



철근부식 표면측정법 모델링을 통한 콘크리트 내 철근 탐사

임홍철^{1)*} · 마향화²⁾ · 이석용¹⁾ · 이근우³⁾ · 오진원¹⁾

¹⁾연세대학교 건축공학과 ²⁾삼성엔지니어링 산업해외사업팀 ³⁾경북대학 건축과

Steel Probing in Concrete Using Steel Corrosion Surface Measurement Method Modeling

Hong-Chul Rhim,^{1)*} Hyang-Hwa Ma,²⁾ Suk-Yong Lee,¹⁾ Kun-Woo Lee,³⁾ and Jin-Won Oh¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Industrial Plant Overseas Business Team, Samsung Engineering, Seoul 135-856, Korea

³⁾Dept. of Architecture, Kyungbok College, Pochun 487-717, Korea

ABSTRACT Using non-invasive surface measurement method, the corrosion state of steel embedded inside concrete can be measured by placing four electrodes on the surface of concrete. Modeling of such measurements can provide valuable information as how interfacial impedance between corroded steel and surrounding concrete results in measured impedance on the concrete surface. In this paper, the modeling of surface measurement technique is used for the determination of the sensitivity of the measurements with respect to steel bar size embedded inside concrete and cover thickness. Modeling results indicated that steel bar sizes varied from D10 to D35 could be identified. Concrete cover thickness changes from 0.02 m to 0.1 m was also distinguished using the modeling scheme. The results confirm this modeling technique is capable of determining steel bar sizes and cover thickness, as well as simulating corrosion responses.

Keywords : surface measurement method, corrosion, modeling, steel bar size, cover thickness

1. 서 론

철근콘크리트구조물은 콘크리트와 철근의 복합재로서 두 재료의 상호보완을 통하여 구조물의 안정성을 유지한다. 이때 콘크리트구조물의 내구성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 콘크리트 자체의 열화가 아니라 보강재인 철근의 부식이다. 강알칼리 조건의 콘크리트에 매립된 철근표면은 부동태 피막이 형성되므로 균열이 없는 콘크리트의 경우 철근부식으로부터 보호될 수 있다. 그러나 균열이 발생하여 물, 산소, 염소 이온의 침투가 용이해지거나, 중성화가 매립된 철근의 위치까지 진행되어 부동태 피막이 손상되면 부식은 급진전 되어, 철근부식 생성물로 인한 부피 팽창으로 콘크리트의 박리 및 탈락현상이 발생된다. 또한, 철근과 콘크리트 부착력 감소로 구조물의 내구성이 저하된다. 이미 철근의 부식이 진행된 경우는 보수나 보강이 쉽지 않고 비용이 많이 들기 때문에, 콘크리트구조물의 유지관리를 수행함에 있어 조기에 철근부식의 징후를 감지하여 대책을 수립하는 것이

중요하게 된다.

철근콘크리트구조물 중의 철근부식을 효과적으로 측정하는 전기화학적 방법으로는 철근의 자연전위측정으로 부식상태를 판단하는 자연전위법, 콘크리트의 비저항을 측정하여 부식상태를 판정하는 전기저항법, 미소교류를 인가시켜 분극저항을 통하여 부식속도를 측정하는 분극저항법 및 교류 임피던스법, 전위변동 스펙트럼 해석으로 부식상태와 부식속도를 추정하는 노이즈법 등이 있다.^{1,2)}

근래에 부식 측정에 응용되기 시작한 교류 임피던스법은 정량적인 부식 정도를 알 수 있을 뿐 아니라 부식 프로세스의 모델링에도 효과적인 방법으로 알려져 있다. 그러나 교류 임피던스법을 포함한 기존의 전기화학적인 방법들은 반드시 철근을 외부로 노출시켜야 한다는 문제점을 가지고 있으며 이는 측정의 번거로움뿐만 아니라 이로 인한 구조체의 성능저하까지 일어날 수 있다. 그래서 아직까지는 측정방법의 복잡성과 현장적용의 어려움으로 교류 임피던스법은 실험실에서의 연구에 주로 국한되고 있는 상황이다.³⁾

철근콘크리트구조물에서 콘크리트에 손상을 가하지 않고도 철근의 부식상태를 정량적으로 측정 가능한 표면측정법은, 지구물리학 분야에서 지질의 특성을 측정하기 위하여 응용되던 다전극 배열을 응용하여 철근의 부식상태

*Corresponding author E-mail : hcrhim@yonsei.ac.kr

Received June 26, 2008, Revised March 5, 2008

Accepted March 9, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

를 측정 하는 방법으로서 Monteiro 등에 의하여 제안되고 발전되어 왔다.^{4,7)}

이 방법은 콘크리트 표면에서의 전기화학적 특성과 매립철근계면의 특성을 연관시켜 철근의 부식상태를 측정하는 방법이다. 콘크리트 표면에서 측정된 특성은 계면의 특성 뿐 아니라 콘크리트 비저항과 철근의 크기, 피복두께 전극배열 등에 의존하기 때문에 세밀한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 철근부식 표면측정법에 대한 수치해석 모델링을 통하여 여러 부식상태에서 철근직경변화, 콘크리트 피복두께, 철근의 평행 이격거리에 따른 표면측정 임피던스의 관계를 비교하였다. 그래서 철근부식 표면측정법의 콘크리트내 철근탐사의 이용가능성에 대하여 알아보았다.

2. 표면측정법 모델링

2.1 Wenner array

표면측정법의 전극 측정배열은 Fig. 1과 같다. 두 개의 외부 전극 (A, B) 사이에 전류가 인가되며 전압강하는 두 개의 내부 전극 (M, N) 을 통해 측정된다. 이 배열에서 간격 a로 배열되는 전극이 Wenner array⁸⁾이다.

콘크리트에 전류가 주입됨으로써 철근 표면은 분극화된다. 즉, 철근 표면에 전하가 축적되어 내부 전극들에 의해 전압을 생성시킨다. Fig. 2는 콘크리트 표면측정법

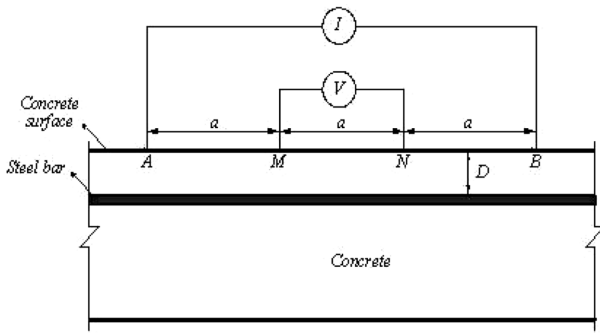


Fig. 1 Wenner electrode array placed on the concrete surface

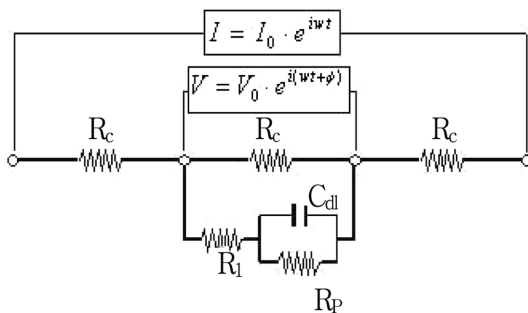


Fig. 2 Schematic equivalent circuit for the surface measurement method

을 나타내는 등가회로 모델을 보여준다. R_c 는 콘크리트 저항을 나타내며, R_1 은 전해질저항, C_{dl} 은 전기이중층용량, R_p 는 분극저항을 의미한다. 주파수 의존 특성에 대해 알아보기 위해 주입전류 I 는, 크기가 I_0 이고 각주파수가 ω 인 주파수역에서 cosine wave로 설정하였다 ($I = I_0 \cdot e^{i\omega t}$). 그 때 전압 V 는 크기가 V_0 이고 전류에 따른 위상각 변화는 ϕ 이다.

Wenner array에서 저항이 일정한 반공간에서의 비저항 ρ 는 $(V/I)2\pi a$ 로 표시될 수 있다. 불균질한 지표 밑의 저항은 겉보기 비저항 ρ_a 라고 하며, 저항이 일정한 반공간에서는 지표 밑의 실제 저항과 같다. 식 (1)과 같이 겉보기 비저항은 다음 식과 같고 비저항계수 $|\rho_a|$ 와 위상각 ϕ 또는 비저항의 실, 허수부로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_a(\omega) &= \frac{V_0(\omega) \times e^{i(\omega t + \phi)}}{I_0 e^{i\omega t}} 2\pi a & (1) \\ &= \left[\frac{V_0(\omega)}{I_0} 2\pi a \right] e^{i\phi} \\ &= |\rho_a| e^{i\phi} \\ &= Re(\rho_a) - iIm(\rho_a) \end{aligned}$$

여기서, $\rho_a(\omega)$: 복소 겉보기 비저항 ($\Omega \cdot m$)

I_0 : 주입 전류의 진폭 (mA)

V_0 : 측정 전압의 진폭 (mV)

ω : 각속도 (rad/sec)

ϕ : 위상각 (rad)

2.2 표면측정법 모델링

2.2.1 모델링

콘크리트 표면에서 측정된 임피던스 응답은 계면 임피던스와 전극배열, 철근의 크기와 위치 및 콘크리트 비저항에 의한 결과이다. 철근, 콘크리트, 그리고 계면 임피던스에 대한 표면측정 응답은 철근 중심에서의 원주좌표계에서 푸아송 방정식으로 나타내어질 수 있다. 표면측정 응답과 접촉면의 임피던스간의 관계를 나타내기 위하여 콘크리트는 일정한 저항의 반공간 (half-space)이고, 철근의 길이는 무한하며, 접촉면 임피던스는 철근을 따라 일정하다고 가정하였으며 콘크리트 내의 함수율은 실험실내의 제어상태로서 일정하다고 보았다. 모델링에서 전위장의 왜곡문제는 피복두께가 철근직경보다 크면 만족된다고 보았다.⁵⁾

수치해석 모델링은 계면 특성을 표면응답으로 나타내고, 측정된 표면 응답으로 계면 특성을 찾는 상호 반복적인 방식으로 적용된다.⁵⁾ 본 연구에서는 배근의 상태와 전극배치 그리고 기하학적 특성에 따른 표면임피던스 값과의 관계분석을 통하여 철근의 기하학적인 특성을 파악하였다.

2.2.2 부식상태와 측정 주파수

철근부식의 표면측정법 모델링을 이용하여 부식된 철근의 직경, 매입 깊이의 영향과 함께 철근의 위치를 추정하기 위해 서로 다른 부식 상태의 시뮬레이션을 적용하였다. 적용된 부식상태는 기존의 분극저항법^{9,10)} 콘크리트 비저항법^{11,12)} 적용되는 기준을 이용하여, 다른 변수는 일정하다고 가정하고 Table 1과 같이 콘크리트 저항 R_c 와 계면의 분극저항 R_p 값을 변화시켜 아주 낮은 부식상태, 낮은 부식상태, 높은 부식상태, 매우 높은 부식상태의 4가지로 가정하였다. 전해질저항 R_1 는 측정하는 전극배열과 철근의 크기나 위치에 따른 영향이고, 전기이중층용량 C_{dl} 은 부식상태를 직접적으로 나타내는 응답의 크기와는 상관없고 최대위상과 최대허수 응답 주파수를 조절함으로써 부식상태에 상관없이 일정하게 하였다 (이때, ρ_s 는 철근의 비저항 값이다).

부식의 정도에 따라 철근직경, 매입깊이, 철근의 이격거리 변화에 따른 임피던스의 크기와 위상차를 알아보기 위해, 각 부식 상태별로 임피던스의 값이 일정한 양상을 보이는 저주파수 대역과, 위상차가 최대가 되는 중간 주파수 대역 (낮은 부식상태: 0.025 Hz, 높은 부식상태: 0.07 Hz), 그리고 Fig. 3에서 보는 바와 같이 최대 위상 주파수의 10배, 100배가 되는 값을 각각 선택하였다. 고주파수 영역에서의 오차로 인하여 모델링의 해석은 저주파수대로 한정하였다.

3. 콘크리트 내 철근 탐사

3.1 철근 직경 변화의 영향

서로 다른 부식상태에서 철근 직경만의 영향을 알아보

Table 1 Assumption of corrosion state used in modeling

Corrosion state	R_p ($\Omega \cdot m^2$)	R_1 ($\Omega \cdot m^2$)	C_{dl} (F/m ²)	R_c ($\Omega \cdot m$)	ρ_s ($\Omega \cdot m$)
Very low corrosion	26	0.5	2.22	200	10^{-7}
Low corrosion	15.6	0.5	2.22	150	10^{-7}
High corrosion	3.9	0.5	2.22	75	10^{-7}
Very high corrosion	2.6	0.5	2.22	50	10^{-7}

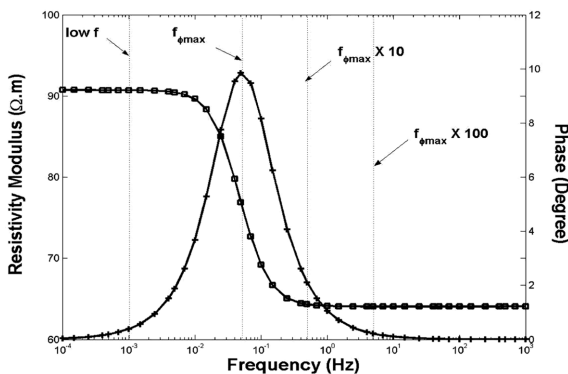


Fig. 3 Frequency selection (maximum phase frequency)

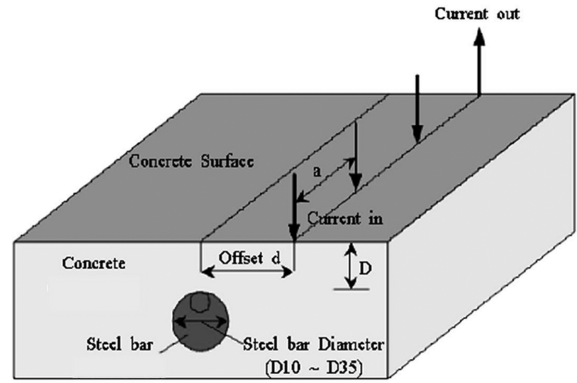


Fig. 4 Geometrical variables applied to the modeling

기 위해 Fig. 4와 같이 피복두께 D (0.04 m)와 전극배열 간격 a (0.08 m)는 일정하게 유지하였다. 철근 직경 변화는 국내에서 사용하고 있는 철근 규격인 D10~D35를 적용하였다. 모델링을 통해 각각의 부식상태에 따른 주파수 특성을 이격거리에 따른 임피던스의 절대값과 위상차의 변화 그래프로 나타내었다. 특히 분명한 차이를 보이는 최대위상 주파수 대역과 낮은 부식상태를 중심으로 해석하였다.

낮은 부식상태에서는 저주파수 대역 중 최대위상 주파수인 0.025 Hz에서 측정전극과 매립철근의 이격거리 (offset distance)에 따른 임피던스 해석 결과 Figs. 5, 6과 같이 철근 직경 증가에 따라 임피던스 값은 감소하고, 위상차는 커지는 경향을 보였다. 철근직경의 변화는 철근콘크리트 계면에서 전류의 재분배를 야기하고 표면측정 임피던스는 이 변화를 반영한다.

철근 직경이 커짐에 따라 임피던스 절대값의 크기가 작아지는 것은, 철근 단면적이 커지면서 전도성이 높은 철근 내부로의 전류 이동량이 증가한 결과이다. 철근-콘크리트 계면에 흐르는 전류의 양이 증가할수록 철근 표면에 분극화된 면적이 증가하며 분극화된 철근 표면은

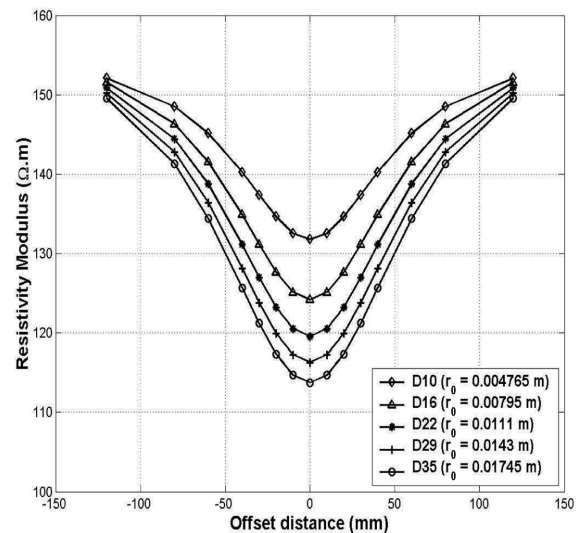


Fig. 5 Offset distance vs. resistivity modulus (low corrosion state, 0.025 Hz)

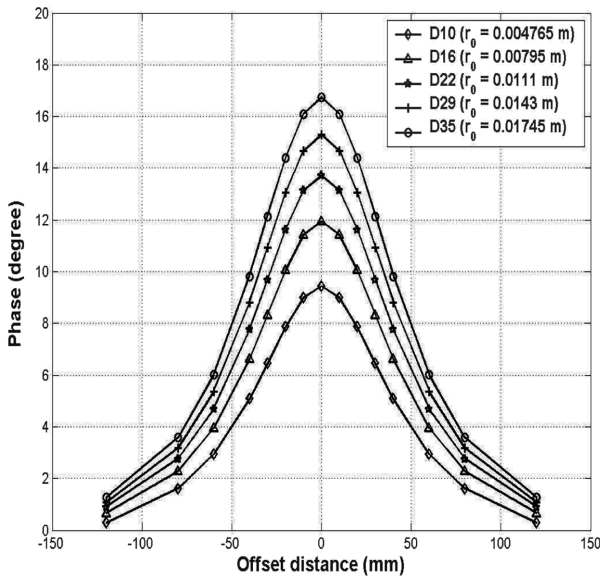


Fig. 6 Offset distance vs. phase (low corrosion state, 0.025 Hz)

위상이나 허수 응답을 증가시킨다.

철근 직경이 증가함에 따라 서로 다른 부식 상태에서 임피던스 절대값은 감소하고 위상은 증가하는 결과를 보이는 것은 일반 구조물에서 표면측정법을 통하여 매립된 철근의 직경을 알아낼 수 있는 있음을 보여 준다.

높은 부식상태에서 4개의 주파수에서 철근직경의 변화에 따른 임피던스 크기와 위상차의 변화를 모델링한 결과 Figs. 7, 8과 같이 주파수크기에 따라 정도의 차이는 있으나 철근직경이 증가함에 따라 임피던스의 크기는 감소하고 위상차는 증가하는 경향을 보였다.

큰 위상차는 부식상태 변화를 분명히 탐지할 수 있음을 의미하므로, 직경이 클수록 부식상태 변화를 탐지하기 쉽다고 할 수 있다. 따라서 임피던스 절대값의 크기가 최소, 위상차가 최대인 곳에 철근이 매입되어 있음을

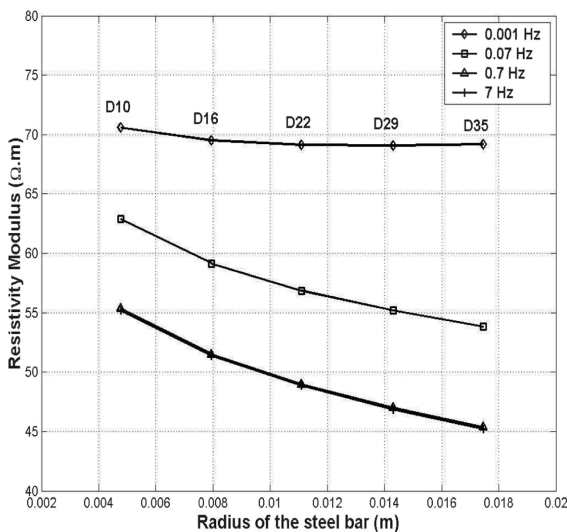


Fig. 7 Radius of the steel bar vs. resistivity modulus (high corrosion state)

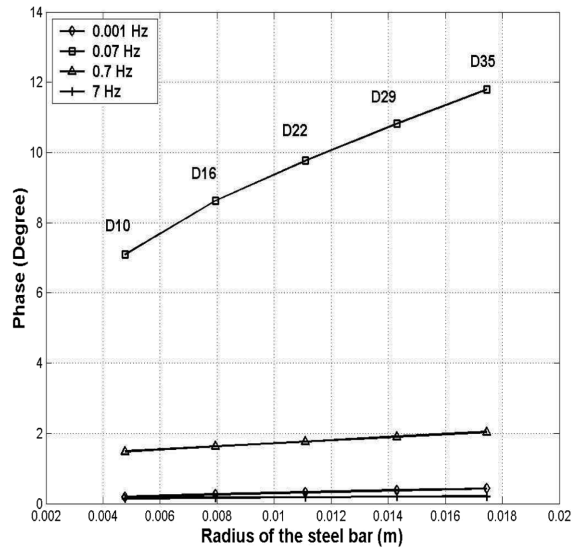


Fig. 8 Radius of the steel bar vs. phase (high corrosion state)

예상할 수 있다. 이는 표면측정법이 철근의 위치를 찾는 데 이용될 수 있음을 알려준다.

3.2 철근 매입깊이 (피복두께) 변화의 영향

서로 다른 부식상태에서 매입 깊이만의 영향을 알아보기 위해 2장의 모델링에서 철근은 D19 ($r_0 = 0.00955$ m), 전극 배열간격 a 는 0.08 m로 일정하게 하였다. 각각의 부식상태에 따라 위에서 언급한 4가지의 주파수에서의 이격거리에 따른 임피던스 절대값의 변화와 위상차의 변화를 그래프로 나타내었다.

Figs. 9, 10과 같이 낮은 부식상태의 최대 위상 주파수인 0.025 Hz에서, 매입 깊이가 증가에 따라 임피던스 절대값은 증가하고, 위상차는 작아지는 경향을 보였다. 매입 깊이의 변화는 철근-콘크리트 계면에서 전류의 재분배를 야기하고, 분극화된 철근 표면의 감소는 측정된 위상이나 허수 응답을 감소시킨다. 따라서 표면응답 크기는 증가하게 되고 최대 위상 응답은 감소하게 된다. 이는 같은 조건일 경우 표면측정 응답 절대값의 크기가 작고 위상차가 클 때 매립된 철근의 피복두께가 작다고 볼 수 있다.

선정된 4 개의 주파수에서 매입 깊이가 변화에 따른 임피던스의 크기 변화에 대한 모델링 결과 주파수에 상관없이 매입 깊이가 증가함에 따라 임피던스의 크기는 증가하고, 위상차는 감소하는 양상을 보였다. Fig. 11에서 매입 깊이가 일정할 때, 주파수가 높을수록 임피던스의 크기가 작아지는 것은 주파수가 높을수록 표면임피던스에 가정된 용량리액턴스의 영향이 감소하며 이로 인해 전류 재분배가 발생하여 전도성이 높은 철근으로 흘러가는 전류의 양의 증가로 전체 임피던스가 감소하기 때문으로 판단된다.

Fig. 12와 같이 높은 부식상태에서 최대위상 주파수에서 매입 깊이가 변화에 따른 위상차의 변화가 현저히 나

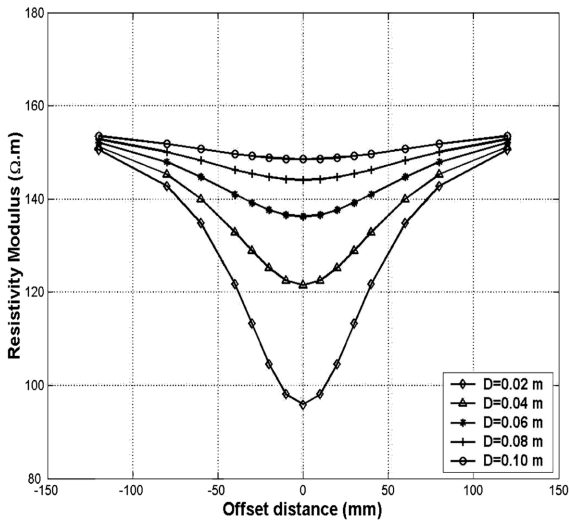


Fig. 9 Offset distance vs. resistivity modulus (low corrosion state)

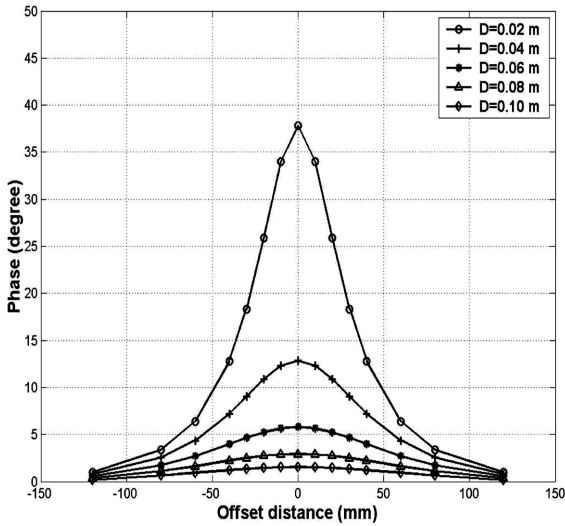


Fig. 10 Offset distance vs. phase (low corrosion state)

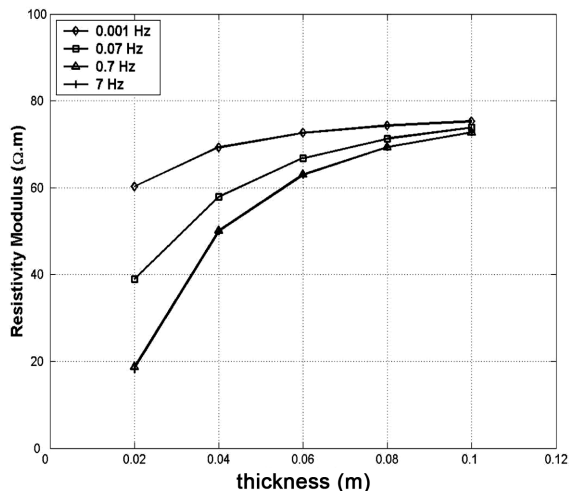


Fig. 11 Concrete cover thickness vs. resistivity modulus (high corrosion state)

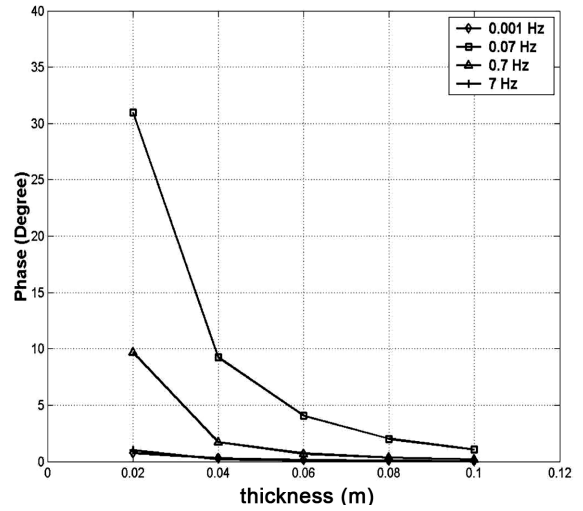


Fig. 12 Concrete cover thickness vs. phase (high corrosion state)

타났으며, 매입 깊이가 감소할수록 위상차가 증가함을 알 수 있다. 이는 콘크리트가 저항체로 작용하여 위상차를 감소시키는 역할을 하기 때문으로 판단된다. 이는 부식 상태가 일정할 때, 매입 깊이가 작을 때 더 쉽게 부식 상태를 파악할 수 있음을 의미한다. 이것은 일반 구조물에서 표면측정법을 통하여 매립된 철근의 깊이를 파악할 수 있다는 것을 보여준다.

4. 결 론

철근부식의 표면측정 모델링을 통하여 철근콘크리트 구조물에서 철근의 피복을 제거하지 않고도 계면의 성질을 대표하는 표면 임피던스로서 콘크리트 내 철근의 부식 상태에 관계없이 철근의 직경, 위치, 매입 깊이 등을 파악할 수 있었다. 현재 철근부식 표면측정법은 실험실 수준에서 측정이 진행 중이나 함수율을 포함한 제반 변수에 대한 연구와 모델링에서 철근 전위장의 영향의 문제 등이 추후 검토된다면 현장에서도 적용이 가능한 유용한 비파괴진단 측정법이 될 것이다.

연구 결과의 세부적인 요약은 다음과 같다.

- 1) 철근직경이 증가할수록 분극화된 계면의 면적을 증가시켜 전류흐름 경로가 확보되므로 임피던스 절대값이 감소하게 되고, 전기이중층 용량 C_{dl} 의 영향이 커지므로 위상차는 증가했다. 철근직경의 변화에 따른 임피던스 절대값 변화는 주파수에 상관없이 일정한 양상을 보였으며, 위상차의 변화는 최대위상 주파수에서 가장 커다란 변화를 보였다.
- 2) 콘크리트 내 철근의 매입 깊이가 증가할수록 포함되는 콘크리트의 면적이 증가하므로 표면 임피던스의 절대값이 증가하게 되고, 전기이중층용량 C_{dl} 의 영향이 작아지므로 위상차는 감소했다. 매입 깊이의 변화에 따른 임피던스 절대값의 변화는 주파수가 높을수록 매입 깊이의 변화에 더 민감하게 반응함을 알 수 있다.

- 3) 전극배열을 수평 이격시켰을 때, 부식상태, 철근직경, 매입깊이와 상관없이 표면 임피던스의 절대값이 최소, 위상차가 최대인 곳에 철근이 매입되어 있음을 예상할 수 있다.
- 4) 철근 직경이 증가함에 따라 고려된 부식 상태에서 임피던스 절대값은 감소하고 위상은 증가하는 결과를 보이는 것은 일반 구조물에서 표면측정법을 통하여 매립된 철근의 직경을 알아낼 수 있는 있음을 보여 준다.

감사의 글

본 연구는 연세대학교 연구처에서 지원한 교내과제와 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2008년도 건설핵심기술 연구개발 사업 (과제번호: 04 핵심기술 C02-02) ‘사회기반 시설물 평가 중점 연구단’의 일부 연구비지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 오창희, 윤재환, 임서형, “콘크리트중의 철근부식에 관한 전기화학적 진단 방법에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 6권, 3호 1990, pp. 281~289.
2. 강태혁, 조원일, 조병원, 주재백, 윤경석, “전기화학적 임피던스법에 의한 철근콘크리트의 부식연구,” *Journal of Korean Ind. & Eng. Chemistry*, Vol. 9, No. 6, 1998, pp. 907~913.
3. Feliu, V., Gonzales, J. A., Andrade, C., and Feliu, S., “Equivalent Circuit for Modeling the Steel-Concrete Inter-

- face, I. Experimental Evidence and Theoretical Predictions,” *Corrosion Science*, Vol. 40, No. 6, 1998, pp. 975~993.
4. Monteiro, P. J. M., Morrison, F., and Frangos, W., “Non-destructive Measurement of Corrosion State of Reinforcing Steel in Concrete,” *ACI Materials Journal Technical Paper*, 1998, pp. 704~709.
5. Zhang, J., Monteiro, P. J. M., and Morrison, F., “Noninvasive Surface Measurement of Corrosion Impedance of Reinforcing Bar in Concrete-Part 2: Forward Modeling,” *ACI Materials Journal Technical Paper*, Title No. 99-M24, 2002, pp. 242~249.
6. Zhang, J., Monteiro, P. J. M., Morrison, F., and Mancio, M., “Noninvasive Surface Measurement of Corrosion Impedance of Reinforcing Bar in Concrete - Part 3: Effect of Geometry and Material Properties,” *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No.4, 2004, pp. 273~280.
7. 임홍철, 이형우, “철근부식 표면측정 모델링을 이용한 철근의 직경변화 탐지,” 대한건축학회 논문집, 21권, 5호, 2005, pp. 3~9.
8. Wenner, F., “A Method of Measuring Earth Resistivity,” *Bull. of the Bureau of Standards*, Vol. 12, No. 4, 1915, pp. 468~478.
9. *Practice for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*, G 59, ASTM, 1997.
10. Carino, N. J., “Nondestructive Techniques to Investigate Corrosion Status in Concrete Structures,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1999, pp. 96~106.
11. 조승호, 정관, “철근부식에 따른 철근콘크리트 부재의 부식량 측정기법에 관한 연구,” 대한건축학회 학술발표 논문집, 20권, 2호, 2000, pp. 225~228.
12. *Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Electrode Method*, G 57, ASTM, 1997.

요 약 콘크리트 표면에 4개의 전극배열을 이용한 비파괴 표면측정법을 통하여 철근의 피복을 벗겨내지 않고도 콘크리트 내 철근의 부식상태 및 철근의 배치상태를 추정할 수 있다. 표면측정법 모델링은 부식된 철근과 주위 콘크리트 사이의 계면 임피던스가 콘크리트 표면에서 측정된 임피던스와 어떤 관련이 있는지를 보여준다. 본 연구에서는 콘크리트에 매립된 철근 크기와 콘크리트 피복두께 등의 탐지를 위하여 철근부식 표면측정 모델링을 이용하였다. 모델링 결과 철근 크기가 D10에서 D35로 커짐에 따라 표면임피던스 변화가 나타났으며, 또한 콘크리트 피복두께가 0.02 m에서 0.1 m로 커짐에 따라 그 변화에 대한 영향이 표면측정 임피던스를 통해 나타났다. 그러므로 표면측정법 모델링을 통하여 콘크리트 내 철근부식반응을 시뮬레이션 할 수 있으며, 동시에 철근직경과 매입 깊이 등에 대한 정보도 얻을 수 있음 알 수 있다.

핵심용어 : 표면측정법, 철근부식, 모델링, 철근직경, 매입깊이