반전위 측정을 통한 원주 법천사지 지광국사탑 모르타르 복원부위 상태평가 연구 - 옥개석 모르타르 복원부위를 중심으로 -

이태종¹ | 조하진 | 박희정 | 채승아
국립문화재연구소 문화재보존과학센터

The Condition Evaluation of Mortar Parts of Stupa of State Preceptor Jigwang from Wonju Beopcheonsa Temple Site by Half Cell Potential Measurement - with Focus on the Mortar Parts the RoofStone -

Tae Jong Lee¹ | Ha Jin Cho | Hee Jeong Park | Seung A Chae
Conservation Science Center, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

¹Corresponding Author: tj0819@korea.kr, +82-42-860-9381

초 록 원주 법천사지 지광국사탑의 1957년 수리-복원에 사용된 모르타르의 손상정도를 평가하고 제거 필요성에 대한 객관적인 데이터를 제공하기 위해 콘크리트 분야에서 사용되는 반전위측정방법을 적용하였다. 철근이 사용된 옥개석 모르타르와 실내 실험체의 촉진부식시험 후 반전위 측정값에 대한 다중회귀분석 결과, 부식량과 피복두께에 따른 HCP 값의 결정계수는 0.86이상의 높은 상관식이 도출되었다. ASTM C876기준에 따르면 옥개석의 습윤상태 측정값 -431~-663 mV는 철근의 부식손상 확률이 90%이상이기 때문에 손상된 모르타르를 제거한 후 신석재를 사용한 복원이 필요한 것으로 판단된다.

중심어: 원주 법천사지 지광국사탑, 모르타르, 반전위측정, 다중회귀분석, 결정계수

ABSTRACT Stupa of State Preceptor Jigwang at Beopcheonsa temple site, Wonju, was conserved and restored in 1957. It was necessary to assess the degree of damage to the used mortar and to provide objective data on the necessity of its removal. Therefore, the HCP(half-cell potential) measurement used in concrete fields was applied. Multi-regression analysis of HCP data, following the rapid corrosion test of the roofstone mortar used by the rebar, resulted in a high correlation of HCP values(0.86), depending on the amount of corrosion and cover depth used for the steel bar. As a result, high correlation values(0.86) for the coefficients of determination were derived. The showed that the measurement of the wet conditions -431 to -663 mV on the roofstone indicated a corrosion damage rate of 90% or more after removal and restoration

Key Words: Stupa of state preceptor Jigwang from Wonju Beopcheonsa temple site, Mortar, Half cell potential, Multi-regression analysis, Coefficient of determination

1. 서론

국보 제101호 원주 법천사지 지광국사탑은(이하 ‘석탑’) 고려시대 국가에서 최고의 승려에게 내리는 ‘왕사(王師)’와 ‘국사(國師)’의 칭호를 받았던 지광국사(984~1067) 해린스님의 사리탑이다. 당초 석탑은 원주 법천사터에 있었으나, 1911년 일본 사람들에게 매매되어 서울 명동으로 가게 되었고 이듬해 일본 오사카로 반출되었다가 다시 돌아오는 등 현재까지 최소 9차례 이상 이전되었다(Cultural Heritage Administration, 2018). 또한 이전을 수차례 반복하던 중 한국전쟁 시 폭탄 피해로 옥개석 등 상부 부재가 수십 조각으로 파손되는 큰 손상을 입었다. 외부 충격에 의한 손상은 석탑 내부에 크고 작은 균열을 남겼으며 대파된 부재는 1957년 납과 시멘트로 접합하고 은장과 격쇠, 원형철근 등으로 고정하였다(National Museum of Korea, 1957). 하지만 전체 면적의 4.6%에 해당하는 멸실된 부분은 모르타르로 복원하였고 직접적 손상을 입은 옥개석(47%), 양화(37%), 보개(35%) 등은 1/3이상을 모르타르로 채웠다. 60년이 경과되면서 모르타르 복원부위를 중심으로 균열, 박리·박락, 탈락 등 물리적 손상이 높게 확인되었고 주요 변색 요인인 흑색과 백화 모두 모르타르에서 기원한 Ca이 주성분을 구성하고 방해석과 석고결정이 관찰되었다(Cultural Heritage Conservation Science Center, 2015).

모르타르 복원부위는 총 59개의(사업추진과정에서 94개로 확인됨) 반선과 원형철근을(이하 ‘철근’) 사용하여 부재를 복원하였는데 대부분 철근 부식도가 높게 확인되었고 양화, 옥개석 등 상부 부재의 철근 부식도가 상대적으로 높았다(Cultural Heritage Conservation Science Center, 2015). 특히 옥개석은 보개 등 상부 부재의 하중이(1,013 kg) 집중되기 때문에 공학적으로 보고된 바와 같이 철근 부식에 따

른 내구성 문제가 발생하게 되고 이는 구조적인 문제로 진전된다(Kwon and Song, 2010; Ryu *et al.*, 2017). 모르타르 복원부위 내부의 철근이 부식될 경우, 초기에는 부식의 팽창현상으로 인해 부착강도가 개선되는 공학적 장점이 일시적으로 나타나지만, 부식량이 5%이상 증가하게 되면 급격한 슬립현상이 발생하고 균열폭 확대, 석재와 모르타르 간 이격 등으로 진전하며 최종적으로는 구조물의(해당 경우는 옥개석과 복원부 연결부분인) 일체성을 확보할 수 없게 된다(Kim *et al.*, 2013). 이와 같은 이유로 2005년 국립중앙박물관이 용산으로 신축 이전하면서 경복궁 내 대부분의 석조문화재도 함께 옮겨졌으나 이 석탑은 이전 시 옥개석의 파손위험이 우려되어 그대로 남게 되었다(Cultural Heritage Administration, 2004). 이후 정기조사(2010)와 문화재 특별종합점검(2014), 정밀안전진단(2015)등의 결과에 따라 보존처리가 결정되었고 2016년 석탑을 해체하여 국립문화재연구소에서 보존처리를 진행 중이다(Cultural Heritage Conservation Science Center, 2015).

그 동안 석탑 보존처리 시 모르타르로 복원된 부재는 재료적 이질감, 모르타르 풍화에 따른 구성 석재의 2차 풍화, 동일 석재를 사용하는 복원원칙 등의 이유로 대부분 제거되었다. 하지만 해당 석탑의 옥개석과 같이 모르타르가 47% 가량을 점유하고 있기 때문에 제거 시 부재의 형태유지가 불가능하고 구조적인 성능저하와 직결되기 때문에 제거에 신중을 기해야 한다.

따라서 본 연구에서는 석탑 원형보존을 위해 모르타르 복원부위에서 특징적으로 확인되는 철근의 부식정도를 반전위 측정이라는 비파괴 기법으로 조사하고 상관성 분석을 통해 모르타르의 손상정도를 평가하였다. 이 결과는 모르타르 복원부위의 제거 필요성을 객관적으로 제시함으로써 동일 석재를 이용한 석탑 복원의 토대를 마련할 수 있었다.

Figure 1. Mortar range of roofstone(red mark).

2. 연구방법

2.1. 석탑 모르타르 복원부위

석탑은 29개 부재로 구성되어 있는데 모르타르로 복원된 부재는 옥개석 등 19개 부재로 평면, 입면, 바닥면 3D스캔 결과 전체 면적의 4.6%를 점유하고 있다. 하지만 앞서 설명과 같이 옥개석(47%), 양화(37%), 보개(35%) 등 파손 면적이 넓은 부재는 1/3 이상이 모르타르로 복원되었다(Figure 1). 특히 옥개석과 같이 복원부위가 넓은 부재는 균열, 박리·박락, 탈락 등의 물리적 손상과 원부재간 이격, 노출된 매립 철근의 부식 등이 확인되었다(Cultural Heritage Conservation Science Center, 2017).

2.2. 반전위 측정

옥개석 모르타르의 손상도 평가는 비파괴 기법을 사용하고 부재의 이동이 불가능하기 때문에 현장에서 진행되어야 한다. 이에 매립된 철근을 일부 노출시키고 모르타르 모재 사이의 전위를 측정함으로써 부식손상가능성을 평가하는 반전위 측정(HCP: half cell potential)법을 사용하였다. 해당 측정법은 석조문화재에 처음 사용되었으나 콘크리트

손상특성을 해석하는 방법으로는 다양하게 보고된바 있다(Elsener, B. *et al.*, 2003; Song *et al.*, 2009; ASTM C876-09, 2009; Ryu *et al.*, 2017). 반전위측정은 분극저항법과 같이 정량적인 방법은 아니지만, 우수한 현장적용성과 ASTM C876(시멘트 콘크리트 내 철근부식 가능성 판정, -350 mV이하 기준)의 측정전위에 따른 부식 손상확률 기준을 명확히 가지고 있으므로 간편하게 적용할 수 있어 많이 사용되고 있다(Song *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2013).

2.2.1. 측정개요

석탑 모르타르 복원부위의 상태 평가를 위해 옥개석 상·하단의 철근 피복두께를 탐사하고, 모르타르에서 확인되는 노출 철근 7지점에서 반전위를 측정하였다(Figure 2). 아울러 물-시멘트비 및 피복두께, 축진부식수준을 고려한 모르타르 실험체(72개)에 대한 실내 실험을 실시하고 석탑 옥개석 반전위 측정값과 비교분석을 통해 부식 손상가능성을 최종 평가하였다.

2.2.2. 측정방법

피복두께 탐사는 RC-RADAR(NJJ-105, JRC, Japan)를 이용하여 옥개석 상·하단의 철근 위치 및 피복두께를 탐사

Figure 2. Exposed steel bar found on the roofstone.

Figure 3. Cover depth and HCP(half cell potential) measurement location of the roofstone.

Table 1. Sample production conditions

Sample type	Sample size	Test items	Mortar ration (w/c, %)	Steel cover depth	Corrosion level	Sample amount
Cement mortar	Square 50 mm ×100 mm ×200 mm	HCP (dry, wet)	35	20 mm	20 V, 6 hours	Level × 2 ea Total 72 ea
			55	30 mm	20 V, 18 hours	
		Corrosion loss	70	40 mm 50 mm	20 V, 42 hours

Figure 4. Sample specifications and experimental methods.**Table 2.** Results of measurement of cover depth steel bar by location of roofstone (Upper: u, Lower: l)

East front		West front		South front		North front	
Detections	Cover depth (mm)	Detections	Cover depth (mm)	Detections	Cover depth (mm)	Detections	Cover depth (mm)
(u) 1-1	35	(u) 6-1	41	(u) 8-1	50	(u) 5-1	26
(u) 2-1	12	(u) 7-2	38	(u) 9-1	50	(u) 5-2	22
(u) 3-1	55					(u) 7-1	39
(l) 10-1	30	(l) 12-1	23	(l) 13-1	45	(l) 11-1	21
				(l) 14-1	25		
				(l) 14-2	25		
				(l) 15-1	100		

하였다. 반전위 측정은 ASTM C876을 활용하여 철근이 매립된 복원부위의 습도 및 표면 조건을 감안한 부식 손상가능성을 평가하였고 도출된 측정값의 상관성 분석을 위해 실험체 제작 후 촉진부식시험을 수행하여 상대적인 반전위 측정값으로 최종 평가를 수행하였다(Figure 3).

2.2.3. 실험체 제작

실험체 제작은 1957년 수리 당시의 물-시멘트비를 확인 할 수 없고 다양한 부분에서 모르타르 복원부재의 시료채취가 불가능하였기 때문에 정확한 비율을 설정할 수 없었다. 따라서 복원-성형이 가능한 반죽정도 및 일반적 제작기준을 고려하여 35%, 55%, 70%의 세 가지 비율로 제작하였으며 피복두께 조정은 RC-RADAR조사 결과를 따랐다(Table 1). 제작된 실험체는 습도를 고려한 반전위 측정 및 강제 부식시험 후 반전위 재측정을 수행하였다(Kim *et al.*,

2013).

강제 부식시험은 아크릴 수조에 실험체 및 구리판을 위치시키고 3.5% NaCl 수용액에 실험체 피복두께 높이만큼 침지시켰다. 실험체 내부의 철근봉은 전압발생기의 +극, 구리판은 -극으로, 전기화학적으로 전지를 구성하여 철근봉에서의 아노드 반응을 촉진시키기 위하여 전압발생기로 20 V의 전압을 가하여 촉진 부식을 실시하였다(Figure 4). 부식의 단계는 전압을 가하는 시간으로 구분하여 6시간, 18시간, 42시간으로 진행하였다.

3. 연구결과

3.1. 철근탐사

Figure 3에 설정된 지점을 따라 모르타르 내부에 존재하

는 철근의 위치 정보 및 피복두께를 측정하여 실험체 제작에 필요한 피복두께를 산정하였다. RC-RADAR는 넓은 면적을 한 번에 측정할 수 있기 때문에 복원부와 원부재 간의 연결부를 중심으로 상단 9구역, 하단 6구역을 탐사하였고 총 17지점(중복 1지점)에서 철근이 탐지되었다(Table 2).

탐지된 철근의 피복두께 분석 결과, 25 mm~100 mm의 범위로 나타났으나 피복두께는 옥개석 낙수면의 반전곡선을 고려할 시 경사면에서 확인되는 특정 값으로 대부분의 피복두께는 25~50 mm로 판단된다(Figure 5). 해당결과는 2015년 연구결과와 유사한 양상으로 실험체 제작 시 피복두께 산정의 기초자료가 되었다.

3.2. 옥개석 반전위 측정

모르타르 복원부위를 건조조건과 습윤조건에서 반전위를 측정한 결과를 Figure 6에 나타내었다. 또한 내부의 부식상분포를 예상하기 위하여 반전위 측정 결과를 기반으로 부식전위 분포도를 구성하였다(Figure 7).

반전위 측정결과, 건조상태에서는 철근이 위치해 있을

것으로 예상되는 부분에서도 비교적 낮은 수치가 나타났으나 습윤상태의 경우 일부를 제외한 측정면 전체가 철근이 부식되었을 확률이 높은 -350 mV이하의 반전위값을 나타내었다.

3.3. 실험체 반전위 측정

6시간, 18시간, 42시간으로 촉진부식을 실시한 이후, 각 단계에서 건조상태, 습윤상태의 반전위를 측정하였다. 촉진부식이 완료된 이후, 실험체를 파쇄하여 철근봉을 채취하였고, 이를 구연산 수용액에 침지, 녹 제거 후 부식감량을 측정하였다(Figure 8, 9).

Figure 9는 실험체 내의 철근봉 평균 부식감량을 물-시멘트비 및 피복두께의 변화에 따라 평가한 결과이다. 피복두께 증가 및 물-시멘트비의 감소에 따라 부식감량이 줄어드는 것이 확연하게 관찰되었으나 물-시멘트비 70%에서는 피복두께에 따라 큰 차이가 발생하지 않았다.

Figure 10은 물-시멘트비에 대한 건조상태와 습윤상태에서의 반전위 측정결과를 나타내었다. 건조상태의 측정값

Figure 5. Locations and results of steel bar exploration on the roofstone using RC-RADAR.

Figure 6. Results of HCP measurement of the roofstone. (a), (b): upper(dry-wet), (c), (d): lower(dry-wet).

Figure 7. Distribution of corrosion potential in the roofstone(wet conditions).

이 습윤상태에서의 측정값보다 높은 값으로 측정되었으며, 습윤상태의 측정값은 촉진부식 시간 증가에 따라 보다 뚜렷한 추이를 나타내는 것으로 확인되었다. 물-시멘트 35%의 실험체는 6시간 촉진부식 실시 후에도 측정값이 부식발생이 낮은 영역에 속하였으나, 55%, 70%의 경우는 모두 -

350 mV이하에 분포하고 있어 90%의 부식확률을 갖는 것으로 확인되었다. 이와 같은 이유는 물-시멘트비가 감소하고 단위시멘트량이 증가할수록 구조가 치밀해지고 부식 저항성이 증가하기 때문에 부식손상확률이 낮게 형성된다 (Kim *et al.*, 2013).

Figure 8. HCP of sample. (a): HCP measurement, (b): Corrosion mass loss measurement, (c): Sample after rapid corrosion test [35 (w/c)-30 (mm)-42 (hour)], (d): [55 (w/c)-30 (mm)-42 (hour)], (e): [70 (w/c)-30 (mm)-42 (hour)].

Figure 9. Results of corrosion mass loss of steel bar.

Figure 10. Results of HCP measurement by w/c(%) of sample. (a): dry, (b): wet.

Figure 11. Results of HCP measurement by cover depth of sample. (a): dry, (b): wet.

Table 3. HCP measurement results of sample(dry condition)

Cover (mm)	W-C ratios (%)	HCP (-mV)			Cover (mm)	W-C ratios (%)	HCP (-mV)		
		6 hours	18 hours	42 hours			6 hours	18 hours	42 hours
20	35	364~386	401~433	387~440	40	35	209~213	412~442	456~498
20	55	335~388	469~478	475~482	40	55	261~320	425~436	456~503
20	70	342~468	566~574	522~586	40	70	424~453	527~545	543~582
30	35	273~299	461~510	487~497	50	35	269~286	233~253	286~422
30	55	199~210	548~559	559~587	50	55	324~353	314~325	433~461
30	70	324~346	517~556	562~574	50	70	480~489	458~485	534~579

Table 4. Multi-regression analysis results of sample(dry condition)

Variable	Corrosion (g)=Y+X1×(cover depth)+X2×(W-C%)+HCP		
	6 hours	18 hours	42 hours
Y intercept	1.24	3.33	5.97
X1 Cover depth (mm)	-2.11×10^{-2}	-5.21×10^{-2}	-9.26×10^{-2}
X2 W-C	2.82×10^{-2}	2.74×10^{-2}	5.00×10^{-2}
X3 HCP (mV)	1.49×10^{-3}	-2.80×10^{-4}	3.67×10^{-4}
Coefficient of determination	0.86	0.90	0.88

Figure 12. Multi-regression analysis results for corrosion amount and HCP with different acceleration periods(dry condition).

Table 5. HCP measurement results of sample(wet condition)

Cover (mm)	W-C ratios (%)	HCP (-mV)			Cover (mm)	W-C ratios (%)	HCP (-mV)		
		6 hours	18 hours	42 hours			6 hours	18 hours	42 hours
20	35	251~274	587~594	731~742	40	35	407~437	620~637	565~575
20	55	457~573	574~585	738~775	40	55	343~389	606~616	712~757
20	70	480~572	409~469	591~710	40	70	183~218	533~584	638~702
30	35	399~405	519~602	622~639	50	35	380~423	573~634	762~766
30	55	286~332	590~630	581~583	50	55	440~445	631~649	708~735
30	70	349~379	552~579	579~619	50	70	388~444	588~590	800~802

Table 6. Multi-regression analysis results of sample(wet condition)

Variable	Corrosion (g)=Y+X1×(cover depth)+X2×(W-C%)+HCP		
	6 hours	18 hours	42 hours
Y intercept	1.51	5.10	4.99
X1 Cover depth (mm)	-2.15×10^{-2}	-4.34×10^{-2}	-9.62×10^{-2}
X2 W-C	0.83	2.13	5.07
X3 HCP	-1.30×10^{-4}	-3.21×10^{-3}	1.83×10^{-3}
Coefficient of determination	0.76	0.92	0.90

Figure 11은 피복두께에 대한 건조상태와 습윤상태에서의 반전위 측정결과를 나타내었다. 촉진부식 전의 실험체는 피복두께와 무관하게 부식발생 확률이 낮은 -350 mV 이상의 값으로 나타났으나 촉진부식이 진행됨에 따라 부식발생 확률이 급격히 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 피복두께 70 mm에서는 촉진부식에 따른 뚜렷한 추이변화를 확인하기 어려웠다.

4. 결과 고찰

본 연구는 국내 석조문화재의 모르타르 복원부 상태평가를 수행한 첫 사례로 옥개석 복원부위 내 철근의 부식으로 인한 모르타르 손상 발생 가능성을 예측하였다. 이를 위해 물-시멘트비와 피복두께의 변수를 가진 실험체의 전위값 및 부식량을 이용하여 건조 및 습윤상태의 데이터베이스를 구축하였다. 최종적으로는 측정된 석탑 옥개석 전위값을 이용하여 모르타르 복원부위의 손상 가능성을 예측하였다.

Figure 13. Multi-regression analysis results for corrosion amount and HCP with different acceleration periods(wet condition).

4.1. 실험체 건조상태

건조상태의 손상평가를 위해 부식손상도 평가시점인 6시간, 18시간, 42시간에 대하여 각각의 반전위측정결과를 Table 2에 나타내고 있다. 물-시멘트비, 피복두께, 측정된 반전위의 평균값을 변수로 하여 철근 부식량에 따른 다중회귀분석을 수행하였다. 해당 Table 3, 4와 Figure 12는 건조상태의 다중회귀분석 결과로 측정된 HCP와 철근 부식량은 선형적인 관계를 가지고 있으며 결정계수가 모두 0.86이상의 높은 상관성을 나타내고 있다.

4.2. 실험체 습윤상태

습윤상태의 손상평가를 위해 부식손상도 평가시점인 6시간, 18시간, 42시간에 대하여 각각의 반전위측정결과를 Table 5에 나타내고 있다. 물-시멘트비, 피복두께, 측정된 반전위의 평균값을 변수로하여 철근 부식량에 따른 다중회

Table 7. Results of measurement of cover depth steel by location of roofstone(upper)

East front				West front			
Detections	Cover depth (mm)	HCP (mV)		Detections	Cover depth (mm)	HCP (mV)	
		Dry	Wet			Dry	Wet
1-1	50	-112	-535	6-1	50	-25	-529
2-1	12	-99	-495	7-2	50	-29	-526
3-1	60	-124	-449				
South front				North front			
Detections	Cover depth (mm)	HCP (mV)		Detections	Cover depth (mm)	HCP (mV)	
		Dry	Wet			Dry	Wet
8-1	50	-112	-663	5-1	32	-76	-594
9-1	50	-104	-590	5-2	22	-70	-524
				7-1	50	-133	-559

Table 8. Results of measurement of cover depth steel by location of roofstone(lower)

East front				West front			
Detections	Cover depth (mm)	HCP (mV)		Detections	Cover depth (mm)	HCP (mV)	
		Dry	Wet			Dry	Wet
10-1	30	-198	-431	12-1	30	-43	-535
South front				North front			
Detections	Cover depth (mm)	HCP (mV)		Detections	Cover depth (mm)	HCP (mV)	
		Dry	Wet			Dry	Wet
13-1	50	-105	-590	11-1	30	-67	-496
14-1	25	-100	-559				
14-2	25	-82	-591				
15-1	100	-126	-587				

귀분석을 수행하였다. 해당 Table 5, 6과 Figure 13은 건조 상태의 다중회귀분석 결과를 나타내고 있는데 결정계수는 6시간 실험값의 경우 0.76로 평가되어 비교적 낮은 수준이었으나 나머지 값들에서는 0.90이상의 높은 상관성을 나타내고 있다.

4.3. 옥개석 손상가능성 평가

석탑과 같이 옥외 석조문화재는 강우에 노출되어 건조와 습윤상태를 반복하기 때문에 현장조사 및 실내실험을 이에 따라 진행하였다. 옥개석은 피복두께 평가 및 건조, 습윤상태의 전위측정을 통하여 부식손상 가능성을 평가할 수 있으며 실내실험에서 도출된 높은 상관성을 가진 식을

이용하여 부식손상량의 추정이 가능하다.

3장. 연구결과와 같이 옥개석에 대한 반전위측정값과 피복두께가 명기되어 있는데 이를 이용하여 부식손상량을 추정할 수 있다. ASTM C 876기준에 따르면, 전위값이 -350 mV이하인 경우, 즉 절대값이 350 mV이상으로 평가될 경우 내부 철근은 90%이상 부식이 발생한 것으로 평가한다. 이에 옥개석 상·하단의 피복두께와 반전위 측정 평균값을 정리하면 다음과 같다(Table 7, 8).

옥개석 상단 및 하단의 경우 건조시에는 모두 -200 mV 이상으로 평가되어 부식손상 가능성이 거의 없는 것으로 평가되지만, 습윤조건일 경우 상단은 대부분 -495 mV이하의 값을 보이고 있어서 부식손상가능성이 90%이상인 것으

Table 9. Evaluation of corrosion amount of upper of roofstone

East front				West front			
Detections	Cover depth (mm)	Usable	Corrosion amount (g)	Detections	Cover depth (mm)	Usable	Corrosion amount (g)
1-1	35	wet (18 hours)	1.96~2.38	6-1	41	wet (18 hours)	1.98~2.40
2-1	12	wet (18 hours)	3.88~4.31	7-2	38	wet (18 hours)	1.99~2.41
3-1	55	wet (18 hours)	1.80~2.23				
South front				North front			
Detections	Cover depth (mm)	Usable	Corrosion amount (g)	Detections	Cover depth (mm)	Usable	Corrosion amount (g)
8-1	50	wet (18hours)	1.55 ~ 1.98	5-1	26	wet (18hours)	2.55~2.98
9-1	50	wet (18hours)	1.78 ~ 2.21	5-2	22	wet (18hours)	2.98~3.41
				7-1	39	wet (18hours)	1.77~2.20

Table 10. Evaluation of corrosion amount of lower of roofstone

East front				West front			
Detections	Cover depth (mm)	Usable	Corrosion amount (g)	Detections	Cover depth (mm)	Usable	Corrosion amount (g)
10-1	30	wet (6 hours)	1.10~1.26	12-1	23	wet (18 hours)	2.83~3.25
South front				North front			
Detections	Cover depth (mm)	Usable	Corrosion amount (g)	Detections	Cover depth (mm)	Usable	Corrosion amount (g)
13-1	45	wet (18 hours)	1.78~2.21	11-1	30	wet (18 hours)	2.95~3.38
14-1	25	wet (18 hours)	2.97~3.39				
14-2	25	wet (18 hours)	2.86~3.29				

로 평가되었다. 하단 역시 -431 mV이하의 값을 가지고 있으며, 최대 -587 mV가 측정되기도 하였다. 물-시멘트비는 전술한 대로 35~70% 범위로 실내실험 데이터베이스를 기초하고 내부 매립철근의 부식량을 추정한 결과를 정리하였다(Table 9, 10). 수분 포화상태와 같이 피복두께에 따른 철근 부식량은 상당한 차이를 보이고 있으며 피복두께가 증가할수록 부식량은 현저히 감소하는 경향도 확인할 수 있

다. 하지만 피복두께 측정결과와 같이 25~30 mm 내외에 위치한 철근이 많기 때문에 부식인자에 의한 손상이 보다 높을 것으로 예측된다.

4. 결 론

원주 법천사지 지광국사탑은 한국전쟁 시 폭탄피해로

부재 상당수가 파손되었다. 특히 옥개석은 수십 조각으로 파손되었으며 부재의 47%이상을 모르타르로 복원하였다. 본 연구에서는 석탑 옥개석의 모르타르 복원부위 제거 범위 결정에 필요한 공학적 기초 데이터 제공을 목적으로 외부 노출 철근과 매립 철근에 대한 피복두께와 반전위 측정을 수행하였다. 또한 모르타르 복원부의 물-시멘트비를 감안한 실내 촉진 실험을 통하여 부식 손상가능성을 평가하였다. 석탑 옥개석 탐사 결과와 실내 실험의 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. RC-RADAR를 이용한 철심의 위치 정보 및 피복두께 측정 결과, 옥개석에는 총 17개소(중복 1개소)에서 철심이 탐지되었으며, 탐지된 철심 위치에서의 피복두께는 전반적으로 25~50 mm로서 철근 부식 인자가 충분히 철심부에 도달할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

2. 3수준의 물-시멘트비(35, 55, 70%)와 4수준의 피복두께(20, 30, 40, 50 mm)를 시험변수를 고려한 모르타르 실험체를 총 74개 제조하였으며, 6시간, 18시간, 42시간 동안 20 V로 촉진부식하여 부식량 및 반전위 측정을 수행하였다. 해당 내용에 대한 다중회귀분석결과, 결정계수 0.86 이상의 높은 상관성을 도출하였으며, 이 식을 이용하여 부식 손상가능성 평가 및 부식량을 산정하였다.

3. 옥개석 외부 노출 철근의 부식손상가능성을 평가한 결과, 건조상태에서는 -200 mV이상의 전위값을 가지고 있으므로 철근의 부식가능성은 10%이하로 매우 낮았으나, 습윤상태에서는 모두 -430 mV이하의 전위 값을 나타내고 있으므로 옥외에 노출되어 있는 동안 부식이 상당히 진행되었을 것으로 예측된다.

4. 다중회귀분석을 통하여 부식량을 산정한 결과 습윤상태의 옥개석 상단부는 전위측정값이 -449~-663 mV수준이었으며, 하단부는 -431~-591 mV수준으로 평가되었고 부식량은 상단부 1.55~4.31 g, 하단부 1.10~3.39 g으로 평가되었다. 가장 취약한 조건은 옥개석 동측면 2-1지점의 피복두께 12 mm로 부식량은 최소 3.88 g, 최대 4.31 g으로 평가되었다.

5. 제안된 다중회귀분석식 및 철근부식관련 DB를 활용하여 옥개석 손상의 상관성을 확인한 결과, 습윤상태에서는 측정된 전 면적에서 전위 값이 -350 mV이하로 측정되었으므로 부식손상 가능성은 모두 90%이상인 것으로 평가되었다.

6. 현재 석탑 옥개석의 모르타르는 반전위 측정시 전위 값이 -431~-663 mV범위이며(습윤상태 기준), 부식예측량

또한 1.10~4.31 g수준으로 평가되었다. 따라서 추가적인 균열과 표면박리·박락, 구조적 손상 등이 예상되기 때문에 부식 철근과 손상된 모르타르를 제거한 후 신식재를 사용한 복원이 필요한 것으로 판단된다.

7. 해당 연구는 향후 모르타르의 파괴분석을 통한 중성화 시험, 기공도 및 공극율 평가, 철근과의 접합 상태를 명확히 밝힌 후 상호 교차검증이 필요한 부분이다. 따라서 추후 연구를 통해 분석 데이터의 상관성을 밝힐 예정이다.

사 사

본 연구는 국립문화재연구소 문화유산조사연구(R&D)사업의 일환으로 사)한국콘크리트학회와 공동으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

REFERENCES

- ASTM C876-09, 2009, Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. 1-6.
- Cultural Heritage Administration, 2004, Meeting of the 5th department of architecture and cultural heritage committee. 29-36. (in Korean)
- Cultural Heritage Administration, 2018, Monthly cultural heritage love. 161, 28-29. (in Korean)
- Cultural Heritage Conservation Science Center, 2015, Report of precise nondestructive diagnosis for Buddhist Stupa of Priest Jigwang in Beopcheunsaji temple site at Wonju. Kongju National University Industry-University Cooperation Foundation, 1-302. (in Korean)
- Cultural Heritage Conservation Science Center, 2017, Report of conservation and restoration of State Preceptor Jigwang Stupa from Beopcheonsa temple site in Wonju. 1-198. (in Korean)
- Elsener, B., Andrade, C., Gulikers, J., Polder, R. and Raupach, M., 2003, Half-cell potential measurements — potential mapping on reinforced concrete structures. Materials and Structures, 36(7), 461-471.
- Kim, K.B., Park, K.T. and Kwon, S.J., 2013, Variation of half cell potential measurement in concrete with different properties and anti-corrosive condition. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 17(6),

- 95-103. (in Korean with English abstract)
- Kwon, S. J. and Song, H. W., 2010, Analysis of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation modeling. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 119-127. (in Korean with English abstract)
- National Museum of Korea, 1957, Report on the reconstruction of the stupa of state preceptor Jigwang from Wonju Beopcheonsa temple site. 1-56. (in Korean)
- Ryu, H.S., Park, J.S. and Kwon, S. J., 2017, Relationship between half cell potential and corrosion amount considering saturated cover depth and W/C ratios in cement mortar. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(3), 19-26. (in Korean with English abstract)
- So, H.S., 2006, Environmental influences and assessment of corrosion rate of reinforcing bars using the linear polarization resistance technique. *Journal of Korea Architecture Institute*, 22(2), 107-114. (in Korean with English abstract)
- Song, H.W., Lee, C.H. and Lee, K.C., 2009, A study on corrosion potential of cracked concrete beam according to corrosion resistance assessment. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 13(1), 97-105. (in Korean with English abstract)
-