

붕규산유리 및 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성능 및 중성자 차폐성능 평가

Mechanical Properties and Neutron Shielding Rate of Concrete with Borosilicate-Glasses and Amorphous Boron Steel Fiber

이준철^{1*}Jun-Cheol Lee^{1*}

(Received August 23, 2016 / Revised September 9, 2016 / Accepted September 12, 2016)

In this study, the mechanical properties and the neutron shielding rate of concrete with the borosilicate glass and the amorphous boron steel fiber were investigated. The measures of this investigation includes air contents, slump loss, compressive strength, static modulus of elasticity, compressive toughness, flexural strength, flexure toughness and neutron shielding rate. As a result, the neutron shielding rate of the concrete with borosilicate glasses increased even though the compressive strength and flexural strength decreased in comparison with that of plain concrete. Also, the mechanical toughness and the neutron shielding rate of the concrete with amorphous boron steel fiber increased in comparison with that of plain concrete.

키워드 : 붕규산 유리, 비정질 붕소강 섬유, 중성자 차폐, 차폐콘크리트

Keywords : Borosilicate glass, Amorphous boron steel fiber, Neutron shielding, Radiation shielding concrete

1. 서론

콘크리트는 감마선 차폐와 중성자 차폐에 많이 사용되어지는 재료 중 하나이다(Neville 2000; Singh et al. 2008). 감마선 차폐 성능은 차폐물질의 단위면적당 질량에 비례하기 때문에 원전건설 등에 있어서는 감마선을 차폐하기 위해 단위중량이 큰 중량골재를 사용하여 콘크리트를 제조하고 있다(Neville 2000). 하지만 중성자선의 경우에는 콘크리트 내부에서 중성자선의 흡수와 함께 에너지에 따른 2차 감마선을 방출한다. 이러한 이유로 중성자선원의 차폐는 감마선과는 달리 콘크리트의 두께와 밀도에 크게 영향을 받지 못한다(Kaplan 1989). 이로 인해 중성자선을 흡수하면서 2차 감마선을 발생시키지 않는 붕소 등의 원소를 콘크리트에 혼입하여 사용하고 있다(Kharita et al. 2011).

이러한 중성자선을 흡수하고 2차 감마선을 발생시키지 않은 재료로 콘크리트에 가장 많이 사용되고 연구되어지는 것은 탄화붕소

(B₄C)이다(Kharita et al. 2011). 하지만 탄화붕소의 경우 콘크리트 내의 함량이 증가할수록 콘크리트 밀도를 감소시켜 이로 인해 강도 등 역학적 성능이 급격하게 저하되는 문제점을 가지고 있다(Abdullah et al. 2010, 2014). 이러한 문제로 인해 차폐 콘크리트에 있어서 중성자를 효율적으로 흡수하는 동시에 콘크리트의 역학적 성질을 저하시키지 않은 새로운 소재 및 공법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 콘크리트의 중성자 차폐성능을 향상시키며 콘크리트의 역학적 성능을 확보하기 위한 새로운 소재로 붕규산 유리 및 비정질 붕소강 섬유의 가능성을 평가하였다. 이를 위해 콘크리트의 주요 재료인 잔골재를 붕규산 유리로 치환한 콘크리트와 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성능과 중성자 차폐성능을 평가하여 기초적인 자료를 제시하였다.

* Corresponding author E-mail: uggenius@hanmail.net

¹박사 후 연구연구원, 경북대학교 대경권국토교통기술지역거점센터 (Daekyung Regional Research and Development Center for Infrastructure Technology, Kyungpook University, Daegu, 41566, Korea)

2. 실험내용 및 방법

2.1 실험계획 및 사용재료

본 실험에서는 붕규산 유리와 비정질 붕소강 섬유가 콘크리트의 역학적 특성 및 중성자 차폐성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 Table 1과 같이 실험을 실시하였다.

본 연구에서는 콘크리트 설계배합강도를 35MPa로 설정하였으며, 이를 위해 Plain 콘크리트의 물시멘트비(W/C)는 40%, 잔골재율(S/a)은 32%인 배합으로 설정하였으며 목표공기량 3.5±1.0%, 목표슬럼프 150±20mm를 만족하도록 배합설계를 실시하였다. Table 2는 본 실험에서의 Plain 콘크리트의 배합비를 나타낸 것이다.

Plain 콘크리트와 대비하여 길이 10mm의 비정질 붕소강섬유를 콘크리트 체적 대비 1.0 vol.%를 혼합한 콘크리트와 잔골재를 붕규산 유리로 중량비 100%를 치환한 콘크리트를 실험 변수로 두었다.

Table 1. Experimental design

| Type | Air contents (%) | Slump (mm) | Amorphous boron fiber (vol.%) | Fine aggregate | |
|-------|------------------|------------|-------------------------------|----------------|--------------------|
| | | | | Sand | Borosilicate glass |
| Plain | 3.5±1.0 | 150±20 | - | ✓ | - |
| Py | | | - | - | ✓ |
| BF | | | 1.0 | ✓ | - |
| Py-BF | | | 1.0 | - | ✓ |

Table 2. Physical properties of amorphous boron steel fiber

| W/C | S/a (%) | Unit weight(kg/cm ³) | | |
|-----|---------|----------------------------------|-------|--------|
| | | OPC | S | G |
| 0.4 | 32 | 437.1 | 539.4 | 1178.1 |

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

본 실험에서는 KS L 5201의 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재의 경우 2mm이하의 입도 조절된 경북 낙동산 강모래, 굵은 골재의 경우 표준 입도범위를 만족하는 최대치수 25mm 이하의 경북 칠곡산 부순골재를 사용하였다.

본 실험의 비정질 붕소강 섬유는 전해철, 페로붕소, 순금속(Gd, Mo, Cr)을 혼합금으로 사용하여 제조된 리본형태의 섬유로 중량대비 4.88%의 붕소 함유량을 가지고 있다. Table 3은 비정질 붕소강 섬유의 물리적인 성질을 나타낸 것이다.

본 실험에서 잔골재 치환용으로 사용된 붕규산 유리는 독일 D사의 제품으로 물리화학적인 성능은 Table 4와 같으며, 2mm이하

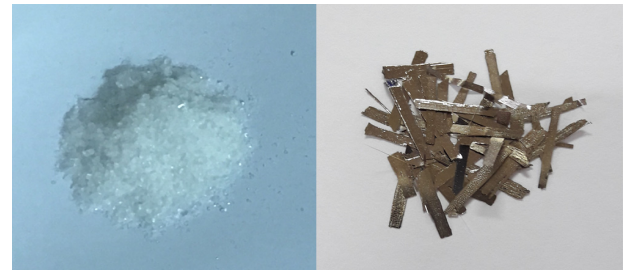
로 입도 조절된 분말을 사용하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 붕규산 유리와 비정질 붕소강 섬유를 나타낸 것이다.

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 |

Table 4. Physical and chemical properties of borosilicate glass

| Density | Elastic modulus (N/mm ²) | Chemical composition(weight %) | | | |
|---------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | | SiO ₂ | B ₂ O ₃ | Na ₂ O +K ₂ O | Al ₂ O ₃ |
| 2.23 | 63×10 ³ | 81 | 13 | 4 | 2 |



(a) Borosilicate glass (b) Amorphous boron steel fiber

Fig. 1. Borosilicate glass and amorphous boron steel fiber

2.2 시편의 제조

본 실험에서의 콘크리트는 강제식 팬믹서를 이용하여 배합을 실시하였으며, 배합이 완료된 이후 공기량, 슬럼프 시험을 실시한 후 시편을 제작하였다. 압축시편은 지름 10cm, 높이 20cm의 원주형 공시체로 제작하였으며, 휨시편은 폭 10cm, 높이 10cm, 길이 40cm의 각주형 공시체로 제작하였다. 중성자 차폐시험용 시편은 지름 10cm, 높이 5cm의 원주형 공시체로 제작하였다. 제작된 시편은 21±2℃의 온도에서 24시간 보관하였으며, 이후 탈형을 실시하여 각 실험 재령일까지 21±2℃의 온도로 습윤양생을 실시하였다.

2.3 실험방법

본 실험에서는 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성으로 KS F 2421와 KS F 2594에 의거 공기량과 슬럼프값을 측정하였다.

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 의거 재령 3일, 7일, 28일에 측정하였으며, 압축시 변형 측정은 JSCE-SF5에 의거 실시하였다. 경화된 콘크리트의 압축강도 실험을 통해 획득된 응력-변형

를 데이터값을 이용하여 최대 응력의 1/30내의 가장 근접한 측정 값을 이용하여 콘크리트의 정탄성계수를 산출하였다(Poon et al. 2004). 콘크리트의 압축인성은 JSCE-SF5와 Nataraja(1999), Poon (2004)에 의한 기존연구에서 사용한 시험체 길이의 0.75%의 변형률 값을 기준으로 하여 응력-변형률 곡선 아래의 면적을 산출하였다.

콘크리트의 휨강도는 재령 28일째의 시편을 이용하여 KS F 2408에 의거 측정하였으며, 측정된 하중-변위 데이터를 이용하여 ASTM C 1609에 의거 시편의 휨인성을 평가하였다.

콘크리트의 중성자 차폐 실험에서는 중성자 방출률이 $2.334 \times 10^5 \text{s}^{-1}$ 인 $^{241}\text{Am-Be}$ 를 중성자 선원으로 이용하였으며, SP_9 ^3He 비례계수기를 이용하여 열중성자를 검출하였다. 중성자 선원에서 방출되는 중성자는 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 설정하였다. 이후 중성자 선원과 열중성자 검출기 사이에 각 콘크리트 시편을 거치한 후 중성자 계수율을 측정하였다. Fig. 2는 본 실험의 중성자 차폐 실험 시험장치 및 중성자 선원을 나타낸 것이다.

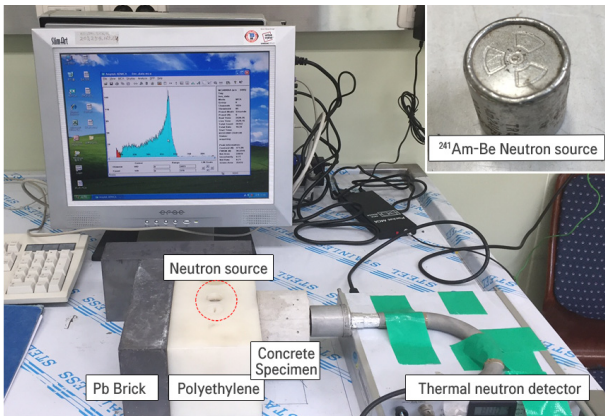


Fig. 2. Experimental setup for neutron shielding test

3. 실험결과 및 분석

3.1 공기량 및 슬럼프값

Fig. 3은 각 시편의 공기량 및 슬럼프값을 나타낸 것이다. Plain 콘크리트의 경우 공기량이 3.2%를 나타냈으며, 잔골재를 붕규산

유리로 치환한 콘크리트(Py시편)의 경우 3.4%, 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트(BF시편)의 경우 3.6%, 붕규산유리와 비정질 붕소강을 혼입한 콘크리트(Py+BF시편)의 경우 3.6%의 공기량을 각각 나타냈다. 전반적으로 공기량의 경우 붕규산 유리나 비정질 붕소강 섬유를 혼입할 경우 증가하는 추세를 나타내고 있으나 콘크리트 작업성에 있어서는 크게 유의할 만한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 각 시편의 슬럼프값은 Plain 시편과 비교시 붕규산 유리나 비정질 강섬유를 혼입이 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이를 통해 비정질 붕소강 섬유의 혼입비 1.0vol%까지의 수준과 붕규산 유리의 잔골재 치환율 100% 수준까지는 콘크리트의 작업성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

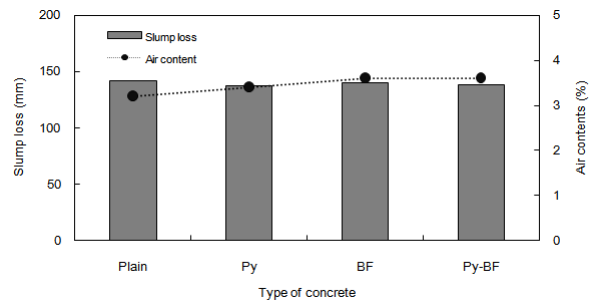
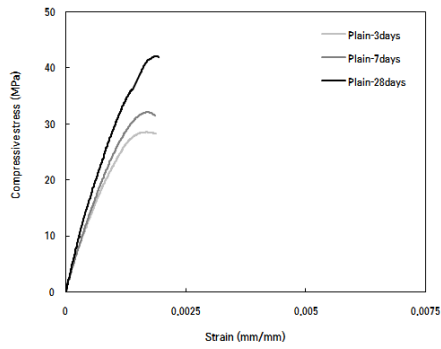


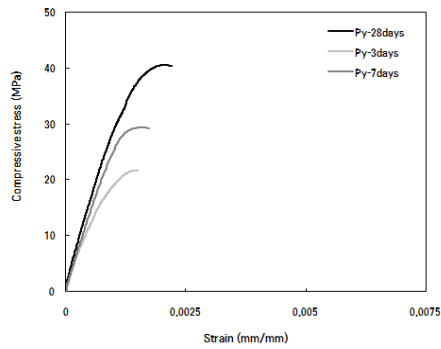
Fig. 3. Slump loss and air contents of various concrete

3.2 압축강도 및 압축인성

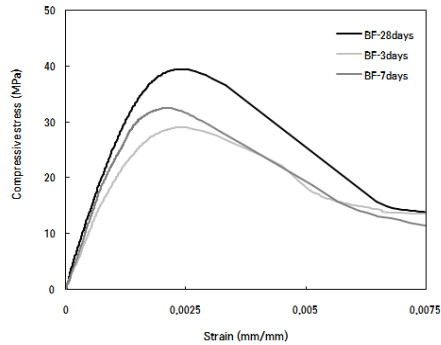
Fig. 4는 재령 3일, 7일, 28일에서의 각 시편의 압축응력-변형률을 나타낸 것이며, Fig. 5는 각 시편의 압축강도를 나타낸 것이다. 재령 28일에서의 각 시편의 압축강도는 목표강도인 35MPa를 모두 상회하는 것으로 나타났다. 하지만, 붕규산 유리를 혼입한 시편(Py, Py-BF)의 경우, 초기재령(3일, 7일)에서는 Plain 시편과 대비하여 상대적으로 낮은 압축강도를 나타냈다. 잔골재를 붕규산 유리로 혼입한 시편(Py)의 경우에는 재령 28일에서의 압축강도는 Plain 시편과 대비하여 유사하게 나타났으나, 비정질 붕소강 섬유와 붕규산유리를 혼입한 시편(Py-BF)의 경우 재령28일에서 Plain 시편과 비교하여 약 12%정도 낮은 압축강도를 나타냈다. 반면, 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 각 재령에서 Plain 시편과 유사한 강도변화 추세를 나타냈다. 붕규산 유리를 혼입한 시편(Py, Py-BF)의 경우 초기재령에서의 낮은 압축강도는 붕규산 유리가 상대적으로 일반 잔골재에 비해 강도가 낮기 때문으로 판단되며, 재령 28일의 경우 붕규산 유리의 포졸란반응에 의해 추가적인 수화물에 생성되어 Plain 시편과 유사한 강도를 나타내는 것으로 판단된다.



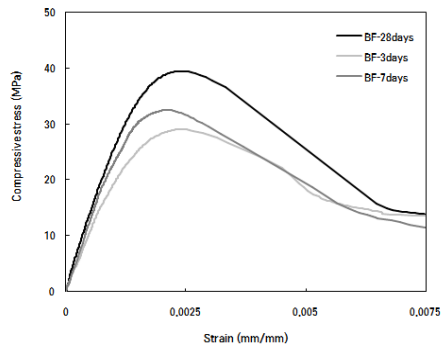
(a) Plain concrete



(b) Concrete with borosilicate glass



(c) Concrete with amorphous boron steel fiber



(d) Concrete with borosilicate glass and amorphous boron steel fiber

Fig. 4. Compressive strain-stress curve of various concrete

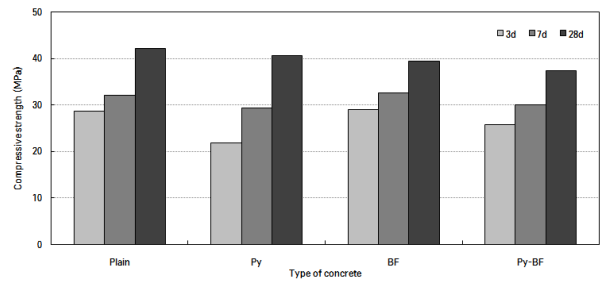


Fig. 5. Compressive strength of various concrete

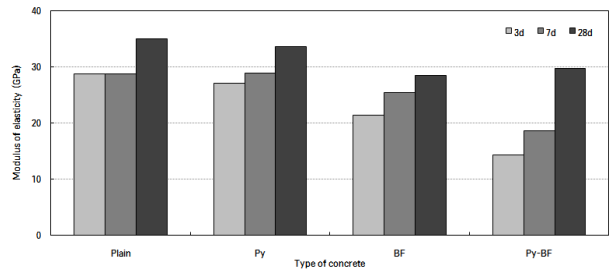


Fig. 6. Static modulus of elasticity of various concrete

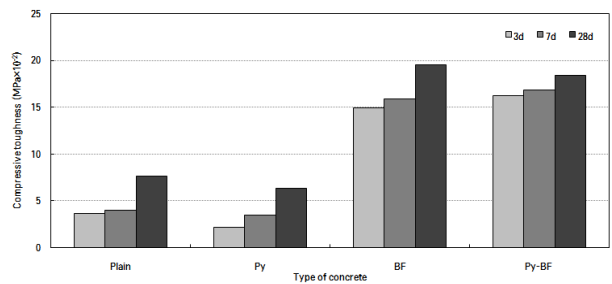


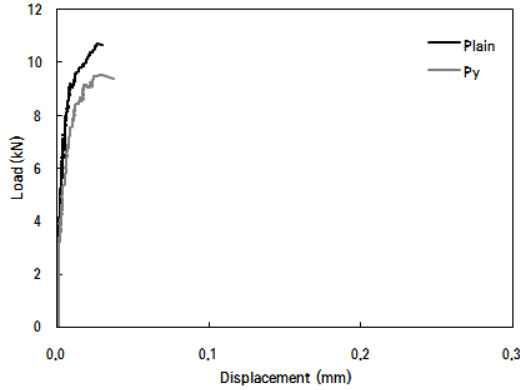
Fig. 7. Compressive toughness of various concrete

Fig. 6은 각 재령에서 콘크리트 시편의 정탄성계수를 나타낸 것으로, Plain 콘크리트와 대비하여 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 시편(BF, Py-BF)의 경우 Plain 시편 및 붕규산 유리 혼입 시편(Py)에 비해 각 재령에서의 정탄성계수가 상대적으로 저하되는 경향을 나타냈다.

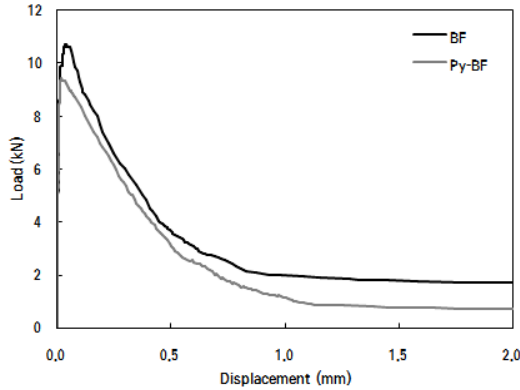
Fig. 7은 각 재령에서의 콘크리트 시편의 압축인성을 나타낸 것으로, 재령 28일에서의 압축인성은 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 시편(BF, Py-BF)이 현저하게 높은 것으로 나타났다. 이는 섬유를 혼입하지 않은 경우와 비교하여 섬유를 혼입한 경우 최대하중 이후 섬유에 의한 인성 발현으로 하중에 대한 에너지를 흡수하기 때문으로 판단된다.

전반적으로 잔골재를 붕규산 유리로 치환한 콘크리트의 경우 Plain 콘크리트와 대비하여 압축강도가 상대적으로 저하되는 현상

을 나타냈으며, 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 Plain 콘크리트와 대비하여 정탄성계수가 상대적으로 저하되는 현상을 나타냈다.



(a) Plain concrete and the concrete with borosilicate glasses



(b) The concrete with amorphous boron steel fiber and the concrete with borosilicate glasses and amorphous boron steel fiber

Fig. 8. Flexural load-displacement curve of various concrete

3.3 휨강도 및 휨인성

Fig. 8은 휨 실험을 통해 획득된 각 시편의 재령 28일에서의 휨하중-변위 곡선을 나타낸 것이며, Fig. 9는 재령 28일에서의 각 시편의 휨강도를 나타낸 것이다. 붕규산 유리를 혼입한 시편(Py, Py-BF)의 경우 Plain 시편에 비해 상대적으로 휨강도의 저하를 나타냈다. 비정질 붕소강섬유를 혼입한 시편의 경우 Plain 시편과 유사한 휨강도를 나타냈으며, 이를 통해 섬유 혼입율 1.0% 수준에서는 섬유혼입이 휨강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. Fig. 10은 재령 28일에서의 각 시편의 휨인성을 나타낸 것으로 Fig. 8에서 보듯이 비정질 붕소강 섬유가 혼입되지 않은 시편(plain, Py)의 경우 최대하중 이후 시편이 완전 파손되어 휨인성을

발현하지 못하지만, 비정질 붕소강 섬유가 혼입된 시편(BF, Py-BF)의 경우 최대하중 이후에도 섬유에 의해 휨인성이 발현되는 것을 알 수 있다. 전반적으로 붕규산 유리를 혼입한 시편의 경우 휨강도의 저하를 나타냈으나, 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 시편의 경우 휨강도의 저하 없이 휨인성을 증가시키는 경향을 나타냈다.

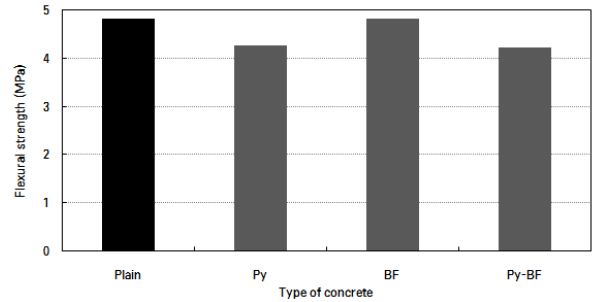


Fig. 9. Flexural strength of various concrete

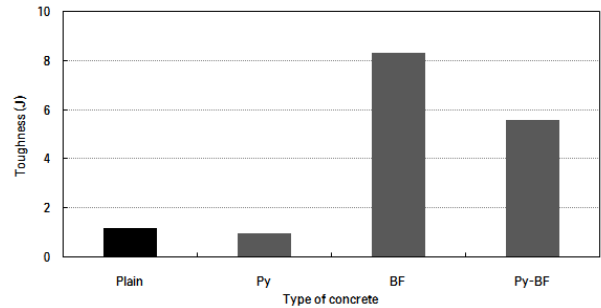


Fig. 10. Flexural toughness of various concrete

3.4 중성자 차폐성능

Table 5는 중성자 차폐시험을 통해 측정된 각 시편의 중성자 계수율과 차폐율을 나타낸 것이며, Fig. 11은 Plain 시편과 대비하여 비정질 붕소강 섬유 및 붕규산 유리를 혼입한 시편의 상대적 차폐성능을 나타낸 것이다. 대기 중에서 측정된 중성자 계수율과 비교시 Plain 시편의 경우 중성자 계수율이 68.44% 가량 감소되는 것으로 나타나 콘크리트 자체의 중성자 차폐성능을 확인할 수 있었다. 붕규산 유리를 혼입한 시편의 경우 중성자 차폐율이 94.38%로 Plain 시편과 대비하여 중성자 차폐율이 25.94%가 증가하는 것으로 나타났다. 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 시편의 경우 중성자 차폐율은 85.94%로 Plain 시편 대비 17.5%가 증가하는 것으로 나타났다. 비정질 붕소강 섬유와 붕규산 유리를 동시에 혼입한 경우는 중성자 차폐율이 95.31%로 붕규산 유리만 혼입한 시편과 대비하여 큰 차이를 나타내지는 않았다. 이를 통해 붕규산 유리

비정질 붕소강 섬유 혼입이 콘크리트의 중성자 차폐에 효과적이라는 것을 알 수 있다.

Table 5. Neutron shielding performance

| Type | Neutron radiation rate (S ⁻¹) | Neutron shielding rate (%) |
|-------|---|----------------------------|
| Air | 32.0 | 0.00 |
| Plain | 10.1 | 68.44 |
| Py | 1.8 | 94.38 |
| BF | 4.5 | 85.94 |
| Py-BF | 1.5 | 95.31 |

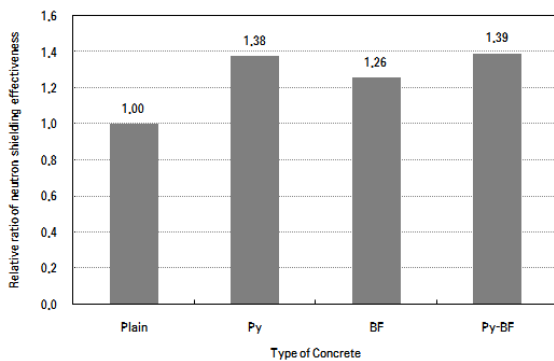


Fig. 11. Relative neutron shielding effectiveness

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트의 중성자 차폐재로서 붕규산 유리 및 비정질 강섬유의 가능성을 평가하기 위한 기초연구로 붕규산 유리와 비정질 붕소강 섬유를 콘크리트에 혼입하여 역학적 특성과 중성자 차폐성을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서의 실험배합에서 잔골재를 붕규산 유리로 치환한 콘크리트와 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 공기량과 슬럼프값은 Plain 콘크리트와 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만 비정질 붕소강 섬유의 경우 시멘트페이스트와 부착면이 넓은 리본형태라는 단점으로 인해 형상비가 달라질 경우 콘크리트의 작업성에 큰 영향을 미칠 것이라고 판단된다.
2. 잔골재를 붕규산 유리로 치환한 콘크리트의 경우 Plain 콘크리트와 대비하여 압축강도가 저하되는 현상을 나타냈으며, 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 Plain 콘크리트와 대비하여 정탄성계수가 상대적으로 저하되는 현상을 나타

냈다. 하지만 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 경우 Plain 콘크리트와 대비하여 압축강도는 유사하며 최대하중 이후 압축인성을 발현하는 것으로 나타났다.

3. 잔골재를 붕규산 유리로 치환한 콘크리트의 경우 Plain 콘크리트와 대비하여 휨강도의 저하를 나타냈으나, 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 시편의 경우 Plain 콘크리트와 유사한 휨강도를 나타내며 휨인성을 증가시키는 경향을 나타냈다.
4. 잔골재를 붕규산 유리로 치환한 콘크리트와 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 Plain 콘크리트와 대비하여 중성자 차폐율의 현저한 증가를 나타냈다. 특히 잔골재를 붕규산 유리로 치환한 콘크리트의 경우 비정질 붕소강 섬유만을 혼입한 콘크리트보다 중성자 차폐율이 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 붕규산 유리와 비정질 붕소강 섬유의 혼입이 콘크리트의 중성자 차폐에 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 전반적으로 붕규산 유리의 경우 콘크리트의 역학적 성능에 있어서는 다소 불리하다는 점과 알칼리 골재반응을 유발할 가능성을 가지고 있으나 중성자 차폐에 있어서는 매우 효과적이며, 비정질 붕소강 섬유의 경우 인성을 증진시킨다는 점에서 역학적 성능개선에서 기여를 하지만 상대적으로 붕규산 유리에 비해 중성자 차폐성능이 낮다는 것을 알 수 있다. 향후 각각의 문제점에 대한 보완연구를 통해 최적 배합비를 도출한다면 중성자 차폐재로서 붕규산 유리와 비정질 붕소강 섬유의 활용이 증가될 것으로 기대되어진다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(16RDRP-B076268-03)에 의해 수행되었습니다.

References

Abdullah, Y., Ariffin, F.N., Hamid, R., Yusof, M.R., Zali, N.M., Ahmad MHARM, Mohamed, A.A. (2014). Preliminary study of neutron absorption by concrete with boron carbide addition, In AIP Conference Proceedings, **1584(1)**, 101–104.

Abdullah, Y., Yusof, M.R., Muhamad, A., Samsu, Z., Abdullah, N.E. (2010). Cement–boron carbide concrete as radiation shielding material, Journal of Nuclear and Related Technologies, **7(2)**, 74–79.

- JSCE-SF5, (1984). Method of Test for Compressive Strength and Compressive Toughness of Steel Fibre-Reinforced Concrete, Concrete library of JSCE, **3**, 63-66.
- Kaplan MF, (1989). Concrete Radiation Shielding. Longman Scientific & Technical.
- Kharita, M.H., Yousef, S., AlNassar, M. (2011). Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete, Progress in Nuclear Energy, **53(2)**, 207-211.
- Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A.P. (1999). Stress-strain curves for steel fiber reinforced concrete under compression, Cement and Concrete Composite, **21(5-6)**, 383-390.
- Neville, A.M. (2000). Properties of Concrete, 4th Ed., Longham, ELBS.
- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L. (2004). Compressive behavior of fiber reinforced high performance concrete subjected to elevated temperature, Cement and Concrete Research, **34(12)**, 2215-2222.
- Singh, K.J., Singh, N., Kaundal, R.S., Singh, K. (2008). Gamma-ray shielding and structural properties of PbO-SiO₂ glasses, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **266(6)**, 944-948.

붕규산 유리 및 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성능 및 중성자 차폐성능 평가

본 연구에서는 붕규산 유리와 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성능 및 중성자 차폐성능을 평가하였다. 잔골재를 붕규산 유리로 치환한 콘크리트와 비정질 붕소강 섬유를 보강한 콘크리트를 제조하여 압축강도, 정탄성계수, 압축인성, 휨강도, 휨인성, 중성자 차폐성능을 평가하였다. 실험결과, Plain 콘크리트와 대비하여 붕규산 유리를 혼입한 콘크리트의 경우 압축강도 및 휨강도는 저하되었으나, 중성자 차폐성능은 향상되는 것으로 나타났다. 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 Plain 콘크리트와 대비하여 압축인성 및 휨인성이 증진되었으며 중성자 차폐성능도 향상되는 것으로 나타났다.