

Properties of artificial aggregates fabricated with various heating conditions

Kangduk Kim and Seunggu Kang[†]

Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

(Received November 8, 2010)

(Revised December 3, 2010)

(Accepted December 10, 2010)

Abstract The artificial aggregates were fabricated by using the inorganic wastes, dredged soil produced at a dredging work. The input temperature (800~1000°C), output temperature (1100~1200°C) and heating rate (5~10°C/min) in sintering process were controlled to fabricate the aggregates with various value of density and water absorption, and their properties were analyzed as a function of those factors. The specimens sintered at the lower input temperature showed the higher density and the lower water absorption while those with higher input temperature had many pores inside of the aggregates, lower density and higher water absorption. Also increasing the input temperature accelerated the black core phenomenon in the aggregates. The bloating phenomena which the gigantic pores were generated inside the aggregates were improved as increasing the output temperature, but its effect was lower than that of input temperature. It could be realized that the bloating tendency was improved from the results that the density was increased and water absorption was decreased with increasing heating rate from 5 to 10°C/min. It was found that the artificial aggregates of light or heavy weight with various value of density and water absorption could be fabricated by using dredged soils naturally involving gas and fluxing components by controlling the sintering conditions.

Key words Aggregates, Sintering, Microstructure, Bulk density, Water absorption

다양한 승온조건으로 제조된 인공골재의 특성

김강덕, 강승구[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 443-760

(2010년 11월 8일 접수)

(2010년 12월 3일 심사완료)

(2010년 12월 10일 게재확정)

요약 준설탁업 시 발생하는 무기성 폐기물인 준설탁토를 이용하여 인공골재를 제조하였다. 소성조건에 따른 다양한 비중과 흡수율의 골재를 제조하기 위하여, 투입온도(800~1000°C), 배출온도(1100~1200°C) 및 승온속도(5~10°C/min)를 변화시켜 소성하였으며, 그에 따른 인공골재의 물성변화를 관찰하였다. 투입온도가 낮을 경우 골재의 비중은 높고 흡수율은 낮은 특성을 나타냈으며, 투입온도가 높아지면 골재 내부에 기공이 다량 형성되고 비중은 낮아지고 흡수율은 증가하는 경향을 나타내었다. 더불어 투입온도 증가에 따라 골재 내부의 블랙코어(black core) 현상도 두드러졌다. 한편 배출온도가 높아질수록 골재 내부에 거대기공이 발생하는 발포특성이 향상되기는 하나, 그 효과는 투입온도에 비해 크지 않았다. 승온속도가 5°C/min에서 10°C/min로 증가하면, 골재의 비중은 낮아지고, 흡수율이 높아져 골재의 경량화 특성이 향상됨을 알 수 있었다. 연구결과 자체적으로 가스성분과 용제성분을 포함하고 있는 준설탁토는 소성조건에 따라 경량부터 중량의 다양한 비중과 흡수율의 인공골재 제조가 가능함을 알았다.

1. 서 론

최근 건설 환경의 급격한 변화로 인한 초고층 건물 및 초장대교의 등장은 건축 설계 변화와 함께 전통적으로

사용되던 건축 재료를 대신할 새로운 기능성 건설재료를 필요로 하고 있다. 이런 이유로, 기존 건축물에 주로 사용되던 천연골재를 대신할 인공경량골재의 연구가 활발히 진행되어 있다[1-5].

인공골재의 경량화를 위해서는 소성 시 내부에 가스를 발생시키는 발포제 성분과 표면에 액상을 형성시키는 용제 성분이 필수적이다[6, 7]. 또한 가스 발생 및 액상형성 온도의 적절한 제어를 통한 기공제어가 필요하다. 인

[†]Corresponding author
Tel: +82-31-249-9767
Fax: +82-31-244-8241
E-mail: sgkang@kyonggi.ac.kr

공 골재에서 발포제 역할을 하는 것은 주로 원료에 포함된 유기물과 결정수, 그리고 탄소성분이며 액상을 형성하는 용제성분보다 낮은 온도에서 연소 반응에 의한 가스 발생을 유도한다. 액상을 형성하는 알카리 및 알카리 토류 산화물의 반응은 일반적으로 가스발생온도보다 고온에서 일어나므로, 가스형성과 포집을 통한 다양한 비중과 흡수율을 갖는 인공골재를 제조하기 위해서는 골재의 소성조건 제어가 매우 중요하다.

Adell은 승온 속도 변화에 따라 소성된 미분 연료재(Pulverized Fuel Ash)의 특성에 관해 연구하였으며, 천천히 소결된 시편은 소결온도가 증가함에 따라 흡수율은 감소하고 소결 밀도와 수축률은 증가하였으며, 고온에서 빠르게 소결된 경우 소결밀도는 낮아지고 흡수율은 높아지는 결과를 얻었다[8]. Gennaro는 경량 팽창 골재(Lightweight Expanded Aggregates) 생산을 위해 응회암으로 제조된 3~8mm 크기의 골재를 1220~1380°C 소성조건으로 muffle furnace 및 로타리 킬른에서 소성하는 실험을 수행하였다[9]. 소성 결과 골재들이 로타리 킬른에서 muffle furnace과 같은 밀도를 얻기 위해서는 일반적으로 muffle furnace보다 60~80°C 이상 높은 온도가 요구되어지는 실험결과를 얻었다.

본 실험에서는 인공골재 대량 생산 시 소성공정에 사용되는 로타리 킬른의 운전조건에 따른 인공골재의 물성 변화를 예측하기 위해 muffle furnace를 이용하여 소성 온도, 승온 속도, 투입 및 배출온도와 같은 소성조건을 변화시키고 그에 따른 인공골재의 특성변화를 관찰하였다.

2. 실험방법

인공골재의 원료는 'Y' 화력발전소 공사현장에서 발생된 준설토를 사용하였다. 준설토를 열풍건조기에서 120°C/48 hr의 조건으로 건조 후, 핀밀(Pin mill)을 이용하여 100 µm 이하로 분쇄하였다. 분쇄된 준설토에 물 20 wt% 첨가하여 지름 10 mm의 구형 성형체를 제조하였다.

성형체는 일정 온도로 미리 가열시킨 상태의 전기로에 투입하여 일정한 승온 속도로 가열하여 지정된 온도에 도달하면 즉시 배출시켜 냉각하는 방법을 적용하였다. 이때, 승온 속도는 각각 5 및 10°C/min로 수행하였으며, 시편의 투입온도는 800, 900, 1000°C로 변화시키고, 배출온도는 1100, 1150, 1200°C로 변화시켰다.

원료의 화학조성은 XRF(ZSX-100e, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였다. 소성된 인공골재의 비중과 흡수율은 KS F 2503 '굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법'을 이용하여 측정하였다. 광학현미경(DCS-105, Sometech Vision, Korea)과 SEM(JSM-6500F, JEOL, Japan)을 이용하여 소성된 인공골재의 미세구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 준설토의 화학조성 분석결과를 Table 1에 나타내었다. SiO₂와 Al₂O₃가 각각 70.7 wt%와 14.4 wt%로 존재하며, 강열감량성분도 4.1 wt% 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

Riley는 점토가 소성 시 발포(bloating)하여 경량화되기 위해서는 2가지 특성을 갖는 성분들이 함유되어야 한다고 주장하였는데, 그중 하나는 고온에서 가스를 포집하기에 충분한 점성을 갖는 용제(flux)성분, 다른 하나는 가스를 발생시키는 성분이다[7]. 또한 SiO₂, Al₂O₃ 그리고 용제(FeO, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O)를 축으로 하는 삼성분계를 작성하여 소성 시 우수한 발포특성을 발현할 수 있도록 충분한 점성을 갖는 점토의 조성구간을 나타내었다. Riley가 제안한 3성분계의 각축은 전통적인 산화물 분류에 의거하여 산성산화물(SiO₂, TiO₂, ZrO₂, P₂O₅), 중성산화물(Al₂O₃, Cr₂O₃) 그리고 염기성산화물(CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, ZnO, MnO, PbO)로 대체할 수 있다.

Table 1의 화학조성 결과를 Riley의 3성분계에 적용하기 위하여 각각 산성산화물, 중성산화물, 염기성산화물로

Table 1
Chemical compositions of dredged soil

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | Ig. loss | Total |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-------------------|------------------|------------------|----------|-------|
| Dredged soil | 70.7 | 14.4 | 3.8 | 0.8 | 0.2 | 2.5 | 2.7 | 0.8 | 4.1 | 100.0 |

Table 2
The acid, neutral and basic oxide content in the dredged soil

| | Acids | | Neutrals | | Bases | | | | Total |
|--------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----|-------------------|------------------|-------|
| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | |
| Dredged soil | 73.7 | 0.8 | 15.0 | 4.0 | 0.9 | 0.2 | 2.6 | 2.8 | 100.0 |
| Sub tot. | 74.5 | | 15.0 | 10.5 | | | | | 100.0 |

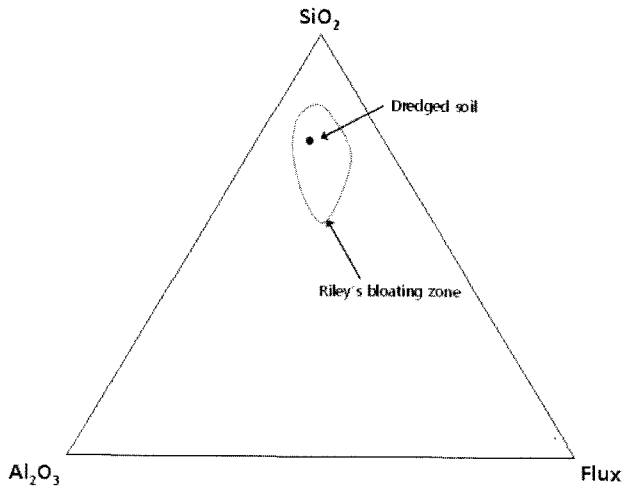


Fig. 1. Composition diagram of dredged soil. Dashed line represents limit of bloating by Riley.

다시 구분하여 Table 2에 나타내었다. 이 때 SO₃, C, 강열감량(Ig. loss) 성분을 제외한 나머지 주요 산화물들의 합이 100%가 되도록 작성하였다. 준설토는 산성산화물이 74.5 wt%, 중성산화물이 15 wt% 그리고 염기성 산화물이 10.5 wt% 존재하며 이는 Riley가 제안한 세라믹

삼성분계에서 발포현상이 가능한 구간에 들어가게 되며 이를 Fig. 1에 나타내었다. 또한 약 4%의 강열감량 성분을 포함하고 있어 소성조건에 따른 변화를 관찰하기에 적합할 것으로 판단된다.

5°C/min의 승온속도로 소결된 인공골재의 절단면 광학 이미지를 Fig. 2에 나타내었다. 투입온도(800°C)와 배출온도(1100°C)가 낮은 경우, 골재 내부의 블랙코어 형성이 미비하며, 기공형성도 잘 관찰되지 않았다. 투입온도(800°C)는 낮고 배출온도(1200°C)가 높은 경우, 골재 중심부에 기공 형성이 증가되었으나, 블랙코어 현상은 뚜렷이 관찰되지 않았다. 투입온도(1000°C)는 높고 배출온도(1100°C)가 낮은 경우, 골재 내부에 블랙코어가 크게 형성되었으며, 미세한 기공들이 많이 형성됨을 관찰할 수 있었다. 투입온도(1000°C)와 배출온도(1200°C)가 동시에 높은 경우에는 골재 내부의 블랙코어 색이 뚜렷해지고, 동시에 블랙코어 부분의 기공크기가 증가하였다.

결과적으로 투입온도가 낮을 경우 골재의 비중은 높고 흡수율은 낮은 특성을 나타냈으며, 투입온도가 높아지면 골재 내부에 기공이 다량 형성되고 비중은 낮아지고 흡수율은 증가하는 경향을 나타내었다. 더불어 블랙코어(black core) 현상도 두드러졌다. 한편 배출온도가 높아

| Input temp. (°C) | Output temp.(°C) | | |
|---------------------|------------------|-----|------|
| | 800 | 900 | 1000 |
| 1100 | | | |
| 1150 | | | |
| 1200 | | | |

Fig. 2. Optical microscopic images for cross section of artificial lightweight aggregates at various input/output temperature (heating rate = 5°C/min).

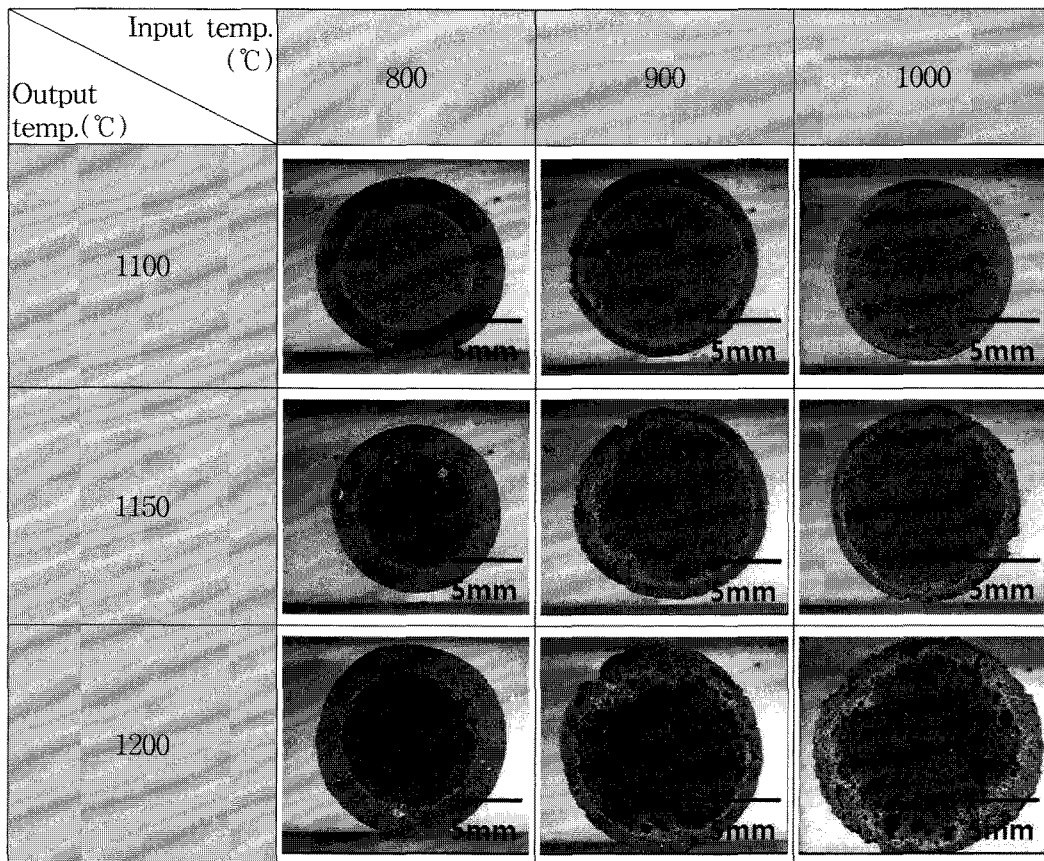


Fig. 3. Optical microscopic images for cross section of artificial lightweight aggregates at various input/output temperature (heating rate = 10°C/min).

질수록 거대기공을 많이 포함한 다공성구조를 갖는 인공 경량골재의 특성을 나타내었으나, 골재의 발포특성에 미치는 효과는 투입온도에 비해 크지 않았다.

Fig. 3은 승온속도 10°C/min의 조건으로 소성된 인공 골재 절단면의 광학이미지 관찰 결과이다. 투입온도 및 배출온도가 높을수록 골재 내부에 블랙코어가 잘 발달되고, 기공의 크기가 거대화해지는 경향은 승온속도 5°C/min일 때와 유사함을 관찰 할 수 있다. 그러나 골재의 블랙코어링 현상 및 발포경향이 승온속도 5°C/min 경우와 비교하여 더욱 증가된 것을 확인 할 수 있다.

소성 시 투입 및 배출온도에 따른 인공골재의 부피비중 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 투입 및 배출온도가 높을수록 골재의 부피비중은 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 투입 및 배출온도 조건이 동일할 경우 승온속도가 빠를수록 인공골재의 비중이 낮아지는 것을 관찰하였다. 특히 부피비중이 1 이하인 경량골재는 투입 및 배출온도가 본 실험조건 중 가장 높은 각각 1000°C 및 1200°C 조건에서 승온속도 10°C/min 경우에만 얻을 수 있었다.

소성 시 투입 및 배출온도에 따른 인공골재의 흡수율 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 흡수율은 투입 및 배출온

도가 높을수록 증가하고, 승온속도가 클수록 높게 나타났다. 승온속도 5°C/min의 경우 투입온도가 800°C인 시편의 경우 배출온도가 증가할수록 흡수율이 1%에서 8%로 증가하고, 투입온도가 1000°C의 경우 배출온도가 증가할수록 흡수율은 4%에서 14%로 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 앞의 Fig. 2와 3의 온도조건에 따른 골재의 미세구조 관찰결과와 일치하였다. 즉 투입온도와 배출온도가 증가할수록 블랙코어 내 기공 형성 경향이 높아졌고, 골재의 발포성이 증가하였는데 그 결과 비중은 감소하고 흡수율은 증가한 것으로 생각된다.

위와 같이 투입온도와 배출온도의 변화 및 승온속도에 따른 골재의 미세구조와 물리적 특성의 변화는 상대적으로 낮은 가스 발생온도와 상대적으로 높은 액상형성온도의 차이에 의한 것으로 판단된다. 투입온도와 배출온도가 낮을 경우, 골재 표면에 액상 형성이 충분하지 않으므로, 발생된 골재내부의 가스가 쉽게 외부로 빠져나가면서 내부에 기공이 형성되기 어렵다. 특히 투입온도가 상온(常溫)으로 낮아질 경우 골재는 발포되지 않고 소결되면서 오히려 수축하게 된다. 그러나 투입온도와 배출온도가 높을 경우 골재 내부의 급격한 가스발생과 동시에 골재표면에 많은 양의 액상이 형성되면서 가스는 골

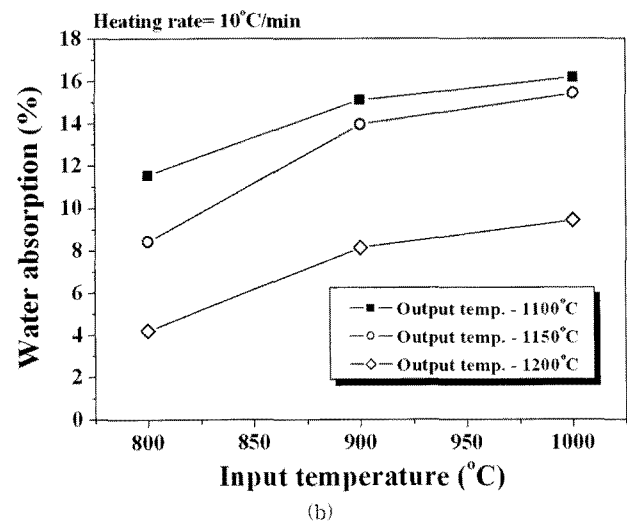
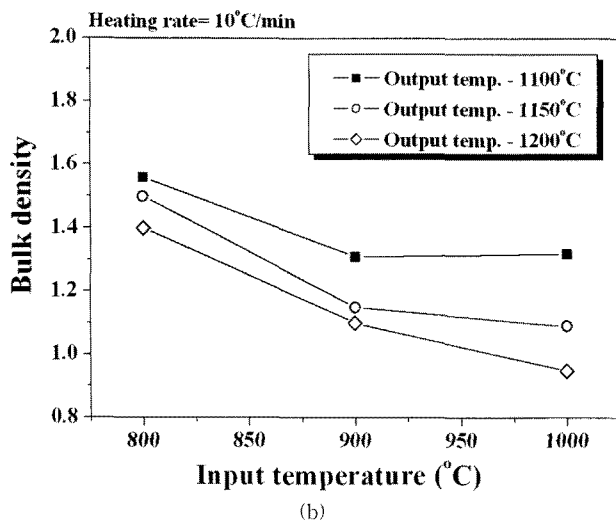
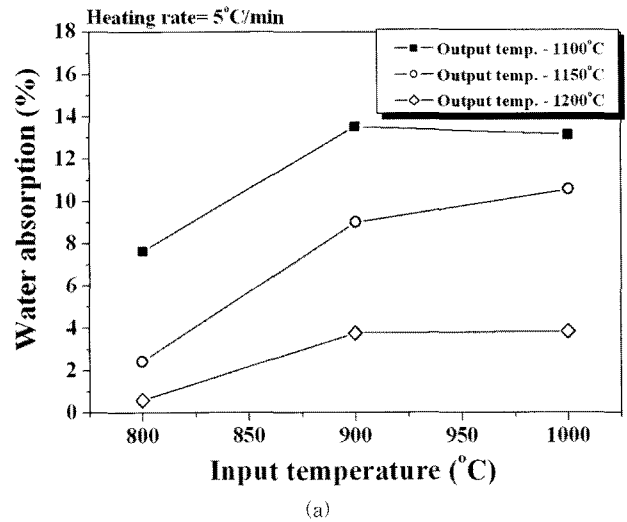
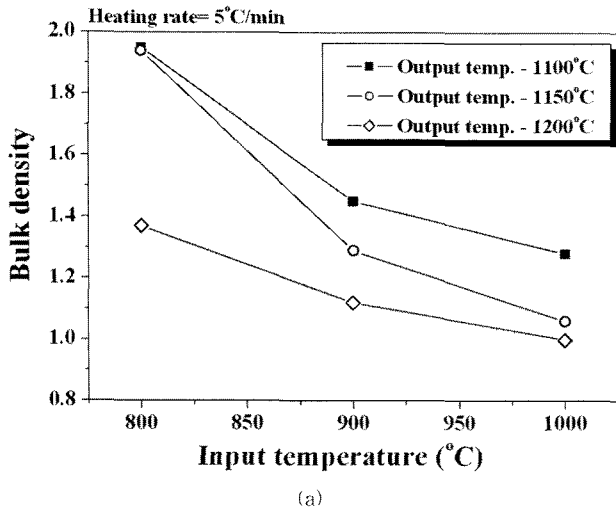


Fig. 4. Bulk density of artificial lightweight aggregates at various heating rate and input/output temperature conditions; (a) heating rate = 5°C/min and (b) heating rate = 10°C/min.

Fig. 5. Water absorption of artificial lightweight aggregates at various heating rate and input/output temperature conditions; (a) heating rate = 5°C/min and (b) heating rate = 10°C/min.

재 내부에 포집된다. 동시에 골재는 발생된 액상에 의해 점성거동을 보이며 팽창하게 된다. 특히 승온속도가 빠를 경우, 골재는 가스발생온도구간에서 액상형성온도구간으로 빠르게 진입하면서, 발생된 가스가 미처 빠져나가지 못하고 내부에 상대적으로 많이 포집되면서 기공형성과 발포에 유리할 것으로 판단된다[6-8]. 이상의 실험 결과로 부터 소성조건에 따른 미세구조 및 물성 변화는 인공경량골재 제조 시 투입온도와 배출온도, 그리고 승온 속도에 크게 의존함을 확인하였다. 특히 준설토의 경우 4%의 강열감량 성분을 포함하고 있으며, 알카리 산화물과 알카리토류 산화물들이 점토에 비해 많이 포함되어 있어 다른 첨가성분 없이 소성조건 변화만으로 발포가 가능했던 것으로 판단된다.

일반적으로 세라믹 내부에 형성되는 검은 부분을 블랙코어(black core)라고 한다. 소성 시 골재표면의 붉은 색을 나타내는 껍질부분은 철(Fe) 성분의 산화반응에 의해

의한 것이며, 골재내부는 액상형성에 따른 점성거동으로 치밀화 된 골재표면에 의한 산소 차단과 유기물과 미연탄소(C)의 산화반응에 의해 철성분이 환원되어 검은색을 띠게 되는데, 이는 점토 제품의 급속 소성 시 자주 관찰된다[10, 11]. 본 실험에서 투입온도가 낮을 경우 블랙코어 형성이 미비하였는데 골재 표면의 액상형성 이전에 가스가 빠져나간 후 액상막이 형성되면서 내부의 환원반응이 일어나지 않았기 때문이다.

4. 결 론

화력 발전소에서 배출된 준설토는 화학조성에 10%의 용제성분과 4.1%의 발포제 성분이 존재하여 소성 시 발포현상을 통한 다공성으로 인공골재 제조가 가능하였다. 준설토로 제조된 성형체의 투입온도와 배출온도가

낮을수록 부피비중은 높고 흡수율은 낮은 인공골재를 얻을 수 있었다. 이는 낮은 온도에서 발생된 가스가 골재 내부에 미처 포집되지 못하고 빠져나가면서 골재가 치밀화 되기 때문이다. 성형체의 투입온도와 배출온도가 높을수록 골재의 비중은 낮고, 흡수율은 높은 골재를 얻을 수 있었다. 이는 발생된 가스가 고온에서 골재표면에 형성된 액상에 의하여 내부에 포집되면서 팽창하기 때문이다. 성형체를 소결할 때, 승온속도가 증가할수록 가스발생온도구간에서 액상형성 온도구간으로 빨리 진입하면서, 가스의 포집에 의한 골재의 경량화 경향이 증가하였다. 결과적으로 준설토를 이용한 인공골재의 제조 시 적절한 발포제와 용제의 첨가 없이 성조건의 제어에 따른 다양한 비중과 흡수율의 인공골재 제조가 가능하였다.

감사의 글

“본 연구는 한국연구재단에서 지원하는 2009년도 일반 연구자 지원사업 중 기본연구 2009-0077077에 의해 수행되었습니다.”

참 고 문 헌

- [1] D.O. Park, S.H. Sa, S.H. Kim, S.W. Ji, S.K. Choi and C.H. Seo, “A study on the properties of lightweight aggregate concrete according to the pore structure and water absorption characteristics of lightweight aggregate”, *J. Arch. Inst. Kor.* 25[3] (2009) 85.
- [2] C.S. Lee, S.H. Choi, J.H. Park and Y.O. Kim, “A study on moisture transport of artificial lightweight concrete”, *J. Kor. Soc. Civil Eng.* 29[4A] (2009) 373.
- [3] W.J. Yang, W.H. Yi, S.W. Jee and H.S. Lee, “Reinforcement effect and capacity of punching shear on flat plate slab-column connections using eco lightweight concrete”, *J. Arch. Inst. Kor.* 25[8] (2009) 53.
- [4] B. Gonzalez-Corrochano, J. Alonso-Azcárate, M. Rodas, F.J. Luque and J.F. Barrenechea, “Microstructure and mineralogy of lightweight aggregates produced from washing aggregate sludge, fly ash and used motor oil”, *Cem. & Conc. Composites* 32 (2010) 694.
- [5] V. Ducman and B. Mirtic, “The applicability of different waste materials for the production of lightweight aggregates”, *Waste Management* 29 (2009) 2361.
- [6] S.M. Han, D.Y. Shin and S.K. Kang, “Preparation for porous ceramics using low grade clay”, *J. Kor. Cera. Soc.* 35[6] (1998) 575.
- [7] C.M. Riley, “Relation of chemical properties to the bloating of clay”, *J. Amer. Cera. Soc.* 34[4] (1951) 121.
- [8] V. Adell, C.R. Cheeseman, A. Doel, A. Beattie and A.R. Boccaccini, “Comparison of rapid and slow sintered pulverised fuel ash”, *Fuel* 87 (2008) 187.
- [9] R. de Gennaro, P. Cappelletti, G. Cerri, M. de' Gennaro, M. Dondi, S.F. Graziano and A. Langella, “Campanian Ignimbrite as raw material for lightweight aggregates”, *Appl. Clay Sci.* 37 (2007) 115.
- [10] J.Y. Park, Y.T. Kim, K.G. Lee, S.G. Kang and J.H. Kim, “The mechanism of black core formation”, *J. Kor. Cry. Growth and Cry. Tech.* 15[5] (2005) 208.
- [11] V.Z. Abdrakhimov and E.C. Abdrakhimova, “Formation of the black core in high-speed firing of floor tiles”, *Glass and Ceramics* 56 (1999) 263.