

나일론 섬유를 적용한 순환 굵은골재 콘크리트의 성능 평가

이승태^{1*}

Performance of Recycled Coarse Aggregate Concrete with Nylon Fiber

Seung-Tae Lee^{1*}

Abstract: The adhered mortars in recycled aggregate may lower the performance of the concrete, such as by reducing in strength and durability, and cracking. In the present study, the effects of nylon fiber (NF) on the mechanical and durable properties of 100% ordinary portland cement (OPC) and 50% ground granulated blast furnace slag (GGBFS) concretes incorporating recycled coarse aggregate (RA) were experimentally investigated. Concrete was produced by adding 0 and 0.6kg/m³ of NF and then cured in water for the predetermined period. Measurements of compressive and split tensile strength, water permeable pore and total charge passed through concrete were carried out, and the corresponding test results were compared with those of concrete incorporating crushed coarse aggregate (CA). In addition, the microstructures of 28-day concretes were observed by using SEM technique. Test results revealed that the RA concrete showed lower performance than CA concrete because of the adhered mortars in RA. However, it was obvious that the addition of NF in RA concrete was much effective in enhancing the performance of the concretes due to the bridge effect from NF. In particular, the application of NF2 (19 mm) exhibited a somewhat beneficial effect compared with concrete incorporating NF1 with respect to mechanical properties, especially for RA concrete.

Keywords: Recycled coarse aggregate, Concrete, Nylon fiber, Adhered mortar

1. 서 론

최근, 산업폐기물 중 콘크리트 구조물의 노후화, 성능저하, 용도변경 등의 이유로 인하여 구조물의 해체시 발생하는 폐콘크리트량이 급증하고 있어 중대한 사회문제로 대두되고 있다. 우리나라의 경우, 2014년 통계에 따르면 폐콘크리트는 연간 약 4,000 만톤 이상 발생하였으며, 이는 전체 건설폐기물 중 약 60% 이상으로 가장 큰 비중을 차지하고 있으나, 폐콘크리트의 대부분은 도로기층용 및 성토, 복토 등의 기층재로 활용되며, 콘크리트용 골재로 활용되는 양은 약 11% 정도로 보고되고 있다. 이에 정부에서는 순환골재의 고부가가치 활용을 위하여 「KS F2573(콘크리트용 순환골재)」, 「순환골재 품질기준」 등 관련기준을 제정하여 순환골재의 활용방안을 점차적으로 넓혀나가고 있으며, 안정적인 순환골재의 품질확보를 위하여 국가적인 차원에서 연구개발 지원 및 제도개선에 노력하고 있다. 일례로써, 순환골재의 재활용을 촉진하기 위하여 2000년대 초반에 건설폐기물의 재활용 촉진을 위한

법률을 제정함으로써 재활용 용도별 순환골재의 품질기준을 마련하고자 하였으며, 2014년에는 제 2차 건설폐기물 재활용 기본계획에 따라 순환골재의 재활용률을 45%까지 향상시키기 위한 제도적 기준을 마련하고자 하였다(Korean Ministry of Environment, 2014).

순환골재를 콘크리트용 골재로 대체하여 사용하기 위해서는 순환골재의 공학적 품질성능이 우선적으로 확보되는 것이 중요하나, 순환골재는 천연골재와 달리 품질이 우수하다고 하여도 순환골재에 함유되어 있는 부착모르타르의 영향으로 인하여 콘크리트에 다량으로 적용할 경우 강도, 유동성, 내구성 등 콘크리트의 성능이 저하되는 약점이 존재한다.

순환골재 사용 콘크리트는 천연골재 사용 콘크리트와는 다르게 신(新) ITZ(interfacial transition zone)외에도 부착모르타르에 의하여 생성되는 구(舊) ITZ가 존재하게 되며, 부착모르타르의 영향으로 인하여 콘크리트의 성능은 저하하게 된다(Ryou, 2003; Lee et al., 2016; Katz, 2003; Silva et al., 2014; Akca et al., 2015). 이러한 순환골재 적용 콘크리트의 역학적 단점을 해결하기 위한 연구자들의 다양한 시도가 이루어져 왔으며, 이 중 섬유보강재를 순환골재 콘크리트에 적용함으로써 성능을 향상시키기 위한 일련의 연구가 보고되기도 하였다. 특히, Akca et al. (2015)은 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 순환골재 콘크리트의 성능향상 효과에 대하여 연구하였으며, Ahmadi et al. (2017)은 강도향상에 대한 재생 섬유보강재의

¹정회원, 군산대학교 토목공학과 교수

*Corresponding author: stlee@kunsan.ac.kr

Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk, 54150, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 3월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

영향을 실험적으로 검증하였다.

주지하다시피, 순환골재 사용 콘크리트는 ITZ의 증가, 강도감소 등으로 인하여 콘크리트 조직내부에 미세균열이 다량으로 발생하기 쉬우며, 나일론섬유(nylon fiber)는 콘크리트의 균열저감에 우수한 성질을 가지는 것으로 알려져 있으나, 아직까지 전 세계적으로 나일론 섬유를 순환골재 콘크리트에 적용시킨 연구는 그다지 많지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 나일론섬유를 보강재로 적용한 순환골재 콘크리트의 성능을 실험적으로 고찰하였다. 특히, 섬유길이가 상이한 두 종류 나일론 섬유(6 및 19 mm)를 100 % 보통포틀랜드시멘트 및 50 % 고로슬래그미분말을 결합재로 사용한 부순 굵은골재 및 순환 굵은골재 콘크리트에 각각 혼합하여 콘크리트의 역학적 성능, 내구성 및 미세조직구조를 비교, 고찰하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 향후 순환골재의 재활용 및 이를 콘크리트 부재에 적용하기 위한 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 광물질혼화제

본 실험에 사용된 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC) 및 고로슬래그미분말(ground granulated blast furnace slag, GGBFS)의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1 과 같다.

Table 1 Chemical composition and physical properties of binders

Items	OPC	GGBFS
SiO ₂ [%]	21.7	33.1
Al ₂ O ₃ [%]	5.7	17.8
Fe ₂ O ₃ [%]	3.2	0.4
CaO[%]	63.1	40.3
MgO[%]	2.8	4.1
SO ₃ [%]	2.2	2.8
Ig. loss[%]	1.3	0.3
Density[g/cm ³]	3.15	2.91
Fineness[cm ² /g]	3,280	4,150

2.1.2 골재

잔골재는 밀도 2.65 g/cm³, 흡수율 0.98 % 및 조립률 2.80인 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수 25mm인 부순골재(crushed aggregate, CA)를 사용하였다. 한편, 순환 굵은골재(recycled coarse aggregate, RA)는 국내 J사에서 분쇄, 세척 및 분류과정을 거친 골재 중 체가름 시험을 통하여 부순골재와 마찬가지로 최대치수가 25 mm가 되도록 입도조정하여

사용하였다. 굵은골재의 입도분포곡선을 나타낸 것이 Fig. 1이며, 본 실험에 사용된 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

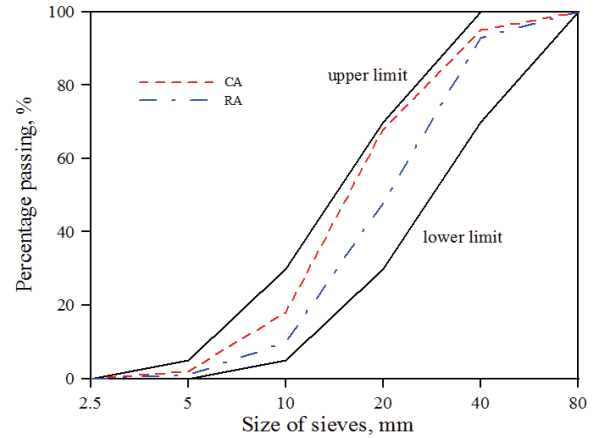


Fig. 1 Sieving test result for CA and RA

2.1.3 나일론섬유

본 연구에 사용된 국내 K사의 나일론 섬유(nylon fiber, NF)는 분산성을 향상시키기 위하여 섬유표면에 분산제를 코팅하여 사용하였으며, NF의 길이가 콘크리트 성능에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 6 mm(NF1) 및 19 mm(NF2)의 섬유길이가 상이한 두 종류 NF를 콘크리트 중에 각각 적용하였다. 본 실험에서 사용한 NF의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

2.1.4 화학혼화제

콘크리트의 유동성(150 ± 20 mm) 및 공기량(4.5 ± 1.5 %)을 적절하게 확보하기 위하여 PC계열 고성능감수제 및 공기연행제를 사용하였다.

Table 2 Physical properties of aggregates

Properties	Sand	CA	RA
Density[g/cm ³]	2.65	2.64	2.37
F.M.	2.80	7.17	7.43
Absorption[%]	0.98	0.66	4.31
Abrasion rate[%]	-	21.7	47.5
Adhered mortar [%]	-	-	5.56

Table 3 Physical properties of NF

Properties	NF
Diameter[μ m]	23
Length[mm]	6 & 19
Density[g/cm ³]	1.16
Tensile strength[MPa]	919
Elastic modulus[GPa]	5.3
Color	White

2.2 콘크리트 배합

콘크리트 제조를 위하여 CA 및 RA를 굵은골재로 적용하였다. 또, OPC에 대한 GGBFS의 대체율은 0 및 50 %로 하여 각각 100 % OPC 및 50 % GGBFS 콘크리트로 명명하였으며, 각 콘크리트의 w/b는 50.0 %로 고정하였다. 이 때, 기준 콘크리트(CA를 적용한 100 % OPC 콘크리트의 설계기준강도는 24 MPa로 하였다. 또, NF의 혼입량은 선행연구(Jeon et al., 2008)를 참조하여 섬유길이에 관계없이 0.6 kg/m³으로 고정하여 사용하였다. 믹싱된 콘크리트는 제조 1일 후 탈형하여 20±2 °C 조건에서 소정의 기간동안 수중양생하였다. 본 실험에서 사용한 콘크리트의 배합표는 Table 4와 같다.

Table 4 Mix proportions of concrete

Code	Unit weight [kg/m ³]							
	W	C	GGBFS	S	CA	RA	NF1	NF2
CA	170	340	-	745	1015	-	-	-
CA-NF1	170	340	-	745	1015	-	0.6	-
100% OPC	CA-NF2	170	340	-	745	1015	-	0.6
RA	170	340	-	745	-	912	-	-
RA-NF1	170	340	-	745	-	912	0.6	-
RA-NF2	170	340	-	745	-	912	-	0.6
CA	170	170	170	748	1008	-	-	-
CA-NF1	170	170	170	748	1008	-	0.6	-
50% GGBFS	CA-NF2	170	170	170	748	1008	-	0.6
RA	170	170	170	704	-	868	-	-
RA-NF1	170	170	170	704	-	868	0.6	-
RA-NF2	170	170	170	704	-	868	-	0.6

2.3 실험방법

2.3.1 강도

본 실험에는 수중양생한 Ø100×200 mm 원주형 공시체를 대상으로 KS F 2405 및 2423에 준하여 재령 7, 28 및 91일에서 콘크리트의 압축강도 및 쪼갬 인장강도 실험을 실시하였다.

2.3.2 투수공극량

ASTM C 642에 준하여 공시체 중량 800 g을 초과하지 않는 범위에서 공시체 두께 20mm로 정하여 절단한 후 표면건조포화 상태 중량(W_{ssd}), 수중중량(W_{susp}) 및 노건조상태 중량(W_{dry})을 측정하여 다음 식 (1)과 같이 투수공극량(P_{wat})을 계산하였다.

$$P_{wat} = \frac{W_{ssd} - W_{dry}}{W_{ssd} - W_{susp}} \times 100(\%) \quad (1)$$

2.3.3 염소이온침투저항성

콘크리트의 통과전하량은 Fig. 2와 같이 ASTM C1202에 준하여 Ø100×50 mm의 공시체를 대상으로 하여 측정하였다. 시험체 양단에 60 V의 직류전압을 6시간 동안 통전시키면서 시험체에 흐르는 전류를 데이터 로거를 이용하여 30분 간격으로 측정하였으며, 측정된 전류로부터 시간에 대한 전류의

적분 값을 취하여 식 (2)로 총통과전하량을 산정하였다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2)$$

여기서, Q = 총통과전하량(Coulomb), I_x = x분에서의 전류 값(A)이다.

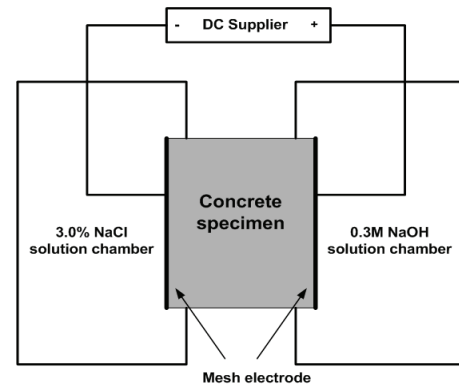


Fig. 2 Set-up for ASTM C1202

2.3.4 주사형전자현미경(SEM) 분석

콘크리트의 조직구조를 관찰하기 위하여 재령 28일 콘크리트를 대상으로 XL30ESEM(P사)을 이용하여 SEM 분석을 실시하였다. 콘크리트의 수화반응을 정지시키기 위하여 대상 샘플을 아세톤(acetone) 용액에 6시간동안 침지한 후 24시간 동안 진공상태가 되도록 전처리 작업을 실시하였다. 또, 수화 생성물의 구성요소를 평가하기 위하여 EDAX Falcon System 60SEM을 이용하여 EDS 분석을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 강도 특성

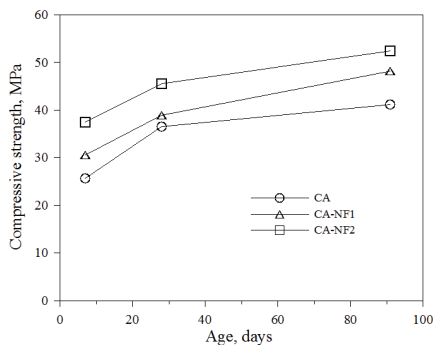
Fig. 3은 CA 및 RA를 사용한 100 % OPC 콘크리트의 압축강도에 대한 NF의 영향을 도식화하여 나타낸 것이다. CA를 사용한 100 % OPC 콘크리트의 압축강도(Fig. 3 (a))는 사용된 NF의 종류에 따라 다르게 나타났다. 특히, NF를 사용한 콘크리트는 압축강도가 증진되는 효과를 나타내었으며, 길이가 19 mm인 NF2를 사용한 콘크리트는 섬유길이 6 mm인 NF1을 적용한 콘크리트보다 재령에 관계없이 압축강도가 크게 나타나는 것으로 관찰되었다. 한편, Fig 3(b)는 RA를 사용한 OPC 콘크리트의 압축강도 경향을 나타낸 것으로서, CA를 적용한 콘크리트보다 대체적으로 압축강도 발현이 작게 나타났다. 또, 재령 28일에서 RA, RA-NF1 및 RA-NF2 콘크리트의 압축강도는 각각 25.4, 31.4 및 39.5 MPa을 나타냄으로써 RA 콘크리트의 압축강도 향상에 대한 NF의 효과를 확인할 수 있었다.

한편, CA 및 RA를 사용한 50 % GGBFS 콘크리트의 압축

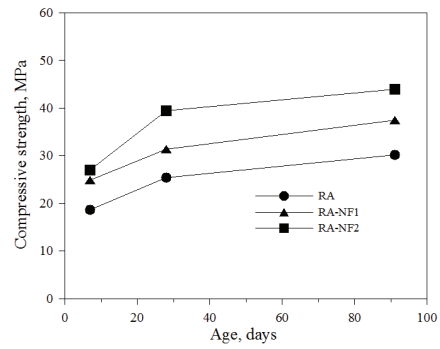
강도에 대한 NF의 영향을 재령별로 나타낸 것이 Fig. 4이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 GGBFS 콘크리트의 압축강도 경향은 Fig. 3의 OPC 콘크리트와 유사한 경향임을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)는 CA를 굵은골재로 사용한 GGBFS 콘크리트의 압축강도에 대한 NF의 영향을 나타낸 것으로써, 재령의 증가와 더불어 NF를 적용한 콘크리트의 압축강도가 상대적으로 크게 나타나는 것으로 조사되었다. 이는 콘크리트 중 GGBFS의 잠재수경성으로 인하여 장기재령에서 압축강도 발현이 다소 향상되었기 때문으로 생각된다. 또, Fig. 4(b)에 나타났듯이, RA를 사용한 GGBFS 콘크리트의 압축강도도 CA를 사용한 콘크리트와 마찬가지로 재령에 관계없이 NF2를 0.6 kg/m³ 사용한 콘크리트의 압축강도 발현이 가장 우수하게 나타남을 알 수 있다.

이상과 같이 결합재 종류에 관계없이 콘크리트 중에 NF를 적용함으로써 NF의 친수성으로 인한 강한 수소결합이 콘크리트와 섬유와의 부착력 증진효과를 초래하여 압축강도가 향상되는 효과를 나타낸 것으로 판단되며, 특히 적용된 NF의 길이가 길수록 이러한 효과는 더욱 뚜렷하게 나타났다(Mu et al., 2002).

한편, 콘크리트의 압축강도에 대한 결합재 종류, RA 유무 및 사용된 NF의 길이의 영향을 고찰하기 위하여 재령 28일의 CA사용 100% OPC 콘크리트의 압축강도에 대한 각 콘크리트의 28일 압축강도를 비(%)로써 나타낸 것이 Fig. 5이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 50% GGBFS 콘크리트의 압축강도는 혼화재료의 잠재수경성의 영향으로 인하여 100% OPC 콘크리트에 비하여 압축강도가 다소 크게 나타나는 것으로 조사되었으며, RA를 사용한 콘크리트가 CA를 사용한 콘크리트에 비하여 RA에 함유된 부착모르타르의 영향으로 인하여 압축강도가 작게 나타나는 경향을 나타내었다. 한편, NF를 사용한 콘크리트는 결합재 및 굵은골재 종류에 관계없이 압축강도를 증진시키는 효과를 나타내는 것이 확인되었으며, 특히, 6 mm NF(NF1)를 사용한 콘크리트에 비하여 19 mm NF(NF2)를 사용한 콘크리트에서 이러한 경향은 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 적용된 NF의 섬유길이 길수록 콘크리트 조직 구조와의 부착력을 증진시켰기 때문인 것으로 판단된다.



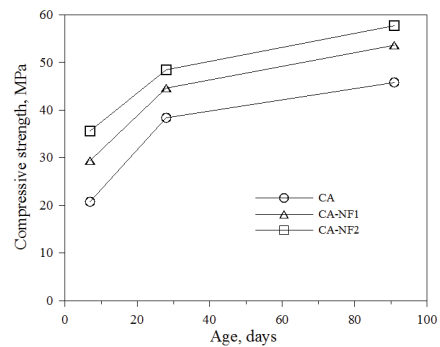
(a) CA concrete



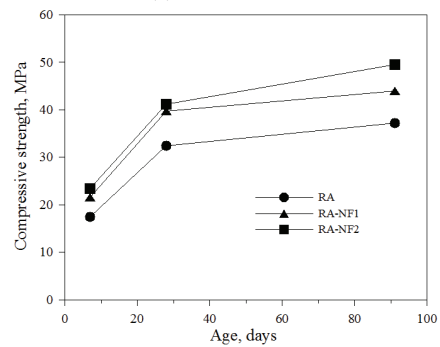
(b) RA concrete

Fig. 3 Compressive strength of 100% OPC concrete

Fig. 6은 CA 및 RA를 사용한 100% OPC 콘크리트의 쪼갬 인장강도에 대한 NF의 영향을 나타낸 것이다. CA를 사용한 콘크리트의 경우(Fig. 6(a)), NF를 사용하지 않은 CA 콘크리트의 쪼갬 인장강도가 초기재령(7일)에서 약 2.9 MPa으로 나타난 반면, 6 mm 및 19 mm NF를 적용한 CA-NF1 및 CA-NF2 콘크리트는 약 3.6 및 4.2 MPa으로 나타남으로써, NF를 적용한 콘크리트의 쪼갬 인장강도가 약 24 ~ 45% 정도 증진되는 것으로 나타났으며, 재령 28일 이후 CA-NF1 및 CA-NF2 콘크리트의 쪼갬 인장강도는 서로 유사하게 나타나는 것으로 관찰되었다. 한편, RA를 사용한 콘크리트의 쪼갬 인장강도 경향은 CA를 사용한 콘크리트보다 대체적으로 작게 나타났다(Fig. 6(b)).



(a) CA concrete



(b) RA concrete

Fig. 4 Compressive strength of 50% GGBFS concrete

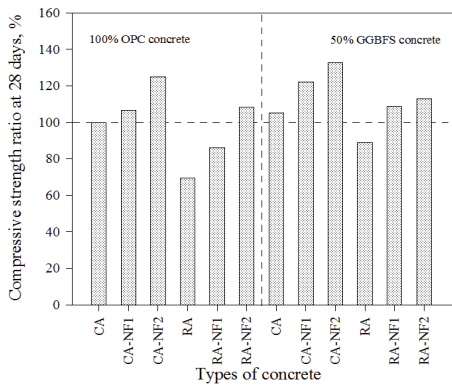
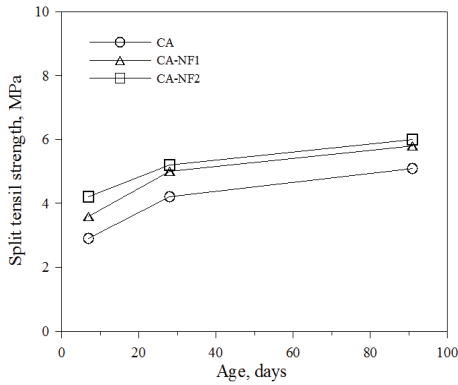
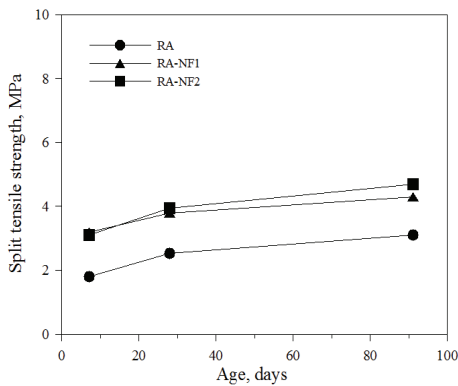


Fig. 5 Comparison of compressive strength ratio of concrete at 28 days



(a) CA concrete



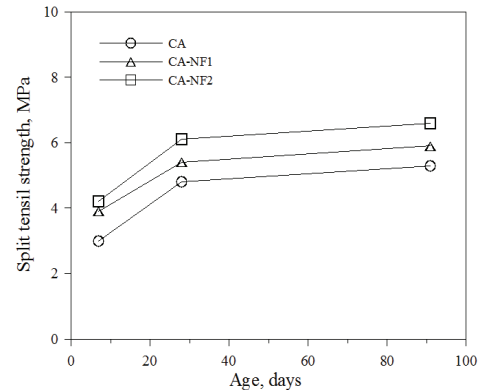
(b) RA concrete

Fig. 6 Split tensile strength of 100 % OPC concrete

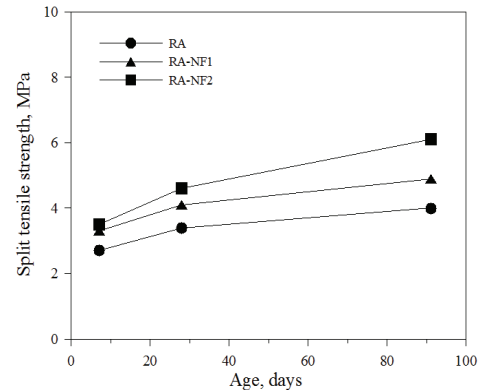
Fig. 7은 50% GGBFS 콘크리트의 쪼갬 인장강도에 대한 굽은골재 및 NF의 영향을 재령별로 나타낸 것으로써, Fig 6의 100 % OPC 콘크리트와 유사한 경향을 나타내었으나, NF2를 적용한 CA 및 RA 콘크리트는 장기재령으로 갈수록 쪼갬 인장강도 증진효과가 뚜렷하게 관찰되었다.

한편, Fig. 8은 CA사용 100 % OPC 콘크리트의 재령 28일 쪼갬 인장강도에 대한 각 콘크리트의 28일 인장강도를 비(%)

로써 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 결합재의 종류에 관계없이 재령 28일에서 19 mm NF(NF2)를 적용한 콘크리트의 쪼갬 인장강도 향상 효과가 6 mm NF(NF1)보다 뚜렷하게 나타났으며, RA를 적용한 콘크리트가 CA를 적용한 콘크리트보다 쪼갬 인장강도 발현이 작게 나타나는 경향임을 확인하였다. 특히, 50 % GGBFS 콘크리트의 경우 CA-NF2 콘크리트의 28일 쪼갬 인장강도가 본 연구의 비교대상 배합 중 가장 크게 나타난 것으로 조사되었다.



(a) CA concrete



(b) RA concrete

Fig. 7 Split tensile strength of 50 % GGBFS concrete

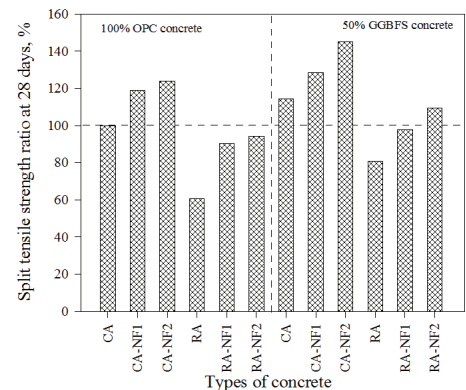


Fig. 8 Comparison of split tensile strength ratio of concrete at 28 days

3.2 투수공극량

Fig. 9는 NF 혼입에 대한 재령별 100 % OPC 콘크리트의 투수공극량 결과를 나타낸 것이다. CA를 사용한 콘크리트의 투수공극량 실험결과를 나타낸 것이 Fig. 9(a)로써, CA, CA-NF1 및 CA-NF2 배합의 재령 7일 투수공극량이 각각 11.3, 10.7 및 10.5 %, 재령 91일 투수공극량은 각각 6.2, 5.0 및 4.8 %을 나타냄으로써 19 mm NF(NF2)의 조직치밀화 효과를 확인할 수 있다. 한편, RA를 사용한 콘크리트의 투수공극량 결과는 Fig. 9(b)에 제시되었으며, 순환골재에 함유된 부착모르타르의 영향으로 인하여 CA를 사용한 콘크리트에 비하여 재령에 관계없이 투수공극량이 다소 크게 나타났으나, 전체적인 투수공극량 경향은 Fig. 9(a)과 유사하게 나타났다.

NF 혼입에 대한 재령별 50 % GGBFS 콘크리트의 투수공극량 결과를 나타낸 것이 Fig. 10으로써, 모든 배합에서 GGBFS의 영향으로 인하여 투수공극량이 100 % OPC 콘크리트보다 작게 나타났으며, 굵은골재 종류에 관계없이 배합별 투수공극량도 CA > CA-NF1 > CA-NF2 및 RA > RA-NF1 > RA-NF2의 순으로 나타났다.

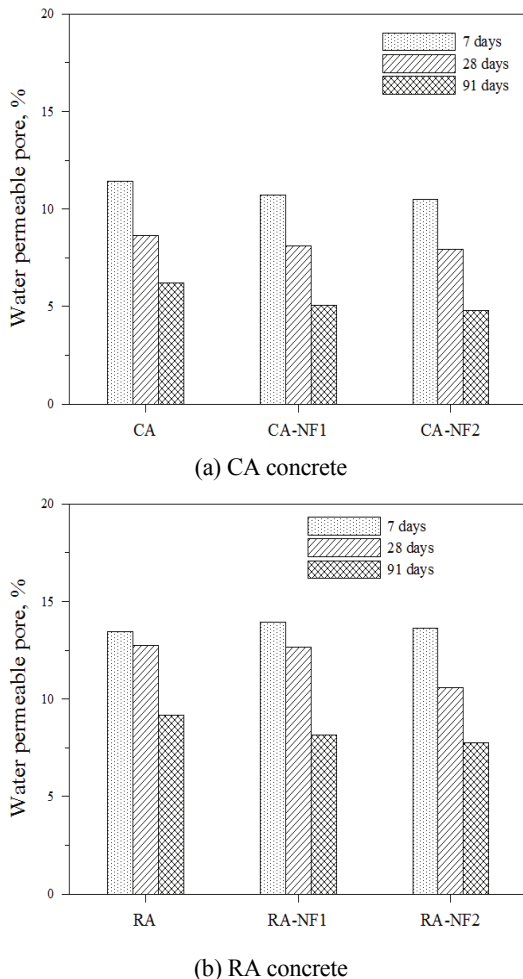


Fig. 9 Water permeable pore of 100 % OPC concrete

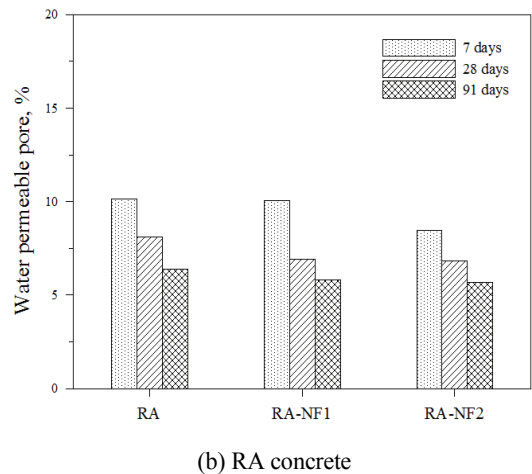
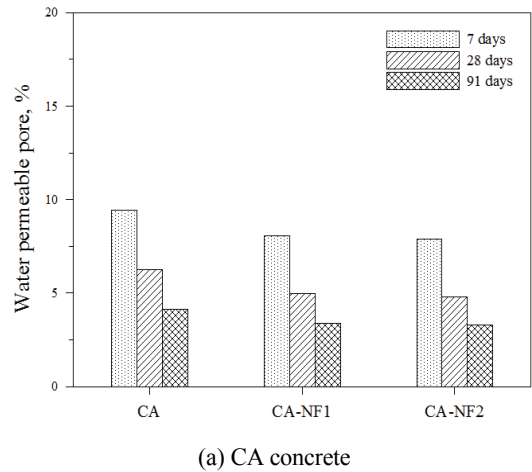


Fig. 10 Water permeable pore of 50 % GGBFS concrete

3.3 염소이온침투저항성

Fig. 11은 ASTM C1202 실험법에 준하여 측정된 재령 28일 콘크리트의 총통과전하량을 배합별로 비교하여 나타낸 것으로써, 굵은골재 종류, NF 사용유무에 따라 서로 상이한 결과가 나타남을 알 수 있다. 특히, 100 % OPC 콘크리트에서 CA를 사용한 콘크리트는 NF를 적용할 경우, 총통과전하량이 약 4 ~ 8 % 정도 감소한 반면, RA를 사용한 콘크리트는 약 22 % 이상 감소하였다. 이와 같이 NF를 순환골재 콘크리트에 적용할 경우, 친수성 섬유의 균열 가교효과(bridge effect)에 따른 시멘트 경화체와의 부착력증대로 인하여 콘크리트의 조직구조가 밀실해지는 것으로 나타났다(Song et al., 2005; Jeon et al., 2008).

한편, 50 % GGBFS 콘크리트는 배합에 관계없이 총통과전하량이 700 coulomb 이하로써 100 % OPC 콘크리트에 비하여 매우 우수한 염소이온침투저항성을 나타내었다. 또한, 50 % GGBFS 콘크리트에 NF를 적용할 경우, CA 및 RA 콘크리트에서 약 35 ~ 40 % 정도의 총통과전하량 감소효과가 나타난 것으로 확인되었다.

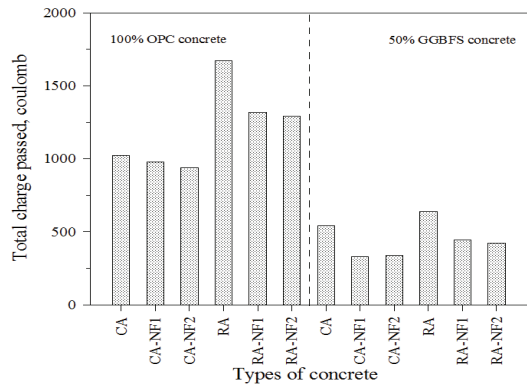


Fig. 11 Comparison of total charge passed through concrete at 28 days

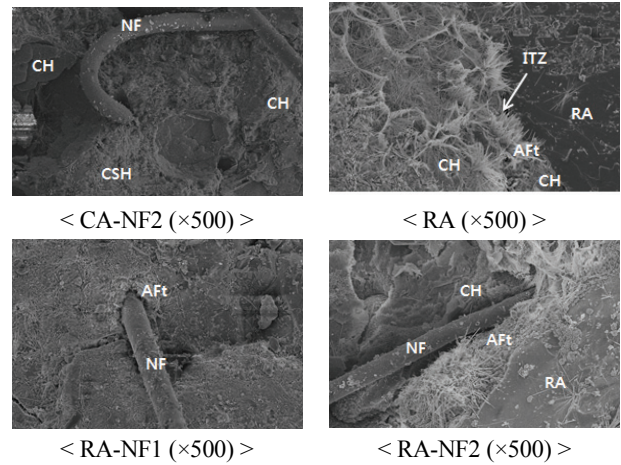


Fig. 12 SEM images of 100 % OPC concrete samples (28 days)

3.4 미세조직구조 분석

배합조건에 따른 콘크리트 중 수화물질 및 ITZ를 정성적으로 평가하기 위하여 SEM 기법을 이용하여 콘크리트의 조직구조를 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 12 및 13에 나타내었다.

Fig. 12는 재령 28일에서 100 % OPC 콘크리트 샘플의 미세조직구조를 나타낸 것으로서, NF를 적용하지 않은 CA 콘크리트 샘플은 굽은골재와 시멘트 매트릭스의 천이지대(ITZ)가 비교적 밀실한 형태의 조직구조로 이루어져 있는 것을 관찰할 수 있다. 한편, RA 콘크리트 샘플은 ITZ에서 미세균열이 관찰되었으며, 이 부근에서 시멘트 수화물인 CH(portlandite) 뿐만 아니라 침상의 수화물(AFt)이 다량 생성되었음을 확인할 수 있다. 반면, NF를 적용한 콘크리트는 NF의 부착력 증진 작용으로 인하여 비교적 밀실한 조직구조를 형성하고 있는 것으로 조사되었다. 특히, RA 콘크리트에 NF를 적용한 콘크리트는 균열 생성부위에 NF가 가교효과를 나타냄으로써 순환골재 콘크리트의 성능향상에 기여한 것으로 관찰되었다.

또, 재령 28일 50 % GGBFS 콘크리트 샘플의 미세조직구조를 나타낸 것이 Fig. 13으로써, 콘크리트의 조직구조는 광물질 혼화재료의 잠재수경성으로 인하여 수화물질로서 C-S-H가 지배적으로 생성되었으며, 조직구조가 상대적으로 치밀하게 형성된 것을 확인할 수 있다. 한편, NF를 적용한 RA 콘크리트의 조직구조는 NF를 적용하지 않은 콘크리트에 비하여 상대적으로 밀실한 형태로 나타났으며, 이러한 결과는 앞서 언급하였듯이 NF를 적용한 순환골재 콘크리트의 역학적 성능 실험결과와 어느 정도 일치하는 것으로 판단된다.

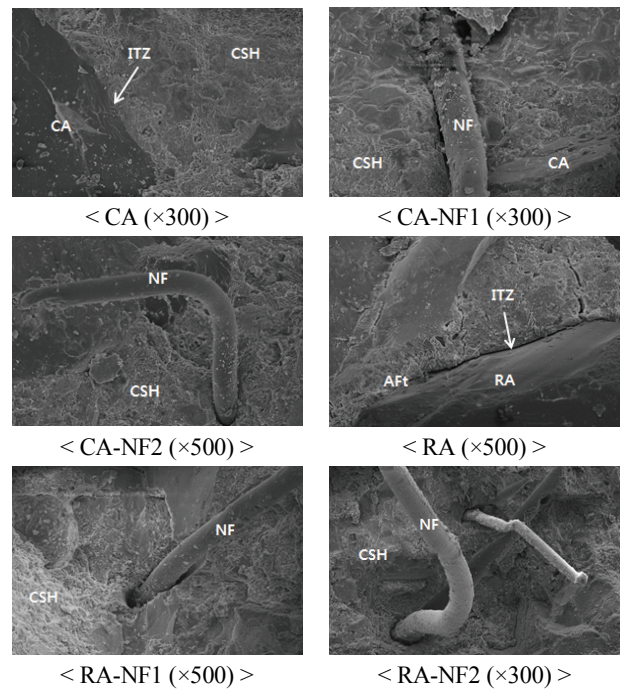
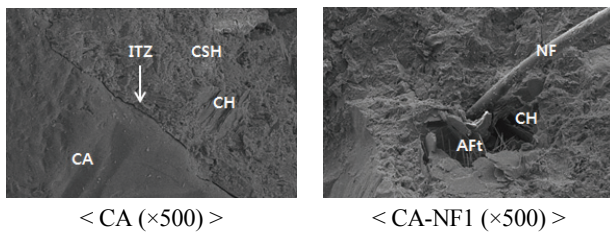


Fig. 13 SEM images of 50 % GGBFS concrete samples (28 days)

4. 결론

본 연구는 순환 굽은골재를 사용한 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성에 대한 나일론섬유의 영향을 고찰한 것으로서, 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 콘크리트의 압축강도에 대한 NF의 영향을 조사한 결과, 굽은골재 및 결합재의 종류에 관계없이 NF2를 사용한 콘크리트는 NF1을 사용한 콘크리트보다 압축강도 발전



이 우수한 것으로 나타났다. 또한, CA 콘크리트보다 RA 콘크리트에서 NF의 강도향상 효과는 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 이러한 경향은 콘크리트의 쪼갬 인장강도 측정결과에서도 유사하게 나타났다.

- 2) 100 % OPC 콘크리트의 투수공극량 측정결과, NF2를 적용한 콘크리트의 투수공극량이 상대적으로 작게 나타남으로써 조직치밀화 효과가 우수함을 알 수 있다. 특히, RA를 굵은골재로 사용한 콘크리트는 순환골재에 함유된 부착모르타르의 영향으로 인하여 CA를 사용한 콘크리트에 비하여 재령 및 배합에 관계없이 투수공극량이 다소 크게 나타났다. 반면, 50 % GGBFS 콘크리트의 투수공극량은 모든 배합에서 GGBFS의 잠재수경성의 영향으로 인하여 투수공극량이 100 % OPC 콘크리트보다 작은 것으로 조사되었다.
- 3) 굵은골재 종류, NF 사용유무에 따라 콘크리트의 총통과전하량을 비교한 결과, 100 % OPC 콘크리트에서 CA를 사용한 콘크리트는 NF를 적용할 경우, 총통과전하량이 약 4 ~ 8 % 정도 감소하였다. 한편, RA를 굵은골재로 사용한 콘크리트에 NF를 적용할 경우, 친수성 섬유의 균열 가교효과에 따른 시멘트 경화체와의 부착력증대로 인하여 총통과전하량이 약 22 % 이상 감소하였다. 또, 50 % GGBFS 콘크리트는 배합에 관계없이 총통과전하량이 700 coulomb 이하로써 100 % OPC 콘크리트에 비하여 매우 우수한 염소이온침투저항성을 나타내었다.
- 4) 100 % OPC 콘크리트의 미세조직구조를 고찰한 결과, RA 콘크리트 샘플 중 NF를 적용한 콘크리트는 균열 생성부위에 NF가 가교효과를 나타냄으로써 ITZ가 비교적 밀실한 형태의 조직구조로 형성되어 순환골재 콘크리트의 성능향상에 기여한 것으로 관찰되었다. 그러나, 적용된 섬유길이 차이에 따른 영향은 SEM 기법으로 확인할 수 없었다. 한편, 50 % GGBFS 콘크리트 샘플의 미세조직구조는 광물질혼화재료의 잠재수경성으로 인하여 수화물질이 C-S-H가 지배적으로 생성되어 콘크리트의 조직구조가 상대적으로 치밀하게 형성된 것을 확인할 수 있다.
- 5) 본 연구의 범위에서 종합적으로 고찰해 보면, 결합재로써 GGBFS를 적용한 경우, 부순골재 및 순환골재 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성은 크게 향상되는 것으로 나타났다. 또, 콘크리트의 보강재로써 NF의 적용은 콘크리트 중 골재 및 시멘트 매트릭스의 부착력 향상에 기여하여 순환골재 콘크리트의 구조성능이 매우 개선되는 것으로 관찰되었다. 그러나, 순환골재 콘크리트에 NF의 적용을 상용화하기 위한 현장적용성 평가, 최적배합에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 “고품질 순환골재 생산 및 콘크리트 활용기술 개발”연구 과제에서 연구비를 지원받아 수행된 결과입니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Ahmadi, M., Farzin, S., Hassani, S., and Motamedi, M. (2017), Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates, *Construction and Building Materials*, 144(30), 392-398.
2. Akca, K. R., Cakir, O., and Ipek, M. (2015), Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 98(15), 620-630.
3. Jeon, J. K., You, J. O., and Moon, J. H. (2008), Durability evaluation of tunnel lining concrete reinforced with nylon fiber, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(4), 487-493.
4. Katz, A. (2003), Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 703-711.
5. Korean Ministry of Environment (2014), Basic plan for recycling construction waste (2nd).
6. Lee, J., Lee, B. C., Cho, Y. K., and Jung, S. H. (2016), Chloride diffusivity of concrete using recycled aggregate by strength levels, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(2), 102-109.
7. Mu, B., Meyer, C., and Shimanovich, S. (2002), Improving the interface bond between fiber mesh and cementitious matrix, *Cement and Concrete Research*, 32(5), 783-787.
8. Ryou, J. S. (2003), An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties, *Magazine of Concrete Research*, 54(1), 7-12.
9. Silva, R. V., de Brito, J., and Dhir, R. K. (2014), Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Construction and Building Materials*, 65(29), 201-217.
10. Song, P. S., Hwang, S., and Sheu, B. C. (2005), Strength properties of nylon and polypropylene fiber reinforced concretes, *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1546-1550.

Received : 10/15/2018

Revised : 11/12/2018

Accepted : 11/13/2018

요 지 : 순환골재는 다량의 부착모르타르를 포함하고 있어 콘크리트의 강도감소, 내구성 저하, 균열발생의 원인이 되기도 한다. 본 연구에서는 보통포틀랜드시멘트(OPC)에 고로슬래그미분말(GGBFS)을 0 및 50% 대체한 순환 굵은골재 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성에 대한 나일론섬유의 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 섬유보강 순환골재 콘크리트를 제조하기 위하여 섬유길이가 상이한 두 종류 나일론섬유를 0 및 0.6kg/m³ 두 단계로 혼입하여 소정의 재령동안 수중양생하였다. 제조된 콘크리트의 압축 및 쪼갬 인장강도, 투수공극량 및 총통과전하량을 측정하여 섬유보강 부순골재 콘크리트의 성능과 비교, 고찰하였다. 또, 재령 28일 콘크리트를 대상으로 SEM 기법을 이용하여 미세조직 구조를 관찰하였다. 실험결과에 따르면, 순환골재 콘크리트는 부순골재 콘크리트에 비하여 역학적 성능 및 내구성이 떨어지는 것을 확인하였으나, 나일론섬유를 혼입할 경우, 나일론 섬유의 가교작용으로 인하여 콘크리트의 성능을 개선시키는 것으로 나타났다. 특히, NF2(19 mm)를 사용한 콘크리트는 NF1(6 mm)을 사용한 콘크리트보다 역학적 성능이 다소 우수한 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 RA 콘크리트에서 더욱 뚜렷하게 나타났다.

핵심용어 : 순환 굵은골재, 콘크리트, 나일론섬유, 부착모르타르
