

폐CNT와 전도촉진재를 혼입한 시멘트 모르타르 블록의 발열 전도 특성

Heating Transferring Characteristics of Cement Mortar Block with Waste CNT and Conduction Activator

구현철¹ · 김운학² · 오홍섭^{3*}

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

(Received May 30, 2022 / Revised June 28, 2022 / Accepted June 28, 2022)

High-purity waste CNTs were mixed into cement mortar to manufacture heat-generating concrete that can use low voltage power, and carbon fiber and waste cathode materials were also used improve the conductivity of the mortar. The waste CNTs were analyzed to have a high concentration of multi-walled CNTs, and substituted liquid type waste CNTs were used during mortar mixing in order to increase dispersibility. The temperature change of the mortar with CNT was evaluated when using electric power below DC 24 V in order to utilize a small self-generation facility such as small solar power module when the mortar heats up and to minimize electromagnetic waves. When liquid-type waste CNTs were applied and a voltage of DC 24 V was introduced, it rose to 60 °C in a 200 × 100 × 50 mm mortar block specimen. The field applicability of self heating mortar with waste CNT was sufficient and also the amount of change in heat energy in mortar with liquid type waste CNT, carbon fiber and waste cathode materials is more effective compared to it of other variables.

키워드 : 자가발열, 폐CNT, 폐음극재, 탄소섬유, 저전압

Keywords : Self-heating, Waste carbon nanotube, Waste cathode agent, Carbon fiber, Low voltage

1. 서론

최근 친환경, 저탄소 및 자원순환을 통한 다기능 건설재료로의 전환이 요구됨에 따라 전통적인 콘크리트에 추가적인 기능을 부여하기 위한 다양한 접근이 이루어지고 있다. 특히 절연체인 콘크리트에 탄소계열의 재료를 혼입하여 자가진단 기능을 갖는 스마트콘크리트 또는 전도성과 자기장 특성을 최적화한 자가발열 및 전자파 차폐콘크리트로 개발하고자 하는 연구들이 많이 진행되고 있다(Chang et al, 2009; Chu et al, 2014; Karademir 2019; Lee et al, 2017). 특히 탄소나노튜브의 개발과 활용이 활발해지고, 생산비용이 낮아짐에 따라 이를 콘크리트에 활용하고자 하는 연구들도 진행되고 있다(Gomis et al, 2015; Lee et al, 2018). Kim(2014)은 다양한 CNT를 모르타르에 혼입하여 강도 특성을 평가하였다. 또한 분산성을 향상시키기 위해 고분자로 전처리한 Wrap type CNT

와 분말 SWCNT(Single walled carbon nanotube), MWCNT(Multi walled carbon nanotube)를 모르타르에 혼입한 결과 전처리 WCNT는 작업성이 매우 떨어지고, SWCNT는 경제성에 문제가 있으며, MWCNT는 2.5 % 이상에서 강도가 현저히 떨어지는 것으로 분석되었다. Oh et al.(2017)은 MWCNT를 중량대비 0.2 %와 0.5 % 첨가한 후 강도와 발열특성을 평가하였으며, CNT 첨가량이 증가할수록 28일 강도는 감소하나, 91일 이후에는 감소량이 낮아지고, CNT가 수화반응에 크게 영향을 미치지 않는 것을 실험적으로 분석하였다. Liu et al.(2015)은 고속도로 또는 공항 활주로 및 사회 간접시설에 적용할 수 있는 포장체에 활용하기 위하여 탄소나노섬유(CNF) 콘크리트 복합체에 AC 50~150 V 전압으로 발열 성능을 시험하여 분당 10 °C의 발열 성능을 갖는 시멘트 복합체를 개발하였다.

콘크리트에 열을 발생시키기 위해서는 비전도체인 시멘트 매트

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

¹(주)하이퍼콘 대표 (Hypercon Co. Ltd., Gyeongnam, 52828, Korea)

²한경대학교 건설환경공학과 교수 (Hankyong National University, Gyeonggi, 17579, Korea)

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

릭스에 일정한 전류가 흐를 수 있도록 하는 재료가 추가되어야 한다. 이때 콘크리트에는 전원에 직접 연결된 도체(저항체)가 전류의 흐름을 방해함으로써 발생하는 줄(Joule)열로 가열하는 전기가 열 방식 중 Fig. 1과 같은 고전압에 의한 간접저항가열 방식을 발열 콘크리트에 사용하게 된다(Park et al. 2018; Zhao et al. 2011). 본 연구에서는 간접저항가열방식의 효율성을 높이기 위하여 CNT 제조 과정에서 발생하는 폐CNT와 다른 폐자원 등을 활용하였으며, 전자파가 발생하지 않는 직류 저전압을 도입하여 적용성을 높이고자 하였다.

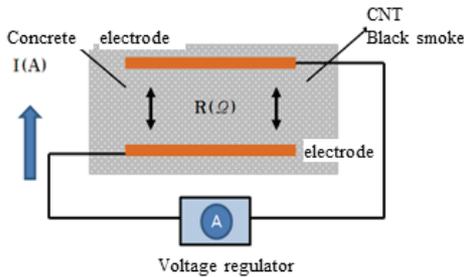


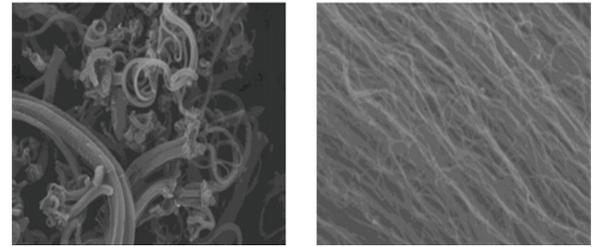
Fig. 1. Schematic diagram of indirect resistance heating on concrete

2. 폐 CNT 혼입 발열시멘트 복합체

2.1 사용재료 특성

발열 시멘트 복합체 제조를 위한 전기전도 탄소 복합재료는 카본블랙, 흑연분말, 탄소섬유, 탄소나노튜브, 그래핀 등이 있다. 탄소나노튜브는 탄소원자가 육각 벌집구조 형태로 말려진 그래핀(Graphene)이 한 겹 또는 여러 겹으로 말려져 있는 형태이고, 벌집구조의 결합형태에 따라 구분하거나, 벽의 수에 따라 한 겹으로 말려진 단일벽 나노튜브(Single-Walled Carbon Nano-Tube, SWCNT), 두 겹으로 말려진 이중벽 나노튜브(Double-Wall Carbon Nano-Tube, DWCNT), 여러 겹으로 말려진 다중벽 나노튜브(Multi-Walled Carbon Nano-Tube, MWCNT)로 구분한다(Lee et al. 2017; Labulo et al. 2017).

CNT는 활용도가 높은 재료임에도 불구하고, 생산전 시험로트, 생산설비안의 폐잔재 등으로 연간 2~3만톤의 폐CNT가 발생하게 되며, 탄소나노튜브 시장의 확대로 폐CNT 발생은 증가하고 있다. 그러나 폐CNT는 지정폐기물로 지정되어 있어 고순도의 SWCNT 및 DWCNT, MWCNT를 구분하지 않고, 일괄수거 후 대부분 소각하거나 일부 활성탄 제품에 활용하고 있다. 따라서 본 연구에서는



(a) 5,000 × magnification (b) × 100,000 magnification

Fig. 2. SEM images of waste CNT powder

폐기되는 폐CNT를 콘크리트에 혼입하고자 하였으며, 사용전 분말 폐CNT 조성을 Fig. 2와 같이 SEM으로 확인하였다. 사용된 폐CNT는 소량의 단일벽 탄소나노튜브(SWCNT)와 이중벽 탄소나노튜브(DWCNT)가 포함되어 있으나, 대부분은 다중벽 나노튜브(MWCNT) 폐CNT로 구성되어 있는 것을 확인하였다.

폐CNT 만으로는 콘크리트 내부에서 발열 성능을 높이기 어렵고, 균질한 분산도를 확보하기 어렵기 때문에 폐음극재와 탄소섬유를 보조 전도촉진재로 사용하고자 하였다. 최근 사용범위가 확대되고 있는 이차전지는 외부의 전기에너지를 화학에너지의 형태로 전환시켜 충·방전이 가능한 전지를 의미하며, 양극활물질(Cathode), 음극활물질(Anode), 분리막(Separator), 전해질(Electrolyte) 등으로 구성되어 있다. 그리고 사용시간 경과에 따라 성능저하된 리튬 이차전지 부품들은 Re-Use 및 Re-Cycling 개념으로 분리하여 재활용하게 된다. 리튬 이차전지의 양극재는 주구성재료가 니켈과 망간, 코발트 등이 사용되기 때문에 재활용이 활발하게 이루어지고 있으나, 탄소소재의 미립분과 일부 나노 소재가 혼입된 음극재는 분리기술의 한계로 제한적으로 사용되고 나머지는 매립 및 소각하는 실정으로, 토질 및 수질오염, 미세먼지로 인한 환경피해의 위험이 발생하게 된다.

음극재는 일반적으로 Table 1과 같이 인조흑연과 천연흑연이 포함되어 있기 때문에 발열시멘트 복합체의 전도 촉진재로 활용하고자 하였다.

시멘트 매트릭스내의 불연속 전도체의 전도성을 높이고 매트릭스 내부의 미세균열을 억제하기 위하여 Fig. 3의 탄소섬유를 같이 활용하고자 하였다. 탄소섬유의 성질은 인장강도 4,900 MPa, 밀도 1.8 g/cm³, 직경 0.005~0.010 mm이며, 길이 6 mm로 가공하여 사용하였다.

모르타르 배합을 위해 사용한 시멘트는 초기 워커빌리티 개선과 내구성 확보를 위해 KS L 5201(2017) 규정을 만족하는 분말도 3,860 cm³/g의 고로슬래그 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 세

Table 1. Types and characteristics of anode active materials

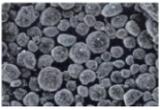
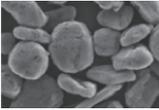
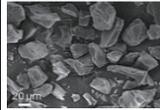
	Graphite		Low crystalline carbon	Metal
	Artificial	Natural		
SEM images				
Capacity (mAh/g)	270~360	360~370	235~315	700~1000
Surface area (m/g)	1	3~8	2~5	-
Energy density (Wh/cc)	2.02	1.99	1.07	2.13<



Fig. 3. Waste carbon fiber

척사와 부순모래를 혼합하여 사용하였다. 세척사의 밀도, 조립률과 흡수율은 2.58 g/cm³, 1.44, 0.96 %이었으며, 부순모래는 2.62 g/cm³, 3.19, 1.2 %이다.

2.2 폐CNT 혼입 시멘트 모르타르의 분산

폐CNT 분산 특성을 평가하기 위하여 시멘트와 골재, 분말 폐CNT, 폴리비닐피롤리돈(polyvinyl pyrrolidone, PVP)을 3분 건비빔 실시한 후 배합수와 폴리카본산계 고성능 감수제를 넣고 2분 동안 교반하였다. 감수제는 경시변화를 낮추고, 점성을 낮게 하여 유동성을 좋게 하기 위하여 적용하였으며, PVP는 폐CNT의 시멘트내 분산도를 높이기 위하여 사용하였다. 시험편은 7일 기건양생 후 24시간동안 50 °C에서 건조한 후 미세구조분석을 실시하였으며, Fig. 4에 정리하였다. 분말CNT는 매트릭스내에서 분산되지 않고 섬유뭉침현상이 발생하여 배합시간을 2배 증가시켰다.

분말CNT의 뭉침 현상을 근본적으로 해결하기 위하여 초음파장비를 이용하여 폐CNT를 액상으로 제조하였으며, 초음파 파쇄기는 최대출력 750 W, 횡수 20 kHz를 사용하여 물 0.5 L에 폐CNT 1 %, 2 %와 3 %를 분산제인 PVP, 고성능 감수제를 같이 배합하였다. 혼합시 폐CNT간의 충돌로 미세열이 발생하여 폐CNT의 단락이 발생하거나 마찰에 의한 기능저하가 발생할 수 있기 때문에 내부온

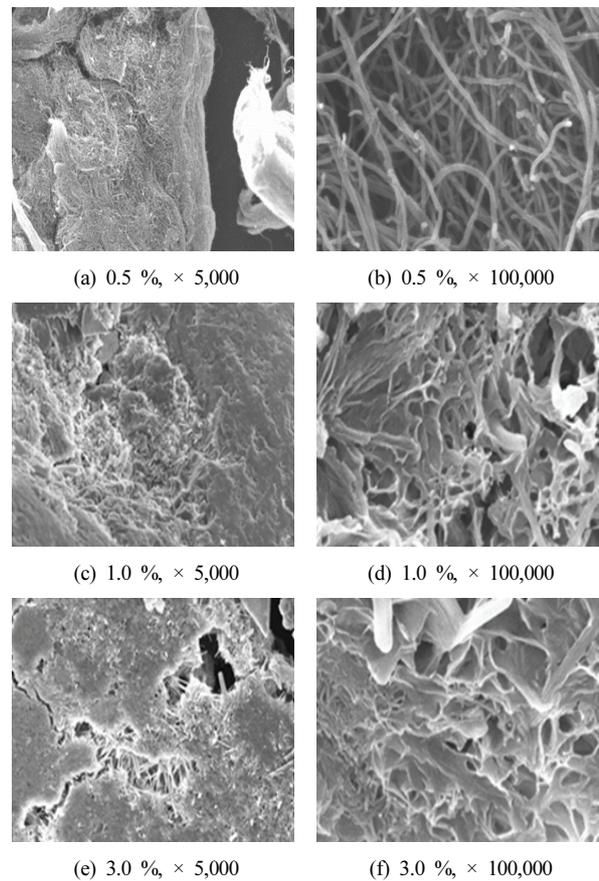


Fig. 5. Waste liquid CNT(0.5 %) in cement mortar

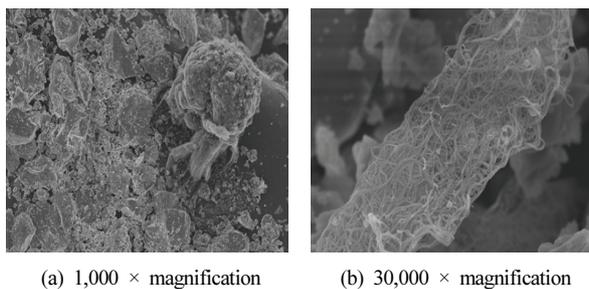


Fig. 4. Waste CNT powder in cement mortar

도가 45 °C이하가 되도록 일정하게 유지하였다. 폐CNT 2.0 wt%와 3.0 wt%는 뭉침에 의해 노즐이 막히는 현상이 발생하였으며, 최적 배합조건은 1.0 wt% 이하인 것으로 분석되었다.

액상 폐CNT 치환률 0.5 wt%, 1.0 wt%, 3.0 wt%를 혼입한 모르타르의 미세구조는 Fig. 5에 정리하였다. 제작시 분산된 액상 폐CNT혼입 모르타르를 50 °C에서 24시간 건조한 뒤 SEM 이미지

Table 2. Mix proportion of cement mortar for deicing concrete

	W/B (%)	W (g)	C (g)	S (g)	Waste CNT (g)		Stimulant (g)	
					Powder	Liquid	Carbon fiber	Waste cathode
WC-0.5(L)	46%	127.0	276.0	552.0	-	2.8	-	-
WCCF-1				552.0	-	2.8	2.8	-
WCCF-0.5				552.0	-	2.8	1.4	-
WCCM-10				496.8	-	2.8	-	55.2
WCCM-5				524.4	-	2.8	-	27.6
WCCMF-0.5(L)				524.4	-	2.8	1.4	27.6
WCCMF-0.5(P)				524.4	2.8	-	1.4	27.6

분석을 실시하였다. Fig. 5(a)와 (b)에 나타난 것과 같이 액상 폐CNT의 치환률 0.5 wt%, 1.0 wt%는 동일한 네트워크 형식의 분산과 발열 온도는 5.0 °C에 제어되었으나, 3.0 % 혼입 모르타르는 섬유 뭉침이 부분적으로 발견되고, 미세균열이 형성된 것을 확인하였다.

3. 폐 CNT 혼입 모르타르 발열특성

3.1 시험체 제작 및 온도 측정

본 연구에서는 폐CNT의 기본 혼입율을 0.5 wt% 로 결정하여 배합별 온도 특성을 평가하고자 하였다. 모르타르의 배합변수는 Table 2에 정리하였으며, 7일과 28일 양생후 압축강도를 측정하였다. 압축강도는 Fig. 6에 정리하였으며, 액상 폐CNT 0.5 wt% (WC-0.5(L)) 변수의 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 탄소섬유가 혼입된 모르타르의 강도가 섬유 뭉침 등에 의해 가장 낮은 강도를 발현하였다.

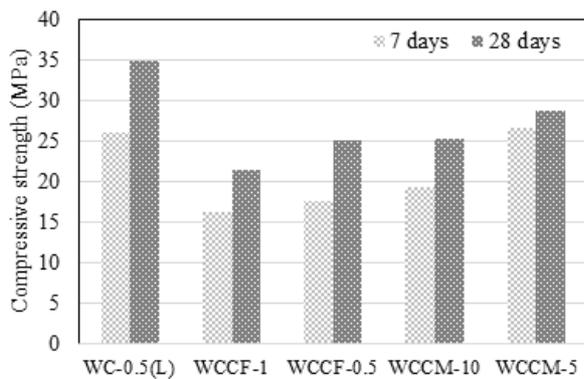


Fig. 6. Compressive strength of cement mortar with waste CNT, waste cathode material and carbon fiber

시멘트와 잔골재, 탄소섬유의 교반시 건비빔 시간과 당초 W/B 비 보다 0.7 %~1.8 % 증가로 인한 수용액 증가, 혼입시 공시체

내부에 뭉침 현상으로 공시체 내부에 탄소섬유가 적절히 분산되지 않아 강도가 저하된 것으로 판단되었다.

흑연이 주성분인 음극재 5 % 혼입 변수(WCCM-5)는 7일 이후 28일 강도 발현 정도가 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 폐음극재에 혼입된 인조흑연, 천연흑연, 저결정탄소 등의 육각형 판상체로 구조의 층간 결합으로 구성되기 때문에 흑연판상면의 낮은 강도와 W/B비 2.2 %~4.3 % 증가로 인하여 압축 강도가 저하된 것으로 판단된다.

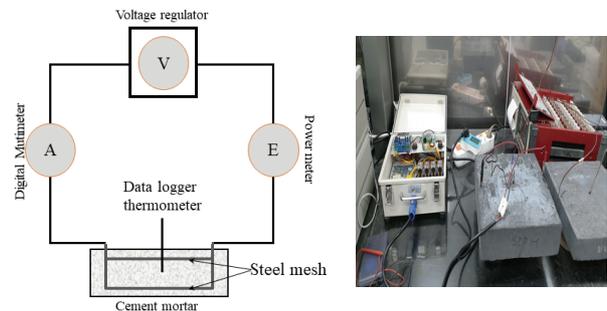


Fig. 7. Temperature measurement schematic diagram of mortar with waste CNT

모르타르 내부의 온도변화는 Fig. 7에 나타난 것과 같이 150 × 100 × 50 (H)mm 단면의 상하면에 40 mm 간격이 되도록 철망을 배치시키고, 블록 외측단에서 전류를 도입한 상태에서 시험편 정중앙에 열전도계를 설치하여 온도변화를 측정하였다. 일차적으로 WC-0.5(L)와 WCCF-0.5, WCCF-0.5, WCCM-5를 각각 혼입한 시험체에 전극간격 90 mm에 DC 24 V를 흐르게 하여 시험체 중앙부와 표면의 온도변화를 thermometer와 열화상카메라로 측정하였다. 전극체는 열전도가 원활하도록 도전율 1.10 × 10⁶ mhos/m이고, 직경 1.05 mm, 철망간격 15 mm인 스테인레스철망을 사용하였다.

2차 실험변수에서는 단면 300 × 300 × 70 (H)mm의 사각형 시험체 상·하면의 10 mm 깊이에 내부 전극체 간격이 50 mm가 유지되도록 철망을 배치하고, 280 mm 간격의 외부전극에 DC 12 V, 24 V 각각 전압을 공급하여 동일한 방법으로 온도변화를 측정하였다.

온도변화 특성은 폐CNT 0.5 wt%(WC-0.5(L)) 변수를 기본으로 하여 액상과 분말 폐CNT변수에 폐탄소섬유와 음극재를 같이 혼합한 변수와 폐CNT 분말과 용액 0.5 wt% 변수에 폐음극재와 탄소섬유를 모두 혼합한 변수의 온도를 평가하였다. 온도변화 시험시 내부 함수율이 온도 특성에 영향을 미치기 때문에 자연 건조상태로 7일간 양생한 후 건조로에서 50 °C로 24시간 동안 건조한 시험체로 실험을 실시하였다.

3.2 변수별 발열 특성

액상 폐CNT 0.5 wt% 기본배합(WC-0.5(L))와 WCCF-0.5, WCCM-5 변수에 대하여 DC 24 V 인가전압을 공급한 후 온도변화를 측정하였으며, Fig. 8과 9에 도시하였다.

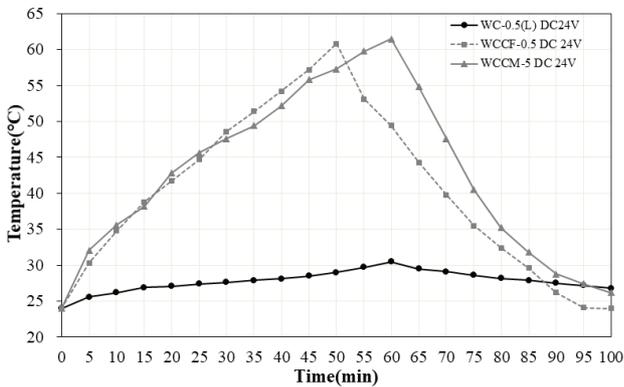


Fig. 8. Temperature change of cement mortar with waste CNT powder due to electrical supply(150 × 100 × 50 mm)

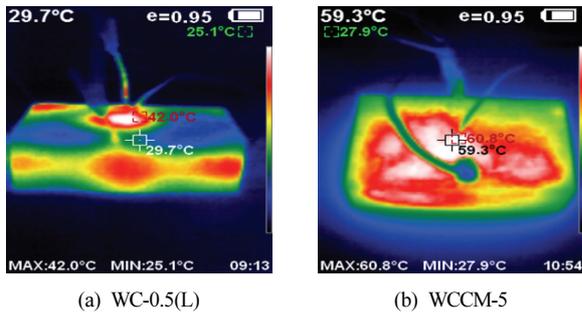


Fig. 9. Thermal images of cement mortar with waste CNT

액상 폐CNT 0.5 %만을 혼합한 WC-0.5(L)는 전압 공급 60분 후 최대 30.5 °C까지 발열된 후 온도가 감소하였으나, 탄소섬유 혼합 0.5 %를 혼합한 WCCF-0.5에서는 50분 후 최대온도 60.8 °C까지 발열되었으며, 폐음극재 5.0 % 혼합한 WCCM-5의 경우도 60분 경과후 61.5 °C에 발열되었다가 저하되는 것으로 나타났다. 또한 WC-0.5(L)의 열화상사진에서는 양단부의 전극쪽에만 온도가 상승한 것으로 나타났으나, WCCM-5 시험체의 표면 온도는 시험편 전체적으로 온도가 상승한 것을 확인할 수 있다.

Koo et al.(2022)의 이전 결과와 비교하면 폐CNT만으로 약 5 °C 정도의 온도 상승만을 나타내었으며, 이전의 실험과 유사한 것으로 분석되었다. 이에 반하여 전도촉진재로 탄소섬유와 음극재를 활용한 경우, 50 mm 시험체와 비교하여 시험체 크기가 커졌음에도 60분 전류 도입후 5.6 °C와 2.1 °C의 온도 상승이 나타나 보조촉진재로 사용한 탄소섬유와 음극재의 효과가 일부 나타난 것으로 판단된다. 따라서 발열 콘크리트의 발열특성은 전도촉진 재료의 배합비, 제작 방법 등과 함께 모르타르 평면에 폐CNT와 전도촉진재가 균질하게 분포되었는지가 중요한 설계인자인 것으로 판단된다.

두 번째로 탄소섬유와 폐음극재를 모두 혼합한 경우의 발열 특성을 평가하고자 하였으며, 태양광 같은 소형 자가발전모듈에 적용가능한 DC 12 V 적용시의 온도 특성을 같이 평가하고자 하였다. 시험체의 크기는 300 × 300 × 70 mm이며, 상하면 철망간의 간격은 50 mm로 고정하고, 전극간 수평 간격은 280 mm가 되도록 하였다. 변수별 온도변화 특성은 Fig. 10과 11에 정리하였다.

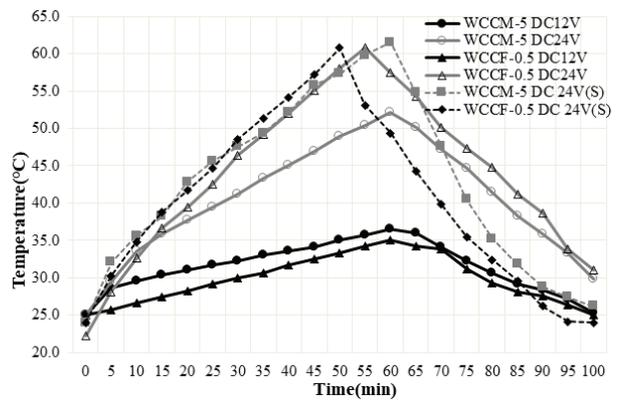


Fig. 10. Temperature change of waste CNT specimens(150 × 100 × 50 mm and 300 × 300 × 70 mm) with carbon fiber and waste anode material, respectively

액상 폐CNT 0.5 wt% 기본 혼입한 WCCM-5 배합에 전압 DC 12 V에서 60분 공급한 결과 36.5 °C 상승 후 온도가 저하되었으며, 전압 DC 24 V에서 60분 공급시 52.2 °C 까지 상승 후 저하되었다. WCCF-0.5의 경우에는 DC 12 V와 DC 24 V에서 각각 최대 35.1 °C와 60.8 °C까지 온도가 상승하는 것으로 분석되어 DC 12 V에서는 발열 효과가 낮아 실용화하기 위해서는 배합 등에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 WCCM-5(L) 배합에서도 유사하게 나타났으며, 음극재보다는 탄소섬유를 혼입한 경우의 발열 효율성이 높은 것으로 분석되었다. 시험체 크기 150 × 100 × 50 mm와 300 × 300 × 70 mm의 경우 동일한 변수에서의 중앙부 온도 발열은 탄소섬유의 경우에는 유사하게 나타났으나, 폐음극재 변수에서는 300 × 300 × 70 mm 시험체 온도가 10 °C 가까이 낮게 나타나 음극재에 의한 온도 편차가 상대적으로 큰 것으로 판단된다.

분말과 액상 폐CNT에 탄소섬유와 폐음극재를 모두 혼입한 변수의 온도 곡선은 Fig. 11에 정리하였다. 분말 WCCMF-0.5 변수에 전압 DC 12 V 공급 시 60분이후 34.5 °C까지 상승하였으나, 액상

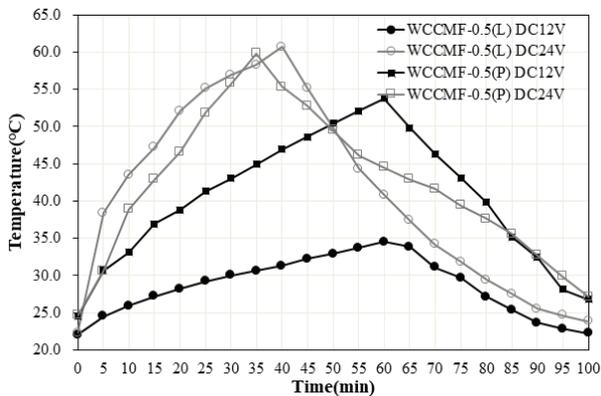


Fig. 11. Temperature change of power and liquid type waste CNT specimens(300 × 300 × 70 mm) with carbon fiber and waste anode material

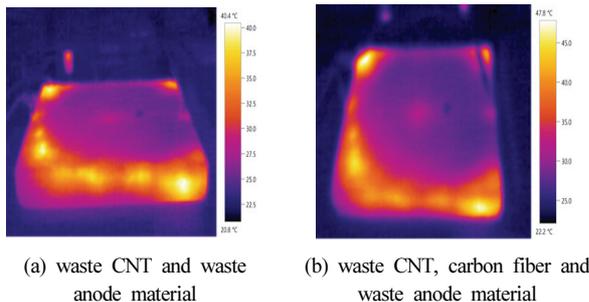
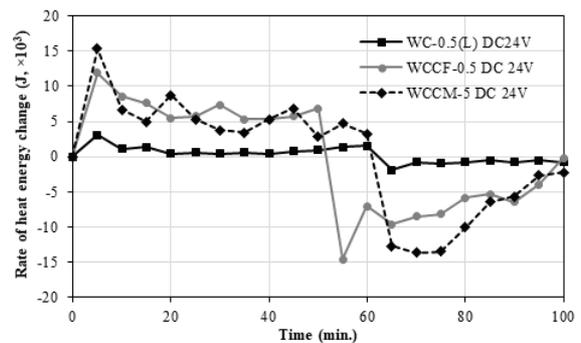


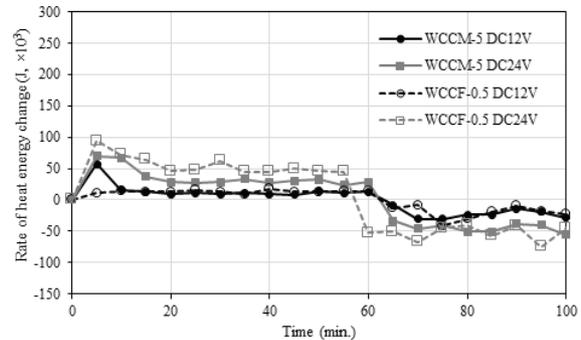
Fig. 12. Thermal images of cement mortar with waste CNT

형의 경우에는 DC 12 V에서도 최대 53.8 °C 까지 상승하여 액상형의 분산정도가 좋은 것으로 나타났다. 전압 DC 24 V 공급시에는 액상과 분말 모두 모두 60 °C내외까지 증가하였으며, 온도 상승 속도가 35분~40분 내외로 감소하여 효율성이 증가하는 것을 확인하였다. Fig. 12에는 시험체 표면의 열화상 이미지를 나타내었으며, 전체적으로 시험체 외측 온도가 높고, 내부로 갈수록 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 상면의 온도가 하면보다 온도 상승 정도가 높은 것으로 나타났으며, 외측 모서리부까지 균일한 온도를 유지하고 있는 것으로 확인하였다.

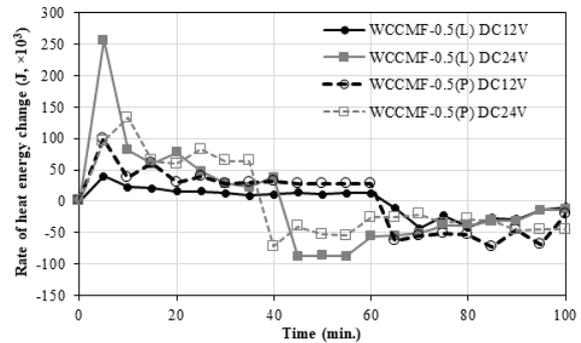
각 변수별 온도 곡선을 분석하여 시간에 따른 온도에너지의 변



(a) WCCF and WCCM specimens(size 150 × 150 × 50 mm)



(b) WCCF and WCCM specimens(size 300 × 300 × 70 mm)



(c) power and liquid typed WCCMF specimen(size 300 × 300 × 70 mm)

Fig. 13. Thermal energy change rate of mortar

화를 Fig. 13에 정리하였다. 전류가 도입된 모르타르의 온도에너지는 열량(Q) 변화로 정의하였으며, 모르타르의 비열은 모르타르와 콘크리트의 평균치인 1150 J/kg°C을 적용하여 시험체별 질량을 반영한 에너지 변화량을 나타내었다. 동일변수에서의 열량변화는 시험체의 질량에 비례하였으며, 전류도입 초기에 에너지 변화량이 증가한 후 최대온도시까지 열량변화는 일정하게 유지되는 것으로 분석되었다. 높은 전압과 탄소섬유를 적용한 경우 열에너지 증가가 빠르게 이루어졌으며, 탄소섬유와 폐음극재를 액상형 폐CNT와 혼합한 변수의 에너지 변화가 가장 크고 빠르게 나타났으며, 최대온도 이후 에너지변화 또한 빠르게 안정화되는 것으로 분석되었다.

4. 결론

폐CNT와 전도 촉진재인 탄소섬유, 폐음극재를 혼합한 블록 형태의 시멘트 모르타르 시험체를 제작하여 단부에 전극을 설치하고 전류를 흐르게 하여 변수별 발열 정도를 측정하였다.

1. 전극체는 제작 효율성을 작업성과 경제성을 고려하여 Stainless Steel Mesh를 사용하였으며, 열화상 이미지에 나타난 것과 같이 중앙부로 전류가 잘 흐르는 것으로 분석되어 국부단락이 발생하여도 전체 전류흐름에는 문제가 없을 것으로 판단된다.
2. 폐CNT 혼합시 초음파로 분산시킨 액상형 CNT으로 혼합하는 것이 모르타르내 분산을 위하여 효과적인 것으로 나타났으나, 3 wt 이상 혼합시에는 뭉침현상과 강도 저하현상이 나타났다.
3. 전도촉진재로 음극재와 탄소섬유가 혼합된 변수의 발열온도가 상승하고, 시간이 단축되었으며, 폐음극재보다는 탄소섬유의 효율이 상대적으로 크게 나타났다. 열화상 이미지에서는 외측의 온도가 내측보다 높은 것으로 나타나, 전도촉진재의 혼합이 필수적인 것으로 판단된다.
4. 효율성을 높이기 위하여 탄소섬유와 폐음극재를 모두 혼합한 경우 분산효과를 높일 수 있는 액상형 분산재를 활용하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.
5. 실제 구조부재 적용을 위해서는 전류를 주기적으로 도입할 수 있는 제어장치와 전압의 과부하가 발생하지 않도록 비저항 전극 간격재의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술촉진연구사업(22CTAP-C164040-02)의 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, S.K. (2014). An Experiment Study on The Characteristics of X-Ray Shielding In Carbon Nano Tube Mixed Concrete, Master's Thesis, Hanyang University [in Korean].
- Koo, H., Kim, W.H., Oh, H. (2022). Fundamental study on the strength and heat transferring characteristic of cement composite with waste CNT, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **10(1)**, 66-73 [in Korean].
- Labulo, A.H., Martincigh, B.S., Omondi, B., Nyamori, V.O. (2017). Advances in carbon nanotubes as efficacious supports for palladium-catalysed carbon-carbon cross-coupling reactions, *Journal of Materials Science*, **52(16)**, 9225-9248.
- 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.S., Jung, S.H., Chung, W., Yoo, S.W. (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].

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.

폐CNT와 전도촉진재를 혼입한 시멘트 모르타르 블록의 발열 전도 특성

저전력 사용이 가능한 발열콘크리트를 제작하기 위하여 시멘트 모르타르에 고순도 폐CNT를 혼입하였으며, 모르타르의 전도율을 향상시키기 위하여 압축강도를 제어하는 수준에서 탄소섬유와 폐음극재를 활용하고자 하였다. 사용된 폐CNT는 다중벽 CNT의 함유량이 많은 것으로 분석되었고, 모르타르 배합시 분산성을 높이기 위하여 액상형으로 치환하여 사용하였다. 모르타르 발열시 태양광 등에 의한 소형 자가발전 설비를 활용하고 전자파를 최소화하기 위하여 DC 24 V이하의 전력 사용시의 모르타르의 온도 변화를 평가하였다. 액상형 폐CNT를 적용하고, DC 24 V의 전압을 도입한 경우 200 × 100 × 50 mm 블록 시험편에서 60 °C까지 상승하였으며, 액상형 폐CNT와 탄소섬유, 폐음극재를 모두 사용한 경우에는 DC 12 V에서도 55 °C이상까지 온도가 상승하여 현장 적용성이 충분한 것으로 판단되었다. 특히 발열에너지 변화량에 있어서도 다른 변수들과 비교하여 효과적인 것으로 나타났다.