

산업부산물을 이용한 콘크리트 벤치플룸의 성능평가

Performance Evaluation of Concrete Bench Flume Using Industrial by Products

정재호^{1*}

Jae-Ho Jung^{1*}

(Received September 12, 2023 / Revised September 19, 2023 / Accepted September 19, 2023)

Water pipes manufactured using existing Portland cement suffer from the problem of rapid deterioration and reduced durability due to the hydration product of cement being vulnerable to acids. Therefore, in this study, water pipes were manufactured using slag and fly ash, which are industrial by-products from various industries, and their characteristics were analyzed. As a result of the experiment, slump in unhardened concrete tended to increase due to the ball bearing action of fly ash, and the amount of air was reduced due to unburned coal, indicating that measures for frost resistance were needed. In addition, the initial strength of the compressive strength was increased through steam curing, and the results were equal to or better than OPC when mixing more than 50 % of slag. The acid resistance results showed that the mass reduction rate was less than 5 %, showing excellent durability performance, and the bending failure load of the water pipe also exceeded the KS standards, so it is judged to be commercializable.

키워드 : 산업부산물, 고로슬래그, 플라이 애시, 벤치플룸

Keywords : Industrial by products, Blast furnace slag, Fly ash, Bench flume

1. 서론

콘크리트는 경제성 및 구조특성의 장점을 가지고 있으나 결합재가 시멘트수화물이기 때문에 경화까지 일정한 시간이 필요하다. 또한 압축강도에 비하여 인장강도가 현저히 작고, 건조수축이 크고, 내화학성이 취약한 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 개선시키기 위하여 결합재의 일부 또는 전체를 대체시켜 활용하고자 하는 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되고 있다. 기존 시멘트는 제조과정에서 많은 양의 자원과 에너지를 소비하며, 1 kg 당 950 g의 이산화탄소를 배출하여 지구온난화의 주요 원인으로 지목받고 있다. 시멘트의 제조과정에서 발생하는 온실가스의 배출량은 약 135만 ton으로 전 세계 배출량의 7 %를 차지하고 있다. 또한, 주요 원료인 석회석, 점토 등 광물을 채굴하는 과정에서 발생하는 채굴부산물과 산림훼손은 지구온난화 뿐만 아니라 환경에 많은 부담을 주고 있는 실정이다.

최근, 온실가스로 인한 기후변화 및 지구온난화는 이미 전세계

적으로 심각한 위협이 되고 있으며, 온실가스 감축은 더 이상 환경적 문제뿐만 아니라 경제적 문제와도 직결되고 있다. 시멘트산업에서 보통 포틀랜드시멘트(이하 OPC) 제조시 방출되는 이산화탄소 감축을 위해 플라이 애시나 고로슬래그, 그리고 실리카 등과 같은 산업부산물을 OPC에 대해 부분적으로 치환한 콘크리트의 사용이 점차 보편화 되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 원재료로 플라이 애시나 고로슬래그를 사용한 알칼리 활성 바인더에 대한 연구가 전세계적으로 증가하고 있다. 하지만 산업부산물에 대한 부정적 인식과 산업부산물을 활용한 콘크리트는 초기강도 저하문제로 현장타설용 콘크리트 시공 및 제조에 적극적으로 사용하는 사례는 미진한 실정이다. 산업부산물을 콘크리트 결합재로 활용하여 저시멘트 또는 무시멘트 콘크리트를 제조하기 위해서는 고가의 반응성 첨가제를 사용해야 하므로 시멘트를 단독 사용한 베이스 콘크리트보다 단가가 상승하는 단점을 내포하고 있어 실질적인 상용화가 미진한 실정이다. 또한 본 연구의 알루미노 실리케이트 무기 바인더는 기존의 포틀랜드 시멘트에 비해 우수한 내화학성을

* Corresponding author E-mail: ground2005@hanmail.net

¹서원대학교 교양대학 교수 (College of Liberal Arts, Seowon University, Seowon-Gu, Cheonju, 28474, Korea)

보유하고 있으며, 이산화탄소의 배출을 획기적으로 저감할 수 있는 소재이므로 친환경적인 기술이다. 고내산능력이 필요한 콘크리트 2차 제품에 내구성능 향상을 기대할 수 있어 유지관리 비용의 절감, 정비 및 교체주기 연장 등 SOC 시설물의 사회적 비용 절감 효과를 가져올 수 있다.

또한 우리나라는 강수가 여름철에 집중되어 있고 대기정체로 인해 고농도 미세먼지 현상이 자주 발생하는 환경이다. 미세먼지는 일반적으로 대기오염물질이 공기중에 반응하여 형성된 황산염, 질산염 등과 화석연료를 소모하는 과정에서 발생하는 탄소류, 지표면 흙먼지 등에서 생기는 광물질로 인해 대기 중 이산화황(SO₂)이나 산화질소(NO₂)가 산성비를 내리게 하는 요인으로 작용하여 수산화칼슘의 중성화, C-S-H 겔이 분해되어 표면의 탈락, 골재의 노출로 인해 구조물의 열화를 촉진시키는 요인이 되고 있다. 특히 수로관은 환경오염으로 산성화한 우수, 용수에 직접적으로 노출되어 침식에 의한 내구성 저하 위험도가 높으며 사회기반 시설물에 대한 유지보수 비용이 증가되고 있기 때문에 내산성이 우수한 수로관 개발이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고로슬래그 및 플라이 애시를 활용하여 콘크리트 2차제품인 수로관 중 벤치플룸 Ⅲ종을 제작하여 KS표준에 의거한 기초성능과 화학저항성평가를 진행하여 콘크리트 2차 제품에서 산업부산물의 활용 가능성을 평가하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 친환경 콘크리트 수로관은 충북 괴산군에 위치한 콘크리트 2차제품 제조회사의 KS F 4010 철근콘크리트플룸 및 벤치플룸의 벤치플룸 Ⅲ종의 제품 중 중형 800B와 대형 1200B의 제품으로 평가하였다.

먼저 배합은 수로관 제조회사의 표준배합표를 이용하여 W/B 40 %로 정하고 목표슬럼프는 80 ± 25 mm로 하였고, 사용분체는 OPC와 슬래그, 플라이 애시를 일정비율로 혼합하여 사용하였다. 실험항목은 굳지 않은 콘크리트에서 공기량을 측정하였고 경화콘크리트에서는 압축강도와, 황산 5 % 수용액에 침지한 후 내화학성 측정하였고, 성능이 가장 우수한 산업부산물의 조성비율을 도출하여 벤치플룸 Ⅲ종을 제작하고 휨하중을 측정하여 활용가능성을 검토하였다.

Table 1. Experimental plan

Factor		Level	
Mixture	W/B (%)	1	· 40
	Flow (mm)	1	· 80±25
	Binder	2	· OPC · BS:FA(①3:7 ②5:5 ③7:3)
	Reaction accelerator	1	· SS,NH
Experiment	Hardened concrete	2	· Compressive strength (3, 7, 28, 56days) · Acid-resistance (3, 7, 28, 56days)
	Bench flume III	1	· Flexural load(28days)

* BS:Blast Furnace slag FA:Fly Ash
SS:Sodium Silicate NH:NaOH

Table 2. Concrete block mixing table

Spec	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)							
		W	B			G	NH	SS	
OPC	40	140	350	-	-	1088	854	-	-
BS3FA7			-	105	245	981	770	36.1	6.5
BS5FA5			-	175	175	981	770	36.1	6.5
BS7FA3			-	245	105	981	770	36.1	6.5

2.2 사용재료

본 연구에서 사용된 산업부산물은 국내 H사의 고로슬래그(BS)를 사용하였고, 플라이 애시(FA)는 국내 C사를 사용하였으며, 알칼리반응 촉진제로서 Sodium silicate(SS)와 순도 98 %의 시약급 NaOH(NH)를 사용하였다 상대비교군으로 일반적으로 사용되는 결합재는 국내 S사의 보통포틀트시멘트를 사용하였고, 각 재료의 물리적 특성 및 화학적 조성특성은 Table 3과 4와 같다.

Table 3. Chemical and physical properties of BS & FA

Item	Density (g/cm ³)	Chemical proportion (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃
BS	2.9	38.3	13.0	40.3	3.5	0.4	2.5
FA	2.2	52.3	21.8	6.9	1.9	8.3	0.6

Table 4. Properties of sodium silicate

Proportion (%)		
SiO ₂	Na ₂ O	W
28.2	9.3	62.5

Table 5. Properties of fine aggregate

Item	Results
F.M	2.61
Density (g/cm ³)	2.58
Absorption (%)	1.1
Unit Mass (kg/L)	1.56

Table 6. Properties of coarse aggregate

Item	Results
F.M	6.88
Density (g/cm ³)	2.69
Absorption (%)	0.9
Unit Mass (kg/L)	1.58

또한 콘크리트 제조를 위한 잔골재는 5 mm 이하의 강모래로서 KS의 품질기준을 만족하는 것을 사용하였으며, 굵은골재는 화강암질 부순골재로서 최대 입도가 25 mm인 것을 사용하였고 골재의 품질특성은 Table 5와 6과 같다.

2.3 실험방법

2.3.1 공기량

공기량 시험은 KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법에 준하여 측정하였다.

2.3.2 압축강도

압축강도 시험을 위한 공시체는 KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법에 준하여 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주 공시체를 제작하고, 양생은 벤치플룸 III종과 동일하게 $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$, R.H 100 % 조건에서 증기양생을 실시하고 탈형 후 소정의 기간동안 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 조건이 유지되는 수조에서 수중양생을 실시하였고, 압축강도는 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 준하여 최대용량 1,000 kN의 UTM을 이용하여 측정하였다.

2.3.3 내화학적성

내산성 시험은 Fig. 1과 같이 $\phi 100 \times 200$ mm의 원형 시험체를 제작하여 양생을 실시한 후 5 % 황산 용액에 소정 기간 동안 침지 시켰고, 침지 전 후의 질량 변화율을 측정하였다.

2.3.4 벤치플룸 III종 증기양생 및 휨파괴 하중

벤치플룸의 휨파괴하중은 Fig. 2와 같이 제작한 후 Fig. 3과 같이

초기 2시간동안 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 씩 승온한 후 4시간 동안 $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$, R.H 100 % 조건에서 증기양생을 실시하였다. 이후 Fig. 3과 같이 KS F 4010의 철근 콘크리트 플룸 및 벤치 플룸에 준하여 벤치플룸 III 그대로를 최대용량 1,000 kN의 UTM을 이용하여 측정하였다.



Fig. 1. Acid resistance test



Fig. 2. Bench flume manufacturing

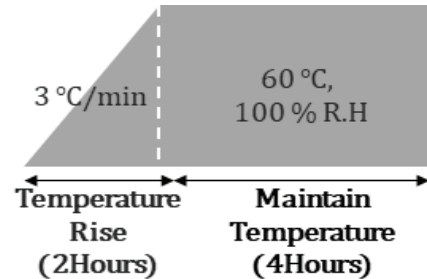


Fig. 3. Steam curing conditions

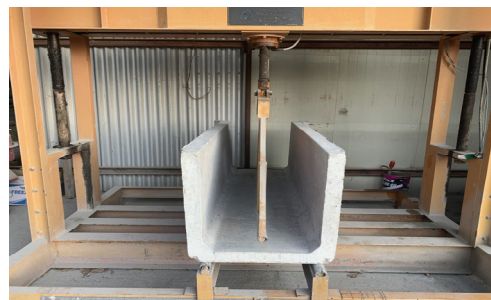


Fig. 4. Flexural load test

3. 실험결과

3.1 공기량

배합요인 별 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험결과는 Fig. 5와 같다. OPC 배합에서는 4.3 %로 측정되어 (3~6) %의 KS기준값을 만족하였다. 하지만 산업부산물이 활용된 BS7FA3은 3.9 %, BS5FA5는 3.2 %, BS3FA7은 2.6 %로 나타나 공기량이 저하하는 경향으로 나타났다. 이는 플라이 애시의 미연탄분에 의한 연행공기가 감소된 것으로 판단되며(Ahn et al. 2021), 플라이 애시 첨가율이 증가될수록 경향은 크게 나타났다. 추후 플라이 애시가 혼합된 산업부산물을 활용한 수로관 제조시 내동해성 확보를 위한 AE제 투입량 증가를 검토해야 할 것으로 판단된다.

3.2 압축강도

배합요인 및 재령별 압축강도 시험결과는 Fig. 6과 같다. 콘크리트 2차제품 제조 업체에서 실시하는 증기양생을 한 결과 초기강도에서 강도발현 비율이 매우 큼을 확인 할 수 있었으며, 초기 재령 7일에서 재령 28일 강도 대비 90% 정도 확보할 수 있는 것으로 나타나, 산업부산물을 활용한 시험체에서도 초기에 제품출하 강도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다, 그리고 배합요인별에 따른 강도특성은 고로슬래그를 50 % 이상 사용할 경우 재령 28일 압축강도는 39 MPa, 재령 56일에서는 44 MPa를 나타내어 기존의 OPC를 사용한 경우와 동등 수준의 강도를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 플라이 애시를 70 % 사용한 경우는 기존의 OPC 대비 70 % 이하의 강도를 발현하는 것으로 나타나 결합재로서의 성능확보가 부족한 것으로 나타나 추후 상대적으로 낮은 강도를 요구하는 2차제품에 적용 가능성을 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.3 내화학적성

배합요인 별 내화학적성 실험결과는 Fig. 7과 같다. 황산 5%용액에 침지한 OPC의 경우 침지 14일 이후부터 급격한 질량 감소를 나타내어 침지 28일에서는 10% 정도를 나타내었다. 이는 시멘트의 수화생성물인 수산화칼슘과 황산과의 반응으로 수화생성물이 표면부터 붕괴되기 시작하면서 내부로 확산되어 열화가 진행된 것으로 판단된다. 산업부산물을 활용한 시험체에서는 재령이 증가함에 따라 질량이 감소하는 것으로 나타났지만 약 3.5% 정도의 질량감소만을 나타내 OPC보다 우수한 내산성을 확보할 수 있는

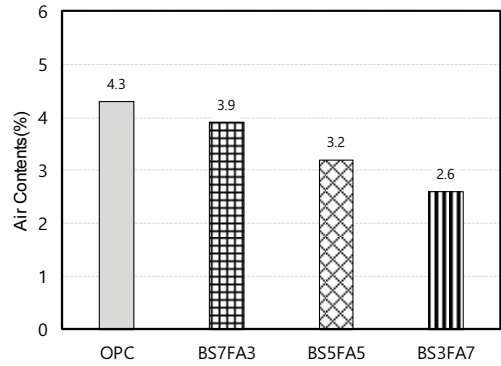


Fig. 5. Result of air contents

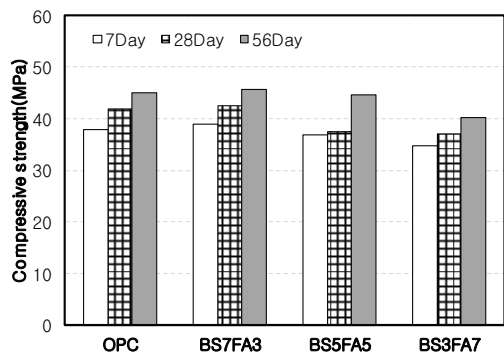


Fig. 6. Result of compressive strength

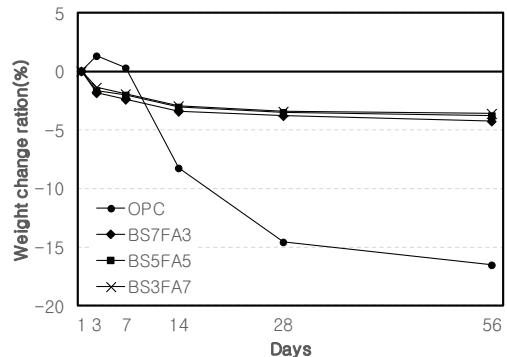


Fig. 7. Result of weight change ratio

것으로 나타났다. 이는 기존의 연구결과(Heo et al. 2014)에서 산업부산물의 반응매커니즘 화학저항성에 취약한 수산화칼슘을 포졸란반응과 잠재수경반응으로 소비하기 때문으로 판단된다.

3.4 벤치플룸 III종 힘파괴하중

상기 실험을 토대로 산업부산물 배합별 중 결과값이 가장 우수

한 BS와 FA 비율을 7:3으로 정하여 OPC 배합과 비교하여 벤치플룸 III 중 800B와 1200B를 Fig. 8과같이 제작한 후 휨파괴를 실시하였다. 실험결과 Table 7과 같다. 먼저 KS F 4010에서는 휨파괴하중을 800B는 40.7 kN, 1200B는 39.2 kN 이상으로 규정하고 있다. 실험결과 모두 KS 기준은 상회하는 것으로 나타났다. 또한 산업부산물을 활용한 배합에서도 OPC와 동등한 수준으로 나타나 본 연구결과를 적용한 제품을 상용화할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 800B



(b) 1200B

Fig. 8. Waterway (bench flume III)

Table 7. Results of Flexural load

Spec	KS (kN)	Flexural load (kN)	
		OPC	BS70FA30
800B	40.7	50.9	52.9
1200B	39.2	43.2	46.8

4. 결론

산업부산물을 고내산성 수로관에 적용하기 위한 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 굳지 않은 콘크리트에서 공기량은 산업부산물을 혼합한 배합에서 플라이 애시의 미연탄분에 의해 감소하는 경향을 나타냈고, 추후 내동해성을 위한 공기량 증가가 필요할 것으로 사료된다.
2. 경화 콘크리트의 압축강도는 증기양생을 한 결과 초기강도발현율이 우수하였다. 또한 초기에 탈형강도가 나타남에 따라 2차제품에 적용이 가능할 것으로 판단되며, 고로슬래그 50 % 이상의 배합에서는 OPC와 동등 이상의 우수한 결과나 나타났다.
3. 황산 5 % 수용액에 침지한 내화학성 실험결과 OPC의 질량 감소율은 재령 14일 이후 급격하게 증가되어 산에 의한 열화가 진행됨을 알 수 있었고, 산업부산물을 이용한 시험체는 질량 감소율이 5 % 미만으로 내화학성에 대한 성능을 확보하였다.
4. 벤치플룸 III 중 휨파괴 시험결과 KS기준을 상회하는 것으로 나타나 상용화에 문제가 없을 것으로 판단된다.

본 연구에서 도출된 결과 산업부산물을 이용한 벤치플룸 III은 KS 기준을 상회하였고, 특히 재령 7일에서 28일 강도의 90 % 정도 발현됨으로써 조기출하가 가능할 것으로 판단된다. 또한 내화학성에서도 우수한 결과를 나타내어 화학적 침식이 발생하는 부분에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

None.

References

Ahn, T.H., Yang, K.H., Jeon, Y.S. (2021). Evaluation on workability and compressive strength development of concrete using modified fly-ash by vibration grinding, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **9(1)**, 66-74 [in Korean].

Cho, W.J., Pakr, K.P., Ann, K.Y. (2022). Freeze–thaw resistance of alkali activated ternary blended cement incorporated with ferronickel slag, *Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute*, **10(2)**, 159–167 [in Korean].

Heo, J.O., Lee, J.K., Hyung, W.G. (2014). Properties of non–sintered hwangtoh mortar using eco–friendly inorganic binding material, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **26(4)**, 499–506 [in Korean].

Heo, Jo., Lee, JK., Hyung, WG. (2014) Properties of Non–Sintered Hwangtoh Mortar Using Eco–Friendly Inorganic Binding Material, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **26(4)**, 499–506.[in korean]

Kim, C.Y., Ann, K.Y. (2023). Durability evaluation of cement concrete using ferrosilicon industrial byproduct, *Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute*, **11(1)**, 89–96 [in Korean].

Kim, S.C., Park, D.K., Yoog, G.C. (2016). Evaluation on the applicability of recycled fine aggregate to precast concrete products, *Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute*, **4(1)**, 1–9 [in Korean].

Kim, Y.J. (2022). The quality properties of quaternary component blended high fluidity concrete using industrial by–products for carbon neutrality, *Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute*, **10(4)**, 506–513 [in Korean].

KS F 2403 (2019). Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens, Korea Standards & Certification, Korea [in Korean].

KS F 2421 (2019). Standard Test Method for Air Content of Fresh Concrete by the Pressure Method, Korea Standards & Certification, Korea [in Korean].

KS F 4010 (2019). Reinforced Concrete Flumes And Bench Flumes, Korea Standards & Certification, Korea [in Korean].

Lee, Y.J., Jee, N.Y., Kim, J.H. (2007). The experimental study for application of alkali activated slag concrete, *Journal of Architectural Institute of Korea*, **23(2)**, 99–106 [in Korean].

Yang, K.H., Song, J.K (2007). The properties and applications of alkali–activated concrete with no cement, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **19(2)**, 42–48 [in Korean].

Yoo, S.W., Yang, I.H. (2016). Structural capacity of water channel fabricated of blast furnace slag concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **4(4)**, 446–453 [in Korean].

산업부산물을 이용한 콘크리트 벤치플룸의 성능평가

기존 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 제작한 수로관은 시멘트의 수화생성물이 산에 취약한 특성으로 인하여 열화가 빠르게 진행되고 내구성이 저하되는 문제점이 발생되고 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 산업에서 발생하는 산업부산물인 고로슬래그와 플라이 애시를 이용하여 수로관을 제작하고 그 특성을 분석하였다. 실험결과 굳지 않은 콘크리트에서 슬럼프는 플라이 애시의 볼베어링작용으로 인해 증가되는 경향을 나타내었고, 공기량은 미연탄분으로 인해 감소되어 내동해성에 대한 대책이 필요할 것으로 나타났다. 또한 압축강도는 증기양생을 통해 초기강도가 증가되었고, 슬래그 50 %이상의 배합에서는 OPC와 동등이상의 결과가 나타났다. 내산성결과는 질량감소율이 5 % 미만으로 나타나 내구성에 우수한 성능을 나타내었고, 벤치플룸의 휨파괴하중도 KS기준을 모두 상회하여 상용화가 가능할 것으로 판단된다.