

# 강섬유보강 콘크리트 세그먼트의 강섬유가 표면전기저항에 미치는 영향

문도영<sup>1</sup>, 이규필<sup>2\*</sup>, 장수호<sup>3</sup>, 배규진<sup>4</sup>

## Effect of steel fibers on surface electric resistivity of steel fiber reinforced concrete for shield segment

Do-Young Moon, Gyu-Phil Lee, Soo-Ho Chang, Gyu-Jin Bae

**ABSTRACT** Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) is widely used for tunnel structures such as shotcrete and segments. Corrosion of steel fibers and steel reinforcements may affect on the long-term durability of the concrete structures with steel fibers and reinforcement. Therefore, a study on the feasible method to evaluate corrosion possibility and permeability of the concrete structures is required. This experimental study examines the effect of steel fibers and internal reinforcement on the surface resistivity. Steel fiber mix ratio and corrosion of internal reinforcement were considered as variables. In the results, steel fibers significantly reduce the surface resistivity due to those conductive characteristic. In the case of 3% mix ratio, it was difficult to evaluate rate and permeability of corrosion due to the great reduction of resistivity by mixing of steel fibers.

**Keywords:** Steel fiber reinforced concrete (SFRC), corrosion, surface electric resistivity

**요약** 강섬유보강 콘크리트는 슛크리트와 쉘드터널 세그먼트 등에 널리 이용되는 건설재료이다. 강섬유와 이형철근이 동시에 보강된 콘크리트 구조물에서 강섬유와 철근의 부식은 장기적 내구성능에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 이러한 구조물의 부식 가능성과 침투성능에 대한 적절한 평가가 가능한 방법의 도출이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 강섬유와 철근이 동시에 보강된 콘크리트의 부식평가방안에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 강섬유의 혼입량, 이형철근의 부식 유무 등을 변수로 실험체를 제작하였으며, 각 변수 등이 표면전기저항치에 미치는 영향을 분석하였다. 실험결과, 강섬유는 전류의 교란을 발생시켜 표면전기저항치를 크게 저하시키는 것으로 확인되었다. 또한 강섬유가 3% 이상 혼입이 되면, 내부 이형 철근의 부식상태 및 부식가능성에 대한 평가가 불가능한 것으로 판단된다.

**주요어:** 강섬유보강 콘크리트, 부식, 표면전기저항

---

접수일(2011.11.16), 수정일(2011.11.28), 게재확정일(2011.12.5)

<sup>1</sup>경성대학교 토목공학과 조교수

<sup>2</sup>한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 수석연구원

<sup>3</sup>한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

<sup>4</sup>한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 선임연구위원

\*교신저자: 이규필 (E-mail: freely@kict.re.kr)

---

## 1. 서론

강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)는 터널분야에서 널리 사용되는 재료로서, NATM 터널에서는 지보재로 SFRC 슛크리트가 일반적으로 사용되고 있다(김재동과 김덕용, 2000). 이 뿐만 아니라 선진국과 국내에서도 SFRC 슛크리트의 성능 향상을 모도하고, 이를 영구지보재로 활용하고자 하는 연구가 진행되고 있다(이상필 등, 2007). 최근에는 일본과 유럽에서 쉘드터널 세그먼트에도 SFRC를 적용하고 있다(Chiaia et. al., 2009; Dobashi et. al., 2006).

강섬유는 콘크리트 구조물의 휨인성을 증진시킴으로써, 균열 발생을 억제하는 효과와 내구성능을 향상시킬 수 있으며(김재동 등, 2000; Mangat and Gurusamy, 1987), 쉘드터널 세그먼트의 성능과 강도를 향상시켜 배력철근과 전단철근을 최소화하는데 기여하는 것으로 보고되고 있다(Chiaia et. al., 2009; Dobashi et. al., 2006). 그러나 SFRC에서도 부식은 피할 수 없는 중요한 내구성능의 저하요인이며, 여러 문헌들에서 혼입된 강섬유 자체의 부식에 대한 문제를 지적하고 있다(Granju and Balouch, 2005; Balouch et. al., 2010). 이를 극복하기 위하여 강섬유를 대체하면서도 성능은 유지할 수 있는 유기 및 무기섬유의 적용성에 대한 연구가 수행되고 있다. 국내에서는 이수열 등(2010)이 염해에 노출된 해저터널의 시공에 폴리프로필렌섬유의 적용성에 대한 연구를 수행하였으며, Balouch et al(2010)은 강섬유의 부식이 강섬유와 콘크리트의 부착성능에 미치는 영향을 실험을 통하여 분석하였다.

또한 SFRC에서 내부 철근보강재의 부식에 대한 연구도 진행되고 있다(Roque et. al., 2009). 김병일(2010)은 SFRC의 수송계수 및 특성에 대한 연구를 수행하였으며, SFRC내에 보강된 철근의 부식과의 관계를 고찰하였다. 연구결과에 따르면, SFRC내의 철근 부식이 타 배합에 비하여 더욱 빨리 발생하는 것으로 보고되고 있다(김병일 등, 2010). 따라서 SFRC에서도 강재의 부식에 대한 장기 내구성능 저하에 대한 우려가 있으며, 이를 평가하기 위한 적절한 방법과 자료축적이 필요하다.

강섬유와 철근이 동시에 보강된 SFRC의 장기적 내구성능의 평가와 철근의 부식상태 평가를 위해 고려될 수 있는 방법은 자연전위차를 이용한 방법과 표면전기저항법 등을 들 수 있다. 자연전위차를 이용한 방법은 철근을 노출시켜야 하는 단점이 있는 반면, 현장의 여건과 비파괴 관점에서 표면전기저항법이 가장 적절한 방법으로 판단된다. 그러나 표면전기저항방법은 콘크리트내부의 철근에 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(문도영, 2011; 소형석, 2008; 소형석, 2009; Sengul and Gjörv, 2009; Lataste et al., 2008). 이는 철근이 조사장비에서 검사를 위하여 방출하는 미소전류의 통로를 제공·교란시키기 때문이다. 이와 같은 전류의 교란은 평가결과 및 판독에 심각한 오

류를 가져올 수 있기 때문에 일반 철근콘크리트 구조물에 적용할 경우 전극의 간격과 측정위치의 선정에 주의를 기하여야 한다고 보고되고 있다(Sengul and Gjorv, 2009). 이와 같은 교란의 문제는 SFRC에서 더욱 크게 발생할 수 있으므로 이에 대한 연구 및 기초자료가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 강섬유가 콘크리트 표면전기저항에 미치는 영향을 분석하고, 그 결과를 토대로 SFRC의 철근부식평가의 적용성을 검증하고자 하였다. 본 실험에서 쉴드터널 세그먼트와 샷크리트에 주로 사용되는 SFRC 배합의 시험편을 제작한 후 시험편의 표면에서 전기저항을 측정하였으며, 현재 준용되고 있는 기준에 의하여 평가를 수행하였다.

## 2. 표면전기저항측정법의 활용 및 보강근의 영향

### 2.1 표면전기저항측정법의 활용

표면전기저항측정법은 4전극방식의 Wenner 기술이라 불리며, 그림 1과 같이 4개의 전극을 동일한 간격으로 유지하며, 외부 두 개의 전극에 미소교류전류(I)를 통과함으로써, 내부 2개의 전극에 발생하는 전위차(V)를 측정하여 식 (1)에 의하여 저항치를 결정한다. 식 (1)에서  $R$ 은 전기저항( $k\Omega - cm$ )이며,  $a$ 는 전극의 간격(cm)을 의미한다.

$$R = 2\pi\alpha \frac{V}{I} \tag{1}$$

콘크리트내 철근의 부식정도 또는 부식의 가능성에 대한 평가는 표 1에서 보이는 바와 같이 표면 전기저항치로부터 수행한다(Gowers and Millard, 1999; Roque, 2009).

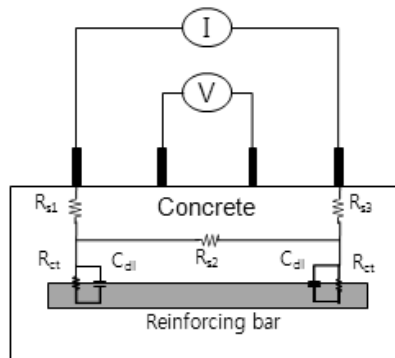


그림 1. 표면전기저항측정방법의 모식도

**표 1.** 표면전기저항치와 철근의 부식과의 관계

Resistivity ( $k\Omega - cm$ )	Corrosion rate	Resistivity ( $k\Omega - cm$ )	Chloride ion permeability
<5	Very high	<12	Very high
5 to 10	High	12 to 21	Moderate
10 to 20	Low/moderate	21 to 37	Low
>20	Low	37 to 254	Very Low

## 2.2 내부 보강재로 인한 영향

Sengul and Gjrv(2009)은 콘크리트 구조물내에 보강된 이형철근은 콘크리트 표면전기저항치에 큰 영향을 미친다고 보고하였다. 실험에서 측정을 위한 전극(probe)의 간격을 변수로 하여, 표면으로부터 이형철근의 깊이, 배근의 방향, 측정 위치에 따른 표면전기저항치의 변화를 고찰하였다. 연구결과에 따르면, 전기저항법의 효용성을 확보하기 위해서는 철근과의 이격을 가능한 크게 확보해야 하지만, 이것이 현실적으로 불가능하기 때문에 그 간격을 배근간격보다 작게 할 것을 권유하고 있다. 특히, 전극의 간격과 내부철근의 깊이가 일치할 때 내부 철근의 영향이 가장 크다고 보고하였다. 이와 같은 구조물 내부 철근의 영향은 그림 1과 같이 내부철근과 콘크리트 표면사이에 형성된 등가회로에 기인한다(소형석, 2008; Gowers and Millard, 1999).

Roque 등(2009)은 플로리다 도로국 연구 프로젝트를 통해 섬유보강 콘크리트의 장기 내구성능을 비교분석하였으며, SFRC의 표면전기저항실험을 수행하였다. 실험결과 SFRC의 표면전기저항치가 다른 배합에 비하여 매우 낮게 나타난다고 보고하였다.

## 3. 실험방법

### 3.1 실험체의 제작 및 실험변수

본 연구를 위한 실험변수는 표 2와 같으며, 기준이 되는 강섬유를 혼입하지 않은 무근 콘크리트 실험체를 제작하였으며, 강섬유를 1%, 2%, 3% 혼입한 무근 콘크리트 실험체(C1, C2, C3)를 제작하였다. 강섬유의 영향을 배제하기 위하여 강섬유는 혼입하지 않고, 부식되지 않은 직경 10mm의 이형철근만이 삽입된 실험체(R-1)와 부식된 동일한 직경의 이형철근이 삽입된 실험체(R-2)를 제작하였다.

또한 이형철근이 매입된 각 경우에 대하여 강섬유를 체적비 대비 1% 보강한 실험체(R1-1, R1-2), 2% 보강한 실험체(R2-1, R2-2), 3% 보강한 실험체(R3-1, R3-2)를 제작하였다. C 실험체군(C1, C2, C3)의 상호 비교를 통해 철근의 전류간섭이 완전히 배제된 상태에서 강섬유 혼입량의 영향을 검토할 수 있다(그림 7 참고). 또한 C 실험체(강섬유를 혼입하지 않은 무근실험체)와 무부식 철근보강실

험체군(R#-1)와의 상호 비교(그림 8 참고), C 실험체와 부식된 철근보강 실험체군(R#-2)과의 상호 비교(그림 9 참고)를 통해 각 철근상태에 따른 강섬유의 영향을 분석할 수 있다. 마지막으로 동일한 강섬유 혼입량을 가진 실험체의 비교(그림 10 참고)를 통해 이형철근의 영향에 대한 고찰이 가능하다.

표 2. 실험체 변수표

구분	C	C1	C2	C3	R-1	R-2	R1-1	R1-2	R2-1	R2-2	R3-1	R3-2
이형 철근	무	무	무	무	부식 없음	부식 있음	부식 없음	부식 있음	부식 없음	부식 있음	부식 없음	부식 있음
강섬유	무	1%	2%	3%	무	무	1%		2%		3%	

표 3. 콘크리트 배합표

구분	W/B	S/a	단위재료량 (kg/m <sup>3</sup> )					고성능감수제 (Cement×%)
			W	C	S	G	Fiber	
무 강섬유 실험체	50.0	40.1	76.6	153.4	268.0	425.0	-	0
강섬유 1%							78.1	
강섬유 2%							157.0	
강섬유 3%							235.1	

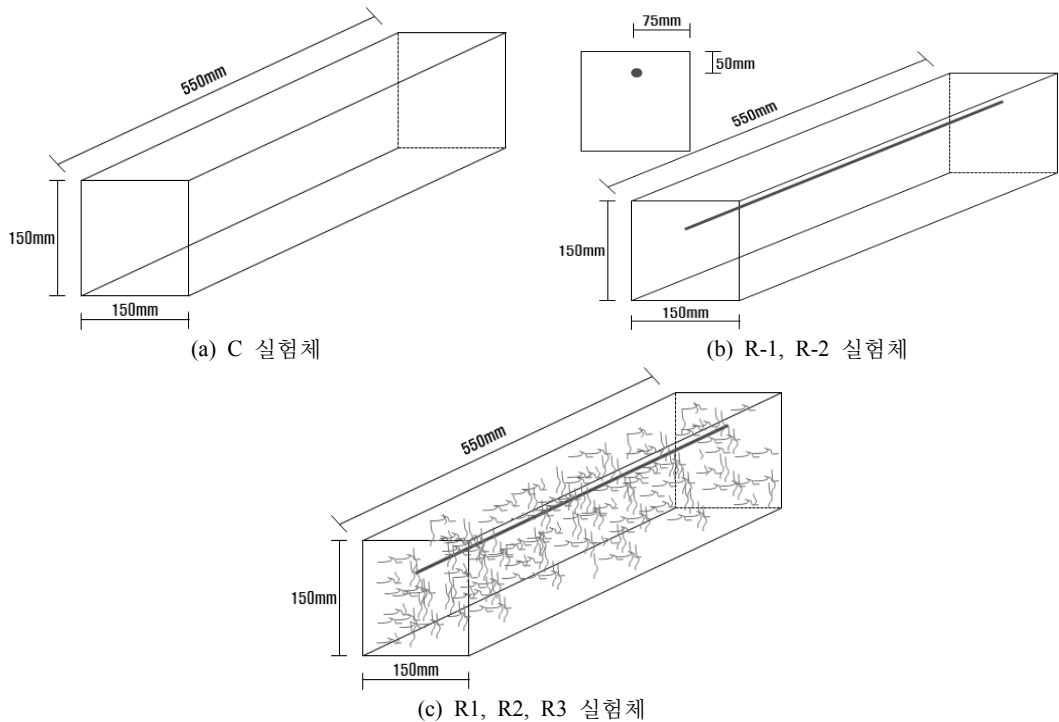


그림 2. 실험체

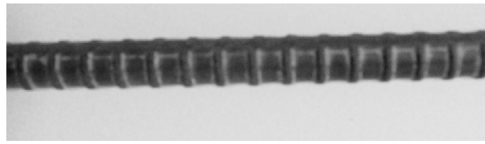


그림 3. 부식된 이형철근

일반적으로 NATM 터널용 슛크리트의 강섬유 혼입량은 0.5%~1%이며, 실드터널 세그먼트의 경우에는 선진국에서 3%까지 사용하기 때문에 본 실험에서도 이를 참고하여 강섬유 혼입율을 결정하였다. 본 실험체에 사용된 부식된 철근은 그림 3과 같다. 이형철근의 부식을 촉진시키기 위하여 NaCl용액에 6개월간 수침시켰다.

본 실험을 위하여 그림 2와 같이 150 mm×150 mm×550 mm의 휨시험체를 제작하였다. 콘크리트의 설계강도는 21 MPa이며, 배합설계표는 표 3과 같다. 사용된 강섬유는 국내 B사 제품을 사용하였으며, 직경 0.5 mm, 길이 30 mm로 형상비는 60, 인장강도는 1200 MPa이다.

### 3.2 실험방법

본 실험에 사용된 측정 장비는 P사의 RESIPOD로써, 전극의 간격이 50 mm로 고정되어 있다. 따라서 보강근의 표면전기저항치에 미치는 영향을 크게 하기 위하여 보강근의 매입 깊이를 50 mm로 전극간의 간격과 일치시켰다.

그림 4는 검교정 바(bar)의 저항치를 측정하는 모습으로 본 실험에서는 실험전 검교정을 통해 장비의 정확성을 확보하였다. 표면전기저항의 측정은 콘크리트 표면을 사포로 정리한 후 표면에 스프레이를 이용하여 충분한 수분을 살포한다(그림 5 참조). 전극이 접촉될 표면에 미리 표시된 보강근 위치에 전극을 접촉시키고 측정값이 안정화 될 때 까지 5초간 대기한 후 결과치를 정리하였다(그림 6 참조). 동일한 실험체에 대하여 한명의 측정원이 3회 측정을 1식(set)으로 총 3명의 측정원이 총 9회 측정하였으며, 본 논문에 정리한 결과는 9회 측정치의 평균값이다.



그림 4. 장비의 검교정

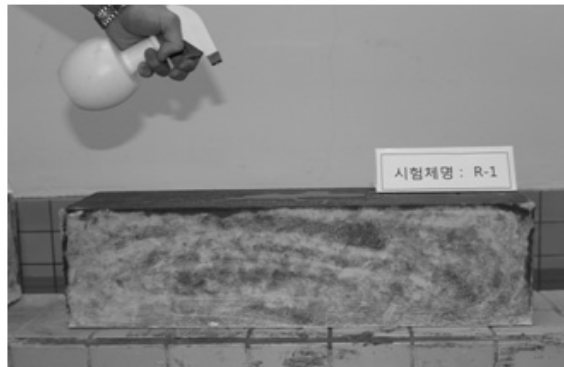


그림 5. 표면 수분 살포



그림 6. 표면전기저항 측정

#### 4. 실험결과 및 고찰

표 4는 모든 실험체의 표면전기저항 평균치와 표준편차를 나타내고 있다. 상대적인 비교를 위하여 모든 실험의 결과를 강섬유를 혼입하지 않은 무근 실험체(무근, 무 강섬유 실험체, C)의 결과로 고찰하였다.

##### 4.1 강섬유 혼입량 영향

그림 7은 무근 실험체에서, 그림 8~9는 부식되지 않은 철근과 부식된 철근이 보강된 실험체에서 강섬유 혼입량이 표면전기저항치에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림 7~9에서 보이는 바와 같이 강섬유 혼입시 표면전기저항치가 35%~79% 까지 급격하게 감소하며, 또한 강섬유의 혼입율이 1%에서 3%로 증가할 때 저항치가 더욱 감소하는 것으로 나타났다. Roque 등(2009)의 실험결과에서도 강섬유보강 콘크리트의 표면전기저항치는  $2\text{k}\Omega\text{-cm} \sim 5\text{k}\Omega\text{-cm}$ 이며, 본 실험결과 매우 유사한 것으로 나타났다.

상기 결과를 표 1을 근거로 평가하면 강섬유보강 콘크리트는 부식가능성이 크며, 혼입율이 증가할수록 부식가능성도 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 김병일(2009)의 연구결과에 의하면 수송특성, 즉 흡수성, 투과성 및 염소이온 확산성도 강섬유의 혼입으로 인해 개선된다. 또한, 잘 알려진 바와 같이 강섬유보강 콘크리트는 강섬유가 균열간 연결보강재로서의 역할을 하며, 휨인성을 증가시켜 부재의 내구적인 측면에서 유리하다고 제안하였다. 그러나 상기와 같은 결과는 강섬유가 전도체로서, 측정 전류의 교란에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.

그림 8은 부식되지 않은 이형철근이 배근된 실험체의 결과를 나타내고 있다. C1 보다는 R1-1이, C2 보다는 R2-2의 저항치가 크게 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 내부 이형철근이 전류의 통로 역할을 하게 되면서 전류의 교란을 더욱 심화시켰기 때문이라고 판단된다. 그림 9는 부식된 철근의 실험결과를 나타내고 있다. 그림 8과 비교하면 1%(R1-2)와 2%(R2-2)의 혼입율에서는 부식된 철근으로 인한 표면전기저항치의 감소를 명확하게 확인할 수 있다. 그러나 강섬유 혼입율 3%(R3-2)의 결과는 모든 경우 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터, 강섬유가 표면전기저항치를 크게 감소시킨다는 사실이 확인되었다. 다만, 낮은 저항치가 실제 강섬유보강 콘크리트의 부식가능성과 침투성이 크다는 것을 직접적으로 의미하는 것은 아니며, 전류의 교란으로 인한 것으로 판단된다.

공학적으로 낮은 표면전기저항치는 내부에 부식이 없더라도 향후 부식의 가능성과 부식의 침투성(permeability)이 크다는 것을 의미한다. 강섬유의 부식이 미미한 경우라도 구조물의 구조 및 내구성능에 영향을 미칠 수 있으므로 향후 부식된 강섬유를 이용한 추가적인 실험 및 고찰이 필요하다.

한편, 내부 이형철근의 부식가능성에 대한 평가시에는 강섬유로 인해 표면전기저항치가 크게 저하되기 때문에 실제로 내부 철근의 부식과 부식의 가능성이 크지 않음에도 불구하고, 표 1에 근거한 과도한 평가가 될 수 있기 때문에 이를 감안한 새로운 기준의 제시가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 이를 위해서는 내부 철근의 부식과 강섬유의 부식 및 부식가능성의 관계에 대한 다양한 실험 연구가 필요하다고 판단된다.

## 4.2 이형철근의 영향

그림 10은 이형철근의 유무와 부식에 의한 영향을 나타낸다. 그림 10(a)는 무 강섬유 실험체의 결과를 나타내고 있다. 부식되지 않은 철근은 기존의 연구결과와 같이 전류의 통로 역할을 함으로써, 약 4%의 저항치 감소를 나타냈다. 한편, 부식된 철근은 동일한 위치에 있음에도 불구하고 10%의 저항치 감소가 추가로 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 부식으로 인한 저항치 감소의 민감도는 약 10%이다. 그림 10(b)는 1% 강섬유 실험체의 결과를 나타내고 있다. 부식되지 않은 철근으로 인해 15%, 부식된 철근으로 인해 추가적으로 20%의 저항치 감소가 발생하였다. 그림 10(c)는 2% 강섬유 실험체의 결과를 나타내고 있다. 부식되지 않은 철근으로 인해 약 9%의 감소를, 부식된 철근으로 인해 약 10%의 추가적인 저항치의 감소를 확인할 수 있다. 그림 10(d)는 3%의 강섬유



혼입실험체의 결과를 나타내고 있다. 부식되지 않은 철근으로 인해 약 3%의 감소를, 부식된 철근에도 불구하고 저항치의 감소가 나타나지 않았다.

표 4. 표면전기저항 측정결과

구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mean	STD
C	5.2	6.2	6.1	5.2	6.4	6.2	5.7	6.0	6.0	5.89	0.43
C1	4.9	4.2	3.3	3.4	3.9	3.7	3.9	4.0	3.4	3.86	0.50
C2	2.3	2.2	2.4	2.2	2.3	2.5	3.0	3.7	3.8	2.71	0.64
C3	1.8	1.8	2.0	1.0	1.7	1.6	1.2	1.3	1.3	1.52	0.33
R1	5.9	4.6	5.6	5.3	6.7	5.1	6.0	5.8	6.1	5.68	0.62
R2	4.7	4.7	6.0	5.3	5.2	4.6	4.7	5.3	5.4	5.10	0.46
R1-1	2.3	2.5	2.9	2.9	2.7	2.8	3.0	3.7	3.8	2.96	0.50
R2-1	2.1	2.2	4.7	3.8	2.5	1.4	2.1	2.1	3.8	2.07	0.36
R3-1	1.1	1.3	1.2	1.6	1.0	1.7	1.3	1.8	1.1	1.34	0.29
R1-2	2.2	2.7	2.8	1.2	1.1	1.3	1.5	1.3	1.5	1.73	0.66
R2-2	1.3	2.1	1.2	1.5	1.2	2.0	1.3	1.6	1.6	1.53	0.33
R3-2	1.5	2.3	1.0	1.3	1.3	1.0	1.2	1.3	1.3	1.36	0.39

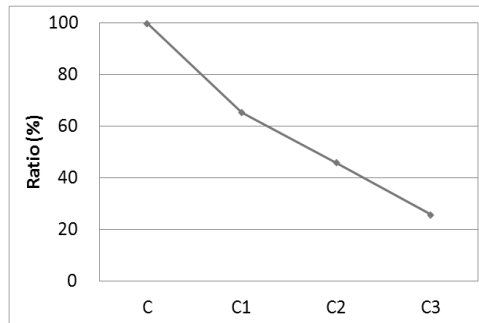


그림 7. 무근 실험체

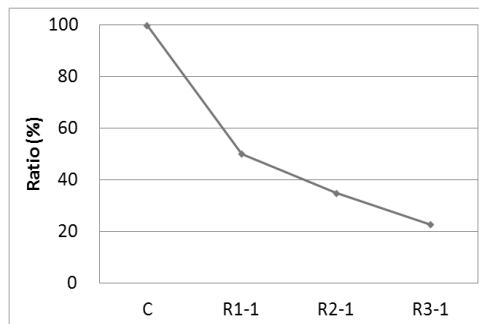


그림 8. 무 부식 철근보강실험체

강섬유의 혼입율이 1%~2%인 경우 이형철근의 영향과 부식으로 인한 저항치 변화 민감도가 4%~15%, 부식으로 인한 저항치 변화 민감도가 10%~20%인 반면 3%에서는 이에 미치지 못하는 것으로 나타났다.

상기의 결과는 강섬유 혼입율이 1%와 2%인 경우 표면전기저항치 결과의 차이가 명확하므로 구조물 내 철근 부식의 판단 및 평가가 가능하지만, 3%의 경우에는 강섬유 혼입 영향이 철근의 부식에 의한 영향보다 지배적인 것으로 나타났다. 이는 이형철근의 부식을 위한 평가가 불가능하다는 것을 의미한다. 그러나 이와 같은 결과는 이형철근의 부식정도에 따라 달라질 수 있으므로 철근의 부식도를 다양하게 적용한 추가적인 실험을 통해 보다 면밀하게 검토하여야 한다.

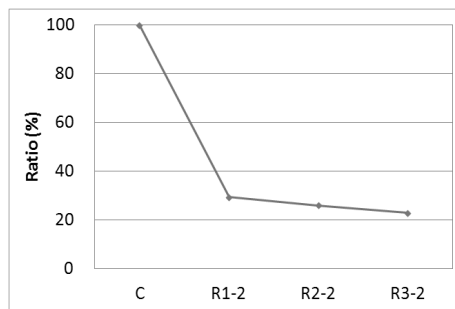


그림 9. 부식된 철근보강 실험체

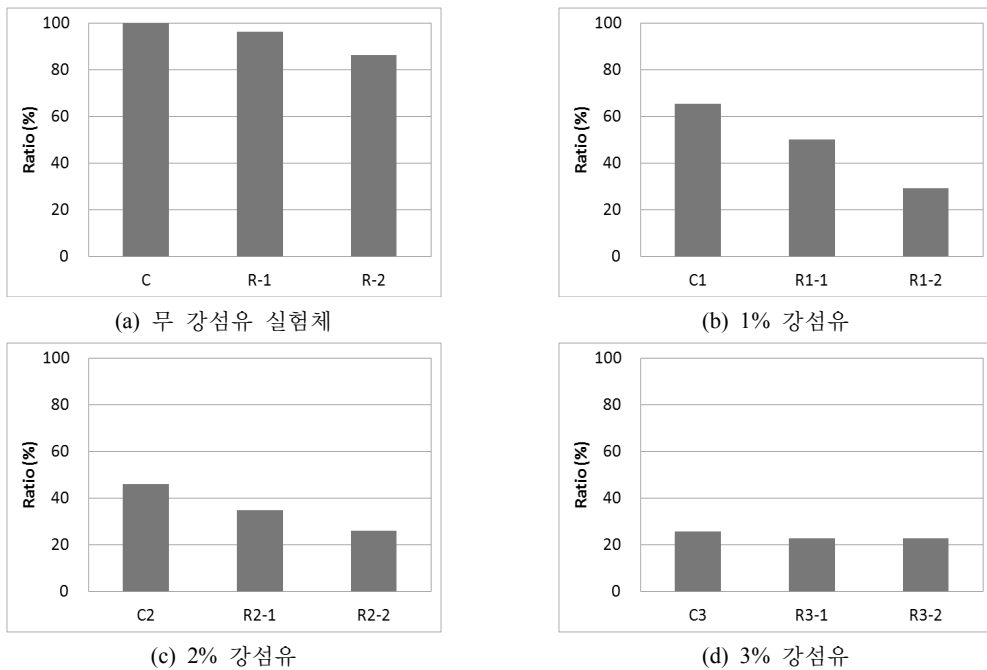


그림 10. 이형철근의 영향

## 5. 결 론

최근들어 구조체인 슬드터널 세그먼트에서 강섬유와 철근이 동시에 사용하는 사례가 증가되고 있다. 이때, 강섬유와 내부 이형철근의 부식은 장기적 내구성능에 영향을 미치므로 이에 대한 상태 평가 방법 및 기준에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 강섬유와 철근이 동시에 보강된 콘크리트의 부식평가방안에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 강섬유의 혼입량, 이형철근의 부식 유무 등을 변수로 실험체를 제작하였으며, 각 변수 등이 표면전기저항치에 미치는 영향을 분석하였다. 이상과 같은 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 강섬유보강 콘크리트에 표면전기저항측정방법을 적용하여 부식가능성과 부식 침투성 평가시, 강섬유는 내부 이형철근과 같이 측정전류의 교란을 일으켜 저항치를 저하시키며, 강섬유의 혼입율의 1%~3%증가에 따라 무 강섬유 실험체 결과의 35%~75%의 표면전기저항치가 감소하는 것으로 나타났다. 본 결과가 실제 표면강섬유의 부식 가능성과의 상관성에 대한 연구는 향후 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.
2. 강섬유보강 콘크리트에 부식된 이형철근을 매립하여 철근의 부식이 콘크리트 표면전기저항에 미치는 영향을 분석한 결과, 강섬유 혼입율이 1% 및 2%에서는 철근의 부식평가가 가능하나, 3%에서는 불가능한 것으로 나타났다. 이는 3% 혼입에서는 강섬유로 인한 저항치 감소가 과도하여 이형철근의 부식으로 인한 저항치 감소의 식별이 불가능하기 때문이다. 따라서 강섬유 혼입율이 3%인 경우에는 표면전기저항측정법을 이용한 부식 및 가능성에 대한 평가가 불가능한 것으로 판단된다.
3. 다만, 이와 같은 결론은 본 실험에서 인위적으로 도입한 정도의 철근부식에 대한 한정적인 실험 결과에 근거한 것으로, 철근의 부식정도에 따른 추가적인 실험을 통해 보다 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

---

## 참 고 문 헌

1. 김병일(2010), “강섬유 보강 콘크리트의 수송계수 및 부식저항효과”, 한국콘크리트학회논문집, Vol. 22, No. 6, pp. 867-873.
2. 김병일, 차상아, 이정윤(2010), “철근의 부식저항에 대한 섬유보강콘크리트의 효과”, 한국콘크리트학회 가을 학술대회논문집, pp. 143-144.
3. 김재동, 김덕용(2000), “강섬유 보강 슛크리트의 휨인성 평가 방법 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 10, pp. 196-210.
4. 문도영(2011), “FRP 보강근의 콘크리트 표면저항치에 미치는 영향”, 한국콘크리트학회 봄학술대회논문집, P-023.
5. 소형석(2008), “철근콘크리트구조물에서 철근의 부식율 측정을 위한 직류전기저항법의 이용에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, Vol. 24, No. 6, pp. 93-100.
6. 소형석(2009), “철근콘크리트구조물에서 콘크리트의 전기저항측정에 미치는 내부철근 및 환경변수의 영향”, 대한건축학회논문집, Vol. 25, No. 6, pp. 91-98.
7. 이상필, 류중현, 이상돈, 전석원, 이정인(2007), “터널영구지보재로서의 슛크리트 고성능화 및 내구성 평가에 대한 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 17, No. 4, pp. 266-284.
8. 이수열, 박연준, 김수만, 유광호, 장성일, 서영호(2010), “폴리플로필렌섬유보강 콘크리트의 성능평가 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 378-389.
9. Balouch, S.U., Forth, J.P., Granju, J.L. (2010), “Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 410-414.
10. Chiaia, B., Fantilli, A.P., Vallini, P. (2009), “Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings”, Engineering Structures, Vol. 31, pp. 1600-1606.
11. Dobashi, H., Konishi, Y., Nakayama, M., Matsubara, K. (2006), “Development of steel fiber reinforced high fluidity concrete segment and application to construction”, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 21, p. 422.
12. Gowers, K.R., Millard, S.G. (1999), “Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique”, ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 5, pp. 536-541.
13. Granju, J.L., Balouch, S.U. (2005), “Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks”, Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 572-577.
14. Lataste, J.F., Behloul, M., Breyse, D. (2008), “Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements”, NDT&E International, Vol. 41, pp. 638-647.

15. Mangat, P.S., Gurusamy, K. (1987), "Long-term properties of steel fibre reinforced marine concrete", *Materials and Structures*, Vol. 20, pp. 273-282.
16. Roque, R., Kim, N., Kim, B., Lopp, G. (2009), "Durability of fiber-reinforced concrete in Florida environments", Florida Department of Transportation, Final Report, pp. 84-85.
17. Sengul, O., Gjorv, O.E. (2009), "Effect of embedded steel on electrical resistivity measurements on concrete structures", *ACI Materials Journal*, Vol. 106, No. 1, pp. 11-17.