

석조문화재의 석재공급지에 관한 연구 -익산 지역에 대한 지형학적 및 암석학적 접근-

조기만 · 좌용주*

경상대학교 지구환경과학과

Study on the Source Area of the Stones from Stone-cultural Properties -Geomorphological and Petrological Approach for the Iksan Area-

Ki-Man Cho and Yong-Joo Jwa*

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

요 약: 본 연구에서는 익산의 미륵산 일대의 화강암 지형경관에 대한 지형학적 및 지질학적 특성을 파악하고, 더불어 미륵사지 서탑에 사용된 석재의 공급지를 추정하였다. 절리는 익산 지역에서 가장 뚜렷한 지형학적 및 지질학적 구조이며, J1 절리의 방향은 N71°E~EW이고 J2 절리의 방향은 N20°W~N20°E의 범위를 나타낸다. 절리의 형태를 세분할 때 연구지역에서는 cross형의 절리가 우세하며 또한 linear형의 수직절리도 관찰된다. 지형적 특징으로 토어와 핵석도 관찰되는데, 토어를 이루는 핵석들은 2~3 m의 길이에 2~3 m 또는 5 m 이상의 높이를 가진다. 그들의 경도는 주로 hammer bounce에 속한다. 미륵산 화강암에서 나타나는 토어는 tower형과 castle형이 우세하다. 한편 타포니와 나마 등과 같은 지형적 특징도 나타난다. 미륵사지 서탑의 석재와 인근 미륵산 화강암의 암석기재적 및 지구화학적 특징들을 비교할 때, 이 두 암석들은 매우 유사함이 지적되어 미륵산이 석재의 공급지일 가능성이 제기된다. 미륵산에서는 과거 채석의 흔적이 다수 발견되기도 한다.

핵심어: 미륵사지 서탑, 석재의 공급지, 화강암 지형경관

Abstract: In this study we examined the geomorphological and geological characteristics of the granite landforms in the Iksan area. Moreover we investigated the source areas of stones which are used to build the Mireuksaji west stone pagoda. Joint is most identifiable geomorphological and geological structure in the Iksan area. Direction of J1 joint appears to be N71°E~EW, and that of J2 joint ranges N20°W~N20°E. Cross-pattern joint is predominant in the study area, and linear-pattern vertical joint is also observed. Tor and corestone are easily found as geomorphological features in the study area. Corestones forming tor are almost 2~3 m across and 2~3 m or over 5 m high. Their hardness is mainly of hammer bounce. Tower-type and castle-type of tor are characteristic in the Mireuksan granites. Other geomorphological features such as tafoni, gnamma are also observed in the study area. Petrographical and geochemical features of the stones used for the Mireuksaji west stone pagoda are compared with those of the granites cropped out nearby, and indicate that the stones from the Mireuksaji west stone pagoda are quite similar to the Mireuksan granites. In the Mireuksan we can easily find lots of old traces for rock cutting.

Key words: Mireuksaji west stone pagoda, source area, granite landforms

서 론

화강암지형은 지질 구조와 화강암의 조성 및 구출 광물 등에 따라 달라지며 그곳에 거주하는 인간생활도

지형의 영향을 받는다. 그러므로 자연현상을 지형학적 관점과 지질학적 관점에서 종합적으로 관찰하고 분석하여 인간생활과의 관련성을 파악하는 것은 지리학과 지질학의 학제간 연구에 있어서 중요하다.

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

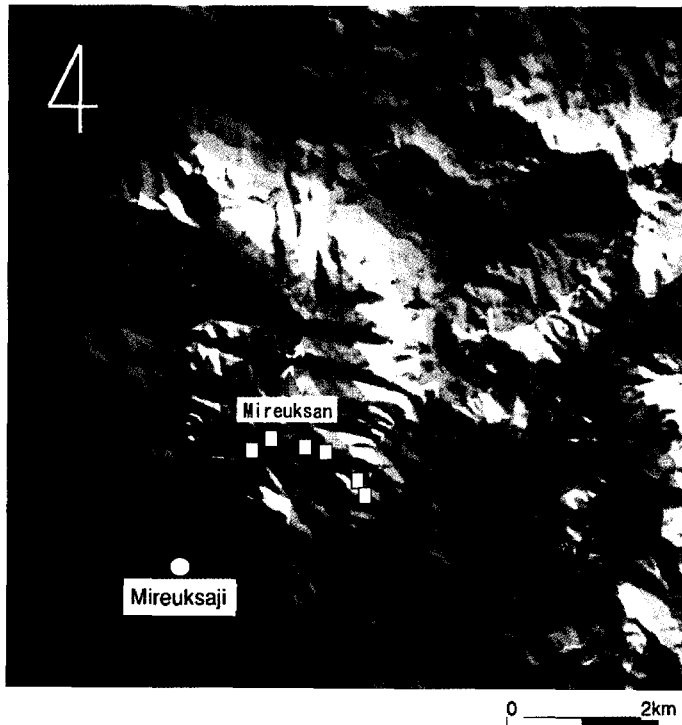


Fig. 1. 3D topographic map around the Mireuksan area. □: site of the stone-cutting trace.

우리나라에서는 예로부터 궁궐, 주택, 사찰 등의 건축 재료와 종교적 상징물인 석탑과 불상을 만드는데 석질이 다른 암석에 비해서 우수한 화강암을 주로 사용하여 왔다. 경우에 따라서는 화강암을 멀리까지 운반하여 석탑과 사찰을 건립하기도 하였다. 최근에는 훼손된 석조 문화재의 보수와 복원에 대한 관심이 높아지고 있어 남아 있는 원래의 석재와 동일한 암석을 찾아야 하는 필요성이 제기되었다. 따라서 석조문화재에 사용된 석재의 공급지에 대한 지형학적·지질학적 연구와 종합적인 자료 축적이 있어야 한다고 사료된다. 우리나라 석조문화재의 석재에 대한 암석기재적 보고와 그 석재 공급지에 관한 연구는 최근 그 수가 늘어나고 있는 있지만 아직 부족한 실정이다(예: 이상현, 1996; 좌용주 외, 2000, 2002; 이찬희 외, 2004)

본 논문에서는 화강암 석조문화재가 비교적 풍부하게 산재하는 익산 지역을 대상으로 다음의 사항들을 규명하였다. 첫째 화강암 분포지역에 나타나는 절리와 토어(tor), 핵석(corestone)을 지질구조적 관점에서 파악하고, 둘째 화강암 분포지역에서 볼 수 있는 미지형(微地形)인 타포니(tafoni), 나마(gnamma) 등의 풍화 지형을 지형지(地形誌, morphography)적인 관점에서 고찰하

였으며, 셋째 석조 문화재를 이루는 화강암과 이들 석조문화재에 공급되었을 것으로 추정되는 주변 화강암의 암석학적 특성을 현미경분석, 모드분석, 화학분석 및 비파괴검사를 통하여 석재의 종류와 그 공급지를 파악하였다.

지역개관과 일반지질

본 지역은 충청남도과 전라북도의 경계지역으로, 행정구역상으로는 전라북도 금마면과 낭산면에 접해 있다. 미륵산의 정상은 430.2m로 낮으며, 주변에는 충적층이 발달하여 대부분 논으로 이용되고 있다. 정상 부근에는 과거에 산성을 축조한 흔적도 남아 있으며, 최근에는 황등석 등 화강암 채석장이 주변에 많이 분포하고 있다. 수치지도를 이용한 3차원 입체지도에서 동서방향의 선구조를 확인할 수 있다(Fig. 1). 이러한 선구조의 영향으로 절리와 토어, 타포니, 나마 등의 화강암 지형이 많이 나타난다.

미륵산의 남쪽 사면 아래에는 백제시대에 세워진 미륵사지(사적 제 150호)와 미륵사지 서탑(국보 제 11호)이 남아 있다. 이곳은 주변이 논과 밭으로 되어 있고

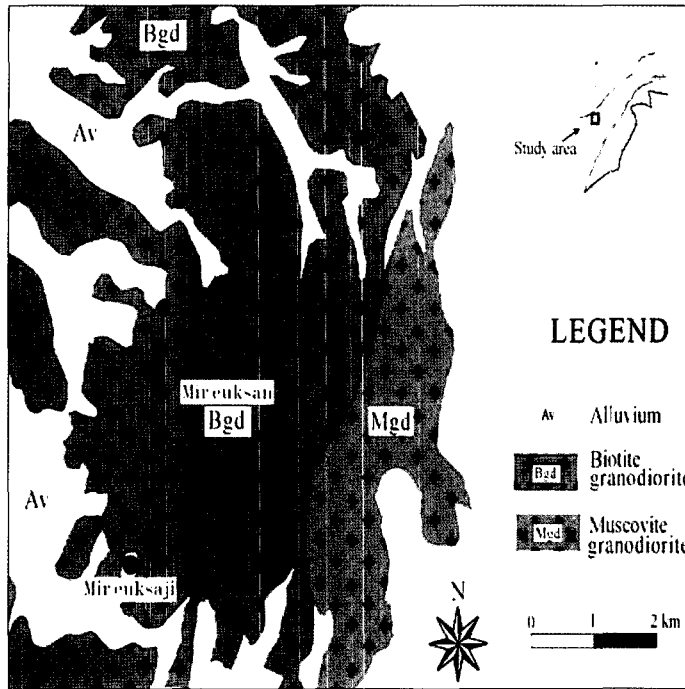


Fig. 2. Geologic map of the study area.

배수가 잘 되지 않아서 풍화가 심하며, 과거에는 어린이 놀이터 등으로 이용될 만큼 인위적인 훼손도 심한 곳이다. 현재는 대규모 복원 공사를 진행 하고 있으며 역사적 가치가 큰 지역이다. 익산 일대에 분포하는 화강암은 중생대 화성활동의 결과에 의해 생성된 백악기 화강암으로 보고되었다(정창희와 고석진, 1963). 그러나, 이후 연구 결과들은 주라기 화강암으로 수정 발표되었다(홍만섭과 김영원, 1969). 전체적으로는 흑운모 화강섬록암(biotite granodiorite)이 우세하게 나타나며 백운모 화강섬록암(muscovite granodiorite)은 미륵산의 동부지역에 분포하고 있다(Fig. 2). 화강암의 노두는 쉽게 관찰되고 주로 미륵산의 중단부에 암반이 동서 방향으로 길게 나타난다. 화강암체 내에 흔히 관찰되는 페그마타이트 맥은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모 등으로 이루어져 있다.

미륵산 주변지역의 화강암 지형 경관

지하에 있던 화강암이 지표에 노출되면 다양한 형태의 지형을 형성한다. 이러한 지형형성에 영향을 주는 인자로는 조적, 지각변동, 기후, 시간 등이 있다. 화강암은 지하에서는 변화가 적지만, 지표로 상승하는 과

정에서 구조운동을 받으면 상황에 따라 균열이나 절리가 잘 발달한다. 지표에서의 2차 균열의 차이가 지표에서 침식의 차이를 가져와 결국 지형을 변화시킨다. 화강암체가 상승하는 도중에 일시적으로 용기가 정제되고 침식이 진행되면 준평원이 발달한다. 그 후 지각이 융기하여 지하 깊은 곳까지 심층풍화가 진행되고 침식을 받으면 화강암 산지 특유의 풍화 지형이 발달하게 된다.

우리나라는 오랜 동안의 침식으로 지하 깊은 곳에 있던 화강암이 돛 형태나 석산의 형태로 지표에 드러나서 다양한 형태의 암석구릉을 만들었다. 지표에 드러난 화강암은 절리나 토어 지형을 형성하여 채석을 유리하게 하였다. 이와 같이 화강암 산지는 석조 건물과 석불을 만드는데 필요한 석재의 공급지 구실을 하기도 하면서 우리 문화의 일부를 구성하여 왔다.

절리

지표상의 암석구조 중에서 가장 흔하게 눈에 띄는 것이 절리이다. 일반적으로 암석은 탄성 한계를 넘는 힘을 받으면 절리와 단층 같은 단열이 형성되는데, 퇴적암과 화성암에 발달한 절리는 지각운동에 의한 것이 대부분이지만, 특히 화강암의 절리는 냉각·수축으로

Table 1. Dip and Strike of joints in the Mireuksan area.

| Orthogonal joint | | | | | | | |
|------------------|---------|-------------------|--------|---------|---------|-------------------|--------|
| Outcrop | Dip (°) | Dip direction (°) | Strike | Outcrop | Dip (°) | Dip direction (°) | Strike |
| MJ-01 | 89 | 358 | N88°E | MJ-09 | 87 | 162 | N72°E |
| | 82 | 137 | N47°E | MJ-10 | 87 | 7 | N83°W |
| MJ-02 | 82 | 281 | N11°E | MJ-11 | 77 | 274 | N4°E |
| | 85 | 172 | N82°E | MJ-12 | 78 | 173 | N83°E |
| MJ-03 | 85 | 281 | N11°E | MJ-13 | 68 | 81 | N9°W |
| | 85 | 167 | N77°E | MJ-14 | 66 | 47 | N43°W |
| MJ-04 | 90 | 177 | N87°E | MJ-15 | 80 | 85 | N5°W |
| | 85 | 259 | N11°W | MJ-16 | 80 | 273 | N3°E |
| MJ-05 | 88 | 225 | N15°W | MJ-17 | 80 | 192 | N77°W |
| | 84 | 357 | N87°E | MJ-18 | 82 | 91 | N1°E |
| MJ-06 | 86 | 177 | N87°E | | 90 | 171 | N81°E |
| | 75 | 259 | N11°W | | 76 | 81 | N9°W |
| MJ-07 | 83 | 177 | N87°E | | 80 | 153 | N63°E |
| | 84 | 259 | N11°W | | 81 | 184 | N86°W |
| MJ-08 | 80 | 5 | N85°W | | 80 | 211 | N59°W |
| | 80 | 283 | N13°E | | | | |

부터 형성되기도 한다. 절리는 모든 암석에서 나타나기도 하나 동질적인 암석 조직에서 잘 발달하며 특히 입자로 구성된 화강암, 섬장암, 현무암, 점판암 등에서 잘 발달한다.

화강암에서의 단열은 단층과 절리에 의해 나타나는데 어느 것이 더 큰 원인인지는 구분하기가 힘들다. 단열은 두 가지 유형으로 발달하는데, 하나는 수직절리(orthogonal joint sets)이고 다른 하나는 판상절리(arcuate joint sets)이다. 수직절리의 방향은 보통 주방향(principal direction)과 부방향(minor direction)으로 구분된다. 판상절리는 지표면에 대해 편평한 구조(flaggy structures)로 수평적이거나 수평에 가까운 방향성을 보이는 절리를 말한다.

과거의 채석은 현재의 채석 방법과는 달라 절리가 발달되어 있는 곳이 유리하였을 것으로 판단되어 그 형태와 방향성을 조사하였다. Table 1은 미륵산의 절리를 나타낸 것이다. 절리의 방향성을 분석에서 가장 뚜렷한 20~30°의 범위를 주방향(principal direction: J1), 그 다음의 20~30°의 범위를 부방향(minor direction: J2)이라 하였다. 이를 분석해 보면, N81°E~EW가 가장 뚜렷한 방향성을 보이고 있다. 그 다음으로는 N~N10°E, N11°E~N20°E, N~N10°W, N11°W~N20°W 등의 방향이 확인되며 나머지 방향성은 미약하다. 따라서 N71°E~E 방향의 20° 범위가 J1이 되고, N21°W~N20°E의 40° 범위가 J2가 된다. 이는 미륵산이 과거에 EW방향으로 구조적인 운동을 받았으며 절리 또한 그 방향으로 발달

한 것을 의미한다. Fig. 3은 미륵산 수직절리의 방향성을 나타낸 장미도표이다.

절리는 유형에 따라 linear형, cross형, T 또는 Y형, cross check형, curvilinear형, radial형, irregular형으로 분류할 수 있다(김주환, 1982; Fig. 4). Table 2는 미륵산 절리를 유형별로 분류한 것이다. 이를 분석해 보면, cross형이 가장 많고 그 다음으로는 linear(vertical)형, cross check형의 순이다. curvilinear형은 한 곳에서 확인되었지만, T 또는 Y형, radial형, irregular형은 나타나지 않았다. 절리(joint)의 유형 중에서 석재의 채취와 관련해서는 비교적 잘게 부서지는 irregular형이나 cross check형 보다는 장방향성을 갖추고 있는 linear형이나 cross형이 발달한 곳이 유리하였을 것으로 판단된다. Fig. 5는 미륵산의 대표적인 절리를 나타낸 것이다.

토어(Tor)

석재 채취와 이용을 위해서는 그 암석의 크기와 형태(shape), 강도(hardness), 원마도(roundness) 등을 고려할 수 있다. 토어를 구성하는 핵석의 크기측정은 석재로 사용되었을 경우 그 이동과 관련성이 있다. 지나치게 크면 이동에 불리하고 작으면 석재로서의 가치가 떨어지기 때문에 석조건축물에 사용된 석재보다는 크면서 이동하기에 유리한 것을 채취하였을 것이다. Table 3은 미륵산의 토어를 조사하여 정리한 것이다. 미륵산 토어의 장축 방향을 보면, N80°W~EW의 방향이 가장 우세한 방향성을 보이고, 그 다음으로 N10°W~NS가 두

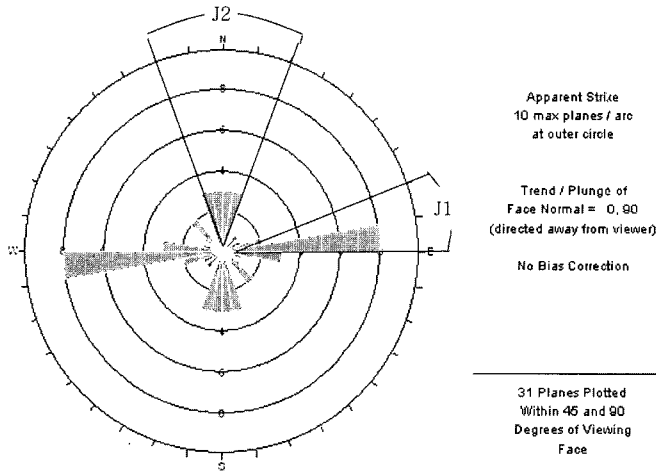


Fig. 3. Rose diagram of joints in the Mireuksan area.

| Classification | | Pattern |
|----------------|------------|-----------|
| Linear | horizontal | ≡ ≡ ≡ ≡ ≡ |
| | vertical | |
| Cross | | X X X X X |
| T or Y | | ⋈ ⋈ ⋈ ⋈ ⋈ |
| Cross check | | ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ |
| Cunipinar | | ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ |
| Radial | | ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ |
| Irregular | | ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ |

Fig. 4. Classification of joint patterns (after Kim, 1982).

의 방향인 J1, J2의 방향과도 대체로 일치하고 있어, 미륵산의 토어 방향은 이 지역의 절리의 방향과 대체로 일치한다고 볼 수 있다. 장경(長徑)을 보면 2~3m가 가장 많고, 2m 이하와 5m 이상도 분포하고 있다. 단경(短徑)은 2m 이하가 가장 많이 분포하고 있다. 높이는 2~3m와 5m 이상이 많고, 2m 이하도 부분적으로 분포한다. 5m 이상이 많이 분포하는 것은 절리 유형이 linear형 중에서도 수직형으로 발달하였기 때문으로 판단된다. 미륵산에서도 토어의 형성에 절리(joint) 유형이 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다. 강도는 hammer bounce가 가장 많은 분포를 보이고 있고, hammer break는 한 개만 분포하고 hand break는 분포하지 않았다. 원마도는 semi-rounded형이 가장 많고, rounded형도 분포하지만 angular형은 분포하지 않았다. 형태는 tower형이 가장 많고, castle형, table hill형도 분포하였다. Fig. 6a는 tower형의 토어이고, Fig. 6b는 castle형의 토어이다.

번째 우세한 방향성을 보인다. 이들 방향은 주된 절리

Table 2. Frequency of strike direction of joints in the Mireuksan area.

| Strike | Frequency | % | Strike | Frequency | % |
|-------------|-----------|-------|-------------|-----------|-------|
| N~N10°E | 3 | 9.68 | N~N10°W | 3 | 9.68 |
| N11°E~N20°E | 3 | 9.68 | N11°W~N20°W | 3 | 9.68 |
| N21°E~N30°E | - | - | N21°W~N30°W | - | - |
| N31°E~N40°E | - | - | N31°W~N40°W | - | - |
| N41°E~N50°E | 1 | 3.23 | N41°W~N50°W | 2 | 6.45 |
| N51°E~N60°E | - | - | N51°W~N60°W | 1 | 3.23 |
| N61°E~N70°E | 1 | 3.23 | N61°W~N70°W | - | - |
| N71°E~N80°E | 2 | 6.45 | N71°W~N80°W | 1 | 3.23 |
| N81°E~E | 8 | 25.80 | N81°W~W | 3 | 9.68 |
| Total | 18 | 58.07 | Total | 13 | 41.95 |



Fig. 5. Joint pattern of the granites in the Mireuksan area. (a) linear pattern, (b) cross pattern.



Fig. 6. (a) Tower-type tor and (b) castle-type tor in the Mireuksan area.

타포니(Tafoni)

타포니와 나마는 화강암 풍화 현상의 하나이다. 이들의 풍화는 화강암으로 된 석조 문화재가 야외에 노출되었을 경우에 일어 날 수 있는 풍화 양상을 유추하는데 의미가 있다. 타포니는 형태적으로 보면 암반이나 암괴 표면에 수십 cm에서 수 m에 달하는 타원형 내지 원형으로 뚫린 구멍들을 말한다. 이 구멍들은 처음에는 작지만 점차 성장해 가면서 구멍 안쪽으로 확대하는 성질을 갖고 있다(Fig. 7a). 타포니는 사암이나 석회암 등에도 만들어지지만 주로 화강암류와 같은 결정질 암석에 많이 생기는 화강암 미지형이다(권동희, 2002). 타포니의 성인에 대해서는 다양한 견해가 있지만, 대체로 입상붕괴(granular disintergration)와 flaking 작용에 의한 것으로 보고 있으며, 이를 일으키는 인자는 기후적인 측면과 염풍화(salt weathering)와 관련이 있다.

타포니는 발달한 위치와 형태를 기준으로 분류할 수 있다. 즉, 지표면이나 기반암의 상부에 발달하는 것을 지표형(basal tafoni), 암괴의 벽면에 발달하는 것을 암벽형(side-wall tafoni), 암벽과 지표면이나 기반암 상부에 전체적으로 발달하는 것을 복합형(complex tafoni)으로 분류할 수 있다. 이것을 다시 형태를 기준으로 하여 발달 단계적인 측면에서 절리 유관형(joint-relating pattern), 독립형(isolated pattern), 결합형(combination pattern), 분리형(seperation pattern), 복합형(complex pattern), 소와형(小窩型, cell-like hole pattern) 등으로 분류할 수 있으며 이런 기준과 관계없이 암석의 천정에 발달하는 것은 천정형(base-elimination pattern)이다(김혜자, 1982).

연구지역에서는 타포니가 전형적으로 다양하게 나타나지는 않지만 부분적으로 분포하고 있다. Fig. 7b와 7c는 미륵산에서 발견되는 타포니의 유형들로 7b는 절리 유관형이며 7c는 독립형이다. 미륵산은 해안으로부

Table 3. Classification of joint patterns in the Mireuksan area.

| Pattern | Outcrop | Linear | Cross | T or Y | Cross check | Curviplanar | Radial | Irregular |
|---------|---------|--------|-------|--------|-------------|-------------|--------|-----------|
| MJ-01 | | | ○ | | | | | |
| MJ-02 | | | ○ | | | | | |
| MJ-03 | | | ○ | | | | | |
| MJ-04 | | | ○ | | | | | |
| MJ-05 | | | ○ | | | | | |
| MJ-06 | | ○ | | | | | | |
| MJ-07 | | ○ | | | | | | |
| MJ-08 | | | ○ | | | | | |
| MJ-09 | | | ○ | | | | | |
| MJ-10 | | ○ | | | | | | |
| MJ-11 | | | | | ○ | | | |
| MJ-12 | | | ○ | | | | | |
| MJ-13 | | | | | | ○ | | |
| MJ-14 | | | ○ | | | | | |
| MJ-15 | | | | | ○ | | | |
| MJ-16 | | | ○ | | | | | |
| MJ-17 | | | ○ | | | | | |
| MJ-18 | | | ○ | | | | | |
| Total | | 3 | 12 | - | 2 | 1 | - | - |

터의 거리가 가까워 염풍화의 가능성이 많은 것으로 판단되며, 위치는 겨울철에 북서풍의 영향을 받는 서쪽사면의 능선에서 주로 관찰되었다.

나마(Gnamma)

나마는 풍화혈(weathering pit)의 일종인데, 타포니와 같이 암반이나 암괴의 측면에서 하방에서 상방으로 향하여 형성되는 것이 아니라 암반상의 수평면에 형성된다. 또한 타포니의 경우에는 그 형성에 습기를 포함한 기류나 미풍을 필요로 하는데 반해, 나마는 동결·융해나 습윤·건조 등이 반복되는 환경을 필요로 한다. 형성 초기에는 암반 표면의 작은 구멍에 고인 물의 동결·융해 작용의 반복에 의해, 구멍의 바닥을 중심으로 하는 암석표면의 팽창·수축에 의한 광물조각의 분리 분해가 일어난다. 반건조 지역의 나마는 이끼류 즉, 선태류(蘚苔類) 지의류(地衣類)나 초본 등의 식물의 생장과 고사(枯死) 그리고 이들이 바람을 매개체로 제거되는 과정을 반복함으로써 나마가 형성된다.

나마의 형태는 pan형과 pit형으로 분류한다(Twidale, 1982). pan형은 깊이보다 넓이가 큰 것이고, pit형은 넓이에 비해서 깊이가 큰 것이다(Fig. 8a). 대개 등글지만 동결·융해에 의해 만들어진 경우가 더욱 깊고 바닥의 깊이도 일정하며 특히 가장 자리로부터 급하게 파이는 형태가 된다.

Fig. 8b와 8c는 미륵산의 정상부 고도 400 m 지점에 있는 토어의 상부에 발달한 pan형과 pit형의 나마이다. 크기는 비교적 작지만 군집을 이루며 발달한 것이 특징이다. 대부분 바닥에 rock meal이 있는 것으로 봐서 현재에도 나마가 성장하고 있는 것으로 판단된다.

미륵사지 서탑

미륵사지 서탑은 백제가 중국의 목탑양식을 석재로 충실히 옮긴 것으로 정림사지 5층석탑과 함께 우리나라 석탑의 시원양식(始原樣式)으로 확립되었다. 이 탑은 전북 익산시 금마면 가양리에 있는 석탑으로, 조선시대 지리지인 신증동국여지승람(新增東國輿地勝覽)에는 '석탑의 높이는 수장(數丈)에 이르고 석탑 중의 최고(最古)'라고 하였고 삼국유사(三國遺事)에는 미륵사가 백제 무왕(재위 600~641년) 때에 지어졌다고 되어 있어 이 탑도 같은 시기인 7세기 초에 지어진 것으로 판단된다. 발굴조사 결과 삼탑삼원(三塔三院)의 가람배치와 더불어 본래 9층 석탑이었음이 확인되어 미륵사지 동탑(東塔)은 1993년에 9층으로 복원되었다. 석재로 목탑양식을 완벽히 재현하고 있는 이 탑에는 백제인들의 예술적 감각이 고스란히 녹아 있으며 또한, 수학적·건축학적 측면에서 그들의 우수한 역량을 엿볼 수 있다(박경식, 2001). 우리나라 석탑의 시원양식으로 눈

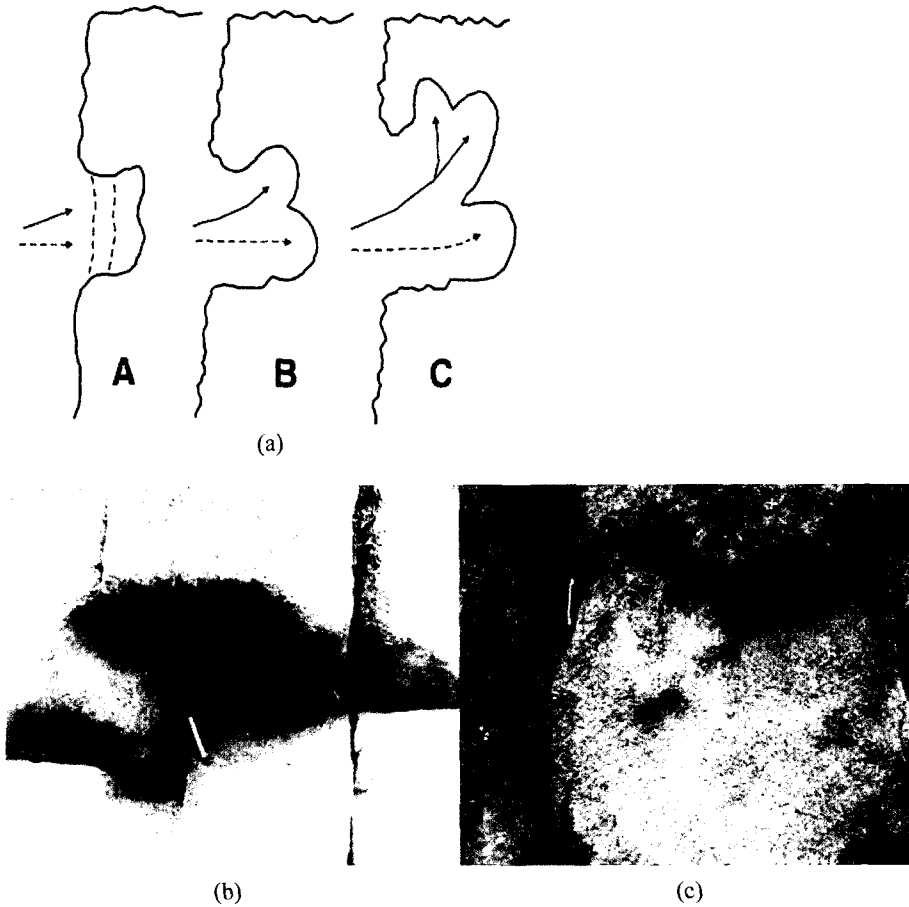


Fig. 7. (a) Schematic development of a tafoni, (b) joint-relating pattern and (c) isolated pattern of tafoni in the Mireuksan area.

이는 14.2m이며 국보 제 11호로 지정되어 있다. 1998년 문화재위원회에서 ‘전면 해체 수리 결정’을 한 이후 2001년 10월부터 해체·복원을 위한 공사가 진행 중이며 2007년 말까지 복원을 완성할 계획으로 있다.

석조문화재에 사용된 석재의 공급지 파악

미륵산은 화강암질 암석으로 이루어진 지형으로 이 지역 주변에 건축된 미륵사와 동탑과 서탑의 석재 공급지 역할을 한 것으로 추정된다. 여기에서는 미륵사와 동탑과 서탑의 건립에 사용된 석재가 실제로 이들 화강암 지형에서 공급되었는지를 확인하고자 한다.

주변 산지 암석의 특징

미륵산 주변 지역에서 13개의 시료를 채취, 박편을 제작하여 편광 현미경 관찰을 하였다. 석영은 타형 결

정으로 거의 전부가 파동소광(波動消光)을 나타내며 사장석을 포함하고 미세한 열극이 다수 발달하여 있다. 사장석은 반정과 석기로 또는 등립질암에서는 주성분 광물로서 자형(自形) 또는 반자형(半自形)의 입상조직을 나타내며 알바이트 쌍정과 칼스바드-알바이트 쌍정이 우세하고 드물게 페리클린 쌍정이 보인다. 누대조직을 띠는 입자도 많으며 미사장석과의 접촉부에 생긴 밀메카이트질은 미사장석 쪽으로 전진하는 양상으로 발달한다. 칼리장석으로는 미사장석만이 감별되며 격자상 쌍정을 나타내는 결정과 퍼사이트로 구분된다. 미사장석은 반정으로도 나타나는데 이러한 경우에는 다수의 사장석과 흑운모를 포유물로 내포한다. 사장석과의 접촉부에서는 밀메카이트의 발달이 뚜렷하다. 흑운모는 대개가 타형 내지는 반자형의 결정으로서 다색성이 현저하다. 이는 자철석과 연정(連晶) 또는 포유물로서 공생하며 저어콘과 인회석을 포유한다. 일부는 각

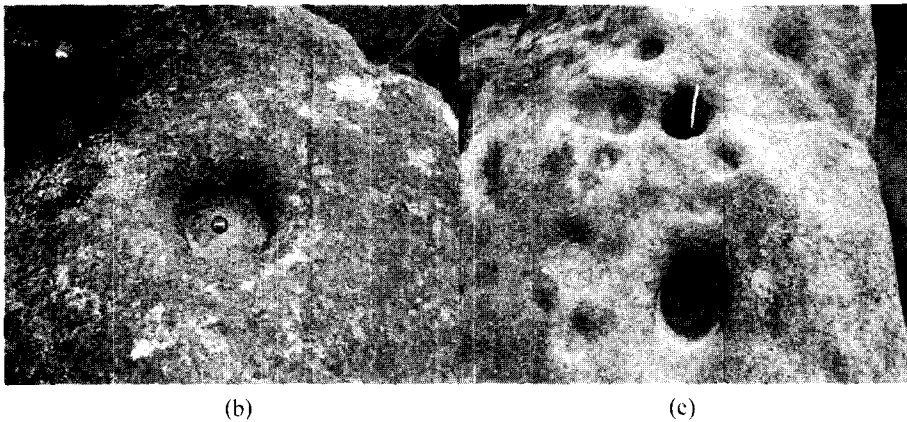
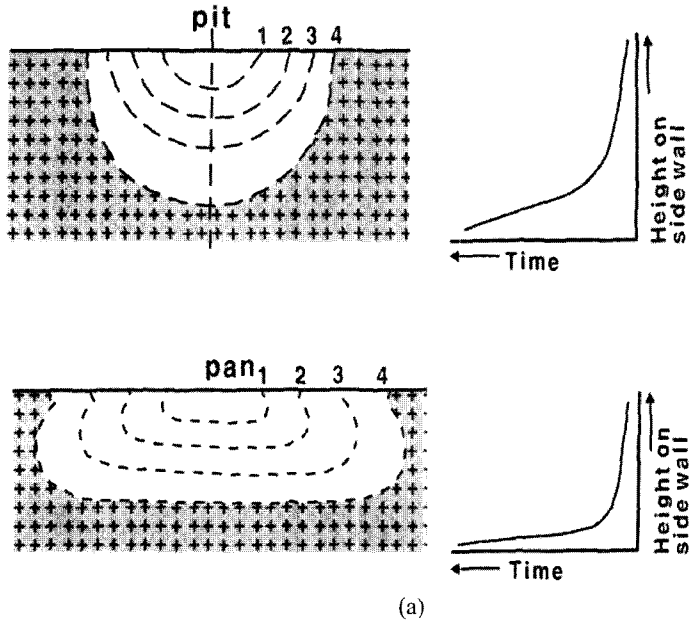


Fig. 8. (a) Schematic development of pit- and pan-type gnamma, (b) pan-type gnamma and (c) pit-type gnamma in the Mireuksan area.

섬석이 변질된 것으로 보이며 이 경우 이들은 서로 점이적으로 변한다. 갈럼석은 자형의 세립으로 누대조직을 띠며 특징적인 다색성을 나타낸다. 스펀도 자형의 세립으로서 쌍정을 나타내며 미약한 다색성을 보인다 (Fig. 9). Fig. 10은 미룩산에서 채취한 시료와 미룩사지 서탑에서 나온 부재에 대한 모드 분석 결과이다. 미룩산과 미룩사지 서탑 부재 모두 화강섬록암-몬조화강암의 조성을 나타내므로 미룩산과 미룩사지 서탑에 사용된 석재는 관련성이 큰 것으로 판단된다.

미룩산에 분포하는 흑운모화강섬록암의 화학적 특징을 파악하기 위하여 미룩산 주변지역에서 시료를 채취

하여 화학분석을 실시하였다. 시료는 미룩산의 남사면과 서사면, 동사면, 그리고 과거 채석장과 관계있는 지명이라고 판단되는 ‘독징이’(‘독’은 현지 방언으로 ‘돌’을 의미함)의 뒷산, 현재의 채석장 등 6곳에서 채취하였다. 이것은 부경대학교에 의뢰하여 분석을 하였으며, Table 4는 그 결과이다. 주성분원소 분석결과 SiO_2 함량은 최소 70.8wt.%에서 최고 73.3wt.%로 나타났고, Al_2O_3 은 최소 14.4wt.%에서 최고 15.0wt.%로 나타났다. Fe_2O_3 은 최소 1.2wt.%에서 최대 1.94wt.%의 분포를 나타내고 있다. 미룩사지 서탑 부재의 화학분석결과(양희제, 2004)와도 차이가 별로 없었다.

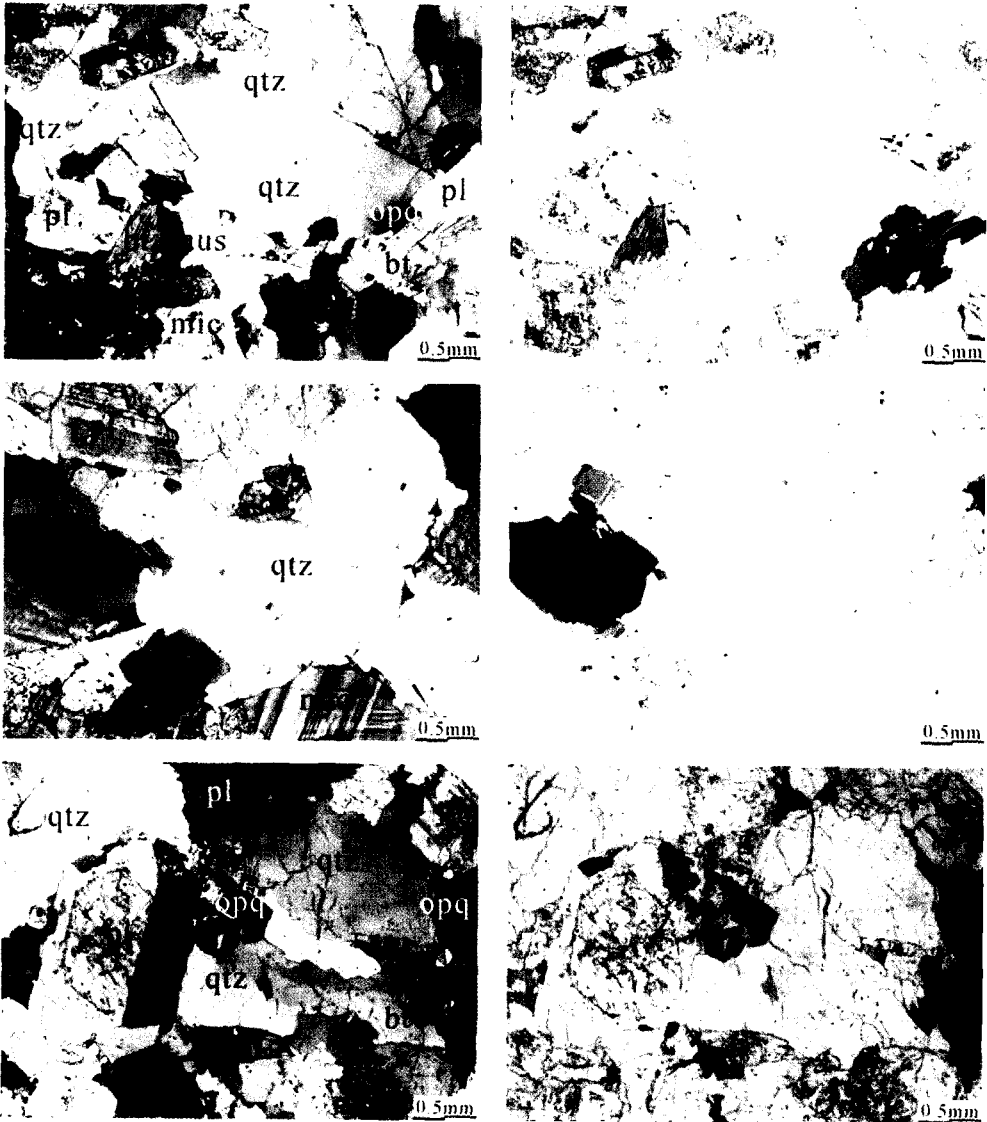


Fig. 9. Photomicrographs of the Mireuksan granodiorite. Crossed nicols (left) X40 and opened nicols (right) X40. (qtz: quartz, pl: plagioclase, per: perthite, mic: microcline, mus: muscovite, bt: biotite, amp: amphibole, opq: opaque mineral).

육안관찰의 비교

미륵산 중턱의 과거 채석장으로 보이는 절벽에서는 사장석, 석영, 흑운모들이 관찰되고 흑운모와 석영의 결정이 큰 것이 특징이다. Fig. 11a와 11b는 미륵산 노두를 근접 촬영한 것이다. 석영 등의 결정이 큰 입자가 관찰되고 페그마타이트의 거정들이 관찰되기도 한다. Fig. 11c와 11d는 미륵사지 서탑의 부재를 근접 촬영한 것이다. 미륵사지 서탑은 전체적으로 흑운모화강암의 특징을 보이며 부재가 여러 종류로 섞여 있는 특

징을 보이며 한 부재 내에서도 불균질하게 보인다. 페그마타이트의 거정들도 관찰된다. 미륵사지 서탑 부재에 대한 육안 관찰 결과 배후산지인 미륵산의 흑운모 화강암과 서로 유사한 것으로 판단되었다.

감마 스펙트로미터(gamma-ray spectrometer)

특징

단채널 분석기 감마스펙트로미터는 자연적으로 발생하는 방사성 핵종을 인지하고 정량화시킨다. 예를 들

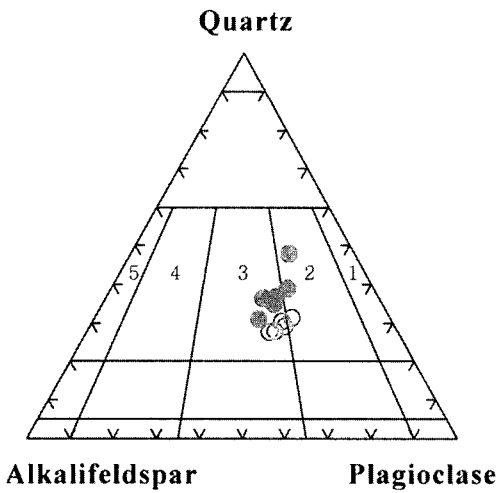


Fig. 10. Q-A-P diagram of the stones from the Mireuksaji west stone pagoda (by Yang, 2004) and the Mireuksan granodiorites Symbols and numbers: ○, Mireuksaji west stone pagoda; ●, Mireuksan granodiorites; 1, tonalite; 2, granodiorite; 3, monzo-granite; 4, syenogranite; 5, alkali-feldspar granite.

어 ^{238}U 과 ^{232}Th 은 각각의 특징적인 딸핵종 ^{214}Bi 와 ^{208}Tl 을 기록함으로써 측정된다. 붕괴 계열의 다른 종에 대해서도 동일하게 이용된다. 특히, Rn측정은 종종 U과 Th의 존재에 대한 지시자로 사용된다.

사용된 기기 GRM-260은 NaI(Tl) 단채널 분석기 시

스템이다. 이 시스템에서 4개 창이 선택적으로 기록하는 것은 (1) 특정 한계치(threshold) 이상의 전체 카운트 수 (2) K 창에 대한 카운트 수 (3) U 창에 대한 카운트 수 (4) Th 창에 대한 카운트 수이다. 이 방법은 원칙적으로 현장에서 암석과 토양 내의 K, U, Th의 함량과 전체 감마선 활동을 얻기 위해 사용된다 (Ward, 1981). 하지만, 인정 가능한 데이터를 얻기 위해서는 3가지 기본 조건이 충족되어야 한다. 첫째, 시료가 어느 정도 균질해야 하고, 둘째, 붕괴 계열이 지속적으로 평형이어야 하며, 셋째, 시료 형태가 일정하게 유지되어야 한다.

야외 노동에서의 감마스펙트로미터의 측정은 미륵산에서 석재채취 흔적이 있는 곳과 채석장을 포함하였다. 측정 시간은 1회에 2분씩 5~6회를 측정하여 그 평균값을 사용하였다. 유효한 방사선(감마선)의 총량은 nGy/h로 표시하며 K 함량은 그 단위가 mass percent (%), U와 Th의 등가함량인 eU과 eTh 함량은 그 단위가 ppm이다.

전체 방사선량의 값을 보면, 미륵사지 서탑에서는 가장 낮은 값이 50 nGy/h, 가장 높은 값이 120 nGy/h로 나타나지만 대체로 60~80의 범위가 많이 나타난다. 미륵산에서의 전체 방사선량의 값은 편차가 큰 편으로 최소 10, 최대 90으로 나타난다. 미륵사지와 가까운 지점인 M01~M14지점에서는 미륵사지 서탑과 비슷한 값을 보인다. K 함량은 미륵사지 서탑의 거의 모든 시료

Table 4. General features of tor in the Mireuksan area.

| Outcrop | Long diameter azimuth | Long diameter (m) | Short diameter (m) | Height (m) | Hardness | Roundness | Type | National grid (GPS) |
|---------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------|----------|-----------|------------|-------------------------------|
| MT-01 | EW | 2.4 | 1.8 | 2.5 | ◎ | ○ | Tower | N36° 01' 12" E127° 02' 06" |
| MT-02 | EW | 2.5 | 1.8 | 2.2 | ◎ | △ | Tower | N36° 01' 14" E127° 02' 10" |
| MT-03 | N10°W | 1.5 | 1.1 | 1.5 | ◎ | ○ | Tower | N36° 01' 13" E127° 02' 14" |
| MT-04 | NS | 2.5 | 0.7 | 9.0 | ◎ | □ | Castle | N36° 01' 11" E127° 02' 14" |
| MT-05 | N84°E | 2.5 | 1.5 | 2.3 | ◎ | △ | Castle | N36° 01' 13" E127° 02' 18" |
| MT-06 | N80°W | 1.1 | 0.8 | 1.8 | ◆ | △ | Tower | N36° 01' 14" E127° 02' 20" |
| MT-07 | N70°W | 6.4 | 1.3 | 3.7 | ◎ | △ | Tower | N36° 01' 13" E127° 02' 24" |
| MT-08 | N80°W | 20.0 | 10.0 | 9.0 | ◎ | △ | Table hill | N36° 00' 54" E127° 02' 49" |
| MT-09 | N86°W | 4.5 | 3.5 | 7.5 | ◎ | ○ | Castle | N36° 01' 43" E127° 02' 25" |

* 강도 --- ◎ : hammer bounce ◆ : hammer break
원마도 -- ○ : rounded △ : semi-rounded □ : angular

Table 4. Contents of major oxides (wt.%) of the granitic rocks in the Mireuksan area.

| Sample | MJ-01 | MJ-02 | MJ-03 | MJ-04 | MJ-05 | MJ-06 | Mireuksaji west stone pagoda (Yang, 2004) |
|--------------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|---|
| SiO ₂ | 72.94 | 72.71 | 73.32 | 72.88 | 71.44 | 70.79 | 73.91 |
| Al ₂ O ₃ | 14.41 | 15.02 | 14.92 | 14.22 | 14.77 | 14.96 | 14.38 |
| TiO ₂ | 0.26 | 0.33 | 0.32 | 0.21 | 0.28 | 0.35 | 0.37 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.63 | 1.83 | 1.79 | 1.20 | 1.60 | 1.94 | 1.97 |
| MnO | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | |
| MgO | 0.33 | 0.39 | 0.38 | 0.23 | 0.33 | 0.42 | 0.48 |
| CaO | 1.68 | 1.95 | 1.86 | 1.51 | 1.86 | 2.11 | 2.07 |
| Na ₂ O | 3.72 | 3.83 | 3.67 | 3.54 | 3.67 | 3.81 | 3.41 |
| K ₂ O | 3.81 | 3.91 | 4.14 | 4.18 | 4.10 | 3.73 | 3.81 |
| P ₂ O ₅ | 0.07 | 0.09 | 0.08 | 0.05 | 0.08 | 0.09 | 0.14 |
| LOI | 0.65 | 0.43 | 0.45 | 0.52 | 0.43 | 0.45 | |
| Total (%) | 99.53 | 100.52 | 100.96 | 98.57 | 98.57 | 98.67 | 99.98 |

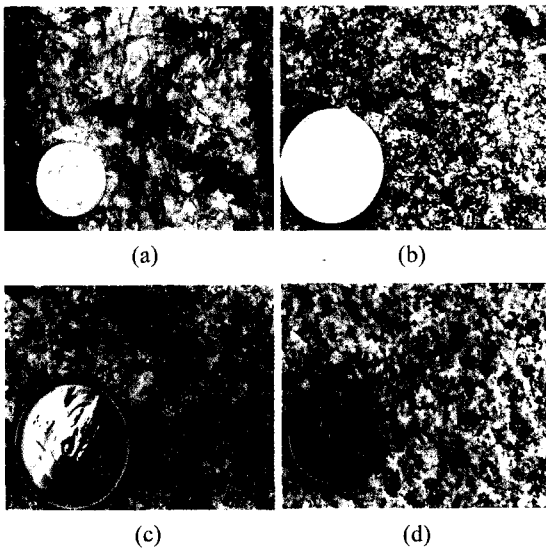


Fig. 11. Photographs of the granitic rocks in the Mireuksan area (a and b), and the stones from the Mireuksaji west stone pagoda.

에서 3.0%의 분포를 보인다. 미륵산에서도 부분적으로는 4.0~5.0%의 분포를 보이지만 대부분이 3.0% 대의 분포를 보인다. eU 함량은 미륵사지 서탑이 최소 3.0 ppm에서 최대 9.0 ppm까지 나타나지만, 대부분은 3.0~5.0의 분포 범위를 보인다. 미륵산의 경우는 최소 3.0, 최대 13.0까지도 나타나지만, 대부분은 3.0~5.0의 분포를 보인다. eTh 함량은 미륵사지 서탑이 최소 11.0 ppm과 최대 31.0 ppm까지도 나타나지만, 대부분은 12.0~14.0의 분포를 보인다. 미륵산의 경우는 최소 13.0,

최대 26.0까지도 나타나지만 대부분은 13.0~20.0의 분포 범위를 보인다(Table 5).

K, eU, eTh 함량을 비교한 결과 미륵사지 서탑과 미륵산에서의 값이 상당히 일치하여 나타남을 알 수 있다(Fig. 12). 감마스펙트로미터 분석에 의하면, 미륵사지 서탑에 사용된 석재는 미륵산에서 공급되었을 가능성이 높은 것으로 판단된다.

석재 채취 흔적

미륵산에서의 석재채취 흔적은 미륵사지의 뒤편 서남부와 남부 사면에서 발견되었다(Fig. 1). Fig. 13은 미륵산에서 발견된 석재 채취 흔적이다. 절리가 발달한 암석의 옆면을 떼어 내려고 한 흔적과 절리 면을 따라서 채취하려고 한 흔적을 볼 수 있다. 특히, 절리가 비교적 잘 발달한 castle형 토어와 tower형 토어에서 많이 확인되었다. 이는 절리와 토어 지형이 발달한 곳이 석재 채취에 유리하게 작용하였기 때문으로 판단된다.

석재 채취의 흔적을 확인한 결과 첫째, 석재 채취는 대체로 고도가 낮은 곳에서부터 이루어졌을 것으로 추정된다. 토어나 핵석이 솔리플렉션(solifluction) 작용에 의해서 사면 아래로 이동한 것들이 주요 대상이었을 것이다. 대체로 채취 흔적이 남아 있는 고도가 200m 이하로 나타나 낮은 곳에서부터 채취가 이루어졌을 것으로 판단된다. 둘째, 석재 채취는 절리가 발달하여야 하고 절리 밀도가 높아서 인력으로 옮길 수 있는 크기의 석재들이 많이 나오는 곳이 주요 대상이었을 것으로 판단된다. 미륵산은 석재공급에 유리하도록 절리가 발달하였고 산지의 고도가 낮으며 경사도 완만한 지형적인 특징 때문에 석재 공급이 가능하였던 것으로 판단된다.

Table 5. Gamma-ray spectrometer values of the Mireuksaji west stone pagoda and granitic rocks in the Mireuksan area.

| Mireuksaji west stone pagoda | | | | | Outerop | | | | |
|------------------------------|--------|------|------|-------|---------|-------|------|-------|-------|
| Sample | nGy/h | K | eU | eTh | Sample | nGy/h | K | eU | eTh |
| P-01 | 57.57 | 3.31 | 5.17 | 12.12 | M-01 | 90.96 | 4.41 | 6.10 | 19.42 |
| P-02 | 60.46 | 3.75 | 4.95 | 15.52 | M-02 | 56.70 | 3.66 | 3.23 | 20.07 |
| P-03 | 73.07 | 3.45 | 7.06 | 12.38 | M-03 | 43.23 | 4.29 | 3.69 | 15.27 |
| P-04 | 61.97 | 3.32 | 5.87 | 13.69 | M-04 | 43.74 | 3.20 | 3.44 | 14.63 |
| P-05 | 63.42 | 3.06 | 5.88 | 12.56 | M-05 | 65.98 | 4.67 | 5.45 | 18.56 |
| P-06 | 65.41 | 3.59 | 3.14 | 16.44 | M-06 | 44.38 | 3.61 | 3.30 | 15.90 |
| P-07 | 71.17 | 3.25 | 5.93 | 11.79 | M-07 | 57.46 | 3.98 | 3.82 | 18.20 |
| P-08 | 56.32 | 3.59 | 3.30 | 15.35 | M-08 | 43.19 | 4.40 | 4.31 | 18.70 |
| P-09 | 70.38 | 3.23 | 5.07 | 13.07 | M-09 | 65.86 | 4.76 | 4.76 | 21.89 |
| P-10 | 55.90 | 3.47 | 4.57 | 14.89 | M-10 | 14.98 | 3.64 | 6.40 | 14.23 |
| P-11 | 76.04 | 3.48 | 4.27 | 14.45 | M-11 | 40.81 | 3.88 | 4.54 | 13.97 |
| P-12 | 51.15 | 3.32 | 4.79 | 14.99 | M-12 | 44.94 | 3.37 | 3.48 | 13.43 |
| P-13 | 42.38 | 2.98 | 3.89 | 15.27 | M-13 | 70.51 | 4.42 | 4.98 | 18.62 |
| P-14 | 54.15 | 3.54 | 4.16 | 14.55 | M-14 | 84.36 | 5.12 | 4.55 | 26.71 |
| P-15 | 55.01 | 3.62 | 4.38 | 13.7 | M-15 | 88.64 | 4.65 | 13.19 | 26.84 |
| P-16 | 61.99 | 3.47 | 3.33 | 16.11 | M-16 | 28.46 | 4.19 | 6.94 | 20.35 |
| P-17 | 73.63 | 3.82 | 3.47 | 14.77 | M-17 | 64.95 | 4.43 | 4.14 | 21.39 |
| P-18 | 77.17 | 3.34 | 3.73 | 12.56 | M-18 | 26.75 | 4.16 | 4.33 | 21.68 |
| P-19 | 71.10 | 3.15 | 3.35 | 13.32 | M-19 | 24.51 | 3.83 | 3.04 | 22.10 |
| P-20 | 120.22 | 4.27 | 9.50 | 31.81 | M-20 | 63.12 | 4.11 | 5.62 | 18.58 |
| P-21 | 68.69 | 3.55 | 3.68 | 13.64 | | | | | |
| P-22 | 80.21 | 3.51 | 5.11 | 12.72 | | | | | |
| P-23 | 64.53 | 3.42 | 4.94 | 12.60 | | | | | |
| P-24 | 66.15 | 3.64 | 4.58 | 16.51 | | | | | |
| P-25 | 68.18 | 3.77 | 3.52 | 14.12 | | | | | |
| P-26 | 56.45 | 3.02 | 3.98 | 13.44 | | | | | |

결 론

화강암은 우리나라에서 가장 흔하게 볼 수 있는 암석이다. 이 화강암이 지하에서 형성되어 지표에 노출되는 과정에서 구조적인 운동과 기후적인 영향으로 절리가 발달하게 되어, 토어, 핵석 등의 지형을 만든다. 우리나라에 불교가 도입되면서 화강암과 화강암 지형은 사찰과 석탑의 재료로 사용되어 새로운 인공지형으로 바뀌기도 한다. 이렇게 만들어진 석조문화재는 오랜 세월동안 훼손되어 보수와 복원에 대한 관심도 높아지고 있다. 현재 남아 있는 석조 문화재의 석재와 동일한 암석과 공급지를 지형·지질적, 암석학적 관련성을 종합적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 미륵산 지역에서 주된 방향인 J1이 N71°E~EW로 나타났으며, 그 다음 방향인 J2는 N20°W~N20°E로 나타났다. 둘째, 절리의 유형분류에서 미륵산은 대체로

cross형이 우세하게 나타났으며 부분적으로 linear형이 수직(vertical)으로 나타나기도 하였다. 셋째, 미륵산 토어에서 장경은 2~3m가 가장 많이 나타났으며, 단경은 2m 이하가 가장 많았다. 높이는 2~3m와 5m 이상의 것이 많았다. 강도는 거의 대부분이 hammer bounce였으며, 원마도에서 semi-rounded형이 많았다. 형태는 tower형이 많았고, castle형과 table hill형도 나타났다. 넷째, 화강암 풍화지형도 다양하게 나타났다. 타포니의 대부분은 해안 쪽과 미주보는 서쪽사면에서 관찰되었다. 나마는 그 규모는 크지 않으며 형태는 pan형보다는 pit형이 많았다. 다섯째, 화강암에 대한 현미경관찰과 화학분석, 모드분석 결과 미륵산은 거정질의 페그마타이트가 나타나는 화강섬록암으로 분류되었다. 여섯째, 감마스펙트رو미터를 이용하여 미륵산의 암석과 미륵사지 서탑의 석재에서 방출되는 자연 상태의 방사능을 측정하여 그 상관성을 파악하였다. 그 결과, 미륵

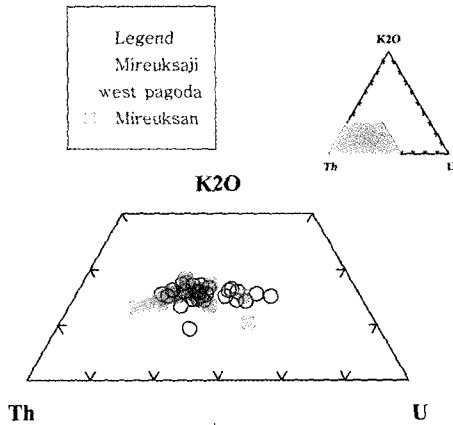


Fig. 12. K-Th-U ternary diagram for the stones from the Mireuksaji west stone pagoda and the granitic rocks in the Mireuksan area.

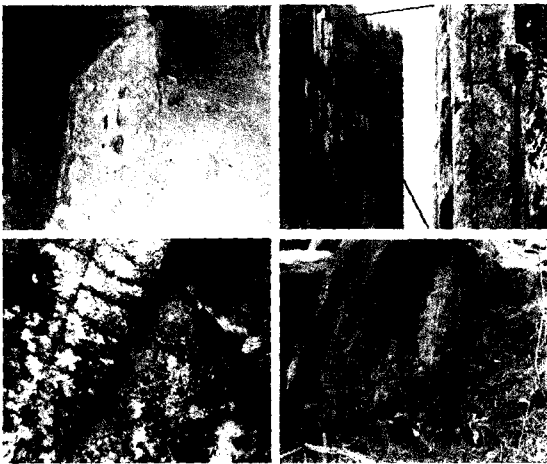


Fig. 13. Field occurrence of the stone-cutting traces in the Mireuksan area.

사지 서탑과 주변 산지 암석과의 상관관계가 높게 나타났다. 일곱째, 미륵산에서 과거에 석재를 채취한 흔적을 확인하였다. 이들의 흔적이 석조문화재를 만들 당시의 것으로 단정하기는 힘들지만, 이들 화강암 산지가 석재를 공급하는 기능을 한 것임에는 틀림없다.

석조문화재의 복원과 보전에 있어 석조문화재와 이들 석조 문화재에 석재를 공급하였을 것으로 추정되는 주변 산지의 암석에 대한 지형·지질학적, 암석학적

정보 축적은 지속적으로 다른 석조문화재로 확대되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구를 위해 미륵사지 서탑의 석재에 대한 관찰과 측정을 허락해 주신 미륵사지 석탑보수 정비사업단에 감사드립니다. 또한 논문에 대한 유익한 지적을 해주신 한국지질자원연구원의 홍세선 박사님과 기초과학지원연구원의 박찬수 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

권동희, 2002, 화강암지형의 세계, 한울아카데미, 32 p.
 김주환, 1982, 절리와 화강암 풍화와의 관계고찰, 동국지리, 3, 1-17.
 김혜자, 1982, 서울부근의 tafoni현상에 관한 연구, 상명여자사범대학 대학원 석사학위논문, 32 p.
 박경식, 2001, 탑파, 예경, 12 p.
 양희재, 2004, 익산 미륵사지서탑의 석재에 대한 보존과학적 특성과 기원암석의 성인적 연구, 공주대학교 대학원 석사학위 논문, 84 p.
 이상현, 1996, 감은사지 삼층석탑(동탑)과 나원리 5층 석탑의 암석과 풍화현상의 특징에 대한 연구, 보존과학회지, 5, 41-68.
 이찬희, 이명성, 서만철, 최석원, 김만갑, 2004, 감은사지 서탑의 풍화훼손도 진단 및 석재의 산지 추정, 자연환경지질, 37, 569-583.
 정창희, 고석진, 1963, 한국지질도 함열도폭 1:50,000, 국립지질조사소, 29 p.
 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, 2000, 경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여, 대한지질학회지, 36, 335-340.
 좌용주, 조기만, 김건기, 김옥한, 2002, 석조문화재에 사용된 화강암 석재의 구별 및 공급지 파악에 대한 연구: 경주 불국사와 석굴암의 예, 대한지질학회 제57차 추계공동학술발표회 초록집, 74 p.
 홍만섭, 김영원, 1969, 한국지질도 삼례도폭 1:50,000, 국립지질조사소, 32 p.
 Twidale, C.R., 1982, Granite landforms, Elsevier, 224 p.
 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.

(2005년 2월 14일 접수; 2005년 3월 5일 채택)