강섬유 보강 콘크리트의 표면전기저항 민감도

Sensitivity of Resistivity Measurement of Steel-Fiber Reinforced Concrete

문도영*

Moon, Do Young

Abstract

For condition surveying of concrete structures, corrosion rate or permeability is to be one of important checklists and is usually evaluated by resistivity measurement on concrete surface. But, it is known that the conductive materials, such as embedded steel rebars, affect the observed resistivity. This could be more severe in the case of steel-fiber reinforced concrete structures. In this study, the experimental program were conducted on steel-fiber reinforced concrete specimens with 1%, 2% and 3 Vol% of hooked steel fibers to provide more information about the effect of distributed steel fibers on electrical resistivity measurements on concrete structures. The effect of moisture content, embedded steel reinforcement and its corrosion state were investigated also. The results show that the amounts of mixed fibers and moisture content significantly affect more than others. Consequently, their effect should be carefully considered for the evaluation of corrosion rate or permeability of steel-fiber reinforced concrete structures.

Key words : Steel fiber reinforced concrete(SFRC), Surface resistivity, Mix ratio, Sensitivity

요 지

콘크리트 구조물의 상태평가에서, 부식률 또는 투과성능은 중요한 체크항목중의 하나이며, 일반적으로 표면전기저항 측정치를 이용한 방법을 통해 평가된다. 그러나, 이와 같은 평가방법은 내부 이형철근 등과 같은 전도물질에 의하여 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이러한 전도물질의 간섭현상은 강섬유보강콘크리트의 경우에 더욱 심화될 수 있다. 본 연구에서는 콘크리트에 분포된 강섬유가 표면전기저항에 미치는 영향에 대한 정보를 제공하기 위하여 강섬유를 1%, 2% 및 3% 포함하고 있는 시편에 대한 실험을 수행하였다. 또한, 함수량, 이형철근 및 철근의 부식상태에 따른 영향을 조사하였다. 실험결과에 따르면, 강섬유의 혼입량과 함수량의 영향이 다른 인자들에 비하여 큰 것으로 나타났다. 따라서, 강섬유 보강콘크리트의 부식률 또는 투과성능을 평가하기 위해서는 함수량과 강섬유의 혼입량에 대한 세심한 고려가 필요하다.

핵심용어 : 강섬유보강콘크리트, 표면전기저항, 혼입률, 민감도

1. 서 론

일반 철근콘크리트에 강섬유를 추가적으로 보강함으로써, 균열제어 효과가 크게 개선되는 것으로 보고되었다(김병일, 2010; Balouch et al., 2010; Granju and Balouch, 2005; Mangat and Gurusamy, 1987). 이후 강섬유 보강콘크리트의 제조, 설계기법에 대한 수많은 연구가 수행되었으며, 발전을 거듭하였다(Chiaia et al., 2009; Dobashi et al., 2006). ACI 318-11에서는 강섬유 보강콘크리트의 전단성능에 대한 개선을 인정하여 품질이 일정조건을 만족하는 경우 전단철근을 배근하지 않아도 되도록 허용하고 있다(ACI 318 Committee, 2011). 여기에 그치지 않고, 최근에 발표된 Model Code 2010(CEB-FIP, 2010)에서는 강섬유 보강콘크리트의 인장강도 개선을 고려하여 주철근의 일부 또는 모든 인장철근의 인장

강도를 강섬유가 부담토록 설계를 허용하고 있다. 따라서 강섬유는 콘크리트 구조물의 성능을 개선하기 위한 보조적인 재료로 활용되는 것을 넘어 주철근을 일부 또는 완전히 대체하는 주요한 재료로서 그 역할이 크게 증대되고 있음을 알 수 있다.

콘크리트 구조물의 상태평가 중 가장 주요한 항목은 철근의 부식상태의 평가이다. 철근의 부식은 균열의 발생, 내구성능의 저하로 이어져 구조물의 수명을 결정짓는 주요한 손상 원인이기 때문이다. 전술한 바와 같이 강섬유 보강콘크리트에 철근을 동시에 사용한 콘크리트 구조물이 균열저항에 효과적이라 할지라도 콘크리트 구조물에서 균열의 발생은 필연적인 만큼 철근의 부식가능성 및 부식상태에 대한 평가는 여전히 중요하다. 현재 철근 콘크리트 구조물의 부식가능성 및 부식상태에 대한 평가방법 중 구조물에 손상을 입히지 않는 방법

*정회원 · 경성대학교 토목공학과(E-mail : dymoon@ks.ac.kr)

으로 표면전기저항측정방법이 많이 사용되며, 측정 결과를 근거로 상태평가를 하고 있다(문도영 등, 2011; 문도영, 2011; 소형석, 2008; 소형석, 2009, Sengul and GjFr, 2009). 특히, 미국의 루이지애나 주에서는 콘크리트구조물의 품질평가를 위하여 사용되는 촉진염소이온침투시험을 표면전기저항측정시험으로 대체하여 큰 경제적 효과를 얻은 것으로 보고하고 있다(Rupnow and Icenogle, 2011). 평가는 저항치가 클수록 부식가능성과 부식율이 적은 것으로, 저항치가 적을수록 부식가능성과 부식율이 큰 것으로 평가한다(Gowers and Millard, 1999; Lataste et al., 2008; Sengul and GjFr, 2009).

문제는 콘크리트 구조물에 배근되는 이형 철근은 전기 전도체로서, 전류의 통로 역할을 하게 되며 표면전기저항치를 감소시킬 수 있다(Sengul and GjFr, 2009). 기존 연구결과에 의하면 내부 이형철근의 영향을 최소화하기 위하여 측정시 철근탐사를 통해 가능한 철근과의 거리를 확보하며, 전극의 간격도 철근의 간격보다 작게 유지하도록 제시하고 있다. 더욱 중요한 것은 콘크리트에 혼입되는 강섬유로 인한 전류의 간섭이다. Roque et al.(2009)에 의하면, 강섬유보강콘크리트의 수송계수 및 부식저항효과 분석을 위하여 표면전기저항측정방법을 적용하였으며, 강섬유의 간섭에 의하여 저항치의 큰 감소가 나타났다고 제시하고 있다.

본 연구에서는 강섬유보강콘크리트와 보강된 이형철근이 콘크리트 표면전기저항치에 미치는 민감도를 실험적으로 분석함으로서, 현재 사용하고 있는 표면전기저항측정방법과 그 평가기준이 강섬유보강콘크리트에도 적용될 수 있는지를 고찰하고자 하였다. 이를 위하여 강섬유의 혼입률, 내부 철근의 유무, 내부 철근의 부식여부를 변수로 하였으며, 재령에 따라

3차에 걸친 측정을 통해 콘크리트내 함수량에 따른 측정치의 민감도를 동시에 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험체 제작

표면전기저항을 측정하기 위한 실험체는 그림 1과 같이 150 mm×150 mm×550 mm의 휨실험체를 활용하였다. 강섬유 콘크리트의 배합은 가장 일반적으로 사용되는 콘크리트 배합인 설계압축강도 21 MPa이 발현되도록 배합설계를 하였으며, 배합표는 표 1과 같다. 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재 최대치수는 19 mm, 비중 2.29의 부순 골재를 사용하였다. 잔골재는 비중 2.65의 강모래를 사용하였다.

실험체에 사용된 강섬유는 국내 S사의 제품으로 일반적인 hooked 타입의 섬유로, 직경 0.5 mm, 길이 30 mm, 형상비 60의 번들형태이다. 강섬유의 인장강도는 1,100 MPa이며, 탄성계수는 200 Gpa로, 제작사로부터 제공받았다.

본 실험의 변수에 따라 무근-일반콘크리트 실험체(C), 무근-강섬유보강콘크리트 실험체(C1, C2, C3), 무부식 및 부식된 철근보강-일반콘크리트 실험체(R0-1, R0-2), 무부식 및 부식된 철근보강-강섬유보강콘크리트 실험체(R1-1, R2-1, R3-1, R1-2, R2-2, R3-2)가 제작되었으며 각각의 형상은 그림 1과 같다.

실험체는 타설후 실내에서 24시간 초기양생 후 탈형하여 7일간 수조에서 수중양생을 실시하였다. 수조에서 꺼낸 실험체는 표면 물기를 제거한 후 1차 측정을 수행하였다. 이때 실험체의 수분상태는 포화상태로 간주될 수 있으며, 이후 재령에 대한 측정치의 기준치로 간주되었다. 1차 측정 이후에는

그림 1. 실험체 형상 및 구분

표 1. 콘크리트 배합표

구분	W/B	S/a	단위재료량 (kg/m ³)					고성능감수제 (Cement×%)
			W	C	S	G	Fiber	
무강섬유 실험체	50.0	40.1	76.6	153.4	268.0	425.0	-	0
강섬유 1%							78.1	1.00
강섬유 2%							157.0	
강섬유 3%							235.1	

50일 동안 기건양생 후 2차 측정을, 120일 기건양생 후 3차 측정을 실시하였다.

2.2 실험변수

본 실험의 변수는 3가지로 설정하였다. 강섬유의 혼입량, 철근의 유무, 철근의 부식상태에 대한 영향을 고찰하고자 하였다. 또한, 함수량에 따른 저항치의 변화를 고찰하였다. 1차 측정시에는 포화상태의 실험체를 측정하고 이후 기건양생을 장기간 실시하여 함수량의 변화를 유도하였다. Su et al. (2002)에 따르면 함수량에 따라 저항치의 변화가 발생한다. 본 실험에서는 함수량에 따른 표면저항치의 민감도를 강섬유와 이형철근 등 다른 인자의 영향에 의한 민감도와 비교하기 위하여 재령(7일, 28일, 100일)에 따라 3차례의 측정을 실시하였다.

본 실험의 주된 변수로서, 강섬유의 혼입률에 따른 영향을 살펴보기 위하여 강섬유의 혼입량을 체적비에 대하여 1%(80 kg/m³), 2%(160 kg/m³), 3%(240 kg/m³)로 달리하였다. 일반적으로 터널 숏크리트에는 0.5%~1%가 사용되며, 세그먼트 등 1차 구조체의 제작시에는 철근을 일부 대체하는 경우 1%~1.5%, 철근을 완전히 대체하는 경우 1%~2% 정도의 배합이 사용되고 있다(Chiaia et al., 2009; Dobashi et al., 2006). 또한, SIMCON(Slurry Infiltrated Continuous-Fiber-Mat Reinforced Concrete)과 같은 강섬유보강 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 경우에는 3% 이상의 혼입이 사용되고 있다(Krstulovic-Opapa and Malak, 1997).

철근과의 동시간섭에 의한 영향을 살펴보고 상호 비교를 통하여 주된 영향인자를 찾기 위하여 철근의 배근여부를 변수로 하였다. Sengul and GjFriv (2009)이 수행한 실험체 따르면, 철근의 간섭이 가장 큰 경우는 전극의 간격과 철근의 덮개가 일치할 때 인 것으로 나타났다. 따라서, 철근의 영향으로 인한 간섭이 최대화 될 수 있도록 철근의 피복덮개는 측정장비의 전극간격과 일치하도록 5 cm로 하였다. 철근의 간섭에 의한 영향의 민감도와 강섬유의 혼입량에 의한 민감도를 상호 비교함으로서, 주된 영향 인자를 비교·고찰 하고자 하였다. 표 2는 실험변수를 정리하여 나타내고 있다.

표 2. 실험변수 및 변수명

구분		강섬유 혼입비			
		0%	1%	2%	3%
무보강(C)		C0	C1	C2	C3
이형철근	무부식	R0-1	R1-1	R2-1	R3-1
	부식	R0-2	R1-2	R2-2	R3-2

철근의 부식상태도 표면전기저항치에 영향을 미치며, 부식상태를 평가하는 것이 주요한 측정의 목적이다. 따라서 철근의 부식상태에 의한 민감도 분석을 위하여 이를 변수로 채택하였다. 철근을 NaCl 용액에 6개월간 수침시켜 표면에 강제 부식을 유도하였으며, 단면적에 약 10%의 손실에 해당하는 부식상태를 나타내었다. 표 1은 실험변수와 변수명을 나타내고 있다. 실험변수명에서 첫 번째 자리에 영문 C와 R은 각각 무근과 철근보강을 의미하며, 두 번째 자리의 숫자 1, 2, 3은 강섬유 혼입량을 의미한다. 마지막에 표시된 -1과 -2는 철근의 부식상태를 의미하며, “-1”은 무부식을, “-2”는 부식된 철근을 의미한다.

2.3 실험방법

본 실험에 사용된 측정 장비는 P사의 RESIPOD라는 장비로서, 전극의 간격은 50 mm로 고정되어 있다. 그림 2와 같이 검교정板的의 저항치를 측정함으로서, 실험전 검교정을 통해 장비의 정확성을 확보하였다. 표면전기저항의 측정은 콘크리

그림 2. 장비의 검교정

그림 3. 표면 수분 살포

그림 4. 표면전기저항 측정

트 표면을 사포로 정리한 후 표면에 스프레이를 이용하여 충분한 수분을 살포한다(그림 3 참조). 측정 위치는 실험체의 중앙 상면으로 보강근의 배근 방향에 따라 측정을 수행하였다. 장비의 4개의 전극을 접촉시키고 측정값이 안정화 될 때까지 5초간 대기한 후 결과치를 정리하였다(그림 4 참조). 동일한 실험체에 대하여 총 9번의 측정을 실시하였다. 한명의 측정원이 3회 측정을 1식(set)으로 하였으며, 총 3명의 측정원이 동원되었다. 본 논문에서 제시된 결과치는 9번 측정치의 평균값이다.

3. 실험결과 고찰

3.1 강섬유혼입량에 따른 저항치 변화 민감도 분석

강섬유의 혼입량 변화에 따른 표면저항치의 변화를 그림 5~그림 7에 나타내었다. 각각의 그림은 1차, 2차 및 3차 측

정의 결과를 나타내고 있다. 측정결과의 상대비교를 위하여 무근-일반콘크리트 실험체(C)의 측정치로 각 실험체의 측정치를 나누어 비교, 고찰하였다. 그러므로 1차, 2차 및 3차의 무근-일반콘크리트 실험체(C)의 표면저항치가 기준이 되며, 1이다.

타설 후 7일 수침이후 측정된 1차 측정(포화상태)에서 무근-일반콘크리트 실험체(C)의 평균 저항치는 $5.89 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 로 나타났다. 2차 측정과 3차 측정시 무근-일반콘크리트 실험체(C)의 평균 저항치는 각각 $11.71 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 과 $15.59 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 로 측정되었다. Roque 등(2009)의 결과에서도 다른 섬유에 비하여 강섬유가 혼입된 SFRC의 저항치가 크게 감소하는 경향을 확인하였다. 본 실험에서도 그림 5와 같이 일반콘크리트에 비하여 강섬유 콘크리트의 저항치가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 큰 저항치의 감소는 무부식 또는 부식된 철근이 보강된 실험체군(R*-1 series, R*-2 series)에서도 동일한 경향을 확인할 수 있다. 또한, 강섬유의 혼입량이 증가할수록 감소의 경향은 뚜렷한 것을 확인할 수 있다. 그림 6과 그림 7에서 볼 수 있듯이 강섬유의 혼입량의 증가에 따른 저항치의 감소는 재령에 따라 함수량이 감소하여도 동일한 양상을 나타내고 있다.

강섬유 혼입의 영향에 따른 저항치 변화 민감도는 실험체마다 큰 차이가 있지만 혼입률 1%까지는 최소 5%($0.3 \text{ k}\Omega\text{-cm}$)에서 최대 85%($5 \text{ k}\Omega\text{-cm}$)까지 감소하는 것으로 나타났다. 혼입률 2%에서는 최소 50%($5.9 \text{ k}\Omega\text{-cm}$)에서 최대 90%($10.5 \text{ k}\Omega\text{-cm}$)까지 감소하며, 혼입률 3%에서는 최소 60%($9.4 \text{ k}\Omega\text{-cm}$)에서 최대 82%(12.8)까지 감소하는 것으로 나타났다.

그림 5. 강섬유 혼입량의 영향 (1차 실험결과)

그림 6. 강섬유 혼입량의 영향 (2차 실험결과)

그림 7. 강섬유 혼입량의 영향 (3차 실험결과)

3.2 일반콘크리트에서 철근 유무와 철근의 부식상태에 따른 저항치 변화 민감도 분석

일반콘크리트에서 철근 유무와 철근의 부식상태에 따른 영향을 우선 고찰하였다. 그림 8에는 각 측정치수의 일반콘크리트의 결과를 요약하여 나타내었다. 우선, 내부에 철근이 있는 경우에는 철근의 영향으로 저항치가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 철근의 부식상태에 의한 영향을 보면, 1차에서는 R0-1 보다 R0-2의 저항치가 10% 정도 더 작은 것으로 나타났으나, 2차 및 3차의 결과에서는 오히려 저항치가 부식으로 인하여 증가하는 양상을 나타낸다. 따라서 부식에 의한 영향은 일관되지 않기 때문에, 본 측정방법을 통하여 콘크리트 철근의 부식상태를 직접적으로 평가할 수 없는 것으로 판단된다. 다만, 본 측정방법은 내부 이형철근의 부식 가능성과 침투성능을 평가하는 간접적인 평가방법으로 적합한 것으로 판단된다.

변화의 민감도를 살펴보면, 전도체인 철근의 영향으로 인하여 최소 3%에서 최대 19%의 저항치 감소를 나타내었다. 이와 같은 수준의 변화 민감도는 강섬유의 혼입률에 따른 변화 민감도와 비교할 때 상대적으로 그 영향이 크지 않다는 것을 알 수 있다.

3.3 강섬유보강 콘크리트에서 철근 유무에 따른 저항치 변화 민감도 분석

강섬유 보강 콘크리트내에 이형철근의 보강 유무에 따른

그림 8. 철근 및 부식상태의 영향(일반콘크리트)

표면저항치의 변화를 고찰하였다. 3.2장 일반콘크리트의 실험 결과에서 설명한 바와 같이 철근의 부식상태에 따른 평가는 불가능하기 때문에 무부식 및 부식된 철근 보강실험체의 결과 모두에서 철근 보강으로 인한 간섭의 영향만을 고찰하였다.

그림 9는 강섬유보강콘크리트에 부식되지 않은 이형철근이 보강된 실험체의 측정결과를 비교하여 나타내고 있다. 철근으로 인한 표면전기저항치의 명확한 감소를 나타내는 결과는 3 경우(C2와 R2-1, C3와 R3-1, C2와 R2-1)에 불과한 것을 볼 수 있으며, 나머지의 결과에서는 철근이 보강된 실험체의 저항치가 철근이 보강되지 않은 실험체의 저항치와 유사하거나 오히려 큰 것으로 나타났다.

그림 10은 강섬유보강콘크리트에 부식된 이형철근이 보강된 실험체의 결과를 나타내고 있다. 이 결과에서도 일관된 저항치의 감소가 나타나지 않으며, 오히려 증가하는 결과가 나타났다. 이 결과를 종합할 때, 강섬유의 혼입에 따른 간섭 영향이 내부 이형철근에 의한 영향을 지배하는 것으로 판단된다.

3.4 콘크리트 함수량에 의한 저항치 민감도 분석

Su 등(2002)의 연구에 의하면 표면전기저항결과가 콘크리트가 함유하고 있는 수분량에 의하여 크게 영향을 받는다고 주장하였다. Su 등의 실험에서는 포화상태의 실험편과 오븐에서 건조시킨 실험편과의 저항치의 변화를 비교·고찰하였으며 그 영향이 중대하므로 이를 고려한 평가가 필요하다고 제시하였다. 본 연구에서는 함수상태에 의한 저항치 변화 민감도와 강섬유의 혼입에 의한 저항치 변화 민감도를 비교·평가하고자 하였다.

본 실험의 1차, 2차 및 3차의 측정은 재령에 따라 수행되었으며, 1차 측정은 7일 수침이후에 표면건조후 저항을 측정하였기 때문에 수분포화상태의 결과로 간주될 수 있다. 이후에는 기건 상태에서 50일과 120일이 지난 후 저항치를 측정하였으므로 내부의 여유수분이 수화작용과 건조에 의하여 소실됨으로서, 3차에 걸친 측정결과로부터 수분함유량에 대한 영향을 평가할 수 있다. 포화상태 즉, 1차 측정에서 도출된 무근-일반콘크리트 실험체의 측정치로 모든 실험체의 3차에 걸친 측정치를 나누어 상대 평가하였으며, 그 결과를 그림

(a) 1차 결과

(b) 2차 결과

(c) 3차 결과

그림 9. 내부 이형철근의 영향(강섬유 콘크리트)

(a) 1차 결과

(b) 2차 결과

(c) 3차 결과

그림 10. 내부 이형철근의 부식상태에 따른 영향 (강섬유 콘크리트)

11에 정리하였다.

그림과 같이 대부분의 실험체에서 함수량의 감소에 따라 표면저항측정치의 급격한 증가가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 변화민감도는 포화상태를 기준할 때, 콘크리트 내부의 함수량이 감소하게 되면, 표면저항치가 200%(11.8 kΩ-cm)에

서 250%(14.8 kΩ-cm)까지 증가한다. 이와 같은 함수량에 의한 변화 민감도는 강섬유의 혼입에 따른 저항치의 최대 감소 12.8 kΩ-cm과 비교할 때 그 영향이 훨씬 지배적임을 의미한다. 따라서, 강섬유 콘크리트의 부식가능성을 평가할 때에는 수분 함유량이 서로 다른 경우 그 평가가 의미가 없기 때문

그림 11. 수분함유량에 따른 저항치의 변화

에 최대한 동일한 수분함유상태가 되도록 하는 것이 매우 중요하다.

3.5 평가기준에 대한 고찰

전술한 바와 같이 본 표면전기저항측정방법은 부식율과 이온투과성능에 대한 평가를 위하여 주로 사용된다. 부식율에 대한 평가기준은 Langford and Broomfield(1987)에 의하여 이온투과성능에 대한 평가기준은 Chini et al.(2003)에 의하여 제시되었으며, 표 3과 같다. 제시된 표와 같이 부식율의 경우 10 kΩ-cm 단위로 상태평가의 기준이 달라지며, 이온투

표 3. 표면전기저항치의 평가기준

표면저항, kΩ-cm	부식율	표면저항, kΩ-cm	이온투과성능
<5	매우 높음	<12	높음
5 to 10	높음	12 to 21	중간
10 to 20	중간/낮음	21 to 37	낮음
>20	낮음	37 to 254	매우 낮음

과성능의 경우에는 중간의 경우에는 9 kΩ-cm, 낮음의 경우에는 16 kΩ-cm, 매우 낮음의 경우에는 217 kΩ-cm의 범위를 가지고 평가하도록 하고 있다. 본 측정결과를 통해 강섬유보강콘크리트의 표면전기저항치와 부식율 또는 이온투과성능과의 직접적인 상관관계를 밝힐 수는 없으며, 이를 위해서는 매우 면밀하고 방대한 실험적 연구가 필요하다. 그러나 전술한 바와 같이 강섬유의 혼입량과 함수량의 차이에 따라 5 kΩ-cm~15 kΩ-cm 정도의 변화민감도가 발생함을 감안할 때, 표 3에 제시된 기준으로 평가한 결과가 적정한지에 대한 여부를 고찰하고자 하였다.

표 4에는 모든 측정치와 평가결과를 정리하여 나타내었다. 표 4의 결과의 1차, 2차 및 3차에 걸친 측정치의 평가를 상호 비교함으로써, 동일한 콘크리트라 할지라도 함수량에 따른 평가결과의 변화를 고찰할 수 있다. 평가결과에 따르면 동일한 콘크리트라도 함수량에 따라 부식율은 “매우 높음”에서 “높음”, “중간”까지 평가결과가 달라질 수 있음을 볼 수 있다. 이온투과성능의 평가에서도 “높음”에서 “중간”으로 평가결과가 달라진다. 따라서, 함수량에 따른 측정치의 변화민감도가 평가기준의 기준간 차이를 초과함으로써, 동일한 콘크리트라도 다른 평가결과가 나타날 수 있기 때문에 이에 대한 평가기준의 보완 또는 측정시 함수량 상태에 대한 기준이 필요하다.

한편, 표 4를 통해 강섬유의 혼입률에 따른 부식율 평가결과를 살펴보면, 일반콘크리트와 강섬유 콘크리트간의 평가는 확실한 차이를 나타낸다. 일반콘크리트 보다는 강섬유 콘크리트의 부식율이 한 단계 높은 것으로 나타났다. 강섬유 콘크리트에서 혼입률이 증가함에 따라 저항치의 큰 감소에도 불구하고 평가결과는 거의 동일한 것으로 나타났다. 이온투과성능의 평가결과를 살펴보면, 강섬유의 혼입량 증가에도 불구하고 거의 동일한 평가결과를 확인할 수 있다. 이로부터, 강섬유 콘크리트의 특징과 혼입률의 영향을 평가하기에는 기존의 평가기준의 기준이 되는 측정치간의 차이가 너무 크다고 판단되며, 더욱 세분화된 기준치의 제시가 필요하다.

표 4. 부식율과 이온투과성능 평가

구분	1차			2차			3차		
	측정치 (kΩ-cm)	부식율 평가	이온투과성능 평가	측정치 (kΩ-cm)	부식율 평가	이온투과성능 평가	측정치 (kΩ-cm)	부식율 평가	이온투과성능 평가
C	5.89	높음	높음	11.71	중간	높음	15.59	중간	중간
C1	2.96	매우 높음	높음	6.42	높음	높음	12.68	중간	중간
C2	2.71	매우 높음	높음	5.47	높음	높음	7.54	높음	높음
C3	1.52	매우 높음	높음	4.53	매우 높음	높음	5.64	높음	높음
R0-1	5.68	높음	높음	9.47	높음	높음	14.26	중간	중간
R1-1	3.86	매우 높음	높음	11.27	중간	높음	14.29	중간	중간
R2-1	2.74	매우 높음	높음	1.08	매우 높음	높음	1.48	매우 높음	높음
R3-1	1.34	매우 높음	높음	2.22	매우 높음	높음	5.80	높음	높음
R0-2	5.10	높음	높음	11.74	중간	높음	15.21	중간	중간
R1-2	1.61	매우 높음	높음	1.33	매우 높음	높음	9.99	높음	높음
R2-2	1.53	매우 높음	높음	1.87	매우 높음	높음	3.15	매우 높음	높음
R3-2	1.36	매우 높음	높음	3.32	매우 높음	높음	3.03	매우 높음	높음

본 논문에서는 강섬유보강 콘크리트의 표면전기저항치의 변화를 고찰함으로써, 표면전기저항측정방법을 통한 부식가능성의 평가방법의 적용성을 분석하고, 내부 철근과 철근의 부식 상태에 따른 저항치의 간섭영향을 동시에 분석하였다. 또한, 콘크리트 내부 수분함유상태에 따른 변화 민감도를 강섬유에 의한 영향과 비교 평가하였다. 이상의 실험결과를 통해 획득한 결론은 다음과 같다.

- 1) 강섬유보강콘크리트의 표면저항치는 일반콘크리트에 비하여 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 강섬유의 혼입율이 증가할수록 저항치의 감소가 더 큰 것으로 나타났다. 강섬유의 혼입으로 인한 저항치의 변화 민감도는 최대 90%로 나타났다.
- 2) 내부 이형철근 보강여부와 부식상태에 따른 영향을 일반 콘크리트와 강섬유콘크리트에서 비교·평가하였다. 우선 내부 이형철근의 부식유무에 따른 표면저항치의 변화를 분석한 결과로부터 본 표면저항측정방법을 통해 내부철근의 부식상태에 대한 직접적인 평가는 불가능한 것을 확인하였다. 한편, 이형철근 보강여부에 따른 영향은 일반 콘크리트의 분석결과, 내부 이형철근으로 인한 저항치의 감소가 최소 3%에서 19% 발생하는 것으로 나타났으나, 강섬유 보강콘크리트에서는 강섬유로 인한 저항치의 감소에 비하여 내부 철근에 의한 저항치의 감소가 상대적으로 매우 미미한 것으로 나타났다. 따라서, 일반 콘크리트와 달리 강섬유보강콘크리트에서는 내부 이형철근의 영향이 상대적으로 제한적이기 때문에 강섬유보강 콘크리트의 부식가능성의 평가에서는 내부 보강철근의 위치와 깊이 보다는 강섬유의 혼입량과 강섬유의 분포상태에 대하여 더욱 주의하여야 할 것으로 판단된다.
- 3) 3차에 걸친 측정을 통해 콘크리트 내부 수분함유상태에 따른 저항치의 변화 민감도를 분석하였으며 이를 강섬유의 혼입에 따른 변화 민감도와 비교·평가하였다. 수분 포화상태에서 수분이 감소할수록 표면저항치가 200%~250% 증가하는 것으로 나타났다. 강섬유의 혼입에 따른 저항치의 감소가 최대 90% 정도임을 감안할 때, 수분 함유상태가 더 지배적인 인자임을 알 수 있다. 따라서, 강섬유보강콘크리트의 부식가능성의 평가시 이를 고려하여 측정대상 부위의 수분함유상태가 최대한 동일한 조건이 되도록 하여야 한다.
- 4) 본 연구에서 획득한 강섬유보강 콘크리트의 표면저항치를 근거로 부식율과 이온투과성능에 대한 평가를 수행하고, 기존 평가기준의 강섬유 보강콘크리트의 적용성에 대한 간접적인 민감도 고찰을 수행하였다. 고찰결과, 동일한 콘크리트라도 함유량에 따라 부식율과 이온투과성능에 대한 평가결과가 다름을 확인하였으며, 표면저항측정시 수분함유상태에 대한 기준이 제시되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 강섬유의 혼입률이 1%에서 3%까지 변화하여도 이에 대한 평가결과가 동일한 것으로 나타나, 강섬유 혼입률의 영향을 반영하기 위해서는 기준치의 세분화가 필요한 것으로 판단된다.

이 논문은 2012학년도 경성대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김병일 (2010) 강섬유 보강 콘크리트의 수송계수 및 부식저항효과, **한국콘크리트학회논문집**, 제22권, 제6호, pp. 867-873.
- 문도영, 이규필, 장수호, 배규진 (2011) 강섬유보강 콘크리트 세그먼트의 강섬유가 표면전기저항에 미치는 영향, **한국터널지하공간학회논문집**, 제13권, 제6호, pp. 557-569.
- 문도영 (2011) 콘크리트내 섬유복합체 보강근이 표면저항치에 미치는 영향, **구조물진단학회지**, 제15권, 제6호, pp. 212-218.
- 소형석 (2008) 철근콘크리트구조물에서 철근의 부식을 측정을 위한 직류전기저항법의 이용에 관한 실험적 연구, **대한건축학회논문집**, 제24권, 제6호, pp. 93-100.
- 소형석 (2009) 철근콘크리트구조물에서 콘크리트의 전기저항측정에 미치는 내부철근 및 환경변수의 영향, **대한건축학회논문집**, 제25권, 제6호, pp.91-98.
- ACI Committee 318 (2011) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary(ACI 318-11)*, American Concrete Institute, Farming Hills, 77 pp.
- Balouch, S.U., Forth, J.P. and Granju, J.-L. (2010) Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 410-414.
- CEB-FIP (2010) Model Code 2010-First complete draft, Vol. 2, 215 pp.
- Chiaia, B, Fantilli, A.P. and Vallini, P. (2009) Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings, *Engineering Structures*, Vol. 31, pp. 1600-1606.
- Chini, A.R., Muszynski, L.C. and Hicks, J.K., (2003) *Determination of Acceptance Permeability Characteristics for Performance-Related Specifications for Portland Cement Concrete*, Final Report, Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge LA, USA.
- Dobashi, H., Konishi, Y., Nakayama, M. and 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.
- Gowers, K.R. and Millard, S.G. (1999) Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique, *ACI Materials Journal*, ACI, Vol. 96, No. 5, pp. 536-541.
- Granju, J.-L. and Balouch, S.U. (2005) Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 572-577.
- Krstulovic-Opara, N. and Malak, S. (1997) Micromechanical Tensile Behavior of Slurry Infiltrated Continuous-Fiber-Mat Reinforced Concrete (SIMCON), *ACI Materials Journal*, ACI, Vol. 94, No. 5, pp. 373-384.
- Langford, P. and Broomfield, J. (1987) Monitoring the Corrosion of Reinforcing Steel in a Marine Environment, *Construction Repair*, pp. 32-36.
- Lataste, J.F., Behloul, M. and Breysse, D. (2008) Characterization of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements, *NDT&E International*, Vol. 41, pp. 638-647.
- Mangat, P.S. and Gurusamy, K. (1987) Long-term properties of steel fibre reinforced marine concrete, *Materials and Structures*, Vol. 20, pp. 273-282.

Roque, R., Kim, N., Kim, B. and Lopp, G. (2009), *Durability of Fiber-Reinforced Concrete in Florida Environments*, University of Florida, Tallahassee FL, USA, pp. 84-85.

Rupnow, T.D. and Icenogle, P. (2011) *Evaluation of Surface Resistivity Measurements as an Alternative to the Rapid Chloride Permeability Test for Quality Assurance and Acceptance*, Report FHWA/LA.11/479, Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge LA, USA.

Sengul, O. and GjFrV, O. E. (2009) Effect of embedded steel on

electrical resistivity measurements on concrete structures, *ACI Materials Journal*, ACI, Vol. 106, No. 1, pp. 11-17.

Su, J., Yang, C., Wu, W. and Huang, R. (2002) Effect of Moisture Content on Concrete Resistivity Measurement, *Journal of the Chinese Institute of Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 117-122.

◎ 논문접수일 : 2012년 09월 04일
◎ 심사의뢰일 : 2012년 09월 06일
◎ 심사완료일 : 2012년 10월 04일