

TDFA를 혼입한 초기재령 콘크리트의 공학적 특성 평가

박재성¹, 박상민², 김혁중³, 권성준^{4*}

Evaluation of Engineering Properties in Early-Age Concrete with TDFA

Jae-Sung Park¹, Sang-Min Park², Hyeok-Jung Kim³, Seung-Jun Kwon^{4*}

Abstract: This paper presents an evaluation of engineering properties in TDFA(Tire Derived Fuel Ash)- based concrete in early age. Concrete containing 0.5 of w/b(water to binder) ratio and 20% of FA(Fly Ash) replacement ratio are prepared, and FA content are replaced with TDFA from 3% to 12% for evaluating the effect of TDFA on fresh and hardened concrete properties. With higher than 6% of TDFA replacement ratio, workability is significantly worsened but it is improved with more SP(Super plasticizer) and AE(Air Entrainer) agent. Concrete with 6~12% of TDFA shows reasonable strength development and better resistance to carbonation and chloride attack in spite of early-aged condition. However concrete with 6% TDFA shows poor resistance to freezing and thawing action due to insufficient air content. If air content and workability are obtained, replacement of TDFA to 12% can be used for concrete with FA.

Keywords: TDFA(Tire Derived Fuel Ash), Durability, Fly ash, Workability, Carbonation resistance, Chloride resistance

1. 서 론

콘크리트는 경제적이고 내구적인 건설재료로서 꾸준히 사용되어 왔다. 그러나 사용기간의 증가에 따른 내구성 문제가 보고되고 있으며, 이를 극복하기 위해 많은 연구가 재료, 설계, 시공분야에 따라 진행 중이다(Song et al., 2005; Broomfield, 1997). 특히 혼화재료의 사용은 산업 부산물의 재활용 뿐 아니라 콘크리트의 내구 성능을 개선하는데 큰 역할을 하고 있다. 대표적인 혼화재료는 플라이애시(FA: Fly Ash), 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag), 실리카폼(SF: Silica Fume) 등이 있다. 최근 들어서 왕겨재(RHA: Rice Husk Ash)등 도 사용되고 있는데, 이러한 혼화재료는 초기재령 거동의 안정성 및 장기적인 내구성 확보 등에 기여하고 있다(Ramznianpour et al., 2009; Rukzon et al., 2009).

일반적으로 FA를 혼입한 콘크리트는 유동성의 확보(Kim and Lee, 2014), 장기 염해저항성 증가(Saraswathy et al., 2003),

건조수축의 감소(Yoo et al., 2013) 등의 다양한 공학적 장점을 가지고 있으며, 최근 들어 HVFAC(High Volume Fly Ash Concrete)와 같이 50%이상의 치환률을 가지는 대단위 치환 콘크리트에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. GGBFS 콘크리트 역시 장기강도의 개선, 황산 저항성의 증가 등의 공학적 장점이 있으며, 공극구조 개선과 흡착을 통하여 염화물 침투 저항성을 가지고 있다(Kwon et al., 2009; Maekawa et al., 2003; Neville, 1995). 최근 들어 개별 난방 및 공장의 에너지 공급을 위해 유연탄과 타이어 조각을 같이 소각하여 열효율을 높이게 된다. 이때 발생된 재를 TDFA(Tire-Derived Fuel Ash)라고 하는데 국내에서는 건설재료로 시도된 적이 없는 산업부산물이다. 국외에서도 TDFA에 대한 연구는 매우 제한적인데, 고분말을 가지고 있으므로 강도 개선과 염해저항성에 효과적으로 알려져 있다(AI-Akhras and Smadi, 2004). 그러나 기존의 연구에서는 아연의 영향으로 지연현상이 보고되었으며, 잔골재 치환을 10%이상 TDFA로 할 경우 내구성 지수를 60이상 확보하지 못하였다(AI-Akhras and Smadi, 2004).

본 연구에서는 2종 FA를 20%치환한 콘크리트를 대상으로 FA를 최대 12%까지 TDFA로 치환하면서 기초적인 공학적 특성을 분석하였다. 본 연구는 국내에서 최초로 시도되는 TDFA를 활용한 건설재료 적용성에 대한 연구이며, 이후 장기거동에 대한 추가적인 연구가 수행될 예정이다.

¹정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 석사과정

²정회원, 에스엠아이(주) 대표이사

³정회원, 금호석유화학 중앙연구소 선임연구원

⁴정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Civil and Environmental Engineering, Hannam University, 70 Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

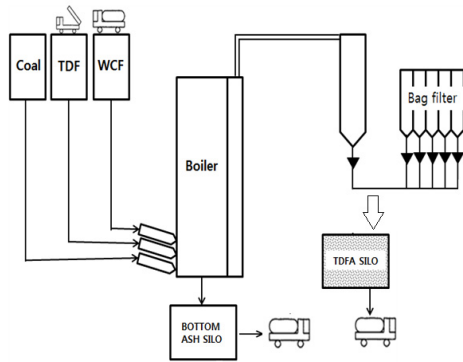
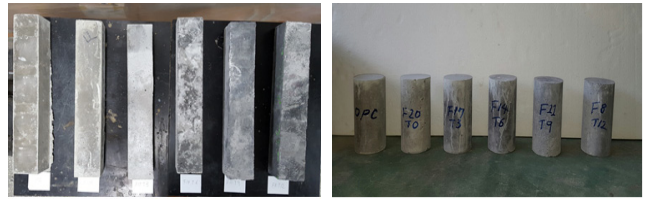


Fig. 1 Process of TDFA generation



(a) Beam specimens

(b) Cylindrical specimens



(c) Specimens under curing

Fig. 2 Various concrete specimens with FA and TDFA

Table 1 List of test for TDFA-based concrete and mortar

List	Examinations	Standards
Fresh concrete Performance	Air amount	KS F 2421
	Slump	KS F 2402
	Setting time	KS L 5108
	Flow test	KS F 5105
Mechanical Performance	Compressive strength	KS F 2405
	Tensile strength	KS F 2423
	Flexural strength	KS F 2408
Durability Performance	Accelerated diffusion test	Tang's method
	Accelerated carbonation test	KS F 2584
	Freeze/ Thawing test	KS F 2456



Compressive

Tensile

Flexural

Fig. 3 Photos for compressive, tensile, and flexural strength test

2. TDFA 제조

TDFA는 페타이어 시편(30~50 mm)을 기타 화력발전 생산 재료와 소각하여 나온 부산물이다. 최저 발열량이 약 8,000 kcal/kg 으로서 유연탄(약 6,200 kcal/kg)보다 높은 효율성을 나타낸다. 주연료원으로는 석탄, 목재 칩(WCF: Wood Chip Fuel) 및 타이어 칩이며 주연료원 투입, 보일러, 집진 및 필터 처리의 과정을 거치면서 TDFA를 수급할 수 있다. 국내 K사 열병합발전소의 TDFA 발생 과정 및 TDF의 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

3. TDFA 콘크리트의 공학적 특성 평가를 위한 실험계획

3.1 실험의 개요

본 실험은 TDFA를 혼입한 콘크리트 및 모르타르의 공학적 특성을 평가를 주목적으로 한다. 평가항목으로는 굳지 않은 콘크리트의 거동 평가를 위해 공기량, 슬럼프, 응결시간, 플로

우 시험을 실시하였다. 굳은 콘크리트에 대해서는 역학적 성능 평가를 위해 압축강도, 인장강도, 휨강도 시험을 실시하였다. 내구성 평가를 위해서는 재령 28일 시편에 대하여 촉진염해, 촉진탄산화, 동결융해 시험을 실시하였다. Table 1에 본 연구를 위한 시험항목을 나타내었다.

본 실험을 위해 실린더 공시체는 100 × 200 mm, 휨시험 공시체는 75 × 75 × 405 mm의 동결융해 몰드로 각각 제작하였다. 시편들은 24시간 기건 양생 후 탈형 하였고, 이후 수중양생을 28일간 실시하였다. Fig. 2에서는 공시체의 사진을, Fig. 3에서는 각 시험에 따른 진행 사진을 나타내고 있다.

3.2 배합특성

본 실험의 배합은 배합강도 24 MPa로 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 2종 FA를 사용하였다. 물-바인더비(w/b: water to binder)를 0.5로 고정하였으며, FA를 20%치환한 배합에 대하여 TDFA를 3%씩 중량 치환하여 최대 12%까지 혼입하였

Table 2 Mixture proportions

Case	w/b	W(kg/m ³)	C(kg/m ³)	FA(kg/m ³)	TDFA(kg/m ³)	S(kg/m ³)	G(kg/m ³)	AE(kg/m ³)
OPC			350	0	0	876	893	1.23
F20T0				70	0	865	882	1.23
F17T3				59.5	10.5	864	881	1.23
F14T6	0.5	175	280	49.0	21.0	864	880	1.23
F11T9				38.5	31.5	863	879	2.45+SP0.175
F8T12				28.0	42.0	847	863	2.45+SP0.175

S: Sand, G: Gravel, AE: Air Entrainer, SP: Super-plasticizer

Table 3 Physical properties of fine and coarse aggregate

Types	Item	G _{max} (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate	-	-	2.60	1.00	2.70
Coarse aggregate	25	25	2.62	0.78	6.78

F.M.: Fineness Modulus

Table 4 Chemical compositions for OPC, GGBFS, FA and TDFA

Types	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Blaine (cm ² /g)
OPC	21.96	5.27	63.41	1.96	3,214
FA	55.66	27.76	2.70	0.49	3,621
GGBFS	32.74	13.23	44.14	1.84	4,340
TDFA	27.5	6.49	24.6	5.14	5,200

다. 또한 기본적인 OPC(Ordinary Portland Cement) 콘크리트의 특성을 알기 위해 FA가 치환되지 않은 배합을 기본으로 고려하였다.

Table 2에서는 본 연구를 위한 배합표를, Table 3에서는 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 특성을, Table 4에서는 TDFA의 화학적 조성을 OPC, FA, GGBFS와 비교하여 나타내었다. 한편 Table 2의 배합에서 FaTb 표시는 FA a%, TDFA b%를 중량 비로 나타낸 것이다. F8T12는 OPC 중 FA를 20% 치환하고 그 20%에 대해서 12%는 TDFA를 혼입한 배합을 의미한다.

TDFA의 분말도가 시멘트보다 크고 비중이 1.95~2.10으로 낮으므로 치환률의 증가에 따라 워커빌리티가 낮아지게 된다 (Jung and Kwon, 2013). 따라서 TDFA 혼입율 6%이상의 배합에서는 공기연행제제의 혼입량을 늘리고 추가적인 SP제를 혼입해 워커빌리티를 개선하여 배합을 실시하였다. 본 배합의 목표슬럼프와 공기량은 각각 180 mm와 4±1.0%로 설정하였다.

Table 4에서 TDFA의 SiO₂는 FA의 50%수준이고 GGBFS와는 비슷한 수준을 보이고 있다. CaO는 수산화칼슘을 직접 생성하는 화합물인데, TDFA의 CaO가 OPC에 비해서는 50%

수준이지만 GGBFS의 60%수준을 나타내고 있다. 다만 황이온이 5배 이상이므로 다량 치환시 에트린자이트의 생성을 통해 이상 팽창을 보일 우려가 있다. 기존의 연구에서도 알 수 있듯이 TDFA는 5,000 cm²/g이상의 고분말을 가지고 있으므로 주로 충전효과를 통한 강도증가 및 공극구조 개선 등을 기대할 수 있다(AI-Akhras and Smadi, 2004).

4. TDFA 콘크리트의 특성 평가

4.1 TDFA를 혼입한 굳지 않는 콘크리트의 특성

4.1.1 슬럼프 시험

TDFA를 혼입한 콘크리트의 슬럼프 특성을 평가하기 위해 KS F 2402에 따라 실험을 수행하였다. 슬럼프는 TDFA 혼입율이 증가함에 따라 165 mm(OPC)에서 85 mm(F14T6)로 크게 감소하였다. 이후 워커빌리티의 확보를 위해 AE제를 2배로, 고성능 감수제(SP: Super plasticizer)제를 결합재 중량의 0.175%추가하였다. 추가적인 혼화제의 영향으로 TDFA 혼입율 9%, 12%에서는 각 205 mm, 200 mm로 슬럼프가 개선되어 목표 슬럼프 수준을 만족하였다. TDFA 혼입율 3%대비 6%에서 약 43%의 급격한 슬럼프의 감소를 보였는데 원인은 미립분양의 증가로 인한 자유수 감소이다. OPC 보다 F20T0에서 슬럼프가 약 8%증가하는 경향이 나타났는데 이는 FA의 불베어링 효과로 FA를 사용할 경우 발생하는 대표적인 공학적 장점 중 하나이다(Neville, 1995; RILEM 1998). Fig. 4에서는 슬럼프 실험결과를 도시하였다.

4.1.2 공기량 시험

공기량은 동결융해 작용에 대한 저항성을 높이기 위해 최근 들어 매우 중요하게 평가되고 있다(Koh et al., 2001). KS F 2421에 따라 압력법으로 공기량 실험을 수행하였으며, 추가적인 혼화제의 영향으로 TDFA 혼입율 9%, 12%에서 공기량이 개선되었다. TDFA의 치환율이 증가할 경우 공기량은 급

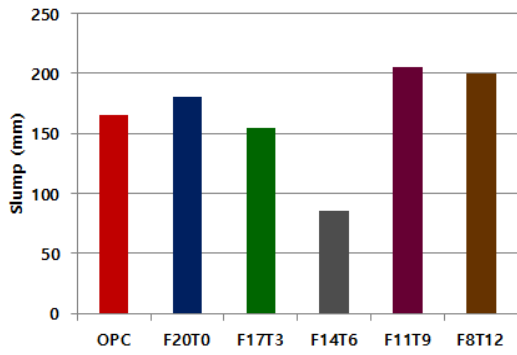


Fig. 4 Slump in TDFA and FA concrete

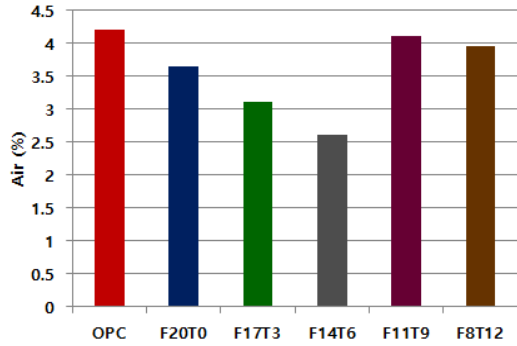


Fig. 5 Air content in TDFA and FA concrete

속하게 감소하는데, 이는 비표면적이 큰 TDFA의 첨가가 연행공기 공극을 감소시키고 워커빌리티의 감소로 판단된다. Fig. 5에서는 공기량 실험결과를 나타내고 있다.

4.1.3 응결시험

TDFA를 혼입한 콘크리트의 응결 특성을 평가하기 위해 KS L 5108에 따라 비카트 침을 이용하여 실험을 수행하였다. 응결시간은 TDFA의 응결성을 독립적으로 평가하기 위해 기준배합이 아닌 표준반죽질기를 측정하여 실험을 진행하였는데, Table 5는 표준반죽질기 배합을 나타낸다. TDFA 혼입율 3%까지는 초결 및 종결시간이 FA의 영향으로 OPC 대비 약 18%씩 지연되는 경향이 나타났다. 이후 배합에서는 TDFA 혼입율이 증가함에 따라 충전효과가 커져서 초결시간이 단축되고 있다.

초결시간은 변동 폭이 크지만 종결시간에는 큰 차이가 없었는데, 이는 시멘트 수화에 따른 강도발현은 OPC량이 지배적이기 때문이다. 초결시간은 혼입된 재료의 흡수율과 밀접한 관계가 있는데, 비중이 낮은 TDFA 미립분을 많이 포함한 배합에서 초결시간의 단축은 빈번하게 발생한다(Jung and Kwon, 2013; Lee et al., 2011). Fig. 6에서는 응결시험 결과를 나타내고 있다.

Table 5 Mortar mixture for setting time

Case	OPC	F20T0	F17T3	F14T6	F11T9	F8T12
W(g)	124.0	155.0	150.0	157.5	157.5	160.0
C(g)	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
FA(g)	0	100	85	70	55	40
TDFA(g)	0	0	15	30	45	60

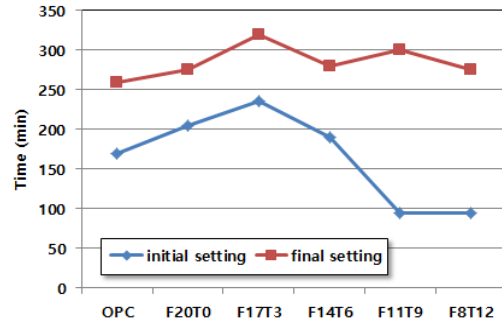


Fig. 6 Setting time of TDFA mortar

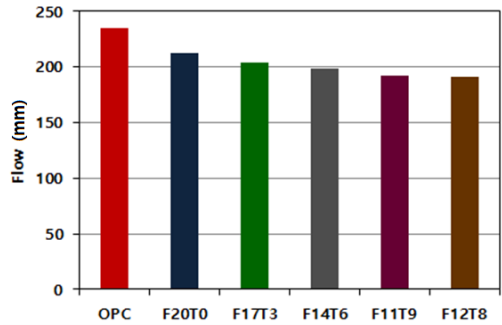


Fig. 7 Flow test results in TDFA mortar

4.1.4 플로우 시험

TDFA를 혼입한 콘크리트의 플로우 특성을 평가하기 위해 KS L 5105에 따라 실험을 수행하였다. 플로우 시험도 응결시간 시험과 마찬가지로 TDFA의 흐름 특성을 평가하기 위해 시멘트 510 g, 표준사 1,250 g, W/C 48.5%의 조건에서 FA와 TDFA의 혼입율을 가감하여 시험을 수행하였다. TDFA 혼입율이 증가함에 따라 OPC 배합의 기준 지름 대비 234 mm에서 F8T12배합의 190 mm로 감소하였다. 그 이유는 앞서 언급한 TDFA 미립분양의 증가로 인한 자유수 감소이다. Fig. 7에서는 각 배합의 플로우 시험결과를 나타내었다.

4.2 TDFA를 혼입한 콘크리트의 역학적 거동평가

4.2.1 압축강도 평가

압축강도시험은 KS F 2405에 따라 수행하였는데, 각 공시체는 목표재령일인 7일, 28일까지 수중양생 후 본 실험을 진행하였다. 각 배합별로 3회씩 강도측정을 실시해 평균값을 사

Table 6 Results of average compressive strength

Age(day)	Average compressive strength(MPa)					
	OPC	F20T0	F17T3	F14T6	F11T9	F8T12
7	23.8	18.2	16.7	17.1	18.7	16.8
28	31.2	26.3	27.5	28.4	26.5	26.9

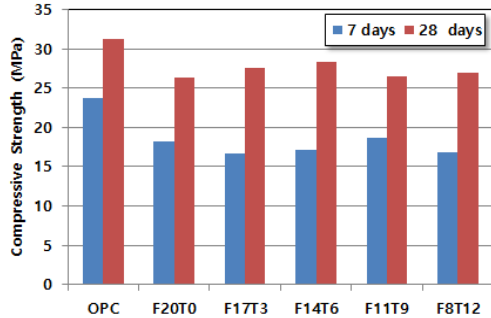


Fig. 8 Compressive strength of TDFA concrete with TDFA ratio

Table 7 Results of average tensile strength

Age(day)	Average tensile strength(MPa)					
	OPC	F20T0	F17T3	F14T6	F11T9	F8T12
7	2.1	1.8	1.6	2.0	1.7	1.9
28	2.6	2.5	2.5	2.8	2.1	2.3

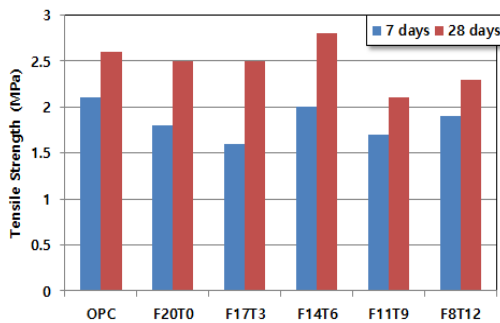


Fig. 9 Tensile strength of TDFA concrete with TDFA ratio

용하였으며, Table 6 및 Fig. 8에 결과를 나타내었다.

재령과 TDFA 혼입율이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 그 중 TDFA 혼입율 6%에서 OPC 대비 약 91%인 28.4 MPa를 나타내었는데, 다른 배합에 비하여 공기량이 감소하여 콘크리트가 밀실해진 것으로 판단된다. OPC를 제외한 재령 28일 시편에서는 압축강도의 큰 차이가 발생하지 않았다.

4.2.2 인장강도 및 휨강도

인장강도시험은 KS F 2423에 따라 수행하였는데, 양생기간 및 조건은 압축강도 시험과 동일하다. Table 7에 인장 및 휨

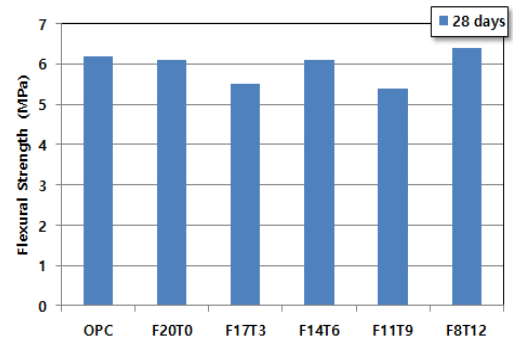


Fig. 10 Average flexural strength of TDFA concrete with TDFA ratio

강도 평가 결과 값을 나타내었고 이를 Fig. 9에 도시하였다. 압축강도와 마찬가지로 TDFA 혼입율 6%에서 가장 높은 인장강도가 발생되었으며, 압축강도 발현특성과 비슷한 경향을 나타내었다.

휨강도시험은 KS F 2408의 규정을 참고하여 75 × 75 × 405 mm 빔 공시체의 지간을 300 mm로 설정하여 4점 휨시험을 수행하였다. 그 중 TDFA 혼입율 12%에서 가장 큰 휨강도가 발생되었으나 TDFA 혼입율 6%의 휨강도와 비교해 큰 차이가 나타나지 않았다. Fig. 10에서는 휨강도 시험결과를 나타내고 있다.

강도특성에서는 TDFA 혼입율 6~12%수준에서는 모든 강도값이 FA 20%배합과 큰 차이를 보이지 않았다.

4.3 TDFA를 혼입한 콘크리트의 내구특성

4.3.1 탄산화 시험

TDFA를 혼입한 콘크리트의 탄산화 특성을 평가하기 위해 KS F 2584에 따라 재령 28일 시편을 상대습도 60%, 온도 20°C, 이산화탄소 5%의 조건하에서 실험을 수행하였다. 실험 기간은 2주, 4주로 하여 각 결과 값을 비교하였다. 탄산화 침투깊이는 TDFA 혼입율이 증가함에 따라 모든 시편에서 침투깊이가 증가하였는데, 이는 FA배합을 기본으로 하여 포졸란 반응에 따른 수산화칼슘의 감소가 원인이다(Kwon and Song 2010; Kobayashi and Uno, 1990). TDFA 혼입율 6%이후 탄산화 깊이는 감소하는 경향을 보이는데, 이는 FA에 의한 수산화칼슘의 소모량이 감소하고 TDFA의 미립분이 이산화탄소의 유입을 일부 차단하는 것으로 예상된다. 탄산화 거동에 대해서는 초기재령에서의 OPC에서 생성되는 수산화칼슘량, TDFA 미립분의 충전에 의한 이산화탄소 확산계수 저감, FA기반 포졸란 반응으로 소모되는 수산화칼슘량 등으로 매우 복잡한 거동이 발생하게 되므로 초기재령에서는 명확한 경향을 파악하기 어려웠다.

Table 8 및 Fig. 11에서는 2주, 4주간의 탄산화 실험 결과를

Table 8 Results of average carbonation depths

Weeks	Average Carbonation depths(mm)					
	OPC	F20T0	F17T3	F14T6	F11T9	F8T12
2	1.84	5.86	7.85	4.47	4.71	4.84
4	4.16	9.16	10.54	7.06	8.62	8.63

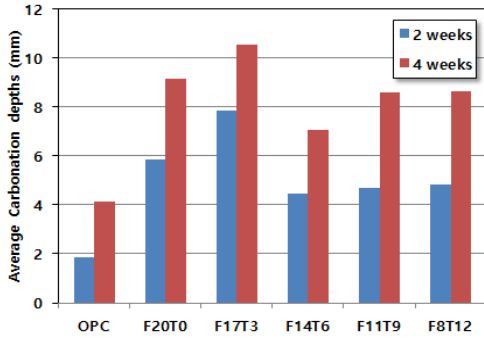


Fig. 11 Carbonation depths of TDFA concrete

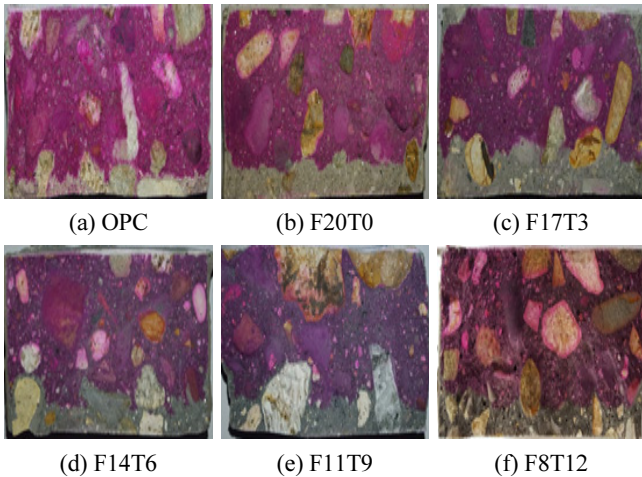


Fig. 12 Carbonation depth after 4 weeks under carbonation test

나타내었다. Fig. 12에서는 4주 시험후의 탄산화 깊이를 각 배합에 따라 사진으로 나타내었다.

4.3.2 축진염해 시험

TDFA를 혼입한 콘크리트의 염화물 저항 특성을 평가하기 위해 Tang's method에 따라 비정상상태의 염화물 축진시험을 수행한 뒤, 확산계수를 도출하였다(Tang, 1996). 재령 28일의 원주형 공시체를 50 mm 두께로 절단하여 24시간동안 증류수에 침지시킨 후 음극 셀에 0.5 M NaCl 수용액을 양극 셀에 0.3 M NaOH 수용액을 채워 30 V의 전압을 8시간동안 인가함으로써 염화물 침투를 촉진시켰다. Fig. 13에서는 확산계수 실험결과를 나타내고 있다.

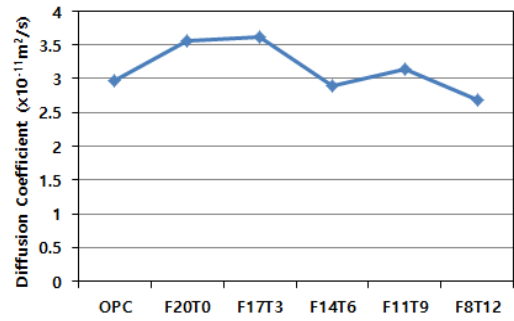


Fig. 13 Diffusion coefficient of TDFA concrete

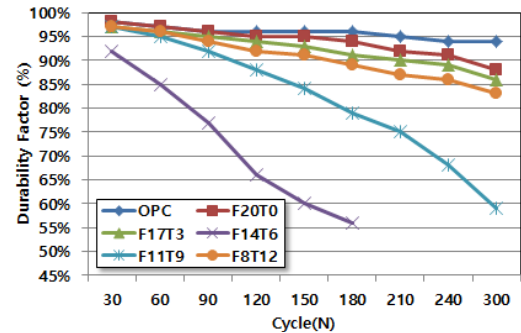


Fig. 14 Durability factor of TDFA concrete

4.3.3 동결융해 시험

TDFA 혼입한 콘크리트의 동결융해 저항 특성을 평가하기 위해 KS F 2456에 따라 재령 28일 시편에 대하여 수중 급속 동결융해 방법으로 실험을 수행하였다. TDFA 혼입율 6%의 내구성지수가 다른 배합보다 매우 낮게 나타났는데, 이는 공기량이 가장 적게 확보되었고 연행공기량을 위한 AE제의 혼입량이 매우 적었기 때문이다. 또한 TDFA 혼입율 9%에서도 낮은 내구성 지수를 나타내었는데, 이는 시편의 제조 시 다짐이 불충분 하였으며, TDFA의 변동성에 의한 것으로 나타났다. Fig. 14에서는 Cycle에 대한 내구성 지수를 나타내었다.

5. 결론

TDFA를 혼입한 초기재령 콘크리트의 공학적 특성 평가를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 굳지 않은 콘크리트의 시험에서는 TDFA 혼입율 6%이후에 급격한 워커빌리티의 감소가 있었는데, 비중이 낮은 TDFA의 높은 분말도가 주원인이었다.
- 2) TDFA 혼입율 6%에서 압축강도가 가장 높게 평가되었으나, 충분한 공기연행을 하지 못하여 150 Cycle이후 60이하로 내구성 지수가 감소하였다. 공기량을 확보한 TDFA 혼

입을 9~12%수준까지는 준수한 압축강도 증가를 나타내었다. 또한 초기재령에도 불구하고 염화물 확산계수 및 탄산화 저항성이 FA 20% 치환 배합보다 우수하게 평가되었는데, 이는 TDFA를 적절히 혼입시킴으로써 내구성 및 강도 특성을 개선할 수 있음을 나타낸다.

- 3) TDFA의 사용성은 공기량 및 워커빌리티의 확보만 가능하면 12%수준까지 사용하는 것은 큰 문제가 없을 것으로 사료되지만 20%이상 다량 치환할 경우 팽창성과 동결융해 저항성 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 TDFA의 충전효과 이외에도 포졸란 반응에 의한 수화물 여부를 정량적으로 평가하기 위해서는 SEM 또는 XRD의 미세분석실험을 통한 정량화가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 호남권 생태산업단지(EIP) 구축사업을 수행된 것이며 저자는 이에 감사드립니다.

References

- Al-Akhras, N. M., and Smadi, M. M. (2004), Properties of Tire Rubber Ash Mortar, *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 821-826.
- Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, London: E&FN, 1-15.
- Cho, M. S., Song, Y. C., Ryu, G. S., Koh, K. T., Kim, S. W., and Lee, J. H. (2002), Durability Evaluation of Concrete using Fly Ash, *Journal of Korea concrete institute*, 755-760.
- Jung, S. H., and Kwon, S. J. (2013), Engineering Properties of Cement Mortar with Pond Ash in South Korea as Construction Materials: from Waste to Concrete, *Central European Journal of Engineering*, 3(3), 522-533.
- Kim, D. B., and Lee, K. J. (2014), A Study on the Concrete Durability by Fly Ash Replacement Ratio, *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, 10(4), 566-571.
- Kobayashi, K., and Uno, Y. (1990), Mechanism of Carbonation of Concrete, *Concrete Library of JSCE*, 16(12), 139-151.
- Koh, K. T., Kim, D. K., Kim, S. W., Cho, M. S., and Song, Y. C. (2001), A Compound Deterioration Assessment of Concrete Subjected to Freezing and Thawing and Chloride Attack, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 13(4), 397-405.
- KS F 2402 (2007), Method of test for slump of concrete, KSSN, 1-12.
- KS F 2405 (2010), Standard test method for compressive strength of concrete, KSSN, 1-3.
- KS F 2408 (2015), Standard test method for flexural strength of concrete, KSSN, 1-3.
- KS F 2421 (2011), Standard test method for air content of fresh concrete by the pressure method, KSSN, 1-7.
- KS F 2423 (2011), Standard test method for splitting tensile strength of concrete, KSSN, 1-3.
- KS F 2456 (2013), Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing, KSSN, 1-10.
- KS F 2584 (2105), Standard test method for accelerated carbonation of concrete, KSSN, 1-4.
- KS F 2594 (2015), Standard test method for slump flow of fresh concrete, KSSN, 1-3.
- KS L 5108 (2012), Testing method for setting time of hydraulic cement by vicat needle, KSSN, 1-6.
- Kwon, S. J., and Song, H. W. (2010), Analysis of Carbonation Behavior in Concrete using Neural Network Algorithm and Carbonation Modeling, *Cement and Concrete Research*, 40(1), 119-127.
- Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., and Jung, S. H. (2009), Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack: Probabilistic Approach for Chloride Diffusion, *Structural Safety*, 31(1), 75-83.
- Lee, B. C., Jung, S. H., Kim, J. H., and Kwon, S. J. (2011), Evaluation for Properties of Domestic Pond Ash Aggregate and Durability Performance in Pond Ash Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(3), 311-320.
- Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003), Multi-Scale Modeling of Concrete Performance Integrated Material and Structural Mechanics, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(2), 91-126.
- Neville, A. M. (1995), Properties of concrete: 4th ed, England: Longman Group, 23-58.
- Ramznianpour, A. A., Mahdikhani, M., and Ahmadibeni, Gh. (2009), The Effect of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Durability of Sustainable Concretes, *International Journal of Civil Engineering*, 7(2), 83-91.
- Rukzon, S., Chindaprasirt, P., and Mahachai, R. (2009), Effect of Grinding on Chemical and Physical Properties of Rice Husk Ash, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(2), 242-247.
- Saraswathy, V., Muralidharan, S., and Srinivasan, S. (2003), Electrochemical Studies on the Corrosion Performance of Activated Fly Ash Blended Cements, *Materials Engineering*, 14(3), 261-284.
- Sarja, A., and Vesikari, E. (1996), Durability Design of Concrete Structures : Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, London : E&FN Spon, 28-52.
- Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K. (2005), A Study on Analytical Technique of Chloride Diffusion Considering Characteristics of Mixture Design for High Performance Concrete using Mineral Admixture, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 25(1A), 213-223.
- Tang, L. (1996), Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete-Current Development, *Magazine of Concrete Research*, 48(176), 173-179.
- Thomas, M. D. A., and Bamforth, P. B. (1999), Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag, *Cement and Concrete Research*, 29(4), 487-495.
- Yoo, S. W., Koh, K. T., Kwon, S. J., and Park, S. G. (2013), Analysis Technique for Flexural Behavior in RC Beam Considering Autogenous Shrinkage Effect, *Construction and Building Materials*, 47, 560-568.

Received : 03/02/2016

Revised : 04/29/2016

Accepted : 05/19/2016

요 지 : 본 연구에서는 산업부산물인 TDFA를 혼입한 콘크리트에 대하여 초기재령의 공학적 특성을 분석하였다. 물-결합재비 0.5, FA 치환율 20%인 콘크리트를 대상으로 TDFA를 3~12%치환하여 경화 전 및 경화 후의 특성을 분석하였다. TDFA 혼입율 6% 이후의 배합에서는 작업성이 현저하게 감소하였고 공기량 확보가 어려웠으며, 이로 인해 감수제 및 공기연행제를 추가하여 작업성을 개선시켰다. TDFA 혼입율 6~12%까지는 콘크리트의 강도에 큰 영향은 없었으며, 탄산화저항성 및 염해저항성에서는 FA 20% 치환 배합보다 우수한 성능을 나타내었다. 그러나 공기량이 부족한 TDFA 혼입율 6%배합에서는 동결융해 저항성이 크게 감소하였다. 공기량 및 작업성이 확보된다면 FA를 12%수준까지 TDFA로 치환해도 공학적인 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : TDFA, 내구성, 플라이애쉬, 작업성, 탄산화저항성, 염해저항성
