

## Determination of Water Content in Compacted Bentonite Using a Hygrometer and Its Application

### 습도계를 이용한 압축벤토나이트 내 함수율 결정 및 적용

Jae Owan Lee<sup>1)</sup> and Won Jin Cho

Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeok-daero Yuseong-gu, Daejeon

이재완<sup>1)</sup>, 조원진

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

(Received October 24, 2008 / Revised December 09, 2009 / Approved March 17, 2009)

#### Abstract

Investigation of resaturation and thermal-hydro-mechanical behavior for the buffer of a repository requires measuring the water content of compacted bentonite. This study investigated the relative humidity of compacted bentonites using a humidity sensor (Vaisala HMT 334) applicable under high temperature and pressure, and then conducted a multi-regression analysis based on the measured results to determine relationships among the water content, relative humidity, and temperature. The relationships for the compacted bentonites with the dry densities of 1,500 kg/m<sup>3</sup> and 1,600 kg/m<sup>3</sup> were expressed as  $\omega = 0.196RH - 0.029T + 1.391$  ( $r^2 = 0.96$ ) and  $\omega = 0.199RH - 0.029T + 2.596$  ( $r^2 = 0.98$ ), respectively. These were then used to interpret the resaturation of bentonite blocks in the KENTEX test.

**Key words** : water content, compacted bentonite, buffer, HLW repository

#### 요 약

처분장 완충재의 재포화 및 열-수리-역학적 거동 규명을 위해서는 압축벤토나이트의 함수율 측정이 필수적이다. 본 연구에서는 고온, 고압 조건에서 실시간 자동측정이 가능한 습도센서를 이용하여, 여러 가지 온도와 함수율 (이하 중량함수율을 말함)을 갖는 압축벤토나이트를 대상으로 상대습도를 측정하고, 다중회귀 분석으로부터 압축벤토나이트의 함수율과 상대습도 및 온도의 상관관계식을 결정하였다. 결정된 상관관계식은 건조밀도가 1,500 kg/m<sup>3</sup>, 1,600 kg/m<sup>3</sup>인 압축벤토나이트의 경우 각각  $\omega = 0.196RH - 0.029T + 1.391$  ( $r^2 = 0.96$ ) 과  $\omega = 0.199RH - 0.029T + 2.596$  ( $r^2 = 0.98$ ) 로 표시되었고, 이 관계식은 KENTEX실증시험의 벤토나이트블록 재포화 현상을 해석하는데 활용되었다.

**중심단어** : 함수율, 압축벤토나이트, 완충재, 고준위폐기물처분장

1) Corresponding Author. E-mail : jolee@kaeri.re.kr

### I. 서론

우리나라 고준위폐기물 기준처분시스템 (KRS) 설계개념 [1]에 따르면, 처분장은 완충재로 압축벤토나이트를 고려하고 있다. 고준위폐기물처분장에서 압축벤토나이트 완충재는 지하수의 유입을 최소화하고, 지하수에 의해 용해된 핵종이 폐기물로부터 주변환경으로 유출되는 것을 저지하며, 외부의 역학적 충격으로부터 폐기물과 처분용기를 보호하는 역할을 한다.

압축벤토나이트의 함수율은 처분장 완충재의 재포화 및 이로 인한 완충재의 열 및 역학적 거동에 영향을 미치는 중요한 인자로서, 완충재의 성능 및 안전성 평가를 위해서는 압축벤토나이트의 함수율 측정이 매우 중요하다.

압축벤토나이트의 실험적 함수율 측정 방법으로는 시료 샘플링을 통한 직접측정방법과 습도계 (hygrometer)를 이용한 간접측정방법이 있으나, 후자의 경우 센서기술의 발달로 고온, 고압조건에서도 대상 시스템을 교란 시키지 않고 장기간 동안 실시간, 자동으로 데이터를 수집할 수 있어, 최근 mock-up실험이나 현장실험과 같은 대규모 실험에 적용되고 있는 추세이다.

습도계를 이용한 함수율 측정방법은 여러 가지 실험조건에서 벤토나이트의 함수율에 따른 상대습도를 측정하고, 이 측정 데이터를 이용하여 결정된 함수율-상대습도 상관관계식으로부터 압축벤토나이트의 함수율을 결정하는 방법으로서, 일본 [2], 스페인 [3] 등에서 사용한 사례가 있으나, 측정 센서와 벤토나이트의 종류뿐만 아니라 실험조건이 서로 달라 함수율-상대습도 상관관계식의 적용에 한계가 있는 실정이다.

이와 관련하여 연구에서는 국산 벤토나이트를 대상으로 고온, 고압용 습도센서 (Vaisala HMT 334)를 사용하여 기준 처분 조건에서 예상되는 건조밀도, 온도, 함수율 조건에서 압축 벤토나이트의 상대습도 특성을 분석하고, 이 결과를 다중회귀분석하여 함수율-상대습도 상관관계식을 도출하고자 하였다. 또, 이 상관관계식을 현재 공학적 규모로 수행 중인 KENTEX 실증

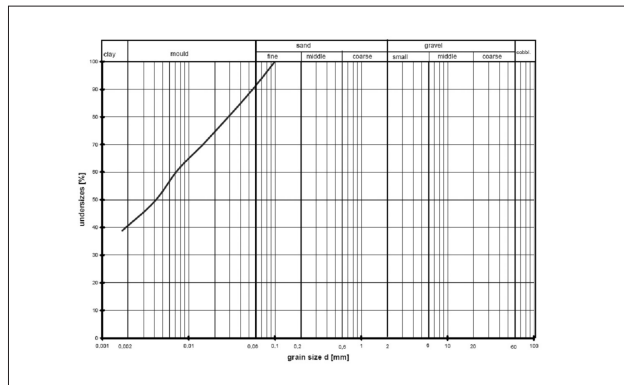


Fig. 1 Particle size distribution of bentonite powder.

실험 [4, 5]에 적용하여 압축벤토나이트 블록의 재포화현상을 해석하고자 하였다.

### II. 실험

#### 가. 시료

본 실험에 사용된 벤토나이트는 경주시 양남면 벤토나이트광산에서 채취한 것 (KRS 기준완충재물질)로서, 원광을 건조, 분쇄 한 후 200 메쉬(mesh) ASTM (American Society for Testing and Materials) 망체를 통과한 것을 사용하였다 [6]. 분말 벤토나이트의 입도분포는 Fig. 1과 같다. 광물분석 결과 (Fig. 2), 벤토나이트는 몬모릴로나이트 (montmorillonite, 70 %)와 장석(feldspars, 29%)을 주성분으로 하고, 소량의 석영 (quartz, ~1%)을 포함하였다. 화학조성은 SiO<sub>2</sub> 56.8%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 20.0%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6.0% 및 기타 미량성분으로 되어 있다. 벤토나이트의 주요 교환가능 양이온은 Ca<sup>2+</sup>이고, 양이온교환능은 57.6 meq/100g이다. 벤토나이트의 액성한계와 소성한계는 각각 162%와 39%이며, 소성지수는 123%이었다.

벤토나이트 시료의 함수율은 데시케이터 (desiccator)를 이용하여 조절하였다. 즉, 시료를 110℃에서 24시간 동안 건조한 후, 필요한 양 만큼 유리접시에 옮겨 증류수 (distilled and demineralized water)가 든 데시케이터에 넣고, 일정한 시간 간격으로 스푼으로 저어주며 목표 함수율에 도달할 때까지 기다렸다가 사용하였다.

압축벤토나이트 시편은 함수율이 조절된 벤토나이트를 양방향 유압프레스 (bi-axial hydraulic press)로 압축 (건조 밀도 1,500 kg/m<sup>3</sup>, 1,600 kg/m<sup>3</sup>)하여, 직경 5×10<sup>-2</sup> m, 높이 5×10<sup>-2</sup> m의 크기로 만들었으며, 압축 후에는 균일한 함수율 분포를 갖도록 하기 위해 밀봉백 (zip bag)에 넣어 3일간 데시케이터에 두었다가 실험에 사용하였다.

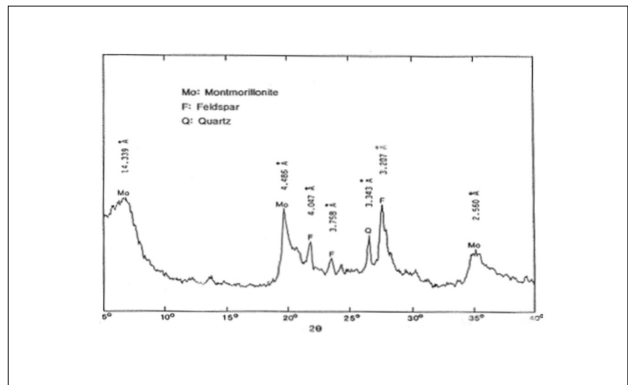


Fig. 2 XRD pattern of the bentonite used in this study.

### 나. 압축벤토나이트의 습도 측정

압축벤토나이트의 습도는 Fig. 3의 실험장치를 이용해서 측정하였다. 이 장치는 테스트셀 (test cell), 습도센서/송신기 (humidity sensor/transmitter), 데이터 수집 및 분석 컴퓨터로 구성되며, 테스트셀 내부에는 측정 대상 압축벤토나이트를 넣어 설치하였다.

압축벤토나이트 시편은 가운데에 직경  $1.2 \times 10^{-2}$  m, 깊이  $2.5 \times 10^{-2}$  m 홀(hole)을 뚫어 습도센서를 설치하였다. 습도센서/송신기는 전기용량식 고분자 습도센서/송신기의 일종인 Vaisala HMT 334로서, 허용 온도범위는  $-70 \sim +180$  °C, 외부로부터의 허용압력은 최대 100 기압이며, 습도뿐만 아니라 온도도 동시에 측정이 가능하다.

압축벤토나이트의 습도 및 온도는 센서를 통하여 외부에 연결된 송신기와 컴퓨터 프로그램에 의해 수집·분석 되었다. 또 테스트셀은 일정한 온도 유지와 여러 가지 온도영역에서의 습도 측정이 가능 하도록 온도조절식 건조기에 넣어서 측정을 하였다. 본 실험장치에서 측정된 습도는 상대습도이며, 다음 실험변수를 조합한 여러 가지 실험조건에서 측정 하였다.

- 건조밀도 ( $\text{kg/m}^3$ ) : 1500, 1600
- 함수율 (%)<sup>(주1)</sup> : 3, 7, 12, 17, 22
- 온도 (°C) : 25, 35, 45, 55, 70, 90

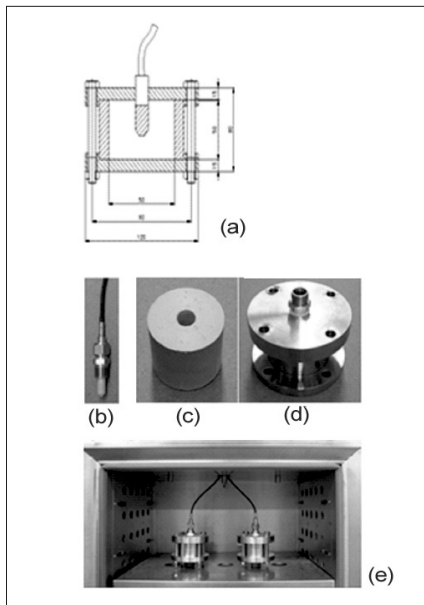


Fig. 3 Experimental apparatus for measuring the relative humidity of a compacted bentonite ((a) schematic diagram, (b) Vaisala HMT 334 sensor, (c) compacted bentonite, (d) test cell housing, and (e) experimental setup completed with 2 hygrometers.

(주1) 건조밀도 1,500와 1,600  $\text{kg/m}^3$ 인 압축벤토나이트의 포화 시 함수율은 각각 30%, 26%이다.

### 다. 습도-함수율 관계식의 KENTEX 적용

KENTEX (KAERI Engineering-scale T-H-M Experiment for an Engineered Barrier System)는 우리나라 고준위폐기물 기분처리시스템 공학적방벽시스템 (Engineered Barrier System)의 열적-수리적-역학적 거동을 규명하기 위해, 실재크기의 1/3 규모로 설계, 제작된 엔지니어링 규모의 실증실험장치이다 [4].

KENTEX 실증실험장치 (그림 4 (a))는 압력실린더 (confining cylinder), 가열시스템 (heating system), 벤토나이트 블록 (bentonite blocks), 수화시스템 (hydration system), 센서부 (sensors & instruments), HCS (heater-controlling system) - DAS (data acquisition system), 프레임 구조물 (overall frame-structure) 등으로 구성되며, 벤토나이트 블록의 재포화 및 수리적 거동을 조사하기 위해서 Vaisala HMT 334 습도센서-송신기를 사용하였다. 그림 4(b)-(d)는 KENTEX 실증실험장치의 HMT 334 습도센서 설치 모습을 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 벤토나이트 블록에 설치된 습도센서는 고온·고압 다중케이블 연결구를 이용하여 외부의 송신기와 컴퓨터에 설치된 DAS에 연결되고, 센서로부터 수집된 습도는 습도-함수율 관계

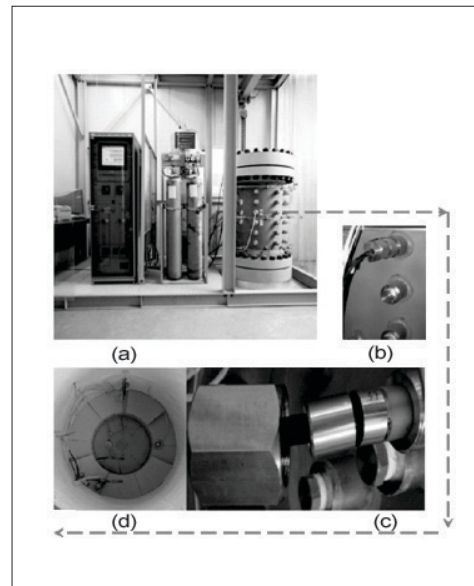


Fig. 4 Application of a hygrometer to measure the relative humidity of compacted bentonite in the KENTEX ((a) Picture of KENTEX facility, (b) hygrometer sensor cable port, (c) high-temperature and high-pressure connector and sensor cable, and (d) hygrometer sensors installed in the bentonite blocks.

식을 이용하여 컴퓨터 프로그램에 의해 함수율로 변환되며, 이 결과는 벤토나이트 블록의 재포화 현상을 분석하는데 사용된다.

### III. 실험결과

습도센서로부터 얻어진 압축벤토나이트의 상대습도는 대부분이 수 시간 이내에 정상상태에 도달하였다. 그림 5는 측정결과 중 건조밀도 1,500 kg/m<sup>3</sup>, 함수율 22%, 초기온도 35℃인 압축벤토나이트를 45℃의 온도에서 측정한 습도변이 곡선을 일례로 보여 준 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 압축벤토나이트는 측정을 시작한 후 얼마 되지 않아 온도가 일정하게 유지되고 그에 따라 압축벤토나이트의 상대습도도 일정한 값을 보이며 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 이것은 온도가 높아짐에 따라 압축벤토나이트의 공극에 존재하던 수증기들이 서로 이동하여 평형을 이루고, 그 결과로서 압축벤토나이트의 상대습도가 일정한 값을 보이는 것

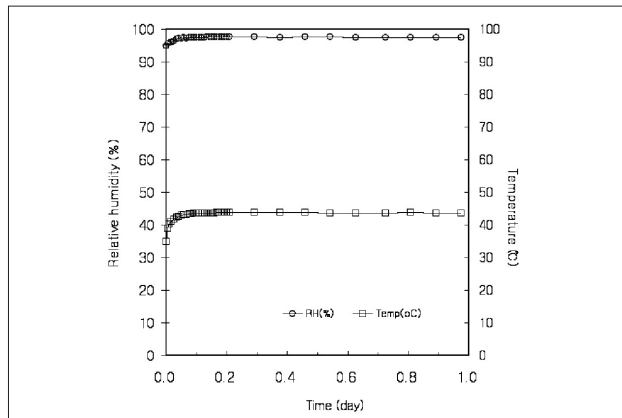


Fig. 5 Evolution curve of relative humidity in a compacted bentonite with the dry density of 1,500 kg/m<sup>3</sup> and the water content of 22% under the temperature of 45℃

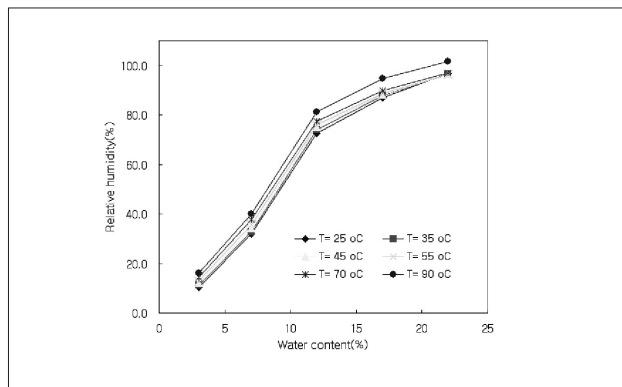


Fig. 6 Change of relative humidity as a function of water content at each temperature (dry density of compacted bentonite = 1,500 kg/m<sup>3</sup>).

로 생각된다. 본 연구에서는 압축벤토나이트의 상대습도가 실험 시작 후 3일에는 충분히 정상상태에 도달했다고 보고 그 때의 값을 최종 상대습도로 간주하였다.

각 실험조건에서의 측정결과는 Table 1과 Fig. 6, 7, 9, 10에 도시하였다. 대부분의 압축벤토나이트 시료는 상대습도 100% 이하의 값을 보였다. 그러나 22% 함수율을 갖는 압축 벤토나이트 시료는 90℃에서 100% 이상의 값을 보였는데, 이것은 HMT 334 습도센서를 이용해서 함수율이 22% 이상인 압축벤토나이트 시료의 상대습도를 측정하고, 그 결과로부터 함수율을 예측하는 데는 한계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6과 9에서 보는 바와 같이, 각 측정온도에서 상대습도는 함수율이 증가할수록 증가하였고, 또 각 함수율에서 상대습도는 예상과는 달리 온도가 증가할수록 증가하였다. 보통 일정한 공기 중의 상대습도는 온도가 증가할수록 감소하지만, 압축벤토나이트에서는 입자에 붙어 있던 흡착수의 물분자가 온도 증가에 따라 분자운동을 보다 활발히 해서 측정센서가 위치한 부분으로 이동하고 그 결과 증가

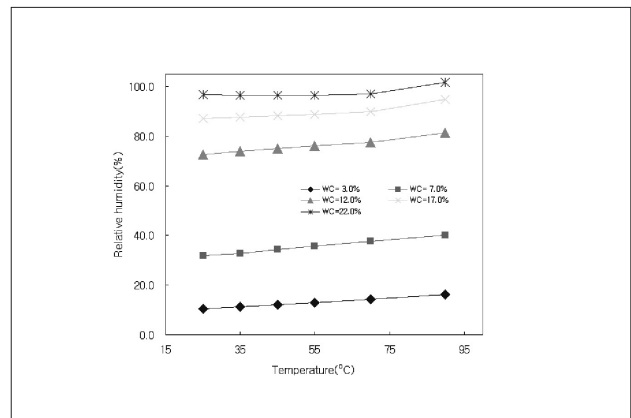


Fig. 7 Change of relative humidity as a function of temperature at each water content (dry density of compacted bentonite = 1,500 kg/m<sup>3</sup>).

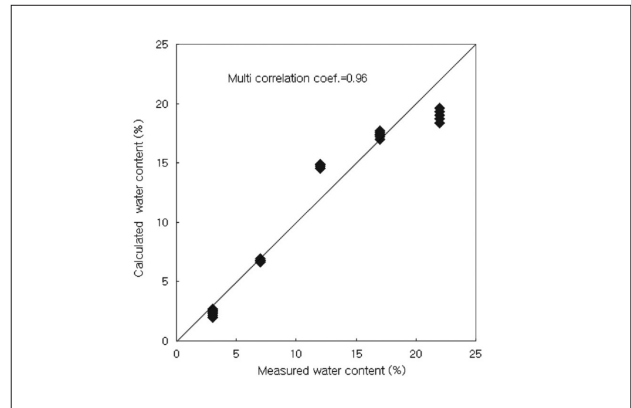


Fig. 8 Comparison between measured and calculated water content for the dry density 1,500 kg/m<sup>3</sup>).

한 것으로 보여진다.

함수율과 온도에 대한 상대습도의 민감도는 온도보다 함수율에서 훨씬 더 크게 나타났다. 그리고 동일한 함수율 및 온도조건 하에서 압축벤토나이트 시료의 상대습도는 건조밀도가 낮을수록 큰 값을 보였다. 이것은 압축벤토나이트의 건조밀도가 낮을수록 공극 중에 존재하던 수증기가 측정 센서 쪽으로 이동하는데 방해를 받지 않고 더 쉽게 이동할 수 있기 때문으로 생각된다.

압축벤토나이트의 상대습도와 함수율 및 온도의 상관관계식은 22% 함수율과 90℃ 온도조건에 대한 데이터를 제외하고 다중회귀분석 (multi regression analysis)으로 결정하였다. 압축 건조밀도가 1,500 kg/m<sup>3</sup>인 경우,

$$\omega = 0.196RH - 0.029T + 1.391 \quad (r^2 = 0.96) \quad (1)$$

1,600 kg/m<sup>3</sup>인 경우는

$$\omega = 0.199RH - 0.029T + 2.596 \quad (r^2 = 0.98) \quad (2)$$

로 표시되었다. 여기서,  $\omega$ 는 함수율 (%),  $RH$ 는 상대습도 (%),  $T$ 는 측정온도 (℃), 그리고  $r^2$ 는 다중상관계수를 나타낸다. Fig. 8과 11은 각각 건조밀도 1,500 kg/m<sup>3</sup>, 1600 kg/m<sup>3</sup>인 압축벤토나이트 시료에 대한 측정결과와 상관관계식으로부터의 계산결과를 비교한 것으로서, 회귀분석으로부터 얻은 상관관계식은 측정결과와 비교적 잘 일치함을 보여주고 있다.

#### IV. 벤토나이트블록 재포화현상 해석에의 적용

Fig. 12는 KENTEX 실증실험장치의 습도센서 ((a))로부터 측정된 압축벤토나이트블록의 상대습도변화 ((b))와 회귀분석 상관관계식 (1)을 이용해서 계산한 압축벤토나이트블록의 함

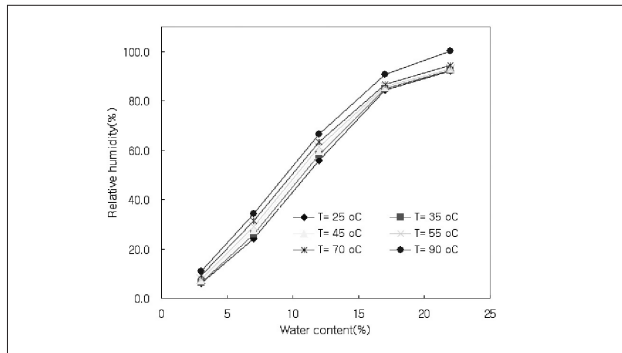


Fig. 9 Change of relative humidity as a function of water content at each temperature (dry density of compacted bentonite = 1,600 kg/m<sup>3</sup>).

수율 변화를 나타낸 그림이다.

Table 1. Measured results of relative humidity

RUN	Dry density (Mg/m <sup>3</sup> )	Water content (%)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)		
				A	B	Average
1	1.5	3	25	10.01	10.82	10.415
2	"	"	35	10.82	11.71	11.265
3	"	"	45	11.65	12.59	12.120
4	"	"	55	12.46	13.49	12.975
5	"	"	70	13.76	14.89	14.325
6	"	"	90	15.62	16.80	16.210
7	"	7	25	31.49	32.26	31.875
8	"	"	35	32.42	33.10	32.760
9	"	"	45	33.98	34.63	34.305
10	"	"	55	35.37	36.00	35.685
11	"	"	70	37.35	37.99	37.670
12	"	"	90	39.72	40.31	40.015
13	"	12	25	72.62	77.29	72.620
14	"	"	35	73.96	78.24	73.960
15	"	"	45	75.13	79.04	75.130
16	"	"	55	76.09	79.69	76.090
17	"	"	70	77.42	80.42	77.420
18	"	"	90	81.23	83.75	81.230
19	"	17	25	86.42	87.64	87.030
20	"	"	35	87.29	88.24	87.765
21	"	"	45	87.88	88.61	88.245
22	"	"	55	88.53	89.08	88.805
23	"	"	70	89.70	89.98	89.840
24	"	"	90	94.28	95.15	94.715
25	"	22	25	96.17	97.51	96.840
26	"	"	35	95.78	97.38	96.580
27	"	"	45	95.59	97.53	96.560
28	"	"	55	95.44	97.41	96.425
29	"	"	70	95.92	97.91	96.915
30	"	"	90	100.49	102.79	101.640
31	1.6	3	25	5.79	6.27	6.030
32	"	"	35	6.42	6.52	6.470
33	"	"	45	7.14	7.17	7.155
34	"	"	55	7.92	7.85	7.885
35	"	"	70	9.21	9.01	9.110
36	"	"	90	11.07	10.75	10.910
37	"	7	25	23.17	24.93	24.050
38	"	"	35	25.16	26.50	25.830
39	"	"	45	26.93	28.13	27.530
40	"	"	55	28.80	29.65	29.225
41	"	"	70	31.18	31.83	31.505
42	"	"	90	34.02	34.27	34.145
43	"	12	25	55.92	57.38	55.920
44	"	"	35	58.10	59.43	58.100
45	"	"	45	59.48	60.49	59.480
46	"	"	55	61.22	62.23	61.220
47	"	"	70	63.36	64.37	63.360
48	"	"	90	66.58	67.67	66.580
49	"	17	25	83.91	84.76	84.335
50	"	"	35	84.52	85.17	84.845
51	"	"	45	85.21	85.70	85.455
52	"	"	55	85.62	86.03	85.825
53	"	"	70	86.62	86.88	86.750
54	"	"	90	91.15	90.50	90.825
55	"	22	25	92.42	91.99	92.205
56	"	"	35	92.73	92.13	92.430
57	"	"	45	93.28	92.48	92.880
58	"	"	55	93.28	92.78	93.030
59	"	"	70	94.72	93.98	94.350
60	"	"	90	100.10	100.00	100.100



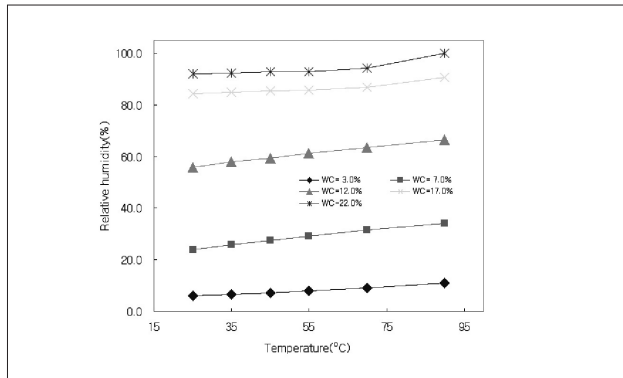


Fig. 10 Change of relative humidity as a function of temperature at each water content (dry density of compacted bentonite = 1,600 kg/m<sup>3</sup>).

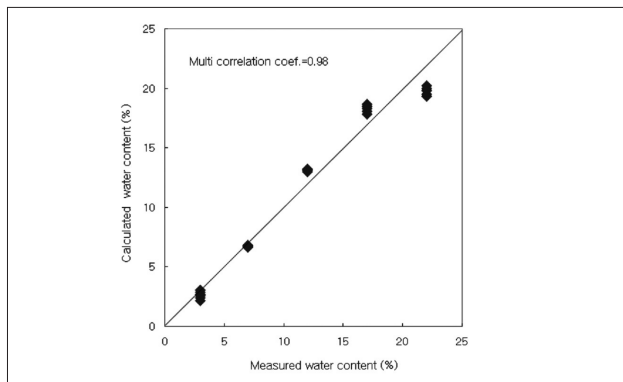


Fig. 11 Comparison between measured and calculated water content for the dry density 1,600 kg/m<sup>3</sup>.

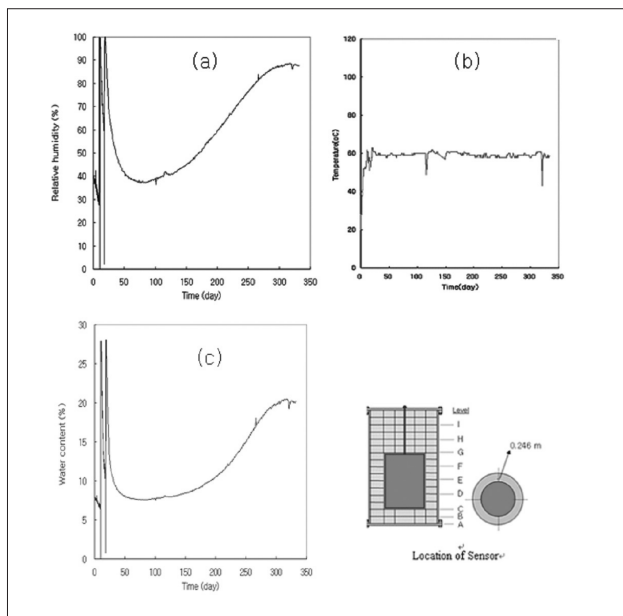


Fig. 12 Resaturation behaviour of the KENTEX bentonite blocks ((a) relative humidity evolution, (b) temperature evolution, and (c) water content evolution calculated using a relationship of water content, relative humidity, and temperature for the dry density 1,500 kg/m<sup>3</sup>).

이 그림에서 보는 바와 같이, 습도센서가 설치된 높이 0.34 m, 반경방향의 길이 0.246 m 지점의 압축벤토나이트블록 함수율은 지하수를 공급하는 순간 갑자기 증가하다가 그 뒤는 서서히 감소하고, 약 80일이 지난 뒤로부터는 다시 약간씩 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이것은 측정지점의 벤토나이트블록 재포화가 다음과 같은 과정에 의해 일어나기 때문으로 추정된다. 즉, 먼저 실험 시작과 동시에 지하수를 공급할 때 블록과 블록 사이 및 센서와 센서케이블 설치를 위해 만든 틈새로 공급 지하수가 빠른 속도로 유입되면서 함수율이 갑자기 증가하기 때문이고, 둘째는 유입된 지하수가 온도구배 (thermal gradient)에 의해 차가운 곳으로 빠져나가 건조되면서 함수율이 감소되기 때문이며, 셋째는 KENTEX 압력실린더 외부로부터 지하수가 계속 유입되고 그 결과 벤토나이트블록이 포화되면서 함수율이 증가하기 때문으로 사료된다.

### V. 결론

실험결과, 건조밀도 1,500 kg/m<sup>3</sup> 이상에서 압축벤토나이트의 온도와 상대습도는 실험 후 수 시간 내 정상상태에 도달하였다. 실험에 사용된 습도센서 (Vaisala HMT 334)는 함수율 22%, 온도 90°C 조건에서 100% 이상의 상대습도 값을 보여 측정에 한계를 보였다. 그러나 나머지 실험조건에서는 압축벤토나이트의 상대습도는 함수율이 증가할수록, 또 온도가 증가할수록 증가하였다. 압축벤토나이트의 상대습도에 대한 함수율과 온도의 민감도는 온도보다 함수율에서 더 크게 나타났다. 동일한 함수율 및 온도 조건에서 압축벤토나이트의 상대습도는 건조밀도가 낮을수록 큰 값을 보였다. 다중회귀분석 결과, 압축벤토나이트의 함수율은 상대습도와 온도에 대해 건조밀도 1,500 kg/m<sup>3</sup> 인 경우  $\omega = 0.196RH - 0.029T + 1.391$  ( $r^2 = 0.96$ ), 1,600 kg/m<sup>3</sup>의 경우는  $\omega = 0.199RH - 0.029T + 2.596$  ( $r^2 = 0.98$ )로 표시되었다. 본 연구에서 결정된 상관관계식을 KENTEX 실증실험에 적용한 결과, 압축 벤토나이트블록의 재포화는 여러 가지 수리학적 과정에 의해 진행됨을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 원자력증강기연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- [1] 강철형, 김진웅, 전관식, 박정화, 조원진, 최종원, 이재

- 완, 이연명, 김승수, 황용수, 김성기, 권상기, "고준위폐기물처분기술개발/심지층처분시스템개발," 한국원자력연구원, KAERI/RR-2336/2002 (2002).
- [2] Y. Sugita, M. Chijimatsu, T. Fujita, and H. Ishikawa, "Instrumentation in Buffer Mass," Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, PNC TN8410 97-072 (1996).
- [3] J.L. Fuentes-Cantillana and J.L. Garcia-Sineriz, "Final Design and Installation of the "In-situ" Test at Grimsel," ENRESA, Publication Technical No. 12/98 (1998).
- [4] Jae Owan Lee, Jeong Hwa Park and Won Jin Cho, "Engineering-scale Validation Test for the T-H-M Behaviors of a HLW Disposal System," J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol.4(2), P. 197-207 (2006).
- [5] Jae Owan Lee, Jeong Hwa Park, Won Jin Cho, "Engineering - scale Test on the Thermal-Hydro-Mechanical Behaviors in the Clay Barrier of a HLW Repository," Annals of Nuclear Energy 35, 1386-1396 (2008).
- [6] 이재완, 조원진, "벤토나이트완충재의 열수거동 및 장기 건전성 연구," 방사성폐기물학회지, 5(2), P.145-154 (2007).