

바텀애시 경량골재를 사용한 콘크리트의 열전도율 특성

Characteristics of Thermal Conductivity of Concrete Containing Fine Bottom Ash Aggregates

박지훈¹ · 정회원² · 양인환^{3*}

Ji-Hun Park¹ · Hoe-Won Jung² · In-Hwan Yang^{3*}

(Received November 30, 2020 / Revised December 8, 2020 / Accepted December 9, 2020)

In this paper, an experimental study was conducted to investigate the applications of bottom ash, which is an industrial by-product obtained from thermal power plants. Bottom ash was used as fine aggregate in this study, and an experiment was conducted to determine the characteristics of the bottom ash aggregate. In addition, 25, 50, 75, and 100% contents of crushed (natural) fine aggregate were replaced with bottom ash aggregate to produce concrete mixture including bottom ash. Thereafter, test results of the unit weight, ultrasonic velocity, compressive strength, and thermal conductivity of bottom ash concrete were obtained. Moreover, the effect of the curing ages of 28 and 91 days on the material characteristics of bottom ash concrete were identified. Test results showed that bottom ash used as fine aggregate had pozzolanic reaction. Finally, based on the extensive experimental results, relationships between thermal conductivity and unit weight, ultrasonic velocity, and compressive strength was suggested.

키워드 : 바텀애시, 열전도율, 초음파속도, 단위중량, 압축강도

Keywords : Bottom ash, Thermal conductivity, Ultra-sonic velocity, Unit weight, Compressive strength

1. 서론

콘크리트는 건축 및 기타 기반시설 공사에서 가장 중요한 재료이다. 2002년에는 세계적으로 약 27억 m³의 콘크리트가 생성되었는데, 이것은 일 년에 1인당 0.4m³ 이상의 콘크리트를 한 번 사용하는 것으로 계산된다(Books et al, 2018). 향후 콘크리트의 필요량은 2050년까지 연간 약 180억 톤으로 증가할 예정이다(Gorme et al, 2010; Rafieizonooz et al, 2016). 하지만 현재 콘크리트를 생산하기 위하여 자연 상태 골재들이 무분별하게 사용되어감에 따라 점차 고갈되어 가고 있다. 또한, 콘크리트의 사용량의 증대와 더불어 국내 산업이 발전함으로 산업폐기물은 비례하여 폭발적으로 늘어가고 있다(Yang et al, 2020a). 현재 국내에서의 2018년 화력발전소의 석탄재 발생량은 지속적으로 증가하여 186만 톤 정도로 50~60% 정도가 재활용되고 있으나, 나머지 40% 이상은 인근 매

립지에서 매립된다(Yang et al, 2020b).

석탄 화력발전소에서는 미분산 연소의 부산물인 바텀애시(bottom ash)와 플라이애시(fly ash)는 각각 20%, 80% 생산한다(Kim 2010). 플라이애시는 시멘트의 치환재로서 지금까지 많이 사용되고 있지만(Choi and Kim 2018), 바텀애시는 대부분 땅에 매립하여 버려지고 있는 실상이다. 매립량의 무분별한 증가로 매립장의 용량이 한계에 이르러 최악의 경우 전기 생산을 중단할 수밖에 없는 위기 상황이 올 수 있다(Yang and Park 2020).

본 연구에서는 증가하는 산업폐기물과 자연상태의 골재의 고갈을 해결하기 위해 화력발전소 폐기물인 바텀애시를 이용하여 자연상태의 골재를 대체하여 콘크리트 배합 시 적용 가능성에 관한 연구를 수행하였다. 바텀애시는 천연골재의 형상과 비교했을 때 입도 분포가 비슷하고 화학성분 및 등급 분류에서 콘크리트 이용에 적합하다(Hashemi et al, 2018; Tasdemir et al, 2017). 반면에

* Corresponding author E-mail: ihyang@kunsan.ac.kr

¹군산대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

²군산대학교 토목공학과 석사과정 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

³군산대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

밀도는 바텀애시의 경우, 일반적으로 2.0g/cm³로 알려져 있으며, 천연골재의 밀도 2.6g/cm³보다 낮은 값을 나타낸다. 또한, 바텀애시의 흡수율은 10% 이하로서, 천연골재의 흡수율인 3%보다 큰 값을 나타내며, 공극률이 크다는 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 플라이애시와 같이 바텀애시도 SiO₂, Al₂O₃ 성분이 시멘트의 C₃S, C₂S 등과 반응하여 포졸란 반응을 나타낸다(Singh and Siddique 2014). 이는 초기강도에 비해 장기강도 발현에 유리하다는 것을 나타낸다(Hubscher et al. 2001).

현재 바텀애시는 골재를 대체하여 모르타르나 경량 콘크리트를 만드는 것에 주로 이용되고 있다(Jung and Kwon 2013; Kim 2015; Oruji et al. 2017). 국내 연구 현황으로 바텀애시를 이용한 인공경량토를 만들어 콘크리트 건물의 옥상녹화를 통한 건물 단열성 향상에 이용과 포장면의 보도블록을 바텀애시의 다공성을 이용하여 물을 보수할 목적으로 사용되고 있다. 또한, 건물의 콘크리트 자중을 줄이기 위하여 낮은 밀도인 바텀애시를 사용하며(Muthusamy et al 2020), 현재 문제점으로 대두되고 있는 미세먼지의 감소를 목적으로 바텀애시의 공극을 이용한 콘크리트 방음벽과 같이 다양한 측면과 기술 발전이 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 화력발전소에서 배출되는 산업부산물인 바텀애시와 플라이애시를 콘크리트 배합에 적용하여 제작하고, 재료특성 분석을 위한 실험을 수행하였다. 플라이애시는 바인더의 일부를 대체하여 적용하였고 바텀애시는 잔골재를 대체하여 적용하였다. 최종적으로 단위중량, 초음파속도, 압축강도 및 열전도율 실험을 수행하여 다공질 및 경량 특성을 갖는 바텀애시의 열전도율 특성과 다른 재료 특성 간의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

본 연구에서의 콘크리트 배합 재료로서 바인더를 보통 포틀랜드 시멘트를 기본 바인더로 설정하고 플라이애시를 대체함에 따른 콘크리트의 특성을 분석하였다. 플라이애시 밀도는 2.23g/cm³, 분말도는 3,650cm²/g의 값을 나타내고 있다. 잔골재로는 부순 모래와 바텀애시를 사용하였으며, 바텀애시는 인천 영흥화력발전소에서 생산하는 바텀애시를 사용하였다. 골재 직경이 5mm를 초과하는 바텀애시는 조크리셔를 이용하여 분쇄하여 입자 크기를 5mm 이하로 유지하였다. 바텀애시는 보통 골재보다 낮은 밀도와 다공성 특성을 나타내므로 함유량의 증가함에 따라 콘크리트 자중의 감소와 초기강도가 감소하는 영향을 준다. 하지만 포졸란 반응으

로 장기강도 증진에 유리한 장점이 있다. 굵은 골재는 최대치수 20mm로 구형에 가까운 골재를 선정하였으며, 밀도 2.60g/cm³, 흡수율 1.02의 값으로 KS F 2527 부순 굵은 골재의 물리적 성질에 만족하는 값을 나타내고 있다. 혼화제는 강도를 증진시키고 수량을 감소시키기 위하여 고성능 감수제를 사용하였고 공기연행제를 사용하여 굳지 않은 콘크리트의 작업성을 확보하고자 하였다.

2.2 배합 및 제조

바텀애시 콘크리트 배합표를 Table 1에 나타내었다. 콘크리트 배합의 실험변수로는 바인더 중량의 20 및 40%를 플라이애시로 치환하였고, 잔골재 부피의 0, 25, 50, 75 및 100%를 바텀애시로 치환하여 재료 특성을 분석하였다. 플라이애시 및 바텀애시의 포졸란 반응으로 인한 장기 재령 효과를 파악하기 위하여 양생기간을 28일과 91일로 구분하여 실험을 수행하였다.

콘크리트 타설이 완료된 시편은 24시간 이상 기건양생을 통한 경화가 진행된다. 경화된 콘크리트는 탈형 후 20±3°C 온도의 물에 시편을 침지하여 수중양생을 수행하였다. Fig. 1은 양생이 종료된 후, 바텀애시 혼입률에 따른 시편 표면을 비교한 사진이다.



Fig. 1. Sections of concrete specimens with different bottom ash contents

2.3 골재 특성

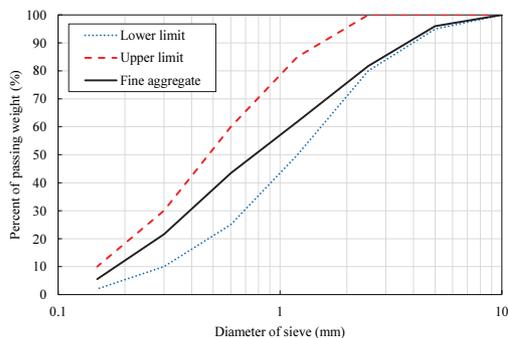
잔골재인 부순 모래를 대체하여 바텀애시를 사용하기 위해서는 골재의 형상 및 입도 분포가 유사한 성질을 가져야 한다. 따라서, 골재 특성을 파악하기 위하여 모래 및 바텀애시의 체가름 시험을 수행하였으며, KS F 2502의 규정에 맞추어 실시하였다. 모든 골재는 건조기를 이용하여 105±5°C의 온도로 24시간 동안 질량이 일정하게 될 때까지 건조했다.

Fig. 2는 부순 모래와 바텀애시의 체가름 시험을 통하여 측정된 입도분포곡선 그래프이다. 각 그래프의 ‘Upper limit’와 ‘Lower limit’는 골재의 표준 입자 크기의 상한선과 하한선인 곡선으로 두 곡선 사이의 그래프가 그려지는 것을 목표로 실험을 수행하였다. 부순 모래의 체가름 시험은 총 무게 500g의 절건상태 골재로 실험을 수행하였으며, 입도 분포 곡선은 표준 입도 분포 곡선 범위내에

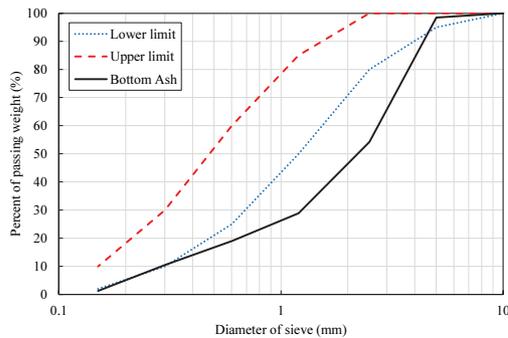
Table 1. Mixing proportion

Mixture	F.A (%)	B.A (%)	Curing (days)	W/B	Unit weight(kg/m ³)							
					W	Binder		Coarse aggregate	Fine aggregate		Admixture	
						OPC	F.A		Sand	B.A	HRWR	A.E
F20-B000	20	0	28 (91)	0.32	178.5	476	84.2	878.5	650	0	6.72	1.88
F20-B025		25		0.32	178.5	476	84.2	878.5	487	115	6.72	1.88
F20-B050		50		0.32	178.5	476	84.2	878.5	325	230	6.72	1.88
F20-B075		75		0.32	178.5	476	84.2	878.5	162	346	6.72	1.88
F20-B100		100		0.32	178.5	476	84.2	878.5	0	461	6.72	1.88
F40-B000	40	0	28	0.34	178.5	357	168.5	878.5	650	0	6.31	1.77
F40-B050		50		0.34	178.5	357	168.5	878.5	325	230	6.31	1.77
F40-B100		100		0.34	178.5	357	168.5	878.5	0	461	6.31	1.77

W: water, OPC: ordinary portland cement, F.A: fly ash, B.A: bottom ash, HRWR: high range water reducing agent, A.E: air entraining admixture



(a) Fine aggregate



(b) Bottom ash

Fig. 2. Particle size distribution curve

위치하는 결과를 나타냈다. 또한, 조립률 2.90의 값으로 KS에서 기준하는 2.3~3.1에 만족한 결과를 나타냈다. 한편, 바텀애시는 경량골재이므로 실험에 사용된 골재의 무게는 잔골재의 절반인 250g의 절건상태 골재로 실험을 수행하였다. 입도 분포 곡선은 표준 입도 분포 곡선의 하한선과 유사하거나 더 낮은 값의 결과를 나타냈으며, 조립률은 3.88의 값으로 도출되었다. 바텀애시는 표

준 입도 분포 곡선을 만족하지 못했으나, 다른 골재와 적절히 혼합 된다면 표준 입도 분포 곡선의 하한선을 상회하여 만족할 것으로 판단되므로 콘크리트 제작에 충분히 사용 가능할 것으로 기대 한다.

2.4 밀도 및 흡수율

콘크리트 배합 시 사용된 골재의 대체 가능성과 골재 특성을 비교 분석하기 위한 밀도 및 흡수율 시험을 시행하였다. KS F 2504 규정에 따라 부순 모래의 밀도 및 흡수율 시험을 수행하였으며, KS F 2529 규정에 따라 경량골재인 바텀애시의 밀도 및 흡수율 시험을 수행하였다. 부순 모래 및 바텀애시는 각각 총 중량 500g 및 300g의 표면건조 포화상태의 골재를 사용하여 시험을 수행하였다.

Fig. 3에 바텀애시의 함유량에 따른 밀도 및 흡수율 시험 결과를 나타냈다. 바텀애시 함유량 0%일 때의 밀도는 2.61g/cm³로서 KS 에서 규정하고 있는 표준 잔골재 밀도 2.60g/cm³를 만족한다. 반면에 바텀애시 함유량이 100% 일 때의 밀도는 1.84g/cm³의 값으로 표준 바텀애시의 밀도 1.0~2.0g/cm³의 범위내에 존재하는 값을 나타냈다. 바텀애시 함유량이 0 및 100%일 때, 흡수율은 각각 0.64% 및 3.88%로서 KS F 2527에서 규정하는 부순 모래와 바텀 애시 경량골재의 표준값을 만족한다. Fig. 3에서 바텀애시 함유량이 0, 25, 50, 75 및 100%일 때, 밀도는 각각 2.61, 2.47, 2.29, 2.13 및 1.84g/cm³로 낮아지며, 흡수율은 각각 0.64, 0.92, 1.41, 2.64 및 3.88% 값으로 증가한다. 이는 바텀애시가 잔골재 대비하여 공극이 많은 다공성인 특징으로 밀도가 낮으며, 다공성의 공극을 통한 흡수율의 증가로 나타나는 결과이다. Table 2에 사용한

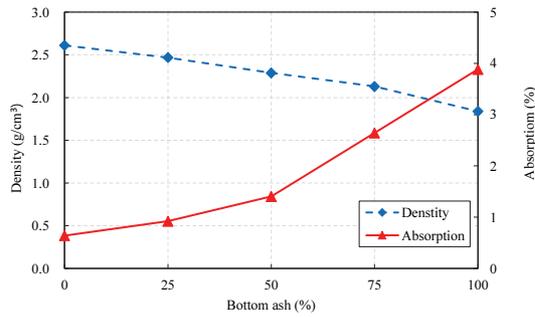


Fig. 3. Density and water absorption at different bottom ash contents

Table 2. Properties of aggregate

Type of aggregate	Density (g/cm³)	Absorption (%)	F.M
Coarse	2.60	1.02	6.68
Fine	2.61	0.64	2.90
Bottom ash	1.84	3.88	3.88

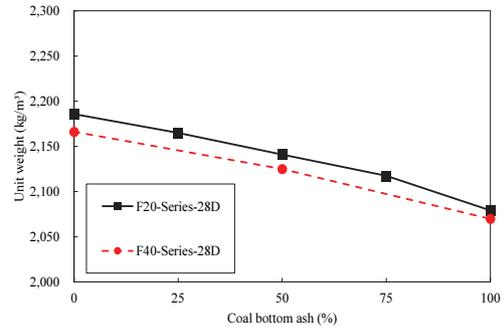
골재의 밀도, 흡수율 및 조립률 시험 결과를 나타내었다.

3. 재료시험 결과 및 분석

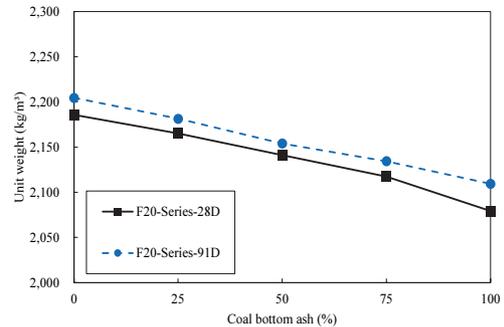
3.1 단위중량

플라이애시 및 바텀애시 콘크리트의 대표적인 물리적 특성으로서 단위중량을 측정하였다. 측정을 위하여 양생조에서 꺼내 24시간 이상 상온에서 건조를 진행하였다. 콘크리트의 단위중량은 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 원주형 공시체 시편으로 측정하였다.

Fig. 4는 바텀애시 함유량에 따른 콘크리트의 단위중량 실험결과를 나타낸 그래프이다. 플라이애시 함유량과 양생일수에 따른 영향을 비교분석 하기 위하여 두 가지 유형의 그래프로 구분하였다. 바텀애시 함유량이 증가함에 따라 단위중량이 감소하는 경향을 나타낸다. 바텀애시의 밀도는 잔골재보다 낮고 다공성으로 많은 공극을 포함하기 때문에 바텀애시 함유량의 증가로 인해 콘크리트 단위중량은 감소하게 된다. 또한, 플라이애시 함유량의 증가에 따라 단위중량은 감소하며, 이는 플라이애시의 단위중량이 시멘트 단위중량보다 작아서 나타나는 결과로 판단된다. 또한, 양생기간이 증가하면 단위중량도 증가하는 결과를 나타냈다. 양생기간이 증가할수록 시멘트 페이스트 공극을 C-S-H가 결합하여 채워짐으로써 나타나는 결과로 판단된다.



(a) Effect of fly ash content



(b) Effect of curing ages

Fig. 4. Test results of unit weight

3.2 초음파 속도

초음파 속도 측정은 매질의 종류에 따라 통과하는 초음파의 속도를 이용하여 콘크리트의 압축강도를 유추하는 대표적인 비파괴 시험 방법 중 하나이다. $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 실린더 시편의 양면에 초음파 속도 측정용 센서의 완전한 부착을 위하여 그리스(grease)를 도포하여 초음파 속도를 측정하였다.

Fig. 5에서 바텀애시를 함유한 콘크리트의 초음파 속도를 비교하였다. 플라이애시 함유량이 증가하면 초음파 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 재령 28일에서 시멘트보다 낮은 밀도를 갖는 플라이애시의 다량 함유는 상대적으로 단단하지 않은 매질을 형성하게 된다. 결과적으로 치밀하지 못한 콘크리트 구조는 초음파 도달 시간을 증가시키고 초음파 속도 저하를 유발하는 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 또한, 재령이 증가할수록 초음파 속도는 증가하는 결과를 나타냈다. 이는 포졸란 재료인 플라이애시 및 바텀애시가 재령이 증가할수록 콘크리트의 공극을 C-S-H로 채우면서 밀실한 구조를 만들고 초음파 도달 시간을 감소시켜 초음파 속도의 증가를 나타낸 것으로 판단된다. 반면에 바텀애시 함유량이 증가할수록 초음파 속도는 낮아지는 경향을 나타내는데, 이는 다공성 바텀애시의 영향으로 인해 나타나는 현상으로 판단된다.

3.3 압축강도

바텀애시 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위하여 원주형공시체를 제작하였으며, 2000kN 용량의 만능시험기(UTM)를 이용하여 실험을 수행하였다. KS F 2405에서 규정하는 기준에 따라 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 원주형 공시체의 하중재하실험을 통해 응력 및 변위 값을 측정하고 콘크리트의 압축강도를 산출하였다. Fig. 6에 압축강도 실험 전경과 파괴형상을 나타내었다.

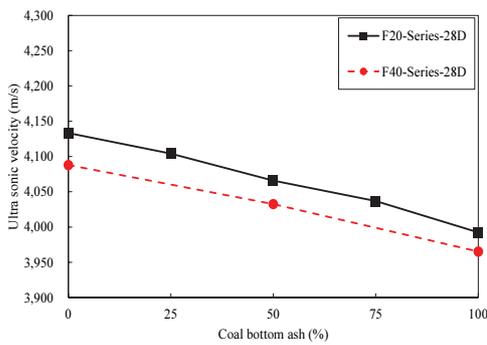
Fig. 7에 바텀애시 콘크리트의 압축강도 실험결과를 그래프로 나타내었다. 바텀애시 함유량이 증가할수록 압축강도는 감소하는

경향을 나타낸다. 바텀애시의 밀도가 모래에 비해 상대적으로 낮고 바텀애시 내부의 공극에 존재하고 있던 수분이 증발하여 공극이 재생성되기 때문이다. 재령과 바텀애시 함유량이 동일할 때, 플라이애시 함유량이 40%인 콘크리트의 압축강도가 플라이애시 함유량이 20%인 콘크리트의 압축강도보다 작다. 이는 시멘트보다 낮은 밀도를 갖는 플라이애시 함유량 증가에 따라 플라이애시 주변의 생성되는 공극으로 인해 콘크리트가 치밀하지 못한 구조를 갖게 되면서 결과적으로 압축강도 감소를 유발하기 때문이다.

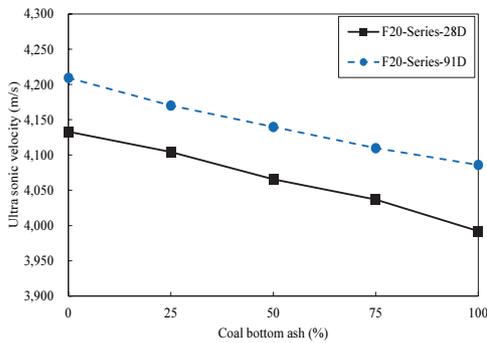
플라이애시와 바텀애시 함유량이 동일할 때, 재령 28일에서 재령 91일로 증가할 때 콘크리트의 압축강도 증가한다. 플라이애시 및 바텀애시의 포졸란 반응으로 콘크리트 내부 공극이 C-S-H로 채워져 콘크리트는 더욱 치밀한 구조로 변함으로써 나타나는 현상으로 판단된다.

3.4 열전도율

Fig. 8은 열전도율 실험 과정을 나타낸 그림이며, 열전도율 측정 장비는 TPS-1500 장비를 사용하였다. 콘크리트의 열전도율 측정값에 신뢰성을 향상시키고 정확한 결과값 도출을 위하여 24 시간 이상 상온에서 건조시킨 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 크기의 원주형 시편을 준비하여 시편 전체 높이의 중앙에서 절단하고 그 위치에 측정



(a) Effect of fly ash content



(b) Effect of curing ages

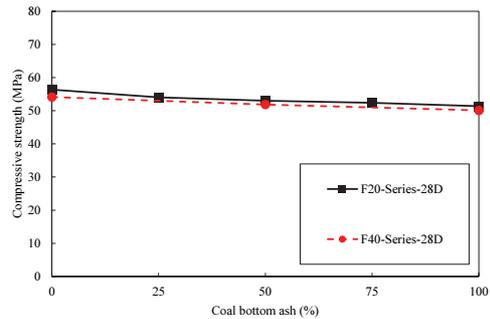
Fig. 5. Test results of ultrasonic velocity



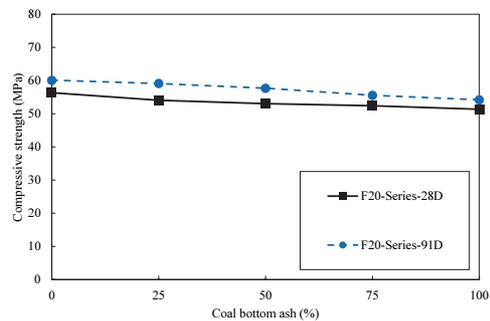
(a) Test setup

(b) Failure shape

Fig. 6. Compressive strength test view



(a) Effect of fly ash content



(b) Effect of curing ages

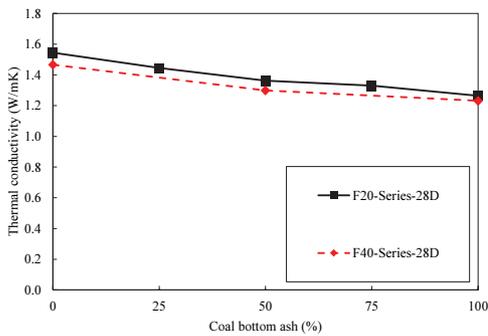
Fig. 7. Test results of compressive strength

센서를 거치하여 실험을 수행하였다. 실험 시, 시편 절단면에 이물질이 없도록 하여 열전도율에 영향을 미치지 않도록 설정하였다. 또한, 시편의 절단면과 측정 센서의 높이는 동일하게 설정하여 절단면 사이는 틈새 없이 정확히 맞물리도록 설정하여 실험을 수행하였다.

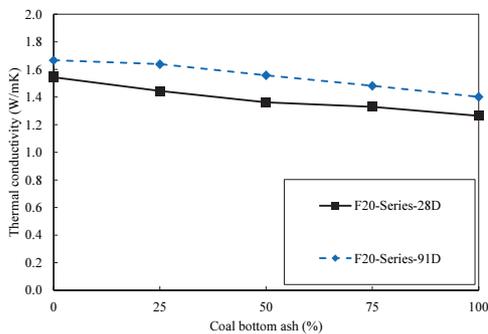
Fig. 9에 열전도율 실험결과를 나타내었다. 바텀애시 함유량이 증가할수록 열전도율은 감소하는 경향을 나타낸다. 바텀애시의 다



Fig. 8. Test setup of thermal conductivity



(a) Effect of fly ash content



(b) Effect of curing ages

Fig. 9. Test results of thermal conductivity

공성 특성은 콘크리트 전체 공극을 증가시키고 콘크리트의 열전도율의 감소를 유발한다. 플라이애시 함유량 20%일 때, 재령 28일에서 바텀애시 함유량 100%의 열전도율은 바텀애시 함유량 0%의 열전도율보다 18.1% 감소한 값을 나타냈다. 재령과 바텀애시 함유량이 동일할 때, 플라이애시 함유량 40%인 콘크리트의 열전도율은 플라이애시 함유량 20%인 콘크리트의 열전도율보다 낮은 값을 나타냈다. 플라이애시 함유량의 증가는 열전도율 감소를 유발한다. 반면에 플라이애시와 바텀애시 함유량이 동일할 때, 재령 28일에서 재령 91일로 증가하면 콘크리트의 열전도율은 증가한다. 재령의 증가로 인한 콘크리트 수화 진행과 더불어 바텀애시 및 플라이애시의 포졸란 반응이 주요인으로 판단되며, 수화물의 생성은 콘크리트 공극을 채움으로써 치밀한 구조를 갖게 되므로 열전도율의 증가를 나타낸다.

4. 상관관계 분석

열전도율과 단위중량간의 관계를 분석하기 위하여 회귀분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 10(a)에 나타내었다. 단위중량이 증가할수록 열전도율 또한 증가하는 경향을 나타낸다. 즉, 열전도율과 단위중량은 비례하여 증가 또는 감소하는 경향을 나타내며, 유기적인 관계를 형성하고 있다. 열전도율과 단위중량 관계 그래프에서 상관계수 R^2 은 0.9273으로 10에 가까운 높은 신뢰성을 나타내며, 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$\lambda_c = 0.0155e^{0.0021\rho_c} \quad (1)$$

여기서, λ_c 은 열전도율(W/mK), ρ_c 은 콘크리트의 단위중량(kg/m^3)을 의미한다.

본 연구에서와 같은 실험결과를 축적하여 방대한 데이터 베이스를 구축할 경우, 실험을 통한 결과 도출이 어렵거나 할 수 없는 상황에서 이러한 상관관계를 통해 콘크리트의 단위중량 또는 열전도율을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10(b)에는 열전도율과 초음파속도의 상관관계에 관한 그래프를 나타내었다. 초음파속도의 증가와 함께 열전도율은 증가하는 경향을 나타냈으며, 열전도율과 단위중량의 관계와 유사한 결과가 도출되었다. 열전도율과 초음파속도 관계에서 상관계수 R^2 은 0.8933으로 도출되었다. 열전도율과 초음파속도 관계식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_c = 0.0727e^{0.0007V_c} \quad (2)$$

여기서, V_c 는 초음파속도 (m/s)를 의미한다.

Fig. 10(c)는 열전도율과 압축강도의 상관관계에 관한 그래프이다. 그래프에서 압축강도의 증가와 함께 열전도율도 증가하는 경향이 나타난다. 높은 압축강도는 콘크리트가 밀실한 구조를 갖는 것을 의미하며, 이러한 이유로 인해 열전도율 역시 비례하여 높은 값을 나타내는 것으로 판단된다. 열전도율과 압축강도 관계에서 상관계수 R^2 은 0.9325로 1에 가까운 값을 나타내며, 높은 연관성을 갖는 것으로 판단된다. 열전도율과 압축강도의 관계는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

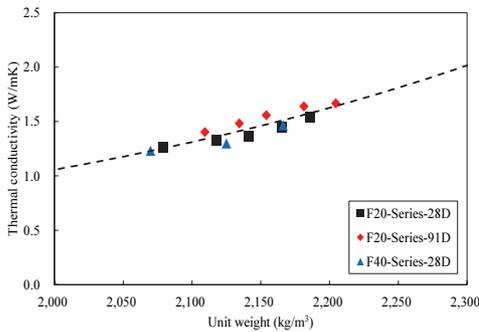
$$\lambda_c = 0.4626e^{0.0205f_{ck}} \tag{3}$$

여기서, f_{ck} 는 압축강도(MPa)를 나타낸다.

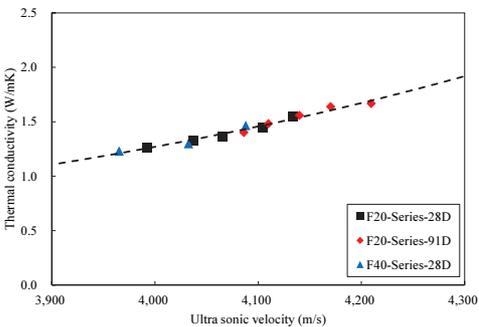
5. 결론

본 연구에서는 천연 잔골재의 고갈과 화력발전소 산업부산물인 바텀애시의 활용증가를 위해 천연골재를 바텀애시로 대체한 콘크리트의 재료 특성과 열전도율에 관한 실험 연구를 수행하였다. 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

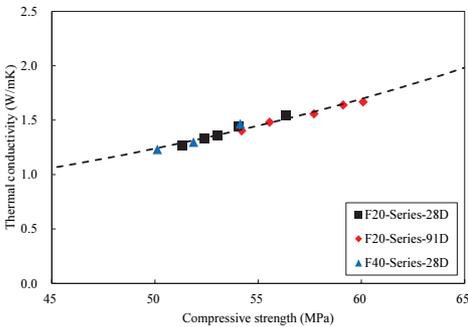
1. 부순(천연)골재에 비해 바텀애시 골재의 밀도는 낮고 흡수율은 증가하는 경향의 실험결과를 나타냈으나, 부순 골재와 혼합하여 사용한다면 콘크리트에 충분히 적용 가능한 것으로 판단된다.
2. 바텀애시의 골재 특성 및 다공성으로 인해 바텀애시 함유량이 증가할수록 바텀애시 콘크리트 단위중량 및 초음파속도는 감소하는 경향을 나타낸다. 반면에 재령이 증가할수록 바텀애시 콘크리트의 단위중량 및 초음파속도는 증가하며, 이는 포졸란 특성에 기인하여 장기재령에서 우수한 성능을 나타내는 것으로 판단된다.
3. 바텀애시 함유량이 증가함에 따라 압축강도 및 열전도율은 감소하는 경향을 나타내며, 콘크리트 성능 저하를 유발한다. 반면에 재령이 28일에서 91일로 증가하면 바텀애시의 포졸란 반응으로 압축강도 및 열전도율은 증가한 결과를 나타냈다. 바텀애시는 장기재령에서 유효하게 작용하여 성능 향상에 영향을 준 것으로 판단된다.
4. 열전도율은 단위중량, 초음파속도 및 압축강도와와의 관계에서 서로 비례하여 증가 또는 감소하는 유기적인 관계를 형성하고 있는 것으로 나타났다. 이 관계를 통해 산출된 식을 토대로 특성 간의 유추 또는 예측이 가능할 것으로 기대된다.



(a) Relationship between thermal conductivity and unit weight



(b) Relationship between thermal conductivity and ultrasonic velocity



(c) Relationship between thermal conductivity and compressive strength

Fig. 10. Relationships between thermal conductivity and other material characteristics

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통기술촉진연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(19CTAP-C151889-01).

References

Brooks, A.L., Zhou, H., Hanna, D. (2018). Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites, *Construction and Building Materials*, **159**, 316–328.

Choi, H.B., Kim, J.M. (2018). Fundamental properties of lightweight concrete with dry bottom ash as fine aggregate and burned artificial lightweight aggregate as coarse aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **6(4)**, 267–274.

Gorme, J.B., Maniquiz, M.C., Kim, S.S., Son, Y.G., Kim, Y.T., Kim, L.H. (2010). Characterization of bottom ash as an adsorbent of lead from aqueous solutions, *Environmental Engineering Research*, **15**, 207–213.

Hashemi, S.S.G., Mahmud, H.B., Djobo, J.N.Y., Tan, C.G., Ang, B.C., Ranjbar, N. (2018). Microstructural characterization and mechanical properties of bottom ash mortar, *Journal of Cleaner Production*, **170**, 797–804.

Hubscher, V.B., Lagarde, F., Leroy, M.J.F., Coughanowr, C., Enguehard, F. (2001). Utilisation of bottom ash in road construction: a lysimeter study, *Waste Management & Resourch*, **19**, 557–566.

Jung, S.H., 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**, 522–533.

Kim, H.K. (2015). Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength mortar to improve workability, *Construction and Building Material*, **91**, 57–64.

Kim, S.C. (2010). Evaluation of bottom ash on the application for the aggregate of concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **5(2)**, 105–115.

Muthusamy, K., Rasid, M.H., Jorkhio, G.A., Budiea, A.M.A., Hussin, M.W., Mirza, J. (2020). Coal bottom ash as sand replacement in concrete: a review, *Construction and Building Materials*, **236**, 1–12.

Oruji, S., Brake, N.A., Nalluri, L., Guduru, R.K. (2017). Strength activity and microstructure of blended ultra-fine coal bottom ash-cement mortar, *Construction and Building Material*, **153**, 317–326.

Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M.R., Hussin, M.W., Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement, *Construction and Building Materials*, **116**, 15–24.

Singh, M., Siddique, R. (2014). Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate, *Construction and Building Materials*, **50**, 246–256.

Tasdemir, C., Sengul, O., Tasdemir, M.A. (2017). A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes, *Energy and Buildings*, **151**, 469–475.

Yang, I.H., Park, J.H. (2020). A Study on the Thermal Properties of High-Strength Concrete Containing CBA Fine Aggregates, *Materials*, **13**, 1493.

Yang, I.H., Park, J.H., Jung, H.W. (2020a). An Experimental Study on the Thermal Conductivity of Concrete Containing Coal Bottom Ash Aggregate, *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020)*, 1–6.

Yang, I.H., Park, J.H., Le, D.N., Jung, S.H. (2020b). Strength properties of high-strength concrete containing coal bottom ash as a replacement of aggregates, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2020**, 1–12.

바텀애시 경량골재를 사용한 콘크리트의 열전도율 특성

본 논문에서는 화력발전소 산업부산물인 바텀애시의 활용성을 증대시키기 위한 실험연구를 수행하였다. 본 연구에서는 바텀애시를 잔골재로 설정하였으며, 골재 특성 파악을 위한 실험을 수행하였다. 부순 잔골재의 25, 50, 75 및 100%를 바텀애시로 치환하여 바텀애시를 혼입한 콘크리트를 제작하였으며, 재료특성으로서 단위중량, 초음파속도, 압축강도 및 열전도율 실험을 수행하여 결과를 도출하였다. 한편, 바텀애시는 포졸란재료로서 가능성이 있으며, 재령 28일과 91일로 구분하여 양생기간에 따른 영향을 파악하였다. 측정된 실험결과를 토대로 다공질 및 경량 특성을 갖는 바텀애시를 잔골재로 사용한 콘크리트의 열전도율 특성과 단위중량, 초음파속도 및 압축강도와와의 상관관계를 제시하였다.