

## 전남 무안지역에 분포하는 석회질암의 용식작용과 지반침하

안 건 상\*

조선대학교 사범대학 지구과학교육 전공, 광주광역시 서석동 375

## Corrosion of Calcareous Rocks and Ground Subsidence in the Muan Area, Jeonnam, Korea

Kun-Sang Ahn\*

Department of Earth Science Education, Chosun University, 501-759 Gwangju

**요약:** 본 연구에서는 2005년 6월 지반침하가 발생한 전남 무안군 무안읍 교촌리 일대의 기반암의 분포를 조사하고, 지반침하의 원인인 석회질암의 용식작용과 지반침하 현상을 추적했다. 연구지역의 지표에서는 운모 편암과 유문암이 관찰되나, 지하에는 크고 작은 공동을 갖는 석회질암이 분포한다. 또한 지반침하지역 북측의 우회도로를 따라 폭이 최대 300 m이고, 길이가 4 km 이상의 두꺼운 석회암 층이 분포하고 있다. 이러한 석회암의 분포 규명은 이후에 발생할 수 있는 석회공동에 의한 지반침하를 예측하는데 매우 유용한 자료가 될 것이다. 이 지역 석회질암은 심한 전단변형을 받아 소규모의 습곡과 단층으로 교란되어 있다. 석회질암층에 형성된 습곡의 배사 부분에 소규모의 공동들이 자주 발견된다. 이는 습곡작용 시 약화된 석회질이 용해되어 공동이 형성된 것으로 판단된다. 또한 석회질암 내에는 다양한 두께의 편암이 협재되어 있는데, 이 편암은 주로 판상광물(녹니석, 운모)과 석영으로 구성되어 있다. 풍화된 암석 시료의 절단면을 보면 편암의 흑운모가 녹니석으로 변질되고, 이어서 편암 주변부터 방해석이 용식되어가는 현상이 관찰된다. 이는 석회질암에 협재된 판상광물 틈새로 지하수가 침투하여 석회암의 용식이 시작되었음을 시사한다. 즉, 위의 두 가지 메커니즘에 의해 무안지역의 석회질암층에서는 공동이 생성되었을 것으로 보인다. 저수지(불무재)의 매립과 농업용수의 과다 양수와 같은 이유로 공동을 지지하는 지하수가 고갈되거나, 공동퇴적물이 유실되어 지반침하가 일어난 것으로 해석된다.

**핵심어:** 무안지역, 석회암, 용식작용, 석회공동, 지반침하

**Abstract:** This study examines the distribution of basement rocks in Gyochon-ri, Muan-eup, Muan-gun, Jeonnam where ground subsidence occurred in June 2005, and traces corrosion of limestone. Mica schist and rhyolite are distributed in the surface of the study area, but thick limestone layer with large and small caverns are distributed underground. A horizon of limestone with maximum width of 300 m and 4 km of length was found along the detour which is in the north of ground subsidence. Such identification of limestone presence would be very useful to predict potential ground subsidence. Limestone in this area was disturbed by fold and fault due to severe shearing deformation. Small caverns were frequently found in anticline part of folds formed in limestone layer. Schists with different thicknesses were intercalated in the limestone with shearing deformation and consist of sheet silicate minerals (chlorite and mica) and quartz. In sections of weathered specimen, it is shown that biotite of schist part was altered into chlorite and corrosion of calcite around the schist followed. This suggest that ground water permeated between intercalated sheet silicate minerals and corrosion of limestone began. And small caverns were generated where active corrosion occurred. This study suggests that because of many reasons (for instance, reclamation of the Bulmu reservoir and excess pumping), cavern water level was lowered and cave sediments were removed, and it caused ground subsidence to occur.

**Key words:** Muan area, limestone, corrosion, cavern, ground subsidence

\*Corresponding author: Tel. 82-62-230-7348, E-mail. aksahn@chosun.ac.kr

## 서 언

2005년 6월 30일 밤 전남 무안군 무안읍 교촌리에서 주택 뒤쪽이 내려앉으면서 벽면 곳곳에 균열이 발생하여 흙탕물이 방안으로 흘러들어오는 사고가 발생했다. 사고발생 지역의 지하 공동 여부를 확인하기 위해 도로와 가옥 등 2곳을 시추한 결과 지하 7.0 m와 10 m 깊이에서 공동 2개가 확인되었다.

사고지역(교촌리)과 인접한 무안읍 성남리에서 지반 침하 현상이 처음 나타난 것은 1992년 10월이며, 1993년에는 지반이 2 m 가량 내려앉아 성토작업을 했으나 또 다시 1995년에 7 m 가량이 무너졌고, 2000년 1월에는 창고가 직경 8 m, 깊이 13 m의 웅덩이 속으로 흔적 없이 사라졌다. 이러한 지반침하를 매립된 저수지(과거 불무재)와 가까운 곳을 중심으로 양 남북방향으로 2004년 말까지 무려 19차례나 발생하였다. 2005년 지반침하가 일어난 교촌리는 무안읍 성남리에서 북서쪽으로 500 m쯤 떨어져 비교적 안전지대로 여겨졌던 곳이었기 때문에 재해가 발생하여 충격을 주었다. 매립된 저수지는 성남지역과 교촌지역 사이에 분포한다.

과거의 지반침하의 예는 1988년 문경시 농가 공터의 지반함몰, 1993년 강원도 평창군과 삼척군의 농경지 침하, 그리고 1994년 경기도 파주군 농경지의 불규칙한 요철발생을 들 수 있다(2005, 박영석). 가장 최근의 예로는 2007년 3월 14일에 영동선 철로공사 현장에서 가까운 강원도 태백시 황연동 솔안마을에서 발생한 지반침하로, 둘레 20 m · 지름 6 m · 깊이 2 m 정도의 커다란 웅덩이가 생겼다. 이 지역에서는 2006년 4월 이후 6번의 발생한 크고 작은 지반침하가 일어났다.

2005년 지반침하가 일어난 무안군 교촌리 일대는 기존의 지질도에 유문암과 화강암이 분포하는 지역으로 기재되어 있어, 2004년까지 지반침하가 발생했던 석회암 지반의 성남리 · 성내리와는 달리 지반침하가 예상되지 않았다. 그러나 교촌리에서 2 곳의 시추결과 지하에 석회암 공동의 존재가 밝혀져, 이 지역을 중심으로 한 광역적인 석회암 분포가 관심의 대상이 되었다. 따라서 본 연구에서는 무안읍 교촌리를 중심으로 석회암의 명확한 분포와 연장방향을 밝혀, 지반침하 가능 지역을 예상하고 대처하는데 도움이 되고자 한다.

국내의 석회공동의 형성에 대한 지구물리학적 연구는 다수 있으나(고진석 외, 2002), 석회공동의 형성에 관한 연구는 김춘식 외(2007)에 불과하다. 따라서 여기서 무안지역 지반침하 지역을 대상으로 석회질암의 용식작용과 지반침하 과정을 추적하고자 한다.

## 분석방법

1:5만, 1:2만5천, 1:5천 지형도를 이용하여 지질분포를 도시하고, 암석의 화학성분, 구성광물 등을 판별하기 위해 암석과 토양시료를 채취했다. 47개의 암석 박편을 제작하여 구성광물과 조직을 관찰했다. 12개의 암석시료에 대해 전자현미분석(EPMA)을 실시하여 광물의 구성성분을 분석했다. 또한 풍화와 관련된 석회암과 편암의 미세한 호층에 대해서는 BSE(Back Scattered Electron) 화상분석을 통해 구성성분을 해석하였다.

EPMA BSE 화상분석은 전남대학교 공동실습관에 설치된 Shimadzu 모델 EPMA-1600을 이용하였다. 일부 광물을 명확하게 판정하기 위하여 정량분석을 실시하였는데, 분석은 기초과학지원연구원 전주지소에 설치된 Shimadzu 동일모델을 이용하여 시행하였다.

토양과 변질된 암석 그리고 이들의 원암이라고 판단되는 15개의 시료에 대해 X선회절분석(XRD)을 실시하여 구성광물을 판별했다. XRD분석은 조선대학교 공동실습관에 설치된 PANalytical사의 모델 X'pert Pro MPO를 이용하였으며, 피크해석은 연세대학교 송윤구 교수의 도움을 받았다.

XRD분석을 실시한 15개의 시료의 전암성분을 분석하기 위해 유리비드(시료 : 용융제(Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) = 1 : 7 비율로 혼합)를 제작하여 X선형광(XRF)분석을 실시하였다. 부경대학교에 설치된 Shimadzu사의 모델, XRF-1700을 이용했다. 분석조건은 가속전압과 전류가 각각 40 kV, 70 mA이었다.

## 지형 및 수계

연구지역은 북북동-남남서 방향으로 발달한 광주단층의 서측에 위치하며, 단층 동측에 비해 낮은 충적층 지대와 완만한 구릉을 형성하고 있다. 무안군청과 교촌리 사이는 단층방향과 나란히 저지대를 이루며, 저지대 중앙에 형성된 저수지(과거 불무재로 불림)는 현재 매립되어 공원이 조성되어 있다.

교촌지구의 서편은 상봉산에서 깃대봉과 같은 소규모의 봉우리들이 단층방향과 거의 나란히 배열되어 비교적 고지대를 이룬다. 이러한 소규모의 봉우리들은 전 단대를 따라 거의 직선상으로 인접한 엽리상 화강암 지대에서 다시 계곡을 형성한다.

이 지역의 수계는 유역연장이 짧고 소규모이므로, 교촌리를 포함한 무안읍의 집수역이 매우 좁고 유수가 머무르는 시간 또한 짧다. 이러한 특성으로 보아 풍수기와 갈수기 사이의 유량과 유속은 매우 큰 차이를 보일 것이다.

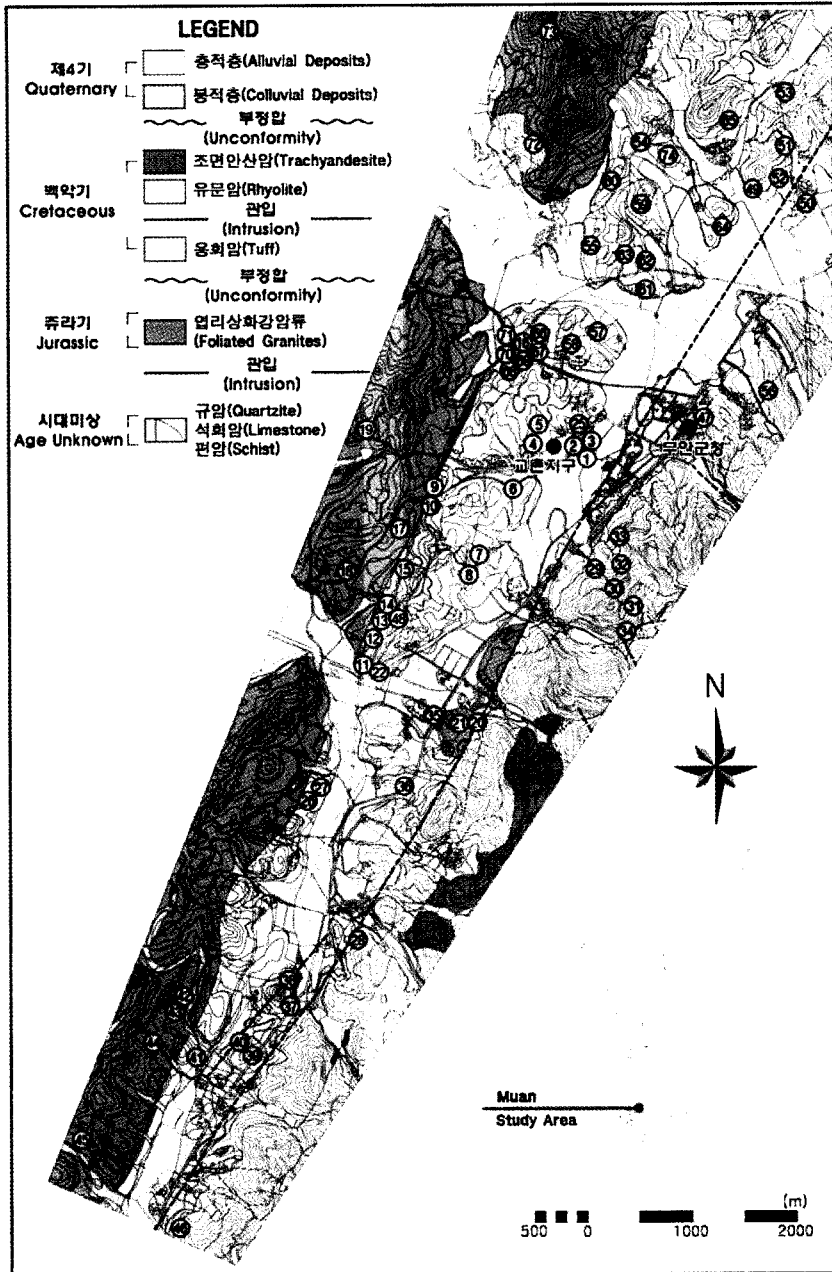


Fig. 1. Geologic map of the Kyochonri, Muan, Cheonnam.

교촌리와 상봉산을 둘러싸고 발달한 소규모의 하천들은 무안천을 통해 영산강으로 이어진다. 교촌리 남측은 국도 1호선 동측 화산암지대에서 발달하는 경사가 급하고, 길이가 짧은 소규모 하천들이 모여 청천천을 따라 서해에 이른다. 따라서 이 지역의 지하수의 함

양은 주로 저수지(과거의 불무재)에 의해 이루어졌을 가능성이 크다.

**지질개요**

지체구조적으로 옥천대의 남서부에 해당하는 이 지

역은 시대미상의 변성퇴적암류로부터 백악기 화산암류까지 다양한 암체와 지층이 분포한다.

함평에서 무안군청 앞을 지나 국도 1호선과 나란히 이어지는 광주단층과 교촌리 서측에서단층과 같은 북북동-남남서 방향의 전주전단대는 중생대 지각의 진화 과정에 커다란 영향을 끼쳤다. 전주전단대가 지나고 교촌리 지역의 백악기 이전에 생성된 변성퇴적암류 및 화강암류는 강한 전단작용으로 암쇄화되어 있다. 이 지역에서의 전단작용은 편암과 석회암으로 구성된 변성퇴적암류를 파쇄 또는 신장시켰다.

이 지역의 지질은 선캄브리아시대로 추정되는 시대미상의 변성퇴적암류, 이를 관입한 쥐라기의 화강암류, 백악기의 화산암류, 그리고 제 4기층 등으로 구성된다. Fig. 1은 교촌리 일대의 광역지질도이며, 노두(시료) 위치는 원형 내 숫자로 표기하였다.

이 지역의 최 하부 지층인 시대미상의 변성퇴적암류는 주로 편암과 석회암이다. 이 지층은 신흥도폭(김정환 외, 1982) 지역에서부터 광주단층을 따라 대상의 분포를 보이는 변성퇴적암류의 남서쪽 연장부에 해당한다. 영광도폭(최위찬 외, 1986)에서는 이 지층의 분포지가 옥천층군의 주 분포와 동일한 연장선에 위치하고 구성암상이 서로 유사하다는 점에 근거하여 옥천층군에 대비시키기도 하였다.

쥐라기 화강암은 교촌지구 서측 지역에 넓게 분포하는 열리상화강암류이다. 열리상화강암류는 전단변형의 특징적인 암쇄조직을 나타낸다. 백악기의 화산암류는 광주단층 동측(무안군청 뒤쪽)에 광범위하게 분포하며, 유문암은 교촌리에서 대상으로 분포한다. 제 4기층은 사면을 따라 분포하며, 충적층은 저지대에서 농경지로 이용되고 있다.

## 지질각론

**변성퇴적암류:** 1971년에 발간된 1:5만 지질도 무안도폭에는 교촌리를 포함한 연구지역 전체를 변성퇴적암류가 점유하고 있으나, 2000년에 발간된 1:25,000 무안도폭에는 교촌리 부근에는 유문암이 대상으로 분포하는 것으로 기재되어 있다. 교촌리 지역에 분포하는 변성퇴적암류는 주로 편암과 석회암이다. 규암층은 조사지역 남측에서 소규모로 분포한다. 기존 조사에서 석회암은 편암류 내에 렌즈상 혹은 얇게 협재되는 것으로 기재되어 있으나, 금번 조사에서 확인 한 바로는 최소한 200 m 이상의 두께를 가진 석회암층이 존재한다. 이 석회암층 내에 전단작용을 받아 신장된 1 mm에서 수 cm에 이르는 규질암 또는 얇은 편암이 협재한다.

변성퇴적암류는 광주단층을 경계로 백악기 지층들과 접하면서 북북동-남남서 방향으로 대상으로 분포하며, 쥐라기의 열리상화강암류와 백악기 유문암이 이들을 관입한다. 그리고 편암과 인접한 열리상화강암류의 경계를 따라서 전단대가 발달한다.

**편암류:** 이 지역의 편암류로는 건운모석영편암, 운모편암, 녹니석편암이 관찰된다. 이들은 전단작용을 심하게 받아 강한 암쇄조직을 보이는 것이 특징이다.

대부분의 시료는 풍화가 심하고, 노두가 불량하여 모질물로 확인되는 경우가 많다. 그러나 교촌리 남부의 공사장의 비교적 신선한 편암노두(시료 Mu07)에서는 암쇄구조가 발달하여 강인한 광물이 회전된 구조를 보여준다. 남안리 인근의 노두에서 관찰된 편암은 규질 편암과 운모편암이 뒤 섞인 전형적인 건운모석영편암이다.

현미경 하에서는 석영, 운모가 열리구조를 형성하고 있으며, 불투명광물과 녹니석, 전기석 등이 관찰된다. 흑운모는 녹니석화되어 있는 경우가 흔하다. 이들은 대부분 석영입자들이 재결정작용을 받아 석영암쇄암으로 전이되어 있는 것이 특징이다. X선 회절분석에 의하면 시료 Mu26과 Mu27에는 현미경에서 관찰되는 석영, 운모 이외에 버미큘라이트, 스�멕타이트 그리고 카올린이 인지된다.

**석회암:** 지표에서 석회암은 국도 1호선 무안우회도로 공사장의 절개 사면을 따라 수 km에 걸쳐 관찰된다. 우회도로와 60번 지방도가 교차하는 교촌리 북부 지역에서 석회암(시료 Mu70)은 유백색을 띠며, 단층작용의 영향으로 편암과 함께 심하게 교란되어 있다. 습곡된 석회암층의 배사에는 풍화작용으로 인한 소규모의 공동이 발달하여 있으며, 공동 내부는 풍화토(시료 Mu69)가 채워져 있다(Fig. 2). 이 석회암은 석영이나 운모가 포함되지 않은 거의 순수한 석회암으로, 교차로 북부 건너편 경신동 마을 쪽도(시료 Mu71) 동일한 암상을 나타낸다. 이들은 거의 동일한 크기의 방해석과 돌로마이트로 구성되어 있으며, 2차적으로 생성된 맥이나 절단면에서 성장한 방해석은 기존의 입자보다 크게 성장하고 있다(Fig. 3). 석회암 지반붕괴가 일어나고 있는 교촌리 지하에서 채굴한 코아 시료5와 동일한 암상을 나타낸다.

한편 교촌리 북부의 무안 우회도로를 따라 연속적으로 두꺼운 석회암층이 발달하여 있다. 이 지역 석회암들은 전단작용으로 지층이 휘어지거나 절단되기도 했으나, 전체적인 주향은 N20~30°E, 60~75°SE이다. 이



Fig. 2. Outcrop of limestone at the Muan area.

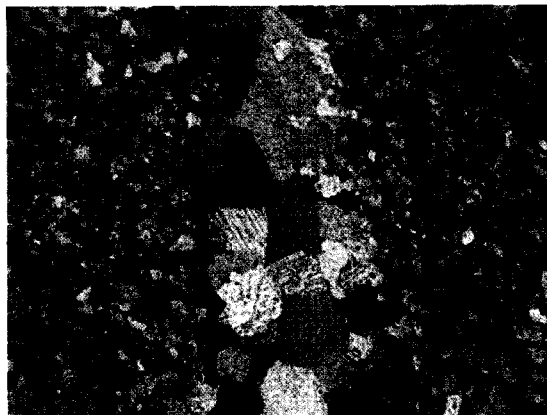


Fig. 3. Microphotograph of limestone (sample Mu70).

석회암은 암청색 또는 청회색을 띠는 석회암, 부분적으로는 편암과 석회암이 교호되는 양상을 보이기도 한다. 풍화된 표면은 갈색에서 회갈색으로 편암과 유사하지만, 햄머로 쳤을 때 쉽게 하얀 자국이 남고, 묽은 염산에 쉽게 반응한다.

교촌리 지역의 석회질암은 순수한 석회암 층도 관찰되지만, 대부분의 석회암 내에는 수 mm 두께의 얇은 편암이 협재되어 있다. 이 편암들은 주로 운모와 석영으로 구성되며, 때때로 석영의 집합체가 렌즈상(2~3 mm) 또는 맥상으로 산출되기도 한다. 지표의 노두에서 관찰된 석회암은 지반침하 지역 지하에서 채취한 코아 시료(Core-5)와 암상이 아주 유사하다. 따라서 지표에서(우회도로)에서 관찰되는 석회암은 주향(N20-30°E)과 경사로 판단할 때 교촌리 하부까지 연장되어 분포하는 것으로 판단된다.

이번 조사를 통해 유문암과 화강암의 분포지역으로 알려진 교촌리 지역은 기반암의 대부분이 석회질암 즉, 순수한 석회암이거나 얇은 편암이 끼어있는 석회질암으로 밝혀졌다. 또한 그 분포도 예전에 소규모 점상으로 산재된 석회암이 아니라 광주전전단대와 나란히 4 km 이상 대상으로 분포하는 두꺼운 석회암 층임을 알게 되었다. 이러한 석회암층의 분포는 이후에 발생할 수 있는 석회암층의 붕괴를 예측하는데 매우 유용한 자료가 될 것이다.

**쥐라기 화강암:** 조사지역에 분포하는 쥐라기 화강암의 대부분은 엽리상화강암으로 변성퇴적암류의 서측에서 북동-남서 방향으로 넓게 분포한다. 엽리상화강암은 대부분의 지역에서 심하게 풍화되어 있고 노출도 불량한 편이며, 비교적 신선한 노두는 보평산 근처, 병

산 남쪽 학동제 근처의 절개지, 청계면 송현리에서 관찰할 수 있다. 이 화강암의 관입 시기는 쥐라기 중기인 1억 7천만 년 전이다.

엽리상 화강암은 전단작용으로 압쇄엽리구조와 신장구조가 발달하여 있으며, 특히 전단대의 중심부가 지나가는 시대미상의 변성퇴적암류와의 경계부로 갈수록 압쇄작용의 강도가 증가하여 장식 반정을 포함한 구성 광물들의 입도가 현저히 감소하는 경향을 보인다.

이 암석은 알칼리장석을 반정으로 함유하는데, 반정의 대부분은 칼스바드 쌍정을 나타낸다. 알칼리장석 반정은 최대 3 cm이고, 보다 작은 크기의 사장석 반정과 드물게 석영 반정이 존재한다. 알칼리장석 주변에서는 미문상조직도 관찰된다.

**백악기 응회암:** 조사지역에서 화산 쇄설암류는 광주 단층 동측에 한정되어 여러 응회암들이 분포한다. 본암은 청천리 상천천, 무안읍 초당대학교 교내 및 주변에 주로 분포한다. 본암은 층리가 발달된 녹색 또는 담녹색의 암편질 화산회 응회암과 암편질 래피리 응회암으로 주로 구성되나, 녹회색의 역암, 담회색 응회질 사암, 자색 응회질 이암 등의 쇄설성 퇴적암류도 빈번하게 협재된다.

**백악기 유문암:** 유문암은 교촌리 인근에 가장 넓게 분포하는 백악기 화산암류이다. 광주단층 서측에서 유문암은 편암류와 쥐라기의 엽리상화강암류를 북북동-남남서 방향으로 일정하게 관입하고 있다. 무안고등학교 뒤편에서와 같이 편암의 엽리 방향에 평행하게 판상의 암맥으로 관입되어 산출되는 경우도 있다. 시추자료에 의하면 이 지역 지하 지질은 대부분 석회암이 분포한다.

**Table 1. Major elements of various rocks in the Muan Kyochonri area**

Sample	Mu01	Mu02	Mu07	Mu16	Mu27	Mu66	Mu67	Mu68	Mu69	Mu70	Core4	Core6
	rhy	rhy	sch	sch	sch	soil	LS	soil	soil	L	L	L
SiO <sub>2</sub>	76.46	78.44	87.31	60.85	59.73	62.15	21.04	54.99	52.98	6.44	10.92	24.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.66	13.05	7.88	17.39	18.87	13.32	4.32	18.47	19.52	1.15	1.68	7.32
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.05	0.17	0.80	0.92	0.97	0.45	0.72	0.65	0.03	0.05	0.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.95	1.48	1.17	8.02	9.29	12.23	2.97	8.72	10.14	0.22	1.04	2.52
MnO	0.04	0.03	0.01	0.08	0.02	0.26	0.06	0.13	0.13	0.00	0.02	0.04
MgO	0.29	0.22	0.12	1.46	0.72	0.87	1.66	1.76	1.29	15.06	7.72	1.87
CaO	0.12	0.06	0.05	0.66	0.06	0.64	37.67	0.69	0.62	35.76	40.90	32.75
Na <sub>2</sub> O	1.99	0.03	0.02	0.07	0.15	0.02	0.00	0.09	0.05	0.01	0.00	0.01
K <sub>2</sub> O	3.69	3.17	1.94	5.79	5.49	4.09	1.46	6.06	5.40	0.33	0.54	2.11
P <sub>2</sub> O	50.01	0.02	0.01	0.23	0.12	0.36	0.20	0.19	0.20	0.01	0.02	0.14
LOI	2.26	2.90	1.33	4.01	4.07	4.46	30.54	7.34	8.26	43.70	39.94	28.46
Total	99.51	99.47	100.00	99.36	99.43	99.35	100.37	99.17	99.26	102.72	102.83	99.68

Note: rhy = rhyolite, sch = schist, Ls = limestone with schist, L = limestone.

조사지역인 광주단층 서측에서 편암류를 관입하고 있는 유문암체는 유동구조가 거의 발달하지 않은 괴상으로 산출되며, 주로 연한 녹색이나 저색을 나타낸다. 담회색의 유문암은 1~2 mm 크기의 석영 반정을 드물게 포함하고 미세한 정동들이 관찰된다.

구성광물은 석영, 정장석, 사장석 등은 반정을 이루며, 공동은 방해석으로 충전되어 있는 경우가 많다. 단층 서측의 교촌리 부근에 분포하는 유문암의 장석은 대부분 견운모로 변질되어 있다. 무안교육청 인근에서 채취한 풍화된 유문암(시료 Mu01)의 분말을 X선회절 분석한 결과도 구성광물은 석영, 운모, 사장석으로 나타난다. 전암성분은 유문암 시료 Mu01의 경우 SiO<sub>2</sub>가 76.7%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 13.7%, 알칼리가 5.7%로서 전형적인 산성암의 조성을 보여준다. Table 1은 연구지역에서 채취한 암석의 종류와 화학성분이다.

### 교촌리 지하 시추자료

본 시추자료는 저자도 참여한 “교촌주거지 기반침하 지역 정밀안전진단조사” 결과보고의 일부이다. 이 자료는 무안군으로부터 의뢰받은 한국농촌공사가 2006년 5월에 작성한 보고서 내용이다. 기반암에 대한 시추는 기반침하 사고지역을 중심으로 반경 300 m 북측에서 집중적으로 이루어졌다. 시추조사결과, 연구지역의 기반암은 대부분 석회암과 편암이 협재된 석회질암으로 확인되었으며, 일부 지역에는 후기에 화강암, 유문암이 관입한 것으로 해석했다.

30개소의 시추조사공 중 공동이 확인된 시추공수는 9개소(Fig. 4, 5)로, 기 조사된 무안군 무안읍 성남리·

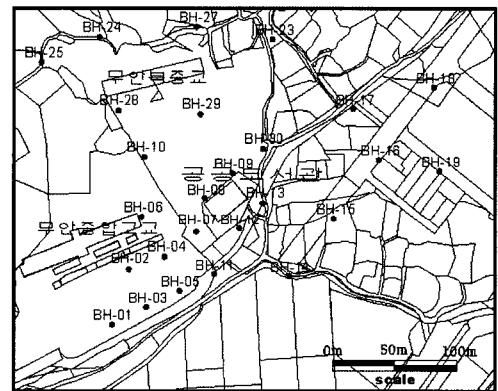


Fig. 4. Drilling sites at Kyochonri area (Muan-gun, 2006).

성내리 지역과 같은 대규모 공동은 거의 발견되지 않았다. 공동규모는 대부분 직경 1.0 m 이하의 소규모 공동으로 침하현상이 발생했던 지역을 중심으로 발달하고 있었다. 가장 큰 공동은 시추공BH-8번 공에서 발견되었으며 공동 높이가 약 2.0 m이다(Table 2). 공동은 황색 내지 회색의 점토, 또는 흑색의 단층점토로 채워져 있었다. 기 조사지역에 비해 공동은 거의 발견되지 않았으나 연약대는 더 광범위하게 발달하고 있는 것을 알 수 있었다.

### 석회암의 용식작용

국도 1호선 무안 우회도로와 무안읍에서 무안공항으로 이어지는 60번 지방도가 교차하는 교촌리 북부 교

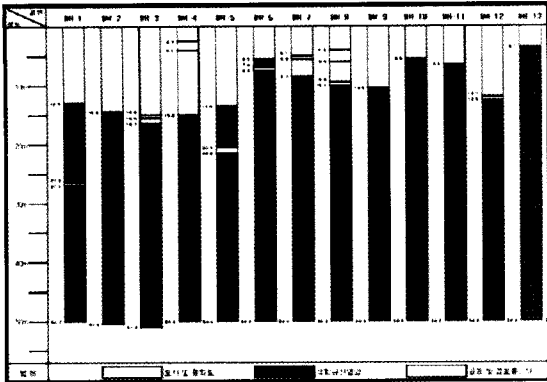


Fig. 5. Columnar section of drill holes at Kyochoonri area (Muan-gun, 2006).

Table 2. Distribution and size of caverns at Kyochoonri area

시추공	공동의 분포심도(m)	높이(m)
BH-1	27.2~27.5	0.3
BH-3	14.9~15.4	0.5
BH-4	1.6~1.8	1.4
BH-5	20.6~20.9	0.3
BH-6	7.4~8.0	0.6
BH-7	5.1~5.6	0.5
BH-8	4.0~6.0, 9.6~10.1	2.0, 0.5
BH-12	12.1~12.5	0.4
BH-24	5.9~6.6	0.7

차로 건설공사로 지표에 노출된 석회암층에는 다양한 석회암의 풍화 양상이 관찰된다.

**사례 1:** 석회암층은 심한 진단변형을 받아 소규모의 습곡과 단층으로 교란되어 있다. 석회암층에 형성된 습곡의 배사 부분에 소규모의 공동들이 자주 발견된다 (Fig. 2). 습곡 배사부에 형성된 공동의 내부와 외부 모양을 구성하는 광물조성을 XRD로 조사해 보았다. 공동 위 지표의 토양시료(Mu68)는 석영, 운모류, 녹니석, 정장석으로 구성되어 있으며, 공동 내의 토양시료(Mu69)는 석영, 운모, 녹니석, 사장석, 버뮤클라이트, 스멕타이트로 구성되어 있었다. 공동 위 지표의 토양시료 (Mu68)의 구성광물은 화강암류의 풍화산물인 토양의 구성광물과 유사하며, 공동내의 토양시료(Mu69)의 구성광물을 주변의 암석과 대비하면 유문암과 편암의 풍화물이 혼합된 토양처럼 판단된다. 화학성분에서도 공동 위쪽 지표의 토양과 공동내부 토양의 SiO<sub>2</sub> 함량은 각각 54 wt.%와 52 wt.%로 주변의 석회암(6 wt.%)과는 현저히 달라 석회암의 풍화산물로 보기는 어렵다

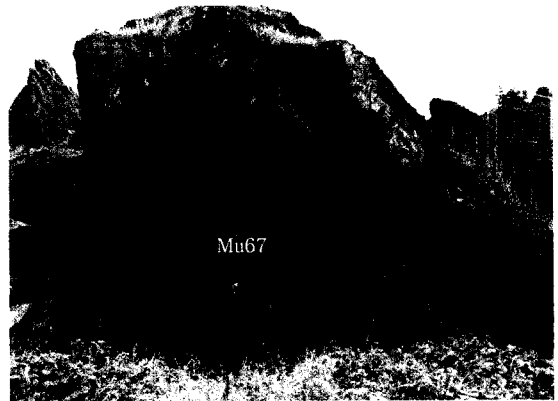


Fig. 6. An outcrop of weathered limestone at the Muan.

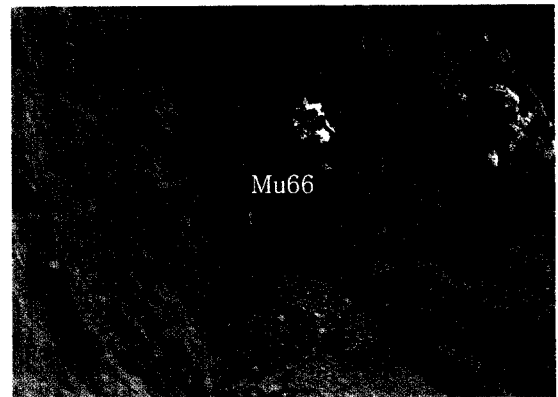


Fig. 7. An intensively weathered part, the right part of Fig. 6.

(Table 1). 즉 이 두 시료는 그 원암을 명확히 알 수 없으나, 기원이 서로 다르게 나타나며, 모양을 둘러싸고 있는 석회암의 구성광물과도 전혀 다르다.

이러한 공동퇴적물은 구성광물 차이로 보아 석회암의 풍화산물로 보기도 어렵다. 또한 공동 내부와 공동 위 지표의 구성광물이 달라 현재 지표의 모양이 직접 유입되었을 가능성도 적다. 따라서 이 공동은 습곡작용에 의해 약화된 석회암이 용해되어 유실되었고, 현재의 공동 퇴적물은 외부에서 유입된 것이다.

**사례 2:** 도목공사로 지표에 노출된 석회질 노두(Fig. 6)에는, 풍화가 현저히 진행되어 거의 토양으로 변한 부분과 풍화가 진행되지 않아 석회질암임을 손쉽게 판단할 수 있는 부분이 있다. 이렇게 풍화도가 다른 석회질암이 지하수에 노출되면 풍화가 현저한 곳부터 토양이 유실되어 공동이 생성된다. 동일 노두에서 용식이 현저한 부분의 구성광물을 조사하였다. Fig. 7은 Fig.

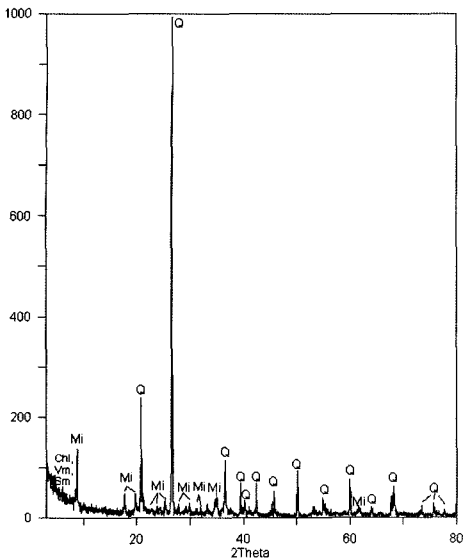


Fig. 8. XRD peak of sample Mu66.

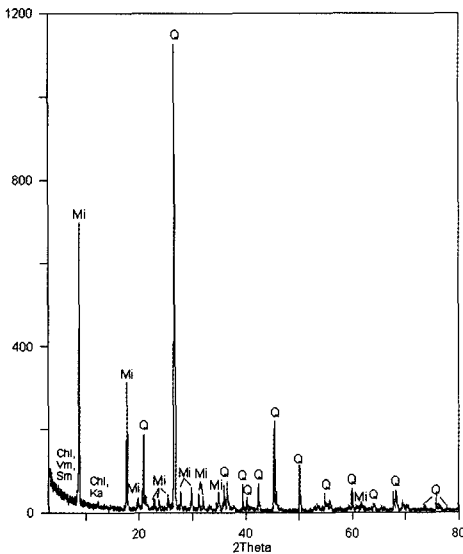


Fig. 9. XRD peak of sample Mu26.

6에서 풍화가 심한 부분(1m 자 부분)에서 시료(Mu66)를 채취한 부분이다. 시료 Mu66에 대하여 X선회절분석을 한 결과, 구성광물은 주로 석영과 운모류이며, 녹니석, 스멕타이트, 벤투클라이트가 포함되어 있다(Fig. 8).

한편 Mu66과 동일한 광물로 구성된 암석을 비교하기 위해 19개 암석과 토양에 대하여 X선 회절분석을 실시하였다. 풍화도양 Mu66의 X선 회절분석 결과와 가장 유사한 구성광물을 가진 암석은 견운모석영편암

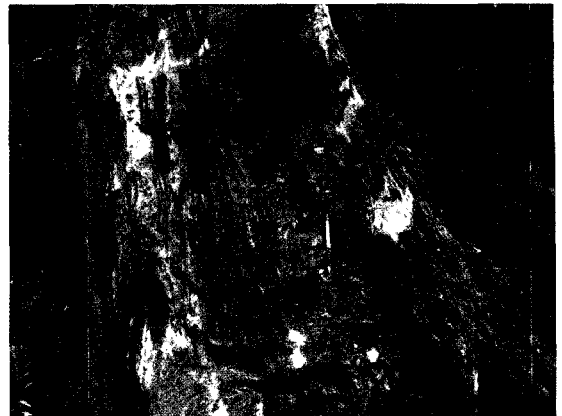


Fig. 10. A outcrop of calcareous rock (Mu67).

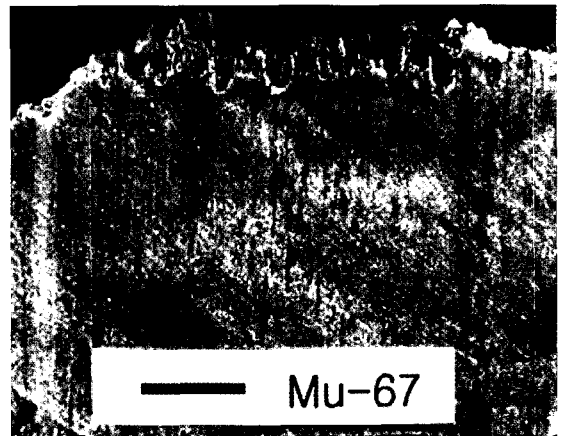


Fig. 11. A cutting plane of weathered calcareous rock.

인 Mu26과 Mu27이었다(Fig. 9). 이는 풍화가 현저한 곳에서는 방해석이 용식되어 유실되고 비교적 풍화에 강한 광물만 잔류한 결과로 사료된다.

동일한 노두에서 풍화가 심하지 않은 부분(Fig. 6의 Mu67)은 청회색을 띠는 석회질암으로 수 mm 두께의 편암이 협재되어 있다(Fig. 10). 암석표면에서 볼록한 부분이 편암이고, 오목한 부분은 주로 석회암이다. 시료 Mu67의 절단면(Fig. 11)에서 밝거나 어두운 회색 부분이 석회암이며 줄무늬를 이루며 녹회색 또는 녹황색을 나타내는 부분이 편암이다. 요철된 표층부터 내부로 갈수록 황색 부위가 감소하는데, 이는 풍화가 표층에서 협재된 편암을 통해 시작되었음을 알 수 있다.

이 시료를 박편으로 제작하여 육안으로 관찰할 때, 암석표면(Fig. 12의 좌측)에 가까울수록 옅은 황색 내지는 녹황색을 띠는 부분이 많고, 멀어질수록 편암의



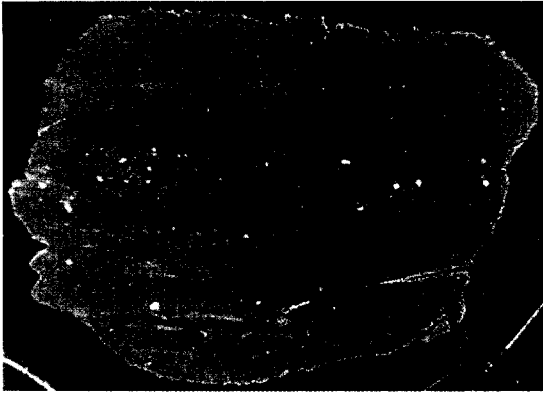


Fig. 12. A photograph of thinsection calcareous rock (Mu67).

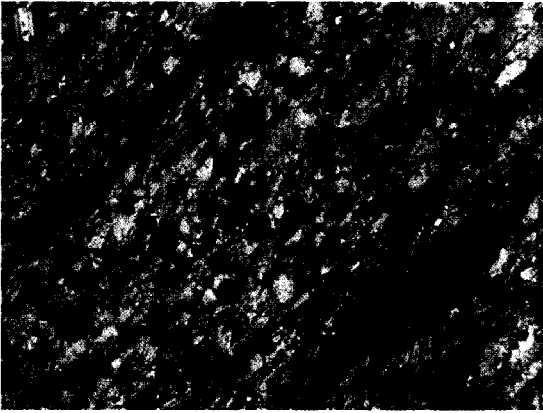


Fig. 13. A microphotograph of sample Mu67 (right circle of Fig 12 (5×, cross Nicol).

색이 백색으로 밝아짐을 알 수 있다. 석회암 내에서 황색을 띠거나 백색을 나타내는 1 mm 이하의 박층은 운모와 석영으로 구성되어 있다. Fig 13은 시료67에서 비교적 풍화가 덜 진행된 부분(Fig. 12의 우측 원 부분)의 현미경사진으로 방해석의 석회암 사이에 운모가 주 구성광물인 편암이 협재되어 있다.

Fig.14와 15는 Fig. 12의 좌측 원 부분으로, 풍화가 상당히 진행되어 육안상 황색으로 보이는 곳의 현미경 사진이다. Fig. 14(개방 니콜)에서 방해석과 인접하여 열은 녹색으로 변질된 부분이 녹니석이며, 이 녹니석은 편암의 내부로 갈수록 줄어드는 경향을 보인다. 편암층 내부에서 밝은 띠 또는 점상으로 보이는 광물이 석영이고, 검게 보이는 반점은 불투명 금속광물이다. Fig. 15의 직교니콜 사진에서 편암부 내부의 관상광물은 대부분 운모류이다. 따라서 이 지역 석회질암의 용

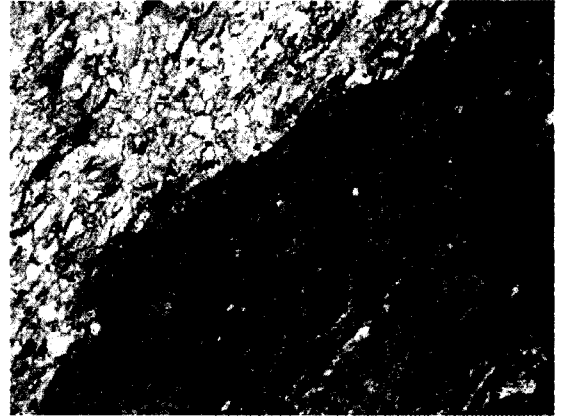


Fig. 14. Microphotograph of sample Mu67 (left circle of Fig 12 (10×, open Nicol).

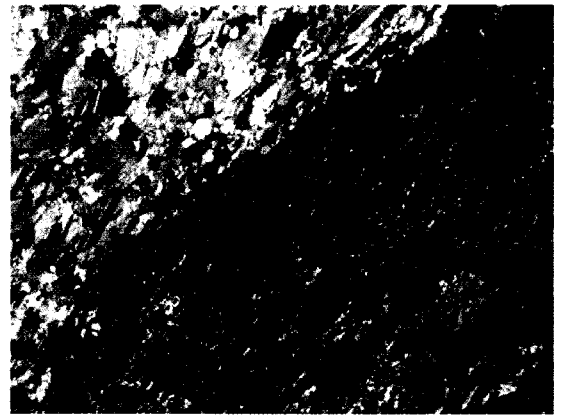


Fig. 15. Microphotograph of sample Mu67 (left circle of Fig 12 (10×, cross Nicol).

식작용은 지하수가 통과할 수 있는 편암부위에서 시작되었음을 지시한다.

**사례 3:** 표면에서의 풍화가 보다 많이 진행된 석회질암(Mu16)노두에서 풍화 양상을 관찰하였다(Fig. 16). 노두 Mu16은 앞에서 언급한 노두 Mu66과 20 m 정도 떨어져 있다. Fig. 16에서 동그란 부분은 동전이며, 풍화되고 남은 황색의 잔존물이 닭의 벼슬처럼 돌출되어 있다. Fig. 17은 노두 Mu16에서 채취한 풍화잔존물을 포함한 시료의 절단면으로 방해석의 풍화표면은 갈색 거품이 덮고 있는 것 같은 형태를 보인다. 그러나 석영과 운모로 구성된 편암 부분은 적갈색을 띠며 돌출되어있고, 내부로는 적갈색 풍화물이 식물의 뿌리처럼 암석 내부까지 침투되어 있다.



Fig. 16. Photograph of limestone outcrop (Mu16). Many yellow projecting parts are weathered schist.

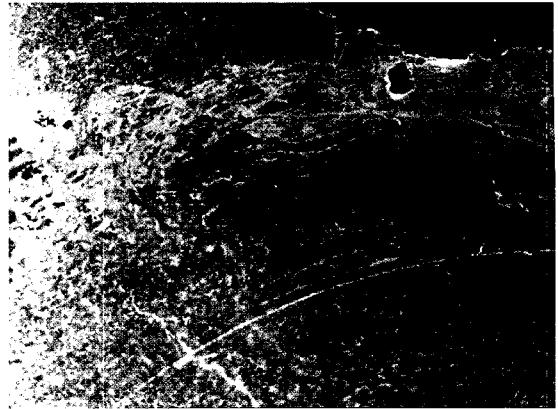


Fig. 18. Photograph of thin section sample Mu16. yellow color is weathered schist.

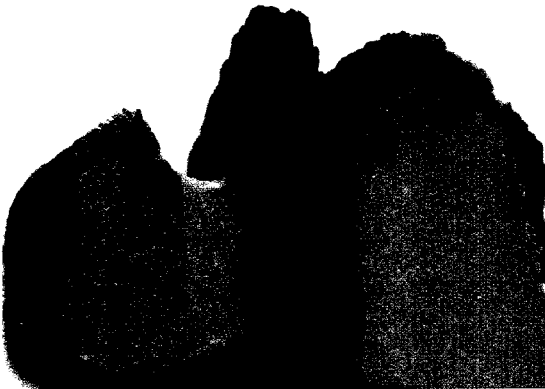


Fig. 17. Rock specimen of outcrop (Mu16). reddish brown projecting part is weathered schist, gray part is limestone.

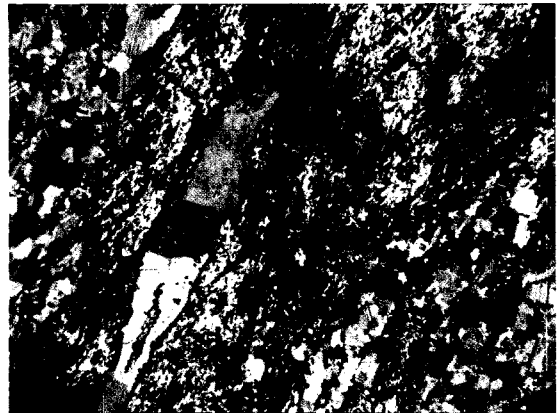


Fig. 19. Microphotograph of sample Mu16 (yellow part of Fig. 18 (10 $\times$ , cross Nicol).

Fig. 18은 Mu16의 박편사진으로, 풍화된 편암 부분은 선명한 황색을 나타내며, 회색으로 나타나는 넓은 부분은 대부분 방해석이다. 선명한 황색을 나타내는 부분에서도 자세히 관찰하면 회색의 방해석이 엽리를 따라 부분적으로 분포함을 알 수 있다.

풍화된 황색부분을 현미경으로 관찰하면, Fig. 19에서와 같이 변질된 편암과 방해석 사이가 겹겹게 나타나는데 이 부분이 육안관찰에서는 황색으로 보인다. 노두에서 닭의 벉슬처럼 돌출된 노란색 풍화잔류물에 대하여 X선회절분석을 한 결과, 풍화잔류물의 구성광물은 풍화되지 않은 편암과 유사한 석영과 운모였다.

Fig. 18에서 관찰되는 황색부분의 광물상을 구분하기 위하여 EPMA로 정성분석을 실시하였다. Fig. 20(100배 확대), Fig. 21(200배 확대), Fig. 22(1000배 확대)는 박

편의 황색부분 일부를 확대하여 영상처리 한 것이다, Fig. 20과 21의 □ 부분은 다음 확대 부분이다.

Fig. 22에서 좌측 하단의 비교적 평탄하고 밝은 회색(Cc)을 보이는 부분은 방해석이다. Fig. 22의 중앙 상부와 우측에서 다소 어두운 부분(Mi)은 막대 모양의 광물이 방향성을 가지고 배열된 것을 확인할 수 있다. 이들이 견운모(백운모)이고, 아주 검은 부분은 풍화되어 떨어져 나간 부분이다. 여기서 운모와 방해석의 경계를 따라 아주 밝게 빛나는 불규칙한 부분들이 철산화물이다. 이 철산화물이 박편 두께에서 겹쳐 보이면 육안상 황색으로 관찰된다. 방해석 내의 철산화물은 협재된 편암 주변에 주로 분포함을 알 수 있다. 이로서 석회암의 용식을 일으키는 지하수는 편암을 통해 공급된 것으로 해석할 수 있다.



Fig. 20. BSE image of sample Mu16 (×100).

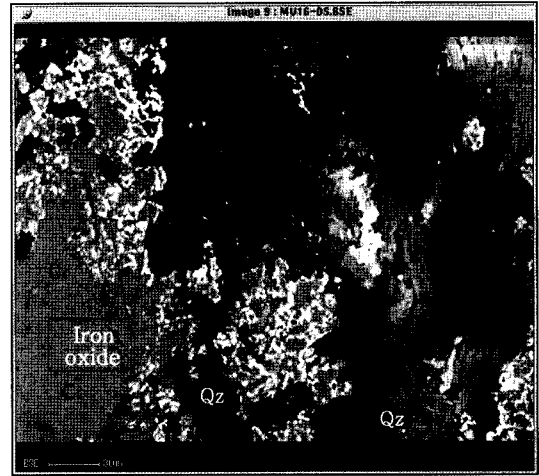


Fig. 22. BSE image of sample Mu16 (×1000). Cc: calcite, Qz: quartz, Mi: mica.

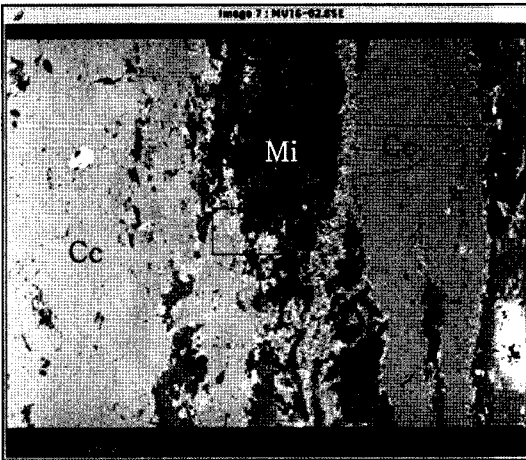


Fig 21. BSE image of sample Mu16 (×200).

## 결 론

본 연구의 결과 유문암과 화강암의 분포지역으로 알려진 교촌리 지역은 지하 기반암은 순수한 석회암이거나 얇은 편암이 끼어있는 석회질암으로 밝혀졌다. 또한 그 분포도 예전에 알려진 바와 같이 소규모 점상으로 산재된 석회암이 아니라 광주전전단대와 나란히 4 km 이상 대상으로 분포하는 두꺼운 석회암 층임을 알게 되었다. 이러한 석회암층의 분포는 향후에 발생할 수 있는 석회암지역의 재해를 예측하는데 매우 유용한 자료가 될 것이다.

석회질암은 심한 변형작용을 받아 소규모의 습곡과 단층으로 교란되어 있다. 석회암층에 형성된 습곡의 배

사 부분에 소규모의 공동들이 자주 발견되는데, 이는 습곡작용시 약화된 배사부분이 지하수에 용식되어 형성된 것으로 판단된다.

연구 지역 석회암 내에는 수 mm 이상의 편암이 협재되어 있으며, 이 편암은 판상광물(녹니석, 운모)과 석영, 또는 신장된 렌즈상의 석영으로 구성되어 있다. 지하수는 석회질암에 협재된 판상광물 틈새로 침투하여 편암 내의 흑운모이 녹니석으로 변질되고, 이어서 편암 주위의 방해석이 용식되었다. 연구지역의 석회공동은 구조적인 이유와 석회질암의 용식작용에 의해 생성되었을 것으로 판단된다.

과거에 지반침하가 일어난 성남리와 본 연구 지역 사이에는 불무재라고 하는 저수지가 있었으나 현재는 매립하여 공원을 만들었다. 북북동-남남서 방향으로 발달한 무안읍 성남리 석회암지역에서 지반침하는 과거의 불무재를 중심으로 양 방향으로 확산되었다. 이 불무재를 사이에 두고 동일한 방향으로 분포한 본 연구 지역도 불무재와 가장 가까운 무안읍 교촌리에서 지반침하가 발생했다는 점에서 불무재의 매립에 의한 지하수 공급차단이 지반침하의 원인일 가능성이 있다. 무안지역은 저수지 매립에 의한 지하수 공급중단과 무분별한 농업용수 개발로 석회공동을 지지하는 지하수가 고갈되어 붕괴가 일어난 것으로 해석된다.

## 사 사

이 논문은 2004년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며, 원고를 읽고 도움을 주신 김춘

식 박사님과 익명의 심사자들에게 감사드립니다. 현장조사와 자료수집에 협조해 주신 한국농촌공사 서구원 박사님과 무안군 관계자, 그리고 야외조사와 실내실험을 도와준 손정모, 최원영 군에게 고마운 마음을 전하고자 한다.

### 참고문헌

- 고진석, 박영석, 장우석, 박삼영, 2002, 무안읍 일원 지반침하 지역의 GPR 및 시추탐사. 한국자원공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리탐사학회, 대한지질학회 2002년도 춘계 공동학술발표회 논문집, 440-443.
- 김정환, 홍승호, 황상구, 1982, 신흥지질도폭 설명서, 27 p.
- 김춘식, 정의진, 윤운상, 2007, 석회암지역 재해등급도 작성연구, 암석학회 2007년 학술심포지엄, 32-48.
- 무안군, 2006, 교촌주거지 지반침하지역 정밀안전진단조사 보고서. 250 p.
- 박영석, 2005, 환경지질연구정보센터 연구동향.
- 이병주, 김정찬, 김유봉, 조동룡, 최현일, 전희영, 김복철, 1997, 광주 지질도폭 설명서. 한국자원연구소. 32 p.
- 최위찬, 황상구, 김영범, 1986, 영광도폭 지질보고서. 31 p.
- 최승오, 고중배, 1971, 무안지질도폭 설명서, 국립지질조사소. 12 p.
- 황재하, 최범영, 김복철, 기원서, 송교영, 2000, 무안 지질도폭보고서, 한국자원연구소. 58 p.

---

(2007년 3월 27일 접수; 2007년 4월 25일 채택)