대한지리학회지 제42권 제3호 2007(315~331)

불국사 지역의 지형특성과 불국사의 내진 구조*

황상일**

The Geomorphic Characteristics of Bulguksa-region and the Earthquake Resistant Structure of the Bulguksa Temple*

Sangill Hwang**

요약 : 한국 불교 사찰을 대표하는 불국사는 활단층인 불국사(울산)단층선이 통과하는 한반도에서 지반이 가장 불안정한 곳에 입지한다. 사찰이 조성된 선상지 지형면의 폭이 좁고 경사가 급하므로 건축자들은 불교의 상징세계를 완성하기 위하여 부지의 남쪽과 서쪽을 확장하였다. 인위적으로 넓힌 공간에는 이 지역의 지형적 특성을 고려하여 내진 구조를 고안하여 적용하였다. 건축미를 극대화하면서 중요한 목적인 내진 기능을 작동시키기 위하여 화강암을 목재처럼 가공하거나 자연석과 다듬은 석재를 이용하여 여러 장치들을 고안하였다. 불국사에 적용된 내진 구조는 그렝이법, 목조건축 기법을 적용한 석조구조(결구), 주두석(동틀돌, 첨차석)의 이용, 유공초석의 사용이다. 석축을 구성하고 있는 각 부분들은 나름대로 지진에너지를 흡수하는 특별한 역할을 하면서 전체적으로 균형과 조화를 이루고 있다. 복잡하고 세밀한 내진 구조들을 겉으로 드러내지 않고 석축 안에 감추면서 미학적으로 절정의 건축물을 만든 건축설계는 1250년 전 신라인들의 기술 수준을 짐작하게 한다. 기교에만 치우쳐 지나치게 치장한 것으로도 보일 수 있는 이 건축물의 진정한 미는 과학에 근거한 아름다움을 추구한 것이다.

주요어 : 불국사, 단층선, 내진구조, 그렝이법, 결구, 주두석(동틀돌, 첨차석), 유공초석.

Abstract : Some reverse fault lines are passing through the alluvial fans and west hill slope of Bulguksa mountains including Mt. Toham in the directions of N-S and NW-SE. The study area is known as relatively unstable, because of active faults. Assuming on the record of *Samguksagi* about earthquakes, the architects in the construction of the Bulguksa Temple should have recognized the possibility of breakdown from the earthquakes and the need for an unique structure against at that time. Against earthquakes, Grengee technique, a stonework construction technique following wooden one and use of Chuduseok(Dongtleseok or Chumchaseok) were applied for the construction of the Bulguksa Temple. By designing the foundation stone with hole, a structure is prevented from modification that pillars secede from a foundation stone in spite of horizontal load of earthquake while wood construction is strong frame at earthquake. The Bulguksa Temple is usually evaluated to be a beautiful architecture from the appearances like the weight balanced structure with unique decoration. Impressive architectures are beautiful in balance and harmony coming from the important and specific rolls in its own way by each part of whole structure. This beauty comes from the science.

Key Words : the Bulguksa Temple, fault lines, the earthquake resistant structure, Grengee technique, Chuduseok(Dongtleseok or Chumchaseok).

* 이 논문은 2003년도 경북대학교 학술진흥연구비(KNURF)에 의하여 연구되었음.

** 경북대학교 지리학과 부교수(Associate Professor, Department of Geography, Kyungpook National University), hwangsi@mail.knu.ac.kr

1. 문제 제기 및 연구 목적

불국사지역을 포함하여 울산과 경주 사이에는 울산(불국사)단층선이 통과하고 있다. 이것은 여러 개의 서로 평행하는 역단층으로 이루어진 활단층이다(윤순옥 · 황상일, 1999; 岡田篤正 外, 1998). 삼국사기에 의하면 고대 동안 경주를 중심으로 여러 차례 지진이 있었다. 경주는 조선시대에도 지진 다발지역에 해당하였으며(윤순옥 · 전재범 · 황상일, 2001), 계기관측이 이루어진 최근의 지진 자료에서도 지진의 진앙지로 보고된 사례가 많다(기상청, 2001). 이와 같은 기록들과 활단층에서 지진이 발생하기 쉽다는 사실을 종합할 때, 경주지역은 소규모 지진이 빈발할 뿐 아니라, 규모가 큰 지진도 발생할 수 있는 곳이다.

지반이 불안정한 이 지역에 한국 불교를 대표하는 불국사가 입지하고 있다. 불국사는 불교문화가 융성했던 통일신라시대에 조성된 건축물로서 8개의 국보와 하나의 보물을 가지고 있다. 부처님의 공간인 사찰에서 가장 중요한 것은 불상, 탑 그리고 대웅전을 비롯한 건물 등이다. 불국사에서도 극락전의 금동아미타여래좌상과 금동비로자나불좌상, 석가탑과 다보탑은 국보로 지정되어 있다. 그럼에도 불구하고 이 사찰을 찾는 이들에게 가장 깊은 감동을 주는 것은 대웅전 전면의 석축과 이 석축에 조영된 청운교와 백운교, 칠보교와 연화교와 같은 다리이다. 이것들은 우리나라의 다른 석조건축물과는 확연하게 구분되는 독특한 건축 양식으로 만들어졌으며, 이 기법으로 조성된 석조건축물은 이것이 유일하다.

불국사 남쪽과 서쪽에 조성된 기단부 석축은 자연석과 인공으로 다듬은 석재를 사용하여 다양한 방법으로 축조하였다. 이와 같은 건축 구조가 단순히 건축물을 아름답게 만들기 위한 것인지, 혹은 다른 특별한 목적을 달성하기 위하여 고안되고 덧붙여 미학적 측면을 고려하여 설계된 것인지에 대해서는 논의된 바 없다. 기단부의 건축 기법과 그 의미에 대해서 고건축학, 미술사학에서 보고되었으나, 이러한 연구들은 과학적 견지에서 논리적으로 해석하고 논증한 것이 아니라, 직관과 경험을 통해서 그것이 가지는 의미를 추론하고 있는 실정이다.

기단부의 건축 양식에 대해서 유홍준(1997)은 자연석에 반듯하게 다듬은 석재를 얹은 것은 목조건축의 그렝이법을 본받아, 자연석 상단의 굴곡에 맞추어 인공으로 다듬은 받침돌의 하부를 깎아 낸 것으로 이 석축은 기교가 절정에 이른 것으로 해석하고 있다. 한편 신영훈(1998)은 그렝이법으로 건축된 우리나라 전통목조건물이 지진에 상당한 내구력이 있다고 설명하고 불국사 기단부에 적용된 이 기법이 내진구조일 가능성을 제시하였다. 그리고 석축에 대해서도 목조건축 양식을 채용하여 창의적, 과학적이면서도 조화와 균형을 이루고 있어서 독특한 아름다움을 나타내고 있다고 기술하고 있다.

이와 같은 방식의 논의는 왜 이곳에 독특한 건축기법을 적용하게 되었는지, 이러한 기법들이 어떤 메카니즘(mechanism)을 통해 내진이 작동하는가에 대한 설명 없이 매우 추상적이며 주관적인 해석에 그치고 있다. 따라서 이 건축구조가 가지는 진정한 의미와 그것을 만든 이들의 궁극적인 목적을 설명하는데 어려움이 많다. 우리나라에서 유일하게 특별한 기법이 적용된 불국사의 건축 구조와 이 지역의 지형 특성 사이의 인과관계를 파악하고 건축가의 의도를 논리적으로 이해할 때, 비로소 과학적 근거를 가진 예술품으로 받아들일 수 있을 것이다.

우리나라에서 지반이 가장 불안정한 곳에 수 천 년 동안 보전되기를 바라는 서원을 담아 대규모 사찰을 건립한 김대성을 비롯한 지배층들이 이 지역의 지형특성과 관련된 건축물의 안정성에 대해서 어떻게 인식하고 있었는가를 파악하는 것은 불국사 건축에 적용된 독특한 건축 기법들이 어떤 목적을 이루기 위하여 고안된 것인지를 이해하는데 중요한 의미를 가진다. 이에 대해서는 고대 문헌에 기록이 없으므로 그들의 생각을 직접적으로 확인할 수 없다. 그러나 이 지역의 지형 특징을 파악하고 완성된 건축물의 구조를 해석하여 당시 건축가들의 생각을 알 수 있다고 생각한다.

본 연구에서는 불국사 기단부 석축을 중심으로 건축물에 함의된 과학적 구조와 건축 설계의 특징을 살펴보았다. 그리고 건축 구조가 불국사 지역의 지형 특성과 어떤 관계를 가지는지에 대해 내진설계에 초점을 맞추어 검토하였다. 이와 같은 논의를 위하여 불국사지역의

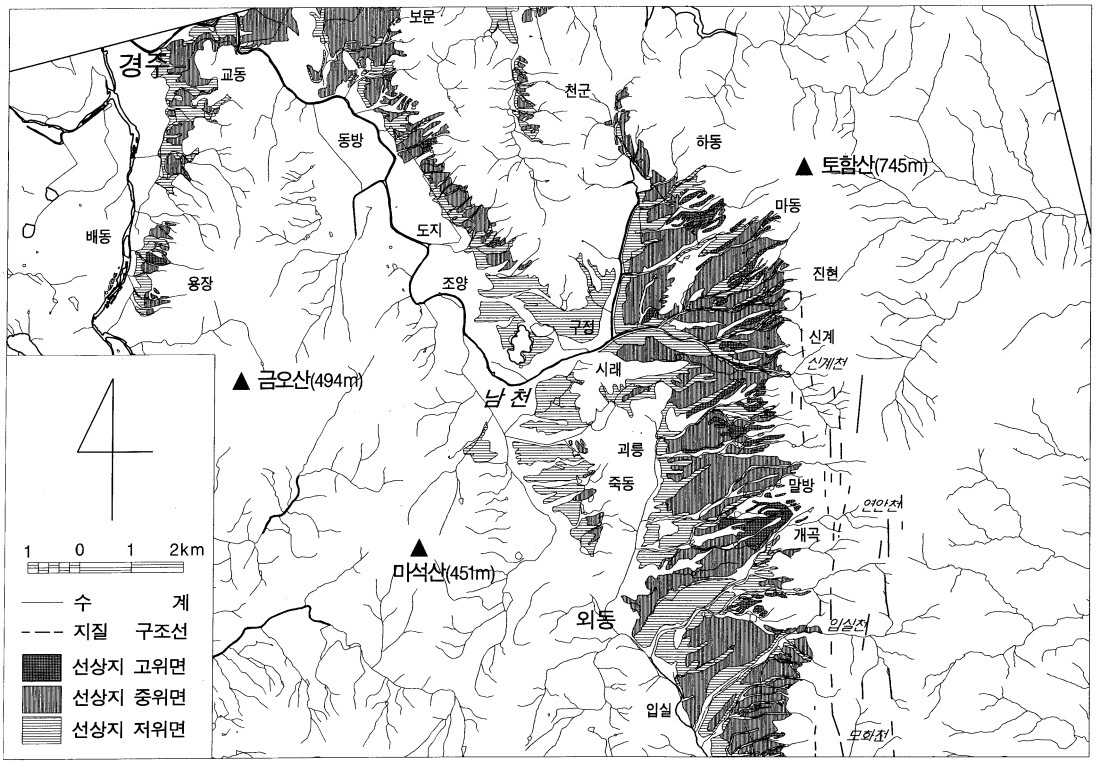

그림 1. 불국사 지역의 지형개관

출처: 황상일 · 윤순옥, 2001

지형을 분류하고, 단층선의 분포와 특징을 검토하였으며, 불국사의 석축부의 건축구조를 파악하였다.

2. 불국사지역의 지형특성

그림 1은 불국사 부근의 지형을 나타낸 것이다. 이곳에는 수매의 선상지가 산지의 산록을 따라 횡적으로 연속하여 잘 발달되어 있다. 이것은 단층선 분포, 기반암 특성, 구조운동과 관계된 산지사면의 특성, 제4기 기후변화 등과 관계되어 형성된 것이다. 불국사산맥을 비롯한 경주–울산지역에는 동쪽과 북동쪽에서 오는 압축력을 받아 북–남 방향, 북서–남동 방향의 역단층선들이 통과한다(황상일 · 윤순옥, 2001). 그러므로 이 산지의 서사면은 사면경사가 매우 급하다. 더욱이 심층풍화작용을 받은 화강암이 기반암인 불국사산맥의 서사면 토양에는 모래와 그래뉼(granule)급 자갈이 대단히 많이 포함되어 있으므로 표토가 안정되지 못하여 집중호우나 약간의 충격에도 랜드슬라이드(landslide)가 일어난다. 빙기 동안 하천은 산지사면에서 하곡으로 많은 퇴적물을 운반하여 산지 전면에 선상지를 형성하였다.

불국사 지역의 선상지는 형성시기를 달리하는 고위면, 중위면, 저위면으로 구분되는 합성선상지이다. 선상지 저위면은 지형면이 폭 넓게 분포하지만, 형성된 지 오래된 고위면은 지형면이 좁고 개석을 많이 받아 능선의 형태로 남아 있다. 중위면은 개석되었거나 현재도 개석이 진행되고 있으므로 지형면에 하곡이 형성되어 있다.

그림 2는 불국사 일대의 지형면과 단층선의 분포를 나타낸 것이다. 불국사를 중심으로 확인되는 단층선 및 단층 노두는 4개이다. 불국사에서 0.6km 남서쪽에

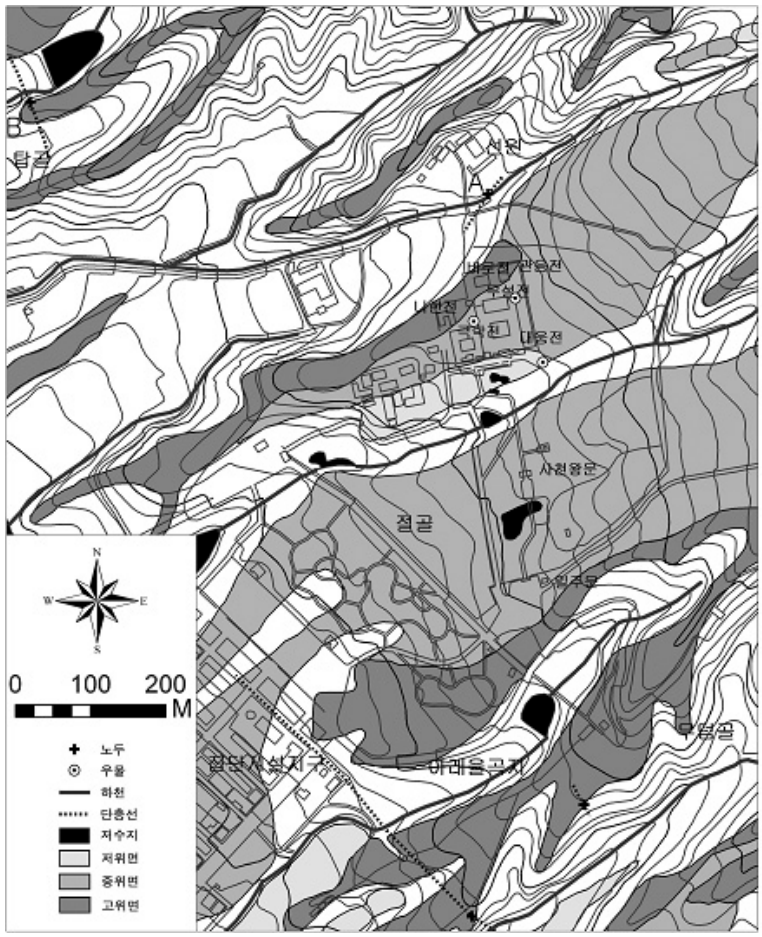

그림 2. 불국사지역 지형 개관

는 북서-남동 주향의 역단층이 통과한다(윤순옥 · 황상일, 1999). 이 단층선의 상반에는 기반암 위에 자갈층 두께가 8m 이상 퇴적되어 있다. 불국사와 선원 사이의 하상, 불국사로부터 서북서 방향으로 약 0.7km 떨어진 탑골(탑마을), 불국사 남쪽으로 약 0.6km 떨어진 진현동 무덤골에서 단층 노두가 확인되었다.

불국사와 북쪽의 선원 사이에는 소하천이 지나고 있으며 콘크리이트로 된 교량이 건설되어 있다. 이 다리 부근의 하상은 역층이지만, 여기에서 동쪽으로 약 10m 떨어진 곳부터 하상은 화강암으로 되어 있다. 이들 경계부는 역단층이 통과한다(그림 3). 확인된 노두의 길이가 수 m에 지나지 않으므로 단층선의 주향을 판단하는데 어려움이 있으나 대략 북동-남서 방향으로 생각된다. 이 단층선은 불국사 경내를 지날 가능성이 크므로 중요한 의미를 지닌다고 생각된다. 한편 불국사 북서쪽의 700m 지점에 있는 탑마을에서도 역단층이 확인된다(그림 4). 이것은 북북서-남남동 주향의 단층으로 불국사 서쪽에 인접하여 통과하고 있다. 불국사로부터 남쪽으로 약 0.6km 떨어진 진현동 무덤골에서는 파쇄대가 거의 수직이지만 노두의 상부는 동쪽의 상반이 서쪽의 하반 위로 밀고 올라가는 형태를 취한다(윤순옥 · 황상일, 1999). 이 단층선이 탑골의 역단층과 연결되는지 또는 선원 부근의 단층선과 연결되는지에 대해서는 추가적인 조사가 필요하다.

한편 불국사 동쪽의 토함산 산록에서 단층선들이 전체적으로 남-북 방향을 취하고 있는 것은 분명하며 불

그림 3. 불국사와 선원 사이 A 지점 하상의 단층선 노두

국사 부근에서는 주향을 달리하는 복수의 단층선이 통과하고 있다(황상일 · 윤순옥, 2001). 이와 같은 경향은 경주–울산 지역의 다른 단층선의 방향과도 조화된다.

불국사 경내에 하상 천이점과 저수지 분포, 기반암과 토양 분포, 불국사 경내의 우물 분포는 구조선 통과 유무를 확인하는데 있어서 매우 의미있는 지표가 된다.

천이점은 기반암분포지와 역층분포지 사이에서 형성되기 쉽다. 이곳에는 천이점이 용이하게 만들어지므로, 하상에 제방을 축조하면 저수량을 충분히 확보할 수 있다. 상류쪽에 분포하는 기반암은 불투수층이므로 유역분지로부터 공급되는 물을 손실없이 저수지로 유입한다. 불국사에서도 일주문과 대웅전 사이에 여러 개의 천이점과 인공저수지가 축조되어 있다. 이것은 하상이 기반암으로 된 지역과 하상이 역층으로 된 지역의 경계에서 형성된 것으로 추정된다. 불국사 석축 전면에 구품연지는 이 절이 선상지에 입지하는 사실에 비추어 볼 때, 유지수 공급의 측면에서 독특한 의미를 가진다. 이것은 불국사 경내에 있는 우물 분포와도 관계있는 것으로 생각된다. 불국사 경내에는 몇 개의 우물이 조성되어 있는데 이곳에 지하수량이 풍부하다는 것을 의미한다. 불국사 동쪽은 역단층의 상반에 해당하고 기반암이 지표면 부근까지 분포하므로 지하수위가 높은 것이다.

선원 부근의 단층선, 구품연지를 비롯한 저수지와 우물의 분포, 하상 단면도에서 확인되는 천이점의 분포를 종합하여 검토하면, 불국사 바로 서쪽 또는 경내에서 단층선이 통과할 것으로 추정된다.

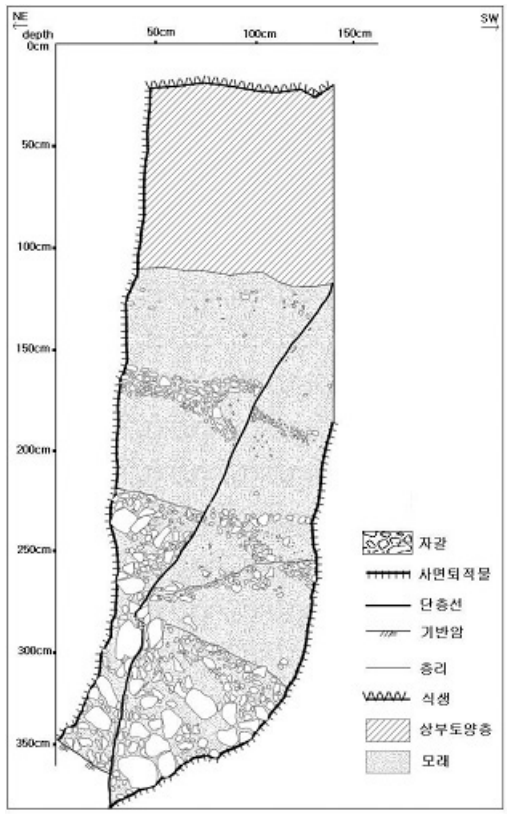

그림 4. 불국사 북서쪽 탑마을 B 지점의 단층 노두

3. 불국사 사찰 구역의 지형 특징

불국사는 선상지 고위면, 중위면, 저위면에 걸쳐 조영되었다(그림 2). 형성 시기가 다른 지형면들로 구성되어 있고 절터 남쪽 가장자리를 가로질러 개석곡이 통과하고 있으므로 지형면이 전체적으로 평탄하지 못하다. 절의 북쪽을 지나는 고위면은 지형면의 폭이 대단히 좁아 능선 형태로 분포하는데, 가장 동쪽에는 관음전이 있고, 비로전, 나한전으로 이어진다. 그보다 서쪽의 고위면에는 소나무와 대나무 숲이 분포한다. 고위면 남쪽에는 중위면이 분포하는데 지형면이 상대적으로 넓고 평탄하여 대웅전, 무설전, 극락전, 요사채가 입지하고 있다. 그리고 중위면 남쪽에는 저위면이 나타난다.

전체적으로 북쪽은 높고 개석곡이 통과하는 남쪽은 지형면의 해발고도가 낮다. 불국사의 설계자는 자연지형을 그대로 살려서 북쪽과 동쪽은 높게 남쪽과 서

쪽은 낮게 하고, 중위면에 사찰 중요부가 들어설 공간을 장방형으로 설계하였다. 그러나 중위면의 폭이 충분하게 넓지 못하여 대웅전 전면에 탑, 회랑, 자하문을 조영할 공간이 부족하므로, 이 지형면의 남쪽을 인위적으로 확장하였다.

하상비고가 서로 다른 고위면, 중위면, 저위면을 이용하여 가람을 배치하였으므로 이 지형면들 사이의 단애에는 계단과 축대를 조성하였다. 북쪽의 고위면 위에 조성된 관음전 및 비로전과 남쪽의 중위면 상에 조성된 무설전 및 대웅전 사이에도 계단과 축대가 만들어져 있는데 그 경사가 대단히 가파르다. 중위면과 저위면 경계에는 청운교, 백운교, 연화교, 칠보교와 같은 계단 및 대규모 석축이 조성되었다.

한편 불국사가 위치한 지형면은 선정부에 인접한 선앙부이므로 지형면 자체의 경사가 다소 가파르다. 그러므로 동쪽에서 서쪽으로 건축물들이 낮아지고 있어 계단과 축대가 많이 조성되어 있다. 고위면에서는 관음전과 비로전 사이, 비로전과 나한전 사이에 축대와 계단이 있다. 중위면 서쪽은 축대를 조성하여 높이고 동쪽 가장자리는 약간 절개하여 지형면을 평탄하게 하였다. 무설전 및 대웅전과 극락전 사이 그리고 극락전과 유물 보호각 사이에 축대와 계단이 만들어져 있다.

4. 불국사에 적용된 특수한 건축 구조

불국사의 남쪽과 서쪽 전면 석축에서 확인되는 특수한 건축 구조는 그렝이법, 결구, 주두석(동틀돌, 첨차)과 채움돌 구조로 나눌 수 있다. 아울러 회랑부 목조건축물의 유공초석도 독특한 구조적 특징을 보인다.

1) 그렝이법

그렝이법은 우리나라 전통건축물에서 주로 주춧돌과 그 위에 세워진 나무 기둥 사이에 적용된다. 목조건물의 기둥을 받치는 주춧돌의 표면을 매끈하게 다듬지 않고 자연 상태의 불규칙한 모양 그대로를 쓰고, 기둥 하부를 주춧돌과 밀착시키기 위하여 기둥아랫면을 주춧돌 표면에 꼭 맞게 깎아내는 것을 그렝이질이라고 한다. 이렇게 맞추어 세워진 기둥은 집이 내려 누루는 하중에 의해 주춧돌과 밀착된다. 그러므로 건축물에 전해지는 다양한 충격에도 어긋나지 않고 원래의 모습을 유지할 수 있다. 이 기법은 성곽을 축조할 때도 적용되는데, 성곽 가장 윗부분의 자연석 위에 다듬은 돌인 장대석을 올려 마감할 때, 다듬은 돌의 하부를 자연석 최상부의 요철(凹凸)에 맞추어 깎아내어 완전히 밀착시킨다. 성곽은 군사적 목적으로 축조되는 것이어서 견고해야하는데, 특히 가장 윗부분의 장대석은 적에 의해 쉽게 파괴되지 않고, 군인들의 다양한 활동에도 원래의 모습을 유지하기 위하여 그렝이법으로 견고하게 축조하는 것이다.

불국사에서 이 기법이 적용된 곳은 대웅전 남회랑 아래 즉, 백운교 좌우 석축, 석가탑의 암좌(岩座), 서편 수미범종각(須彌梵鍾閣, 泛影樓)의 축대이다.

(1) 대웅전 남회랑 밑의 석축

1924년 일본인 기술자들에 의해 이루어진 보수기록에 “대웅전 남회랑의 석축은 극락전과는 달리, 상, 하단으로 구분하였고, 하단석축의 맨밑은 자연거석들로 짜여져 해체복원이 힘이들 뿐 아니라, 현유구자체가 교란됨이 심하지 않아 하단석축은 해체를 하지 않은 것 같고, --- 대웅전 남회랑에는 하단석축을 해체하지 않았기 때문에 여기에 중심을 맞추어 상단에 연결하였다면, 수리 전의 유구에 많이 가까울 것이나, --” 라고 기재되어 있다(문화공보부 문화재관리국, 1976).

이것은 대웅전 남회랑 즉, 불국사 전면의 석축 중 그렝이법으로 축조한 부분에 대한 것이다. 일본인들이 보수하지 않았다는 것은 20세기 초까지 대웅전 남회랑의 하단석축은 그 원형이 거의 손상되지 않았음을 의미한다. 이것은 역시 그렝이법에 의해 조영된 석축의 견고함을 의미한다고 볼 수 있다.

대웅전 남회랑 아래 백운교 좌우 석축은 두 단으로 나누어지는데, 아랫단은 주위 하천이나 산지에서 얻은 다양한 크기의 거력으로 쌓고, 윗단은 다듬은 돌로 마감하고, 그 위에 돌난간을 만들었다. 자연석을 쌓아 올린 아랫단과 반듯하게 가공한 돌로 된 윗단의 경계에는 그렝이질로 완전히 밀착되게 가공한 돌 하부를 다

듬어 맞추었다. 이것은 하단과 상단의 석재가 서로 맞물려 있으므로 수평하중에 의한 충격에 강한 응력을 가지므로, 수평으로 흔들려도 어긋나지 않는다. 하단에는 입경이 대단히 큰 신선한 거력을 사용하여 상단 석재의 하중을 견딜 수 있게 하였다.

(2) 석가탑의 하부 구조

석가탑 기단석의 하부는 그 아래에 있는 자연상태의 불규칙한 자연석의 표면에 맞추어 정밀하게 깎여졌다. 즉, 그렝이법이 적용된 것이다. 현재는 약간 어긋나 있으나 원래의 모습은 대웅전 남측 백운교 좌우 기단부의 자연석과 그 위에 놓인 다듬은 돌과의 관계와 같은 양식인 것으로 생각된다. 석가탑은 기반암 위에 조성된 것이 아니라 인위적으로 옮겨온 자연석들 위에 얹혀 있는 것으로 생각된다. 석가탑이 위치한 곳은 화강암의 거력이 퇴적되어 있는 선상지 중위면이지만, 무설전과 대웅전이 조성된 지형면을 남쪽으로 확장한 구역일 가능성이 크다. 그러므로 원래 선상지 역층위에 신선한 거력을 쌓고 거기에 기단부를 만든 것으로 추정된다.

(3) 범영루 축대

범영루의 기단부는 백운교 좌우 석축과 연결되며 건축 양식도 동일하다. 하단에는 거대한 자연석을 3단 정도 쌓고, 그 위에 반듯하게 가공한 돌로 기단부와 난간을 만들었다. 자연석과 연결되는 다듬은 돌의 아랫부분은 그렝이질하여 완전히 밀착되게 하였다.

2) 결구(結構)

결구는 건축물을 구성하는 각 부재를 짜 맞추는 것이다. 즉, 건물을 이루기 위해서는 수직재와 수직재, 수평재와 수평재, 그리고 수직재와 사경재(斜頃材)가 서로 얽히거나 짜여지게 되는데 이들 모든 방법이나 모양새를 결구법이라고 한다.

(1) 백운교 좌우 대웅전 남회랑 석축인공석 기단부

대웅전 남회랑 자하문 남쪽의 계단으로 된 석교 가운데 아랫부분에 해당하는 백운교의 좌우 기단부에는 자연석으로 된 기단부 위에 반듯하게 다듬은 돌로 결구하여 만든 기단부가 있다.

이 구역은 자연석 위에 하부를 그렝이질한 중방석을 놓고 이들 사이에는 주두석으로 결구하였다. 주두석 위에 석주를 세우고 다시 주두석을 얹고 이들 사이에는 중방석을 가로로 놓았다. 그리고 주두석과 중방석 위에 멍에를 얹어 마감하고는 돌난간을 올려 세웠다. 돌기둥 사이의 간격에는 판석을 한 장씩 끼워서 마감하였는데, 이러한 건축 방법을 자하문 아래, 청운교와 백운교의 전체에 적용하여 석축의 표면을 판석으로 마무리하여 좌우상하 빈틈없이 결구하였다.

이 구조의 핵심은 주두석의 머리부분이다. 주두석은 석주와 석주 사이, 중방석과 중방석 사이, 중방석과 석주 사이에 네모난 작은 돌이 머리만 약간 들어내 보이고 있다(그림 5). 주두석에 중방석을 결구한 부분은 기둥머리에 주두석의 머리 안쪽으로 홈을 파고, 그 홈에 상하의 석주가 걸리고 또 좌우에 중방석을 끼웠다. 그 턱에 걸리게 결구되면서 중방석이나 석주가 앞으로 밀려날 염려가 없어진다. 말하자면 안쪽에 채워진 토양의 압력 때문에 석축을 형성한 석재들이 바깥으로 밀려날 가능성이 있는데, 이 구조를 통해서 이와 같은 문제를 해결하였다.

(2) 범영루 석단

범영루의 기단은 자연석과 인공석으로 조성하였는데, 상단의 인공석 부분은 주두석, 석주, 장대석, 판석으로 이루어졌다. 안쪽으로 깊게 박은 주두석 머리 부분에 홈을 파서 모든 석재가 서로 결구되도록 하였으며 이들 사이에는 자연석으로 뒷채움을 하였다.

이렇게 만든 인공석 기단부의 평탄한 상부에 十字 모양의 평면 형태를 취하는 인공석 여덟 개로 조립한 석단이 범영루 남쪽의 양 기둥을 받치고 있다. 이 인공석들은 서로 결구되어 있을 것으로 추정된다.

(3) 대웅전 남회랑 청운교 좌우 석축

석주, 주두석과 같은 인공석과 자연석으로 된 채움돌(그림 6)로 구성되었다. 석주는 아랫부분과 윗부분으로 나누어지는데, 이들 사이에는 주두석으로 결구되었으나, 중방석은 사용하지 않았다. 위쪽의 석주는 상대

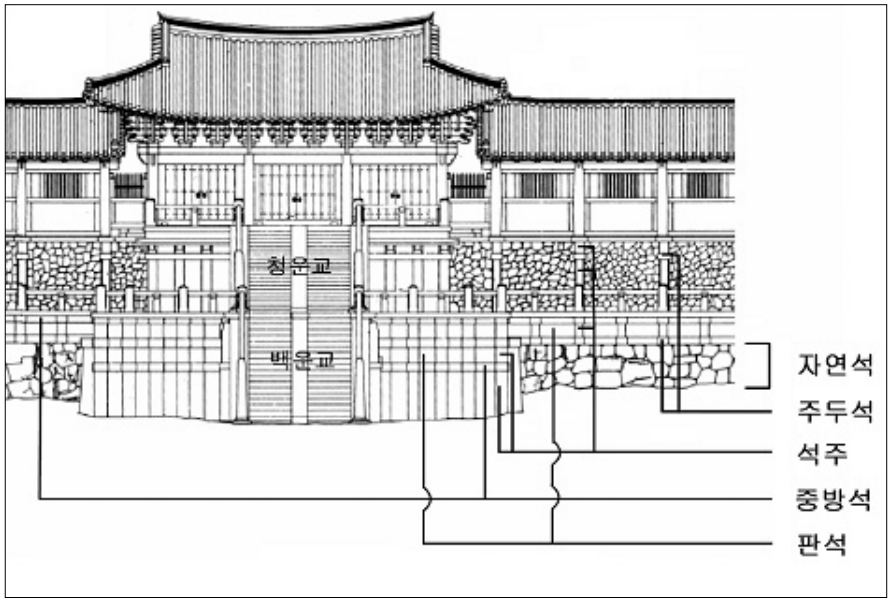

그림 5. 불국사 대웅전 남회랑 전면 석축

출처: 장경호, 1996에 가필

적으로 길이가 짧은데, 이 석주 위의 주두석에는 중방석을 가로로 결구하였다. 석주와 석주 사이는 자연석의 boulder급 자갈로 채웠다. 이 구역의 석축에서는 석주와 석주 사이의 간격이 다른 구역보다 상대적으로 넓다.

(4) 청운교와 백운교

청운교와 백운교가 축조된 대웅전 남측 구역에서 석축은 자연석인 거력을 기반으로 축조하였는데 비하여 자하문 전면의 청운교와 백운교는 모두 인공으로 반듯하게 다듬은 석재로 축조하였다. 구조의 골격은 네모반듯한 석주를 일정한 간격으로 세우고 그 위에 주두석을 얹었다. 그리고 주두석과 주두석 사에는 가로로 중방석을 놓았다. 두 단을 역시 간격을 두면서 설치한 뒤에 주두석과 중방석 위에 멍에를 얹어 마감하고는 돌난간을 올려 세웠다. 돌기둥 사이의 간격에는 판석을 한 장씩 끼워서 마감하였다. 돌난간, 계단들도 모두 다듬은 돌로 양쪽 가장자리의 인공적으로 가공한 돌들과 결구되도록 하였다. 세트로 된 석주들은 아래석주는 길고 위로 가면서 짧아지게 길이를 달리하여 시각적으로 길어 보이는 효과를 내고 있다. 이 부분은 마치 목재 구조물과 같이 정교하게 조영되었다.

(5) 다보탑

다보탑은 목조건축과 같은 결구법을 써서 완성한 석탑이다. 청운교와 백운교 자체 석조구조의 결구법과 같은 방법이 구사되었다(신영훈, 1998). 모든 석재들을 꼭 맞게 다듬어 서로 걸려서 전체적인 형태를 유지하도록 하였다. 다보탑 상층 기단부의 모서리의 네기둥 위에는 이중의 두공이 있고, 기단부 가운데의 기둥 위에는 주두를 얹고 있다. 주두는 기둥 머리에 접시처럼 얹고 있는 것을 말하는 것이 아니라, 기둥머리에서 상부 부재를 떠받고 있는 부재를 통틀어 일컷는 말이다. 이런 관점에서 본다면 모서리 기둥 위의 두공들도 주두라고 보아도 무방하다(신영훈, 1998)

(6) 홍예

홍예에는 지진에 의한 진동을 흡수하는 설계를 찾아볼 수 있다. 일반적으로 홍예는 작은 돌 여러 개를 반원의 둥근 선을 따라 축조하였다. 이때 홍예돌은 위쪽

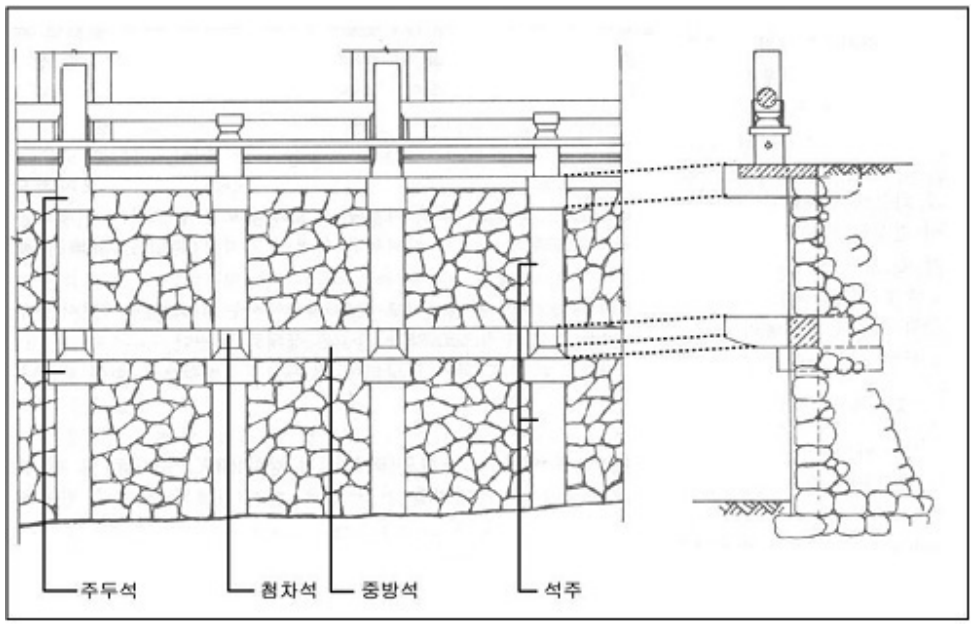

그림 6. 극락전 남회랑 전면 석축

출처: 장경호, 1996에 가필

이 넓고 아랫 쪽이 좁게 다듬는다. 이렇게 하여 바깥지름의 넓은 선과 안쪽의 좁은 선을 일치시킬 수 있으며, 홍예종석이라는 마룻돌을 홍예의 가장 정상부에 곶아 넣음으로써 아치는 무너지지 않는다. 그러나 백운교의 홍예에는 이중구조를 적용하였는데, 일반적인 건축술에 의해 만들어진 홍예 위에 두 개의 아치형 큰 돌과 하나의 사다리꼴에 가까운 홍예종석을 사용하여 겉틀홍예[1]를 조성하였다. 여기서 주목할 사실은 이 겉틀 홍예종석의 모양이다. 이 종석은 일반적인 홍예종석과는 달리 좁게 다듬은 면이 윗쪽에 있고, 긴 면이 아랫쪽에 있어, 겉틀홍예를 구성하는 단일의 석재로 된 2개의 좌우 홍예석을 떠받쳐주는 구실을 하고 있다. 그리고 겉틀홍예종석의 폭이 속틀홍예종석보다 넓어 속틀홍예종석에 부담을 주지않고 있다. 한편 이 겉틀홍예종석은 안으로 깊숙이 들어가 천정돌의 하나로 되어 있어 전체적으로 다른 구조물과 단단히 결구되어 있다(신영훈, 1998). 이와 같은 구조도 백운교의 미적인 측면 뿐 아니라, 이중 홍예구조를 통해 내구성을 높이고 지진에너지를 흡수하도록 고안한 것으로 생각된다.

3) 주두석(통틀돌, 첨차)

불국사 석축 가운데 인공으로 가공한 돌로 조영한 부분은 대부분 결구되어 서로 맞물려 있는데, 이들 중 가장 특징적인 것은 주두석(동틀돌, 첨차)인데, 굳이 목조건축에 대비시키면 보에 해당한다.

대웅전 남쪽 기단부 청운교 좌우, 극락전 남 및 서회랑, 대웅전 서회랑 석축에서는 석주, 동자주, 주두석(동틀돌, 첨차), 중방(수장재)과 같은 반듯하게 다듬은 석재와 이들 사이를 채운 자연석으로 기단부를 조성하였다. 주두석은 결구의 핵심적인 역할을 할 뿐 아니라, 머리부분만 외부에 드러나고 나머지는 석축의 안쪽으로 깊숙이 박혀있으므로 앞으로 빠져나올 가능성이 거의 없다. 그리고 주두석의 머리 부분에 홈을 파서 이것을 중심으로 반듯하게 다듬은 석재들이 서로 맞물리도록 하였다.

(1) 극락전 남회랑 및 서회랑의 석축

1924년 일본인 기술자들에 의해 중수되었다. 이 극

락전 주변 석축의 구조는 불국사 경내의 다른 석축들은 물론이고 전국적으로 어느 석축과도 유사함이 없는 특이한 구조로 건축되었는데, 남회랑 아래의 석축 형태와 서회랑 아래의 석축 모양이 다르다(그림 6). 이들 석축에는 석주 위에 주두석이 있고, 주두석 위에는 목조건물에서의 첨차와 같은 동틀돌이 있는데, 폭과 높이는 1.2척[2]*1척이고, 뺄목(앞으로 튀어나온 부분)은 1.2척이다.

이 축대는 수직으로 조영되어 있는데, 동틀돌과 상단 석주 주두석의 구조가 독특하다. 석축 가운데 있는 동틀돌은 석축 표면에서부터 수직으로 채움돌 안으로 뿌리가 6척 정도 깊게 박혀 있으며, 회랑주간 사이에 있는 상단석주 주두석도 같은 형태로 6척 정도 길이로 다듬지 않는 채로 혹떼기하여 뒷채움에 묻어놓았다. 이들의 머리 부분은 홈을 만들어 여기에 걸리는 수평재와 수직재가 결구되도록 하였다.

이 구간에서 동틀돌과 주두석은 지진에 의해 발생하는 수평운동으로 석축을 이루고 있는 뒷채움들이 움직이는 것을 완화시켜 석축 원래의 형태에 변형이 일어나는 것을 방지한다. 그리고 목조건축의 양식을 적극적으로 차용하여 만든 것이다.

(2) 대웅전 서회랑 밑의 석축

지표면에 높이 6.2척, 폭 1.1척의 석주가 서있고, 이 석주 위에는 장방형의 주두석이 얹혀 있는데, 외부에 보이는 것은 1.4척*0.8척 이지만 그 뿌리가 깊게 박혀 있다. 주두석의 간격은 10척이며, 길이는 4~6척으로 석축 표면에서부터 뒷채움돌 내에 수직으로 깊게 박아두었다(문화공보부 문화재관리국, 1976).

(3) 대웅전 남회랑 석축

청운교 좌우의 석축에서 주두석 사이의 간격은 10척이고 수평재인 중방석은 설치하지 않았다. 수직재인 석주와 동자주를 주두석에 결구하였다. 백운교 좌우의 인공석으로 결구한 석축에서는 주두석 사이의 간격이 5척이다. 그리고 중방석을 주두석에 결구하였다. 주두석이 석축의 뒷채움돌에 어느 정도 깊이까지 심근이 박혀 있는지 확인되지 않았으나, 6척 이상일 가능성이 높다.

4) 유공초석(有孔礎石)

중위면을 확장하기 위해 조성된 축대 외에 목조건축물에도 독특한 건축 구조가 확인된다. 기둥과 초석 사이의 결합구조로서 가장 보편적인 것은 그렝이법인데, 대웅전 서회랑에서는 초석에 구멍을 뚫은 유공초석이 발견된다. 이것은 방형초석(方形礎石)의 가운데 부분에 원형으로 지름 15~20cm 구멍을 관통시켰으며, 초석의 규모로 볼 때 나무기둥 지름은 45~60cm이다(장기인, 1997). 이와 같은 형식의 초석은 일반적이 아니다. 이 양식이 불국사의 회랑과 건물 기둥에 모두 적용되었는지는 불확실하지만, 인공적으로 조성한 축대 부분의 목조건축물에는 광범위하게 사용되었을 가능성이 있다.

5. 토론

1) 불국사지역의 지형특성과 지반의 안정성

삼국사기에 기록된 지진 기록은 거의 30회에 달하며 규모가 큰 지진도 확인된다. 이것이 모두 경주에서 발생한 것은 아닐지라도 대부분 경주 부근에서 일어났을 가능성이 높다. 특히 불국사 동쪽 토함산 산록에는 복수의 북-남 주향의 단층선이 항공사진과 대축척 지형도에서 확인되며, 불국사와 선원 사이를 통과하는 북동-남서 주향의 단층선은 불국사 경내를 통과할 가능성이 크다. 이것은 선상지 역층을 변위시키고 있으므로 활단층이 분명하다. 그러므로 이 사찰을 설계한 사람들은 지진에 의한 재해의 가능성을 알고 있었으며, 이것이 불국사에 영향을 미칠 것으로 판단하였을 것이다. 그러나 불가피하게 절의 위치를 이곳에 정하지 않을 수 없었으므로 다양한 내진설계를 고안하였던 것으로 생각된다.

불국사에서 목조 건축물이 입지하고 있는 곳은 선상지 중위면과 고위면인데 기반암 위에 역층이 퇴적되어 있다. 이 층준의 matrix는 모래가 주를 이루고 있으나 silt와 점토가 포함된 치밀한 토양이다. 선상지 퇴적물

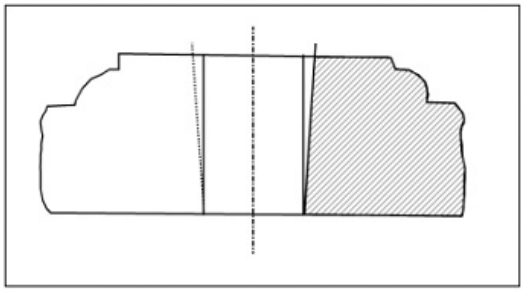

그림 7. 유공초석
출처: 장기인, 1988

의 대부분을 차지하는 화강암 자갈들도 대부분 완전히 풍화되어 있다. 이것은 화강암이 풍화에 대한 저항력이 매우 낮기 때문이다.

한편 불국사 건축물의 주요부가 입지한 중위면은 공간이 충분하지 못하여 남쪽과 서쪽 가장자리에 석축을 조성하여 추가적인 공간을 마련하였다. 인위적으로 확장한 구역인 이곳은 지진 하중의 충격에 대해 원지반과 같은 정도의 저항력을 갖기 어렵다. 건축에 있어서 내진건축방식은 주로 기초공사에 적용되고 있다. 현대에서도 내진설계가 되지 않은 건축물이 지진의 영향을 받으면, 가장 아랫부분이 내려앉거나 뒤틀리는 피해를 가장 많이 받는다. 따라서 불국사에서 지진에 대한 특수 공법은 중위면의 가장자리에 해당하는 대웅전과 극락전 남쪽 석축부 그리고 중위면의 지형면 경사를 극복하기 위하여 조성한 대웅전 서쪽과 극락전 서쪽 축대에 집중되어 있다.

2) 내진 설계의 일반적 원리와 불국사에 적용된 내진 구조

(1) 내진설계의 원리

지진에 의한 피해 발생 mechanism은 지진파에 의해 지반이 움직이게 되며 그에 따라 지반은 운동가속도를 얻게 되고, 이에 따라 지반 위의 건물은 관성의 법칙에 의해서 그 반대방향으로 쏠리게 되면서 일어난다. 지반운동가속도는 지구중력가속도의 일정 비율로 표시되는데, 지반이 어느 방향으로 갑자기 움직이면 이때 건물 전체가 받는 수평력 즉, 건물의 반응가속도는 건물 중량과 건물 반응가속도의 곱으로 산출되므로 건물의 반응가속도는 지반운동가속도와 비례관계[3]에 있다(변진섭, 1998).

지진이 일어날 때, 건물에 주는 지진하중(seismic load)은 주로 구조물의 측면으로 작용하는 수평하중(lateral load)이다. 지진하중이 정확히 어떤 크기와 방향으로 구조물에 작용할 것인가를 알아내기는 거의 불가능하므로, 내진설계에 사용되는 지진하중은 대략적인 경험수치라 할 수 있다(변진섭, 1998). 지진이 발생하였을 때, 가장 이상적인 상태는 건물이 손상되지 않고 움직이지 않는 상태에서 지진에 순응하며 서있는 것이다. 지반과 그 위의 건물은 처음의 위치로부터 영구변형을 일으키지 않고 또한 앞뒤로 몇 cm 이상 움직이지 않아야 한다. 건물의 움직임은 반드시 감쇄되어야하고 건물은 원래 위치로 되돌아가야 한다. 이와 같은 목표에 도달하기 위해서는 건물 밑부분은 움직일 수 있고, 동시에 건물 밑부분에 지반으로부터 오는 진동을 제한할 수 있는 장치를 만들어야 한다(김용부, 1999). 건물의 기초를 이루는 지반은 지진 하중을 받지만, 그 위에 얹혀 있는 건물 자체는 지진하중을 거의 받지 않는 구조를 만드는 것이다. 즉, 지반과 상부건물 사이에 지진 하중의 대부분을 흡수하여 소멸시키는 완충장치들을 만드는 것이다.

현대에 사용되는 내진설계방법으로는 첫째, 구조물을 기초지반과 일체적으로 견고하게 연결시켜 지진력이 작용할 때 지반으로부터 유리되는 것을 방지하는 것이다. 건물을 지반과 일체화시켜 같이 움직이게 하는 것이다. 둘째, 구조물을 적당한 방법으로 기초지반과 분리시켜 지반으로부터 전달되는 지진력을 차단해 보려는 시도이다. 구체적으로 건물의 밑바닥에 바퀴를 달아 수평방향으로의 움직임을 허용하여 지진력을 최소화시키거나, 건물바닥에 탄성이 높은 고무판을 겹겹이 쌓아 만든 받침대를 두는 것이다. 이것은 지진력이 건물에 도달되기 전에 흡수하는 방법인데 다시 말하면, 수평진동을 흡수하는 기능을 한다. 이 중 후자의 방법이 보다 현실적인 유용성이 높아 오늘날 대부분의 기초분리 설계에 이용되고 있다. 고대 건축물에서 이와 같은 방법에 속하는 예는 고대 중국 왕궁터에서 돌기초와 그 밑의 암반 사이에 모래 또는 타르가 뿌려진

흔적이 발견된 적이 있다. 모래는 현대적인 기초분리 장치의 바퀴에 해당하고, 점착성이 높은 타르는 고무판의 기능을 한 것으로 보는 것이다(변진섭, 1998).

(2) 불국사에 적용된 내진 구조

지진에 의해 지반이 흔들릴 때 많은 양의 에너지가 발생하면 그 위에 세워진 건축물의 안전은 담보하기 매우 어렵다. 지구 내부에서 발생한 지진에너지를 지반이 모두 흡수할 수는 없는 것이다. 지진에너지가 지각위에 세워진 건물로 전달되고 건물은 반드시 이 에너지를 흡수하여야 한다.

현재 불국사에서 확인된 내진공법은 크게 네 가지로 구분된다. 첫째, 그랭이법의 광범위한 적용이다. 둘째는 지진하중에 강한 목조건축물의 기법인 결구하는 방식을 기반의 석축에 적용하여 응용한 것이다. 셋째, 주두석(동틀돌, 첨차석)과 채움돌을 이용하여 지반으로부터 오는 에너지를 흡수하는 것이다. 넷째, 목조건물의 기둥을 유공초석에 끼워 시공한 것이다.

① 그렝이법

고대의 축대는 돌을 조적(組積)으로 쌓는 것이 가장 일반적이다. 이와 같은 방법은 비용을 적게 들이고 빠른 기간 내에 완성할 수 있으나 지진하중에는 매우 취약하다. 즉, 조적을 하는 경우에는 돌들 사이에 이음새가 생기게 되므로 지진에너지를 수렴하기 어렵다. 불국사에서 중위면에 추가적인 공간을 얻기 위하여 조성한 석축은 지진 에너지를 극복할 수 있는 공법이 필요했을 것이다.

그렝이법이 지진에 상당한 내구력이 있다는 사실은, 1967년에 지은 멕시코(Mexico)시의 한국정(韓國亭)이 그간 수많은 지진이 발생하고 주변건물이 피해를 입었는데도 탈없이 무사한 데서 입증되고 있는데, 이것은 기둥과 주춧돌이 따로 놀아 유격의 여유가 있기 때문이기도 하지만 기둥과 주춧돌 사이가 서로 완전히 맞물리게 밀착되어, 지진에 흔들렸다가도 기둥의 요철에 따라 다시 제자리로 들어설 수 있기 때문이다(신영훈, 1998).

이 기법이 석조건축물에 내진공법으로 적용된 예는 페루의 쿠스코(Cuzco)시와 그의 북쪽에 있는 마추피추 유적을 들 수 있다. 잉카제국의 고도(古都) 쿠스코시는 안데스산맥의 해발고도 3,400m 고원 평지에 있는데, 잉카 신앙의 중심지였던 태양의 신전이 있었던 자리에 남아있는 당시의 석조 건축물은 오랜 세월 동안 조금도 변함이 없는데, 그 자리에 새로 건축한 천주교 성당은 매년 수리하다시피하고 있다. 도시 대부분을 구성하는 잉카시대의 건물이나 석축은 매우 단단하게 만들어져 나중에 스페인 사람들이 증축하거나 수리한 것이 먼저 허물어지는 형편이다.

마추피추(Machu Picchu) 지역은 안데스 산지의 한가운데 있으므로, 진도 6 이상의 지진이 빈번하게 일어나며 그 이하 강도의 지진은 일상적으로 발생한다. 마추피추 유적을 건설한 이들은 이와 같은 자연재해를 충분히 고려하여 기초공사를 하였다. 여기에 적용된 기법은 불국사에 적용된 것과 같은 그렝이법인데, 다만 돌과 돌 사이의 맞물리는 틈의 정교함에서 약간 차이가 있다. 즉, 불국사의 경우, 자연석을 약간 가공하여 그들이 만나는 면이 맞닿도록 다듬고, 가장 윗부분에서 자연석의 울퉁불퉁한 표면에 맞추었다. 그러나 잉카인들은, 기단석과 기초부에서 석재를 거칠게 다듬어 대략 맞추는 것이 아니라, 가장 아랫부분부터 모양과 크기가 다양한 돌들이 서로 만나는 면을 편평하게 다듬어, 다양한 크기와 모양으로 가공하여 돌과 돌이 꼭 맞물리도록 쌓았다. 즉, 불규칙한 조각들을 조합하여 어떤 형상을 만드는 방식을 구사하였다. 다만 돌을 가공하는 정교함의 차이로 인해 맞물리는 면의 표면적에서 차이가 나는 것은 양 지역의 지진 규모의 차이를 반영한 것으로 볼 수 있다.

불국사에 적용된 그렝이법은 기반암 위에 쌓은 자연석과 그 위에 얹힌 인공으로 가공한 석재 사이가 단단하게 맞물려 고정되므로 하부 자연석과 상부 가공한 석재가 일체가 되어 지진의 수평하중으로 인한 변형을 막아 지진에너지를 견디는 장치이다. 아울러 반듯하게 가공한 석재의 가장 아래 부분이 하부석재들을 고정시켜 기반암으로부터 전달되는 에너지로 인하여 자연석들이 이탈되거나 위치가 변형되는 것을 방지한다. 자연석들 사이에 약간의 유격이 있으므로 지진에너지는 이런 석재들 사이의 미세한 움직임과 그리고 여기서 발생하는 열, 소리에너지로 상당한 양이 소모된다. 그

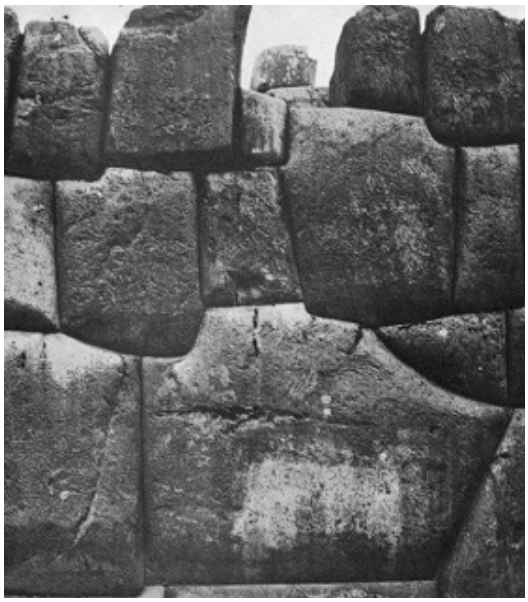

그림 8. 페루 마추피추 석조 기단석의 구조

출처: 김찬삼, 1972

렝이법은 기반암 위에 석축이 가장 높이 조성된 대웅전 남회랑에만 적용되었다. 이것은 인공 구조물이 높게 만들어야 하므로 지진에너지에 의한 피해가 가장 크게 발생할 가능성이 높기 때문이다.

② 목조건축 기법 적용

지진이 빈번하게 일어나는 일본의 건축물은 거의 목조로 되어 있다. 그리고 이 목조건축의 양식도 힘을 받는 기둥과 보를 못으로 고정시키는 것이 아니라, 부재들이 서로 걸리게 결구하는 방식을 채택하고 있다. 그리고 기둥과 기둥 사이의 공간을 작게 구획하고 있다. 이와 같은 건축양식은 기본적으로 지진을 염두에 두고 이루어지는 건축방식이다. 지진이 일어났을 때, 건물 전체가 지각운동에 따라 흔들리지만, 지진이 끝나면 원래의 모습으로 돌아온다. 이것은 탄성이 있는 목재들이 서로 단단히 결구되어 있으므로, 지진에 의한 흔들림에도 파괴되지 않고 원래의 모습을 유지하기 때문이다.

불국사의 석축은 목재가 사용된 것은 아니지만 목조건축 양식을 응용하여 조성하였다. 고대에는 벽돌이나 시멘트 불록으로 중요한 건물을 만드는 경우는 드물었으나 축대는 조적조(組積造)와 유사하게 직육면체의 석재를 쌓아서 만든다. 이와 같이 양식으로 축대를 쌓는다면 단기간에 기초공사를 마무리할 수 있지만 수평하중에 대단히 취약하므로 지진이 발생하면 건축물은 안정을 담보할 수 없다. 그러므로 불국사를 설계한 이들은 인공 기초인 축대를 만드는데 석재로 목조건축의 양식을 적용하였다. 이것은 목재가 가진 높은 진동저항계수는 없으나, 목조건축양식이 가진 내진기능을 응용한 것이다.

목조건축물은 지붕의 서까래(rafter)와 벽체 내의 수직재(wall stud) 배치에서 볼 수 있듯이 다른 건축재료로 만든 건축물에 비해서 많은 수의 부재를 보다 촘촘한 간격으로 사용하므로 연결부위의 수가 대단히 많은 다선구조형식(multiple-joint system)이다. 이 형식은 지진하중이 어느 특정구조부위에 집중되지 않게 하고 다수의 부재와 그 연결부위에 분배되도록 함으로써 전체적으로 보다 균형잡힌 내진기능을 발휘하게 되며, 목재 자체의 높은 진동저항계수(damping factor)는 목조구조의 내진기능을 증대시키는데 일조하므로, 일반적으로 동일한 모델의 구조 중 지진에 가장 안전하다(변진섭, 1998).

불국사 기단부의 인공으로 가공한 석재로 만든 부분은 기둥과 기둥 사이의 간격이 매우 좁다. 그리고 그 외의 구조에서 사용된 부재들의 길이도 짧다. 이 석조부재들은 목조건축에 사용된 부재들의 길이에 비해서도 상대적으로 짧게 설계되어 있으므로 기단부 전체에 사용된 석조부재들의 수량이 대단히 많다. 이들 사이에는 마추피츄유적에 사용된 것과 같이 틈이 없이 완전히 결구된 것이 아니라 어느 정도 융통성 있게 맞추어져 있다. 그러므로 지반으로부터 전달되어 자연석과 그렝이부분에서 어느 정도 소모된 지진에너지는 인공으로 다듬은 석재로 된 부분에서 대단히 많은 석조부재들에게 골고루 분산되어 소모될 수 있다.

당시 건축설계자들은 지진에너지를 면밀하게 계산하여 축대를 설계하였을 것이다. 석축에 사용된 부재의 크기도 위치에 따라 다르다. 대웅전 남회랑 석축 가운데 자연석 위에 반듯하게 다듬은 석재로 조영된 백운교 좌우는 부재들을 짧게 하여 좁은 간격으로 결구

하였으나, 축대의 윗부분인 청운교 좌우에는 석주 사이의 간격을 길게하고 중방도 생략하였다. 이것은 기단부에서 전달되는 지진에너지를 자연석 부분에서 일차적으로 흡수하고, 다음은 석재로 조성한 석축의 아랫단에서 2차적으로 완화시키므로 기단부 상단에서는 그 영향이 크지 않기 때문인 것으로 생각된다.

한편 청운교와 백운교, 칠보교와 연화교는 자연석을 쓰지 않고 석조 부재를 결구하여 조성하였다. 이 구조는 모두 목조 건축 기법으로 조성되었는데, 다리들이 석축 전면에서 이것을 지탱하는 역할을 하므로 강한 내진 구조로 만들었을 것이다.

목조건축 기법으로 만든 석축은 3가지 형태로 구분된다. 첫째, 대웅전 남회랑 축대 가운데 백운교 좌우, 청운교와 백운교, 칠보교와 연화교에서 볼 수 있다. 이것은 모든 부재들을 인공적으로 다듬어서 수평재인 중방석과 수직재인 석주를 주두석을 중심으로 서로 결구하였다. 그리고 석주들 사이의 간격은 5척으로 좁으며, 이들 부재들 사이는 판석으로 마감하였다. 둘째, 극락전 남쪽과 서쪽 축대에서 확인할 수 있는 양식으로 석주들 사이의 간격은 5척으로 짧고 주두석과 주두석 사이에는 수평재인 중방석을 만들어 주두석을 중심으로 사방으로 결구하였다. 부재들 사이에 판석은 만들지 않았다. 셋째, 대웅전 남회랑 청운교 좌우 석축, 대웅전 서회랑 석축으로 석주들 사이의 간격은 10척으로 길다. 주두석 사이에 중방을 설치하지 않았으며 판석도 없다. 내진기능은 첫째 양식이 가장 뛰어나고 셋째 양식이 상대적으로 떨어진다.

③ 주두석(동틀돌, 첨차석)

긴 석재를 축대 전면의 수직 방향으로 뒷채움한 돌들 사이에 깊게 넣은 주두석(동틀돌, 첨차석)은 마치 안쪽으로 깊게 박힌 못대가리처럼 축대의 표면에 드러난다.

못대가리처럼 머리 안쪽에 잘숙한 홈을 파서 상하의 돌기둥과 좌우의 수장재를 걸어서 인공적으로 가공한 석재로 조영한 축대의 뒤쪽에 채워진 자갈이나 토양의 압력에 의해 석조부재들이 외부로 밀려나와 축대가 무너지는 것을 방지하였다. 이것은 지진으로 발생하여 동틀돌로 전달된 에너지는 축대 내부의 자갈들을 운동시키면서 분산된다. 자갈들 자체에 전달되는 에너지도 이들을 운동시키고 이들 사이의 마찰열을 증대시키면서 소모된다. 그러므로 축대 위의 건물로 전달되는 에너지는 감소될 수 있다. 아울러 주두석은 뒷채움돌들의 움직이는 정도를 완화시키고, 석주 사이에 채워진 돌들이 주두석을 통해 서로 지지하게 하여 석축 원래 형태에 변형이 발생하지 않도록 한다.

한편 이와 같은 구조를 적용하면 축대를 지면과 수직되게 쌓을 수 있으므로, 동틀돌을 바깥으로 더 길게 내어 축대의 벽체를 장식할 수 있는 기교를 부릴 수 있다. 이와 같은 건축기법은 축대를 오랫동안 유지할 수 있고 불국사의 건축미를 제고시키는데 이바지하였다.

④ 유공초석

초석에 구멍을 뚫은 것은 기둥의 하단이 유공초석에만 끼워져 있었는지, 초석 아래의 축대 가장 상단의 주두석에도 홈을 만들어 거기에 결구시킨 것인지에 대해서는 자료가 없어 확인이 어렵다. 이 기법은 그렝이법보다 훨씬 더 강력한 내진구조이다. 지진에너지의 대부분이 수평하중인 것을 감안하여 건물의 기단부와 기둥을 일체화시켜 지반이 움직일때 함께 움직이도록 하여 기둥이 초석에서 이탈되는 것을 방지하며 건축물의 변형을 막고 관성에 의해 발생하는 충격은 목조건축물이 가지고 있는 고유한 내진기능으로 흡수하도록 하였다.

3) 불국사 내진구조의 의의

불국사는 불교의 교리적 상징체계를 갖추었다. 즉, 청운교, 백운교, 범영루, 다보탑과 석가탑, 칠보교와 연화교 등이 가지는 상징체계에 대해서는 많은 연구자들이 불교적 관점에서 분석하였다. 그러나 불국사가 아무리 훌륭한 상징체계를 갖추었다 하더라도 이것을 받쳐주는 형식을 제시하지 못했다면 그것은 아무것도 아니며, 그것은 예술로나 건축으로나 실패를 의미한다(유홍준, 1997). 파노프스키의 도상학에 동조하여 인도, 인도네시아의 불교미술을 해석한 쿠마라스와미(Coomaraswami)는 『시바의 춤(Dance of Siva)』에서 "과학에 근거하지 않은 예술은 아무것도 아니다(The art without science is nothing)"라고 단언하면서 수리

적(數理的) 체계의 조화를 강조했다.[4]

불국사의 수리적 체계에 대해서는 요네다의 연구가 주목을 받고 있는데[5], 대웅전 구역 평면도에서 대웅전, 무설전, 다보탑, 석가탑, 범영루, 좌경루, 자하문, 청운교, 백운교, 회랑들이 어떤 비례관계 속에 배치되어 있는가에 대해 논의하고 있다. 이것은 건축물의 아름다움과 전체 공간의 조화를 추구하기 위하여 공간 배치의 기하학적 비례를 어떤 방식으로 고안하였는가에 대한 해석으로서, 예술적, 미학적, 철학적 아름다움과 의미에 대해서만 주목하는 단계이다. 즉, 건축물이 대단히 조화와 균형있게 배치되었으며, 이것이 불국사를 엄정한 기품이 있는 사찰로 만든다(유홍준, 1997)는 것이다.

그러나 이와 같은 설명으로 불국사 건축이 가지는 과학적인 의미가 모두 파악된 것은 아니다. 이러한 미진함은 이 지역이 가지는 독특한 자연환경을 정확하게 이해하지 못한 데서 오는 한계로 생각된다. 즉, 불국사 지역의 지형 특징과 관계된 건축 구조의 특성을 포함하여 과학에 근거한 예술적 건축술에 대해 논의한 것은 아니다. 이 지역의 지형적 특수성으로 인하여 규모가 큰 지진이 발생할 수 있음에도 불구하고 불국사 건축을 책임진 김대성은 불국사선상지를 내려다 볼 수 있는 곳에 불교의 이상세계인 불국토를 건설하였다. 그가 어떤 과학적 장치를 통해 이와 같은 문제들을 해결하였는가하는 것은 이 건축물이 가진 의미를 제대로 이해하는데 기초가 된다. 불국사에 적용된 내진 설계는 세계에서도 유례가 드물게 독특하다. 화강암을 목재처럼 가공하여 건축의 아름다움을 극대화 시키면서도 궁극적 목적인 내진설계에 도달하기 위해 수많은 장치들을 고안하여 석조 축대에 겉으로 드러나지 않게 숨겨둔 것이다. 그리고 이것을 어디에도 기록하지 않았다.

일반적인 목조건축에 대한 기술 수준이 매우 높아서 황룡사 9층탑과 같은 초대형 목조건축물을 만들 수 있었던 당시에, 불국사를 조성하는데 지나치게 긴 시간(서기 751년 착공, 774년 김대성 사망 시에도 완공되지 않았음)이 소요되었다. 통일신라의 최전성기를 구가하며, 막대한 재정지원으로 인적, 물적 자원을 동원할 수 있는 8세기 중엽에 국가적 대사로 시작된 불국사의 건축기간이 길어질 수밖에 없었던 것은 이 지역이 가지는 자연환경의 특수성으로 인하여 파생된 건축학적 문제를 해결해야 하였기 때문일 것이다. 당시로서 동원 가능한 모든 내진공법을 연구하여 설계도를 완성하는데 많은 기간이 걸렸으며, 내진공법의 요체가 되는 석축을 완성하는데 역시 대단히 긴 세월을 보내야 했기 때문인 것으로 생각된다[6]. 아울러 석축의 내진기능이 제대로 작동되면서 석재들 사이의 균형과 비례를 통해서 완성된 건축미를 표현하도록 설계하는 데도 많은 시간이 필요하였을 것이다.

석축을 통해 인공적으로 확장한 부분에 목조로 된 범영루(泛影樓), 자하문(紫霞門), 회랑(回廊)을 배치하였다. 특히 범영루의 석축부에는 석재를 그렝이법으로 완벽하게 처리하고 그 위의 기단부에는 돌을 마치 목재를 가공하듯이 결구를 짜서 포개어 주춧돌을 만들었다. 이와 같은 상부구조와 하부구조의 하중의 배치와 석축의 내진공법의 적용은 자연현상을 완전히 이해하고, 그것을 극복할 수 있는 방법을 고안하고, 심미적인 안목으로 설계하여 만들어진 것이라고 보면, 이 건축물의 건축 기간이 오래 걸린 이유를 짐작할 수 있다.

이와 같은 내진설계기술들은 지난 1,250년 동안 우리나라에서 전승되어 발전되지 못하였다. 아울러 지진의 위험이 매우 높은 일본을 비롯하여 세계 어디에도 이와 같은 다양한 내진구조가 함께 적용된 고대의 석조건축물은 찾아보기 어렵다. 이 구조의 내진 기능의 우수함은 불국사 중창 기록에서 확인할 수 있는데, 목조 건물은 여러 차례 다시 짓거나 보수하였으나, 석축 부분은 거의 보수하지 않고, 창건 이후 오랜 기간 동안 원래의 모습을 그대로 유지 하였다. 다만 숙종 12년(서기 1686년), 숙종 41년(서기 1715년)에 청운교와 백운교를 중수하였을 뿐이다. 석축 가운데 일제시대에 일본인들에 의해 보수된 부분은 원래의 건축 방법에 충실하지 않고 시멘트를 사용하였으며, 뒷채움돌을 원력이나 아원력의 하상력이 아니라 각력으로 한 것 등은 원래의 내진 설계에 반하는 것으로 이에 대한 내진 기능의 훼손에 대한 과학적인 조사가 필요한 것으로 생각된다.

6. 요약 및 결론

1) 토함산을 포함한 불국사 산맥 서사면과 불국사 선상지에는 북-남 방향의 역단층과 북서-남동 방향의 역단층선이 여러 개 통과하고 있다. 이들은 대부분 활단층이므로 이 지역은 지반이 상대적으로 불안정하다.

2) 불국사와 인근 지역에서 확인되는 몇 개의 역단층 노두, 저수지의 배치, 기반암 분포 특성은 불국사 경내와 인접한 지역에 복수의 활단층선이 통과하고 있을 가능성이 매우 높음을 암시한다.

3) 삼국사기에 기록된 대형 지진에 대한 기록으로 유추할 때, 불국사 건축 담당자들은 경주 지역의 지반이 안정되지 못하고 지진으로 인하여 건축물이 붕괴될 수 있음을 인식하고 있었으며 내진설계가 필요하다고 판단하였을 가능성이 매우 높다.

4) 지형적인 문제로 불국사가 입지할 수 있는 공간이 부족하므로 선상지 중위면을 확장하기 위하여 석축을 조성하였다.

5) 불국사에 적용된 내진 구조는 그렝이법, 목조건축 기법을 적용한 석조구조, 주두석(동틀돌, 첨차석)의 이용, 유공초석의 사용이다.

6) 그렝이법은 가장 하부의 자연석과 인공적으로 가공한 석재들 사이에 불규칙한 면들이 서로 꼭 맞물리도록 하여 지반으로부터 전달되는 수평하중에도 석축이 변형되지 않도록 할 뿐 아니라, 하부의 자연석들이 이탈되거나 변형되지 않도록 하였다.

7) 목조건축 기법을 석조 건축에 적용하여 부재인 수평재와 수직재가 서로 결구되도록 하였다. 특히 주두석, 동틀돌, 첨차석의 머리 부분에 홈을 만들어 모든 부재들이 서로 맞물리도록 하여 지진의 진동에도 원래의 형태를 유지할 수 있도록 설계하였다. 부재의 크기도 석축의 위치에 따라 다르게 하여 지진에너지를 가장 효과적으로 소모시킬 수 있게 설계하였다.

8) 목조건축 기법을 응용한 석축은 세 가지 양식으로 구분되는데, 수직재인 석주와 수평재인 중방석의 간격을 짧게 하고 주두석을 중심으로 수평재와 수직재를 모두 결구하였으며 판석으로 겉을 마감한 것, 첫째 양식에서 중방석들 사이의 간격을 넓히고 판석을 생략한 것, 중방석과 판석을 모두 생략하고 석주 사이의 간격을 넓게 한 것이다. 이들 가운데 첫째 양식의 내진기능이 가장 우수하고 셋째 양식은 상대적으로 내진기능이 떨어진다.

9) 주두석(동틀돌, 첨차)을 좁은 간격으로 석축 내부로 깊숙하게 박아 넣어 지반으로부터 전달되는 에너지가 이 석재 사이에 채워진 뒷채움돌의 운동으로 소모되도록 하고, 뒷채움돌들이 크게 움직이지 않도록 하여 석축의 전체적인 형태에는 변화가 생기지 않게 하였다.

10) 석축의 내진구조들은 지반으로부터 전달되는 수평하중을 부재들 상호간의 마찰과 뒷채움돌들의 내부마찰을 통해 흡수하는 방식이다. 석축부에서 지진에너지가 분산, 소모되므로 상부구조물에 대한 지진충격을 감소시킨다. 에너지는 결코 없어지지 않고 단지 한 형태에서 다른 형태로 바뀔 뿐이며, 마찰에 의해 흡수된 에너지는 해롭지 않는 열로 전환되어 축대 내부에서 소멸된다.

11) 목조건축물 자체가 내진구조이지만 유공초석을 고안하여 지진의 수평하중에도 기둥이 초석으로부터 이탈되어 건축물이 변형되는 것은 방지하였다.

12) 겉으로 드러난 부분이 균형 잡히고 특별한 표현으로 조영되었으므로 건축미가 완성된 것으로 판단하는 것은 마치 특별한 의미를 가지지 않은 채 기교만 부린 것들을 보고 아름답다고 평가하는 것과 다를 바 없다. 건축물을 구성하고 있는 각 부분들이 나름대로 특별한 역할을 하면서 균형과 조화를 이루어야 하며 이것이 과학에 근거한 아름다움이다.

註

1) 신영훈, 1998, 82-83.

2) 1척은 30cm로 환산할 수 있음.

3) 수평력(건물의 반응속도) = 지반운동가속도 · 건물중량/지구중력가속도.

4) 유홍준, 1997, 242에서 재인용.

5) 유홍준, 1997, 242-244에 요약되어 있음.

6) 불국사 창건에는 몇가지 설이 있으나, 경덕왕 십년에 해당하는 천보십년(天寶十年) 즉 서기 즉 751년에 김대성에 의해 창건되기 시작하여 혜공왕 십년(서기 774년) 그가 사망한 해

에도 완성되지 않았다. 따라서 불국사 공사기간은 최소한 23년 이상이다.

文獻

김상현, 1992, 불국사, 대원사, 서울.
김소구, 1996, 지진과 재해, 기전연구사, 서울.
김용부, 1999, 지진은 왜 일어나는가?, 기문당, 서울.
김찬삼, 1972, 김찬삼의 세계여행 1(아메리카), 삼중당, 서울.
기상청, 2001, 지진관측보고(1978-2001).
문화공보부 문화재관리국, 1976, 불국사 복원공사 보고서.
박경석, 1989, 한국의 우곡지형연구, 경북대학교 교육대학원 석사학위논문.
변진섭, 1998, 우리가 알아야할 지진, 일공일공일, 서울.
신영훈, 1998, 석불사 · 불국사, 조선일보사, 서울.
유홍준, 1997, 나의 문화유산답사기 3, 창작과 비평사, 서울.
윤순옥 · 황상일, 1999, "한국 남동부 경주시 불국사단층선 북부의 활단층지형," 대한지리학회지, 34(3), 231-246.
윤순옥 · 황상일, 2000, "한국 남동해안 해안단구의 지형형성 mechanism," 대한지리학회지, 35(1), 231-246.
윤순옥 · 전재범 · 황상일, 2001, "조선시대 이래 한반도 지진발생의 시공간적 특성," 대한지리학회지, 36(2), 93-110.
장경호, 1996, 한국의 전통건축, 문예출판사, 서울.
장기인, 1988, 목조(한국건축대계 Ⅴ), 보성각, 서울.
장기인, 1997, 석조(한국건축대계 Ⅶ), 보성각, 서울.
정지성, 1998, 잉카문명의 신비, 도서출판 한백, 서울.
황상일, 1998, "경주시 하동 주변의 선상지 지형발달과 구조운동," 한국지형학회지, 5(2), 189-200.
황상일 · 윤순옥, 2001, "한국 남동부 경주 및 울산시 불국사단층 지역의 선상지 분포와 지형발달, 대한지리학회지," 36(3), 217-232.
岡田篤正 · 渡邊滿久 · 佐藤比呂志 · 全明純 · 曺華龍 · 金性均 · 田正秀 · 池憲哲 · 尾池和夫, 1994, "梁山斷層 (韓國南東部) 中央部の活斷層地形とトレンチ調査," 地學雜誌, 103(2), 111-126.
岡田篤正 · 渡辺滿久 · 鈴木康弘 · 慶在福 · 曺華龍 · 金性均 · 尾池和夫 · 中村俊夫, 1998, "蔚山斷層系(韓國南東部) 中央部の活斷層地形と斷層露頭," 地學雜誌, 109(5), 644-658.

교신: 황상일, 702-701, 대구시 북구 산격동, 경북대학교 사회과학대학 지리학과(이메일: hwangsi@knu.ac.kr, 전화: 053-950-5230)
Correspondence: Hwang, Sangill, Department of Geography, College of Social Sciences, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea(e-mail: hwangsi@knu.ac.kr, phone: 053-950-5230)

최초투고일 06. 11. 28.
최종접수일 07. 06. 17.