

## 경주시 양남면 제4기 해안단구퇴적층내 혼펠스 자갈의 화학적 풍화작용

### Chemical Weathering of Hornfels Pebbles in the Marine Terrace Deposits, Yangnam-Myon, Gyeongju

정 기 영 (Gi Young Jeong)\* · 이 봉 호 (Bong Ho Lee)

안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

요약 : 경주시 양남면의 해안단구퇴적층에 풍부히 함유된 혼펠스 자갈의 풍화작용을 X선회절분석, 주사전자현미경관찰, 화학분석을 이용하여 조사하였다. 분석결과, 혼펠스 자갈 풍화 초기에 사장석이 가장 먼저 용탈되어 공극을 형성하며, 그 후 풍화가 진행됨에 따라 흑운모는 흑운모-버미큘라이트 혼합층(hydrobiotite)으로 그리고 녹니석은 녹니석-버미큘라이트 혼합층 광물로 변질되며, 사장석의 풍화산물로 할로이사이트가 부분적으로 침전되었다. 그러나 석영과 K장석은 거의 변질되지 않았다. 단구의 고도 차이에 따른 풍화각 두께와 생성되는 광물종의 차이가 인지되었다. 하부의 제2단구에서는 대체로 사장석의 약한 풍화작용이 주를 이루고 흑운모와 녹니석의 풍화작용은 관찰되지 않았으나, 상부의 제3단구에서는 사장석의 심한 풍화작용과 함께 흑운모와 녹니석이 혼합층으로 풍화되었다. 그러나 동일 단구퇴적층내에서도 풍화각 두께와 생성되는 광물종의 변화가 있으며, 이는 국지적인 지형변화에 따른 배수조건에 기인한 것으로 보인다.

주요어 : 제4기, 풍화, 자갈, 단구, 흑운모, 녹니석, 할로이사이트

**ABSTRACT :** Weathering of hornfels pebble in the marine terrace deposits, Yangnam-Myon, Gyeongju was investigated by X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and chemical analysis. In the early stage of weathering, only plagioclase was leached leaving pores. With progress of weathering, biotite and chlorite were transformed to hydrobiotite and chlorite-vermiculite, respectively. Quartz, K-feldspar, and muscovite were not altered. Thickness of weathering rinds and their mineralogical characteristics were different between terraces of different elevations. In the lower second terrace, the weathering of pebble was dominated by the decomposition of plagioclase, while in the upper third terrace, weathering was characterized by the transformation of biotite and chlorite with precipitation of halloysite from the weathering of plagioclase. Thickness of weathering rind and weathering products were varied even within the same terrace deposit probably due to local variation of drainage conditions.

**Key words :** Quaternary, weathering, pebble, terrace, biotite, chlorite, halloysite

\*교신저자: jearth@andong.ac.kr

## 서 언

경주 지역의 해안 지역을 따라 분포하는 4기 단층들은 구조물의 안전에 영향을 끼칠 수 있는 지진의 근원으로써, 그 연대는 부지 선정과 구조물 설계시 고려되어야 한다. 단층의 연대측정은 단층점토를 대상으로 Rb-Sr, K-Ar 등의 방사성 동위원소를 이용한 방법(정창식 외, 2000; Cheong *et al.*, 2001; 정창식 외, 2003)과 ESR법(Lee and Schwarcz, 2001)이 적용되고 있다. 그러나 단층점토의 방사성 동위원소연대는 심부단층운동직후 열수변질작용의 시기를 나타내며 관심의 대상인 지표근처에서의 최후 단층운동시기를 결정할 수는 없다. 또한 ESR법은 시료가 단층운동시에 충분히 reset되지 않았거나, 시료내에 석영의 양이 적거나, 지표 근처에서 오염되었을 경우에는 측정값이 최후 운동시기를 나타낸다고 보기 어렵다.

최근에 단층에 의하여 절단된 퇴적층을 대상으로 단층운동시기의 상한을 설정하기 위한 절대연대 측정 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 현재 해안 단구층들의 경우 잘 정립된 방법인 U계열 비평형법이나  $^{14}\text{C}$  연대측정에 이용할 만한 조개나 산호화석이 산출되지 않고 있다. 따라서 이런 문제점을 극복하기 위하여 최근 OSL(Cheong *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2003a, 2003b)과 화산재층서(Inoue *et al.*, 2002)를 이용한 연대측정이 활발히 적용되고 있으나, 아직 두 방법이 상호일치하지 않고 있어서 다른 여러 가지 방법들에 의한 추가적인 검증작업이 필요한 것으로 생각된다. 이러한 관점에서 측정된 절대연령을 검증하고 보완할 수 있는 자료로써 단층의 상대적 운동시기를 조사하여볼 필요가 있다(Jeong, 2002). 상대적 운동시기는 단층작용에 의하여 교란된 퇴적층의 비교 연구에 의하여 추정하여 볼 수 있다. 따라서 동해안에 나타나는 해안단구 퇴적층들의 풍화과정과 풍화도를 비교함으로써 해안단구퇴적층들의 상대적인 연령관계를 정립할 수 있고, 그에 따라 해안단구를 절단하는 단층의 절대연대를 제한할 수 있는 가능성도 있다. 이상의 관점에서 제4기 해안단구 퇴적층의 풍화작용에 대한 광물학적 연구의 필요성이 제기되었다. 해안단구 퇴적층은 대부분 자갈로 구성되어 있는데 그 중에서도 혼펠스 자갈이 가장 풍부하게 함유되어 있다. 본 연구

의 목적은 4기 단층이 분포하는 경주시 양남면 지역에서 단층으로 절단된 해안단구퇴적층의 광물, 미조직, 풍화도의 체계적 비교 분석에 근거하여 단구퇴적층의 상대적 시기를 결정하기 위한 예비연구로써 이 지역 해안단구 퇴적층의 주구성요소인 혼펠스 자갈의 풍화과정과 풍화산물의 광물학적 특성을 규명하는 것이다.

## 시료 및 방법

경주시 양남면 수림지역을 중심으로 야외에서 해안단구퇴적물 및 풍화물의 산출상태와 풍화양상을 조사하고 실내분석을 위한 시료들을 채취하였다(Fig. 1). 양남중학교 부근 2단구에서 시료 SU9를 채취하였다. 현대자동차연수원부지 내 3단구에서는 하위면에서 중위면의 수림단층에 가까워질수록 풍화도가 증가하는 경향이 있어서 3개의 시료(SU23, SU37, SU36)를 풍화도에 따라 체계적으로 채취하였다. 그리고 3단구 상위의 평탄한 단구층에서도 풍화도가 SU23과 유사한 시료 SU28을 채취하였다. 시료는 원조직이 파괴되지 않도록 폴리에틸렌 병에 밀봉하여 보관하였다. 기반암과 해안단구퇴적물 및 풍화물, 단층암 전암시료와 분리한 점토광물에 대하여 X-선 회절분석(X-ray diffraction, XRD)으로 광물학적 특성을 분석하였다. 전암 시료에 대하여 우선 XRD 분석을 실시한 다음 점토광물의 정확한 감정을 위하여 원심분리기로  $2\ \mu\text{m}$  이하의 점토를 분리하여 정향시료를 제작한 후에 원시료, 가열시료, 에틸렌 글리콜 처리 시료에 대하여 각각 XRD 분석을 실시하였다. 사용된 XRD기기는 회절빔 단색화장치가 부착된 Rigaku RINT2200 장비였으며 40 kV/30 mA에서 발생한 Cu X-ray를 이용하였다. 광물 및 암석의 변질조직관찰과 광물감정을 위하여 원조직이 보존된 시료를 대상으로 Jeong and Kim (1993)의 절차에 따라 에폭시 수지로 굳힌 후 연마박편을 제작하였다. 연마박편은 광학현미경을 이용하여 일차 관찰하고 필요한 경우 주사전자현미경의 후방산란전자(back-scattered electron, BSE)상을 이용하여 보다 정밀하게 관찰하였으며, 모광물 및 변질물의 원소조성은 에너지분산X선분광기(energy dispersive X-ray spectrometer, EDS)로 분석하였다. 이용된 주사전자현미경은 Oxford EDS가 부착된 JEOL JSM 6300 장비였다. 자갈

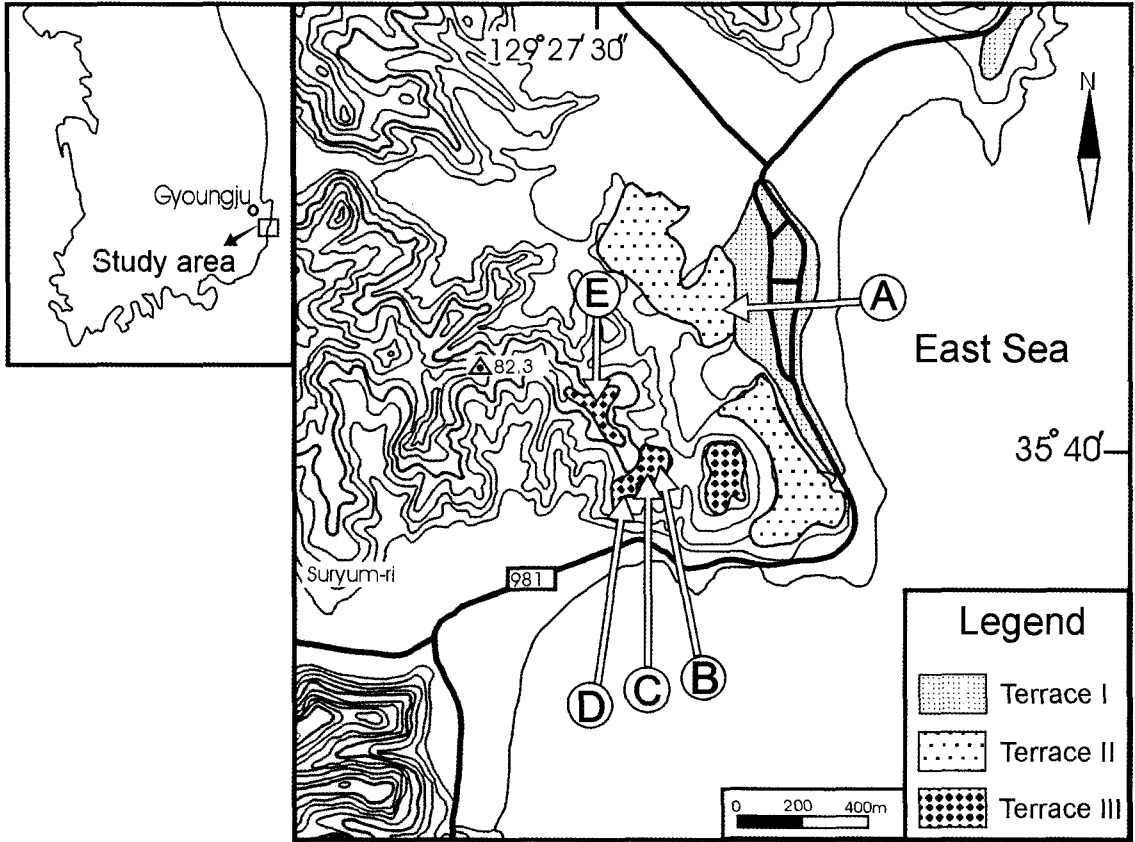


Fig. 1. Distribution of marine terrace deposits and location of samples (A: SU9, B: SU23, C: SU37, D: SU36, E: SU28).

풍화과정에서의 화학조성변화를 알아보기 위하여 자갈의 외부 풍화각과 내부 신선한 부분의 시료를 채취하여 Li-metaborate로 분해 및 용액화한 후 ICP 전암화학분석을 실시하였다.

### 결과 및 토의

#### 산출상태

경주지역의 연평균기온은 12.2°C, 연평균 강수량은 1091 mm이다. 이 지역의 광역 지질은 백악기 화강암, 장석질 사암, 혼펠스, 제3기 염기성화산암류, 역암, 그리고 미고결 제4기 퇴적층으로 구성되어 있으나, 연구지역에서는 하부에 현무암류가 분포하고 상부에 현무암질 라필리 응회암류가 분포하고 있다. 특히 작은 부석들로 구성된 현무암질 라필리 응회암은 속성과

정에 의하여 현재 벤토나이트로 변질되어 있다. 이 지역에는 3개의 고기 해안단구퇴적층이 3~5 m(제1단구), 10~15 m(제2단구), 45~55 m(제3단구) 고도에서 산출되고 있다(Fig. 1) (이봉주의, 1999). 제1단구는 대부분 주거지로 활용되고 있어서 퇴적층의 확인이 어려우나, 제2단구와 제3단구 퇴적층은 부분적으로 단면이 노출되어 있다. 제2단구는 양남중학교 부근, 판성해수욕장 뒷편의 도로신설공사현장과 양남 북서부의 도로신설을 위한 유적발굴현장에 절개된 단면에서 매우 잘 발달된 퇴적층 단면을 관찰할 수 있었다. 그러나 공사현장이나 유적 발굴지의 경우, 공사가 완료된 현재는 매몰되거나 그라우팅처리되어 노두를 볼 수가 없다. 제3단구 퇴적층은 제4기 수렴단층에 의하여 절단되어 있으며 현대 자동차연수원 부지내에 주로 산출된다.

이 지역의 해안단구 퇴적층은 주로 흑운모 화

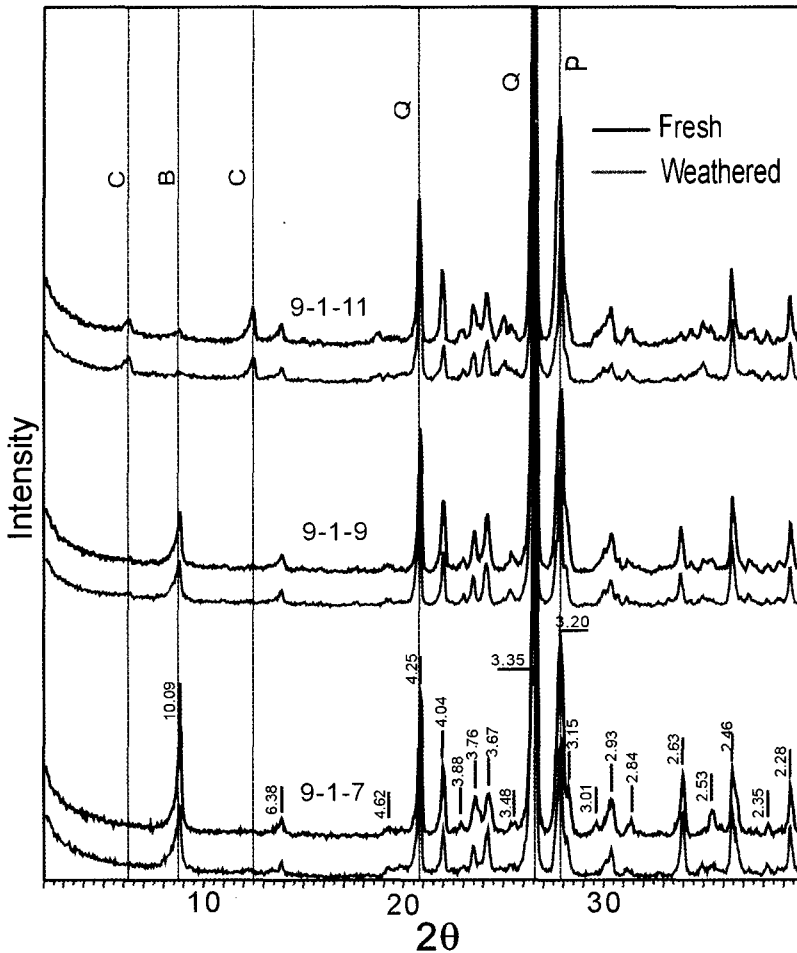


Fig. 2. XRD patterns of the fresh inner parts (black lines) and their weathering rinds (gray lines) of the weakly weathered hornfels pebbles (SU9-1-7, 9, 11) from the 2nd terrace. B: biotite, C: chlorite, P: plagioclase, Q: quartz.

강암, 화강반암, 장석질사암, 혼펠스, 안산암, 현무암, 안산암질/현무암질 응회암 자갈로 구성된 자갈층이 우세하며, 제2단구 퇴적층에서는 모래-자갈층이 협재되어 있다. 단구퇴적층의 자갈종은 양남 일원 현생 해빈들의 자갈종과 거의 동일하다. 자갈의 풍화작용이 해안단구 퇴적층의 풍화작용을 대표하며, 자갈 중에서도 인근 경상계 이암 및 실트암의 열변성 산물인 흑색, 암갈색, 암녹색 혼펠스 자갈이 가장 흔하다. 양남 일원의 현생 해빈들에서도 혼펠스 자갈들이 흔하게 분포하고 있다. 혼펠스의 경우, 가장자리를 따라 풍화각(weathering rind)이 매우 뚜렷한 경

계를 보이며 발달되어 있는 반면에 산성화산암이나 화강반암 등의 회백색 자갈들은 풍화도가 약하거나 풍화되어도 풍화테를 구분하기가 쉽지 않았다. 자갈의 풍화도에 있어서 제2단구와 제3단구 자갈의 차이는 명백하다. 제3단구 자갈은 심하게 풍화되어 손으로 약간의 힘만 가해도 부서지며 매우 두꺼운 풍화각이 발달되어 있고 자갈 사이 공극이 담황갈색 점토로 뺨뺨이 메워져 있는 반면에, 제2단구 자갈은 보다 얇은 회백색 풍화각을 보이고 있으며, 자갈 사이의 공간은 상위 토양층에서 내려온 점토광물로 부분적으로 충전되어 있다. 그러나 제3단구에서도 수

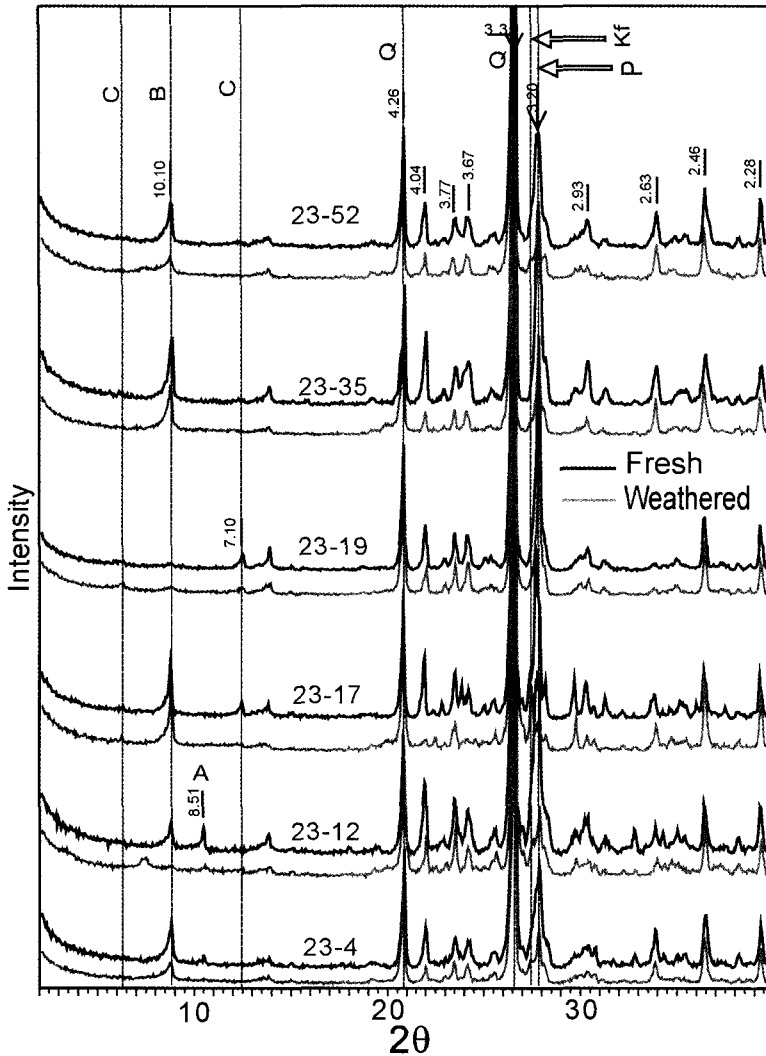


Fig. 3. XRD patterns of the fresh inner parts (black lines) and their weathering rinds (gray lines) of the weakly weathered hornfels pebbles (SU23-4, 12, 17, 19, 35, 52) from the 3rd terrace. A: amphibole, B: biotite, C: chlorite, Kf: K-feldspar, P: plagioclase, Q: quartz.

럼단층대에 접한 자갈층은 좀더 심하게 풍화되어 있는데, 아마도 단층대를 따른 지표수의 빠른 순환과 용탈 작용에 기인한 것으로 판단된다.

#### XRD

풍화된 자갈 내부의 신선한 흑색 자갈의 XRD 분석결과, 주 광물은 석영, 사장석, K장석, 흑운모, 녹니석이며, 각섬석이 일부 시료에 부분적으로

함유되어 있다(Figs. 2, 3). 수렴지역 제2단구의 SU19와 제3단구 수렴단층대 아래쪽에서 채취한 SU23 혼펠스 자갈들의 풍화태의 XRD 분석에서 일부 시료에 hydrobiotite가 형성되어 있으나, 대부분의 시료에서 흑운모는 변질되지 않았으며 사장석이 부분적으로 용해되었다(Figs. 2, 3). 그러나 3단구의 보다 풍화된 SU37의 자갈 풍화산물의 XRD 분석에서 흑운모는 대부분 hydrobiotite로 풍화되었고 사장석 풍화산물로 10 Å-할로이

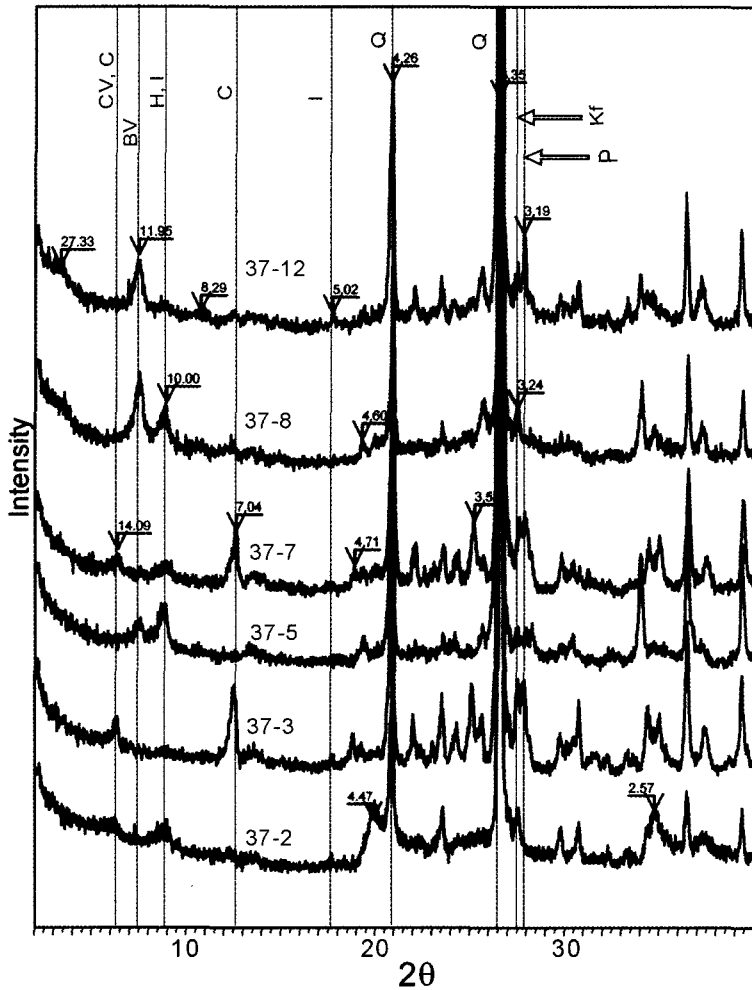


Fig. 4. XRD patterns of the severely weathered hornfels pebbles (SU37-2, 3, 5, 7, 8, 12) from the 3rd terrace with no fresh core. BV: hydrobiotite, C; chlorite, CV: interstratified chlorite-vermiculite, H: halloysite, I: illite, Kf: K-feldspar, P: plagioclase, Q: quartz.

사이트가 생성되어 있음이 확인되었으나 녹니석은 거의 풍화되지 않았다(Fig. 4). 보다 상위의 수렴단층대 부근의 SU36 혼펠스 자갈들은 대체로 내부에 신선한 부분이 남아있지 않을 정도로 심하게 풍화되어 있다. 자갈의 XRD 분석결과, 사장석은 대부분 용해되어 없어졌으며, 주요 풍화산물로서 흑운모로부터 변질된 hydrobiotite, 사장석의 풍화산물인 10 Å-할로이사이트외에 추가로 녹니석이 녹니석-버미큘라이트 혼합층으로 풍화되어 있음을 알 수 있었다(Figs. 5, 6, 7).

#### 주사전자현미경

풍화테가 잘 발달된 SU23 자갈 박편의 BSE 관찰결과, 사장석이 선택적으로 용해되고 공극이 생성되어 풍화테가 형성되고 있음을 볼 수 있으나, 흑운모나 K장석은 XRD 분석결과와 일치하게 형태 변화가 거의 관찰되지 않는다(Fig. 8). 그러나 일부 흑운모는 EDS 분석에서 K의 강도가 약화되어 있어서 부분적으로 hydrobiotite로 풍화되어 있는 것으로 보인다. SU36의 심하게 풍화된 자갈 내에는 사장석의 용해작용으로 미

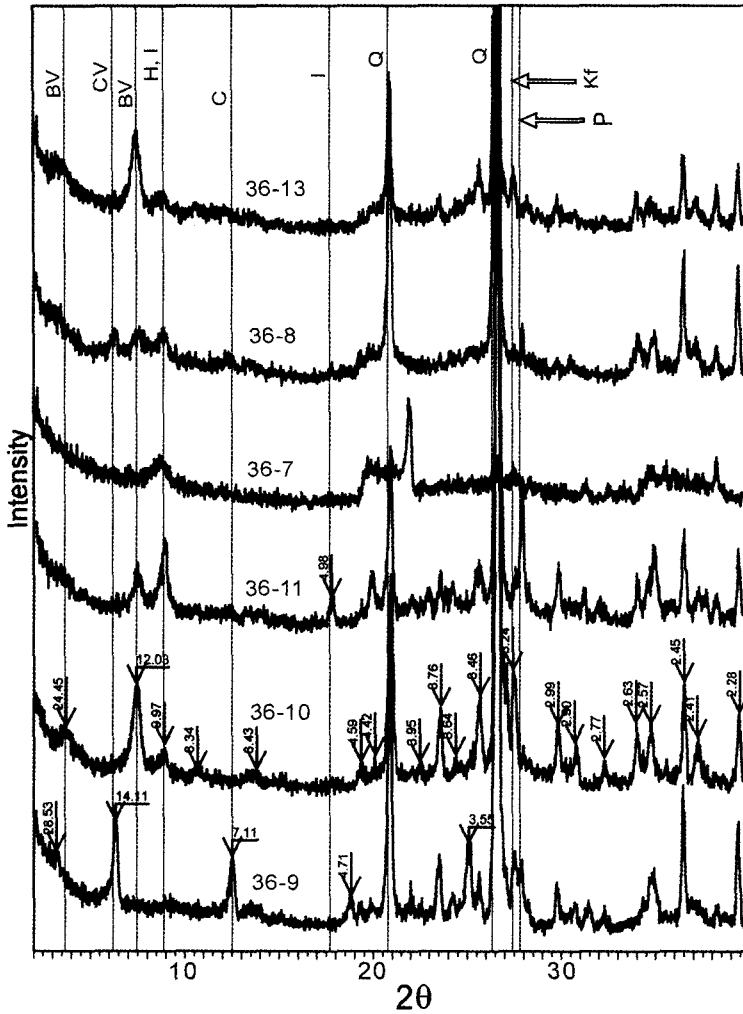


Fig. 5. XRD patterns of the severely weathered hornfels pebbles (SU36-7, 8, 9, 10, 11, 13) with no fresh core from the Suryum fault site in the 3rd terrace. BV: hydrobiotite, CV: interstratified chlorite-vermiculite, H: halloysite, I: illite, Kf: K-feldspar, P: plagioclase, Q: quartz.

세한 공극들이 형성되어 있으며, 일부 공극의 한가운데에는 작은 사장석 결정들이 잔존되어 있다(Figs. 9a, 9b). 자갈 사이 공극은 할로이사이트 점토로 충전되어 있으나 자갈내에 사장석들의 용해로 생긴 공극에는 충전 점토가 관찰되지 않았다. 이는 사장석의 용해 작용이 주로 자갈 내에서 일어나고, 자갈 사이의 공간에서는 점토 광물의 침전이 주로 일어나고 있음을 의미한다. 흑운모는 모두 심하게 팽창되어 vermicular morphology를 보이며, XRD 분석과 EDS 분석 결과

를 종합하면 hydrobiotite와 kaolin광물의 혼합체임을 알 수 있다(Figs. 9b, 9c, 9d) (Jeong *et al.*, 2002). Vermicular morphology는 층상규산염 광물에서 풍화되어 생성되는 캐올리나이트의 전형적인 형태로 알려져 있다(Jeong, 1998, 2000).

#### 화학분석

풍화도가 비교적 약한 SU9, SU23, SU28의 풍화된 혼펠스 자갈의 신선한 내부와 풍화각 사

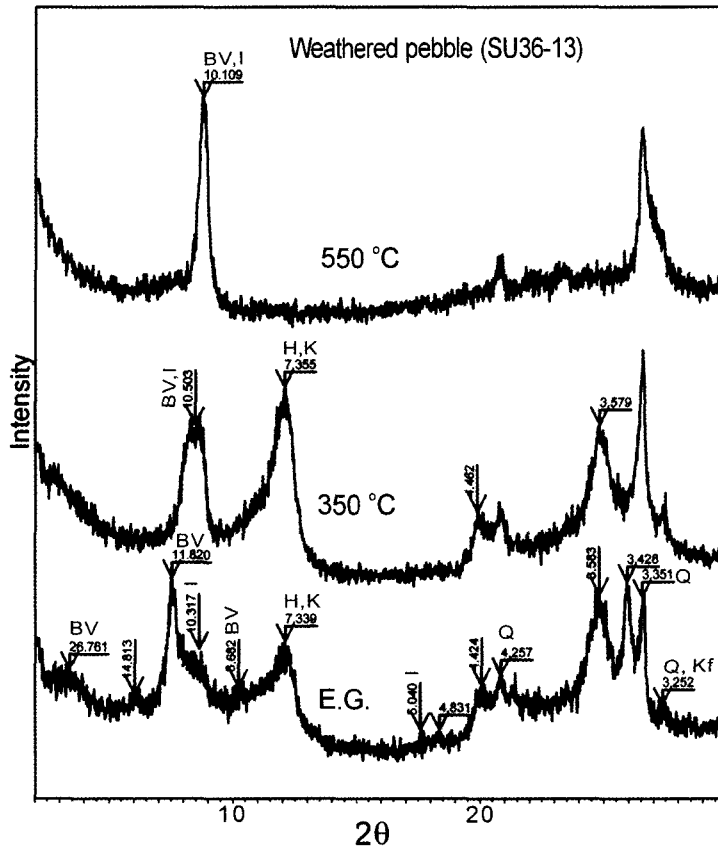


Fig. 6. XRD patterns of the hydrobiotite after ethylene glycol solvation and heating treatments for oriented clay fraction prepared from the weathered hornfels pebble (SU36-13).

이의 조성 변화를 보면 Ca, Na, Al, Si의 순서로 손실되는 경향을 보인다(Table 1, Table 2). 이는 주로 사장석의 용해작용에 기인한다. 사장석에 함유된 Ca와 Na의 함량변화로부터 계산된 손실된 사장석의 함량은 42~96% 정도의 범위를 보이며 궁극적으로 모든 사장석이 용해되는 방향으로 반응이 진행되고 있다. 반면에 알칼리 원소인 K의 함량은 큰 변화가 없는데 이는 K장석과 흑운모가 아직 큰 풍화반응을 겪지 않았음을 의미한다.

#### 풍화각 두께 변화

풍화각의 두께를 비교한 결과, 제2단구 자갈들은 중앙값이 0.8~3.2 mm의 범위를 보이며, 제3단구 자갈들은 6.7~8.0 mm의 범위를 보인다

(Table 3). 따라서 제3단구는 제2단구에 비하여 3~8배 정도의 풍화도를 보이며 뚜렷한 상대적 연대차이를 보인다. 그러나 풍화의 강도는 일반적으로 지형적인 배수조건 등에 따라 크게 변한다. 초기에는 풍화가 신속히 진행되다가, 생산된 점토광물들이 공간을 메우고 일차광물을 피복하여 광물의 용해반응과 물의 순환이 느려지게 되면 풍화속도는 일반적으로 크게 느려지는 경향이 있다. 즉 풍화각의 두께가 풍화연대와 선형적인 관계를 갖는 것은 아니기 때문에, 두께 차이가 곧바로 절대연대의 차이와 일치하지는 않는다. 제3단구 퇴적층 중 allophane으로 교결된 모래자갈층의 자갈풍화태 두께는 중앙값이 0.5 mm로서 제2단구와 제3단구를 통틀어서 가장 미약한 풍화도를 보인다. 이는 Jeong *et al.* (2002)에서 토의된 바와 같이 allophane이 불-암



**Table 1.** Chemical changes in the weathering of hornfels pebbles in the marine terrace deposits. B: inner fresh part, W: outer weathering rind. Unit: major element wt%, trace element ppm

Sample	9-1-9		28-3		28-14		28-11		23-19		23-52		23-17	
	B	W	B	W	B	W	B	W	B	W	B	W	B	W
SiO <sub>2</sub>	70.73	72.98	69.42	69.87	69.59	71.24	62.67	64.84	77.62	79.18	72.75	72.08	70.8	73.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.31	10.73	15.58	13.88	13.17	11.17	16.98	12.47	10.91	9.67	12.83	11.64	14.26	11.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.92	5.44	2.84	3.57	5.14	6.01	5.86	8.96	2.71	3.25	3.81	5.6	3.58	5.16
MnO	0.055	0.058	0.063	0.08	0.102	0.096	0.092	0.127	0.055	0.049	0.068	0.08	0.074	0.074
MgO	1.46	1.67	0.93	0.95	2.2	1.98	1.88	2.88	0.65	0.65	1.38	1.98	0.89	1.24
CaO	2.39	1.12	1.93	0.46	2.06	0.19	2.39	0.08	1.04	0.17	1.77	0.14	2.23	0.69
Na <sub>2</sub> O	4.23	3.48	5.69	4.54	2.71	0.99	2.56	0.23	4.17	3.24	3.21	1.6	3.87	1.33
K <sub>2</sub> O	1.62	1.59	1.84	2.52	2.34	2.52	4.51	5.77	1.18	1.19	2.42	2.95	3.12	3.44
TiO <sub>2</sub>	0.624	0.746	0.691	0.955	0.589	0.696	0.773	1.127	0.453	0.487	0.548	0.769	0.62	0.841
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.03	0.13	0.04	0.15	0.11	0.13	0.05	0.11	0.06	0.12	0.04	0.12	0.07
LOI	0.99	1.65	1.02	1.95	2.15	4.8	1.68	2.56	1.25	2.06	0.9	2.74	0.46	2.34
Total	99.5	99.5	100.14	98.81	100.18	99.8	99.52	99.08	100.16	100	99.82	99.61	100.03	99.96
Ba	94	116	1151	1529	481	687	651	800	790	701	195	307	306	501
Sr	139	76	349	161	210	90	209	67	142	71	163	36	192	109
Zr	167	195	208	297	208	250	165	261	147	144	221	247	203	283
*LP%		42		53		79		96		39		75		76

Sample	28-10		28-16		23-35		23-4		23-12		9-1-12		9-1-11	
	B	W	B	W	B	W	B	W	B	W	B	W	B	W
SiO <sub>2</sub>	72.99	78.45	71.58	78.3	70.9	73.24	67.1	70.36	67.84	68.9	68.81	69.07	70.41	72.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.8	8.59	12.67	5.92	14.4	12.1	12.99	11.33	13.9	11.77	15.68	13.18	13.49	11.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.13	3.9	3.36	6.97	4.08	5.33	7.15	6.32	3.69	5.92	3.17	4.66	4.04	5.06
MnO	0.038	0.034	0.099	0.073	0.034	0.047	0.129	0.112	0.069	0.066	0.055	0.074	0.059	0.075
MgO	1.24	1.35	1.85	1.29	1.16	1.62	1.74	1.72	1.63	1.78	1.25	1.83	1.79	2.23
CaO	1.61	0.17	4.15	1.04	1.76	0.26	3.53	1.88	3.69	1.32	2.45	0.77	2.36	0.57
Na <sub>2</sub> O	3.57	1.25	3.9	0.5	4.51	1.79	2.34	1.45	3.75	2.1	5.38	3.58	4.3	3.13
K <sub>2</sub> O	2.16	2.57	1.47	2.24	1.62	1.89	3.42	3.66	2.42	2.83	1.84	2.1	0.67	1
TiO <sub>2</sub>	0.552	0.762	0.525	0.964	0.591	0.818	0.54	0.592	0.641	0.784	0.713	0.955	0.709	0.75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	0.05	0.12	0.14	0.13	0.04	0.15	0.06	0.14	0.16	0.17	0.05	0.16	0.03
LOI	1.92	2.95	0.5	2.57	0.89	3.07	0.85	2.13	0.85	3.55	0.62	3.29	1.7	3.14
Total	100.09	100.07	100.23	100.01	100.1	100.2	99.95	99.61	98.61	99.2	100.14	99.55	99.69	100.18
Ba	368	446	732	977	276	362	277	373	463	618	416	517	77	153
Sr	223	85	284	61	222	57	172	96	198	76	302	135	196	98
Zr	254	379	193	391	176	254	170	206	194	271	191	261	296	333
*LP%		80		90		76		48		62		59		47

\*Loss of plagioclase using TiO<sub>2</sub> as immobile component:  

$$\left\{ \frac{(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})}{\text{TiO}_2} \right\}_B - \left\{ \frac{(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})}{\text{TiO}_2} \right\}_W \times 100 / \left\{ \frac{(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})}{\text{TiO}_2} \right\}_B$$

석 반응을 방해하는 장벽 역할을 하여 자갈의 풍화가 저지되었기 때문이다.

### 결론

광물학적 분석결과를 종합하면 혼펠스 자갈 풍화과정에서 사장석이 가장 먼저 분해되어 용탈되어 공극을 남기거나 일부는 할로이사이트로

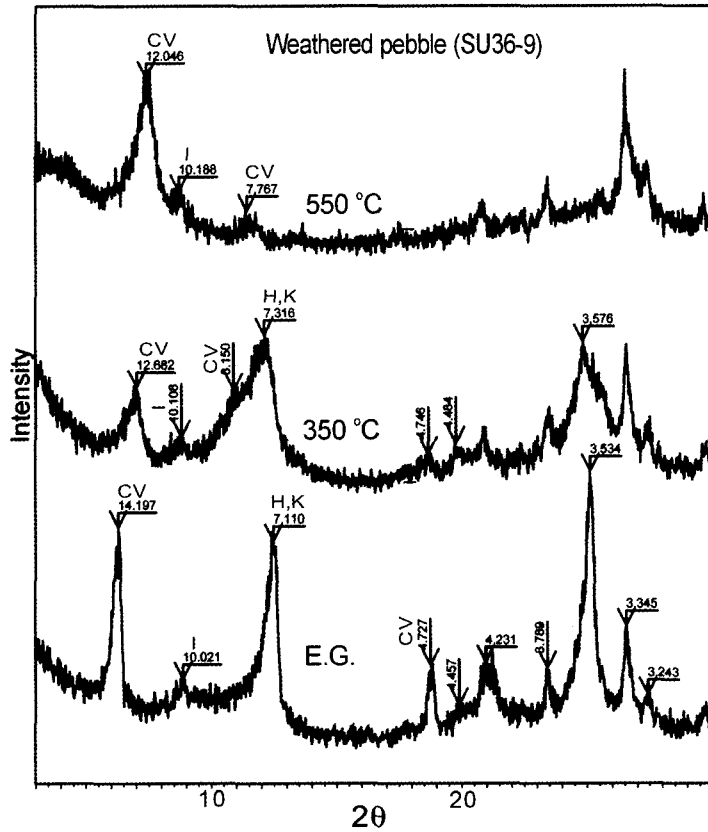


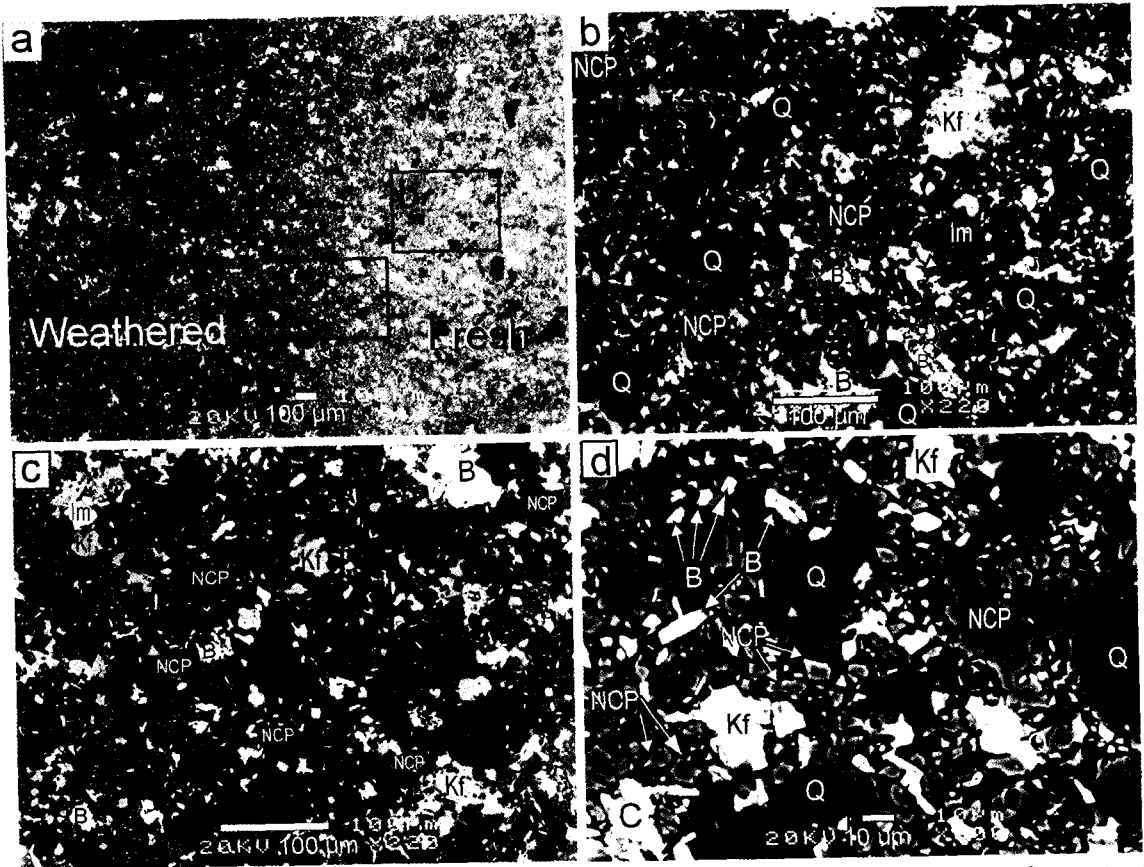
Fig. 7. XRD patterns of the interstratified chlorite-vermiculite after ethylene glycol solvation and heating treatments for oriented clay fraction prepared from the weathered hornfels pebble (SU36-9).

Table 2. Loss of cations in the weathering of hornfels derived from data in Table 1 after porosity correction using TiO<sub>2</sub> as an immobile component. Value indicates % change relative to fresh part. (-) indicates loss during the weathering

Sample	9-1-9	28-3	28-14	28-11	23-19	23-52	23-17	28-10	9-1-12	9-1-11	23-35	23-4	23-12	28-16	Average	1σ	Max	Min
SiO <sub>2</sub>	-14	-27	-13	-29	-5	-29	-24	-22	-25	-2	-25	-4	-17	-40	-20	11	-2	-40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-27	-36	-28	-50	-18	-35	-41	-51	-37	-20	-39	-20	-31	-75	-36	15	-18	-75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-8	-9	-1	5	12	5	6	-10	10	18	-6	-19	31	13	3	13	31	-19
MnO	-12	-8	-20	-5	-17	-16	-26	-35	0	20	0	-21	-22	-60	-16	19	20	-60
MgO	-4	-26	-24	5	-7	2	3	-21	9	18	1	-10	-11	-62	-9	20	18	-62
CaO	-61	-83	-92	-98	-85	-94	-77	-92	-77	-77	-89	-51	-71	-86	-81	13	-51	-98
Na <sub>2</sub> O	-31	-42	-69	-94	-28	-64	-75	-75	-50	-31	-71	-43	-54	-93	-59	22	-28	-94
K <sub>2</sub> O	-18	-1	-9	-12	-6	-13	-19	-14	-15	41	-16	-2	-4	-17	-7	15	41	-19

침전한다. 그 후 풍화가 진행됨에 따라 흑운모는 hydrobiotite로 변질되며, 그 후에 녹니석이 녹니석-버미큘라이트 혼합층 광물로 변질된다. 그러나 석영, K장석, 백운모, 견운모는 전체적으

로 거의 변질되지 않았다. 제2단구와 제3단구 자갈 사이에 고도 차이에 따른 풍화각 두께와 생성되는 광물종의 차이가 인지되었다. 제2단구 자갈에서는 대체로 사장석의 약한 풍화작용이



**Fig. 8.** BSE images of the weathered hornfels pebble (SU23-17). Thin section. a) Development of weathering rinds from fresh hornfels. b) Fresh hornfels. c) Interfacial region of fresh and weathered hornfels. d) Weathered hornfels. b, c, and d were magnified from a. B: biotite, C: chlorite, Im: ilmenite, Kf: K-feldspar, NCP: Na-Ca plagioclase, Q: quartz.

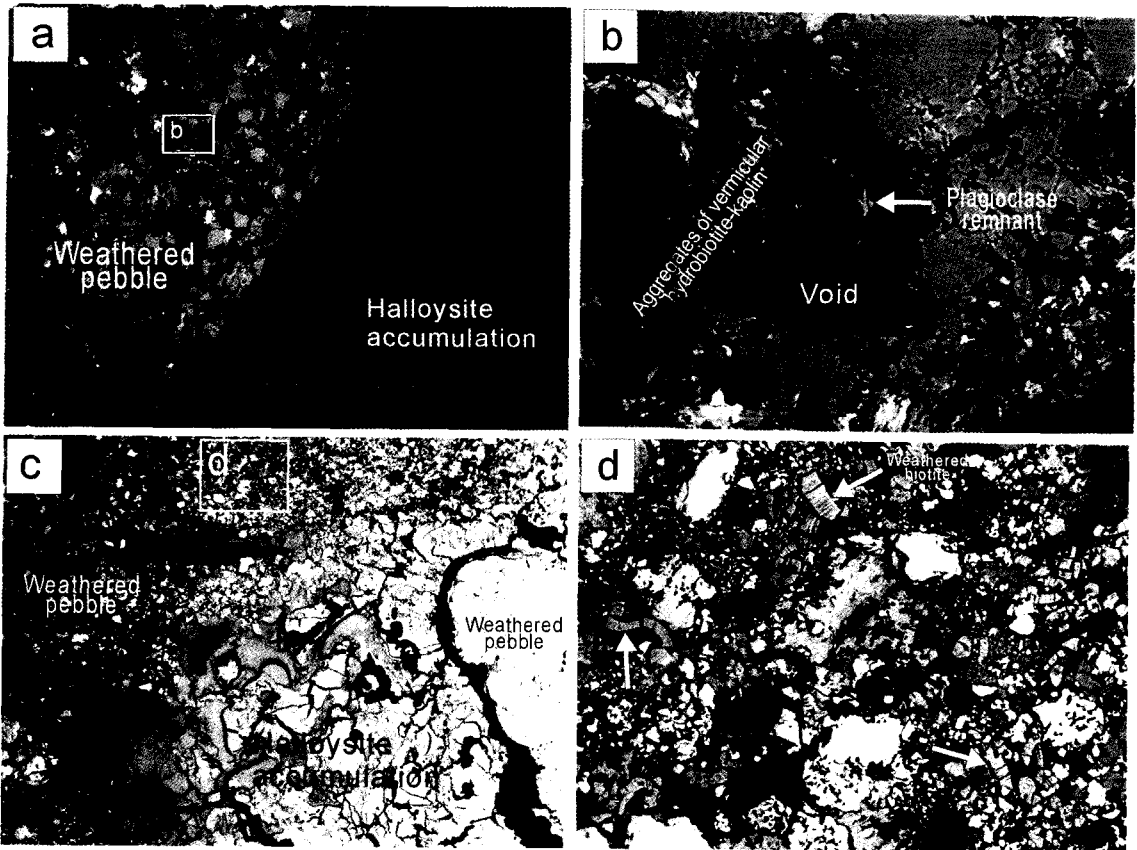
**Table 3.** Thickness of weathering rind of the weathered hornfels pebble in the marine terrace deposits (unit in mm)

	2nd terrace								3rd terrace		
	YN2	SU9-1	SU10	SU11	SU14	SU19-3	SU19-12	MT-4	SU23	SU28	JSU2
<i>n</i>	42	6	3	18	14	12	27	6	9	6	18
Mean	1.6	2.9	6.4	3.3	1.1	1.0	1.0	2.4	8.8	7.8	0.7
Median	<b>1.3</b>	<b>2.3</b>	-	<b>3.2</b>	<b>1.1</b>	<b>1.0</b>	<b>0.8</b>	<b>2.1</b>	<b>8.0</b>	<b>6.7</b>	<b>0.5</b>
Max	7.3	1.9	9.6	5.3	2.3	1.9	2.7	4.9	13.5	12.4	1.8
Min	0.6	0.6	4.1	1.8	0.5	0.6	0.3	1.5	5.9	4.9	0.3

YN2: Yangnam Middle School, SU9-1, SU10, SU11, SU19-3, SU19-12: archaeological site, SU23: lower platform of the 3rd terrace, SU28: the upper platform of the 3rd terrace, JSU2: pebbles within allophane-cemented layer in the Suryum fault site. MT-4: Jeongja.

주를 이루었으나, 제3단구에서는 흑운모와 녹니석도 혼합층으로 풍화되었다. 그러나 동일 단구 퇴적층내에서도 자갈 풍화각의 두께와 생성되는

광물종의 차이가 있으며, 이는 국지적인 지형과 배수조건의 차이에 기인한 것으로 보인다.



**Fig. 9.** BSE images of the weathered hornfels pebble (SU36). a, c) Weathered hornfels and halloysite accumulations between pebbles. b) Aggregates of vermicular kaolin-hydrobiotites. Magnified image from a. d) Vermicular kaolin (arrows) derived from biotite. Magnified image from c.

## 사 사

원고의 미비점을 지적하여 주신 황진연교수님과 익명의 심사위원께 감사드립니다. 이 연구는 2003년도 한국원자력안전기술연구원의 지원을 받아 수행되었다.

## 참 고 문 헌

- 이봉주, 류충렬, 최위찬 (1999) 경주시 양남면 일대의 제4기 단층. 지질학회지, 35, 1-14.
- 정창식, 최위찬, 김종욱, 이석훈, 정기영, 임창복, 장천중, 장호완 (2003) 왕산단층에 대한 루비듐-스트론튬 연대측정. 지질학회지, 39, 403-412.
- 정창식외 12인 (2000) 신기단층에 대한 절대연대 측정법 정립. 기초과학지원연구소, 한국원자력안전기술원, 131p.
- Cheong, C., Lee, S.H., Kim, J., Im, C.B., Chang, B., Jeong, G.Y., and Chang, H. (2001) Rb-Sr and K-Ar dating of fault gouges from the Ulsan fault zone, Southeastern Korea. European Union of Geosciences XI, April, 2001, Abstracts, p.595.
- Cheong, C.-S., Choi, J.H., Choi, S.J., Chwae, U., Hong, D.G., Jeong, G.Y., Im, C.B., Chang, C.J., and Chang, H.W. (2003) Dating late Pleistocene marine terrace system in Southeastern Korea. 16th INQUA Congress, Leno, Nevada, USA, July 23-30, 2003. Programs with Abstracts, p.229.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Jain, M., Cheong, C.S., and Chang, H.W. (2003a) Luminescence dating of well-sorted marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea. Quat. Sci. Rev., 22, 407-421.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Cheong, C.S., Hong, D.G., and Chang, H.W. (2003b) The resolution of stratigraphic inconsistency in the luminescence ages of marine terrace sediments from Korea. Quat. Sci.

- Rev., 22, 1201-1206.
- Inoue, D., Sasaki, T., Yanagida, M., Choi, W.H., and Chang, C.J. (2002) Stratigraphy of the marine terraces along the east coast in Korea by means of the loess-paleosol sequence and Japanese tephra. Abstract of the 57th Annual Meeting of the Geological Society of Korea, p. 81.
- Jeong, G.Y. (1998) Vermicular kaolinite epitactic on primary phyllosilicates in the weathering profiles of anorthosite. *Clays Clay Miner.*, 46, 509-520.
- Jeong, G.Y. (2000) The dependence of localized crystallization of halloysite and kaolinite on primary minerals in the weathering profile of granite. *Clays Clay Miner.*, 48, 196-203.
- Jeong, G. Y. (2002) Pedogenic process in the marine terrace deposits at the site of Suryum Fault and its implications to the relative age of fault movement. Abstracts with program of the 56th Annual Meeting of the Geological Society of Korea, p.111.
- Jeong, G.Y. and Kim, S.J. (1993) Boxwork fabric of halloysite-rich kaolin formed by weathering of anorthosite in Sancheong area, Korea. *Clays Clay Miner.*, 41, 56-65.
- Jeong, G.Y., Bae, J.H., and Cheong, C.S. (2002) Origin of allophane and retardation of pebble weathering in Quaternary marine terrace deposits. *Clays Clay Miner.*, 50, 145-156.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H. (2001) ESR dating of the subsidiary faults in the Yangsan fault system, Korea. *Quat. Sci. Rev.*, 20, 999-1003.
- 
- 2004년 3월 8일 원고접수, 2004년 3월 17일 게재승인.