

전자기유도법과 전자파레이더법을 이용한 각종인자에 따른 철근탐사의 신뢰성에 관한 연구

A Study on the Reliability of Detecting Reinforcement Embedded in Concrete in Various Factors Using Electromagnetic Induction Method and Electromagnetic Wave Method

김 종 호* 오 광 진** 박 승 범***
Kim, Jong-Ho Oh, Kwang-Chin Park, Seung-Bum

Abstract

Probing inside of concrete structures is one of the important steps in assessing condition of the structure. For the assessment, electromagnetic induction method and electromagnetic wave method are currently applied to the measurement of cover depth, and the detection of reinforcement embedded in concrete. To determine detection capability of locating reinforcement embedded in concrete, commercially available nondestructive testing (NDT) equipments have been tested. The equipments include electromagnetic wave system and electromagnetic induction system. In the tests, nine concrete specimens which have the dimensions of 1,000mm(length)×300mm(width) with thickness varying from 125mm to 150mm are used. The reinforcement are located at 45, 60, 100mm depth from the concrete surface. Horizontal reinforcement spacing has been set over 100mm. From the outcome, it is shown that error is increased as the diameter of reinforcement enlarge in case of using electromagnetic induction method. In case of using electromagnetic wave method, the detection of reinforcement embedded in deep is good in the view of reliability because of using the relative permittivity on the real cover depth.

요 지

콘크리트 구조물 내의 철근탐사는 구조물의 상태를 평가하는 가장 중요한 단계중의 하나이다. 콘크리트 내의 철근 탐사 장비는 전자파레이더법과 전자기 유도법의 원리를 적용하고 있으며, 본 연구에서는 두 가지 원리를 적용한 비파괴시험장비의 철근직경, 피복두께 및 습윤상태에 따른 철근탐사 신뢰성을 시험적으로 분석하였다. 시험에는 1,000mm(길이)×300mm(폭)인 9개의 콘크리트 시험체가 이용되었으며, 시험체내 철근의 피복두께는 45, 60, 100mm로 변화시키고 배근간격은 100mm이상으로 하였다. 시험결과, 전자기 유도법의 경우, 철근직경이 커짐에 따라 오차가 증가하는 것으로 나타났다. 그 반면에 전자파레이더법의 경우, 실제 피복두께에 맞는 비유전율에 따라 계측하여 깊은 심도의 경우에도 신뢰성이 우수한 것으로 나타났다.

Keywords : Cover depth, Electromagnetic induction method, Electromagnetic wave method, Reinforcement,

핵심 용어 : 피복두께, 전자기유도법, 전자파레이더법, 철근

* 정회원, 한국시설안전공단 과장

** 정회원, 한국시설안전공단 팀장

*** 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

E-mail : jhkim@kistec.or.kr 031-910-4071

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

철근콘크리트 구조물에서 철근은 인장부재로서 대상 구조물에 대한 정확한 철근정보의 파악이 매우 중요하다. 이러한 철근에 대한 정보를 파악하기 위하여 실시되는 비파괴 철근탐사는 철근부식 정도의 계측과 같은 콘크리트의 내구성 측면과 피복두께 및 철근배근 상태의 적정성 파악을 위한 안전성 측면에서 실시된다.⁽¹⁾ 철근탐사는 비파괴 철근탐사장비를 사용하게 되는데 탐사결과와 판독에 있어서 각 장비마다 제공하는 탐사 가능 범위 및 오차가 실제와는 다른 경우가 많고, 분석방법 및 판독자의 기술력에 따라 많은 오차가능성을 포함하고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

철근탐사의 주요 목적은 철근피복과 간격을 계측하는데 있으며, 철근의 간격은 장비에 따라 다소 다르기는 하지만 비교적 정확한 계측이 가능하며 철근의 피복은 철근직경과 철근간격 및 피복두께의 영향을 크게 받고 있어 정확하지 않은 계측값을 나타내고 있다.⁽¹⁵⁾

따라서 본 연구에서는 배근체원의 실측이 가능한 각 인자별 시험체를 일반적으로 사용되는 전자기유도법과 전자파레이더법의 장비를 이용하여 철근의 직경, 피복두께 및 습윤상태에 따라 계측을 실시하고 분석하여 이러한 인자에 대한 신뢰성에 대하여 알아보려고 한다.

2. 탐사장비의 원리 및 특성

2.1 전자기유도법

전자기유도법에 의한 철근탐사는 철근과 같이 자기를 띠는 것에 적용되어 콘크리트의 영향을 받지 않기 때문에 콘크리트 내부의 철근탐사에 효과적으로 적용된다. 자기감응방식은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 Scanner에 마련된 코일에 교류전류를 흘려 자장을 발생시키고 그 자장내에 철근과 같은 자성체에 기전류가 흐르며 동시에 역으로 새로운 자장을 형성하여 계기의 코일에 전류가 발생함에 따라 코일의 전압이 변화한다.

이러한 코일 전압의 변화는 자장내 자성체의 특성 및 거리에 의해 변하기 때문에 콘크리트 내부에 철근의 위치 및 직경 등을 구하는 방법으로 이용된다.^{(4),(6),(16)}

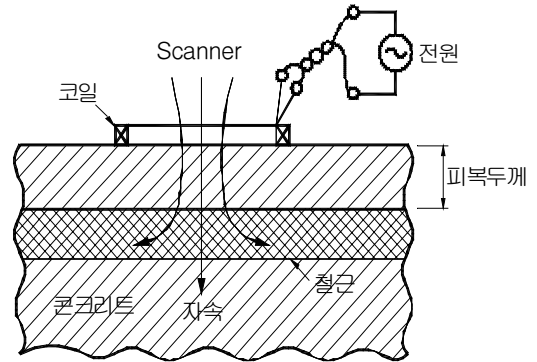


Fig. 1 전자기유도법 탐사원리

2.2 전자파레이더법

전자파레이더법에 의한 철근탐사는 방사선, 적외선보다는 주파수가 낮고 전파(라디오파)보다는 높은 전자파(수백MHz~수GHz)를 발신하여 Fig. 2와 같이 대상 물체내에 송신된 전자파가 전기적 특성(유전율 및 전도율)이 철근, 매설물, 공동 등의 다른 물질의 경계에서 반사파를 일으키는 성질을 이용해 그 반사파의 영상을 해석하여 조사하는 방법이다.^{(3),(5)-(9),(11)}

전자파는 주파수가 높으면 분해능이 좋지만 감쇠가 크고 탐사심도가 낮아진다. 따라서 콘크리트 내부의 철근과 같이 비교적 얇은 부분은 펄스폭이 극히 짧은 전자파가 사용되는데 고정밀도 탐사에는 일반적으로 500MHz~1000MHz 범위의 안테나가 사용된다.^{(12),(13),(17)} 피복두께(D)는 송신시각부터 반사파의 수신시각까지의 시간차(T)에서 콘크리트중의 전자파 속도(V)로 식(1)로 구하여 진다.

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

여기서, C : 공기중의 전자파 속도(=3×10⁸m/s)

ϵ_r : 콘크리트의 비유전율

V : 콘크리트내부의 전자파 속도

D : 피복두께

T : 송신파와 반사파의 시간차

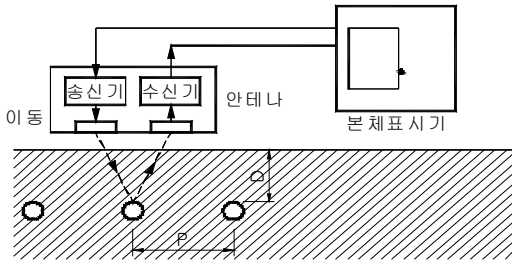


Fig. 2 전자파레이더법 탐사원리

3. 시험 및 결과

3.1 시험체

철근탐사 계측결과와의 신뢰성 평가를 위하여 철근직경 D13에서 D25, 철근간격 100mm이상, 피복두께 45mm에서 100mm인 1,000mm(길이)×300mm(폭) ($f_{ck} = 21\text{MPa}$, $W/C=55$, $C=160\text{kg/m}^3$, $S=291\text{kg/m}^3$, $G=832\text{kg/m}^3$, $G_{\max}=\phi 25$) 콘크리트 시험체 9개를 이용하여 시험하였고, Fig. 3에 시험체의 제원을 도시하였다. Table 1은 본 시험에 적용한 각 인자를 나타낸 것이고, Photo 1, 2는 시험체 전경 및 시험전경을 나타낸 사진이며 Fig. 4는 계측결과를 화상처리한 한 예이다.

Table 1 철근탐사를 위한 콘크리트 시험체

철근직경(①)	피복두께(②)	비 고
D13	45mm	3개(①)×3개(②) = 9개
D19	60mm	
D25	100mm	

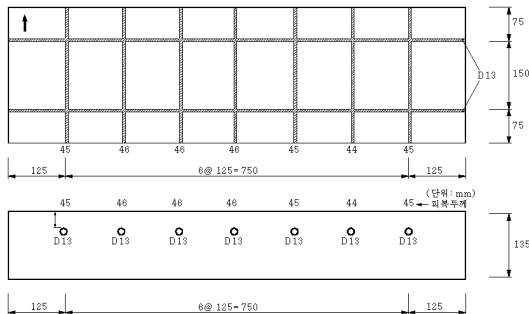


Fig. 3 콘크리트 시험체 제작도(예)
(D13, 피복 45mm, 간격125mm)

3.2 시험 및 결과

3.2.1 계측인자

연구목적 특성상 장비명을 비공개로 하였으며 편의상 전자기유도법의 장비(자기감응방식, 제조국가 : 스위스)를 A, 전자파레이더법의 장비(레이더방식, 제조국가 : 일본, 주파수범위 : 400~950MHz, 깊이보정 : 7단계)를 B로 지정하였다.

1) 철근직경별

사용된 철근은 D13, D19, D25이다.

2) 피복두께별

피복두께를 45mm, 60mm, 100mm로 하였다.

3) 습윤상태별

시험체를 습윤조건으로 만들기 위해 수조에 48시간 침수 후 바로 꺼낸 경우, 일정시간 건조후, 기건상태로 구분하였다. 시험체의 상대수분함량은 실제 현장조건인 기건상태를 기준으로 식 2와 같이 계산하였다.

$$\text{상대수분함량(\%)} = \frac{M - M_A}{M_A} \quad (2)$$

여기서, M : 측정시 시험체의 무게

M_A : 기건상태 시험체의 무게



Photo 1 시험체 전경



Photo 2 시험전경(예)

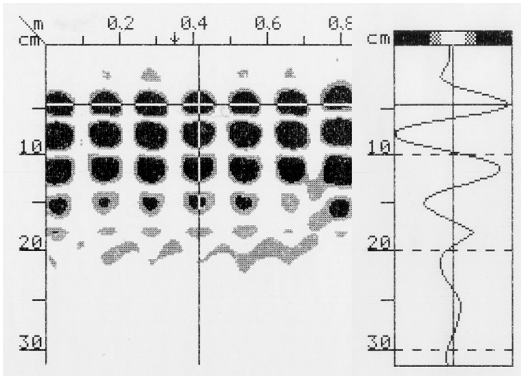


Fig. 4 전자파레이더법 계측 1차 화상처리 결과(예)

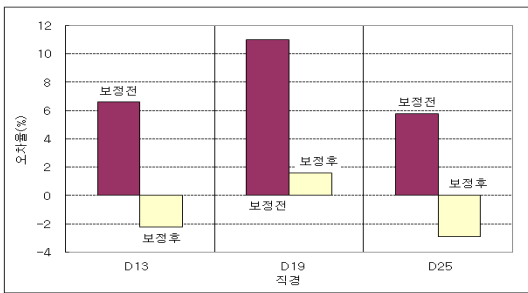


Fig. 5 전자파레이더법의 비유전율 보정전과 보정후

3.2.2 전자파레이더법의 보정

전자파레이더법의 경우 콘크리트 내부의 전자파속도 (V)는 식 1에 나타난 바와 같이 비유전율(ϵ_r)의 제곱근에 반비례하는 관계이므로 매질에 따른 비유전율의 보정이 필요하다.⁽¹¹⁾ 본 시험에서는 피복두께에 대한 실측이 가능하므로 실제 피복두께에 근접하도록 장비의 7가지 측정모드(mode)중 최적 모드를 선정하여 측정 (KS F 2735 : 2004, Table 1에 따라 6.2~10.7 범위의 비유전율을 -3~3cm 만큼 보정)하였다. Fig. 5는 비유전율의 보정전과 보정후의 오차율을 나타내었다.

3.2.3 시험 및 결과값의 통계적 검증

시험방법은 시험체 좌측에서 우측으로, 반대로 우측에서 좌측으로 각각 5회씩 총 10회를 실시한 후 시험체의 중앙에 배근된 4개의 철근 피복두께에 대한 시험체 각각의 계측값(총 40개)을 대상으로 분석하였다.

주요 인자별 결과분석을 실시하기 전에 실제피복값

과 측정방법의 표본에 대한 측정결과가 참인지 거짓인지 판정하는 통계적 기법인 가설검정(hypothesis testing)을 위해 Table 2에 피복두께별로 분류하였다. 각 피복깊이에 따른 가설검정을 위해 “실측값과 A와 B의 계측값은 동일하다”라는 귀무가설(歸無假說, null hypothesis)을 세웠다.

1) 피복두께 45, 60mm인 경우

변인은 피복이며 피복별 데이터는 3개의 그룹으로 나누어지므로 요인이 하나인 시험에 대한 분산분석에 해당하므로 일원배치법인 One-Way ANOVA 분석을 실시하였다. 일원일류 분산분석은 시험단위들이 처리의 각 수준에 랜덤하게 배치되는 완전확률화 계획법에 의해 시험이 실시되는 것을 전제로 하며, 유의수준 5%에서 Table 3과 같은 결과를 얻었다.

ANOVA 분석은 F 검정이라고도 한다. 따라서 “F비 > F기각치”이면 귀무가설이 기각되며 그 반대이면 귀무가설이 채택된다. 분석결과, “F비 < F기각치”이며 P-값 > 유의수준 0.05이므로 45, 60mm 깊이에서 귀무가설이 채택되어 A와 B방법에 의한 계측값 및 실측값이 5% 유의수준 내에서 동일하다고 할 수 있다.

Table 2 시험결과 평균값

피복두께 (mm)	실측피복 (mm)	A	B
45	45.3	46.3	42.7
	42.3	41.0	42.0
	46.0	43.5	44.3
60	62.0	59.0	61.0
	60.2	58.8	61.8
	63.0	60.3	61.0
100	100.4	102.0	-
	100.6	100.5	-
	99.6	100.5	-

Table 3 피복두께 45, 60mm인 경우 통계분석

피복두께 (mm)	변동요인	제곱합	자유도	제곱평균	F비	P-값	F기각치
45	처리	3.58	2	1.79	0.44	0.67	5.14
	잔차	24.57	6	4.09	-	-	-
	계	28.15	8	-	-	-	-
60	처리	9.43	2	4.71	4.89	0.05	5.14
	잔차	5.78	6	0.96	-	-	-
	계	15.21	8	-	-	-	-

Table 4 피복 100mm인 경우 통계분석

구 분	유의수준 5%		유의수준 1%	
	실측	B	실측	B
평 균	100.2	101	100.2	101
분 산	0.28	0.75	0.28	0.75
관측수	3	3	3	3
피어슨 상관 계수	0.327327	-	0.327327	-
가설 평균차	0	-	0	-
자유도	2	-	2	-
t 통계량	-1.62177	-	-1.62177	-
P(T<t) 단측 검정	0.123155	-	0.123155	-
t 기각치 단측 검정	2.919987	-	6.964547	-
P(T<=t) 양측 검정	0.246311	-	0.246311	-
t 기각치 양측 검정	4.302656	-	9.924988	-

2) 피복 100mm인 경우

피복 100mm에서 전자기유도법을 적용하지 못하는 관계로 B방법에 의해 전자파레이더법에 의한 계측값만 적용하였다. 이 경우 요인 하나에 2 그룹의 데이터만을 비교하여야 하므로 일원일류분산을 적용할 수 없어 t 검정(쌍체 비교)을 실시하였다. t 검정 쌍체비교 결과는 Table 4와 같다. 귀무가설은 두 그룹의 데이터의 크기를 예측할 수 없는 경우에 해당하므로, "실측치=B"라고 가정하여 5% 유의수준 내에서 양측 검정을 실시하였다.

통계분석결과, t 기각치 양측 검정 > t 통계량의 절대값인 경우이므로 귀무가설이 채택되어 역시 5% 및 1% 유의수준 내에서 각 데이터의 신뢰성은 동일하다고 할 수 있다.

4. 주요 인자별 분석

주요 인자별 분석은 콘크리트 시험체에 매입된 철근들의 직경, 피복두께, 콘크리트의 습윤상태에 대해 각각 수행하였다.

4.1 철근직경 영향

피복두께가 일정하고 철근직경이 D13, D19, D25인 시험체에 대한 계측결과는 Table 5에 나타낸 바와 같으며 이에 대한 대표적인 그래프를 Fig. 6~8에 나타내었다.

Table 5 각 피복두께 및 철근직경별 계측결과

피복 (mm)	철근 직경	실측피복 (mm)	탐사 장비 ^{주1)}	계측피복 (mm)	오차율 (%) ^{주2)}
45	D13	45.3	A	46.3	2.2
			B	42.7	5.6
	D19	42.3	A	41.0	3.1
			B	42.0	0.8
	D25	46.0	A	43.5	5.4
			B	44.3	3.6
60	D13	62.0	A	59.0	4.8
			B	61.0	1.6
	D19	60.2	A	58.8	2.4
			B	61.8	2.7
	D25	63.0	A	60.3	4.3
			B	61.0	3.2
100	D13	100.4	B	102.0	1.6
	D19	100.6	B	100.5	0.1
	D25	99.6	B	100.5	0.9

주 1) 탐사장비 A : 전자기유도법, B : 전자파레이더법

주 2) 오차율 = (실측피복-계측피복)/ 실측피복 × 100

피복두께가 일정하고 철근직경이 변하는 경우에 대해 분석해보면 전자기유도법은 철근직경이 증가함에 따라 낮은 피복(45mm)에서는 오차율이 증가하는 경

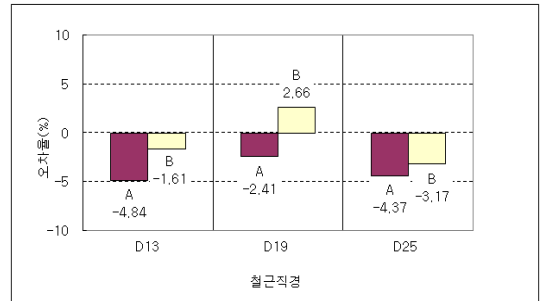


Fig. 6 피복두께 45mm인 경우 철근직경별 계측피복 결과

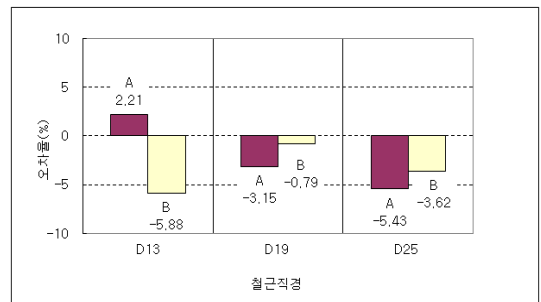


Fig. 7 피복두께 60mm인 경우 철근직경별 계측피복 결과

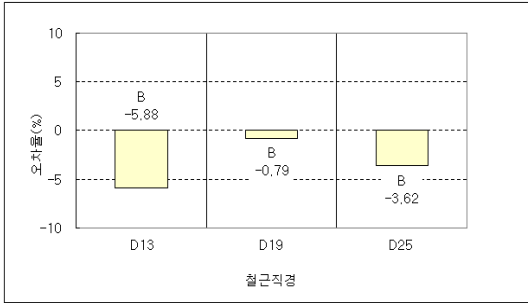


Fig. 8 피복두께 100mm인 경우 철근직경별 계측피복 결과

향을 보였으며, 깊은 피복(60mm이상)에서는 일관되지 않은 오차율을 나타내었다. 이는 피복이 60mm 이상인 경우에는 장비의 측정한계(약100mm)에 근접하여 자장 검출능력이 저하되기 때문인 것으로 판단되며, 김영환(2000)⁽³⁾의 '철근직경이 커질수록 자장이 크게 형성되어 철근직경이 작은 동일 배근간격의 조건에 비해 주변의 철근에 더 많은 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다'는 연구결과와 일치하고 있다. 한편, 전자파레이더법의 경우 피복이 일정할 때 철근직경의 변화에 따른 오차율 변화경향이 일관성이 없어 철근직경의 영향은 크지 않은 것으로 판단되며, 사용재료 및 콘크리트의 품질 등에 따른 반사파의 산란 등에 따른 영향일 것으로 사료된다.

4.2 피복두께 영향

철근직경이 일정하고 철근피복이 45, 60, 100mm인 경우에 대해 획득된 철근직경별 피복의 계측결과를 Table 5에 나타낸 바와 같으며 이에 대한 대표적인 그래프를 Fig. 9~11에 나타내었다.

동일한 철근직경을 사용하고 피복두께가 변화할 때의 영향을 분석하여 보면 전자파레이더법의 경우 피복이 증가함에 따라 오차율은 대체적으로 감소하고 있는 것으로 나타났으며, 이는 임홍철(1999)⁽¹⁰⁾에 의하면 피복두께가 커질수록 표면반사파와 철근에 의한 반사파의 중첩영향이 적어지기 때문인 것으로 보인다. 다만 D19철근의 경우 일부 다른 경향을 나타내고 있는 것은 장비 특성상 적정 비유전율의 선정이 곤란하였기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 전자기유도법(장비 A)

은 피복두께 100mm인 경우 자기장의 영역이 멀어져 측정이 불가하였으며, 철근직경 D13인 경우 피복이 증가함에 따라 오차율이 증가한 반면, D19이상인 경우 피복이 증가함에 따라 오차율은 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 철근직경이 미치는 자장의 간섭이 발생하기 때문인 것으로 판단되며, 다만 D13과 같이 철근직경이 작은 경우 철근직경의 영향이 배제된 것으로 간주할 때 피복이 증가할수록 오차율은 증가하는 것으로 판단된다.

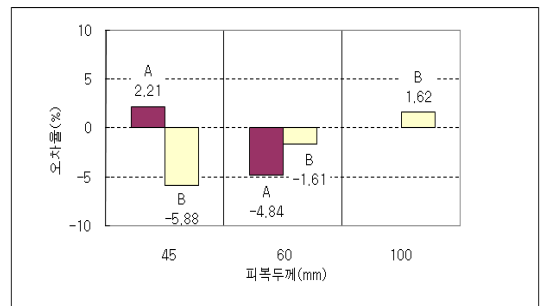


Fig. 9 철근직경 D13인 경우 피복두께별 계측피복

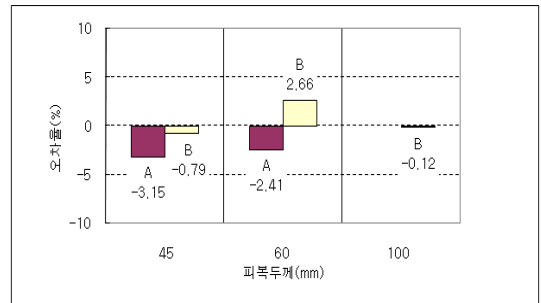


Fig. 10 철근직경 D19인 경우 피복두께별 계측피복

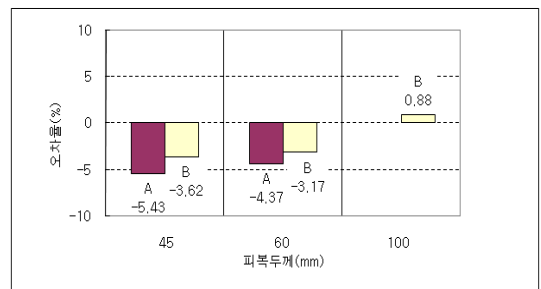


Fig. 11 철근직경 D25인 경우 피복두께별 계측피복

4.3 습윤상태 영향

시험체의 습윤상태에 따른 영향을 분석하기 위하여 기존의 기건상태와 상대수분함량 2.6%, 5.8%에 대하여 시험하였다. 시험결과는 Table 6과 같으며 이에 대한 대표적인 그래프를 Fig. 12~14에 나타내었다. 다만, 상대수분함량 5.8%의 경우 비유전을 10.7 미만까지만 보정이 가능한 장비의 한계가 있어 실측에 가까운 비유전을 선정이 곤란하여 분석에서는 제외하였으며, 다만 참고적으로 표 및 그래프 항목에 추가하였다. 동일한 피복두께에 대해 상대수분함량이 변화할 때

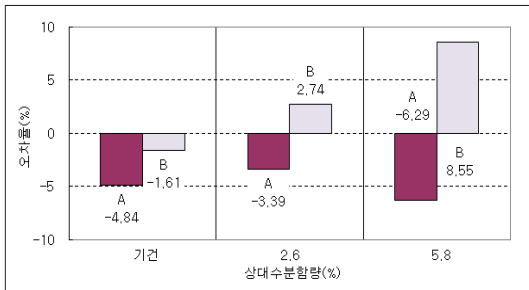


Fig. 12 철근직경 D13인 경우 습윤상태별 계측피복 결과

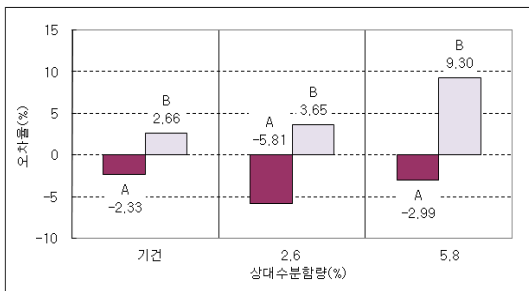


Fig. 13 철근직경 D19인 경우 습윤상태별 계측피복 결과

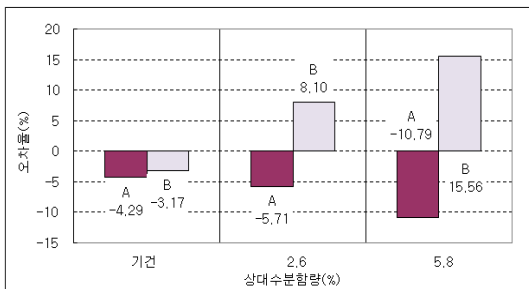


Fig. 14 철근직경 D25인 경우 습윤상태별 계측피복 결과

Table 6 습윤상태별 철근피복의 계측결과

상대수분함량 ^{주1)} (%)	철근 직경	실측피복 (mm)	탐사 장비	계측 피복 ^{주2)} (mm)	오차율 (%)
0	D13	62.0	A	59.0	4.8
			B	61.0	1.6
	D19	60.2	A	58.8	2.4
			B	61.8	2.7
	D25	63.0	A	60.3	4.3
			B	61.0	3.2
2.6	D13	62.0	A	59.9	3.4
			B	63.7	2.7
	D19	60.2	A	56.7	5.8
			B	62.4	3.7
	D25	63.0	A	59.4	5.7
			B	68.1	8.1
5.8	D13	62.0	A	58.1	6.3
			B	67.3	8.5
	D19	60.2	A	58.4	3.0
			B	65.8	9.3
	D25	63.0	A	56.2	10.8
			B	72.8	15.6

주 1) 기건상태 기준 상대적인 수분함량

주 2) 장비B(전자파레이더법)의 경우 실측피복두께에 대한 7단계 측정모드(mode)로 결정하였으며 장비의 특성상 비유전을 제한적용(최대 : 10.7)

의 영향을 분석하여 보면 전자기유도법의 경우 수분함량이 증가하여도 대체적으로 오차율의 변화가 적은 경향을 나타내었으며 반면에 전자파레이더법의 경우 대체적으로 수분함량이 증가함에 따라 오차율도 증가하여 2.6% 상대습윤상태에서 오차율이 8.1%까지 증가하는 것으로 나타났다. 이는 임홍철(1999)⁽¹⁰⁾에 의하면 전자파는 매질의 전도율이 낮을수록 더 깊이 투과하므로 습윤상태의 경우가 기건상태보다 전도율이 크기 때문에 전자파의 투과율이 낮아져 오차율이 다소 증가하는 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트구조물의 철근탐사에 대한 신뢰성 제고의 일환으로 철근탐사 신뢰도의 주요인자인 철근직경, 피복두께, 습윤상태별 시험 및 결과분석을 실시하였다. 그 결과, 기존 문헌^{(3),(10),(14)}의 내용과도 잘 일치하는 것으로 나타났다. 요약하면, 전자

기유도법의 경우, 철근직경 및 피복두께가 증가함에 따라 오차가 증가하며 전자파레이더법의 경우, 실제 피복두께에 맞는 비유전율에 따라 계측하여 깊은 심도의 경우에도 신뢰성이 우수한 것으로 나타났다. 주요 항목별로 정리하면 다음과 같다.

- 1) 철근직경에 대한 영향은 전자기유도법의 경우 철근 직경이 증가함에 따라 오차가 증가하여 최대 5.4%의 오차율을 나타내었다. 반면에 전자파레이더법의 경우는 철근직경의 영향이 작은 것으로 나타났다.
- 2) 피복두께에 대한 영향은 전자파레이더법의 경우 피복두께가 증가함에 따라 오차율은 대체적으로 감소하는 경향을 보였으며, 이는 장비 특성상 콘크리트 상태에 적합한 비유전율의 조절이 가능하기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 전자기유도법은 피복두께 100mm인 경우 자기장의 영역이 멀어져 측정이 불가하였으며, 철근직경의 간섭이 적은 철근직경이 작은 경우(D13이하)의 결과를 고려할 때 피복이 증가할수록 오차율은 증가하는 경향을 나타내는 것으로 판단된다.
- 3) 습윤상태에 대한 영향은 전자파레이더법의 경우에 수분함량 증가에 따라 오차율이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 상대수분함량의 증가와 함께 전도율 및 비유전율이 증가하면서 오차율이 커지는 것으로 판단된다. 반면에 전자기유도법의 경우는 습윤상태에 대한 영향이 작은 것으로 나타났다. 따라서 습윤상태의 콘크리트 철근탐사시 전자기유도법이 신뢰성 측면에서 유리할 것으로 판단된다.
- 4) 향후 철근탐사의 신뢰성제고를 위한 다양한 조건의 추가 실험이 필요할 것으로 판단되며 또한 콘크리트내 수분함량의 변화에 따른 전도율 및 비유전율의 정량적인 변화를 파악하기 위한 심도 있는 연구 및 관련 추정식의 제안이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구의 일부는 SISTeC(R11-2002-101-01005-0)의 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 임창덕, "전자파, 방사선, 적외선 등을 이용한 비파괴 시험", 한국콘크리트학회, 콘크리트구조물의 비파괴검사 및 안전진단 제2회 기술강좌, 1993. 2.
2. 건교부, 시설안전기술공단, "시설물 안전진단 장비의 사용 및 유지관리 매뉴얼", 2000.12. pp. 11-92.
3. 김영환, "콘크리트 구조물의 비파괴검사 현황", 비파괴검사학회지 Vol. 20 No. 4, 2000. 8.
4. KS F 2734, 전자기유도법에 의한 철근탐사 시험방법, 2004.
5. 박승범, "콘크리트진단 및 유지관리", 기문당, 2002.10.
6. 박승범, "콘크리트 구조물의 진단 및 유지관리", 한국콘크리트학회, 콘크리트의 제조·시공·품질관리 및 유지관리 제3회 기술강좌, 2004.11.
7. 박기준, 이승재, 임홍철, "구조물 진단장비를 이용한 철근탐사", 대한건축학회 학술발표논문집 제20권 제1호, 2000년 4월, pp. 189-192.
8. 박석균, 임홍철, "전자파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사", 콘크리트학회지, 제10권, 2호, 1998, pp.27-39.
9. 임홍철, 김우석, "레이더를 이용한 콘크리트 시편내 수평 배근간격 탐사", 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제2호, 2000. 6, pp. 65-71.
10. 임홍철, "레이더를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴 검사 방법 개발", 비파괴검사학회지 '99 학술 제2분과 워크샵, 1999. 8.
11. KS F 2735, 전자파레이더법에 의한 철근탐사 시험방법, 2004.
12. 건교부, 시설안전기술공단, "교량정밀안전진단 및 통과허용하중 산정기법 개선(2차)", 1999.
13. 한국시설안전기술공단, "시설물의 건전성평가를 위한 비파괴 및 재하시험매뉴얼 개발", 2006.
14. 임홍철, "비파괴 방법에 의한 지진후 피해평가", 콘크리트학회지 제9권 2호, 1997. 4.
15. 建設省土木研究所 コンクリト 研究室, 日本 構造物診断技術協會, "コンクリト 構造物の健全度診断技術の開発に 關す 共同研究報告書", 第106号, 1994. 7.
16. Rhim, H. C., "Detection of Steel Reinforcing Bars inside Concrete Using Radar", by Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Edited by Taketo Uomoto, 2000. pp. 577-581.
17. Cheng, D.K., "Field and Wave Electromagnetics", Addison-Wesley Pub. Co., Massachusetts, 1989, pp. 703.

(접수일자 : 2007년 11월 30일)

(심사완료일자 : 2008년 5월 21일)