

## Quantitative Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration in Ca-rich Waste Mineral for Accelerated Carbonation

Seong-Young Nam\*, Nam-Il Um\*\*, and Ji-Whan Ahn\*†

\*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

\*\*National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

(Received February 10, 2014; Revised March 3, 2014; Accepted March 5, 2014)

### 가속탄산화를 통한 Ca-rich Waste Mineral의 정량적인 CO<sub>2</sub> 고용량 평가

남성영\* · 엄남일\*\* · 안지환\*†

\*한국지질자원연구원 광물자원연구본부

\*\*국립환경과학원 자원순환연구과

(2014년 2월 10일 접수 ; 2014년 3월 3일 수정 ; 2014년 3월 5일 채택)

#### ABSTRACT

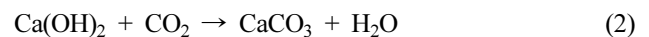
Accelerated carbonation is a technique that can be used as a CCS technology for CO<sub>2</sub> sequestration of approximately 5 ~ 20% in a stable solid through the precipitation of carbonate. An alkaline inorganic waste material such as ash, slag, and cement paste are generated from incinerators, accelerated carbonation offers the advantage of lower transport and processing costs at the same generation location of waste and CO<sub>2</sub>. In this study, we evaluated an amount of CO<sub>2</sub> sequestration in various types of inorganic alkaline waste processed by means of accelerated carbonation. A quantitative evaluation of CO<sub>2</sub> real sequestration based on a TG/DTA analysis, the maximum 118.88 g/kg<sub>waste</sub> of CO<sub>2</sub> in paper sludge fly ash, the maximum 134.46 g/kg<sub>waste</sub> of CO<sub>2</sub> in municipal solid waste incinerator bottom ash, the maximum 9.72 g/kg<sub>waste</sub> of CO<sub>2</sub> in industrial solid waste incinerator fly ash, and the maximum 18.19g/kg<sub>waste</sub> of CO<sub>2</sub> in waste cement paste.

**Key words :** Alkaline inorganic wastes, CO<sub>2</sub> sequestration, Accelerated carbonation

#### 1. 서 론

산업의 고도화에 따라 온실가스의 발생량은 점차 증가하고 있으며, 온실가스 발생을 억제 또는 저감하기 위한 노력을 활발히 진행하고 있다. 온실가스 중 대부분을 차지하고 있는 CO<sub>2</sub>는 Carbon Capture and Storage (CCS) 기술을 통해서 지중저장, 해양저장, 광물탄산화 등과 같은 방법으로 저감하기 위한 다양한 연구 개발 및 기술 개발이 시행되고 있다.<sup>1,2)</sup> 여러가지 CCS 기술에서 CO<sub>2</sub>를 저감하기 위한 방법으로 가속탄산화 (Accelerated Carbonation) 기술은 탄산염의 침전 반응을 통해서 고체 내에 안정한 상태로 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있는 기술이다. 가속탄산화는 자연에서 발생하는 풍화 (Weathering) 작용과 같은 메커니즘을 갖고 있으며, 1가 나트륨, 칼륨, 2가 칼슘, 마그네슘 이온 등과 같은 물질이 반응하여 안정하고 용해

되지 않는 탄산염을 생성하는 기술이다.<sup>3-5)</sup> 일반적으로 탄산화 반응은 다음과 같은 식 (1), (2)에 의해서 CaCO<sub>3</sub>를 생성하는 반응을 의미한다.



가속탄산화는 CO<sub>2</sub>와 반응하는 칼슘 및 마그네슘 등의 광물뿐만 아니라, 철강슬래그, 각종 소각재, 폐콘크리트 등과 같이 산업에서 발생하는 무기성 폐기물에 CO<sub>2</sub> 고용이 가능한 기술로 알려져 있다. 철강슬래그, 소각재, 폐콘크리트 등의 폐기물은 알칼리성이며, 일반적으로 칼슘, 마그네슘, 나트륨 등과 같이 CO<sub>2</sub>와 반응하여 탄산염을 생성할 수 있는 성분을 함유하고 있다.<sup>6,7)</sup> 산업에서 발생하는 생활폐기물, 산업폐기물, 슬러지 등과 같은 폐기물은 유기물 및 중금속과 같은 환경적인 문제 발생과 폐기물 부피의 감소 등과 같은 목적을 위해서 소각을 실시한다. 특히 생활폐기물 및 산업폐기물은 각 지역의 처리 업체를 통해서 소각을 실시하게 되며, 제지공정에서 발생하는

†Corresponding author : Ji-Whan Ahn

E-mail : ahnjw@kigam.re.kr

Tel : +82-42-868-3578 Fax : +82-42-861-3990

슬러지 역시 부피 감소 및 연료로 사용하기 위해서 소각을 한다. 소각을 통해서 발생하는 폐기물, 즉 소각재는 발생 위치에 따라 바닥재와 비산재로 나뉠 수 있으며, 원폐기물의 약 20%(중량비)가 소각재로 발생된다.<sup>8)</sup> 소각 과정에서 발생된 바닥재나 비산재는 일부 중금속 및 염류가 다량 함유되어 있어 환경적으로 문제가 발생되고 있으며, 소각시에 발생하는 배가스에 약 5~20%의 CO<sub>2</sub>를 배출하고 있다.<sup>8,9)</sup> 소각로에서 발생하는 폐기물과 배가스로 배출되는 CO<sub>2</sub>는 오염원의 발생 위치가 동일하기 때문에 가속탄산화를 통해서 소각재와 같은 폐기물의 환경적 안정화를 도모할 수 있으며, 또한 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 새로운 on-site 모델로 가능할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 가속탄산화를 통한 알카리 무기 폐기물의 정량적인 CO<sub>2</sub> 고용량을 도출하기 위해서 이론적 및 실제 고용가능한 양을 정량적으로 평가하였다.

2. 실험 방법

가속탄산화를 통한 알카리 무기폐기물의 정량적인 CO<sub>2</sub> 고용량을 측정하기 위해서 칼슘 함유량이 높은 제지슬러지 소각비산재 (PS-FA; Paper Sludge Fly Ash), 생활폐기물 소각바닥재 (MSWI-BA; Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash), 산업폐기물 소각비산재 (ISWI-BA; Industrial Solid Waste Incinerator Fly Ash), 폐시멘트 페이스트 (WCP; Waste Cement Paste) 등 총 4종의 폐기물을 이용하여 실험을 실시하였다. 제지슬러지 소각비산재는 대전에 위치한 H 회사에서 제공받았으며, 생활폐기물 소각바닥재는 서울의 N구 소각장, 산업폐기물 소각비산재는 경기도 P시 소각장, 폐시멘트 페이스트는 D사에서 제공받아 실험을 실시하였다. Weathering과 같이 자연 상태에 존재하는 CO<sub>2</sub>와의 반응이 진행되지 않은 시료를 얻기 위해서 소각, 적재된 후 약 1일 이내로 저장된 시료를 채취하여 실험에 사용하였다. 채취된 시료는 대형 건조기에서 3일간 105°C로 건조하여 밀봉 후 외기와의 접촉을 차단하였다.

가속탄산화 실험을 통해서 알카리 무기폐기물의 CO<sub>2</sub> 고용량을 알아보기 위해서 다양한 조건하에 실험을 진행하였다. 압력 (10, 20, 30, 40 bar)과 온도 (30, 60°C)의 조건을 달리하여 CO<sub>2</sub> 거동을 파악하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 장치를 나타낸 것이다. 온도와 압력 조절이 가능하도록 제작하였으며, CO<sub>2</sub> 주입을 위해서 유량계를 장착하였다. 알카리 무기폐기물 시료와 증류수를 고액비(L/S) 50으로 혼합하였으며, 450 rpm으로 교반하면서 분당 1L의 CO<sub>2</sub>를 주입하였다. 총 반응시간은 1시간으로 하여 진행하였으며, 반응 종료 후 고액분리를 통해 얻어진 고체 시료를 바탕으로 다양한 분석을 실시하였다.

알카리 무기폐기물의 화학성분을 측정하기 위해서 X-

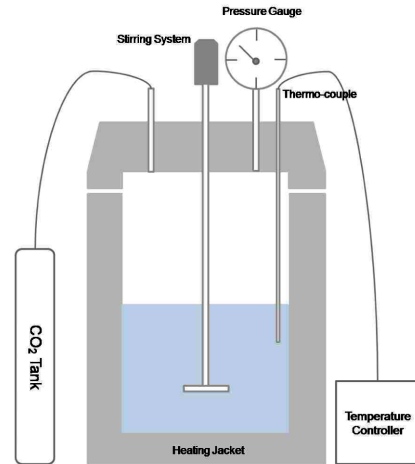


Fig. 1. Apparatus of accelerated carbonation.

Table 1. Decomposition of CaCO<sub>3</sub> by Literature

	CaCO <sub>3</sub> TGA decomposition
Cole and Kroone (1960)	600~750 poorly crystallized 820 well crystallized
Ramachandran <i>et al.</i> (1964)	850~950 calcite
Taylor <i>et al.</i> (1985a,b)	-
Papadakis <i>et al.</i> (1991)	600~800
Papadakis <i>et al.</i> (1992)	-
Stern (2001)	827~927 calcite
Huijgen <i>et al.</i> (2005)	> 500
Huntzinger (2006)	500~800
Chang and Chen (2006)	550~950

선 형광분석기 (XRF; XRF 1700, Shimadzu)를 이용하였으며, 가속탄산화에 의한 폐기물의 광물상 변화를 측정하기 위해서 X-선 회절분석기 (XRD; D/Max-1200, Rigaku; 40 kV, 40 mA)를 이용하였다. 탄산화 된 무기폐기물의 CO<sub>2</sub> 고용량을 측정하기 위해서 열중량/시차열 분석기 (TG/DTA; DTG-60H, Shimadzu)를 통해 분석을 실시하였다. TG-DTA는 여러가지 범위의 온도에서 열에 의한 시료의 질량 변화와 열 변화를 측정할 수 있으며, 질량의 변화는 시료의 화학적 성분이 기체화합물로 분해되어 기체 상태의 물질이 증발되는 것에 의해서 발생된다. 여러 문헌을 통해 CaCO<sub>3</sub>에서 CO<sub>2</sub>가 기체 상태로 분해되는 온도를 조사하였으며, Table 1에서 보는바와 같이 통상적으로 550~950°C에서 분해가 발생된다. 이는 CaCO<sub>3</sub>의 분해됨에 따라 CO<sub>2</sub>의 방출에 따라 질량 변화를 초래하게 된다.<sup>10)</sup> 따

**Table 2.** Chemical Compositions of Inorganic Wastes

(unit : wt%)

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
PS-FA	9.22	46.12	1.27	0.17	4.05	0.03	0.26	0.67	11.13	0.56	18.30
MSWI-BA	15.66	39.36	0.88	0.20	1.72	0.14	0.68	1.86	6.28	1.19	29.80
ISWI-FA	0.73	24.51	0.58	11.84	2.56	0.01	16.20	0.49	2.52	21.22	16.23
WCP	7.12	39.23	2.18	0.32	1.08	0.12	0.47	0.14	46.81	1.89	0.64

\*LOI : Loss of ignition

라서 시료의 가속탄산화 반응 전과 후의 시료의 질량감소를 측정하여 CO<sub>2</sub>의 고용량을 측정하였다.

### 3.결과 및 고찰

#### 3.1. 알칼리 무기폐기물의 물리·화학적 특성

산업에서 발생하는 알칼리 무기폐기물은 다양한 성분이 함유되어 있으며, 발생하는 공정에 따라서 성분 차이를 보인다. Table 2는 알칼리 무기폐기물의 화학분석결과로서, 제지슬러지 소각비산재의 주요성분은 46.12 wt%의 CaO, 11.13 wt%의 SiO<sub>2</sub>, 9.22 wt%의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 함유하고 있는 것으로 나타났으며, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등이 1~4 wt%로 함유되어 있는 것으로 나타났다. 생활폐기물 소각바닥재의 주요성분은 39.36 wt%의 CaO, 15.66 wt%의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6.28 wt%의 SiO<sub>2</sub>가 함유되어 있었으며, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SO<sub>3</sub> 등이 1~2 wt% 내외로 함유되어 있는 것으로 나타났다. 산업폐기물 소각비산재의 주요성분은 24.51 wt%의 CaO, 21.22 wt%의 SO<sub>3</sub>, 16.20 wt%의 Na<sub>2</sub>O, 11.84 wt%의 K<sub>2</sub>O가 함유되어 있으며, SiO<sub>2</sub>, MgO 등이 2 wt% 내외로 함유되어 있었다. 폐시멘트 페이스트의 주요성분은 46.81 wt%의 SiO<sub>2</sub>, 39.23 wt%의 CaO, 7.12 wt%의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 함유되어 있었으며, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, MgO 등이 1~2 wt% 내외로 포함되어 있었다. 4개의 시료 모두 높은 CaO 함유량을 보이고 있으며, 특히 제지슬러지 소각비산재의 경우 약 46 wt% 이상 높은 함유량을 보였다. 산업폐기물 소각비산재의 경우 상대적으로 약 24 wt%의 CaO 함유량을 보였지만, 다른 시료와는 다르게 약 16 wt%의 Na<sub>2</sub>O, 약 21 wt%의 SO<sub>3</sub>, 약 11 wt%의 K<sub>2</sub>O등을 함유하고 있는 것으로 나타났다.

가속탄산화를 통한 폐기물의 CO<sub>2</sub> 고용량은 CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O 등과 같은 CO<sub>2</sub>와 반응하기 쉬운 물질의 함유량이 많을수록 CO<sub>2</sub> 고용량은 증가할 것으로 사료된다. 따라서 제지슬러지 소각비산재, 생활폐기물 소각바닥재, 폐시멘트 페이스트가 CaO 함유량이 약 39% 이상으로 높은 고용량을 보일 것으로 판단되었으며, 산업폐기물 소각비산재의 경우 약 24%의 CaO를 함유하고 있지만 16% 정도의 Na<sub>2</sub>O등을 함유하고 있는 것으로 확인되었다. 하지만 CO<sub>2</sub>와 반응할 수 있는 칼슘, 마그네슘, 나트륨 등과 같은 성분이 어떤 광물로 존재하는지 여부에 따라서 고용량은

차이를 보일 것이며, XRD 분석을 통해서 광물상을 파악하였다.

Fig. 2는 알칼리 무기성 폐기물의 광물상 분석을 실시한 결과로, 제지슬러지 소각비산재는 calcite(CaCO<sub>3</sub>), lime(CaO), mayenite(Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub>)가 주 결정상이며, 생활폐기물 소각바닥재는 calcite(CaCO<sub>3</sub>), portlandite(Ca(OH)<sub>2</sub>), hydrocalumite(Ca<sub>2</sub>Al(OH)<sub>6.5</sub>Cl<sub>0.5</sub>·3H<sub>2</sub>O)로 구성되어 있는 것으로 확인되었다. 산업폐기물 소각비산재는 calcite(CaCO<sub>3</sub>), halite(NaCl), portlandite(Ca(OH)<sub>2</sub>)가 주 결정상이며, 폐시멘트 페이스트는 calcite(CaCO<sub>3</sub>), quartz(SiO<sub>2</sub>), anorthite(CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)로 구성되어 있는 것으로 확인되었다. 모든 시료에서 calcite가 관측된 것으로 보아, 소각시 연소온도가 낮아 산화되지 않거나, lime이나 portlandite가 대기 중의 CO<sub>2</sub>와 반응한 것으로 판단된다.

#### 3.2. 알칼리 무기폐기물의 가속탄산화

가속탄산화는 CO<sub>2</sub> 고용을 위한 기술로 탄산염의 침전 반응을 통해서 CO<sub>2</sub>를 저장하는 기술이다. Seifritz (1990)<sup>11)</sup>에 의해서 최초로 언급된 가속탄산화는 높은 순도의 CO<sub>2</sub>와 알칼리 물질과의 반응으로, 수 분 또는 수 시간 내에 반응시킬 수 있는 기술이다. 압력, 온도, 고액비, 가스의 순도, 가스의 유량, 입도 등의 다양한 변수들의 최적 조건을 도출하여 최적의 조건에서 반응을 유도하며, 최근에는 CO<sub>2</sub>의 고용량을 증가시키기 위한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub>의 고용량을 높이기 위해서 10, 20, 30, 40 bar의 압력과 30, 60°C의 온도에서 실험을 실시하였으며, 각 실험 조건에 따른 CO<sub>2</sub> 고용량을 평가하였다. 가속탄산화를 통해 서로 다른 압력과 온도에서 알칼리 무기폐기물의 광물상 변화에 대한 XRD 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3(a)는 제지슬러지 소각비산재의 가속탄산화 결과로서, 압력이 증가함에 따라서 원료에 존재하고 있는 calcite가 증가하는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 비산재에 존재하는 lime과 mayenite가 CO<sub>2</sub>와 반응하여 calcite를 생성하였기 때문이다. Fig. 3(b)는 생활폐기물 소각바닥재의 결과로, portlandite와 hydrocalumite가 CO<sub>2</sub>와 반응하여 calcite를 생성하였다. Fig. 3(c)는 산업폐기물 소각비산재 결과로서 염화물인 NaCl이 가속탄산화에 의해서 분해되는 것을 확인하였으며, portlandite가 CO<sub>2</sub>와 반응하여 calcite를 생

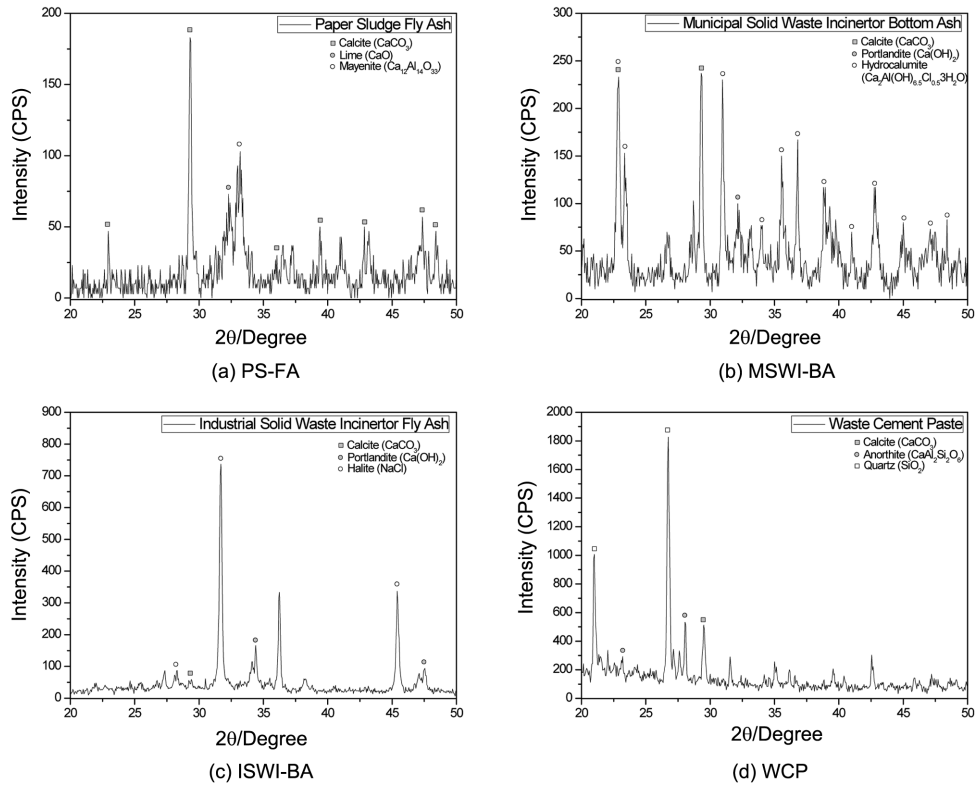


Fig. 2. XRD pattern of alkaline inorganic wastes.

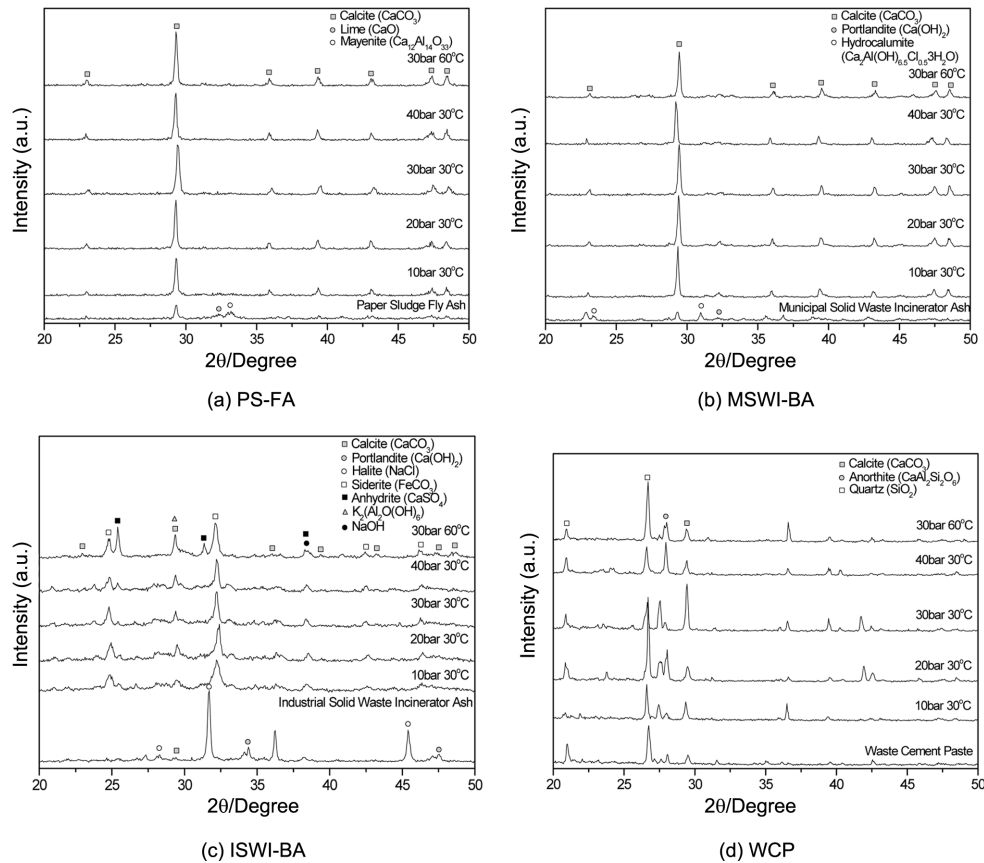


Fig. 3. XRD pattern of alkaline inorganic wastes for accelerated carbonation.

성하였다. 또한, 새로운 생성물로 siderite,  $K_2(Al_2O(OH)_6)$ , NaOH를 생성하는 것을 알 수 있으며, 30 bar의 동일한 압력에서 온도가 증가함에 따라 anhydrate가 생성되는 것을 확인하였다. Fig. 3(d)는 페시멘트 페이스트 가속탄산화 결과로서, 압력이 증가함에 따라서 calcite가 증가하는 경향을 보였으나, 큰 차이는 보이지 않았다. 또한 온도가 증가함에 따라서 calcite는 감소하는 경향을 보였다.

### 3.3. 이론적인 CO<sub>2</sub> 고용량 평가

화학적 조성에 기초한 이론적 CO<sub>2</sub> 고용량은 다음과 같은 식 (3)을 이용하였으며, 시료에 함유된 SO<sub>3</sub>를 제외한 모든 CaO는 탄산화 반응을 통해 CaCO<sub>3</sub>를 형성한다고 가정하였으며, MgO는 MgCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O는 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O는 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>로 형성한다고 가정하고 계산할 수 있다.<sup>6)</sup>

$$\begin{aligned} CO_{2-theoretical}(wt\%) = & \\ 0.785CaO + 1.091MgO + 1.41Na_2O + & \quad (3) \\ 0.935K_2O - 0.55SO_3 & \end{aligned}$$

Table 3은 이론적으로 가능한 CO<sub>2</sub> 고용량을 나타낸 결과로, 제지슬러지 소각비산재는 40.84 wt%, 생활폐기물 소각바닥재는 33.27 wt%, 산업폐기물 소각비산재는 44.27 wt%, 페시멘트 페이스트는 31.90 wt%로 나타났다. 즉, 1 kg의 제지슬러지 소각비산재는 408.40 g의 CO<sub>2</sub>를 고용할 수 있는 것으로 판단되며, 생활폐기물 소각바닥재는 332.70 g, 산업폐기물 소각비산재는 442.70 g, 페시멘트 페이스트는 319.00 g의 CO<sub>2</sub>를 고용할 수 있는 것으로 나타났다. XRF 분석을 통한 CaO 함량으로는 산업폐기물 비산재가 가장 낮은 이론적인 CO<sub>2</sub> 고용량을 보일 것으로 예측되었으나, 다른 시료와는 다르게 Na<sub>2</sub>O 및 K<sub>2</sub>O를 약 10 wt% 이상 함유하고 있기 때문에 높은 이론적 고용량을 보이는 것으로 확인되었다. 하지만 이론적인 CO<sub>2</sub> 고용량은 실제로 가능한 것이 아니라 화학 조성을 이용하여 CO<sub>2</sub>와 최대로 반응할 수 있는 양을 계산하였기 때문에 실제 CO<sub>2</sub> 고용량과는 차이를 보일 것이다. 또한 반응할 수 있는 물질들이 어떠한 광물상으로 존재하는지 여부에 따라서 고용량의 차이를 보일 수 있다.

### 3.4. TG/DTA를 이용한 실제 CO<sub>2</sub> 고용량 평가

가속탄산화를 통해 다양한 압력 및 온도 하에 실험된 실제 CO<sub>2</sub> 고용량을 측정하기 위해서 TG/DTA를 이용하였으며, 여러 범위의 온도에서 열에 의한 고체 시료의 질량변화를 측정하여 계산하였다. 측정을 통해 발생된 질량변화는 시료의 화학적 성분이 기체화합물로 분해되어 기체상태의 물질로 방출되는 것에서 발생한다는 원리에 근거를 둔다. 가속탄산화 반응 전·후의 시료 질량감소를 측정하여, CO<sub>2</sub> 고용량을 측정하였다. CO<sub>2</sub>의 분해 온도는 통

상적으로 550~950°C에서 발생되며, 본 실험에서는 700~800°C에서 기체 상태로 방출되는 것을 확인하였다. Fig. 4(a)는 가속탄산화에 의한 제지슬러지 소각비산재의 CO<sub>2</sub> 고용량을 측정한 결과로, 비산재 원료의 질량 감소는 3.992 wt%, 30 bar, 30°C의 조건에서 탄산화 된 비산재의 질량 감소는 15.649 wt%로 나타났다. 따라서 30 bar, 30°C의 조건에서 제지슬러지 소각비산재의 CO<sub>2</sub> 고용량은 11.657 wt%로 나타났으며, 1 kg의 제지슬러지 소각비산재를 통해서 116.57 g의 CO<sub>2</sub>를 고용할 수 있는 것으로 나타났다. Fig. 4(b)는 30 bar, 30°C의 조건에서 생활폐기물 소각바닥재의 CO<sub>2</sub> 고용량을 측정한 결과로서, 탄산화 전은 7.439 wt%, 탄산화 후에는 20.885 wt%로서 13.446 wt%의 CO<sub>2</sub>를 고용하는 것으로 나타났다. 따라서 1kg의 생활폐기물 소각바닥재에 134.46 g의 CO<sub>2</sub>를 고용할 수 있는 것으로 나타났다.

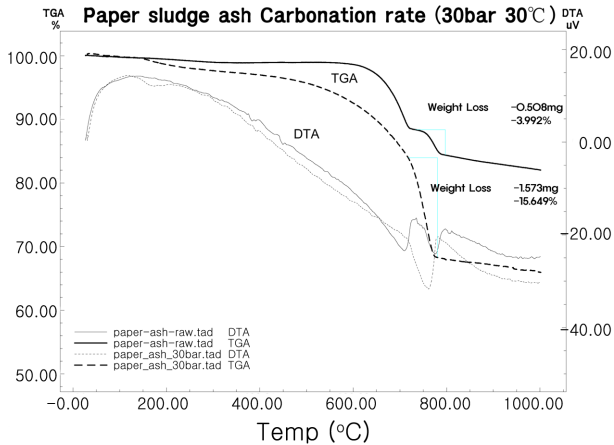
Table 4는 제지슬러지 소각비산재와 생활폐기물 소각바닥재의 다양한 조건에서의 정량적인 CO<sub>2</sub> 고용량을 나타낸 결과로서, 압력이 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 고용량은 증가하는 것으로 나타났다. 압력이 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 고용량이 증가하는 이유는 칼슘 및 CO<sub>2</sub>의 용해도와 관련이 있다. 압력이 증가함에 따라서 칼슘 및 CO<sub>2</sub> 용해도가 증가하고, 따라서 calcite의 생성량이 증가할 것으로 판단된다. 하지만 온도가 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 고용량은 감소하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 온도가 증가함에 따라 CO<sub>2</sub>의 용해도 감소와 calcium 용해도 감소와 연관이 있을 것으로 사료된다.

Fig. 5(a)는 30 bar, 30°C의 조건에서 산업폐기물 소각비산재의 CO<sub>2</sub> 고용량을 측정한 결과로, 탄산화 전의 질량 감소는 1.616 wt%로 나타났으며, 탄산화 후에는 2.580 wt%로 0.964 wt%의 CO<sub>2</sub>를 고용할 수 있는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)는 30 bar, 30°C의 조건에서 페시멘트 페이스트로, 탄산화 전에는 3.878 wt%, 탄산화 후에는 5.697 wt%로 1.819 wt%의 CO<sub>2</sub>를 고용할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 산업폐기물 소각비산재는 1 kg당 CO<sub>2</sub> 고용량은 9.64 g, 페시멘트 페이스트는 1 kg당 18.19 g의 CO<sub>2</sub>를 고용할 수 있는 것으로 나타났다.

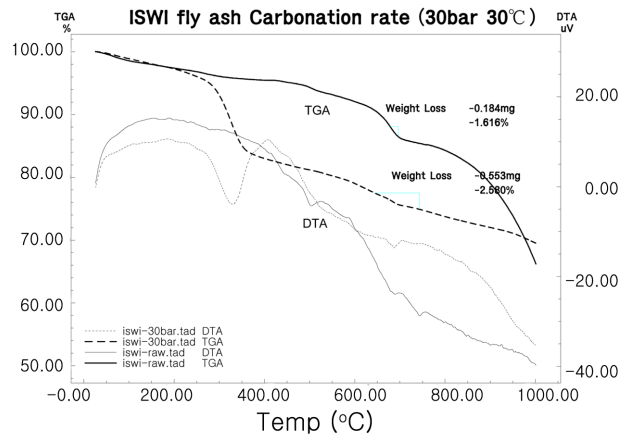
Table 5는 여러가지 조건에서의 산업폐기물 소각비산재와 페시멘트 페이스트 정량적인 CO<sub>2</sub> 고용량을 나타낸 결과로, 앞의 결과와 동일하게 압력이 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 고용량은 증가하였으며, 온도가 증가함에 따라서 고용량은 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 산업폐기물 소각비산재는 1% 이하의 낮은 CO<sub>2</sub> 고용량을 보였으며, 페시멘트 페이스트 역시 2% 이하로 매우 낮은 CO<sub>2</sub> 고용량을 보였다. 산업폐기물 소각비산재와 페시멘트 페이스트 모두 XRD 결과를 통해서 미량의 calcite가 생성된 것으로 판단되며, 이러한 결과는 원료에 CO<sub>2</sub>와 반응할 수 있는 물질이 충분하지 않거나, 칼슘과 같은 물질이 CO<sub>2</sub>와 반

**Table 3.** Theoretical CO<sub>2</sub> Sequestration of Inorganic Wastes

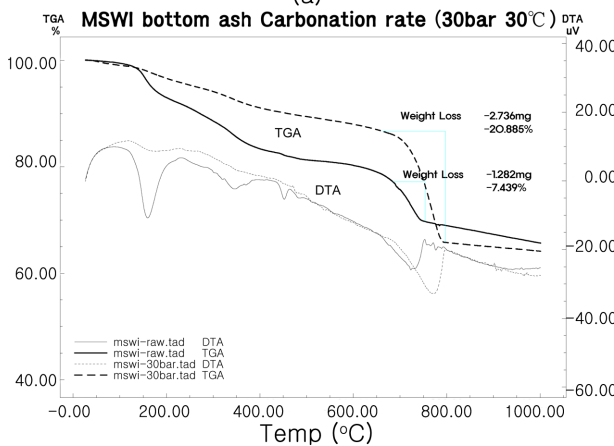
	PS-FA	MSWI-BA	ISWI-FA	WCP
Theoretical CO <sub>2</sub> Sequestration (as wt%)	40.84	33.27	44.27	31.90
Theoretical CO <sub>2</sub> Sequestration (as g-CO <sub>2</sub> /kg-waste)	408.4	332.7	442.7	319.0



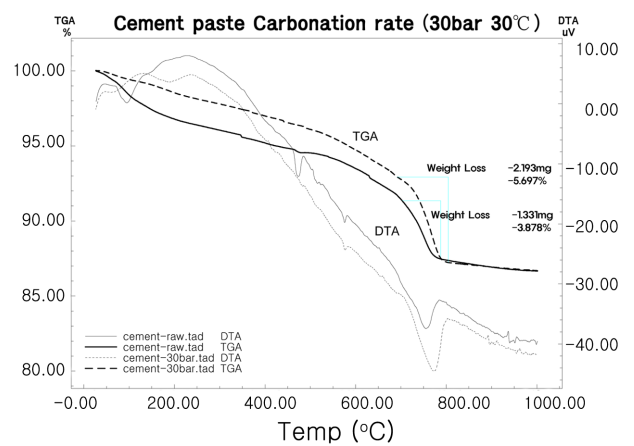
(a)



(a)



(b)



(b)

**Fig. 4.** TG/DTA graphs of alkaline inorganic wastes (a) PS-FA (b) MSWI-BA for accelerated carbonation at 30 bar and 30°C.

**Fig. 5.** TG-DTA graphs of alkaline inorganic wastes (a) ISWI-FA (b) WCP for accelerated carbonation at 30 bar and 30°C.

응하지 않는 다른 화합물로 존재하기 때문이다.

#### 4.결 론

본 연구에서는 가속탄산화 방법을 통해서 산업에서 발생하는 다양한 알칼리 무기폐기물의 정량적인 CO<sub>2</sub> 고용량 가능량을 평가하였다. CO<sub>2</sub> 고용량 평가를 위해서 화학 조성을 기반으로 한 이론적인 CO<sub>2</sub> 고용량을 평가하였으며, TG/DTA를 이용하여 실제 CO<sub>2</sub> 고용량을 정량적으로 평가하였다. 제지슬러지 소각비산재는 이론적으로 1kg당 408.40 g의 CO<sub>2</sub>를 고용할 수 있는 것으로 나타났고, 생활폐기물 소각바닥재는 332.70 g, 산업폐기물 소각비산재는

442.70 g, 폐시멘트 페이스트는 319.00 g의 CO<sub>2</sub>를 고용할 수 있는 것으로 나타났다. 가속탄산화를 통해 다양한 압력과 온도하에 CO<sub>2</sub> 고용량을 평가하였으며, 제지슬러지 소각비산재는 최대 kg당 118.88 g의 CO<sub>2</sub>를 고용하는 것으로 나타났고, 생활폐기물 소각바닥재는 최대 kg당 134.46 g의 CO<sub>2</sub>를 고용하는 것으로 조사됐다. 산업폐기물 소각비산재는 최대 kg당 9.72 g의 CO<sub>2</sub>를 고용하였으며, 폐시멘트 페이스트는 최대 kg당 18.19 g의 CO<sub>2</sub>를 고용하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해서 산업에서 발생하는 알칼리 무기폐기물의 CO<sub>2</sub> 고용량을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 보이며, CO<sub>2</sub> 저감을 위한 기술로서 가속탄산화 기술의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

**Table 4.** Quantitative CO<sub>2</sub> Sequestration in PS-FA and MSWI-BA

Material	Condition	Weight loss after the reaction (wt%)	CO <sub>2</sub> Sequestration (as wt%)	CO <sub>2</sub> Sequestration (as g-CO <sub>2</sub> /kg-waste)
Paper sludge fly ash	Raw material	3.992		
	10bar 30°C	14.230	10.238	102.38
	20bar 30°C	14.969	10.997	109.97
	30bar 30°C	15.649	11.657	116.57
	40bar 30°C	15.880	11.888	118.88
	30bar 60°C	15.148	11.156	111.56
Municipal solid waste incinerator bottom ash	Raw material	7.439		
	10bar 30°C	17.821	10.382	103.82
	20bar 30°C	19.574	12.135	121.35
	30bar 30°C	20.885	13.446	134.46
	40bar 30°C	20.036	12.597	125.97
	30bar 60°C	20.606	13.167	131.67

**Table 5.** Quantitative CO<sub>2</sub> Sequestration in ISWI-FA and WCP

Material	Condition	Weight loss after the reaction (wt%)	CO <sub>2</sub> Sequestration (as wt%)	CO <sub>2</sub> Sequestration (as g-CO <sub>2</sub> /kg-waste)
Industrial solid waste incinerator bottom ash	Raw material	1.616		
	10bar 30°C	2.014	0.398	3.98
	20bar 30°C	2.244	0.628	6.28
	30bar 30°C	2.580	0.964	9.64
	40bar 30°C	2.588	0.972	9.72
	30bar 60°C	2.288	0.672	6.72
Waste cement paste	Raw material	3.878		
	10bar 30°C	5.280	1.402	14.02
	20bar 30°C	5.223	1.345	13.45
	30bar 30°C	5.697	1.819	18.19
	40bar 30°C	5.676	1.798	17.98
	30bar 60°C	5.282	1.404	14.04

### Acknowledgment

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업(2013 T100100021)의 연구비 지원을 통하여 수행되었습니다.

### REFERENCES

1. S. Y. Pan, E. E. Chang, and P. C. Chiang, "CO<sub>2</sub> Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications," *Aerosol Air Qual. Res.*, **12** [5] 770-91 (2012).
2. B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer, "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change," pp. 319-35, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2005.
3. K. S. Lackner, "A Guide to CO<sub>2</sub> Sequestration," *Science*, **300** [5626] 1677-78 (2003).
4. S. Eloneva, S. Teir, J. Salminen, C. J. Fogelholm, and R. Zevenhoven, "Fixation of CO<sub>2</sub> by Carbonating Calcium Derived from Blast Furnace Slag," *Energy*, **33** [9] 1461-67 (2008).
5. R. Baciocchi, G. Costa, E. Di Bartolomeo, A. Poletini, and R. Pomi, "The Effects of Accelerated Carbonation on CO<sub>2</sub> Uptake and Metal Release from Incineration APC Residues," *Waste Manage.*, **29** [12] 2994-3003 (2009).
6. S. Y. Nam, J. B. Seo, T. Thriveni, and J.W. Ahn, "Accelerated Carbonation of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash for CO<sub>2</sub> Sequestration," *Geosyst. Eng.*, **15** [4] 305-11 (2012).
7. G. Costa, R. Baciocchi, A. Poletini, R. Pomi, D. Hills Colin, and J. Carey Paula, "Current Status and Perspectives of Accelerated Carbonation Processes on Municipal Waste Combustion Residues," *Environ. Monit. Assess.*, **135** [1-3] 55-75

- (2007).
8. G. C. Han, "Accelerated Carbonation for Recycling of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash," pp. 1-2, Ph. D. in Thesis, Seoul National University, Seoul, 2009.
  9. N. I. Um, S. Y. Nam, and J. W. Ahn, "Effect of Accelerated Carbonation on the Leaching Behavior of Cr in Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash," *Mat. Trans.*, **54** [8] 1510-16 (2013).
  10. M. H. Lim, G. C. Han, J. W. Ahn, K. S. You, and H. S. Kim, "Leachability of Arsenic and Heavy Metals from Mine Tailings of Abandoned Metal Mines," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **6** [11] 2865-79 (2009).
  11. W. Seifritz, "CO<sub>2</sub> Disposal by Means of Silicates," *Nature*, **345** [6275] 486 (1990).