

전도성 재료를 사용한 도로결빙방지 포장시스템 개발을 위한 기초연구

Fundamental Study of Deicing Pavement System Using Conductive Materials

이강휘 Lee, Kanghwi
이재준 Lee, Jaejun

전북대학교 공과대학 토목공학과 (E-mail : leekang01@naver.com)
정회원 · 전북대학교 공과대학 토목공학과 조교수 · 교신저자 (E-mail : lee2012@jbnu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to develop a deicing pavement system using carbon fiber or graphite with high electrical conductivity and thermal conductivity.

METHODS : Based on literature reviews, in general, conventional concrete does not exhibit electrical and thermal conductivity. In order to achieve a new physical property, experiments were conducted by adding graphite and carbon fiber to a mortar specimen.

RESULTS : The result of the laboratory experiment indicates that the addition of graphite can significantly reduce the compressive strength and improve the thermal conductivity of concrete. In the case of carbon fiber, however, the compressive strength of the concrete is slightly increased, whereas, the thermal conductivity is slightly decreased against the plain mortar irrespective of the length of the carbon fiber. In addition, a mixture of the graphite and carbon fiber can greatly improve the degree of heating test.

CONCLUSIONS : Various properties of cement mortar change with the use of carbon fiber or graphite. To enhance the conductivity of concrete for deicing during winter, both carbon fiber and graphite are required to be used simultaneously.

Keywords

Carbon fiber, graphite, conductive mortar, electrical conductivity, thermal conductivity, deicing pavement

Corresponding Author : Lee, Jaejun, Assistant Professor
Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University, 567
Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeonbuk, 54896, Korea
Tel : +82.63.270.2427 Fax : +82.63.270.2421
E-mail : lee2012@jbnu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Jun. 24, 2015 Revised Jun. 26, 2015 Accepted Sep. 18, 2015

1. 서론

최근 지구온난화현상 등 다양한 환경의 변화로 인하여 기상이변 현상이 빈번히 발생하고 있으며, 겨울철 폭설과 한파가 세계 곳곳에서 발생하고 있다. 겨울철 도로 포장의 결빙으로 인해, 보행자의 낙상사고와 교통사고의 비율은 매년 증가하는 경향을 보이고 있으며, 도로에 쌓인 눈 또는 도로표면에 두껍고 얇게 형성된 빙판은 일시적·장기적 교통체증 및 교통사고를 유발하는 직·간접적인 원인이 되고 있다. 이는 차량 운전자 또는 보행자에게 도로 서비스 이용에 대한 불편함을 유발하며, 더

나아가서는 인명손실과 같은 심각한 안전문제에까지 위협을 미치고 있다. 이러한 측면에서, 결빙도로의 제설 및 융설 시스템에 관한 연구와 개발은 불가피하며, 이로써 창출되는 사회적·경제적으로 발생하는 손실에 대한 예방과 비용절감에 대한 효과를 기대할 수 있다.

고속도로의 경우 국가 경제의 대동맥 역할을 하고 있으며, 고속도로포장 위의 과도한 적설과 도로표면에 결빙이 발생하는 것은 교통의 흐름에 지대한 영향을 미친다. 매년 우리나라의 동절기에 도로 상부의 적설과 노면의 결빙으로 인하여 발생하는 사고 원인으로는, 도로 표

면의 미끄러운 부분과 타이어 사이에 충분한 마찰이 발생하지 않아 유발되며, 교통사용자에게 고속도로 이용에 있어 정체·사고와 같은 불편함을 야기시킨다. 더불어 우리 사회에 중요하고 많은 도로가 동시에 접합하는 역할을 하는 다리의 경우, 일반 도로보다 차가운 공기와 눈이 쌓이기 쉬운 환경에 노출되어 있다. 이러한 이유로 다리에서 운전하는 것은 일반 도로에서 운전하는 것보다 위험하며, 결빙방지 부분에 있어서 중요시 다뤄져야 할 사항이다.

뿐만 아니라 현재 교통수단 중 비행기는 전 세계 이용자들에게 가장 빠르고 신속한 운송수단임에 틀림없다. 겨울철에 활주로의 노면에 발생하는 얇은 얼음 층이나 눈의 퇴적물은 비행기의 타이어와 활주로의 표면간의 마찰을 줄이고, 결국 이러한 현상은 활주로에서 비행기의 이륙과 착륙을 어렵고 위험하게 만들며 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있다. 도로결빙방지를 위해 융설 시스템이 적용된 도로포장 하부의 발열체에서 공급되는 열을 효율적으로 도로표면까지 전달하고, 열이 도로 상부 표면까지 도달하여 제설·융설을 위한 제 기능을 적절히 수행하기 위해서는, 열의 이동경로 동안의 열손실을 최소화하는 것이 중요한 사항임에 틀림없다. 따라서 본 연구에서는 포장체 하부의 발열체로부터 도로표면까지 효율적인 열 확산을 위하여 Powder와 Fiber형태의 Carbon의 배합을 통하여 열전도성을 향상시킴으로써 도로의 결빙방지 포장시스템 개발을 위한 기초연구 수행결과를 보고하고 있다. 전도성 재료의 첨가가 모르타르의 강도에 미치는 영향을 측정·평가하기 위하여 Compressive Strength Test를 실시하였으며, 흑연과 탄소섬유의 혼입으로 인한 공시체 내부의 열전도율의 경향을 알아보고자 Surface Probe를 통한 Thermal Conductivity Test를 실시하였다. 또한 전도성재료의 첨가로 인한 전기적 특성을 가진 전도성모르타르를 제작하여 Heating Test를 실시하여, 공시체의 시간에 따른 온도발열을 측정하였다.

2. 실험방법

2.1. Compressive Strength Test

전도성 물질인 carbon fiber 또는 carbon power가 혼합된 전도성 모르타르 압축강도 시험특성을 알아보기 위하여 KS L ISO 679(시멘트의 강도 시험방법)에 준하였으며, 실내수중양생 후 재령 7일, 14일, 28일에 각각 압축강도를 측정하였다.

Fig. 1, Fig. 2는 전도성 모르타르에 혼입된 Chopped Carbon Fiber와 Graphite 그리고 압축강도 테스트 장비를 나타내고 있다.



Fig. 1 Chopped Carbon Fiber and Graphite



Fig. 2 Compressive Strength Test Equipment

2.2. Thermal Conductivity Test

본 연구에서는 전도성 재료가 혼입된 공시체의 열전도율을 측정·평가하기 위하여, Fig. 3에서 나타내고 있는 Applied Precision사의 열전도 측정 장치인 ISOMET-2114를 시험에 사용하였다. 열전도 측정을 위한 두 가지 타입의 니들 프루부(Needle Probe), 서피스 프루브



Fig. 3 Thermal Conductive Test Equipment Set, ISOMET-2114

(Surface Probe)가 있지만, 본 연구에서는 강성재료에 적합한 서피스 타입의 프루브를 사용하여 열전도율을 측정하였다.

프루브 센서는 Heat Flow Impulse에 대한 시료의 온도반응을 분석하는데, 저항 히터를 통해 생성된 Heat Flow는 시료와 직접 접촉한 프루브 센서에 전달되며, 온도경사에 의해 열은 상대적으로 고온부에서 저온부로 흐르며 각각의 온도를 측정하여 시간에 따른 온도 차이와 공급열량이 고려되어 열전도율(Thermal Conductivity)이 주기적으로 측정된다(Cho, Dae-seong, 2012).

본 연구에서 사용된 Surface Probe의 경우, 강성질 재료의 열전도율 측정에 필요한 최소직경은 60mm이상, 최소 요구두께는 10mm 이상이 적합하며, 강성질 재료의 열전도율이 높을수록 보다 정확한 측정을 위해 표면의 고른 평면성(Flat Surface)이 요구된다.

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 Surface probe 타입의 열전도율 측정 센서를 나타내고 있다.



Fig. 4 Thermal Conductive Sensor

2.3. Heating Test

일반적으로 시멘트 모르타르 및 콘크리트는 전기저항성이 높기 때문에 부도체의 성질을 지니고 있다. 하지만 비금속성 재료인 흑연과 탄소섬유를 혼입함으로써, 콘크리트의 전기저항을 크게 낮추어 전기전도성을 띄게 되며 이로 인해 모르타르가 직접 발열체가 되어 열을 발산하게 된다(Hong, Chul-Ho, 2014).

본 연구의 발열테스트 실험에서는 탄소계재료(전도성물질)인 Graphite(GP)와 Carbon Fiber(CF)가 혼입된 모르타르 공시체에 전류를 흘렸을 때 발생하는 열의 거동을 알아보기 위하여 수행하였다. Graphite는 시멘트 중량대비 30~50%까지 치환하여 제작하였으

며, CF의 길이는 20mm, 60mm 그리고 80mm로 각각 다른 길이의 CF를 사용하였으며, 공시체의 용적대비 0.5~1%까지 첨가하였다. 또한, GP와 CF를 동시에 사용하였을 경우의 특성을 알아보기 위하여 GP 30%와 CF 0.5%를 함께 믹싱하여 공시체를 제작하였다. 본 연구에서 발열온도 측정을 위한 공시체의 크기는 10×10×5cm로 제작되었으며, 양생이 끝난 공시체에 30V의 전압을 부하하여 온도의 변화를 10분 간격으로 총 60분 동안 측정하였다. 또한 온도조절기에서 공급되는 전압의 세기를 확인하기 위하여 Multi Tester를 이용하여 일정한 전압의 공급을 확인하였으며, 적외선 온도계를 이용하여 공시체에서 발생하는 열의 온도를 측정하였다.

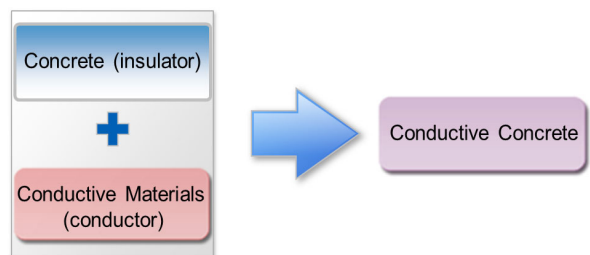


Fig. 5 Schematic Diagram of Conductive Cement Mortar

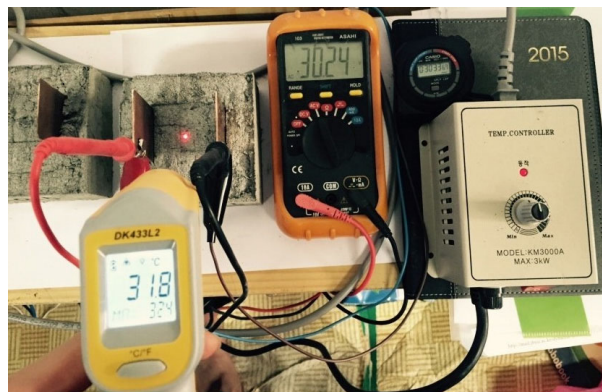


Fig. 6 Measurement of Heating Temperature on Specimen

3. 실험 결과

3.1. Compressive Test

Graphite와 Carbon Fiber 사용에 따른 압축강도경향을 분석하기 위하여 Graphite는 시멘트 중량대비 각각 30, 40, 50%를 치환하였으며, CF(Carbon Fiber)는 섬유 길이 20, 60, 80mm 각각에 대하여 용적대비 0.5, 0.75, 1%의 양을 혼입한 후의 압축강도 결과는 Fig. 7과 같다.

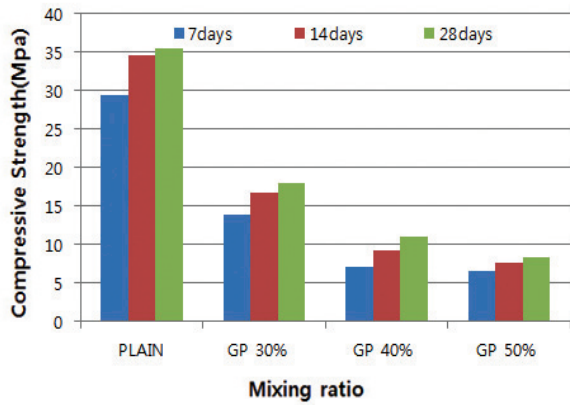


Fig. 7 Compressive Strength of Mortar with Graphite

Graphite의 경우 치환율이 30~50%로 증가할수록 강도는 Plain 공시체에 비해 현저히 저하되는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향을 보이는 이유는 Graphite 치환율의 증가로 인해, 상대적으로 시멘트의 첨가량이 감소했기 때문에 강도발현이 저하된 것으로 판단된다(Kim, Chul-Keun, 2014).

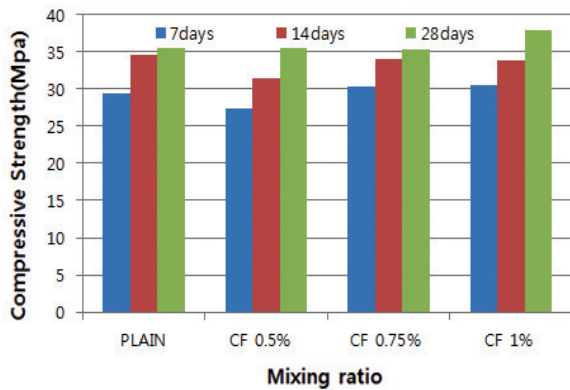


Fig. 8 Compressive Strength of Mortar with Carbon Fiber (20mm)

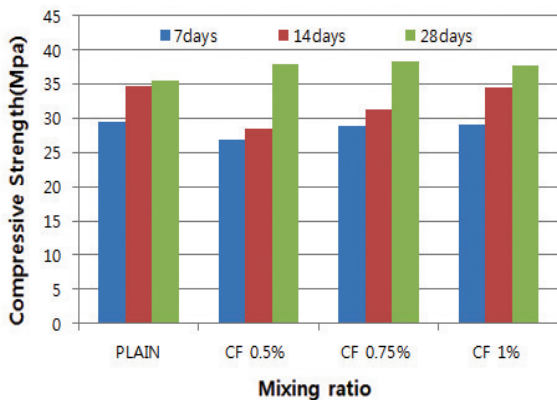


Fig. 9 Compressive Strength of Mortar with Carbon Fiber (60mm)

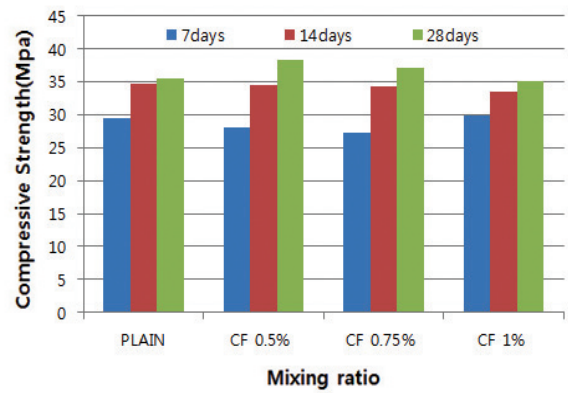


Fig. 10 Compressive Strength of Mortar with Carbon Fiber (80mm)

이와 대조적으로 Fig. 8~10을 통해 볼 수 있듯이, Carbon Fiber의 경우 혼입율의 증가뿐만 아니라 Fiber의 길이에 관계없이 표준모르타르와 비슷한 강도 또는 증가한 거동을 나타내고 있다. 60mm, 80mm 길이의 섬유인 경우 혼입율이 1%일 때 28일 강도가 약간 저하된 것을 확인할 수 있는데, 이는 섬유의 길이가 길어질수록 Mixing중 공시체 내부에 Fiber ball이 쉽게 형성되어 공시체 내부에 Fiber가 적절히 분산이 되지 않아 강도발현이 충분히 되지 않은 것으로 사료된다(Alvaro Garcia et al., 2009).

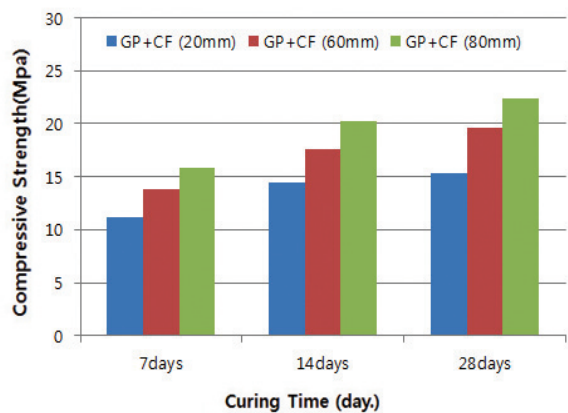


Fig. 11 Compressive Strength of Mortar with GP 30%+CF 0.5%

Fig. 11은 Powder 형태의 흑연과 Fiber 형태의 CF가 함께 첨가된 공시체의 압축강도에 대한 경향을 확인하고자 수행되었다. 흑연은 시멘트 중량대비 30% 치환하였으며, CF는 용적대비 0.5%를 첨가하였다. Fig. 11을 통해 확인할 수 있듯이, Fiber의 길이가 20~80mm로 증가함에 따라 압축강도 역시 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.2. Thermal Conductivity Test 실험결과

본 실험에서는 모르타르 공시체의 전도성 재료의 혼입에 대한 열전도율 측정을 수행하기 전, 선행실험으로 흑연의 혼입에 따른 열전도율의 경향을 평가하고자 모르타르에 비해 상대적으로 경화가 빠르고 열전도율이 낮은 Epoxy(EP)에 흑연(GP)을 배합하여 열전도율을 측정하였다. 일반적으로 Surface Probe의 경우 사용 가능한 두께는 최소 10mm 이상이므로, 본 연구에서는 열전도율 측정을 위한 공시체의 크기는 10×10×5cm의 규격으로 수행하였으며, 공시체 제작 후 3일동안 기건양생 후 열전도율을 측정하였다. 열전도율 측정에 있어, 정확성에 영향을 미칠 수 있는 요인으로는 Probe센서와 공시체의 접촉면적의 확보, 공시체의 크기, 시료의 균질성(Homogeneity), 시료의 이방성(Anisotropy) 등이 고려되어진다.

Fig. 12는 열전도율 실험 초기에 흑연의 열전도율 향상에 대한 거동을 확인하고자, 상대적으로 열전도율이 낮은 에폭시에 혼입하여 열전도율 테스트를 실시한 그래프이다. 흑연의 혼입률이 20~50%까지 증가함에 따라 열전도율도 상승하는 경향을 보였다.

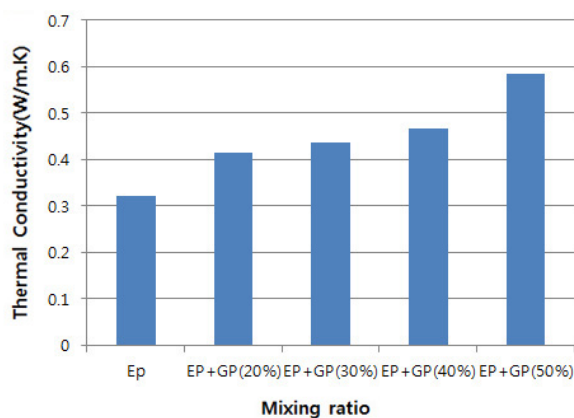


Fig. 12 Thermal Conductivity of Epoxy with Graphite

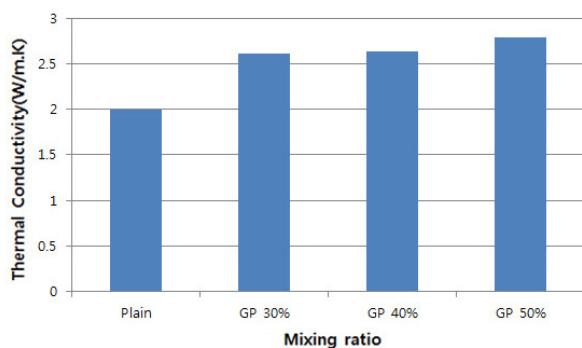


Fig. 13 Thermal Conductivity of Mortar with Graphite

Fig. 13은 전도성재료인 흑연을 시멘트 및 잔골재와 혼입하여 제작한 공시체의 열전도율의 경향을 나타내고 있으며, 시멘트 중량대비 흑연의 치환율이 30~50%까지 높아질수록 열전도율도 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14~16는 20~80mm의 Chopped Carbon Fiber를 용적대비 0.5~1%까지 첨가하여 열전도율 테스트를 수행하였다. Fiber의 길이와 무관하게 섬유 혼입률이 증가할수록 열전도율이 감소하는 경향을 나타내지만, 탄소섬유의 길이가 20~80mm까지 길어질수록 열전도율 감소의 폭은 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 탄소섬유가 길어질수록 열전도율이 개선되는 것으로 판단된다. 흑연과 달리 CF의 혼입률이 높아질수록 열전도율은 감소하는 양상을 나타내고 있는데, 이러한 감소경향을 보이는 이유는 섬유를 첨가할 때 분산이 가장 중요한 사항이지만, 공시체 내부에 분배되어 있는 CF가 Mixing과정에서 균등하게 분산되지 않아 모르타르의 내부에 Fiber ball이 형성되어 치밀한 구조를 갖지 못해 열전도율이 낮게 측정된 것으로 판단된다(D.D.L. Chung, 2000).

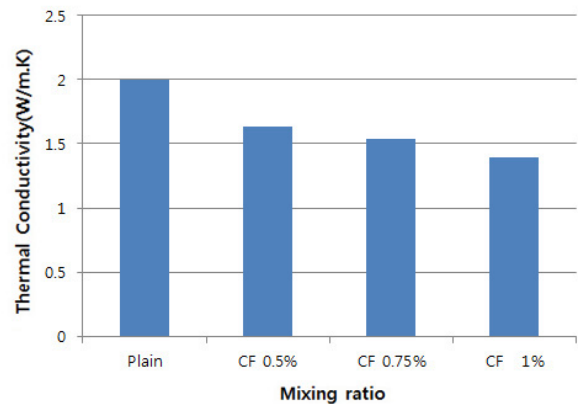


Fig. 14 Thermal Conductivity of Mortar with Carbon Fiber (20mm)

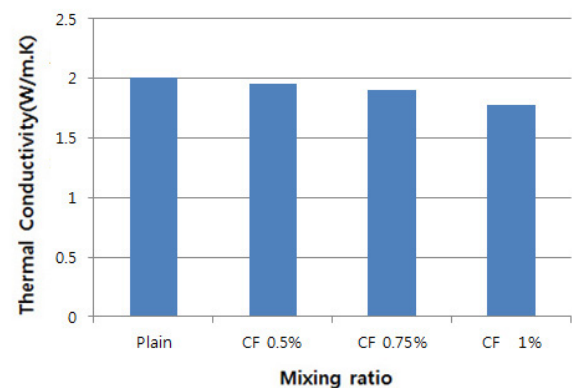


Fig. 15 Thermal Conductivity of Mortar with Carbon Fiber (60mm)

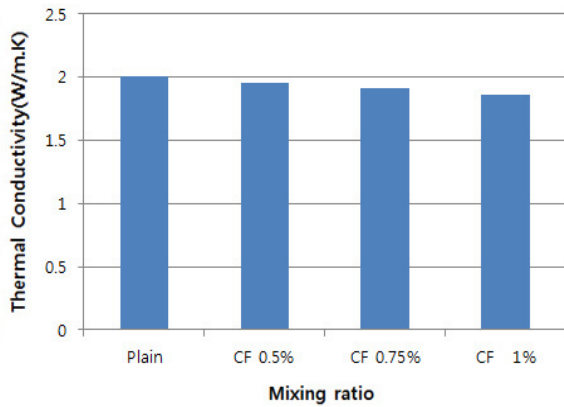


Fig. 16 Thermal Conductivity of Mortar with Carbon Fiber (80mm)

Fig. 17은 흑연과 CF를 함께 배합하여 만든 공시체의 열전도율을 측정된 그래프이다. 공시체의 배합은 흑연은 시멘트 중량대비 30% 치환하였으며, CF는 용적 대비 0.5%를 첨가하여 제작하였다. 섬유 길이 길어질수록 열전도율이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 이유는 보다 긴 섬유가 공시체 내부에서 더욱 쉽게 서로 Connecting되어 열전도가 보다 더 효율적으로 전달될 수 있는 환경이 만들어졌기 때문이라고 판단된다.

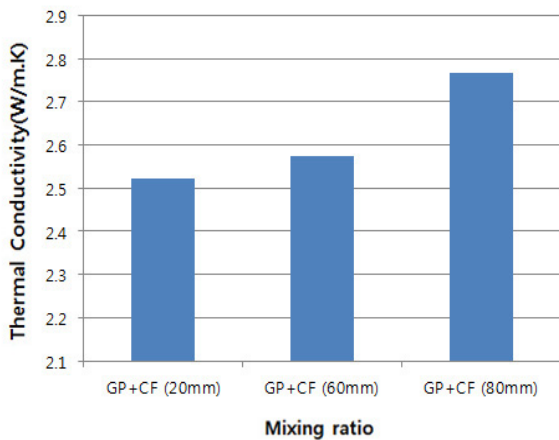


Fig. 17 Thermal Conductivity of Mortar with GP 30%+CF 0.5%

3.3. Heating Test 실험결과

Fig. 18에서 볼 수 있듯이, Graphite의 경우 치환율이 증가함에 따라 60분 경과 후 공시체의 발열온도 역시 비례하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 시멘트 중량대비 50% 치환되었을 때 30%때보다 발열온도가 약 20% 이상 증가한 것을 볼 수 있다.

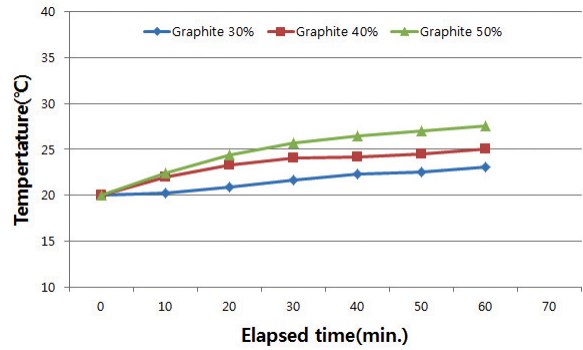


Fig. 18 Heating Graph with Graphite

Carbon Fiber의 발열온도 측정 결과 Graphite에 비해서 발열에 있어 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 양상을 보이는 이유는 공시체 내부에 Graphite와 Carbon Fiber의 첨가량이 증가함에 따라서 비저항의 값은 감소하게 되는데, 이러한 비저항의 감소로 인하여 공시체 내부에 전기가 쉽게 흐를 수 있게 통로가 생성되어 전기의 흐름이 활발해지기 때문이다 (Xin Tian et al, 2012).

전기적 특성인 도전성이 부여된 전기전도성 콘크리트는 전도성 재료의 배합비뿐만 아니라 제작방법, 양생환경에 따라 값이 달라진다. 또한 동일하게 제작된 공시체

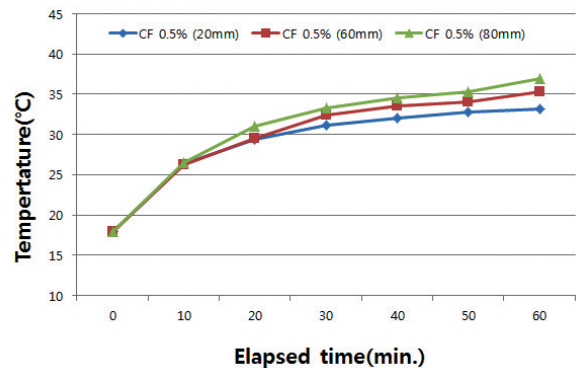


Fig. 19 Heating Graph with Carbon Fiber 0.5%

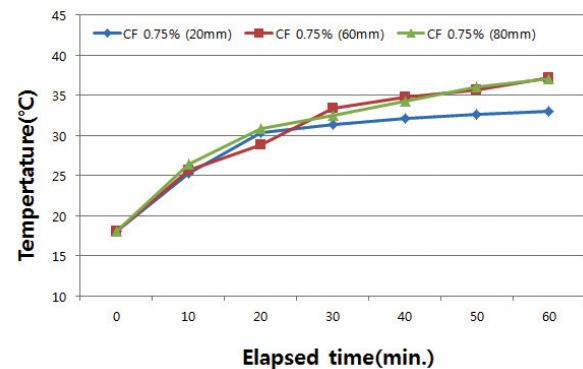


Fig. 20 Heating Graph with Carbon Fiber 0.75%

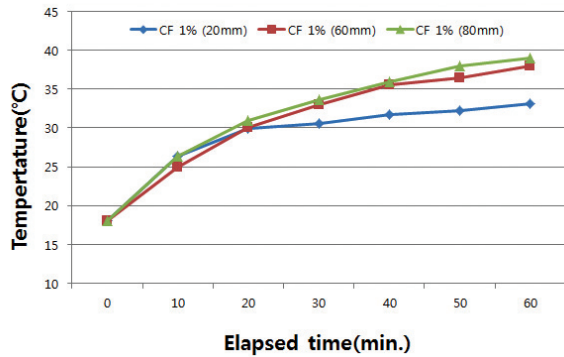


Fig. 21 Heating Graph with Carbon Fiber 1%

내에서도 내부의 혼합물이 얼마나 균질하게 분포되었는지에 저항적 특성이 달라지기 때문에 제작과정에 있어서 등방성은 중요한 사항이다.

Fig. 22는 Graphite와 Carbon Fiber를 동시에 혼입하여 만든 공시체의 발열에 관한 거동을 나타낸 그래프이다. 그래프를 통해 알 수 있듯이, Carbon Fiber만 혼입하여 제작한 공시체보다 약 25% 높은 최대발열온도가 측정되었다. 공시체 내부에 Fiber가 생성한 전기적인 통로를 Graphite 입자가 서로 접촉하여 보다 낮은 저항과 전자의 이동이 수월한 Optimal Path가 만들어졌기 때문으로 사료된다(Mingqing SUN, 2011).

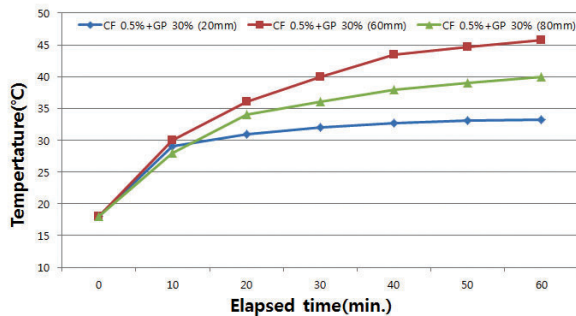


Fig. 22 Heating Graph with Graphite 30%+Carbon Fiber 0.5%

4. 결론

본 연구는 결빙방지를 위한 기초연구로서, Powder 형태의 Graphite와 섬유형태의 Carbon Fiber를 공시체에 첨가하여 Compressive Test, Thermal Conductivity Test, Heating Test를 실시하였으며 결론은 다음과 같다.

1. Powder와 Fiber 형태의 Carbon을 모르타르에 치환 및 첨가하여 압축강도테스트를 실시하였으며,

Graphite의 경우 공시체 내부에 시멘트 중량대비 30~50%까지 치환율이 증가할수록 강도는 저하하는 경향을 나타냈으며, 이러한 이유는 전도성 재료인 흑연의 치환율 증가로 인하여 상대적으로 시멘트의 양이 감소했기 때문에 강도발현에 있어 감소하는 거동을 나타낸 것으로 판단된다.

2. Carbon Fiber를 공시체의 용적대비 0.5, 0.75, 1%로 첨가시켰을 경우 Plain에 비해 강도저하는 크게 없었으며, 20mm Fiber의 경우 재령 28일 강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 60, 80mm Fiber의 경우 첨가율이 증가할수록 28일 강도가 약간 저하되는 양상을 보이고 있는데, 이러한 이유는 Mixing과정 중 공시체 내부에 Fiber가 균질하게 분산되지 못했기 때문에 충분한 강도발현이 이루어지지 않았다고 사료된다.

3. Graphite의 경우 치환율이 증가할수록 열전도율 역시 증가하는 경향을 나타낸 반면, Carbon Fiber의 경우 첨가율이 증가할수록 오히려 열전도율이 약간 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 섬유를 첨가할 경우 분산이 가장 중요한 사항이지만, 공시체 내부에 분배되어 있는 섬유가 서로 뭉치는 일종의 Fiber Ball이 형성되어 열전도에 있어 방해요소로 작용한 것으로 판단된다.

4. Graphite와 Carbon Fiber를 함께 혼입하여 수행한 열전도율테스트에서는 섬유의 길이가 20~80mm로 길어짐에 따라 열전도율이 높게 평가되었으며, 이러한 이유는 보다 긴 섬유가 공시체 내부에서 더욱 쉽게 Connecting을 형성하게 되어 열전도가 보다 더 잘 전달될 수 있는 요소로 작용했다고 판단된다.

5. Heating Test의 경우 Graphite의 치환율이 증가함에 따라 발열온도도 비례하는 경향을 보였으며, 30~50%로 치환율 증가에 따라 약 20%의 발열온도 차이를 나타냈다. Carbon Fiber의 경우 Graphite에 비해서 보다 높은 발열성능을 나타내는 것을 확인하였으며, Graphite와 Carbon Fiber를 함께 혼입하여 제작한 공시체의 경우 Fiber만 첨가한 경우보다 약 25% 높은 발열온도가 측정되었다. 이러한 경향을 보이는 이유는 공시체 내부에 전도성재료의 첨가량이 증가함에 따라서 비저항의 값이 감소하게 되어, 전기가 쉽게 흐를 수 있는 통로가 형성되어 공시체 내부에 보다 많은 전기 흐름이 활발해진 것으로 사료된다. 또한 동일한 환경에서 제작된 공시체라도 내부의 혼합물과 전도성 재료가 얼마나 균질하게 분

포되었는지에 대해서 저항성 특성에 영향을 끼치기 때문에 제작과정에 있어 등방성은 중요한 사항으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며, (No.2014R1A1A1004577) 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCE

- Alvaro Garcia, and others, (2009). "Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers". *Construction and Building Material*, 3175-3181.
- Cho, Dea-seong (2012) "A study on the optimization of Backfill Materials for Underground Power Cables using Thermal Resistivity Characteristic", Chonbuk National University.
- Chung, D.D.L, (2000). "Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material". *Composites:Part B* 31, 511-526.
- Hong, Chul-Ho (2014). "A study on the Exothermic Performances and Electrical Properties of Cement Mortar Containing Conductive Materials", Hanyang University.
- Kim, Chul-Keun (2014) "Thermal Properties of Early-Opening Conductive Heat Cement Based Composites", Konkuk University.
- Mingqing SUN, (2011). "Deicing concrete pavement containing carbon black/carbon fiber conductive lightweight concrete composites". *ICTIS*, 662-668.
- Xin Tian, Hu Hu and Bin Chen, (2012). "An Environment-Friendly Conductive Concrete". *Earth Science Research*, 185-188.