자원환경지질, 제36권, 제1호, 1-8, 2003
Econ. Environ. Geol., 36(1), 1-8, 2003

감포와 연일 지역 벤토나이트의 팽창성 및 X-선 부합성 산란영역 크기에 관한 연구

강일모[1]* · 박석찬[1] · 문희수[1] · 유장한[2]

[1]연세대학교 지구시스템과학과, [2]한국지질자원연구원

Study on expandability and X-ray coherent scattering domain size of bentonite from Gampo and Yonil area, Korea

Il-Mo Kang[1]*, Suck-Chan Park[1], Hi-Soo Moon[1] and Jang-Han Yoo[2]

[1]Department of Earth System Sciences, Yonsei University, 134, Sinchon-dong, Seodaemunku, Seoul, 120-749, Korea

[2]Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Gajeong-dong 30, Daejeon, 305-350, Korea

This study was performed to measure expandabilities and coherent scattering domain sizes (CSDs) of bentonite samples from Gampo and Yonil area, Korea, using X-ray powder diffraction (XRD), and to compare their experimental data with those of international standard bentonite samples (SAz-1, STx-1, and SWy-2). Most of Gampo and Yonil bentonite samples comprised randomly interstratified illite-smectite (R0 I-S), and their expandabilities ranged over 77-100%S_{XRD} from the saddle/001 method. The interstratification deformed 001 peaks of EG-solvated samples (Méring's first principle), which prohibited us from adopting these peaks to measure CSDs using BWA (Bertaut-Warren-Averbach) method. CSDs of the bentonite samples with R0 I-S could be measured through dehydration at 300°C after K-saturation, where the deformation originated from the interstratification could be removed effectively. Gampo and Yonil bentonite samples showed that their mean CSDs ranged over 3.8-5.4 interlayers, and that their CSDs distributions were similar to those of Gonzales (STx-1) and Wyoming (SWy-2) bentonite samples.

Key word : X-ray powder diffraction, bentonite, expandability, coherent scattering domain size, illite-smectite

본 연구는 X-선분말회절(XRD)을 이용하여 감포와 연일에서 산출되는 벤토나이트에 대한 팽창성과 부합성산란영역크기(CSDs)를 측정하고, 이를 세계표준 벤토나이트(SAz-1, STx-1, SWy-2)와 비교해 보고자 하였다. 에틸렌글리콜(EG)-포화 시료에서 측정한 001 피크의 저각도 쪽 굴곡과 001 피크의 강도비(saddle/001 강도비)를 이용하여 감포와 연일 벤토나이트의 팽창성을 측정한 결과, 77-100% S_{XRD}를 보였으며, GP-56을 제외한 대부분은 무질서형 일라이트-스멕타이트 혼합층광물(R0 I-S)로 구성되어 있었다. BWA(Bertaut-Warren-Averbach) 방법으로 CSDs를 측정한 결과, EG-포화 시료의 001 피크는 혼합층에 의한 피크의 변형(Méring의 제 1 원칙)이 관찰되었으며, CSDs 측정에 부적절하였다. 반면에, 300°C 열-처리 시료의 001 피크는 혼합층에 의한 변형이 발생하지 않았으며 CSDs 측정에 적합하였다. 열-처리 시료로부터 측정한 감포와 연일 벤토나이트의 평균 CSDs는 3.8-5.4층간으로 측정되었으며, 세계표준 벤토나이트와 비교하였을 때, CSDs 분포는 곤잘레스(STx-1)와 와이오밍(SWy-2) 벤토나이트와 유사하였다.

주요어 : X-선분말회절, 벤토나이트, 팽창성, 부합성산란영역크기, 일라이트-스멕타이트 혼합층광물

*Corresponding author: momo@yonsim.yonsei.ac.kr

1. 서 론

일반적으로 스멕타이트는 온도, 시간, 공극수 내 K 함량 등이 증가하면서 일라이트화 작용을 통하여 일라이트-스멕타이트 혼합층광물(I-S)로 전이된다(Hower *et al.*, 1976; Whitney, 1990; Huang *et al.*, 1993). 따라서, 벤토나이트(주로 스멕타이트질 광물로 구성된 화산쇄설물의 변질산물)는 지질환경에 따라 스멕타이트 또는 다양한 혼합층비를 갖는 I-S를 함유하게 된다. 이러한 벤토나이트 내 스멕타이트와 일라이트의 혼합층비는 팽창성(expandability)으로 정량화할 수 있다. 팽창성이란 I-S 결정자의 층간(본문에서는 팔면체 중앙에서 다음 팔면체 중앙까지를 의미함)이 물분자나 극성 유기분자에 의해 저면간격이 팽창함을 의미하는 것으로 주로 스멕타이트 층간에서 발생하며, 식 (1)과 같이 표현한다(Środoń *et al.*, 1992).

$$\text{팽창성}(\%)=\frac{\text{팽창가능 층간개수}}{\text{전체 층간개수}}\times 100\% \qquad (1)$$

X-선분말회절(X-ray powder diffraction; 이하 XRD)을 이용하여 I-S의 팽창성을 측정하는 분석방법에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으며(Środoń, 1984; Tomita *et al.*, 1988; Inoue *et al.*, 1989; Środoń and Elsass, 1994; Moore and Reynolds, 1997), 이러한 팽창성을 $\%S_{XRD}$라 표기한다. 팽창성을 정량적으로 이해하기 위해서는 식 (1)과 같이 전체층간을 알아야 하며, I-S의 경우에는 이를 X-ray 부합성산란영역크기(coherent scattering domain size; 이하 CSDs)로 간주할 수 있다(Altaner and Ylagan, 1997; 강일모 등, 2002). XRD를 이용하여 I-S의 CSDs를 측정하는 방법은 크게 세 가지 방법이 일반적으로 사용되고 있다.

첫째, Scherrer 식을 이용하여 회절피크의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)으로부터 측정하는 방법(Moore and Reynolds, 1997).

둘째, Scherrer 식을 변형하여 회절피크의 적분면적을 최대강도로 나눈 적분폭(integral width)으로부터 측정하는 방법(Drits *et al.*, 1997).

셋째, 회절피크로부터 간섭함수를 추출하여 퓨리에 분석으로 측정하는 BWA-(Bertaut-Warren-Averbach) 방법(Drits *et al.*, 1998) 등이다. Mystkowski *et al.* (2000)은 벤토나이트에서 측정한 CSDs와 고분해능투과전자현미경에서 관찰한 벤토나이트의 결정자 두께가 매우 유사함을 보고하였다.

벤토나이트는 구조적 특성에 의해 비점토광물(또는 기타 점토광물)에 비해 c* 방향의 CSDs가 제한되어 있기 때문에 반치폭이 매우 큰 $00l$ 계열 회절피크가 발생한다. 이러한 현상은 식 (2)와 같이 간섭함수, $\Phi(\theta)$로 정의되는 주기함수에 의해서 이해될 수 있다(Moore and Reynold, 1997).

$$\Phi(\theta)=\frac{\sin^2(2\pi N D\sin\theta/\lambda)}{\sin^2(2\pi D\sin\theta/\lambda)} \qquad (2)$$

윗 식에서 N은 CSDs, D는 저면간격, λ는 X-선 파장을 의미한다. 따라서, $\Phi(\theta)$는 CSDs에 의해 주기가 결정되며, 이는 $00l$ 계열 회절피크의 반치폭 및 형태를 결정하는 주요 원인으로 작용한다(Moore and Reynold, 1997; Drits *et al.*, 1998). 그러나, I-S의 경우에는 저면간격이 상이한 스멕타이트와 일라이트가 혼합층을 형성하고 있기 때문에, 식 (2)에서 저면간격의 변화가 발생하여 $\Phi(\theta)$의 주기성이 교란되고 회절피크의 반치폭 및 형태에 변형이 유발된다(또한, 구조인자의 차이에 의한 회절피크의 변형도 발생함). 이는 I-S의 회절피크를 이용한 CSDs 측정에 오차를 발생하는 원인이 되기 때문에 팽창성에 관한 연구가 선행되어야 한다(Moore and Reynold, 1997; Jaboyedoff *et al.*, 1999).

이를 종합하면, 벤토나이트의 팽창성과 CSDs는 식 (1)과 같이 팽창가능 층간과 직접 관련되어 있기 때문에 벤토나이트의 물리-화학적 성질과 매우 밀접한 연관성이 있다(Środoń *et al.*, 1992). 그러나, 국내에서 산출되는 벤토나이트에 대한 팽창성과 CSDs에 관한 연구는 미미한 현실이다. 이에 본 연구는 감포와 연일에서 산출되는 벤토나이트의 팽창성과 CSDs를 측정하고, 이를 세계표준 벤토나이트와 비교해 보고자 하였다. 또한, CSDs 측정에 있어서 팽창성에 기인한 문제점을 고찰하고 그 해결방법을 제시하고자 하였다.

2. 시료 및 연구방법

본 연구는 감포와 연일에서 산출되는 벤토나이트 9개와 세계표준 벤토나이트로 사용되는 체토(SAz-1), 곤잘레스(STx-1), 와이오밍(SWy-2) 벤토나이트 3개를 분석하였다(Table 1 참조). 모든 시료는 Na-아세테이트(pH=5.5 완충용액), H_2O_2, Na-구연산염-중탄산염-디티오나이트(CBD)로 전처리를 실시하였으며(Jackson, 1985), 퇴적법으로 1 μm 이하 입도로 분리하였다. 분리된 시료는 NaCl을 이용하여 응집시킨 후, 투석막을

Table. 1. XRD data of international standard and domestic (Gampo and Yonil area) bentonite samples.

Sample	Locality	%S_{XRD}*	saddle/ 001 peak	Na-saturation/EG-solvation				K-saturation/300°C heating			
				FWHM†	CSDs‡	Lognormal Parameters		FWHM†	CSDs‡	Lognormal Parameters§	
						α	β^2			α	β^2
SAz-1 (Cheto)	Arizona, USA	100	0.091	0.90	6.1	1.72	0.18	1.48	3.4	1.13	0.18
STx-1 (Gonzales)	Texas, USA	100	0.085	0.66	7.7	1.92	0.22	1.22	4.0	1.27	0.23
SWy-2 (Wyoming)	Wyoming, USA	100	0.063	0.58	8.4	2.0	0.23	0.92	5.1	1.48	0.30
GP-33	Gampo 33 mine	89	0.194	0.72	6.6	1.76	0.22	0.70	5.4	1.49	0.30
GP-46	Gampo 46 mine	91	0.169	0.92	6.1	1.72	0.18	1.34	3.8	1.23	0.21
GP-56	Gampo 56 mine	100	0.086	0.58	8.0	1.95	0.24	0.95	5.2	1.47	0.30
GP-65 (blue)	Gampo 65 mine	97	0.116	0.68	7.2	1.85	0.23	1.16	4.4	1.35	0.24
GP-65 (red)	Gampo 65 mine	94	0.145	0.72	6.9	1.82	0.21	1.23	4.2	1.32	0.23
YI-3 (blue)	Yonil 3 mine	86	0.220	1.08	5.5	1.63	0.15	1.02	4.0	1.25	0.25
YI-3 (yellow)	Yonil 3 mine	87	0.207	0.94	5.9	1.69	0.17	0.98	4.4	1.32	0.26
YI-22	Yonil 22 mine	77	0.339	2.20	3.5	1.33	0.07	0.83	4.8	1.39	0.30
YI-33	Yonil 33 mine	93	0.152	0.80	6.5	1.78	0.19	0.90	4.8	1.40	0.30

*percentage of expandable layers measured using saddle/001 method (Inoue *et al.*, 1989)
†full width at half maximum (°2θ) for interference function of 001 peak
‡coherent scattering domain size (nm) measured using BWA method (Drits *et al.*, 1998) for 001 peak
§lognormal distribution $f(T)=\frac{1}{\beta T\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(\ln T-\alpha)^2}{2\beta^2}\right]$

이용하여 잔류염을 제거하였으며 동결건조기로 건조하였다. 정방위시료는 퇴적법을 이용하여 박편용 유리판 위에 약 10 mg/cm^2 두께의 점토필름으로 제작하였으며, 증기법으로 에틸렌글리콜을 24시간 포화시켰다(이하 EG-포화 시료라 함). 또한, 스멕타이트 층간을 K로 포화시키기 위해서 1M KCl 용액으로 시료를 3회 씻은 후에 위와 동일한 방법으로 잔류염 제거, 건조, 정방위시료 제작 후, 300°C에서 4시간 동안 가열하였다(이하 열-처리 시료라 함).

XRD분석은 MXP 18A RINT-2500(MacScience사, 일본) 장비를 사용하였으며, Cu-타켓을 이용하여, 40 kV/30 mA, 발산슬릿 0.5°, 수광슬릿 0.15°으로 0.02° 2θ당 5초로 측정하였다. CSDs 측정은 MudMaster 프로그램(Eberl *et al.*, 1996)을 사용하여 BWA 방법으로 측정하였다.

3. 연구결과

본 연구에서 실시한 XRD 분석결과는 Table 1에 표기한 바와 같다. 벤토나이트로부터 분리된 1 μm이하 입도는 XRD 분석결과, 대부분이 순수한 스멕타이트 및 무질서형 I-S(이하 R0 I-S라 함)로 구성되어 있었다(단, YI-22에서 소량의 K-장석 회절선이 검출되었으며, 주사전자현미경으로 약 1 μm 크기로 변질된 세립질 K-장석입자를 관찰할 수 있었음). Fig. 1a와 같이, 본 연구시료는 EG-처리 시 다양한 001 피크의 저각도 쪽 굴곡과 001 피크의 강도비(saddle/001 강도비)를 보였으며, 이에 본 연구에서는 R0 I-S에 적합한 Inoue *et al.* (1989)의 saddle/001 강도비 방법을 사용하여 팽창성을 측정하였다. 정량선은 NEWMOD© 프로그램(Reynolds and Reynolds, 1996)으로 계산하였으며, 이때 Inoue *et al.* (1989)이 제시한 조건(3<CSDs<12; 부정방위 분말형 Lorentz-편광 인자)을 사용하였다. Table 1의 saddle/001 강도비로부터 팽창성을 측정한 결과(Fig. 1b), 세계표준 벤토나이트는 100% S_{XRD}, 감포 벤토나이트는 89-100% S_{XRD}, 연일 벤토나이트는 77-93% S_{XRD}로 측정 되었다. 이러한 결과는 감포와 연일에서 산출되는 벤토나이트 대부분이 주로 R0 I-S로 구성되어 있음을 시사하며, 본 연구에서는 대체적으로 연일 벤토나이트가 감포 벤토나이트보다 더 낮은 팽창성을 보였다.

BWA 방법은 회절피크로부터 Lorentz-편광 인자(Lp(θ))와 구조인자(G^2(θ))를 제거함으로써 Φ(θ)를 추출하고, Φ(θ)에 대한 퓨리어 분석을 통하여 CSDs 분포를 측정하는 방법이다. 따라서, 해당 점토광물에 적당한 Lp(θ)G^2(θ) 인자를 사용하여 Φ(θ)를 추출하는 과정이 BWA 방법에서 가장 중요하다. 본 연구에서는 기존 연구결과(Inoue *et al.*, 1989; Moore and Reynolds, 1997)와 본 연구실의 사전연구 경험을 바탕으로 부정방위 분말형 Lp(θ)인자를 사용하였으며, EG-

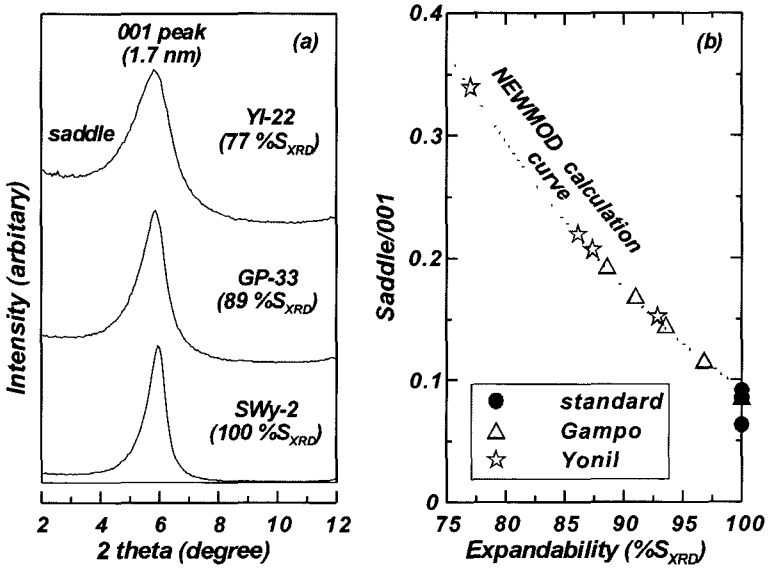

Fig. 1. Representative XRD patterns for (a) EG-solvated specimens and (b) saddle/001 peak diagram for measuring expandability of R0 I/S (Inoue *et al.*, 1989).

처리 시료에 대해서는 층간에 2개의 EG층을 갖는 스멕타이트(2-gly smectite)에 대한 $G^2(\theta)$를, 열-처리 시료에 대해서는 반단위포당 층간에 0.4 K를 갖는 일라이트(0.4 K illite)에 대한 $G^2(\theta)$를 사용하여 001 피크로부터 $\Phi(\theta)$를 추출하였다. 추출된 $\Phi(\theta)$는 이미 배경값이 제거된 상태이기 때문에 배경값 제거에 따른 오차를 줄이고 측정 상의 일관성을 위해서 추출된 $\Phi(\theta)$로부터 반치폭을 측정하였다. Fig. 2a와 같이 EG-처리 시료는 팽창성이 감소할수록 추출된 $\Phi(\theta)$의 피크 위치는 감소하고 반치폭은 증가하였다. 특히, 본 연구시료 중 팽창성이 가장 낮은 YI-22는 심하게 왜곡된 $\Phi(\theta)$가 추출되었다. 반면에, 모든 열-처리 시료에서는 일라이트 저면간격(약 0.98 nm)을 갖는 양호한 $\Phi(\theta)$가 추출되었다(Fig. 2b). EG-처리 시료에 대한 BWA 분석 결과, 세계표준 벤토나이트의 평균 CSDs는 SAz-1: 6.1nm, STx-1: 7.7nm SWy-2 : 8.4 nm 순으로 측정되었으며, 이는 Mystkowski *et al.* (2000)이 EG-처리 시료에 대하여 측정한 결과와 잘 일치하였다. 감포 벤토나이트의 평균 CSDs는 6.1-8.0 nm로 연일 벤토나이트의 3.5-6.5 nm보다 다소 높게 측정되었다. 모든 시료는 Eberl *et al.* (1990)이 제시한 로그정규분포를 보였으나 팽창성이 감소할수록 약 3-4 nm 구간이 이론적 로그정규분포보다 높은 빈도값을 보였다. 로그정규분포를 규정하는 평균값(α)과 분산계수(β^2)(Table 1 참조)는 각각 1.33-2.00 nm와 0.07-0.24 nm 범위로 측정되었다. 반면에, 열-처리 시료에 대한 BWA분석 결과, 모든 시료는 로그정규분포를 보였으며, 세계표준 벤토나이트의 평균 CSDs는 SAz-1 : 3.4 nm, STx-1 : 4.0 nm SWy-2 : 5.1 nm 순으로 측정되었고, 감포 벤토나이트는 3.8-5.4 nm, 연일 벤토나이트는 4.0-4.8 nm로 측정되었다. α와 β^2은 각각 1.13-1.49 nm와 0.18-0.30 nm 범위로 측정되었다.

4. 토 의

스멕타이트와 일라이트가 혼합층광물을 형성할 경우에는 부합성산란에 의해 개개의 $G^2(\theta)$와 저면간격이 결정학적으로 상호 영향을 주기 때문에 개개의 회절패턴과는 상이한 복합한 회절패턴이 발생하게 된다(Reynolds, 1980). Fig. 2a와 같이 EG-처리 시료에서 $\Phi(\theta)$가 왜곡되어 추출되는 현상도 스멕타이트와는 $G^2(\theta)$와 저면간격이 상이한 일라이트가 혼합층으로 결정자 내에 존재하기 때문이다. 따라서, 스멕타이트에 대한 $G^2(\theta)$(2-gly smectite)를 사용하여 $\Phi(\theta)$를 추출

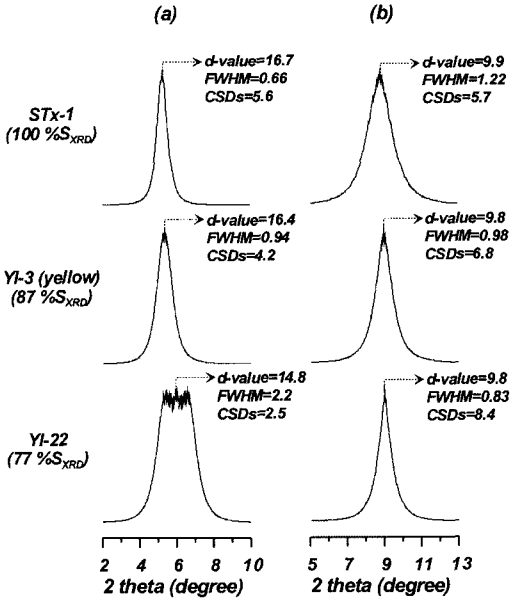

Fig. 2. The interference function peaks extracted from (a) 001 reflections under EG-solvation and (b) dehydration at 300°C.

하게 되면, 팽창성이 감소할수록 $\Phi(\theta)$의 왜곡이 점점 심하게 발생하게 된다. 이는 BWA법으로 CSDs를 측정하는데 있어서 오차를 발생시키는 주요 원인이 된다. R0 I-S에 의해 발생하는 EG-처리 시료의 001 피크변형은 Méring의 제 1 원칙에 의해 이해될 수 있다(Drits *et al.*, 1994; Moore and Reynolds, 1997). 회절패턴에 있어서, 스멕타이트 001 피크(1.68 nm)와 일라이트 001 피크(0.98nm)는 상호 간섭을 일으키기에는 °2θ 위치가 멀리 떨어져 있기 때문에 팽창성이 감소하여도 스멕타이트 001 피크의 위치는 변화하지 않게 되나, 회절강도는 급격하게 감소하게 되고 반치폭은 점차적으로 증가하게 된다(Fig. 1a). Fig. 3a와 같이, EG-처리 시료의 경우에 팽창성과 반치폭 간에 역의 상관관계를 보이는 것은 이러한 Méring의 제 1 원칙을 설명해 주는 결과이다. 반면에, Fig. 3a에서 보이는 팽창성과 CSDs 간의 정의 상관관계는 Scherrer 식으로 이해될 수 있다. Scherrer 식에서 반치폭과 CSDs는 FWHM≈1/CSDs의 관계가 있기 때문에(Moore and Reynolds, 1997; Drits *et al.*, 1997), 반치폭에서 관찰된 역의 상관관계와는 반대로 CSDs는 팽창성과 정의 상관관계를 보이게 된다. 결론적으로, R0 I-S에 있어서 EG-처리 시료의 001 피크는 Méring 의 제 1 원칙에 의해 강도가 낮아지고 폭이 넓어지는 형태로 변형되기 때문에 벤토나이트 고유의 CSDs에 비해 작

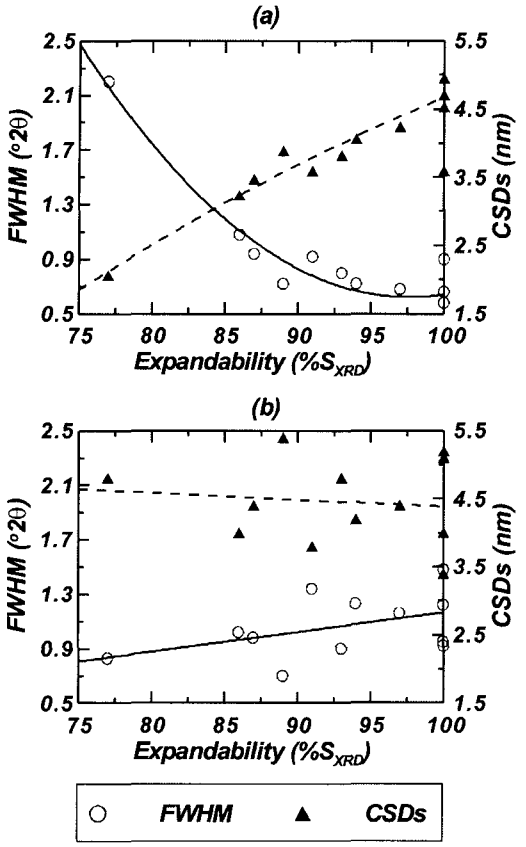

Fig. 3. Variations of FWHM and mean CSDs measured for 001 reflections under (a) EG-solvation and (b) dehydration at 300°C according to expandability. Mean CSDs values for EG-solvation were divided by 1.68 to compare with those for dehydration.

은 CSDs가 측정되게 되며, 팽창성이 감소할수록 그 오차는 점점 커지는 결과가 초래된다. 그러므로, R0 I-S를 함유한 벤토나이트의 EG-처리에 대한 001 피크는 BWA 방법뿐만 아니라, Scherrer 식을 이용하여 CSDs를 측정하는데 있어서 부적합하다.

반면에, 열-처리 시료의 경우에는 스멕타이트의 $G^2(\theta)$와 저면간격이 일라이트와 유사해지게 되기 때문에 Méring의 제 1 원칙이 크게 발생하지 않는다. Drits *et al.* (1997)은 I-S 시료의 경우에 K-포화 후 300°C 열처리를 통하여 스멕타이트 층간을 일라이트 층간으로 붕괴시킴으로써 CSDs 측정 시 저면간격의 혼재에 따른 오차를 줄일 수 있다고 제안하였다. 이는 그림 2b와 같이, 열-처리 시료에서는 양호한 $\Phi(\theta)$가 추출되는 것으로 확인할 수 있으며, 이로부터 CSDs를 측정한 결과는 Fig. 3b와 같이 팽창성과 관계를 보이

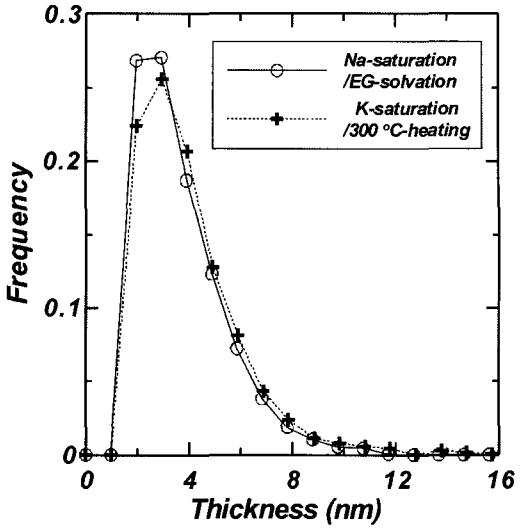

Fig. 4. Comparison of CSDs distribution measured under EG-solvation and dehydration at 300°C for SAz-1 sample. The unit thickness for EG-solvation (1.68 nm) was normalized to 0.98 nm, to compare with that for dehydration.

지 않는다. 즉, R0 I-S의 CSDs 측정 시 열처리를 통하여 혼합층에 의한 영향을 효과적으로 제거할 수 있게 된다. 그러나, 열-처리 시료에서 측정한 CSDs를 사용하기 위해서는 이러한 측정값이 벤토나이트 고유의 CSDs를 반영하는지를 검토해 보아야 한다. 이를 위하여, 순수한 스멕타이트로 구성된 세계표준 벤토나이트에 대한 EG-처리 시료와 열-처리 시료의 CSDs 분포를 비교해 본 결과, Fig. 4와 같이, 거의 유사한 분포를 보였다. 이러한 결과는 CSDs는 I-S를 구성하는 기본입자의 고유한 물리적 성질이고, 층간의 변화와 같은 인위적 요인에 크게 영향을 받지 않는다는 기존연구와 일치하며(Środoń *et al.*, 1992; Mystkowski *et al.*, 2000), 열-처리 시료에서 측정한 CSDs가 해당 시료의 고유한 CSDs를 반영한다고 생각할 수 있게 해준다. 그러므로, 열-처리 시료에 대한 CSDs 측정결과에 의해, 감포와 연일 벤토나이트는 탈수 시 평균 3.8-5.4 nm의 CSDs를 갖는 것으로 사료된다. 또한, 일라이트의 경우에 1개 층간 ≈ 0.98 nm라고 볼 수 있기 때문에 열-처리 시료에서 측정한 CSDs 결과는 결정자를 구성하는 층간개수로 간주할 수 있다(Drits *et al.*, 1997; 강일모 등, 2002). 즉, 감포와 연일 벤토나이트는 3.8-5.4개의 층간으로 구성되어 있다고 생각할 수 있다(이러한 길이단위에서 층간개수로의 단위변화는 벤토나이트 층간변화에 따른 결정자의 두께변화를 예측

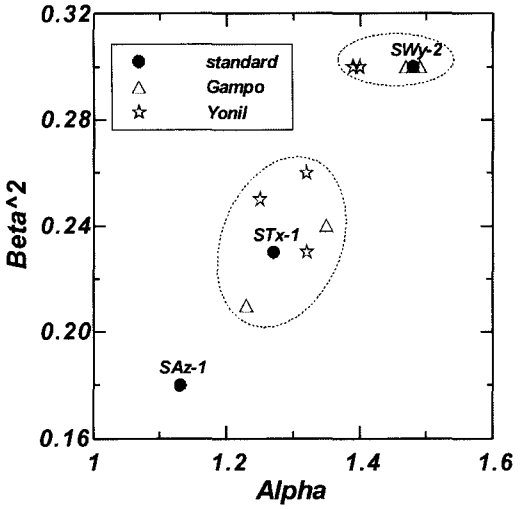

Fig. 5. Plot of lognormal parameters for CSDs distributions measured using BWA method (SWy-2: Wyoming bentonite, STx-1: Gonzales bentonite, SAz-1: Cheto bentonite).

하고 벤토나이트 간 구조비교를 용이하게 함). 강일모 등(2002)의 연구결과에 의하면, 실제 결정자 두께는 CSDs에 비해 1개 층간만큼 더 크기 때문에 감포와 연일 벤토나이트는 평균 4.8-6.4층(본 연구에서는 사면체판의 저면산소를 기준으로 다음 저면산소까지를 의미함)으로 구성되어 있는 것으로 사료된다.

감포와 연일 벤토나이트의 평균 CSDs를 세계표준 벤토나이트와 비교하면, Fig. 3b와 같이, 대체적으로 체토 벤토나이트보다는 크고 곤잘레스와 와이오밍 벤토나이트 사이의 값을 보인다. 또한, α와 β^2를 이용하여 CSDs 분포 형태를 비교해 보면(Fig. 5), 감포와 연일 벤토나이트는 크게 곤잘레스와 와이오밍 벤토나이트형으로 분류될 수 있으며 체토 벤토나이트와는 큰 차이를 보인다. 그러나 분류상에서 지역별 차이는 관찰되지 않는다.

5. 결 론

본 연구는 XRD를 이용하여 감포와 연일에서 산출되는 벤토나이트의 팽창성과 CSDs를 측정하고 이를 세계표준 벤토나이트와 비교해 보았다. 감포와 연일 벤토나이트의 팽창성은 77-100%S_{XRD}를 보였으며, GP-56을 제외한 대부분은 R0 I-S로 구성되어 있었다. R0 I-S의 경우, EG-처리 시료의 001 피크는 Méring의 제 1 원칙에 의한 변형이 발생하여 CSDs 측정에 부적절하였다. 반면에, 열-처리 시료의 001 피크는 혼합층에 의한 변형이 발생하지 않았으며 CSDs 측정에 적합하였다. 감포와 연일 벤토나이트의 평균 CSDs는 3.8-5.4층간(또는 4.8-6.4층)으로 측정되었으며, 세계표준 벤토나이트와 비교하였을 때, CSDs 분포는 곤잘레스와 와이오밍 벤토나이트와 유사하였다.

사 사

시료 채취에 도움을 주신 지질자원연구원 김재곤 박사와 동해화학에 감사드린다.

참고문헌

강일모, 문희수, 김재곤, 송윤구 (2002) 일라이트-스멕타이트 혼합층광물의 팽창성과 MacEwan 결정자 및 기본입자두께에 관한 연구. 한국광물학회지, 15권, p. 95-103.

Altaner, S.P. and Ylagan, R.F. (1997) Comparison of structural models of mixed-layer illite/smectite and reaction mechanisms of smectite illitization. Clays Clay Miner., v. 45, p. 517-533.

Eberl, D.D., Drits, V., Środoń, J. and Nüesch, R. (1996) MudMaster: A program for calculating crystallite size distributions and strain from the shapes of X-ray diffraction peaks. USGS Open File Report 96-171.

Drits, V.A., Varaxina, T.V., Sakharov, B.A. and Plançon, A. (1994) A simple technique for identification of one-dimensional powder X-ray diffraction patterns for mixed-layer illite-smectite and other interstratified minerals. Clays Clay Miner., v. 42, p. 382-390.

Drits, V.A., Środoń, J. and Eberl, D.D. (1997) XRD measurement of mean crystallite thickness of illite and illite/smectite: Reappraisal of the Kubler index and the Scherrer equation. Clays Clay Miner., v. 45, p. 461-475.

Drits, V.A., Eberl, D.D. and Środoń, J. (1998) XRD measurement of mean thickness, thickness distribution and strain for illite and illite-smectite crystallites by the Bertaut-Warren-Averbach technique. Clays Clay Miner., v. 46, p. 38-50.

Hower, J., Eslinger, E.V., Hower, M.E. and Perry, E.A. (1976) Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 1. Mineralogical and chemical evidence. Geol. Soc. Am. Bull., v. 87, p. 725-737.

Huang, W.L., Longo, J.M. and Pevear, D.R. (1993) An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. Clays Clay Miner., v. 41, p. 162-177.

Inoue, A., Bouchet, A., Velde, B. and Meunier, A. (1989) Convenient technique for estimating smectite layer percentage in randomly interstratified illite/smectite minerals. Clays Clay Miner., v. 37, p. 227-234.

Jaboyedoff, M., Kübler, B. and Thélin, P.H. (1999) An empirical Scherrer equation for weakly swelling mixed-layer minerals, especially illite-smectite. Clay Miner., v. 34, p. 601-617.

Jackson, M.L. (1985) Soil chemical analysis-advanced course. 2nd(ed.), 11th printing, published by the author, Madison, Wisconsin, 53705, 895p.

Mystkowski, K., Środoń, J. and Elsass, F. (2000) Mean thickness and thickness distribution of smectite crystallites. Clay Miner., v. 35, p. 545-557.

Moore, D.M. and Reynolds, R.C. (1997) X-ray Diffraction and the Idenfication and Analysis of Clay Minerals. 2nd(ed.), Oxford University Press, Oxford and New York, 378p.

Reynolds, R.C. (1980) Interstratified clay minerals. In Brindley, G.W. and Brown, G.(eds.) Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Monograph No. 5, Mineralogical Society, London, p. 249-303.

Reynolds, R.C. and Reynolds, R.C. (1996) NEWMOD for Windows: A program for the calculation of one-dimensional diffraction patterns of mixed-layered clays. Published by the authors, 8 Brook Road, Hanover, New Hampshire, USA.

Środoń, J. (1984) X-ray powder diffraction identification of illitic materials. Clays Clay Miner., v. 32, p. 337-349.

Środoń, J., Elsass, F., McHardy, W.J. and Morgan, D.J. (1992) Chemistry of illite-smectite inferred from TEM measurements of fundamental particles. Clay Miner., v. 27, p. 137-158.

Środoń, J. and Elsass, F. (1994) Effect of the shape of fundamental particles on XRD characteristics of illitic minerals. Eur. J. Mineral., v. 6, p. 113-122.

Tomita, K., Takahashi, H. and Watanabe, T. (1988) Quantification curves for mica/smectite interstratifications by X-ray powder diffraction. Clays Clay Miner., v. 36, p. 258-262.

Whitney, G. (1990) Role of water in the smectite-to-illite reaction. Clays Clay Miner., v. 38, p. 343-350.

2003년 2월 10일 원고접수, 2003년 2월 24일 게재승인.