

쓰레기 소각재 사용 콘크리트의 품질특성에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Quality of Concrete with Municipal Solid Waste Incineration Ash

김재우¹ · 최재진² · 문대중^{3*}Jae-Woo Kim¹ · Jae-Jin Choi² · Dae-Joong Moon^{3*}

(Received December 18, 2014 / Revised December 23, 2014 / Accepted December 26, 2014)

The Quality of municipal solid waste incineration ash (incineration ash) was analyzed for the purpose of the reusing for concrete material. The flowability and strength properties of concrete mixed with incinerator ash were investigated.

CaO component was included more than 50% in chemical component of incinerator ash, mean size of 50% accumulated particle distribution of incinerator ash was about 25 μ m. Particle shape of incinerator ash (IA1) was massed the round shape with fine particle, particle shape of incinerator ash (IA2) was piled up the sheet shape according to manufacture procedure.

The Quality of concrete was effected by use of incinerator ash. When the incinerator Ash (IA2) was used, slump of concrete was increased and dosage of high range water reducing agent was reduced. However, strength development of concrete was decreased. Dosage of high range water reducing agent was increased by combined use of incinerator ash (IA2) and diatomite powder, but strength development of concrete was improved. Ratio of compressive strength and tensile strength was in the range 85%~105% of CEB-FIP model code.

키워드 : 쓰레기 소각재(소각재), 규조분말, 소각재 혼합 콘크리트, 유동특성, 강도특성

Keywords : Municipal Solid Waste Incineration Ash (Incineration Ash), Diatomite Powder, Concrete Mixed with Incineration Ash, Flowability, Strength Property

1. 서론

사회구조가 소멸도심의 산업사회로 변화됨에 따라 폐기물의 양이 급속히 증가하는 한편, 발생폐기물의 질적인 변화 등으로 인하여 폐기물의 처리가 중요한 사회문제로 대두되고 있다. 특히, 정부의 쓰레기 처리정책은 원천적인 쓰레기 감량과 분리수거 및 재활용의 극대화를 실시하고, 소각처리 후 매립이라는 단계별 처리방식을 취하고 있다. 2008년도까지 폐기물 발생량은 증가하는 추세에 있었으나, 그 이후 비슷한 발생량을 보이고 있다. 2012년 통계자료에 의하면 생활폐기물의 발생량은 12.8%중에서 매립율은 15.9%, 소각율은 25.0%로 소각비율이 점차적으로 증가하는 추세

이다(Ministry of Environment 2013).

즉, 매립방식을 중심으로 진행되던 과거 폐기물 정책은 NIMBY 현상에 의한 매립지 대상지역 확보의 어려움, 자원 순환형 사회구축, 매립가스 및 침출수 등에 의한 환경오염, 폐기물 처리방식의 균형적 분산 등 많은 문제에 직면하였다. 이에 정부는 2011년까지 생활폐기물 추정발생량의 12% 수준의 감량을 목표로 20%인 소각비율을 2011년까지 30%까지 올리는 한편, 20%의 매립비율을 10% 수준으로 낮추는 등 재활용 및 소각비율은 증가시키고, 매립 비율은 꾸준히 감소시키는 정책을 추진하고 있다.

최근 정부에서도 도시폐기물의 처리방법을 매립에서 소각으로 전환하고 있고, 사업장에서도 폐기물 처리방향을 소각처리 방법으

* Corresponding author E-mail: moondaejoong@empal.com

¹한화건설 토목기술팀 (Department of Civil Technical Engineering, Hanwha Engineering & Construction, Seoul, 150-881, Korea)

²공주대학교 건설환경공학부 (Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Chungnam, 314-701, Korea)

³이제이텍 기술연구소 (Technical Research Institute, Eitech Co., Geonggido, 463-800, Korea)

로 활발히 진행시키고 있는 실정이지만 소각과정에서 발생하는 소각재중에는 인체에 유해한 납, 구리 등의 중금속을 함유하고 있어 이를 안전하게 처리, 처분하는 방안들이 제시되고 있지만 아직도 국내에서는 미비한 수준에 머무르고 있다(Ahn et al. 2008; Chang 2010; Lim 2001).

본 연구에서는 도시쓰레기에서 발생하는 소각재(이하 소각재로 약함)를 콘크리트용 혼화재로 재활용하기 위한 일환으로 국내 소각장에서 발생하는 소각재의 특성을 비교, 고찰하였다. 또한, 소각재를 사용한 콘크리트의 유동특성과 강도특성에 대하여 실험을 통하여 검토하였다.

2. 소각재의 발생현황 및 처리현황

2.1 소각재의 발생현황

폐기물을 폐기물 관리법상 폐기물 분류와 폐기물 통계 작성상 폐기물을 분류 비교한 것이 Fig. 1이다.

2.1.1 폐기물 발생현황 추이

Table 1에 나타난 바와 같이 2012년도의 폐기물 발생량(지정폐기물제외)은 382천톤/일이며, 전년도 373천톤/일과 대비 약 2.3%,

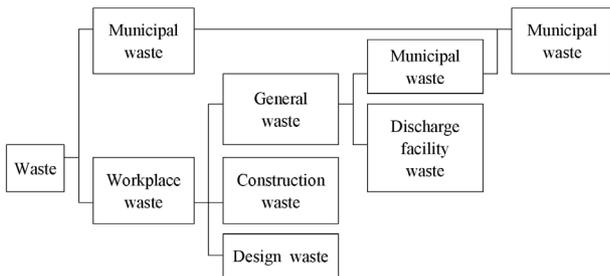


Fig. 1. Waste classification

Table 1. Annual waste production status (unit: ton/day, %)

Division		2007	2008	2009	2010	2011	2012
Total	Yield	337,158	359,296	357,861	365,154	373,312	382,009
	YoY Chg	5.7	6.6	-0.4	2.0	2.2	2.3
Municipal waste	Yield	50,346	52,072	50,906	49,159	48,934	48,990
	YoY Chg	3.1	3.4	-2.2	-3.4	-0.5	0.1
Discharge facility waste	Yield	114,807	130,777	123,604	137,875	137,961	146,390
	YoY Chg	13.6	13.9	-5.5	11.5	0.1	6.1
Construction waste	Yield	172,005	176,447	183,351	178,120	186,417	186,629
	YoY Chg	1.8	2.6	3.9	-2.9	4.7	0.1

2007년도 337천톤/일과 대비 약 23.3% 증가하였으며, 구성비를 살펴보면 생활폐기물이 12.8%, 사업장배출시설계폐기물이 38.3%, 건설폐기물이 48.9%를 나타내었다(Ministry of Environment 2013).

2.1.2 폐기물 종류별 발생현황 분석

생활폐기물은 2008년도까지 발생량은 증가하였으나, 2009년도 이후 발생량이 감소하였다. 2012년도에는 약간 상승하는 경향을 보이고 있다. 총 폐기물 중 생활폐기물의 점유율은 12.8%로 전년도 13.1%에 비해 약간 감소하였으며, 2012년도 1인당 1일 생활폐기물 발생량은 0.95kg으로 2011년도 0.95kg과 동일한 수준으로 외국에 비하여 적은 양이다.

참고로 2007년 OECD자료에 의한 외국의 생활폐기물 발생량(kg/인·일)은 미국이 2.08, 프랑스가 1.39, 영국이 1.53, 이탈리아가 1.37, 스페인이 1.84, 일본이 1.12kg이었다.

2.2 폐기물 처리현황

폐기물을 처리하는 방법으로는 크게 다음 Table 2와 같이 소각, 매립 및 재활용과 같이 3가지로 분류할 수 있다.

재활용은 분리수거하여 다시 사용할 수 있는 것으로 종이, 알루미늄, 유리 및 플라스틱 같은 제품 등이 있다. 매립은 쓰레기를

Table 2. Management method of incineration ash

Incineration	Incineration is a waste management process to prevent air pollution by incinerator with burning garbage function.
Landfill	Landfill is a method of getting rid of waste by burying to prevent contamination of soil and underground water
Recycle	Recycle is a process change waste material such as paper, glass, aluminum, plastic etc. into new product. It also includes to stabilize fly ash and bottom ash.

Table 3. Management status of municipal waste

Item	2007		2008		2009		2010		2011		2012	
	ton/day	%										
Total	50,346	100	52,072	100	50,906	100	49,159	100	48,934	100	48,990	100
Landfill	11,882	23.6	10,585	20.3	9,471	18.6	8,797	17.9	8,391	17.2	7,778	15.9
Incineration	9,348	18.6	10,349	19.9	10,309	20.3	10,609	21.6	11,604	23.7	12,261	25.0
Recycle	29,116	57.8	31,138	59.8	31,126	61.1	29,753	60.5	28,939	59.1	28,951	59.1

땅에 묻는 방법으로 토양오염 및 수질환경오염을 유발시키고, 매립지 부족 등 사회, 환경적 문제를 발생시키므로 현실적으로 바람직하지 않은 방법이다.

그래서 매립방법 대신 소각방법으로 전환되고 있으나, 소각시 공기오염 및 소각재 중에 포함되어 있는 중금속이 2차 환경오염을 유발시킬 수 있으므로 이를 해결하기 위한 방안들이 연구, 강구되고 있는 실정이다(Lee et al, 2010; Zhao et al, 2002).

Table 3은 생활 폐기물 처리방법을 비교한 것으로서, 생활폐기물의 처리방법은 재활용이 주류를 이루고 있으며 2012년도 매립율은 15.9%로 전년대비 1.3% 감소하였으며, 소각율은 25.0%로 전년도에 비하여 1.3% 증가하였다.

3. 실험개요

3.1 사용재료

시멘트는 밀도가 3.15g/cm³이고 비표면적이 3,539cm²/g인 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)를 사용하였으며, 규조분말(Diatomite Powder, DP)은 소성한 제품을 사용하였다. 시멘트와 규조분말의 화학적 성분은 Table 4와 같다. 소각재(Incinerator Ash, IA)는 국내 소각장에서 수집한 것으로 2종류를 사용하였다. 그 화학성분은 Table 5와 같다.

잔골재는 밀도 2.61g/cm³인 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수가 25mm이고, 밀도 2.65g/cm³인 부순자갈을 사용하

Table 4. Chemical compositions of cement and diatomite powder (Wt %)

Item	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃
OPC	61.40	21.60	6.00	3.68	3.10	2.50
DP	1.52	86.12	5.14	0.87	3.55	2.80

Table 5. Chemical compositions of incineration ash (Wt %)

Item	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
IA1	56.23	5.66	1.39	0.01	1.74	6.96	3.04	6.05	18.92
IA2	47.95	4.30	1.05	0.00	1.52	7.23	3.31	9.86	24.78

였다. 화학 혼화제는 폴리카본산계 고성능감수제(이하 SP)를 사용하였으며, 밀도는 1.10±0.02g/cm³이었다.

3.2 실험방법

소각재 및 규조분말의 화학성분 및 입자형상을 조사하기 위하여 X선 회절분석(XRD) 및 SEM 촬영을 실시하였다.

콘크리트의 슬럼프시험은 KS F 2402, 공기량 시험은 KS F 2421에 준하여 실시하였다.

∅100×200mm의 공시체를 제작한 후, 압축강도는 KS F 2405에 준하여 7일, 28일 및 90일 동안 수증양생을 실시하여 측정하였으며, 인장강도는 재령 28일 공시체를 KS F 2423에 준하여 측정하였다.

3.3 배합

보통강도용 콘크리트를 제조하기 위하여 물-시멘트비를 50%로 결정하고 단위수량 190kg/m³로 고려하여 배합설계를 실시하였다. 소각재 2종류를 사용하였으며, 단위시멘트 중량에 10%, 규조분말은 5% 혼합하였다. 콘크리트 시편(∅100mm×H200mm)을 제작하였다. 이때 목표슬럼프를 90±20mm 범위내로 조절하기 위하여 베이스콘크리트를 제조후 고성능감수제(SP)는 시멘트량에 0.8~2.5%를 각각 첨가하였다. Table 6은 콘크리트의 배합을 나타내고 있다.

Table 6. Mix Proportions of concrete

Item	Unit Mass (kg/m ³)						SP (C×%)
	W	C	IA	DP	G	S	
CC*	190	380	0	0	935	821	1
IA1C**	190	380	38	0	929	784	1
IA2C**	190	380	38	0	927	783	0.8
IA1DPC***	190	361	38	19	916	773	2.5
IA2DPC***	190	361	38	19	915	772	2

*CC: Control concrete

**IA1C, IA2C: Concrete mixed with incineration ash

***IA1DPC, IA2DPC: Concrete mixed with incineration ash and diatomite powder

4. 실험결과 및 고찰

4.1 소각재 품질 특성

4.1.1 소각재의 화학성분

소각재의 화학성분을 조사하여 측정한 결과(Table 5)에서 알 수 있듯이 시멘트의 화학성분과 유사하며 그 성분비율에 차이가 있다. 또한, 소각재의 종류에 따라라도 화학성분의 비율이 차이가 있음을 알 수 있었다.

화학성분 중 SiO_2 성분은 시멘트 조성광물 중 C_2S , C_3S 에 형성된 C-S-H 수화물과 재차 반응하는 성질을 갖는다. 시멘트는 약 21.6%인데 비하여 소각재의 SiO_2 성분은 소각재 종류에 따라 차이가 있었다. IA1은 5.66%로 시멘트에 비하여 약 4배 작은 값이었으며, IA2는 시멘트보다 작은 값으로 4.30%를 나타내었다.

MgO 성분은 석고와 반응하여 에트링가이트 성분을 형성하게 되며, MgO 성분이 많을 경우 에트링가이트가 과다 형성되어 팽창을 유발할 수 있으므로 시멘트에서는 5% 이하로 규정하고 있으며, 시멘트는 약 3.68%인 반면, 소각재는 거의 나타나지 않았다.

CaO 성분은 시멘트 조성광물 C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF 및 시멘트 수화물인 C-S-H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 형성하는 주성분으로 시멘트는 약 61.40%를 나타내었으나, IA1은 56.23%로 시멘트와 비슷한 값이었으며, IA2는 시멘트보다 작은 값으로 47.95%를 나타내었다. 이들 성분은 이러한 염기성 성분 CaO의 산성성분($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)에 대한 비율을 수경률(H.M.)으로 나타내며, 일정비율에 대한 염의 생성반응을 나타낸다.

이와 같이 소각재 종류에 따른 화학성분을 비교하여 본 결과, 소각재 종류에 따라 화학성분이 차이가 있는 것은 원료의 차이에 의한 영향 및 소각방식에 의한 영향이 크게 작용하였다고 판단된다(Charles et al, 2010; Huh and Ko 2004).

4.1.2 소각재의 조직성분 및 입자형상

소각재의 조직성분을 검토하기 위하여 X선 회절 분석시험을 실시하였으며, 이를 정리한 것이 Fig. 2로서 두 종류의 소각재가 비슷한 조직을 하고 있다고 평가된다.

소각재의 입도분포를 측정하여 정리한 것 Fig. 3 및 Table 7이다.

소각재의 누적입자량은 소각재의 종류에 큰 차이가 없이 비슷한 값을 나타내었으며, 누적 입자량이 50%에 해당하는 소각재의 평균입경은 IA1 27.8 μm , IA2 26 μm 로 나타났다.

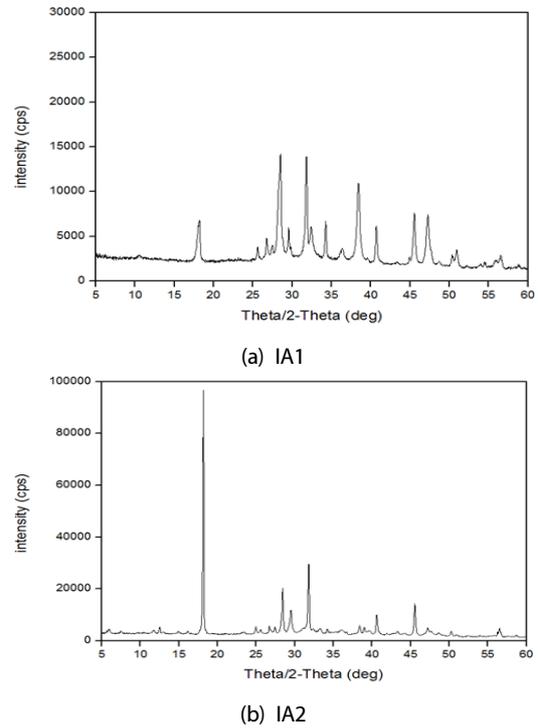


Fig. 2. X-ray diffraction of IA

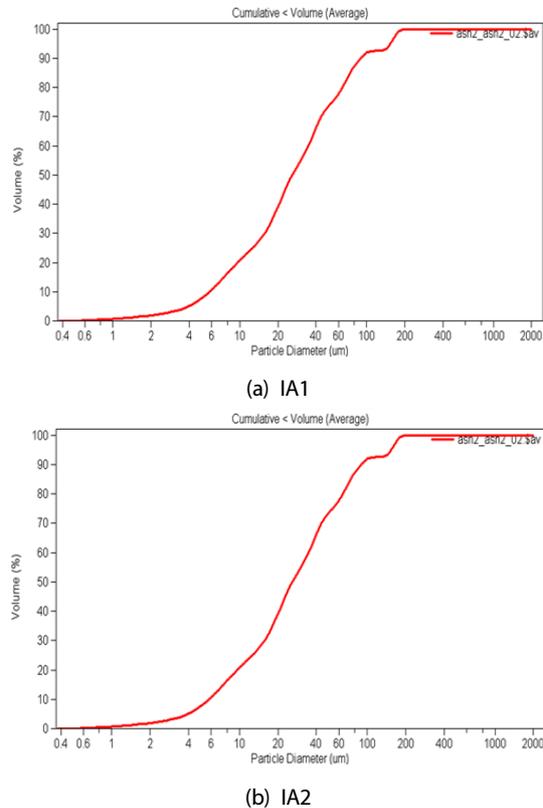
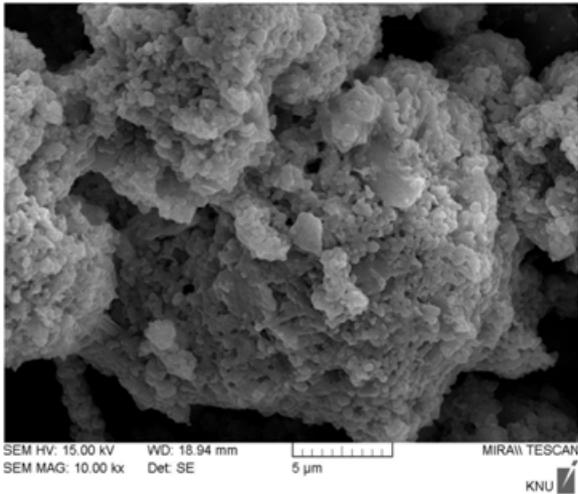


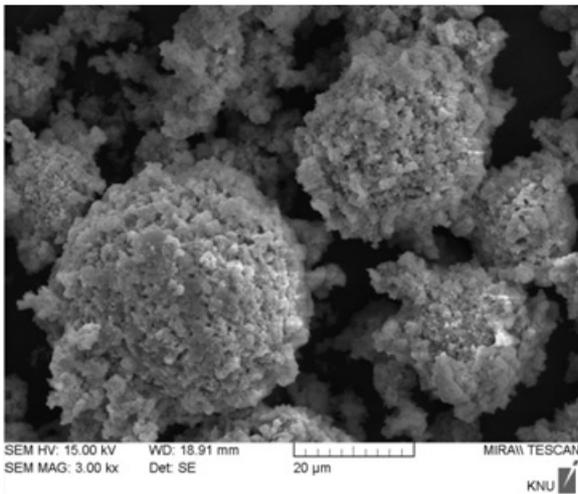
Fig. 3. Particle Distribution of IA

Table 7. Particle size of IA according to accumulated particle weight (μm)

Accumulated particle weight (%)	Particle Size (μm)	
	IA1	IA2
10	7.68	5.82
25	16	12.6
50	27.8	26
75	50	53.7
90	86	89.9



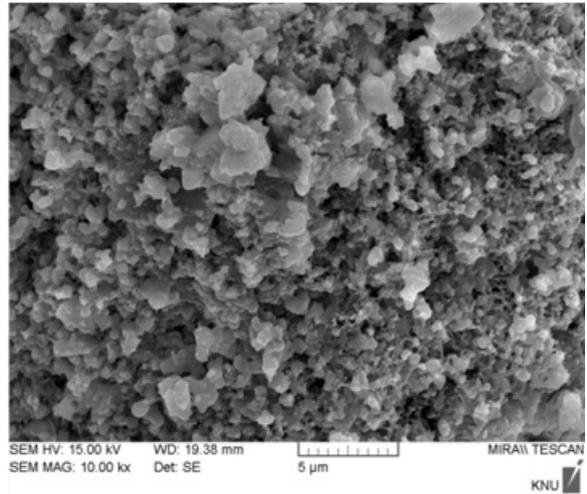
(a) 10,000 times magnification



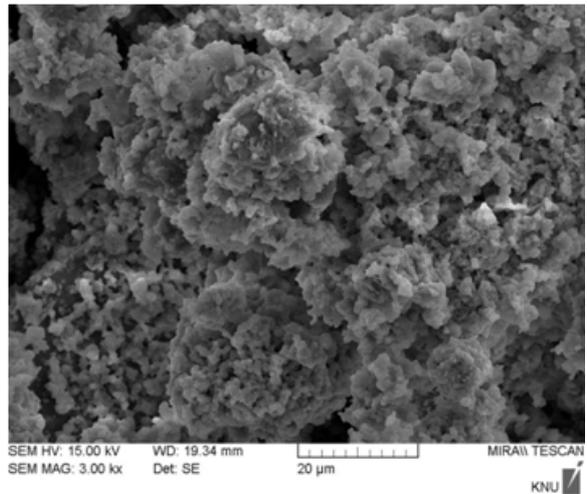
(b) 3,000 times magnification

Photo 1. Particle shape of IA1 (SEM)

소각재의 입자형상을 관찰하기 위하여 전자현미경으로 소각재 종류별 입자를 3,000배 및 10,000배 확대 촬영하여 나타낸 것이 Photo 1 및 Photo 2이다.



(a) 10,000 times magnification



(b) 3,000 times magnification

Photo 2. Particle shape of IA2 (SEM)

Photo 1에서 알 수 있듯이 소각재 IA1의 입자형상은 미세한 입자들이 뭉쳐져 구형상을 나타내고 있으며, 다공질의 형상을 보이고 있으므로 이를 사용한 모르타르 및 콘크리트의 유동성은 저하될 것으로 판단된다.

Photo 2에서 알 수 있듯이 IA2는 미세한 입자들이 뭉쳐져 박판형상을 하고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 두 종류의 소각재의 입자크기 및 입도분포는 비슷하였으나, 입자형상에 크게 차이가 있었다. 즉, 소각재 IA1은 미세입자들이 뭉쳐 구형을 나타내며 다공성을 가지므로 혼합수를 흡수하게 되어 콘크리트 워커빌리티를 저하시키는 요인으로 작용한다.

4.2 소각재 사용 콘크리트의 품질특성

4.2.1 굳지않은 콘크리트의 특성

생활폐기물 소각재에서 발생하는 소각재는 우리나라뿐만 아니라 전세계적 이슈로 소각재를 시멘트고형물과 안정화하여 콘크리트용 재료로 재활용하고자 연구가 활발히 진행되고 있다(Charles et al, 2010; Gines and Chimenos 2009).

소각재 및 구조분말을 혼합한 모르타르의 품질분석 결과를 토대로 소각재 2종류와 구조분말 DP를 사용한 콘크리트의 유동특성을 평가하기 위하여 공기량 및 슬럼프 시험을 실시하였으며, 공기량 및 슬럼프 시험결과를 표로 정리한 것이 Table 8이다.

콘크리트의 목표슬럼프 90±20mm를 얻기 위하여 베이스 콘크리트를 제조한 후 고성능감수제를 첨가하였다. 소각재만을 혼합한 콘크리트의 베이스 슬럼프는 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트와 비슷한 값을 나타내었으며, 고성능감수제도 목표 슬럼프를 얻기 위하여 오히려 작게 소요되었다. 반면에 소각재와 구조분말을 혼합한 경우 베이스 슬럼프가 작게 나타나며, 이에 따라 목표슬럼프를 얻기 위한 고성능감수제 사용량이 증가하였다. 즉, 구조분말이 입자크기가 작고 다공성 입자로 구성되어 있기 때문에 유동

성이 저하되었다고 평가된다. 아울러, 콘크리트의 공기량은 1.5%~1.7%로 비슷한 값을 나타내었다.

소각재 및 구조분말을 혼합한 콘크리트를 제조한 후, 베이스 슬럼프 값을 측정하였으며, 목표 슬럼프 90±20mm를 얻기 위하여 고성능감수제를 첨가하였다. 이 때 콘크리트의 베이스 슬럼프 값, 목표 슬럼프 값 및 고성능감수제 사용량을 그림으로 정리한 것이 Fig. 4 및 Fig. 5이다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 소각재 IA2를 혼합한 콘크리트의 베이스 슬럼프는 40mm로 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트의 베이스 슬럼프 30mm에 비하여 큰 값을 나타내었다. 또한, 목표 슬럼프 90±20mm를 얻기 위한 고성능감수제의 사용량은 0.8%로 작게 소요되었다. 이는 콘크리트 배합시 소각재를 시멘트에 대체하여 혼합하였기 때문에 소각재의 입형에 의한 영향으로 판단된다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 소각재와 구조분말을 혼합하므로써 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트에 비하여 콘크리트의 베이스 슬럼프 값이 저하되었으며, 고성능감수제 사용량은 증가하였다.

즉, 소각재 IA1과 구조분말을 혼합한 콘크리트의 베이스 슬럼프는 0mm로 슬럼프 값이 “zero”로 나타났으며, 목표슬럼프 90±20mm를 얻기 위한 고성능감수제의 사용량은 2.5%로 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트에 비하여 2.5배 증가하였다.

또한, 소각재 IA2와 구조분말을 혼합한 콘크리트의 베이스 슬럼프는 20mm였으며, 목표슬럼프 90±20mm를 얻기 위한 고성능감수제의 사용량은 2.0%로 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트에 비하여 2배 증가하였다.

한편, 소각재 IA1만을 혼합한 콘크리트의 베이스 슬럼프는 20mm를 나타내었으나, 목표슬럼프 90±20mm를 얻기 위하여 고성능 감수제 사용량은 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트

Table 8. Slump and air content of concrete

Item	SP (C×%)	Slump (mm)		Air Content (%)
		Base	SP Addition	
CC	1	30	100	1.5
IA1C	1	20	100	1.5
IA2C	0.8	40	90	1.7
IA1DPC	2.5	0	80	1.5
IA2DPC	2	20	90	1.5

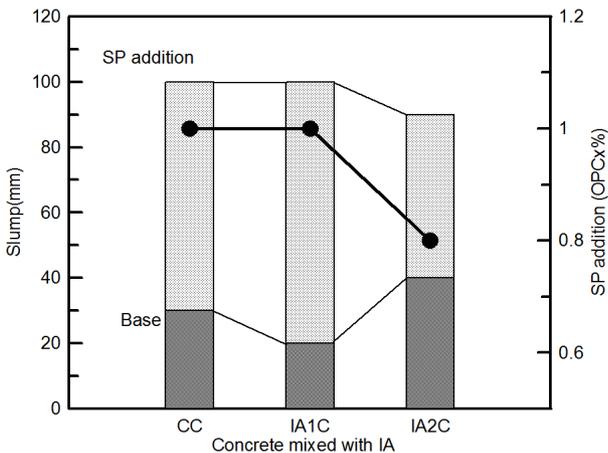


Fig. 4. Slump and SP dosage of concrete mixed with IA

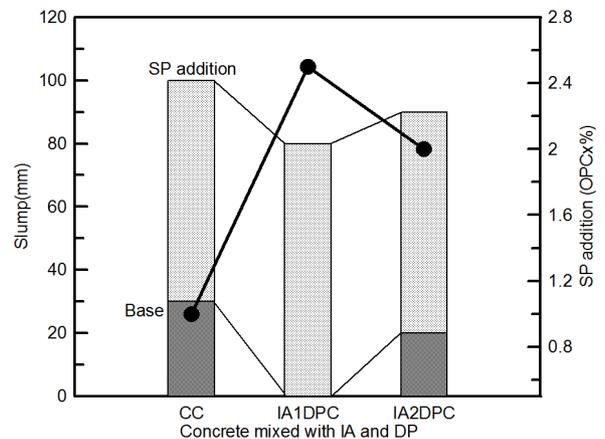


Fig. 5. Slump and SP dosage of concrete mixed with IA and DP

와 동일한 양으로 1%만을 사용하는데 비하여 소각재와 규조분말을 동시에 혼합할 경우 소각재만을 사용한 콘크리트에 비하여 유동특성이 저하되는 현상이 나타났다.

이와 같이 소각재와 규조분말을 혼합한 콘크리트의 베이스 슬럼프 값이 저하하고 고성능감수제 사용량이 증가하는 이유는 규조분말의 입도분포 특성상 58.4 μ m의 미세입자가 90% 이상 함유되어 있으며, 규조분말의 입자가 다공성에 의한 영향으로 판단된다.

4.2.2 압축강도 및 인장강도

콘크리트 강도시험은 재령 7일 및 재령 28일 압축강도와 재령 28일에서의 인장강도를 측정하기 위하여 콘크리트 공시체를 제작한 후, 소요재령까지 수중양생하여 강도시험을 실시하였다.

Photo 3은 콘크리트 강도 시험용 공시체를 제작하여 탈형 후, 공시체 표면상태를 나타낸 사진이다.

사진에서 알 수 있듯이 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트의 공시체는 탈형 후 표면이 얼룩이 없는 깨끗한 상태를 나타내었다.

그러나, 소각재를 사용하여 제조한 콘크리트의 공시체는 탈형 후 적색의 녹성분이 표면에 발생되어 있는 현상을 볼 수 있다. 이는



Photo 3. Surface condition of concrete specimen

Table 9. Result of Concrete Strength

Item	Compressive Strength				Tensile Strength	
	7days		28days			
	MPa	%	MPa	%	MPa	%
CC	29.9	100	37.5	100	2.72	100
IA1C	25.3	84.6	35.8	95.5	2.16	79.4
IA2C	27.3	91.1	36.1	96.3	2.53	93.0
IA1DPC	28.7	95.9	38.6	102.9	2.41	88.6
IA2DPC	27.8	92.9	38.3	102.1	2.87	105.5

소각재 중에 포함되어 있는 화학성분이 산화되어 표면에 나타나는 현상으로 콘크리트용 건설재료로 사용시 이와 같은 현상을 충분히 검토한 후 적용해야 할 것으로 평가된다.

강도시험 결과를 Table로 정리한 것이 Table 9이다.

Table 9에서 알 수 있듯이 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트의 재령 7 및 28일 압축강도는 각각 29.9MPa 및 37.5MPa를 발현하였으며, 재령 28일의 인장강도는 2.72MPa를 나타내었다.

소각재를 혼합한 콘크리트의 압축강도는 소각재 종류에 따라 차이가 있으며, 소각재 IA2를 혼합한 콘크리트가 소각재 IA1을 혼합한 콘크리트에 비하여 강도발현이 우수하였다.

소각재와 규조분말을 혼합한 콘크리트의 압축강도는 재령 7일에서는 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트에 비하여 작게 나타났으나, 재령 28일에서는 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트 보다 크게 나타났다.

소각재 및 규조분말을 혼합한 콘크리트의 압축강도 결과를 정리한 것이 Fig. 6 및 Fig. 7이다.

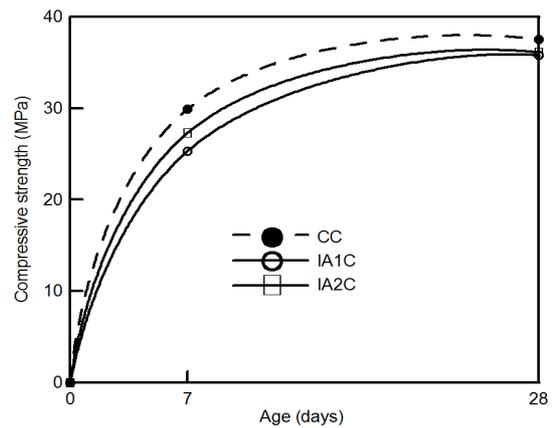


Fig. 6. Compressive strength of concrete mixed with IA

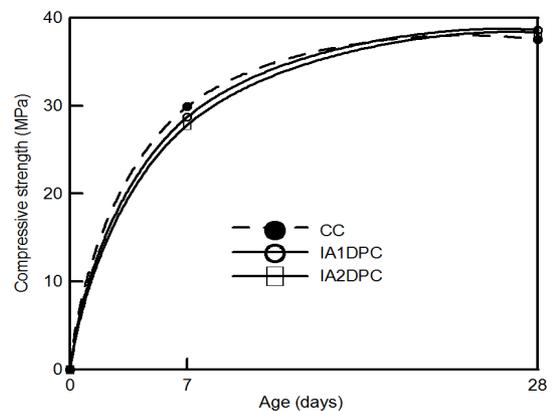


Fig. 7. Compressive strength of concrete mixed with IA and DP

Fig. 6에서 알 수 있듯이 소각재 IA1 및 IA2를 혼합한 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 35.8MPa 및 36.1MPa로 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트와 비교하여 95.5% 및 96.3%를 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 소각재와 규조분말만을 혼합한 콘크리트의 압축강도 검토 결과, 소각재와 규조분말을 혼합한 콘크리트 IA1DPC, IA2DPC의 재령 7일 압축강도는 28.7MPa 및 27.8MPa이었다. IA1DPC, IA2DPC의 재령 28일 압축강도는 38.6MPa 및 38.3MPa로 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트에 비하여 약 2.9% 및 2.1%로 증가하였다.

이와 같이 규조분말을 혼합하므로써 포졸란 반응효과에 의하여 재령 28일 압축강도가 증가하는 효과가 나타났다(Neville 2000), 즉, 소각재를 사용한 콘크리트의 강도저감 보상을 위하여 규조분말의 혼합이 유효하다는 것으로 평가된다.

소각재 및 규조분말을 혼합한 콘크리트의 압축강도 결과를 정리한 것이 Fig. 8이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 소각재 IA1 및 IA2를 혼합한 콘크리트의 재령 28일 인장강도는 2.16MPa 및 2.53MPa로 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트와 비교하여 79.4% 및 93.0%를 나타내었다.

소각재와 규조분말만을 혼합한 콘크리트의 인장강도 시험 결과, 소각재와 규조분말을 혼합한 콘크리트 IA1DPC, IA2DPC의 재령 28일 인장강도는 2.41MPa 및 2.87MPa로 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트에 비하여 약 88.6% 및 105.5%를 나타내었다.

즉, 소각재 혼합 콘크리트의 강도저감 보상을 위하여 규조분말을 사용할 경우 규조분말 혼합 콘크리트의 인장강도 발현에 효과가 있는 소각재는 IA2가 유효하다고 평가되었다.

보통강도 콘크리트(20MPa 이하)의 인장강도와 압축강도와의

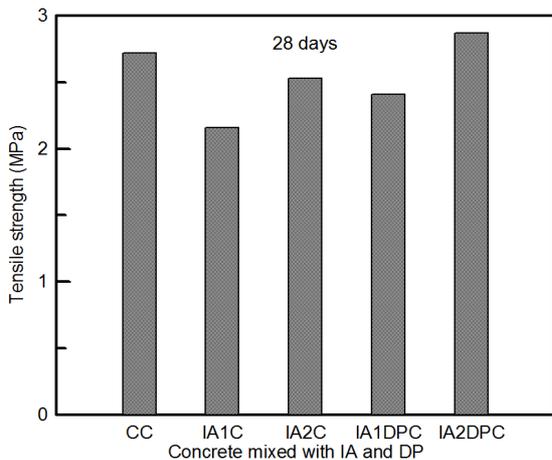


Fig. 8. Tensile strength of concrete mixed with IA and DP

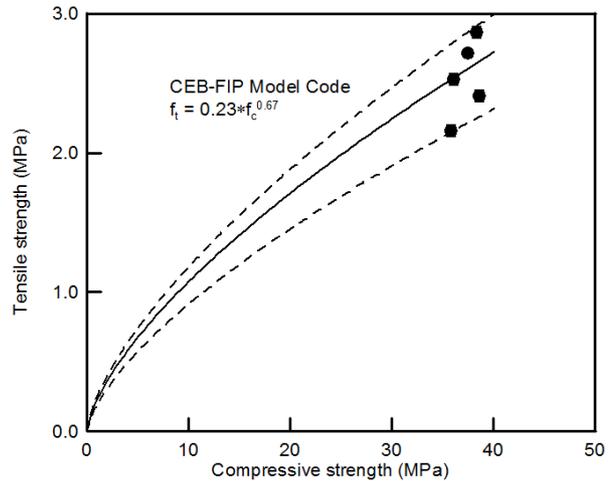


Fig. 9. Relationship between compressive strength and tensile strength of concrete mixed with IA and DP

비(σ_t/σ_c)는 10~11% 범위를 갖으며, 중강도 콘크리트(20~40MPa)의 인장강도와 압축강도와의 비(σ_t/σ_c)는 8~9% 범위를 갖는다. 또한 고강도 콘크리트(40MPa 이상)의 인장강도와 압축강도와의 비(σ_t/σ_c)는 7% 범위를 갖는다.

Fig. 9는 재령 28일에서 소각재와 규조분말을 혼합한 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계를 정리한 것이다.

보통포틀랜드시멘트만을 혼합한 콘크리트의 인장강도와 압축강도와의 비(σ_t/σ_c)는 약 7.25%로 나타난 반면에 소각재를 혼합한 콘크리트의 인장강도와 압축강도와의 비(σ_t/σ_c)는 6.0% 및 7.0%로 나타났다. 소각재 IA2와 규조분말을 혼합한 콘크리트의 인장강도와 압축강도와의 비(σ_t/σ_c)는 7.49%로 나타났다. 소각재와 규조분말을 혼합한 콘크리트의 압축강도와 인장강도의 관계는 CEB-FIP 코드에서 제시한 콘크리트의 압축강도와 인장강도 관계에서 85%~105% 범위내에 나타남을 알 수 있다.

5. 결론

국내 2곳의 소각장에서 발생하는 소각재를 콘크리트용 재료로 활용하기 위하여 실시한 본 연구의 실험결과에 대한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 소각재의 누적입도분포 50%의 평균입경은 27.8 μ m 및 26.0 μ m를 나타내었으며, 소각재 IA1의 입자형상은 미세입자가 뭉쳐져 구형상을 나타내고 있으며, 소각재 IA2의 입자형상은 미세입자가 판상형상으로 겹쳐져 있었다.

2. 소각재 종류에 따라 콘크리트의 유동특성에 크게 영향을 미치며, 소각재를 사용하지 않은 콘크리트에 비하여 소각재 IA2을 사용한 경우 베이스 슬럼프는 40mm로 큰 값을 나타내었으며, 목표슬럼프 90±20mm를 얻기 위한 고성능감수제의 사용량은 0.8%로 작게 소요되었다.
3. 소각재와 규조분말을 동시에 혼합한 콘크리트는 규조분말의 입자크기와 다공성의 영향으로 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트에 비하여 목표슬럼프 90±20mm를 얻기 위한 고성능감수제의 사용량이 2배 이상 증가하였다.
4. 소각재 IA1 및 IA2를 혼합한 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 35.8MPa 및 36.1MPa로 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트와 비교하여 약 4.5% 및 3.7% 정도 작게 나타났으며, 인장강도는 20.6% 및 7% 작게 나타났다.
5. 소각재와 규조분말을 혼합한 콘크리트의 강도발현은 규조분말의 포졸란반응 효과에 의하여 IA2DPC의 재령 28일 압축강도 및 인장강도가 약 2.1% 및 5.5% 증가하였다. 소각재와 규조분말을 혼합한 콘크리트의 압축강도와 인장강도의 관계는 CEB-FIP 코드에서 제시한 기준값의 85%~105% 범위내에 나타났다.

이상의 실험결과와 같이 소각재 종류에 따라 콘크리트의 유동 특성 및 강도특성에 큰 영향을 미치고 있으며, 소각재를 사용한 콘크리트의 공시체 표면상태는 적색의 녹성분이 표면에 발생되어 있는 현상을 볼 수 있으므로 콘크리트용 건설재료로 사용하기 위해서는 이와 같은 현상을 충분히 검토한 후 적용해야 할 것으로 평가된다.

References

- Ahn, J.W., Oh, M.H., and Han, C. (2008). A Study about Recycling from Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash, *Journal of Korean Inst. of Resources Recycling*, **17(1)**, 3–11 [In Korean].
- Chang, C.H. (2010). Characteristics of Cement Mortar Mixed with Incinerated Urban Solid Waste, *Journal of the Environmental Sciences*, **19(5)**, 639–646 [In Korean].
- Charles, H. K. Lam, Alvin W. M. Ip, John Patrick Barford and Gordon McKay (2010). Use of Incineration MSW Ash: A Review, www.mdpi.com/journal/sustainability, 1943–1968.
- Gines, O., Chimenos, J.M. (2009). Combined Use of MSWI Bottom Ash and Fly ash As Aggregate in Concrete Formulation: Environmental and Mechanical Considerations, *Journal of Hazardous Materials*, **169**, 643–650.
- Huh, M., Ko, K.S. (2004). Physico-Chemical characteristics of MSWs in Insular Area, *J. Korea Society of Waste Management*, **21(2)**, 152–162 [In Korean].
- Lee, H.Y., Choi, S.R., Noh, J.H., and Heo, H.S. (2010). An Experimental Study on the Treatment of Waste Ash from the Incinerator by Alkali Soluble Acrylic Copolymer Emulsion, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, **5(1)**, 111–116 [In Korean].
- Lim, N.W. (2001). Effect of Cement on the Solidification of Harmful Industrial Waste, *J. Korea Society of Waste Management*, **18(6)**, 39–50 [In Korean].
- Ministry of Environment (2013). The status on National Waste Emission and Disposal in 2012, <http://kostat.go.kr/wnsearch/search.jsp> [In Korean].
- Neville, A. M. (2000). *Properties of Concrete*, 4th Edition, Prentice Hall, London.
- Zhao Youcai, Song Lijie, Li Guojian (2002). Chemical Stabilization of MSW Incinerator Fly Ashes, *Journal of Hazardous Materials* 2815, 1–17.

쓰레기 소각재 사용 콘크리트의 품질특성에 대한 실험적 연구

쓰레기 소각재(소각재)를 콘크리트용 재료로 재활용하기 위하여 소각재의 품질특성에 대하여 분석하였으며, 소각재를 사용한 콘크리트의 유동특성 및 강도특성에 대하여 검토하였다.

소각재의 화학성분은 CaO 성분이 50%이상을 차지하고 있었으며, 소각재의 누적입도분포 50%의 평균입경은 25 μ m 정도를 나타내었다. 소각재 IA1의 입자형상은 미세입자가 뭉쳐져 구형상을 나타내고 있으며, 소각재 IA2의 입자형상은 미세입자가 판상형상으로 겹쳐져 있는 구조로 제조공정에 따라 다르게 나타났다.

소각재를 사용함으로써 콘크리트의 품질특성에도 크게 영향을 미쳤으며, 소각재 IA2를 사용한 경우 슬럼프가 증가하고 고성능감수제 사용량이 감소하였으나, 압축강도 발현은 저하하였다. 소각재 IA2와 규조분말을 병용하여 혼합함으로써 목표슬럼프를 얻기 위한 고성능감수제의 사용량은 증가하였으나, 재령 28일 압축강도는 향상되는 효과가 있었다. 또한, 압축강도와 인장강도와의 비는 CEB-FIP 코드의 85%~105% 범위내에 있었다.