

고로슬래그 미분말과 알칼리 자극재로서 순환골재를 사용하는 콘크리트의 강도발현 특성

Strength Development of the Concrete Incorporating Blast Furnace Slag and Recycled Aggregate as Alkali Activator

김준호¹ · 한민철² · 한천구^{3*}

Jun-Ho Kim¹ · Min-Cheol Han² · Cheon-Goo Han^{3*}

(Received May 1, 2014 / Revised June 23, 2014 / Accepted June 24, 2014)

The objective of this study is to evaluate the strength development of blast furnace slag concrete in response to the use of recycled aggregate as alkali activator. The influence of the amount of recycled aggregate was evaluated depending on different ratios of replacement for each RFA and RCA to NFA and NCA, respectively. The results indicated that as replacement of RFA and RCA increased, their strength exhibited to be increased. This was due to the fact that the latent hydraulic properties of blast furnace slag was activated by the alkali in recycled aggregates. However, in case of 365-days, it showed lower compressive strength than using NA(natural aggregates) which could be explained as the exhaustively use of alkali containing in RA. The specimens using RA showed about 90% of compressive strength comparing with specimens using NA.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 순환골재, 강도발현 특성

Keywords : Blast furnace slag powder, Recycled aggregate, Strength development

1. 서론

콘크리트는 건설 공사에 사용되는 주된 재료로서, 이중 골재는 콘크리트 전체용적의 70~80%를 차지하는 중요 구성 재료이다. 그런데, 근래에는 콘크리트 구조물의 해체 공사가 매년 증가하는 추세에 따라 순환골재(이하 RA)의 생산이 활발하게 이루어지고 있고 또한, 이러한 RA의 생산량에 발맞추어 학계에서는 RA를 효율적으로 활용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Nam S I, 1995).

그러나, RA를 사용한 콘크리트는 RA생산과정 중에 다량의 이물질, 미립분 등이 함유되고 있어 골재 자체의 품질이 낮고, 균질성 확보도 어려운 실정으로, 일반적인 천연골재(이하 NA)를 사용하는 콘크리트에 비해 압축강도가 약 13% 정도로 낮은 품질을 나타내는

것으로 보고되어(Sim J S, 2006) 아직 실무현장에서의 활용성은 낮은 추세로서, 도로의 보조 기층재, 콘크리트 2차 제품 및 방수층 누름 콘크리트 등의 비구조적인 용도에 주로 사용되고 있는 실정이다(Son S H, 2011).

그런데, 이와 같은 RA를 고로슬래그 미분말(이하 BS) 다량 치환 콘크리트의 알칼리자극을 시키기 위하여 RA표면의 미수화 시멘트를 이용하여 강도를 발현시키는 연구가 진행되고 있다(Han C G, 2011). 또한, BS는 최근 사회적 문제점인 CO₂의 배출량을 저감하기 위한 시멘트의 대체재로서, 거듭된 연구를 통해 품질이 확보되고 안정화되어 실무현장에서는 레드믹스콘크리트의 결합재로 중요하게 자리잡고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 BS치환 콘크리트의 천연 잔골재(NFA)와 천연 굵은골재(NCA)에 대하여 순환 잔골재(RFA)와 순환

* Corresponding author E-mail: cghan@cju.ac.kr

¹청주대학교 대학원, 공학석사 (Master, Dept. of Architectural Engineering, Cheong-ju Univ., Korea)

²청주대학교 건축공학과 부교수, 공학박사 (Associate Professor, Dr. Eng., Dept. of Architectural Engineering, Cheong-ju Univ., Korea)

³청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사 (Professor, Dr. Eng., Dept. of Architectural Engineering, Cheong-ju Univ., Korea)

굵은골재(RCA)의 치환율을 변화시킨 콘크리트 상태에서 강도발현 특성을 분석하므로서 RA의 알칼리지극재 역할을 검토하여 향

후 RA의 효율적인 실용화에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

Table 1. Experimental outline

Factors		Levels	
Mixture	W/B(%)	1	50
	Target slump(mm)	1	120±25
	Target air(%)	1	5.5±1.0
	BS Contents(%)	3	0, 25, 50
	RA* ratio for NA* (%)	9	3
3			RCA*** ratio for NCA*** (0, 50, 100)
Experiment	Fresh concrete	3	Slump Unit volume weight Air contents
	Hardened concrete	1	Compressive strength (3, 7, 28, 365 days)

*RA: Recycled Aggregate, NA : Natural Aggregate
 **RFA: Recycled Fine Aggregate, NFA : Natural Fine Aggregate
 ***RCA: Recycled Coarse Aggregate, NCA : Natural Coarse Aggregate

Table 2. Mixture proportions of Concrete

Series			W/B (%)	W/SP/AE (kg/m ³)	Unit volume weight (kg/m ³)					
BS	RFA	RCA			BS	OPC	NFA	RFA	NCA	RCA
0	0	0	50	170 / 3.6 / 0.072	85	255	764	0	975	0
		50					764	0	487	484
		100					764	0	0	968
	50	0					382	335	975	0
		50					382	335	487	484
		100					382	335	0	968
	100	0					0	670	975	0
		50					0	670	487	484
		100					0	670	0	968
25	0	0	50	170 / 3.6 / 0.072	85	255	762	0	972	0
		50					762	0	486	432
		100					762	0	0	964
	50	0					381	333	972	0
		50					381	333	486	482
		100					381	333	0	964
	100	0					0	667	972	0
		50					0	667	486	482
		100					0	667	0	964
50	0	0	50	170 / 3.6 / 0.072	170	170	759	0	968	0
		50					759	0	480	487
		100					759	0	0	961
	50	0					379	332	968	0
		50					379	332	480	487
		100					379	332	0	961
	100	0					0	668	968	0
		50					0	665	480	487
		100					0	665	0	961

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합표는 Table 2와 같다. 먼저, 실험계획으로 W/B는 50% 한 수준으로 하였고 OPC에 대한 BS치환율은 KSL 5210(고로슬래그 시멘트)의 1종과 2종을 고려하여 0, 25, 50%의 3수준을 치환하는 것으로 하였다. 이때 골재 변수로는 RFA와 RCA를 NFA 및 NCA에 대하여 각각 0, 50, 100%의 3수준씩 복합 치환하는 것으로 9수준을 계획하여 총 27배치를 실험계획 하였다. 이때, BS 0%, RFA 0% 및 RCA 0%인 Plain의 경우 목표 슬럼프는 120±25mm, 목표 공기량 5.5±1.0%의 범위에 만족하도록 단위수량, S/a 및 SP제 및 AE제 사용량을 배합 설계한 후 모든 실험변수에 동일하게 적용하는 것으로 한다.

실험사항으로는 굳지 않은 콘크리트에서 슬럼프, 공기량 및 단위용적질량을, 경화 콘크리트에서 압축강도를 측정하는 것으로 실험계획 하였다.

2.2 사용 재료

본 실험에 사용한 재료는 모두 실무 건설공사에서 활용할 수 있는 일반적인 것을 사용하였다. 먼저 OPC는 국내산 1종 보통포틀

Table 3. Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Soundness (%)	Setting time (min.)		Compressive strength (MPa)		
			Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	3 390	0.05	230	345	24.8	39.3	56.9

Table 4. Physical and chemical properties of BS

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L.O.I (%)	Moisture content (%)	Chemical composition (%)				
				MgO	SO ₃	Cl	SiO ₂	CaO
2.90	4 254	1.91	0.23	5.26	1.95	0.002	34.20	42.50

Table 5. Physical properties of fine aggregates

Series	Density (g/cm ³)	Fineness modulus	Absorption ratio of aggregate (%)	Passing 0.08mm sieve size(%)	pH
NFA	2.59	2.86	2.63	2.87	-
RFA	2.20	2.76	6.20	2.40	11.5

랜드 시멘트를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다. BS는 시중에 유통되는 KS F 2563의 3종으로 그 물리·화학적 성질은 Table 4와 같다. 골재는 천연 잔·굵은골재 및 순환 잔·굵은골재로서 그 물리적 성질은 Table 5, 6과 같다.

혼화제로서 SP제 및 AE제는 D사의 제품을 사용하였고, 물은

상수도를 이용하였다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 먼저, 콘크리트의 혼합은 Fig. 1과 같은 순서와 시간으로 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 진행하였다. 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 단위용적질량·공기량은 KS F 2402, 2409에 의거 실시하였고, 경화콘크리트의 압축강도는 KS F 2403에 의거 $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$ 의 원주형 공시체를 제작하여, $20 \pm 2^\circ \text{C}$ 의 수중에서 양생시킨 후 소요재령별에서 KS F 2405 규정에 의거하여 3 000 KN UTM을 사용하여 압축강도를 측정하였다.

Table 6. Physical properties of coarse aggregates

Series	Density (g/cm ³)	Fineness modulus	Absorption ratio of aggregate (%)	Unit volume weight (kg/m ³)
NCA	2.68	6.55	0.95	1 546
RCA	2.53	7.03	2.72	1 446

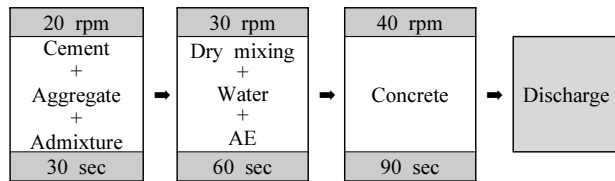


Fig. 1. Mixing of concrete

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험 결과

본 연구의 실험결과로서 Table 7은 굳지 않은 콘크리트 상태의 슬럼프, 공기량 및 단위용적질량과 경화콘크리트의 압축강도 측정 결과를 나타낸 것이며, 이하에는 이와 같은 실험결과를 토대로 각

Table 7. Test Results of concrete

Series	BS	RFA	RCA	Slump(mm)	Air content(%)	Unit volume weight(kg/m ³)	Compressive strength (MPa)			
							3 days	7 days	28 days	365 days
0	0		0	130	6.5	2 323	20.0	26.2	35.2	40.4
			50	125	6.0	2 305	21.5	26.6	37.4	39.7
			100	120	5.8	2 288	21.5	29.5	38.4	39.3
	50		0	125	6.0	2 308	20.7	28.8	36.4	37.0
			50	120	5.5	2 303	21.5	29.4	38.9	43.2
			100	115	5.3	2 263	22.4	29.6	39.5	39.2
	100		0	120	5.5	2 306	22.3	29.8	37.1	37.8
			50	110	5.1	2 300	22.6	31.8	38.4	39.0
			100	100	4.9	2 260	23.9	32.1	39.6	40.0
25	0		0	155	6.2	2 330	13.7	22.6	33.3	41.3
			50	145	5.8	2 322	13.7	22.7	34.1	47.4
			100	135	5.7	2 290	15.7	23.2	35.8	46.3
	50		0	140	5.7	2 328	14.6	22.7	33.5	39.5
			50	135	5.3	2 321	15.0	22.8	34.7	45.6
			100	130	5.2	2 291	16.0	25.9	35.9	45.8
	100		0	135	5.0	2 329	14.6	23.4	33.8	41.6
			50	130	4.9	2 313	16.6	24.9	34.7	41.7
			100	130	4.6	2 261	18.0	25.9	36.1	42.1
50	0		0	170	6.0	2 350	10.7	20.2	30.6	53.6
			50	167	5.8	2 325	10.8	21.5	34.4	52.9
			100	165	5.3	2 299	11.7	22.9	35.7	54.6
	50		0	163	5.3	2 350	11.4	20.5	30.7	47.6
			50	161	4.9	2 322	11.5	21.6	35.9	45.9
			100	160	4.5	2 295	11.7	23.5	33.7	46.3
	100		0	150	4.5	2 344	11.4	20.8	31.5	42.6
			50	147	4.2	2 314	11.8	22.5	35.8	40.6
			100	145	3.9	2 268	12.5	24.8	35.8	44.7

종특성을 분석하고자 한다.

3.2 굳지 않은 콘크리트의 특성

Fig. 2~4는 RFA 및 RCA의 치환율 변화에 따른 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량 및 단위용적질량의 측정결과를 나타낸 것이다.

먼저, 슬럼프에서는 RFA 및 RCA의 치환율이 증가할수록 저하하는 경향을 나타내었는데, 이는 RFA 및 RCA의 높은 흡수율에 의한 배합수 소모에 기인한 것 및 RA의 경우 건식 방법으로 제조하게 되는데, RA의 입형불량 및 표면에 약간의 미립분을 함유하고 있어 유동성에 어느 정도 영향을 미친 것으로 사료된다.

또한, RFA 및 RCA의 치환율과는 관계없이 모든 배합에서 BS의 치환율이 증가함에 따라 슬럼프는 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 유리질 표면을 갖는 BS량이 증가함에 기인한 것으로 판단된다.

공기량의 경우는 목표범위인 5.5±1.0% 범위에 모두 만족하였으나, BS 치환율이 증가할수록 저하하고, RFA 및 RCA 치환율이 증가함에 따라 공기량이 다소 저하하는 경향을 보였다. 특히 RFA 및 RCA를 100% 치환한 경우에 낮은 공기량이 분포한 것은 전술한 바와 같이 미립분량의 공극충전 결과로 판단되며, 단위용적질량은 RFA 및 RCA의 치환율이 증가함에 따라 작아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 공기량의 영향과 RFA 및 RCA의 밀도가 크게 영향을

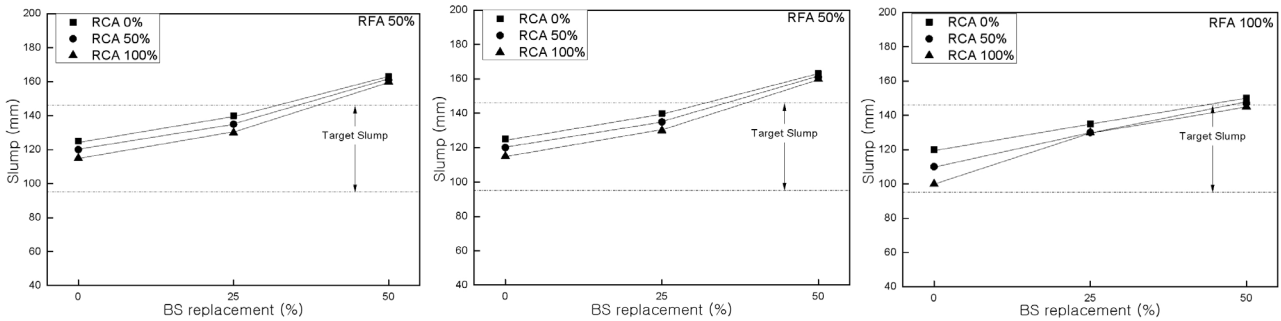


Fig. 2. Slump according to BS replacement

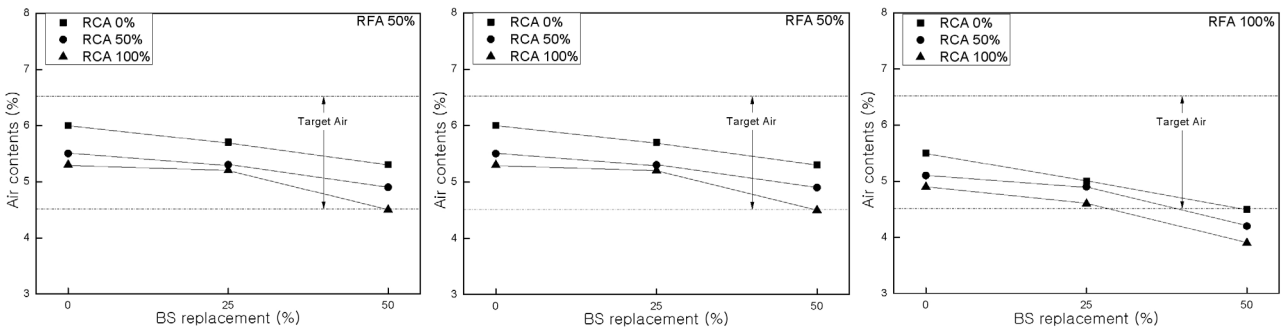


Fig. 3. Air content according to BS replacement

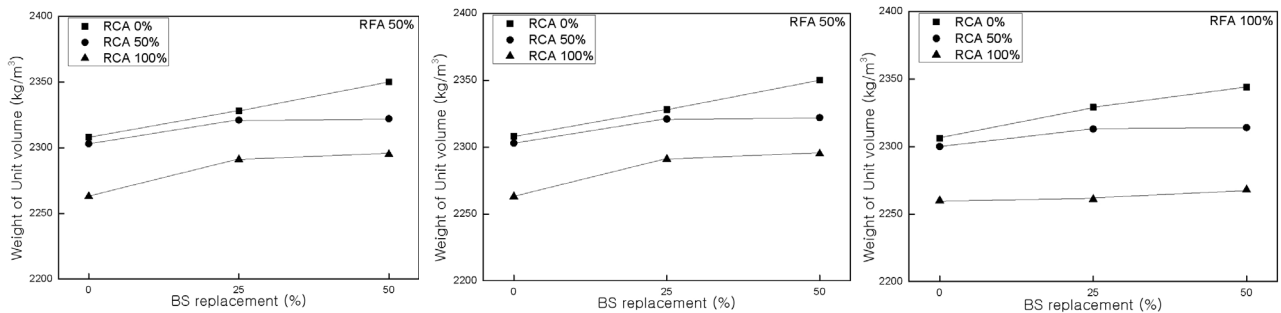


Fig. 4. Weight of unit volume according to BS replacement

미쳐 나타난 결과로 분석된다. 단, 밀도가 작은 BS의 치환율이 증가할수록 단위용적질량이 증가하는 경향으로 나타났는데, 이는 공기량 감소에 기인한 것으로 사료된다.

3.3 경화 콘크리트의 실험결과

Fig. 5~7은 RFA·RCA 치환율별 BS 치환율 변화에 따른 재령

별 압축강도를 나타낸 것이다. 전반적으로 초기재령에서는 BS의 치환율이 증가할수록 OPC만을 사용한 Plain에 비해서 7~10MPa 정도 낮은 값을 나타내었지만, 재령 28일에서는 상당부분 근사한 값을 나타내었고, 1년인 재령 365일에서는 BS의 잠재수경성 반응에 의해 강도역전현상이 일어나 Plain보다 최대 15MPa 큰 값을 나타내었다.

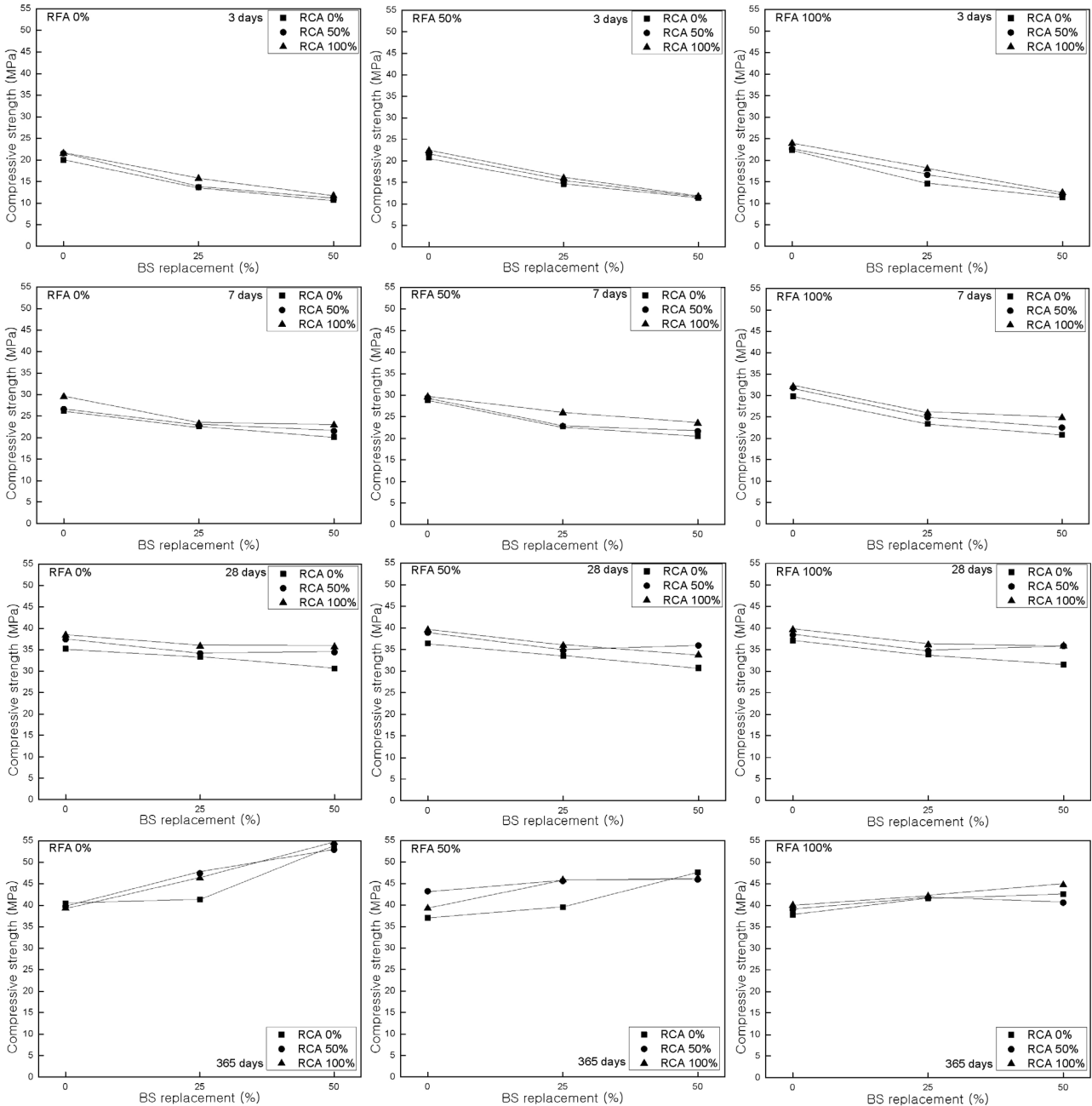


Fig. 5. Compressive strength according to BS replacement with RFA 0%

Fig. 6. Compressive strength according to BS replacement with RFA 50%

Fig. 7. Compressive strength according to BS replacement with RFA 100%

또한, 재령 28일에서 OPC와 NFA 및 NCA만을 사용한 Plain이 35MPa를 나타내었는데 RFA의 치환율이 증가할수록 미미하지만 1~2MPa 높게 나타나는 것을 확인하였다. 이와 같은 경향은 RCA의 치환율 변화에서도 유사하였는데, 이는 BS를 사용하지 않는 경우 10% 이상강도가 저하하는 경향과 반대 경향으로서 이와 같은 강도증진현상은 전술한 바와 같이 슬럼프 저하에 따른 실제적 결합재 입자와 물간의 W/B가 감소된 것 및 공기량감소에 따른 강도증진의 복합작용에 기인한 결과로 판단된다. 즉, 동일슬럼프 및 공기량 조건인 경우라면 압축강도는 감소하게 될 것으로 추측된다.

Fig. 8은 OPC와 NFA 및 NCA만을 사용한 Plain배합을 100%로 하고 각각의 재령별 강도비율을 백분율로 나타낸 것이다. 먼저,

BS 치환율 0% 즉, OPC만을 사용한 경우 초기재령인 3일부터 28일까지는 RCA 치환율이 증가할수록 강도 또한 Plain보다 높게 나오는 것을 확인할 수 있었는데, 그 차이는 최대 20% 까지 높은 비율을 나타내기도 하였다. 따라서, RA의 치환이 초기강도 발현에 미치는 영향은 매우 우수한 것으로 판단된다.

그러나, 후기강도인 재령 365일에서는 Plain에 비해 약 90%만을 나타내어 비교적 낮은 값을 나타내긴 하였지만 실제 강도 값은 40MPa 전후로 양호한 것으로 판단된다.

또한, BS를 25% 치환시킨 경우 초기의 강도가 Plain인에 비해 현저히 낮은 값을 나타내었지만, RFA 및 RCA의 치환율이 증가함에 따라 비례적으로 강도가 높아지는 경향을 나타내었으며, RFA를 100% 치환한 경우에는 3일 재령을 제외한 모든 재령에서 Plain

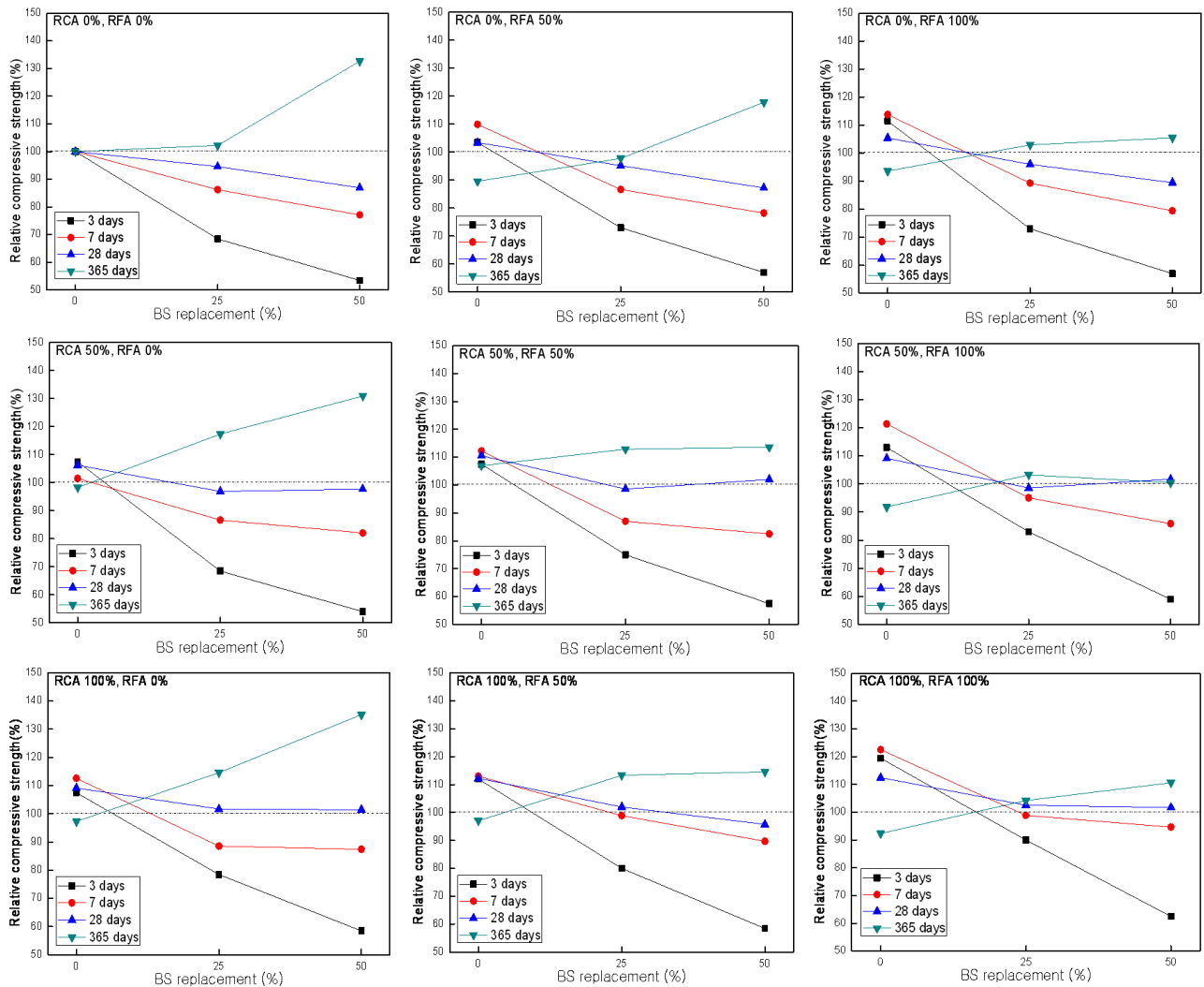


Fig 8. Relative compressive strength according to RFA and RCA replacement

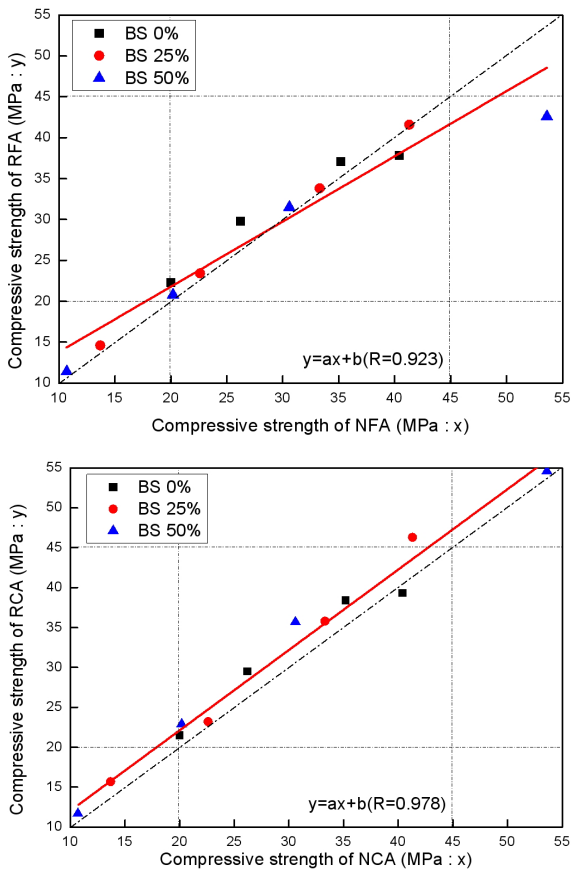


Fig 9. Relationship between compressive strength according to RFA and RCA replacement

의 90% 내외의 값을 나타냄으로서 Plain에 근접한 강도 발현율을 나타내었다. 특히, 365일 강도는 Plain인 보다 높은 강도가 발현되었으며, 크게는 약 17% 높은 강도 비율을 나타냈다.

BS 50%를 치환한 경우 BS의 높은 치환량에 의해서 초기에는 낮은 강도 영역에 머물렀으나, RA에 의한 강도증진 효과를 확인할 수 있었고, 28일 재령에서는 Plain과 유사한 정도의 값을 나타내었으며, 365일 강도에서는 여타의 다른 배합에 비해서 높게 나타났다. 단, 재령 365일에서는 RFA의 치환율이 증가할수록 Plain보다 확연하게 낮은 강도 값을 나타내었는데, 그 감소폭은 10~20%로 확인되었다. 이는 BS의 다량 치환한 배합에 RFA에 의해 작용하였던 알칼리가 1년에 걸친 양생에서 전부 소비되고, 기존 선행연구에서 나타난 RA의 낮은 품질 특성이 발현됨에 기인한 것으로 판단된다(Sim J S,2006).

Fig. 9는 BS 치환율별 RFA·RCA의 단독 치환율간 압축강도 상관관계를 나타낸 것이다. 먼저 RFA치환의 영향으로는 낮은 강도인 초기재령에서는 RFA가 NFA 보다 큰 압축강도를 발휘하는 것

으로 나타났으나, 후기재령으로 갈수록 NFA의 영향이 큰 것으로 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 1년에 걸친 수화반응에 RFA의 알칼리소비 및 저품질골재 영향에 따른 것으로 판단된다. 또한, RCA의 경우는 재령 및 BS의 치환율과 관계없이 RCA의 알칼리 및 양호한 골재품질에 기인하여 NCA보다 큰 강도를 나타내었다.

4. 결론

본 연구는 고로슬래그 미분말을 0, 25 및 50%를 치환한 콘크리트에 순환골재를 잔골재와 굵은골재로 구분하여 0, 50, 100%로 혼합사용할 때 콘크리트의 기초적 특성 및 초기 와 후기 강도발현 특성을 분석하여 순환골재의 알칼리자극재로서의 역할을 확인하고, 순환골재의 실용화에 기여하고자 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 굳지 않은 콘크리트 특성으로 슬럼프, 공기량 및 단위용적질량은 순환골재의 미립분 및 높은 흡수율에 기인하여 치환율이 증가할수록 저하하는 경향을 나타내었다.
2. 압축강도에서는 순환골재의 치환율에 따라 미미하지만 강도증진에 영향을 미치는 것으로 나타내었는데, 이는 순환골재의 표면의 미수화시멘트 입자들에 의해 알칼리자극이 이루어진 것으로 분석된다.
3. 재령 365일의 후기강도에서는 순환 잔골재의 치환율이 증가할수록 강도가 다소 낮아지는 것으로 나타났으나, 그 저하치는 천연골재만을 사용한 Plain배합의 90%에 달하는 값이지만 그 강도값은 40MPa전후로 비교적 양호하게 나타났다. 또한, 순환 잔골재에 의한 강도저하는 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 잠재수경성 반응에 의해 대부분의 배합에서 Plain보다 높은 강도를 나타내어 우려할 수준은 아닌 것으로 판단된다.

이상을 종합하면 고로슬래그 미분말 콘크리트에 순환골재를 치환하여 사용할 경우 그 효과는 고로슬래그 미분말의 치환율이 높을수록 강도발현 기여도가 큰 것으로 나타났는데, 기존의 연구와 동일한 경향으로 순환골재에 의해 강도가 다소 낮아지는 것으로 나타났으나, 그 비율은 약 10% 전후로 크지 않은 것으로 판단되며, 고로슬래그 미분말의 치환으로 보완 할 수 있을 것으로 분석되었다.

References

Han, C.G., Son, S.H., Park, K.T. (2011). Effect of Recycled

- Aggregates Powder on the Properties of Zero Cement Mortar Using the Recycled Fine Aggregates and Fly-Ash, Architectural Institute of Korea, **27(6)**, 99-106.
- Han, M.C., Lee, H.J., Han, C.G. (2013). Effect of Fine Particle Cement and Recycled Aggregates as Alkali Activator on the Engineering Properties and Micro-Structure of High Volume Blast Furnace Slag Concrete, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **13(6)**, 602-608.
- Lee, D.H.(2004). Problem and Countermeasure of Recycled Aggregates for Concrete, Korean national housing corporation, Housing and Urban, **83**, 29-35.
- Nam, S.I., (1995). A Study on the Engineering Properties of Resysled Aggregate Concrete, Ph.D thesis, Chungnam National University, Korea.
- Sim, J.S., Park, C.W., Park, S.J., Kim, Y.J. (2006). Characterization of Compressive Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete with Respect to Replacement Ratios, Korean Society of Civil Engineers, **26(1)**, 213-218.
- Son, S.H., (2011). Development of Zero-Cement Mortar Using Reactivity of Recycled Fine Aggregates and Mineral Admixtures, Ph.D thesis, Chongju University, Korea.
- Yang, K.H., Song, J.K., Lee, K.S., and Ashour, A. F.(2009) Flow and Compressive Strength of Alkali-Activated Mortars, ACI Material Journal, **106(1)**, 50-58.

고로슬래그 미분말과 알칼리 자극재로서 순환골재를 사용하는 콘크리트의 강도발현 특성

본 연구에서는 자원순환형으로 재활용되는 순환골재(RA)를 고로슬래그 미분말(BS) 콘크리트에 치환하여 강도발현특성을 확인하므로 RA의 실용화에 기여하고자하는 연구이다. 즉, BS치환 콘크리트에 RA를 순환잔골재(RFA) · 순환굵은골재(RCA)로 나누어 천연잔골재(NFA) · 천연굵은골재(NCA)에 치환율을 실험변수로 하여 실시하였다. 실험결과 RFA · RCA의 치환율이 증가함에 따라 강도가 증가하는 것을 확인하였는데, 이는 RA의 미수화 시멘트에 의한 알칼리자극재(Alkali Activation) 역할을 하여 BS의 불투수성 피막을 파괴하여 잠재수경성 반응을 촉진시킨 것으로 판단된다. 그러나, 재령 365일에서는 RA의 알칼리가 거의 소비되어 효과를 발휘하지 못하고, 또한 RA의 낮은 품질특성에 기인하여 강도가 다소 저하하나, 천연골재(NA)만을 사용한 시험체에 비해 약 90 % 전후의 강도를 나타내어 다소 양호한 값이며, BS의 치환할 경우 오히려 NA 시험체보다 높은 강도를 나타내어 우려할 사항은 아닌 것으로 분석되었다.