

옥천 용암사 마애불의 보존관리를 위한 불연속면의 거동특성 해석

이찬희* · 정연삼** · 김지영* · 이정은* · 김선덕***

*공주대학교 문화재보존과학과, **공주대학교 지질환경과학과, ***(주)엔가드
문화재연구소

Behavior Interpretation of Discontinuity for Conservation Treatment of Standing Sculptured Buddha at the Yongamsa Temple, Korea

Chan-Hee Lee*, Yeon-Sam Jeong**, Ji-Young Kim*, Jeong-Eun Yi*
and Sun-Duk Kim***

**Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University*

***Department of Geoenvironmental Sciences, Konju National University*

****Research Institute of Cultural Properties, ENGUARD Co. Ltd.*

Abstract

The host rock of standing sculptured Buddha in the Yongamsa temple was macular biotite granite, which has gone through mechanical and chemical weathering. The principal rock-forming minerals are quartz, plagioclase, alkali feldspar, and biotite, the last two of which have been transformed into clay minerals and chlorite due to weathering processes. The bed rock around the Buddha statue is busily scattered with steep inclinations that are almost vertical and discontinuous planes with the strikes of N8°E. The major joints have the strikes of N4 to 52°W and N6 to 88°E and the dips of 42 to 89°. Especially the development of the joints that cross the major joints causes the structural instability of the rock. The host rock of the Buddha image is separated into many different rock masses because of the also many different discontinuity, which group

accounts for about 12 % of the rock. Thus it's estimated that the bed rock has not only plane and toppling failure but also wedge failure in all the sides. Since the earth pressure and the inclination pressure are imposed on the body of the Buddha in the basement rock, it's urgent to give a treatment of geotechnical engineering for the sake of its structural stability. The parts where serious fractures are seen should receive the hardening process using the fillers for stones. It's also necessary to introduce a landfill liner system in order to reduce the ground humidity. The rock surface of the Buddha statue are partly contaminated by lichens and bryophyte. The joints have turned into earth, which promotes the growth of weeds and plant roots. Thus biochemical treatments should also be considered to get rid of the vegetation along the discontinuous planes and prevent further biological damages.

1. 서 론

용암사 마애불은 충북 옥천군 옥천읍 삼청리 용암사 경내에 있는 시도유형 문화재 제17호로서, 대웅전 뒤쪽 산기슭에 동향하고 있는 절벽의 암반에 양각되어 있다(Fig. 1A). 이 마애불의 기반암은 풍화작용을 적게 받은 반상 흑운모 화강암이나, 마애불이 조각된 암반은 수십여 개의 암괴로 분리되어 있다. 이 암반에 발달된 크고 작은 균열대는 강수의 통로가 되며 암편과 토양이 충전되어 있다. 따라서 균열대와 그 주변에는 지의류, 선태류, 초본식물과 목본식물이 서식하고 있어 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화에 완전히 노출되어 있다.

이 마애불 주변에 발달된 수직 균열대는 강회로 충전한 흔적이 있으나 명확한 보수기록은 남아있지 않으며, 정량적인 보존과학적 진단과 연구는 없었다. 따라서 이 연구에서는 용암사 마애불을 대상으로 암석학적 특성과 종합적 풍화훼손도를 진단하였다. 또한 암반사면에 대한 주향과 경사를 측정하고 불연속면의 방향성을 구하여 구조적 안정성을 해석 하였다. 이 결과는 석조문화재에 발생하는 불연속면의 거동특성을 명확히 해석하여 대처방안을 도출하고 가장 적절한 보존과학적 대안을 마련하는데 기여할 수 있을 것이다.

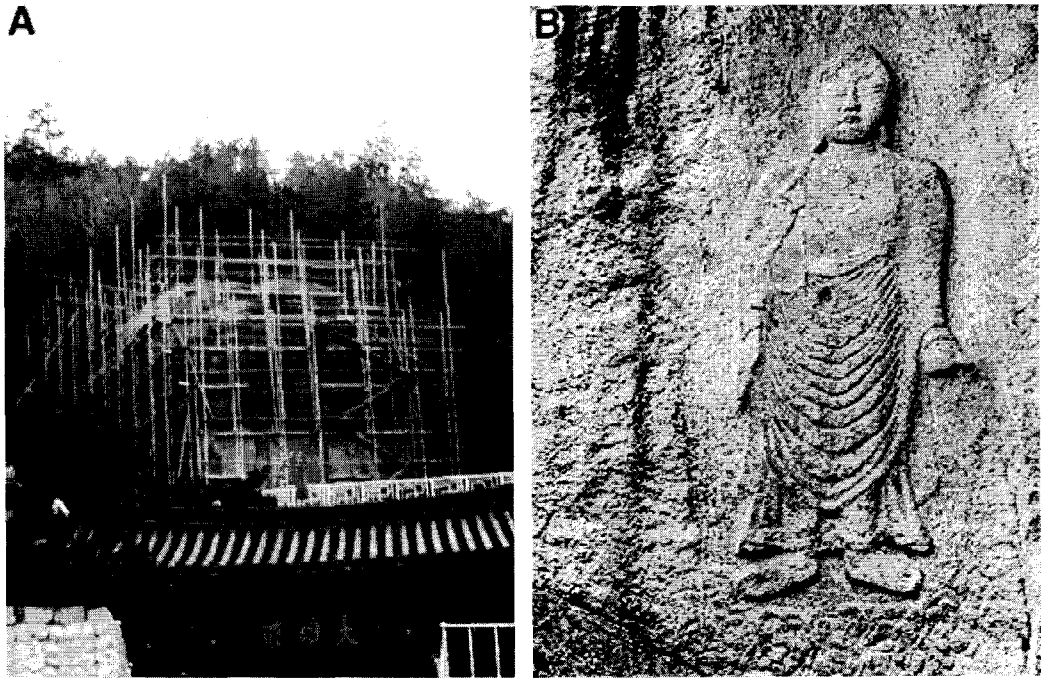


Fig. 1. Eastern frontal view of the standing Buddha at the Yongamsa temple. (A) The basement rock engraved Buddha statue set up the scaffold by stainless steel pipe and plates for detail survey and conservation treatment. (B) The Buddha statue of the Yongamsa temple is partly painted reddish brown pigments.

2. 현황 및 연구방법

용암사 마애불은 자연 지붕이 갖춰진 절벽의 하단에 감실형으로 바위를 파서 도드라지게 새긴 얽은 부조의 마애불입상으로 붉은 색이 아주 인상적이다. 붉은색은 인위적인 채색의 흔적이 있다. 이 마애불의 좌우에는 암흑색의 오염 물질이 분포하며, 우측에는 수직균열과 이를 충전한 강회가 노출되어 있다. 마애불의 총 높이는 343 cm, 두상은 52 cm, 가슴너비는 83 cm 이다(Fig. 1B).

이 연구에서는 마애불 주변에 대한 정밀 지형 및 지질조사와 마애불의 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화특성에 관한 정밀조사를 실시하였다. 또한 기반암의 불연속면을 대상으로 구조적 안정성을 평가하였다. 한편 마애불과 마애불 주변의 기반암을 대상으로 전암대자율을 측정하였고, 실내연구를 위하여 마애불 주변에 분포하며 본체와 동일한 종류의 암편과 식물종을 회수하여 암

석학적, 광물학적 및 생물학적 분석용 시료로 이용하였다.

암석의 화학분석은 XRF, ICP, ICP-MS 및 INNA를 이용하여 정량분석 하였다. 이 마애불을 이루는 암석에 대하여 반정량적인 광물조성, 상대적 함량, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성 등을 관찰하기 위하여 편광현미경과 전자현미경(SEM)을 사용하였다. 일부 시료에서 X-선 회절분석을 실시하였다. 조암광물의 모드조성은 자동계수기가 장착된 Leitz사 모델의 Orthoplan 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다. 또한 마애불의 기반암에 발달한 절리면의 구조적 안정성을 평가하고자 하고자 불연속면의 주향과 경사를 측정하고 DIPS 프로그램을 이용하여 사면의 안정성을 해석하였다.

3. 암석학적 특징 및 풍화 훼손도 진단

3.1. 암석학적 특징

이 마애불 주변에 분포하는 옥천화강암은 반상 흑운모 화강암으로 유색광물의 포획암이 발달하고 있다. 이들은 대부분 섬록암질 포획암으로 구성되며 수십 cm의 타원형을 이루기도 한다. 암색은 회색 내지 담회색으로 부분적으로 옅은 담홍색을 띤다. 주요 구성광물은 석영, 사장석, 알카리 장석, 흑운모와 녹니석 등이다. 이 마애불을 구성하는 암석은 중립질의 반정을 갖는 반상 흑운모 화강암이다.

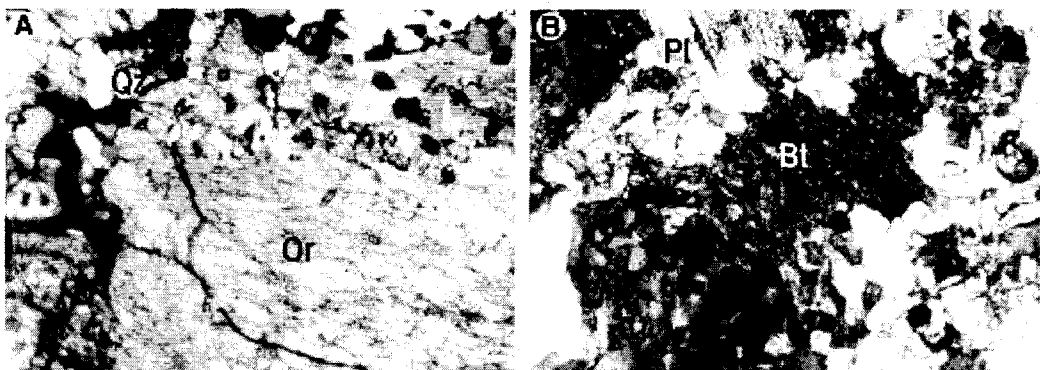


Fig. 2. Microphotographs showing host rocks of the Buddha statue at the Yongamsa temple. (A) Porphyritic granite composed of sericitized orthoclase and seriate textured quartz. (B) Quartz, plagioclase and biotite assemblages of

porphyritic granite. Qz; quartz, Or; orthoclase, Bt; biotite, Pl; plagioclase.

이 암석의 구성광물과 풍화도를 파악하기 위해 마애불과 같은 암종을 박편으로 제작하여 편광현미경으로 관찰하였다. 현미경하에서는 현정질의 장석 거정이 관찰되며, 세리에이트 조직을 갖는 석영이 공존한다(Fig. 2A). 이 장석의 거정은 입자경계와 쌍정면을 따라 점토광물화 작용을 받았다. 또한 흑운모는 풍화작용에 따라 녹니석화 되어 있다(Fig. 2B). 전암 대자율 측정 결과, 마애불이 양각된 부분은 $2.14\sim 4.64 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 대자율 분포를 보이며, 마애불 주변암반도 이와 비슷한 $2.28\sim 3.76 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 범위 내의 값을 갖는다. 따라서 이 마애불을 구성하는 암석은 자철석계열의 반상 흑운모 화강암임을 알 수 있다.

3.2. 풍화와 훼손도 진단

이 마애불이 양각된 암반은 거의 수직에 가까운 수십여 조의 절리로 인하여 여러 개의 암괴로 분리되어 있다. 또한 마애불의 좌측에는 수평균열이 발달하고 있으며, 이 절리대에는 잡목과 암편들이 산재한다(Fig. 3A, 3B). 이들은 우수의 통로가 되어 화학적 풍화를 촉진하며 겨울에는 결빙과 융해가 반복되면서 암석의 기계적 파괴를 가속시킬 것이다. 이 마애불과 인접한 곳에는 사교절리가 지표에서부터 상부의 돌출 암반까지 연장되어 암괴의 분리, 이탈 및 붕괴 위험과 같은 마애불의 구조적 안정성을 위협하고 있다(Fig. 3C). 이 절리면에는 강회를 충전하였으나 오히려 암석의 이차적 풍화 및 훼손을 야기하고 있다(그림 3D).

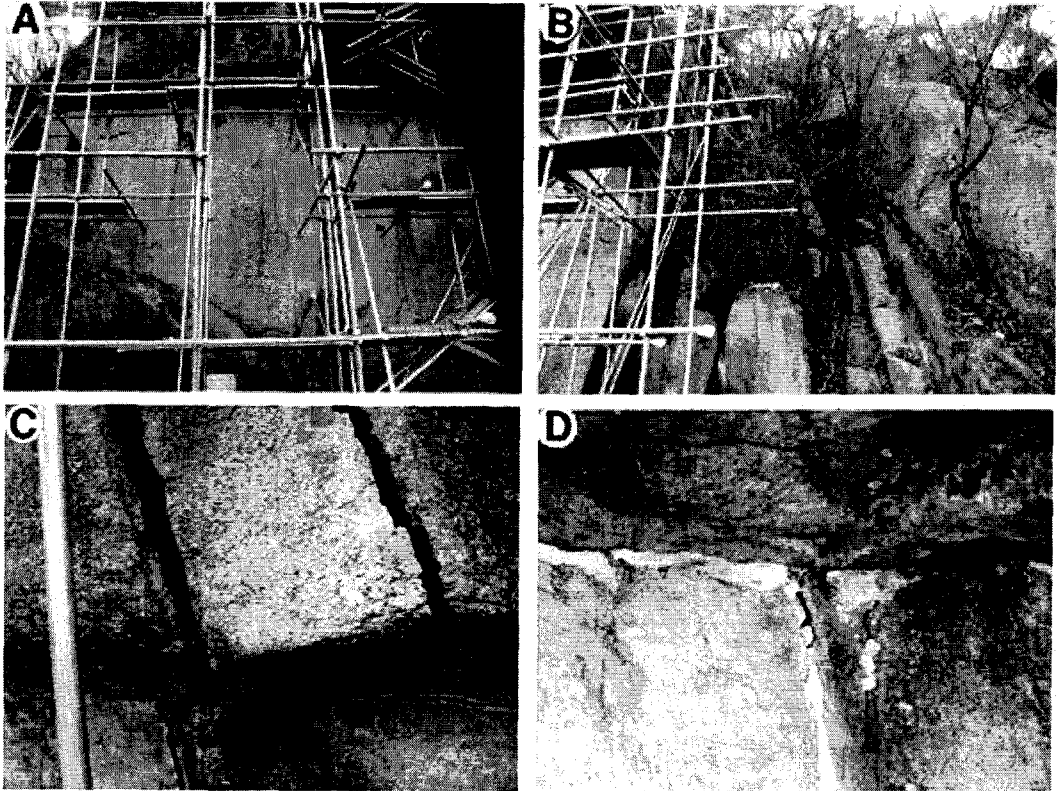


Fig. 3. Deterioration and physical weathering showing host rock of the Buddha statue at the Yongamsa temple. (A) Frontal view of the Buddha statue and the scaffold by stainless steel pipe and plates for detail survey and conservation treatment. (B) Discontinuity systems and vegetations developed around the Buddha statue. (C) Protrude roof rock of the Buddha statue is divided by oblique joint set. (D) Gap to the host rock jammed quick lime into the fracture right side of the Buddha statue.

주성분원소 분석을 통해 암석의 풍화에 의한 원소들의 거동특성과 부화 및 결핍정도를 근거로 화학적 풍화지수와 풍화잠재지수를 구해본 결과, 용암사마에불의 암석은 전체적으로 이미 풍화작용이 활발하게 진행되고 있는 것으로 해석된다. 각각의 조성을 일반적인 화강암의 평균 함량으로 표준화하면 대부분의 원소 TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , P_2O_5 가 결핍되어 있고 SiO_2 , Na_2O 는 부화되어 있으며 Al_2O_3 와 CaO 는 일정한 값을 갖는다. 이는 암석의 풍화작용에 의한 소실효과와 사장석, 정장석 및 흑운모가 풍화에 따라 점토광물과 산화철광물로 변질되면서 감소한 원소가 있기 때문으로 해석된다.

이 마애불 주변에는 지의류, 선대류를 비롯하여 양치식물, 초본식물과 소나무까지 다양한 생물침해 상태를 보인다(Fig. 4A, 4B). 두상은 비교적 양호하나 법의와 대좌의 선각된 틈 사이, 광배의 가장자리에 고사된 지의류의 흔적이 관찰된다. 햇볕이 들지 않는 기반암 하부에는 짙은 녹색의 선대류가 약 60 %의 피도를 이루며 왕성하게 서식하고 있다. 지의류 또한 고사된 것을 비롯하여 연두색, 회백색, 회흑색을 이루며 분포하며 피도는 60 % 이상이다.

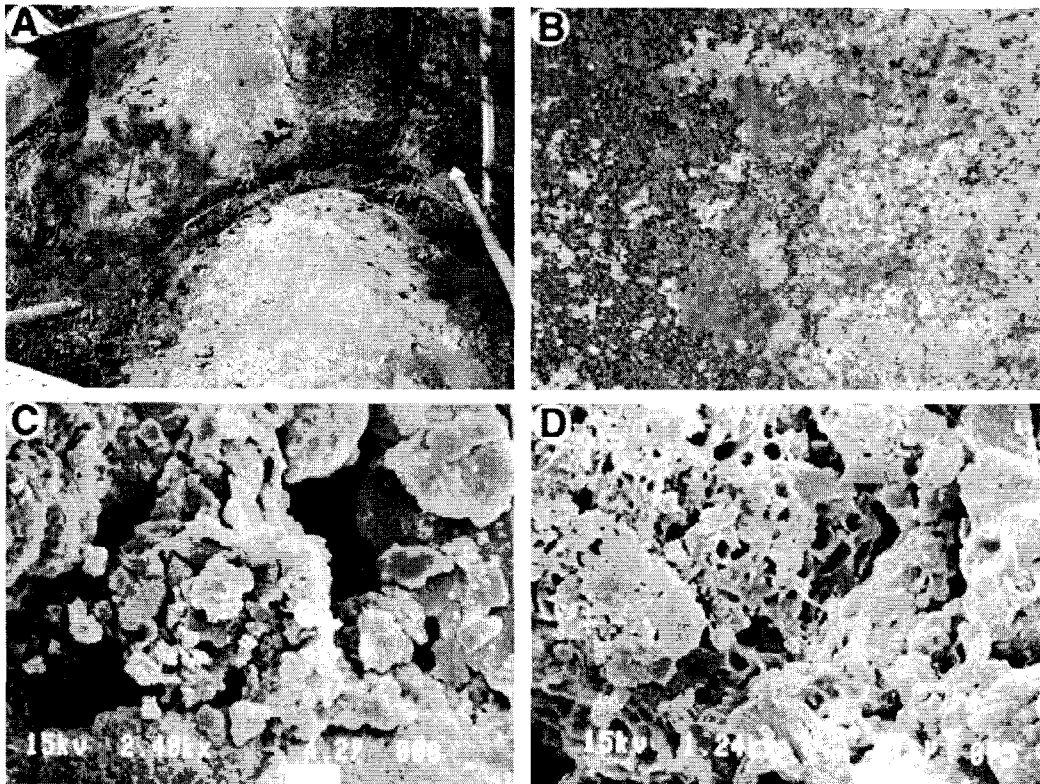


Fig. 4. Photographs showing biological weathering and scanning electron micrographs (SEM) for organic and secondary materials of the Buddha statue at the Yongamsa temple. (A) Some weeds and trees grow in the joint systems. (B) Algae and lichen observed on the rock surface near the Buddha statue. (C) Kaolinitic clay minerals and open cavity formed with feldspar boundaries. (D) Sponge shaped rootlets and fungus of lichen grown into the near surface of the rock material.

마애불 우측의 절리대 역시 선대류와 회녹색, 연두색의 고사된 지의류가 관찰되었다. 좌측에는 회흑색과 밝은 주황색의 지의류가 전체적으로 분포하고

있고 비례피도는 대략 40 % 이다. 기반암의 크고 작은 절리대에는 양치식물과 초본식물이 식생하고 있어 생물천이가 상당히 진행되어 있음을 알 수 있다. 마애불에 서식하던 생물군의 표본을 채집하여 동정하여보면 엽상지의류, 선태류, 초본식물, 선태류, 양치식물 등 다양한 생물종군을 볼 수 있다.

이와 같이 생물군이 피복한 곳은 암석의 박리현상과 함께 화학적 및 광물학적 풍화도 심하게 진행되어 있어 약한 충격에도 쉽게 떨어져 나온다. 따라서 식물체에 의한 암석의 기계적 풍화가 가속되고 있어 이에 대한 대비가 있어야 하겠다. 또한 마애불을 이루는 암석을 전자현미경에서 관찰해 보면 장식들은 용식에 의하여 많은 공극이 발달된 것을 볼 수 있고, 공극과 입간에는 이차적으로 생성된 점토광물과 지의류와 같은 표면 기생종의 뿌리조직을 관찰할 수 있다(그림 4C, 4D).

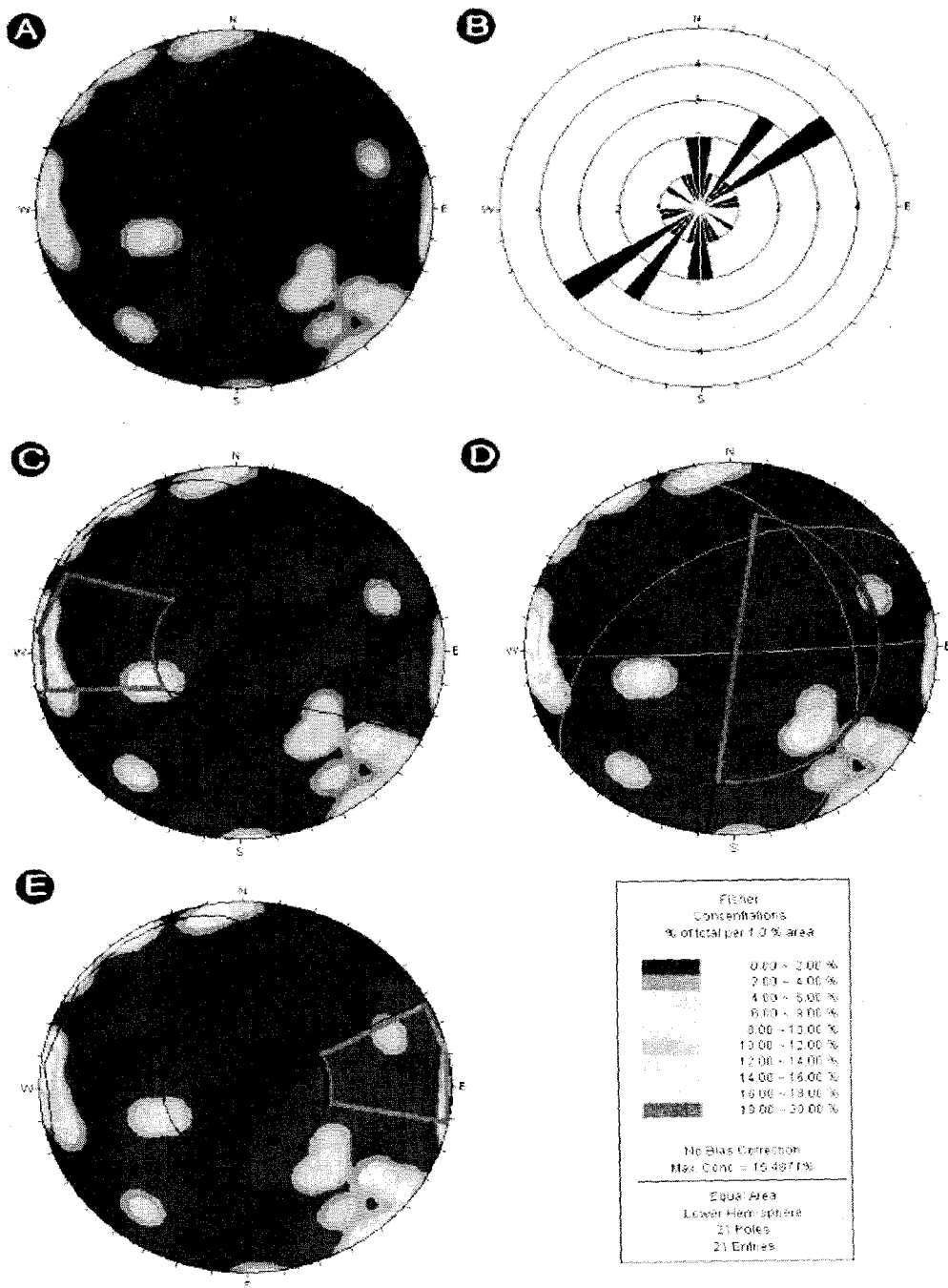


Fig. 5. Diagram showing behavior of discontinuity for the Buddha statue at the Yongamsa temple. Stereonet (A), rose diagram (B), possible activity domains of the plane failure (C), wedge failure (D) and toppling failure (E) plotted on linearments.

3.3. 불연속면의 거동 해석

불연속면의 존재유무는 암반사면의 안정성에 매우 중요한 영향을 미치며, 이와 같은 정보를 명확히 해석하는 것이 사면을 안정화시키는데 크게 기여한다. 이 마애불의 기반암에 발달된 불연속면의 주향과 경사를 측정하고 개인용 컴퓨터 프로그램인 DIPS를 이용하여 평사투영법에 의한 평면파괴, 썸기파괴, 전도파괴 안정성 검토하였다. 용암사 마애불 주변의 암반에서 측정한 불연속면의 분포를 투영하여 비교하면 Fig. 5와 같이, 불연속면의 분포가 전체의 구면으로 골고루 분포되어 있음을 알 수 있다.

이 마애불에 나타난 절리들의 방향을 살펴보면 마애불이 선각된 부분의 주향과 경사는 각각 N8°E, 88°SE로써 거의 수직에 가까웠으며 북사면에 선각되었음을 보여준다. 마애불이 선각된 암반의 절리대의 방향은 N4~52°W와 N6~88°E로 다양하다. 경사는 42~89°까지 구조적으로 불안정한 모습을 보이고 있다. 주요 절리는 N56°E~70°NW, N18°W~42°NE, N88°E~88°SE의 주향과 경사를 갖는다(Fig. 5A, 5B).

Fig. 5C는 평면파괴의 가능성을 도시한 것으로 마찰각보다는 크고 사면의 경사각보다는 작은 위치는 초승달 모양의 영역이 되는데, 이 영역 중 사면의 주향과 $\pm 20^\circ$ 되는 붉은 선 영역이 파괴가 가능한 장소이다. 이 안에 도시되는 불연속면이 최소 12 % 이다. 따라서 평면파괴의 가능성이 존재하는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 5D는 썸기파괴의 가능성을 도시한 것으로 사면의 경사각보다는 작고, 마찰각보다는 큰 영역인 길쭉한 초승달 모양의 영역이 파괴가 일어날 영역이다.

Fig. 5E는 전도파괴를 도시한 것으로 잘 발달된 급경사의 불연속면으로 분리되어 있는 연속적인 암주들이 전방으로 구부러짐에 따라 사면의 방향과 평행하게 굴곡되어 붕괴될 가능성이 있는 영역이다. 이를 정리하면 용암사 마애불의 조각되어 있는 암반사면에는 평면파괴와 전도파괴뿐 아니라 썸기파괴의 가능성까지 가지고 있어 구조적으로 불안정한 사면에 노출되어 있는 것으로 해석할 수 있다.

4. 결 론

1. 용암사 마애불을 구성하고 있는 암석은 기계적 및 화학적 풍화작용을

받은 반상 흑운모 화강암이다. 암색은 회색 내지 담회색으로 부분적으로 옅은 담홍색을 띤다. 주요 구성광물은 석영, 사장석, 알카리 장석, 흑운모이며 장석과 흑운모는 풍화작용에 따라 점토광물과 녹니석으로 변질되어 있다.

2. 이 마애불 주변의 기반암에는 수직에 가까운 경사와 N8°E의 주향을 갖는 불연속면이 산재한다. 주요 절리대의 방향은 N4~52°W와 N6~88°E의 주향을 가지며, 경사는 42~89°까지 나타난다. 또한 다른 방향의 절리와 이를 사교하는 절리계가 발달되어 있어 암반의 구조적 불안정을 초래하고 있다.

3. 이 마애불이 양각된 기반암은 다양한 불연속면의 발달에 따라 여러 개의 암괴로 분리되어 있으며, 불연속면의 균집이 12 % 정도 존재하므로 마애불의 암반사면에는 평면파괴와 전도파괴뿐 아니라 쉼기파괴의 가능성까지 있는 것으로 해석된다.

4. 이 기반암의 토압과 편압력은 마애불 전신으로 향해있기 때문에 마애불의 구조적 안정을 위한 지반공학적 보강방법이 강구되어야 할 것이다. 또한 균열이 심한 부분에는 암석용 충전제를 사용하여 경화처리가 선행되어야 할 것으로 보이며, 마애불의 풍화와 구조적 불안을 야기하는 지면의 습도를 저감하기 위한 차수층의 설치도 고려되어야 할 것이다.

5. 이 마애불이 선각된 암석의 표면과 공극에는 지의류와 선태류의 오염이 심각하며, 절리대는 토양화의 진행에 의하여 잡초와 수근이 암석의 기계적 풍화작용을 가중시키고 있다. 이와 같은 생물학적 훼손과 불연속면에 서식하는 식생을 제거하기 위한 생화학적 처리도 필요하다.