

Characteristics of sintered fly ash-clay body prepared by slip processing and its applicability for foundation soils

Seung-Gu Kang[†] and Yeong-Saeng Lee*

Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea

*Department of Civil Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea

(Received November 17, 2008)

(Accepted December 3, 2008)

Abstract The civil engineering properties for the coal fly ash produced from a power plant mixed with sintered powders made from the fly ash-clay slip system were measured and its applicability for the foundation soils was investigated. The F-slip whose dispersion state is 'not good' and C-slip which is re-flocculated by adding a flocculant to a well-dispersed slip were fabricated and then sintered. The sintered body made from C-slip had more uniform microstructure than that of F-slip, therefore, the bulk density and compressive strength were improved. The civil engineering properties such as compression index, compressive strength, permeability coefficient of fly ash were improved by mixing 0.84~2 mm powders obtained by crushing a sintered body made from C-slip. Therefore, the applicability of mixed powders composing of fly ash and sintered body made from C-slip was confirmed to foundation soils due to its improved civil engineering properties.

Key words Fly ash, Slip, Direct coagulated casting, Civil engineering, Foundation soil

슬립 공정으로 제조된 비산재-점토 계 소결체의 물성 및 기반재로의 적용 특성

강승구[†], 이영생*

경기대학교 공과대학 신소재공학과, 수원, 442-760

*경기대학교 토목공학과, 수원, 442-760

(2008년 11월 17일 접수)

(2008년 12월 3일 심사완료)

요약 비산재-점토 계 슬립으로부터 제조된 소결체 분쇄 분말을 화력발전소에서 배출되는 비산재와 혼합하여 그 토목공학적 특성을 측정하고 기반재로의 적용가능성을 조사하였다. 분산이 잘 되지 않은 비산재-점토 계 슬립(F-slip)과 이를 분산시킨 후 재응집시킨 슬립(C-slip)을 제조하고 이로부터 소성체를 합성하였다. C-slip으로부터 제조된 소결체가 F-slip 경우보다 더 균일한 미세구조를 나타냈으며 따라서 그 밀도 및 강도가 더 높았다. C-slip으로 부터 소성된 소결체를 파쇄한 뒤 0.84~2 mm 입자를 추출하여 순수 비산재에 섞은 혼합분말은 압축지수, 압축강도 그리고 투수계수 등 토목공학적 물성이 순수 비산재에 비하여 향상되었다. 따라서 슬립 공정으로 제조된 분말을 비산재에 혼합하게 되면 그 역학적 특성이 개선되어 기반재 또는 기층재로의 적용 가능성이 향상됨을 확인하였다.

1. 서론

최근 들어, 전력 사용량이 급증하면서 화력발전소에서 부산물로 발생하는 석탄회량도 증가하여 2010년도에는 우리나라에서 연간 600만 톤에 이를 것으로 추정되고 있다. 석탄회 중 80% 이상을 차지하는 것이 비산재(fly ash)이고 나머지는 바닥재(bottom ash)인데, 현재 우리나라에서 바닥재 재활용 사례는 거의 없는 실정이며, 비산

재는 시멘트 분야에 대부분 사용되고 있어 석탄회 재활용 연구의 다양한 분야적용이 필요한 실정이다.

외국에서는 비산재를 이용한 성토재, 매립재, 노반재, 기반재, 매립지의 라이너 등 토목건설재로서의 재활용에 대한 많은 연구와 시공 사례가 많다[1-3]. 반면, 국내에서도 건설 재료로서의 타당성 연구나 매립 성토시의 적정 혼합비에 대한 연구 등[4, 5]이 진행된 바 있으나 아직은 실용화단계에 이르지 못한 것이 실정이다. 최근에는 국내에서 대량 발생 폐기물을 토목건설재로 재활용하려는 연구가 시작되고 있다. 예를 들어 항만건설 등의 대규모 산업시설 구축에 따라 매년 대량으로 배출되는 준설토 등에 대한 재활용을 위한 보강 경량토의 토목공

[†]Corresponding author

Tel: +82-31-249-9767

Fax: +82-31-244-8241

E-mail: sgkang@kgu.ac.kr

Table 1
Composition of clay and fly ash

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	lg-loss
Clay	61.7	22.7	3.5	0.6	0.5	0.4	1.6	0.3	0.1	8.7
Fly ash	65.3	22.9	3.9	0.9	0.6	0.2	0.9	1.2	0.3	3.8

학적 물성에 대하여 연구한 논문들이 발표된 바 있다 [6, 7].

본 연구에서는 화력발전소 부산물인 비산재를 점토와 혼합하여 슬립을 형성하고 이를 성형 및 소결한 뒤 적정 크기의 분말입자를 추출하여 이를 순수 비산재에 혼합하여 그 토목공학적 특성을 분석함으로써 도로, 운동장, 모 표장 등에서의 기반재 또는 기층재로서의 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 슬립 제조 및 소결체 물성 측정

본 실험에 사용된 비산재와 점토의 화학성분을 Table 1에 나타내었다. 비산재는 'C' 도에 위치한 화력발전소에서 배출되는 석탄 비산재를 사용하였고, 점토는 청자점토로서 가소성이 좋은 것을 사용하였다. 출발원료에 대한 입도분석을 X-ray sedimentation(Sedigaph 5000ET, Micromeritics, USA)로 행하여 Fig. 1에 나타내었다. 점토의 평균입경은 약 6 μm로, 비산재의 11 μm보다 약간 더 크며, 점토 비중은 측정된 결과 약 2.3으로 우리나라에 존재하는 일반 토사의 평균 비중 2.7보다 훨씬 가볍다.

점토와 비산재를 3 : 7(무게비)으로 혼합한 뒤 물을 첨

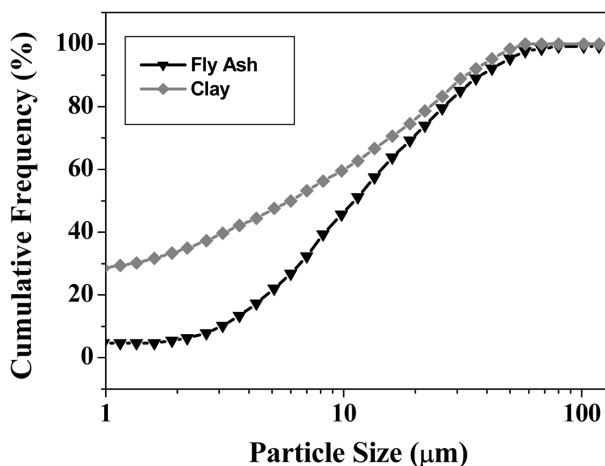


Fig. 1. Particle size distribution for the clay and fly ash produced from power plant in 'C'-Do, Korea.

가하여 비중 = 1.6의 슬립을 제조하였다. 비산재-점토 계 슬립을 제조할 때, 분산제와 응집제의 효과에 대하여는 여러 연구가 있으며[8, 9], 본 연구에서는 Lee 등[9]의 연구에서 제시된 공정조건을 사용하였다.

비산재-점토 계 슬립에 분산제인 물유리(sodium silicate, Na₂SiO₃)를 첨가하면 슬립 분산성이 향상되는데, 물유리 첨가량이 소량이면 슬립이 충분히 분산되지 못해 비교적 높은 점도값을 갖는다. 이때 점도가 약 1,000 cP인 슬립을 F-slip이라고 명명하였다. 여기서 F는 응집된 상태(flocculated)를 의미한다. 분산제 첨가량이 일정 값을 넘으면 슬립의 점도가 더 떨어지지 않는데 이때의 슬립을 D-slip이라고 명명하였다. D-slip의 점도는 약 200 cP이었으며, 여기서 D는 잘 분산된 상태(dispersed)를 의미한다. 분산이 잘 된 D-slip에 응집제인 CaSO₄를 첨가하면 슬립이 재응집하면서 점도가 급격히 증가하게 되는데 점도가 약 2,500 cP에 도달된 슬립을 C-slip이라고 명명하였다. 여기서 C는 재응집된 상태(coagulated)를 의미한다.

제조된 슬립으로부터 성형체를 제조하기 위하여 두가지 방법을 사용하였다. F-slip은 석고몰드에 부어 성형체를 얻는 여과(filtration)성형을 하였고, C-slip은 몰드에 부어줄 때 스스로 겔화(gelling)가 일어나서 성형이 되는 DCC(direct coagulated casting)법을 이용한 성형을 하였다. 제조된 성형체 및 소성체의 기공 분포를 Mercury Porosimetry(Micromeritics Autopore II 9220, USA)로 관찰하였다. 시편의 압축강도는 종횡비 = 1 : 2의 직육면체 시편을 연마지(#800)로 표면처리하여 측정하였으며, 1종류 당 5개의 시편을 제조하여 그 평균값을 취하였다. 소결체의 파단면은 SEM(SX-30E, Topcon, Japan)으로 관찰하였다.

2.2. 혼합분말의 토목공학적 특성

C-slip을 DCC 법으로 성형하여 1150°C에서 2 hr 범위로 소결한 후, 분쇄하여 입경이 0.84~2 mm 범위의 입자를 체가름으로 추출하였다. 얻어진 분말을 원래의 비산재 및 물(11 wt%로 고정)과 혼합하여 단위중량 값이 1.54 ton/m³인 혼합분말을 준비하고 그 토목공학적인 특성을 평가하였다.

혼합분말의 압축특성은 KS F 2316에 의거하여 측정하였다. 직경 = 6 cm, 높이 = 2 cm의 원통형 금속몰드에

혼합분말을 채운 후, 수직방향으로 압축력을 가하면서 간극에 존재하는 물(water in voids)이 몰드 하단의 다공체를 통하여 자유롭게 배출되도록 한다. 압축에 따른 혼합분말의 부피변화를 측정 한 뒤 이로부터 간극비를 계산하여 압축응력 대 간극비 그래프의 기울기로부터 압축지수(compression index), C_c 를 계산하였다. 간극비(e ; void ratio)는 다음 식으로 주어진다[10].

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

여기서 V_v = 간극(void)의 부피이고 V_s = 혼합분말의 부피이다.

혼합분말의 압축강도는 직경 = 3.5 cm, 높이 = 7 cm의 원통형 공시체를 제작하여 일축 압축을 주어 측정하였다. 투수계수는 직경 = 10 cm, 높이 = 12.7 cm의 시험관 내에 혼합 분말을 채우고 물을 시험관에 흘려줄 때 시험관 밑의 출구로 나오는 물의 양을 측정하여 다음 식으로 계산된다[11].

$$k = \frac{QL}{t \cdot h \cdot A} \quad (2)$$

여기서 k = 투수계수(cm/sec), Q = 시간 t 동안 흘러나간 물의 양(cm^3), L = 시료의 길이(cm), h = 물 높이 감소(cm), A = 시료의 단면적(cm^2)이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 슬립 제조 및 소결체의 특성

비산재-점토계 슬립을 제조할 때, 첨가된 물유리

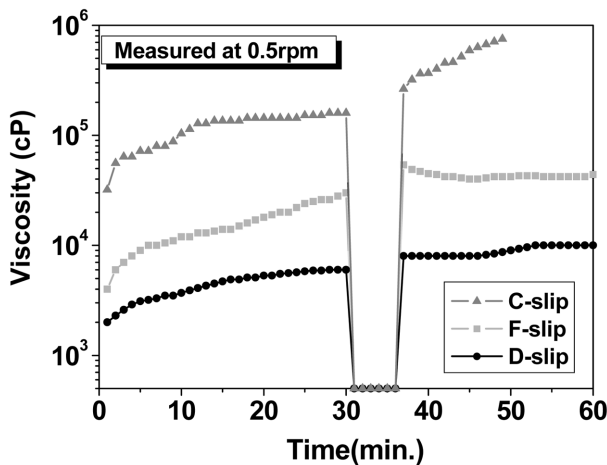


Fig. 2. Viscosity with time for 3 different slips of fly ash-clay system (excerpted from the reference [9]).

(sodium silicate, Na_2SiO_3)는 비산재의 주종을 이루는 입자인 cenosphere들의 steric 반발력을 유도하여 분산에 기여하고, 또한 잘 분산된 슬립에 다시 CaSO_4 를 첨가하면, 전기 이중층이 축소되면서 입자간 응집이 일어나 점도가 증가한다고 알려져 있다[9]. 이렇게 CaSO_4 로 재응집된 슬립(C-slip)은 충분히 분산되기 전 상태의 슬립(F-slip) 구조와 매우 다르며, 예로 시간이 지나면 F-slip은 침강되었으나, C-slip은 침강되지 않았다.

얻어진 3가지 슬립, F-, D- 그리고 C-slip에 대하여 Lee 등[9]이 측정하여 발표한 gel 곡선 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 재응집된 C-slip은 다른 슬립과는 달리 정지기를 지난 후 지속적인 점도증가를 보인다. 이 현상은 입자표면에 poly-silicon hydroxo precipitate가 재흡착되어 젤화를 유도하기 때문으로 알려져 있다[12]. 본 연구에서 C-slip을 성형할 때, 이러한 겔화현상을 이용하였다. 즉 C-slip은 몰드에 부어줄 때 스스로 겔화(gelling)가 일어나므로 소위 DCC(direct coagulated casting)법에

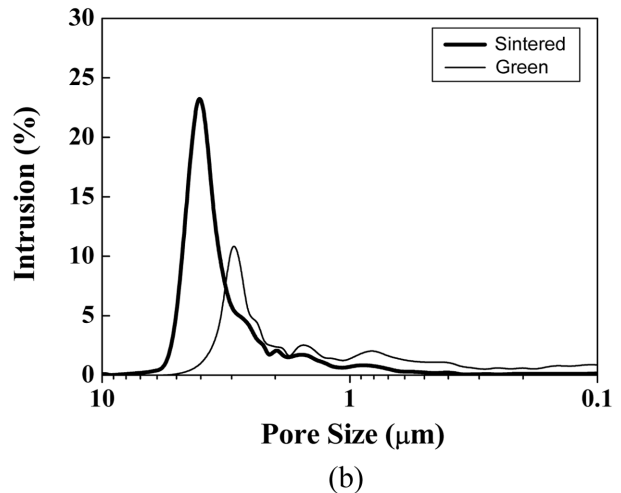
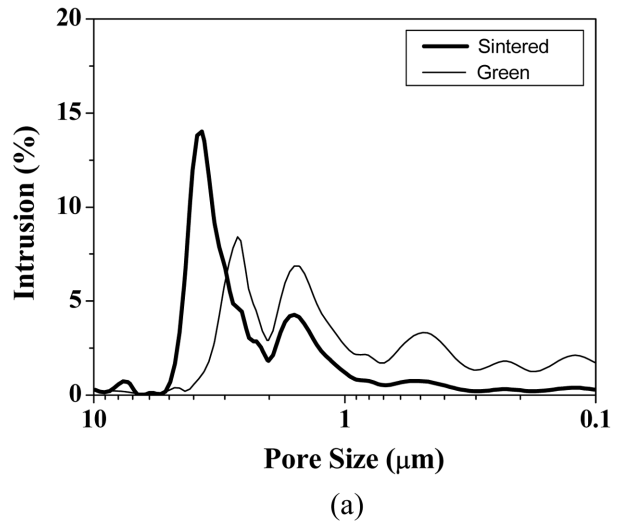


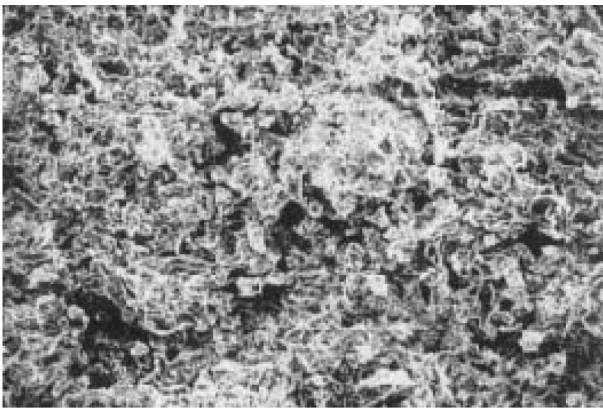
Fig. 3. Pore size distribution for a green and sintered body made from (a) F-slip and (b) C-slip of fly ash-clay system.

의해 성형이 가능하였다. 한편 F-slip에 대하여는 석고물 드에 부어 성형체를 얻는 여과 성형을 행하였다.

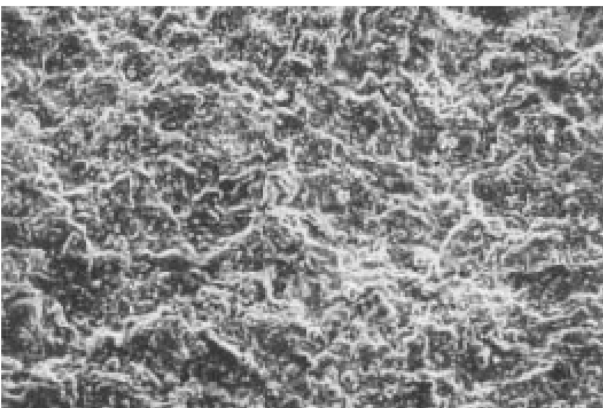
F- 및 C-slip에서 얻은 성형체 및 소결체의 기공분포를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. F-slip 성형체의 기공은 1 μm 이상에서 쌍봉형태를 보이며 1 μm 이하에도 미세 기공이 존재함을 알 수 있다. 이를 소결할 경우, 1 μm 이하의 미세기공은 대부분 소멸되었고, 대부분의 기공은 4 μm 와 1.5 μm 크기로 구성되었다. 한편 C-slip의 경우, 성형체는 3 μm 크기의 기공이 대부분이었으며, 이를 소결할 경우 4 μm 의 단일 기공분포를 보인다. 이로부터 F-slip은 성형체 자체가 불균일하며 소결체 역시 쌍봉의 기공분포를 나타내지만, C-slip은 성형체 및 소결체 모두 단일 기공분포를 나타냄으로서 F-slip 보다 균일한 구조를 갖음을 확인하였다.

각 성형체를 1150°C/2 hr으로 소결한 뒤 그 파괴단면을 SEM으로 관찰한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. F-slip으로 소성된 시편은 미세구조가 불균일하였으나, C-slip의 경우에는 균일하였다.

C-slip으로 제조된 소결체의 밀도를 Fig. 5에 나타내었



(a)



(b)

Fig. 4. Fractured surface for the sintered body made from (a) F-slip and (b) C-slip of fly ash-clay system observed by SEM (magnified $\times 300$).

다. 1100°C에서 소결한 시편은 성형체와 큰 차이가 없었으며, 1125°C부터 밀도가 증가하기 시작하였다. 1150°C에서 소결한 F-slip의 비중은 C-slip보다 낮게 나타났다. 이는 Fig. 3의 미세구조와 Fig. 4의 기공분포에서도 확인하였듯이 F-slip에 비해 C-slip으로 제조된 소결체의 미세구조가 더 균일하기 때문으로 생각된다. 1200°C에서 소결한 시편의 밀도는 1.6으로 1100°C에서 소결된 시편보다 약 20% 증가를 보였다. 1150°C에서 여러 소성시간에서 소성된 소결체 밀도의 소성시간 의존성을 Fig. 6에 나타내었다. 소성시간이 1 hr 일 경우 밀도는 성형체와 큰 차이가 없었으나 2시간 이후부터 밀도가 증가하였다.

C-slip으로부터 제조된 소결체의 압축강도를 Fig. 7에 나타내었다. 소성온도 증가에 따라 압축강도가 함께 증가되었으며, 1150°C에서 압축강도는 같은 소결 조건의 F-slip 시편보다 약간 높은 강도를 나타내었다. 이는 전

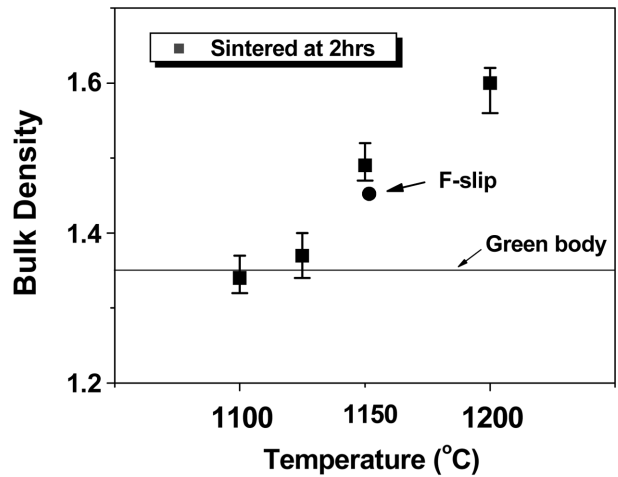


Fig. 5. Bulk density of sintered body made from C-slip at various sintering temperatures.

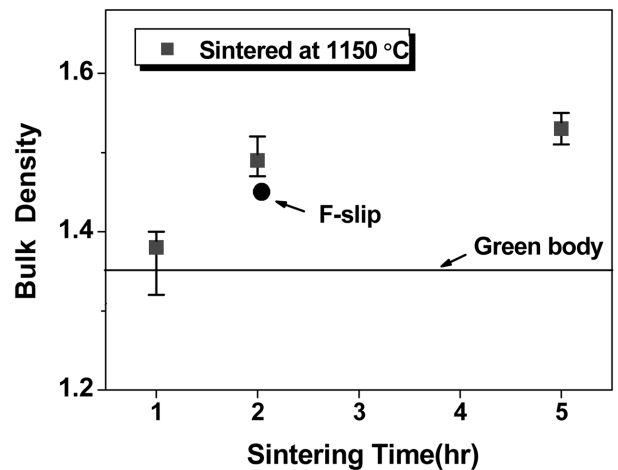


Fig. 6. Bulk density of sintered body made from C-slip at various sintering time.

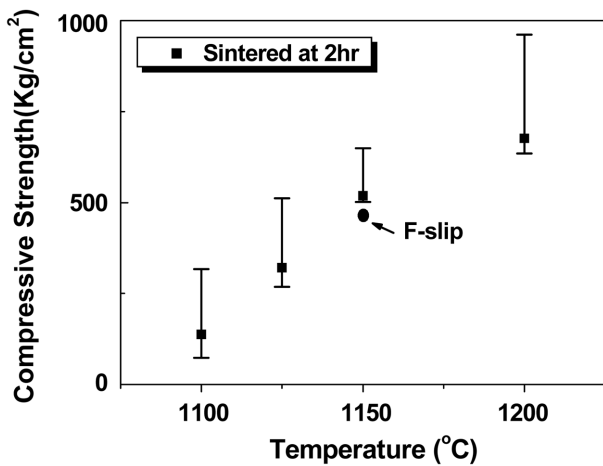


Fig. 7. Compressive strength for the sintered body made from C-slip at various sintering temperatures.

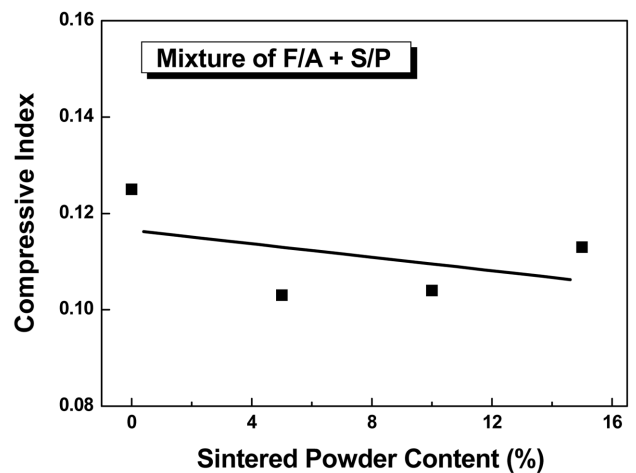


Fig. 9. Compression index for mixture of fly ash and sintered powders (S/P) with various content made from C-slip. The regression curve is linear fit to data points.

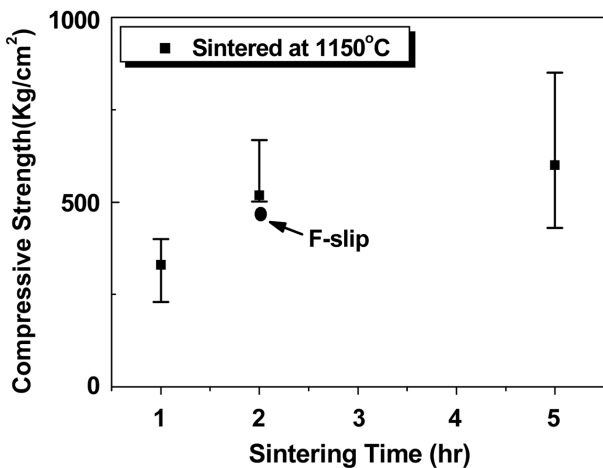


Fig. 8. Compressive strength for the sintered body made from C-slip at various sintering time.

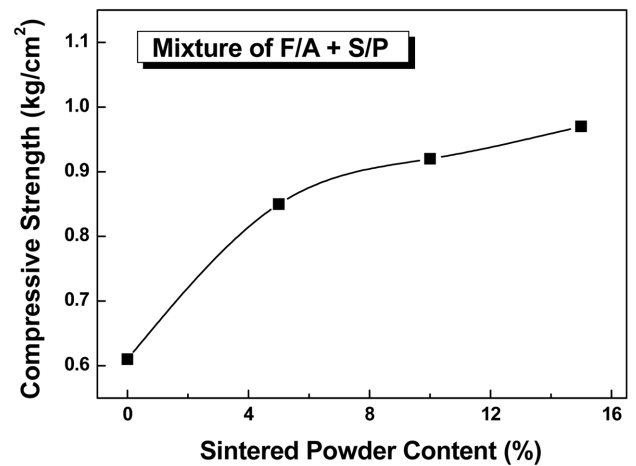


Fig. 10. Compressive strength for mixture of fly ash and sintered powders (S/P) with various content made from C-slip.

술한 바와 같이, F-slip에 비해 C-slip으로 제조된 소결체의 미세구조가 더 균일하기 때문으로 생각된다. 소결체의 압축강도에 대한 소성시간 의존성을 Fig. 8에 나타내었다. 소성시간이 증가함에 따라 압축강도가 함께 증가하였다.

3.2. 석탄회의 토목 공학적 특성

본 실험에서 제조된 C-slip을 DCC법으로 성형하고 1150°C/2 hr로 소성한 소결체를 분쇄하여 입경이 0.84~2 mm 범위의 입자를 선별 추출하였다. 이렇게 준비된 C-slip 소결분말을 0~15 wt% 범위로 원래 비산재에 섞어 그 압축지수 값을 구하여 Fig. 9에 나타내었다. C-slip 소결분말의 함유량에 따라 압축지수 값은 감소하여, 함유량이 15% 일 때 압축성은 약 10% 감소하였다. 이것은 C-slip 소결분말의 입경이 비산재 보다 크고 따라서

압축 저항성이 증가했기 때문으로 생각된다.

C-slip 소결분말을 0~15 wt% 범위로 섞인 비산재로 공시체를 만들어 압축강도를 측정 한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 압축강도는 C-slip 소결분말 함유량이 증가함에 따라 함께 증가하였다. 15%의 C-slip 소결분말이 혼합된 시료의 압축강도는 0.971 kg/cm²으로 순수 비산재의 압축강도 0.610 kg/cm²에 비하여 약 59% 정도 증가하였다. 이는 원래 비산재에 비해 강도가 높고 입경이 큰 C-slip 소결분말이 일종의 보강재 역할을 하여 전체 시료의 압축강도가 증가된 것으로 생각된다.

C-slip 소결 분말과 원래 비산재와의 혼합분말에 대하여 투수 시험을 실시하여 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 소결분말의 첨가량 증가에 따라 투수계수는 점차 증가하였다. 순수 비산재의 투수계수는 1.3×10⁻⁵ cm/sec인 반면, 소결체 분말이 15% 첨가된 시편은 1.9×10⁻⁵ cm/

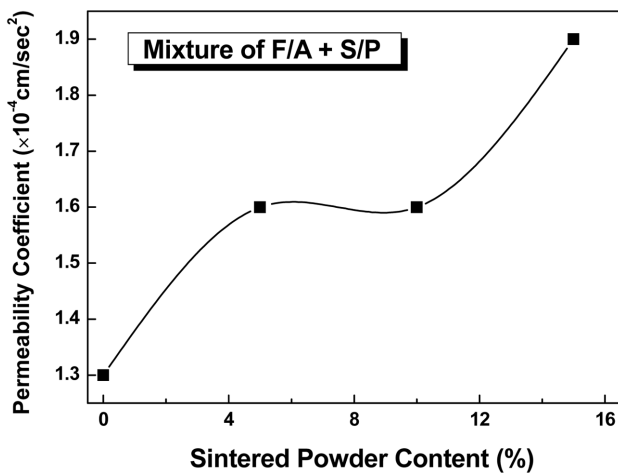


Fig. 11. Permeability coefficient for mixture of fly ash and sintered powders (S/P) with various content made from C-slip.

sec로서 46%의 증가를 나타내었다. 이러한 경향은 4 μm 크기의 기공이 많이 존재하는 C-slip 소결체(Fig. 3의 기공분포 참조)의 입자가 시료에 혼합됨으로서 투수성 증가에 기여했기 때문으로 판단된다.

이와 같이 혼합분말에 대한 압축지수, 압축강도, 투수계수를 측정된 결과, 원래 비산재보다 C-slip 소결분말을 혼합한 시료에서 더 높은 압축 저항성 및 강도가 나타났으며 특히 배수성이 향상되는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 슬립 공정으로 제조된 분말을 비산재에 혼합하게 되면 그 역학적 특성 개선에 효과가 있었으며 그 결과 기반재 또는 기층재료의 적용 가능성이 순수 비산재에 비해 향상됨을 확인하였다.

4. 결 론

비산재와 점토와 혼합하여 분산이 충분하지 않은 슬립(F-slip)과 분산 후 재응집시킨 슬립(C-slip)의 2가지 슬립을 제조하고 이로부터 성형체 및 소성체를 합성하였다. F-slip은 여과성형을 하였으나, C-slip은 자체 겔화현상을 보임에 따라 DCC(direct coagulated casting)법으로 성형을 할 수 있었다. 소결체의 파단면 및 기공분포 분석 결과로 부터 C-slip의 경우가 F-slip 보다 미세구조가 더 균일한 것을 알 수 있었으며, 이로 인하여 밀도 및 강도가 더 높게 나타났다. C-slip 소성분말 중 0.84-2 mm 범위의 입자를 추출하여 순수 비산재에 섞은 혼합분말은 순수 비산재에 비하여 토목공학적인 물성이 향상되었다.

예를 들어, 15%의 C-slip 소결 분말이 첨가된 비산재의 경우, 순수 비산재에 비하여 압축지수는 10% 감소되었고, 압축강도는 59% 증가되었고, 그리고 투수계수는 46% 증가되었다. 따라서 슬립 공정으로 제조된 분말을 비산재에 혼합하게 되면 그 역학적 특성 개선에 효과가 있었으며, 그 결과 기반재 또는 기층재료의 적용 가능성이 순수 비산재에 비해 향상됨을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 21C 프런티어 사업, 자원 재활용 기술개발 사업단의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] "Fly Ash for Soil Improvement", ASCE, Geotechnical Special Publication No. 36, (1993).
- [2] D.H. Gray and Y.K. Lin, "Engineering properties of compacted fly ash", SM 4, ASCE (1972) 361.
- [3] R.C. Joshi and D.M. Duncan, "New & conventional engineering uses of fly ash", J. of Transportation Engineering, ASCE (1975) 791.
- [4] J.H. Jung and T.C. Kim, "Study on the fly ash applications", Chemistry Eng., and Tech. 7(1) (1989) 49.
- [5] B.S. Chun, Y.I. Ko, M.Y. Oh and H.S. Kwon, "Study on the characteristics of fly ash produced as an industrial wastes", J. Kor. Civil Eng. 10(1) (1990) 115.
- [6] Y.Y. Kim, Y.K. Kwon and H.J. Kim, "Compressive characteristics comparison of reinforced and un-reinforced lightweight soils for dredged clays", J. Kor. Ocean Eng. 19(6) (2005) 44.
- [7] J.C. Kim and J.G. Lee, "Engineering properties of lightweight porous mixed soils using by dredged clays", J. Kor. Ground Eng. 18(4) (2002) 309.
- [8] S.K. Mukherji, B.B. Machhoya, R.M. Savsani, D.R. Vyas and T.K. Kan, "The utilization of fly ash in the preparation of ceramic tableware and artware", Br. Ceram. Trans. 92(6) (1993) 254.
- [9] G.G. Lee, C.J. Park, Y.T. Kim, S.B. Kim and J.H. Kim, "Rheological behavior of coal-fly-ash and clay slip", J. Kor. Ceram. Soc. 35(2) (1998) 180.
- [10] M.M. Kim, "Soil Mechanics" (in Korean), 4th Ed. (Moonwundang, Seoul, Korea, 1999) p. 19.
- [11] *ibidem* reference [10], p. 84.
- [12] G.G. Lee, C.J. Park, J.H. Kim, S.G. Kang, J.H. Park and E.G. Lee, "Analysis of pore structure for porous body with coal fly ash and clay", Kor. J. Crystallography 9(1) (1998) 64.