



폐석탄회를 이용한 고성능 슛크리트의 내구특성 평가

박철우¹⁾ · 이현기²⁾ · 강태성^{2)*}

¹⁾강원대학교 토목공학과 ²⁾한양대학교 토목공학과

Evaluation of Durability Characteristics of High Performance Shotcrete Using Fly Ash

Cheol-Woo Park,¹⁾ Hyeon-Gi Lee,²⁾ and Tae-Sung Kang^{2)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, Samcheok 245-711, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

ABSTRACT The industrial by-product market has increased at a geometric rate worldwide with the rapid economic growth. At present time, conventional disposal methods of industrial by-products in Korea including landfill, incineration and storage already have reached their limits. In this study, the industrial by-products such as fly ash and silicafume were used as mineral admixtures, which are commonly added to concrete mix to enhance the economic efficiency, long-term strength and durability of concrete, to determine the optimized mix proportion of high performance shotcrete. Through the series of tests (compressive strength test, accelerated chloride ion penetration test, measurement of chloride diffusion coefficient). The results of the study showed that the proposed mix proportions satisfied the requirements of domestic as well as international guidelines for shotcrete, with a higher durability than the existing shotcrete.

Keywords : industrial by-products, fly ash, silica fume, shotcrete, durability characteristics

1. 서 론

국내 산업이 발전함에 따라서 산업부산물이 기하급수적으로 늘어가고 있다. 국내외 장기전력 수급계획에 따르면 국내 석탄 화력발전의 설비용량은 Fig. 1과 같이 1990년 유연탄 268만 kW, 무연탄 120만 kW, 총 370만 kW에서 2006년에는 유연탄 1,716만 kW, 무연탄 60만 kW로 총 1,776만 kW로 4.8배 증가되었다. 이에 따른 석탄회 발생량은 1990년 180만톤에서 2006년에는 550만톤으로 2010년경에는 600만톤으로 증가될 것으로 전망되고 있다. 산업부산물 중 석탄의 연소과정에서 발생하는 석탄회는 산업폐기물로서 막대한 처리비용과 함께 매립장의 부족 등 여러 가지 문제점을 야기시키고 있다. 폐석탄회는 어떻게 하면 여러 분야로 재활용할 수 있는가의 문제가 오늘날 당면과제로 제기되는 바 이러한 해결을 위해 매립장에 폐기 처리되고 있는 석탄회를 적극적으로 활용하고자 한다.

더불어 현재 국내의 경제적인 진보와 함께 최근 사회

기반 시설의 확충 및 급속한 경제 성장으로 인해 국토 이용의 효율성을 위하여 터널 및 지하 공간 건설 공사가 증가하고 있으며, 터널 및 지하 공간 건설시 주요 지보재로 사용되고 있는 슛크리트 공법 역시 적용이 확대되고 있다. 따라서 이 연구는 산업부산물을 구조재료인 시멘트에 혼입함으로써 산업부산물의 재활용 효과를 극대화시키기 위한 방안으로, 슛크리트 전용 시멘트로 활용하는데 그 목적이 있다.^{1,2)}

일반적으로 슛크리트는 본질적으로 보통 콘크리트와 같으나 압축공기로 뿜어 붙여 시공을 한다는 점에서 일반 콘크리트와 차이를 나타낸다. 즉 슛크리트는 터널 굴착 이후에 굴착 면에 급결성의 콘크리트를 뿜어 붙여서 밀착시킴으로써 원지반의 표층부와 협동해서 원지반 내부의 이완을 억제하고, 표면의 요철을 매끄럽게 마무리함으로써 응력집중에 의한 원지반 균열의 발달을 억제함과 동시에 대기작용에 의한 암반의 풍화를 방지하여 굴착면의 안정을 도모하는 것이다.^{3,4,8)} 특히 터널, 철도 및 지하 공간의 활용에 그 중요성이 더욱 크게 부각되고 있으며, 이런 추세에 발맞추어 국외의 경우 슛크리트의 고강도 및 고내구화를 목적으로 고품질 혼화재 및 고성능 급결제를 적용한 슛크리트 관련기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 아직까지 국내 슛크리트 관련 기술

*Corresponding author E-mail : bigstar@hanyang.ac.kr

Received August 10, 2009, Revised January 29, 2010,

Accepted March 5, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

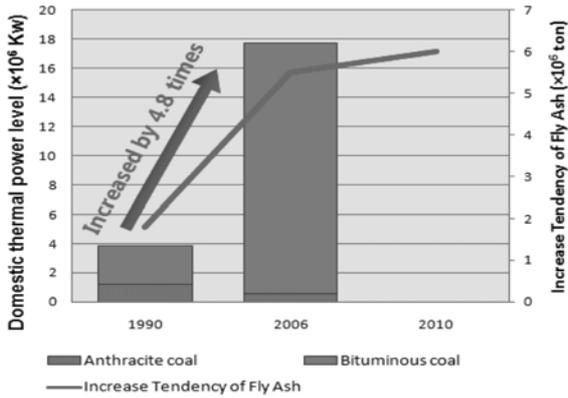


Fig. 1 Domestic thermal power level and increase tendency of fly ash

은 국가적인 제도의 미비와 재료의 단가 부담 등으로 선진국에 비해 상당히 낮은 수준이다.⁵⁻⁷⁾

따라서 이 연구에서는 경제적 재활용과 내구성 향상을 위해 산업부산물인 플라이애쉬와 실리카폼, 급결제를 적절히 혼합하여 슛크리트 현장에 적용할 수 있는 적정 배합비에 선정하고자 한다. 또한 슛크리트 특성상 초기재령에서의 압축강도가 중요하므로 초기재령에서의 강도 특성 및 외부 환경 변화에 따른 내구성능을 평가하기 위하여 압축강도시험, ASTM C1202, NT Build 492, 동결융해저항성 시험을 실시하였으며 외부환경에 대한 각각 내구특성을 평가하였다.

2. 사용 재료 및 배합설계

2.1 시멘트 및 골재

이 연구에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 적합한 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 굵은골재 최대치수는 10 mm 쇄석을 사용, 잔골재 비중은 2.61, 조립률은 2.65강사를 사용하였다.

2.2 혼화제

콘크리트가 소정의 워커빌리티를 얻기 위해 단위수량을 감소시키는 목적으로 사용되는 것으로, 시멘트 입자를 분산시켜 시멘트풀의 유동성을 증대시킴으로써 감수효과를 얻을 수 있다. 감수제에는 표준형 감수제 외에 축진형 감수제, 지연형 감수제 및 고성능 감수제가 있는데, 이 연구에 사용한 혼화제는 고성능 감수제로 암갈색의 액체로 비중은 $1.20 \pm 0.2(20^\circ\text{C})$, pH는 $7 \pm 1(20^\circ\text{C})$ 의 물성치를 가진다.

2.3 혼화재

2.3.1 플라이애쉬

이 연구에서 사용한 대체재인 플라이애쉬는 석탄을 미

분말 형태의 연료로 사용하는 발전소에서 이를 연소할 때, 굴뚝을 통해 대기 중으로 확산되는 재의 미립자를 집진 장치로 채취한 것이다. 재(ash)를 집진하는 장소에 따라 fly ash, bottom ash, cinder ash로 구분하며, 이 중 플라이애쉬는 화산재와 성질이 같은 물질로 매우 미세한 분말 상태이며 주성분은 SiO_2 와 Al_2O_3 이며 구형의 입자를 가진다.

2.3.2 실리카폼

실리카폼은 실리콘, 페로실리콘, 실리콘메탈 생산산업의 전기로에서 발생하는 부산물로서, 가스형태로 생산되어 포집된 비정질의 산화실리콘(SiO_2)이며 배출가스온도는 800°C 이다. 탄소가 대부분 연소하여 색깔이 백회색인 것을 밀폐형이라 하고, 200°C 에서 미연소 탄소가 남아 색깔이 흑회색인 것을 개방형이라 한다.

이 연구에서 사용한 재료들에 대한 화학 성분 분석 시험을 실시하였으며, 시멘트는 KS L 5120(포틀랜드 시멘트의 화학분석방법)에 준하여 실시하였으며, 플라이애쉬는 KS L 5405(플라이애쉬), 실리카폼은 KS F 2567(콘크리트용 실리카폼)에 각각 준하여 실시하였다. 그 결과 값은 Table 1과 같다.

2.4 급결제

이 연구에서 사용한 급결제는 시멘트 광물의 일종인 칼슘알루미네이트 광물이 주성분으로 자극성이 적어 인체에 대한 위험이 없고 환경오염이 최소화되며 적은 양으로도 급결제가 뛰어나 리바운드가 감소되고 에트르나이트가 형성되어 조기강도와 장기강도 발현에 기여한다. 건식 및 습식시공에 모두 사용할 수 있으며, 현회색의 분말로 진비중 2.76, 부피비중 0.7 ± 0.1 , pH 11.5 ± 0.5 의 물성치를 가진다.

3. 실험 방법

3.1 실험 개요

산업부산물을 이용해 경제적인 재활용과 시공성 및 적용성을 평가하고자 실내실험을 실시하였다. 이 실험에서는 과도한 입경으로 인한 펌프카 노즐의 막힘 현상을 해소하고 다소 낮은 슬럼프에서도 시공이 용이하여 우수한 시공성을 확보할 수 있도록 한국산업규격(KS)⁹⁾에 의거해 골재최대치수를 10 mm로 적용하였다. 또한 산업부산물의 종류별 치환량에 따른 성능평가를 위해 목표슬럼프

Table 1 Results of chemical constituent analysis

Unit (%)	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO
Cement	21.5	2.97	5.00	61.4	3.77
Silica fume	92.5	0.47	1.47	0.37	0.28
Fly ash	47.5	10.1	18.1	14.4	2.79

는 80~100 mm, 목표공기량은 4~6%로 하여 국내에서 규정하고 있는 슛크리트용 콘크리트의 압축강도를 만족하는 범위를 확인하고자 하였다. 콘크리트의 내구특성은 여러 가지 방법에 의해 평가될 수 있다. 그 중에서도 ASTM C1202, NT Build 492, 압축강도시험, 동결융해저항성 시험을 하였다.^{9,11)}

이 연구에서는 참고문헌을 토대로 산업부산물물의 적용성을 평가하기 위하여 산업부산물 종류별 치환량을 플라이애쉬(5%, 10%, 12%, 15%, 17%, 20%)와 실리카폼(7%)을 치환하여 사용하였다. 혼화재 치환량에 따른 각각의 변수들의 특징은 Table 2와 같다. 이때의 변수에 대한 배합은 Table 3과 같다.¹²⁾

3.2 실험 개요

3.2.1 압축강도 실험

압축강도 측정을 위해 KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법에 의하여 $\phi 100 \times 200$ mm의 실린더형 공시체를 재령 1일, 3일, 28일에 산업부산물 혼화재료의 종류와 첨가량에 따라 각각 10가지 변수별로 제작하여 압축강도

Table 2 Experimental variable definition

Specimens	Contents	Notes
Plain	No. mineral admixture	Cement mineral accelerator 5%
PS7	Silica fume 7%	
PS7F5	Silica fume 7% Fly ash 5%	
PS7F10	Silica fume 7% Fly ash 10%	
PF5	Fly ash 5%	
PF10	Fly ash 10%	
PF12	Fly ash 12%	
PF15	Fly ash 15%	
PF17	Fly ash 17%	
PF20	Fly ash 20%	

Table 3 Mixing properties

Mix No.	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight (kg/m ³)						SP		Target slump 80~120 mm	Target air 4~6%	
			W	B	C	SF	F/A	S1	G	(C×%)			(kg/m ³)
Plain	45	60	190	422	422	0	0	988	644	2	8.4	10	6
PS7					393	30	0	983	640			8.5	5.8
PS7F5					372	30	21	978	637			9.5	4.8
PS7F10					350	30	42	973	634			8	4.8
PF5					401	0	21	983	640			10	5.8
PF10					380	0	42	978	637			11.5	5.6
PF12					372	0	51	977	636	1.9	8.022	10	5
PF15					359	0	63	974	634	1.00	4.222	11.5	4.9
PF17					350	0	72	972	633	0.75	3.167	10	4
PF20					338	0	84	969	631	0.65	2.744	10	3.5

를 측정하였다. 공시체는 23±2°C, 상대습도 50%의 양생실에서 1일 양생 후 23±2°C의 항온 조건에서 수중양생을 실시하였다.¹³⁾

3.2.2 염소이온 침투 시험

염소이온 침투시험은 ASTM C1202-91의 방법에 의거하여 수행하였다. 7일, 28일 수중양생한 원형 공시체를 50 mm가 되도록 절단한다. 실험시 시편은 Applied Voltage Cell 에 고정시키고 회로 구성을 한다. 이 때 사용되는 저항으로는 콘크리트 시편에 적용되는 전압에 영향이 적도록 하기 위하여 가능한 작은 저항을 사용하는 데 이 실험에서는 0.1Ω을 사용하였다. 시험 중 30분마다 0.1Ω의 저항에 걸리는 전압을 데이터로거로 측정하여 기록한다. Fig. 2는 산업부산물 혼입량에 따른 변수들을 셀에 고정시켜 회로를 연결한 사진이다.¹³⁾

3.2.3 염화물 확산계수 시험

염화물 확산계수 시험은 유럽의 표준인 NT Build 492에 준하여 실시하였으며, 시료는 재령 14일 고온수열 콘크리트의 원주형 시험체를 두께 50±2(mm)로 중간부를 절단하여 규준에 따라 측정시료의 전처리를 마쳤다. 염화물이온 확산계수 시험체를 고온수열 콘크리트의 가열 온도에 따라서 10~50(V)의 전압을 20시간 가한 후, 시료

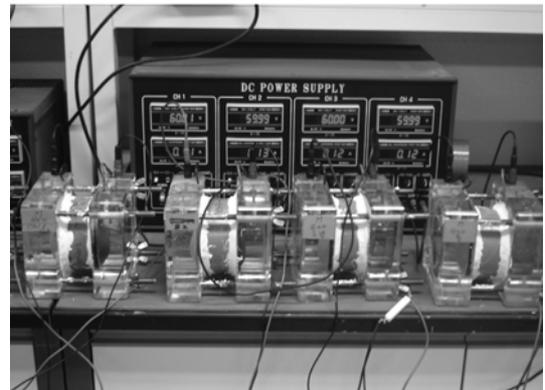


Fig. 2 Photograph of chloride ion penetration resistance test

의 절단면에 질산은을 분무하여 염화물이온 침투깊이를 측정하였다.¹⁴⁾ 염화물이온 침투 깊이는 Fig. 4와 같이 시료를 할렬 인장파괴 시킨 후 가장자리를 제외한 부분을 평균내어 산출하였고, Fig. 3은 염화물확산계수 측정 실험 사진이다.

3.2.4 동결융해 저항성 시험

동결 융해 시험은 실험 실내에서 동결융해의 급속 반복 사이클에 대한 콘크리트 공시체의 동결융해 저항성을 측정하기 위한 시험방법으로써 KS F 2456에 준하여 실험을 실시하였다. 이 연구에서는 기중급속 동결융해 시험을 실시하였다.

시험체는 14일간 표준 양생 100 × 100 × 400 mm의 각주 공시체를 사용하며 양생 후 초기 동탄성계수를 측정하고 시험체를 급속 동결융해 시험기에 넣고 Fig. 5와 같이 동결융해 시험을 실시하면서 매 30 cycle 마다 진동주파수를 측정하여 상대동탄성계수를 측정하였다. 동결융해 종료 사이클은 300 cycle이며 시험체가 실험 진행 중 시험 시작 전 측정한 초기 동탄성계수보다 동탄성계수가 60% 이하로 떨어지면 해당 시험체는 실험을 종료하였다. 상대동탄성계수(relative dynamic modulus of elasticity)를 이용하여 내구성 지수(DF)를 평가하였다. 내구성지수는 최초의 상태를 100으로 하며 동결융해 진행 과정에서 내구성지수가 60이하로 나타나면 내구성 상실로 판정한다.¹⁵⁾



Fig. 3 Photograph of arrangement of the migration set-up



Fig. 4 Photograph of measurement of chloride

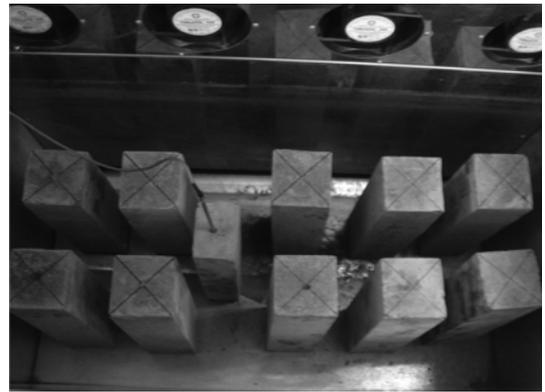


Fig. 5 Photograph of arrangement of the freezing-thawing repeat test set-up

4.1 실험 결과

4.1.1 압축강도 결과

산업부산물을 혼합한 슛크리트의 배합비에 따른 콘크리트의 재령 1일, 3일, 28일 압축강도 비교 결과를 Table 4, Fig. 6에 나타내었고, Table 5와 같은 현행 기준을 만족하였는지 비교하였다.

재령 1일의 경우에는 플레인을 제외한 변수 중 PS7이 가장 높은 강도를 발현하였고, 플라이애쉬를 혼합한 슛

Table 4 Compressive strength test result

Specimen	1 day (MPa)	3 days (MPa)	28 days (MPa)
Plain	16.9	23.4	34.1
PS7	16.6	25.1	33.3
PS7F5	13.5	19.9	29.0
PS7F10	13.0	17.6	29.0
PF5	16.1	22.9	25.4
PF10	13.2	22.1	25.7
PF12	12.9	21.5	31.1
PF15	6.8	19.8	31.0
PF17	5.9	19.6	30.6
PF20	5.6	17.0	29.8

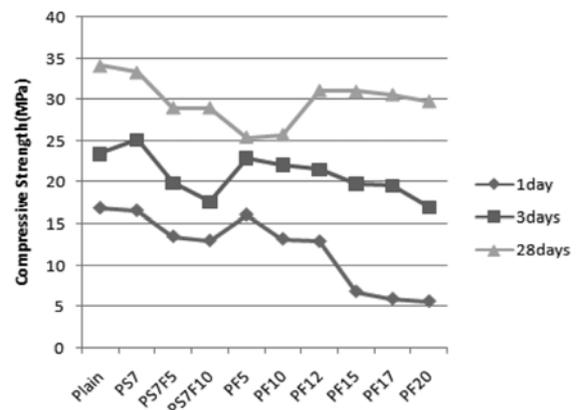


Fig. 6 Compressive strengths with five types of coal-ashy up to 28 days

Table 5 Institute of compressive strengths standard for curing time

Standard	1 day (MPa)	3 days (MPa)	28 days (MPa)
Korea Concrete Institute	5~10	-	18
Tunnel Standard Specification	10	-	21
Highway Corporation Standard Specification	10	14	20
Japan Concrete Institute	5~10	-	18

크리트의 경우 PF5가 가장 좋은 결과를 나타내었으며 12%이상 혼입한 경우에는 오히려 초기강도가 현저히 저하하는 것을 볼 수 있었지만 국내의 현행기준은 모두 만족하고 있었다.

재령 3일 강도의 경우, 변수 중 PS7이 가장 높은 강도 발현을 하였고, 플라이애쉬 배합비가 증가함에 따라 점차 낮아졌다. 또한 모든 변수가 기준에 만족하였다.

재령 28일 강도의 경우, 재령 1일에서 낮은 강도 발현을 보였던 플라이애쉬 15% 이상에서 높은 강도 발현을 보였다. 이는 숏크리트에 플라이애쉬를 혼입할 경우 장기강도에 효과가 있는 것으로 판단된다. 재령 1일의 경우 플라이애쉬 첨가량 15% 이상일 때 현저히 강도저하 현상이 발생하였지만 그 외의 경우를 보면 플레인의 ± 5 MPa로 차이가 크지 않을 것을 알 수 있었고, 28일의 경우 그 차이가 더욱 저감되었고, 15%이상의 배합비에 서도 강도가 발현되었음을 확인할 수 있었다.

플라이애쉬의 경우 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 첨가량을 증가시킬수록 강도를 저감시키지만 산업부산물을 재활용 한다는 측면에서 현행기준을 만족하는 강도의 적절한 배합비를 산정할 수 있었다.

4.1.2 염소이온 침투시험 결과

배합비에 따른 제작된 콘크리트 공시체의 염소이온 침투저항성의 척도가 되는 총 통과전하량 측정 결과 및 염소이온 침투성 판정 결과는 Table 7과 같이 나타났다.

KS F 2711에 의한 총 통과전하량으로 염소이온 침투저항성 비교 결과, Fig. 7에 나타난 바와 같았다. 재령 7일의 경우 모든 변수의 통과전하량은 4,000 이상으로 염소이온 침투성이 높았고, 이 중 실리카폼을 혼합한 경우 다른 변수에 비해 낮은 전하량을 보였다. 재령 28일의 경우 통과전하량이 모두 감소하였으며, 변수 PS7, PS7F5의 경우에는 Table 6에 나타난 바와 같이 정성적 평가에

Table 6 Classification of chloride ion penetration standard for coulombs

Classification	Coulombs	Remarks
I	4,000	High
II	2,000~4,000	Moderate
III	1,000~2,000	Low
IV	100~1,000	Very low
V	100	Negligible

Table 7 Chloride ion penetration test result

Specimen	Coulombs			
	7 days		28 days	
Plain	17,157	High	4,370	High
PS7	7,707	High	1,763	Low
PS7F5	7,453	High	1,707	Low
PS7F10	7,014	High	2,375	Moderate
PF5	16,248	High	4,778	High
PF7	16,074	High	5,170	High
PF10	16,035	High	5,444	High
PF12	14,427	High	4,755	High
PF15	14,216	High	6,239	High
PF20	13,577	High	4,910	High

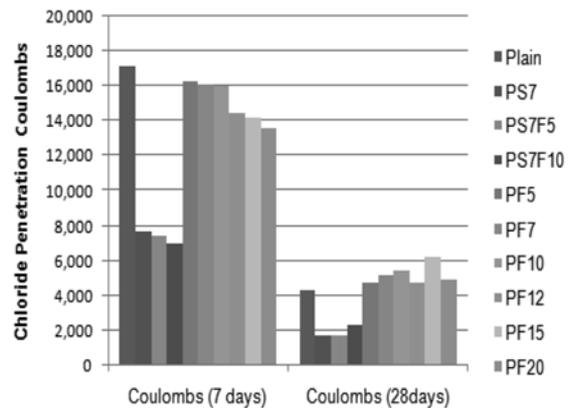


Fig. 7 Chloride ion penetration with ten types of coal-ashy up to 28 days

따라 낮음의 판정 결과가 나왔고 PS7F10은 보통의 판정이 나왔다. 실리카폼을 사용한 배합에서는 모두 낮은 침투성을 나타내었으며 실리카폼을 사용하지 않은 배합은 높은 침투성을 나타내었는데 이것은 실리카폼이 시멘트 사이의 공극을 충전하는 마이크로 필러 효과가 있으며 수산화칼슘과 결합하여 포졸란 반응에 의해 미세한 공극을 감소시켜 공시체의 내부를 치밀하게 한 것으로 판단된다.¹⁾ 따라서 실리카폼의 사용으로 인하여 숏크리트의 침투저항성을 향상시킬 수 있는 것으로 볼 수 있다.

4.1.3 염화물 확산계수 시험 결과

염화물이온 확산시험은 유럽의 시험규준인 NT Build 492에 준하여 실시한 결과 플라이애쉬, 실리카폼 배합비에 따른 염화물 확산계수 결과 값은 Table 8과 같이 나타났다. 염화물이온 침투깊이는 시험이 종료한 후 Fig. 4와 같이 시험편을 할렬하여 0.1 N AgNO₃를 분무하였을 때 변색되는 부위를 사진과 같이 버니어캘리퍼스를 사용하여 측정하였다. 염화물 침투 깊이 측정한 값은 Fig. 8, 그 값을 식에 대입하여 나타난 염화물 확산계수 값은 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다.

배합비에 따른 변수들의 염소이온 침투저항성 비교 결

Table 8 Chloride penetration test result

Specimen	Chloride penetration depth (mm)	Non-steady-state migration coefficient ($10^{-12}m^2/sec$)
	14 days	
Plain	17.667	11.839
PS7	6.167	2.895
PS7F5	6.750	3.321
PS7F10	6.750	3.266
PF5	12.000	10.329
PF10	13.250	11.296
PF12	12.500	8.224
PF15	13.750	9.063
PF17	12.417	8.035
PF20	13.667	8.962

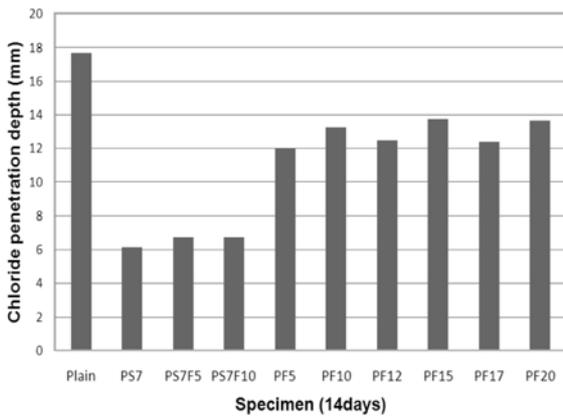


Fig. 8 Chloride penetration depth test result

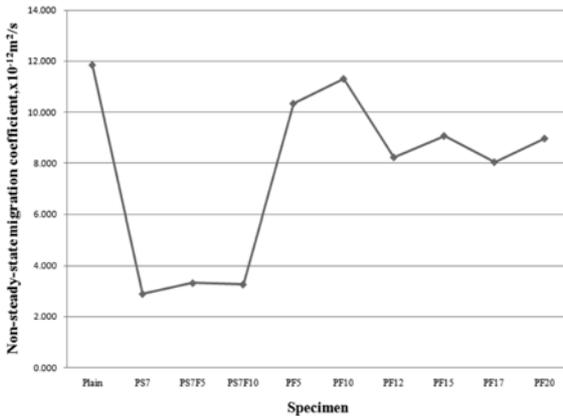


Fig. 9 non-steady-state migration coefficient test result

과 ASTM C1202-91과는 염화물 확산계수 값들과는 다소 차이가 있었지만 비슷한 경향을 보였다. 실리카폼을 배합한 시험체의 경우 다른 변수들에 비해 염화물 확산계수 값이 낮은 값을 나타내었고, 플라이애쉬를 배합한 경우에서도 플레인보다 낮은 값을 나타내었다. 따라서 플라이애쉬의 경우 산업부산물의 재활용의 측면뿐만 아니라 쏫크리트의 내구성에 기여한다는 측면에서도 필요요소로 판단된다.

Table 9 The results of freeze and thaw test

Specimens	Relative dynamic modulus (%)	Durability factor	E_D/E_S
Plain	100.6	100.6	1.14
PS7	97.4	97.4	1.09
PS7F5	97.6	97.6	1.07
PS7F10	96.9	96.9	1.04
PF5	100.3	100.3	1.16
PF10	99.4	99.4	1.15
PF12	97.9	97.9	1.06
PF15	99.7	99.7	1.13
PF17	95.3	95.3	1.09
PF20	98.6	98.6	1.09

4.1.4 동결융해 저항성 시험 결과

동결융해 반복 후 영구지보재로서 고성능 쏫크리트의 초기와 동결융해 반복 300 cycle의 공명진동주파수와 상대동탄성계수 측정 결과 Table 9에 정리하였다. Table 9에서 보는 바와 같이 모든 배합에서 동결융해 반복 300 cycle까지 상대동탄성계수가 90% 이상으로 나타나 기준인 60% 이상의 우수한 동결융해 저항성을 보여주었고, E_D/E_S 의 비율이 1.04~1.37의 범위를 벗어나지 않았다. 이는 동결융해 저항성에 가장 큰 영향을 미치는 공기량의 범위를 이 연구에서는 모든 배합에서 4~6%로 고정하였기 때문에 동결융해 저항성이 우수하게 나타났다. 일반적으로 공기량이 증가하면 동결융해 저항성이 증가하는 것으로 알려져 있다. 그러나 공기량을 크게 증가시키면 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치기 때문에 강도에 크게 영향을 미치지 않는 범위에서 공기량을 확보하여야 한다. 이 연구에서는 이와 같은 내용을 고려하여 공기량의 범위를 4~6%로 결정하여 적용하였으며 따라서 각 배합마다 동결융해 저항성에 작은 차이는 나타나고 있으나 그 범위는 크지 않은 것으로 나타났다.

5. 결 론

이 연구에서는 산업부산물을 혼입한 쏫크리트의 초기 재령에서의 강도 특성 및 내구특성을 알아보기 위하여 실리카폼, 플라이애쉬의 첨가량에 따라 압축강도, 염소이온 침투시험, 염화물 확산계수 시험, 동결융해 저항성 시험 등을 수행하였다. 이러한 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었으며, 이러한 결과들은 산업부산물을 재활용하는 측면 고내구성의 쏫크리트를 만드는 데 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

- 1) 산업부산물 혼화제를 사용한 쏫크리트의 각각 내구성 시험 결과 압축강도의 경우 국내외의 재령별 압축강도 기준을 모두 상회하였고, 플라이애쉬만 혼입한 경우 장기강도에 어느 정도 효과를 보였고, 초기강도를 고려하였을 때, 실리카폼의 혼입량과 적정량을 산정하는 것이 중요함을 알 수 있다.

- 2) 염소이온 침투시험의 경우 초기 재령에서 각각의 변수가 투수율 감소 효과를 보이진 못하였지만 재령 28일에서는 실리카폼을 혼입한 경우 통과전하량이 4000이하로 뛰어난 투수율 감소효과를 보였다.
- 3) 염화물 확산 계수 시험에서는 플라이애쉬의 혼입량과 통과전하량의 사이에 뚜렷한 경향을 보이진 않았지만 플레인보다 낮은 통과전하량을 나타내어 플라이애쉬의 경우 시멘트만 사용한 슛크리트에 비해 투수율 감소에 효과가 있는 것으로 판단된다.
- 4) 동결융해 저항성 시험 결과 배합설계시 공기량의 범위를 4~6%로 고정하였기 때문에 모든 변수들의 동결융해 반복 300 cycle까지 상대동탄성계수가 90% 이상으로 우수한 동결융해 저항성을 보여주었고, 그 차이 또한 크지 않은 것으로 나타났다.
- 5) 이 연구에서 플라이애쉬 혼입량에 의한 변수들에 대한 각각의 내구특성을 알아본 결과 적절한 플라이애쉬 혼입은 산업부산물의 재활용 측면뿐만 아니라 슛크리트의 내구성에 기여한다는 측면에서도 필요한 요소로 판단된다.
- 6) 실내시험 및 현장시험 등과 같은 지속적인 연구가 진행된다면, 산업부산물을 활용한 고성능 슛크리트의 현장적용으로 인한 시공성, 품질, 환경 및 경제성 부분에 큰 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 강원대학교 캠퍼스간 공동연구 지원사업에 의해 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 원종필, 성상경, 박해균, 이명섭, “C12A7계 광물계 급결

- 제를 사용한 슛크리트의 내구특성,” 대한토목학회 논문집, 25권, 3C호, 2005, pp. 235~240.
2. 원종필, 이용수, 이준자, “Bottom Ash를 재활용한 저장도 고유동 재료의 내구성 및 환경영향 평가,” 콘크리트학회 논문집, 14권, 2호, 2002, pp. 223~230.
3. 국토해양부, 터널설계기준, 1999, pp. 31~33.
4. 국토해양부, 터널표준시방서, 1999, pp. 41~45.
5. 백신원, 정덕추, 김의성, “혼화재 종류가 슛크리트 내구성에 미치는 영향에 관한 연구,” 산업안전학회지, 19권, 2호, 2004, pp. 98~103.
6. 박해균, 이명섭, 김재권, “영구 슛크리트 터널 라이닝 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발(I),” 콘크리트학회지, 15권, 3호, 2003, pp. 66~73.
7. 원종필, 김황희, 박경훈, 이시원, “급결재 종류 및 실리카폼 치환율에 따른 영구지보재로서 슛크리트의 배합설계 및 성능 평가,” 대한토목학회 논문집, 27권, 2C호, 2007, pp. 157~162.
8. 원종필, 김황희, 장창일, 이상우, “대형 지하공간의 영구 지보재로서 고성능 슛크리트의 내구 특성,” 콘크리트학회 논문집, 19권, 6호, 2007, pp. 701~706.
9. KS F 2577, “스�크리트용 재료,” 지식경제부 기술표준원, 2002, pp. 1~4.
10. ACI Committee 506, “Guide to Shotcrete,” ACI 506R-90, 1995, pp. 1~40.
11. ACI Committee 506, “Specification for Materials, Proportioning and Application of Shotcrete,” ACI 506.2-90, 1995, pp. 1~8.
12. KS F 2405, “콘크리트의 압축 강도 시험 방법,” 지식경제부 기술표준원, 2002, pp. 1~16.
13. KS F 2711, “전기 전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험 방법,” 지식경제부 기술표준원, 2002, pp. 1~16.
14. NT Build 492 “Concrete Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady Migration Experiments,” 1999, pp. 1~8.
15. KS F 2456, “급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법,” 지식경제부 기술표준원, 2003, pp. 1~10.

요 약 최근 국제적으로 급속한 경제성장으로 인한 산업부산물이 기하급수적으로 증가하고 있다. 현재 국내 산업부산물은 매립, 소각, 저장과 같은 1차원적인 처리에도 그 한계를 드러내고 있는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 자원재활용을 목적으로 산업부산물을 이용한 고성능 슛크리트용 최적 배합비를 도출하고자 한다. 이 연구에서는 경제적 재활용, 장기강도 및 내구성 향상을 위해 콘크리트에 다양하게 적용되고 있는 혼화재인 산업부산물(플라이애쉬, 실리카폼)을 적용하여 슛크리트 현장에 적용할 수 있는 적정 배합비에 대한 변수를 설정하여 압축강도 실험을 수행하였고, 외부 환경 변화에 따른 내구성을 평가하기 위하여 촉진염소이온침투시험 및 염화물확산계수측정시험을 실시하여 외부환경에 대한 내구특성을 평가하였다. 실험 결과 모든 실험에서 국내외 기준을 만족하였고, 내구성에서는 기존 슛크리트 보다 뛰어난 것으로 나타났다.

핵심용어 : 산업부산물, 플라이애쉬, 실리카폼, 슛크리트, 내구특성