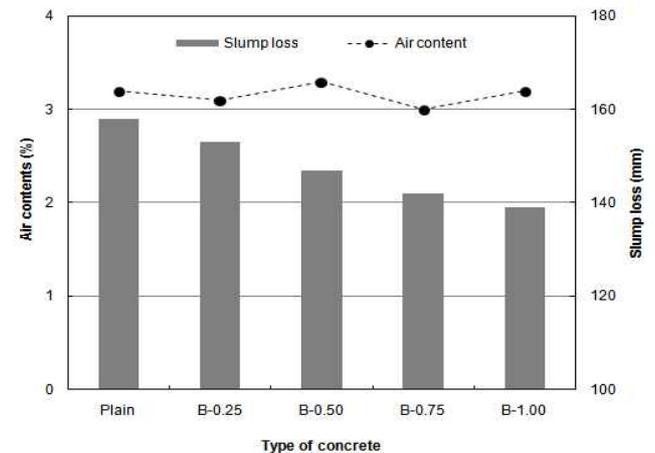


Figure 3. Air contents and slump loss of concrete with amorphous boron steel fiber

3.2 압축강도

Figure 4는 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 각 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 시편의 경우 각 재령에서 Plain 시편과 대비하여 상대적으로 압축강도의 저하를 나타냈다. 특히 재령 7일 및 28일에서는 비정질 붕소강 섬유의 혼입량이 증가할수록 압축강도가 상대적으로 저하하는 경향을 나타냈다. 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 시편의 경우 재령 28일에서의 압축강도는 목표강도인 35MPa를 상회하나, 혼입비 1.0vol.% 수준에서 Plain 시편과 비교시 상대적으로 약 16% 가량의 압축강도 감소를 나타냈다.

하지만 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트는 압축강도 증진보다는 휨강도 및 휨인성 개선을 주목적으로 사용하기 때문에 비정질 붕소강 섬유의 혼입비 1.0vol.%까지는 압축강도가 약간 저하되더라도 사용상의 문제는 없는 것으로 판단된다.

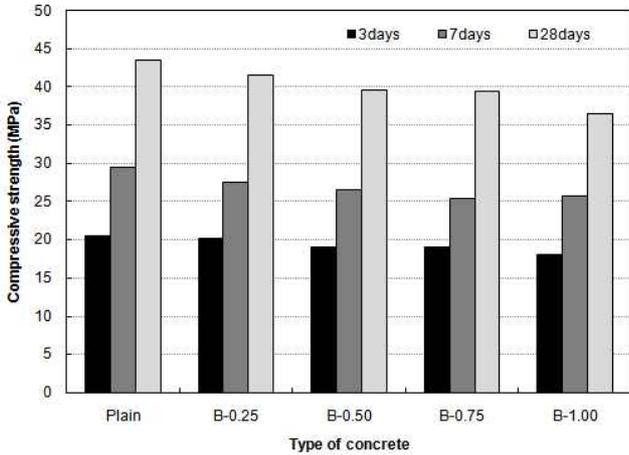


Figure 4. Compressive strength of concrete with amorphous boron steel fiber

3.3 휨강도 및 휨인성

Figure 5는 재령 28일에서의 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 휨실험을 통해 획득된 하중-변위 곡선을 나타낸 것이며, Figure 6은 각 시편의 휨강도를 나타낸 것이다. 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 시편의 경우 재령 28일에서의 휨강도는 섬유의 혼입비에 상관없이 약 5.3MPa로 거의 일정하게 나타났다. 또한 Plain 시편과의 비교시 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 시편의 경우 유사한 휨강도를 나타내 비정질 붕소강 섬유의 혼입이 1.0vol.%까지는 콘크리트의 휨강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

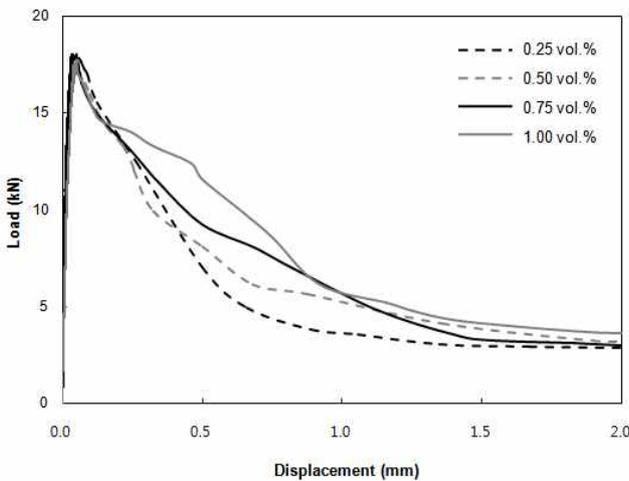


Figure 5. Load-displacement curve of concrete with amorphous boron steel fiber

Figure 7은 재령 28일에서의 비정질 붕소강 섬유를 혼입

한 콘크리트의 휨인성을 나타낸 것이다. Figure 5에서 보듯이 Plain 시편의 경우 최대하중 이후 시편이 완전히 파손되지만, 비정질 붕소강 섬유가 혼입된 시편의 경우 최대하중 이후 시편이 파손되더라도 섬유에 의해 휨인성이 발현되는 것을 알 수 있다. 혼입되는 비정질 붕소강 섬유의 양이 1.0vol.%까지 증가할수록 휨인성은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

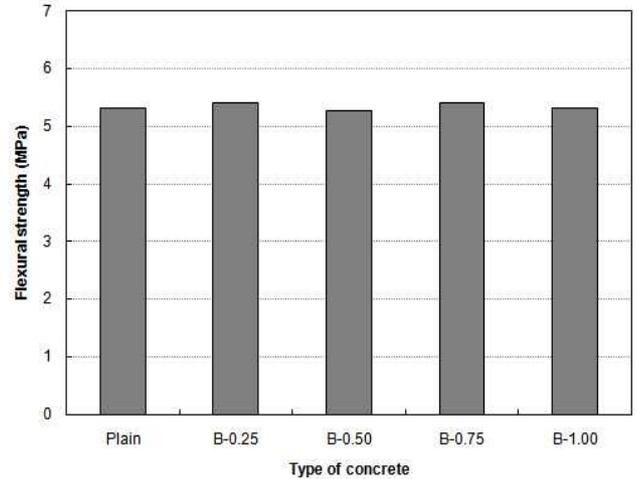


Figure 6. Flexural strength of concrete with amorphous boron steel fiber

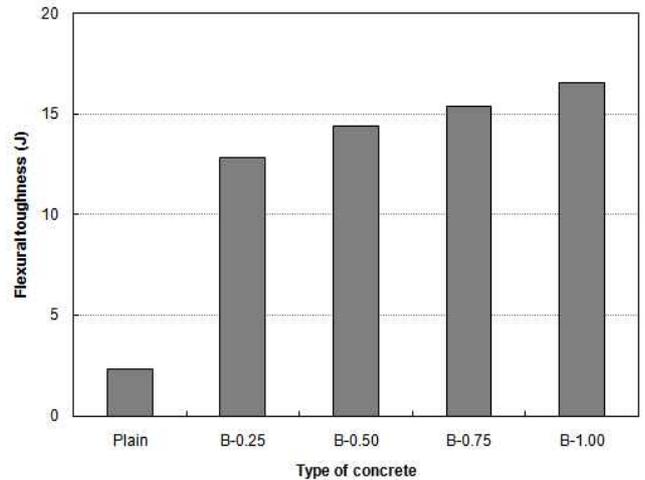


Figure 7. Flexural toughness of concrete with amorphous boron steel fiber

3.4 중성자 차폐성능

Table 4와 Figure 8은 중성자 차폐시험을 통해 측정된 각 시편의 중성자 계수율과 차폐율을 나타낸 것이며, Figure 9는 Plain 시편과 대비하여 비정질 붕소강 섬유를 혼입한

시편의 상대적인 차폐성능을 나타낸 것이다. 대기 중에서 측정된 중성자 계수율과 비교시 Plain 시편의 경우 중성자 계수율이 66.4% 가량 감소되는 것으로 나타나 콘크리트 자체의 중성자 차폐성능을 확인할 수 있었다. 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 경우 Plain 시편과 대비하여 상대적으로 높은 중성자 차폐성능을 나타냈다. 또한 혼입되는 비정질 붕소강 섬유의 양이 증가할수록 중성자 차폐성능이 향상되는 것으로 나타났다. 비정질 붕소강 섬유의 혼입율이 1.0vol.%까지 증가할수록 중성자 차폐율은 최소 83.5%에서 최대 91.3% 수준까지 증가하였으며, Plain 시편과 대비하여 상대적으로 약 1.26배에서 1.38배까지의 중성자 차폐성능을 나타냈다. 이를 통해 콘크리트에 비정질 붕소강 섬유의 혼입이 중성자 포획에 있어서 효과적이라는 것을 알 수 있다.

Table 4. Neutron shielding performance of concrete

Type	Neutron counting rate (s ⁻¹)	Neutron shielding rate (%)
Air	36.9	0.00
Plain	12.4	66.4
B-0.25	6.1	83.5
B-0.50	4.5	87.8
B-0.75	3.8	89.7
B-1.00	3.2	91.3

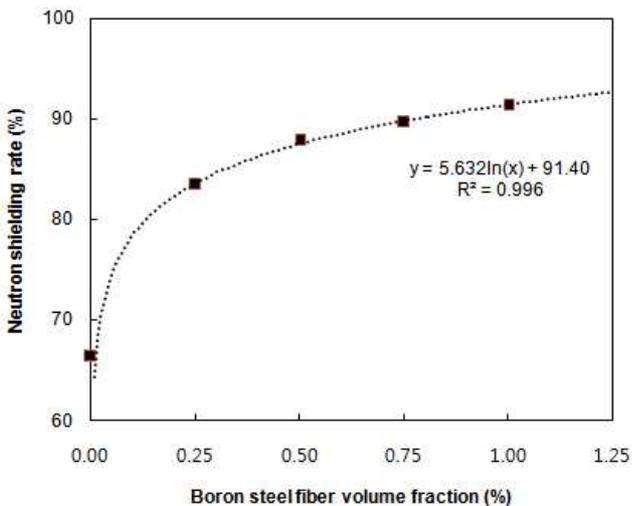


Figure 8. Neutron shielding rate as function of fiber volume fraction

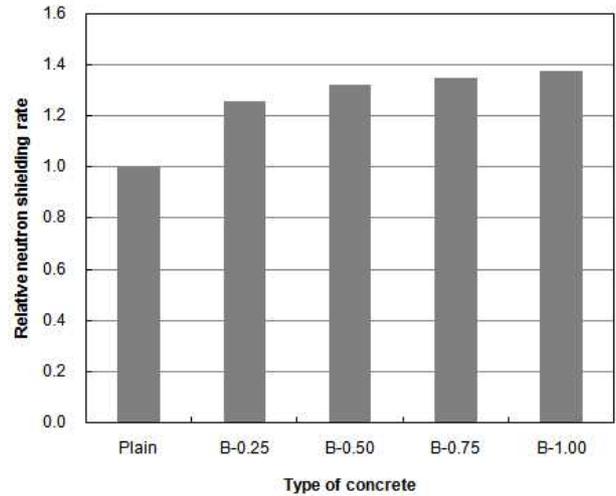


Figure 9. Relative neutron shielding rate of concrete with amorphous boron steel fiber

4. 결 론

본 연구에서는 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성과 중성자 차폐성능에 대해 평가하였으며, 본 연구의 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 공기량은 섬유 혼입율 1.0vol.% 수준까지는 Plain 콘크리트와 비교하여 큰 변화가 없었으나, 슬럼프값의 경우 섬유 혼입율이 증가할수록 저하되는 것으로 나타났다. 이는 비정질 붕소강의 형상이 리본형태로 시멘트 페이스트와의 부착면적이 커져 작업성을 저해하기 때문으로 판단된다.
- 2) 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트는 섬유의 혼입율이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 섬유혼입율 1.0vol.% 수준까지는 설계배합 강도를 상회하는 것으로 나타나 사용상의 문제는 크게 없을 것이라고 판단된다.
- 3) 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트는 섬유혼입율 1.0vol.% 수준까지는 Plain 콘크리트와 비교하여 휨강도의 큰 변화는 나타내지 않았다. 하지만, 섬유 혼입율이 증가할수록 휨인성이 증가하는 것으로 나타났다.
- 4) 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트는 섬유 혼입율이 증가할수록 중성자 차폐성능이 향상되는 것으로 나타났다. 섬유 혼입율이 0.25vol.%에서 1.0vol.%까지

증가할수록 Plain 콘크리트와 비교하여 중성자 차폐 성능이 상대적으로 1.26배에서 1.38배까지 향상되는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 사용된 비정질 붕소강 섬유는 제조단가 등 경제적인 측면의 해결과 붕소함량을 높이는 원천기술을 확보에 대한 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결한다면 향후 원전시설물 뿐만이 아니라 중성자 차폐 성능이 요구되는 콘크리트 구조물에 효과적으로 사용되어질 수 있을 것이라 기대된다.

요 약

본 연구에서 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성능 및 중성자 차폐 성능을 평가하였다. 비정질 붕소강 섬유를 콘크리트 체적 대비 0.25%에서 1.0%까지 혼입하여 굳지 않은 콘크리트의 공기량과 슬럼프값, 경화된 콘크리트의 압축강도, 휨강도, 휨인성 및 중성자 차폐 성능을 평가하였다. 실험결과, 비정질 붕소강 섬유의 혼입량이 증가할수록 콘크리트의 휨인성 및 중성자 차폐 성능이 향상되는 것으로 나타났다. 이를 통해 비정질 붕소강 섬유의 혼입이 중성자 차폐 성능 뿐만 아니라 역학적 성능을 효과적으로 개선시켜 줄 것이라고 기대된다.

키워드 : 비정질 붕소강 섬유, 중성자 차폐율, 차폐콘크리트, 붕소, 섬유보강 콘크리트

Acknowledgement

This research was supported by a grant(16RDRP-B076268-03) from R&D Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

References

1. Mehta PK, Monterio PJM, Concrete : Microstructure, Properties, and Materials, 3rd rev. New York: McGraw-Hill; 2006. p. 14.
2. Singh KJ, Singh N, Kaundal RS, Singh K, Gamma-ray shielding

- and structural properties of PbO-SiO₂ glasses. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research . 2008 Mar;266(6):944-8.
3. Kaplan MF. Concrete Radiation Shielding. Harlow: Longman; 1989. 476 p.
4. Kharita MH, Yousef S, AlNassar M, Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete. Progress in Nuclear Energy. 2011 Mar;53(2):207-11.
5. Abdullah Y, Yusof MR, Muhamad A, Samsu Z, Abdullah NE, Cement-boron carbide concrete as radiation shielding material. Journal of Nuclear and Related Technologies. 2010 Dec;7(2):74-9.
6. Abdullah Y, Ariffin FN, Hamid R, Yusof MR, Zali NM, Ahmad MHARM, Mohamed AA, Preliminary study of neutron absorption by concrete with boron carbide addition. In: Mohamed AA, Idris FM, Wood AK, editors. Proceedings of the International Nuclear Science, Technology & Engineering Conference 2013; 2013 Sep 30-Oct 2; Kuala Lumpur, MY. Melville(NY): AIP Publishing. c2014. p. 101-4.
7. Korea Concrete Institute. New Concrete Engineering. Seoul: Kimoonang; 2007. p. 714-32.
8. KS L 5201. Portland cement. Korean Standard Association, Seoul. 2013.
9. KS F 2421. Standard Method for air content of fresh concrete by the pressure method (air receiver method). Korean Standard Association, Seoul. 2011.
10. KS F 2594. Standard Method of test for slump flow of fresh concrete. Korean Standard Association, Seoul. 2015.
11. KS F 2408. Standard test method for flexural strength of concrete. Korean Standard Association, Seoul. 2015.
12. ASTM C1609/C1609M-12. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2012.