

열화상 정보를 이용한 부식률 예측기법

Corrosion Measurement Method Using Thermographical Information

윤주영*, 정 란**, 노영숙***†

Ju-Young Yun*, Lan Chung** and Young-Sook Roh***†

초 록 콘크리트에 매입된 철근의 정량적인 부식률을 측정하기 위해 적외선 열화상법을 이용하였다. 적외선 촬영 실험에서는 부식률(0, 1, 3, 5, 7, 10%)과 대기온도(16, 21, 25, 28°C), 피복두께(10 mm, 20 mm, 30 mm)에 변수를 주어 콘크리트 표면온도를 측정하였으며, 콘크리트 표면온도의 초기 온도상승률에 대해서 측정결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 적외선 촬영으로 얻어진 열화상 정보는 서로 다른 부식률과 피복두께에서는 현저한 차이를 보였으나 대기온도에 대해서는 그 영향이 미비하게 나타났다. 철근의 부식률에 따른 열 발생량이 콘크리트 표면온도에 부식률에 비례하여 열을 발생시킴으로써 철근의 부식률을 정량적으로 평가할 수 있는 분석기법을 연구하였다.

주요용어: 열화상 자료, 철근부식, 부식률, 콘크리트

Abstract In order to measure corrosion level of steel reinforcement rebar which is inside reinforced concrete structure, infrared thermographic technique was employed. Experimental test parameters were four different ambient temperatures and various levels of corrosion states (0, 1, 3, 5, 7 and 10% of weight loss). After analysis of temperature distributions of concrete surface, the amount of heat flux from the concrete surface is directly proportional to the corrosion level which is inside of concrete.

Keywords: Thermographical Information, Steel Corrosion, Corrosion Level, Concrete

1. 서 론

염화물은 콘크리트 내부에서 여러 가지 반응을 일으키지만 그 중 콘크리트 내부 철근의 부식이 가장 큰 문제이다. 신도시아파트 내구성 보고서[1]에 따르면 신도시 아파트에 대량의 해사가 사용되어 십수 년 후 철근 부식으로 인한 콘크리트 구조물의 내구성 저하가 심각한 사회적인 문제를 야기 시킬 것으로 보고되고 있다. 또한 최근 대규모 공사의 증가로 인하여 하천골재가 부족해져 바다골재의 사용이 늘어나고 있고[2], 영종도 신공항 건설, 서해안고속도로 건설 등 해양환경 하의 건축물이 증가

하여 염화물에 의한 피해에 대책 마련이 필요해지고 있다. 콘크리트 내부 철근의 부식은 콘크리트의 균열을 발생시켜 내력을 저하시키므로, 철근의 부식 정도를 조기에 파악하고 적절한 보수·보강을 통하면 구조물의 수명을 연장시킬 수 있다. 적외선 열화상을 이용한 비파괴 측정법은 그 사용의 간편함과 인력의 절약, 검사비용의 경제성 및 대용량과 비접촉식의 장점 등으로 인해 최근 다양하게 연구되고 있다. 미국, 일본, 유럽 등 해외에서는 근대화 이후부터 적외선 열화상을 이용한 기술을 건축물 열관리, 발전설비 안전진단, 콘크리트 교량상관 결함탐지, 지하 가스 배관의 누설, 콘크리트 부재의

균열 평가, 보강부재의 건전성 평가 등 산업 전반에 걸쳐 활용된 것에 비해 국내에서는 일부 기관들이 장비를 도입하여 사용하기 시작하였으나 그 기술의 숙지 및 신뢰성의 결여로 인하여 활용이 되지 못하였다. 최근에는 적외선 영상 장치의 발전으로 인해 사용법이 간략화 되었고 신뢰성의 증대를 바탕으로 적외선 열화상을 이용한 비파괴 시험법에 대해 활발한 연구가 진행되고 있으며, 적외선 열화상법에 의한 비파괴 검사기술이 해결해야 할 문제점인 결함·손상계측의 고분해능, 고정밀도화 및 정량적 결함·손상계측 분야 등의 비파괴 검사 방법으로서의 단점을 해결하기 위하여 최첨단 적외선 영상장비 개발 및 적외선을 이용한 비파괴 검사법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 적외선 영상장비를 이용한 검사 방법이 다른 방법들에 비하여 비 접촉성으로 인하여 안전하고 고속으로 원거리 측정이 가능한 점 등, 여러 가지 장점을 지니고 있는 점을 감안할 때 철근콘크리트 구조물의 결함 감지를 위한 비파괴 검사 방법으로 유용하게 활용되어질 수 있을 것으로 예상된다. 다만, 정성적이고 확률적으로 부식정도를 예측하고 있거나 부식속도를 예측하여 시공 시점으로부터 현재까지의 시간을 고려한 부식정도를 추정할 뿐, 아직까지도 정확한 측정시점의 철근 부식량을 정량적으로 측정할 수 있는 기법은 제시되어지고 있지 못한 실정이다[3].

따라서 본 연구는 적외선 열화상 데이터를 이용하여 철근의 부식률을 정량적으로 측정할 수 있는 비파괴 측정기법을 개발하고자 이에 대한 기초 연구를 수행하였다.

2. 이론적 고찰

본 연구는 식 (1)과 식 (2)에서 철근이 부식됨에 따른 단면적의 감소로 인해 철근의 저항 값이 달라져 철근에 전류를 가했을 때 발열량이 달라진다는 점에 착안하여 실험을 기획하였다.

이 초기 조건을 증명하기 위해 철근의 저항 값 계산과 선행 실험을 실시하여 비교한 결과 Fig. 1 과 Table 1와 같이 실험오차로 인해 예상 저항 값과 측정 저항 값 간에는 차이가 있었지만 철근의 부식이 클수록 발열량이 증가하는 것을 증명할 수 있었다. 또한 부식률이 증가하면 할수록 예상 저항 값과 측정 저항 값 사이의 값은 작아짐을 알 수 있었다.

옴의 법칙: $R = \rho \frac{l}{A} (\Omega)$ 식 (1)

줄의 법칙: $H = 0.24 I^2 R (cal/s)$ 식 (2)

ρ : 길이 1m, 단면적 1m² 인 도체의 고유저항 (강철의 고유저항 : $40 \times 10^{-8} \Omega m$)

l : 도체의 길이 A : 도체의 단면적

H : 전류에 의해 발생되는 열량

I : 전류량 R : 도체의 전기저항

Table 1 Electric resistance in steel bar

부식률 (%)	예상전기저항 (mΩ)	측정전기저항(mΩ)
0 %	1.122	0.64
1 %	1.133	0.73
3 %	1.156	0.8
5 %	1.181	0.945
10 %	1.246	1.03
20 %	1.402	1.145
30 %	1.602	1.325

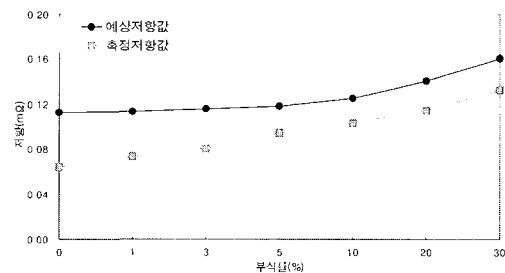


Fig. 1 Resistance curve vs. corrosion level

3. 실험 방법

실험 변수로는 예상 부식률 0, 1, 3, 5, 7, 10%, 피복두께 10, 20, 30 mm, 대기온도 16, 21, 25, 28℃로 선정하였다. 시험체의 형상은 Fig. 2와 같이 제작하였으며, 실험에 사용된 콘크리트의 배합비는 Table 2에서 보는 바와 같다. 사용된 D13 철근은 SD40으로 평균항복강도 f_y 는 498 MPa, 평균 인장강도 f_u 는 682 MPa이었다.

Table 2 Mix proportion of concrete

배합 강도 (MPa)	W/C (%)	슬럼프 (cm)	단위중량(kg/m ³)					평균 압축 강도 (MPa)
			물	시멘트	잔골재	굵은 골재	AE 감수제	
21	60	15	185	308	720	994	1.541	22.7

시험체를 제작한 후 전위차 부식촉진법에 의해 강제부식을 시킨 후 Fig. 3에서 보는 바와 같이, 시험체의 철근 양단에 전기가열기를 이용하여 전류를 가하고 콘크리트 표면과 40 cm의 거리를 유지하면서 적외선촬영을 진행하였다. 전기가열은 피복두께 10 mm 시험체의 경우는 100A의 전류를 통전하여, 각 시험체 별로 300초 동안 철근을 가열하면서 30 초 간격으로 콘크리트 표면의 열화상 데이터를 취득하였고, 그 후엔 상온에서 180초간 방치시키며 열화상 데이터를 취득하였다.

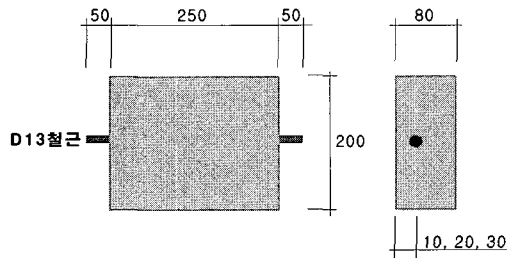


Fig. 2 Detail of specimen

4. 열화상 데이터 분석

취득된 열화상 데이터를 텍스트 형식으로 변환하고 MATLAB 프로그램을 이용하여 각 시험체 별로 30 초마다 측정된 결과를 전체 320(철근방향) × 240(철근직각방향)개의 데이터 중 320 × 210 개의 데이터를 추출하여 그 데이터 중 시험체의 최외각 단부에 해당하는 부분과, 철근이 위치한 부분의 최대값을 추출하여 평균값을 구하였다. 이는 부식이 철근의 길이방향으로 일정하게 분포되어있다고 가정하는 것이다. 데이터를 추출하는 과정을 도식화하여 나타낸 것이 Fig. 4이다. 추출된 데이터는 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 시간에 따른 시험체 최외각 부분의 콘크리트 표면 온도는 변화가 거의 없거나 미약하며 철근이 위치한 시험체 중앙부의 콘크리트 표면 온도가 두드러지게 상승하는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 철근이 위치한 콘크리트 표면의 초기 온도상승률 비교를 통한 부식률을 예측하기 위하여 측정 시간대별 온도변화를 1차식으로 곡선 맞춤하여 그 기울기를 비교하였다. Fig. 5와 같이 300초 이후의 데이터는 콘크리트 표면이 냉각되거나 온도변화가 미비하여 분석에서 제외하였고, Fig. 6과 같이 예상 부식률에 따른 온도변화를 비교·분석하였다.

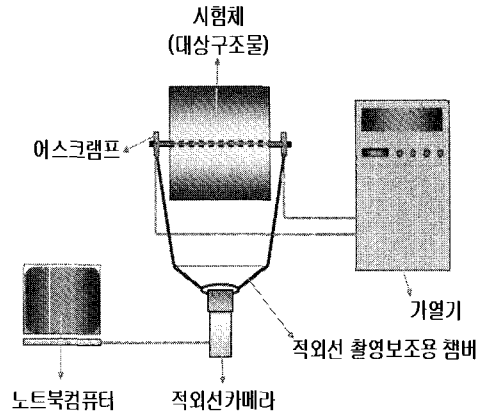


Fig. 3 Infrared thermographic technique system

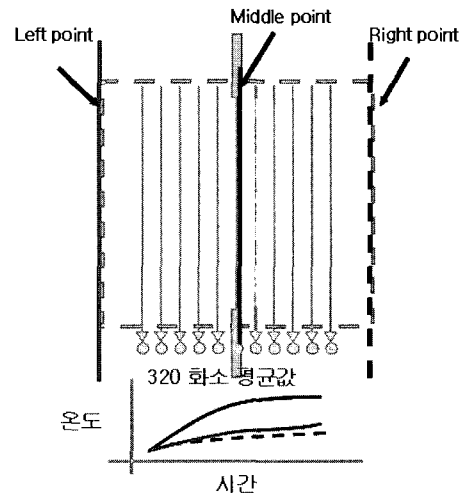


Fig. 4 Analysis method of infrared thermographic data

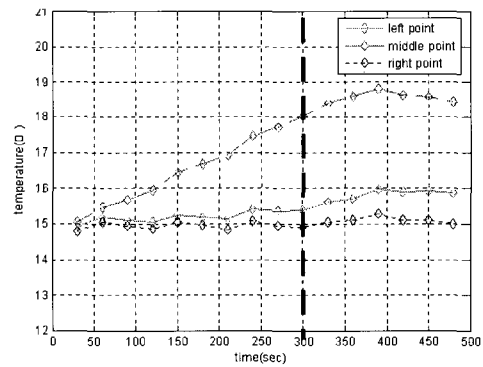


Fig. 5 Temperature curve from the measurement

5. 실험결과 및 분석

5.1. 철근의 부식률에 따른 콘크리트 표면의 초기 온도상승률

Fig. 6과 Table 3는 피복두께 10 mm 시험체의 부식률별 온도상승률과 이에 따른 상관계수를 나타내고 있으며 부식률 5%의 경우를 제외하면 부식률이 증가할수록 온도상승률이 증가하는 것을 알 수 있으며, 부식률 10% 시험체의 온도상승률이 부식률 0%에 비해 약 22.6%인 것으로 나타났다. 부식률이 높아짐에 따라 온도상승률이 커지는 이유는 철근 부식이 진행될수록 단면적의 감소로 인한 철근의 저항이 증가하게 되어 보다 많은 열을 발생시킨 것으로 판단된다. 따라서 철근의 단면적의 감소에 의해 발생하는 열량이 콘크리트를 통과하여 표면에 도달하는 온도는 부식률별로 차이가 있으며 부식률이 증가하면 할수록 온도의 증가율도 커짐을 알 수 있다. Fig. 7은 부식률에 따른 온도상승률을 비교한 것으로, 부식률 5%인 경우를 제외하고는 부식률에 따라 온도상승률이 점차 증가하는 것으로 나타났다.

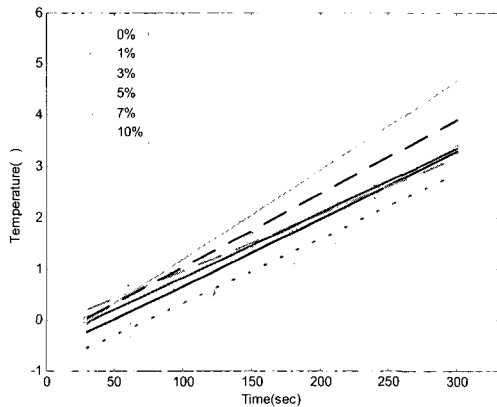


Fig. 6 Temperature increasing rate of 10 mm cover depth

Table 3 Temperature increasing rate with corrosion level

예상부식률(%)	온도상승률(%)	상관계수(R ²)
0	1.06	96.1%
1	1.09	98.7%
3	1.16	99.1%
5	1.47	99.4%
7	1.26	98.3%
10	1.30	98.3%

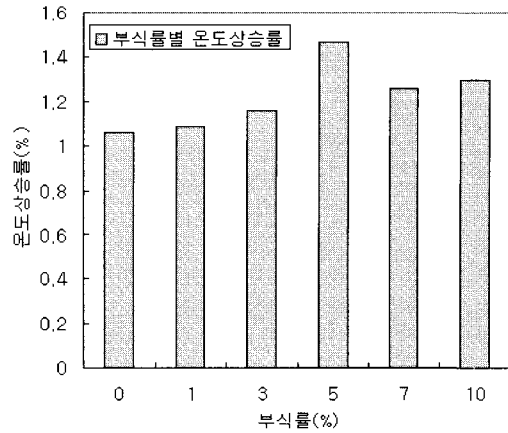


Fig. 7 Corrosion level according to temperature increasing rate

5.2. 대기온도에 따른 철근의 부식률별 콘크리트 표면의 초기 온도상승률

열화상 데이터 취득시 대기온도가 실험결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 대기온도(16, 21, 25, 28°C)별 피복두께 10 mm 시험체의 열화상 데이터를 취득하여 비교·분석하였다. Fig. 8은 서로 다른 대기온도를 부식률에 따라 분류하여 직선 맞춤한 그래프들을 나타낸다. 이에 따른 온도 상승률과 각각의 상관계수를 Table 4에 나타내었다. Fig. 9는 대기온도에 따른 부식률별 평균 온도상승률을 나타내고 있는데 철근의 부식률이 증가할수록 콘크리트 표면 초기 온도상승률이 증가함을 알 수 있지만 대기온도에 의한 영향은 미미한 것으로 분석된다.

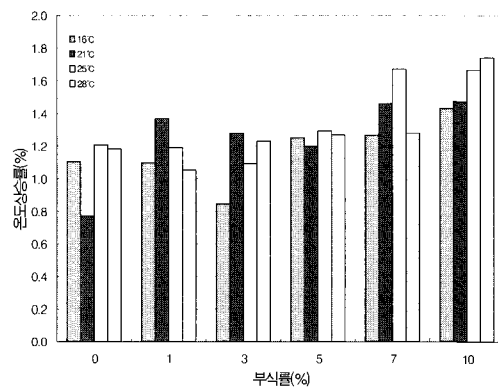


Fig. 9 Average temperature increase rate for different ambient temperatures

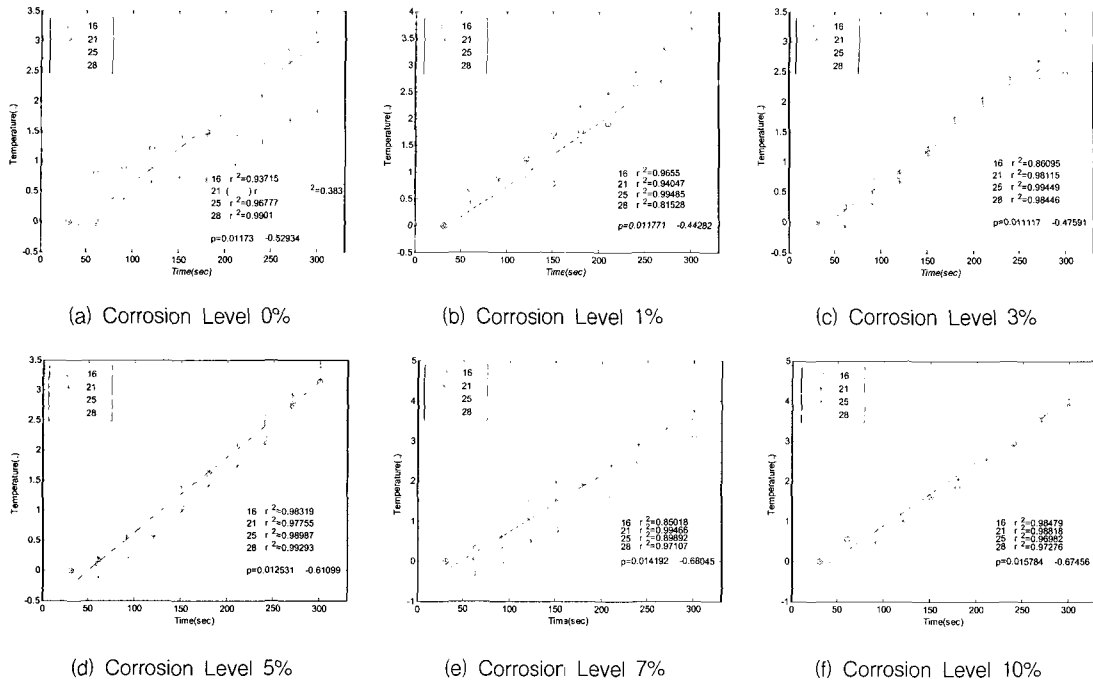


Fig. 8 Temperature increase rate for various corrosion level

Table 4 Correlation coefficient for different ambient temperature

예상 부식률(%)	온도 상승률(%)	상관계수(R ²)			
		16°C	21°C	25°C	28°C
0	1.17	89.8%	38.8%*	97.1%	97.1%
1	1.18	96.5%	94.0%	99.4%	81.5%
3	1.11	86.0%	98.1%	99.4%	98.4%
5	1.25	98.3%	97.7%	98.9%	99.2%
7	1.42	85.0%	99.4%	89.8%	97.1%
10	1.58	98.4%	98.8%	96.9%	97.2%

* 실험 분석에서 제외

5.3. 부식률에 따른 온도증가율

피복두께의 영향과 부식률에 따른 순수 온도증가율을 구하기 위해 Fourier의 열전도 방정식에 의거하여 직선구간만을 고려하였다. 온도가 가열되는 초기에는 피복 두께의 영향으로 철근의 가열구간에서 콘크리트 표면으로 열이 발산되기까지의 온도도달 시간(delay time)이 존재 하게 되어 초기의 비선형 구간이 존재하게 된다. 이 비선형의 온도구간

이후에는 열에너지가 콘크리트 피복두께에 비례하여 선형 증가하는 것으로 나타났다.

각각 피복두께에 따른 온도변화 곡선의 직선구간은 Fig. 10과 같이 부식률이 커질수록 기울기 값이 증가하는 것을 파악할 수 있었다. 피복두께 10 mm인 경우 부식률 10% 시험체에서는 콘크리트 표면 온도 증가량이 다른 시험체 값들보다 현저히 크게 나타났으며 이는 피복두께가 얇기 때문에 시험체를 부식시키는 과정에서 균열이 발생되어 가열된 철근의 열이 직접 균열된 면을 따라서 외부로 발산되기 때문인 것으로 판단된다.

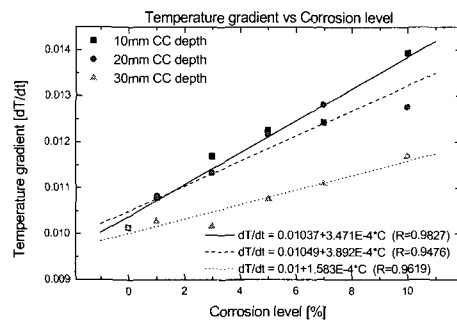


Fig. 10 Temperature increasing rate at different corrosion levels

6. 결론

콘크리트에 매입된 부식 철근의 정량적인 부식률을 측정하기 위한 적외선 촬영 실험에서는 부식률, 피복두께, 대기온도에 변수를 주어 콘크리트 표면 온도의 초기 온도상승률에 대해서 측정결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 철근의 부식률에 따른 철근의 저항을 계산해본 결과, 부식률 증가로 인한 철근단면적의 감소로 저항이 증가하였으며, 실제 부식된 철근의 저항 측정에서도 부식률이 증가함에 따라 철근의 저항도 증가 하는 것을 확인 할 수 있었다.
- (2) 철근의 단면적에 의한 열 발생량이 콘크리트 표면온도에 부식률별로 비례하여 많은 열을 발생시킴으로써 부식률별 콘크리트 표면온도의 차이를 알 수 있다.
- (3) 부식률별 평균 온도상승률은 대기온도의 영향은 거의 없는 것으로 판단되며, 철근의 부식률이 증가할수록 콘크리트 표면 초기 온도상승률이 증가함을 알 수 있다.

적외선 열화상을 이용한 그래프의 온도상승률에 의한 정량적인 부식률 판단을 위해서는 초기가열시점과 콘크리트 표면에 열이 발산되기 시작하는 온도 도달시간(delay time)에 대한 연구가 추후 진행되어 콘크리트 표면에 온도상승률에 대한 보완이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 대한건축학회, "신도시 아파트 내구성 조사연구 보고서", 대한건축학회, (1995)
- [2] 오병환, 차수원, 조윤구, "구조물의 염해 대책 특별 연구 보고서", 서울대 공학 연구소, (1995)
- [3] 백인관, "적외선 열화상을 이용한 철근의 부식률 부식률 측정 기법 개발", 단국대학교 박사학위논문, pp. 3-12, (2006)
- [4] 이주영, 이현호, "적외선카메라를 이용한 섬유쉬트 보강공사의 결합검지기술", 대한건축학회 논문집 제16권 제10호, (2000)
- [5] 정 란, 한남희, 조승호, "콘크리트내부 철근부식의 비파괴 측정방법에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제18권 제8호, (2002)
- [6] 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조물의 비파괴 검사 및 안전진단", 기문당, (2001)
- [7] G. G. Clemena and W. T. McKeel, "Detection of delamination in bridge decks with Infrared thermography," Transportation Research Record No. 664, (1978)
- [8] 권영진, "적외선 탐사에 의한 타일 박리 부위 모니터링에 관한 사례분석", 한국구조물진단학회 봄학술발표회 논문집 2권 1호, (1998)
- [9] 김성수, "해양환경하에 방치한 콘크리트의 열화 및 철근의 부식, 방식에 대한 연구", 한양대학교 대학원 토목공학과 박사학위논문, (1994)
- [10] S. G. Mickenzie, "Techniques for monitoring corrosion of steel in concrete, corrosion prevention & control," Vol. 34, No. 1, (1987)
- [11] Springer, Tasi, "Thermal Conductivities of Unidirectional Materials," Journal of Composite Materials, Vol. 1, pp. 166-173, (1967)
- [12] 권오현, "적외선법을 이용한 RC구조물의 결합검지 실용화에 관한 연구", 영남대학교 박사학위 논문, (2000)