

건식 응벽 블록의 시멘트 혼입량 감소를 위한 혼화제 개발

이원홍¹, 오홍섭¹, 이승열¹, 강욱중², 정재홍³, 장낙섭^{1*}
¹경상국립대학교 건설시스템공학과, ²엔바이로테크 총괄본부, ³(주)디와이산업

Development of admixtures and mixing design to reduce cement mixing ratio for retaining wall blocks

Won-Hong Lee¹, Hong-Seob Oh¹, Seuong-Yeol Lee¹, Wook-Jung Kang²,
Jae-Hong Jung³, Nag-Seop Jang^{1*}

¹Department of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University
²Head-Office, Enviro-Tech
³DY Int. Ltd

요약 본 연구에서는 건식 응벽 블록에 배합되는 시멘트량을 일정 비율로 감소시키더라도 건식 응벽 블록 콘크리트의 조기강도 및 설계강도를 발휘할 수 있는 혼화제를 개발하였다. 혼화제의 설계 및 검증을 위해 건식 응벽 블록 콘크리트와 건식 응벽 블록에 혼입하고 파괴 및 비파괴 압축강도 시험법을 통해 추정강도를 평가하였다. 기존 잔골재인 석분을 페로니켈 슬래그 52%로 치환하였으며, 혼화제 혼입량에 따라 잔골재 대비 시멘트를 5~15% 감소한 콘크리트에 대하여 실험하였다. 개발 혼화제를 사용한 콘크리트는 시멘트 혼입량을 줄였으나, 기존 폴리카본산 혼화제를 사용한 콘크리트보다 재령 7일 압축강도는 오히려 증가하여 조기강도 발현에 적합한 것으로 평가되었다. 개발 응벽 블록은 페로니켈 슬래그의 잔골재 치환율을 52%로 고정하고 개발 혼화제를 혼입함으로써 시멘트를 10% 감소한 배합설계로 건식 공정을 통한 응벽 블록에 대하여 파괴 및 비파괴 압축강도 시험법을 통해 압축강도를 평가한 결과, 시멘트량을 감소시키더라도 제품의 압축강도 성능을 유지할 수 있을 것으로 확인되었다.

Abstract The admixture was developed to improve short and long age strength of concrete by replacing ferronickel slag, solid waste produced in the industrial ferronickel alloys smelting process, with fine aggregate. It was mixed into concrete and the estimated strength was evaluated through compressive strength and rebound hardness tests of retaining wall blocks. The fine aggregate replacement rate of ferronickel slag was fixed at 52%, and tests were conducted on concrete with 5 ~ 15% reduction in cement compared to fine aggregate depending on the amount of admixture mixed. In concrete using the developed admixture, the amount of cement mixed was reduced, but the compressive strength at 7 days actually increased. Therefore, it was evaluated as suitable for developing early strength. The developed retaining wall block was designed with a mix design that reduced cement by 10% by fixing the fine aggregate replacement rate of ferronickel slag at 52% and mixing the developed admixture. The compressive strength of the retaining wall block through the dry process was evaluated through the rebound hardness test method, and it was confirmed that the compressive strength performance of the product could be maintained even if the amount of cement was reduced.

Keywords : Ferronickel Slag, Admixture, Compressive Strength, Retaining Wall Block, Aggregate Replacement

본 논문은 경상국립대학교 연구지원사업에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Nag-Seop Jang(Gyeongsang National Univ.)

email: bonitosubi@gmail.com

Received November 23, 2023

Revised December 20, 2023

Accepted January 5, 2024

Published January 31, 2024

1. 서론

콘크리트는 뛰어난 압축강도, 작업성, 내구성, 경제성 등 공학적인 장점을 가지고 있어 과거부터 전 세계에서 가장 많이 사용되고 있는 건설재료 중 하나이다[1]. 연간 전 세계적으로는 약 250억 톤이 사용되는 것으로 추정되고 있으며[2], 콘크리트 생산에서 필수적으로 사용되는 시멘트는 제조과정에서 많은 에너지를 소비하고 다량의 이산화탄소를 배출하는 것으로 알려져 있다[3]. 전 세계에서 시멘트 생산시 발생하는 이산화탄소 배출량은 7%를 차지하며[4], 콘크리트 제조 및 타설 공정까지 포함할 경우에는 약 10% 수준에 이르는 것으로 보고 되고 있다[5]. 따라서, 산업부산물을 시멘트의 일부로 치환하여 사용하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 대표적인 산업부산물로는 플라이 애쉬(Fly ash, FA), 고로슬래그(Ground granulated blast furnace slag, GGBS) 등이 있다[6].

페로니켈 슬래그(Ferro-nickel slag, FNS)는 스테인리스강과 니켈 합금을 전기로에서 1500~1600°C 온도로 녹이고 부산물을 물이나 공기 중에서 냉각시키는 제조 과정에서 배출되는 산업부산물이다[7,8]. 페로니켈 슬래그는 원료와 제조기술에 따라 괴재 페로니 슬래그와 수쇄 페로니켈 슬래그로 구분되며, 1톤의 페로니켈을 생산하면 약 14톤의 페로니켈 슬래그가 배출된다[9]. 수쇄 페로니켈 슬래그는 용융된 슬래그에 물을 살포하여 콘크리트 및 아스팔트 잔골재, 케이슨 채움재 등으로 활용할 수 있다. 괴재 페로니켈 슬래그는 자연 공기 냉각 방식에 의해 생산되며, 주로 성토재, 노반재 등에 사용된다. 페로니켈 슬래그를 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 연구가 수행되고 있다[10-13]. Saha et al.(2016)은 페로니켈 슬래그를 잔골재 치환율에 따라 변수를 달리하여 압축강도, 할렬인장강도 등의 시험을 수행하였으며, 잔골재의 40%를 페로니켈 슬래그로 대체하면 콘크리트에서 더 많은 겔 생성물이 생성되어 미세구조가 개선된다고 보고하였다[14]. Chen et al.(2020)은 페로니켈 슬래그 혼입 콘크리트에 대한 압축강도 및 염소이온침투저항성을 평가하였으며, 페로니켈 슬래그를 혼입하면 염소이온에 대한 콘크리트의 저항성이 증진되고 염소이온으로 인한 철근부식이 지연된다고 평가하였다[15]. 다만, 페로니켈 슬래그를 잔골재로 대체에 따른 초기압축강도 및 팽창반응으로 인한 안정성에 대한 문제가 보고되고 있다[16,17]. 따라서 화학적인 안정성을 확보하기 위해 고로슬래그, 혼화제 등을 사용하여 알칼리 활성화가 필요하

다고 하였다[18,19].

페로니켈 슬래그 혼입 콘크리트의 작업성, 강도, 염화물 및 황산염에 대한 저항성 등을 향상시키기 위해 사용 목적에 맞는 다양한 혼화제를 사용하고 있다.

콘크리트용 화학혼화제는 유동성 향상, 공기량 확보, 강도발현 및 내구성 증대 등 다양한 특성을 부여하여 콘크리트의 품질을 향상시키기 위한 목적으로 사용하기 시작하였다[20]. 1930년대 개발된 1세대 혼화제인 리그닌(Ligin)계 혼화제는 제조가 쉽고 가격이 저렴하나, 고강도 콘크리트의 제조에서는 사용하기 어렵다. 2세대 혼화제는 나프탈렌(Naphthalene)계와 멜라민(Melamine)계가 있으며, 분산성이 우수하여 고강도, 고유동 콘크리트 제조시 사용되나 슬럼프 손실이 크다는 단점이 있다. 2000년도에 개발된 폴리카본산(Polycarbonic)계 혼화제는 3세대 혼화제로 구분할 수 있으며, 기존의 혼화제의 단점을 개선하여 재료 분리성, 건조수축, 슬럼프 손실 등이 낮고 분산성이 높아 고강도, 고유동 콘크리트 제조에 사용된다[21].

본 연구에서는 산업부산물인 페로니켈 슬래그를 잔골재로 치환하고 건식 옹벽 블록에 배합되는 시멘트량을 일정 비율로 감소시키더라도 초기강도 및 설계강도를 발현할 수 있는 혼화제를 개발하였으며, 페로니켈 슬래그의 잔골재 치환율은 52%로 고정하고 혼화제의 혼입량에 따라 잔골재 대비 시멘트를 5~15% 감소한 콘크리트 압축강도와 옹벽 블록에 대한 성능평가를 수행하였다.

2. 실험 개요

2.1 콘크리트 배합 및 시편 준비방법

본 연구에서는 페로니켈 슬래그와 개발 혼화제를 혼입한 콘크리트 강도를 평가하기 위해 기본 배합설계를 Table 1과 같이 나타내었다. 사용된 굵은 골재(G)의 최대치수는 13mm이며, 시멘트(C)는 고로슬래그 시멘트 2종을 사용하였다. 시험체 제작에 사용된 잔골재는 페로니켈 슬래그(S1)와 석분(S2)으로 구분하여 사용하였다.

일반적으로 콘크리트 배합설계에서 압축강도는 통상 KS F 2405(콘크리트의 압축 강도 시험방법)에 따라 평가하고 있으나, 본 연구에서는 개발 혼화제를 적용한 옹벽 블록의 압축강도 시험편과의 비교를 위하여 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 따라 시험체를 제작하여 압축강도를 평가하였다. 시험체는 50×50×50mm 입방형 몰드를 사용하여 온도 22℃,

습도 60% 환경에서 3일간 양생한 후 탈형하였다. 탈형 이후 시험체를 수중양생을 실시하였으며, 재령 7일에서 압축강도를 측정하였다.

Table 1. Basic Mix proportions of Plain concrete

Specimens	W/C (%)	G (kg/m ³)	S1 (kg/m ³)	S2 (kg/m ³)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S.P (kg/m ³)
Plain	28.6	717	567	508	359	103	3.6

2.2 사용재료

2.2.1 페로니켈 슬래그

본 연구에서 사용된 페로니켈 슬래그는 국내 T사에서 생산되었으며, KS F 2527(콘크리트용 골재)을 만족하는 제품으로 체 통과량 질량 백분율은 Table 2와 같다. 페로니켈 슬래그의 화학적 성질은 Table 3에 나타난 바와 같이 규소, 마그네슘 성분을 다량 함유하고 있으며, 높은 화학적 안정성과 알칼리실리카 반응이 없어 콘크리트의 노화나 강재 부식에 영향이 낮다. 다양한 종류의 화학성분을 함유하고 있음에도 불구하고 안정화된 재료로써 중금속 용출시험 결과는 Table 4와 같이 중금속 성분이 검출되지 않았다.

Table 2. Particle Passing Mass Percentage of FNS

10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15

Table 4. Heavy Metal Leaching Test Results of FNS

Type	Cd (mg/l)	Hg (mg/l)	Cr6 (mg/l)	Pb (mg/l)	As (mg/l)	CN (mg/l)
Standard	0.3 or less	0.005 or less	0.15 or less	3.0 or less	1.5 or less	1.0 or less
Result	Non-detectable					

Table 3. Chemical properties of FNS

Type	SiO ₂	MgO	FeO ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	CaO	Na ₂ O	ZrO ₂	NiO	K ₂ O	ZnO	SO ₃
FNS	40.10	27.90	25.10	2.44	2.04	0.88	0.76	0.32	0.18	0.14	0.12	0.08	0.05

Table 5. KS standards and test results of mineral filler

Type	absolute dry condition (g/cm ³)	absorption ratio (%)	soundness test (%)	solid volume percentage (%)	0.08mm passing ratio (%)
KS standards	2.5 or more	3.0 or less	10.0 or less	53.0 or more	7.0 or less
Test result	2.59	1.55	3.2	56.0	6.5

2.2.2 석분

석분은 국내 D사에서 생산한 석분을 사용하였으며, Table 5에 나타난 바와 같이 KS F 2527(콘크리트용 골재)에서 제시하는 기준을 만족하였다. 석분의 입도분석은 Fig. 1과 같다.

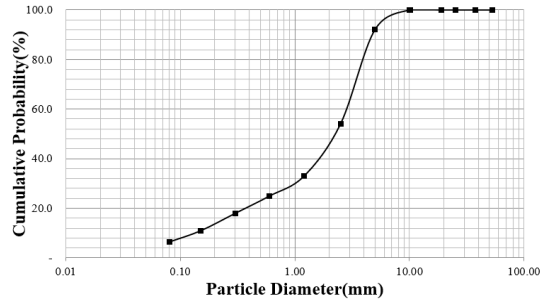


Fig. 1. Particle size distribution curve of mineral filler

2.2.3 콘크리트 혼화제 개발

본 연구에서 개발하고자 하는 혼화제의 제작과정을 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 1차 생성물은 초산칼슘, 산화규소, 메탈실리콘, 수산화나트륨 및 증류수를 적정 비율에 맞게 70°C~100°C 온도에서 8시간 동안 고속 교반기로 교반하여 칼슘아세테이트와 산화규산칼슘이 함유된 화합물을 생성한다. 다음으로 2차 생성물은 초산알루미늄, 수산화나트륨 및 증류수를 각 3:2:5 비율로 조성하여 70°C~100°C 온도에서 5시간 동안 고속 교반기로 교반하여 나트륨알루미늄에이트가 함유된 화합물을 생성한다. 3차 생성물은 폴리카본산 혼화제를 주재료로 하여 무기경화제, 유지제, 감수제, 소포제 및 증류수를 혼입 후 20±2°C 온도에서 1시간 동안 교반을 실시한다.

최종 개발 혼화제는 1, 2, 3차 생성물을 각 1:1:8 비율로 조성하여 20±2°C 온도에서 1시간 동안 고속 교반기로 교반하여 제조한다. 각 해당 단계에서 제조된 생성

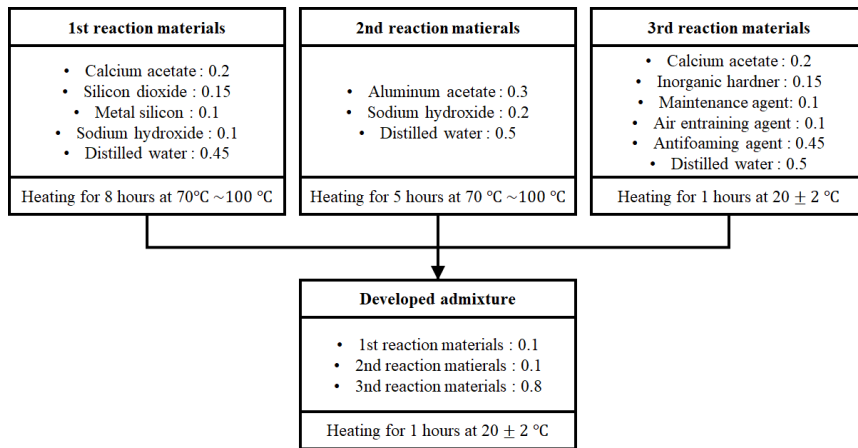


Fig. 2. Developed admixture manufacturing process

물질 및 최종 개발 혼화제는 Fig. 3, Fig. 4와 같다. 개발 혼화제에 대한 성능평가를 수행하기 위하여 KS F 2560 (콘크리트용 화학혼화제)에 따라 품질 시험을 실시하였으며, 시험 결과는 Table 6에 나타내었다.



Fig. 3. Admixture used in the experiment(left : 1st reaction materials, middle : 2nd reaction materials, right : 3rd reaction materials)



Fig. 4. Developed admixture used in the experiment

Table 6. Test Results of Development Admixture (KS F 2560)

Type		KS standards	Test result
Absorption Ratio(%)		10 or more	16.4
Bleeding Percentage Ratio(%)		70 or less	43
Difference in Setting Time(min)	initial set	-60 ~ +90	+41
	final set	-60 + 90	+37
Compression Strength Ratio (%)	Curing for 3 Days	115 or more	134
	Curing for 7 Days	100 or more	122
	Curing for 28 Days	100 or more	120
Length Change Ratio(%)		120 or less	100
Resistance to Freeze-Thaw(%)		80 or more	89

3. 실험결과 및 분석

3.1 개발 혼화제 및 페로니켈 슬래그를 활용한 콘크리트 7일 압축강도 시험

페로니켈 슬래그를 사용한 콘크리트에 첨가되는 기준 및 개발 혼화제 압축강도 평가를 위한 목표 압축강도 30MPa인 배합설계는 Table 7에 나타내었다. 변수명 N은 기준 폴리카본산계 혼화제가 혼입된 콘크리트 시험체를 의미하며, P는 개발 혼화제를 혼입한 콘크리트 시험체를 나타낸다. 콘크리트 배합에서 페로니켈 슬래그의 잔골재 치환율은 52%로 고정하였으며, 시험 변수는 혼화제의 혼입량에 따라 잔골재 대비 시멘트를 5%, 10%, 15% 감소하고 기준 혼화제 및 개발 혼화제 혼입 여부로 변수를 두었다. 콘크리트 압축강도 시험체는 골재와 건비빔을 1분 정도 진행하며, 물과 개발 혼화제를 미리 교

Table 7. Mix proportions of concrete

Specimens	W/C (%)	Coarse aggregate (kg/m ³)	Fine aggregate1 (Ferronickel slag) (kg/m ³)	Fine aggregate2 (mineral filler) (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Polycarboxlate Admixture (kg/m ³)	Developed Admixture (kg/m ³)
Plain	28.6	717	567	508	359	103	3.59	-
N1	30.2	723	573	514	341	103	3.41	-
P1	30.2	723	573	514	341	103	-	3.41
N2	31.0	729	579	520	323	100	3.23	-
P2	31.0	729	579	520	323	100	-	3.23
N3	32.9	735	585	526	304	100	3.04	-
P3	32.9	735	585	526	304	100	-	3.04

반한 배합수와 시멘트를 동시에 투입하여 믹싱한다. 믹싱 후 100×100×100mm 입방형 몰드를 사용하여 3일간 양생 후 탈형하고 수증양생을 실시하였다. Fig. 5는 압축강도 시험체 및 시험 전경을 나타내었다. Table 8은 7일 압축강도 시험 결과를 나타내었으며, Fig. 6 및 Fig. 7은 기존 폴리카본산계 혼화제 및 개발 혼화제를 혼입한 시험체별 잔골재 대비 시멘트 감소율에 따른 압축강도 관계를 나타내었다.



(a) Compression test specimen (b) overview of Compression test

Fig. 5. Compressive Strength Test

Table 8. Compressive strength test results using Polycarboxylic admixtures

Specimens	Compressive strength(MPa)			
	1st	2nd	3rd	Average
Plain	32.5	31.9	32.3	32.2
N1	31.1	29.8	31.7	30.9
P1	36.7	34.9	35.7	35.8
N2	27.6	30.1	28.2	28.6
P2	34.3	34.0	33.8	34.0
N3	27.3	29.4	26.9	27.9
P3	33.8	33.4	33.7	33.6

기존 폴리카본산 계열의 혼화제를 혼입한 시험체의 경우, Plain 대비 시멘트 5%, 10%, 15% 저감에 따른 압축강도 감소율은 각 4.04%, 11.18%, 13.35% 감소하였으며, 시멘트 5%가 감소된 N1 시험체를 제외한 나머지 시험체에서 목표 압축강도인 30MPa에 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

개발 혼화제를 혼입한 시험체의 7일 압축강도는 모든 변수에서 목표 압축강도 30MPa를 만족하였으며, 조기

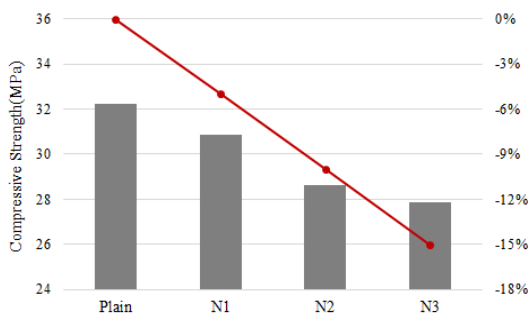


Fig. 6. Compressive strength test results using Polycarboxylic admixtures according to cement reduction rate

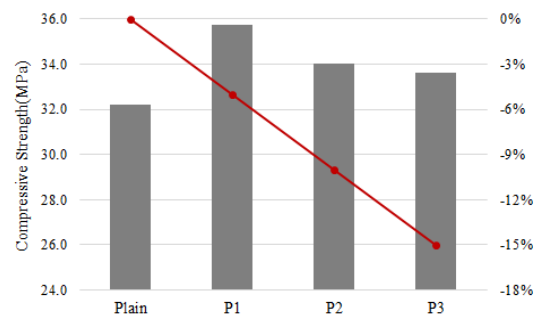


Fig. 7. Compressive strength test results using developed admixtures according to cement reduction rate

강도 발현이 확보되는 것으로 나타났다. P1시험체의 경우, Plain 대비 시멘트가 5% 감소함에도 불구하고 압축강도가 오히려 35.8MPa로 11.18% 증가하는 것으로 나타났다. P2, P3 시험체 역시 Plain 대비 시멘트가 각 5% 및 10% 감소하였으나, 압축강도는 34.0MPa와 33.6MPa로 나타났으며 개발 혼화제가 조기강도 발현에 영향을 미치는 것으로 확인할 수 있었다.

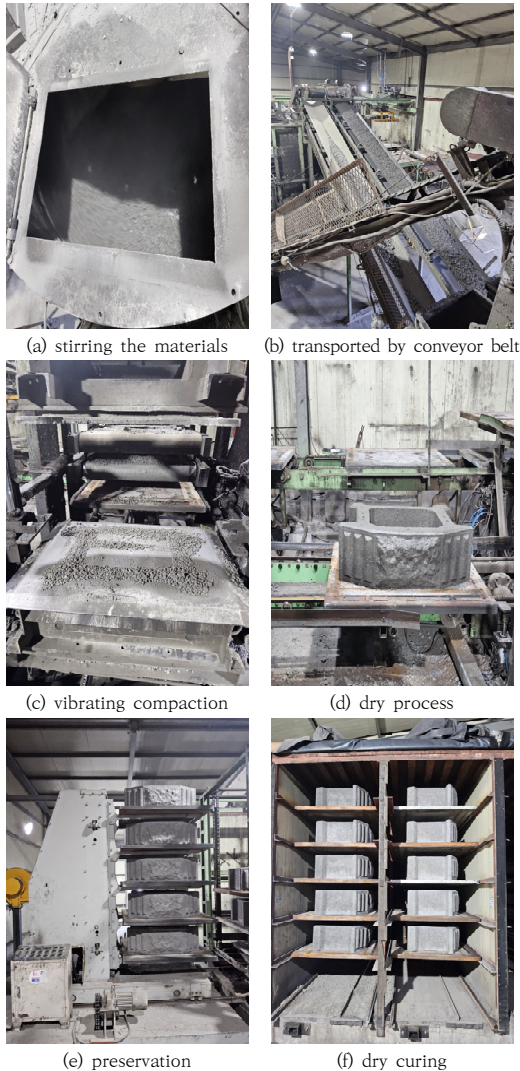


Fig. 8. Production process for retaining wall block

3.2 개발 혼화제 혼입 옹벽 블록 성능평가

본 연구를 통해 개발 혼화제를 혼입한 옹벽 블록은 Plain 대비 시멘트 10%를 저감한 P2 변수로 배합설계하

여 건식 공정에 적용하였다. 생산 공정으로는 사출 시스템이 있는 저장소에 배합 설계된 재료를 혼입한 후 교반을 실시하면서 개발 혼화제를 혼입한다. 충분한 교반을 실시한 후에 이송 컨베이어 벨트를 통해 옹벽 블록 몰드를 충전과 동시에 진동 다짐을 실시한다. 건식용 옹벽 블록 생산시 진동 회전수는 3,300~3,700rpm, 양생온도는 65℃, 습도는 75%, 양생기간은 500 도시로 하여 제품 제작 및 양생을 실시하였으며, 증기양생은 실시하지 않았다. 진동 다짐 이후 자동화 장치를 통해 건식 공정을 실시하고 건조로에서 3일 동안 양생하여 생산된다. Fig. 8은 옹벽 블록 건식 생산공정을 나타내었으며, 개발 옹벽 블록의 크기는 1000×750×330 mm(B×L×H)이다.

생산된 옹벽 블록의 콘크리트 압축강도 품질의 균질성을 평가하기 위해 옹벽 블록에서 채취한 시험편의 압축 파괴강도 평가와 비파괴 시험방법 중 반발경도 시험법을 사용하였다. Fig. 9와 같이 압축강도 시험편은 제작된 옹벽 블록의 전면부를 절단하고 절단면에서 100×100×100mm 크기로 시험편을 채취하였다. 옹벽 블록에 채취한 재령 28일 콘크리트 압축강도 시험 결과는 Table 9와 같다. 기존 폴리카본산계 혼화제를 사용한 옹벽 블록의 압축강도는 31.25Mpa이며, 개발혼화제를 혼입한 옹벽 블록의 압축강도는 38.74MPa로 나타났다. 개발 혼화제가 기존 폴리카본산계 혼화제보다 안정적으로 압축강도를 발현하는 것으로 평가되어 잔골재의 일부를 페로니켈 슬래그로 치환한 콘크리트를 옹벽 블록으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 옹벽 블록을 절단하여 콘크리트 시험체로 채취하는 과정에서 손상 발생에 의해 압축강도 시험체의 품질의 균질성을 확인해보기 위해 콘크리트 반발경도 시험은 KS F 2730(콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발경도 시험방법)에 의해 슈미트 헤머(SCHMIDT, Switzerland)를 사용하여 시험을 실시하였다. 옹벽 블록 양벽체 상부

Table 9. Test result of retaining wall block compression strength

Specimens	Compressive strength(MPa)	
	Retaining wall blocks using polycarbonic admixtures	Retaining wall blocks using developed admixtures
1st	31.44	38.51
2nd	29.86	39.60
3rd	31.79	38.35
4th	32.41	38.78
5th	30.12	37.92
6th	31.88	39.26
Average	31.25	38.74

단면에 3cm 간격으로 횡방향으로 5열, 종방향으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 수직 방향으로 20회 측정하여 평균 반발경도를 산정하였으며, 비파괴 압축강도의 추정의 정확성을 높이기 위해 측정 위치를 달리하여 4번 반복하여 시험하였다. 그리고 옆과 뒤 벽체 상단을 따라 30cm 간격으로 측정하였다.



(a) Reconstructed Retaining Wall Block



(b) Specimen Cross-Section



(c) Compression Strength Specimen



(d) Overview of Compression Strength Test

Fig. 9. Testing Procedure of Retaining Wall Block Compression Strength

측정된 반발경도에 의해 콘크리트 강도 추정식은 Eq. (1)과 같은 일본건축학회[22](Architectural Institute of Japan)에서 제시하는 강도 추정식을 사용하여 계산하였다.

$$F_c = 0.73R_o + 10.0 \quad (1)$$



Fig. 10. Overview of nondestructive test

Table 10. Test result of rebound hardness and compressive strength of retaining wall blocks

Average number of measurements	Retaining wall blocks using polycarbonic admixtures		Retaining wall blocks using developed admixtures	
	Round hardness	Compressive strength(MPa)	Round hardness	Compressive strength(MPa)
1	25.50	28.62	30.10	31.97
2	25.15	28.36	30.25	32.08
3	27.00	29.71	28.15	30.55
4	27.30	29.93	28.85	31.06
Average	26.24	29.15	29.34	31.42

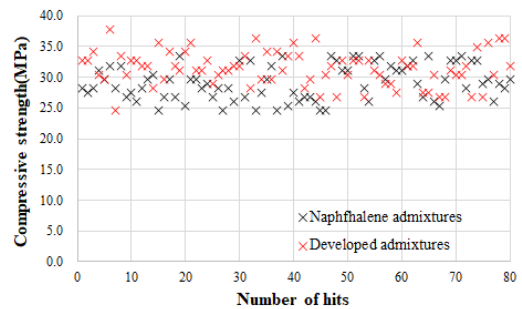


Fig. 11. Compressive strength according to number of measurements

Fig. 10은 시험전경을 나타내었다. 기존 폴리카본산계 혼화제 및 개발 혼화제 혼입 여부에 따른 응벽 블록의 시험 결과는 Table 10과 Fig. 11과 같다. 기존 폴리카본산계 혼화제를 사용한 응벽 블록의 경우, 강도추정식을 사용한 평균 7일 압축강도는 29.15MPa로 나타났으며, 개발 혼화제를 혼입한 응벽 블록의 평균 7일 압축강도는 31.42MPa로 목표 압축강도인 30MPa를 만족하였다.

4. 결론

건식 응벽 블록에 산업부산물인 페로니켈 슬래그를 잔골재로 치환하고 배합되는 시멘트량을 일정 비율로 감소시키더라도 설계강도를 발현하기 위한 혼화제를 개발하였다. 개발된 혼화제를 혼입한 콘크리트와 건식 응벽 블록에 대한 파괴 및 비파괴 압축강도 평가로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 폴리카본산 계열의 혼화제를 혼입하고 시멘트를 저감한 시험체의 경우, 재령 7일 압축강도 30MPa에 만족하지 못하였으며, 잔골재 대비 시멘트 저감에 따라 선형적으로 압축강도가 감소하는 것을 확인되었다.
- 2) 개발 혼화제를 사용한 콘크리트는 잔골재 대비 시멘트를 최대 15% 감소하였음에도 불구하고 Plain 대비 재령 7일 압축강도가 오히려 33.6MPa로 측정되어 개발 혼화제가 조기강도 발현에 적합한 것으로 평가되었다.
- 3) 개발된 혼화제 성분들이 반응하여 일라이트(Illite)인 규산삼갈슘(3CaOSiO_2)와 벨라이트(Belite)인 규산이갈슘(2CaOSiO_2)을 생성시켜 콘크리트의 압축강도를 증진시킨 것으로 판단된다.
- 4) 개발 혼화제 및 페로니켈 슬래그를 혼입하여 개발된 건식 응벽 블록의 반발경도 시험법을 통해 추정된 재령 7일 평균 압축강도는 31.42MPa로 설계강도를 충분히 만족하였으며, 재령 28일의 건식 응벽 블록을 절단하여 채취한 시험체의 콘크리트 압축강도는 38.74MPa로 확인되어 개발된 혼화제의 건식 응벽 블록 생산현장 적용이 가능한 것으로 판단된다.
- 5) 페로니켈 슬래그의 잔골재 치환율은 52%로 고정하고 개발 혼화제를 콘크리트 제품 생산에 적용할 경우 시멘트량을 감소시키더라도 제품의 압축강도 성능을 유지할 수 있을 것으로 확인되었다.

References

- [1] N. S. Jang, Y. H. Kim and H. S. Oh, "Comparison of the Prediction of Effective Moment of Inertia of FRP Rebar-Reinforced Concrete by an Optimization Algorithm.", *Materials*, 16, 2, 621, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16020621>
- [2] B. S. Thomas, J. Yang, K. H. Mo, J. A. Abdalla, R. A. Hawileh, and E. Ariyachandra, "Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review.", *Journal of Building Engineering*, 40, 102332, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102332>
- [3] W. J. Cho, E. S. Park, H. S. Jung and K. Y. Ann, "Durability Characteristics of Ternary Cement Matrix Using Ferronickel Slag According to the Alkali-Activators.", *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 8, 2, 190-197, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14190/JRCR.2020.8.2.190>
- [4] A. Akhtar, and A. K. Sarmah, "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective.", *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- [5] Y. J. Kim, "The Quality Properties of Quaternary Component Blended High Fluidity Concrete Using Industrial By-products for Carbon Neutrality.", *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 10, 4, 506-513, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14190/JRCR.2022.10.4.506>
- [6] W. J. Cho, H. S. Kim and K. Y. Ann, "A Study on the Hydration Characteristics and Fundamental Properties of Ternary Blended Cement Using Ferronickel Slag.", *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 8, 1, 39-48, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14190/JRCR.2020.8.1.39>
- [7] Y. Huang, Q. Wang and M. Shi, "Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder." *Construction and Building Materials*, 156, 773-789, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.038>
- [8] Y. C. Choi, and S. C. Choi, "Alkali-silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions.", *Construction and Building Materials*, 99, 279-287, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.039>
- [9] A. K. Saha and P. K. Sarker, "Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars.", *Construction and Building Materials*, 123, 135-142, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.144>
- [10] Z. Z. Ismail and E. A. Al-Hashmi, "Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement.", *Waste management*, 28, 11, 2041-2047, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>

[11] I. Maragkos, I. P. Giannopoulou and D. Panias, "Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers.", *Minerals Engineering*, 22, 2, 196-203, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.07.003>

[12] M. Malek, M. Jackowski, W. Łasica, K. Dydek and A. Boczkowska, "An experimental study of possible post-war ferronickel slag waste disposal in szklary (Lower silesian, poland) as partial aggregate substitute in concrete: Characterization of physical, mechanical, and thermal properties.", *Materials*, 14, 10, 2552, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14102552>

[13] R. K. Patra and B. B. Mukharjee, "Influence of incorporation of granulated blast furnace slag as replacement of fine aggregate on properties of concrete.", *Journal of cleaner production*, 165, 468-476, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.125>

[14] A. K. Saha and P. K. Sarker, "Mitigation of the potential alkali-silica reaction of FNS using ground FNS as a supplementary binder.", *Advances in Cement Research*, 32, 12, 537-546, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1680/jadcr.19.00035>

[15] Y. Chen, T. Ji, Z. Yang, W. Zhan and Y. Zhang, "Sustainable use of ferronickel slag in cementitious composites and the effect on chloride penetration resistance.", *Construction and Building Materials*, 240, 117969, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117969>

[16] J. H. Yoo and J. J. Choi, "A study on the residual expansibility of electric arc furnace slag aggregate.", *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2, 1, 128-135, 2006.

[17] N. W. Kim and J. S. Bae "A fundamental study on the characteristics of concrete with the substitution ratio of the rapidly cooled steel slag.", *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 13, 1, 78-87, 2009.

[18] Y. Huang, Q. Wang, and M. Shi, "Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder.", *Construction and Building Materials*, 156, 773-789, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.038>

[19] X. F. Gao, H. Y. Zhang, X. Y. Yang and K. Z. Li, "The application of ferronickel compound admixture in concrete.", *China J. Build. Mater. Tech*, 26, 01, 23-26, 2017.

[20] J. C. Kim, H. J. Yoo, H. S. Kim and H. J. Jeong, "Influences on Concrete Quality of Residue Content Change of Chemical Admixtures.", *Journal of the Korea Concrete Institute*, 26, 4, 457-463.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.4.457>

[21] W. H. Lee, S. Y. Lee, W. J. Kang, J. H. Ahn and H. J. Kim, "Development of admixture for improving compressive strength of concrete using bottom ash as fine aggregate.", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 23, 1, 316-324, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.1.316>

[22] Architectural Institute of Japan, Manual of nondestructive test methods for the evaluation of concrete strength, 26, 1983.

이 원 홍(Won-Hong Lee)

[정회원]



- 1987년 2월 : 건국대학교 대학원 농공학과 (농학석사)
- 1995년 2월 : 건국대학교 대학원 농공학과 (농학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 경상국립대학교 건설시스템공학과 교수

<관심분야>

합성구조, 콘크리트

오 흥 섭(Hong-Seob Oh)

[정회원]



- 1996년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 한양대학교 토목공학과 (구조공학 박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 경상국립대학교 건설환경공과대학 건설시스템공학과 교수

<관심분야>

토목공학, 구조공학

이 승 열(Seung-Yeol Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 경상국립대학교 토목공학과대학원 (공학석사)
- 2009년 2월 : 경상국립대학교 토목공학과대학원 (공학박사)
- 2007년 8월 ~ 2019년 2월 : 경남과학기술대학교 토목공학과 겸임 교수

• 2019년 2월 ~ 현재 : 경상국립대학교 연구원

<관심분야>

구조역학, 구조물 유지관리

강 옥 중(Wook-Jung Kang)

[정회원]



- 1974년 2월 : 국민대학교 경제학과 (학사)
- 1979년 ~ 2002년 : 두산그룹 근무
- 2002년 ~ 2004년 : J&B Korea 대표이사
- 2005년 ~ 2008년 : 남해심층수 개발본부장
- 2021년 9월 ~ 2023년 8월 : 인제대학교 산업융합대학원 신소재부품공학과 (공학석사)
- 2011년 ~ 현재 : 엔바이로-테크 대표

<관심분야>

재료역학, 신소재부품공학

정 재 홍(Jae-Hong Jung)

[정회원]



- 2018년 8월 : 창원대학교 산업대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 10월 ~ 1999년 12월 : 대양콘크리트 실장
- 2000년 1월 ~ 현재 : (주)디와이 산업 대표이사

<관심분야>

철근콘크리트공학, 구조공학

장 낙 섭(Nag-Seop Jang)

[정회원]



- 2020년 2월 : 경상국립대학교 건설시스템공학과 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 경상국립대학교 건설시스템공학과 (박사과정)

<관심분야>

토목공학, 구조공학