경주 불국사 삼층석탑(석가탑) 파손원인에 관한 연구

A Study on the Damage of the Three Storied Stone Pagoda
of *Bulguksa* Temple in *Gyeongju*

지 성 진*

Ji, Sung-Jin

(국립문화재연구소 건축문화재연구실 학예연구사)

Abstract

The purpose of this study is to analyze the cause of damage to the three storied stone pagoda of Bulguksa temple in Gyeongju. This report is attempted to making reinforcement and conservation plan through investigating and analyzing the cause of damage to that.

The damage is caused by occurring of stress, degrading of stone strength, changing of underground soil structure, natural disasters and so on. Compressive stress, shear stress, bending stress and lateral pressure affected to the pagoda since built up. Ultrasonic examination data tells the strength of the stone. According to this result, strength of the stereobate stone materials is enough to support the weight of the upper ones. But we could found many other factors of the damage could consider, for example the problems occurred on building the pagoda construction and the weakness of the stone material(soft rock). And many environmental factors being changed in soil structure(subsidence of soil and degradation of bearing power of soil and freezing and melting of soil) can be seen as the cause of the damage. Natural disasters like earthquake, lightning and heavy rain were also thought to give direct impact to the damage. At last Concentration of compressive stress caused the crack and exfoliation on the stone materials and shear stress, bending stress and lateral pressure were main causes of the stereobate stone materials shearing.

주제어 : 경주 불국사 삼층석탑, 석가탑

Keywords: The Three Storied Stone Pagoda of *Bulguksa* Temple in Gyeongju, *Seokgatap* Pagoda

1. 머리말

국보 제21호 慶州 佛國寺 三層石塔(일명 釋迦塔)은景德王 원년(742, 天寶원년)에 창건¹⁾되었다. 이후 고려 정종 4년(1038)에 전면 해체수리 되었으며, 1966년에는 2층 옥개석까지 해체수리 되었다. 1970년대 초에는 소실되었던 상륜부의 복원이 이루어졌다. 이후 2010년 12월

북동측 상층기단 갑석에서 균열이 발생하여, 2011년부터 석탑 전면 해체수리²⁾에 착수하였다.

해체수리가 완료된 지 반세기 만에 새로운 균열이 발생한 사실은, 석탑을 구성하는 석재의 재료적 특성인 항구성과는 상충되는 부분이라 할 수 있다. 특히 기단부의 부재가 두 조각으로 절단되어, 탑신부와 상륜부의 하중을 지지하는 조건에 변화가 생긴 것은 석탑에 구조적 문제점이 발생하였음을 암시하는 것으로 볼 수 있다. 그리고 구조적 문제가 발생하였다면 2차, 3차 파손이 생길 가능성도 적지 않다.

이에 본 연구는 경주 불국사 삼층석탑(이하 불국사 삼층석탑)에서 확인된 부재의 파손 현황을 살펴보고, 파손

* Corresponding Author : jsj79@korea.kr

본 연구는 문화재청 국립문화재연구소 건축문화재연구실에서 추진 중인 중요석조문화재 수리복원 사업 연구과제의 일환으로 진행되고 있는 '경주 불국사 삼층석탑 보수 사업'(국립문화재연구소·경주시) 추진에 따른 성과이다. 별도의 표기가 없는 도판 및 사진, 도면 등 수록 자료는 국립문화재연구소 경주석조문화재보수정비사업단에서 생성한 것이다.

1) 西石塔重修形止記, 1966년 해체수리 당시 경주 불국사 삼층석탑(석가탑)의 수리연혁을 보여주는 '西石塔重修形止記'가 사리장엄구와 함께 발견되었다. 서석탑중수형지기는 고려 정종 때 석탑의 중수과정을 기록한 것으로 고려시대 석탑 해체수리와 관련한 사항을 알려준다.

2) 북동측 상층기단 갑석에서 발생한 균열의 길이는 1,320mm, 균열의 최대 너비는 5mm로 확인되었다. 이에 따라 건축문화재위원회 안전번호 2010-14-21(2010년 12월)로 검토하였으며, 해체수리가 결정되었다.

의 원인을 밝히는 것을 목적으로 하며, 이를 통해 석탑 보수 시 파손의 원인을 효율적으로 제거할 수 있도록 하는데 기여하고자 한다.

이 연구는 국립문화재연구소에서 2012~13년 해체과정 중 조사한 각종 조사 자료와 옛 문헌 및 과거 사진자료 등을 분석하여 불국사 삼층석탑의 파손현황을 검토하고, 석탑의 구조, 구성 재료, 지반 지지조건, 자연재해 등과 관련시켜 봄으로 파손원인을 밝히고자 하였다. 또한 파손 원인에 대한 대응책을 제시하여 후속되는 연구의 밑거름이 될 수 있도록 하고자 한다. 이 연구가 석탑에 대한 보수·보강 방안 연구에 도움이 되어 우리 문화유산이 후대에 온전히 전수될 수 있기를 기대한다.

2. 불국사 삼층석탑 현황

2-1. 석탑의 형태 및 구성

불국사 삼층석탑은 통일신라시대의 전형적인 석탑으로 이층의 기단 위에 3층의 탑신을 올린 형식이다. 상륜부는 1972년 남원 실상사 삼층석탑의 형식을 참고하여 불국사 삼층석탑의 비례체계를 반영하여 복원³⁾한 것이다.

Fig.1 The three storied pagoda of *Bulguksa* temple in Gyeongju(SE)

3) 文化財管理局, 『佛國寺 境内 整備報告書』, 1976, P.170

상륜부는 노반, 복발, 양화 등 다양한 부재로 구성된 다. 찰주는 길이 3.97m로 3층 옥개석의 찰주공에 꽂혀 있다. 상륜부를 구성하는 부재들은 가운데 圓形孔을 두어 찰주를 통과시켜 적재할 수 있도록 되어 있다.

탑신부는 지붕면과 층급받침으로 구성된 옥개석과 탑신석으로 구분되며, 각각 단일석재로 이루어져 있다. 기단부는 가구식 기단으로 내부에는 흙과 돌로 채워져 있다. 지대석은 하층기단 면석과 일체형으로 제작되어 있으며, 하부 기초 및 초반석에 의해 지지되어 있다.

상륜부를 구성하는 부재의 수는 노반~보주까지 17개 부재와 철제 찰주 1개, 탑신부는 6개 부재, 기단부는 상층기단 8개 부재, 하층기단 12개 부재로 되어 총 44개 부재로 구성된다. 지대석 외곽의 팔방금강좌 8개 부재와 21개 장대석을 포함하면 총 73개가 된다. 상·하층 기단내부는 석재와 흙을 혼용하여 구성한 적심구조로 되어 있다.

Tab.1 The size chart(South side, measuring unit : mm/ton)

Location		Width (상단/하단)	Height	Pieces	Weight(t)	
相輪部 Stupa Finial	刹柱	36/73	3970	1	0.130	
	寶珠	149	116	1	0.006	
	龍車	171	146	1	0.008	
	水煙	118/226	421	1	0.036	
	水煙臺石	195/334	233	1	0.023	
	寶蓋	651	161	1	0.077	
	寶蓋臺石	188	122	1	0.009	
	寶輪4	487	120	1	0.041	
	寶輪臺石4	175	150	1	0.010	
	寶輪3	489	131	1	0.045	
	寶輪臺石3	190	155	1	0.011	
	寶輪2	521	165	1	0.060	
	寶輪臺石2	211	179	1	0.017	
	寶輪1	531	160	1	0.066	
	寶輪臺石1	286	175	1	0.022	
	仰花	250/453	264	1	0.064	
	覆鉢	482	250	1	0.074	
	露盤	635/905	429	1	0.950	
塔身部 Superimposed Stories	3層	屋蓋石	1943	684	1	3.482
		塔身石	1337	410	1	1.150
	2層	屋蓋石	2304	784	1	6.280
		塔身石	1510	612	1	2.630
	1層	屋蓋石	2661	657	1	7.400
		塔身石	1570	1345	1	7.900
基壇部 Foundation	上層 氣團	甲石	3124	396	4	6.930
		面石	2876	1040	4	10.095
	下層 基壇	甲石	4433	359	4	10.446
		面石	4245	188	8	10.519
		地臺石	4396	312		

석탑의 남측면을 기준으로 하여 측정한 높이는 10.635m이며 하층기단 너비 4.433m, 높이 0.859m, 상층기단 너비는 3.124m, 높이 1.436m, 1층 탑신부 탑신 너비 1.57m, 옥

개석 너비 2.661m, 높이 2.029m, 2층 탑신부 탑신 너비 2.304m, 옥개석 너비 2.304m, 높이 1.425m, 3층 탑신부 탑신 너비 1.337m, 옥개석 너비 1.943m, 높이 1.102m, 상륜부의 높이는 3.781m이다. 각부 구성부재의 세부치수는 <Tab.1>⁴⁾과 같다.

2-2. 파손현황

불국사 삼층석탑에 발생한 파손부는 상륜부, 탑신부, 기단부에 전체적으로 분포하고 있으며, 균열에 의해 이미 탈락된 부분도 상당하다. <Fig.2>는 균열 및 탈락된 파손부의 조사현황을 도식화한 것이며, <Fig.3~Fig.12>는 각 부의 현황사진이다. 조사결과를 정리하면 <Tab.2>와 같다.

Fig.2 The damage in the pagoda

상륜부의 경우 보주에서 균열이 발생하였으며, 보륵에 조각된 귀꽃에 균열이 발생하여 탈락되었다. 접합된 흔적이 2개소, 유실된 부분이 1개소 확인된다. 보륵받침3 및 양화에서는 가로방향의 균열이 확인되며, 노반은 상

4) 본 데이터는 불국사 삼층석탑 해체 과정에서 국립문화재연구소 경주석조문화재보수정비사업단 조사한 자료를 토대로 작성하였다.

Fig.3 Crack in BoRyun

Fig.4 Crack in 2nd floor body stone(W)

Fig.5 Broken edge column in body stone(SW-2f, 3f)

Fig.6 Crack in upper stereobate cover stone(NE)

Fig.7 Vertical Crack on Edge in Upper Ground Stone(NE)

Fig.9 Crack in lower stereobate cover stone(NW)

Fig.10 Crack in lower stereobate cover stone(SW)

Fig.11 Crack in lower stereobate cover stone(SW)

Fig.12 Crack in ground stone(SE)

면 모서리 부분이 파손되어 있다.

탐신부의 경우 옥개받침석 최하단과, 탐신의 우주에서 균열과, 균열에 의한 탈락부분이 다수 확인된다. 3층 탐신의 경우 북서측 일부⁵⁾가 균열, 절단되어 상면에 꺾쇠를 삽입하여 접합 보수한 흔적을 볼 수 있다.

상층기단 갑석과 하층기단 갑석은 균열에 의한 부재분리가 확인된다. 북동측 상층기단 갑석은 탐신받침 인접 부위에 동-서 방향으로 균열이 발생하여 부재가 두 조각으로 절단되었다. 북서측 하층기단 갑석은 부재가 네 조각으로 분리되어 접합된 흔적을 확인할 수 있으며, 남서측, 남동측 하층기단 갑석은 각각 두 조각으로 분리되어 있다. 기단 갑석에서 발생한 균열은 탐신에서 각부 갑석의 모서리 방향인 대각선 방향으로 균열이 발생한 것을 볼 수 있다.

상층기단 면석과 하층기단 면석은 탐신석과 유사한 양상의 균열이 확인된다. 우주 일부분의 균열 탈락, 상단 및 하단의 탈락 등이 확인된다.

Tab.2 The situation of damage

Name		Location	Situation
相輪部	寶珠	남측, 북서측, 북동측	균열
	寶輪4	남측, 남동측	접합보수
	寶輪臺石3	남동측	균열
	寶輪1	북동측	탈락
	仰花	동측	균열
	露盤	남동측, 북서측	모서리 파손
塔身部	3層	屋蓋石	북측
		塔身石	북서측
			보수(파손)
	2層	屋蓋石	서측
		塔身石	북동측, 남서측, 서측
	1層	屋蓋石	북동측
		塔身石	남동측, 남서측, 북동측
基壇部	上層氣團	甲石	북동측, 북서측, 남동측
		面石	북서측, 북동측
			서측, 북측, 북동측
	下層基壇	甲石	남동측, 북서측
		面石	남동측, 남측, 동측, 북측, 북동측
			地臺石

한편, 일제강점기 사진과 1966년 수리 당시의 사진, 2011년 해체과정에서 확인된 내용은 각 부위의 균열시점을

5) 북서 모서리로 부터 남-515mm, 동-290mm에 지점 균열이 확인된다.

Fig13 South-west side, 1916(朝鮮古蹟圖譜 IV)

Fig.14 East side(1925)

Fig.15 Deconstruct(1966)

Fig.16 Broken part(1966)

Fig.17 Broken edge in BoRyun(2006)

Fig.18 Broken Piece of BoRyun(2006)

알려주는 자료로 활용할 수 있다.⁶⁾ <Fig.13>과 <Fig.14>는 일제강점기 촬영사진으로 서측면 상, 하층기단 갑석, 남측 하층기단 갑석에서 균열과 부재탈락 발생이 확인된다. 1층 탑신석의 남서, 남동측 우주하단, 2층과 3층 탑신석 남서측 우주의 일부가 탈락되었음을 볼 수 있다.

<Fig.15>와 <Fig.16>은 1966년 보수공사 당시의 모습인데, 당시의 기록을 통해 2층 옥개석이 3층 탑신 위로 추락하는 사고가 있었으며, 당시의 충격에 의해 3층 탑신, 2층 옥개석, 상층기단 갑석에 파손이 일어났음을 알 수 있다.⁷⁾

1972년 상륜부 복원 이후 발생한 균열로는 2006년 보륜4 연화의 탈락<Fig.17, Fig.18>이 있으며, 2010년 국립문화재연구소 정기안전점검에서 확인된 북동측 상층기단 갑석에서 발생한 균열이 있다. <Tab.3>은 각 시기별 파손발생 시점을 구분하여 정리한 것이다.

Tab.3 The situation of damage by period

Period	Location	Damage
일제강점기 이전	상륜부	찰주 절단 양화 상부 소실
	3층 탑신석	우주 파손
	2층 탑신석	우주 파손
	1층 탑신석	우주 파손
	북서측 하층기단 갑석	균열(4조각)
	남서측 하층기단 갑석	균열(2조각)
1966년 이전	남동측 하층기단 갑석	균열(2조각)
	3층 탑신석	파손
	2층 옥개석	파손
2011년 이전	남동측 상층기단 갑석	파손
	보주	균열(3조각)
	보개	귀꽃부분 탈락
	북동측 상층기단 갑석	부재균열

3. 파손원인

3-1. 응력발생

불국사 삼층석탑의 상륜부와 탑신부는 각 층 혹은 매 단마다 단일부재로 이루어져 있다. 이러한 구조는 조적식 구조와 유사하여 전단응력⁸⁾, 휨응력⁹⁾, 측압¹⁰⁾ 등이

6) <Fig.14> : 성균관대학교 박물관, 『慶州 新羅 遺跡의 어제와 오늘 - 석굴암 · 불국사 · 남산』, 2007

<Fig.15~Fig.16> : 정영호, 진홍섭, 황수영 『佛國寺 三層石塔 舍利具와 文武大王海中陵』, 한국정신문화연구원, 1998

7) 정영호, 「佛國寺三層石塔 調査経緯」, p. 1~40, 『佛國寺三層石塔舍利具와 文武大王海中陵』, 한국정신문화연구원, 1998

8) 물체 내 하나의 단면상에 단면에 따라 크기가 같고 방향이 반대인 한 쌍의 힘이 작용하여 물체를 그 단면에서 절단하도록 하는 하중으로, 그림과 같이 재료를 가위로 자르듯이 절단하는 하중에 생기는 응력을 말한다. 『보일러용어사전』, 일본보일러용어 연구회편, 2006

작용할 가능성이 적어 석탑을 쌓기에 적절하다.

반면, 기단부는 조적식 구조와는 차이가 있다. 상층기단의 경우 갑석과 면석이 각각 4매의 부재로 되어 있고, 하층기단은 갑석 4매, 면석과 지대석이 한 석재에 조각되어 8매로 되어 있다. 내부는 중심부에 큰 석재를 놓고, 주변에 잔석재와 흙을 혼용하여 구성하였다.

이러한 구조는 전단응력과 휨응력이 발생할 가능성이 크다. 그 이유는 각 갑석의 하중을 지지하는 면석과 적심이 각각 다른 재료로 구성되어 각부 허용압축력에 차이가 있기 때문이다. 또한 흙과 석재로 이루어져 우수, 바람 등에 영향을 받는 적심은 형태·구조적으로 변형이 일어나기 쉬워 외측에 있는 부재를 바깥으로 밀어내는 측압과 전단력, 인장력 등 다양한 응력이 발생할 수 있는 조건이다.

즉 불국사 삼층석탑 기단부에는 압축력, 전단력, 휨응력, 측압 등이 동시에 작용하는 것으로 볼 수 있으며, <Fig.19>의 도식과 같이 정리할 수 있다.

Fig.19 Stress distribution drawing

9) 부재축에 직각인 횡단면에 작용하는 휨 모멘트에 의하여 발생하는 직응력(直應力). 휨 응력은 중립축을 경계로 하여 정(正)·부(負)가 다른 직선형의 분포를 이루는데 한쪽은 압축 응력, 다른 쪽은 인장 응력이다. 『토목용어사전』, 토목관련용어편찬위원회, 1997

10) 유체, 분체(粉體), 입체(粒體) 등이 용기 또는 이들에 접하는 물체의 측면에 작용하는 압력. 예를 들면, 옹벽, 지하벽, 거푸집널, 시트 파일 등에 작용하는 토압. 거푸집에 가해지는 콘크리트의 수평방향의 압력, 분체, 입체의 Silo벽에 미치는 압력, 『건축용어사전』, 현대건축관련용어편찬위원회, 2011

압축력의 집중현상은 각 부재를 쌓는 과정에서 불가피하게 발생한다. 개별 부재를 쌓는 과정에서의 기울어짐, 부재면의 치석 차이에서 생기는 미세한 차이 등을 보완하기 위해 삽입하는 고임쇠, 각 부재와 부재가 맞닿는 면의 돌출부 등 지지점의 면적이 작은 부위에는 압축력이 집중된다. 집중하중이 가해지는 조건이 지속되고, 풍화현상 등 석재의 허용 압축강도가 약화될 경우, 미세균열이 발생하게 된다. 이러한 모습은 상층기단 면석 <Fig.7>과 남동측 지대석<Fig.12>에서 볼 수 있다. 남동측 지대석은 받침석이 다른 부분에 비해 높게 위치하는데, 이 받침석 상부의 하중이 집중됨에 따라 발생한 수직방향의 균열이 발생한 것을 볼 수 있다. 상층기단 면석의 경우 우주 모서리 부분에 집중하중이 작용하면서 수직방향의 균열이 발생한 것을 볼 수 있다.

미세균열이 발생한 이후에도 집중하중이 계속 작용할 경우 부재의 탈락에 이르게 된다. 미세균열은 점차 간격이 확장되어, 균열이 부재 외곽까지 이르게 되면서 일부분이 탈락하게 되는 것인데, 이러한 양상은 남서측 탑신의 2층과 3층 탑신<Fig.5>의 우주 모서리 부분에서 모서리 외측 부분이 탈락되어 소실된 모습에서 볼 수 있다.

한편 기단부에서 발생하는 전단력과 휨응력의 발생은 부재 전단파괴의 원인이 된다. 전단력과 휨응력은 상부의 하중을 지지하는 지지점이 소실되면서 지지가 되지 않는 부분 주변으로 두 점 이상의 지지점이 생기게 되면서 발생하는데, 불국사 삼층석탑은 해체과정을 통해 상층기단부에서 적심부와 면석 사이의 지지점이 소실되었음이 확인되었다.

<Fig.20>은 불국사 삼층석탑 북동측 상층기단 갑석해체 과정에서 조사된 3D 스캔 데이터로, 지지점이 소실된 적심내부 상태와 이에 따른 균열의 모습을 보여준다. 이 그림은 해체 전 상층기단 갑석을 3D 스캔하여 작성한 데이터와 상층기단 갑석해체 이후 상층기단 면석과 상층기단 내부적심 현황을 3D 스캔하여 작성한 데이터를 병합한 것이다. 해체 전 외곽에 대한 3D 스캔 데이터를 기준으로 하여 각 부재의 위치에 맞게 배치한 결과를 보면 상층기단 갑석하부에 지지가 되는 점을 확인할 수 있는데, 대부분의 공간에서 지지점이 상실되고 상층기단 적심 내부 일부(Support point 1)와 상층기단 면석 일부(Support point 2)에서만 상층기단을 지지하고 있음을 확인할 수 있다. 지지점을 제외한 부분에서는 크기는 5cm 이상 간극이 존재하고 있었음을 볼 수 있다.¹¹⁾

11) 1972년에 복원된 상륜부 중 보륜부터 찰주를 포함한 보주까지의 부재 중량 약 0.56ton의 하중 증가와 간극발생에 의한 하중 집중

Fig.20 Stress distribution chart drawing

Fig.21 The empty space between upper stereobate cover stone with inner side (NE)

Fig.22 The empty space between lower stereobate cover stone with inner side (NE)

점의 발생은 2010년 발생한 북동측 상층기단 갑석의 균열의 원인 중 하나로 작용하였을 것으로 생각된다.

이러한 양상의 하중지지는 동일부재의 다른 지점에 하중을 가함으로 전단응력과 휨응력 작용을 유발하게 된다. 또한, 기단내부 적심석에서 발생하는 측압은 이러한 전단력과 휨응력의 발생을 가중시킨다. 측압의 작용은 면석을 외부방향으로 밀어내면서 기단 내부 적심석의 침하를 가져오기 때문이다.

이러한 전단응력, 휨응력의 작용에 따른 균열은 압축응력의 작용에 의한 것과는 다른 양상의 균열을 발생시키는 것을 볼 수 있다. 하중을 받는 부재가 양분되거나 큰 조각으로 절단되는 균열양상이 주로 나타나게 되는데, 이러한 모습은 북동측 상층기단 갑석, 북서측, 남서측 하층기단, 남동측 하층기단 갑석에서 볼 수 있다.

3-2. 석재강도 저하

불국사 삼층석탑을 구성하는 석재의 강도는 균열과 직접적인 연관관계가 있다. 부재의 강도는 초음파 속도법을 통해서 추정할 수 있다. 2011년 국립문화재연구소에서는¹²⁾ 상·하층 기단을 대상으로 총 1,367개소에 대한 초음파를 이용한 비파괴시험으로 석재의 강도를 추정하였다.

전체 석재에 대한 추정압축강도는 10.9MPa(898m/sec)에서 41.6MPa(3,217m/sec)의 범위 내에서 분포하고 있다. 측정위치에 따라 최대 30.7MPa(2,319m/sec)의 편차를 보이고 있는데 전체 평균 추정압축강도는 19.4MPa(1,875m/sec)를 나타내고 있다. 초음파 속도에 의한 기단부의 암반분류를 보면 전체의 99.71%가 초음파 속도 1.2~2.5km/sec에 해당하는 연암으로 확인되며, 풍화암이 0.22%, 보통암이 0.07%에 지나지 않아 연암으로 판단¹³⁾된다.

이와 같은 측정 자료를 통해 기단부가 지지할 수 있는 압축강도를 역산정할 수 있다. 간접법으로 측정된 초음파속도를 직접법초음파속도로 재산정하고, 다시 직접법 초음파 속도를 일축압축강도로 변환¹⁴⁾하였다. 직접법 초음파속도를 구하는 수식은 국립문화재연구소 문화재보존 지침서¹⁵⁾에서 발표된 공식을 활용하였으며, 압축강도는 지구물리학회 논문¹⁶⁾에서 발표된 공식을 활용하였다.

12) 초음파측정 시 단자의 접속방법은 석재 표면에서만 측정이 가능한 관계로 대상 면에 일정간격으로 평행하게 배치하는 간접법을 적용하여 측정하였다. 『불국사 삼층석탑 균열원인 조사 분석 연구 보고서』, 국립문화재연구소, 2011

13) 한국 엔지니어링 진흥협회 표준품셈의 암반분류기준에 따른다

14) 일축압축강도 변환 시 사용한 보정계수는 1.51로 남산화강암에 대한 보정계수이다.

15) 『초음파탐사를 이용한 석조문화재 풍화도 비파괴 평가기법』, 국립문화재연구소, 문화재보존지침서, 2012, P.08~09

16) 서만철, 송인선, 최희수, 「초음파 속도 분석을 통한 불국사 다보탑구조안전진단」, 지구물리학회, 2002, Vol. 5, P.201~203

$$V_p = 'V_p \times 1.51$$

$$C_0 = 66.039 \times \exp(0.000578598 \times V_p)$$

V_p =직접법초음파속도, $'V_p$ =간접법초음파속도

C_0 =일축압축강도, 1.51=남산화강암에 대한 보정계수

이 수식을 사용하여 산정한 일축압축강도의 값은 <Tab.4>와 같다. 이 결과값과 해체 과정에서 측정된 석탑 부재의 중량을 상호 비교해 보면 상부하중 지지가능 여부를 판단할 수 있다. 1층 탑신 바닥의 면적 2.46m¹⁷⁾을 상층기단 갑석의 일축압축강도에 적용하면 상층기단 갑석에서 받을 수 있는 상부하중은 수치상으로 78.03~103.27ton이 된다. 1층 탑신부 이상에 위치한 부재의 개별하중을 합산하면 총30.491ton인데, 이 경우 상층기단 갑석이 지지할 수 있는 허용하중의 30~37%에 지나지 않음을 알 수 있다. 따라서 기단부의 부재는 상부 하중을 충분히 견딜 수 있는 상태로 판단할 수 있다.

Tab.4 Ultrasonic sensing result on the pagoda

Location			간접법 (Mpa)	간접법 (m/s)	직접법 (m/s)	일축압축강도 (ton/m ²)
基壇部	上層氣團	甲石	20.9~22.6	1,977~2,117	2,985~3,197	37.15~41.98
		面石	19.2~19.5 16.0(남측)	1,796~1,899 1,556(남)	2,712~2,867 2,350(남)	31.72~34.70 25.72
	下層基壇	甲石	18.4~19.4	1,796~1,899	2,712~2,867	31.72~34.70
		面石	18.3~19.7	1,794~1,915	2,709~2,892	31.66~35.19

그럼에도 불구하고 부재의 거칠기, 기울기, 수평을 맞추기 위한 철판의 삽입을 감안하면 상부 하중을 지지할 수 있는 면적 즉 1층 탑신 바닥면과 상층기단 갑석 윗면의 맞닿는 면적은 상당히 줄어들게 되어 각 부에 작용하는 하중이 부재가 지지할 수 있는 하중을 넘어설 가능성이 적지 않다. 또한 부재의 강도가 연암에 해당한다는 점을 고려한다면 균열 파손과 연관관계가 없다고 단정 짓기는 어렵다

한편, 2010년에 발생한 균열과 초음파 강도측정을 통한 암석의 강도치를 비교하여 보면, 석재강도 저하와 균열과의 관계를 보다 명확히 알 수 있다. <Fig.23>은 석탑 기단부 동측면에서 측정된 추정 압축강도치를 도식화하여 표현한 것이다. 어두운 색으로 표현된 부분이 강도가 약한 부분으로 국부적으로 강도저하가 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 균열 발생부위인 북동측 상층기단 갑석의 초음파 강도측정치는 다른 부분과 별 차이가 없

17) 계산식 : 1.57m × 1.57m = 2.4649m²

며, 남동측 상층기단 갑석 보수부위(1966년 훼손), 상층기단 면석의 우주석, 하층기단 갑석의 일부에서 강도저하가 나타나는 현상을 볼 수 있다.

Fig.23 The intensity of stereobate stone by ultrasonic sensing(2011, East side)

이러한 특성은 석재의 강도저하가 진행되면서, 각부에 존재하는 암석의 미세균열이나, 박리박락에 의한 변화에 따라 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 균열이 발생할 위험이 있는 부분에서 강도저하가 가속되고, 균열, 탈락의 원인이 되는 것이다.¹⁸⁾

한편 1972년 새로 제작한 상륜부 보주와 보개에서 발생한 균열은 석재가 가지고 있는 미세균열에 의한 것으로 판단된다. 미세균열은 암석 자체에 내재하고 있는 균열로서, 형태를 다듬는 과정에서 피로도가 누적됨에 따라 점차 균열의 범위가 커진다. 이러한 균열이 부재 표면에서 내부까지 전체적으로 발생할 경우에는 기온변화, 비바람 등 약한 외력에 의해서도 부재가 파손되는 결과를 가져올 수 있다.

3-3. 지반구조 변화

불국사 삼층석탑의 지반구조는 2001년과 2011년에 탄성파탐사, GPR탐사, 전기 비저항탐사 등의 비파괴조사법으로 조사되었다.

2001년에 조사된 내용¹⁹⁾을 보면, 석탑 주변 지반에 대한 탄성과 탐사 결과 풍화토~연암 지반이 주변보다 깊게 지하 약 6m까지 구축되어 있는 것으로 조사되었으며, 북측면 펜스 부분은 탄성과 속도가 주변보다 낮게 나타나 연약지반으로 추정하였다. GPR탐사에서는 인위적으

18) 석조문화재(홍인지문과 함평고막천석교)의 구제와 신재를 대상으로 직접파괴시험을 실시하였던 기존의 자료를 분석해 보면 홍인지문의 경우는 화강암 구제의 일축압축강도가 신재의 58.06%(70.61MPa) 정도의 강도 값 보이고 있으며, 함평고막천석교의 경우는 화강암 구제가 신재 대비 72.5%(72.96MPa), 변성암 구제가 신재 대비 56.76%(71.76MPa) 정도의 강도 값을 보이고 있다. 조선 초에 축조되어 시기가 비슷한 홍인지문과 함평고막 천석교의 구성석재 강도 값은 약 600여년이 경과하면서 구제의 풍화로 인해 신재에 비해 30~40%정도 내구성이 저하되어 있는 것을 알 수 있다. 불국사 삼층석탑 균열원인 조사 분석 연구보고서, 국립문화재연구소, 2011, p.194

19) 『불국사3층석탑(석가탑) 정밀안전진단보고서』, 경주시, (주)고려구조ENG, 2001. 9

로 조성된 석탑 기초지반과 원지반의 경계에서의 매질변화가 확인되었다.

Fig.24 The result of electrical resistivity survey(2011, S-N)

<Fig.24>는 석탑 인접 지반의 남-북 방향 전기비저항 탐사결과를 보여주는 것이다. 석탑 하부에서는 고 비저항 값이 확인되고 석탑 북측면과 인접한 지점에서는 주변보다 저 비저항 값을 보이며 북측면 지반이 상대적으로 연약함이 확인되었다. 또한 수평분포를 분석한 결과 석탑의 지반은 동서 약 8m, 남북 약 10m의 직사각형 모습이며, 수직전기비저항 결과에 의해 본 지반은 약 3m 깊이까지 분포하는 것으로 해석되었다. 또한 탄성과 속도는 P파 평균치가 V_p 400m/s, 변환된 S파 평균치가 V_s 160m/s, 이를 통해 표준관입시험 N치로 변환한 값은 5로 확인되었으며, 이를 기준으로 한 장기허용지지력은 $5 \sim 7 \text{ ton/m}^2$ 로 산정되었다. 이 조사에서는 석탑의 전체하중을 약 82ton으로 추정하였으며 8.58 ton/m^2 ²⁰⁾의 하중을 가지는 것으로 판단하였다. 지반의 허용치보다 상회하는 하중으로 판단하여 석탑 지반이 석탑을 지지할 수 없는 조건으로 판단하였다.²¹⁾

또한, 동 조사에서는 석탑의 중심축을 분석하여 기울기를 조사하였는데, 북북서 측으로 0.9° 기울어져 있음을 확인하였으며, 북측 연약지반에 의한 것으로 추정하고 있다.

한편, 지반과 관련한 사항은 1970년대 시행된 배수로 공사와의 연관된다. 1970~72년 불국사 경내 정비 공사를 위하여 지반의 일부가 굴착되었는데, 당시 18개의 집수정을 설치하고, 경내 곳곳에 배수관을 삽입하였다. <Fig.25>는 당시 배수로 설치를 위한 집수정 위치와 배수로 배치도면으로, 무설전 앞마당부터 불국사 삼층석탑 북측과 서측을 거쳐 남측으로 배수로가 설치되었음을 알 수 있다.

단면도가 확인되지 않아 정확한 굴착 깊이는 확인할

20) 상부하중을 지반으로 전달하기 위한 하층기단의 지지면적을 산정하는 방법에서 하층기단의 공극률을 50%로 계산하여, 상부하중 지지면적이 $4.37 \times 4.39 \times 50\% = 9.59 \text{ m}^2$ 인 것으로 진행하였다.

21) 위 보고서 p.134 수정마이어 호프식(1986), Pack-Hanson-Thornburn(1976)의 방법을 적용하여 산정하였다.

수 없으나, <Fig.26~Fig.27>의 공사 모습 촬영사진을 통해 굴착 깊이가 1.2~1.5m 정도인 것으로 추정할 수 있다. 굴착위치 역시 경계석에 인접하였는데, 이는 2010년 조사내용에서 확인된 석탑의 조성지반 (동-서 8m, 남-북 10m)내의 부분 일부를 굴착한 것으로 볼 수 있으므로, 기초지반의 여건변화를 짐작할 수 있다.

Fig.25 Drain Plan Drawings(Blue Line)

Fig.26 Drainage work (North Side) Fig.27 Drainage works (South Side)

3-4. 자연재해

지진의 발생, 낙뢰 등 자연재해는 단 시점에 큰 파손을 가져오는 요인이다. 불국사에서 발생한 자연재해 역시 석탑에 큰 영향을 주었다. 자연재해와 관련된 사항은

과거 기록을 통해 확인된다.

1966년 2층 탑신에서 수습된 중수문서 중 西石塔重修形止記<Fig.28>의 내용에는 ‘太平16년(1036, 靖宗 2년) 丙子年 6월 □□ □時에 地動이 나서 佛門 南쪽 大梯 □□階積이 무너졌으며, 下仙門 □□□ 廊積부터 東向行廊과 副舍廊間積□□□□西邊의 石塔이 기울어져 무너질 것 같아, □□□가 잠목을 굴러와 구했다’는 내용이 확인된다.

이어지는 기록에서는 太平 18년(1038) 1월에 다시 지진이 발생하였으나, 나라에서 수리할 뜻이 없는 것으로 판단하고 밧줄 등을 마련하여, 1038년 1월 24일부터 석탑 해체를 준비하고, 시작하여 2월 13일에 사리를 재봉 안하였음이 확인된다.²²⁾ 따라서 고려 정종 2년(1036)에 발생한 지진에 의해 석탑에 버팀목을 대어 놓아야 할 정도의 피해가 발생하였으며, 약 1년 7개월 후에 석탑을 전면 해체수리 하였음을 알 수 있다.

Fig.28 SeoSeokTapJungSuHyeongJiGi(西石塔重修形止記)

1966년에 있었던 수리 역시 지진과 관계가 있다. 동아일보의 1966년 9월 8일 ‘佛國寺無影塔倒壞위기, 地震으

22) 『불국사 석가탑 유물 02 중수문서』, 국립중앙박물관, 대한불교조계종, 2009, P.112~113

로 금가 7度 기울어'라는 제목의 기사가 있다.

기사의 내용을 정리하여 보면 '8월 29일 오후 8시경 발생한 지진의 영향으로 1층 탑신과 옥개석사이에 있던 켜기(철편)가 주저앉으면서 북쪽으로 약 5cm 가량의 틈이 생기는 바람에 서남쪽으로 7도가량 기울어진 것으로 보인다. 1층 탑신 남쪽 부분의 우주에서 세로 약 30cm, 두께 약 5cm 조각이 땅에 떨어지고, 1층 동쪽 부분 기둥이 손바닥 크기만큼 떨어져 나갔으며, 2층 동쪽 갑석이 벽돌크기만큼 떨어져 나갔다. 2층 서편 옥개석 갑석이 가로 60cm, 세로 15cm, 두께 15cm 허물어졌으며, 2층과 3층 탑신 모퉁이가 손바닥만큼 떨어져 나갔다. 그 외 '2~3개 처에 금이 가고 파손되는 등 상처를 입었으며 남측 기단갑석에 8cm가량의 균열이 생겼다.'고 기록되어 있다.

낙뢰와 관련한 내용은 조선시대 1586~1589년 具思孟의 『八谷先生集』, 五言律詩의 佛國寺 경관에 관한 시구에서 확인할 수 있다. 시구 중간에 '雷痕留古塔' 이라는 문구가 확인되는데, '우뢰의 흔적이 오래된 탑에 남아 있다'는 내용이 있다. 그러나 시구에서는 '古塔'이라는 표현만 있을 뿐 불국사 삼층석탑인지 불국사 다보탑인지는 확실하지 않다. 다만 낙뢰의 경우 높게 솟아있는 물체에 손상을 주는 경우가 많아 상륜부에 훼손을 주었을 것으로 추정할 수 있다. 또한 상륜부의 경우 다보탑은 온전히 남아있는데 비해, 불국사 삼층석탑은 파손, 소실되었음을 감안한다면 창건 이후부터 조선중기까지의 기간 중 시구가 작성된 시점 이전에 낙뢰로 인해 불국사 삼층석탑에 파손이 있었음을 추정할 수 있다.

3-5. 파손원인에 대한 대응책

응력집중에 의한 전단응력, 휨응력, 측압 등의 작용에 의한 부재 파손은 불국사 삼층석탑 뿐 아니라, 유사한 기단구조를 가진 慶州 感恩寺址 三層石塔(국보 제112호), 慶州 羅原里 五層石塔(국보 제39호), 慶州 高仙寺址 三層石塔(국보 제38호) 등 신라계 석탑 일반에서도 확인되는 공통적인 현상²³⁾이다. 적심석으로 구성된 기단구조를 가진 신라계 석탑은 조성연대가 오래된 탓에 대부분 적심석 내에 다짐으로 사용되었던 흙성분이 유실되어 지지조건이 변화함에 따른 파손양상은 대부분 유사하다. 암석의 종류도 대부분 화강암으로 강도저하에 따른

균열 역시 대부분 유사한 양상으로 발생한다. 즉 불국사 삼층석탑에서 확인되는 응력의 집중과 석재의 강도저하는 대부분의 신라계 석탑에서 유사하게 발생한다고 할 수 있다.

응력발생에 대한 대응책으로는 압축응력, 전단력, 휨응력, 측압 등이 집중되어 작용하지 않을 수 있도록 골고루 분산시키는 방법을 들 수 있다. 각 부분에서 지지할 수 있는 허용강도 범위 내에 있도록 구조계산을 통한 최소 지지면적을 산정하고 그 이상의 면적에서 응력을 지지시킬 수 있도록 조치할 수 있다. 유실된 적심부의 보완, 시간의 흐름에 따른 침하에 대한 예방조치 등이 필요하다.

석재강도 저하와 관련한 근본적인 대응책은 강도저하 부분을 신재로 교체하거나, 화학제를 도포하여 표면을 강화하는 적극적인 방법이 있으나, 이러한 부분은 진정성의 측면, 교체나 화학적 처리를 통해 발생할 수 있는 문제점 등을 신중히 검토하여 결정하여야 할 부분이다. 다만 육안으로 확인되는 균열부에 충전제를 사용하여 빈틈을 메워주거나, 표면에 서식하거나 고착되어 석재강도 저하를 가속화하는 지의류 등 서식생물 및 오염물을 제거함으로써 석재강도 저하의 속도를 늦출 수 있을 것이다.

한편, 1966년 해체 시 발생한 파손의 경우 당시 수지 등 접합재료를 통해서 접합하였으며, 3층 탑신석의 경우 꺾쇠형 금속 보강재를 삽입하여 접합하였다. 일제강점기에는 팔방금강좌를 정비하고 서측면 하층기단 갑석에 균열부에 시멘트 등을 사용하여 접합한 것으로 추정된다.²⁴⁾ 당시 진행된 보수부분 중 석탑의 구조에 직접적인 영향을 주는 문제는 발생하지 않았으나, 당시 사용한 보수재료는 외관상의 이질감을 가지고 있다. 문화재에 대한 보수와 관련 시기별 관점의 변화에 따른 적절한 보수방법의 검토, 선정이 필요함을 인식할 수 있다. 또한 1층 탑신의 남서측 우주 상면 접합 부분, 2층 탑신의 서측면 탑신받침의 경우 접합제의 접착력 저하에 따른 접합부 탈락 현상이 일부 확인되고 있어 보완이 필요하다.

지반침하, 낙뢰, 태풍 등 자연재해에 대한 대비방안은 정기적인 조사 및 관리, 피해를 최소화할 수 있는 방안을 마련하여 사전에 준비하는 것이다. 기초지반의 여건 변화는 부분침하, 지내력 저하, 우수유입 동결해 등에 의한 지반 팽창 및 수축 등을 가져올 수 있다. 이러한 변

23) 경주 감은사지 삼층석탑의 경우 서삼층석탑은 상층기단 갑석 남동, 남서, 북동, 북서 4면 전체에서 균열이 확인되며, 하층기단 갑석 남동, 남서측에서 균열이 확인된다. 동삼층석탑 경우 상층기단 갑석 남동, 남서, 북동, 북서, 하층기단 갑석 북동, 북서에서 균열이 확인된다. 『경주 감은사지삼층석탑 수리보고서』, 국립문화재연구소, 경주시, 2010. 『경주 감은사지 동삼층석탑 해체수리보고서』, 경주시, 재단법인 계림문화재연구원, 2011

24) 1925년 다보탑 수리공사 전후 사진을 비교하면 팔방금강좌의 정비 및 서측면 하층기단 갑석에 변화를 확인할 수 있다. 현재 불국사 삼층석탑과 관련된 일제강점기의 공사 관계 서류는 확인되지 않는다.

화는 석탑 전체의 하중지지구조에도 영향을 미치는 요인이 되며, 하중 지지를 위한 응력발생과도 연관 지을 수 있다. 낙뢰, 태풍 등의 자연재해 역시 추가적인 파손의 원인으로 작용할 수 있다. 따라서 직접적인 파손원인을 제거할 수 없을 경우 정기조사를 통한 현황을 정확하게 파악하고, 문제를 예측하여 사전에 조치를 취할 수 있을 것이다.²⁵⁾

4. 맺음말

본 연구를 통해 불국사 삼층석탑의 파손원인과 관련하여 살펴본 내용을 정리하면 다음과 같다.

불국사 삼층석탑에는 상륜부, 탑신부, 기단부 전체에서 다양한 파손이 확인된다. 균열이 진행되어 부재의 일부가 탈락되거나, 파손된 부분도 확인된다. 부재의 균열은 석탑 일체강점기 이전부터 현재까지 꾸준히 발생하였으며, 구조적 문제에 따라 추가 발생의 우려도 있다.

파손의 원인은 압축응력, 전단응력, 휨응력, 토압 등 응력발생, 풍화에 따른 석재강도 저하, 연약지반 존재, 기조지반 굴착 등에 따른 지반구조 변화 등 여러 사항이 복합적으로 작용하여 발생한 것으로 볼 수 있다.

부재에 압축력이 가해질 경우 탑신석, 기단석의 우주 등의 외곽부에서 균열이 발생하여, 부재의 탈락으로 진행된다. 기단부 적심의 지지조건은 휨응력과 전단응력, 토압과 관계가 있는데, 이러한 하중이 작용할 경우에는 균열이 발생해 부재가 2조각 혹은 그 이상의 조각으로 절단된다.

석재의 강도저하는 균열을 일으키는 직접적인 원인으로 보기에는 어려우나, 균열 발생부에 강도저하가 관찰되어 균열 발생을 가속화시키는 주요 요인이 되는 것으로 볼 수 있다.

지반구조의 변화 역시 균열과 상관관계가 있음을 알 수 있다. 전기비저항탐사, GPR탐사, 탄성과 탐사 결과치를 통해 지반구조를 확인할 수 있으며, 북측에 연약지반이 위치하는 점, 2001년 조사 당시 석탑이 북북서 방향으로 0.9° 기울어진 점 등을 통해, 기단구조에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다. 또한 1970년대 불국사 정비공사 시 석탑 주변으로 배수로 삼입을 위한 굴착이 진행됨에 따라 기초구조에 변화가 생겼으며, 이러한 점을 균열과

연관하여 생각할 수 있다.

자연재해 특히 지진의 발생, 낙뢰 등은 석탑의 파손에 직접적인 영향을 주는 요소였다. 『西石塔重修形止記』, 조선시대 具思孟의 『八谷先生集』, 1966년 신문기사 등을 통해 살펴본 결과 지진의 발생에 따라서 석탑이 기울어져 무너질 상황에 처한 적이 있었으며, 여러 군데 균열과 파손이 발생한 사례를 볼 수 있었다. 또한 낙뢰 역시 석탑 파손의 원인이 되는 것임을 확인하였다.

석탑에 균열이 발생하고 일부가 탈락되는 등 훼손이 진행되는 것은 구조적인 불균형이 생김에 따라 보다 안정적인 구조를 찾아가기 위한 자연스러운 현상이다. 중력이 존재하고, 외기에 노출되고, 계절의 변화에 따라 지반의 상태가 변화하는 한 이러한 현상은 자연스러운 현상으로 볼 수밖에 없다. 이러한 과정에서 부재가 파손되고, 또 다른 불균형이 생겨 점차 무너져 가는 것이다. 이 연구는 이러한 과정을 이해하기 위한 목적으로 진행되었다. 이 연구가 우리 문화유산을 후대에 잘 전할 수 있는 보수, 보강방안 마련의 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

References

1. 『佛國寺西石塔重修形止記』
2. 具思孟, 『八谷先生集』, 卷之- 五言律詩, 次佛國寺韻二首
3. 東京帝國大學, 『韓國建築調查報告』, 1902
4. 朝鮮總督府, 『朝鮮古蹟圖譜 四』, 1916
5. 關野貞, 『韓國の建築と藝術』, 1947
6. 文化財管理局, 『佛國寺 境内 整備報告書』, 1976
7. National Research Institute of Cultural Heritage, Gyeong-Ju City, 『The Research & Analysis on The cause of Crack in Three Storied Pagoda in Bulguksa temple』, 2011
8. Korea Sturctural Engineering Co. Ltd, Gyeong-Ju city, 『精密安全診斷報告書, Three Storied Pagoda in Bulguksa temple(SeokGaTap)』, 2001
9. National Research Institute of Cultural Heritage, 『感恩寺址西三層石塔』, 2005
10. National Research Institute of Cultural Heritage, 『The Restoration Report of e West Three Storied Pagoda on Gam-Eun-Sa Temple Site』, 2010
11. National Research Institute of Cultural Heritage, Gyrong-Ju city, 『佛國寺多寶塔 修理報告書』, 2011
12. National Research Institute of Cultural Heritage, 『Nondestructive Evaluation of Weathering Degree for

25) 최근 문화재 보수와 관련하여 자연재해에 대한 대책이 거론되고 있다. 일본 나라 평성궁 대극전의 경우 기단부를 전통적인 방법으로 조성하는 대신 지진에 대비할 수 있는 현대식 내진 시스템을 도입하였는데, 장기적인 관점에서 이와 같은 자연재해 대비방안도 필요하다고 할 수 있다.

58 논문

- Stone Cultural Heritage using Ultrasonic test』, 2012
13. National Museum of Korea, Jogye Order of Korean Buddhism, 『Renovation Document - Vulguksa Seokgatap Relics Vol 2』, 2009
14. Gyeong-Ju city, Gye-Lim Research Institute of Cultural Heritage, 『The Restoration Report of e East Three Storied Pagoda on Gam-Eun-Sa Temple Site』, 2011
15. Seo Man Cul Sun, Choi Hee Soo, 「The structural safety diagnosis of Dabo Pagoda of Bulguk Temple using analyses of ultrasonic wave velocity」, 2002, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, Vol. 5

접수(2013. 10. 15)

수정(1차: 2013. 11. 29)

게재확정(2013. 12. 7)