

초음파 속도 분석을 통한 불국사 다보탑 구조 안전 진단

서만철* · 송인선* · 최희수**

*공주대학교 문화재보존과학연구소 문화재비파괴진단연구실

** (주)고려구조ENG

요 약

경상북도 경주시에 위치한 불국사 다보탑의 구조 안전 진단을 목적으로 탑의 각 부재에 대한 비파괴 정밀 조사가 실시되었다. 암석 부재의 역학적 성질을 추정하기 위해 255개 부재에서 641 지점에서 초음파 속도를 측정하였으며, 그 결과는 P-파 속도 범위가 584~5169 m/sec이며 평균 속도는 2876 m/sec이다. 일축압축강도는 93~1314 kg/cm² 범위로 평균치가 396 kg/cm²이고, 풍화도지수는 0.07~0.88의 범위로 평균 0.43으로 중간정도의 풍화를 받은 것으로 나타났다. 각 암석부재의 파괴강도와 이에 작용하는 응력을 비교한 결과, 탑의 구조에 관계된 부재들의 상태는 비교적 양호한 상태를 보여주지만, 편하중에 의한 부분 파괴의 가능성이 남아있다. 편하중에 의한 균열이 계속 진행중인지 모니터링이 필요하며, 편하중을 제거하기 위한 대책이 중요하다. 1층 및 2층 옥신부 주변의 난간은 비교적 작은 부재들로 이루어져 있어 풍화가 많이 진전되었지만 구조적 불안정에는 직접 관련이 없다.

주요어: 불국사 다보탑, 초음파 속도, 파괴확률, 구조 안전 진단, 암석강도, 풍화도 지수.

Mancheol Suh, Insun Song and Huisoo Choi, 2002, The structural safety diagnosis of Dabo Pagoda of Bulkuk Temple using analyses of ultrasonic wave velocity. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 5, n. 3, p. 199-209

ABSTRACT: We have carried out a nondestructive close examination for the purpose of the structural safety diagnosis of the Dabo Pagoda of Bulkuk temple located in Kyungju, Kyungbuk, Korea. For estimating the mechanical properties of each rock block of the pagoda, ultrasonic measurements were conducted at 641 points of 255 blocks. The P-wave velocity ranges from 584 m/sec through 5,169 m/sec, and averages 2,901 m/sec. Based on this result, the uniaxial compressive strength was estimated to be 93~1,943 kg/cm² with 396 kg/cm² of average, and the index of weathering is 0.07~0.88 with 0.43 of average, which means the moderate degree of weathering. The comparison of the rock strength of each block with the overburden acting on the block reveals that the rock blocks related to the structure of the pagoda are relatively sound for uniform stress, but it is highly possible for a concentrated stress to lead to a partial failure. We suggest a monitoring of cracks due to the concentrated stress. The parapets of 1st and 2nd floors composed of small rock pieces are severely weathered. However, this is not directly related to the structural safety of the pagoda.

Key words: Dabo Pagoda of Bulkuk Temple, ultrasonic wave velocity, probability of failure, structural safety diagnosis, rock strength, index of weathering.

(Mancheol Suh and Insun Song, Nondestructive Research Lab. Cultural Property, Kongju National University, Kongju, 314-701, Chungnam, Korea, e-mail: mcsuh@knu,kongju.ac.kr; Huisoo Choi, Korea Structure Engineering Co.)

1. 서 언

불국사 다보탑은 1962년 12월에 국보 제20호로 지정된 석조문화재로서, 통일신라 제 35대 경덕왕

10년(서기 751년)에 축조된 것으로 알려져 있다. 본 탑은 불국사 석가탑과 마찬가지로 축조 시기가 천년이 넘는 데다가 옥외에 위치해 있기 때문에 풍화를 심하게 받고 있어 원래의 모습과 강도

가 크게 훼손되어 있다고 보고된 바 있다(김수진 외, 2000). 본 탑의 정밀 안전 진단을 위하여 2001년 5월 및 6월 2차에 걸친 종합적인 현장 조사가 이루어 졌으며(박일철, 2001), 본 논문에서는 비파괴 구조 안전 진단을 목적으로 각 부재의 풍화정도 및 물성을 규명하고 분석하였다.

일반적으로 암석의 강도와 물성은 현장에서 암석시료를 채취하여 실험실에서 적당한 크기와 모양으로 가공한 뒤, 시험을 통하여 측정할 수 있다. 그러나 석조 문화재는 그 특성상 시료를 채취할 수도 없고 실험실로 가져올 수도 없기 때문에 현장에서 간접적인 방법으로 측정할 수밖에 없다. 강도에 관한 비파괴검사 방법은 슈미트 해머법이나 초음파법이 현재 가장 많이 이루어지고 있으나(박승범, 1995) 슈미트 해머를 이용한 타격법은 문화재를 손상시킬 수 있기 때문에 본 연구에서는 제외되었다.

암석의 공학적인 성질은 풍화가 진행됨에 따라 급격하게 변하는데 암석의 풍화에 따른 물성치의 변화는 밀도, 공극률, 압축강도, 인장강도 등 여러 가지 이다. 탄성(초음)과 속도는 주어진 매질에서 일정하며 매질의 탄성계수 밀도의 함수로 표현된다. 풍화에 의한 입자간의 결합력의 약화와 미세 균열의 생성 등으로 초음파 속도가 저하되므로 초음파 속도 측정을 통하여 다른 물성을 산정할 수 있다 (서만철, 2000). 불국사 다보탑을 구성하는 255개 부재에서 641 지점을 선정하여 초음파 탐사를 실시하였으며, 상기한 원리를 이용하여 암석의 강도 및 풍화정도를 산출해 탑의 안정성을 평가하였다.

2. 탑의 구조 및 훼손 현황

암석부재는 부재에 따라 이견이 있을 수 있으

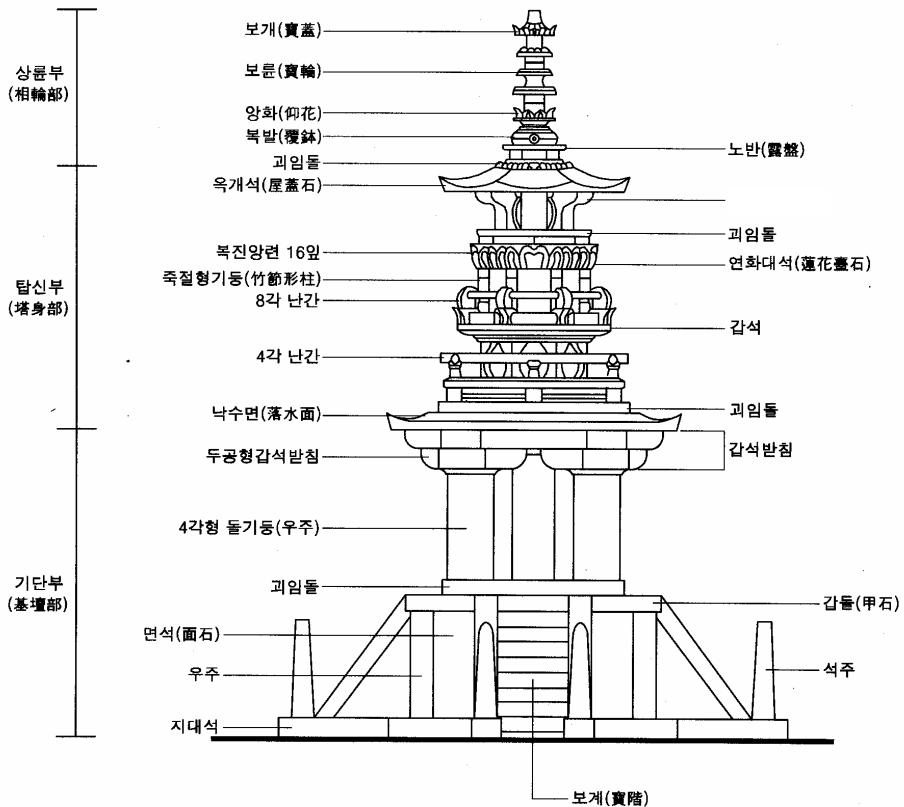


Fig. 1. Names of rock blocks of Bulkuksa Dabo Pagoda (after Park, 2000)

며 좌용주 외(2000)는 남산화강암으로, 김수진 외(2000)는 토함산 화강섬록암에 해당하는 것으로 보고하였다. 불국사 다보탑은 외부에서 확인 가능한 부재가 262개로 이루어져 있으며, 전체 구조는 아래로부터 기단부, 탑신부, 상륜부로 나뉘어지고, 전체탑신의 높이는 10.4 m 이다(Figure 1). 기단부는 상·하로 구분되며, 하부기단부는 3.9 m x 3.9 m x 1.8 m (높이)의 단의 형상을 하고 있으며 전체 하중을 지지하고 있다. 하부 기단부의 4면에는 층계로 이루어진 보개가 있으며 이 층계를 통하여 상부기단으로 접근할 수 있다. 이 부분은 지면으로부터 상당한 부분까지 수분이 상승하고 있어 염분의 침전현상이 관찰되며(김수진 외, 2000), 벽면, 계단에는 이끼가 자라고 있다. 기단석과 계단석에는 균열 및 모서리 탈락 현상이 관찰된다(Figure 2a). 상부기단은 위로부터 4각형의 얇은 갑석과 이를 밑에서 받치고 있는 갑석 받침, 그리고 이 전체를 지지하는 5개의 4각 기둥과 괴임돌로 구성되어 있다. 중앙의 4각 기둥은 북쪽으로 약간 기울었으며, 괴임돌 서북부에서 편하중에 의한 것으로 추정되는 균열이 보인다(Figure 2b). 갑석 받침의 표면이 암석의 박리와 박락 및 변색이 아주 심하며 누수에 의한 것으로 생각된다(Figure 2c).

탑신부는 3층으로 구성되어 있으며 각 층의 중앙에 팔각 기둥이 전체하중을 지탱하고 있으며, 1층 상부는 8각형의 갑석, 2층 상부는 연화대석, 3층 상부는 옥개석으로 이루어져 있다. 팔각기둥의 주변에는 죽절형, 주두형 등의 8개의 기둥이 있으며 이는 하중을 지지는 물론 미형(美形)을 위해 만들어진 것으로 판단된다. 1층 및 2층에는 각각 4각 및 8각 난간이 있어 아름다움을 더해주고 있으나, 이 들 난간은 얇은 부재들로 이루어져 있고 바람과 비에 직접 노출되어 있어 풍화와 박락이 심하다. 특히 동남쪽 방향에 있는 난간 및 간대들은 풍화가 심하여 이미 토양화가 진행되어 있으며 갈라진 틈들이 보인다(Figure 2d). 팔각난간의 갑석부분의 일부가 편하중에 의한 것으로 보이는 균열이 보인다(Figure 2e). 상륜부는 밑으로부터 노반, 복발, 양화, 보륜과 보개 및 그 사이를 잇는 원통형의 대륜으로 이루어져 있다. 최상위에 있는

응회암으로된 보개의 탈락 현상이 관찰된다(Figure 2f). 외관상 작고 외부에 위치한 부재일수록 풍화가 많이 진행되었으며 전체 하중을 지탱하는 기둥들은 비교적 그 상태가 양호하다.

3. 조사방법

3.1. 초음파 속도 측정

자세한 초음파 속도의 측정 방법은 ASTM Designation D2845-90(1996)에 잘 설명되어 있다. 그러나 문화재로부터 코어시료를 채취할 수 없기 때문에 실험실에서 사용되는 방법을 직접 문화재 안전진단에 이용할 수 없다. 본 조사에서는 두 개의 압전결정을 현장에서 석조면에 직접 설치하고 측정하는 방법을 이용하였다. 이러한 방법에는 3가지 방법이 주로 쓰이며 Figure 3과 같다. 부재의 폭이 30 cm 이하일 경우에는 직접전달(direct transmission) 방법을 사용하였으며 30 cm 이상일 경우에는 주로 간접전달(indirect transmission) 방법을 사용하였다. 두 압전결정 사이의 거리 측정이 비교적 어려운 반 직접전달(semi-direct transmission) 방법은 본 조사에서는 제외되었다. 간접전달 방법 사용 시, 두 압전 결정사이의 거리는 10 cm, 16 cm 그리고 22 cm 이었다. 본 조사에 이용된 기기는 CNS Farnell에서 제조된 PUNDIT이었으며 전달 시간을 digital로 직접 읽을 수 있도록 고안되었다. 이 방법은 도착시간을 직접 읽을 수 있어 조사가 빨리 진행될 수 있으나 파형을 볼 수 없어 신뢰성을 입증하기가 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위해 한 지점에서 여러 번 측정하여 신뢰성을 높였다. 초음파 방출 및 수진을 위해 54 kHz 압전 결정이 사용되었다.

3.2. 풍화정도 및 암석강도

주어진 광물에서는 초음파 속도가 일정하기 때문에 여러 가지 광물이 모여서 만들어진 암석에서도 광물조성만 같으면 초음파 속도가 같아야 한다. 그러나 광물조성이 같다 하더라도 이차적으로 발생한 미세균열의 발달 정도 및 광물의 풍화정도에 따라 초음파 속도도 달라진다(Goodman, 1989). 같은 광물조성의 암석이라도 미세균열이 발달할



Fig. 2. Damage conditions of Dabo Pagoda; (a) a broken plane at a stairway, (b) fractures at supporting blocks on the platform due to unequal weight, (c) severely weathered cornerstones under the Kidan Gapseok, (d) a severely weathered parapit on the second floor, (e) a fracture of the first floor Gapseok, and (f) a broken plane at at Bogae.

수록 즉, 암석내의 공극이 커질수록 초음파 속도는 작아진다. 이러한 원리를 이용하면 광물조성에 의해 주어지는 이론적 초음파 속도와 측정된 초음파 속도와의 차이를 통해 균열 발달 정도 및 풍화정도를 추정할 수 있으며 궁극적으로 암석의 강도도 산출할 수 있다.

서만철(2000)에 의하면 암석의 풍화도지수(Coefficient of weathering)와 초음파 속도와의 관계는 다음과 같다.

$$k = \frac{V_u - V_w}{V_u} \quad (1)$$

Table 1. Degree of weathering k determined by P-wave velocity.

풍화 및 변질의 정도	풍화도 지수 k	P-파 속도 (m/s)
신선한	0	> 5,000
약간 풍화된	0 - 0.2	5,000 - 4,000
중간정도로 풍화된	0.2 - 0.4	4,000 - 3,000
상당히 풍화된	0.4 - 0.6	3,000 - 2,000
현저히 풍화된	0.6 - 1.0	< 2,000

여기서 V_u 는 신선암의 P파 속도이며 V_w 는 풍화암의 P파속도이다. 화강암에서의 k 값에 따른 풍화정도는 표 1과 같다. 각 부재의 풍화도지수를 분석함으로써 탑의 안전도 및 풍화원인을 추정할 수 있다.

다음은 각 부재가 상위 부재의 하중을 견딜 수 있는지 진단하기 위하여, 각 부재가 받는 응력을 그 부재의 일축압축강도(C_0)와 비교하였다. 각 부재의 일축압축강도는 초음파 속도와 암석의 일축압축강도와의 관계를 나타내는 경험식을 이용하였으며 화강암에서의 경험식은 다음 (2)식과 같다.

$$C_0 = 66.039 \times \exp(0.000578598 \times V_p) \quad (2)$$

3.3. 구조 안전 진단 방법

암석강도를 정상분포를 갖는 임의 변수로 가정하고 확률빈도함수(PDF: probability density function)로 표현할 수 있으며(Figure 4) 암석의 파괴확률(probability of failure)은 전체 PDF 면적분의 응력에 따라 달라지는 면적(Figure 4에서 그림자 부분)으로 나타낼 수 있다. 확률이론은 토목구조의 설계(Harr, 1987), 구조물의 안전도(Whitman, 1984) 및 지하 구조물에서 발생하는 여러 가지 문제점을 분석하기 위한 도구로써 사용되어져 왔다(Pine, 1992; Tyler *et al.*, 1991; Hatzor and Goodman, 1993; Carter, 1992). 암석 구조물에서의 파괴확률이론은 Hoek(2000)에 잘 소개되어 있으며, 석탑의 구조안전 분석에 적용하는 방법이 서만철 외(2001)에서 자세히 서술되어 있기 때문에 본 논문에서는 자세한 이론 부분은 생략한다.

한 부재에서 부위를 달리하여 여러 번 초음파 속도를 측정하였으며 식 (2)를 이용하여 각 측정

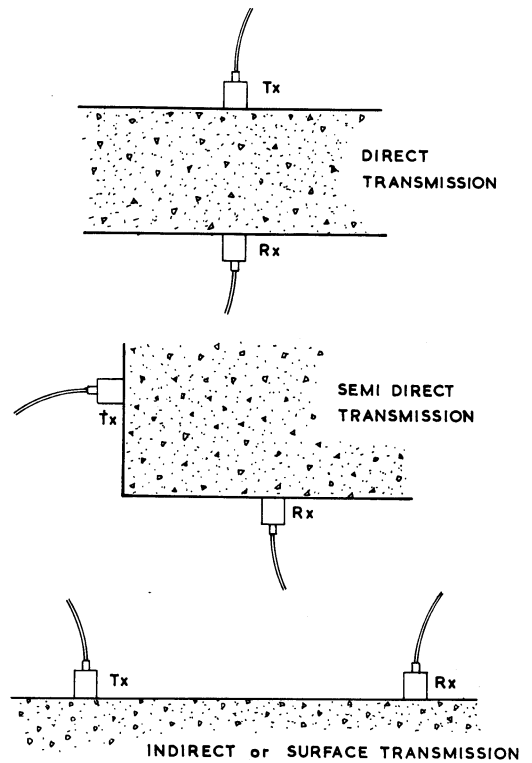


Fig. 3. Array methods of transducers.

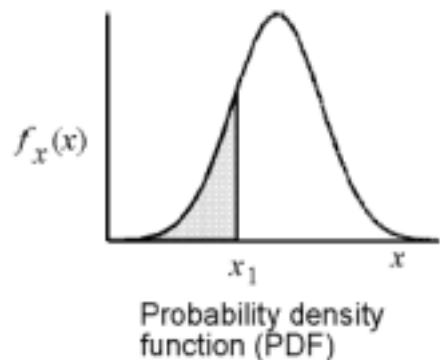


Fig. 4. Probability density function.

에서 일축압축강도를 구하였다. 각 부재의 여러 부위에서 비파괴적으로 구하여진 일축압축강도로부터 평균값(μ)과 표준편차(σ)를 구하였다. 각 부재의 일축압축강도의 평균값과 표준편차로부터 강도의 정상분포를 구하였으며 정상분포를 구하는 식은 다음 (3)식과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], -\infty < x < \infty \quad (3)$$

식 (3)에서 $f(x)$ 는 확률빈도함수(PDF: probability density function)이다. 부재에 작용하는 응력이 s 라고 가정하면 이 부재의 파괴확률은 식 (4)와 같이 된다.

$$\text{파괴 확률} = \int_{-\infty}^s f(x) dx \quad (4)$$

각 부재의 암석강도 확률빈도함수와 이 부재에 작용하는 응력으로부터 파괴확률을 구하여 탑의 안전도가 어느 정도인지 파악하고 이를 토대로 다보탑의 구조 안전을 진단하였다.

불국사 다보탑의 구조안전진단을 위해 먼저 탑신의 각 부재가 상위 부재의 하중을 지지할 수 있는지를 조사하였다. 이 진단을 위하여 석탑이 수직으로 서있고 하중을 받는 모든 면은 수평하다고 가정하였다. 각 부재의 중량은 각 부재의 부피와 화강암의 밀도(2.7 g/cm^3)의 곱으로 나타낼 수 있다. 각 부재의 폭, 길이, 높이 등을 실측하여 부피를 계산하였으며, 불규칙한 입체형을 띠고 있는 부재는 여러 부분으로 나누어 부피를 계산한

후 합을 구하였다.

각 부재에 작용하는 응력은 상위 부재들의 중량의 합을 그 부재의 단면적으로 나누어 구할 수 있다. 식 (3)으로부터 구하여진 각 부재의 암석강도의 확률빈도함수와 계산된 응력을 이용하여 각 부재의 파괴확률을 식 (4)로부터 구하였다. 단면적이 일정한 경우에는 평균 단면적을 이용하였고 불규칙 할 경우에는 최소 단면적을 이용하였다. 즉, 중량치는 최대 값을 취하고 단면적은 최소치를 취하여 안전도 진단에 있어 최대의 보수적 입장을 유지하였다. 그러나 접촉면의 경우 완전 접촉을 이루지 않고 부분적으로 접촉하고 있기 때문에 실제 접촉면 부근에서 응력의 집중 현상이 있을 수 있다. 접촉면 부근에서는 실제 면적을 고려하여 응력을 계산하였다. 그러나 면적을 정확히 측정할 수 없어 완전접촉, 1% 접촉, 0.2% 접촉으로 나누어 계산하였으며, 이를 토대로 현재 석탑의 부재별 안전도를 진단하고, 석탑의 안전을 위한 보수방안을 제시하는 것을 목적으로 하였다.

4. 결과 및 고찰

불국사 다보탑에서 실시한 초음파탐사 부재의 측정수는 전체 255개 부재에서 641 지점을 측정하였고 결과는 Table 2 및 Figure 5와 같다. 속도 범위는 584~5169 m/sec 의 분포로 평균 속도가 2876 m/sec로 나타났다. 일축압축강도는 92~1314 kg/cm^2 범위로 평균치가 396 kg/cm^2 이고, 풍화도지수는 0.07~0.88의 범위로 평균 0.43로 나타났다. 이러한 수치는 원래 신선한 암석이 갖는 암석강도의 약 25%에 해당하는 것으로 중간정도의 풍화가 진전되고 있음을 나타낸다(Table

Table 2. Result of ultrasonic wave velocity measurement.

	초음파(P파) 속도 (m/s)	일축압축강도 (kg/cm^2)	풍화도지수
평균 값	2876	396	0.43
표준편차	936	240	0.18
최대 값	5169	1314	0.88
최소 값	584	92	0.07

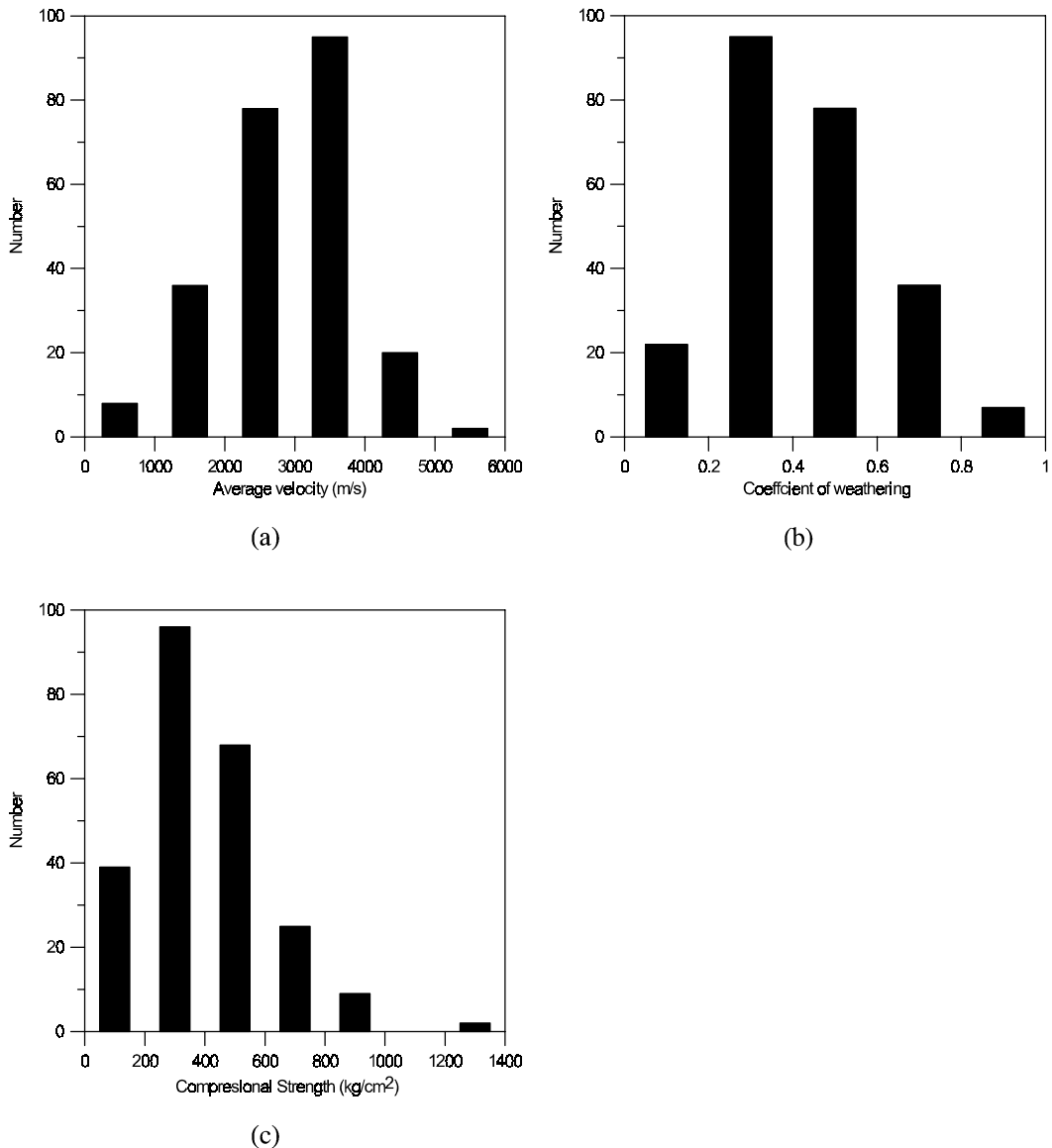


Fig. 5. Histograms of ultrasonic wave velocity(a), coefficient of weathering(b), and compressional strength(c).

1). 본 탑의 특징은 속도 및 암석강도의 분포가 상당히 넓어 암석이 상당히 풍화된 것으로부터 거의 신선한 암석까지 존재한다는 것이다.

암석의 압축강도가 전체 탑신의 구조 안전에 영향을 줄 수 있는 부재들을 정밀 분석하였다. 각 층 및 기단부의 옥개석은 압축력보다는 굴곡 모멘트에 의한 인장력에 의한 파괴 가능성이 훨씬 크기 때문에 압축 강도에 의한 분석에서는 제외되었다. 또한 각 층의 난간 및 보개도 구조안전과

는 상관이 없어 응력 진단에서는 제외되었다. 진단 결과는 Table 3에 요약되어 있다.

상륜부의 하중이 노반에 미치는 영향을 파악하였다. 상륜부의 하중은 275 kg이고 노반의 평균 암석강도는 241 kg/cm²이고 표준편차는 10 kg/cm²이다. 상륜부가 노반에 접촉하는 최소 단면적은 855 cm²이다. 상륜부의 하중이 접촉면 전체를 통하여 노반에 골고루 작용하고 있다고 가정하면 응력은 각각 0.322 kg/cm²이 되어 평균 암석 강

Table 3. Analysis of probability of failure.

부재명칭	압축강도(kg/cm ²)		하중 (kg)	면적 (cm ²)	파괴확률 (%)		
	평균	표준편차			완전접촉	1% 접촉	0.2%접촉
노반	241	10	275	855	0.10	0.10	0.10
3층 중앙 팔각 기둥	536	7	2675	8163	0.10	0.10	0.10
3 ()	200	20	2675	8163	0.10	0.10	3.59
3 ()	771	77	2675	8163	0.10	0.10	0.10
3 ()	730	73	2675	8163	0.10	0.10	0.10
3 ()	556	55	2675	8163	0.10	0.10	0.10
3 ()	524	52	2675	8163	0.10	0.10	0.10
3 ()	848	84	2675	8163	0.10	0.10	0.10
3 ()	294	29	2675	8163	0.10	0.10	0.10
3 ()	204	20	2675	8163	0.10	0.10	2.12
평균	518	28	2675	8163	0.10	0.10	0.65
2층 중앙 팔각 기둥	550	39	6012	7619	0.10	0.10	0.10
2층 축절형 기둥 (남-서)	336	30	6012	7619	0.10	0.10	97.50
2층 축절형 기둥 (남-동)	144	14	6012	7619	0.10	0.10	99.90
2층 축절형 기둥 (동-남)	176	17	6012	7619	0.10	0.10	99.90
2층 축절형 기둥 (동-북)	125	12	6012	7619	0.10	0.10	99.90
2층 축절형 기둥 (북-동)	147	14	6012	7619	0.10	0.10	99.90
2층 축절형 기둥 (북-서)	136	13	6012	7619	0.10	0.10	99.90
2층 축절형 기둥 (서-북)	129	12	6012	7619	0.10	0.10	99.90
2층 축절형 기둥 (서-남)	170	17	6012	7619	0.10	0.10	99.90
평균	213	19	6012	7619	0.10	0.10	88.54
1층 중앙 팔각 기둥	410	99	11326	6499	0.10	0.89	99.90
1층 주변 기둥 (남-서)	307	159	11326	6499	2.74	20.05	99.90
1층 주변 기둥 (남-동)	616	159	11326	6499	0.10	0.21	94.52
1층 주변기둥 (동-남)	575	159	11326	6499	0.10	0.59	96.86
1층 주변기둥 (동-북)	616	159	11326	6499	0.10	0.28	94.52
1층 주변기둥 (북-동)	522	159	11326	6499	0.10	0.16	5.71
1층 주변기둥 (북-서)	186	159	11326	6499	12.30	47.21	99.90
1층 주변기둥 (서-북)	356	159	11326	6499	1.29	12.71	99.90
1층 주변기둥 (서-남)	618	159	11326	6499	0.10	0.26	1.43
평균	468	152	11326	6499	1.88	9.15	76.96
중앙 4각 돌기둥	371	184	26334	21589	2.22	8.85	90.82
돌기둥 (남동)	574	228	26334	21589	0.60	2.40	56.36
돌기둥 (북동)	458	268	26334	21589	4.46	10.56	71.57
돌기둥 (북서)	518	304	26334	21589	4.46	9.68	61.79
돌기둥 (남서)	437	244	26334	21589	3.67	9.85	76.11
평균	471	246	26334	21589	3.08	8.27	71.33
괴임돌(남)	486	167	47628	21589	0.19	5.59	99.90
괴임돌(동)	997	315	47628	21589	0.10	0.68	63.31
괴임돌(북)	719	251	47628	21589	0.21	2.33	93.70
괴임돌(서)	703	217	47628	21589	0.10	31.32	96.71
평균	726	237	47628	21589	0.74	9.64	84.99
면석 (남-서)	562	48	50701	151846	0.10	0.10	0.10
면석 (남-동)	336	174	50701	151846	2.74	4.18	16.60
면석 (동-남)	542	158	50701	151846	0.10	0.10	0.87
면석 (동-북)	462	204	50701	151846	1.16	2.44	7.35
면석 (북-동)	423	197	50701	151846	1.62	2.44	9.68
면석 (북-서)	499	102	50701	151846	0.10	0.10	0.10
면석 (서-북)	558	84	50701	151846	0.10	0.10	0.10
면석 (서-남)	381	132	50701	151846	0.20	0.43	5.26
우주(남동)	316	257	50701	151846	10.93	13.57	28.10
우주(북동)	529	273	50701	151846	2.68	3.51	9.34
우주(북서)	441	199	50701	151846	1.74	2.07	8.38
우주(남서)	512	129	50701	151846	0.10	0.10	0.38
평균	463	163	50701	151846	1.80	2.43	7.19

*0.10은 0.10 이하를 의미함.

도에 훨씬 못 미치며 파괴확률도 0.1%미만이 된다. 그러나 각 암석의 표면은 거칠기 때문에 실제 접촉면은 이에 훨씬 못 미친다. 우리가 실제 접촉면을 구하는 것은 불가능하기 때문에 탑 부재의 부분파괴 및 안전도를 고려하여 실제 접촉 면적을 가정하였다. 실제 접촉 면적이 전체 면적의 1%와 0.2%로 가정하면 접촉면에 작용하는 응력은 각각 32.16 kg/cm^2 과 160.8 kg/cm^2 이지만 평균 암석 강도에 훨씬 못 미쳐 파괴확률은 별 차이가 없다. 육안 감식 결과도 접촉부 부근에서 기계적 파괴면이 보이지 않고 접촉면이 비교적 양호한 것으로 보아 상당히 안전한 것으로 판단된다.

3층 옥신부는 중앙 8각 기둥 및 8개의 신발 모양 기둥으로 구성되었으며 상륜부 및 3층 옥개석을 지지하고 있다. 중앙 8각 기둥의 암석강도는 536 kg/cm^2 이고 표준편차는 7 kg/cm^2 이다. 신발 모양 기둥의 암석강도는 $200 \sim 850 \text{ kg/cm}^2$ 으로 편차가 매우 심한 편이다. 상부의 하중이 전체 면적에 골고루 작용할 경우 응력은 0.328 kg/cm^2 이 되어 암석강도에 크게 못 미치며, 접촉부근에서의 실제 접촉 면적이 0.1%라 하더라도 응력은 32.8 kg/cm^2 이 되고 파괴확률도 0.1%이하가 되어 상당히 안정되어 있음을 보여준다.

2층 옥신부는 중앙의 8각 기둥 및 8개의 대나무 모양의 기둥으로 구성되어 있으며 연화대석 상부의 모든 하중을 지지하고 있다. 전체 하중은 6012 kg 이고 옥신부의 전체 단면적은 7619 cm^2 가 되어 응력은 0.789 kg/cm^2 이다. 중앙 기둥의 암석강도는 550 kg/cm^2 이며 대나무 모양의 기둥은 $120 \sim 330 \text{ kg/cm}^2$ 의 분포를 보여주어 파괴확률은 4% 미만이 되어 안전하다. 그러나 접촉면의 경우 완전접촉을 이루지 않고 있기 때문에 응력이 접촉점에 편중될 수 있다. 중앙부의 8각 기둥은 0.2%의 접촉 하에서도 파괴확률이 0.1% 미만이 되어 상당히 안전하나 주변의 죽절형 기둥들은 1%의 접촉률을 가질 경우 20% 이상의 파괴확률을 갖는 기둥들이 있어 부분 파괴를 보여줄 가능성이 있다. 그러나 중앙 기둥이 대부분의 하중을 흡수할 것으로 보여 위험도는 크지 않을 것으로 보여 구조적으로는 안전한 것으로 판단된다. 실제적으로 이 부분에서 접하중에 의한 부분 파

괴는 별로 보이지 않는다.

1층 옥신부 역시 중앙의 8각 기둥과 8개의 주변 기둥으로 구성된다. 갑석까지의 총 하중은 약 11톤이며 1층 옥신부의 총 단면적은 6500 cm^2 으로 옥신부에 작용하는 응력은 1.743 kg/cm^2 이다. 중앙 8각 기둥의 암석강도는 410 kg/cm^2 이며 주변 기둥들의 강도는 $150 \sim 620 \text{ kg/cm}^2$ 를 보여주어 상당히 안전하다. 파괴확률도 평균 약 2%로 안전함을 보여준다. 그러나 접촉부에서는 편하중 및 접하중에 의해 부분파괴가 일어날 가능성이 있다. 실제 접촉면이 1% 이하로 될 경우 파괴확률은 부재에 따라 20~40%를 보여준다. 탑이 약간 기울어 있어 탑의 기울기에 의한 편하중으로 인한 파괴면이 1층 갑석 북서쪽 면에서 관찰된다(Figure 2d). 일단 파괴가 시작되면 풍화가 가속화되어 부재가 급격히 약해지므로 보수가 필요하다. 편하중이 일어나지 않도록 갑석의 수평을 유지해야하며 모니터링을 통하여 파괴가 진행중 인지를 판별해야 한다.

다음은 전체 탑신을 지지하는 갑석을 분석하였다. 갑석은 중앙의 사각 기둥과 탑 모서리 부분에 위치한 4개의 돌기둥으로 이루어졌다. 탑신과 갑석받침까지의 총 하중은 약 26톤이며 5개 돌기둥의 총 단면적은 21589 cm^2 이며 이 단면적에 작용하는 응력은 1.22 kg/cm^2 이다. 갑석의 암석강도는 $370 \sim 520 \text{ kg/cm}^2$ 으로 분포하며 평균치는 471 kg/cm^2 이다. 응력이 암석강도에 비해 훨씬 작지만 암석강도의 표준편차가 커 평균 파괴확률은 약 3%에 이른다. 그러나 전체 파괴의 가능성은 별로 없고 접촉면에서 1%의 부분접촉을 보일 경우 파괴확률은 약 10%에 이르고 0.2%의 접촉률을 보일 경우 파괴확률은 50~90%를 보여 부분파괴의 위험이 상당하다. 중앙부의 사각기둥이 약간 기울어져 있기 때문에 편하중을 받을 가능성이 있으므로 조치를 해야한다. 다음은 갑석 밑에 4개의 괴임돌을 분석하였다. 괴임돌의 암석강도는 $500 \sim 1000 \text{ kg/cm}^2$ 의 분포를 보여 상당히 강한 것으로 나타났다. 하중에 의한 전체파괴의 가능성은 적지만 (파괴확률: 0.7%), 실제 접촉 면적이 1% 이하일 경우 부분파괴의 확률은 갑석보다 높게 나온다. 또한 이 괴임돌은 길게 누어 있

어 편하중이 작용할 경우 굴곡 모멘트로 인하여 파괴될 위험이 크다. 실제로 갑석과 만나는 면 주위에 파괴면이 많이 보이는데(Figure 2b) 이는 돌기둥(갑석)으로부터 오는 편하중 때문으로 판단된다. 서쪽에 있는 괴임돌이 암석강도가 적게 나온 것은 이 파괴면과 관련이 있는 것으로 판단된다.

기단석을 구성하는 면석과 우주석을 분석하였다. 기단부 내부의 구조를 정확히 알 수 없어 외벽을 구성하는 면석과 우주석이 기단부의 내부까지 연장되어 있다고 가정하였다. 면석과 우주석 모두 300 kg/cm^2 이상의 비교적 양호한 암석강도를 보여준다. 탑신 전체와 갑석 부분의 모든 하중을 합한 응력이 0.334 kg/cm^2 로 암석 강도에 비해 현저히 적을 뿐 아니라 1%의 실제 접촉면을 가정한다 하여도 파괴확률은 크게 늘지 않는다. 실제 육안관찰에 의하면 부재와 부재 사이가 비교적 잘 접촉하는 것으로 보여 구조적으로는 매우 안정하다고 판단된다. 기단부 면석(북-서)와 우주석(북동)을 비교하면, 우주석(북동)이 평균 강도가 529 kg/cm^2 로 면석(북-서)의 499 kg/cm^2 보다 크지만 파괴확률은 Table 3에서 보여 주듯이 우주석(북동)이 훨씬 크다. 그 이유는 표준편차가 273 kg/cm^2 로 우주석(북동)의 102 kg/cm^2 보다 훨씬 크기 때문에 같은 응력에서도 상대적으로 파괴확률은 크게 나온다. 접촉 면적이 0.2%일 경우 파괴확률은 9.34%와 0.1%로 아주 큰 차이를 보여준다. 암석강도의 평균치만 사용하지 않고 표준편차와 함께 강도의 확률 분포를 이용하여 파괴확률의 개념을 이용하면 암석이 얼마나 균질한지도 함께 고려가 되기 때문에 안전도를 보다 과학적으로 분석할 수 있다.

5. 결론

불국사 다보탑의 각 부재별 초음파 속도 측정 및 분석을 분석한 결론 및 보강대책은 다음과 같다.

(1) 초음파 속도와 화강암의 일축압축강도 사이의 경험식을 이용하여 부재별 암석 강도를 계산한 결과 부재별 평균치는 $92 \sim 1314 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위를 가지며 전체 평균 강도가 396 kg/cm^2 로

나타났다. 이 수치는 신선한 화강암이 갖는 암석 강도의 약 25%에 해당됨을 의미한다.

(2) 각 부재의 부피와 화강암의 평균밀도로부터 탑의 각 수평 단면적 및 접촉면에 작용하는 하중을 구하였으며, 전체 하중을 지지하는데 전혀 무리가 없다. 접촉면 부근에서의 파괴 확률은 실제 접촉면이 1%이상일 경우 탑신의 부분 파괴 확률은 10%미만으로 비교적 안전하다. 육안 관찰 결과 접촉면이 비교적 양호하여 점하중에 의한 파괴면은 잘 보이지 않는다.

(3) 상부 기단부의 갑석받침까지의 총 26톤의 하중을 지탱하는 4각 돌기둥의 경우, 돌기둥 자체의 전체 파괴율은 3% 이내로 비교적 안전하지만 접촉부의 불완전으로 점하중 및 편하중이 작용할 경우 부분 파괴의 위험이 있다. 4개의 돌기둥을 받치고 있는 괴임돌의 압축 파괴 위험은 적으나 편하중으로 인한 파괴 가능성이 크며 실제로 4개의 기둥 주변에 파괴면이 다수 발견된다.

(4) 탑신의 경우, 하중이 비교적 골고루 받고 있고 접촉면도 양호하여 부분 및 전체 파괴의 위험도는 상당히 낮다. 또한 탑의 골격을 이루는 중앙의 팔각기둥이 비와 바람 등 풍화의 원인으로 부터 보호될 수 있는 위치에 있기 때문에 구조적으로는 양호하다고 할 수 있다.

(5) 구조적으로는 상당히 안정감을 주지만 탑이 약간 기울어 있어 탑의 기울기에 의한 편하중으로 인한 파괴면이 1층 갑석 및 상부기단의 괴임돌에서 관찰되는 만큼 보완이 필요하다.

(6) 탑신부의 팔각난간 및 사각난간이 풍화가 아주 심하여 토양화에 이르고 있어 원래의 모습을 크게 훼손하고 있다. 이 들 부재는 탑신의 구조 안전과는 밀접한 관계를 갖지 않지만 풍화 저지 및 부재교체 등을 통하여 원래의 모습을 찾는 것이 필요하다고 생각된다.

사 사

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업으로 지원된 공주대학교 자연과학대학 문화재비파괴진단연구실 사업의 일환으로 수행되었으며, (주)고려구조의 재정지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김수진, 여상진, 장세정, 성소영, 이범한, 2000, 불국사 다보탑의 훼손현황과 보존대책, 한국문화재보존과학회 제12회 추계 학술대회(안병찬, 도춘호 편집), 국립중앙박물관.
- 박승범(편집), 1995, 콘크리트 구조물의 비파괴검사 및 안전진단, 한국콘크리트학회.
- 박일철, 2001, 정밀안전진단보고서-불국사 다보탑, 고려01-건-036, 고려ENG, 공주대학교 문화재 비파괴진단 연구실.
- 서만철, 2000, 탄성과 압반 분류, 지질 공학 기술 강좌(송무영 편집), 대한지질공학회, 공주대학교.
- 서만철, 송인선, 최희수, 2001, 암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전 진단, 지구물리, 4, 57-69.
- 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, 2000, 경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여, 지질학회지, 36, 335-340.
- ASTM, 1996, Annual Book of ASTM Standards, Easton, MD, 1996.
- Carter, T.G. 1992. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments. Proc. 4th. int. rock mechanics and rock engineering conf., Torino. Paper 1.
- Goodman, R.E. 1989. Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, New York.
- Hatzor. Y. and Goodman. R.E. 1993. Determination of the design block for tunnel supports in highly jointed rock. In Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice and Projects. (ed. J.A. Houson) 2, 263-292. Oxford: Pergamon.
- Harr, M.E. 1987. Reliability-based design in civil engineering. New York: McGraw-Hill.
- Hoek, E. 2000, Practical Rock Engineering, Hoek's 2000 edition, electronic version.
- Pine. R.J. 1992. Risk analysis design applications in mining geomechanics. Trans. Inst. Min. Metall. (Sect.A) 101, 149-158.
- Tyler, D.B., Trueman, R.T. and Pine, R.J. 1991. Rockbolt support design using a probabilistic method of key block analysis. In Rock mechanics as a multidisciplinary science, (ed. J.C. Roegiers), 1037-1047. Rotterdam: Balkema.
- Whitman. R.V. 1984. Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. J. Geotech. Enng, ASCE 110(2), 145-186.

2002년 6월 12일 원고접수

2002년 9월 23일 원고채택