Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 18, No. 12 pp. 785-792, 2017

https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.12.785
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

순환 굵은골재 사용 콘크리트의 성능향상을 위한 나일론 섬유의 적용성 연구

이승태
군산대학교 토목공학과

Application of Nylon Fiber for Performance Improvement of Recycled Coarse Aggregate Concrete

Seung-Tae Lee
Department of Civil Engineering, Kunsan National University

요 약 최근 양질의 천연골재의 부족으로 인하여 콘크리트용 순환골재의 적용성에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나, 순환골재는 다량의 부착모르타르를 포함하고 있어 콘크리트의 강도감소, 내구성 저하, 균열발생의 원인이 되기도 한다. 본 연구에서는 순환 굵은골재 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성에 대한 나일론 섬유의 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 섬유보강 순환골재 콘크리트 공시체를 제조하기 위하여 나일론 섬유를 0. 0.6 및 1.2 kg/m^{3}의 3단계로 혼입하였으며, 콘크리트의 압축 및 쪼갬 인장강도, 흡수율, 투수공극량 및 총통과전하량을 측정하여 섬유보강 부순골재 콘크리트와 비교, 고찰하였다. 또, 수화생성물, 천이지대 등 미세조직구조를 관찰하기 위하여 재령 28일 콘크리트에 대하여 주사형전자현미경(SEM) 분석을 실시하였다. 본 실험에서 도출된 실험결과에 의하면, 순환골재 콘크리트는 부순골재 콘크리트에 비하여 성능이 떨어지는 것으로 나타났으나, 순환골재 콘크리트에 나일론 섬유를 혼입할 경우, 나일론 섬유의 가교작용으로 인하여 시멘트 매트릭스의 부착력을 증진시켜 콘크리트의 성능을 개선시키는 것으로 조사되었다.

Abstract In recent times, the lack of good quality natural aggregate has led to the alternative use of recycled aggregate. However, the adhered mortars in recycled aggregate lower the performance of the concrete, such as by reducing its strength and causing deterioration and cracking. In this study, the effects of nylon fiber (NF) on the mechanical and durable performance of recycled coarse aggregate concrete (RAC) were experimentally examined. Concrete specimens with natural coarse aggregate (NA) or RA were produced by adding 0, 0.6 and 1.2kg/m3 of NF. Various mechanical properties and the durability of the RAC were measured and compared with those of the NAC. In addition, in order to observe the hydrates and ITZ, SEM observations were made of the 28-day concrete samples. From the test results, as expected, it was found that the RAC exhibited lower performance than the NAC. However, the addition of NF to the concrete was effective in significantly enhancing the performance of the RAC due to the bridge effect of the NF.

Keywords : Concrete, Durability, Mechanical performance, Nylon fiber, Recycled coarse aggregate

1. 서론

최근 경제발전 및 생활수준 향상으로 인하여 생활 및 산업 폐기물의 배출량이 크게 증가하고 있으며, 폐기물 처리 문제가 심각한 사회 및 경제적 문제점으로 대두되고 있는 실정이다. 특히, 2014년 기준으로 건설폐기물은

본 논문은 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 건설기술연구사업 “고품질 순환골재 생산 및 콘크리트 활용기술 개발” 연구과제에서 연구비를 지원받아 수행된 결과입니다. 이에 감사드립니다.
*Corresponding Author : Seung-Tae Lee(Kunsan National Univ.)
Tel: +82-63-469-4877 email: stlee@kunsan.ac.kr
Received October 11, 2017 Revised November 6, 2017
Accepted December 8, 2017 Published December 31, 2017

년간 6,700만톤 이상 발생하였으며, 이는 국가 총 발생 폐기물의 절반이상을 점유하고 있다. 또, 건설폐기물 중 콘크리트 구조물의 노후화, 용도변경 등으로 발생하는 폐콘크리트의 양도 년간 4,000만톤 이상 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다[1].

이러한 문제점을 인식하여 양질의 천연골재 부족현상 해소 및 환경하중 제어를 위하여 콘크리트 기술자들 사이에는 폐콘크리트를 콘크리트용 순환골재로 재활용하기 위한 일련의 노력이 수행되어 오고 있으며, 어느 정도 가시적인 성과도 확보되어 있는 실정이다.

정부에서도 순환골재의 고부가가치 활용을 위하여 「KS F 2573(콘크리트용 순환골재)」, 「순환골재 품질기준」 등 관련 기준을 제정하여 순환골재의 활용방안을 점차적으로 넓혀나가고 있다.

순환골재 콘크리트는 천연골재 사용 콘크리트와는 다르게 신(新) ITZ (interfacial transition zone)외에도 부착모르타르에 의하여 형성되는 구(舊) ITZ가 존재하게 되며, 부착모르타르의 영향으로 인하여 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성이 감소하게 된다[2]. 따라서, 전세계적으로 순환골재 콘크리트가 내포하고 있는 공학적 단점을 극복하기 위한 연구자들의 다양한 시도가 이루어지고 있다. 이러한 연구들 중 순환골재 콘크리트에 폴리프로필렌섬유(polypropylene fiber), 강섬유(steel fiber), 탄소섬유(carbon fiber), 유리섬유(glass fiber) 등 보강섬유재를 적용함으로써 순환골재 콘크리트의 성능을 향상시키기 위한 다수의 연구도 수행되었다[3-5]. 특히, Ahmadi 등[3]은 순환골재 콘크리트의 강도향상에 대한 재생 섬유 보강재의 영향을 검토하였으며, Akca 등[4]은 최대 1.5%의 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 순환골재 콘크리트의 강도(특히, 휨 및 쪼갬 인장강도)향상 효과를 실험적으로 입증하기도 하였다.

일반적으로 순환골재 콘크리트는 ITZ의 증가, 강도감소 등으로 조직내부에 미세균열이 다량으로 발생하기 쉬우며, 나일론섬유(nylon fiber)는 콘크리트의 균열저감에 우수한 성질을 가지는 것으로 알려져 있으나, 나일론섬유를 순환골재 콘크리트에 적용시킨 연구는 그다지 많지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 순환골재 콘크리트의 성능향상을 위한 일환으로 국내에서 생산되는 나일론섬유를 보강재로 적용하기 위한 연구를 착안하게 되었으며, 순환굵은골재 콘크리트에 나일론섬유를 각각 3단계로 혼입량을 달리하여 공시체를 제조하였으며, 콘크리트의 역학적 성능, 내구성 및 미세조직구조를 실험적으로 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 실험결과는 향후 섬유보강 순환골재 콘크리트의 최적설계를 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트

본 연구에서는 KS L 5201에 준하는 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였으며, OPC의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition, mineralogical compound and physical properties of OPC

Chemical composition (%)						
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	1.3

Mineralogical compound (%)			
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
54.9	16.6	10.3	9.1

Physical properties	
Density (g/cm^3)	Fineness (cm^2/g)
3.15	3,280

2.1.2 골재

잔골재는 밀도 2.65 g/cm^3, 흡수율 0.98% 및 조립률 2.80인 강모래(sand)를 사용하였으며, 천연 굵은골재(NA: natural coarse aggregate)는 밀도 2.64 g/cm^3, 흡수율 0.66 %, 최대치수 25 mm인 부순 굵은골재를 사용하였다. 한편, 순환 굵은골재(RA: recycled coarse aggregate)는 전주 J사에서 분쇄, 세척 및 분류과정을 거친 골재 중 체가름시험을 통하여 부순 굵은골재와 마찬가지로 최대치수 25 mm가 되도록 입도조정하여 사용하였다. 본 실험에 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Physical properties of aggregates

Properties	Sand	NA	RA
Density (g/cm^3)	2.65	2.64	2.37
Absorption (%)	0.98	0.66	4.31
Abrasion rate (%)	-	21.7	47.5
Adhered mortar (%)*	-	-	5.56

* Acid-soluble value

2.1.3 나일론섬유

Fig. 1과 같이 본 연구에 사용된 국내 K사의 나일론 섬유(NF: nylon fiber)는 분산성을 향상시키기 위하여 섬유표면에 분산제를 코팅하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 NF의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

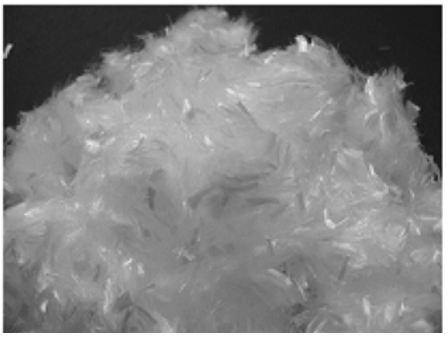


Fig. 1. Nylon fiber(NF) used in this study

Table 3. Physical properties of NF

Item	NF
Diameter (μm)	23
Length (mm)	6
Density (g/cm^3)	1.16
Tensile strength (MPa)	919
Elastic modulus (GPa)	5.3
Color	White

2.1.4 화학혼화제

콘크리트의 적절한 유동성((150±20) mm) 및 공기량((4.5±1.5) %)을 확보하기 위하여 PC계열 고성능감수제(SP제) 및 공기연행제(AE제)를 사용하였다.

2.2 배합

콘크리트 제조를 위하여 NA 및 RA를 굵은골재로 적용하였으며, NF의 혼입량을 3단계(0, 0.6 및 1.2 kg/m^3)로 조절하여 총 6배합의 공시체를 제작하였다. 이때, 기준 콘크리트(NAC-F1)의 설계기준강도는 24 MPa로 하였다. 믹싱된 콘크리트는 제조 1일 후 탈형하여 (20±2) ^{o}C 조건에서 소정의 기간동안 수중양생하였다. 본 실험에 사용된 콘크리트의 배합표는 Table 4와 같다.

Table 4. Mix proportions of concrete

Code	Unit weight (kg/m^3)						SP	AEA
	W	C	S	NA	RA	NF	(CX%)	(CX%)
NAC-F1	170	350	745	1015	-	0	0.7	0.004
NAC-F2	170	340	745	1015	-	0.6	0.7	0.004
NAC-F3	170	340	745	1015	-	1.2	0.7	0.005
RAC-F1	170	340	745	-	912	0	0.8	0.005
RAC-F2	170	340	745	-	912	0.6	0.8	0.006
RAC-F3	170	340	745	-	912	1.2	0.8	0.006

2.3 실험방법

2.3.1 강도

수중양생한 ∅100×200 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 흡수율

ASTM C 1585에 준하여 콘크리트의 흡수율 실험을 실시하였으며, 재령 28일 시편을 대상으로 초기흡수계수(Si : initial absorption coefficient)를 산정하였다.

2.3.3 투수공극량

콘크리트의 투수공극량 시험은 ASTM C 642에 준하여 공시체 중량 800 g을 초과하지 않는 범위에서 공시체 두께를 20 mm로 정하여 절단한 후 표면건조포화상태 중량(W_{ssd}), 수중중량(W_{susp}) 및 노건조상대 중량(W_{dry})을 측정한 후, 다음 식 (1)과 같이 투수공극량(P_{wat})을 계산하였다.

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

2.3.4 염소이온 침투저항성

콘크리트의 통과전하량은 ASTM C 1202에 준하여 두께 ∅100×50 mm의 공시체를 대상으로 하여 측정하였다. 시험체 양단에 60V의 직류전압을 6시간 동안 통전시키면서 시험체에 흐르는 전류를 데이터 로거를 이용하여 30분 간격으로 측정하였으며, 측정된 전류로부터 시간에 대한 전류의 적분 값을 취하여 식 (2)로 총 통과전하량을 산정하였다.

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

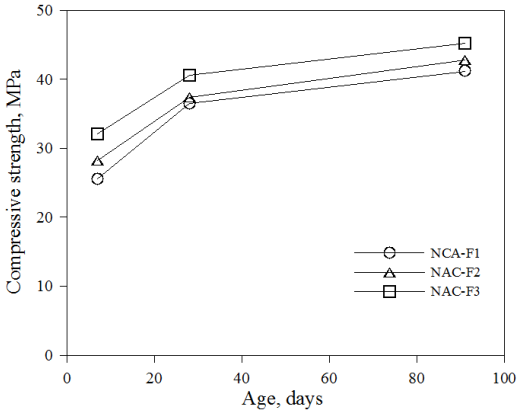
여기서, Q = 총 통과전하량(Coulomb), Ix = x분에서의 전류값(A)이다.

2.3.5 주사형전자현미경(SEM) 분석

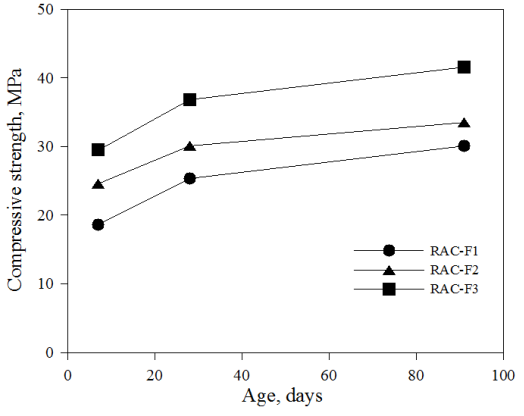
콘크리트의 조직구조 및 수화생성물을 관찰하기 위하여 수중에서 28일간 양생한 콘크리트 샘플을 대상으로 XL30ESEM(P사)을 이용하여 확대촬영을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 강도특성



(a) Natural aggregate concrete

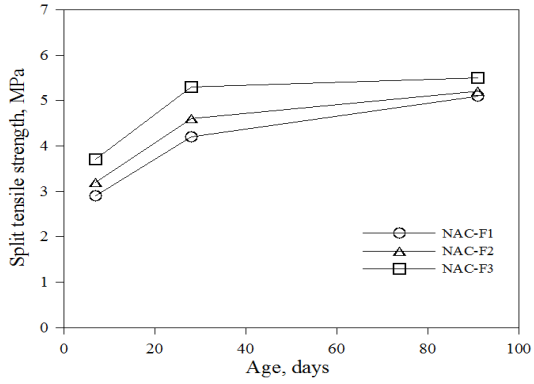


(b) Recycled aggregate concrete

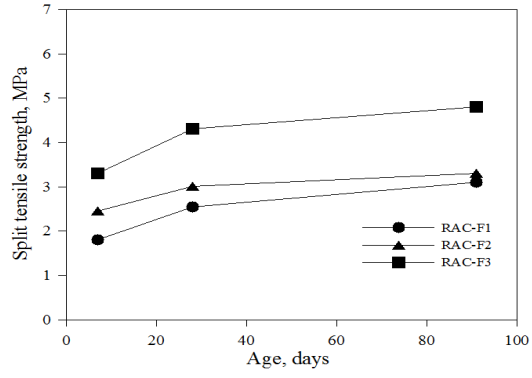
Fig. 2. Compressive strength development of concrete with different NF contents

Fig. 2는 NAC 및 RAC의 압축강도 특성에 대한 NF 혼입량의 영향을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에 나타났듯이, NF를 혼입하지 않은 NAC-F1 콘크리트의 압축강도가 초기재령(재령 7일)에서 약 25.6 MPa으로 나타난 반면, NF를 0.6 및 1.2kg/m^3 적용한 NAC-F2 및 NAC-F3 콘크리트의 압축강도는 약 28.2 및 32.1 MPa 로 나타남으로써, NF를 적용한 콘크리트의 압축강도가 다소 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 재령 28일 및 91일에서도 유사하게 관찰되었다.

한편, RAC의 압축강도 발현에 대한 NF 혼입량의 영향을 나타낸 것이 Fig. 2(b)로써, NF 혼입량 증가에 따른 압축강도의 증가가 NAC 콘크리트 보다 상대적으로 뚜렷하게 관찰됨을 알 수 있다. 예를 들어, NAC는 재령 91일에서 NF 1.2 kg/m^3 혼입할 경우, NF 무혼입 콘크리트에 비하여 압축강도가 약 9.7 % 증가한 반면, RAC는 동일량의 NF를 혼입한 콘크리트의 압축강도가 약 38.2 % 증가하는 결과를 나타내었다.



(a) Natural aggregate concrete



(b) Recycled aggregate concrete

Fig. 3. Split tensile strength development of concrete with different NF contents

Fig. 3은 NAC 및 RAC의 쪼갬 인장강도 특성에 대한 NF 혼입량의 영향을 도시한 것으로써, Fig. 2의 압축강도 경향과 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 특히, Fig. 3(a)에서와 같이 NAC에 NF를 각각 0.6 및 1.2 kg/m^3 적용함에 따라 재령 91일에서 각각 2.0 % 및 7.8 %의 인장강도 증진효과를 나타낸 반면, RAC에 NF를 각각 0.6 및 1.2 kg/m^3 적용한 경우(Fig. 3(b)), 인장강도가 각각 6.4 % 및 54.8 % 증진되는 것으로 나타났다. 이와 같이 콘크리트에 NF를 혼입한 콘크리트의 압축 및 인장강도가 큰 이유는 나일론 섬유가 친수성으로 인한 강한 수소결합력을 유도함으로써, 콘크리트와 섬유간의 부착력을 증진시켰기 때문으로 판단된다[6]. 또한 NF의 강도증진 효과는 순환 굵은골재 사용 콘크리트에서 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

3.2 흡수율

본 연구에서는 6종류 콘크리트의 표면투수 특성을 평가하기 위하여 흡수율 실험을 수행하였으며, 콘크리트 종류별 재령 28일에서 실험결과를 상호 비교하여 Fig. 4와 같이 나타내었다. 측정결과, 순환 굵은골재 사용 콘크리트가 부순 굵은골재 사용 콘크리트에 비하여 상대적으로 큰 흡수율을 나타내었으며, NF 혼입량도 콘크리트의 표면 흡수특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, NAC의 흡수율은 NF 혼입량이 증가함에 따라 크게 감소하는 반면, RAC는 NF 혼입량에 따른 표면 흡수율 개선 효과가 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났으며, 이는 Fig. 2 - 3에 제시된 콘크리트의 강도특성과는 다른 경향을 나타내는 것으로 관찰되었다.

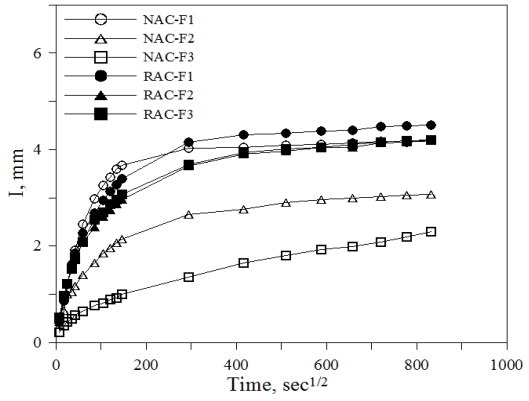


Fig. 4. Results of absorption measurement of concrete (28 days)

Table 5. Initial absorption coefficient (Si) of concrete (28 days)

Mixtures	Si [×10^{-3} mm/s$^{1/2}$]
NAC-F1	22.5
NAC-F2	11.4
NAC-F3	4.9
RAC-F1	20.1
RAC-F2	16.2
RAC-F3	17.1

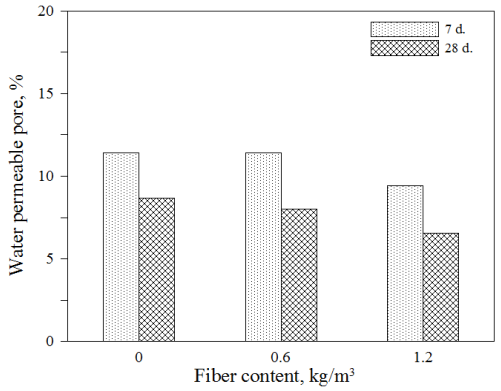
한편, Table 5는 ASTM C 1585에 준하여 산정된 콘크리트의 초기흡수계수(Si)를 비교하여 나타낸 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이 콘크리트 종류에 따라 Si 값은 상이하였으며, NAC-F1의 Si 값은 22.5×10^{-3} mm/s$^{1/2}$로 나타났다. 한편, NF 혼입량이 0.6 및 1.2kg/m^{3}인 NAC-F2 및 NAC-F3의 Si 값은 각각 11.4 및 4.9×10^{-3} mm/s$^{1/2}$로 조사되었다. 그러나, RAC의 Si 값은 NF 혼입량에 따라 크게 변화하지 않은 것으로 나타났다.

3.3 투수공극량

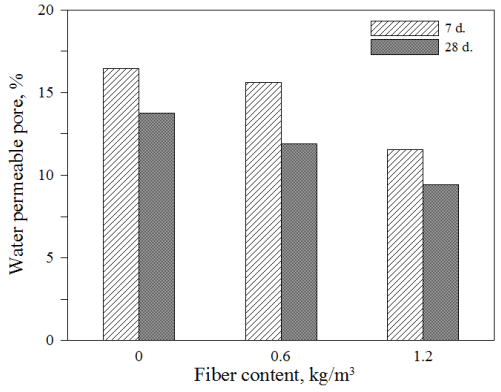
콘크리트의 공극크기 및 공극량은 결합재의 종류, 수화물량 및 종류, 배합조건, 양생방법 등과 같은 다양한 인자에 따라 달라지게 되며, 시간 함수에 지배적인 영향을 받게 된다. 이러한, 콘크리트의 공극특성은 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성에 지배적인 영향을 미치게 된다[7].

Fig. 5는 NF 혼입량에 대한 재령별 콘크리트의 투수공극량 결과를 나타낸 것이다. NAC 콘크리트의 투수공극량 실험결과를 나타낸 것이 Fig. 5(a)로써, NF 0.6 kg/m^3 적용 콘크리트는 NF를 사용하지 않은 콘크리트와 비교하여 유사한 투수공극량 결과를 나타낸 반면, NF 1.2 kg/m^3 적용 콘크리트의 투수공극량이 상대적으로 크게 감소하는 경향을 나타내었다.

한편, RAC 콘크리트의 재령별 투수공극량에 대한 NF 혼입량의 영향을 나타낸 것이 Fig. 5(b)로써, NF 혼입량 증가에 따라 투수공극량이 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, RAC-F1의 재령 7일 및 28일에서 투수공극량이 약 16.4 % 및 13.7 %인 것에 비하여 NF 1.2 kg/m^3 사용한 RAC-F3는 약 11.5 % 및 9.4 %로 나타났다. 이와 같이 NF를 사용한 콘크리트의 투수공극량이 감소하는 이유는 Spadea 등[8]의 연구결과에서 나타났듯이 NF와 시멘트 경화체의 재령에 따른 점진적인 부착강도 증진으로 인하여 공극량이 감소하였기 때문으로 판단된다.



(a) Natural aggregate concrete



(b) Recycled aggregate concrete

Fig. 5. Water permeable pore of concrete with different NF contents

3.4 염소이온 침투 저항성

Fig. 6은 재령 7 및 28일 콘크리트를 대상으로 총통과전하량을 측정하여 콘크리트의 염소이온 침투저항성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 사용된 골재에 관계없이 콘크리트 중 NF 혼입량이 증가함에 따라 콘크리트의 총 통과전하량은 감소하는 경향을 나타내었다.

또, RAC계 콘크리트는 사용된 순환 굵은골재에 존재하는 부착모르타르의 영향으로 인하여 NAC계 콘크리트보다 재령에 관계없이 총통과전하량이 크게 나타나는 것으로 관찰되었다[9]. 특히, 재령 28일에서 RAC에 NF를 1.2 kg/m^3 사용한 콘크리트(RAC-F3)의 총통과전하량이 부순골재 사용 콘크리트(NAC-F1) 보다 오히려 작은 값을 보임으로써, 순환 굵은골재 콘크리트의 염소이온 침투저항성에 대한 NF의 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 나일론섬유를 순환 굵은골재 콘크리트에 적용할 경우, 친수성 섬유의 균열 가교효과 (bridge effect)에 따른 시멘트 경화체와의 부착력 증대로 인하여 콘크리트 내부조직의 밀실도가 증가하는 것으로 나타났다[10]. 이러한 실험결과는 Jeon 등의 연구결과[11]에서도 유사하게 나타나는 것으로 보고되고 있다.

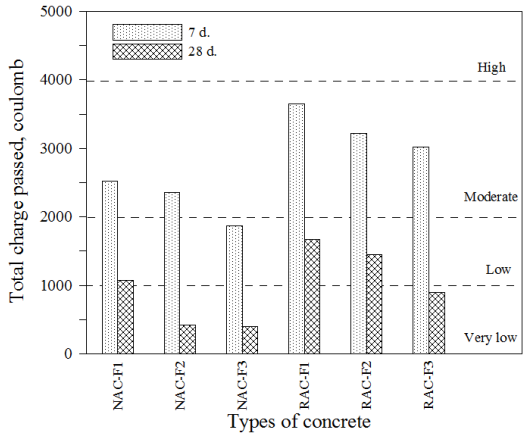


Fig. 6. Total charge passed through concrete

3.5 미세구조분석

콘크리트 중에 생성된 수화물질 및 ITZ를 정성적으로 평가하기 위하여 SEM 기법을 이용하여 조직구조를 조사하였으며, 이를 Fig. 7 - 10에 나타내었다. Fig. 7은 재령 28일에서 NAC-F1 샘플의 미세조직구조를 나타낸 것으로써, 부순 굵은골재와 시멘트 메트릭스의 경계부분(ITZ)이 비교적 균열이 적은 밀실한 형태로 이루어져 있으며, 망상의 C-S-H가 다량으로 생성되어 있는 것으로 관찰되었다. 한편, 순환 굵은골재를 사용한 RAC-F1 샘플의 SEM 사진을 나타낸 것이 Fig. 8로써, 순환 굵은골재의 ITZ에서 미세균열이 관찰되었으며, 이 주변에 판상(portlandite) 및 침상(AFt)의 수화물이 지배적으로 생성된 것으로 조사되었다.

또, NAC에 NF를 1.2 kg/m^3 적용한 콘크리트 샘플의 재령 28일 SEM 사진을 나타낸 것이 Fig. 9로써, 수화물질은 C-S-H가 지배적으로 생성되었으며, 시멘트 매트릭스 중에 NF의 부착력 증진 작용으로 인하여 비교적 밀실한 조직구조를 형성하고 있는 것으로 관찰되었다. 한편, RAC에 NF를 1.2 kg/m^3 적용한 콘크리트의 미세조직구조를 나타낸 것이 Fig. 10으로써 균열생성 부위에 NF가 가교작용을 함으로써, 순한 굵은골재 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성능 향상에 크게 기여한 것으로 판단된다.

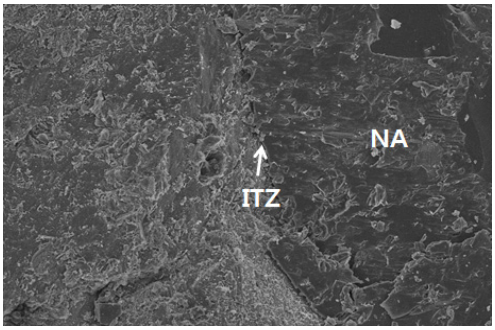


Fig. 7. SEM image of NAC-F1 sample (x500)

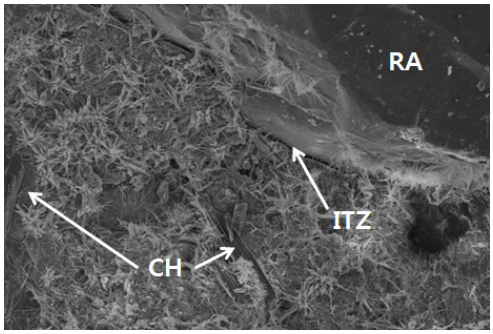


Fig. 8. SEM image of RAC-F1 sample (x500)

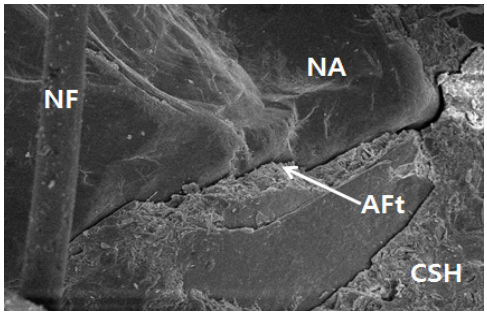


Fig. 9. SEM image of NAC-F3 sample (x500)

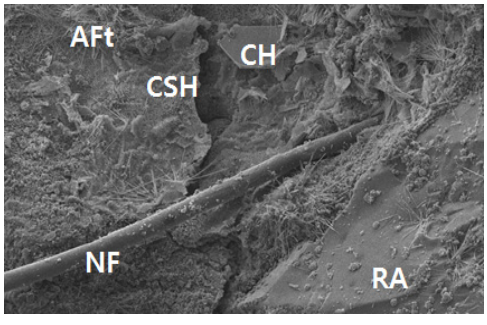


Fig. 10. SEM image of RAC-F3 sample (x300)

4. 결론

본 연구는 순환 굵은골재 사용 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성에 대한 나일론섬유의 영향을 실험적으로 평가한 것으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 콘크리트의 압축강도에 대한 NF의 영향을 조사한 결과, NF 혼입량이 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도는 증가하는 경향을 나타내었으며, NAC보다 RAC에서 NF 혼입량에 따른 강도 증대효과가 더 크게 나타났다. 또한, 이러한 경향은 쪼갬 인장강도 측정결과와도 어느 정도 유사하게 나타났다.
2. 재령 28일 콘크리트의 흡수율을 측정한 결과, RAC가 NAC에 비하여 상대적으로 큰 흡수율을 나타내었으나, NF 혼입에 따른 RAC의 표면 흡수율 개선 효과는 오히려 NAC보다 상대적으로 작은 것으로 관찰되었다.
3. RAC계 콘크리트는 순환 굵은골재 중 부착모르타르의 영향으로 NAC계 콘크리트보다 재령에 관계없이 투수공극량 및 총통과전하량이 크게 나타났으며, NF를 혼입함에 따라 콘크리트의 염소이온 침투저항성이 크게 개선되는 효과를 나타내었다.
4. 콘크리트의 미세조직구조를 고찰한 결과, RAC가 NAC에 비하여 미세균열이 상대적으로 많이 존재하였으며, ITZ도 상대적으로 크게 나타났다. 또, RAC에 NF를 적절하게 혼입할 경우, NF의 가교효과(bridge effect)로 인하여 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성이 크게 향상될 것으로 기대된다.

References

[1] Ministry of Environment, “Construction waste recycling survey report”, 2014.

[2] J. Ryou, “An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties”, *Magazine of Concrete Research*, vol. 54, pp. 7-12, 2003. DOI: https://doi.org/10.1680/macr.2002.54.1.7

[3] M. Ahmadi, S. Farzin, A. Hassani and M. Motamedi, “Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates”, *Construction and Building Materials*, vol. 14, pp. 392-398, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.215

[4] K. R. Akca, O. Cakir and M. Ipek, “Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled

aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 620-630, 2015.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133

[5] D. Gao, L. L. Zhang and M. Nokken, "Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear", *Cement and Concrete Composites*, vol. 79, pp. 1-8, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.006

[6] B. Mu, C. Meyer, and S. Shimanovich, "Improving the interface bond between fiber mesh and cementitious matrix", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 783-787, 2002.
DOI: https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00715-9

[7] M. F. M. Zain, Md. Safiuddin, H. Mahmud, "Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder ratios", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 1501-1505, 2000.
DOI: https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00359-8

[8] S. Spadea, I. Farina, A. Carrafiello and F. Fraternali, "Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement", *Construction and Building Materials*, vol. 80, pp. 200-209, 2015.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075

[9] S. T. Lee, J. Y. Choi, K. T. Park, D. W. Seo and Y. j. Yoo, "Effect of steam curing on the properties of recycled aggregate concrete", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, vol. 18, pp. 99-107, 2014.
DOI: https://doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.2.099

[10] P. S. Song, S. Hwang and B. C. Sheu, "Strength properties of nylon and polypropylene fiber reinforced concretes", *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1546-1550, 2005.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033

[11] J. K. Jeon, J. O. You and J. H. Moon, "Durability evaluation of tunnel lining concrete reinforced with nylon fiber", *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 20, pp. 487-493, 2008.
DOI: https://doi.org/10.4334/JKCI.2008.20.4.487

이 승 태(Seung-Tae Lee) **[정회원]**

- 1999년 8월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
건설재료, 콘크리트 구조, 콘크리트 포장