

알칼리 활성화반응에 의한 Briquette ash의 강도 발현 특성

서명덕*** · 이수정** · 박현혜*** · 김윤종*** · 이수옥* · 김택남* · 조성백**†

*배재대학교 대학원 재료공학과

**한국지질자원연구원

***(주)동진산업

The Compressive Strength Development of Briquette Ash by Alkali Activated Reaction

Myeong-Deok Seo***, Sujeong Lee**, Hyun-Hye Park***, Yun-Jong Kim***, Su-Ok Lee*,
Taik-Nam Kim* and Sung-Baek Cho**†

*Dept. of Materials Engineering, Paichai University 14 Yeon-Ja 1 Gil Seo-gu, Daejeon, 302-735 Korea

**Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources Gwahang-no 92, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

***Dong Jin Industry Co., Ltd. Geumam-ri 1118-4, Dongi-myeon, Okcheon-gun, Chungcheongbuk -do, Korea

(2008년 7월 22일 접수 : 2008년 8월 12일 최종수정 : 2008년 8월 19일 채택)

Abstract Non-sintering cement was manufactured with briquette ash. Alkali activator for compression bodies used a NaOH solution. In order to apply alkali-activated briquette ash and the non-sintering cement to concrete, several experimental studies were performed. It was necessary to study the binder obtained by means of a substitute for the cement. This study concentrated on strength development according to the concentration of NaOH solution, the curing temperature, and the curing time. The highest compressive strength of compression bodies appeared as 353 kgf/cm² cured at 80°C for 28 days. This result indicates that a higher curing temperature is needed to get a higher strength body. Also, geopolymerization was examined by SEM and XRD analysis after the curing of compression bodies. According to SEM and XRD, the main reaction product in the alkali activated briquette ash is aluminosilicate crystal.

Key words geopolymer, briquette ash, alkali activated, compressive strength.

1. 서 론

국내 연탄의 사용량은 2000년 이후부터 급증하고 있다. 이에 따른 연탄재의 발생량은 꾸준히 증가하고 있으며, 04년도 46만톤에서 05년도 67만톤으로 급격히 증가하였다. 온실이나 화원, 난방용도 등으로 사용하는 연탄은 우리의 생활속에서 많이 쓰이는 자원중 하나이다. 최근 연탄의 사용량과 연탄재의 발생량은 늘어나고 있지만 연탄재는 쉽게 처리할 수 없어 버려지는 것이 현실이다. 때문에 이를 재활용할 수 있는 방안을 마련하는 것이 시급하다. 발생된 연탄재는 작물성장에 필요한 비료나 토양의 오염을 막기 위한 복토재로써 재활용되기도 하지만 이는 지극히 일부이며 이를 처리할 방법이 없는 대부분 지역에서는 매립처리 하고 있어서 근본적인 해결방안이라고 할 수 없다. 현재 연탄재를 처리하기 위한 매립지가

부족한 현실이고 불법매립으로 인한 환경문제까지 발생하고 있어 연탄재의 재활용 방안 마련이 시급하다.

한편 최근에는 화력발전소에서 발생하는 부산물인 fly ash 나 철강산업의 부산물인 고로슬래그 등과 같은 산업폐기물을 이용하여 시멘트를 대체하기 위한 순환자원 재활용 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁸⁾ Fly ash나 슬래그 같은 알루미늄도 규산염광물을 함유하는 물질에 알칼리 활성화제로 NaOH, Na₂CO₃, Na₂SiO₃ 등을 첨가하면 화학적 반응에 의해 소성과정을 거치지 않아도 건설재료로 사용이 가능한 강한 기계적 강도를 갖는 경화체가 만들어진다.⁹⁻¹⁴⁾ 이 연구들은 Davidovits에 의해 만들어진 geopolymer 반응에 기초를 두고 있다. 가장 간단한 geopolymer는 메타카올린과 알칼리 실리케이트 용액이 반응한 혼합물로 구성된다고 하였으며 양생온도를 20~150°C 범위로 유지시켰을 때 발열반응과 Si-O-Al 결합을 한 반응 생성물이 나타난다고 하였다. 1979년 Davidovits는 geopolymer를 근거로하여 SILIFACE PROCESS라는 제조공정을 고안하였다. 이 제조공정은 Al-Si mineral이 함유된 분말을 강알

†Corresponding author

E-Mail : sbcho@kigam.re.kr (S. B. Cho)

칼리 조건에서 혼합하면 화학적 반응이 일어나게 되며 반응한 혼합물은 화학적으로 결합한 하나의 세라믹 덩어리로 되어 단단해진다.^{9,10)} Geopolymer 반응은 이러한 메카니즘의 차이와 조성의 차이로 인해 콘크리트에서 갖지 못하는 특성을 나타내며 빠른 응결시간을 가지고 있어 초기에 높은 강도를 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다.^{9,10)}

연탄재는 연탄을 만드는 과정에서 점결제로 점토를 사용하고 있기 때문에 연탄의 연소 후에도 점토의 주성분인 SiO₂와 Al₂O₃ 성분이 남아 있다. 연탄재에 알칼리 활성화제를 첨가하여 기계적 강도가 만들어 진다면 위에서 설명한 것과 같이 geopolymer 반응을 이용한 건설재료 용도로 사용이 가능하다.

연탄재를 이용하여 건자재로 재활용 시 장점은 첫째, 폐기물로 취급되어 대부분 매립 처리 하는 연탄재를 회수한다면 매립지 수명을 단축시키는 쓰레기 매립 난을 해소할 수 있다. 이는 2000년 이후 연탄의 사용량 증가에 있어 앞으로 발생할 연탄재들을 처리하는데 필수적인 사항이기도 하다. 둘째로 연탄재는 폐기물이기 때문에 비용이 저렴하므로 경제적 가치가 있다. 지금까지 결합재로 사용되어 왔던 포틀랜드 시멘트는 천연자원의 소비와 제조시 발생하는 이산화탄소 등 환경오염에 관한 문제점을 가지고 있다. 연탄재를 원료로 하는 건자재 사용 시 시멘트의 사용량을 줄이고 비용을 절감할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 발생·폐기되는 연탄재를 재활용하기 위한 방법을 찾고자 연탄재와 강알칼리를 사용하여 시멘트를 대체할 수 있는 비소성 무기결합재를 제조하였다. 이 과정에서 활용성을 높이기 위하여 가장 높은 기계적 강도를 얻고자 하였으며 연탄재와 강알칼리의 혼합조건, 양생온도와 시간이 강도에 미치는 영향 등을 알아보았다.

2. 실험 방법

2.1 시료 및 시료준비

본 연구에 사용된 시료는 대전소재 A연탄공장에서 생산되어 화원에서 연소한 후 폐기된 연탄재이다. 회수한 연탄재는 자연상태에서 3일 이상 충분히 건조한 후, 콘 크러셔(Cone crusher, Marcy Gy-Roll Crusher, Svedala Industries, U.S.A)를 사용하여 3 mm 이하의 크기로 파쇄하였다. 파쇄된 시료는 geopolymer의 반응성을 높이기 위하여 $\Phi 10\sim 30$ mm의 쇄불을 매체로 하는 본드밀(bond mill)에 넣고 입자의 최대크기가 40 μm 이하가 되도록 분쇄하여 실험용 시료로 사용하였다. 연탄재와 알칼리 활성화제로는 수산화나트륨(NaOH)을 증류수에 용해시켜 사용하였다. 또한 수산화나트륨은 6M, 8M, 10M, 12M로 농도를 달리하여 알칼리용액을 제조하였다.

2.2 성형체 제조

Fig. 1은 geopolymer를 제조하기 위해 실험에 사용된 주 원료 및 제조방법을 나타내었다. 실험은 먼저 증류수와 수산화나트륨을 혼합하여 알칼리 활성화용액(liquid)을 제조한 다음 분쇄한 연탄재와 제조된 NaOH용액을 혼합하였다.

본 실험에서는 연탄재 분말대비 NaOH용액의 양을 30 wt.%로 고정하여 NaOH용액의 농도만을 변화시켜 실험하였다. 활성화제로 사용한 NaOH용액의 양을 연탄재의 분말대비 20 wt.% 첨가하면 성형 후 형태는 유지되었으나 성형성이 좋지 않아 조금만 외력이 가해져도 형태를 유지하지 못하고 부수어 지는 경향을 나타내었다. 이에 비해 NaOH용액의 양을 연탄재 분말대비 30 wt.% 및 40 wt.%로 하면 적당한 강도를 가지는 성형체를 얻을 수 있었다. NaOH용액의 양을 50 wt.%로 하면 슬러리 상태로 되어 가압성형에는 부적절하다고 생각되었다.

성형체를 제조하기 위한 시료는 연탄재와 NaOH용액이 충분히 혼합되어야 한다. 혼합은 분당 200회 회전하는 mixer를 이용하여 5분간 섞어주었다. 혼합된 시료는 압축강도 측정용 시편을 제작하기 위해 $\Phi 15$ mm의 몰드에 넣고 100 kgf/cm²의 힘으로 press 하여 성형체를 제작하였다. 이렇게 만들어진 성형체는 25°C, 60°C, 80°C에서 각각 보관하고 압축강도 측정일까지 건조양생하였다. 연탄재와 NaOH용액을 혼합하여 성형체를 제조하기 위한 실험조건은 Table 1과 같다. 성형체는 NaOH용액의 농도, 양생온도 및 양생 시간을 실험변수로 하여 제작하였다.

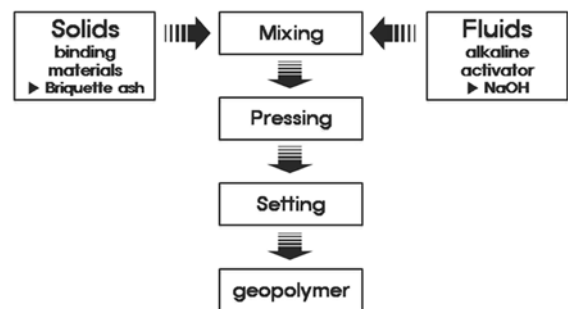


Fig. 1. Procedure of experiment.

Table 1. Experimental parameters of the NaOH concentration, cure time and temperature for compression bodies

Liquid/B-A (wt.%)	NaOH (M)	Temperature (°C)	Time (day)
0.3 : 1.0	6	25	1
	8		3
	10	60	7
	12	80	14
			28

*B-A: Briquette Ash

Table 2. Chemical composition of briquette ash (unit : wt.%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Ig.loss
B-A	57.26	27.44	6.50	1.20	1.13	3.59	0.32	1.49	0.06	0.20	1.26

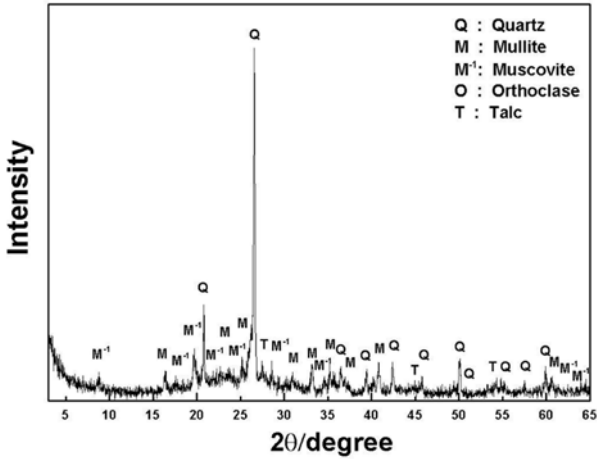


Fig. 2. X-ray diffraction pattern of briquette ash.

2.3 분석방법

연탄재로 제조된 성형체의 압축강도 시험은 압축강도 측정기(Unitech T, R&B Inc.)를 사용하였다. 시험에 사용된 성형체는 같은 조건에서 실험된 3개의 시편을 대상으로 하고 초당 0.3 mm의 속도로 압축강도를 측정 후, 측정값 3개의 평균을 구하여 압축강도를 산출하였다.

또한 연탄재와 알칼리 활성화반응에 의한 성형체의 파단면 미세구조를 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM : JSM-6380LA, JEOL, Japan)분석을 수행하였고, 알칼리 활성화반응에 의해 생성된 반응생성물을 관찰하기 위하여 X-선 회절(XRD : X-Pert MPD, Philips, Netherlands)분석을 수행하였다.

3. 실험 결과

3.1 원료의 특성

원료 물질인 연탄재의 특성은 X-선 회절분석과 X-선 형광(XRF : MXF-2100, Shimadzu, Japan)분석을 이용하여 정량분석 및 원료 물질의 특성을 검토하였다. Table 2와 Fig. 2는 각각 연탄재의 화학적 조성과 XRD 분석결과를 보여주고 있는 것으로, 연탄재를 구성하고 있는 물질은 quartz (SiO₂)와 mullite (3Al₂O₃ · 2SiO₂), 운모, 장석 및 활석 등으로 나타났다.

연탄재는 주사 전자현미경으로 관찰한 결과 Fig. 3에 보이는 것처럼 모여 있는 작은 입자와 모서리가 예리한 입자로 구성되어 있었다. Fig. 4는 이 입자들을 구성하고 있는 화학성분을 알아보기 위하여 EDAX의 mapping으로 표면을 분석한 그림이다. 그 결과 모서리가 예리한

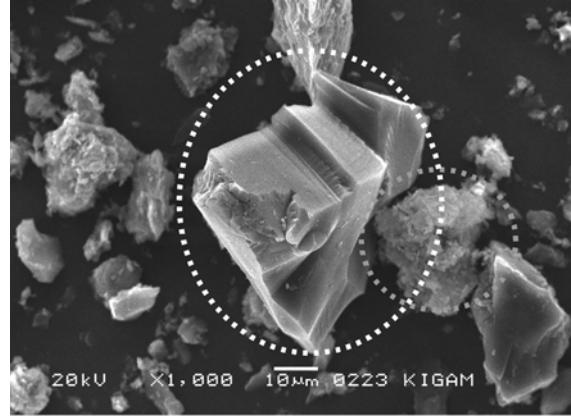


Fig. 3. Scanning electron micrographs of remaining unburned carbon to briquette ash.

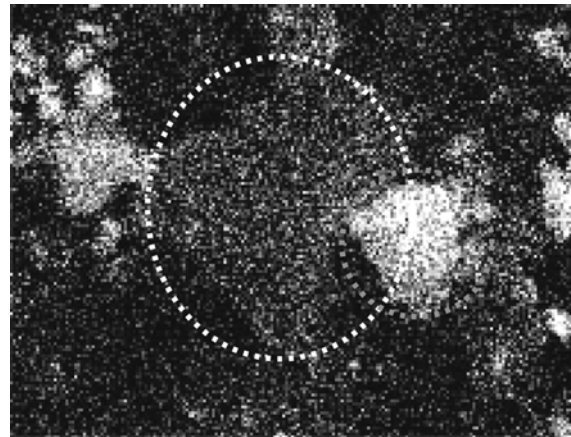


Fig. 4. Ingredient of briquette ash each particle by EDAX analysis.

입자는 Carbon인 것으로 나타났고, 그렇지 않은 입자의 화학성분은 Si, Al, K를 주성분으로 함유하고 있는 점토 성분으로 판단되었다. 일반적인 비금속 광물과 구성 성분이 매우 유사한 것이었다. 연탄재에 잔존하는 미연소 탄소의 양을 확인하기 위하여 공업분석을 시행하고 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 본 실험에 사용된 연탄재에는 고정탄소가 9.88% 함유되어 있는 것으로 나타났다.

3.2 압축강도 특성

연탄재의 분말대비 NaOH용액의 양을 30 wt.%와 40 wt.%로 변화시켜 상온에서 양생한 경우 성형체의 양생시간에 따른 압축강도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 두 경우 모두 양생시간이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을

Table 3. Proximate analysis of briquette ash (unit : wt.%)

	Fixed Carbon	Volatile Materials	Moisture	Ash
B-A	9.88	2.43	0.12	87.69

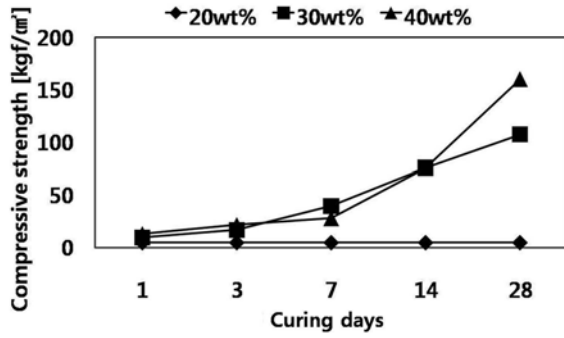


Fig. 5. Compressive strength of compression bodies cured at 25°C and solid / liquid ratio.

보이고 있지만 첨가량 차이에 따른 압축강도의 차이는 크게 나타나지 않았다. 따라서 성형체 제작을 위한 적정 첨가량은 30 wt.%가 적당하다고 생각되었다.

연탄재와 알칼리 활성화 반응을 위한 적정 알칼리 농도를 찾기 위해 NaOH용액의 농도를 6M부터 12M까지 점차 높여가며 실험하였다. 25°C, 60°C, 80°C에서 양생하고 1, 3, 7, 14, 28일-압축강도를 측정하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6(a)는 제조된 성형체들을 25°C에서 조건별로 양생하여 압축강도를 측정한 결과이다. NaOH용액의 농도에 따라 비교하였을 때 6M에서 1일 양생한 압축강도가 9.8kgf/cm²의 압축강도를 가지나 12M-1일 양생에서는 3.4kgf/cm²로 NaOH용액의 농도가 높을수록 압축강도가 낮아졌다. 3, 7, 14, 28일 결과에서도 마찬가지로 NaOH의 농도가 6M일 때보다 12M일 때 압축강도가 떨어지는 것으로 나타났다. NaOH용액의 농도가 같은 경우에는 양생시간이 증가할수록 압축강도가 높아졌다. 6M-1일 양생에서 9.8 kgf/cm²의 압축강도가 28일 양생하면 107.6 kgf/cm²의 압축강도로 증가하였다. 8M~12M 농도의 양생조건에서도 같은 결과가 나타났다. 따라서 25°C에서 양생할 경우, 6M내지 8M이 적당하며 28일 이상의 장기 양생기간이 필요한 것을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 연탄재와 알칼리 활성화반응으로 제조된 성형체들을 60°C에서 양생하여 압축강도를 측정한 결과이다. 25°C의 그래프에 비해 상대적으로 높은 압축강도를 나타냈다. 앞의 25°C에서 양생한 경우 28일 양생하여도 압축강도가 최고 107.6 kgf/cm² 밖에 도달하지 않지만, 양생온도를 60°C로 하는 경우 6M의 농도로 1일 양생하여도 147.1 kgf/cm²의 높은 압축강도를 갖는 것으로 나타났다.

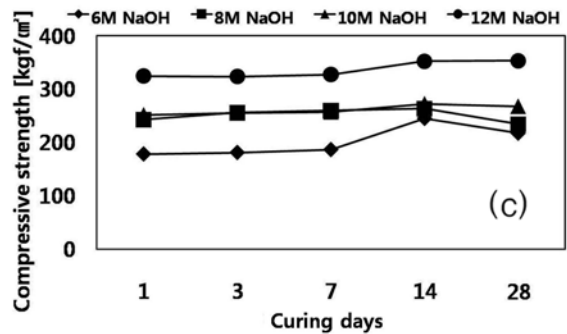
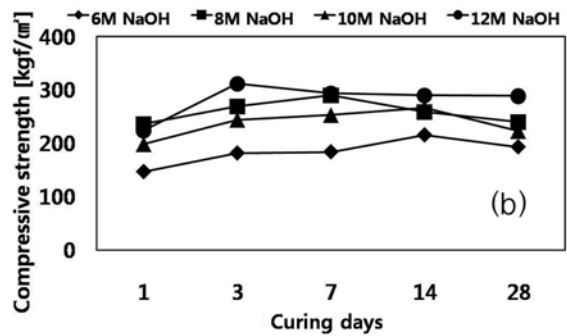
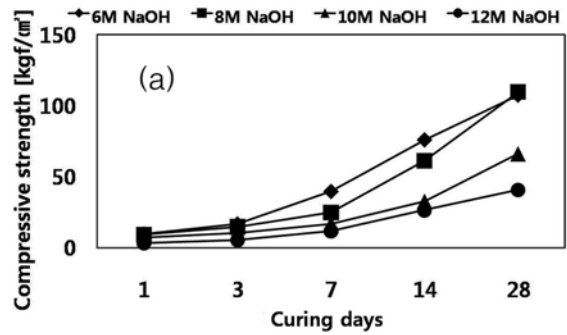


Fig. 6. Compressive strength of compression bodies cured at (a) 25°C, (b) 60°C and (c) 80°C.

또한 전체적인 압축강도 결과는 위의 결과와 반대로 NaOH용액의 농도가 6M일 가장 낮은 압축강도를 나타내었고 12M일 때 가장 높은 압축강도를 보여주고 있다. 60°C의 압축강도 측정결과를 보면 1일부터 28일 까지 약간씩 증가하였지만 큰 증가를 나타내지 않았다. 이는 geopolymer의 빠른 응결시간으로 초기에 높은 강도를 발현하는 특성이 60°C의 고온양생에서 나타나고 있었다.

Fig. 6(c)는 더 높은 온도인 80°C에서 양생하여 압축강도를 측정한 결과이다. 이 결과는 60°C에서 측정한 압축강도 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있었다. 60°C일 때보다 전체적으로 더 높은 강도를 가지고 있는 것으로 나타났다. 본 실험에서는 NaOH용액의 농도가 6M에서 12M로 높아질수록 압축강도가 증가하였으며 12M-28일 80°C 양생조건에서 가장 높은 압축강도인 353.6 kgf/cm²

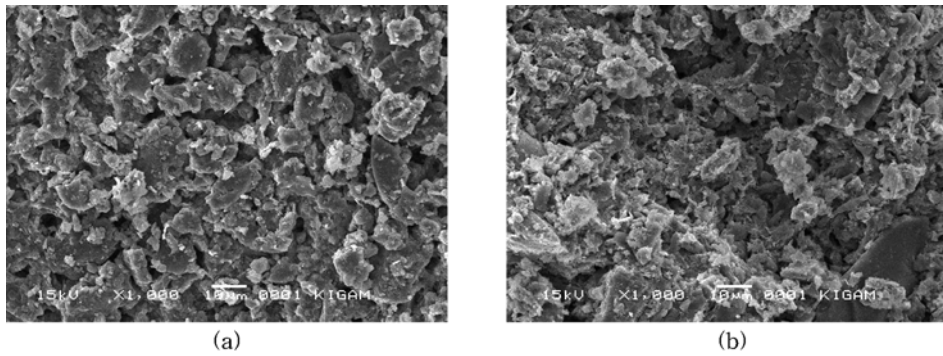


Fig.7. Scanning electron micrographs of briquette ash treated with 12M NaOH solution at 28day for (a) 25°C, (b) 60°C.

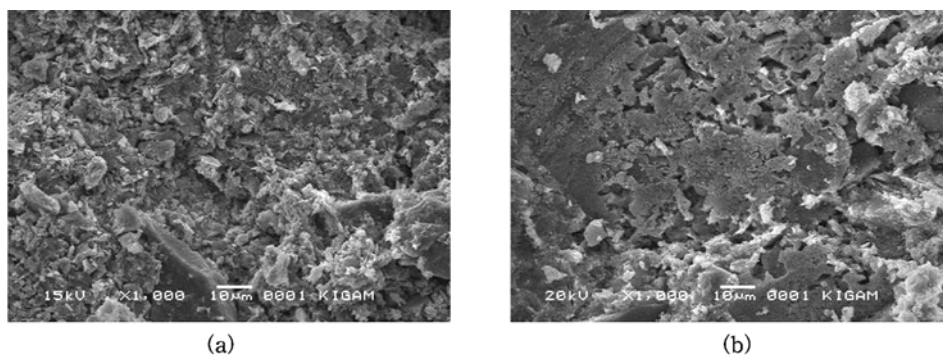


Fig. 8. Scanning electron micrographs of briquette ash treated with 12M NaOH solution at 80°C for (a) 7day, (b) 28day.

결과를 얻을 수 있었다. 압축강도가 발현된 원인을 알아내기 위하여 시편의 파괴 후 파단면을 관찰하여 그 변화를 비교하고 XRD 분석을 통해 반응 생성물을 알아보고자 하였다.

3.3 SEM 분석을 통한 미세구조 관찰

연탄재와 NaOH용액의 반응으로 만들어진 geopolymer 성형체 중 반응이 덜된 25°C에서 12M-28일 양생한 시편과 상대적으로 반응이 이루어진 60°C에서 12M-28일 양생한 시편의 파단면을 SEM으로 관찰하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 25°C에서 양생한 시편으로 연탄재와 알칼리 용액의 반응생성물로 보이는 겔 입자가 부분적으로 덮여진 것이 보이고 있다. 또한 입자와 입자사이의 틈이 큰 것으로 보아 반응이 완전하지 못하여 강도를 증가시킬 수 없었다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7(b)에서 보이는 60°C 양생한 결과는 더 많은 겔이 생성되어 입자간의 조직이 더욱 치밀하게 되어 강도를 증가 시키게 된 것을 알 수 있다.

또한 80°C의 양생시간에서는 geopolymer 반응의 특성처럼 조기에 높은 압축강도를 발현하고 있는 것으로 나타났지만 양생 시간이 지남에 따라 압축강도가 미세하게 증가한 원인을 알아보기 위해 SEM으로 파괴된 시편의 파단면을 관찰하였다. 연탄재와 12M NaOH용액의 반응

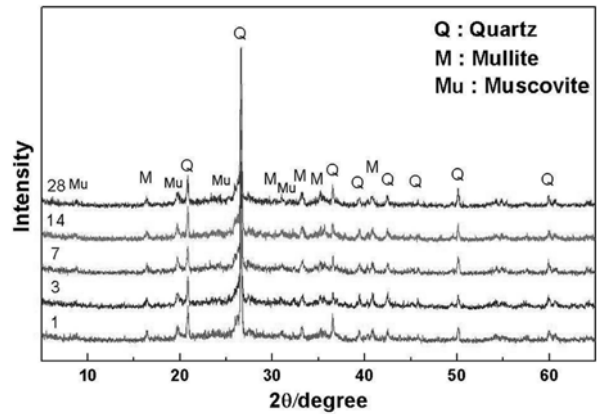


Fig. 9. X-ray diffraction patterns of briquette ash treated with 12M NaOH solution at 80°C for 1, 3, 7, 14, 28days.

으로 만들어진 geopolymer 성형체 중 80°C에서 양생하여 제조한 시편의 파단면을 SEM으로 관찰하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 7일 시편의 파단면에서는 Fig. 8(a)에서 보이는 것과 같이 반응생성물로 보이는 겔 입자가 연탄재를 덮고 있는 것이 나타나며 Fig. 8(b)에 보여 지는 28일 양생 결과에서는 입자가 전체적으로 덮여 하나의 덩어리를 이루고 있는 것을 알 수 있다.

3.4 X-선 회절을 통한 결정구조 분석

Fig. 9은 연탄재와 알칼리용액을 혼합하여 만들어진 geopolimer 성형체들 중 가장 높은 압축강도를 나타내고 있는 80°C에서 양생한 시편의 양생시간별로 X-선 회절 분석하여 비교한 그래프이다. 양생일에 따른 geopolimer 성형체의 XRD 분석결과 전체적으로는 미세한 비정질 peak가 나타났다. 그러나 출발원료인 연탄재가 가진 성분으로 인하여 대부분 quartz (SiO_2)와 mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) 상으로 결정질이 나타났다. 또한 원료에 포함된 점토질 성분인 muscovite가 일부 남아 있는 것이 확인되었다. SEM으로 관찰되었던 연탄재를 덮고 있는 반응 생성물은 XRD 분석으로는 분명한 peak가 나타나지 않는 무정형의 비용해성 aluminosilicate 입자로 구성된 혼합물로 판단되어지며, 이러한 결과는 다른 연구자의 문헌에서 연구한 결과와도 일치한다.¹²⁾ 따라서 geopolimer 반응에 의한 생성물은 결정질인 Al-Si계 물질과 amorphous 한 semi-crystalline gel이 섞여있는 형태라고 할 수 있다.

4. 고 찰

원료의 특성은 quartz와 mullite로 나타났는데 이중 mullite는 점결제로 사용된 점토 광물이 연소열에 의해 상전이 하여 생긴 것으로 판단되며 그 밖에 물질들은 점토광물 속에 혼합되어 있던 것으로 연소 후에도 특성 변화가 없는 것으로 생각된다. 현미경 관찰시 연탄에는 낮은 연소열에 의해 미연소된 석탄이 잔재하고 있었다. 연탄재에 잔존하는 미연소 탄소는 본 실험에서 의도하고자 하는 geopolimer 반응에 참여하지 않기 때문에 강도증가에 나쁜 영향을 줄 수도 있을 것으로 생각되었다.

25°C에서 양생한 시편의 압축강도 측정결과는 NaOH의 농도가 높으면서도 압축강도가 낮은 값을 나타냈다. 25°C에서 양생한 성형체들은 대부분이 연탄재와 알칼리 활성화반응에 참여하지 못한 과잉의 NaOH용액이 성형체 표면에 석출되어 있었다. 석출되는 용액은 NaOH의 몰 농도가 높은 시편일수록 더 많이 나오고 있었다. 따라서 25°C에서 양생하는 조건은 geopolimer 반응을 이루기에 적합하지 않으며 60°C이상의 고온양생하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

60°C 이상의 양생조건은 geopolimer 반응의 빠른 응결시간에 의해 초기에 강도를 발현하는 특성이 잘 나타나고 있다. 이것은 온도에 의해 geopolimer반응이 촉진되어 NaOH용액이 연탄재와 대부분 반응했기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 양생 온도는 연탄재와 알칼리활성반응을 이용할 경우 강도 발현을 위한 매우 중요한 변수임을 알 수 있었다. 결과에서도 양생온도를 증가시키는 것이 성형체의 압축강도 증가에 크게 기여하고 있었다.

압축강도 증가의 원인은 알루미늄 규산염 광물을 함유

하고 있는 연탄재가 NaOH용액과 반응하여 반응물을 생성 시키게 되어 압축강도를 증가시킨 것으로 생각된다. Fly ash나 slag를 기초로 하는 다른 연구들에서는 이 물질을 aluminosilicate gel 이라고 부르고 있지만 연탄재와 관련한 자료들은 아직까지 정확하게 규명되고 있지 않다. 하지만 이 반응생성물은 원료의 성분에서 크게 차이가 나지 않는다면 동일한 물질로도 해석될 수 있다.

5. 결 론

연탄재와 같은 무기계 폐기물은 환경에서 비교적 안정적인 상태이기 때문에 구성성분을 정확히 검토할 경우 재 활용하여 자원으로 사용이 가능한 장점이 있다. 본 연구를 통해 연탄재와 NaOH용액을 혼합하여 geopolimer 성형체를 제조하고 압축강도 및 특성을 검토하였으며 실험 결과로부터 geopolimer 반응에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연탄재의 주 성분은 quartz와 mullite 등으로 구성되어 있어 이는 알루미늄 규산염 광물과 알칼리 활성화제의 혼합으로 반응하는 geopolimer 반응을 이루기에 적합한 특성을 나타내었다.

(2) 연탄재와 12M NaOH용액 30 wt.%를 혼합하여 80°C-28일 양생한 조건에서 압축강도가 353 kgf/cm²으로 가장 높은 결과를 얻었다.

(3) 고온의 양생조건 그리고 알칼리용액의 농도가 높을수록 반응이 잘 이루어져서 기계적인 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 세부적인 조건을 변화시켜(알칼리용액의 농도, 혼합비증가 등) 압축강도를 더욱 증가시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

(4) 또한 연탄재에 포함되어 있는 미연소 탄소는 본 실험에서 의도하고자 하는 geopolimer 반응에 참여하지 않으므로 이를 제거하면 압축강도는 더욱 증가할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. S. K. Gang, Y. I. Kim and J. D. Kim, Catalog of reports on energy R&D, ed. by KIER, p.105-118, KIER, Daejeon (1985).
2. W. Jiang and D. M. Roy, Ceram. Bull., **71**, 642 (1985).
3. P. K. Mehta and O. E. Gjory, Cem. Concr. Res., **12**, 587 (1982).
4. Y. S. Kim, J. H. Rim, B. H. Kim and B. S. Shin, J. Miner. Eng., **34**, 227 (1997).
5. Puertas, S. Martinez-Ramirez, S. Alonso and T. Vazquez, Cem. Concr. Res., **30**, 1625 (2000).
6. A. Palomo, M. W. Grutzeck and M. T. Blanco, Cem. Concr. Res., **29**, 1323 (1999).
7. B. V. Rangan, D. Hardjito, S. E. Wallah and D. M. J. Sumajouw, J. Mater. Sci., **42**, 3124, (2007).

8. F. Jirasit, L. Lohaus, In Proceedings of the World Congress Geopolymer (Saint Quentin, France, June 2005). p107-111.
9. J. Davidovits, 15th ed., Melbourne, Australia, (2002).
10. J. Davidovits, In Proceedings of the world Congress Geopolymer (Saint Quentin, France, June 2005). p9-15.
11. A. F. Ross, J. D. Kenneth, MacKenzie, L. Catherine, Nicholson and S. Shimada, J. Europ. Ceram. Soc., **25**, 1471 (2005).
12. J. G. S. van jaarsveld, J. S. J. van Deventer and L. Lorenzen, Miner. Eng. **10**, 659 (1997).
13. J. Davidovits, J. Therm. Anal., **37**, 1633 (1991).
14. P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. J. Jannie and V. Deventer, Cem. Concr. Res., **37**, 1590 (2007).