Journal of the Korea Concrete Institute
Vol.15, No.5, pp. 670~678, October 2003

석탄회를 재활용한 건설소재의 강도발현 및 건조수축

조병완 [1)*] · 김영진 [1)] · 박종빈 [1)]

[1)] 한양대학교 토목공학과

(2003년 1월 28일 원고접수, 2003년 7월 25일 심사완료)

Strength Development and Drying Shrinkage in Recycled Coal-Ash Building Material

Byung-Wan Jo [1)*], Young-Jin Kim [1)], and Jong-Bin Park [1)]

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

(Received January 28, 2003, Accepted July 25, 2003)

ABSTRACT

Recently, since industrial waste and life waste leaped into a pollution source, the building material used now a days is striking the limit. The purpose of this paper is to investigate an application of recycled coal ash using non-sintering method in the construction field. Accordingly, compressive strength, elastic modulus and drying shrinkage were experimentally studied for hardened coal ash using the non-sintering method. Also, Lineweaver and Burk method were applied to the regression analysis of drying shrinkage for the proposal equation. Elastic modulus, compressive strength of material become the basis properties of structural design. And these properties by age for hardened coal ash are important because of change by pozzolan reaction. This hardened coal ash is weak for tensile stress like that of concrete. And drying shrinkage is very important factor to make huge tensile force in early age.

In the results, although some differences were shown when comparing coal ash with mortar or concrete, the application as a building material turned out to be possible if further researches were carried out. And the shrinkage characteristic of hardened coal-ash reveals to be similar to that of moderate heat cement.

Keywords : Coal-ash, compressive strength, elastic modulus, drying shrinkage

1. 서 론

석탄회는 2000년도에 우리나라에서만 약 440만 톤이 발생하였으며, 매년 증가하고 있는 추세이다. 석탄회의 효율적 처리는 국가차원의 새로운 문제로 대두되고 있다.[1)] 현재 석탄회를 재활용 하고있는 분야로는 시멘트, 레미콘 분야, 토목, 건축재료분야, 농수산분야 등이 있다. 이 중 건설분야는 석탄회의 대량 수요를 창출할 수 있다. 이러한 석탄회의 재활용은 고갈되어 가는 천연자원을 대체할 수 있으며, 석탄회의 매립 등으로 인한 환경오염도 줄일 수 있는 장점이 있다.

현재의 석탄회 건설자재화 기술은 일반적으로 1200~1500 ℃ 이상의 온도에서 소성을 하는 고온소성법을 이용하고 있다. 그러나 이 방법은 고에너지의 사용에 따른 높은 생산단가, 낮은 강도, 품질관리의 어려움 등의 단점이 있어 지금까지 석탄회의 재활용실적이 극히 저조하였다. 따라서, 본 연구에서는 100 ℃ 이하의 저온에서 경화하여 비용을 낮추기 위해 비소성법을 제안하였다.

석탄회 경화체는 포졸란 반응 등에 의해 시간의 흐름에 따라 강도특성이 변화하므로 재령에 따른 압축강도와 탄성계수를 측정하고 두 요소간의 상호 관계를 구명하는 것은 구조설계에 적용하기 위해 가장 기초적이면서도 중요한 연구이다.

또한, 석탄회 경화체는 인장력에 취약하기 때문에, 건조수축과 같이 장기간에 걸쳐 부재에 인장력을 유발시키는 현상은 매우 치명적이다. 그리고 고형화를 위해 수분을 사용하므로 내부수분의 유출에 기인하는 건조수축이 매우 발생하기 쉬우므로 석탄회 경화체의 건조수축에 대한 예측 모델을 제시하는 것은 설계, 시공을 위한 기초자료로서 반드시 필요하다.

* Corresponding author
Tel : 02-2290-0327 Fax : 02-2292-0321
E-mail : joycon@hanmail.net

따라서 본 연구에서는 석탄회의 비소성 고형화 기술을 이용하여 석탄회 경화체를 제조하고, 건조수축 및 탄성계수, 압축강도 실험을 실시하여, 재령과 압축강도, 압축강도와 탄성계수, 재령과 건조수축의 상호관계를 구명 제시하였다. 이러한 일련의 과정들을 통해 석탄회 경화체를 토목, 건축용 프리캐스트 제품 등과 같은 구조물에 응용하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험개요

본 연구에서는 예비시험 배합을 통해 얻은 실험배합비를 이용하였으며, Fly ash에 대한 Bottom ash 치환률(20 %, 30 %, 50 %)에 따른 건조수축 특성을 파악하였다.

재령별 강도특성 및 정탄성계수 실험을 ASTM C469-94에 규정된 바와 같이 Compressometer를 장착한 하중제어 만능시험기를 이용하여 재령 2, 3, 7, 10, 14, 28, 60, 90일에 대하여 실시하였다. 건조수축 특성은 ASTM C159에서 모르터에 대해 규정하고 있는 방법을 적용해 시험하였다.

마지막으로 측정값을 이용하여 재령별 강도발현식, 압축강도로부터 탄성계수 추정식, 재령에 따른 건조수축률 추정식을 선형회귀분석 기법을 이용하여 제시하고 이에 대한 신뢰성을 검토하였다.

2.2 실험재료

2.2.1 석탄회 및 시멘트

석탄회는 보령화력 발전소에서 발생되는 유연탄 Fly ash, Bottom ash를 사용하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이, Fly ash는 CaO 함량이 6% 미만이고 강열감량(LOI)이 최대 5% 미만인 F급을 사용하였다. 또한 No.8 체를 통과하고 No.200체에 남는 미연탄소분을 제거한 Bottom ash를 사용하였다.

강도증진제로 사용한 시멘트는 KS F 5201에 규정된 규격을 만족하는 S사의 보통 포틀랜트 시멘트로서 비중은 3.15, 분말도는 3,150 g/cm^{3}인 제품을 사용하였다.

2.2.2 혼화제

Fly ash와 $Ca(OH)_2$의 반응성을 증가시키고 Fly ash에서 실리카의 용해속도를 증가시키기 위하여 $NaOH$ 및 CaO를 사용하였고, 이 반응의 촉매제로 MnO_2를 첨가하였다. 또한 $Na_2 \cdot SiO_2$를 사용하여 자체경화 및 Fly ash 반응성 증가를 통한 강도증진을 유도하였다.

2.3 예비실험

강도특성을 알아보기 위해 3단계의 예비실험을 실행하였다. 1차실험으로 Fly ash와 혼화제의 배합비를 변화시켜 가장 높은 압축강도를 나타내는 배합비를 찾는 실험을 실시하였다. $NaOH$의 함량이 Fly ash 중량비 5%에서 10%로 증가되었을 때 2.9 ~ 8.8 MPa의 압축강도 증진이 관찰되었으나, 15%로 증가시켰을 때에는 $NaOH$에 희석된 수량의 과도한 증가로 강도저하 현상이 발생하였다. 또한 $Na_2 \cdot SiO_2$의 함량을 Fly ash 중량비 5%, 10%, 15%, 20%, 25%로 증가시켰을 때 0.5 ~ 10.8 MPa의 꾸준한 강도증진이 관찰되었으나, 함량이 많아질수록 경화시간이 단축되어 25%에서는 작업성을 확보하기가 어려웠다. 같은 방법으로 MnO_2는 10%, CaO는 5%에서 최적의 강도를 나타냄을 알 수 있었다.

2차 실험으로 Bottom ash의 적정치환율 도출실험을 수행하였다. Fly ash : Bottom ash의 비율을 10:0, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6으로 변화시킨 배합의 압축강도를 측정하였다. 실험결과 10:0에서 6:4까지의 압축강도는 치환율이 높아질수록 증진되었으나, 5:5와 4:6에서는 급격한 강도저하가 관찰되었다. 치환율이 높아질수록 상대적으로 재활용율이 낮은 Bottom ash의 사용량이 높아지므로 적정치환율을 6:4로 결정하였다.

3차 실험에서는 적합한 양생조건을 도출하는 실험을 실시하였다. 건조로(50℃), 기건양생 등의 방법에 12, 24, 36,

Table 1 Physical and chemical properties of fly-ash and bottom-ash

	Density	LOI	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	TiO_2
Fly ash	2.19	3.6	54.6	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

Table 2 Material compositions (Unit : wt %)

	Fly ash	Bottom ash	C	CaO	Na_2SiO_2	MnO_2	NaOH	W/(F+B)
Hardened fly ash	100	0	10	5	20	10	10	43.2
Hardened bottom ash	100	66.7	10	5	20	10	10	36.6

48, 72, 96시간의 6가지 시간을 변수로 사용하였다. 그 결과 건조로(50 ℃)에서 양생하는 방법이 가장 높은 강도를 보여주었으며, 24시간 이상의 건조로 양생에서는 강도증진이 크게 증가하지 않았다.

따라서, 1, 2, 3차에 걸친 예비실험을 통해 결정된 배합비는 Table 2와 같으며, 양생조건은 타설 후 1일간 상온(30 ℃)에서 양생한 후 탈형 하여 1일간 50 ℃의 건조로에서 것이 적합한 것으로 나타났다.

2.4 시험변수

2.3절에서 도출된 배합비를 적용하여, 본 연구에서 사용한 실험변수는 Table 3과 같다. 또한 B2 및 B5를 통해 Bottom ash의 함량에 따른 건조수축 특성을 분석하였으며, S1을 통해 단위시멘트량이 건조수축에 미치는 영향을 분석하였다.

2.5 실험방법

2.5.1 기초물성시험

실험배합비 S3-B0와 S3-B4의 쪼갬인장강도를 재령28일에서 ASTM C496-96에 규정된 방법을 사용하여 측정하였다. 또한 Table 3의 배합비에 대하여 각주형 공시체(5×5×5 cm)를 3개씩 제작하여 재령 28일에서 기건비중 및 흡수율을 측정하였고, ASTM C109에 따라 압축강도를 측정하였다.

2.5.2 정탄성계수 시험

실험배합비 S3-B0와 S3-B4를 대상으로 ASTM C 469-94에 따라 정탄성계수를 측정하였다. 측정시의 재령은 2, 3, 7, 10, 14, 28, 60, 90일이며 각 재령별로 3개씩의 원주형 공시체를 제작하였다. 초당 0.2 N/mm^{2}의 가압속도로 가압하여 axial strain 및 작용하중을 기록하였다. 이때 사용한 가압장치는 axial strain 측정용 compressometer를 장착한 MTS사의 만능시험기를 사용하였다. 할선탄성계수는 극한하중의 40 %에서 산정하였고, 파괴시에 적용된 최대하중을 기준으로 공시체의 1축 압축강도를 동시에 측정하였다.

2.5.3 건조수축 실험

Table 3의 배합비에 대하여 ASTM C 157-93에서 모르터에 대해서 규정하고 있는 시험법에 따라 길이변화 실험을 실시하였다.

공시체의 크기는 Fig 2에서 보는 바와 같이 2.5×2.5×28.5 cm로서 양단에 길이변화 측정용 Stud Gauge를 매설하였으며 측정값의 신뢰도를 높이기 위해 배합비마다 6개의 시험체를 제작하였다.

석탄회 혼합물을 길이변화 측정용 몰드에 타설하고 1일간 상온(30 ℃)에서 양생한 후 탈형 하였으며, 이후 1일간 건조로(50 ℃) 양생을 하였다. 또한 건조수축을 최소화하

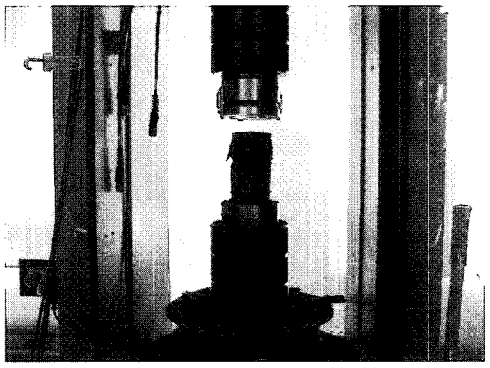

Fig. 1 View of modulus of elasticity test

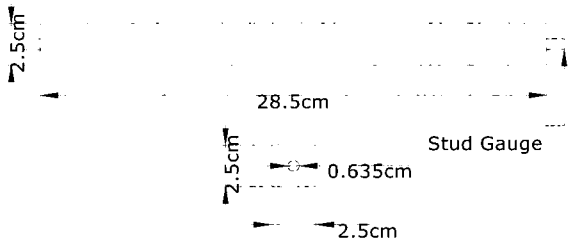

Fig. 2 Specimen for dry shrinkage test

Table 3 Mixture proportion

Specimen	Number of specimen	W/(F+B) (%)	B/F (%)	Unit weight (kg/m³)							
				F	B	C	CaO	$Na_2 \cdot SiO_2$	MnO_2	NaOH	W
S1-B0	6	47.5	0	822	0	123	41	164	82	82	390
S1-B2	6	41.8	25	725	181	110	36	145	73	73	380
S1-B4	6	38.5	67	606	404	92	30	121	61	61	389
S3-B0	6	43.2	0	822	0	82	41	164	82	82	370
S3-B2	6	39.7	25	725	181	73	36	145	73	73	360
S3-B4	6	36.6	67	606	404	61	30	121	61	61	370
S3-B5	6	33.1	100	535	535	53	27	107	54	54	354

S1 cement 15% (fly ash % weight) S3 cement 10% (fly ash % weight)
B0 fly ash : bottom ash = 10 : 0 B2 fly ash : bottom ash = 8 : 2
B4 fly ash : bottom ash = 6 : 4 B5 fly ash : bottom ash = 5 : 5

기 위해 일정한 습도(98%)하에서 건조로 양생을 수행하였다. 양생을 마친 공시체를 항온항습기에 넣기 전에 길이를 버니어 캘리퍼스로 측정하고, 측정값에 양단에 삽입된 Stud Gauge의 길이를 제외한 나머지 길이를 기준길이로 하였다.

상기의 양생 과정 후에는 6월 서울 지역의 기온 및 습도조건인 온도 25 ℃, 상대습도 60±5%로 설정된 항온항습기에 공시체를 보관하였다. 석탄회 경화체는 높은 흡수율의 영향으로 초기 건조수축이 클 것으로 예상되어 ASTM 규정과는 다르게 4, 8, 12, 16, 24, 36, 48시간과 이후 재령 7일까지는 1일 간격, 재령 10, 14, 17, 21, 28, 56, 77, 90일을 측정시간으로 정하였다.

규정된 측정시간마다 Fig 3에서 보는 바와 같이 공시체를 항온항습기에서 꺼내어 Comparator로 측정하고, 이 길이를 표준척을 사용하여 보정하였다. Comparator로 측정한 이후 중량감소율을 측정하기 위해 0.1g 정밀도의 전자식 저울을 사용하여 중량감소율을 측정하였다.

2.5.4 Lineweaver and Burk 방법

석탄회 경화체의 건조수축은 초기에는 급격히 진행되다가 장기재령으로 갈수록 거의 발생하지 않았다. 이와 같은 양상을 가장 적합하게 대표하는 함수는 직각쌍곡선 함수이며, ACI Commitee 209 보고서에서도 직각쌍곡선 함수를 건조수축의 제안식으로 제시하고 있다.

직각쌍곡선 함수를 이용한 건조수축 예측모델은 극한건조수축변형률($(\varepsilon_{sh})_u$)와 반건조시간(f)의 두가지 변수를 회귀분석을 통해 산정하여 결정할 수 있다. 반건조시간(f)는 20~130일의 값을 가지며, 7일 동안 수중 양생한 콘크리트에 대해서는 35로 제시되어 있다. 그러나, 직각쌍곡선 함수의 계수를 판별해내는 비선형 수치해석법은 시간이 매우 오래 걸리고, 최적화의 정도 및 함수와 측정값과의 민감도에 크게 영향을 받게 된다.

본 연구에서 사용한 Lineweaver and Burk 방법은 직각쌍곡선 함수를 선형식으로 변환시켜 곡선의 적합을 보다 용이하게 만드는 수치해석의 한 기법을 응용한 것으로, 건조수축과 유사한 식으로 제시되는 크리프의 분석에도 사용되고 있으며 그 정확성이 검증되어 있다.

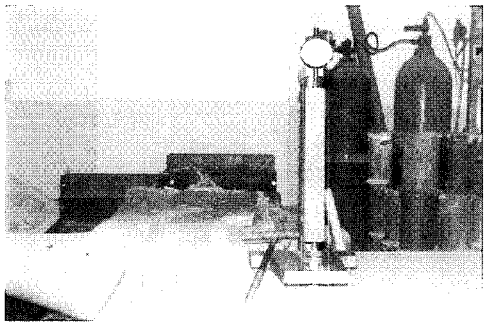

Fig. 3 Equipment for dry shrinkage test

ACI Community 209의 건조수축 제안식은 식(1)과 같다.

$$(\varepsilon_{sh})_t = \frac{t}{f+t}(\varepsilon_{sh})_u \tag{1}$$

식(1)에 역수를 취하면,

$$\frac{1}{\varepsilon_{sh}} = \frac{1}{(\varepsilon_{sh})_u} + \frac{f}{(\varepsilon_{sh})_u \cdot t} \tag{2}$$

여기서, $(\varepsilon_{sh})_u$와 f는 회귀분석을 통해 얻으려는 변수이다. 식(2)를 식(3)과 같이 치환할 수 있다.

$$\frac{1}{\varepsilon_{sh}} = y\ ;\ \frac{1}{t} = x\ ;\ \frac{1}{(\varepsilon_{sh})_u} = b\ ;\ \frac{f}{(\varepsilon_{sh})_u} = a \tag{3}$$

식(1)~식(3)을 통해 식(4)를 얻을 수 있다.

$$y = b + ax \tag{4}$$

여기서, b는 y 절편이고, a는 기울기이다. a와 b는 측정된 건조수축률과 시간에 역수를 취한 후 이를 최소자승법을 이용한 선형회귀분석을 통해 구할 수 있으며, 산정된 a와 b를 통해 최적화된 $(\varepsilon_{sh})_u$와 f의 값을 얻을 수 있다.[10]

3. 실험결과

3.1 기초물성

기건비중 측정결과, 실험배합비 S3-B0, S3-B4의 기건비중은 각각 1.69, 1.65 t/m^{3}의 값을 나타내었다. 전체적인 기건비중값은 1.63~1.71 t/m^{3}의 범위를 보이고 있어 경량콘크리트의 1.2~2.0 t/m^{3}의 범위 안에 속하고 있다. 흡수율은 14.0~17.5%의 분포로 높은 값을 보이고 있고, Bottom ash의 함량이 증가할수록 흡수율이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Bottom ash의 분말도가 Fly ash보다 낮기 때문에 전체 비표면적이 감소했기 때문이다.

압축강도 측정결과, S3-B0는 39.6 MPa, S3-B4는 43.1 MPa를 보이고 있어 구조용 부재로의 실용 가능한 수준으로 나타났다. 또한 Bottom ash의 함량이 증가할수록 강도가 증가하였다. 흡수율 실험결과를 종합하면 치환률 40% 까지의 Bottom ash 함량 증가는 석탄회 경화체를 보다 밀실하게 만든다고 결론지을 수 있다.

쪼갬인장강도 측정결과 S3-B0는 평균 3.02 MPa, S3-B4가 평균 3.34 MPa의 값을 나타내었다. 압축강도와 쪼갬인장강도의 비인 취도계수를 계산한 결과 각각 13.1과 12.9로 나타났다. 콘크리트와 마찬가지로 석탄회 경화체는 인장력에 취약한 특성이 있으며, 이에 따른 건조수축에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

3.2 재령에 따른 강도발현

재령별 정탄성계수 측정실험을 진행하여 압축강도를 얻을 수 있었다. 이로부터 압축강도와 재령과의 관계를 로그함수로 회귀분석한 결과는 Fig 4와 같다. 이 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 재령의 증가에 따른 계속적인 압축강도 증진이 나타났다. 재령 7일에서의 압축강도는 재령 28일 압축강도의 약 65 %를 나타내었다. 재령별 압축강도를 로그함수로 회귀분석 결과, 재령(t)에 따른 압축강도는 식(5)와 같다.

$$f_c = 3.88\,\mathrm{Ln}(t) + 21.90 \qquad \text{(S3-B0)} \qquad \text{(5-a)}$$

$$f_c = 4.47\,\mathrm{Ln}(t) + 22.20 \qquad \text{(S3-B4)} \qquad \text{(5-b)}$$

제안식과 측정값과의 상관계수는 각각 0.924와 0.934로 상관관계가 높게 나타났다. 또한, 지속적인 포졸란 반응으로 인하여 재령이 증가함에 따라 강도가 꾸준히 증가함을 알 수 있었다.

3.3 압축강도와 탄성계수의 관계

석탄회 경화체의 재령별 정탄성계수 시험을 실시한 결과, 극한하중의 40 %에서 할선탄성계수를 계산한 결과는 Fig 6과 같다. S3-B0계열 공시체의 극한변형률은 재령 2, 3일에서 0.008~0.009의 값을 보이고 있으며, 7일 부터 90일까지는 0.0059~0.0069, S3-B4계열은 재령에 상관없이 0.0045~0.0051의 값을 보이고 있다. 콘크리트의 극한변형률이 0.003임을 고려할 때 석탄회 경화체의 변형은 비교적 크게 나타났다. Fig 6에서 극한변형률이 상대적으로 큰 S3-B0 계열 공시체의 탄성계수가 전반적으로 작게 나타나고 있으나 고강도로 갈수록 그 격차가 좁혀지고 있다. S3-B0계열의 공시체는 3.5 ~ 10.0 GPa, S3-B4계열의 공시체는 4.8 ~ 11.4 GPa의 값을 보이고 있다. 이는 압축강도 34.3 MPa인 콘크리트의 탄성계수가 26.1 GPa의 값을 보이고 있는 것과 비교하면 약 1/3 수준이고, 기건비중이 1.6, 압축강도 34.3 MPa인 경량 콘크리트의 탄성계수 15.8 GPa과 비교해서도 약 60 % 수준에 머무르고 있다.

이러한 낮은 탄성계수는 석탄회 경화체 내부에 강성이 높은 골재가 없으며, 상대적으로 높은 극한변형률에 기인하는 것으로 사료된다.

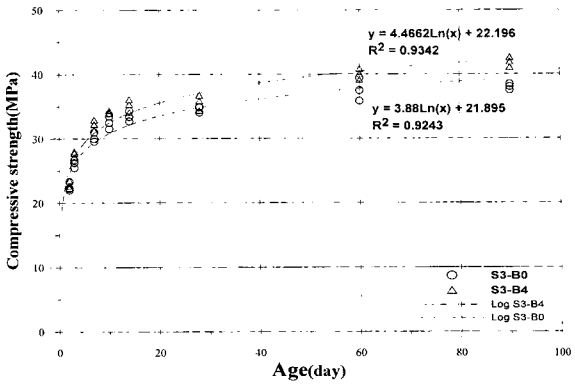

Fig. 4 Relation between compressive strength and curing age

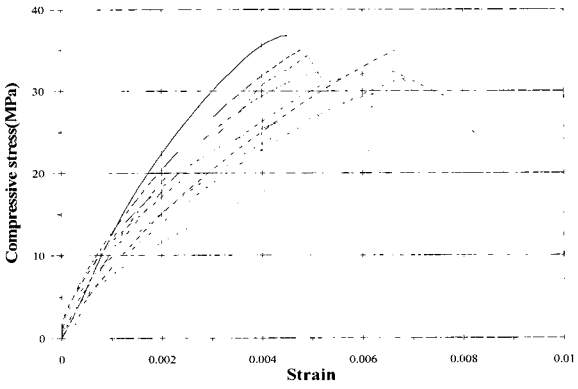

Fig. 5 Stress-strain curves

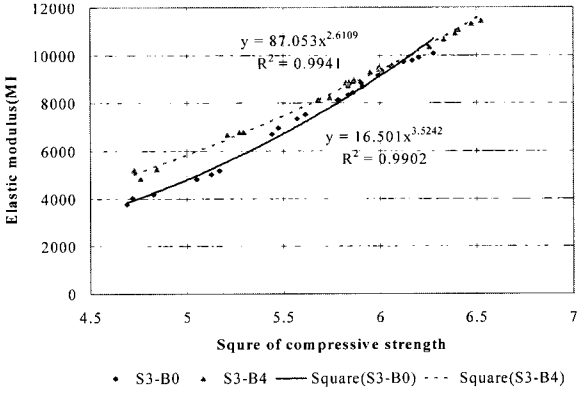

Fig. 6 Proposal equation of elastic modulus

콘크리트에서 탄성계수와 압축강도와의 관계를 제안한 기존식들은 모두 압축강도의 제곱근과 선형적으로 비례하고 있다. 이와 마찬가지로 본 연구에서는 석탄회 경화체의 탄성계수는 압축강도의 제곱근에 선형비례 한다고 가정하고 회귀분석을 실시하였다. 압축강도의 제곱근을 횡축으로, 탄성계수를 종축으로 회귀분석 하였다. 할선탄성계수와 압축강도 관계는 식(6)과 같으며 상관계수는 각각 0.99와 0.994로 높게 나타났다.

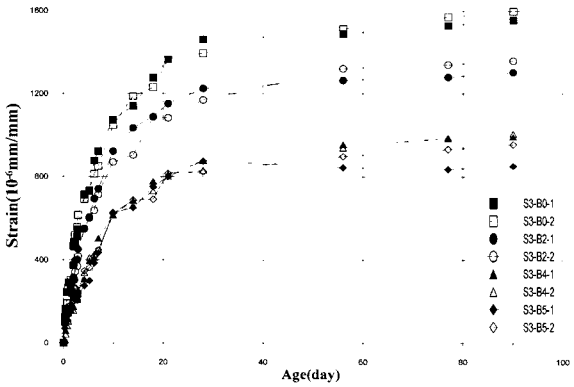

Fig. 7 Length change of type S3

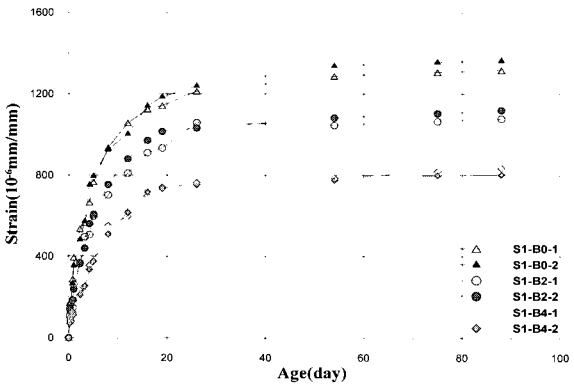

Fig. 8 Length change of type S1

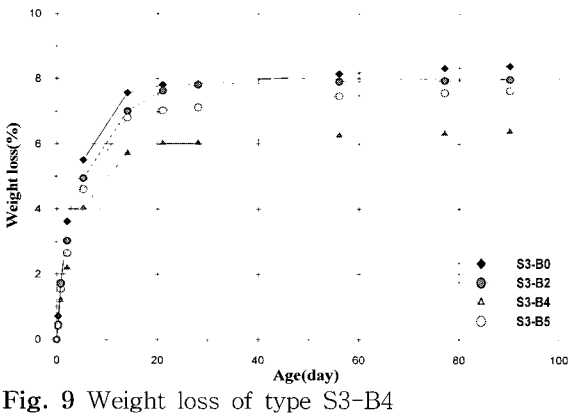

Fig. 9 Weight loss of type S3-B4

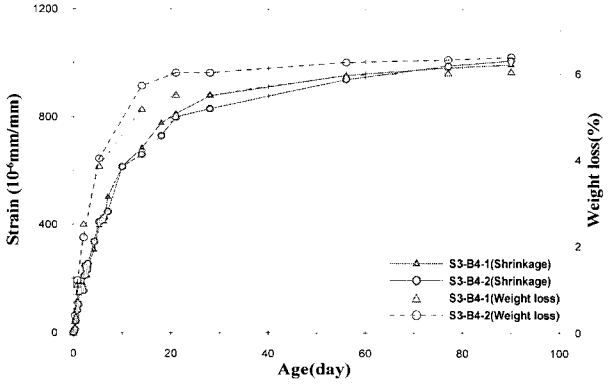

Fig. 10 Weight loss and length change of type S3-B4

$$E_c = 16.501(\sqrt{f_c})^{3.5242} \quad \text{(S3-B0)} \qquad \text{(6-a)}$$

$$E_c = 87.053(\sqrt{f_c})^{2.6109} \quad \text{(S3-B4)} \qquad \text{(6-b)}$$

3.4 건조수축

3.4.1 건조수축률

Fig. 7과 8로부터 Bottom ash 함량에 따른 B0, B2, B4 가 군을 형성하고 있으며, Bottom ash의 함량이 증가할수록 건조수축률이 감소하는 것을 알 수 있다. 재령에 따른 중량감소율을 측정한 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 10은 S3-B4계열의 길이변화율과 중량감소율을 동일한 그래프에 도시하여 상관관계를 나타낸 것이다. 중량감소율은 5.9~8.8%에 분포하고 있으며 B4계열의 공시체가 중량감소율이 작은 경향을 보였고 시멘트 함량을 5% 증가시킨 S1계열의 중량감소율이 S3 계열의 중량감소율보다 1%가량 작게 나타나고 있다. 또한 재령에 따른 중량감소율과 길이변화율은 동일한 양상을 나타내었다.

3.4.2 최종건조수축량 및 반건조시간(f)의 추정

S3-B4의 건조수축 측정값을 식 (3)과 같이 치환하여 선형회귀분석을 실시한 결과는 Fig. 11, 12와 같다. 회귀분석 결과 S3-B4 공시체에 해당하는 극한건조수축 률은 1,153 μ, 반건조시간은 10.56으로 나타났으며, 상관계수는 0.985로써, Fig. 12에서 중심선 근처로 일정하게 분포한 잔차를 통해 추정값들이 높은 신뢰도를 확보하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 13은 다른 변수들에 대해 Lineweaver와 Burk방법을 적용한 결과이다. Table 4는 극한건조수축률과 반건조시간을 산정한 결과로서 상관계수는 0.938 ~ 0.988로 높은 신뢰도를 나타내었다.

3.4.3 Bottom ash 치환율과 건조수축

Table 4를 보면 Bottom ash 치환률이 증가할수록 건조수축변형률이 감소하는 것을 알 수 있다. Bottom ash 치환

Table 4 Dry shrinkage and half dry time

	Dry shrinkage ($\times 10^{-6}$)	Half dry time	Coefficient of correlation (%)
S3-B0	1,669	5.42	95.1
S3-B2	1,473	7.38	98.8
S3-B4	1,153	10.56	98.5
S3-B5	1,152	11.68	96.0
S1-B0	1,425	4.42	96.2
S1-B2	1,193	5.16	96.8
S1-B4	1,041	8.90	93.8

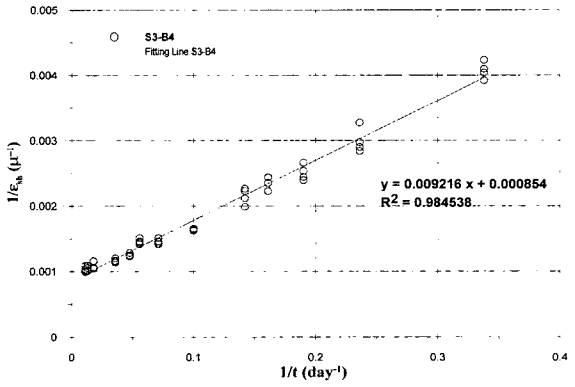

Fig. 11 Linear regression analysis of S3-B4

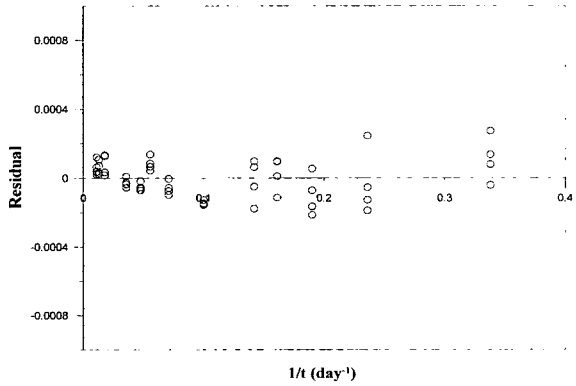

Fig. 12 Residual scatter plot

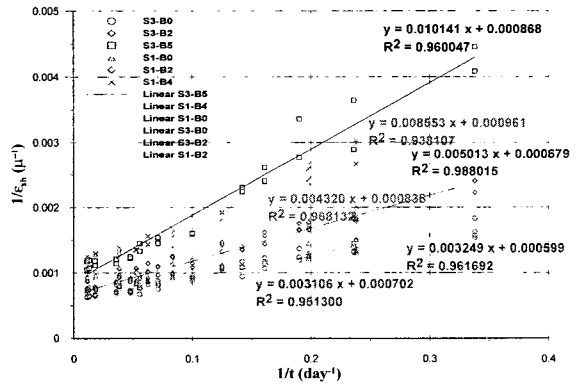

Fig. 13 Regression analysis of type S1 and S3

률이 건조수축에 미치는 영향을 제안식에 도입하기 위해 극한건조수축변형률($(\varepsilon_{sh})_u$) 및 반건조시간(f)와 치환율을 매개변수로 한 회귀분석을 실시하여 세 가지 변수와의 상관관계를 파악하였다. Fig 14는 실험배합비인 S3에 대해 Bottom ash 치환률을 x축으로, 극한건조수축변형률을 실험배합비인 S3-B4와의 비율을 y축으로 하여 도시한 것이며, Fig 15는 Bottom ash 치환률과 반건조시간을 x와 y축으로 하여 회귀분석한 결과이다. 극한건조수축변형률비와 Bottom ash 치환률과의 관계를 선형회귀분석한 결과, $y=-0.01x$, $+1.40$상관관계는 0.953으로 나타났다.

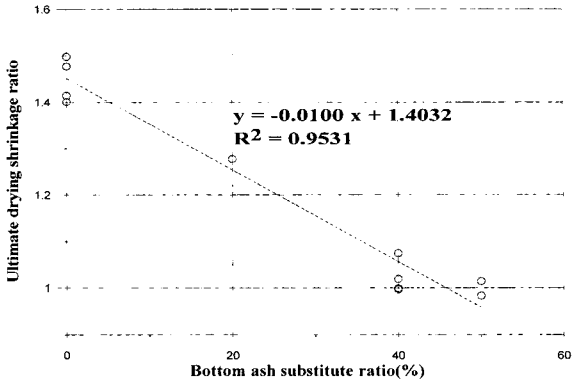

Fig. 14 Dry shrinkage ratio by bottom's replacement

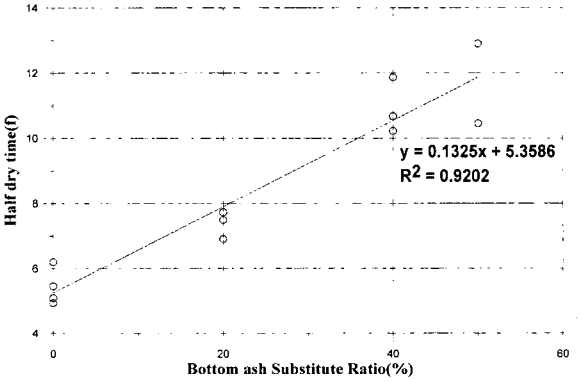

Fig. 15 Half dry time by bottom ash's replacement

또한 반건조시간과 Bottom ash를 매개변수로 하여 선형회귀분석을 수행한 결과 $y=0.13x+5.36$의 관계를 얻었으며 상관계수는 0.92로 높게 나타났다. 이와 같이 극한건조수축 변형률이 Bottom ash의 함량이 증가할수록 감소하는 것은 Bottom ash가 Fly ash 조직의 수축을 억제하는 역할을 수행하며, Bottom ash의 함량이 증가할수록 흡수율과 단위수량이 감소하기 때문인 것으로 추정된다.

3.4.4 시멘트량과 건조수축과의 관계

석탄회 경화체는 단위시멘트량이 매우 작기 때문에 시멘트겔이 건조수축에서 차지하는 영향은 크지 않다. S1은 S3에서 Fly ash의 중량에 대한 시멘트 중량비를 증가시킨 것이기 때문에 석탄회 전체량에 대한 단위시멘트량 증가율은 Bottom ash 치환율이 높아질수록 감소하였다. Fig. 16은 시멘트량 증가비를 횡축에 극한건조수축률비를 종축에 도시하고 2차 비선형 회귀분석을 실시한 것이다.

건조수축의 요인으로 시멘트 함량을 고려한다면 단위시멘트량 증가율이 높아질수록 건조수축률이 비례적으로 증가하여야 하나, Fig. 15에 보여지는 바와 같이, 그러한 개연성이 관찰되지 않고 있으며 상관계수도 76.5%로 높지 않았다.

이로부터 석탄회 경화체에서 단위시멘트량의 증가가 건조수축에 거의 영향을 미치지 못하고 있다고 결론지을 수

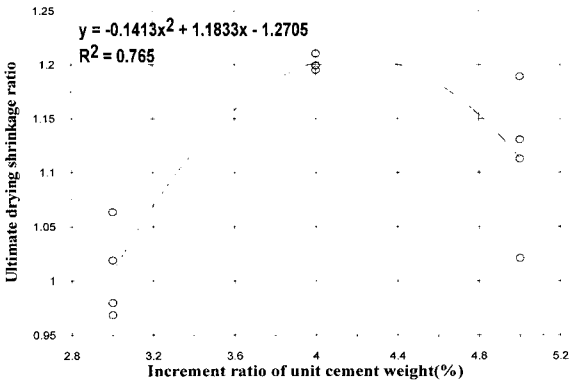

Fig. 16 Dry shrinkage by unit cement amount

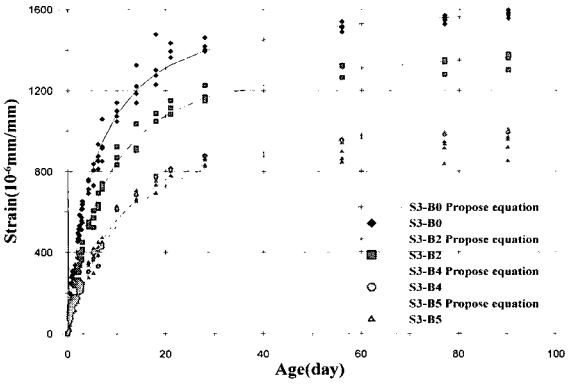

Fig. 17 Comparison of proposal equation and experience value

있다. 이는 석탄회와 혼화재료의 반응으로 인한 다량의 Tobermorite 유사 수화생성물이 생성 때문에 단위시멘트량 증가에 의한 시멘트겔 증가율이 낮아진데 그 원인이 있다.

3.4.5 건조수축 추정식의 제안

3.4.1~3.4.4절의 결과를 토대로 한 석탄회 경화체의 건조수축 추정 제안식은 식(7)과 같다.

$$(\varepsilon_{sh})_t = \frac{t}{f+t} \times (\varepsilon_{sh})_u \qquad (7)$$

여기서, $f = 0.13x + 5.36$, x= Bottom ash 치환율(%)

$$(\varepsilon_{sh})_u = [-0.01x + 1.40] \times 1,153 \times 10^{-6}$$

Fig 17은 (7)에서 제시된 제안식과 실측값을 같은 그래프로 도시하였다. 회귀분석시 정밀도를 높이기 위해 재령 3일 이전의 실측값을 제외하였으므로, 제안식과 실측값의 상관계수를 별도로 계산하여 신뢰도를 검증하였다. Fig 17은 S3-B4 공시체의 재령 3일 이전 측정치와 제안식 값을 동시에 도시한 그래프이다. Fig 17에서 제안식과 실측값의 S3-B0, S3-B2, S3-B4, S3-B5에 대한 상관계수는 각각 0.979, 0.986, 0.973, 0.964로 제안식의 신뢰도가 매우 높음을 알 수 있었다. 또한 Fig 18에서 재령 3일 이전 제안식이 실측값을 제대로 반영하고 있음을 알 수 있었다. Fig 19에서 보통 포틀랜트 시멘트, 중용열 포틀랜트 시멘트, 조강 포틀랜트 시멘트 등각종 시멘트를 W/C=60 %, R.H.=44 %의 조건으로 1:2 모르터를 제조하고 7일간 수중양생 시킨 공시체의 건조수축률과 S3-B4의 제안식을 동시에 나타내었다.

Fig 19에서 석탄회 경화체의 초기건조수축률은 보통 포틀랜트시멘트의 건조수축률과 크게 나타났으나, 최종건조수축률은 중용열 포틀랜트 시멘트 모르터나, B종 Fly ash 시멘트 모르터와 유사한 수준임을 알 수 있었다. 이는 석

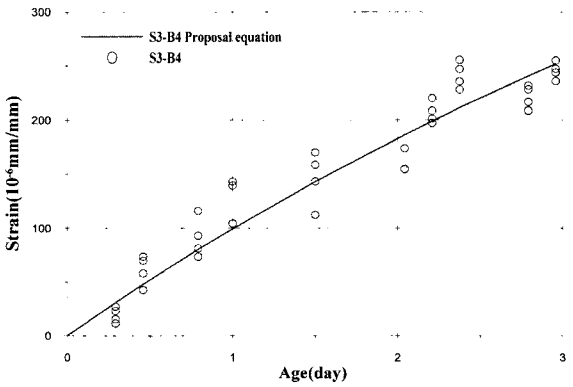

Fig. 18 Comparison of proposal equation and experience value of S3-B4 (before 3 days)

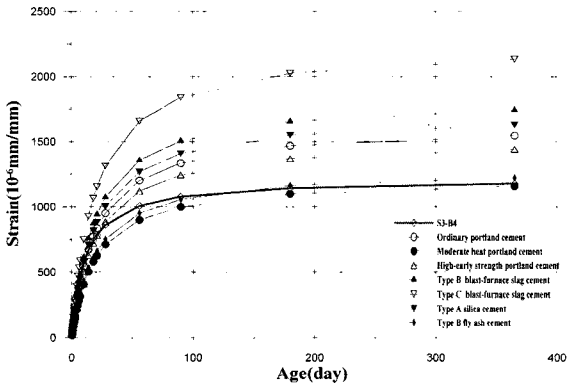

Fig. 19 Dry shrinkage by a kind of cement

탄회 경화체가 흡수율이 높기 때문에 초기 재령에서 수분의 유출속도가 빠르며, 장기재령에서 수화반응에 의한 추가 수분감소량이 콘크리트에 비해 작기 때문이다.

4. 결 론

석탄회 경화체를 토목, 건축 구조분야에 실용화하기 위해 재령에 따른 강도발현, 탄성계수 및 건조수축 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 석탄회 비소성 고형화 기술을 이용하여 수행한 적정배합비 실험결과 Fly ash 중량 대비 Bottom ash는 66.7%, Cement는 10%가 적정하였다. 또한 혼화제의 경우 5%의 CaO, 10%의 MnO_2 및 NaOH, 20%의 Na_2SiO_2 배합시 43.1 MPa의 강도를 나타내어 구조재료서의 실용 가능한 수준임을 보여 주었다.
2) 재령별 압축강도를 로그함수로 회귀분석한 결과 상관계수 0.9 이상의 재령-압축강도 관계식, $f_c = 3.88\,\mathrm{Ln}(t) + 21.90$을 제안할 수 있었다.
3) 압축강도-탄성계수 관계식을 회귀분석한 결과 압축강도의 제곱근에 비례하는 0.99이상의 높은 신뢰도의 제안식, $E_c = 16.501(\sqrt{f_c})^{3.5242}$ 을 얻을 수 있었다.
4) 재령-건조수축 관계식을 Lineweaver and Burk 방법으로 회귀분석한 결과 높은 신뢰도를 가지는 제안식 $(\varepsilon_{sh})_t = \frac{t}{f+t} \times (\varepsilon_{sh})_u$ 을 도출하였다.

본 실험에서 구한 인자들에 대한 평가를 한 결과 대부분의 측정값이 모르타르 또는 콘크리트와 비교하였을 때 약간의 차이는 보이고 있지만 앞으로 계속 연구가 진행되어진다면 충분히 건설용 재료로 사용이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국가지정연구실사업(NRL) 과제인 "폐합성수지와 석탄회를 재활용한 친환경 건설신소재 개발 및 비선형 해석·설계 기법연구" 수행과제의 일부임을 밝혀드리며, 과학기술부와 그 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 환경부, "2000년 환경백서", 2001, pp.510~537.
2. 산업자원부, 에너지 관리공단, "석탄회를 이용한 환경친화 건설자재의 개발", 2002, pp.1~27.
3. ASTM, "1996 Annual Book of ASTM Standards," Vol. 4 No. 2, Concrete and aggregates. 1996.
4. 문제길, 변동균, 신현묵, "철근 콘크리트", 동명사, 1999, pp.6~32.
5. 한국콘크리트학회, "콘크리트공학", 기문당, 1994, pp. 29~61.
6. Wittmann F. H., "Creep and Shrinkage Mechanisms," *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, editor by Bazant Z. P., Wittmann F. H., John Wiley & Sons Ltd, 1982., pp.129~161.
7. Hansen T. C. and Mattock A. H., "Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete," *Journal of ACI*, Vol. 63, 1966.
8. Bazant, Z. P., Wittmann F. H., "Creep and Shrinkage in Concrete Structures," John Wiley and Sons, 1982. 447pp.
9. 장일영, 박훈규, 윤영수, "국내의 실험자료를 이용한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식 제안", 콘크리트학회지, 제 8권 6호, 1996, pp.213~222.
10. Xiaoming, S. H., Al-Omaishi, N., Tadros, M. K., "Creep, Shrinkage, and Modulus of Elasticity of High Performance Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No.6, 2001, pp.440~449.
11. 김진근, 양은익, 권극헌., "콘크리트 건조수축에 대한 실험과 통계적 예측", 대한건축학회 4권 2호, 1988, pp.131~140

요 약

최근 폐기물 재활용에 대한 관심이 지대해 지기 시작하면서 많은 연구가 진행 중에 있다. 그 중 석탄회의 재활용 연구로는 시멘트 대체제로 및 고온소성법을 이용한 인공골재 개발등의 연구가 진행되었으나, 경제성에 있어서 부적합하였다.

본 연구에서는 비소성 고형화 기술을 사용하여 석탄회를 재활용한 건설재료의 토목, 건축 구조분야에 실용화하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다. 재령에 따른 압축강도의 회귀분석을 하였고, 압축강도와 할선탄성계수를 구하였다. 그리고 Lineweaver와 Burk 방법을 적용하여 건조수축의 회귀분석을 실시하여 제안식을 도출하였다. 연구결과, 석탄회 경화체의 압축강도는 구조용 부재로 사용가능 한 수준이었으며 건조수축은 중용열 시멘트 모르터와 유사하였다. 또한, Bottom ash의 첨가가 석탄회 경화체 내부에서 골재의 역할을 수행하는 것으로 나타났다. 건조수축 양상을 중량감소율 측정결과와 종합하면 Bottom ash 치환율과 공시체 내부의 수분감소가 건조수축의 지배적인 요인임을 파악할 수 있었다. 또한 압축강도로부터 탄성계수를 추정하는 제안식은 본 연구에서의 압축강도 범위에서는 매우 높은 신뢰도를 보였다. 또한 Lineweaver와 Burk 방법으로 도출한 건조수축 추정 제안식도 매우 높은 신뢰도를 보였다.

핵심용어 : 석탄회, 압축강도, 탄성계수, 건조수축