

암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전 진단

서만철 · 송인선 · 최희수

공주대학교 문화재비파괴진단연구소

요 약

경상북도 경주시 불국사 삼층석탑(석가탑)의 구조 안전 진단을 목적으로 탑의 각 부재에 대한 비파괴 정밀 조사가 실시되었다. 암석의 역학적 성질을 추정하기 위하여 전체 44 개 부재의 456 개 지점에서 초음파 속도를 측정하였다. 측정된 속도의 범위는 1217 ~ 4403 m/sec의 분포를 가지며 평균 속도는 3227 m/sec이다. 각 부재의 일축 압축강도가 초음파 속도와의 관계를 나타내는 경험식을 이용하여 구하여 졌으며 범위는 134 ~ 844 kg/cm²이고 전체 평균치는 463 kg/cm²이다. 암석의 파괴 강도가 각 부재에서 정상분포를 보인다고 가정하고 석가탑의 각 부재에 대하여 파괴확률을 구하였다. 각 부재가 상위 하중에 의해 전단 파괴가 일어날 확률을 지극히 미약하지만 부재 사이의 접촉 면적이 적어 부분파괴의 가능성이 있으며 실제적으로도 접촉면 부근의 모서리 부근에서 부분파괴가 발생하였다. 본 탑의 기단부는 구조적으로 가장 취약하며 하대갑석의 인장 파괴확률은 6 ~ 18 %로 나타나며 대부분의 부재에서 대각선 방향으로 한 개 이상의 인장 파괴면이 관찰된다.

주요어: 불국사 석가탑, 파괴확률, 구조안전진단, 초음파 속도, 암석강도

Mancheol Suh, Insun Song and Huisoo Choi, 2001, The Structural Safety Diagnosis of Three-Story Pagoda in Bulkuk Temple Using the Probability of Failure. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 4, n. 1, p. 57-69

ABSTRACT: We have carried out a nondestructive close examination for the purpose of the structural safety diagnosis of the Three-Story Pagoda(Seokga Pagoda) in Bulkuk temple in the city of Kyungju, Kyungbuk, Korea. Ultrasonic wave velocities were measured at 456 points of the pagoda comprising 44 blocks to estimate the mechanical properties of rock blocks constituting the pagoda. The measured velocities have the range of 1217 to 4403 m/sec with the average of 3227 m/sec. The empirical relationship between the ultrasonic velocity and the uniaxial compressive strength yielded the estimation of strength of each block, ranging from 134 to 844 kg/cm² and averaging 463 kg/cm². With an assumption that the strength of each block is described as a random variables having a normal distribution, we calculated the probability of failure of rock blocks of the pagoda. Our investigation revealed that the probability of the structural failure due to the weight of higher blocks is very low. However, the probability of partial failure around contact area is substantial, which is consistent with the appearance that the edges and the corners of some blocks were broken off. The platform under the body of the pagoda appeared to be structurally weak as the probability of tensile failure of the lower platform is up to 18%, and diagonal fractures are shown where the probability of failure is high.

Key words: Three-Story Pagoda(Seokga Pagoda) in Bulkuk Temple, probability of failure, structural safety diagnosis, ultrasonic velocity,

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

1. 서 언

신라 제 35 대 경덕왕 10년(서기 751년)에 축조

된 불국사 삼층석탑은 석가의 상주설법을 상징한 것으로 석가탑(석가여래상주설법탑) 또는 무영탑 이라고도 불린다. 본 탑은 다보탑과 함께 신라의

많은 탐 중에서 가장 빼어난 대표작으로 평가되며 1962년 국보 제 21 호로 지정되었다. 불국사 삼층석탑은 축조시기가 천년이 넘는 데다가 옥외에 위치해 있기 때문에 풍화를 심하게 받고 있어서 원래의 모습과 강도가 크게 훼손되어 있다(김수진, 2001). 석조문화재를 훼손시키는 주 요인은 풍화이며, 우리나라의 자연환경을 고려할 때, 주로 빗물, 대기오염, 지하습기, 해수분무 염분, 기온변화, 생물서식 등이며, 인위적 훼손도 가끔 관찰된다(김수진, 2001). 암석의 공학적인 성질은 풍화가 진행됨에 따라 급격하게 변하는데 암석의 풍화에 따른 물성치의 변화는 밀도, 공극률, 탄성과 전달 속도, 압축강도, 인장강도 등 여러 가지이다. 풍화에 의한 입자간의 결합력의 약화와 미세균열의 생성 등으로 탄성과 속도가 저하되므로 초음파 속도 측정을 통하여 다른 물성을 산정할 수 있다(서만철, 2000).

일반적으로 암석의 강도와 물성은 현장에서 암석시료를 채취하여 실험실에서 적당한 크기와 모양으로 가공한 뒤 강도 및 물성 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. 가장 잘 이용되는 것이 초음파의 전달 특성이다.

초음파는 의학분야에서 영상진단을 하거나 기계류의 비파괴 진단을 위해 이미 사용되는 기구이다. 암석역학분야에서는 초음파를 통하여 매질의 강도 및 물성을 산출하는데 사용되어져 왔다. 초음파 속도는 주어진 매질에서 일정하며 매질의 탄성계수 및 밀도와 밀접한 관계를 갖는다. 같은 암석에서도 공극률 및 미세 균열의 발달 정도에 따라 다르다(Goodman, 1989). 이러한 원리를 이용하면 암석의 물성 및 풍화 정도를 산출해 낼 수 있으며, 석조문화재의 안정성을 평가하는데도 이용될 수 있다.

구조물을 설계하거나 안정성을 평가할 때 가장 보편적으로 사용되는 지표는 안전율(Factor of safety)이다(Hoek and Bray, 1981). 안전율은 구조물의 강도(Capacity; strength or resisting force)를 구조물에 작용하는 힘(Demand; stress or

distributing force)으로 나눈 값 즉 $F=C/D$ 로 정의된다. 안전율이 1 보다 작으면 구조물이 붕괴한다고 가정하며, 안전율이 크면 클수록 구조물은 안전하다고 할 수 있다. 그러나 암석과 같은 자연재료는 같은 부재 내에서도 균질하지도 않고, 균질 정도도 부재에 따라 다르기 때문에 강도를 하나의 수치로 보기보다는 임의변수(random variable)로 가정하고 확률빈도함수(PDF: probability density function)로 표현하는 것이 보다 실제에 가깝다고 할 수 있다(Hoek, 2000). 가장 간단한 확률빈도함수(PDF)는 정상분포곡선(normal distribution curve)으로 표현되며 Figure 1 과 같다. 이 부재에 작용한 응력이 x_1 이라고 할 경우 파괴확률(probability of failure)은 전체 PDF 면적분의 PDF를 x_1 까지 적분한 면적으로 표현되기 때문에 작용하는 응력이 증가함에 따라 적분면적이 증가하여 파괴확률도 증가한다. 안전율은 강도의 평균값만 고려하지만, 파괴확률은 부재 내의 균질도에 따른 강도 편차까지 고려하기 때문에 더 정확하다고 할 수 있다.

석기탑을 구성하는 각 부재의 암석강도의 PDF가 정상분포(normal distribution)를 갖는다고 가정하고 탐의 각 부재가 상위 부재의 하중을 견딜 수 있는 확률을 조사하였다. 각 부재의 부피와 밀도로부터 탐의 하중을 구하였으며 각 부재가 상위 하중에 의해 구조적 전단 파괴가 일어날 확률 및 부재 사이의 실제 접촉면에 발생하는 응력의 편중 현상에 의한 부분파손 확률을 구하였다. 석

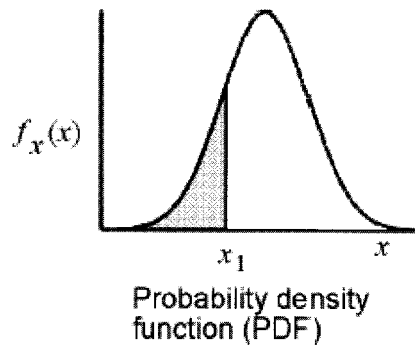


Fig. 1. Probability density function.

가탑의 하대갑석에 보이는 파단현상은 휨 모멘트에 의한 인장파괴의 가능성이 크기 때문에 대각선 방향으로 작용하는 휨 모멘트로부터 하대갑석의 하부에 작용하는 최대 인장응력을 계산하고 인장응력에 의한 파괴확률을 분석하였다. 각 부재의 파괴확률로부터 탑신의 전체적 구조 안전 진단을 실시하였다.

2. 탑의 구조 및 부재별 명칭

석가탑은 전체 44 개의 암석 부재로 되어있는 높이 8.2m의 석탑으로 전체 구조는 아래로부터 기단부, 탑신부 및 상륜부로 나뉜다(Figure 2). 대부분의 암석부재는 불국사 다보탑과 마찬가지로 남산화강암으로 보고되어 있다(좌용주 외, 2000;

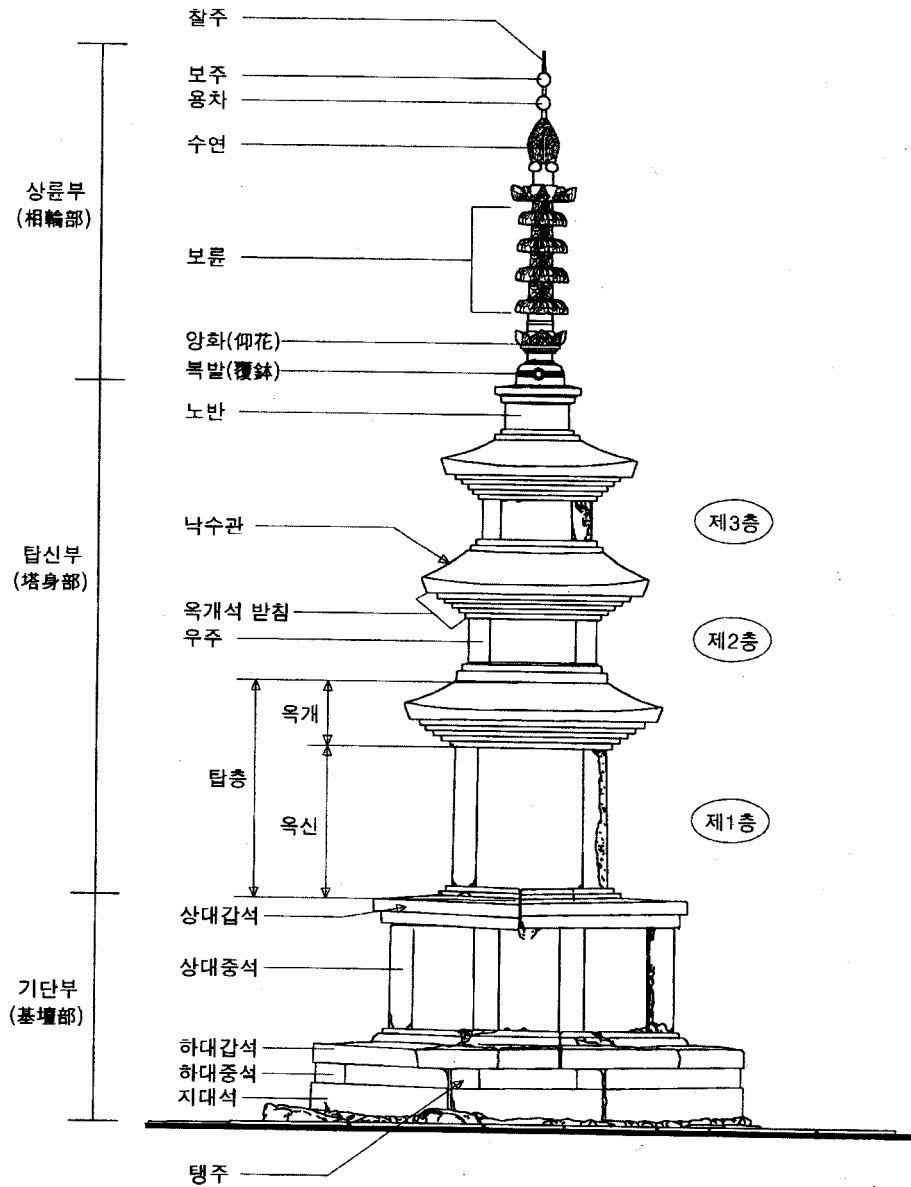


Fig. 2. Names of rock blocks of the Bulguksa Three-Story Pagoda(after Park et al., 2001).

박일철 외, 2001). 기단은 상·하부로 되어있다. 하부기단은 8개의 하대중석 및 지대석으로 정사각의 벽을 이루고 그 위에 4개의 판석 모양의 하대갑석을 얹어 이루어진 단의 형상을 하고있다. 상부기단은 하부기단 위에 4개의 면석을 세워 상대중석을 만들었고 그 위에 역시 4개의 판상으로 된 상대중석을 올려놓아 단을 만들었다. 탑신부는 각각 하나의 부재로 되어있는 옥신과 옥개를 쌓아 1개의 층을 이루며 전체 3층으로 되어있다. 석가탑이 삼층석탑으로 불리는 이유는 탑신부가 3층으로 되어있기 때문이다. 탑의 상륜부는 3층 옥개석까지 철주를 박고 구슬을 펜 듯하게 배치하였다(정영호 외, 1999). 이 상륜부는 원래 훼손되어 없어진 것을 1973년 남원 실상사 삼층석탑의 머리장식을 본따서 복원한 것이다(박일철 외, 2001). 각 부재의 높이와 크기를 절묘하게 조화시켜 전체 탑신의 구조가 서로 상하에서 알맞게 조화되어 안정된 느낌과 아름다운 비례를 보여준다.

3. 조사방법

초음파 속도의 측정은 주로 코아 암석 시료를 통해 이루어지며 시료의 한쪽 끝에서 다른쪽 끝까지 초음파가 진행하는데 걸리는 시간을 측정하고 이를 거리(시료의 길이)로 나누어 줌으로써 속도를 산출해낼 수 있다.

$$\text{초음파 속도} = \frac{\text{시료의 길이}}{\text{전달 시간}} \quad (1)$$

측정방법은 비교적 간단하다. 두 개의 압전 결정(piezoelectric crystal)과 전기신호 발생기 및 오실로스코프가 필요하며 설치방법은 Figure 3과 같다. 전기신호 발생기에서 전기신호가 발생되면 시료의 한쪽 끝에 있는 압전 결정에서 이를 압력신호로 즉 초음파로 바꾸어주고 이 초음파가 시료를 통과하여 다른 한쪽 끝에 있는 압전 결정에 도달하게 되고 이 압전 결정이 압력신호를 전기신호로 바꾸어 준다. 오실로스코프(oscilloscope)를 통해 초음파의 진행된 시간을 측정한다. 자세한 시험방법은 ASTM(D2845-90, 1996)에 잘 설명되어 있다. 그러나 이 방법을 직접 문화재안전진

단에 이용할 수 없다. 왜냐하면 문화재로부터 코아시료를 채취할 수 없기 때문이다.

본 조사에서는 두 개의 압전 결정을 현장에서 석조면에 직접 설치하고 측정하는 방법을 이용하였다. 이러한 방법에는 3가지 방법이 주로 쓰이며 Figure 4와 같다. 부재의 폭이 30cm 이하일 경우에는 Direct transmission 방법을 사용하였으며 30cm 이상일 경우에는 주로 Indirect transmission

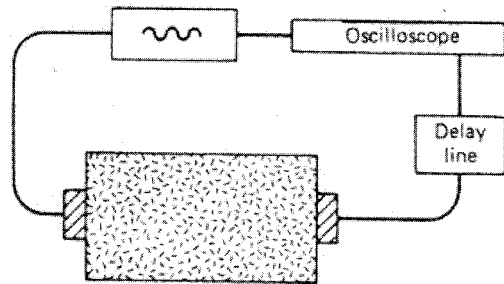


Fig. 3. Scheme for pulse velocity measurement(Goodman, 1989).

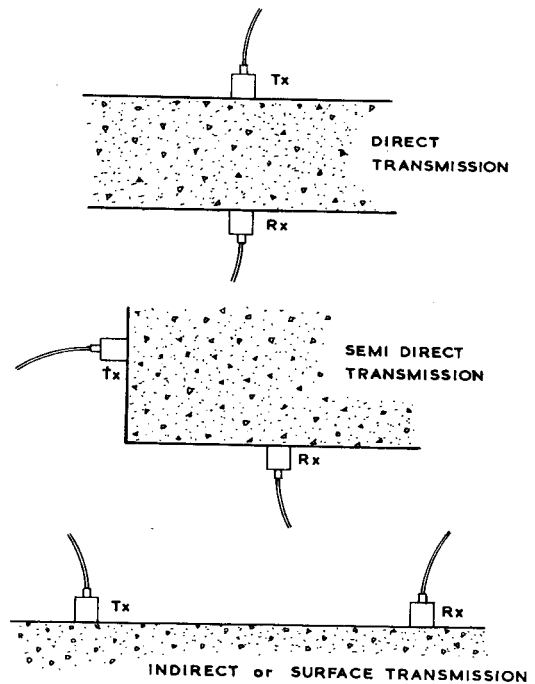


Fig. 4. Array methods of transducers.

방법을 사용하였다. 두 압전결정 사이의 거리 측정이 비교적 어려운 Semi direct transmission 방법은 본 조사에서는 제외되었다. Indirect transmission 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.

4. 파괴확률 이론

확률이론은 Harr(1987)에 의해 토목구조의 설계에 소개된 이래, 구조물의 안전도(Whitman, 1984) 및 지하 구조물에서 발생하는 여러 가지 문제점을 분석하기 위한 도구로써 사용되어져왔다 (Pine, 1992; Tyler *et al.*, 1991; Hatzor and Goodman, 1993; Carter, 1992). 암석 구조물에서의 파괴확률 이론은 Hoek(2000)에 잘 소개되어 있다. 암석강도는 동일한 부재 내에서도 일정하지 않

기 때문에 임의의 변수(random variable)로 가정하고 확률빈도함수(PDF)를 구하면 작용하는 응력에 따른 파괴확률을 구할 수 있다. 본 연구에서는 확률빈도함수가 정상분포곡선(normal distribution curve)을 따른다고 가정하고 파괴확률을 구하였다. 각 부재의 여러 부위에서 초음파 탐사에 의해 비파괴적으로 구하여진 강도로부터 평균값(μ)과 표준편차(σ)를 구하였다. 각 부재의 강도의 평균값과

표준편차로부터 강도의 정상분포를 구하였으며 정상분포를 구하는 식은 다음 (2)식과 같다.

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

식 (2)에서 $f(x)$ 는 확률빈도함수이다. 예를 들어 강도의 평균값이 350 kg/cm²이고 표준편차가 50 kg/cm²인 경우의 확률빈도함수는 Figure 5와같이 나타난다. 만약 이 부재가 250 kg/cm²의 응력을 받고 있다면 이 부재가 파괴될 확률은 이 곡선이 차지하는 전체 면적 분의 250 kg/cm² 왼쪽 부분의 면적으로 나타낼 수 있다. 응력이 점점 커지면 이 면적도 점점 커져 파괴확률이 증가한다. 이 함수를 표준정상분포곡선으로 변형하여 표현하면 표준정

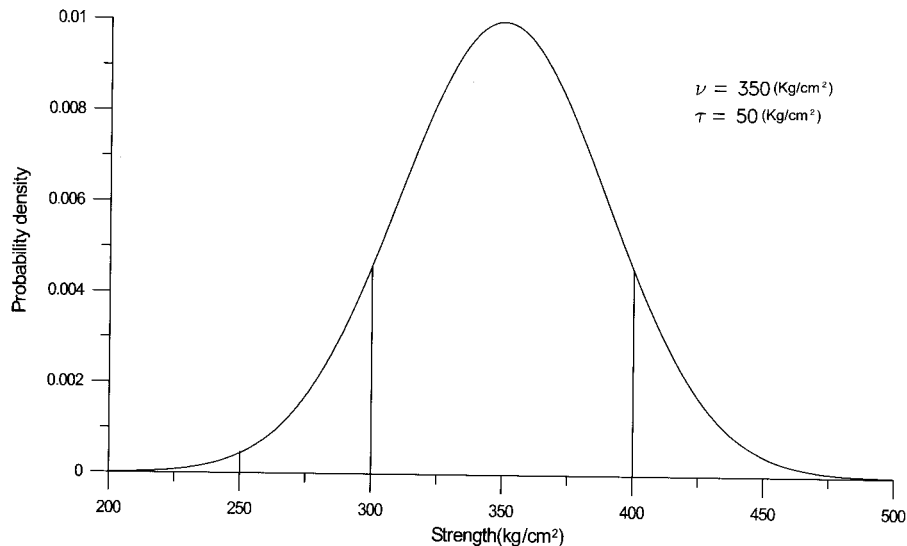


Fig. 5. Probability density function of rock strengths.

상분포표를 이용하여 쉽게 파괴확률을 구할 수 있다. 이 부재의 경우, 만약 250 kg/cm²의 응력을 받고 있다면 파괴확률은 2.28 %, 만약 300 kg/cm²의 응력을 받고 있다면 파괴확률은 15.87 %, 만약 400 kg/cm²의 응력을 받고 있다면 파괴확률은 84.13 % 로써 응력이 증가할수록 파괴확률도 증가한다. 따라서 파괴확률은 암석강도의 평균값만 취하지 않고 암석의 균질도를 나타내는 부위에 따른 강도의 편차까지도 고려함으로 안전율에 의한 분석보다 더 신뢰성이 높다고 할 수 있다(Hoek, 2000).

5. 암석강도

각 부재가 상위 부재의 하중을 전달 수 있는지 진단하기 위해 암석강도를 구하였다. 문화재 특성상 암석강도를 직접 측정할 수는 없었으며 초음파 속도로부터 암석의 강도를 추정하였다. 우선 구조물의 특성상 압축력에 의해 파괴될 수 있는 부재와 인장 응력에 의해 파괴될 수 있는 부재를 구분하여 분석하기 위해 일축압축강도와 인장강도를 구하였다. 비파괴 방법으로 가장 널리 쓰이는 초음파 속도와 암석의 일축압축강도와와의 관계를 나타내는 경험식을 이용하여 일축압축강도를 구하였으며 화강암에서의 경험식은 다음과 같다.

$$C_o = 66.039 \times \exp(0.000578598 \times V_p) \quad (3)$$

여기에서 V_p 는 초음파 P파 속도이다. 한 부재에서 부위를 달리하여 여러 번 초음파 속도를 측정하였으며 식 (3)을 이용하여 각 측정에서 일축압축강도를 구하였다.

인장강도(I) 역시 직접 측정할 수는 없었으며 초음파 속도로부터 구한 암석 부재의 일축압축강도로부터 추정하였다. 암석의 인장강도 대 압축강도의 비는 1:10 에서 1:200 까지 암석에 따라 다양하다(Goodman, 1989). 그러나 화강암의 경우 대체로 1:10 에서 1:20 정도로 압축되며(Goodman, 1989; Bryan, 1997), 우리는 암석의 풍화 및 보수적 구조해석을 고려하여 최소값인 1:20 을 취하였다.

6. 파괴확률 분석

석가탑의 구조안전진단을 위해 먼저 탑신의 각 부재가 상위 부재의 하중을 견딜 수 있는지를 조사하였다. 이 진단을 위하여 석탑이 수직으로 서 있고 하중을 받는 모든 면은 수평하다고 가정하였다. 각 부재의 중량은 각 부재의 부피와 화강암의 밀도(2.7 g/cm³)의 곱으로 나타낼 수 있다. 각 부재의 폭, 길이, 높이 등을 실측하여 부피를 계산하였으며, 부재가 사다리꼴 입체형을 띠고 있는 옥개부는 여러 부분으로 나누어 부피를 계산한 후 합을 구하였다. 하나의 부재가 하나의 구조를 이룰 경우에는 비교적 정확히 중량을 산출할 수 있었으나, 기단부는 여러 개의 부재로 이루어지고 내부의 구조를 정확히 파악할 수 없어 기단부의 내부가 모두 채워진 상태로 가정하고 중량을 계산하였다. 즉 최대 중량치를 산출하여 안전도 진단에 있어 보수적 입장을 취하였다.

각 부재에 작용하는 응력은 상위 부재들의 중량의 합을 진단 부재의 수평 단면적으로 나누어 구할 수 있다. 이 경우에도 하나의 부재가 하나의 구조물을 이루는 상륜부 및 탑신부의 전체 접촉면적은 정확히 측정할 수 있었으나, 기단부는 여러 개의 부재로 이루어졌을 뿐 아니라 내부 구조를 정확히 알 수 없어 밖에서 확인할 수 있는 두께를 전체에 적용하였다. 상대중석의 평균 두께는 약 30 cm, 하대 중석의 평균 두께는 약 45 cm로 가정하고 단면적을 계산하였다. 즉 중량치는 최대값을 취하고 접촉면적은 최소치를 취하여 안전도 진단에 있어 최대의 보수적 입장을 유지하였다. 옥신부처럼 수평 단면적이 일정할 경우 쉽게 단면적을 구할 수 있으나 옥개부처럼 일정하지 않을 경우에는 최소 단면적을 구하였다. 단면적에 작용하는 응력과 각 부재의 암석강도를 비교하여 구조 안전 진단을 하였다. 접촉부 부근에서는 접촉면이 완전 접촉을 이루지 않고 부분적으로 접촉하고 있기 때문에 응력의 집중현상이 나타나 부분파괴를 일으킬 수 있다. 이러한 경우에는 실제 접촉면을 고려하여 응력을 계산하였다. 그러나 실제 접촉 면적을 정확히 측정할 수 없어 완전접촉, 1% 접촉, 0.2% 접촉으로 가정하고 이에 따

르는 응력을 계산하였으며, 이를 토대로 현재 석탑의 부재별 안전도를 진단하고, 석탑의 안전을 위한 보수방안을 제시하는 것을 목적으로 하였다.

Figure 6에서 보여주는 석가탑의 하대 갑석에 보이는 파단 현상은 압축력에 의한 전단 파괴라기 보다는 휨 모멘트에 의한 인장 파괴의 가능성이 크다. 석탑을 구성하는 암석 부재의 휨 모멘트는 암석의 하중 뿐 아니라, 부재의 크기와 모양 그리고 하중의 위치와 관련이 있기 때문에 아주 복잡하며 탑의 구조와도 밀접한 관계가 있다. Figure 7에서 보여주는 것처럼 사각 단면의 시험편의 양단을 지지하고 중앙부에 점하중을 가하였을 때 압편이 아래로 휘게 되어 가압 부분에서는 압축 응력이 발생하지만 동일선상의 반대 면에서는 양단 모멘트로 인한 인장 응력이 발생한다. 이때 최대 인장 응력은 다음과 같이 구하여 진다 (이희근, 양형식, 1997; 장기남, 이정인, 1980).

$$\sigma_t = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4)$$

- σ_t : 최대 인장 응력
- P : 하중
- L : 양단 지지점 간의 거리
- b, d : 사각 단면의 폭, 높이

식 (4)에서 구하여진 인장응력이 그 암석의 고유 인장강도(T)보다 크면 인장 파괴가 일어난다. 석가탑의 경우, 실제 구조는 이보다 훨씬 복잡하여 암석 부재의 각 부분에서의 휨 모멘트에 의한 인

장 응력을 구하는 것은 쉽지 않다. 그러나 하대갑석의 파괴면이 탑의 중심에서 방사선으로 진행된 것으로 보아 인장응력은 이와 직각 방향으로 작용된 것으로 보이며, 이 방향의 양 끝 모서리를 하부중석이 지지하고 중앙에 상대중석의 모서리를 통하여 탑의 하중이 전달되는 것으로 해석할 수 있으며, 이 경우 식(4)을 이용하여 인장응력을 구할 수 있다.

총 하중은 상위 부재들의 중량의 합으로 나타낼 수 있으며, 이 하중은 4개의 부재에 골고루 분산되어 전달되었다고 가정하고 총 하중의 1/4만을 각 부재에 작용한 하중(P)으로 계산하였다. 양단 지지점간의 거리(L)는 하부중석이 지지하는 하부갑석의 양 모서리 부근사이의 거리로 실측을 통하여 구할 수 있다. 단면의 높이(d)는 파괴 위치와 상관없이 거의 일정하지만, 인장이 부재의 대각선 방향으로 작용하기 때문에 폭(b)은 파괴면의 위치에 따라 달라진다. Figure 7과 같이 3점에서 하중을 받으며 단면적이 일정할 경우 인장 응력은 시험편의 중앙부분에서 최대가 되어 대부분의 경우 이 부분에서 파괴가 일어난다. 그러나 석가탑의 경우, 파괴면이 각 부재의 정 중앙을 통과하지 않고 옆으로 비껴간 이유는 중앙부분의 폭(b)이 넓어 인장 응력이 이 부근에서 최대가 되지 않는 것으로 판단된다. 따라서 본 분석에서는 파괴면 부근에서의 폭(b)을 사용하였으며, 파괴면이 없는 부재는 대각선 길이의 2/3를 폭(b)으로 사용하였다. 식 (4)을 이용하여 구한 인장 응력과 각 부재의 인장강도를 비교함으로써 파괴의 가능성을 분석하였다.

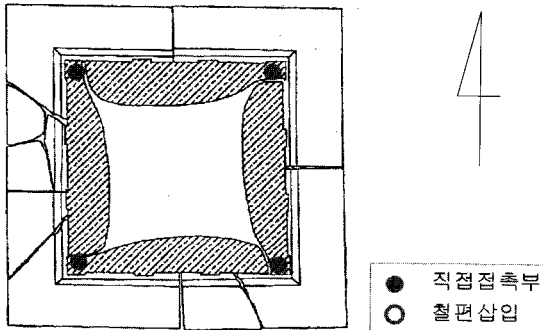


Fig. 6. The lower Gabsok showing radial ruptures.

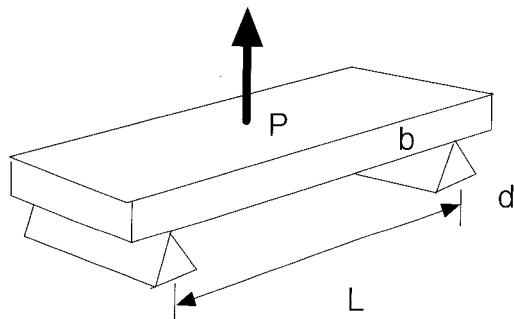


Fig. 7. Schematic of three-point beam test.

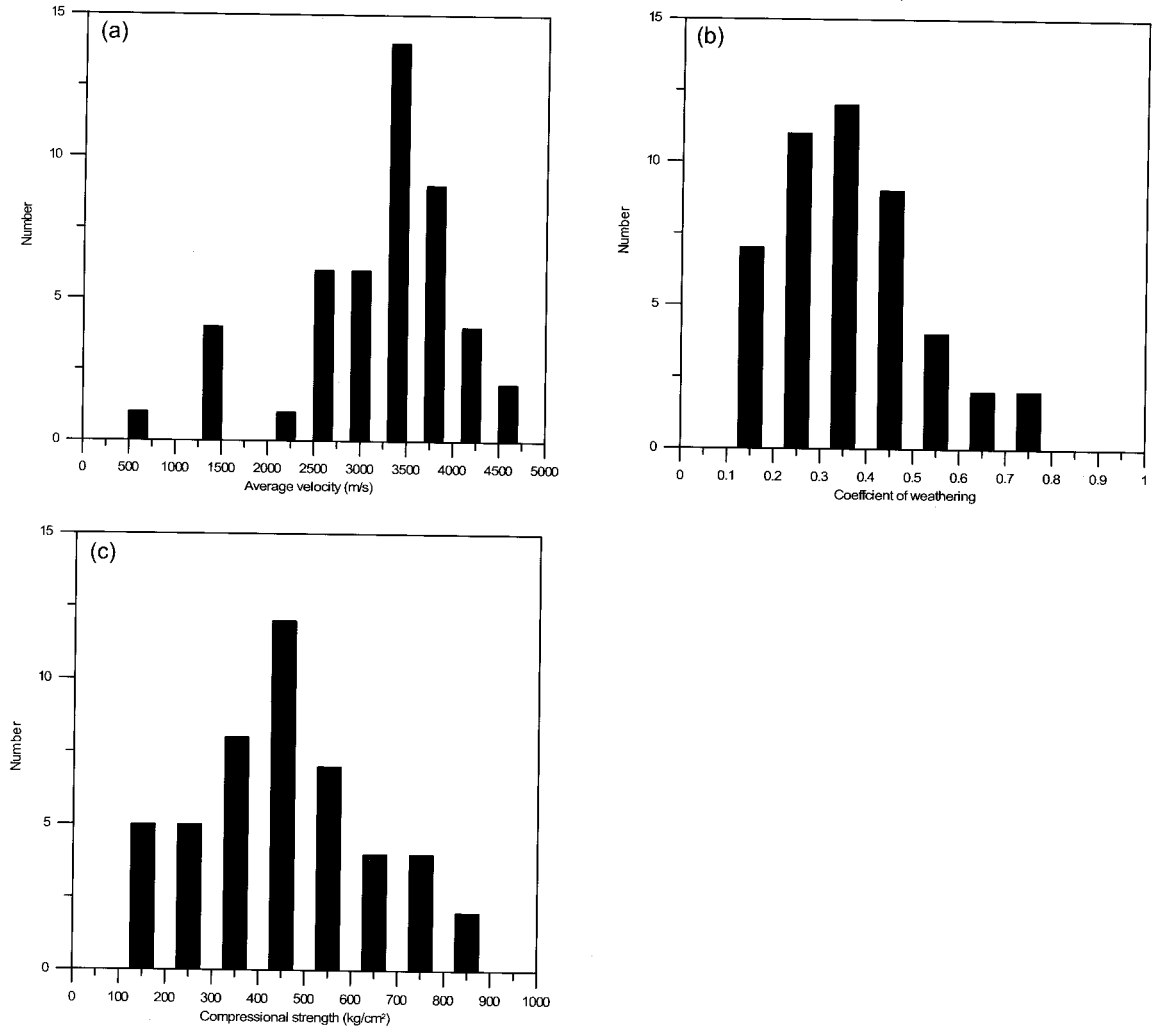


Fig. 8. Histogram of sonic wave velocities (a), coefficients of weathering (b), and compressional strengths for each block (c).

7. 결과고찰

불국사 삼층석탑(석가탑)에서 실시한 초음파탐사 부재의 측정수는 전체 44 개 부재에서 456 지점을 측정하였고, 속도 범위는 1217 ~ 4403 m/sec 의 분포로 평균 속도가 3227 m/sec로 나타났다. 부재별 평균 속도 분포는 Figure 7a 에 나타나 있다. 아래의 식을 이용하여 초음파 속도로부터 풍화도 지수(k ; coefficient of weathering)를 구하였다(Iliev, 1967).

$$k = \frac{V_u - V_w}{V_u} \quad (5)$$

여기서 V_u 는 신선암의 P파 속도이며 V_w 는 풍화암의 P파 속도이다. 식 (2)에 의해 구하여진 풍화지수는 14 ~ 76 %의 범위를 가지며, 평균치는 37 %로 나타났다. 부재별 풍화지수의 분포는 Figure 7b 에 나타나 있다. 식 (3)에 의해 구하여진 부재별 평균 일축압축강도의 분포는 134 ~ 844 kg/cm²의 범위를 가지며 전체 평균치는 463 kg/cm² 이다(Figure 7c). 이러한 수치는 석가탑을 이루고 있는 각 부재가

비교적 잘 보존되어 왔음을 의미하며 역학적으로도 석탑의 하중을 견디는데 전혀 무리가 없음을 나타낸다.

7.1. 압축응력에 의한 파괴확률 분석

암석의 압축강도가 전체 탑신의 구조 안전에 영향을 줄 수 있는 부재들을 정밀 분석하였다 (Table 1). 기단부의 상대갑석과 하대갑석은 압축력 보다는 굴곡 모멘트에 의한 인장력에 의한 파괴 가능성이 훨씬 크기 때문에 압축 강도에 의한 분석에서는 제외되었다.

탑신부는 3개의 옥개부와 옥신부로 구성되어 있으며 아래로 내려올수록 하중과 부재의 단면적이 모두 증가하며 단면 및 접촉면에 작용하는 응력도 증가한다(Table 1). 부재들 사이의 면 전체가 완전히 접촉한다고 가정하면 접촉면에 작용하는 응력은 1.5 kg/cm² 미만이 되어 암석의 강도 (400 ~ 600 kg/cm²)에 훨씬 못 미치며 파괴확률도

2.5% 이하로 전체 파괴가 일어날 확률은 극히 적다. 전체면적의 1%만이 접촉하여 하중을 전달시킨다 하여도 파괴확률이 6% 이하가 되어 비교적 안전하다. 그러나 접촉면적이 전체면적의 0.2% 이하가 되면 접촉 부분의 응력이 평균 강도의 50%에서 100% 까지 육박하여 1층 및 2층 옥신부에서는 파괴확률이 30% 이상이 되어 부분 파괴가 일어날 가능성이 많다. 실제적으로 탑신부에서는 접촉 면적이 그리 크지 않다. Figure 9에서 보이는 것처럼 석가탑 3층 옥신부와 옥개부의 접촉면 사이가 대부분 떠있는 것이 관찰된다.

또한 옥개석의 수평을 유지하기 위해 북서쪽 모서리에 철편을 끼워 넣은 것이 보인다(Figure 9). 석가탑 상위 부재와 하위 부재 사이의 접촉면을 조사하였다. 탑신의 하중이 철편을 통하여 하위 부재로 전달되는 경우가 많은데 이는 철편을 이용하여 각 부재의 수평을 유지시켜 왔음을 나타낸다. 대체로 암석 부재의 모서리 부분에 접촉

Table 1. Analysis of probability of failure due to compression.

측점위치	부재 번호	암석강도(kg/cm ²)		하중 (kg)	면적 (cm ²)	응력(kg/cm ²)			파괴확률		
		평균	표준 편차			완전접촉	1%접촉	0.2%접촉	완전접촉	1%접촉	0.2%접촉
노반	30	533	97	605	2050	0.295	29.5	147.4	0.10	0.10	0.10
3층 옥개	29	389	142	1068	4080	0.262	26.2	130.9	0.31	0.52	3.44
3층 옥신	28	651	205	5499	12332	0.446	44.6	222.9	0.10	0.16	1.88
2층 옥개	27	549	259	6860	12332	0.556	55.6	278.2	1.70	2.87	14.69
2층 옥신	26	580	287	14593	16932	0.862	86.2	430.9	2.17	4.27	30.15
1층 옥개	25	564	287	17494	16932	1.033	103.3	516.6	2.50	5.48	43.25
1층 옥신	24	495	244	25674	35259	0.728	72.8	364.1	2.12	4.18	29.46
상대중석(남)	20	649	439	47510	30068	1.580	158.0	790.0	7.08	13.14	62.55
상대중석(동)	17	483	206	47510	30068	1.580	158.0	790.0	0.96	5.71	93.19
상대중석(북)	12	497	299	47510	30068	1.580	158.0	790.0	4.85	12.82	83.65
상대중석(서)	6	505	193	47510	30068	1.580	158.0	790.0	0.45	3.59	92.92
하대중석(남)	17	483	206	83864	70457	1.190	119.029	595.1	0.96	3.84	70.54
하대중석(남동)	15	524	206	83864	70457	1.190	119.029	595.1	0.57	2.50	63.31
하대중석(동)	14	372	157	83864	70457	1.190	119.029	595.1	0.91	5.37	92.07
하대중석(북동)	10	466	234	83864	70457	1.190	119.029	595.1	2.33	6.94	70.88
하대중석(북서)	9	350	48	83864	70457	1.190	119.029	595.1	0.10	0.10	99.90
하대중석(북서)	3	395	176	83864	70457	1.190	119.029	595.1	1.29	5.94	87.08
하대중석(서)	2	280	16	83864	70457	1.190	119.029	595.1	0.10	0.10	99.90
하대중석(남서)	1	469	201	83864	70457	1.190	119.029	595.1	0.99	4.09	73.24

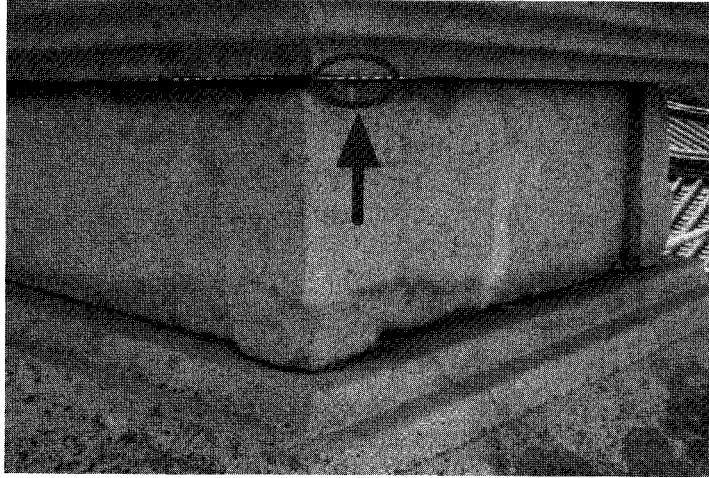


Fig. 9. Contact between Okshin and Okhae in the third story of the Seokga Pagoda.

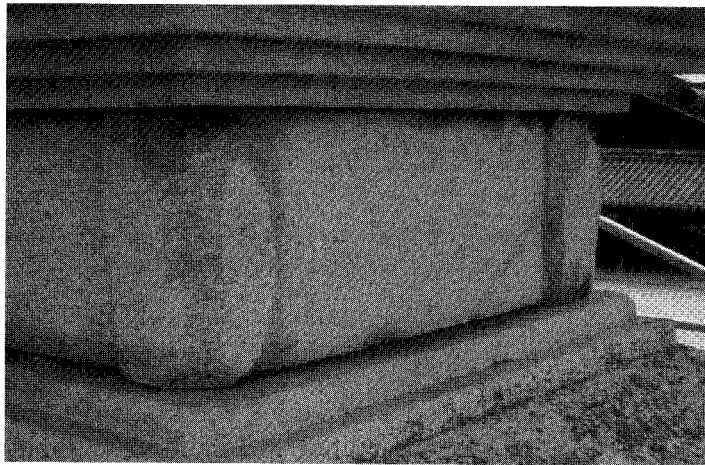


Fig. 10. Okshin of the third story of the Seokga Pagoda showing the corners and edges broken off.

면이 집중되고 있다. 접촉면적을 정확히 측정할 수는 없었지만 육안으로 관찰한 결과 전체면적의 0.2%이하일 가능성이 크다. 접촉면적이 0.2% 이하로 내려갈 경우 파괴확률은 가파르게 상승한다. 부재의 강도가 비교적 높음에도 불구하고 옥신부의 가장자리 부근에 부분파괴가 집중되고 있는 현상은 접촉면적이 부재의 모서리 부분에 집중되어 있는 것과 잘 일치하며 실제 접촉면적이 상당히 작음(0.2%이하)을 나타낸다(Figure 10). 탑신

부에서는 각 부위의 접촉면적을 증가시키면 부분 파괴 현상을 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

기단부의 상대중석 및 하대중석의 하중 지지도를 조사하였다. 상대중석은 4개의 석판으로 구성되어 있으며, 서로 세워져서 상대갑석을 지지하도록 설계되었다(Figure 1, Figure 6). 상대중석이 상륜부, 탑신부 및 상대갑석의 모든 하중을 견딜 수 있는지를 조사하기 위해, 상대중석의 각 부재의

암석 강도와 이에 작용하는 총 하중, 그리고 접촉 면적을 구하였다(Table 1). 계산된 접촉면적에서 완전접촉을 이루고 있다고 가정할 경우, 응력은 1.58 kg/cm^2 으로 상대중석의 평균 강도($500 \sim 650 \text{ kg/cm}^2$)에 비해 훨씬 못 미치며, 파괴확률도 10% 이내이다. 상대중석(남)과 상대중석(북)의 파괴확률이 크게 나온 이유는 표준편차가 크기 때문이다. 상대중석(남)의 경우 평균 암석강도는 가장 크지만 표준편차도 상대적으로 크기 때문에 낮은 응력에서도 상대적으로 파괴확률은 크게 나온다. 암석 강도의 평균치만 사용하지 않고 표준편차와 함께 강도의정상분포를 이용하여 파괴확률의 개념을 이용하면 암석이 얼마나 균질한지도 함께 고려가 되기 때문에 안전도를 보다 과학적으로 분석할 수 있다. 전체 접촉면의 1%만이 실제 접촉하여 하중을 전달시킬 경우에도, 응력은 약 160 kg/cm^2 으로 암석강도에 비해 미미하며, 파괴확률은 15%이하로 비교적 안전하다. 그러나 0.2%만이 접촉할 경우, 응력은 780 kg/cm^2 로 평균 강도를 넘어서며 파괴확률이 최소 62%에서 최대 93%로 대단히 위험하다. 기단부의 하대중석은 총 8개의 부재로 구성되었다(Figure 1). 각 부재의 암석강도와 이에

작용하는 하중을 비교하여 각 부재의 안전도를 조사하였다. 이 부재들과 하대감석 사이가 완전접촉을 이룰 경우, 계산된 응력은 1.19 kg/cm^2 , 파괴확률은 3% 이하로 상당히 안전하며, 1%만의 접촉이 이루어질 경우에도 응력이 119 kg/cm^2 로 평균 암석강도의 20~30%, 파괴확률도 7%미만으로 비교적 안전하다. 그러나, 0.2%만이 접촉할 경우 응력은 595 kg/cm^2 로 암석강도의 평균치를 넘어서며, 파괴확률도 70~99%로 대단히 위험하다. 이 부분은 전체 탑신의 기저 부분으로 대단히 중요하며, 전체 탑신의 안전도에 결정적인 역할을 한다. 이 부분에서도 부분파괴가 일어나는 것으로 보아 접촉면적이 그리 크지 않은 것으로 판단되며 그 이유는 부분 침하에 따르는 하대중석의 변위 때문으로 해석된다(Figure 11). 전체적으로 부분파괴가 일어나는 이유는 접촉면적이 작아 응력의 집중현상에 의해 일어나는 것으로 보이며 이를 저지하기 위해서는 접촉면적을 늘려 주어야 한다. 특히 하대중석 및 지대석은 지반의 차별침하로 구조적으로 위태로우며 이를 막기 위해서는 지반의 보강과 함께 하대중석을 원 위치로 옮겨 놓는 것이 필요하다.

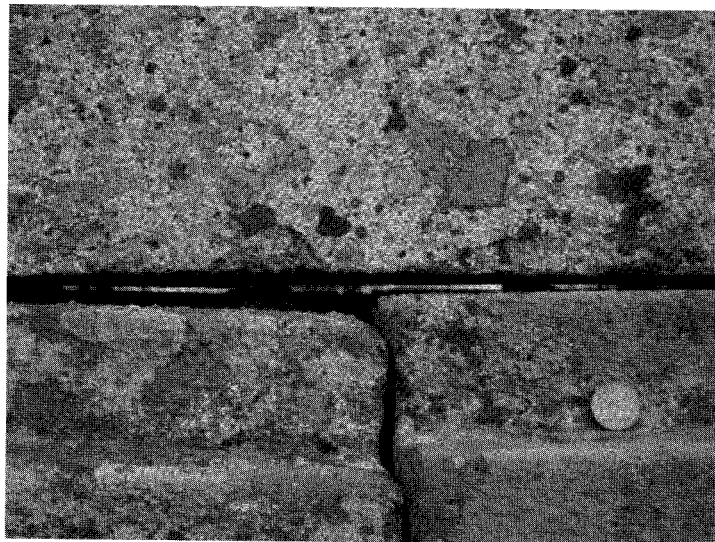


Fig. 11. An aperture between the lower Chungseok and lower Gabseok showing ground settlement.

Table 2. Analysis of probability of failure due to tensile stress.

부재	P(kg)	L(cm)	b(cm)	d(cm)	St(kg/cm ²)	Tave (kg/cm ²)	Tstd (kg/cm ²)	z	확률(%)
동북	14850	196	206	30	23.55	29.2	1.74	-3.25	0.1
서북	14850	253	226	30	27.71	32.8	4.66	-1.09	13.79
서남	14850	228	193	30	29.24	33.6	8.00	-0.55	29.12
동남	14850	216	204	30	26.21	28.4	2.76	-0.79	21.48

7.2. 인장 응력에 의한 파괴확률 분석

압축력에 의한 암석의 전단 파괴는 압축 응력이 압축 강도보다 커질 때 발생하며, 탑의 구조적 결합보다는 탑의 하중 및 각 암석 부재의 강도와 관련이 깊다. 석탑에 사용되는 대부분의 암석 부재의 압축강도는 풍화가 상당히 진행되었다 하더라도 탑의 하중을 견디기에는 전혀 무리가 없다. 석가탑의 하대 갑석에 보이는 파단 현상은 압축력에 의한 전단 파괴라기 보다는 휨 모멘트에 의한 인장 파괴의 가능성이 크다(Figure 6).

인장 응력에 의한 파괴확률 분석 결과는 Table 2와 같다. 계산된 인장 응력이 평균 인장강도의 80 ~ 90%이며 대체로 파괴확률은 30% 미만으로 나왔다. 초음파 속도에 의하여 추정된 인장강도는 신선한 화강암의 약 30%에 해당되어 하대 갑석의 파괴는 풍화가 상당히 진행된 이후 생성된 것으로 판단된다. 동북면의 부재가 파괴확률이 0.1%로 가장 낮게 나왔으며 이 부재에는 파괴면이 보이지 않는다. 나머지 부재에서 한 개 이상의 파괴면이 보이며 특히 서북면의 부재에서는 파괴확률이 13.79%로 비교적 낮게 나왔지만 여러 개의 파괴면이 보인다. 휨 모멘트에 의해 파괴가 일단 발생하면 양단 지점간의 거리(L)가 짧아져 더 이상의 하중이 증가되지 않는 한 안정되는 것이 보통이지만 서북면의 하대갑석이 여러 개의 파괴면을 보이는 것은 부분침하에 의해 응력이 심하게 왜곡되어 있으며 전체 탑신이 서북 방향으로 기울어 하중이 편중되었을 가능성이 크다. 하대중석의 부분 침하를 방지하고 원위치로 환원시켜 접촉점을 늘림으로써 휨 모멘트를 감소시키는 방안이 필요하다.

8. 결 론

(1) 초음파 속도와 화강암의 일축압축강도 사이의 경험식을 이용하여 부재별 암석강도를 계산한 결과 부재별 평균치는 134 ~ 844 kg/cm²의 범위를 가지며 전체 평균치는 463 kg/cm²으로, 이는 탑의 하중을 지지하기에는 충분한 수치이다.

(2) 각 부재의 부피와 화강암의 평균 밀도로부터 탑의 각 접촉면에 작용하는 하중을 구하였으며, 실제 접촉면이 전체 접촉면의 1%가 넘을 경우 파괴확률은 15%이하로 비교적 안전하며, 0.2%이하일 경우 기단부의 파괴확률이 60%를 넘어 부분 파괴 위험이 있고, 탑신부의 파괴확률도 30%를 넘어 비교적 위험하다.

(3) 탑신부의 옥신부와 기단부의 상대 하대중석부의 상단 및 하단의 모서리 부근이 부분파괴를 보여주는 것으로 보아 접촉면이 각 부재의 가장 자리에 집중되고 그 면적도 상당히 작을 것(0.2% 이하)으로 보이며 이는 육안관찰 결과와도 일치한다.

(4) 탑신부의 접촉면적이 작은 이유는 접촉면이 정확하게 편평하지 않고 흔들리지 않도록 첩편으로 괴어 놓았기 때문이며, 기단부에서는 지반의 부분 침하로 각 중석이 움직였기 때문이라고 판단된다.

(5) 탑을 구성하는 각 부재의 부분 파괴를 저지하기 위해서는 접촉 면적을 늘려 주는 것이 급선무이다. 지반의 부분 침하를 막기위한 보강이 필요하며, 변위를 보이는 기단부 부재들을 원위치로 옮기고, 탑신부에서는 접촉점을 늘려 가장자리에 집중되지 않도록 하고 접촉 면적을 늘려야 한다.

(6) 석가탑 하대갑석의 파괴확률 분석 결과, 계산된 인장응력이 평균인장강도의 80 ~ 90 %이며 대체로 파괴확률은 30 % 미만이다. 동북쪽의 하대갑석의 파괴확률은 0.1 % 로 낮게 나왔으며 실제로 현재 온전한 상태이다. 나머지 부재의 파괴확률은 13 ~ 29 %로서, 실제 모두 파괴되었다.

(7) 하대중석의 부분침하를 방지하고 원위치를 환원시켜주는 것이 필요하며 기단 내부에 심주를 설치하여 상부하중을 지지할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업으로 지원된 공주대학교 자연과학대학 문화재비파괴진단연구실의 재정적지원에 감사드립니다.

참고문헌

김수진, 2001, 한국의 석조문화재 보존, 문화재 보존에 있어서의 지질학의 역할(서만철 편집), 대한지질학회, 공주대학교.
 박일철, 2001, 정밀안전진단 보고서-불국사 3층석탑(석가탑), 고려01-건-036, 고려구조 ENG, 공주대학교 문화재 비파괴 진단연구실.
 서만철, 2000, 탄성과 암반 분류, 지질공학 기술강좌(송무영 편집), 대한지질공학회, 공주대학교.
 이희근, 양형식, 1997, 일반암석역학, 서울대학교 출판사, 서울.
 정영호, 손재식, 안장현, 1999, 석탑 대원사, 130p
 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.
 Bryan, 1997, Mechanical Characterization, M.S. thesis, University of Wisconsin-Madison.
 Carter, T.G. 1992. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments. *Proceedings 4th international rock mechanics and rock engineering conference*, 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
 Hoek, E. 2000, Rock Engineering, CD ROM version.
 Hoek, E. and Bray, J.W. 1981. *Rock Slope Engineering*. 3rd edn. London: Institution of Mining and Metallurgy 402p.
 Pine. R.J. 1992. Risk analysis design applications in mining geomechanics. *Transaction of Inst. Mining and Metallurgy*(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.

2001년 2월 3일 원고접수
 2001년 3월 26일 원고채택