Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 24, No. 2, April 2020, pp.41-49
https://doi.org/10.11112/jksmi.2020.24.2.41
pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

삼각조성도를 통한 3성분계 무시멘트 콘크리트의 압축강도 특성 연구

정유진[1], 김영수[2*]

A Study on the Compressive Strength Properties of the Ternary Blended Non-Cement Concrete using Ternary Diagram

Yu-Jin Jung[1], Young-Su Kim[2*]

Abstract : To improve the problem of strength reduction of unary and binary blended non-cement concrete that occur at room temperature, comparative analysis was conducted based on the slump and compressive strength properties of ternary blended non-cement concrete in which cement was replaced with silica fume, fly ash, and blast furnace slag, and the following conclusions were drawn. The ternary blended non-cement concrete showed higher compressive strength than binary binder concrete, and the slump reduction was less when 10% silica fume was mixed. In addition, the appropriate composition ratio range of each by-product was suggested according to slump and compressive strength level based on ternary diagram.

Keywords: Ternary system, Non-cement, Concrete, Silica fume, Fly ash, Blast furnace slag

1. 서 론

최근 이산화탄소의 배출로 인한 지구온난화 및 이에 대한 해결책이 세계 각국의 주요 이슈로 부각되고 있다. 특히, 시멘트 생산과정에서 발생하는 이산화탄소의 양은 국내 총 배출량의 약 6~8%로 다량의 이산화탄소를 발생시키기 때문에 이를 해결할 수 있는 방안이 필요하다(Kim and Kim, 2016).

이산화탄소를 저감하기 위해서는 시멘트를 대체할 수 있는 무기결합재로 일부 또는 전체 치환하여 시멘트 사용량을 감소시키는 방법이 있다. 하지만 무기결합재를 일부 대체할 경우 시멘트의 사용량이 많아 온실가스 저감효과가 미비하다. 따라서 시멘트를 전혀 사용하지 않는 무시멘트 콘크리트를 사용하게 되면 이산화탄소의 양을 줄여 지구온난화와 같은 환경문제를 해결할 수 있다. 이러한 무시멘트 콘크리트는 알루미나 또는 실리카가 포함된 물질과 알칼리 용액의 반응을 통해 만들어지는 지오폴리머의 범주에 속해있다.

무시멘트 콘크리트는 무기결합재의 종류, 알칼리 활성화제의 혼합방법, 양생온도에 따라 특성이 크게 달라진다. 기존 연구에 따르면 무시멘트 콘크리트의 무기결합재로는 왕겨재, 실리카 흄, 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 시멘트 킬른 더스트 등이 사용되고 있으며 무기결합재의 종류에 따라 기초적 특성이 크게 달라진다(Kwon, 2013). 또한, 알칼리 활성화제는 수산화나트륨과 규산나트륨을 1:1의 비율로 혼합하게 될 경우 높은 슬럼프와 압축강도를 나타냈으며(Kim and Yang, 2018), 무시멘트 콘크리트는 양생온도가 높을수록 강도가 증진되지만 상온양생에서는 강도발현이 저하되는 것으로 나타났다(Ryu et al., 2013).

이와 같이 무시멘트 콘크리트에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있지만 시멘트를 단일 또는 2가지 무기결합재로 치환한 1성분계 및 2성분계 무시멘트 콘크리트의 경우 상온에서 양생하게 되면 보통 콘크리트보다 강도가 낮게 나타나거나 한가지 결합재의 다량혼입으로 인해 초기강도 저하 및 응결지연 등의 문제점이 발생한다(Lee, 2014).

이러한 문제점을 개선하기 위해 초기강도가 낮고 장기강도가 높은 플라이애시, 고로슬래그 미분말과 초기강도발현이 우수한 실리카 흄을 혼입한다면, 특성이 다른 각 무기결합재의 장점을 극대화시켜 시너지효과가 나타날 것이라 예상된다. 그러나 무기결합재의 종류 및 구성비율에 따라 특성이 크게 달라지므로 각 무기결합재의 특성을 파악하고 적절한 비율로 혼입하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 실리카 흄, 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 사용한 3성분계 무시멘트 콘크리트에서 무기결합재의 종류 및 구성비율에 따른 시너지 효과를 슬럼프와 압축

[1]정회원, 부산대학교 대학원 석사과정
[2]정회원, 부산대학교 건축공학과 교수, 공학박사
***Corresponding author:** kys@pusan.ac.kr
Department of Architectural Engineering, Pusan National University
•본 논문에 대한 토의를 2020년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2020 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

강도 특성을 통해 분석하고, 3성분계 무시멘트 콘크리트의 배합에 관한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험개요

본 연구에서는 시멘트를 무기결합재로 100% 치환한 1성분계, 2성분계, 3성분계 무시멘트 콘크리트에 대한 슬럼프와 압축강도 특성을 파악하고, 삼각조성도를 통해 슬럼프 및 재령 28일의 압축강도 수준별 각 무기결합재의 구성비율 범위를 제시한다.

Table 1 Experiment factor and assessment

Experiment Factor	Alkali Activator Solution / Binder (%)	50	
	Alkali - Activator ratio (%)	NaOH	Na_2SiO_3
		50	50
	Alkali - Activator Molarity (M)	10	
	Binder composition (%)	Silica fume : 10, 20	
		Fly ash, Blast furnace slag : 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	
Assessment	Slump (mm)	Fresh concrete	
	Compressive Strength (MPa)	3, 7, 14, 28 days	

Table 2 Mixing design of concrete

Mixture	AAS/ Binder (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m^3)							S.P (%)
			SF	FA	BS	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Alkali - Activator		
								NaOH (Solid)	Na_2SiO_3 (Solid)	
SF100	50	47	360	-	-	759	838	90 (28)	90 (34)	1
FA100			-	360	-	762	842			
BS100			-	-	360	812	897			
SF10 FA90			36	324	-	761	841			
SF20 FA80			72	288	-	761	841			
SF10 BS90			36	-	324	806	891			
SF20 BS80			72	-	288	801	885			
FA10 BS90			-	36	324	807	891			
FA30 BS70			-	108	252	797	880			
FA50 BS50			-	180	180	787	869			
FA70 BS30			-	252	108	777	858			
FA90 BS10			-	324	36	767	847			
SF10 FA10 BS80			36	36	288	801	885			
SF10 FA20 BS70			36	72	252	796	880			
SF10 FA30 BS60			36	108	216	791	874			
SF10 FA40 BS50			36	144	180	786	869			
SF10 FA50 BS40			36	180	144	781	863			
SF10 FA60 BS30			36	216	108	776	858			
SF10 FA70 BS20			36	252	72	771	852			
SF10 FA80 BS10			36	288	36	766	847			
SF20 FA10 BS70			72	36	252	796	879			
SF20 FA20 BS60			72	72	216	791	874			
SF20 FA30 BS50			72	108	180	786	868			
SF20 FA40 BS40			72	144	144	781	863			
SF20 FA50 BS30			72	180	108	776	857			
SF20 FA60 BS20			72	216	72	771	852			
SF20 FA70 BS10			72	252	36	766	846			

2.1.1 배합설계

본 연구의 배합은 선행연구에 따라 알칼리 용액/결합재비를 50%로 설정하였으며 알칼리 활성화제는 규산나트륨수용액과 수산화나트륨수용액을 1:1의 비율로 혼합하였다(Kim and Yang, 2018). 시멘트를 대체할 결합재로는 실리카 흄, 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 사용하였으며 2성분계와 3성분계에서 실리카 흄은 10, 20(%)로 혼입하여 배합하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 배합수는 수산화나트륨 90kg/m^3 내에 존재하는 61.7kg/m^3의 H_2O와 규산나트륨 90kg/m^3 내에 존재하는 56kg/m^3의 H_2O가 사용되었다. 실험인자 및 평가항목과 배합설계는 Table 1, 2에서 나타내었다.

2.1.2 시편제작

본 연구의 비빔방법은 먼저 배합 24시간 전에 수산화나트륨과 규산나트륨 수용액을 혼합하였다. 배합 시, 결합재와 알칼리 활성화제를 콘크리트 믹서에 투입하여 2분간 혼합하였으며 그 후에 굵은 골재를 투입하여 3분간 저속비빔을 실시한 후 잔골재를 투입하여 3분간 고속비빔을 실시하였다. 배합 직후 모든 공시체는 ø 100mm × 200mm로 원주형 공시체를 제작하였다. 또한, 타설 후 24시간 동안 실내에서 대기양생 한 후 탈형하여 온도 20 ± 3℃로 유지하여 수중양생을 실시하였다.

2.2 사용재료의 특성

2.2.1 골재

본 연구에서 사용된 굵은 골재의 최대 입경은 25 mm 이하의 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 5 mm 이하의 강모래를 사용하였다. 해당 골재의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of Aggregate

Type of Aggregate	Coarse Aggregate	Fine Aggregate
Maximum size (mm)	25	5
Fineness modulus (F.M.)	6.5	2.95
Density (g/cm^3)	2.65	2.6
Weight of unit volume (kg/m^3)	1,680	1,650

2.2.2 결합재

본 연구에서 사용된 무기결합재는 이산화규소와 산화알루미늄이 함유되어있는 실리카 흄, 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 사용하였으며 각 결합재의 물리적 특성 및 화학적 구성은 Table 4, 5와 같다.

Table 4 Physical properties of binder

Type of Binder	Silica fume	Fly ash	Blast furnace slag
Density (g/cm^3)	2.2	2.25	2.9
Fineness (cm^2/g)	200,000	3,680	4,486

Table 5 Chemical composition of binder

Composition (%)	Silica fume	Fly ash	Blast furnace slag
SiO_2	92.21	61	27.56
Al_2O_3	0.38	22.83	16.19
CaO	0.51	2.64	43.39
MgO	0.72	0.87	6.63
Fe_2O_3	0.09	5.57	0.86
K_2O	0.23	0.96	0.63
Na_2O	0.41	0.35	0.20

2.2.3 알칼리 용액

본 연구에서 사용된 알칼리 용액은 수산화나트륨 분말과 액상의 규산나트륨(물유리)을 사용하였다. 알칼리 활성화제는 규산나트륨(SiO_2 28.8%, Na_2O 9.0%, H_2O 62.2%)과 순도 98%이상의 수산화나트륨 분말을 사용하였으며, 수산화나트륨 분말의 분자량을 통해 10M의 수산화나트륨 수용액을 제조하여 액상의 규산나트륨과 1 : 1 비율로 혼합하여 24시간 동안 균일하게 섞이도록 하였다.

이때, 10M의 수산화나트륨 수용액 1kg은 0.314kg의 고형분(solid)과 0.686kg의 H_2O로 구성되어 있으며(Rangan, 2008) 규산나트륨 수용액 1kg은 0.378kg의 고형분과 0.622kg의 H_2O로 구성되어 있다.

2.2.4 감수제

본 연구에서 사용한 고성능 감수제는 폴리카르본산 계를 사용하였으며, 고성능 감수제의 물리적 특성은 아래 Table 6과 같다.

Table 6 Physical properties of superplasticizer

Kind of superplasticizer	High range water reducing AE agent
Main component	Polycarboxylate
Type	Liquid
Color	Light brown
Specific gravity	1.05

3. 실험결과 및 고찰

1, 2, 3성분계 무시멘트 콘크리트의 슬럼프 및 각 재령의 평균 압축강도에 대한 실험결과는 Table 7과 같다.

Table 7 The result of slump and compressive strength

Mixture	Slump (mm)	Compressive Strength (MPa)			
		3days	7days	14days	28days
SF100	65	17.4	20.8	22.3	23.1
FA100	110	7.3	10.6	13.7	15.5
BS100	120	11.7	15.1	21.2	25.7
SF10 FA90	95	9.2	12.8	14.8	16.7
SF20 FA80	90	15.8	20.3	22.4	25.3
SF10 BS90	90	18.9	25.1	30.5	35.7
SF20 BS80	80	19.3	27.6	31.1	34.3
FA10 BS90	95	16.4	23.8	25.1	26.7
FA30 BS70	100	18.9	22.3	27.6	30.5
FA50 BS50	85	14.6	17.8	20.9	24.1
FA70 BS30	95	12.6	15.3	18.2	21.9
FA90 BS10	105	8.1	12.1	14.3	15.5
SF10 FA10 BS80	90	15.1	25.7	34.1	36.6
SF10 FA20 BS70	90	14.3	25.1	30.8	34.3
SF10 FA30 BS60	95	13.5	25.6	29.3	32.1
SF10 FA40 BS50	90	18.8	32.1	40.4	43.9
SF10 FA50 BS40	95	16.6	29.6	35.7	38.6
SF10 FA60 BS30	100	13.6	28.2	35.3	37.5
SF10 FA70 BS20	105	13.1	25.6	30.1	34.4
SF10 FA80 BS10	100	14.2	22.8	26.4	29.3
SF20 FA10 BS70	70	16.4	26.3	32.9	36.4
SF20 FA20 BS60	80	16.9	26.7	32.1	34.5
SF20 FA30 BS50	80	22.5	32.2	37.8	40.3
SF20 FA40 BS40	90	20.2	30.3	35.1	37.6
SF20 FA50 BS30	90	17.4	28.6	33.0	36.5
SF20 FA60 BS20	95	16.8	28.7	31.2	34.6
SF20 FA70 BS10	100	17.5	27.1	29.4	30.8

3.1 슬럼프

3.1.1 각 성분계에 따른 슬럼프

단일결합재를 사용한 1성분계의 슬럼프 측정결과는 Fig. 1과 같다. 1성분계의 슬럼프는 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 실리카 흄 순으로 높은 값을 나타내었다. 고로슬래그 미분말을 100% 치환한 경우 슬럼프는 120mm로 높은 값을 나타내었으나, 실리카 흄을 100% 치환한 경우는 65mm로 슬럼프가 크게 감소하는 것을 알 수 있었다.

이는, 실리카 흄의 경우 분말도가 높아 중량 혼입에 따른 결합재의 양이 증가하게 되어 유동성 감소가 나타난 것으로 판단된다. 또한, 플라이애시는 구형 입자로 인한 볼베어링 영향에 의해 유동성이 향상되지만, 플라이애시가 100% 혼입된 경우 미연소탄소성분이 증가하여 AE제를 흡착함에 따라 점성이 커지게 되어(Lee, 2014) 슬럼프가 크게 증가하지 않은 것으로 판단된다. 고로슬래그 미분말이 100% 혼입된 경우, 고로슬래그 미분말의 표면에 유리질 피막이 형성되어 있어 흡수율이 낮기 때문에(Kim and Kim, 2016) 슬럼프가 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

2성분계에서 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 구성비율에 따른 슬럼프 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 플라이애시와 고로슬래그 미분말이 혼입된 2성분계의 경우 슬럼프의 범위는 85~105mm로 나타났다. 고로슬래그 미분말이 10% 혼입된 경우 슬럼프는 105mm이며, 고로슬래그 미분말의 구성비율이 증가할수록 슬럼프는 감소하였다. 하지만 고로슬래그 미분말을 70% 혼입하였을 경우 슬럼프가 다소 증가하며 이후 90%까지 100mm에 근접한 슬럼프를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

3성분계에서 실리카 흄 10, 20(%)를 혼입한 경우 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 구성비율에 따른 슬럼프 변화를 Fig. 3에서 나타내었다. 실리카 흄 10% 혼입시 고로슬래그 미분말의 구성비율에 따른 슬럼프의 범위는 90～105mm로 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 구성비율에 따른 슬럼프 변화가 상대적으로 적은 것을 알 수 있었다. 하지만 실리카 흄 20% 혼입시 슬럼프의 범위는 70～100mm로 고로슬래그 미분말의 구성비율 증가에 따라 슬럼프가 저하되며 70% 혼입되었을 때 슬럼프 값은 70mm로 고로슬래그 미분말 10% 대비 30mm 감소한 것을 알 수 있었다.

이를 통해 3성분계 무시멘트 콘크리트의 슬럼프는 실리카 흄과 고로슬래그 미분말의 구성비율이 증가할수록 유동성이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는, 실리카 흄의 높은 분말도 및 고로슬래그 미분말의 구성비율 증가에 따른 플라이애시 구성비율의 감소로, 볼베어링 영향이 감소하여 슬럼프가 감소한 것이라 판단된다.

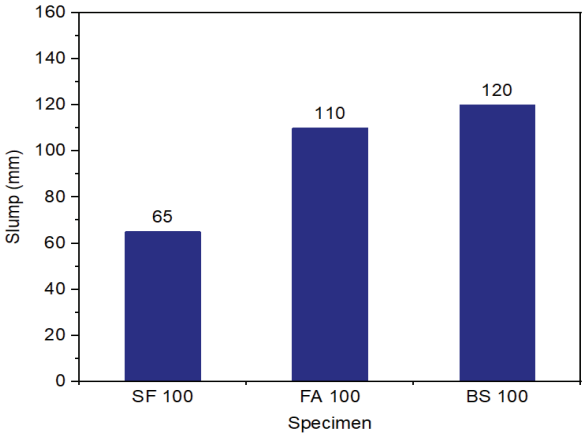

Fig. 1 Slump of unary binder concrete

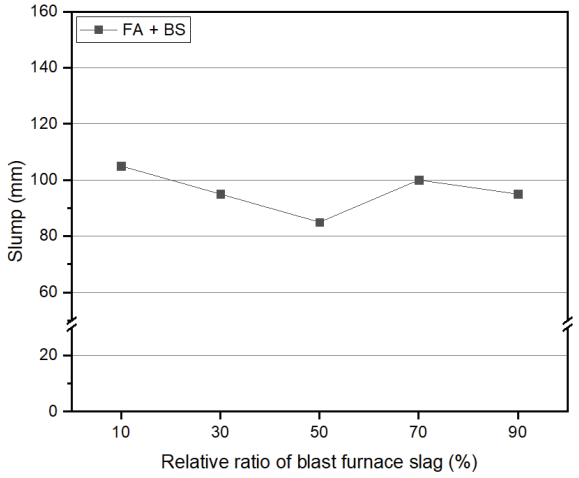

Fig. 2 Slump of binary binder concrete with the BS replacement ratios

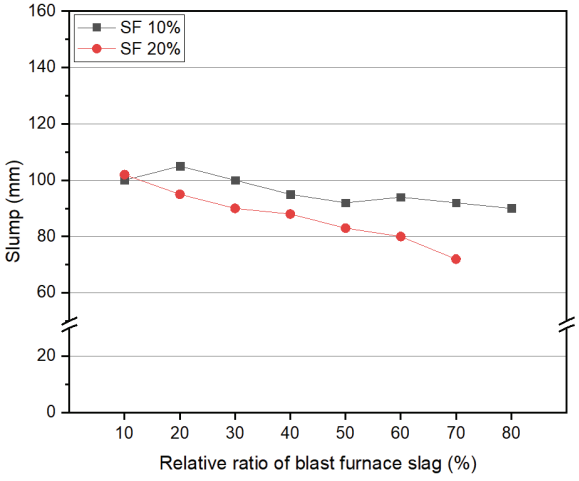

Fig. 3 Slump of ternary binder concrete with the BS replacement ratios

3.1.2 슬럼프별 무기결합재의 구성비율

Fig. 4는 3성분계 무시멘트 콘크리트에서 무기결합재의 혼입비율에 따른 슬럼프의 변화를 각 구간별로 색을 통해 삼각조성도에 나타내었다. 2성분계에서 가장 낮은 슬럼프값인 80mm이하의 구간을 적색구간으로 나타내었다. 또한, 2성분계, 3성분계에서 실리카 흄 30%이상 혼입한 경우는 실험을 진행하지 않아 흰색의 영역으로 나타내었다.

이를 통해, 실리카 흄은 구성비율이 증가함에 따라 슬럼프는 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 고로슬래그 미분말은 구성비율과 관계없이 80mm이상의 슬럼프를 나타내었으며, 실리카 흄 0~20%, 플라이애시 60~100%, 고로슬래그 미분말 0~30%의 범위에서 혼입할 경우 슬럼프는 100mm보다 높은 값을 나타내는 청색구간에 위치해 있는 것을 알 수 있었다.

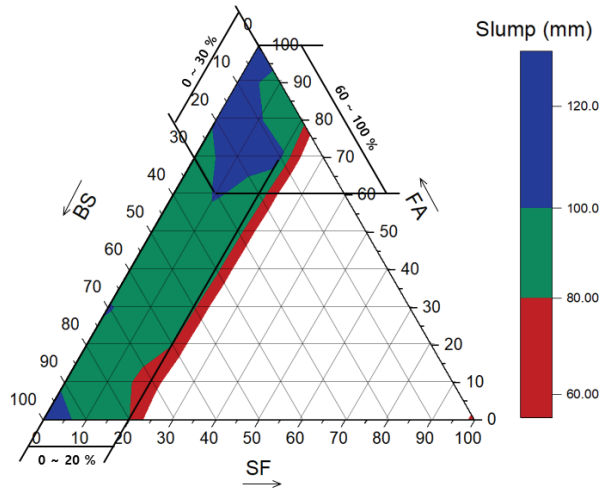

Fig. 4 Ternary diagram of slump

3.2 압축강도

3.2.1 재령에 따른 압축강도

1성분계 무시멘트 콘크리트의 재령별 압축강도 실험결과는 Fig. 5에서 나타내었다. 재령 28일 압축강도는 각각 고로슬래그 미분말 25.7MPa, 실리카 흄 23.1MPa, 플라이애시 15.5MPa로 나타났으며 1성분계 무시멘트 콘크리트의 압축강도 결과를 통해 각 결합재와 알칼리 활성화제의 반응성을 파악할 수 있었다. 실리카 흄을 100% 치환한 경우 재령 3일의 압축강도는 17.4MPa로 1성분계중 가장 높은 압축강도를 나타내었으나 이후 재령 28일까지의 압축강도 증진율이 감소하였다. 이는 실리카 흄의 높은 비표면적으로 인해 급격한 초기 반응 후 반응성이 점차 낮아진 것이라 판단된다. 재령과 관계없이 플라이애시는 낮은 압축강도를 나타내었으며, 이는 플라이애시가 상온에서 다량 혼입될 경우 알칼리 활성화제와 직접적인 반응성이 낮아 강도발현이 저하되는 것으로 판단된

다. 고로슬래그 미분말을 100% 치환한 경우 재령 3일에서의 압축강도는 11.7MPa로 재령 3일의 실리카 흄보다 5.7MPa 낮은 압축강도를 나타내었으나 재령 28일까지의 압축강도 증진율이 증가하였다. 이는 고로슬래그 미분말이 100% 치환된 경우 상온에서 잠재수경성으로 인해 조기재령에서는 강도 증진의 효과가 미비하지만 장기재령에서 더 활발한 반응을 일으켜 강도 증가가 나타난 것으로 판단된다.

실리카 흄이 혼입된 2성분계의 압축강도는 Fig. 6과 같다. Fig. 5에서 고로슬래그 미분말 100%를 치환한 경우, 재령 28일에서 25.7MPa의 압축강도를 나타내었으나 Fig. 6의 실리카 흄과 고로슬래그 미분말을 혼입한 시편의 재령 28일 평균 압축강도는 35MPa로 1성분계 대비 9.3MPa 높은 압축강도를 나타내었다. 이는, 고로슬래그 미분말은 다른 결합재와 혼입될 경우 상온에서 알칼리 활성화제와의 반응성이 높아져 조기재령에서부터 높은 압축강도를 나타내는 것으로 판단된다. 또한, 실리카 흄과 플라이애시를 혼입한 경우 플라이애시의 구성비율이 높을수록 압축강도는 낮게 나타났는데, 이는 상온에서 플라이애시의 Si, Al이온의 용출이 활발하지 않아 이에 따른 반응생성물이 감소로 인해 나타난 결과라 판단된다.

실리카 흄을 10, 20(%) 혼입한 3성분계 무시멘트 콘크리트의 재령 3, 28일 압축강도 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 재령 28일에서 실리카 흄 10%, 플라이애시 40%, 고로슬래그 미분말 50%를 혼입한 경우 압축강도 실험에서 가장 높은 강도인 43.9MPa을 나타내었다. 또한, 실리카 흄 20%, 플라이애시 30%, 고로슬래그 미분말 50%를 혼입한 경우 압축강도는 40.3MPa로, 실리카 흄 10%를 혼입한 경우보다 3.6MPa 낮은 압축강도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

이를 통해 3성분계 무시멘트 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 29.3~43.9MPa로, 모든 시편에서 1성분계의 최대 압축강도인 25.7MPa보다 높게 나타났으며, 고로슬래그 미분말 혼입비율 증가에 따라 압축강도는 증가하였다. 또한, 고로슬래그 미분말을 50% 혼입한 경우 재령 28일에서 40MPa 이상의 강도발현을 확인할 수 있었다. 이는, 고로슬래그 미분말의 혼입비율이 증가할수록 Ca^{2+}함량이 증가하여 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H gel)의 생성이 활발해지며, 재령이 증가함에 따라 고로슬래그 미분말의 수화반응과 중합반응에 의해 플라이애시의 유리질피막이 깨지면서 Si와 Al 성분이 알칼리 활성화제와 중합반응을 하여 강도가 크게 향상된 것으로 판단된다(Ahn, 2017). 그러나 고로슬래그 미분말이 60% 이상 혼입될 시 압축강도는 감소하며, 다량 치환될 경우 균열 및 수축이 발생하여(Kwon, 2013) 고로슬래그 미분말의 적정 혼입비율은 50%인 것으로 판단된다.

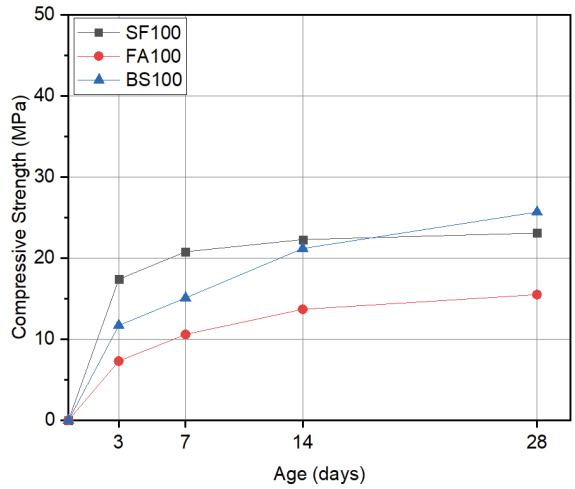

Fig. 5 Compressive strength of unary binder concrete

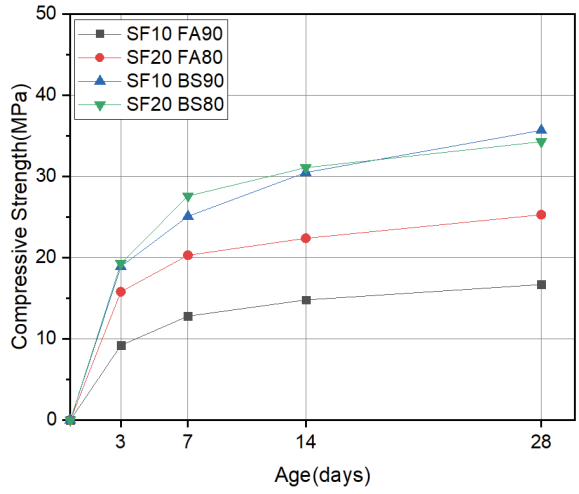

Fig. 6 Compressive strength of binary binder concrete

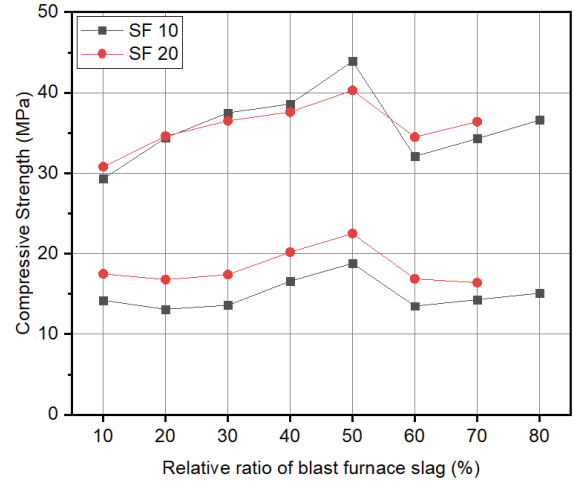

Fig. 7 Compressive strength of ternary binder concrete with the BS replacement ratios

3.2.2 각 성분계에 따른 압축강도

1성분계, 2성분계, 3성분계에서 재령 28일 최대 압축강도를 발현한 시편에 대한 결과는 Fig. 8과 같다. 1성분계에서 고로슬래그 미분말 100%를 혼입한 경우, 재령 28일의 압축강도는 25.7MPa로 1성분계 중 가장 높은 압축강도를 나타냈다. 2성분계의 경우 실리카 흄 10%, 고로슬래그 미분말 90%를 혼입한 경우 재령 28일에서 35.7MPa의 압축강도를 나타냈으며 1성분계의 최대 압축강도 대비 38.9% 증가하였다. 3성분계는 실리카 흄 10%, 플라이애시 40%, 고로슬래그 미분말 50%를 혼입한 경우 재령 28일의 압축강도가 43.9MPa로 가장 높은 압축강도를 나타냈으며 1성분계의 최대 압축강도 대비 70.8% 증가하였다. 이를 통해 상온에서 양생할 경우 1성분계는 한가지 결합재의 다량 혼입으로 인해 반응성이 낮아 각 혼화재의 이온 용출을 촉진시키기 위해서는 고온양생이 필요하다고 판단된다.

또한, 3성분계는 재령 3일까지 2성분계와 비슷한 수준의 압축강도를 나타내었으나 재령 7일 이후 압축강도 발현율이 매우 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

이는, 플라이애시가 40% 혼입됨에 따라 재령 3일의 압축강도는 높게 나타나지 않았으나 고로슬래그 미분말에서 용출되는 Ca^{2+}이온과 플라이애시의 SiO_2 및 Al_2O_3가 반응하게 되어 C-S-H 및 C-A-H가 생성되면서 장기재령의 강도발현에 기여한 것(Kim, 2017)이라 판단된다.

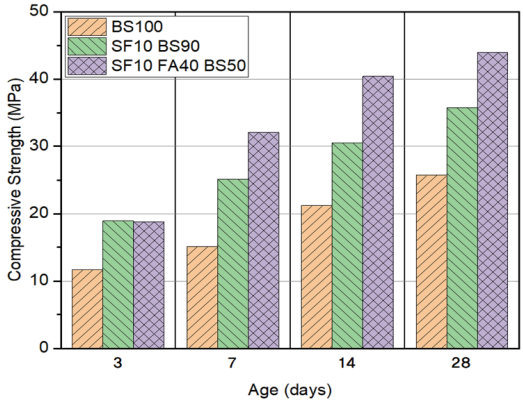

Fig. 8 Maximum compressive strength

Fig. 9는 플라이애시와 고로슬래그 미분말이 혼입된 2성분계에서 실리카 흄을 10% 추가 혼입하였을 경우 압축강도 변화를 나타내고 있다. 플라이애시 50%와 고로슬래그 미분말 50%을 혼입한 2성분계의 재령 28일 압축강도는 24.1MPa로 나타났으며, 실리카 흄을 10% 추가 혼입한 3성분계의 경우 압축강도는 43.9MPa로 2성분계 대비 82.1% 증가하여 강도 증진율이 매우 높은 것을 알 수 있었다. 또한, 모든 시편에서 3성분계가 2성분계에 비해 높은 압축강도를 나타냈으며 이를 통해 실리카 흄의 강도 증진효과를 확인할 수 있었다. 이는 초미립자의 구형인 실리카 흄이 소량 혼입될 경우 실리카 흄의 높은 분말도에 의한 공극 충전효과로(Kim, 2013) 공극 감소에 따른 치밀한 구조를 가진 것이라 판단된다.

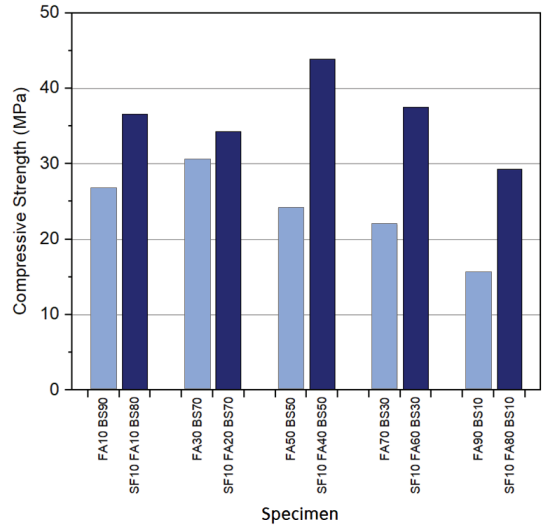

Fig. 9 Compressive strength of binary and ternary binder concrete

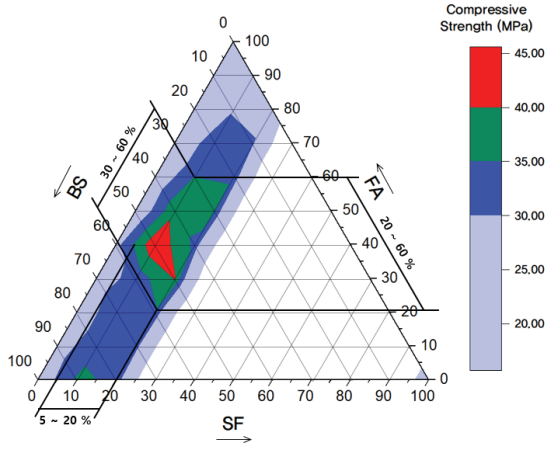

Fig. 10 Ternary diagram of compressive strength

3.2.3 압축강도별 무기결합재의 구성비율

Fig. 10은 무시멘트 콘크리트의 압축강도별 무기결합재의 구성비율을 삼각조성도에 나타낸 것이며 재령 28일에서의 압축강도를 구간별로 나타내었다. 재령 28일의 압축강도가 35MPa 이상인 구간의 범위를 녹색 영역으로 나타내었으며 실리카 흄 5~20%, 플라이애시 20~60%, 고로슬래그 미분말 30~60% 범위에서 배합을 할 경우 재령 28일의 압축강도는

35MPa 이상으로, 2성분계보다 높은 압축강도를 발현할 것이라 판단된다. 또한, 삼각조성도를 통해 각 무기결합재가 적정 비율로 혼입될 경우 높은 압축강도를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 무시멘트 콘크리트 배합시 목표 압축강도에 대한 무기결합재의 적절한 구성비율을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 이산화탄소 배출의 원인이 되는 시멘트를 3가지 무기결합재로 100% 치환한 3성분계 무시멘트 콘크리트의 슬럼프와 압축강도 특성을 알아보았다. 또한, 슬럼프와 압축강도의 수준별 무기결합재의 구성비율 범위를 도출한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 3성분계 무시멘트 콘크리트의 슬럼프는 실리카 흄과 고로슬래그 미분말의 구성비율이 증가할수록 유동성이 감소하였으나 실리카 흄 10%를 혼입한 경우 큰 유동성 감소는 발생하지 않았다.
2) 3성분계 무시멘트 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 고로슬래그 미분말의 혼입율이 50%일 경우 40MPa이상의 고강도를 나타냈으며, 고로슬래그 미분말을 60%이상 혼입할 경우 강도는 저하되었다.
3) 각 성분계의 압축강도를 비교한 결과, 재령 28일에서 2성분계 무시멘트 콘크리트의 최대 압축강도는 1성분계의 최대 압축강도 대비 38.9% 증가하였으나 3성분계의 최대 압축강도는 1성분계 대비 70.8% 증가하여 압축강도 증진율이 매우 높은 것을 알 수 있었다.
4) 삼각조성도를 통해 슬럼프와 압축강도 수준별 적정 구성비율을 조사한 결과, 35MPa 이상의 압축강도는 실리카 흄 5~20%, 플라이애시 20~60%, 고로슬래그 미분말 30~60%의 범위에서 나타났다.

이상의 결과로부터 3성분계 무시멘트 콘크리트는 각 성분계의 비교분석을 통해 상온에서 1, 2 성분계보다 높은 압축강도를 나타낸다는 결론을 얻었으며, 삼각조성도를 통해 압축강도와 슬럼프에 대한 혼입비율을 결정하는 지표로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

또한, 본 연구는 건설현장에 주로 사용되는 3가지 무기결합재를 사용하였기 때문에 실리카 흄을 대체할 수 있는 레드머드와 메타카올린 등을 혼입한 3성분계 무시멘트 콘크리트 배합에 대한 연구의 수행이 필요하며, 다량 치환된 무기결합재의 화학적 특성에 의한 내구성 문제를 검토하기 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Kim, S. H. and Kim, Y. S. (2016), A Study on the Alkali-Silica Reaction of Binary Blended Geopolymer Mortar, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 32(6), 43-46.
2. Kwon, Y. H. (2013), A Study on Fundamental Properties of Alkali-activated Cement free Concrete using Industrial by-product, Dongyang University master's thesis, 45-80.
3. Kim, H. J., and Yang, J. G. (2018), A Study on Early Age Strengths of Geopolymer Mortar with Alkali-Activator Mixing Rate, *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*, 30(1), 569-570.
4. Ryo, G. S., Koh, K. T., Lee, J. H. (2013), Strength Development and Durability of Geopolymer Mortar Using the Combined Fly ash and Blast-Furnace Slag, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 1(1), 35.
5. Lee, S. K. (2014), A Study on the Strength Properties of Binary Blended Geopolymer Concrete with Red-mud, Pusan National University master's thesis, 1-52.
6. Rangan, B. V. (2008), Fly ash-based geopolymer concrete, Curtin University of Technology, 7.
7. Ahn, K. H. (2017), Optimal Mix Proportions and Characteristics of Alkali-Activated Geopolymer Mortar and Concrete Cured in Ordinary Temperature, Inha University doctorate thesis, 48.
8. Kim, J. H.,(2017), A Study on the Effects of Crystalline Change of FA-BFS System Geopolymer Ceramics to Thermal Properties, Kangwon National University dotorate thesis, 16.
9. Kim, T. W.,(2013), Influence of Silica Fume on Strength Properties of Alkali-Activated Slag Mortar, *Journal of Korea Concrete Institute,* 25(3), 308.

Received : 01/20/2020
Revised : 03/16/2020
Accepted : 04/08/2020

요 지 : 상온에서 발생하는 1, 2성분계 무시멘트 콘크리트의 강도저하 문제를 개선하기 위해 시멘트를 실리카 흄, 플라이애시, 고로슬래그 미분말로 치환한 3성분계 무시멘트 콘크리트의 슬럼프와 압축강도 특성을 통해 비교분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 3성분계 무시멘트 콘크리트는 2성분계에 비해 높은 압축강도를 나타냈으며 실리카 흄을 10% 혼입한 경우 슬럼프 감소가 적은 것으로 나타났다. 또한, 삼각조성도를 통해 슬럼프 및 압축강도 수준별 각 무기결합재의 적정 구성비율 범위를 제시하였다.

핵심용어 : 3성분계, 무시멘트, 콘크리트, 실리카 흄, 플라이애시, 고로슬래그 미분말