

알칼리 활성화 석탄회(Fly Ash, Bottom Ash) 인공경량골재 및 콘크리트 적용

조병완¹⁾ · 박승국^{1)*} · 권병윤¹⁾

¹⁾ 한양대학교 토목공학과

(2004년 2월 5일 원고접수, 2004년 10월 30일 심사완료)

Alkali-Activated Coal Ash(Fly Ash, Bottom Ash) Artificial Lightweight Aggregate and Its Application of Concrete

Byung-Wan Jo¹⁾, Seung-Kook Park^{1)*}, and Byung-Yoon Kwon¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

(Received February 5, 2004, Accepted October 30, 2004)

ABSTRACT

Artificial lightweight aggregates and solids were manufactured with coal ash(fly ash, bottom ash). In order to apply alkali-activated coal ash(fly ash, bottom ash) artificial lightweight aggregate to concrete, several experimental studies were performed. Thus, it can be noticed the optimal mix proportion, basic characteristics, mechanical properties and environmental safety of alkali-activated coal ash(fly ash, bottom ash) solid and alkali-activated coal ash(fly ash, bottom ash) artificial lightweight aggregate. Also, the freezing-thawing test property of concrete using the alkali-activated coal ash(fly ash, bottom ash) artificial lightweight aggregate was investigated. As a result, the optimal mixing proportion of coal ash(fly ash, bottom ash) solid to make alkali-activated artificial lightweight aggregates was cement 10%, water glass 15%, NaOH 10%, MnO₂ 5%. Alkali-activated coal ash(fly ash, bottom ash) solid can achieve compressive strength of 36.4 MPa, at 7-days, after the paste was cured at air curing after moist curing during 24 hours in 50 °C. Alkali-activated coal ash(fly ash, bottom ash) artificial lightweight aggregate that do impregnation to polymer was improved 10% crushing strength 150%, and was available to concrete.

Keywords : alkali activation, fly ash, bottom ash, artificial lightweight aggregate, mechanical property

1. 서 론

석탄회 재활용에 대한 연구가 최근 환경문제와 관련하여 활발히 진행되고 있으며, 미국, 일본을 비롯한 선진국의 경우 1970년대부터 진행되어 현재 각종 산업분야에 이용하여 환경문제와 경제적 이익 측면에서 상당한 성과를 이루고 있는 실정이다. 이에 국내에서도 콘크리트 혼화재료로서 플라이애쉬를 제한적으로 사용하고 있으며, 건설자재로서 플라이애쉬 활용을 위한 다수의 연구가 수행 중에 있다. T. Silverstrim(1997)은 알칼리성 활성화 반응에 의한 플라이애쉬 경화체의 강도를 높일 수 있다고 보고하였으며, J. Wastiels와 X. Wu(1994)는 fly ash, water glass와의 반응은 주로 산소원자를 공유하면서 연결되어 있는 SiO₄ 와 AlO₄ 사면체로 이루어진 무기고분자로 구성된 Feldspatoid material을 만든다고 보고하고, 이 물질의 강

도가 일반적인 포틀랜드 시멘트 물질보다 훨씬 높은 강도를 나타낼 수 있다고 발표하였다. 현재 국내 화력발전소에서 발생하는 석탄회의 10~25% 정도가 바텀애쉬며 2001년을 기준으로 국내 석탄회 발생량은 490만톤이다¹⁰⁾. 그 중 바텀애쉬의 양은 약 98만톤이나 국내 석탄회 재활용 기술이 플라이애쉬에 집중되어 있고 바텀애쉬의 재활용 기술은 매우 미약한 상황으로 발전소에서 발생하는 바텀애쉬의 전량이 매립되고 있어 바텀애쉬의 재활용 기술의 개발이 시급한 실정이며, 석탄회(fly ash, bottom ash)의 효과적인 처리가 중요한 문제로 대두되고 있다. 본 연구는 화력발전소에서 발생하는 석탄회를 안정적·친환경적으로 처리하기 위해 알칼리성의 화학적 결합제를 사용하여 알칼리 활성화된 석탄회 경화체 및 인공경량골재를 제조하였으며, 사용된 알칼리 활성화제의 배합비에 따른 경화체의 강도특성과 인공경량골재의 품질특성 및 안정성을 실험적 방법을 통해 고찰하였다. 또한 제조된 인공경량골재의 품질을 향상시키고자 폴리머를 침투시켜 그 효과를 파악하였다. 특히 기존의 고온소성방법에 의한 인공경량골

* Corresponding author

Tel : 02-2290-0327 Fax : 02-2292-0321

E-mail : hasup90@hanmail.net

재의 제조방법과는 달리 알칼리 활성화에 의한 화학적 결합 인공경량골재를 개발하기 위하여 석탄회의 물리·화학적 특성을 파악하여 적절한 첨가물과 배합비를 결정하여 석탄회 경화체 및 인공경량골재의 안정성을 높이고자 하였다. 본 연구에서 제조한 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재의 기초적 물성 및 강도특성, 환경 안전성을 실험하였으며, 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재를 사용한 콘크리트를 제조하여 국내·외 인공경량골재와 자연산 부순(crushed stone)골재를 사용한 콘크리트와 강도 및 동결융해 저항성을 비교 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

주재료로 사용되는 플라이애쉬와 바텀애쉬는 보령화력 발전소에서 발생하는 것으로 구형, 표면이 매끈한 둥근형, 약간 각이진 입자들로 나타났다. 플라이애쉬는 CaO 함량이 6%미만이고 강열감량(LOI, Loss On Ignition)이 3.5%인 F급이며, 바텀애쉬는 2.5mm체를 통과하고 0.075mm체에 남도록 체가름하여 미연탄소분을 제거하였다. CaO 함량이 6% 미만이고 강열감량이 최대 13.4%였으며, Figs. 1~2와 같이 전형적인 XRD회절분석 결과를 나타내었다. 알칼리 활성화에 의한 화학적 결합제로서 Film-type의 결합제인 Water glass(액상 40%, 밀도1.4t/m³, 몰비 3.37)를 사용하였으며, 석탄회와 Ca(OH)₂의 반응성을 증가시키고 석탄회(fly ash, bottom ash)에서 실리카의 용해속도를 증가시키기 위해 NaOH(액상 33%)를 사용하였으며 이 반응을 촉진시키기 위해 산화제로서 MnO₂을 첨가제로 사용하여 강도증진을 유도하였다. 강도증가를 목적으로 사용된 시멘트는 KS F 5201에 규정된 S사의 보통 포트랜드 시멘트로서 비중은 3.15, 분말도는 3,150cm²/g인 제품을 사용하였다. 제조된 석탄회 인공경량골재의 품질을 향상시키기위해 폴리머침투에 사용된 모노머는 결정성 아크릴수지인 공업용 methylmethacrylate [CH₂=C(CH₃)COOCH₃]로 점도 0.55cp, 밀도 0.94g/cc인 고분자재료이다. 반응개시제로는 질소화합물계의 Azobisisobutyronitrile(AIBN)을 사용하였다.

2.2 알칼리 활성화에 의한 석탄회 경화 실험

석탄회(fly ash, bottom ash)와 시멘트를 혼합기를 이용

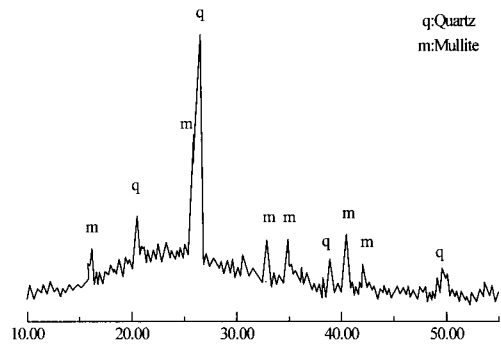


Fig. 1 XRD pattern of fly ash

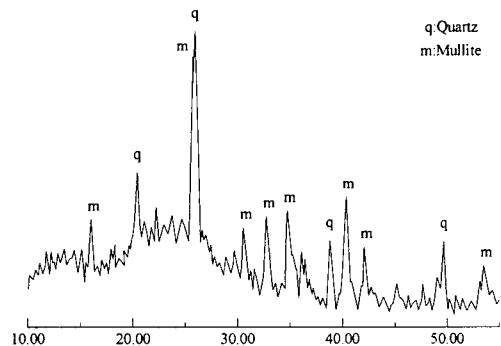


Fig. 2 XRD pattern of bottom ash

하여 2분간 건비빔후 NaOH, water glass, 물을 첨가하여3분간 혼합하였다. 혼합물은 성형을 위해 5×5×5cm 몰드에서 24시간 양생후 탈형하여 각 양생법에 따라 양생시켜 조성비 및 양생방법에 따른 강도특성 및 안정성을 분석하였다. 시멘트의 경우 함량이 증가할수록 강도가 증진되는 것을 예상할 수 있으나 시멘트에 의한 석탄회(fly ash, bottom ash) 경화가 아니므로 초기강도증진을 목적으로 시멘트량을 10%로 제한하였다. 또한 Water glass의 경우 소량으로 사용한다면 입자들을 효과적으로 결합시키지 못하며, 다량으로 사용된다면 석탄회의 압축강도를 측정하려는 본래의 목적과는 상이하게 Water glass의 강도를 측정하는 결과가 되기 때문에 Water glass의 함량을 적절히 제한하였다. 본 연구에서는 사전에 플라이애쉬 만으로 알칼리 활성화에 의한 화학적 경화 실험을 하였으며, 실험결과 시멘트 10%, NaOH 10%, Water glass 15%, MnO₂ 5%을 혼합하여 50℃ 항온기에서 24hr 동안 습윤양생후 144hr 동안 공기중 양생한 시험체에서 압축강도 34.0MPa를 얻을 수 있었다.

Table 1 Properties of fly ash and bottom ash (unit : %)

Type	Density (t/m ³)	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	TiO ₂
Fly ash	2.20	3.5	57.09	24.66	10.5	2.58	1.37	0.94	-	-
Bottom ash	1.98	13.4	50.29	24.08	3.81	3.05	1.28	-	1.37	0.84

이 실험결과를 토대로 석탄회 경화체 실험에 이용된 배합표 및 양생방법은 Table 2의 변수와 같이 실시하였으며 7일동안 양생한 후 압축강도를 측정하였다.

2.3 인공경량골재의 제조 및 특성 실험방법

알칼리 활성화에 의한 석탄회 경화를 통한 인공경량골재 제조는 기존의 고온소성법을 탈피하고 결합제를 사용하여 알칼리 활성화 석탄회 경화 실험의 배합변수 B2-N2-G2와 같은 방법으로 재료를 혼합하여 강재들에서

Table 2 Mixture proportions and compressive strength of coal ash (unit : percentage about coal ash amount)

Type	Fly ash : bottom ash	NaOH (%)	Water glass (%)	Compressive strength (MPa)
B1-N1-G1	5:5	5	10	20.3
B1-N1-G2			15	23.1
B1-N2-G1		10	10	27.1
B1-N2-G2			15	28.1
B1-N3-G1		15	10	23.9
B1-N3-G2			15	25.7
B2-N1-G1	6:4	5	10	26.6
B2-N1-G2			15	27.6
B2-N2-G1		10	10	33.8
B2-N2-G2			15	36.4
B2-N3-G1		15	10	28.4
B2-N3-G2			15	30.9

* Cement(10%), MnO₂(5%)
Curing method : 144 hr air curing(18 °C) after 24 hr moist curing(50 °C)

Table 3 Testing method of artificial lightweight aggregate

Testing method	
Unit weight / solid volume percentage	KS F 2505 methods of test for bulk density of aggregates and solid content in aggregates
10% crushing value	KS F 2541 testing method for determination of aggregates crushing value
Absorption / density	KS F 2503 testing method for density and absorption of coarse aggregates
Gradation	KS F 2502 methods of test for sieve analysis of aggregates

Table 4 Proportioning of concrete mixtures

Used aggregate	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				SP agent (C×%)
				Water	Cement	Sand	Gravel	
JCA, GCA, CCA, PCCA	4±1.5	45	58,	155	352	838	595	0.2
NCA	4±1.5	45	45	158	350	808	1007	0.2

G_{max} : JCA(clay artificial lightweight aggregate produced by Japan)=15, NCA(Natural crushed stone aggregate)=19, GCA(clay artificial lightweight aggregate produced by German)=16, CCA(Non-sintered coal ash artificial lightweight aggregate)=19

재료를 압축하여 성형하였다. 7일간 양생한 후 파쇄하여 체기를 공정으로 골재를 제조하였다. 제조된 인공경량골재의 폴리머 침투는 함침기법(Surface-drying and Monomer-ponding Technique)을 적용하였다. 이 기법은 시편을 질량평형이 될 때까지 건조시킨 후, 함침용 수조를 이용하여 콘크리트의 모세공극으로 침투제를 완전 침투시키는 방법이다. 폴리머 침투깊이(cm)는 모노머의 종류 및 경화 콘크리트의 물성에 따라 상이하나, 일반적으로 MMA의 경우 $0.15\sqrt{\text{함침시간(분)}}$ 으로 추정된다.

본 실험에서는 경제적인 인공경량골재 제조공정 및 골재 치수를 고려하여 상온에서 6시간동안 함침하였다. 파쇄된 골재의 일반적 특성을 파악하기 위해 밀도, 단위용적질량, 실적율, 입도분포 분석등의 시험을 실시하였으며 인공경량골재의 정적 하중에 대한 저항성 등을 파악하기 위해 파쇄율 시험을 실시하여 자연산 부순골재 및 국내외 인공경량골재와 그 품질정도를 비교하여 보았다. 각 공시체의 시험방법은 Table 3에 나타낸 바와 같이 한국산업규격(KS)에 의거하여 실시하였다. 그리고 유해물질 용출시험은 한국폐기물공정시험법상의 KSLT(Korean Standard Leaching Test) 및 미국 환경보호기관 EPA의 환경유해물질규제를 위한 TCLP(Toxicity Characteristics Leaching Procedure)시험에 의거하여 5mm 정도의 골재를 이용하여 실시하였다.

2.4 인공경량골재를 사용한 콘크리트 강도 및 동결융해 저항성 시험

본 연구에서 제작된 인공경량골재와 국내·외 기존의 인공경량골재, 자연산 부순골재를 사용하여 설계기준강도 27.5MPa의 원주형 공시체(Φ10×20 cm)를 제작하여 28일 양생후 KS F 2405 규정에 따라 압축강도를 측정하였다. 본 연구에서 제조한 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 내구특성을 파악하기 위한 동결융해저항성 실험은 골재의 종류와 고성능 감수제(주성분 : copolymer) 사용에 따른 공기량 1.5%, 3%(sp제 0.2%사용), 6%(sp제 0.5%사용)를 주요변수로 하여 실시하였다. 7.5×7.5×40 cm 공시체를 제작하여, 동결융해 시험기에 넣어 -18~4 °C로 급속 동결융해를 진행시키면서 매 23사이클마다 동탄성계수를 측정

하였다. 대부분의 경우 동결융해로 인한 표면에 균열이나 Swelling 등이 발생하기 시작하면 오래있지 않아 공시체의 동탄성계수가 급격히 떨어져 초기치의 60%이하가 되거나 또는 완전 파괴되어 더 이상 동탄성계수의 측정이 불가능하게 되므로 본 실험에서는 공시체가 파괴되거나 동탄성계수가 초기치 60%이하로 되는 경우까지만 측정하였다. 콘 크리트 공시체 제작에 사용된 배합비는 Table 4 와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 알칼리 활성화에 의한 석탄회 경화체의 강도 및 경화 실험결과

플라이애쉬와 바텀애쉬의 함량에 따른 강도변화는 모든 변수에서 플라이애쉬와 바텀애쉬의 비율이 6:4인 경우가 5:5인 경우에 비하여 약 20%의 강도 증가를 보였다. 이는 바텀애쉬의 성분이 플라이애쉬의 성분에 비하여 남아있는 미연탄소함량이 높아 강도발현에 불리하게 작용한 것으로 판단된다. 강도면에서 Water glass가 가장 큰 영향을 미쳤으며, 이는 수분증발에 의해 비교적 빠른 시간에 결합력이 발생하는 Film-type 결합제인 Water glass의 특성으로 판단된다. Water glass 함량이 10%에서 15%로 증가할 때 4%~14% 정도의 강도증진을 확인 할 수 있었다. Water glass의 함량이 증가할수록 강도는 증가하였으며, Water glass 함량이 많은 20% 이상인 경우 경화가 되지 않았고, 반대로 지나치게 적은 3%이하에서는 거의 강도가 발현되지 않았다. 따라서 15%가 적정 최대 함량임을 알 수 있었다. Sodium silicate와 물과의 혼합물인 Water glass는 혼합시 가수분해한다. $[Na_2O \cdot nSiO_2 + (2n+1)H_2O \leftrightarrow 2NaOH + nSi(OH)_4]$ 가수분해로 인한 생성된 NaOH는 적절한 온도하에 Al_2O_3 , Fe_2O_3 그리고 SiO_2 와 같은 산성 합성물과 반응하며, 반응 생성물들은 비결정질 또는 저차의 결정질 구조상태이다. 석탄회와 알칼리 활성화제로 이루어진 페이스트(pastes)의 반응물은 소량의 CaO, MgO 그리고 Fe_2O_3 를 함유한 $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$ 의 화합물 형태로 합성되어지며, 또 다른 가수분해 생성물과 함께 $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$ 는 석탄회와 결합하고, 그 결과 높은 강도를 초래하는 것으로 판단된다.

NaOH의 함량이 5%에서 10%로 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 15%에서는 오히려 압축강도가 10%를 사용한 경우에 비하여 9~16% 정도 떨어지는 결과를 보임으로써 적절한 NaOH의 혼합비는 10%인 것으로 판단된다. 석탄회는 비정질의 상으로 되어 있으며, NaOH에 의해 비정질 상이 etching 된다. 즉 포졸란 물질은 OH^- 이온에 의해 SiO_2 혹은 Al_2O_3 조직이 공격받아 OH^- 이온들은 Si 혹은 망상 구조원자에 결합하며 이들과산소원자간의 결합을 끊게 되고, 이러한 반응의 반복으로 실리케이트 또는 다른 Oxy anion 들이 구조에서 떨어져 나가면서 수화반응이 진행된다. 따라서 석탄회와 $Ca(OH)_2$ 의 반응성을 높이고 석탄회에서 Silica의 용해도를 증가시키기 위해 NaOH를 사용하였다. 그러나 NaOH 농도의 증가는 두단계에 의하여 용해된 칼슘의 농도를 감소시킨다고 알려져 있다²⁾. 처음에는 $Ca(OH)_2$ 의 용해도에 대한 수산기의 공통이온 효과에 의해 감소시키고 다음 NaOH가 석탄회에서 Silica의 용해도를 증가시킴으로써 용해된 칼슘의 농도를 감소시킨다. 그러므로 고농도의 NaOH이 용해된 칼슘의 농도를 극도로 낮추기 때문에 혼합물에서의 적절한 NaOH 농도가 존재함을 알 수 있다.

3.2 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재의 물성실험결과

3.2.1 밀도, 흡수율, 입형 및 입도

석탄회 인공경량골재(이하 CCA로 약칭)의 경우 표준밀도가 $1.75 t/m^3$ 절건밀도가 $1.51 t/m^3$ 이며 폴리머 함침 석탄회 인공경량골재(이하 PCCA로 약칭)의 경우 표준밀도가 $1.78 t/m^3$, 절건밀도가 $1.55 t/m^3$ 로 폴리머 함침 효과가 골재의 밀도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 다른 고온소성방법으로 제조되는 인공경량골재와 비교시 상대적으로 높은 밀도는 고온소성방법으로 제조되는 골재가 알칼리 활성화 의해 제조되는 골재보다 내부 공극이 많이 나타나기 때문으로 판단된다. 흡수율은 CCA가 13.4%, PCCA가 7.6%로 폴리머 함침에 의해 석탄회 인공경량골재의 흡수율을 저감할 수 있었다. CCA와 PCCA의 입형은 다각형 또는 각이진 둥근 형태의 입형을 나타내었다. 입도는 Fig. 4와 같이 CCA와 PCCA 모두 KS F 2534 구조용 경량 굵은골재 표준입도를 만족하는 것으로 나타났다.

Table 5 Properties of aggregates

Aggregates	Density of saturated surface dry aggregate(t/m^3)	Absolute dry density(t/m^3)	10% crushing value(kN)	Unit weight (t/m^3)	Solid volume percentage (%)	Compressive strength 28day (MPa)
JCA	1.48	1.37	81.4	0.788	60.0	27.9
GCA	1.29	1.13	78.5	0.675	62.6	28.4
CCA	1.75	1.51	79.4	0.891	58.3	27.8
PCCA	1.78	1.55	117.7	0.906	57.4	30.1
NCA	2.69	2.55	205.9	1.667	59.8	32.5

※ PCCA : Polymer impregnated CCA

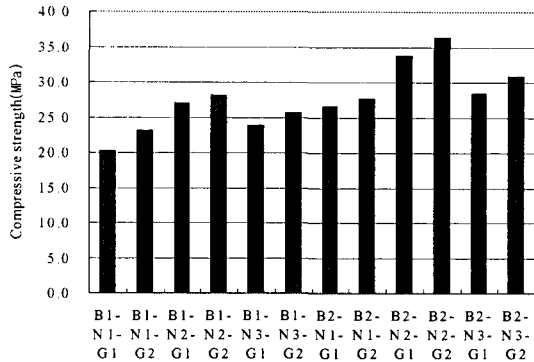


Fig. 3 Compressive strength of alkali-activated coal ash

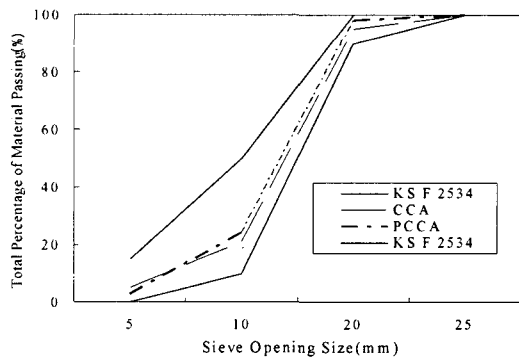


Fig. 5 Grading of CCA and PCCA

3.2.2 단위용적질량, 실적을 및 10% 파쇄강도

JCA는 0.788, GCA는 0.675로 비교적 낮은 단위용적질량을 갖고 있는 것으로 나타났다. CCA의 경우 단위용적질량이 0.891, PCCA는 0.906으로 다른 골재보다 상대적으로 높게 나타나고 있으며 인공경량골재의 종류별 단위용적질량은 전반적으로 밀도와 유사한 경향을 나타내고 있다. 실적율은 JCA, GCA, CCA 및 PCCA가 큰차이를 보이지 않고 비슷한 결과를 나타내고 있다. 이는 모든 골재의 입형이 구형이고 크고 작은 입자가 골고루 섞여 있기 때문에 충전효과가 비슷하기 때문인 것으로 보인다. 파쇄에 의한 방법으로 제조된 CCA와 PCCA의 경우 다른 인공경량골재 보다 조금 낮은 수치를 나타내고 있다. 파쇄 시험은 골재의 정적 압축하중에 대한 저항성을 나타내는

한 방법으로 용기속에 채워 넣은 골재에 392.3kN(40 ton)의 하중을 가했을 때 파쇄율(%) 또는 파쇄율이 10%로 될 때의 하중 값을 표시한다. 10% 파쇄강도는 인공경량골재의 다공성 구조로 인하여 자연산부순골재의 파쇄강도보다 낮게 나타났다. JCA가 81.4kN, GCA가 78.5kN이며, CCA는 79.4kN, 폴리머에 함침시킨 골재인PCCA는 117.7kN을 나타내었다. PCCA는 CCA보다 약 150%의 10% 파쇄강도 증진효과를 나타내었으며, 이는 침투된 폴리머가 CCA의 공극을 충전하여, 흡수를 저감 및 10% 파쇄강도 증가의 효과가 나타난 것으로 판단된다.

3.2.3 중금속 함량 및 용출시험

알칼리 활성화 석탄회 경화체 대한 중금속 용출량을 한국폐기물공정시험법상의 KSLT(Korean Standard Leaching Test) 및 미국 환경보호기관 EPA의 환경유해물질 규제를 위한 TCLP(Toxicity Characteristics Leaching Procedure)시험을 이용하여 분석하였다. Table 6에 나타난 바와 같이 제조된 경화체에서의 중금속 용출은 국내의 규정을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

3.3 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 실험결과

3.3.1 골재별 콘크리트 압축강도

소성 인공경량골재의 경우 표면의 견고한 피막층에 의하여 다소 강도가 증가될 수 있으며, 알칼리 활성화 인공경량골재는 고온의 소성과정을 거치지 않으므로 골재 내부의 공극의 영향으로 다른 골재보다 강도가 작은 것이

Table 6 Test results of extractable heavy metals

Type	Cd(mg/L)	Cr(mg/L)	Cu(mg/L)	Pb(mg/L)	Zn(mg/L)
Result by KSLT	N.D.	0.017	N.D.	N.D.	0.014
KSLT Limit	0.2	1.5	3.0	3.0	-
Result by TCLP	N.D.	0.017	N.D.	N.D.	N.D.
TCLP limit	1	5	-	5	-

Table 7 Results of freezing and thawing test

No.	Air content (%)	Final cycle	Relative dynamic modulus of elasticity (%)	Durability factor (%)	Compressive strength (MPa)
CF0	1.5	271	60	54.2	27.8
CF1	4	300	83	83.0	25.7
CF2	6	300	92	92.0	24.5
CN	1.5	300	91	91.0	34.5

* A using aggregate is CCA in all batch

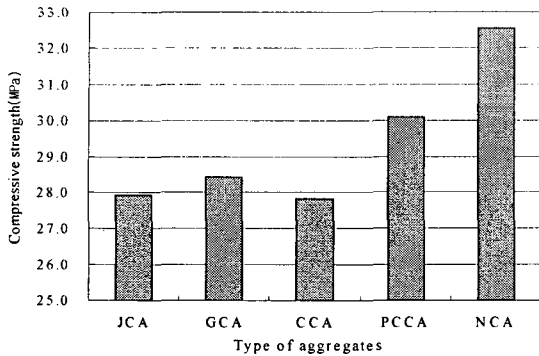


Fig. 5 Compressive strength of concrete with aggregates

콘크리트의 강도 저하를 초래할 수 있을 것으로 예상하였으나, CCA와 PCCA를 사용한 콘크리트의 압축강도는 다른 인공골재를 사용한 콘크리트와 대등한 수준이었으며, NCA를 사용한 콘크리트 압축강도의 86~92% 수준이었다.

또한, 비소성 석탄회 인공골재를 사용한 콘크리트의 배합직후의 슬럼프는 18.6cm, 30분 경과시 12.2cm, 60분 경과시 6.5cm의 슬럼프 값을 나타내었다. PCCA를 사용한 콘크리트의 압축강도는 CCA를 사용한 콘크리트 보다 약 10%정도의 강도증가가 있었으며, 이는 골재자체의 강도증가에 의한 콘크리트의 강도증가로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제조한 골재의 콘크리트에서 굵은 골재로서의 활용가능성을 확인할 수 있었다.

3.3.2 동결융해저항성 실험결과

알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 경우 동결융해저항성 실험결과 공기량 4%와 6%에서 내구성 지수 83.0과 92.0를 나타내었다. 동결융해실험을 위해 제조된 콘크리트의 압축강도를 측정된 결과 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 공기량에 따른 강도변화는 공기량 6%의 압축강도가 공기량 1.5%의 압축강도보다 약 12%정도(공기량 1%당 압축강도 7%감소) 감소하였으며, 일반적으로 일반 골재를 사용한 콘크리트의 경우 공기량 1%증가에 따라 압축강도가 약 4~6%감소함에 비추어 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

알칼리 활성화 석탄회 경화 메커니즘과 콘크리트에 적용성 실험결과 인공경량 굵은골재로서의 사용가능성을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

1) 알칼리 활성화된 석탄회 경화시 높은 강도를 발현하는 water glass, NaOH, 석탄회 혼합물의 반응 결과물은 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 의 화합물 형태로 합성되어지는 것으

로 판단되며, water glass와 NaOH의 적절한 농도와 배합비가 존재함을 알 수 있었다.

- 2) 알칼리 활성화된 석탄회 경화시 적절한 플라이애쉬와 마템애쉬의 비율은 6:4이며 최적 배합비는 시멘트 10%, NaOH 10%, Water glass 15%, MnO_2 5%을 혼합하여 성형후 50 °C 항온습윤양생 24hr 후 상온 공기중 양생이며, 7일 압축강도 36.4MPa를 얻을 수 있었다.
- 3) CCA와 PCCA의 특성 실험 결과, 표건밀도(1.75, 1.78 t/m^3), 절건밀도(1.51, 1.55 t/m^3)과 단위용적질량은 (0.891, 0.906 t/m^3) 고온에서 소성한 인공경량골재 보다 다소 크게 나타났으며, 실적률은 비슷한 결과를 나타냈다. 10% 파쇄시험 결과, CCA의 경우 79.4kN으로 다른 인공경량골재와 비슷한 결과를 나타내었으며, 폴리머 함침골재인 PCCA의 경우 117.7kN으로 약 150% 증가하였다.
- 4) 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재 사용 콘크리트의 압축강도는 27.8MPa 이상으로 나타났으며, 4%이상의 공기량을 연행시 내구성 지수 80이상을 확보할 수 있다.
- 5) 한국폐기물공정시험법상의 KSLT (Korean Standard Leaching Test) 및 미국 환경보호기관 EPA의 환경유해물질규제를 위한 TCLP (Toxicity Characteristics Leaching Procedure)시험을 이용하여 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재의 중금속 용출시험 결과, 두 가지 규정을 모두 만족하였다.

참고문헌

1. Donald W. Pfeifer, "Fly Ash Aggregate Lightweight Concrete," *International Ash Utilization Symposium*, ACAA, 1971, pp.1993~1999.
2. Joseph. R. P. and Gary T. R. "Aqueous Reaction of Fly Ash and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to Produce Calcium Silicate Absorbent for Flue Gas Desulfurization", *Environ. Sci-Technol.*1988, pp.1299~1304.
3. J. Wastiels, X. Wu, S. Faignet, and G. Patfoort, "Mineral polymer based on fly ash," *Journal of Resource Management and Technology*, Vol.22, No.3, 1994, pp.135~141.
4. S. A. Khadikar, M. V. Karandikar, D. Ghosh, and A. K. Chatterjee "A novel clinkerization process for fly ash utilization," *6th CANMET/ACI/JCI*, Bangkok, Thailand, Vol.1, 1998, pp.225~239.
5. S. Wang and K.L. Scrivener "Hydration products of alkali activated slag cement," *Cem. Concr. Res.*, Vol.25, No.3, 1995, pp.561~571.
6. W. Jian and D.M. Roy, "Hydrothermal processing of new fly ash cement," *Ceram. Bull.* Vol.71, No.4, 1992, pp.642~647.

7. Wu. X and J. wastiels, "Detoxification of Fly Ash from Incneration Plants," *Pro. of 13th Annual Conf. of Waste Prevention, Reduction and Recycling*, Brussels, 1993, pp.1112~1116.
8. Z. P Bazant, "Thermodynamics of Hindered Adsorption and Its Implication for Hardened Cement Paste and Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 2, 1972, pp.1~16.
9. T. Silverstrim, H. Rostami, Y. Xi, and J. Martin, "High performance characteristics of chemically activated fly ash," *Proceedings of the PCI/FHWA International Symposium on HPC*, New Orleans, LA, 1997, pp.135~147.
10. 저자, "플라이애쉬의 시멘트 클링커 대체 성능과 재활용 수급전망," 한국과학기술정보원, 2003.

요 약

화력 발전소에서 발생하는 석탄회(fly ash, bottom ash)를 안정적으로 재활용 하기 위하여 알칼리 활성화된 석탄회 경화체 및 인공경량골재를 제조하였으며, 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재의 콘크리트 적용을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 따라서, 알칼리 활성화된 석탄회 경화체의 최적 배합비, 알칼리 활성화 석탄회 경화체와 인공경량골재의 기본적 특성, 역학적 특성과 환경안전성, 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 역학적 특성과 동결융해저항성을 파악하였다. 실험 결과 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재를 제조하기 위한 경화체의 최적 배합비는 시멘트 10%, Water glass 15%, NaOH 10%, MnO₂ 5%였으며, 혼합물을 50℃ 항온습윤양생 24hr 후 상온 공기중 양생을하여, 7일 압축강도 36.4MPa를 얻을 수 있었다. 제조된 골재의 폴리머 함침 결과 10% 파쇄강도를 150% 향상 시킬 수 있었으며, 콘크리트용 굵은골재로의 활용 가능성을 파악할 수 있었다.

핵심용어 : 알칼리 활성화, 플라이애쉬, 바텀애쉬, 인공경량골재, 역학적 특성