



Rice Husk Ash와 실리카폼을 혼입한 초기재령 콘크리트의 내구성능 평가

Velu Saraswathy¹⁾ · 권성준^{2)*}

¹⁾Central Electro Chemical Research Institute, India ²⁾한남대학교 건설시스템 공학과

Durability Performance Evaluation On Early-Aged Concrete with Rice Husk Ash and Silica Fume

Velu Saraswathy¹⁾ and Seung-Jun Kwon^{2)*}

¹⁾Corrosion Protection Division, Central Elctro Chemical Research Institute, India

²⁾Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

ABSTRACT Currently, lots of researches have been performed for reducing cement usages due to increasing social/engineering problems caused by CO₂ emission. Supplementary cement materials like fly ash, slag, and silica fume are usually employed for cement replacement, and nowadays rice husk ash (RHA) is widely studied for enhancement of concrete performance as mineral admixture. In this paper, concrete samples with RHA and SF which is known for its engineering advantages are prepared and a resistance to chloride attack is evaluated in early-aged concrete. For the work, replacement ratios of 10~30% for RHA concrete and 2~8% for SF concrete are considered, and various durability tests such as density, void, sorptivity, current measurement, and chloride diffusion coefficient are performed including mechanical test like compressive and tensile strength. Replacement of RHA 10~15% shows better improvement of corrosion resistance and strength than that of SF 2~4% and normal concrete, which shows a strong applicability for utilization as construction materials.

Keywords : RHA(Rice Husk, Ash), Silica fume, Durability, Steel corrosion, Early-aged concrete

1. 서 론

콘크리트는 최근 150년 동안 가장 많이 사용되고 있는 건설재료로서 성형성, 재료수급의 안정성, 내구성 등 많은 공학적인 장점을 가지고 있다. 그러나 시멘트 1.0 ton을 생산할 때, 0.9 ton 정도 발생하는 이산화탄소는 사회적, 공학적으로 많은 문제를 야기시키고 이를 감소시키기 위해 많은 연구가 집중되고 있다.^{1,2)} 시멘트 첨가량을 줄이면서 공학적 성능을 개선하려는 시도가 일반적이는데, 플라이애쉬(FA: Fly Ash), 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)등이 대표적인 혼화재료로 알려져 있다. 최근 들어 석회석 분말을 직접 시멘트에 혼입하거나 시멘트 자체를 사용하지 않는 지오폴리머에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.^{3,4)} 또한 치환율을 일정수준으로 고정하고 3개 이상의 혼화재료를 혼입한 콘크리트는 장기강도, 내구성능 개선, 워커빌리티와 같은

공학적 성능을 보일 뿐만 아니라 환경부하저감에도 큰 역할을 하고 있다.⁶⁻¹⁰⁾ 시멘트 대체 재료 중에서 국내에서는 다소 생소하지만 POFA (Palm Oil Fuel Ash)나 Rice Husk Ash (RHA)등을 혼화재료로 사용하려는 연구도 꾸준히 진행 중이다.¹¹⁻¹³⁾

이중 RHA는 실리카 폼과 마찬가지로 SiO₂를 다량 포함하고 있으며, 포졸란 반응 및 경제성이 우수하여 최근 들어 인도에서 많이 사용되고 있다.¹²⁻¹⁴⁾ RHA의 구성요소 중 75%는 유기물이며 25% 정도는 소성처리 후 RHA로 변화된다. RHA에 존재하는 다량의 비정형 실리카는 시멘트내의 강알칼리와 반응하여 포졸란 반응을 수반한다. 보통 40°C 정도에서 수분이 있으면 비정형 실리카는 수산화칼슘과 반응하여 CSH 겔을 형성하게 된다.^{7,12,13)} RHA의 뛰어난 포졸란 반응은 다량의 비정형 실리카 성분과 높은 비표면적에 기인하는 것으로 알려져 있으며, 이를 혼입한 콘크리트의 장점은 (1) RHA의 작은 평균 공극크기, (2) 80 Å 정도의 평균공극분포와 다량의 중간크기의 공극에 흡수되는 자유수의 증가에 따른 실질적인 w/c 비의 감소효과, (3) 시멘트 수화반응의 활성화, (4) RHA내의 실리카성분과 시멘트 내의 Ca²⁺, OH⁻, Ca(OH)₂의 수화반응에 따른 다량의 CSH의 형성 등으로 알려져 있다.¹⁵⁾

*Corresponding author E-mail : jjuni98@hannam.ac.kr

Received July 25, 2014, Revised March 2, 2015,

Accepted April 29, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

실제로 토목 및 건축의 구조부재를 제외한 2차 생산품 (블럭, 경계석 등)을 고려하면 고강도는 필요하지 않으며, 이러한 제품들에는 초기강도가 크게 발현되지 않더라도 RHA와 같은 혼화재료를 충분히 사용할 수 있다.

본 연구에서는 대표적 혼화재료인 실리카 폼(SF: Silica Fume)과 RHA를 혼입한 콘크리트에 대하여 역학적 및 내구적 특성을 실험적으로 고찰하고자 한다.¹⁶⁻¹⁸⁾ RHA 콘크리트의 강도특성 뿐 아니라 흡수성, 촉진 염화물 시험, 가압전압을 통한 촉진부식실험 등이 수행되며 실험결과 는 OPC (Ordinary Portland Cement) 콘크리트 및 SF 콘크리트의 공학적 특성과 함께 비교 및 분석되어질 것이다.

2. 실험의 개요

2.1 사용재료(OPC, SF, and RHA)

본 연구를 위하여 1종 보통 포틀랜드 시멘트가 사용되었으며, 일반 강사가 잔골재로 사용되었다. RHA는 650°C에서 소성된 인도산 RHA를 사용하였으며, Elkem사의 실리카폼이 SF 콘크리트 제조를 위하여 사용되었다. Table 1에서는 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 특성을 나타내었으며, Table 2에서는 OPC, SF, RHA의 화학조성을 나타내고 있다. 또한 Table 3에서는 사용된 SF 및 RHA의 물리적 특성을 나타내고 있다.

Table 1 Physical properties of fine and coarse aggregate

	F.M.	Density (g/cm ³)	Absorption (%)
Fine	2.2	2.41	1.2
Coarse	6.4	2.78	0.8

Table 2 Chemical composition of OPC, SF and RHA

Compound (%)	OPC	SF	RHA
SiO ₂	20~21	98.2	85.49
Al ₂ O ₃	5.2~5.6	-	0.13
Fe ₂ O ₃	4.4~4.8	0.3	0.45
CaO	62~63	0.2	3.68
MgO	0.5~0.7	-	1.55
SO ₃	2.4~2.8	0.2	0.05
Loss on ignition	1.5~2.5	0.3	3.02
Na ₂ O	-	-	0.23
K ₂ O	-	-	0.19

Table 3 Physical properties of SF and RHA

Types	Specific gravity	Blaine (g/cm ³)	Particle size (μm)
SF	2.22	210,000	0.09~0.1
RHA	2.06	16,190	10 ~ 30

2.2 배합 및 시험항목

혼화재료의 치환률에 따른 역학적, 내구적 특성을 분석하기 위해 SF은 2%간격으로 2~8%의 수준을, RHA는 5% 간격으로 10~30%수준을 고려하였다. 콘크리트는 w/c 0.52이고 시멘트: 잔골재: 굵은골재 비를 1: 1.8: 3.69로 제조하였다. 또한 시멘트 모르타르에 대해서는 w/c 0.52이고, 시멘트: 잔골재의 비를 1: 3으로 제조하였다. Table 4에서는 시험수준에 따른 배합을 나타내고 있으며, Table 5에서는 본 연구에서 다루어질 실험항목을 나타내었다. 실험시 시멘트 모르타르와 콘크리트로 분류하여 실험을 수행하였는데, 본 연구의 결과는 2차 제품 위주로 제조될 예정이다. 비교적 단기간의 평가를 위한 제품은 시멘트 모르타르를, 철근을 포함하는 내구성 실험은 콘크리트를 사용하여 시험을 수행하였다.

Table 4 Mix proportions for the tests

Mixing level	System (weight replacement)
Control	OPC
SF2	OPC +2% SF
SF4	OPC +4% SF
SF6	OPC+6% SF
SF8	OPC+8% SF
RHA10	OPC+10% RHA
RHA15	OPC+15% RHA
RHA20	OPC+20% RHA
RHA25	OPC+25% RHA
RHA30	OPC+30% RHA

Table 5 Test methods for the work

Classification	Test and the related standards	Sample type
Mechanical test	Compression test -IS 516	Mortar
	Tensile test -ASTM C 496-90	Mortar
Durability test	Density, voids, and water absorption - ASTM C 642-06	Mortar
	Sorptivity - [Non standard method]	Mortar
	Rapid Chloride Penetration Test - ASTM C 1202-09	Concrete
	Accelerated diffusion coefficient - [Nernst Einstein Equation.]	Concrete
	Gravimetric weight loss - ASTM G1-1995	Concrete

3. RHA, SF 콘크리트의 실험

3.1 역학적 성능평가(압축 및 쪼갬인장시험)

압축강도 및 쪼갬인장강도 시험을 수행하기 위해 시멘트 모르타르 시편이 사용되었다. 100×100×100 mm 육면체 몰드가 사용되었으며 타설 24시간 이후 거푸집을 제거하였다. 이후 4주간 수중양생을 수행하였으며, 건조후 압축강도 실험을 수행하였다. ASTM C 496-90에 따라 지름 60 mm, 높이 100 mm 시편을 대상으로 쪼갬인장시험을 수행하였다. 양생 및 거푸집 존치기간은 압축강도 시편과 동일하다. 세 개의 시편이 시험에 각각 사용되었으며 그 평균값을 사용하였다. 2000 kN 용량 UTM이 사용되었으며 재하속도는 140 kN/min로 설정하였다.

3.2 내구적 성능평가

3.2.1 밀도, 공극률, 수분 흡수를 평가

콘크리트의 투수성능은 수화 작용에서 소모된 공극수의 위치에 발생하는 공극과 이로 인한 공극연결구조(connectivity)에 의존한다. 일반적으로 100 Å 미만의 겔공극, 100~100,000 Å 영역의 모세관 공극, 그리고 수 mm에 이르는 기포에 이르기까지 다양한 공극이 콘크리트내부에 형성되며, 이러한 공극은 수분이동의 기본적인 통로뿐만 아니라 염화물 이온과 이산화탄소와 같은 다양한 열화물질의 이동통로가 되기도 한다.¹⁹⁻²¹⁾ ASTM C 642-13에 따라 투수 공극률, 밀도, 수분흡수계수 등을 식(1)~(4)에 따라 도출하였다.

$$W_a = [(B - A) / A] \times 100 \quad (1)$$

$$P_c = [(C - A) / (C - D)] \times 100 \quad (2)$$

$$V_t = [(g_1 - g_3) / g_3] \times 100 \quad (3)$$

$$K_a = [Q / A_s]^2 / t \quad (4)$$

여기서, W_a 는 수분흡수율(%), A 는 건조로에서의 절건 중량(g), B 는 침지 후 표면건조시의 중량(g), P_c 는 투수공극 체적(%), C 는 포화 후 5시간 가열후의 중량(g), D 는 침지상태의 중량(g), V_t 는 총 공극률(%), g_1 은 $A / (C - D)$, g_3 는 겔보기 중량(g)을 나타낸다. 또한 K_a 는 수분흡수계수, Q 는 시간 t 동안 흡수된 수량, A_s (mm²)는 수분이 통과하는 총 표면적이며 t 는 일반적으로 1시간으로 정한다.

3.2.2 침투수분계수(Sorptivity)

침투수분계수는 유입되는 모세관 력을 평가하는 것으로 본 실험에서는 50×50×50 mm의 육면체 몰드가 사용되었다. 시편의 양측면은 에폭시로 실링을 하였으며, 초기

의 중량을 측정하고 1방향 수분유입만을 허용한 뒤, 5분마다 총 한 시간동안 중량을 측정한다. 전체 누적유량을 시간의 제곱근으로 도시하여 그 기울기를 침투수분계수로 정하는데 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 1에서는 실험개요도를 나타내었다.

$$I = S t^{0.5} \quad (5)$$

여기서, I 는 단위면적에 따른 누계수분흡수량, S 는 침투수분계수, t 는 시간(초)를 나타낸다.

일반적으로 RCPT (Rapid Chloride Penetration Test)를 통해서 시멘트계 재료의 내구성을 평가할 수 있으나 혼화재 영향, 내부의 전도성 물질의 영향에 따라 값의 편차가 크게 발생하는데, 침투수분계수는 비교적 쉬운 실험이면서 수분이동을 평가하는데 제한이 거의 없다고 알려져 있다.

3.2.3 전하통과량(RCPT) 및 염화물 확산계수 평가

4주간 수중양생된 콘크리트 시편에 대하여 SF 2%, RHA 10%에 대해 RCPT 시험을 수행하였다. 28일 수중 양생후 100×200 mm 디스크 시편을 이용하여 전하량을 측정하였다. 가압전압은 60 V이며 양쪽 셀에 3%의 NaCl과 0.3N의 NaOH를 채운후 시험을 수행하였다. 30분 간격으로 총 6시간동안 전하량을 측정하였는데, 식(6)에서는 통과 전하량 측정식을 나타낸다.

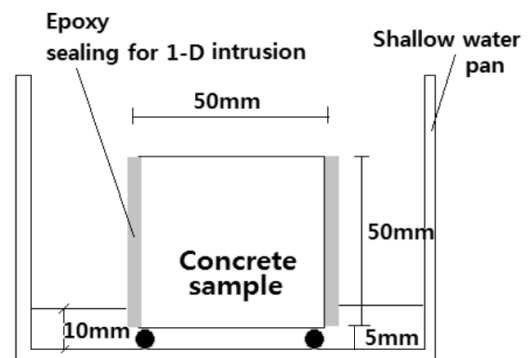


Fig. 1 Schematic diagram for sorptivity coefficient test



Fig. 2 Test setup for RCPT

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (6)$$

여기서 Q 는 통과된 전하량(Coulombs), I_0 는 가압후의 초기전류, I_t 는 t 분뒤에 측정된 전류를 나타낸다. Fig. 2에서는 실험사진을 나타내고 있다.

또한 콘크리트 시편이 120시간 경과 후 정상상태에 도달하였을 때 촉진염화물 확산계수를 도출하였는데, 이는 식 (7)과 같이 Nernst-Einstein방정식을 이용하여 계산하였다.

$$D = \frac{JRTL}{ZFC_0E} \quad (7)$$

여기서 D 는 염화물 확산계수(m^2/s), J 는 염화물 이온의 flux ($mol/m^2.s$), R 은 이상기체상수($8.314J/K.mol$), T 는 시험시의 절대온도($300K$), L 은 시편의 두께(m), Z 는 염화물이온의 발란스 상수($=1.0$), F 는 패라데이상수($9.648 \times 10^4 J/V.mol$), C_0 는 초기 염화물 이온농도(mol/l), E 는 가압전압($60 V$)을 나타낸다.

3.2.4 촉진부식실험

다양한 치환률을 가진 RHA 및 SF 콘크리트에 대해 촉진부식실험을 수행하였다. 50×100 mm 실린더 시편의 중앙에 지름 12 mm, 길이 70 mm의 철근을 매립하였으며 4주간 양생후 실험을 수행하였다. 전해질로는 5%의 NaCl 용액이 사용되었으며, 12 V의 전압을 인위적으로 가압하였다. 시간에 따른 전류(anodic current)가 측정되었으며,

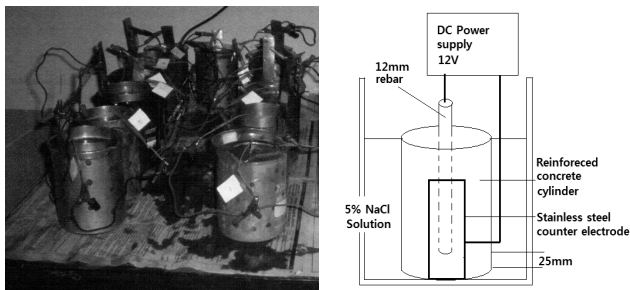
초기균열을 나타내는 시간을 육안으로 판별하여 기록하였다. 3개의 시편이 제조되어 평균값을 사용하였는데, Fig. 3에서는 실험의 개요도 및 실험사진을 나타내고 있다.

3.2.5 중량변화를 평가

본 실험은 부식에 따른 철근중량변화를 평가하는 것으로 150 mm의 육면체 크기의 모르타르가 제조되었다. 한 쪽면에 대해 피복두께를 25 mm로 고정시키고 12 mm 지름, 70 mm 길이의 철근을 두 개 사용하여 전위차를 야기하였다. 4주 양생된 모르타르 시편에 대해 60일간 건조/습윤을 반복하였으며 이후 ASTM G1-1995에 따라 부식을 제거한 후 중량을 측정하였다. 초기중량과의 차이를 이용하여 식(8)과 같이 부식전류를 측정하였다. 건조/습윤 반복은 1주일 단위로 15% NaCl에 침지하고 이후 40°C, 상대습도 60%에 존치하였다. 매립된 철근의 단부는 에폭시 코팅을 하여 국부부식을 방지하도록 하였는데, 피복위치에 있는 철근부식이 시작되면서 심부에 있는 철근과 전류가 형성하게 된다. 각 단부에는 터미널을 조립하여 과전류를 방지하고 10Ω의 저항을 사용하여 부식전류를 측정하였다. Fig. 4에서는 촉진부식실험의 개요도를 나타내고 있다.

$$C_r = (3650 \times W) \frac{1}{DAT} \quad (8)$$

여기서 C_r 은 corrosion rate(mm/year), W 는 중량손실(mg), D 는 철의 밀도(g/cm^3), A 는 철근의 면적(cm^2), T 는 시간(day)를 나타낸다.



(a) Photo for test (b) Schematic representation

Fig. 3 Test setup and schematic diagram for impressed voltage test

4. RHA, SF, OPC 콘크리트의 역학적, 내구적 특성 평가

4.1 역학적 특성 평가

10~30%의 치환률을 가지는 RHA 모르타르와 2~8%의 치환률을 가지는 SF 모르타르에 대한 압축강도 및 인장

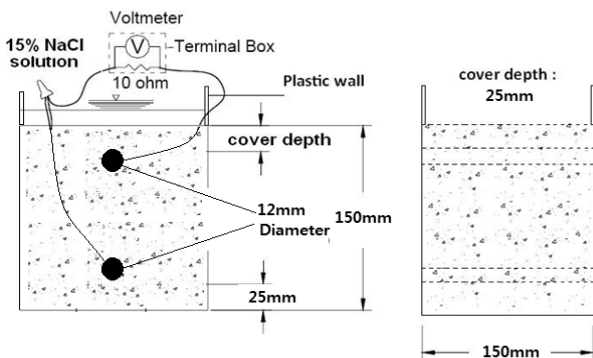


Fig. 4 Schematic diagram for accelerated corrosion test

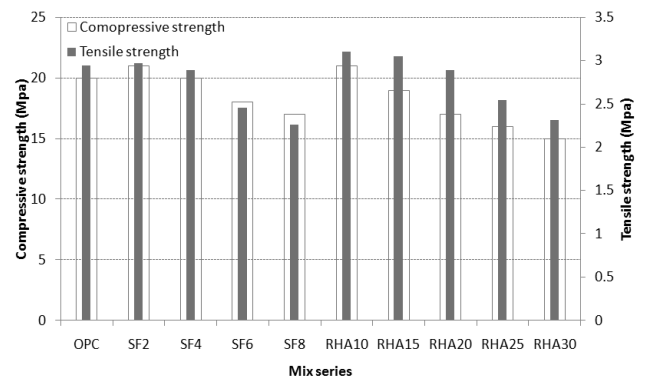


Fig. 5 Compressive and tensile strength results for OPC, RHA, and SF mortar

강도 평가는 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 SF 2% 및 RHA 10%에서는 OPC 모르타르의 압축강도를 상회하는 결과를 얻을 수 있었다. 알칼리 자극제를 첨가하거나 장기재령 강도평가에서는 치환률이 증가할수록 큰 강도증가를 예상할 수 있으나 28일 강도에서는 치환률이 비교적 작을수록 강도가 우수하게 평가되었다. RHA 10의 경우는 SF 2보다 우수한 압축강도 성능을 나타내었다. 인장강도 특성에서도 비슷한 경향이 평가되었는데, SF 2%에서 2.97 MPa이, RHA 10%에서 3.10 MPa이 각각 최대값으로 평가되었으며, 치환률의 증가에 따라 인장강도 역시 약간 감소하였다. RHA를 20% 이상 치환한 경우와 SF를 6% 이상 혼입한 경우의 강도가 크게 증가되지 않는 원인은 (1) 고분말도 혼화재료 사용시 유동화제를 사용하지 않은데 기인한 작업성의 불량, (2) 다량치환에 따른 조기강도 부족 등을 들 수 있다.

4.2 내구적 특성 평가

4.2.1 밀도, 공극, 수분 흡수성 평가

3장에서 강도 평가시 SF 2%, RHA 10%에서 가장 우수한 성능이 평가되었으므로 해당 배합을 선정하여 밀도, 공극률, 수분흡수성을 평가하였다. S2 및 RHA에서는 흡수 공극률이 각각 5.69%, 5.44%로 OPC의 6.76%보다 낮게 평가되었는데, 겉보기 비중에서는 큰 차이가 없었다. 수분 흡수계수에서도 SF 2 및 RHA 10에서 동등 이하의 값이 평가되었다. Table 6에서는 투수 공극률, 밀도, 수분 흡수계수에 대한 평가결과를 나타내었다.

4.2.2 침투수분계수(Sorptivity) 평가

Fig. 6에서는 다양한 배합을 가진 SF 및 RHA 모르타르에 대하여 시간에 따른 침투수분계수 실험결과를 나타내었다. 또한 각 값의 평균을 Fig. 7에 나타내어 정량적인 평가를 수행하였다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 OPC의 침투수분계수가 0.284 수준임에 비해서 RHA 모르타르는 치환률 15%에서 0.133으로 제일 낮은 흡수율을 보이고 있다. 10%에서는 0.172로 두 번째로 낮은 값을 보이고 있는데, 변동성이 발생하지만 압축강도와 비슷한 경향을 보이고 있다. SF 모르타르의 경우 6%의 치환률까지는 OPC에 비하여 우수한 침

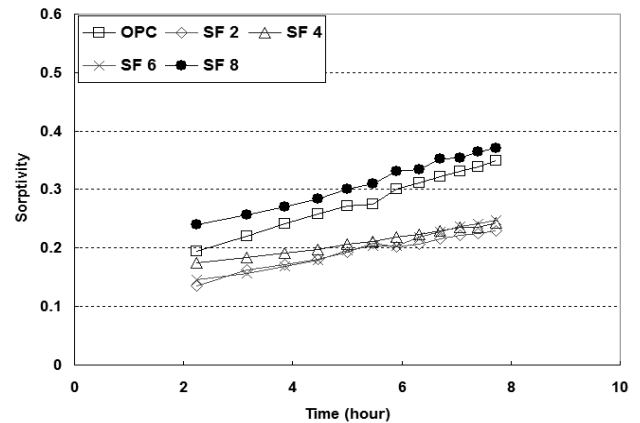
Table 6 Results of voids, density, and water absorption coefficient

Types	Permeable Voids (%)	Apparent density (g/cm ³)	Coefficient of water absorption
Control	6.76	2.22	2.032×10 ⁻⁶
S2	5.69	2.28	2.040×10 ⁻⁶
R10	5.44	2.28	2.003×10 ⁻⁶

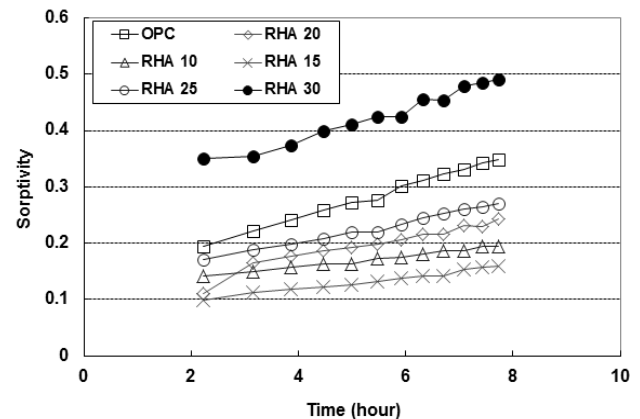
투수분계수를 가지고 있으나 8% 치환의 경우 0.314의 높은 결과를 나타내었다. SF 4% 및 RHA 15% 이상 치환할 경우 강도가 OPC보다 모두 감소하였으나 침투수분계수에서는 SF 8% 및 RHA 30%를 제외하고는 모두 낮은 침투수분계수를 나타내었다.

4.2.3 RCPT 및 촉진 염화물 확산계수 평가

우수하게 평가된 SF 2%와 RHA 10%에 대한 RCPT 시험결과를 Fig. 8에 콘크리트를 대상으로 비교하였다. 상대적으로 측정된 공극률보다 자유 염화물 이온 및 확산



(a) Sorptivity in SF series



(b) Sorptivity in RHA series

Fig. 6 Measured sorptivity with elapsed time

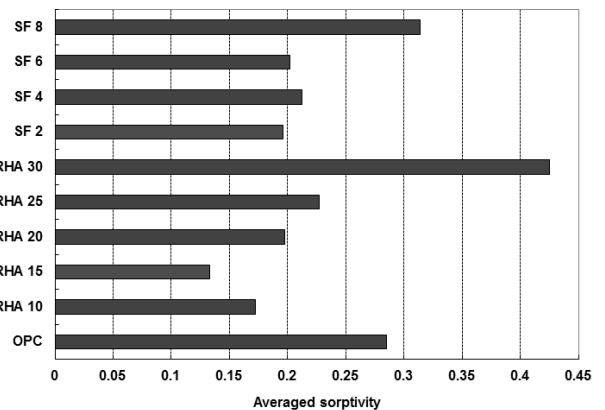


Fig. 7 Averaged Sorptivity in RHA and SF series

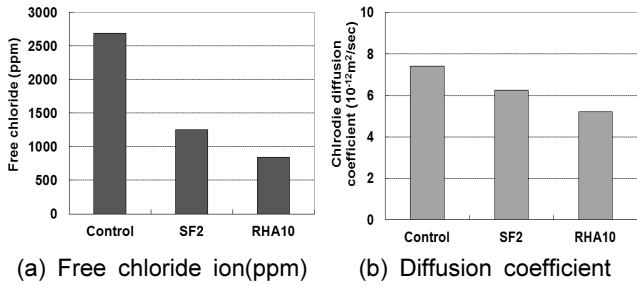


Fig. 8 Free chloride ion and diffusion coefficient in SF, RHA, and OPC concrete

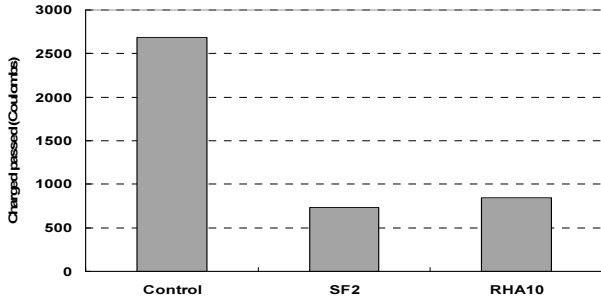


Fig. 9 Results of passed charge (Coulombs)

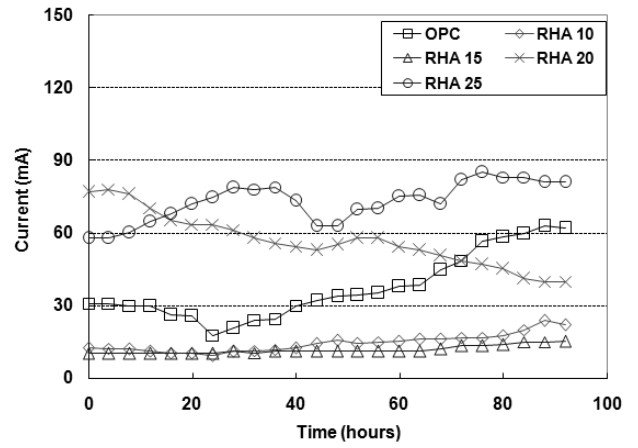
계수의 감소가 크게 평가되었다. 이는 CSH겔의 형성을 통해 염화물 흡착이 많아지고 이로 인해 혼화재료를 혼합한 배합에서 낮은 확산계수를 야기한 것으로 판단된다. OPC에 비하여 확산계수는 0.70~0.84배로, 자유염화물 농도는 0.31~0.47배로 감소하였다.

또한 총 투과한 전하량(Coulombs)을 OPC, SF, RHA 콘크리트에 대하여 측정된 결과는 Fig. 9에 나타내었다. OPC 콘크리트에 비해 SF 2, RHA 10의 경우 거의 3.2~3.7배의 염소이온 투과 저항성을 나타내었는데, 이러한 염해 저항성은 포졸란 반응을 하는 재료에서 많이 나타나는 공학적 장점이다.^{22,23} Ca(OH)₂나 Ca를 기본으로 하는 화합물(Aluminates, Ferrite)은 포졸란 반응을 통하여 CSH를 강화시키고 이러한 수화물은 염소이온의 차단성이 뛰어나고 알려져 있다.²⁴⁻²⁶

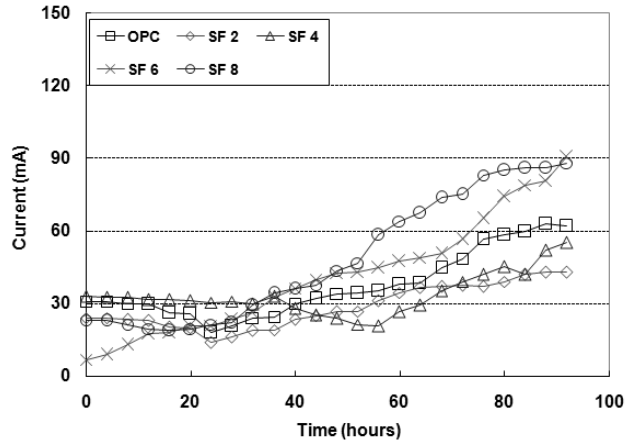
ASTM 1202에서 제시한 기준에 따르면 총 전하량이 1000~2000C 사이일 경우 낮은 염소이온 투과성(Low)을, 100~1000사이일 경우 매우 낮은 염소이온 투과성(Very low)으로 평가하고 있다. SF 2 및 RHA 10의 경우 매우 낮은 염소이온투과성 수준으로 우수한 내염해성능을 보여주고 있다. 이는 OPC의 강도보다 SF2 및 RHA10의 강도가 증가하고 확산성 감소, 공극률의 감소 등 다른 실험결과와 일관성을 가지고 있다.

4.2.4 가압부식실험에 따른 부식전류

12 V로 전압을 인가하여 측정된 전류와 시간과의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. OPC 모르타르에 비하여 SF 2%, SF 4%의 경우는 부식전류가 낮게 평가됨을 알 수 있으



(a) Current in RHA series



(b) Current in SF series

Fig. 10 Measured current with duration in OPC, SF, and RHA mortar

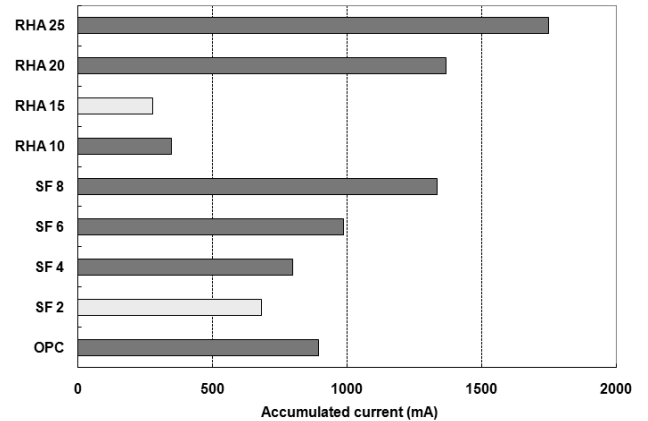
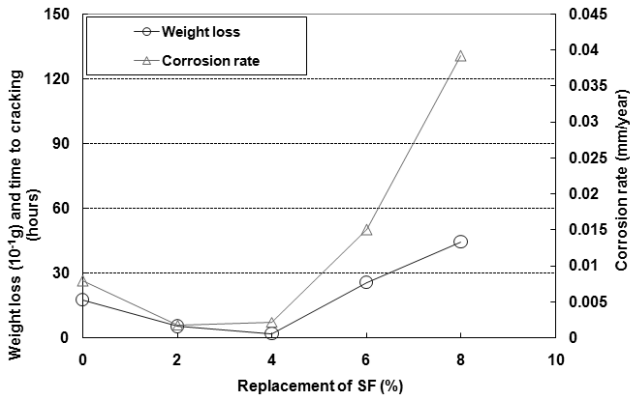


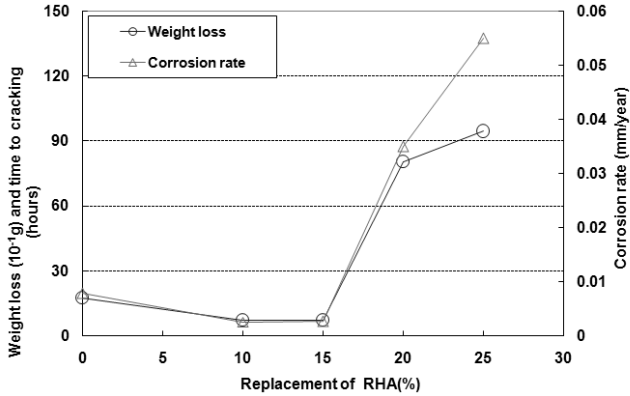
Fig. 11 Accumulated current in test period (96hours)

나, 높은 치환률을 가진 6%, 8%의 경우는 부식전류가 상대적으로 높음을 알 수 있다. RHA 모르타르의 경우 20%와 25%의 치환률에서는 상당히 높은 전류값이 측정되었으나 10% 및 15%에서는 우수한 부식전류 제어를 나타내고 있다. RHA 30의 경우는 실험대상에서 제외하였다.

정량적인 분석을 위해서 총 96시간동안 축적된 전류량을 각 배합별로 도출하였다. 가장 뛰어난 부식전류제어



(a) Results in SF replacement



(b) Results in RHA replacement

Fig. 12 Weight loss and corrosion rate in OPC, SF, and RHA concrete

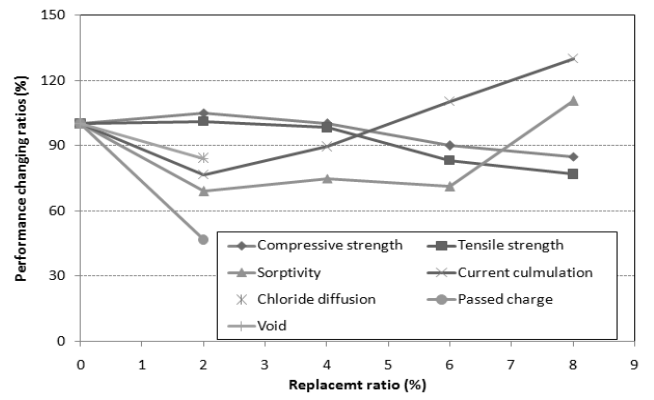
는 RHA 15에서 나타났는데, OPC 콘크리트 대비 31.3% 수준이었으며, SF 2에서는 76% 수준으로 감소하였다. 부식전류 실험에서도 RHA 10 및 RHA 15에서는 우수한 성능을 나타내었는데, 이는 초기재령에서의 포졸란 반응이 SF에 비하여 RHA가 빠르며 이는 CaO 함유량이 SF에 비하여 많으므로 빠른 알칼리성의 확보가 주된 이유이다.

또한 60일간 건조습윤 축진부식실험을 수행한 뒤, 질량결손률 및 부식률을 SF 및 RHA 치환률에 따라 Fig. 12에 나타내었다.

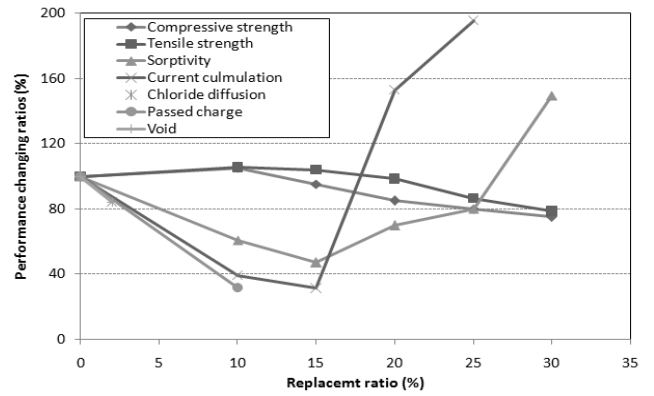
SF 2%에서는 약간 불분명한 실험경향이 나타나는데, 이는 실험상의 오차라고 판단된다. 그러나 6% 이상 SF 혼입에 대해서는 부식량 증가와 부식률의 증가가 발생하였다. RHA 치환률에 따른 부식경향은 치환률에 따라 명확하게 평가되었는데, 치환률 15%까지는 부식량 및 부식률 감소와 균열발생시점의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 10~15% 수준의 RHA 치환은 SF보다 초기재령 부식제어에 대해 뚜렷한 우수성을 나타낸다.

4.2.5 SF 및 RHA의 치환률에 따른 공약적 특성의 변화

본 절에서는 SF 및 RHA의 치환률에 따른 강도 및 내구성 실험결과를 OPC를 기준으로 정규화하였다. SF 치환률에 대한 OPC와의 비교를 Fig. 13(a)에, RHA 치환률에 대한 OPC와의 비교를 Fig. 13(b)에 나타내었다. 전술



(a) Performance changing ratios with SF replacement



(b) Performance changing ratios with RHA replacement

Fig. 13 Performance changing ratios with SF and RHA

한대로 SF 2~4% 수준에서 그리고 RHA 10~15% 수준에서 가장 뛰어난 효과가 평가되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 실리카폼과 Rice Husk Ash를 혼입한 콘크리트 및 모르타르를 대상으로 역학적 특성 및 내부식성에 관련된 내구성 특성을 평가하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 압축 및 인장강도 특성에서는 SF 2%, RHA 10%에서 가장 우수한 강도특성을 나타내었다. 장기강도가 아니므로 치환률에 따른 뚜렷한 증가는 나타나지 않았으나 치환률이 증가할수록 강도감소가 발생하였다. 이는 포졸란 반응을 충분히 야기시키는 재령 및 알칼리도의 부족, 그리고 미분말 혼화제로 치환시 혼화제를 사용하지 않은 것으로 평가된다.
- 2) RHA 10%와 SF 2%를 대상으로 내구성 실험에서는 밀도에서는 큰 차이는 없었으나 공극률과 수분흡수계수에서 OPC 모르타르에 비해 우수한 결과를 나타내고 있으며, 침투수분계수에서는 RHA의 경우 15%까지, SF의 경우 6% 수준까지 초기재령에서 OPC 모르타르에 비해 우수한 특성을 나타내었다.
- 3) 총 96시간동안 축적된 전류량을 평가하면 RHA 15%

에서 나타났는데, OPC 콘크리트 대비 31.3% 수준이었으며, SF 2에서는 76% 수준으로 감소하였다. 또한 SF 6% 이상, RHA 20% 이상 혼입한 경우는 전반적인 부식실험결과가 OPC 콘크리트에 비해 우수하지 못하였다.

- 4) SF 2~4%를 치환시킨 모르타르와 동등이상의 내구 특성을 나타내는 RHA는 10~15% 수준의 치환임을 알 수 있었으며, 적절한 치환률을 가진 RHA 콘크리트는 강도 뿐 아니라 뛰어난 내염해성을 확보하고 있었다. 대단위 치환을 위해서는 알칼리 액티베이터 및 고온양생과 같은 추가적인 기법이 필요하지만, 10~15% 수준의 RHA 콘크리트는 환경부하를 저감하면서 좋은 건설재료로 사용될 가능성이 충분히 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-286 2013 R1A1A2060114)이며 저자는 이에 감사드립니다.

References

1. Lee, B. C., Jung, S. H., Kim, J. H., and Kwon, S. J., "Evaluation for properties of domestic pond ash aggregate and durability performance in pond ash concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.3, 2011, pp.311-320 (in Korean).
2. Lee, B. C., Jung, S. H., Chae, S. T., and Kwon, S. J., "Evaluation for applicability of reinforced concrete structure with domestic pond ash," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.5, 2011, pp.541-550 (in Korean).
3. Antiohos, S. K., Papadakis, V. G., Chaniotakis, E., and Tsimas, S., "Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes," *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.6, 2007, pp.877-885.
4. Kim, J. S., Yoo, K. S., Kim, T. H., and Park, J. H., "A Bond performance evaluation of geopolymer concrete by pull-out test," *KCI Spring conference*, Vol.26, No.1, 2014, pp. 591-592 (in Korean).
5. Kim, S. H., Ryt, G. S., Koh, K. T., and Lee, J. H., "Micro-Structure Analysis of Fly Ash Based Geopolymer," *KCI fall conference*, Vol.24, No.2, 2012, pp.843-844 (in Korean).
6. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste," *Cement and Concrete Composites*, Vol.27, No.4, 2005, pp.425-428.
7. Chindaprasirt, P. and Rukzon, S., "Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar," *Construction and Building Materials*, Vol.22, No.8, 2008, pp.1601-1606.
8. Erdem, T. K. and Kirca, O., "Use of binary and ternary blends in high strength concrete," *Construction and Building Materials*, Vol.22, No.7, 2008, pp.1477-1483.
9. Mullick, A. K., "Performance of concrete with binary and ternary cement blends," *The Indian Concrete Journal*, Vol.81, No.1, 2007, pp.15-22.
10. Muralidharan, S., Saraswathy, V., Merlin Nima, S. P., and Palaniswamy, N., "Evaluation of a composite corrosion inhibiting admixtures and its performance in Portland pozzolana cement," *Journal of Materials Chemistry and Physics*, Vol.86, No.2-3, 2004, pp.298-306.
11. Umoh, A. A., Olaniyi, A., Babafemi, A. J., and Femi, O. O., "Assessing the mechanical performance of ternary blended cement concrete Incorporating periwinkle shell and bamboo leaf ashes," *Civil and Environmental Research*, Vol.3, No.5, 2013, pp.27-36.
12. Ramznianpour, A., Mahdikhani, M., and Ahmadibeni, G., "The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes," *International Journal of Civil Engineering*, Vol.7, No.2, 2009, pp.83-91.
13. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., and Mahachai, R., "Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol.16, No.2, 2009, pp.242-247.
14. Saraswathy, V., and Song, H. W., "Corrosion performance of rice husk ash blended concrete," *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.8, 2007, pp.1779-1784.
15. Sugita, S., Yu, Q., Shoya, M., Tsukinaga, Y., and Isojima, Y., "The Concrete Way to Development," *FIP Symposium 1997*, Johannesburg, South Africa, Vol.2, 1997, p.621.
16. Song, H. W., Jang, J. C., Saraswathy, V., and Byun, K. J., "An estimation of the diffusivity of silica fume concrete," *Building and Environment*, Vol.42, No.3, 2006, pp.1348-1354.
17. Song, H. W., Pack, S. W., Nam, S. H., Jang, J. C., and Saraswathy, V., "Estimation of the permeability of silica fume cement concrete," *Construction and Building Materials*, Vol.24, No.3, 2010, pp.315-321.
18. Zhang, M. H. and Gjörv, O. E., "Effect of silica fume on pore structure and chloride diffusivity of low porosity cement pastes," *Cement and concrete Research*, Vol.21, No.6, 1991, pp.1006-1014.
19. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K., "Predicting carbonation in early-aged cracked concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.36, No.5, May, 2006, pp.979-989.
20. Song, H. W., Pack, S. W., Lee, C. H., and Kwon, S. J., "Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration," *Journal of Restoration of Buildings and Monuments*, Vol.12, No.4,

- 2006, pp.265-284.
21. Song, H. W. and Kwon, S. J., "Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure," *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.6, June, 2007, pp.909-915.
 22. Saraswathy, V., Muralidharan, S., Kalyanasundaram, R. M., Thangavel, K., and Srinivasan, S., "Evaluation of a composite corrosion inhibiting admixture and its performance in concrete under macro cell corrosion conditions," *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.5, 2001, pp.789-794.
 23. Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., and Srinivasan, S., "Activated fly ash cements: Tolerable limit of replacement for durable steel reinforced concrete," *Advances in Cement Research*, Vol.14, No.1, 2002, pp.9-16.
 24. Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., and Srinivasan, S., "Influence of activated fly ash on corrosion resistance and strength of concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol.25, No.7, 2003, pp.673-680.
 25. Saraswathy, V., Muralidharan, S., and Srinivasan, S., "Electrochemical studies on the corrosion performance of activated fly ash blended cements," *Materials Engineering*, Vol.14, No.3, 2003, pp.261-283.
 26. Saraswathy, V. and Song, H. W., "Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview," *Journal of Hazardous Materials*, Vol.138, No.2, 2006, pp.226-233.

요 약 최근들어 CO₂ 증가에 따른 사회적, 공학적 문제가 증가하면서 시멘트 사용량을 줄이려는 연구가 진행되고 있다. 플라 이 애쉬, 고로 슬래그, 실리카폼 등의 혼화재료가 시멘트 대체재로 많이 사용되고 있는데, 최근 들어 Rice Husk Ash (RHA)를 혼 화재료로 사용하여 콘크리트의 성능을 개선시키려는 연구가 활발하게 진행 중이다. 본 연구에서는 RHA와 가장 뛰어난 혼화재료 로 알려진 실리카폼을 혼합한 콘크리트를 제조하여 초기재령 콘크리트에 대한 염해저항성을 평가하였다. 이를 위해 10~30%의 RHA 치환률과 2~8%의 실리카폼 치환률을 가진 콘크리트를 제조하여, 역학적 실험과 밀도, 공극률, 염화물 확산계수, 부식전류 측정등의 내구성 실험을 수행하였다. RHA 10~15% 수준의 치환은 SF 2~4% 수준보다 초기재령 콘크리트에서의 높은 강도 및 염 해저항성을 확보하였으며, 미래에 유용하게 사용될 수 있는 혼화재료의 가능성을 나타내었다.

핵심용어 : RHA(Rice Husk Ash), 실리카폼, 내구성, 철근부식, 초기재령 콘크리트