

## 감은사지삼층석탑(서탑)에 사용된 석재 공급지에 대한 연구

좌용주\* · 김건기 · 고석배 · 김종선

경상대학교 지구환경과학과

### Source Area of the Rocks Using the West Stone Pagoda of Gameunsaji Temple Site, Korea

Yong-Joo Jwa\*, Kun-Ki Kim, Seok-Bae Ko and Jong-Sun Kim

Department of Earth & Environmental Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

**요약:** 감은사지삼층석탑(국보 제112호)은 구성부재의 훼손으로 인해 빠른 시간에 보수되어야 하는 위기의 석조문화재이다. 이 연구에서는 감은사지삼층석탑(서탑)을 이루고 있는 부재들에 대한 각각의 암석기재적인 특징, 대자율 및 감마스펙트رو미터를 측정하여 석탑에 사용된 부재들의 공급지를 추정하였다. 감은사지서탑의 석재는 기재적으로 세립질의 석기에 흑운모, 석영, 장석 등의 광물편의 함량이 많은 유리-결정질 응회암 또는 결정 응회암으로 분류된다. 대자율 측정결과, 이들은  $10\sim 20(\times 10^{-3}$  SI unit) 정도의 값을 가지며, 감마스펙트رو미터 측정결과 K는 3%, eU는 0~8 ppm 그리고 eTh는 9~18 ppm의 함량을 가진다. 이러한 특징은 주변암석들 중에서 감은사지서탑에 사용된 석재의 공급지를 파악하는데 중요한 지시자가 된다. 감은사지 주변에 분포하는 암석 중에서 기재적으로나 화학적으로 감은사지서탑의 석재와 가장 유사한 암석은 와읍분지 내 범곡리층군에 포함된 테이사이트질 화산암류이다. 이 화산암류는 암석층서적으로 다시 와읍리응회암, 용동리응회암 그리고 범곡리화산암류로 구분된다. 세 암석 중에서 감은사지서탑의 석재와 가장 유사한 암석은 범곡리화산암류의 결정 응회암으로 판단되며, 이 석탑의 건축시에 이 결정 응회암이 사용되었을 것으로 생각된다.

**주요어:** 감은사지, 석탑, 공급지, 대자율, 감마스펙트رو미터, 결정 응회암

**Abstract:** The west stone pagoda of Gameunsaji temple site (National Treasure No. 112) has been damaged mainly by fracture, exfoliation and granular disintegration. In this study, the source area of the rocks using the west stone pagoda was examined in terms of petrological feature, magnetic susceptibility, and  $\gamma$ -ray spectrometer. The stones include abundant crystal fragments of biotite, quartz and feldspars in the fine-grained matrix; they are petrographically discriminated to vitric-crystal tuff or crystal tuff. Measured magnetic susceptibility values are of from 10 to 20 ( $\times 10^{-3}$  SI unit). From the  $\gamma$ -ray spectrometer measurement K, eU, and eTh contents of the stones are about 3%, 0 to 8 ppm, and 9 to 18 ppm, respectively. These features are used as indicators to presume the source area of the stones. Comparing the petrographical and chemical characteristics between the stones of the west stone pagoda and the country rocks near the Gameunsaji temple site, it is suggested that the most similar country rock to the stones could be dacitic volcanic rocks of the Beomgokri group in the Waeup basin. The Beomgokri group is lithostratigraphically divided into Waeupri tuff, Yongdongri tuff, and Beomgokri volcanic rocks. Among the three rocks, the crystal tuff of the Beomgokri volcanic rocks seems likely to have been the source rock of the stones of the west stone pagoda.

**Key words:** Gameunsaji, stone pagoda, source area, magnetic susceptibility,  $\gamma$ -ray spectrometer, crystal tuff

\*Corresponding author: Tel: 82-51-751-6004, E-mail: jwayj@gsnu.ac.kr

서 론

감은사지(사적 제31호)는 경주시 양북면 용당리에 위치하고 있으며, 이곳에는 1962년 12월에 국보 제112호로 지정된 감은사지삼층석탑(서탑)이 있다. 이들 석탑은 세워진지 약 1300여년이 흐른 지금, 오랜 세월의 풍화작용으로 인하여 붕괴 위험성이 높고 훼손 정도가 심각하여 빠른 시간에 보수되어야 하는 위기의 석조문화재이다. 이 서탑의 경우 1960년 국립중앙박물관 학술조사단에 의하여 해체조사를 실시한 후에 복원하였고, 동탑의 경우 1996년에 해체 복원하였다. 하지만 현재 서탑의 경우 상층기단과 탑신의 일부가 떨어져 나가는 현상이 계속 진행되어 이 서탑에 대한 보존과학적 연구가 시급한 실정이다.

보존과학적 측면에서 석탑 부재의 자연훼손에 대한 보존처리 방법들이 있겠지만, 감은사지서탑과 같이 석탑의 훼손정도가 심각한 부재들의 경우에는 부분적으로 새로운 석재로 대체하는 방법이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 이 경우 대체 석재는 가능하면 원부재와 동일한 석재를 사용하는 것이 가장 타당할 것이다. 그러나 7세기 후반에 건조된 이 석탑의 부재가 어디서 공급되었는지에 대한 기록이 전혀 없기 때문에, 이 서탑에 사용된 석재의 공급지를 파악하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감은사지서탑에 사용된 부재들에 관한 기존 연구들에는 이상현(1996)과 이찬희 외(2004)에 의한 연구가 있지만, 표면 풍화와 훼손에 의해 서로 다르게 기재되어 왔다. 따라서 이번 연구에서는 감은사지서탑을 이루고 있는 부재들에 대한 각각의 암석기재적인 특징과 대자율 및 감마스펙트로미터를 측정하여 이 서탑에 사용된 부재들의 공급지에 관하여 논의하고자 한다.

연구방법

감은사지서탑은 국보로 지정되어 있기 때문에 시료를 직접 채취할 수 없는 한계가 있으므로 석탑에 사용된 부재들에 대한 연구는 상당히 제한적이다. 그래서 이번 연구에서는 아래의 두 가지 방법을 통해 이루어졌다.

먼저 석탑 부재에 대한 암석기재적 특징을 이용하여 주변 지역에 동일한 암석이 분포하는지를 조사하였으며, 석탑 주변에 탈락된 파편과 주변 지역의 유사한 암석들에 대하여 박편을 제작한 후 현미경하에서의 특징과 모드분석을 이용하여 광물의 함량을 비교 고찰하였다.

다음은 비파괴 분석기기인 휴대용 대자율측정기(GF

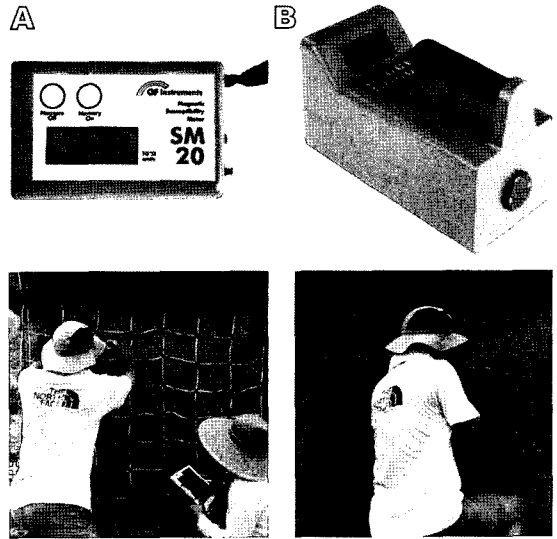


Fig. 1. Analyses of magnetic susceptibility and  $\gamma$ -ray spectrometer for the west stone pagoda of Gameunsaji temple site. (A) SM20 magnetic susceptibility meter used for measuring bulk magnetic susceptibility in situ. (B) GRM260  $\gamma$ -ray spectrometer used for measuring radioactive element contents in situ.

Instruments SM20)와 감마스펙트로미터기( $\gamma$ -ray spectrometer GRM260)를 이용하여, 암석의 자화강도와 방사선량을 측정하였다. 최근 이러한 방법들은 석조문화재에 사용된 석재들의 공급지를 파악하는데 유용하게 이용되어 왔다(좌용주 외, 2000; 이찬희 외, 2003; 양희제, 2004; 조기만, 2004; 조기만과 좌용주, 2005; 양희제 외, 2006).

대자율 측정은 암석의 외부 자기장에 대한 자화강도를 측정하는 것으로, 강자성 광물들의 함량에 따라 대자율 값의 차이를 보인다. 따라서 육안으로 판단하기 힘든 암석 시료들을 구분하는데 아주 유용하게 사용된다. Fig. 1A는 감은사지서탑에 대한 대자율 값의 변화를 측정함으로써 석탑 부재에 격자망을 설치하여 대자율 측정을 실시하였다.

감마스펙트로미터 측정은 단채널 분석기 시스템으로써 4개창(특정한계치, K, U, Th)을 선택적으로 기록하는 것이다. 측정결과는 1) 특정한계치(threshold) 이상의 전체 카운트 수, 2) K 창에 대한 카운트 수, 3) U 창에 대한 카운트 수, 4) Th 창에 대한 카운트 수로 측정된다. 이 방법은 원칙적으로 현장에서 암석과 토양내의 K, U, Th의 함량과 전체 감마선 활동도를 얻기 위해 주로 사용되어 왔다(Ward, 1981).

감마스펙트로미터의 측정값을 신뢰하기 위해서는 기

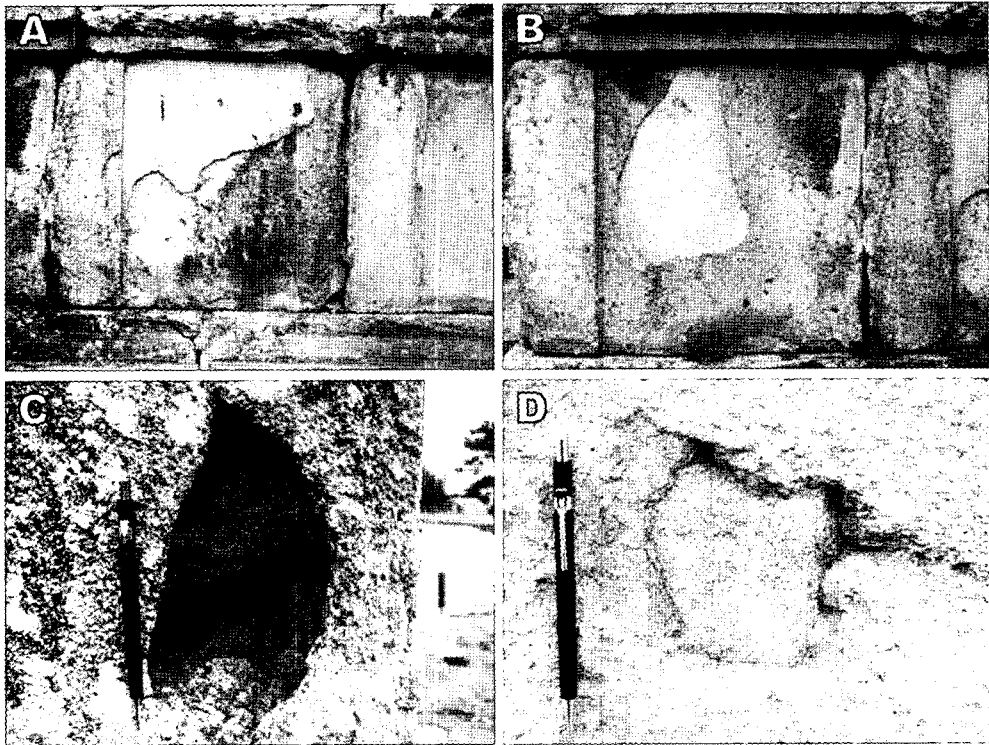


Fig. 2. Photographs showing weathering surfaces of the west stone pagoda. (A&B) Exfoliations of the west stone pagoda. (C&D) Cavities of the west stone pagoda.

본조건 3가지가 충족되어야 한다. 첫째, 시료가 어느 정도 균질해야 하고, 둘째 붕괴 계열이 지속적으로 평행이어야 하며, 셋째 시료 형태가 일정하게 유지되어야 한다. 그러므로 Fig. 1B와 같이 동일한 석탑 부재에 대하여 2분 간격으로 5회씩 혹은 3분 간격으로 3회씩 측정하였다. 감마스펙트로미터로 직접 측정된 K는 원소%로 나타나며, U와 Th는 방사성 붕괴계열의 연속성으로 환산되는 동가함량(equivalent content, eU와 eTh로 표시)이며 단위는 ppm이다.

야외 조사와 현미경관찰 결과로부터 석탑의 부재와 유사하다고 판단된 암석에 대해서도 대자율과 감마스펙트로미터를 측정하였으며, 그 자료를 감은사지서탑의 측정 자료와 비교 고찰하였다.

### 감은사지서탑의 암석기재

석탑 표면은 풍화에 의한 박리와 박락에 의해 훼손되어 있으며, 석탑의 본체를 이루고 있는 부재들에는 크고 작은 공동들이 나타난다(Fig. 2). 이 석탑에 사용된 부재들은 주로 회백색 혹은 담홍색으로 결정의 함

량이 많은 응회암으로 이루어져 있다. 광물편은 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모 그리고 각섬석으로 구성되며, 암편은 침상의 각섬석들이 함유된 녹회색의 암편들이 포함되어 있다. 이들은 화학적 풍화로 말미암아 분리, 제거되어 외부 형태만이 공동으로 남아있는 경우가 흔하며, 이 공동은 최장 20 cm 정도의 크기를 가지기도 한다. 각섬석 역시 풍화로 인해 분리, 제거되어 외부 형태만이 존재하는 경우도 두드러지게 나타난다(Fig. 2C&D). 흑운모는 육각형의 자형으로 산출되며, 평균 1-3 mm의 크기로 뚜렷하게 구별된다. 석영은 자형으로 단결정으로 나타나는 것이 보통이나 균집을 이루기도 하고 다결정으로 나타나기도 한다. 장석은 변질정도가 심해 구별하기 힘들다(Fig. 3A).

한편, 감은사 건축시 사용된 것으로 추정되는 석재의 파편을 미세절단기를 이용하여 슬랩과 박편을 제작하여 관찰하였다. 이 시료는 석탑에 사용된 부재와 암석기재적으로 아주 유사한 특징을 가진다. 암색은 담홍색으로 풍화면에서 관찰되지 않았던 사장석 광물편이 잘 나타나며, 육각형의 흑운모도 자형으로 잘 관찰된다(Fig. 3B). 현미경하에서는 사장석, 석영 그리고 흑

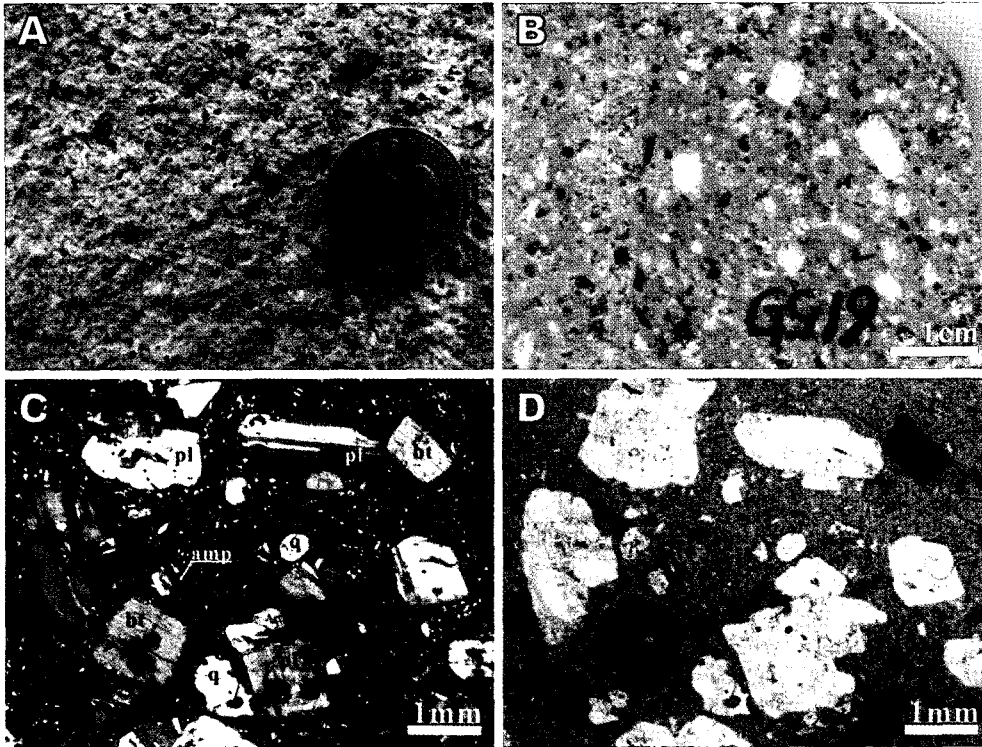


Fig. 3. Petrological features of the west stone pagoda. (A) The surface of the west stone pagoda showing euhedral biotite crystal fragments. (B) The slab of falling off sample from the west stone pagoda, included of euhedral bitotite and plagioclase crystal fragment. (C&D) Thin section of the west stone pagoda, composed of quartz (q), plagioclase (pl), biotite (bt), and amphibole (amp). The matrix is composed of fine grained crystal fragments of quartz and plagioclase.

운모의 광물편들이 잘 나타나며, 세립의 기질을 가진다(Fig. 3C&D). 모드 분석결과 광물편은 41%로 사장석(29.6), 석영(3.9), 알칼리장석(1.2), 흑운모(4.2), 각섬석(1.3) 그리고 불투명광물(1.3)이 포함되어 있으며, 기

질은 58.4% 정도의 함량을 가진다(Table 1). 따라서 감은사지서탑에 사용된 부재는 유리-결정질 응회암에 해당한다(Fig. 4).

Table 1. Modal composition of the west stone pagoda and country rocks

Rock type	Stone pagoda	Waeupri tuff	Yongdongri tuff				Beomgokri crystal tuff	
			GS04	GS05	GS06	GS07	GS12	GS16
Quartz	3.9	4.0	0.2	6.7	3.1	0.2	0.2	1.5
Alkali feldspar	1.2	0.1	0.1	4.5	7.2	3.0	1.5	2.0
Plagioclase	29.6	22.9	33.3	24.3	20.6	33.0	29.4	26.1
Crystal Biotite	4.2	2.2	4.2	4.9	3.1	3.1	6.2	5.2
Amphibole	1.3	0.3	1.5	0.4	0.5	1.2	2.2	0.7
Opaque mineral	1.3	1.2	1.9	1.2	1.5	1.8	0.7	0.6
Total	41.6	30.8	41.1	41.9	36.0	42.2	40.2	36.0
Matrix	58.4	68.3	58.9	56.5	63.2	57.8	59.8	64.0
Rock Fragment	-	0.9	-	1.5	0.7	0.1	-	-
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100

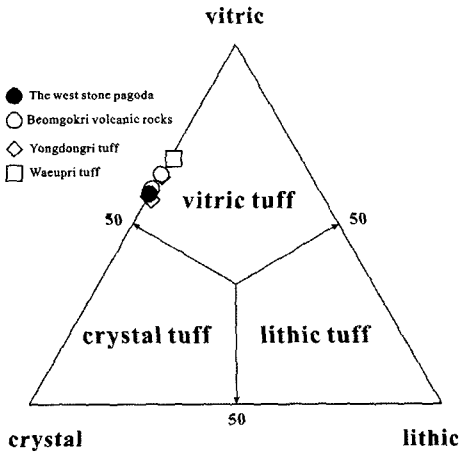


Fig. 4. Modal compositions (vitric-crystal-lithic) of the west stone pagoda and country rocks.

### 감은사지서탑의 대자율 및 감마스펙트로미터

감은사지서탑의 기반부에서부터 상륜부의 노반까지의 대자율과 감마스펙트로미터를 측정하였으며, 측정된 자료를 통계처리 하여 감은사지서탑의 대자율 값과 감마스펙트로미터에 의해 분석된 K, eU 그리고 eTh 함량을 나타내었다(Fig. 5)

이 석탑의 전체 대자율 값의 범위는  $7-52(\times 10^{-3})$  SI 단위, 이하 동일)의 범위를 가리킨다. 대자율 값은 크게 7-20과 31-52 두 부분으로 나뉘는데 31-52 사이의 값은 모두 상륜부에서 나타나는 것이 특징이다. 상륜부는 현재 노반과 찰주만 남아있는데 노반은 가운데 찰주공이 뚫린 정방형 부재로서 하나의 부재로 이루어져 있으며 크기는 가로 72 cm, 세로 85 cm, 두께 45 cm이다. 이것은 1960년에 해체 복원 시 풍화가 심하여 당시에 새로 조성한 것이다. 그러므로 노반에서 측정된 대자율 값은 석탑의 전반에 걸쳐 측정된 값과는 아주 대조적이므로 이 부분을 제외하면 석탑 부재에 대한 대자율 값의 변화는 7-20으로 좁은 범위의 값을 가진다.

석탑의 대자율 값을 방향별로 나누어 분석하면 동쪽 방향은 10의 대자율 값이 가장 많은 빈도수를 나타내며 서쪽 방향은 11의 값이 가장 많은 빈도수를 나타낸다. 남쪽 방향은 서쪽과 유사하게 11의 빈도수가 크며 2층 기반의 값이 고르게 나타난다. 북쪽 방향의 대자율 값은 12의 빈도수가 제일 높지만 다른 13, 14 값도 유사한 빈도수를 나타낸다. 따라서 감은사지서탑의 대

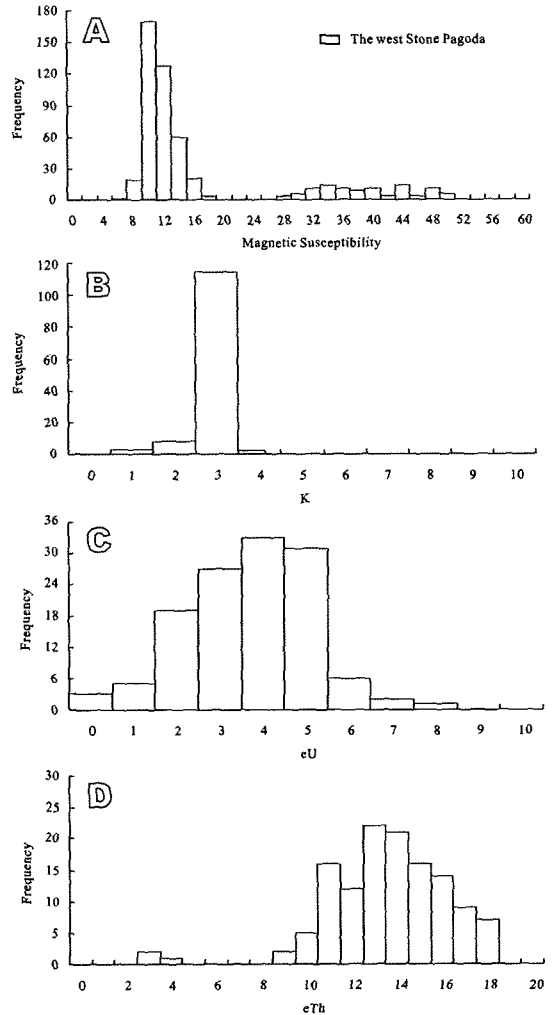


Fig. 5. Histograms of magnetic susceptibility and  $\gamma$ -ray spectrometer data for the west stone pagoda. Measured values of magnetic susceptibility (A), K% (B), eU ppm (C), eTh ppm (D).

자율 값은 10-12로 거의 균질한 대자율 값의 분포를 가진다.

감마스펙트로미터 측정결과 K는 석탑의 방향과 관계없이 대부분 3%에 집중 분포하며, eU값은 0-8 ppm으로 빈도수가 분산되어 나타난다. 동쪽에서는 5 ppm에서, 남쪽과 북쪽에서는 4 ppm에 집중되어 나타나지만 서쪽에서는 2 ppm을 나타낸다. eTh값은 9-18 ppm 사이에 존재하며, 동쪽에서는 10-18 ppm 사이에서 비교적 고르게 분포하여 나타나지만 나머지 방향에서는 13-15 ppm 값에 집중된다.



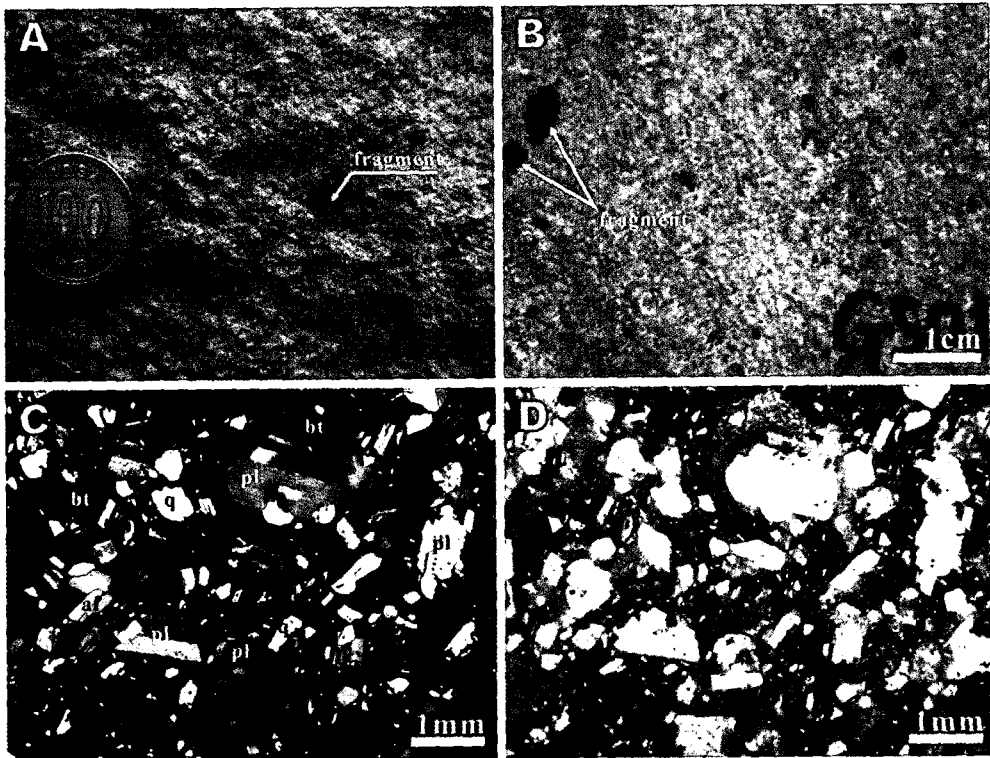


Fig. 7. Petrological features of the Waeupri tuff. The surface (A) and slab (B) of the Waeupri tuff included rock fragments(mudstone chip). (C&D) Thin section of the Waeupri tuff composed of quartz (q), plagioclase (pl), alkali feldspar (af), and biotite (bt). The matrix is composed mainly of vitric and fine grained crystal fragments of quartz and plagioclase.

었으며, 이후 중기 마이오세 초에는 화산물질을 포함하지 않는 육성 혹은 해성 퇴적물이 충전되어 있다(윤선, 1988; 최위찬 외, 1988; Yun et al., 1997; 손문, 1998). 전기 마이오세의 분지 충전물은 범곡리와 장기층군으로 구분되고 있으나 연구자에 따라 각 층군의 정의가 다르며 현재까지 두 층군의 상대적 지질시대에 관한 논란이 계속 되고 있다. 하지만 암석 조성적으로 이들은 차이를 보이는데 범곡리층군은 주로 데사이트질 조성의 화산암류들로 구성되어 있으며, 장기층군은 현무암질의 화산암류로 구성된다(손문 외, 2002).

### 감은사지 주변 암석

감은사지서탑에 사용된 석재는 회백색 내지 담홍색으로 육각형의 흑운모가 반정으로 잘 나타나며, 녹회색의 암편들을 가진다. 이러한 특징은 주변암석들과 감은사지서탑에 사용된 암석을 구분하는데 중요한 지시자가 된다. 감은사지 주변에 분포하는 화성암류들 중 왕산석영안산암질화산암류와 현무암질 화산암류는 암

색이 암흑색으로 암석기재적 특징에 의해 연구대상에서 제외하였다. 경주와 감포일대에 분포하는 화강암류는 대자율 값은 유사하지만, 육각형의 흑운모를 가지지 않으므로 이 역시 암석기재적 특징에 의해 연구대상에서 제외하였다.

범곡리층군은 데사이트질 화산암류로 회백색의 암석을 띠며, 육각형의 흑운모를 가진다. 그리고 녹회색의 암편들 역시 포함하고 있으므로 감은사지서탑의 부재와 가장 유사할 것으로 판단할 수 있다. 따라서 이번 연구에서는 데사이트질 화산암류들에 대하여 좀 더 자세한 암석기재적인 특징, 대자율 및 감마스펙트럼미터 분석을 실시하여 감은사지서탑과 비교 고찰하였다.

범곡리층군의 데사이트질 화산암류는 와읍분지 내에 분포하는 화산암류로 행정구역상 경상북도 경주시 양북면 와읍리, 안동리, 범곡리 그리고 장항리 일대(북위 35° 44' 00"~35° 50' 20", 동경 129° 21' 00"~129° 27' 00")에서 산출된다(Fig. 6). 범곡리층군의 데사이트질 화산암류는 와읍리웅회암, 용동리웅회암 그리고 범곡리화산암류로 세분화되며, 와읍리와 용동리웅회암 사이에

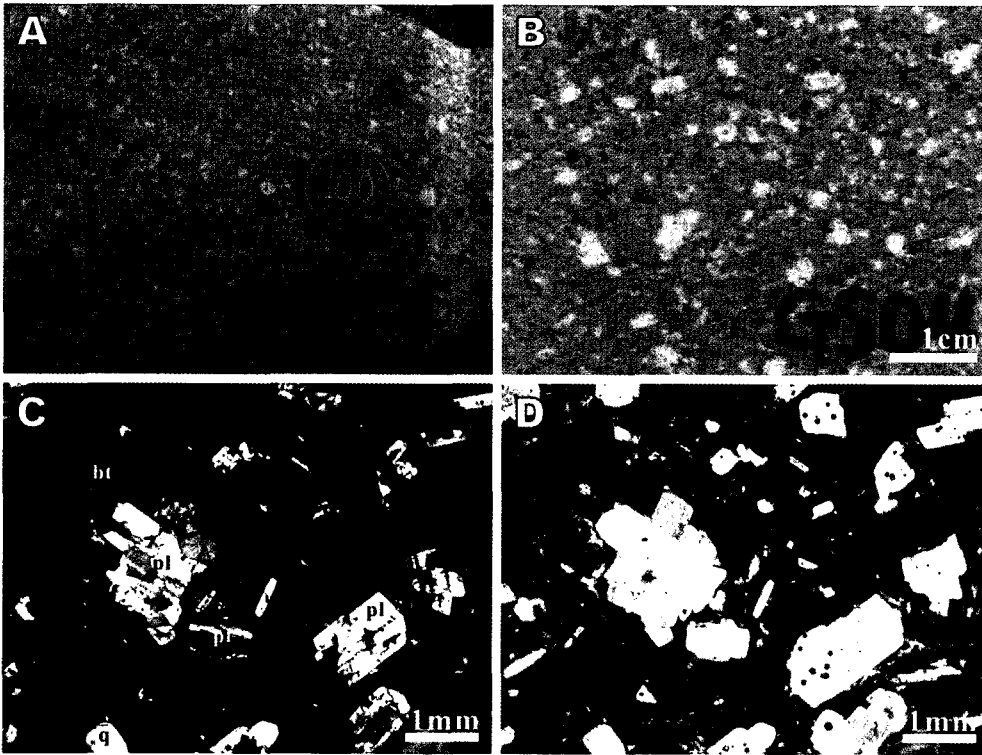


Fig. 8. Petrological features of the Yongdongri tuff. The surface (A) and slab (B) of the Yongdongri tuff including many plagioclase crystal fragment. (C&D) Thin section of the Yongdongri tuff composed of plagioclase (pl), quartz (q), and biotite (bt). The matrix is composed mainly of vitric and fine grained crystal fragments of quartz and plagioclase.

는 응회질 퇴적암으로 구성된 안동리층이 분포한다. 와읍리응회암은 데사이트질 용결 응회암과 암편질 응회암으로 주로 구성되며, 범곡리층군의 최하부에 분포한다. 이들은 회백색의 암색으로 1-3 cm 정도 크기의 이질 암편들을 포함하고 있으며, 광물편은 세립의 사장석, 석영, 각섬석 그리고 흑운모를 가진다(Fig. 7A&B). 현미경하에서는 용결구조가 잘 나타나며, 사장석과 석영은 파각상을 보이고, 각섬석과 흑운모는 자형으로 뚜렷하게 나타난다(Fig. 7C&D). 와읍리응회암의 구성광물은 감은사지서탑에 사용된 석탑 부재와 유사하지만 흑색의 이암편들을 함유하고, 광물편들이 세립질이며, 용결조적이 잘 나타나므로 석탑에 사용된 부재와는 차이를 가지는 것으로 판단할 수 있다. 모드분석 결과에서도 석탑의 부재에 비해 광물의 함량(약 30% 정도)이 낮은 값을 가진다.

용동리응회암은 데사이트질 용결 응회암, 화산집괴암 그리고 응회질 사암으로 구성되며, 와읍리응회암과 안동리층의 상부에 분포한다. 이들은 회백색의 암색으로 침상의 각섬석을 함유한 1-2 cm 정도 크기의 녹회

색 암편들이 포함되어 있으며, 사장석, 석영, 흑운모 그리고 각섬석의 광물편들을 가진다(Fig. 8A&B). 와읍리응회암에 비해 사장석과 각섬석의 입자가 크고 함량이 많으며, 현미경하에서는 와읍리응회암보다는 용결구조가 잘 나타난다(Fig. 8C&D). 용동리응회암은 석탑에 사용된 부재와 구성광물과 암편이 유사하지만, 다른 광물에 비해 사장석 광물편이 크고 함량이 많으며, 용결구조가 잘 나타나므로 다른 암색으로 판단되어진다. 모드분석 결과는 석탑의 부재와 유사한 광물 함량비를 가진다.

범곡리화산암류는 용동리응회암의 상부에 분포하며, 범곡리층군의 최상부에 해당한다. 이들은 데사이트질 화산집괴암, 응회질 역암, 응회질 사암, 안산암질 응회암 그리고 결정 응회암으로 구분할 수 있다. 범곡리화산암류 중 결정 응회암은 회백색 혹은 담홍색의 암색으로 침상의 각섬석을 함유한 2-3 cm 정도 크기의 녹회색 암편들이 포함되어 있으며, 사장석, 석영, 흑운모 그리고 각섬석의 광물편들을 가진다(Fig. 9A&B). 와읍리응회암과 용동리응회암에 비해 육각형 흑운모가 크



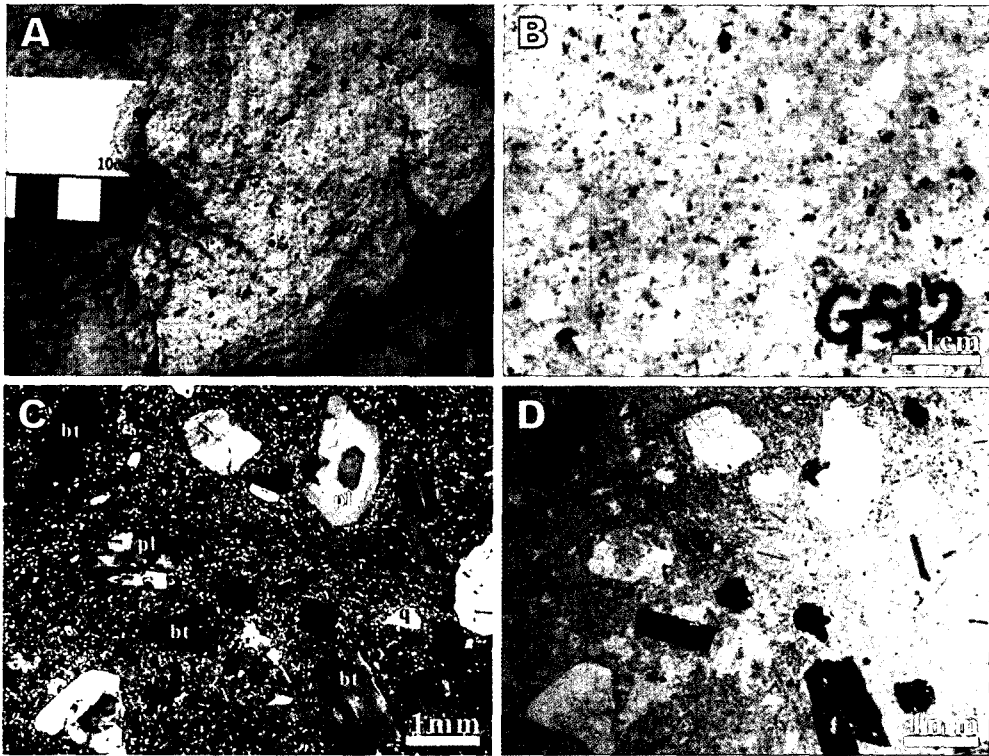


Fig. 9. Petrological features of the Beomgokri crystal tuff. The surface (A) and slab (B) of the Beomgokri crystal tuff showing euhedral biotite crystal fragments. (C&D) Thin section of the Beomgokri crystal tuff composed of quartz (q), plagioclase (pl), and biotite (bt). The matrix is composed of fine grained crystal fragments of quartz and plagioclase.

고 함량이 많으며, 현미경하에서는 사장석과 흑운모가 자형으로 나타나고, 부분적으로 석영들이 파각상을 보인다. 기질은 세립질의 입자크기를 가진다.

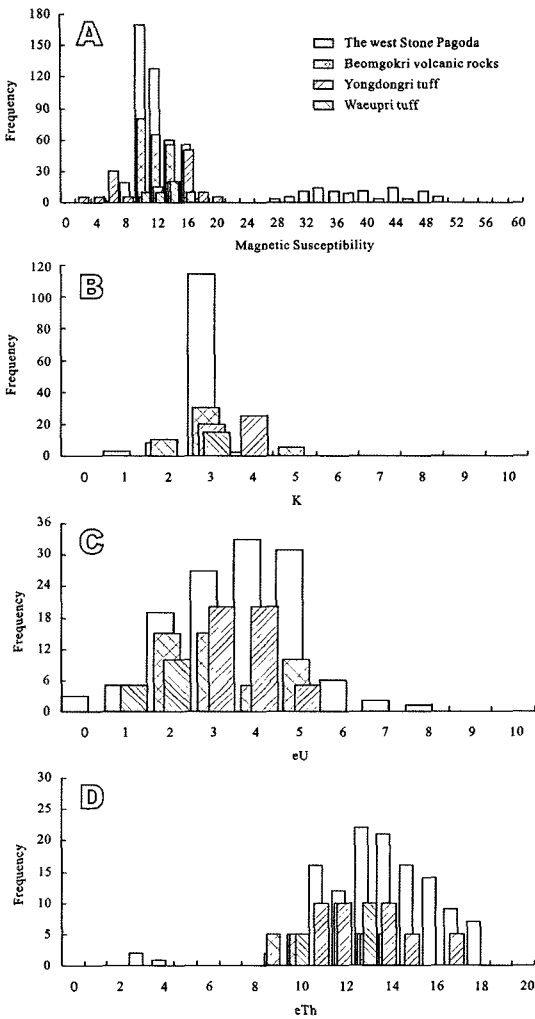
범곡리화산암류는 구성광물, 녹회색의 암편 그리고 육각형의 흑운모 광물편의 크기와 형태가 석탑에 사용된 부재와 매우 유사한 것으로 판단된다. 현미경하에서도 사장석과 흑운모가 광물편으로 나타나며, 세립질의 기질을 가진다(Fig. 9C&D). 따라서 감은사지서탑에 사용된 부재는 암석기재적 특징과 현미경하에서의 특징에 의해 범곡리화산암류 중 결정 응회암이 가장 유사한 암석으로 판단할 수 있다. 모드분석 결과에서도 석탑의 부재와 유사한 광물 함량비를 가진다.

### 감은사지 주변 대자율 및 감마스펙트로미터

감은사지서탑의 암석기재적 특징과 유사한 암석들을 대상으로 대자율과 감마스펙트로미터를 측정하였다(Table 4). 감은사지서탑은 7-20 사이의 값을 가지며, 전반적으로 10-12 사이에 집중되어 분포한다. 범곡리

층군의 전체 대자율 값은 10-24로 감은사지서탑과 유사한 값을 가진다. 와읍리응회암은 10-16으로 석탑의 부재와 유사한 대자율 값의 변화를 보이며, 용동리응회암은 14-24로 넓은 범위를 가지고 주로 17에 집중되어 있다. 암석기재적 특징에서 석탑에 사용된 부재와 가장 유사하다고 판단되는 결정 응회암의 경우 10-16으로 석탑 부재와 유사한 대자율을 가지며, 주로 10-12사이의 값을 가진다. 따라서 대자율 값의 변화에서도 범곡리화산암류의 결정 응회암이 대자율 값이 석탑의 부재와 가장 유사한 것으로 나타난다(Fig. 10).

감마스펙트로미터 분석 결과 범곡리층군은 K는 2-4%, eU는 2-5 ppm, eTh에서는 9-18 ppm 사이의 분포를 보이며 12-14 ppm 값에 집중된다. 이러한 결과는 감은사지서탑의 결과와 유사한 값을 가진다. 와읍리응회암은 K는 3-4%에 집중분포하며, eU는 1-3 ppm, eTh는 10-14 ppm을 가진다. 용동리응회암은 K는 3-4%, eU는 3-6 ppm 그리고 eTh는 11-16 ppm을 가진다. 범곡리화산암류의 결정 응회암의 경우 K는 2-3에 집중분포하며, eU는 2-5 ppm 그리고 eTh는 9-14 ppm을 가진다.



**Fig. 10. Histograms of magnetic susceptibility and  $\gamma$ -ray spectrometer data for the west stone pagoda and country rocks. Measured values of magnetic susceptibility (A), K% (B), eU ppm (C), eTh ppm (D).**

따라서 감마스펙트로미터 측정결과에서도 범곡리화산암류의 결정 응회암이 석탑 부재와 가장 유사한 것으로 나타난다(Fig. 10).

### 석재 공급지에 관한 논의

감은사지서탑의 부재와 가장 유사하다고 생각되는 암석을 찾기 위해 범곡리층군에 속하는 와읍리응회암, 용동리응회암 그리고 범곡리화산암류의 결정 응회암에 대하여 암석기재적인특징을 조사하였고, 또한 대자울과 감마스펙트로미터 값을 측정하였다.

범곡리화산암류의 결정 응회암은 회백색 혹은 담홍색의 암색과 육각형의 흑운모 광물편이 잘 나타나므로 육안상으로도 석탑 부재와 매우 유사함을 발견할 수 있었다. 와읍리응회암은 감은사지서탑에 사용된 석재와 구성광물은 유사하지만 흑색 이암편을 함유하고, 광물편들이 세립질로 차이를 보이므로 다른 암석으로 판단된다. 현미경하에서는 용결구조에 의한 조직적인 차이 또한 나타난다. 용동리응회암은 감은사지서탑에 사용된 석재와 구성광물과 암편은 유사하지만 다른 광물에 비해 사장석 광물편이 크고 함량이 많으며 용결구조가 나타난다는 점에서 차이를 보인다.

Fig. 10은 감은사지서탑의 석재와 주변암석에 대한 대자울 및 감마스펙트로미터 측정값을 비교한 것이다. 전체적으로 석탑 석재 중에서 이상 값을 보이는 상류부의 석재를 제외하면, 대자울값에서는 범곡리화산암류와 와읍리응회암의 대자울 값의 범위가 석탑 석재의 범위와 유사하다. 용동리응회암의 경우 석탑 석재의 대자울 값 범위를 나타내는 시료도 있으나, 7 이하와 20 이상의 값은 석탑 석재의 값과는 차이가 있다. 이는 용동리응회암의 경우 적어도 대자울 값에 있어서는 이질적인 시료가 존재함을 지지하고, 용동리응회암에 포함된 자철석 광물의 함량 차이에 기인한다고 생각된다.

감마스펙트로미터 측정값의 경우 K, eU, eTh의 함량 모두에서 주변지역의 세 종류 암석과 석탑 석재에서의 측정값들이 거의 유사함을 보인다. 이 사실은 감마스펙트로미터의 측정값이 암석의 화학조성에 의존하기 때문에 석탑 석재와 주변의 세 종류 암석에서 유사한 결과가 나타나는 것으로 판단된다.

결국 감은사지 주변지역 암석의 세 가지 중에서 암석기재적인 특징, 대자울 및 감마스펙트로미터 측정값들에서 감은사지서탑의 석재와 가장 유사한 암석은 범곡리화산암류의 결정 응회암으로 파악된다. 따라서 신석 제작용 대체석재로서의 가능성 또한 가장 높은 암석으로 판단 할 수 있다.

와읍리응회암은 비록 대자울 값과 감마스펙트로미터 측정값들에서 유사하지만 암석기재적인 차이가 너무 뚜렷하여 석탑의 석재로 보기 어렵다. 한편, 용동리응회암의 경우 대자울 값과 암석기재적인 특징에서 부분적으로 상이한 시료들이 존재하지만, 일부 시료는 그 차이가 적어 대체석재로서의 가능성은 남아있다.

결론적으로 암석기재적인 특징, 대자울 및 감마스펙트로미터 측정값 등 이번 조사를 통해 얻어진 모든 자료를 분석한 결과 감은사지서탑에 사용된 석재로는 범곡리화산암류의 결정 응회암이 가장 적절한 것으로 판단된다. 하지만 지형적인 변화 등의 원인으로 말미암

아 채석의 흔적은 찾을 수 없으나, 경상북도 경주시 양북면 장항리 노루목 지표에 노출되어 있는 암반에서 공급 되었을 가능성을 가진다.

## 결 론

감은사지서탑에 사용된 부재들의 암석기재적인 특징과 대자율 및 감마스펙트로미터 측정된 결과를 이용하여 석재 공급지에 관한 연구를 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 감은사지서탑은 광물편의 함량이 많은 유리-결정질 응회암으로 육각형의 흑운모 광물편이 잘 나타난다. 대자율 측정결과 10-20을 가지며, 감마스펙트로미터 측정결과 K는 3%, eU는 0-8 ppm 그리고 eTh는 9-18 ppm의 함량을 가진다.

2. 감은사지 주변에 분포하는 유사 암석들에 대하여 석탑 부재에 대한 암석기재적 특징, 대자율 및 감마스펙트로미터를 측정하여 비교 분석한 결과 범곡리층군에 포함된 범곡리화산암류의 결정 응회암이 가장 유사한 암석으로 판명되어졌다.

3. 감은사지서탑에 사용된 석재는 데사이트질 유리-결정질 응회암에 해당하며, 이 석탑의 건축시 범곡리화산암류의 결정 응회암을 사용한 것으로 판단할 수 있다.

따라서 이번 연구를 통하여 감은사지서탑의 보수에 사용될 원석재와 거의 동일한 신석재의 공급지를 확보하였다.

## 사 사

이 연구는 2006년도 국립문화재연구소 보존과학 R&D 사업의 지원으로 수행되었다. 이 논문에 대한 세심한 지적과 건설적인 비평을 해주신 공주대학교 이찬희 교수님과 지질자원연구원 홍세선 박사님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 고정선, 2001, 경상분지내 남산 A-형 화강암과 경주 I-형 화강암류에 대한 광물학적, 지화학적 및 Sr-Nd 동위원소 연구. 부산대학교 박사학위논문, 173p.  
 박양태와 윤형대, 1968, 한국지질도(1:50000), 울산도폭 (Sheet-7020-1) 및 설명서. 국립지질조사소, 20p.  
 손문, 1998, 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달: 구조지질학 및 고자기학적 고찰. 부산대학교 박사

- 학위논문, 233p.  
 손문, 정혜운, 김인수, 2002, 한반도 동남부 연일구조선 남부 일원의 지질과 지질구조. 지질학회지, 38, 175-197.  
 양희재, 2004, 익산 미륵사지석탑의 석재에 대한 보존과학적 특성과 기원암석의 성인적 연구. 공주대학교 석사학위논문, 84p.  
 양희재, 이찬희, 최석원, 이명성, 2006, 익산 미륵사지석탑 구성부재의 암석학적 특징과 석재의 원산지 해석. 지질학회지, 42, 293-306.  
 윤선, 1988, 한국 어일분지의 제3기 층서. 한국과학재단 연구 보고서, 25.  
 이미정, 이종익, 이민성, 1995, 경주지역의 A-형 일칼리 화강암에 대한 광물학 및 주성분원소 지구화학. 지질학회지, 31, 583-607.  
 이상현, 1996, 감은사지삼층석탑(동탑)과 나원리오층석탑의 암석과 풍화현상의 특징에 대한 연구. 보존과학회지, 20, 155-173.  
 이준동, 김종선, 이상진, 황병훈, 김인수, 김진섭, 백인성, 2000, 경주-감포 일대 화강암체의 암석학적 연구. 암석학회지, 9, 70-93.  
 이준동, 황병훈, 1999, 경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 20, 80-95.  
 이찬희, 이명성, 서만철, 최석원, 2003, 불국사 다보탑의 암석학적 특징과 보존과학적 진단. 지질학회지, 39, 319-335.  
 이찬희, 이명성, 서만철, 최석원, 김만갑, 2004, 감은사지 서탑의 풍화훼손도 진단 및 석재의 산지추정, 자원환경지질, 37, 567-583.  
 조기만, 2004, 화강암과 석조문화재에 관한 지형·지질학적 연구: 경주, 익산 지역을 사례로. 경상대학교 박사학위논문, 164.  
 조기만, 좌용주, 2005, 석조문화재의 석재공급지에 관한 연구: 익산 지역에 대한 지형학적 및 암석학적 접근. 암석학회지, 14, 24-37.  
 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, 2000, 경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여, 지질학회지, 36, 335-340.  
 최위찬, 황재하, 윤옥, 김동학, 1988, 한국지질도(1:25,000) 어일도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 42p.  
 황병훈, 2004, 경상분지 남부지역의 화강암질암에 대한 암석학, 동위원소 및 성인. 부산대학교 박사 학위논문, 306p.  
 Ward, S.H., 1981, Gamma-ray spectrometry in geological mapping and uranium exploration. In Skinner, B. J. (ed.), Econ. Geol. Seventy-Fifth Anniversary Volume, 1905-1980.  
 Yun, H., Yi, S., and Byun, H., 1997, Tertiary system of Korea. Paleont. Soc. Korea Special Publication, 3, 1-30.

(2006년 7월 24일 접수; 2006년 8월 17일 채택)