

파이넥스 수쇄 슬래그 잔골재의 혼합률에 따른 콘크리트의 품질특성 평가

Evaluation of Quality Properties of Concrete according to Mixing Proportion of Finex Water Granulated Slag Fine Aggregate

최연왕¹ · 조봉석^{2*} · 오성록¹ · 박만석¹

Yun-Wang Choi¹ · Bong-Suk Cho^{2*} · Sung-Rok Oh¹ · Man-Seok Park¹

(Received June 18, 2014 / Revised June 25, 2014 / Accepted June 28, 2014)

This paper evaluated the quality properties of Finex Water Granulated Slag fine aggregate as part of a study to recycle the Finex Water Granulated Slag generated in Korea, and examined the availability as fine aggregate for concrete by comparing properties (properties of fresh concrete, mechanical properties of hardened concrete) of concrete using Finex Water Granulated Slag fine aggregate with properties of concrete using river sand as fine aggregate.

From the results of this study, it was found that quality properties of concrete using finex water granulated slag as fine aggregate and concrete using river sand as fine aggregate are equivalent level.

키워드 : 파이넥스, 수쇄 슬래그, 잔골재, 콘크리트, 품질특성

Keywords : Finex, Water Granulated Slag, Fine Aggregate, Quality Property

1. 서론

건설산업에서의 콘크리트는 성형성 및 경제성이 우수하여 토목 및 건축공사에서 큰 비중을 차지하고 있으며, 건설구조물의 대형화 및 기능화에 따라 현재까지 그 수요는 지속적으로 증가되고 있는 실정이다(Im et al., 1999). 그러나, 최근 천연골재 채취제한에 따른 수급 불균형 및 가격상승 등에 따라 대체골재 활용에 대한 기대가 높아지고 있다(Cho, 2014). 콘크리트의 구성재료 중 6~70%를 차지하고 있는 골재는 무분별한 골재 채취 및 하천 개발 등으로 콘크리트용 골재 부족 현상이 현재 심각한 상황에 직면하였으며, 향후 골재 수급 전망도 불투명한 실정이다. 특히, 품질이 우수한 강모래의 경우 공급량이 감소하고 있으며, 대체골재인 부순골재 및 바다모래의 경우에도 부족량이 한계 수준에 다다르고 있다. 또한 환경보호에 대한 관심 및 민원 증가로 인하여 골재 수급은 점차 어려워 질 것으로 예측되기 때문에 기존 골재를 대체할 수 있는 양질의 콘크리트용 잔골재의 개발과 이를 활용한 콘크리트

트의 소요품질 확보 기술 또한 국가적으로 절실히 필요한 실정이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2005).

한편, 고로 슬래그를 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 제도적 기반으로써 KS 규격(KS F 2544, 2002)이 제정되어 부산물의 자원화 기반이 마련되어 콘크리트용 골재로써 활발하게 이용되고 있다. 고로 슬래그는 철강산업에서 선철을 생산하기 위하여 고로에서 원료 및 연료를 용융하는 공정에서 발생하는 슬래그로서 최근 철강 제조 기술개발로 인하여 파이넥스 공법에 의한 파이넥스 슬래그가 발생되고 있다. 파이넥스 슬래그는 고로 슬래그와 마찬가지로 고로에서 생산되는 고로 슬래그의 일종으로 사용 원료 및 연료의 가공유무에 따라 구분할 수 있다. 기존 고로 슬래그는 선철을 제조하기 위하여 철광석 및 석탄을 소결광 및 코크스로 가공처리를 실시하여야 하는 반면 파이넥스 슬래그는 자연상태의 분광형 태인 철광석 및 석탄을 가공처리 없이 바로 사용할 수 있는 장점이 있다. 즉, 철의 원료인 철광석과 연료인 석탄의 경우 천연자원으로써 가공처리전에는 다양한 입경을 가지고 있는 분광적으로 존재하

* Corresponding author E-mail: chos8@rist.re.kr

¹세명대학교 토목공학과 (Semyung University, Jecheon, 390-711, Korea)

²포항산업과학연구원 에너지환경연구소 (Environment&Energy Research Center, RIST, Pohang 790-330, Korea)

게 된다. 제선공정에서 고로에 넣는 철광석 및 석탄은 입경 8mm 이하의 가루형태로 된 경우 서로 밀집하여 고온의 반응가스가 원활하게 통과하지 못하게 되며, 철광석을 녹이는데 있어서 저효율 소가 된다. 따라서 기존 고로 공법의 경우 철광석은 사전가공처리를 통하여 입경 8~35mm 크기의 덩어리인 소결광으로 가공하며, 석탄은 구워 코크스로 만드는 공정을 거치게 된다. 이러한 가공처리를 거치게 되면 입자 공간이 확보되어 반응이 원활하게 이루어질 수 있게 된다. 이와같은 기존 고로 공법의 단점을 보완한 것이 파이넥스 공법이다. 선철제조시 기존 고로 공법 대신 파이넥스 공법을 적용하는 경우 사전가공설비 등의 추가비용을 절감하고 가공처리에서 발생하는 환경오염물질의 배출량을 줄일 수 있는 장점이 있기 때문에 파이넥스 슬래그 발생량은 더욱 증가할 것으로 예측된다. 이러한 파이넥스 공법과 같은 새로운 제철공법에 대한 연구는 국내뿐만 아니라 선진국에서도 활발하게 진행되고 있다. 일본의 디오스 공법(DIOS)이나 호주의 하이스멜트 공법(HISMELT) 등이 현재 개발중에 있는 기술 중 하나이다. 기존에는 호주 하이스멜트 공법이 연간 80만톤 규모의 상용화 설비를 착공한 상태로 가장 큰 성과가 있었으나, 국내에서 60만톤 규모의 파이넥스 시험설비를 가동과 최근 150만톤 규모의 상용화 설비 완공에 따라 경쟁 국가의 공법과 비교하여 국내 파이넥스 공법은 큰 경쟁력을 가지고 있는 공법으로 평가되고 있다(Finex, steel production in next-generation process technology, 2006). 이러한 파이넥스 공법은 세계 최초의 국내 철강제조 기술이기 때문에 현재 국내에서만 파이넥스 슬래그가 발생되고 있으며, 최근 파이넥스 슬래그

를 미분말로 제조하여 페이스트 및 모르타르 관점에서 몇몇 연구 및 검토가 기초적인 수준에서 수행되었으나 관련 연구 및 검토가 미흡한 수준이다(Choi et al., 2012). 따라서 점차 발생량이 증가할 것으로 예측되는 파이넥스 슬래그를 국내여건에 적합한 양질의 천연잔골재 대체제로 활용하기 위하여 크기 및 특성이 콘크리트용 잔골재와 유사한 파이넥스 수쇄 슬래그를 활용한 파이넥스 수쇄 슬래그 잔골재 콘크리트의 품질특성을 평가하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트

실험에 사용된 시멘트는 밀도 3.15g/cm³ 및 분말도 3,540cm²/g의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 사용하였다. Table 1은 OPC의 물리·화학적 특성을 나타낸 것이다.

2.1.2 골재

본 실험에 사용된 일반 잔골재는 주천산 강모래(이하, RS로 약함)를 사용하였으며, 파이넥스 수쇄 슬래그는 국내 P사에서 발생하는 파이넥스 수쇄 슬래그(이하, FS로 약함)를 사용하였다. 또한 굵은 골재는 굵은 골재 최대치수 20mm의 화강암질 부순골재(이하, G로 약함)를 사용하였다. Table 2는 사용된 골재의 물리적 성

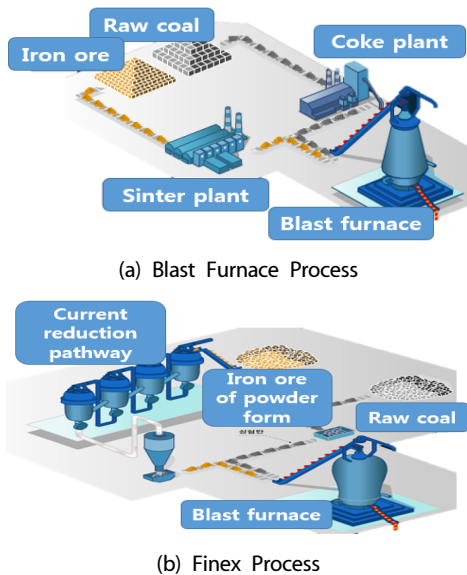


Fig. 1. Iron manufacturing process of domestic

Table 1. Physical and chemical properties of OPC

Type	OPC
CaO (%)	61.60
SiO ₂ (%)	19.80
Al ₂ O ₃ (%)	4.50
MgO (%)	3.01
Fe ₂ O ₃ (%)	3.57
SO ₃ (%)	2.10
L.O.I (%)	1.20
Surface area (cm ² /g)	3,450
Density (g/cm ³)	3.15

Table 2. Physical properties of aggregates

Type	Gmax (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.	Unit Weight (kg/m ³)
RS	-	2.59	1.56	2.70	1,670
FS	-	2.73	0.29	2.45	1,610
G	20	2.67	1.01	6.97	1,630

질을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 2는 FS의 입형 및 표면조직을 나타낸 것으로 (a)와 같은 침상형 지결정 유리질은 약 0.1% 포함하고 있었으나 대부분 (b)와 같은 형태로 되어 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 FS의 입도를 나타낸 것으로 FS는 특별히 구별하여 규정된 것은 없지만 KS F 2544 “고로슬래그 잔골재” 규격의 2.5mm 범위에 만족하는 것으로 나타났다. Table 3은 실험에 사용된 골재의 체가를 실험결과를 나타낸 것이다.

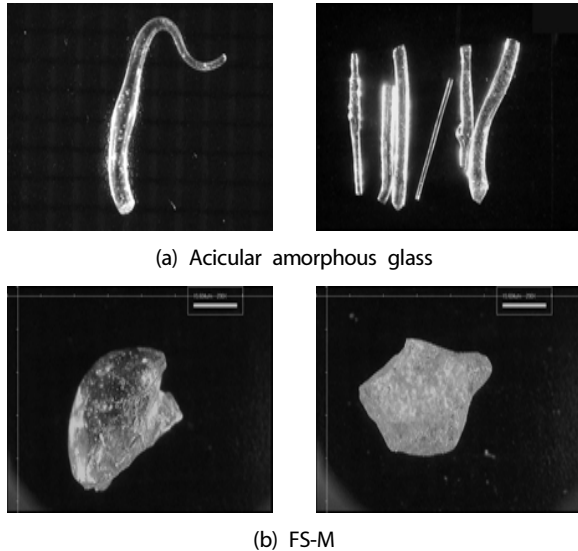


Fig. 2. Particle shape and surface texture

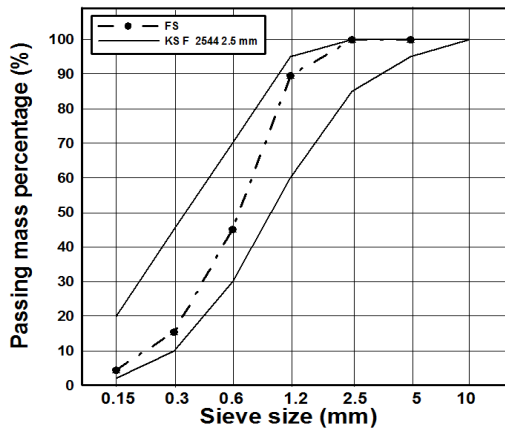


Fig. 3. Grading curve of fnex water granulated slag

Table 3. Result of sieve analysis test

Type	Passing mass percentage (mass%)						
	10mm	5.0mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
RS	100.0	98.2	94.9	73.6	51.36	19.0	2.73
FS	100.0	100.0	99.8	89.6	45.0	15.4	4.42

2.1.3 화학 혼화제

본 실험에 사용된 화학 혼화제는 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 조절을 위하여 국내 H사의 폴리카본산계 고성능 감수제(이하, SP제로 약함) 및 양질의 공기 연행제(이하, AE제로 약함)를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 콘크리트 배합

FS를 사용한 콘크리트의 품질특성을 평가하기 위하여 FS의 혼합률 변화 5수준(0, 25, 50, 75 및 100%) 및 강도 2수준(보통강도 및 고강도)에 따라 콘크리트를 제조하였다. Table 4는 콘크리트 배합표를 나타낸 것이다.

2.2.2 슬럼프 및 공기량

콘크리트의 슬럼프는 KS F 2402 “포틀랜드 시멘트 콘크리트의 슬럼프 실험방법”에 준하여 슬럼프를 측정하였으며, 목표 슬럼프는 150±20mm를 만족하도록 제조하였다. 콘크리트의 공기량은 KS F 2421 “굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기함유량 시험방법”에 준하여 공기량을 평가하였으며, 목표 공기량은 보통강도의 경우 4.5±1.5%, 고강도의 경우 3.5±1.5%를 만족하도록 제조하였다.

2.2.3 블리딩

블리딩은 KS F 2414 “콘크리트의 블리딩 시험방법”에 준하여 평가하였다.

Table 4. Concrete mix proportion

Strength- Replacement ratio (Vol.%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Mass (kg/m ³)				
			W	C	RS	FS	G
Normal-0	50	41	175	350	710	0	1,054
Normal-25	50	41	175	350	533	187	1,054
Normal-50	50	41	175	350	355	374	1,054
Normal-75	50	41	175	350	178	562	1,054
Normal-100	50	41	175	350	0	749	1,054
High-0	35	41	165	350	680	0	1,009
High-25	35	41	165	350	510	179	1,009
High-50	35	41	165	350	340	358	1,009
High-75	35	41	165	350	170	538	1,009
High-100	35	41	165	350	0	717	1,009

2.2.4 압축강도 및 정탄성계수

압축강도 시험용 공시체는 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 원주형 물드를 사용하여 공시체 제작 방법에 따라 제작하였다. 24시간 후 물드를 탈형하여 소정의 재령까지 $20 \pm 3^\circ \text{C}$ 수조에 침지하여 수중 양생하였으며, 압축강도 시험은 재령 7, 28 및 91일에 KS F 2405에 준하여 실시하였다.

또한 정탄수계수는 KS F 2438 “콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법”에 준하여 재령 28일에 콘크리트용 Strain Gauge(변형률 게이지)를 부착한다음 정적 데이터로거(TDS-530)를 사용하여 $0.25 \pm 0.035 \text{MPa/s}$ 의 속도로 극한하중의 40%와 같을 때까지 하중을 재하하여 콘크리트의 정탄수계수를 측정하였으며, 압축강도와와의 상관성을 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 슬럼프

Fig. 4 및 Fig. 5는 FS 사용에 따른 목표 슬럼프를 만족하기

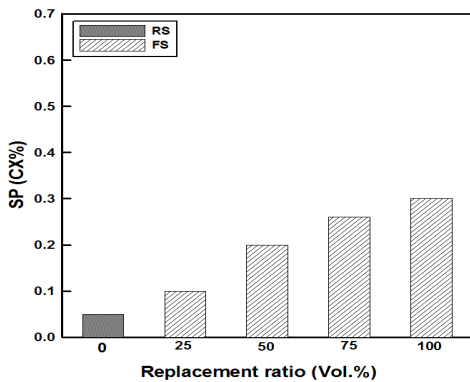


Fig. 4. SP consumption according to FS (Normal strength)

위한 보통강도 및 고강도 영역의 SP제 사용량을 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과 보통강도 영역의 SP제 사용량은 FS의 혼합률 증가에 따라 비례적으로 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 FS가 RS보다 각이진 형태의 입형 및 침상형 비결정 유리질을 일부분 포함하고 있으며, RS와 비교하여 0.15mm 이하의 미립분이 상대적으로 많이 포함하고 조립률이 작기 때문에 FS 혼합률 증가에 따라 SP제 사용량이 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 5의 고강도 영역의 SP제 사용량의 경우에도 전체적인 사용량은 증가하였으나 보통강도 영역과 동일하게 FS 혼합률 증가에 따라 비례적으로 증가하는 경향이 나타났다.

3.2 공기량

Fig. 6 및 Fig. 7은 FS 혼합률에 따른 콘크리트의 공기량을 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과 FS를 사용한 보통강도 영역의 콘크리트 공기량은 동일한 AE제를 사용한 경우 목표 공기량 범위인 $4.5 \pm 1.5\%$ 를 모두 만족하는 것으로 나타났으며, FS 혼합률 증가에 따라 공기량이 최대 20% 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 7의 고강

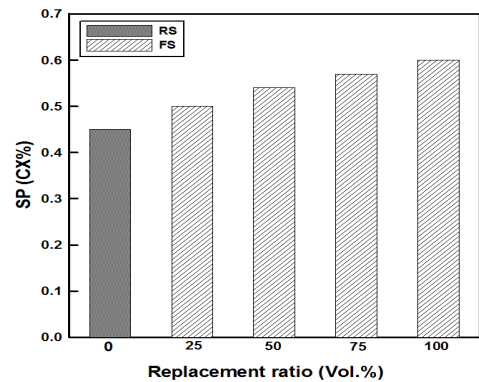


Fig. 5. SP consumption according to FS (High strength)

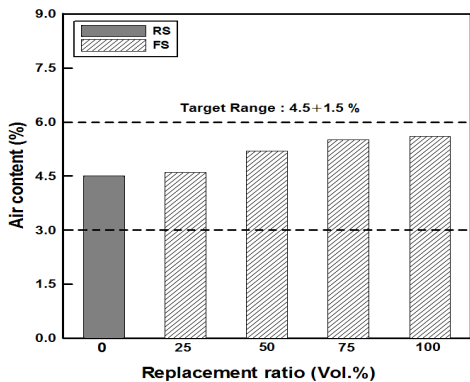


Fig. 6. Air content of concrete using FS (Normal strength)

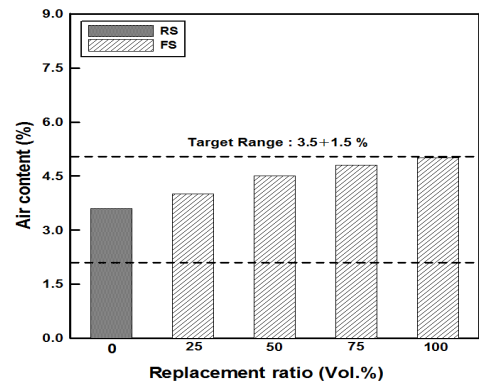


Fig. 7. Air content of concrete using FS (High strength)

도 영역의 콘크리트 공기량의 경우에도 보통강도 영역과 동일하게 FS 혼합률 증가에 따라 비례적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 목표 공기량 범위인 $3.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 FS의 경우 RS와 비교하여 상대적으로 단일입자로 치중된 입도분포를 가지고 있기 때문에 치밀하게 채워지지 못하여 갭한 공기가 증가한 것으로 판단되며, FS가 RS 보다 0.15mm 이하의 미립분이 더 많이 포함하고 있기 때문에 공기량이 증가한 것으로 판단된다. 일반적으로 공기연행 콘크리트의 공기량은 다른 조건이 동일한 경우 잔골재 중 0.15mm 체를 통과한 골재의 총량에 의해 공기량이 변화하는 것으로 알려져 있으며(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011) 이는 0.15mm 체를 통과한 입자 사이에 연행공기가 존재할 수 있기 때문에 이러한 입자가 더 많은 FS가 이러한 원인에 기인하여 공기량이 증가한 것으로 판단된다.

3.3 블리딩

Fig. 8은 FS를 사용한 콘크리트의 블리딩 실험결과를 나타낸 것이다. 블리딩 실험의 경우에는 고강도 영역의 실험은 크게 의미

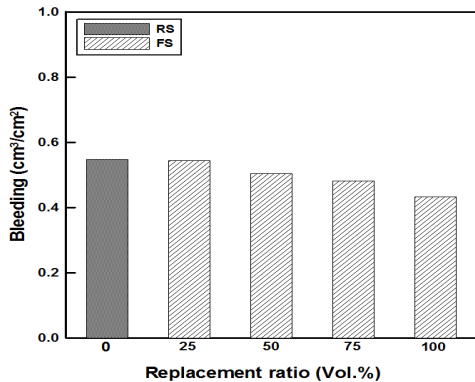


Fig. 8. Bleeding test result of concrete using FS

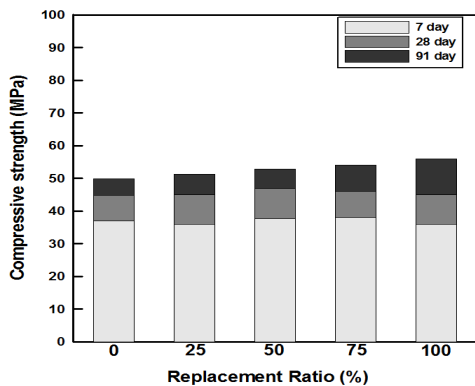


Fig. 10. Compressive strength of concrete using FS (High strength)

가 없으므로 보통강도 영역에 대하여 실험을 실시하였다. Fig. 8의 결과 FS를 사용한 콘크리트의 블리딩량은 FS 혼합률 증가에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 단위수량이 동일한 경우 RS의 밀도가 FS보다 더 크기 때문에 콘크리트 자중에 의한 침하로 블리딩이 증가하는 것으로 판단되며, FS의 표면조직의 경우 유리질로 되어있어 보수성이 나쁘기 때문에 블리딩량이 증가할 것으로 예측되지만(Lee, 2008), 미립분의 증가로 인한 영향이 더 크기 때문에 총 블리딩량이 차이가 발생하지 않은 것으로 판단되며, 이는 오차범위를 고려할 때 동등 수준인 것으로 판단된다.

3.4 압축강도

Fig. 9 및 Fig. 10은 FS를 사용한 콘크리트의 보통강도 및 고강도 영역의 재령별 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과 FS를 사용한 콘크리트의 보통강도 영역 재령별 압축강도는 재령 7일의 경우 RS의 압축강도와 비교하여 동등수준인 것으로 나타났으며, 재령 28일에는 FS 25%, 50%, 75% 및 100%의 압축강도는 1.2%, 2.7%, 5.7% 및 8.8% 증가하는 경향이 나타났다.

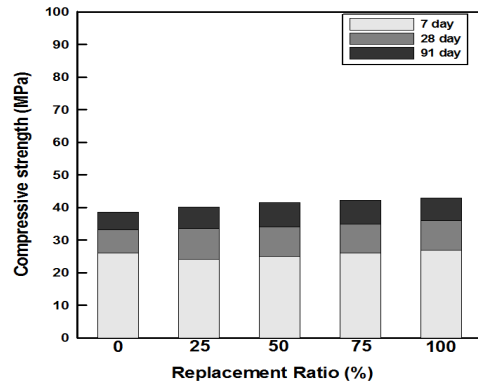


Fig. 9. Compressive strength of concrete using FS (Normal strength)

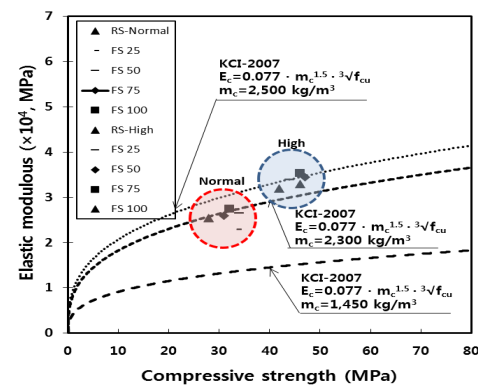


Fig. 11. Elastic modulus of concrete using FS

또한 FS 25%, 50%, 75% 및 100% 사용한 콘크리트의 재령 91일 압축강도는 FS 혼합률 25% 증가에 따라 4.4%, 7.8%, 9.6% 및 11.4% 증가하는 경향이 나타났다. 일반적으로 슬래그 잔골재의 경우 골재자체가 장기강도 증진의 효과가 있는 것으로 보고되고 있으므로(Moon et al., 1997) 본 연구결과의 경우에도 이러한 원인에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 10의 결과 FS를 사용한 콘크리트의 고강도 영역 재령별 압축강도의 경우에도 보통강도 영역의 결과와 동일한 경향으로 나타났다. FS 25%, 50%, 75% 및 100% 사용한 콘크리트의 재령 91일 압축강도는 FS 혼합률 25% 증가에 따라 2.8%, 6.0%, 8.4% 및 12.4%로 보통강도 영역의 결과와 동일한 원인에 기인한 것으로 판단되며, FS 혼합률 100% 사용할 경우 강도 증진율은 보통강도 영역과 비교하여 고강도 영역에서 강도 증진 효과가 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 FS 혼합률이 증가함에 따라 FS 자체의 미분말이 고로 슬래그 미분말과 같이 잠재수경성 역할을 수행하여 재령일에 따라 강도에 영향을 미친 것으로 판단되며, 또한 공기량이 증가하는 결과와 결부하여 고려하여 보면 RS와 FS를 100% 사용한 경우에 공기량이 약 1% 차이가 있으므로 RS 및 FS를 100% 사용한 콘크리트의 공기량이 동일하다고 가정할 경우에는 FS를 100% 사용한 경우의 강도증진 효과는 4~6% 증가할 수 있기 때문에 이에대한 추가적인 고려가 필요한 것으로 판단된다(KCI, 2009).

3.5 탄성계수

Fig. 11은 FS를 사용한 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 정탄성계수 관계를 나타낸 것이다. Fig. 11의 결과 FS를 사용한 보통강도 영역 및 고강도 영역의 정탄성계수는 FS 혼합률에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났지만 오차범위내 동등수준인 것으로 판단되며, 보통강도 및 고강도 영역 모두 국내 콘크리트 구조설계기준에서 제시한 콘크리트 탄성 예측식에 따른 탄성범위에 상회하는 결과가 나타났다(KCI, 2012).

4. 결론

본 논문에서는 파이넥스 슬래그를 보다 고부가가치인 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 연구의 일환으로 파이넥스 수쇄 슬래그를 활용한 파이넥스 수쇄 슬래그 잔골재 콘크리트의 품질특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 파이넥스 수쇄 슬래그를 콘크리트용 잔골재로써 사용할 경우에

는 동일한 워커빌리티를 확보하기 위하여 단위수량 및 혼화제 사용량이 혼합률에 따라 2배이상 증가되므로 소요 요구조건에 따라 경제성 등을 고려하여 적정 혼합률을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

2. 파이넥스 수쇄 슬래그를 사용한 콘크리트의 압축강도 및 정탄수계수는 강사를 사용한 콘크리트의 압축강도 및 정탄수계수와 비교하여 동등수준이거나 파이넥스 수쇄 슬래그의 혼합률에 따라 다소 증가하는 경향이 있으므로 강사를 대체하여 사용가능할 것으로 판단된다.
3. 본 연구결과를 통하여 파이넥스 수쇄 슬래그를 사용한 콘크리트 유동특성 및 역학특성 결과를 종합적으로 고려할 경우 파이넥스 수쇄 슬래그의 혼합률에 관계없이 적용가능할 것으로 판단되지만 보통강도 영역의 경우 혼합률이 증가함에 따른 강도 증진률보다 소요 워커빌리티를 만족하기 위한 혼화제 사용량이 크게 요구되므로 본 연구의 경우 파이넥스 수쇄 슬래그의 적정 혼합률은 50%가 적절한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 (재)포항산업과학연구원의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Cho, B.S. (2014), Study on Stable Use of Stainless EAF Oxidizing Slag as Fine Aggregate of Concrete, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **18(3)**, 133-142.

Choi, Y.W., Oh, S.R., Choi, B.K., Lee, H.H., and Choi, W. (2012), A Study on Physical Properties of FINEX Slag to Utilize Fine Aggregate for Concrete, Journal of Korean Recycled Construction Resource Institute, **7(4)**, 79-87.

Im, N.K. and Jung, S.J. (1999), The Experimental Study on Strength Property of concrete using Blast Furnace Slag Aggregate, Journal of Architectural Institute of Korea, **15(6)**, 87-94.

KCI (2012), Concrete Structure Design Criteria, Korea Concrete Institute.

KCI (2012), Standard Specification for Concrete, Korea Concrete Institute.

Korea Industrial Standard (2002), KS F 2544 Blast furnace slag aggregate for concrete, Korean Agency for Technology and Standards.

Lee, M.H. (2008), A Study on the Evaluation of the Durability of Concrete Using Copper Slag Aggregates, Journal of the Korea Concrete Institute, **20(6)**, 773-784.

Ministry of Land (2011), Infrastructure and Transport, Cement

concrete pavement mix design guidelines, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Moon, H.Y., Jung, S.J., and Im, N.K. (1997), Blast-Furnace Slag Aggregate, Journal of the Korea Concrete Institute, **9(6)**, 18-22.

Naver blog (2006), Finex, steel production in next-generation process technology, <http://blog.naver.com/fortuneajh/120029317673>.

파이넥스 수쇄 슬래그 잔골재의 혼합률에 따른 콘크리트의 품질특성 평가

본 연구에서는 국내에서 발생되고 있는 파이넥스 수쇄 슬래그를 콘크리트용 잔골재로써 활용하기 위한 연구의 일환으로 파이넥스 수쇄 슬래그 잔골재의 기초물성을 평가하였으며, 파이넥스 수쇄 슬래그 잔골재를 사용한 굳지않은 콘크리트의 특성, 경화된 콘크리트의 역학적 특성을 보통강도 및 고강도 영역에서 강사와 비교·평가하여 콘크리트용 잔골재로써 사용성 검토를 수행하였다. 실험결과, 파이넥스 수쇄 슬래그를 사용한 콘크리트와 강사를 사용한 콘크리트의 품질특성은 동등수준인 것으로 나타났다.