

산업부산물을 사용한 지오폐리머 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구

Study on Mechanical Properties of Geopolymer Concrete using Industrial By-Products

김시환¹ · 고경택¹ · 이장화¹ · 류금성^{1*}

Si-Hwan Kim¹ · Kyung-Taek Koh¹ · Jang-Hwa Lee¹ · Gum-Sung Ryu^{1*}

(Received February 28, 2014 / Revised March 26, 2014 / Accepted March 28, 2014)

This study examines the compressive strength, elastic modulus and splitting tensile strength of geopolymer concrete in order to evaluate its mechanical characteristics according to the admixing of fly ash and blast furnace slag. Moreover, identical tests are also conducted considering the amount of powder, the mixing ratio of alkali activator and the mixing ratio of silica fume for further comparative analysis considering various variables. The comparison with the formulae specified in Korean and overseas codes reveal that a mixing ratio of 18% is adequate for the alkali activator and that a replacement ratio of 5% by silica fume is recommended for silica fume. The elastic modulus of the geopolymer concrete appears to increase slightly with the increase of the compressive strength per variable and age and to be smaller than the values predicted by the formulae specified in Korean and overseas codes. In addition, the examination of the stress-strain curves shows that the geopolymer concrete exhibits ductile behavior compared to the conventional OPC. In view of the splitting tensile strength, high strength is observed for a powder content of 400kg/m³ and a replacement ratio of 18% by silica fume. The resulting ratio of the compressive strength to the splitting tensile strength is seen to range between 8.7 and 10.2%.

키워드 : 고로슬래그, 플라이애쉬, 지오폐리머 콘크리트, 탄성계수, 쪼갬인장강도

Keywords : Blast furnace slag, Fly ash, Geopolymer Concrete, Modulus of elasticity, Splitting Tensile Strength

1. 서론

콘크리트는 시멘트, 물, 골재 및 혼화제를 혼합하여 만든 재료로써 건설재료 중 가장 많이 사용되고 있는 재료이다. 이중 시멘트는 석회석(CaCO₃)을 소성과정을 통해 가공한 재료로 콘크리트 산업의 대표적인 결합재료 알려져 있다. 그러나 석회석을 열처리하는 과정 및 연료 연소 과정에서 상당한 양의 이산화탄소를 발생시킴에 따라 지구온난화 등 환경에 악영향을 미치고 있다(Ryu et al, 2013a). 이러한 환경문제를 해결하고자 건설산업에서는 시멘트의 사용량을 줄이기 위해 다양한 연구가 진행되고 있으며, 이중 산업 부산물 및 산업폐기물을 재이용하는 제로에미션(Zero emission)화 방안이 검토되고 있다(Kwon et al, 2013). 시멘트 대체재로 주목받고 있는 산업부산물은 고로슬래그(Blast Furnace Slag) 및 플라

이애쉬(Fly Ash)이며, 이를 활용한 지오폐리머 콘크리트 관련 연구들이 진행되고 있다(Cheriat et al, 1999; Jo et al, 2006; Zhao et al, 2007; Kang et al, 2011).

고로슬래그는 철강 산업에서 발생하는 부산물을 분말화한 것으로 입자 표면에 유리질 피막이 있어 물과 직접적으로 반응하지 못하며, 알칼리 환경에서 유리질 피막이 파괴된 후 수화반응이 진행되는 잠재수경성 물질이다. 기존 연구에 따르면 고로슬래그와 알칼리 활성화제를 혼합사용 시 상온에서 40~70MPa의 강도발현이 이루어지나 급격한 유동성 손실 및 수축에 따른 문제가 있는 것으로 보고되고 있다(Palacios and Puertas 2007; Koh et al, 2010; Kwon et al, 2013). 플라이애쉬는 화력발전소에서 발생하는 석탄 회로써, 그 자체로는 수경성이 없으나 알칼리 활성화제 및 고온양생에 의한 중합반응(polymerization)을 통해 강도발현이 이루어진

* Corresponding author E-mail: ryu0505@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Goyang, 411-712, Korea)

Table 1. Properties of Cementitious Materials

Types \ Items	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	L.O.I	Blain (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
Fly Ash (Raw)	57.70	23.60	9.36	4.57	0.16	0.71	0.01	3,669	2.18
Fly Ash (Milled)	58.30	22.20	7.62	4.40	1.52	0.18	0.03	4,971	2.19
Blast furnace slag	33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	2.06	0.03	4,159	2.90

다(Davidovits 1989; Fernandez-Jimenez et al. 2005; Ryu et al., 2013a), 고온양생은 다량의 에너지를 소모하기 때문에 생산 단가가 상승되는 문제가 있다. 따라서 상온양생이 가능하도록 고로슬래그 및 플라이애쉬를 혼합사용한 지오폐리머 콘크리트에 대한 연구가 진행되고 있다(Sofi et al. 2007; Kwon et al. 2013; Ryu et al. 2013b), Sofi(2007) 등은 35°C 증기 양생조건하에 고로슬래그와 플라이애쉬의 혼합비율에 따른 모르타르 압축강도, 탄성계수 및 쪼갬인장강도를 측정하였다. 그 결과 압축강도 47~57MPa, 탄성계수 22~39 GPa, 쪼갬인장강도 5~6MPa 정도로 변수에 따른 역학적 성능을 보이고 있다. Kwon(2013) 등은 고로슬래그와 플라이애쉬 혼합비를 7:3으로 고정하고 플라이애쉬를 일부 기타 혼화재로 치환하여 유동성 및 강도발현을 분석하였다. 그 결과 기타 혼화재를 사용하는 것이 유동성 확보에 용이한 것으로 분석하였으며, 특히 실리카폼 사용 시 강도증진에도 효과가 있는 것으로 보고하고 있다(Kwon et al. 2013). Ryu(2013b) 등은 고로슬래그 및 플라이애쉬를 50%씩 혼합 사용한 모르타르에 대해 내구성 평가한 결과 일반 시멘트 모르타르에 비해 초기 강도발현 및 동결융해 저항성 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 이상과 같이 고로슬래그 및 플라이애쉬를 혼합사용한 경우에 대해 모르타르의 역학적 성능 및 내구성에 대해 검토되고 있으나 콘크리트에 대한 역학적 성능 연구는 부족한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 고로슬래그와 플라이애쉬를 50%씩 혼합한 지오폐리머 콘크리트의 압축강도, 탄성계수 및 쪼갬인장강도와 같은 역학적 성능에 대해 평가하였다. 또한 다양한 변수에 대한 비교분석을 하기 위해 분체량, 알칼리 활성화제 첨가율 및 실리카폼 혼입률에 대해서도 동일한 시험을 수행하였다.

2. 시험개요

2.1 사용재료

이 연구에서 사용된 지오폐리머 콘크리트의 결합재는 하동 화력발전소에서 생산되는 플라이애쉬(FA)와 포항제철소에서 발생하는 고로슬래그(BS)를 사용하였다. 이들 결합재의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다. 플라이애쉬는 산화규소(SiO₂)와 산

Table 2. Properties of silica fume

Density (g/cm ³)	Chemical Composition					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
2.30	92.6	0.7	1.7	0.3	1.0	0.15

화알루미늄(Al₂O₃)의 함유량이 약 80% 이상으로 반응성 산화물이 다량 포함되어 있다. 이 성분들은 알칼리 활성화제와 Al-Si 중합반응이 발생하여 강도가 발현된다. 그리고 고로슬래그 미분말은 산화규소(SiO₂)와 산화알루미늄(Al₂O₃)의 함유량이 48.7%로 비교적 높아 플라이애쉬와 같이 어느 정도 중합반응을 기대할 수 있고, 특히 산화칼슘(CaO) 성분이 42.1%로 풍부하여 일반 시멘트와 같은 수화반응도 기대할 수 있을 것으로 보고하였다(Palomo et al. 1999). 또한 Kumar(2007) 및 Temuujin(2009) 등은 플라이애쉬를 분쇄하여 그에 대한 반응성을 검토하였다. 그 결과 화학적 구성비의 차이는 없으나 물리적 방법에 통해 플라이애쉬 표면의 유리질 피막을 파괴시킴으로써 중합반응을 활성화시켜 역학적 성능이 향상된 것으로 보고하고 있다(Ryu et al. 2013b). 따라서 이 연구에서는 물리적 충격을 통해 분쇄한 플라이애쉬가 상온에서 강도발현이 유리할 것으로 기대하여 이 연구에서 사용된 플라이애쉬는 볼밀링장비로 분쇄하였다.

플라이애쉬와 고로슬래그의 자극제로 사용된 알칼리 활성화제는 시약용으로 순도 98% 이상의 수산화나트륨(NaOH)과 Na₂O/SiO₂ 비가 1인 소듐실리케이트(sodium silicate)를 혼합사용 하였다.

지오폐리머 콘크리트 배합에 사용된 잔골재는 표준밀도 및 흡수율은 각각 2.59g/cm³ 및 2.5%이고, 굵은 골재는 각각 2.61g/cm³ 및 1.4%이며 최대치수 20mm 이하인 것을 사용하였다.

콘크리트용 혼화재로 사용하는 실리카폼(Silica fume)은 C사에서 판매되는 체코산을 사용하였으며, 화학 및 물리적 성질은 Table 2와 같다. 배합에 사용한 폴리카르보산계 감수제는 고품분 18%, 밀도 1.05g/m³인 암갈색 혼화제를 사용하였고, 공기연행제는 고품분이 2%인 S사 혼화제를 사용하였다.

2.2 변수 및 배합

이 연구에서 사용한 지오폐리머 콘크리트 배합비는 Table 3와 같다. OPC 콘크리트는 목표강도 30MPa로 배합설계하였고, 지오

Table 3. Mixture proportions of concrete

Mixture	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)											Alkali Activator		Slump (mm)	Air (%)
			W	Binder					S	G	AE	NaOH	Sodium silicate	(%)	Si/Na		
				Total	C	FA	BS	SF									
B350A18SF0	44	45	154	350		175	175	0	765	949	1.19	7.7	20.0	18	0.562	120	2.0
B400A18SF0			176	400		200	200	0	716	888	1.36	8.8	22.9	18	0.562	200	4.5
B350A15SF0			154	350		175	175	0	765	949	1.19	6.2	16.9	15	0.579	180	5.7
B350A21SF0			154	350		175	175	0	765	949	1.19	9.2	23.1	21	0.550	100	0.5
B350A18SF5			154	350		166	166	18	763	958	1.19	7.7	20.0	18	0.562	140	2.7
B350A18SF10			154	350		158	158	35	762	946	1.19	7.7	20.0	18	0.562	180	5.6
OPC			47	43	169	360	360				742	999	1.19	-	-	-	-

B=Binder, A=Alkali Activator, and SF=silica fume.

폴리머 콘크리트의 경우 물-결합재비 및 잔골재율은 예비실험을 통해 각각 44% 및 45%로 고정하여 배합설계 하였다. 변수는 총 결합재 분체량 350 및 400kg/m³, 알칼리 활성화제(alkali-activator; Act.) 첨가율 15, 18 및 21%, 실리카퓌름 혼입률 0, 5 및 10%로 하였다. 알칼리 활성화제는 NaOH 및 소듐실리케이트 분말형으로 물 중량에 대한 첨가율로 혼합하여 지오폴리머 콘크리트를 배합하였다. 양생은 20±2°C의 상온에서 기건양생(R.H 65±10%)을 실시하였다.

2.3 시험 방법

2.3.1 압축강도 시험

콘크리트 압축강도는 KS F 2405에 의하여 측정하였다. 공시체는 100×200mm 몰드에 성형한 후 24시간 후에 탈형하였으며, 제작한 공시체는 실험 전까지 규정 온도의 범위를 만족하는 항온항습실에서 기건양생을 시킨 후 300kN 용량의 만능재료시험기로 시험 재령 3일, 7일, 14일 및 28일에서 동일 공시체 3개씩에 대해 강도시험을 실시하여 평균값을 구하였다. 시험시 압축강도 시험기의 가력 속도는 응력도의 증가율이 매초 0.6±0.4MPa이 되도록 하였다.

2.3.2 탄성계수 시험

콘크리트의 탄성계수는 구조재료로 사용되는 콘크리트의 강도특성과 더불어 변형능을 확인 할 수 있는 중요한 요소이다. 탄성계수 측정은 KS F 2438에 준하여 실시하였으며, 300kN 용량의 만능 재료 시험기로 0.125mm/min의 변위 제어로 측정하였다. 변위는 3개의 LVDT를 설치하여 측정하였으며, 식 1에 의해 탄성계수를 계산하였다.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.000050} \quad (1)$$

여기서, E 는 탄성계수(MPa) 이고, S_1 은 세로 변형 0.00005에 대한 응력(MPa)이며, S_2 는 가해진 최대 하중의 40%에 대한 응력(MPa)이며, ϵ_2 는 응력 S_2 로 생긴 세로 변형이다.

콘크리트 탄성계수는 압축강도와 밀접한 관계가 있으며, 이를 이용하여 각 나라별로 탄성계수 산정식을 제시하고 있다. 따라서 이 연구에서는 실험에 의해 산출된 탄성계수를 국내(KCI-12, 식 2), 미국(ACI-318-05, 식 3) 및 영국(EN 1991, 식 4)의 규준에서 제시한 탄성계수 및 압축강도에 대한 상관관계식 값과 비교분석하였다.

$$E_c = 8,500 \sqrt[3]{(f_{ck} + \Delta f)} \quad (MPa) \quad (2)$$

$$E_c = 0.043 \gamma_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \quad (MPa) \quad (3)$$

$$E_c = 22 (f_{ck})^{0.3} \quad (MPa) \quad (4)$$

여기서 f_{ck} 는 콘크리트 압축강도이며, Δf 는 40MPa 이하면 4MPa, 60MPa 이상이면 6MPa, 그 사이는 직선보간으로 구한다. γ_c 는 콘크리트의 단위체적 중량이다.

2.3.3 쪼갬인장강도 시험

콘크리트의 인장강도는 일반적으로 압축강도의 1/10로 상당히 작기 때문에 콘크리트 설계시 무시된다. 그러나 건조수축 및 사인장 응력 등에 의한 균열 발생 예측이 가능하기 때문에 인장강도의 크기를 알 필요가 있다.

따라서 이 연구에서는 KS F 2423 ‘콘크리트의 쪼갬 인장 강도 시험 방법’에 의거하여 최대하중을 측정후 식 5로 쪼갬인장강도를 산출하였다. 산출된 쪼갬인장강도는 국내(KCI, 식 6), 미국

(ACI 363R-08, 식 7), 유럽(EC2-02, 식 8) 및 일본(JSCE, 식 9)에서 제시한 쪼갬인장강도 및 압축강도에 대한 상관관계식으로 산출된 값과 비교분석하였다.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (5)$$

$$f_{sp} = 0.563 \sqrt{f_{ck}} \quad (MPa) \quad (6)$$

$$f_{sp} = 0.59 \sqrt{f_{ck}} \quad (MPa) \quad (7)$$

$$f_{sp} = \frac{1}{3}(f_{ck})^{2/3} \quad (MPa), f_{ck} \leq 50MPa \quad (8)$$

$$f_{sp} = 0.23(f_{ck})^{2/3} \quad (9)$$

여기서, f_{sp} 는 쪼갬인장강도이며, P 는 파괴하중이며, D 는 공시체의 지름(100mm)이며, L 은 공시체의 길이(200mm)이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

굳지 않은 콘크리트 특성은 슬럼프와 공기량을 측정하여 평가하였으며, 그 결과는 Table 3에 나타났다. B350A18SF0을 기준으로 분체량을 증가시킨 B400A18SF0 배합이 슬럼프 200mm로 유동성이 향상된 것으로 나타났으며, 공기량도 2.0 %에서 4.5 %로 증가하였다. B350A15SF0, B350A18SF0 및 B350A21SF0 배합은 알칼리 활성화제의 사용량을 증가시킨 것이며, 슬럼프는 180mm, 120mm 및 100mm, 공기량은 5.7 %, 2.0 % 및 0.5 %로 나타났다. B350A15SF0, B350A15SF5 및 B350A15SF10 배합은 실리카폼 첨가율을 증가시킨 것이며, 슬럼프는 120mm, 180mm 및 200mm, 공기량은 2.0 %, 2.7 % 및 5.6 %로 나타났다. OPC 콘크리트의 슬럼프 및 공기량은 200mm 및 3.9 %로 나타났다. 상기 결과로부터 분체량 및 실리카폼의 사용량이 증가할수록 유동성과 공기량이 증가하는 것으로 분석되었다. 알칼리 활성화제의 사용량이 증가하면 콘크리트 점성 증가 및 반응성 증가로 유동성이 저하되고, 이에 따라 공기량 발포가 원활하게 이루어지지 못하는 것으로 나타났다.

3.2 압축강도

OPC 콘크리트의 압축강도는 3일, 7일, 14일 및 28일 재령에

따라 21.3MPa, 25.2MPa, 26.9MPa 및 28.8MPa로 측정되었다.

Fig. 1은 결합재량에 따른 재령별 압축강도 결과이다. B350A18SF0의 경우, 재령 3일에서 약 18.4MPa로 나타났으며, 그 이후 재령 28일까지 강도가 증진되어 29.7MPa이 발휘되었다. B400A18SF0의 경우는 3일 및 28일 재령에서 각각 18.5MPa 및 31.3MPa의 강도발현이 이루어졌으며, B350A18SF0에 비해 5% 정도 강도증진을 보여 분체량에 대한 강도증진 효과는 일반 OPC를 사용한 경우보다 다소 미비한 것으로 나타났다. 다만 유동성면에서 B350A18SF0은 슬럼프 120mm를 나타냈고, B400A18SF0은 200mm를 측정되어 분체량이 높을수록 작업성이 좋은 것으로 나타났다.

Fig. 2는 알칼리 활성화제 첨가율에 따른 재령별 압축강도 결과이다. B350A15SF0, B350A18SF0 및 B350A21SF0의 3일 재령 압축강도가 각각 13.3MPa, 18.4MPa, 19.2MPa이고, 재령 28일은 각각 20.4MPa, 29.7MPa, 31.2MPa로 나타나 알칼리 활성화제의 첨가율이 높을수록 압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. 기존 연구에 의하면, 알칼리 활성화제에 의해 pH가 높아지면 실리카-알루미나 유리질 결합이 빨리 분해되어 많은 양의 반응 조직들을 생성하게 된다(Shi 1996). 이에 알칼리 활성화제의 첨가율이 증가할수록 압축강도는 증가하고, 첨가율 대비 강도증진율을 고려하여 적정 첨가율을 결정해야 한다. 따라서 강도증진율과 유동성을 고려해서 볼 때, 알칼리 활성화제의 첨가율을 18% 정도 수준에서

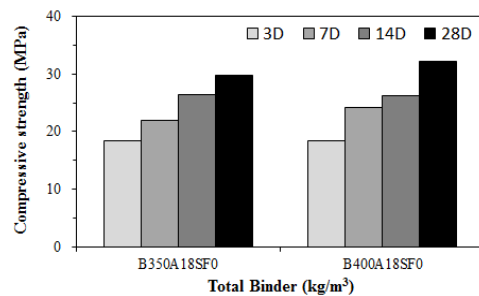


Fig. 1. Compressive strength development according to total binder content

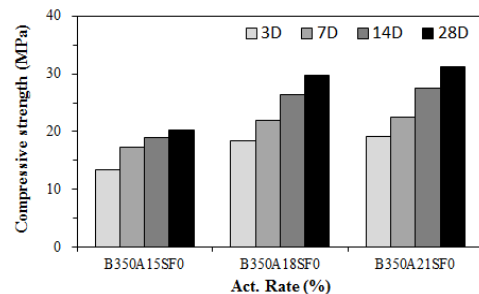


Fig. 2. Compressive strength development according to rate of Alkali-Activator

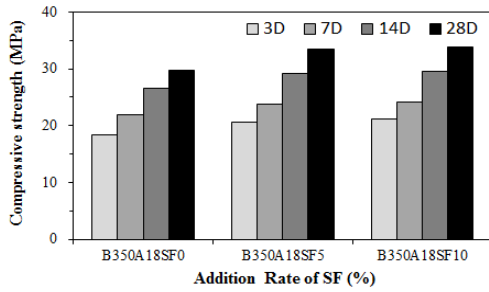


Fig. 3. Compressive strength development according to addition rate of silica fume

사용하는 것이 효과적일 것으로 보인다.

Fig. 3은 전체 결합재 중 5% 및 10%를 실리카퓌름으로 치환하여 사용량에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 결과이다. 실리카퓌름은 구성성분 중 90% 이상이 SiO₂로 이루어진 초미립분말로써 충전효과 및 포졸란 반응에 의해 콘크리트의 강도증진에 효과적인 것으로 알려져 있다(Wild et al, 1995). B350A18SF5의 경우 각 재령별 압축강도는 20.7MPa, 23.8MPa, 29.1MPa 및 33.5MPa로 모든 재령에 걸쳐 가장 큰 압축강도를 나타내고 있다. 실리카퓌름을 사용하지 않은 배합과 비교해 볼 때, 치환율 5%의 경우는 3~28일 재령 모두에서 13% 정도의 강도증진 효과가 있는 것으로 분석되었다. 그러나 B350A18SF10은 더 이상의 강도증진효과가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 실리카퓌름 첨가율 10% 배합에서 공기량이 5.6%로 나타나 타 배합에 비해 많은 양의 미세공기가 발포됨에 따라 압축강도가 저하된 것으로 사료된다.

3.3 탄성계수

콘크리트의 탄성계수는 강성 및 처짐특성을 규명하는 주요요소이다. 이 연구에서는 지오폐리머 콘크리트의 변수에 따른 탄성계수 변화를 측정하였으며, 압축강도와 탄성계수의 상관관계식에 의한 추정값과 비교분석하였다. 또한 추가적으로 동일강도에서 OPC 및 지오폐리머 콘크리트의 응력-변형률 선도를 비교분석하였다.

OPC 콘크리트의 탄성계수는 14일 및 28일 재령에서 21.9GPa 및 22.3GPa로 나타났다. Fig. 4는 분체량에 따른 재령별 탄성계수 측정값 결과를 나타낸 것이다. 재령에 따른 탄성계수 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, 분체량이 증가함에 따라 탄성계수가 5% 정도 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 분체량이 증가할수록 압축강도가 증가된 상기 결과로부터 탄성계수 결과를 설명할 수 있다. Fig. 5는 알칼리 활성화제 첨가율에 따른 탄성계수 측정결과를 나타낸 것이다. 알칼리 활성화제의 첨가율이 증가할수록 탄성계수는 각각 16.6GPa, 17.3GPa 및 17.7GPa로 증가하였다.

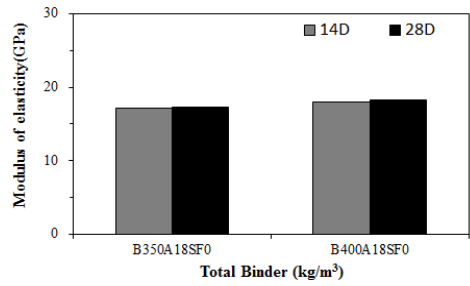


Fig. 4. Modulus of elasticity according to total binder content

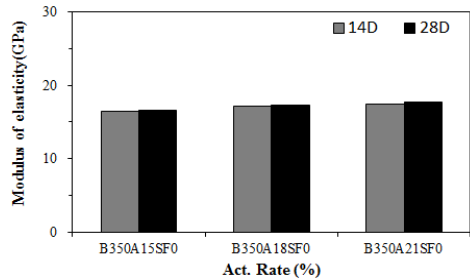


Fig. 5. Modulus of elasticity according to rate of alkali activator

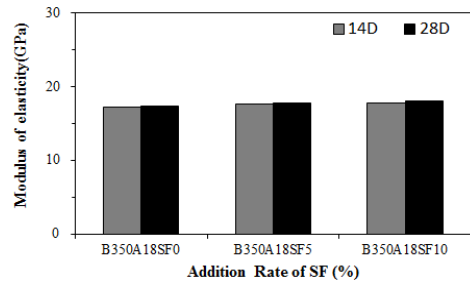


Fig. 6. Modulus of elasticity according to addition rate of silica fume

압축강도 결과에서는 첨가율이 15%에서 18%로 증가했을 때 압축강도가 46%가 증가하였으나, 탄성계수는 약 4%정도 증가한 것으로 나타나 알칼리 활성화제에 따른 탄성계수 변화는 미비한 것으로 분석되었다. Fig. 6은 실리카퓌름 첨가율에 따른 탄성계수 측정값을 나타낸 결과이다. B350A18SF5의 탄성계수는 약 3% 정도 향상되는 것으로 분석되었으며, B350A18SF10의 탄성계수는 약 4% 향상되는 것으로 나타났다.

Fig. 4~6의 결과로부터 지오폐리머 콘크리트의 탄성계수는 16.6~18.2GPa 범위로 나타났으며, 이는 일반 OPC 콘크리트 탄성계수에 비해 낮은 값을 나타냈다(Han et al, 2001).

Fig. 7은 동일강도에서 OPC 및 지오폐리머 콘크리트의 응력-변형률 선도를 나타낸 결과이다. OPC 콘크리트의 경우는 최대하중의 변형률이 0.0024로 나타났으나, 지오폐리머 콘크리트는 강도발현율이 저조한 B350A15SF0 배합을 제외한 모든 배합에서 최

대하중의 변형률이 0.0030 및 0.0036으로 나타났다. 이것은 지오폐리머 콘크리트가 OPC 콘크리트에 비해 탄성계수는 낮은 반면 파괴시의 변형률은 큰 것으로 분석되었고 이러한 결과로부터 지오폐리머 콘크리트는 OPC 콘크리트 비해 좀 더 연성적인 거동을 하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 압축강도 및 탄성계수 상관관계식에 의한 추정값과 실험에 의한 측정값을 비교한 결과이다. OPC 콘크리트 탄성계수 측정값은 ACI 상관관계식의 예측값에 근접한 것으로 나타났다. 지오폐리머 콘크리트는 대체적으로 모든 변수에 대한 탄성계수 측정값이 상관관계식에 의한 예측값 보다 작은 것으로 나타났다. 상기 결과로부터 지오폐리머 콘크리트의 탄성계수는 기존의 상관관계식으로 예측이 어려울 것으로 판단되며 이를 위한 추가연구가 필요하다.

3.4 쪼갬인장강도

이 연구에서는 분체량, 알칼리 활성화제 및 실리카퐁 첨가율에 따른 쪼갬인장강도 특성을 비교분석하였다. OPC 콘크리트의 쪼갬인장강도는 14일 및 28일 재령에서 2.4MPa 및 2.5MPa로 나타났으며, 압축강도에 대한 쪼갬인장강도의 비는 9.1% 및 8.7%로 분석되었다. 지오폐리머 콘크리트는 전체적으로 압축강도에 대한 쪼갬

인장강도의 비가 8.7~ 9.5% 수준에서 나타나 OPC 콘크리트에 대한 비율과 동등한 값을 나타냈다.

Fig. 9는 분체량에 따른 쪼갬인장강도를 14일 및 28일 재령에 측정된 결과를 나타낸 것이다. 재령이 증가함에 따라 쪼갬인장강도는 7~11% 정도 증가하는 것으로 나타났다. B400A18SF0 배합은 B350A18SF0 대비 쪼갬인장강도가 3.1MPa로 약 19% 증가하였고 압축강도 증가율 보다 높은 수치를 나타냈다.

알칼리 활성화제 및 실리카퐁 첨가율에 따른 지오폐리머 콘크리트의 쪼갬인장강도에 대한 실험결과를 Fig. 10 및 11에 나타냈다. 알칼리 활성화제 첨가율이 15%에서 21%로 증가 하면 쪼갬인장강도가 48% 정도 향상되는 것으로 나타났으며, 압축강도에 대한 쪼갬인장강도의 비가 9.2%로 분석되었다. 실리카퐁의 첨가율에 따른 실험결과, B350A18SF5의 경우는 B350A18SF0에 비해 쪼갬인장강도가 20%정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 압축강도결과와 마찬가지로 실리카퐁 첨가율이 10%로 증가하여도 쪼갬인장강도가 향상되지 않는 것으로 분석되었다.

Fig. 12는 실험에 의해 측정된 값과 압축강도와의 상관관계식으로부터 계산된 예측값을 비교한 결과이다. OPC 및 지오폐리머 콘크리트의 재령 14일 및 28일 측정값은 일본(JSCE)의 상관관계식

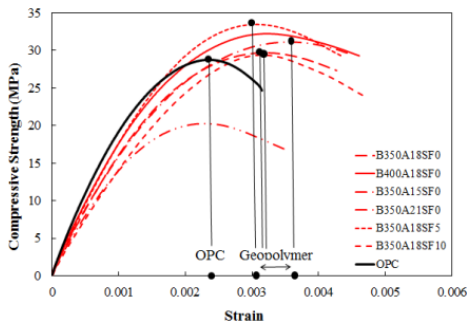


Fig. 7. Stress-Strain diagram of OPC and geopolymer concrete

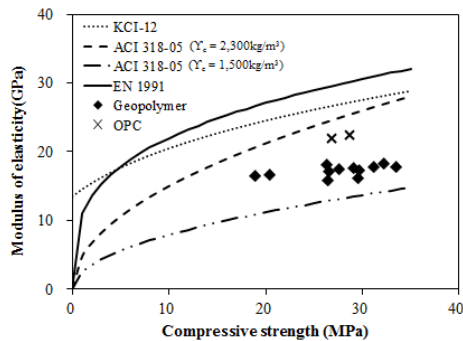


Fig. 8. Comparing the modulus of elasticity by predicted and measured value

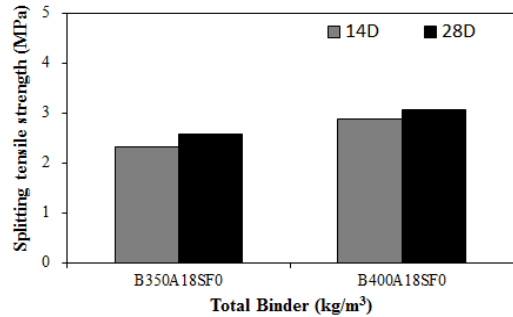


Fig. 9. Splitting tensile strength according to rate of alkali activator

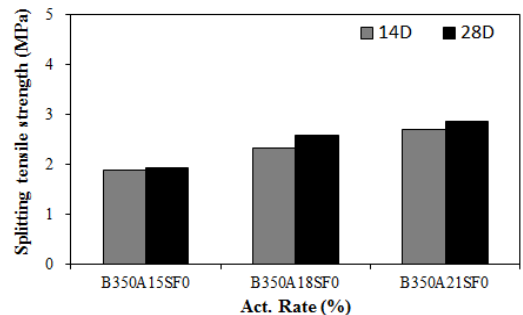


Fig. 10. Splitting tensile strength according to addition rate of silica fume

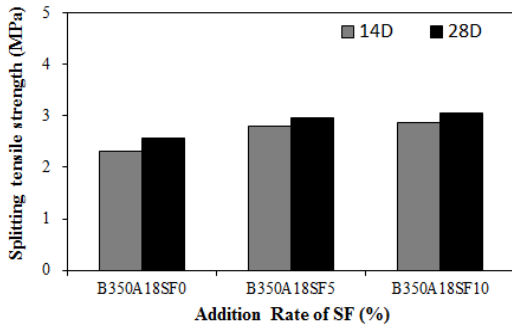


Fig. 11. Splitting tensile strength according to rate of alkali activator

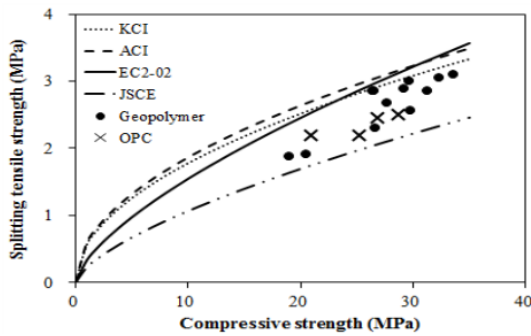


Fig. 12. Comparing the splitting tensile strength by predicted and measured value

에 의한 예측값에 비해 과대평가되는 것으로 나타났으며, 그 외 국가의 상관관계식(KCI, ACI 363R-08, EC2-02)은 저평가되는 경향을 보이고 있다. 상기 결과로부터 국내외에서 제시된 압축강도와 쪼갬인장강도 상관관계식으로 지오폐리머 콘크리트의 쪼갬인장강도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 결합재로 고로슬래그와 플라이애쉬를 50%씩 사용하고, 분체량, 알칼리 활성화제 및 실리카폼 첨가율을 변수로 하여 지오폐리머 콘크리트에 대한 압축강도, 탄성계수 및 쪼갬인장강도를 분석함으로써 역학성능을 평가하였다. 그 결과로부터 이 연구의 범위내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지오폐리머 콘크리트의 유동성 및 공기량은 분체량 및 실리카폼의 첨가율이 증가할수록 향상되었으며, 알칼리 활성화제의 경우는 사용량이 많아질수록 반응성 및 점성이 증가하여 유동성 및 공기량이 저하되었다.
2. 지오폐리머 콘크리트의 압축강도 특성은 분체량을 증가하여도

강도증진 효과가 5% 수준으로 미비하였으며, 알칼리 활성화제의 첨가율 18%와 실리카폼 첨가율 5%가 강도증진 효과가 좋은 것으로 나타났다.

3. 탄성계수의 경우는 변수별 및 재령별로 강도가 증진되면서 탄성계수가 소폭 상승되는 것으로 나타났으며, 전체적으로 일반 OPC 콘크리트에 비해 낮은 값으로 분석되었다.
4. 국·내외 압축강도와 탄성계수 상관관계식을 이용한 비교분석을 통하여 지오폐리머 콘크리트의 탄성계수는 예측값보다 낮은 것으로 확인하였으며, 응력-변형률 선도를 통하여 지오폐리머 콘크리트가 일반 OPC 콘크리트 보다 연성적인 거동을 하는 것으로 분석되었다.
5. 쪼갬인장강도는 분체량, 알칼리 활성화제 및 실리카폼의 첨가량이 증가할수록 쪼갬인장강도가 증가하는 경향을 보이나, 첨가율 대비 쪼갬인장강도 증진효과로 볼 때 분체량 400kg/m³, 알칼리 활성화제 첨가율 18% 및 실리카폼 5%에서 높은 수준을 나타냈다.
6. 실험결과로부터 지오폐리머 콘크리트는 압축강도에 대한 쪼갬인장강도의 비가 8.7~9.5% 수준인 것으로 분석되었으며, 국·내외 압축강도와 쪼갬인장강도 상관관계식을 이용한 비교분석을 통하여 기존의 상관관계식으로 지오폐리머 콘크리트의 쪼갬인장강도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 “HVCCPs 활용 그린 건설재료 및 실용화 기술” (과제번호: 2011T100200271)의 일환으로 한국에너지기술평가원 전력산업융합원천기술개발사업의 재정적 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

References

Cheriaf, M., Cavalcante Rocha, J., and Pera, J. (1999). Pozzolan properties of pulverized coal combustion bottom ash, *Cement and Concrete Research*, **29(9)**, 1387-1391.

Davidovits, J. (1989). Geopolymers and geopolymeric materials, *Thermal Analysis and Calorimetry*, **35(2)**, 429-441.

Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., and Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model, *Cement and Concrete Research*, **35(6)**, 1204-1209.

Han, S.H., Kim, J.K., Park, W.S., and Kim, D.H. (2001). Effect

- of Temperature and Aging on the Relationship Between Dynamic and Static Elastic Modulus of Concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **13(6)**, 610–618.
- Jo, B.W., Park, M.S., and Park, S.K. (2006). Strength Development and Hardening Mechanism of Alkali Activated Fly Ash Mortar, Journal of the Korea Concrete Institute, **18(4)**, 449–458.
- Kang, S.T., Ryu, G.S., Koh, K.T., and Lee, J.H. (2011). Optimum Mix Design of Alkali-Activated Cement Mortar using Bottom Ash as Binder, Journal of the Korea Concrete Institute, **23(4)**, 487–494.
- Koh, K.T., Ryu, G.S., and Lee, J.H. (2010). Properties of the flowability and strength of Cementless Alkali-Activated Mortar Using the Mixed Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute, **5(4)**, 114–121.
- Kumar, R., Kumar, S., and Mehrotra, S.P. (2007). Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation, Resources Conservation and Recycling, **52(2)**, 157–179.
- Kwon, Y.H., Kwon, Y.H., and Lee, D.G. (2013). A Study on the Quality Properties of Alkali-activated cement free Mortar using Industrial by-products, Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute, **1(1)**, 58–66.
- Palacios, M., and Puertas, F. (2007). Effect of shrinkage reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes, Cement and Concrete Research, **37(5)**, 691–702.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W., and Blanco, M.T. (1999). Alkali-activated fly ashes a cement for the future, Cement and Concrete Research, **29(8)**, 1323–1329.
- Park, S.G., Kwon, S.J., Kim, Y.M., and Lee, S.S. (2013). Reaction Properties of Non-Cement Mortar Using Ground Granulated Blast Furnace Slag, The Korea Contents Association, **13(9)**, 392–399.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., and Chung Y.S. (2013a). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkali activators, Construction and Building Materials, **47**, 409–418.
- Ryu, G.S., Koh, K.T., and Lee, J.H. (2013b). Strength Development and Durability of Geopolymer Mortar Using the Combined Fly ash and Blast-Furnace Slag, Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute, **1(1)**, 35–41.
- Shi, C. (1996). Early microstructure development of activated lime-fly ash paste, Cement and Concrete Research, **26(9)**, 1351–1359.
- Sofi, M., Van Deventer, J.S.J., Mendis, P.A., and Lukey, G.G. (2007). Engineering Properties of Inorganic Polymer Concretes (IPCs), Cement and Concrete Research, **37(2)**, 251–257.
- Temuujin, J., Williams, R.P., and Van Riessen, A. (2009). Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature, Journal of Materials Processing Technology, **209(12–13)**, 5276–5280.
- Wild, S., Sabir, B.B., and Khatib, J.M. (1995). Factors Influencing Strength Development of Concrete Containing Silica Fume, Cement and Concrete Research, **25(7)**, 1567–1580.
- Zhao, F.Q., Ni, W., Wang, H.J., and Liu, H.J. (2007). Activated fly ash/slag blended cement, Resources, Conservation and Recycling, **52(2)**, 303–313.

산업부산물을 사용한 지오폴리머 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구

이 연구에서는 플라이애쉬와 고로슬래그를 혼합한 지오폴리머 콘크리트의 역학성능을 평가하기 위하여 압축강도, 탄성계수 및 쪼갬인장강도에 대해 검토하였다. 또한 다양한 변수에 대한 비교분석을 하기 위해 분체량, 알칼리 활성화제 첨가율 및 실리카 품 혼입률에 대해서도 동일한 시험을 수행하였으며, 국내·외의 표준식과 비교하였다. 그 결과, 알칼리 활성화제의 첨가율은 18%가 적당하고 실리카품 치환율은 5%가 유리한 것으로 나타났다. 지오폴리머 콘크리트의 탄성계수는 변수 및 재령별로 압축강도가 증진됨에 따라 탄성계수가 소폭 상승되는 것으로 나타났으며, 국내·외 표준식에 의한 예측값보다 작은 것으로 나타났다. 또한 응력-변형을 선도를 분석한 결과, 지오폴리머 콘크리트가 일반 OPC 콘크리트 보다 연성적인 거동을 하는 것으로 분석되었다. 쪼갬인장강도는 분체량 400kg/m³와 알칼리 활성화제 첨가율 18%에서 높은 강도를 보였으며, 압축강도에 대한 쪼갬인장강도의 비가 8.7~10.2% 수준인 것으로 분석되었다.