

환경적 요인에 따른 비파괴 철근 탐사의 오차율에 관한 연구

A Study on the Error Rate of Non-destructive Rebar Detection Under Different Environmental Factors

강범주¹ · 김영환² · 김영민³ · 박경한⁴ · 오홍섭^{5*}

Beom-Ju Kang¹ · Young-Hwan Kim² · Young-Min Kim³ · Kyung-Han Park⁴ · Hong-Seob Oh^{5*}

(Received October 22, 2021 / Revised November 3, 2021 / Accepted November 6, 2021)

The durability and safety of reinforced concrete structures significantly depend on the reinforcement conditions, concrete cover thickness, cracks, and concrete strength. There are two ways to accurately determine the information on reinforcing bars embedded in concrete – the local destructive method and the non-destructive rebar detection test. In general, the non-destructive rebar detection tests, such as the electromagnetic wave radar method, electromagnetic induction method, and radiation method, are adopted to avoid damage to the structural elements. The moisture content and temperature of concrete affect the dielectric constant, which is the electrical property of concrete, and cause interference in the non-destructive rebar detection test results. Therefore, in this study, the effects of the electromagnetic wave radar method and electromagnetic induction method have been analyzed according to the temperature and surface moisture content of concrete. Due to the technological advancement and development of equipment, the average error rate was less than 5% in the specimens at 24°C, irrespective of their operating principles. Among the tested methods, the electromagnetic induction method showed very high accuracy. The electromagnetic wave radar method indicated a relatively small error rate in the dry state than in the wet state, and exhibited a relatively high error rate at high temperatures. It was confirmed that the error could be reduced by applying the electromagnetic wave radar method when the temperature of the probe was low and in a dry state, and by using the electromagnetic induction method when the probe was in a wet state or at a high temperature.

키워드 : 전자파레이더법, 전자기유도법, 표면수율, 온도, 오차율

Keywords : Electromagnetic radar method, Electromagnetic induction method, Surface moisture content, Temperature, Error rate

1. 서 론

1.1 연구배경

콘크리트 구조물은 시간이 지남에 따라 노화 현상이 발생하고 그로 인하여 내구성 저하가 일어난다. 이 때문에 콘크리트 구조물의 안전성에 관련된 문제가 대두되었고, 안전 진단을 수행하여 구조물의 성능평가를 하고 있다(Rhim et al. 2003). 철근 콘크리트 구조물의 내구성 및 안전성은 콘크리트의 균열 및 강도와 더불어 철근의 배근 상태나 피복 콘크리트 두께에 크게 의존한다. 따라서

설계도면과 비교하여 실제 배근 상태를 파악하여 구조적인 성능을 평가하기도 하지만 과거에 시공된 많은 도시 내 노후 시설물들은 설계도면이 명확히 있지 않아 보수 보강하는 것을 더욱 어렵게 하고 있다(Yoo et al. 2017).

비파괴 철근 탐사는 장비의 제작사나 원리별로 다르지만, 다양한 오차 가능성을 가지고 있다. 예를 들어 전자파는 매질의 전도율이 낮을수록 더 깊이 투과하므로 습윤상태의 경우가 기건상태보다 전도율이 크기 때문에 전자파 투과율이 낮아져 오차율이 다소 증가할 수 있다(Kim et al. 2008). 또한, 탐사를 위해서 매우 고가인

* Corresponding author E-mail: opera69@chol.com

¹경상국립대학교 토목공학과 석사과정 (Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, 52725, Korea)

²경상국립대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, 52725, Korea)

³국토안전관리원 정책연구실 실장 (Korea Authority of Land & Infrastructure Safty, 52856, Korea)

⁴국토안전관리원 정책연구실 차장 (Korea Authority of Land & Infrastructure Safty, 52856, Korea)

⁵경상국립대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, 52725, Korea)

장비를 사용하며 이를 운용하는 데 있어 능숙한 전문가가 필요하지만, 측정 결과의 정확도나 신뢰도가 측정 주변의 환경에 따라 매우 낮게 나타날 수 있는 단점이 있다(Yoo et al., 2017). 따라서 국토안전관리원에서 발행한 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」에서는 철근 탐사의 시험보고서를 작성하기 위해서는 탐사방식에 따른 시험의 관련 근거에서 권장하는 사항에 따라 시험 되었음을 명확히 밝히고, 시험 조건 및 피시험체와 관련된 정보를 제공할 수 있도록 하며, 날짜, 시간, 측정 장소, 기온, 습도 등 시험 대상 구조물 탐사 시의 현장 조건을 시험보고서에 명시하게 되어있다.

1.2 연구 목적 및 내용

2003년, 콘크리트 내 삽입된 철근을 탐사하기 위해서 레이더법을 활용하면 철근과 공동의 위치 탐사, 그리고 철근의 배근 간격 탐사에 효과적이며, 전자기법은 철근의 위치 탐사, 철근의 직경 측정, 그리고 철근 배근 간격 탐사에 유용한 것이 입증되었다(Rhim et al., 2003).

2006년 재건축 현장을 대상으로 노후화된 구조물에 관한 철근 탐사를 진행하여 철근 탐사 장비에 대한 정확도를 측정한 결과 피복 콘크리트 두께와 철근 위치를 측정하는 데에는 약간의 보정을 통해 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다는 결과를 도출하였다(Park et al., 2006). 2008년에는 전자파레이더법과 전자기유도법의 원리를 적용하여 철근 직경, 피복 콘크리트 두께 및 습윤상태에 따른 철근 탐사 신뢰성을 시험적으로 분석하는 연구가 진행되었다(Kim et al., 2008).

기존 철근 탐사 방법의 오차를 줄이고자 다른 새로운 철근 탐사 방법으로 전기비저항법을 이용하여 철근 콘크리트 구조물의 겉보기 비저항을 측정하고 이를 통해 철근의 위치를 측정할 수 있는 기술개발을 위해 비저항추정 모델(REM: Resistivity Estimation Model)을 적용한 철근 탐사 가능성에 대해 해석적 검토를 시행되었다(Lim 2013). 또한, 최근에는 시멘트 모르타르에 매립된 철근을 탐사하기 위해 주파수 차 전기저항 단층촬영(Electrical Resistance Tomography)을 활용하여 이진화된 Micro-CT 이미지와 비교 분석한 연구도 발표되었다(Jeon et al., 2021). 그러나 실제 현장에서 발생할 수 있는 변수인 시험체의 표면 수율과 온도를 고려한 연구는 부족하여 현장에서 환경적인 변수에 따른 오차율을 줄이기 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 철근의 직경과 피복 콘크리트 두께가 다르게 설계된 콘크리트 시험체를 제작하여 탐사 시 현장 조건이 비파괴 철근 탐사에 미치는 영향을 연구하는 것을 목적으로 콘크

리트 표면수율과 온도변화에 따른 전자파레이더법과 전자기유도법의 특성과 결과값을 비교 분석하여 현장에서 장비 원리에 따른 오차율을 줄이는 방안을 제시하고자 한다.

철근의 직경을 변수로 한 콘크리트 시험체는 D6, D10, D16, D19, D25, D29를 철근 중심을 기준으로 같은 깊이에 삽입하여 제작하였다. 피복 콘크리트 두께를 변수로 한 콘크리트 시험체는 D19, 6개를 각각 25mm, 50mm, 75mm, 100mm, 150mm, 200mm의 피복 콘크리트 두께를 갖도록 제작하였다.

콘크리트 시험체 철근 탐사 실험은 전자파 레이더법, 전자기유도법, 방사선법, 적외선법 등의 원리 중 현장에서 일반적으로 사용되는 전자파 레이더법과 전자기유도법을 원리로 하는 장비를 사용하였다. 시험체를 두 그룹으로 나누어 각각 다른 조건에서 실험을 진행하였으며 각 콘크리트 시험체별 30회 이상 실시하여 평균값을 계산하였고, 시험체 제작 후 실측치와 비교하여 오차율을 계산하였다.

2. 시험체 및 철근 탐사 시험

콘크리트 내 삽입된 철근을 조사 할 수 있는 기법은 전자파레이더법, 전자기유도법, 방사선법 등이 있다. 각 철근 탐사 장비마다 제공하는 탐사 가능 범위 및 오차가 실제와는 다른 경우가 많고, 분석 방법 및 판독자의 기술력에 따라 많은 오차 가능성을 포함하고 있다. 피복 콘크리트 두께는 철근 직경과 철근 간격 및 피복 콘크리트 두께의 영향을 크게 받고 있어 정확하지 않은 측정값을 나타내고 있다(Rhim et al., 2000). 특히 표면이 상시 습윤상태를 유지하는 수리 구조물이나 직사광선 등에 의해 국부적인 온도 차이가 발생하는 교량 하부의 경우 적절한 보정이 이루어지지 않는다면 측정값의 오차는 더욱 커질 것이다.

2.1 시험체

2.1.1 피복 콘크리트 두께 측정용 시험체

D19의 철근 6개를 시험체 상부로부터 25mm, 50mm, 75mm, 100mm, 150mm, 200mm 길이로 배근하였으며 피복 콘크리트 두께가 철근 탐사에 미치는 영향을 파악하기 위해 제작되었다.

2.1.2 철근 직경 시험체

철근 직경이 철근 탐사에 미치는 영향을 파악하기 위해 D6, D10, D16, D19, D25, D29의 철근을 철근 중심을 기준으로 시험체 상부로부터 깊이 100mm, 간격 150mm로 삽입하였다.

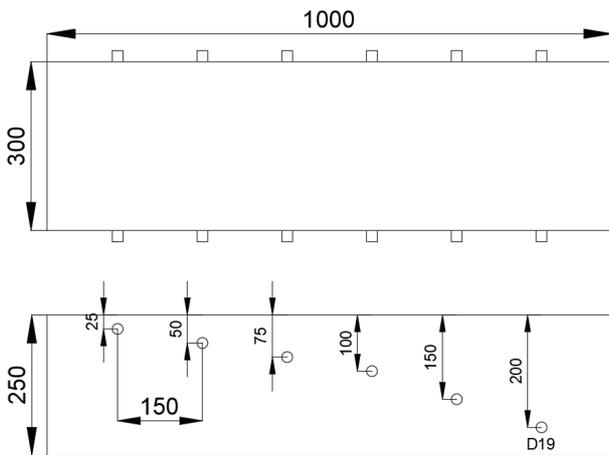


Fig. 1. Covered concrete thickness test specimen

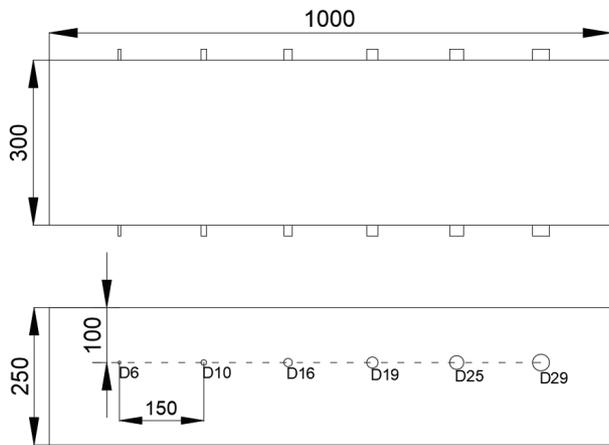


Fig. 2. Rebar diameter test specimen

2.2 철근탐사시험

철근 콘크리트 구조물에서 철근은 구조물 안전성 및 내구성 평가 결과에 크게 영향을 미치기 때문에 철근 정보를 정확히 파악하는 것은 매우 중요하다. 구조물의 시공상태를 평가하기 위해 설계도와 실제 철근 배근 상태를 비교 평가하거나 철근 위치나 간격, 내부 공극, 피복 콘크리트 두께를 측정하여 구조물의 내구성 및 안전성을 평가하기 위해 활용할 수 있다.

콘크리트 내 삽입된 철근을 탐사하기 위해서는 국부파괴하여 실측하거나 비파괴장비를 사용하여야 한다. 국부파괴법의 경우 부재를 손상시켜 구조물의 내력에 손상을 가할 수 있고 보수 등의 경제적인 문제도 발생하는 단점이 있어 일반적으로 비파괴 시험을 통해 확인한다.

비파괴검사 장비 원리에 따라 분류하면 전자파레이더법, 전자

기유도법, 방사선법, 열적외선법 등이 있는데 본 연구에서는 일반적으로 현장에서 사용되는 전자파레이더법과 전자기유도법을 활용하였다.

2.2.1 전자파레이더법

1) 원리

전자파레이더법에 의한 철근 탐사는 방사선, 적외선 등 보다 주파수가 낮고, 전파(라디오)보다 높은 대역을 가지며 파장이 짧은 전자파를 수ns마다 송신하여 Fig. 4와 같이 전기적 특성(유전율 및 전도율)이 다른 물질의 경계면에서 반사되어 안테나로 되돌아가는 반사파의 성질을 이용해 그 반사파의 영상을 해석함으로써 조사하는 방법이다. 피복 콘크리트 두께(D)는 송신 시각부터 반사파의 수신 시각까지의 시간차 (T) 를 측정하여 식(1)으로 구해진다.

$$D = \frac{VT}{2}, V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

여기서,

D : 피복 콘크리트 두께

V : 콘크리트 내부의 전자파 속도

T : 송신 시각부터 수신 시각의 시간차

C : 공기 중의 전자파 속도 ($C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

ϵ_r : 콘크리트의 비유전율

2) 전기적 특성

콘크리트의 전기적 특성인 유전율은 콘크리트의 습윤상태와 내부 삽입물질, 배합비 등에 따라 달라지는데 일반적으로 4~20 사이의 값을 나타낸다. 따라서 탐사 오차율을 줄이려면 초기 탐사 결과와 피복 콘크리트 두께 실측치를 비교하여 유전율을 결정하는 것이 바람직하다.

3) 조사 방법

조사 방법의 경우 각 장비와 제조사마다 달라 그에 맞는 설명서를 숙지한 후 사용하여야 한다. 일반적으로 장비를 사용할 때 설계도와 실제 현장 요건을 고려하여 측정면에 요철이 심하지 않고 평탄한 곳을 선정하며 시작점을 표시한 후 15~40cm/s의 속도로 측정한다. 철근 위치 파악 후 드릴링을 통해 실제 피복 콘크리트 두께를 실측한 다음 측정값과 비교하여 교정 후 사용한다. 최근 부재에 손상을 줄 수 있는 드릴링 없이 장비의 소프트웨어적인 처리로 교정이 가능한 장비도 개발되고 있다.

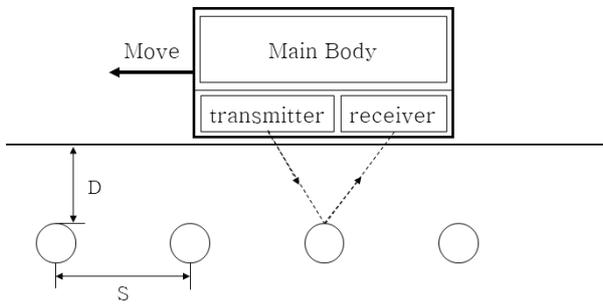


Fig. 3. Electromagnetic wave radar method

2.2.2 전자기유도법

1) 원리

전자기유도법을 활용한 철근 탐사는 강재와 같이 자성을 띤 물질에 적용할 수 있는 방법으로 주로 콘크리트 속의 강재 위치나 치수를 구하는 검사에 적용된다. 전자기유도법은 Fig. 4와 같이 코일에 전류를 흘려 교류 자장을 만들어 내고, 그 자장 내에 철근과 같은 자성체가 존재할 경우 생성되는 기전류가 새로운 자장을 형성한다. 새로운 자장이 역으로 코일에 전류를 발생시킬 때 생기는 코일의 전압변화를 분석하여 조사하는 방법이다.

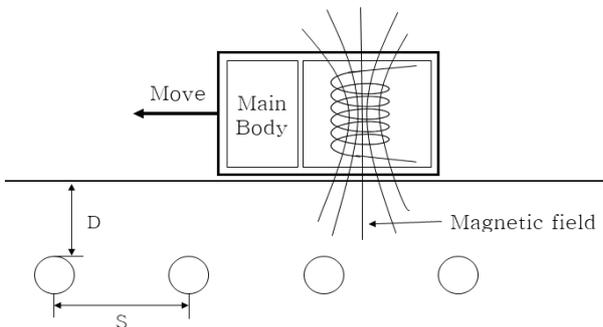


Fig. 4. Electromagnetic induction method

자장은 측정 거리가 멀어질수록 그 세기가 줄어들기 때문에 자성체의 영향 또한 줄어들게 되지만 자장 내에 여러 가지 자성체가 존재하는 경우 모든 자성체의 영향을 받기 때문에 간섭에 주의해야 한다.

2) 조사 방법

전자기유도법도 조사 방법은 전자파레이더법과 유사하나 측정 깊이가 100mm 이하에서 장비를 사용하며 전자기력을 이용하는 기기의 원리로 인해 측정 위치 주변의 무선기기나 전자파 등에 의한 간섭에 주의해야 한다. 따라서 병원, 핵발전소, 공항 또는 무선 기지국 근처에서는 기기의 사용 가능 여부를 확인하여야 한다.

3. 실험 및 분석

철근 탐사에 콘크리트 표면수율이 미치는 영향을 파악하기 위해 4개의 시험체를 두 그룹으로 나누어 실험을 진행하였다. 첫 번째 그룹은 실내에서 충분히 건조해 표면수율을 측정하여 실험을 진행하였으며, 두 번째 그룹은 실험 24시간, 12시간, 6시간, 3시간, 1시간 전 물을 뿌려 내부까지 충분한 습윤상태를 유지해 실험을 진행하였다. 이후 온도 영향을 파악하기 위해 첫 번째 그룹은 약 24°C의 실온에서 실험한 후 -5°C를 유지하는 항온실에 일주일간 보관한 뒤 실험을 진행하였으며, 두 번째 그룹은 실내에서 충분히 건조 후 시험 24시간 전 할로겐 히터를 활용해 40°C로 가열하여 실험을 진행하였다. 자세한 실험 변수는 Table 1에 나타내었다.

철근 탐사 방법은 전자파레이더법과 전자기유도법을 활용하여 시험체에 30회씩 피복 콘크리트 두께를 측정하여 평균값으로 계산하였다. 계산된 평균값과 해당 시험체의 실측 피복 콘크리트 두께와 비교하여 오차율로 표현하였다.

Table 1. Test specimen variables

Specimen	Rebar	Moisture content	Temperature
C-W-24	Concrete covered thickness	100%	24°C
C-D-24		5.5%	24°C
C-D-05		5.5%	5°C
C-D-40		5.5%	40°C
D-W-24	Diameter	100%	24°C
D-D-24		5.5%	24°C
D-D-05		5.5%	5°C
D-D-40		5.5%	40°C

3.1 표면수율에 따른 철근 탐사

시험체 보관 장소는 직사광선을 받지 않는 곳으로 온도와 습도는 각각 24°C, 45%를 유지하였다. 시험체의 표면수율은 건조상태에서 평균 5.5%로 측정되었다.

3.1.1 전자파 레이더법

본 실험에 앞서 비유전율에 따른 철근 탐사 오차율을 확인하기 위해 유전율을 수동으로 4, 5.8, 8, 12로 고정해 실험을 진행하였다. 시험 장비는 4~12의 유전율 설정 범위를 갖는 장비로 5.8의 경우 장비의 기본 설정값으로서 제작사나 장비에 따라 다를 수 있다.

피복 콘크리트 두께 시험체를 활용하여 건조상태 및 습윤상태



Photo 1. Concrete moisture 5.5%

에서 피복 콘크리트 두께를 30회 측정하여 평균 실측치를 분석해 본 결과 Fig. 5와 같이 유전율이 낮을수록 실측치보다 측정치가 크게 나타났고 유전율이 높을수록 실측치보다 작게 나타났다. 이는 식(1)에서 알 수 있듯이 실제 유전율보다 설정값이 낮아지면 전자파의 속도(V)와 시간(T)이 달라져 피복 콘크리트 두께가 크게 측정되는 것으로 분석된다.

건조상태에서는 유전율이 낮을수록 오차율이 낮았고, 습윤상태에서는 유전율이 높을수록 오차율이 낮은 특성을 보였다. 이는 일반적으로 함수량이 증가할수록 유전율이 증가하는 경향을 보이기 때문에 판단된다(Kim et al. 2009).

본 실험에서는 초기 탐사 결과와 피복 콘크리트 두께 실측치를 비교하여 유전율을 결정해 진행하였으며 측정 결과 Table 4와 같이 5% 미만의 오차율이 나타났다. 습윤상태에서는 15~40mm에서 낮은 오차율을 보였고, 건조상태에서는 상대적으로 깊은 65~90mm에서 낮은 오차율이 나타났다. 이는 콘크리트의 함수 상태가 전자파 진행 속도에 영향을 미쳐 비교적 거리가 짧은 15~40mm에서 낮은 오차율을 보인 것으로 파악된다. 콘크리트 속에 수분을 많이 함유하고 있으면 전자파의 진행 속도가 느려지기 때문이다 (Rhim et al. 2003).

철근 직경 시험체를 활용하여 실험해본 결과 실측치의 경우 습윤상태에서 실측치보다 깊게, 건조상태에서는 실측치보다 얇게 측정되는 것으로 나타났다. 그러나 D19 이하의 철근에서는 모두 깊

Table 2. Error rate of moisture content test

Concrete covered thickness(mm)		15	40	65	90	Ave.
C-W-24	Thickness	15.4	39.6	67.9	94.5	-
	Error rate	2.3	1.0	4.5	4.9	3.2
C-D-24	Thickness	15.7	38.9	65.0	93.0	-
	Error rate	4.4	2.8	0.0	3.3	2.6

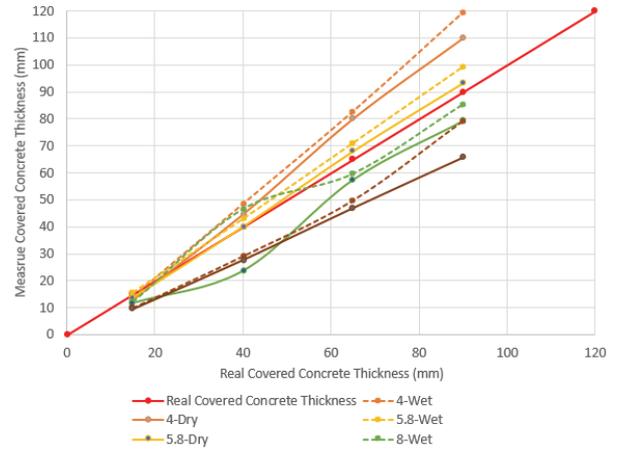


Fig. 5. Comparison between actual covered concrete thickness and measured values

게 측정되는 특성을 나타냈는데, 이는 100mm에 가까운 피복 콘크리트 두께와 비교해 철근 지름에 대한 반사 표면적이 작아 나타나는 현상으로 분석된다.

Table 3. Error rate of moisture content test

Diameter	D29	D25	D19	D16	D10	D6	
Concrete covered thickness(mm)	85	87.5	90	92.5	95	97.5	
D-W-24	Thickness	89.4	90.9	94.2	95.8	98.3	102.6
	Error rate	5.1	3.9	4.8	3.6	3.5	5.2
D-D-24	Thickness	81.8	86.6	90.3	94.4	97.6	99.9
	Error rate	3.8	1.1	0.3	2.0	2.5	2.4

3.1.2 전자기유도법

피복 콘크리트 두께 시험체에 전자기유도법으로 실험을 진행한 결과 습윤상태에서는 최대 3.1%의 오차율을 보이며 매우 신뢰성이 높은 결과가 나타났다. 15mm에서는 오차율이 매우 낮게 나타났는데 이는 전자기유도법을 활용한 장비는 피복 콘크리트 두께가 얇고 철근의 직경이 클수록 더 많은 자속을 통과시켜 탐사 가능성이 높아지기 때문으로 분석된다(Rhim et al. 2000).

Table 4. Error rate of moisture content test

Concrete covered thickness		15	40	65	90	Ave.
C-W-24	Thickness	14.9	38.7	65.2	87.9	-
	Error rate	0.2	3.3	1.9	2.3	1.5
C-D-24	Thickness	14.9	42.1	64.4	94.1	-
	Error rate	0.7	5.3	0.9	4.6	2.8

콘크리트 피복 두께가 100mm에 가까운 철근 직경 시험체의 경우 철근 탐사가 어려웠다. D16 미만의 철근은 읽어내지 못하였고, D29~D16을 측정할 피복 콘크리트 두께 또한 오차율이 높아 실험 결과분석에서는 제외하였다.

3.1.3 시험체 표면수율에 따른 오차율

건조상태에서는 상대적으로 전자파레이더법이 오차율이 낮았고, 습윤상태에서는 전자기유도법이 오차율이 낮은 특성을 나타냈다.

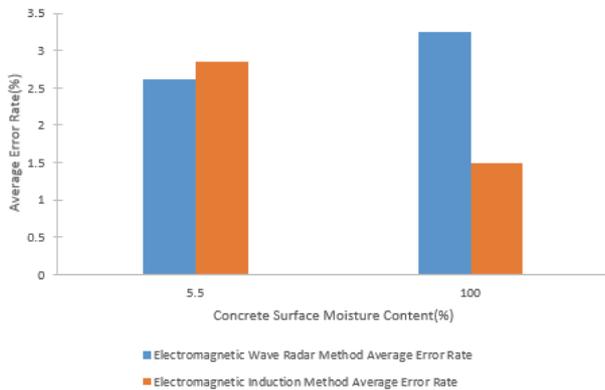


Fig. 6. Relationship graph between concrete surface moisture content and error rate

3.2 온도에 따른 철근 탐사

향온실과 할로겐 히터를 활용하여 시험체 온도를 변화시켜 철근 탐사를 진행하였다. 온도측정은 적외선 열화상 카메라를 활용하여 온도를 측정하였으며, 측정 결과 향온실에 보관한 시험체는 4~8°C(평균 5°C), 할로겐 히터를 활용한 시험체는 36~43°C(평균 40°C)로 나타났다.

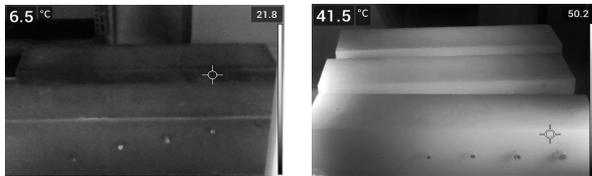


Photo 2. Infrared thermal imaging camera

3.2.1 전자파레이더법

C-D-05의 결과는 C-D-24 결과와 비슷하게 나타났지만 C-D-40에서는 오차율이 증가한 것으로 나타났다. 일반적으로 유전율이 작은 물질의 경우 온도가 증가함에 따라 유전율이 선형적

으로 증가하는 경향을 나타낸다(Kim et al., 2009). 반면에, 아래 결과에서는 피복 콘크리트 두께가 15mm의 오차율에 비해 다른 측정 결과 오차율이 상당히 높은 것으로 나타났다.

Table 5. Error rate of temperature test

Concrete covered thickness		15	40	65	90	Ave.
C-D-05	Thickness	14.7	39.9	68.1	95.9	-
	Error rate	2.2	0.2	4.8	6.6	3.5
C-D-24	Thickness	15.7	38.9	65.0	93.0	-
	Error rate	4.4	2.8	0.0	3.3	2.6
C-D-40	Thickness	15.4	44.6	69.6	98.0	-
	Error rate	2.9	11.6	7.1	8.9	7.6

이는 직경 시험체에서도 동일한 결과가 나타났는데 D-D-05와 D-D-40에서 평균 오차율이 각각 2.2%, 2.1% 인것에 비해 40°C 시험체에서는 5.1%로 증가하였다.

Table 6. Error rate of temperature test

Diameter	D29	D25	D19	D16	D10	D6	
Concrete covered thickness	85	87.5	90	92.5	95	97.5	
D-D-05	Thickness	84.3	88.1	91.1	94.2	98.2	102.5
	Error rate	0.9	0.7	1.2	1.9	3.4	5.1
D-D-24	Thickness	81.8	86.6	90.8	94.4	97.6	99.8
	Error rate	3.8	1.0	0.8	2.0	2.7	2.3
D-D-40	Thickness	87.3	91.5	93.3	98.8	100.5	104.3
	Error rate	2.7	4.6	3.7	6.8	5.8	7.0

3.2.2 전자기유도법

전자기유도법은 상대적으로 온도에 대한 안정적인 것으로 나타났지만 고온에서는 90mm의 피복 콘크리트 두께에서는 오차율이 상당히 증가하는 것을 알 수 있었다.

3.2.3 시험체 온도변화에 따른 오차율

전자파레이더법은 C-D-24에서 가장 낮은 오차율이 나타났다. C-D-05에서는 C-D-24와 유사한 오차율을 나타내었고 고온에서는 7.6%로 다소 높은 오차를 가지는 것으로 나타났다. 반면에 전자기유도법은 온도에 따라 오차율이 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그렇지만 오차율이 5%를 넘지 않아 매우 안정적인 것으로 분석된다.

Table 7. Error rate of temperature test

Concrete covered thickness		15	40	65	90	Ave.
C-D-05	Thickness	14.6	38.6	64.8	87.7	-
	Error rate	2.9	3.4	0.3	2.5	2.3
C-D-24	Thickness	14.9	42.1	64.4	94.1	-
	Error rate	0.7	5.3	0.9	4.6	2.8
C-D-40	Thickness	14.5	40.9	66.1	96.4	-
	Error rate	3.3	2.3	1.7	7.1	3.6

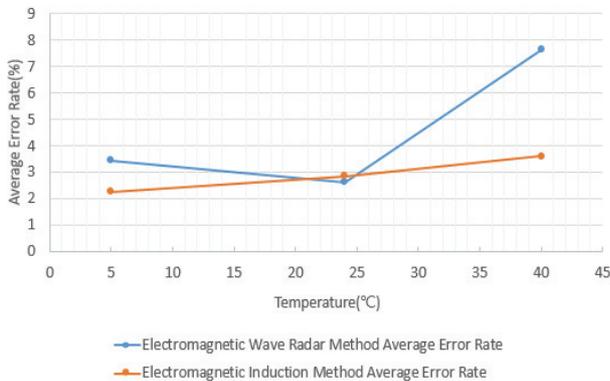


Fig. 7. Relationship graph between temperature change and error rate

4. 결론

전자파레이더법과 전자기유도법을 활용하여 시험체의 습윤/건조상태, 온도변화에 따른 철근 탐사 시험을 진행한 결과는 다음과 같다.

1. 시험법과 상관없이 실온에서 보관한 건조시험체의 철근 탐사 시험 결과는 평균 오차율이 5% 이하로 나타났다. 다만, 전자파레이더법의 경우 실제 피복 콘크리트 두께와 비교하여 유전율 보정이 필요하였다.
2. 전자파레이더법을 사용할 경우 유전율을 특정하기 어렵거나 실제 피복 콘크리트 두께와 비교하기 어려울 경우 대상이 건조상태라면 유전율을 낮은 쪽으로 설정하는 것이 유리하며, 습윤상태라면 유전율이 높은 쪽으로 설정하는 것이 유리하다고 분석되었다.
3. 전자파레이더법은 습윤상태보다 건조상태에서 상대적으로 오차율이 더 작은 특성을 나타내었으며, 고온에서는 7.6%의 다소 높은 오차율을 나타냈다.
4. 전자기유도법은 건조상태보다 습윤상태에서 가장 낮은 오차율

을 보이며 모든 환경 변수 중 가장 정밀한 결과를 나타내었다. 또한, 온도가 상승함에 따라 오차율이 선형적으로 증가하나 90mm미만의 피복 콘크리트 두께를 측정하는데 온도의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

5. 오차율 감소를 위해 탐사 대상의 온도가 낮고 건조한 경우 전자파레이더법이 유리하다고 판단되며, 탐사 대상이 습윤상태를 유지하거나 30° C 이상 고온의 상태에 있다면 전자기유도법을 사용하는 것이 적절하다고 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 시설물 점검 및 진단장비 검·인증을 위한 성능평가 기술개발(21CTAP-C153054-03)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

Capozzoli, L., Rizzo, E. (2017). Combined NDT techniques in civil engineering applications: laboratory and real test, *Construction and Building Materials*, **154**, 1139–1150.

Jeon, D., Kim, M.K., Woo, H., Jeong, Y., Oh, J.E., Kim, D.J., Yoon, S. (2021). Detecting embedded rebar in cement mortar by frequency-difference electrical resistance tomography, *Automation in Construction*, **132**, 103974.

Kim, B.I., Kim, Y.M., Cho, I.S. (2009). Evaluation and determination of air void for asphalt concrete using a dielectric constant measurement, *International Journal of Highway Engineering*, **11(1)**, 95–104 [in Korean].

Kim, J.H., Oh, K.C., Park, S.B. (2008). A study on the reliability of detecting reinforcement embedded in concrete in various factors using electromagnetic induction method and electromagnetic wave method, *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance and Inspection*, **12(4)**, 179–186 [in Korean].

Kim, Y.H. (2000). Nondestructive testing of concrete structure, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **20(4)**, 329–341 [in Korean].

Kwon, S.J., Maria, Q.F., Na, U.J. (2009). An experimental study on characteristics of averaged electromagnetic properties

- considering moisture changes in cement mortar, Journal of the Korea Concrete Institute, **21(2)**, 199–207 [in Korean].
- Lim, Y.C. (2013). A study on the rebar detection using the resistivity method, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **29(12)**, 105–112 [in Korean].
- Park, S.K. (2003). Non-destructive inspection of construction joints of concrete structures using the radar and the infrared thermography method, Journal of the Korea Concrete Institute, **15(3)**, 425–432 [in Korean].
- Park, S.K., Rhim, H.C. (1998). Nondestructive testing of concrete structures using electromagnetic wave techniques, Magazine of the Korea Concrete Institute, **10(2)**, 27–39 [in Korean].
- Park, S.M., Rhim, H.C., Rhim, B.H. (2006). Assessment of accuracy for the rebar detecting device at reconstruction site, Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference, The Korean Institute of Building Construction, 163–166 [in Korean].
- Rhim, H.C., Kim, W.S. (2000). Measurement of horizontal rebar spacing in concrete specimens using radar, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, **4(2)**, 65–72 [in Korean].
- Rhim, H.C., Lee, Y.S., Woo, S.K., Song, Y.C. (2003). Measurement of concrete thickness with antenna frequency variation of radar, Journal of the Korea Concrete Institute, **15(2)**, 209–216 [in Korean].
- Seo, S., Ohn, S.Y., Kim, D.H., Kwak, K., Chung, M. (2020). A study on development of portable concrete crack measurement device using image processing technique and laser sensors, Journal of the Korean Geosynthetics Society, **19(4)**, 41–50 [in Korean].
- Yoo, S.G., Cho, N.J., Kim, H.K. (2017). Steel tendon detection in reinforced concrete structures using infrared thermography, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, **17(6)**, 341–349 [in Korean].

환경적 요인에 따른 비파괴 철근 탐사의 오차율에 관한 연구

철근콘크리트 구조물의 내구성 및 안전성은 콘크리트의 균열 및 강도와 더불어 철근의 배근상태나 콘크리트 피복 두께에 크게 의존한다. 콘크리트 내에 매립되어 있는 철근 정보를 정확히 파악하는 방법엔 국부 파괴법과 비파괴 철근 탐사 시험이 있다. 일반적으로 부재 손상을 최소화하기 위해 비파괴 철근 탐사 시험을 통해 파악하며, 비파괴 철근 탐사 시험에는 전자파레이더법, 전자기유도법, 방사선법 등이 있다.

콘크리트의 함수율과 온도는 콘크리트의 전기적 특성인 유전율에 영향을 미쳐 비파괴 철근 탐사 시험 결과에 간섭을 발생시킨다. 따라서 본연구에서는 콘크리트의 표면수율과 온도에 따라 전자파레이더법과 전자기유도법이 받는 영향을 분석하였다. 장비와 기술의 발달로 원리와 상관없이 24°C 시험체에서는 평균 오차율이 5% 이하로 나타났으며 특히 전자기유도법의 경우 매우 높은 정확성을 갖는 것을 확인하였다. 전자파레이더법은 습윤상태보다 건조상태에서 상대적으로 오차율이 작은 특성을 나타내었으며, 고온에서는 다소 높은 오차율이 나타났다. 탐사 대상의 온도가 낮고 건조한 경우 전자파레이더법을 적용하고, 탐사 대상이 습윤상태이거나 고온에서는 전자기유도법을 사용하여 오차를 감소시킬 수 있음이 확인되었다.