

폐CNT를 혼입한 시멘트 복합체의 강도 및 열전달 특성에 대한 기초적 연구

Fundamental Study on the Strength and Heat Transferring Characteristic of Cement Composite with Waste CNT

구현철¹ · 김운학² · 오홍섭^{3*}

Houchul Koo¹ · Woon-Hak Kim² · Hongseob Oh^{3*}

(Received February 23, 2022 / Revised March 25, 2022 / Accepted March 28, 2022)

The purpose of this study was to develop self-heating concrete by utilizing the conduction resistance of concrete in order to reduce the risk of occurrence of black ice in the concrete pavement in winter and to prevent damage caused by freeze-thawing effect. For this purpose, it was attempted to evaluate the strength and temperature exothermic characteristics using powder and liquid waste CNTs and a waste cathode agent as a conduction promotion. It was analyzed that liquid waste CNT had an effective dispersion degree in the mortar and a small decrease in strength occurred. In addition, DC 24 V was supplied by applying steel mesh, copper foil and copper wire to the mortar as electrodes, and the temperature change characteristics according to the mixing ratio of spent CNTs, anodes and carbon fibers were evaluated. In addition, by evaluating the temperature characteristics according to the electrode spacing from the selected optimal mixture, it was confirmed that it had sufficient heating characteristics up to an electrode spacing of 100 mm up to AC 50 V.

키워드 : 자가발열, 폐CNT, 폐음극재, 탄소성유, 압축강도

Keywords : Self-heating, Waste carbon nanotube, Waste cathode agent, Carbon fiber, Compressive strength

1. 서론

최근 기상변동이 심화됨에 따라 도로 결빙 또는 블랙 아이스 등에 의한 교통사고와 콘크리트 시설물의 파손이 증가하고 있다. 특히 산악지형이 많은 국내 특성상 동결융해와 제설제 등에 의한 복합 손상이 증가하고 있으며, 이에 대한 해결책으로 고내구성 콘크리트를 개발하고자 하는 연구가 진행되고 있으나, 이방법은 블랙아이스 등의 문제를 근본적으로 해결하지는 못하는 한계를 갖고 있다. 따라서 콘크리트에 발열 특성을 도입함으로써 동결융해 등에 의한 손상을 원천적으로 차단하고, 차량 사고 등을 근본적으로 해결하기 위한 연구가 최근 많이 진행되고 있다(Chu et al. 2014; Gomis et al. 2015; Liu et al. 2015; Kim and Ban 2017; Tuan and Yehia 2004; Zhao et al. 2011). 콘크리트 포장체에 열선을 매설하

는 방법으로 결빙이 발생하지 못하도록 하는 기술은 기존에도 사용되는 기술이었으나, 열선의 내구성과 유지관리의 어려움 등으로 인하여 최근에는 거의 사용되지 않고 있다. 열선간격에 의한 발열 문제를 해결하기 위하여 최근에는 흑연 및 탄소나노튜브(CNT) 등과 같은 전도체를 콘크리트에 혼입하여 전도도를 높임으로서 콘크리트의 발열 성능을 향상시키고자 하는 연구들이 많이 진행되고 있다(Chang et al. 2009; Lee et al. 2017; Karademir 2019; Song et al. 2016). Oh et al.(2017)은 CNT가 첨가된 콘크리트 배합에서 CNT 첨가량이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것을 확인하였다. CNT 혼입율이 시멘트 중량의 0.115 %의 정도까지는 강도에 영향을 미치지 않으나, 0.2 % 이상에서는 반데르발스의 힘에 의하여 강도 저하현상이 발생하는 것으로 분석하였다. 미세구조 분석에 의하여 액상CNT의 분산이 효과적이며, 화학반응에 의한 수화물이 생성되는 것이 아니라 filler effect에 의해 역학적 성능에 영향을

* Corresponding author E-mail: opera69@chol.com

¹남평산업 상무 (Nampyoung, Gyeongnam, 52340, Korea)

²한경대학교 건설환경공학과 교수 (School of Civil & Environmental Engineering, Hankyong National University, Gyeonggi, 17579, Korea)

³경상국립대학교 건설시스템공학과 교수 (Department of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam, 52725, Korea)

미치는 것으로 분석하였다(Lee et al. 2018). Park et al.(2018)은 다중벽 CNT를 혼입하여 전압 공급방법에 따른 발열 특성을 분석하였으며, AC 100 V, 150 V를 공급하여 열화상 카메라로 온도 전달 및 분포 특성을 평가하였다. Karademir(2019)는 난방 시스템에 적용하고자 탄소섬유, 흑연, 강섬유 등과 함께 MWCNT를 사용하여 발열 성능을 평가하였다. 0.115 %~0.35 %의 MWCNT를 혼입하여 하였을 때, 60 V 전압으로 20분 안에 35 °C 발열 성능을 갖는 시멘트 복합체를 개발하였다. 이와 같이 CNT를 발열시멘트 복합체에 적용하고자 하는 연구들이 많이 진행되고 있으나, CNT 자체가 콘크리트의 열전달 효과를 높일 수 있으나, 다른 재료와 비교하여 고가이고, 분말형태의 경우에는 인체에 유해할 수 있다는 문제가 있다. 따라서 발열 성능을 유지하면서 단가를 낮추고 유해성을 없앨 수 있는 기술이 개발될 필요가 있다. 본 연구에서는 CNT 제조 과정에서 발생하는 폐CNT를 활용하여 발열시멘트 복합체를 개발하고자 하였으며, 사용된 폐CNT는 순도 등의 요구조건을 만족하지 못하는 제품으로 다양한 형태의 CNT가 혼합되어 있다. 이와 함께 폐기되는 2차전지에서 나오는 폐음극재를 흑연 등의 대체재로 활용하고자 하였다.

2. 발열시멘트 복합체 배합 실험

2.1 기초실험 계획

시멘트 복합체의 발열 특성을 확인하기 위한 기본 모르타르의 배합은 Table 1에 정리한 것과 같이 KS 규격의 시멘트(C) 1 : 잔골재(S) 2 배합으로 고정하고 물-결합재비(water-binder ratio, water cementitious material ratio, W/B)는 46 %를 기본으로 배합하였다. 잔골재 용적대비 0.5 %, 1 %, 3 %, 5 %의 폐CNT 분말로 치환하

거나, 액상 폐CNT 0.5 %와 1 %로 만든 수용액을 모르타르에 혼입한 후 모르타르의 압축강도는 KS L5105 「수경성 시멘트 모르타르 압축강도 시험 방법」에 따라 7일과 28일 압축강도를 평가하였다. 폐CNT 분말은 Fig. 1과 같이 수분을 함유한 상태이며, 건조시키거나 초음파분산기법을 적용하여 액상형태의 폐CNT 용액으로 제조한 후 사용하였다. 그리고 압축강도 조건과 발열 조건을 만족하는 배합에 대하여 전도 촉진재로서 탄소섬유와 폐음극재를 혼입하여 온도전달의 효과를 검증하고자 하였다. 탄소섬유 혼입은 단위 시멘트 대비 각각 0.5 %, 1 %를 혼입하였으며, 폐음극재는 잔골재 용적 대비 5 %와 10 % 치환하여 제작하였다.

열전달을 위한 전극체는 현장적용성과 전도율을 고려하여 Stainless Steel Mesh, 구리 선, 구리포일을 사용하였다. Stainless Steel Mesh는 전도율 1.10×10^6 mhos/m인 강철합금으로 직경 1.05 mm, 간격 12 mm 규격의 Mesh를 사용하였다. 전도율이 높은 구리는 두께 0.3 mm의 포일과 직경 1.05 mm 선을 사용하여 전도 특성을 평가하고자 하였다. 입력전기는 현장에서 전자파 발생정도가 낮은 직류(direct current, DC)와 시간에 따라 전류 주기적으로 크기와 방향이 변하기 때문에 전자파 발생정도는 높으나 현장 적용이 손쉬운 교류(alternating current, AC)를 모두 사용하였다. 전압은 태양광 등에 의한 현장발전을 고려하여 DC는 저전압인 12 V, 24 V를 사용하였으며, AC 입력전압은 30~110 V를 이용하여 발열 온도 실험을 실시하였다. 기초실험에서는 배합별 압축강도와 1단계는 전도체 종류에 따른 온도 특성을 평가하였다.

기본적인 발열 특성 평가를 위하여 Fig. 2와 같이 50 × 50 × 50 mm 시험편과 150 × 100 × 50 mm의 모르타르 시험편을 단계별로 적용하였다. 이때 1단계 발열 특성 평가시 40 mm 간격으로 연결되지 않은 전극체를 모르타르에 매입한 후 인가전압을 공급 후 중앙부의 온도를 측정하였다.

Table 1. Mix proportion of cement mortar for deicing concrete

	W/B (%)	W (g)	C (g)	S (g)	WCNT (g)		Stimulant (g)	
					Powder	Liquid	Carbon fiber	Waste cathode
Plain	46 %	127.0	276.0	552.0	-	-	-	-
WC-5(P)		127.0	276.0	524.4	27.6	-	-	-
WC-3(P)		127.0	276.0	535.4	16.6	-	-	-
WC-1(P)		127.0	276.0	546.5	5.5	-	-	-
WC-0.5(P)		127.0	276.0	549.2	2.8	-	-	-
WC-1(W)		127.0	276.0	552.0	-	5.5	-	-
WC-0.5(W)		127.0	276.0	552.0	-	2.8	-	-
WCCF-1		127.0	276.0	552.0	-	2.8	2.8	-
WCCF-0.5		127.0	276.0	552.0	-	2.8	1.4	-
WCCM-10		127.0	276.0	496.8	-	2.8	-	55.2
WCCM-5		127.0	276.0	524.4	-	2.8	-	27.6

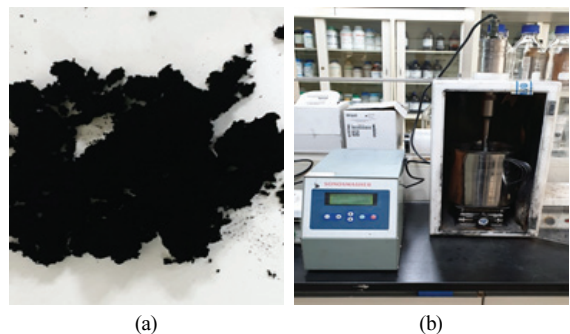


Fig. 1. Waste CNT and sonic spreading apparatus

Fig. 2와 같이 전기저항을 디지털 멀티미터로 측정하고, 내부 온도계를 설치한 후 변압 조정기를 이용하여 1차적으로 DC 12, 24 V 전압을 60분 동안 공급하여 5분마다 60분 동안 발열 특성을 측정한다. 미발열시 2차적으로 AC 30~110 V 전압을 60분 동안 공급하여 발열온도를 5분마다 60분 동안 측정을 한다. 측정 중 발열 온도 60 °C 도달 시 전압 공급을 중단하고 온도 변화를 측정 하였다.

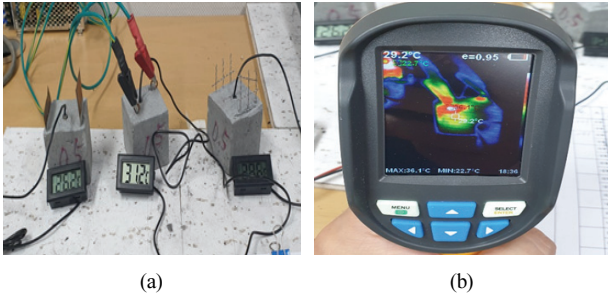


Fig. 2. Temperature measurement of specimens by digital meter and thermal imager

3. 기초 물성 실험결과

3.1 압축강도

Fig. 3에는 페CNT를 혼입한 시멘트 모르타르의 재령별 압축강도를 나타내었다. 기준배합의 28일 압축강도는 35 MPa인 것으로 나타났으며, 페CNT 혼입 모르타르의 강도는 혼입량이 증가할수록 강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 분말 페CNT를 3 %와 5 % 혼입한 변수의 28일 강도가 콘크리트에 적용하기에는 불가능한 10 MPa와 8 MPa 정도를 나타냈다.분말 형태로 0.5 %와 1.0 % 혼입한 경우 기준 모르타르 강도의 50 % 내외로서 CNT의 불링

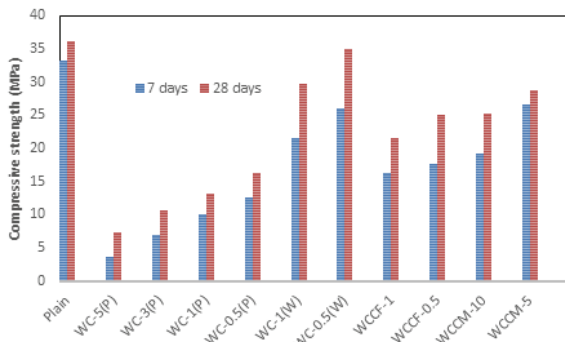


Fig. 3. Compressive strength of cement mortar with waste CNT

등에 의하여 강도발현이 충분히 되지 않은 것으로 판단된다. 또한 분말 페CNT배합시 워커빌리티가 급격히 낮아졌기 때문에 유동성 확보를 위하여 W/B를 1.6 %~9.6 % 증가시켰다. 이는 CNT의 소수성으로 인하여 CNT의 분산이 충분히 이루어지지 않고, 배합수가 증가한 것으로 판단된다. 페CNT를 초음파에 분산시킨 액상 페CNT를 0.5 %~1 % 혼합한 모르타르의 재령별 압축강도는 재령 7일 21.6 MPa~26.1 MPa, 재령 28일 29.8 MPa~34.9 MPa으로 기본 배합과 비교하여 초기강도는 낮으나, 28일 강도는 거의 유사한 것으로 나타났다. 액상 페CNT와 탄소섬유를 혼입한 경우의 강도는 재령 7일 16.3 MPa~17.6 MPa, 재령 28일 21.5 MPa~25.0 MPa으로 액상 페CNT만 혼입된 경우보다 강도가 크게 감소하였다. 액상 페CNT 0.5 %의 수용액과 폐음극재를 혼입한 변수에서는 재령 7일 19.3 MPa~26.7 MPa, 재령 28일 25.3 MPa~28.7 MPa로 강도가 감소하였다. 폐음극재에 혼입된 인조흑연, 천연흑연, 저결정탄소등의 육각형 판상체로 구조의 층간 결합으로 강도가 감소한 것으로 판단된다.

3.2 전기저항 실험

전기저항 및 비저항에 대한 측정은 제작된 시험체에 디지털 멀티미터(Digital Multi Meter, DMM)를 이용하여 전기저항을 측정하였으며, 액상 페CNT를 기반으로 전도촉진재료의 치환률에 대한 발열특성을 분석하기 위해 실시하고자 하였다.

OPC콘크리트는 아주 우수한 절연체로서 기건상태에 있는 경우 콘크리트의 전기저항은 약 $10^6 \Omega \cdot m$ 정도이며, 절건상태는 약 $10^9 \Omega \cdot m$ 정도이다. 하지만 습윤상태의 콘크리트 전기저항은 반도체 범위에 속하는 약 $100 \Omega \cdot m$ 정도이다.

Table 2. Electric Resistance of for deicing concrete ($\Omega \cdot m$)

	Electric resistance	
	50 × 50 × 50	150 × 100 × 50
WC-0.5(P)	3,200.0	-
WC-1(P)	1,210.0	-
WC-3(P)	303.4	-
WC-5(P)	169.2	-
WC-0.5(W)	518,000	292,000.0
WC-1(W)	6,320.0	-
WCCF-0.5	1,630.0	1,750.0
WCCF-1	810.0	-
WCCM-0.5	1,630.0	760.0
WCCM-1	1,230.0	-

측정결과 페CNT의 함유량이 증가할수록 모르타르의 전기저항이 감소하는 것으로 나타났다. 분말의 경우가 액상보다 저항값이 크게 감소하였으나 액상과 탄소섬유 또는 음극재를 사용하는 경우에는 분말형태와 유사하게 저항값이 감소하여 일정정도의 발열효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 시멘트 복합체의 발열특성

4.1 기본발열 특성

4.1.1 전극체 종류별 발열특성

50 × 50 × 50 mm 몰드에 전극체를 40 mm 간격으로 매입한 후 완전건조상태에서 DC 24 V 인가전압을 공급하였으며, Fig. 4에

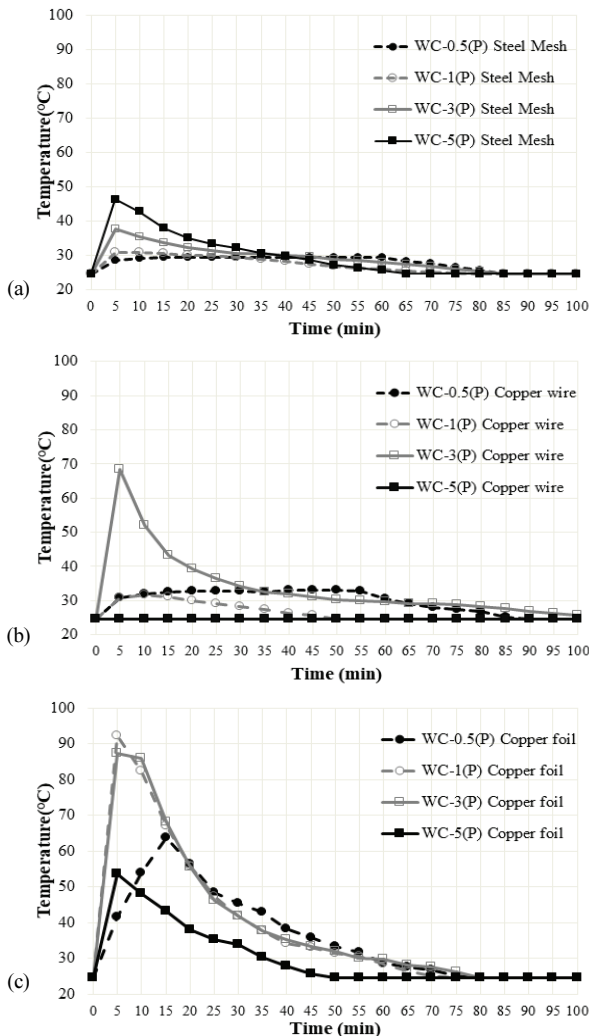


Fig. 4. Temperature change of cement mortar with WCNT powder due to electrical supply

는 페CNT 파우더가 혼입된 모르타르의 온도변화 정도를 도시하였다. 모르타르의 온도가 65 °C 이상까지 올라가면 전원공급을 중단하였으며, 이하에서는 100분동안 전원을 계속 공급하였다. 전압공급 면적이 큰 구리포일의 온도가 가장 높게 증가하는 것으로 나타났으며, 스틸메쉬와 구리선은 비슷하나 WC-3 %가 혼입된 구리선 변수의 경우에는 약 70 °C까지 온도가 증가하였다.

스틸메쉬를 적용하고 분말 페CNT 5.0 %(WC-5(P)) 혼입한 변수는 5분 후 Peak 온도 46.3 °C에 발열 온도가 증가하였으나, 이후 전압 공급에도 온도는 감소하는 것으로 나타났다. 혼입율이 감소할수록 증가되는 온도는 낮은 것으로 분석되었다. 구리선을 전극체로 사용한 변수에서는 5 %에서 온도변화가 없고, 0.5 %와 1 %는 거의 동일하게 온도 변화를 나타내었으며, 3 % 혼입시 최대 67 °C까지 증가하는 것으로 측정되었다. 이에 반하여 전원공급 면적이 큰 구리포일의 경우에는 모든 변수에서 50 °C이상으로 온도가 올라갔으며, 5 % 혼입된 변수의 온도가 가장 낮게 증가하여 스틸메쉬의 경우와는 차이를 나타내었다. 발열 온도 분석 결과, 온도가 상승하다 저하된 것은 시험체내에 분말 페CNT의 뭉침현상에 의하여 분산이 충분히 일어나지 않았으며, 내부 공극에 기인한 것으로 판단된다.

4.1.2 액상 페CNT 혼입

동일한 시멘트 모르타르에 액상 페CNT 0.5 wt%와 1.0 wt% 혼입한 변수에 대하여 전극체 종류에 따른 온도변화를 Fig. 5에 정리하였다.

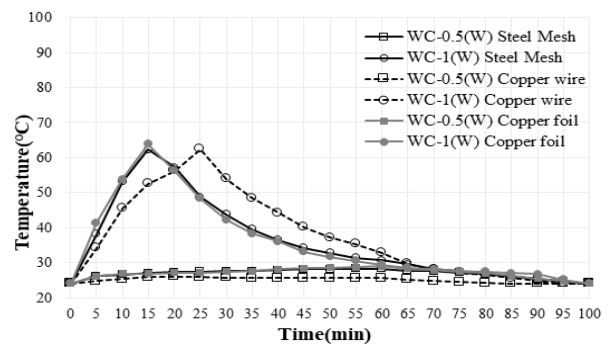


Fig. 5. Temperature change of cement mortar with liquid WCNT due to electrical supply

전극체와 무관하게 0.5 % 혼입시 온도변화가 거의 없는 것으로 나타났으며, 액상 페CNT 1.0 wt%(WC-1(W)) 혼입 시 최대온도에 도달시까지 15분에서 25분 정도까지 소요되었다. 상대적으로 페CNT 분말에 비해서는 상대적으로 전도율이 낮은 것으로 판단되

나, 전극체의 영향은 크지 않은 것으로 분석되었다. 메쉬와 구리포일은 15분내외에서 최대값에 도달하였으며, 구리선의 경우는 25 정도로서 시간이 조금 더 소요되었다. 전극체는 Mesh > 구리포일 > 구리선 등으로 발열 온도 상승 효과를 나타내었다.

4.1.3 액상 페CNT+탄소섬유 혼입

액상 페CNT 0.5 wt% 혼입을 기본배합으로 하고, 전도촉진재로서 탄소섬유 0.5 % (WCCF-0.5)와 1.0 % (WCCF-1)를 각각 혼입한 변수에 대하여 동일한 방법으로 온도 변화를 측정하였다. 액상 페CNT 0.5 %만 혼입한 변수는 온도 변화가 거의 발생하지 않았으나, 탄소섬유 혼입시 Fig. 6에 나타난 것과 같이 60 °C정도까지 온도가 상승하는 것으로 분석되었다. 온도 증가속도는 액상 CNT 1.0 % 혼입시보다 늦어져 탄소섬유 1 %와 구리포일 변수는 30분 정도로 가장 빨리 온도가 상승하였으며, WCCF-0.5 변수는 최대온도까지 60분 정도가 소요되었다. 스틸메쉬와 구리선 변수의 경우 최대 온도까지 상승시간은 60분 정도로 유사하였으며, 대체로 탄소섬유 혼입량이 높은 경우가 온도 상승효과가 높았으며, 구리선의 효율이 가장 낮게 나타났다.

4.1.4 액상 페CNT+폐음극재 혼입

액상 페CNT 0.5 wt% 혼입을 기본배합으로 전도촉진을 위해 폐음극재를 5 % (WCCM-0.5)와 10 % (WCCM-1) 각각 혼입한 변수에 대하여 동일한 방법으로 발열 온도를 측정하고 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

폐음극재 10 % (WCCM-10)와 구리 포일을 적용한 변수가 20분 만에 최대온도 60.2 °C까지 증가한 후 온도가 낮아졌으며, 동일한 전극체를 사용하고 폐음극재 5 %를 적용한 경우는 최대온도 상승 시까지 45분 정도가 소요되었다. 전체적으로 폐음극재 혼입률이 증가할수록 온도 증가 정도가 높아지는 것을 확인할 수 있으며,

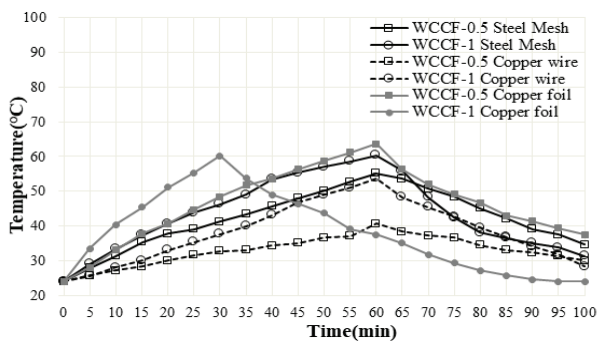


Fig. 6. Temperature change of cement mortar with liquid WCNT and carbon fiber due to electrical supply

전극체에 따른 효율은 구리포일>스틸 메쉬>구리선의 순으로 분석되었다.

결과적으로, 액상 페CNT 0.5 %와 전도촉진재로 폐음극재를 5 %와 10 % 혼입한 경우 최대온도 상승까지 20분 정도의 차이를 나타내었으며, 감소속도의 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다.

4.2 인가전압별 온도특성

발열 온도가 안정적으로 나타난 액상 페CNT 0.5 wt%와 폐음극재 5 % (WCCM-5) 배합을 기준으로 300 × 50 × 70 mm 몰드에 전극간격 100 mm, 200 mm, 280 mm로 유지하고 전압 DC 24 V를 공급한 후 온도를 측정하였으며, 미발열 변수에 대하여 AC 30, 50, 70, 90, 110 V를 각각 60 분 동안 공급하여 Peak 온도와 대기 온도에서 발열 상승 온도를 측정하였다. 이때 발열온도 60.0 °C 도달시 전압공급을 중단하고 온도 저하 상태를 측정하였으며, 열화상카메라에 의한 발열 상태를 Fig. 8에 정리하였다.

전극 간격 280 mm의 경우, 전압 DC 24 V와 AC 30 V 공급시 Fig. 9와 같이 온도 변화 없이 미 발열이 되었고, 전압 AC 70 V와 AC 110 V 공급 시 초기온도에서 약 6.6 °C와 11.1 °C 상승하였으며, AC 110 V에서는 최대 36.1 °C 이후 온도저하 현상이 발생하여 최종 100분 경과시 AC 70 V와 AC 90 V 변수와 동일한 수준의 온도로 저하되었다.

전극 간격 200 mm에서는 Fig. 10과 같이 전압 DC 24 V에서 60분 동안 약 3.4 °C 상승하였으며, 전압 AC 30 V에서는 60분 공급 시 6.8 °C 상승하였다. 그리고 AC 90 V와 AC 110 V 적용시 각각 12.8 °C와 14.3 °C 상승하는 것으로 관찰되어 전극간의 간격을 200 mm까지 증대시키기 위해서는 고전압을 사용해야 하는 한계가 있는 것으로 분석되었다.

전극 간격 100 mm에서 전압 DC 24V 공급 시 Fig. 8과 같이 35.9 °C까지 상승한 후 서서히 저하되었으며, 전압 AC 30 V에서는

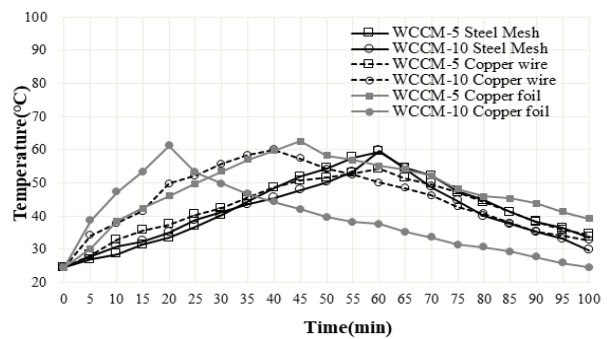
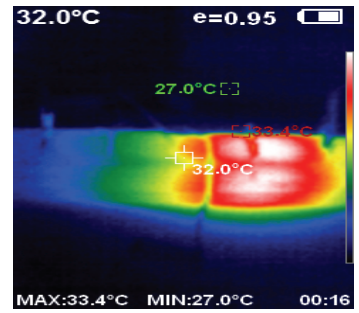
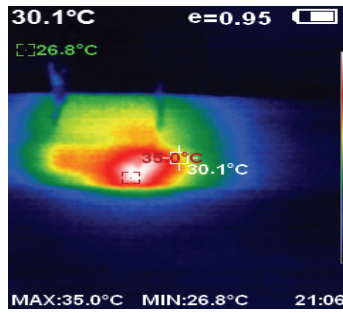
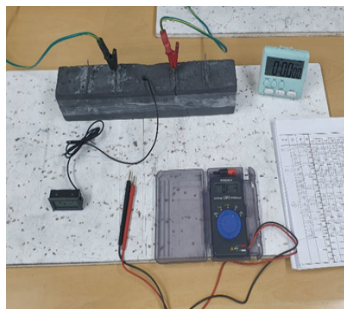
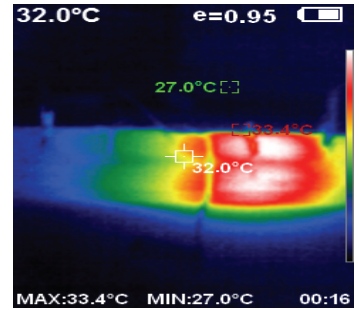
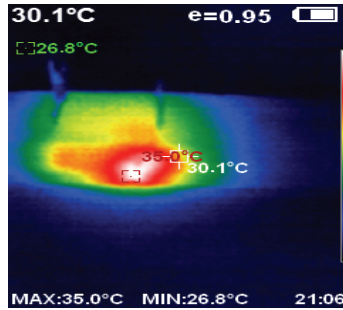
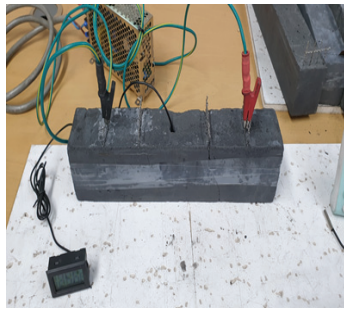


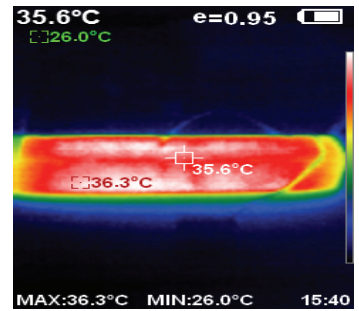
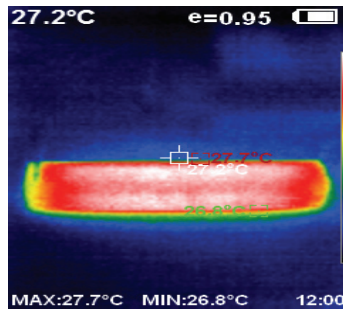
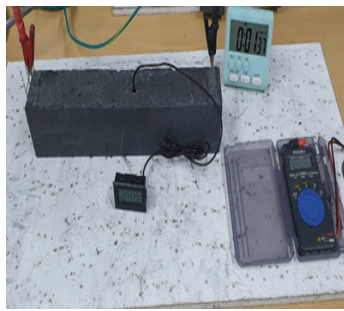
Fig. 7. Temperature change of cement mortar with liquid WCNT and waste cathode material due to electrical supply



(a) DC 24V and AC50V supplied specimen with electrode spacing 100mm, respectively



(b) AC 70V and AC90V supplied specimen with electrode spacing 200mm, respectively



(c) AC 50V and AC110V supplied specimen with electrode spacing 280mm, respectively

Fig. 8 Thermal images according to the change of electrode spacing and supplied voltage

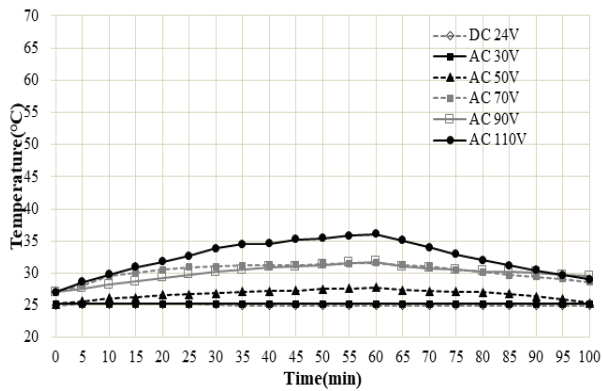


Fig. 9. Temperature change of specimen by various voltage supply with electrode spacing 280 mm

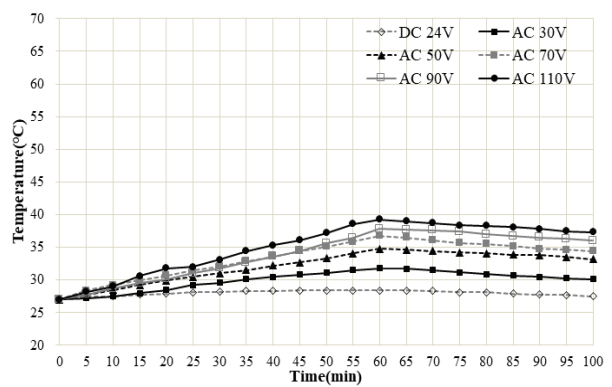


Fig. 10. Temperature change of specimen by various voltage supply with electrode spacing 200 mm

44.3 °C 상승한 후 저하되었다. 전압 AC 50 V에서는 전압 공급 27분 만에 61.5 °C 상승하였으며, 전압공급 중단 후 온도가 급격히 저하되었다. 따라서 적용 목적에 따라 AC 30 V와 AC 50 V 사용시 전극체간 간격을 100 mm까지 확대할 수 있을 것으로 판단된다.

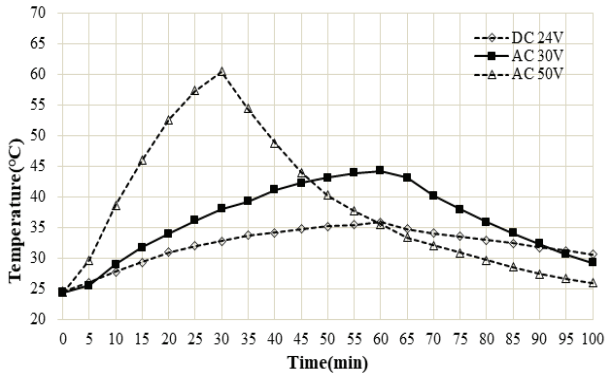


Fig. 11. Temperature change of specimen by various voltage supply with electrode spacing 100 mm

5. 결론

본 연구는 폐기되는 CNT 및 리튬 이차전지의 음극재를 활용한 발열 시멘트 복합체를 건설 분야 전반에 적용하고자 실시하였으며, 전자파를 차단하기 위하여 DC 24 V 이하의 저 전압에서 발열 성능 확보를 위한 최적 배합비를 도출하고 모르타르의 발열 특성을 실험적으로 평가하였다.

1. 분말 페CNT는 혼입량이 증가할수록 페CNT 뭉침 현상으로 인해 W/B비가 증가하고, 불규칙 발열 온도, 압축강도 저하 등의 현상이 나타났다. 액상 페CNT 배합시 0.5 wt%와 1.0 wt% 분산에서 동일한 네트워크가 형성되었기 때문에 액상 CNT 0.5 wt% 기본배합으로 결정하였다.
2. 분말 페CNT 혼입 시 압축강도는 크게 감소하였으나, 액상 페CNT를 0.5 wt% 혼입한 시험체의 재령별 압축강도는 페CNT가 혼입되지 않은 기본배합보다 재령 28일에서 3.6 % 강도 감소만이 나타났으며, 발열성능을 함께 고려할 때 효율성이 있는 것으로 판단된다.
3. 전극체로서 구리포일이 효과적으로 분석되었으나, 작업성과 경제성을 고려하여 Stainless Steel Mesh를 이용하는 것이 발열 온도 재현성이 양호한 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 2021년도 경상국립대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

References

- Chang, C., Ho, M., Song, G., Mo, Y.L., Li, H. (2009). A feasibility study of self-heating concrete utilizing carbon nanofiber heating elements, *Smart Materials and Structures*, **18(12)**, 127001.
- Chu, H., Zhang, Z., Liu, Y., Leng, J. (2014). Self-heating fiber reinforced polymer composite using meso/macropore carbon nanotube paper and its application in deicing, *Carbon*, **66**, 154-163.
- Gomis, J., Galao, O., Gomis, V., Zornoza, E., Garcés, P. (2015). Self-heating and deicing conductive cement, *Experimental study and modeling*, *Construction and Building Materials*, **75**, 442-449.
- Karademir C.(2019). The electrical heating performance of multi-walled carbon nanotubes(MWCNT) reinforced mortar, *Journal of Material Sciences & Engineering*, **8(2)**, 1000519.
- Kim, H., Ban, H. (2017). An experimental approach to investigate the heat transferring effect of carbon nanotube on the concrete slab, *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, **18(12)**, 59-63 [in Korean].
- Lee, H.Y., Kang, D.H., Song, Y.M., Chung, W.S. (2017). Heating experiment of CNT cementitious composites with single-walled and multiwalled carbon nanotubes, *Journal of Nanomaterials*, **2017**, Article ID 3691509.
- Lee, H.Y., Song, Y.M., Loh, K.J., Chung, W.S. (2018). Thermal response characterization and comparison of carbon nanotube-enhanced cementitious composites, *Composite Structures*, **202**, 1042-1050.
- Liu, Y., Lai, Y., Ma, D.X. (2015). Research of carbon fibre grille reinforced composites in airport pavement snowmelt, *Materials Research Innovations*, **19(Sup10)**, 49-54.
- Oh, S., Oh, K., Jung, S., Chung, W., Yoo, S. (2017). Effects of CNT additions on mechanical properties and microstructures of cement, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance*

- and Inspection, **21(6)**, 162–168 [in Korean].
- Park, S., Lee, H., Chung, W. (2018). Experimental study on voltage supply efficiency of nano cement composite for prevention of road icing, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, **18(6)**, 221–228 [in Korean].
- Song, D.G., Cho, H.K., Lee, H.S. (2016). Evaluation of the exothermic properties and reproducibility of concrete containing electro-conductive materials, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **16(1)**, 25–34 [in Korean].
- Tuan, C.Y., Yehia, S. (2004). Evaluation of electrically conductive concrete containing carbon products for deicing, Materials Journal, **101(4)**, 287–293.
- Zhao, H., Wu, Z., Wang, S., Zheng, J., Che, G. (2011). Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires, Cold Regions Science and Technology, **65(3)**, 413–420.

폐CNT를 혼입한 시멘트 복합체의 강도 및 열전달 특성에 대한 기초 연구

동절기 콘크리트 포장체의 블랙아이스 발생위험을 낮추고 동결에 의한손상을 방지할 목적으로 콘크리트의 전도저항성을 활용하여 자기 히팅 콘크리트를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 분말형과 액상형 폐CNT와 전도촉진을 위해 폐음극재를 사용하여 강도변화와 온도 발열특성을 평가하고자 하였다. 액상형 폐CNT가 모르타르내에서 분산정도가 효과적이고, 강도저하가 작게 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 모르타르에 스틸매쉬, 구리포일과 구리선을 전극으로 적용하여 DC 24 V를 공급하였으며, 폐CNT, 폐음극재과 탄소섬유 혼입율에 따른 온도변화 특성을 평가하였다. 또한 선정된 최적배합으로부터 전극 간격에 따른 온도 특성을 평가하여 AC 50 V 까지는 전극간격 100 mm 까지는 충분한 발열 특성을 갖는 것을 확인하였다.