

강섬유 혼입량이 철근 부식저항성에 미치는 영향

김성도¹ · 문도영² · 이규필^{3*}

¹비회원, 경성대학교, 교수

²정회원, 경성대학교, 조교수

³정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소, 수석연구원

Influence of steel fiber contents on corrosion resistance of steel reinforcement

Seong-Do Kim¹, Do-Young Moon², Gyu-Phil Lee^{3*}

¹Department of Civil Engineering, Kyungsoo University, Professor

²Department of Civil Engineering, Kyungsoo University, Assistant Professor

³Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Senior Researcher

ABSTRACT: In order to evaluate corrosion resistance of steel fiber-reinforced concrete, accelerated chloride migration and surface resistivity tests were conducted. In addition air content of fresh concrete, compressive strength and water absorption were measured for investigating fundamental characteristics of concrete. Two different water-cement ratios(0.44, 0.5) and three steel fiber contents(0.25%, 0.5%, 1%) were considered as variables. Note that all specimens cast with same compaction work. As a results, corrosion resistance decreased as steel fiber contents increased regardless of water-cement ratio when the concrete was compacted with same amount of work done. However, for concrete with same steel fiber content, the lower water-cement ratio showed the better corrosion resistance. It is found that enhancement of fluidity and enough compaction should be done for corrosion resistance of SFRC.

Keywords: SFRC, Accelerated chloride migration test, Steel fiber content, Water-cement ratio, Compaction

초 록: 본 연구에서는 강섬유보강콘크리트의 부식저항성을 규명하기 위한 촉진염소이온확산시험과 표면전기저항시험을 수행하였다. 또한 배합평가를 위한 기초시험으로서 굳지 않은 콘크리트 공기량, 일축압축강도, 굳은 콘크리트의 흡습시험을 수행하였다. 실험변수는 두 종류의 물-시멘트비(0.44, 0.50)와 세 개의 강섬유 혼입량(0.25%, 0.5%, 1%)으로 선정하였다. 주목할 것은 모든 타설시 콘크리트의 다짐량은 동일하게 하였다. 시험결과, 동일한 작업량으로 다짐이 되었을 때, 물-시멘트비에 상관없이 두배할 모두에서 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 부식저항성이 감소하는 것으로 확인되었다. 그러나, 동일한 강섬유 혼입비에 대하여 배합의 물-시멘트비가 낮은 콘크리트의 부식저항성이 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 강섬유보강콘크리트의 타설시 유동성의 확보와 충분한 다짐이 염소이온침투저항성을 확보하기 위하여 매우 중요하다고 판단된다.

주요어: 강섬유보강콘크리트, 촉진염소이온확산시험, 강섬유혼입률, 물-시멘트비, 다짐

1. 서론

강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber-Reinforced Concrete, SFRC)에 혼합된 다양한 형태의 강섬유는 균열이 발생하였을 때 균열면에 존재하게 되고, 균열을 연결하는 역할을 담당하게 됨으로써, 균열의 성장을 억제하

는데에 큰 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 장점에도 불구하고 국내에서는 SFRC를 주로 NATM 터널의 콘크리트라이닝 시공을 위한 샷크리트에만 사용하고 있는 실정이다. 이와 같이 SFRC 사용이 제한적인 이유는 그 성능의 우수함에도 불구하고, 이를 정량화할 수 있는 설계기법의 부재에서 기인하였다. 그러나 최근 유럽에서 발표된 Model Code 2010 (fib, 2010)에는 강섬유보강콘크리트 구조물의 정량적인 평가 및 설계방법이 제시되어 있으며,

*Corresponding author: Gyu-Phil Lee
E-mail: freely@kict.re.kr

Received April 15, 2015; Revised April 24, 2015;
Accepted April 28, 2015

이에 따라 SFRC의 활용이 유럽과 미국을 중심으로 크게 증가하고 있다.

향후 SFRC 구조물의 증가가 예상됨에 따라 SFRC 구조물이 충분한 내구성능을 가지며, 설계수명을 확보할 수 있는지에 대한 연구가 필요한 상황이다. 현재 미국과 유럽 등 선진국에서는 SFRC의 내구성능에 대한 연구가 활발한 반면, 국내에서는 초기단계로서 OPC 및 광물질 혼화제가 사용된 콘크리트의 내구성능만 수행된 바 있다(Selvi and Thandavamoorthy, 2013; Kim, 2010).

Rapoport et al. (2002)은 인위적으로 균열을 발생시킨 SFRC 시편의 투수(Water permeability)성능에 대한 실험을 수행하였으며, 강섬유로 인하여 투수저항 성능이 크게 개선된다고 보고하였다. Singh (2013)는 1%Vol., 2%Vol., 4%Vol.의 강섬유보강콘크리트의 투수성에 대한 실험을 수행하였으며, 강섬유의 혼입량이 증가할수록 투수성능이 크게 개선된다고 주장하였다. 그러나, 각 강섬유 혼입비에 대하여 다짐상태나 다짐정도, 슬럼프 및 공기량 등의 조사 분석을 제시하지 않아 실험결과에 대한 객관적인 정보가 부족한 실정이다. 한편 Miloud (2005)은 강섬유의 혼입이 콘크리트의 투수성과 공극률에 미치는 영향을 실험을 통해 분석하였는데, 강섬유의 혼입량이 증가할수록 공극률은 감소하는 것으로 나타났지만 이는 제작시 작업성을 확보하기 위하여 다짐량이 동시에 증가하였기 때문이며, 투수저항 성능은 오히려 감소되었다. 이에 대한 원인으로는 강섬유가 공극간을 연결함으로써 물의 통로역할을 하게 되기 때문이라고 주장하였다. 또한, Frazao et al. (2013)은 강섬유가 혼입된 자기유동콘크리트의 촉진염소이온확산시험과 노출공극을 시험하였는데, 강섬유로 인하여 노출공극은 미세한 증가를, 염소이온확산에 대한 저항성능은 큰 변화가 없다고 주장하였다. Abrycki and Zajdzinski (2012)는 강섬유보강콘크리트의 촉진염소이온확산시험과 표면전기저항시험을 강섬유의 혼입량을 변수로 수행하였다. 실험결과에 따르면 염소이온침투저항성능은

큰 영향이 없으며, 전도체인 강섬유로 인해 표면전기 저항은 큰 저하를 나타내었다. Abbas et al. (2014)는 SFRC 터널세그먼트로부터 채취한 코어를 촉진염소이온침투시험을 수행하였으며, 이를 일반콘크리트 세그먼트와 비교하였다. 실험결과, 전도체인 강섬유로 인한 통과전하량의 증가현상은 없었으며, 일반콘크리트에 비하여 높은 염소이온저항성능을 확인하였다.

이상과 같은 기존 연구자들의 연구결과를 종합하면, 연구자마다 강섬유보강콘크리트의 부식저항성능에 대한 결과에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 특히, 강섬유 콘크리트 배합시 다짐작업의 정도와 감수제 등이 실험결과에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있으나, 각 논문에서 다짐과 감수제 등의 혼화제에 대한 영향을 명확하게 제시하고 있지 않기 때문에 판단이 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 OPC를 사용한 일반 강섬유보강콘크리트의 부식저항성능을 실험적으로 규명하고자 하였다. 광물 혼화제와 감수제 등의 혼화제를 사용하지 않고, 콘크리트 타설시 다짐량도 일반콘크리트와 강섬유보강콘크리트에 대하여 동일하게 하였다. 오직 강섬유의 혼입량만을 변수로 하여 부식저항성능을 검토하고자 하였다. 본 논문의 결과는 향후 강섬유보강콘크리트의 내구성능 평가를 위한 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 개요

본 연구에서는 OPC를 사용한 일반 강섬유보강콘크리트의 철근 부식저항성능을 평가하였다. 배합특성에 따른 영향을 살펴보기 위하여 물-시멘트비와 강섬유의 혼입량을 변수로 하였다. 물-시멘트비는 0.5와 0.44로 하였으며, 각각을 A배합과 B배합으로 명명하였다. 또한 강섬유의 혼입률은 일반강도콘크리트에서 주로 사용하는 혼입률 범위로서, 체적비에 대하여

Table 1. Mix proportions

ID.	G _{max} (mm)	W/C (%)	Slump (mm)	S/a(%)	Unit mass (kg/m ³)				Steel Fiber (kg/m ³) (%Vol.)
					W	C	S	G	
A Mix	20	50.0	80	40.1	192	383	670	1062	0(0%)
			65						20(0.25%)
			45						39(0.5%)
			20						78(1%)
B Mix	20	44.1	55	46.0	175	397	813	980	0(0%)
			40						20(0.25%)
			32						39(0.5%)
			15						78(1%)

0.25%, 0.5%와 1%를 고려하였다. 각 배합에 대한 배합표는 Table 1과 같다. 본 실험에서 사용된 시멘트는 S사의 제품으로 KS L 5201에 규정된 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 골재는 야적된 골재로 체가름을 하여 배합에 사용하였다. 강섬유는 길이 40 mm, 직경 0.5 mm의 Twist 강섬유이다. 강섬유의 인장강도는 제작사로부터 제공받았으며, 2,450 MPa 이상이다. 주목할 것은 강섬유의 혼입량이 증가할수록 슬럼프치가 크게 떨어짐을 알 수 있다. 또한 배합별로 살펴보면, 물-시멘트비가 낮은 B배합의 슬럼프치가 모든 혼입률에 대하여 A배합의 슬럼프치 보다 작다. 시험체의 제작시 다짐량은 모두 동일하게 하였다. 즉, 각 시험체의 제작시 다짐봉의 다짐횟수를 동일하게 하였다.

부식저항성능 규명을 위한 시험은 전위차를 이용한 촉진시험방법인 NT Build 492 (1999) 시험방법과 표면전기저항 시험을 수행하였다. 재령일수에 따른 영향을 분석하기 위하여 재령 7일과 28일의 결과를 비교하였다.

또한 상기 부식저항성능 시험결과에 대한 이유를 규명하고 평가하기 위하여 각 배합의 기초물성시험을 수행하였다. 각 실험항목의 방법과 기준에 대해서는 다음장에 자세히 설명하였다.

2.2 기초물성시험

배합의 기초물성 시험 3가지를 수행하였다. 첫 번째

는 실험변수로 고려된 모든 배합에 대하여 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험을 수행하였다. 시험방법은 KS F 2409(굳지 않은 콘크리트의 공기량의 압력에 의한 시험 방법)에 규정하고 있는 시험방법에 따라 수행하였다. 공기량은 동일한 배합에 대하여 2회 측정하였다.

두 번째는 일축압축강도 시험을 수행하였다. 2가지의 배합[물-시멘트비 0.5(A배합), 0.44(B 배합)]의 콘크리트 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편의 압축강도 측정을 위하여 KS F 2403에서 규정하고 있는 콘크리트의 강도 시험용 공시체(직경 100 mm×높이 200 mm)를 강섬유 혼입비별로 3개씩 24개 제작하였다. 압축강도 공시체는 타설 24시간 후 몰드를 제거하고 28일 동안 수중양생 하였다. 시험은 KS F 2405에서 규정하고 있는 언본드 캐핑 방법으로 수행하였다.

세 번째는 굳은 콘크리트의 흡습량을 측정하였다. 측정방법은 Zinkaah (2014)와 Frazao et al. (2013)이 사용한 방법으로 이를 통해 내부에 존재하는 공극량 (porosity)을 판단하는 근거가 된다. 시험방법은 시험체를 고온건조기에 100°C±10°C에서 24시간 동안 건조한다(Fig. 1). 이후, 시험체를 건조기에서 꺼낸 후 상온에서 표면의 온도가 25°C에 도달할 때 까지 식힌 후 0.001 g까지 측정이 가능한 정밀저울로 질량(MD)을 측정한다. 또한, 시험체를 물에 24시간동안 담근 (Fig. 2) 후 꺼내어 표면을 마른수건으로 닦은 뒤 질량 (MS)을 측정하였으며, 흡습률은 식 (1)에 의하여 계산하였다.



Fig. 1. Drying specimens for moisture absorption test



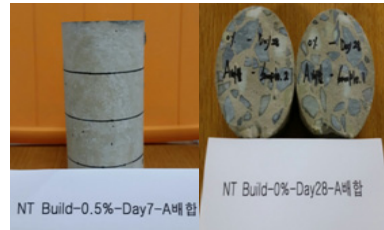
Fig. 2. Immersion of specimens for moisture absorption test

$$W(\%) = \frac{MS - MD}{MD} \times 100 \quad (1)$$

2.3 촉진염소이온확산시험 방법

본 논문에서는 NT Build 492 시험규격을 적용하였다. ASTM 1202의 경우 염소이온투과시험결과를 통과전하량으로 평가하도록 하고 있는데, 강섬유보강콘크리트에 혼입된 강섬유가 전도체로서 통과전하량에 직접적으로 영향을 미칠 수 있기 때문에 적절하지 않다는 지적이 있다. 또한 고로슬래그와 같이 바인더의 종류와 배합에 따라 큰 차이가 발생할 수 있다(Shi, 2012). 반면, 북유럽에 공인된 NT Build 492는 염소이온의 침투깊이로부터 확산계수를 산정하여 평가하는 방법으로 강섬유에 의한 영향을 최소화할 수 있다.

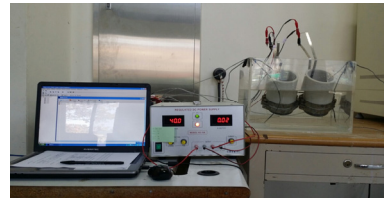
시험체는 직경 100 mm, 높이 50 mm의 원형시편이며, 타설된 공시체는 수중 양생 24시간 후 몰드를 제거하고 기건 양생을 실시하였다. 재령 7일과 28일에 Fig. 3(a)와 같이 다이아몬드 커터를 이용해 원주형 공시체를 이등분 한 후 각 절단 시편의 내부에서 50 ± 2



(a) cutting plan for migration test



(b) preparing



(c) equipment for the test



(d) splitting for inspection



(e) spraying AgNO₃



(f) measurement of penetration depth

Fig. 3. Test procedure for NT Build492

mm 두께의 시편을 채취하였다. 준비된 시편은 표면 먼지를 제거한 후 물로 세척하고, 공시체의 과잉수를 마른수건으로 닦아내어 건조한 후 기준에서 제시한 방법에 의거하여 전처리를 수행하였다. 다. 공시체의 표면이 건조되면 공시체를 데시게이터에 넣은 후 Fig. 3(b)와 같이 진공처리를 하였다. 준비된 시편은 Fig. 3(c)와 같은 영동장치에 설치하고 온도와 전압을 측정할 수 있는 데이터로거에 연결한 후 30V의 전기장을 걸어 24시간 동안 염소이온이 통과하도록 하였다. 침투가 끝난 시험체는 Fig. 3(d)와 같이 절단 한 후 절단면에 염소이온침투깊이(X_d)를 측정하기에 용이하도록 질산은 시약을 분무하였다. 염소이온의 침투 깊이는 버니어캘리퍼스를 이용하여 1/100 mm까지 정밀하게 측정하였다. 염소이온확산계수는 측정된 염소이온침투깊이로부터 식 (1)에 의하여 산정되었다.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U-2)t} \times \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L \times X_d}{U-2}} \right) \quad (2)$$

여기서, D_{nssm} 는 비정상상태의 확산계수($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$), U 는 적용 전압 절대치(V), L 은 시편의 두께(mm), T 는 시험시작시의 온도와 종료시의 온도의 평균($^{\circ}\text{C}$), t 는 시험시간(hr), X_d 는 침투깊이 평균치(mm)이다.

2.4 표면전기저항시험

표면 전기저항 시험을 평가하기 위해 Florida Method of Test For Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability의 시험방법에 근거하여 실험을 수행하였다. 압축 공시체와 동일한 시험체를 각각의 변수에 따라 3개씩 제작하였다. 시험체는 24시간 후 몰드를 제거하고 7일과 28일 동안 기건양생하였다. 시험 방법은 시험체 측면 0° , 90° , 180° , 270° 에 분무기를 사용해 물을 10회 분사 후 Fig. 4와 같이 전기저항 테스트기로 0° , 90° , 180° , 270° 의 표면저항을 시험체당 2번씩 총 6번 측정하였으며, 이를 평균하였다.



Fig. 4. Surface resistivity measurement

3. 실험결과

3.1 기초물성시험 결과

Table 2는 3개 공시체의 압축강도 시험결과를 정리하여 나타낸 것이다. 강섬유가 혼입되지 않은 0%의 A배합과 B배합의 압축강도는 30.62 MPa과 33.62 MPa로 B배합의 강도가 3 MPa 정도 큰 것으로 나타났다. 한편, 강섬유의 혼입량이 증가할 때, A 및 B 배합 모두 압축강도가 증가하는 양상을 나타내었다. A배합의 경우, 강섬유가 0.25%일 때 13%, 0.5%일 때 18%, 1% 일 때 25% 증가하는 것으로 나타났다. B배합의 경우도 마찬가지로 강섬유 혼입량이 증가할수록 압축강도가 증가하며 A배합 강도 증가량에 비하여 약 5% 증가하는 것으로 나타났다. 결과는 Fig. 5와 같다.

굳지 않은 콘크리트의 공기량 측정은 모든 배합에

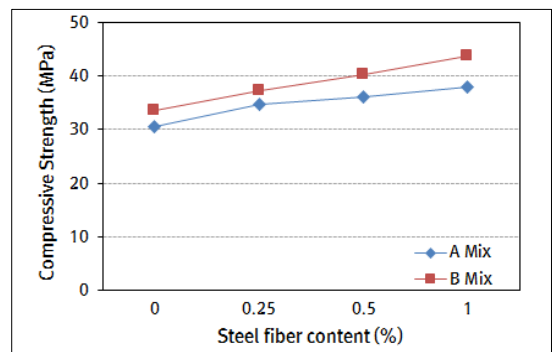


Fig. 5. Compressive strength according to steel fiber contents

Table 2. Compressive strength results

Mix	Steel fiber content (%Vol.)	Strength (MPa)			Avg. (MPa)	Std. Dev. (MPa)	Ratio (%)
		Sample.1	Sample.2	Sample.3			
A	0	29.18	30.92	31.77	30.62	1.32	100.0
	0.25	34.32	35.62	34.25	34.73	0.77	113.4
	0.5	36.25	36.07	36.28	36.20	0.11	118.2
	1	38.87	37.83	37.99	38.23	0.56	124.8
B	0	33.37	33.98	33.51	33.62	0.32	100.0
	0.25	37.57	37.23	37.06	37.29	0.26	110.9
	0.5	40.51	39.99	40.42	40.31	0.28	119.9
	1	43.29	43.13	44.95	43.79	1.01	130.2

대하여 2회 실시하였으며, 주목할 사항은 모든 배합에 대하여 동일한 시간동안 동일한 작업량으로 다짐을 수행하였다. 다짐은 붓다짐이 아닌 핸드 진동기를 사용하였으며, 시험기에 콘크리트 절반을 채운 후 10초간, 나머지 절반을 채운 후 10초간 2회에 걸쳐 다짐하였다. Table 3은 공기량 측정결과를 정리하여 나타내고 있다. Table 3에 나타난 비는 A배합과 B배합의 강섬유가 없을 경우(0%) 시험체의 압축강도로 다른 시험체의 결과를 나눈 값을 %로 나타낸 것이다. 또한 이 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

강섬유가 혼입되지 않은 0%의 A배합과 B배합의 공기량은 2.3%와 2.1%로 거의 유사한 것으로 나타났다. 한편, 강섬유의 혼입률이 증가할 때, A 및 B 배합 모두 공기량의 크게 증가하는 것으로 확인되었다. A 배합의 경우 강섬유량 1%일 때 강섬유가 없을 경우에 비하여 약 70% 공기량이 증가하였으며, B배합의 경우에도 52%의 공기량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 전반적으로 모든 강섬유량에 대하여 A배합의 공기량에 비하여 B배합의 공기량이 다소 적은 것으로 확인되었다. 따라서, 동일한 작업량으로 다짐을 수행할 때 굳지 않은 콘크리트 내부에 존재하는 공기량은 크게 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Miloud (2005)의 고찰과 일치하는 결과로서, 강섬유의 혼입은 공기량을 증가시키며 공기량을 감소시키기 위해서는 강섬유가 없을 때에 비하여 더욱 충분한 다짐을 해야 함을 확인할 수 있다. 이는 강섬유량이 증가할

때 슬럼프의 큰 감소로 배합의 작업성이 크게 저하되는 것과 관련이 있다.

다음의 Fig 7은 굳은 콘크리트의 흡습량 측정 결과를 나타내고 있다. 흡습량 시험은 굳은 콘크리트내의

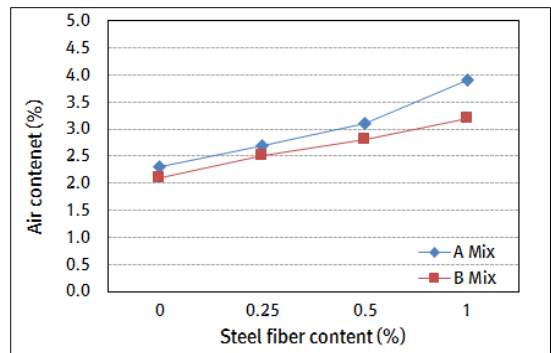


Fig. 6. Air contents of fresh concrete according to steel fiber contents

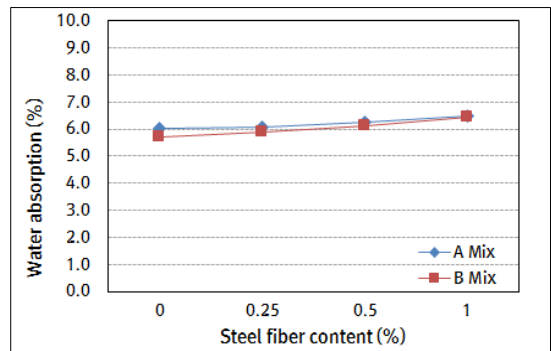


Fig. 7. Water absorption of hardened concrete according to steel fiber contents

Table 3. Air contents and water absorption results

Mix	Steel fiber content (Vol.%)	Air content (%)		Avg. (%)	Ratio (%)	Water absorption (%)	Ratio (%)
		1	2				
A	0	2.4	2.2	2.3	100.0	6.04	100.0
	0.25	2.9	2.5	2.7	117.4	6.09	100.8
	0.5	3.1	3.1	3.1	134.8	6.26	103.6
	1	3.8	4	3.9	169.6	6.50	107.6
B	0	2.1	2.1	2.1	100.0	5.71	100.0
	0.25	2.6	2.4	2.5	119.0	5.89	103.2
	0.5	2.6	3	2.8	133.3	6.11	107.0
	1	3.1	3.3	3.2	152.4	6.45	113.0

노출공극률(Open porosity)를 판단하는데 주로 사용하는 시험방법이다. 강섬유 혼입량이 1% 미만일때는 B배합의 흡습량이 A배합에 비하여 다소 작은 것으로 나타나지만 강섬유의 혼입량이 1%일때는 흡습량이 거의 동일한 것으로 확인되었다. 주목할 결과는 모든 배합에서 강섬유량이 증가할수록 흡습량이 미소하게 증가하는 양상을 나타내고 있다는 것이다.

3.2 촉진염소이온확산시험 결과

NT Build 492의 실험결과로부터 측정된 양극용액의 평균 온도값(T), 적용 전압의 절대값(U), 변수별 염소이온의 침투깊이와 비정상상태의 염소이온확산 계수(D_{nssm})는 Table 4와 같다. Table 4에는 상대비교를 위한 비를 제시하였다. 재령의 영향은 재령 28일의

Table 4. Summary of chloride migration test

Mix	Age	Steel fiber content (Vol.%)	Thickness (mm)	Anolyte average temperature (°C)	Applied voltage (V)	Test duration (hr)	penetration depth (mm)	diffusion coefficient ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	diffusion coefficient ratio (%)		
									Effect of age	Effect of mix proportion	Effect of steel fiber contents
A	7	0	50.0	22.2	35	24	5.8	2.0	1.00	1.00	1.00
		0.25	50.0	24.4	35		7.3	2.7	1.00	1.00	1.35
		0.5	50.0	21.4	35		6.7	2.4	1.00	1.00	1.20
		1	50.0	17.7	40		8.1	2.8	1.00	1.00	1.40
	28	0	50.0	17.6	40		2.2	0.6	0.30	1.00	1.00
		0.25	50.0	16.6	40		5.4	1.6	0.59	1.00	2.67
		0.5	50.0	18.7	40		4.3	1.2	0.50	1.00	2.00
		1	50.0	19.2	35		6.4	2.2	0.79	1.00	3.67
B	7	0	50.0	18.7	40	24	3.0	0.8	1.00	0.40	1.00
		0.25	50.0	22.1	35		3.4	1.1	1.00	0.41	1.38
		0.5	49.0	22.0	40		5.5	1.7	1.00	0.71	2.13
		1	49.5	17.8	40		6.6	2.1	1.00	0.75	2.63
	28	0	50.0	17.9	40		2.1	0.5	0.63	0.83	1.00
		0.25	50.0	18.6	40		3.8	1.1	1.00	0.69	2.20
		0.5	50.0	18.3	40		5.1	1.5	0.88	1.25	3.00
		1	50.0	19.3	40		5.4	1.6	0.76	0.73	3.20

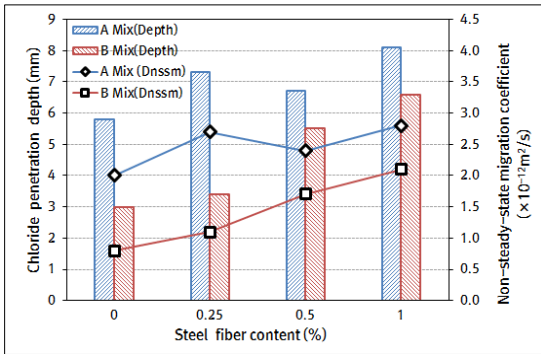


Fig. 8. Chloride migration test results at age 7day

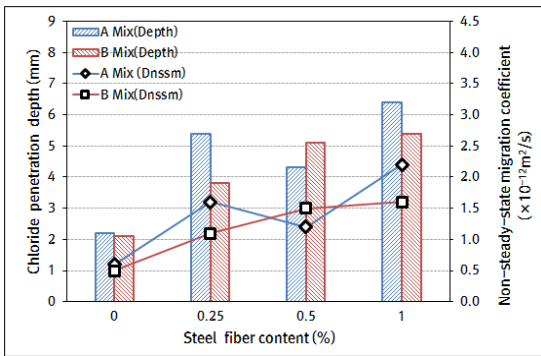


Fig. 9. Chloride migration test results at age 28day



(a) A Mix-1%



(b) B Mix-1%

Fig. 10. Occurrence of pitting corrosion

염소이온확산계수를 재령 7일의 염소이온확산계수로 나누었으며, 배합의 영향은 B배합을 A배합의 결과로, 강섬유의 양의 영향은 각 양의 결과를 0%의 결과로 나누어 제시하였다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9에는 강섬유량에 따른 염소이온침투깊이와 확산계수변화를 그래프로 나타내었다. Fig. 10은 실험후 시편의 모습을 나타내고 있다. 그림과 같이 실험 종료 후 시편의 표면에서는 강섬유의 부식으로 인한 점식(pitting corrosion)이 다수 관찰되었다.

3.2.1 재령에 대한 영향

염소이온확산깊이와 계수의 결과는 재령에 따라 큰 차이를 나타내었다. 재령이 증가할수록 침투깊이와 확산계수가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 염소이온침투 및 확산저항능의 증가는 재령의 증가에 따라 구성재료간의 공극(골재와 시멘트간, 강섬유와 골재간)의 감소가 원인인 것으로 설명할 수 있다. 재령의 증가에 따른 염소이온확산계수비의 결과를 보면, A배합과 B배합 모두 강섬유가 없을 경우 약 40%, 강섬유가 있는 경우에는 약 20%~30%의 감소가 발생하였다.

3.2.2 배합에 대한 영향

Fig. 8과 Fig. 9는 재령 7일과 28일에 A배합과 B배합의 염소이온확산시험 결과를 비교하여 나타내고 있다. 재령 7일일 때 강섬유량 0%의 염소이온침투깊이를 보면 A배합의 침투깊이가 보다 B 배합의 침투깊이가 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 재령 28일의 결과에서도 미소하지만 A 배합 보다 B 배합의 침투깊이가 작은 것을 확인할 수 있다. 재령 7일에 A배합의 염소이온확산계수는 강섬유의 혼입량에 따라 $2.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 에서 $2.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 범위를 나타내고 있으나 재령 28일에는 $0.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 에서 $2.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 범위로 감소하였다. 배합 B의 재령 7일에서의 확산계수는 $0.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 에서 $2.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 범위에 있으며, 재령 28일 확산계수는 $0.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 에서 $1.6 \times$

$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 범위에 있는 것으로 확인되었다. 따라서 물-시멘트비가 낮은 B배합의 염소이온확산 저항성능이 우수함을 알 수 있다. 물-시멘트비 감소에 따른 확산계수는 초기인 재령 7일에서는 25%~60% 감소하며, 재령 28일에는 최대 31% 감소하는 것으로 나타났다.

3.2.3 강섬유 혼입률의 영향

강섬유량의 증가에 따라 침투깊이와 확산계수가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 확산계수의 비를 보면, 강섬유량에 따른 증가는 재령 7일 보다 재령 28일에 더욱 명확하게 확인할 수 있으며, 강섬유가 없을 경우에 비하여 강섬유가 0.25%와 0.5%일 때 두배, 강섬유량이 1%일 때 3배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 강섬유 혼입률의 변화로 인한 영향이 다른 인자, 즉 재령과 배합에 따른 영향 보다 훨씬 지배적임을 알 수 있다.

3.3 표면전기저항시험 결과

Table 5는 표면전기저항측정결과를 평균하여 나타내고 있다. 또한, Fig. 11과 Fig. 12는 재령 7일과 28일에서의 표면전기저항시험결과를 강섬유의 혼입률에 따라 나타내고 있다. 표면전기저항값이 크면 투과저항성능이 상대적으로 우수하며, 작으면 투과저항성능이 열등한 것으로 평가할 수 있다. Table 5에 제시된 비는 Table 4와 같이 상대적인 비교를 위하여 재령, 배합 및 강섬유량에 대한 비를 나타낸 것이다.

우선, 전반적인 변화양상을 살펴보면, 재령이 증가할수록 저항치가 2배 이상 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 염소이온확산시험의 결과와 경향이 일치하지만 증가폭은 상당히 크다. 배합에 의한 영향을 살펴보면, A배합의 저항치가 B배합의 저항치에 비하여 강섬유가 없을 경우에는 다소 크게 나타났으며, 강섬유가 보강된 경우에는 차이가 10% 이내로 표준편차 이내에 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 염소이온투과시험의 결과와 반대의 결과이다. 마지막으로

강섬유량이 증가할 때 염소이온확산시험의 결과와 마찬가지로 저항치가 큰 쪽으로 감소하는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과를 종합할 때, 표면전기저항의 측정방법을 통한 염소이온투과성능에 대한 평가는 물-시멘트비가 서로 다른 배합의 상대평가에 적합하지 않다고 판단된다. 저항측정시 표면의 수분함유상태에 따라 결과가 크게 영향을 받기 때문으로 판단된다. 또한, 강섬유혼입에 따른 영향은 염소이온투과시험결과와 동일한 결과를 나타내고 있다. 그 변화량도 거의 유사한 정도이다. 그러나, Fig. 11과 Fig. 12를 보면, 강섬유가 혼입되었을 때, A배합과 B배합의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 따라서, 이와 같은 강섬유의 혼입에 표면저항치의 감소는 콘크리트의 미세조직에 의한 영향이라기보다는 전도체인 강섬유에 의한 감소라고 판단하는 것이 합당하다.

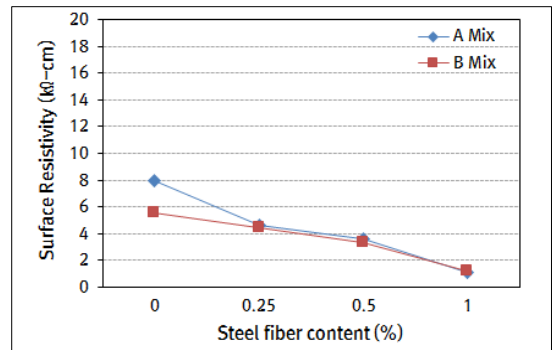


Fig. 11. Surface resistivity results at age 7day

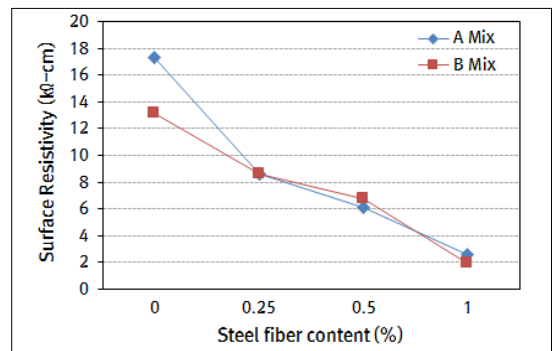


Fig. 12. Surface resistivity results at age 28day

Table 5. Surface resistivity results

Mix	Age (day)	Steel fiber content (% Vol.)	Avg. resistivity (k Ω -cm)	Std. Dev. (k Ω -cm)	Ratio (%)		
					Effect of age	Effect of mix proportion	Effect of steel fiber contents
A	7	0	8.0	0.6	1.00	1.00	1.00
		0.25	4.6	0.6	1.00	1.00	0.58
		0.5	3.6	0.6	1.00	1.00	0.45
		1	1.1	1.3	1.00	1.00	0.14
	28	0	17.3	2.3	2.16	1.00	1.00
		0.25	8.6	2.1	1.87	1.00	0.50
		0.5	6.1	1.4	1.69	1.00	0.35
		1	2.6	3.3	2.36	1.00	0.15
B	7	0	5.6	0.4	1.00	0.70	1.00
		0.25	4.4	0.8	1.00	0.96	0.79
		0.5	3.3	0.7	1.00	0.92	0.59
		1	1.2	1.2	1.00	1.09	0.21
	28	0	13.2	1.9	2.36	0.76	1.00
		0.25	8.6	2.9	1.95	1.00	0.65
		0.5	6.8	2.7	2.06	1.11	0.52
		1	1.9	2.0	1.58	0.73	0.14

4. 결론

본 연구에서는 강섬유 보강콘크리트의 염소이온확산시험과 표면전기저항 시험을 통해 염소이온침투성을 고찰하였다. 실험에서 사용한 배합은 OPC를 사용하였으며, 감소제 등의 혼화제를 사용하지 않은 콘크리트 배합이다. 실험에 사용된 주요한 변수는 강섬유의 혼입량과 배합의 물-시멘트비이다. 기본물성을 파악하기 위한 압축강도시험, 굳지않은 콘크리트의 공기량 시험과 굳은콘크리트의 흡습시험도 수행하였다. 본 연구로부터 획득한 결론은 다음과 같다.

1. 동일한 작업량으로 다짐을 수행하였을 때, 일반콘크리트 보다 강섬유보강콘크리트의 염소이온침투저항성능이 감소하는 것으로 확인되었다. 강섬유량이 증가할수록 이와 같은 결과는 심화되는 것으로 확인되었다. 따라서, 강섬유의 혼입으로 인한 배합의 유동성 저하와 공극량 증가가 염소이온침

투저항성능 감소에 직접적으로 영향을 준다는 것을 확인하였다. 따라서, 강섬유보강콘크리트의 타설시 충분한 유동성의 확보와 다짐이 매우 중요하다고 판단된다. 또한, 보다 심도 있는 결론을 획득하기 위해서는 동일한 유동성을 갖는 일반콘크리트와 강섬유보강콘크리트의 부식저항성능의 비교가 필요하다.

2. 기본물성시험결과에서는 강섬유량이 증가할수록 압축강도가 크게 증가하지만, 동시에 굳지 않은 콘크리트의 공기량도 크게 증가하며, 굳은콘크리트의 흡습량도 미소하게 증가하는 것으로 확인되었다. 따라서, 강섬유보강콘크리트의 압축강도 증가와 염소이온침투저항성능과는 직접적인 관계가 없다는 것을 알 수 있다.
3. 재령, 물-시멘트비와 강섬유의 혼입량에 따른 영향을 상호비교한 결과, 강섬유의 혼입량에 의한 영향이 가장 지배적인 것으로 나타났다.
4. 동일한 강섬유량이 혼입되었을 때, 물-시멘트비가

낮은 콘크리트 배합의 염소이온침투저항성능이 우수한 것으로 나타났다.

5. 강섬유보강콘크리트의 표면전기저항측정 결과는 염소이온확산시험의 결과와는 다소 차이가 있었으며, 콘크리트 내부의 미세조직구조에 의한 영향 보다는 전도체인 강섬유의 영향이 결과를 지배함으로써, 강섬유보강콘크리트의 염소이온침투저항성능을 평가하기에는 부적합한 것으로 판단된다.
6. 이상의 결과를 종합할 때, 강섬유보강콘크리트의 부식저항성능을 확보하기 위해서는 배합설계시 물-시멘트비를 최소화하며, 제조시에는 충분한 다짐을 수행하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091) - 2세부과제 : 고성능 세그먼트 라이닝의 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Abbas, S. (2014), “Chloride Ion penetration in reinforced concrete and steel fiber-reinforced concrete precast tunnel lining segments”, *ACI Materials Journal*, Vol. 111, No. 6, pp. 613-622.
2. Abrycki, M., Zajdzinski, A. (2012), “Effect of fibres on corrosion of steel reinforcement”, *Master of Science Thesis*, Chalmers University of Technology, p. 94.
3. Frazao, C., Camoes, A., Barros, J., Goncalves, D. (2013), “Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete”, *Twin Covilha International Conferences 5th Int'l Conference on The Concrete Future 26-29.*, May 2013, Covilha, Portugal. pp. 93-102.
4. International Federation for Structural Concrete (fib) (2010) *Bulletin 55-56: Model Code 2010 First Complete Draft*. CEB/FIP. pp. 157-166.
5. Kim, B. (2010), “Transport coefficients and effect of corrosion resistance for SFRC”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 6, pp. 867-873.
6. Miloud, B. (2005), “Permeability and porosity characteristics of steel fibre reinforced concrete”, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)* Vol. 6, pp. 317-330.
7. NT BUILD 492 (1999), “Concrete, mortar and cement based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments”, *NORDTEST*, Finland.
8. Rapoport, J., Aldea, C.M., Shah, S.P., Ankenman, B., Karr, A. (2002), “Permeability of cracked steel fiber-reinforced concrete”, *J. Mater. Civ. Eng.* Vol. 14. pp. 355-358.
9. Selvi, M.T., Thandavamoorthy, Dr. T.S. (2013), “Studies on the properties of steel and polypropylene fiber reinforced concrete without and admixture”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* Vol. 3., Issue. 1., pp. 411-416.
10. Shi, X., Xie, N., Fortune, K., Gong, J. (2012), “Durability of steel reinforced concrete in chloride environments : An overview”, *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp. 125-138.
11. Singh, A.P. (2013), “Strength and permeability characteristics of steel fibre reinforced concrete”, *World Academy of Science, Engineering and Technology Int. J. Civ., Architectural, Structural and Construction Engineering* Vol. 7, No. 10, pp. 405-410.
12. Singh, A.P., Singhal, D. (2011), “Permeability of steel fibre reinforced concrete influence of fibre parameters”, *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 2823-2829.
13. Zinkaah, O.H. (2014), “Influence of steel fibers on the behavior of light weight concrete made from crushed clay bricks”, *American Journal of Civil Engineering*. Vol. 2, No. 4, pp. 109-116.