탄소섬유 분말 혼입 모르타르 복합 구조체의 파괴예측 자가진단 특성

Self-Diagnosis Property of Fracture in Carbon Fiber Composite Mortar

박 석 균*

Park, Seok-Kyun

Abstract

A new material was tested and its applicability was investigated so as to give the capability of self-diagnosis of fracture in composite mortar. In the research for giving self-diagnosis capability, conductive mortar intermixed with cokes and carbon fiber powder(milled carbon fiber) was developed and its using for self-diagnosis material was proposed. Then after examining change in the value of electric resistance and AE characteristics before and after the occurrence of cracks at each weight-stage, the relationships of each factors were analyzed. As the results, it can be recognized that a new composite material with cokes and carbon fiber powder(milled carbon fiber) can be applied for self-diagnosis of fracture in mortar specimen.

요 지

새로운 재료의 적용 실험을 통하여, 탄소섬유 분말 혼입 모르타르 복합 구조체의 파괴예측 자가진단 적용 특성에 대해 검토하였다. 본 연구에서는 자가진단 성능을 부여하기 위해 코크스와 탄소섬유분말(미분쇄 탄소섬유)이 혼입된 전도성 모르타르의 개발 및 자가진단 재료로서의 사용이 제안되었다. 각 하중재하단계에서의 균열발생 전후의 전기저항값과 AE특성치의 변화특성 시험을 통해, 이들 각 인자의 상호 연관성을 검토하였다. 그 결과, 코크스와 탄소섬유분말(미분쇄 탄소섬유)을 사용하여 새롭게 제안된 복합재료는 모르타르 시험체의 파괴 자가진단에 사용이 가능함을 알 수 있었다.

Keywords : Cokes, Carbon fiber powder(Milled carbon fiber), Conductive mortar, Fracture, Self-diagnosis

핵심 용어 : 코크스, 탄소섬유분말(미분쇄 탄소섬유), 전도성 모르타르, 파괴, 자가진단

* 정회원, 대전대학교 공과대학 토목공학과 부교수

E-mail : skpark@dju.ac.kr 042-280-2525

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2007년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근, 구조물의 효과적인 유지관리와 유효이용에 대한 관심이 높아지면서, 새로운 설계방식과 재료 및 공법 등의 개발이 이루어지고 있다.[(1)~(8)]. 그러나 재료파괴를 자기스스로가 진단 예측하는 것이 가능하게 된다면, 한층 유효하게 대처할 수 있다. 재료의 파괴측정에 대해서는 변형률게이지와 변위계가 이용되어 왔지만, 모르타르나 콘크리트 재료의 경우에는 균열전파의 형태에 따라 측정치가 크게 영향을 받기 때문에, 재현성이 나쁘고 초기조건의 설정이 필요하여 하중재하 후의 불연속 측정이 곤란하다. 큰 시험부재에서는 파괴위치와 측정위치의 일치가 어려워 다수의 센서사용에서는 계측오류의 원인이나 비용이 높아지는 등 종래 방법에서는 근본적인 해결에 이르지 못하였다. 따라서 구조물에 대한 새로운 파괴예측 센서의 개발이 요구되고 있다.[(6)]

이를 위한 하나의 유효한 방법은 구조물에 사용되고 있는 재료 자체가 파괴를 자가진단 할 수 있는 스마트(또는 인텔리젠트재료)화 되는 것이다. 재료자체가 파괴진행을 자가진단 할 수 있으면 복잡한 회로와 다수의 센서 사용은 불필요하게 되고, 강하고 중후한 설계로 해야 할 필요가 없어진다.[(6)(7)]

이에 대한 기존연구에서는 하이브리드 FRP의 일종인 CFGFRP(탄소섬유-유리강화 플라스틱)로드를 콘크리트 보강근으로 이용하여 재료의 파괴에 이르기까지 각 하중재하단계별 탄소섬유의 전기저항변화특성을 통한 자가진단 센서로서의 기능과 콘크리트 부재 내에서의 작용특성에 대하여 검토한 연구가 다수 보고 되고 있다.[(1)~(5)(7)(8)] 그러나 이들 연구는 구조체 내의 보강부재에 대해서만 파괴예측 등에 대한 자가진단센서로서의 기능을 검토한 것으로서, 실제 보강재료를 둘러싼 모르타르나 콘크리트와 같은 모체재료의 파괴손상에 대해서는 아무런 스마트기능을 부여하고 있지 않다. 물론, 보강근과 같은 구조적인 주요부재에 대해서만 스마트 기능을 부여하는 것은 경제적 측면 등에서 가장 효율적인 센싱방법이라 할 수 있다. 그러나 이는 수동적인 방법으로서 보다 재해예방수준을 높이는 능동적인 방법은 아니라 볼 수 있다. 보다 능동적인 방법은 보강근의 이상을 알리기 전에 그 주변재료의 이상을 먼저 발견해 냄으로써, 그 단계에서 보수·보강 등의 대책을 수립하면 훨씬 경제적이고 안전한 유지관리가 가능해진다. 물론, 휨부재의 경우는 중립축이하의 콘크리트의 강도를 무시하고 설계하지만, 대상 구조물이 균열발생을 허용하지 않는 설계등급의 프리스트레스트 콘크리트이거나, 해양콘크리트 등과 같이 강재의 부식우려가 매우 큰 구조물에서는 모체 재료 자체의 균열도 내구성 측면 등에서 큰 문제를 일으킬 수 있다. 또한, 사람의 접근이 곤란한 특수구조물(방사선차폐 구조물 등)의 안전진단이나 은행금고 등의 외벽파손에 의한 도난방지를 위한 센서기능 부여를 위해서는 보다 사전예방 효과가 높은 모체 재료 자체의 스마트 기능이 중요한 경우가 있을 수 있다. 또한 이는 스마트 구조물의 최종목표인 자가진단과 자가치료(균열의 자가복구)의 복합기능이 가능한 이상적 재료개발에서 반드시 선행되어져야 할 과제라 할 수 있다.

본 연구는 이와 같은 목적을 달성하기 위한 첫 번째 단계 연구로서, 기존의 보강근 위주의 자가진단이 아닌 모체재료 자체에 자가진단 기능을 부여할 수 있는 재료의 개발 및 그 적용 가능성에 대한 기초연구로서, 먼저 모르타르에 자가진단 기능을 부여하기 위해 코크스와 미분쇄 탄소섬유를 혼입한 복합재료를 제조하여 자가진단에 의한 파괴예측 가능성에 대해 검토하였다. 제조된 전도성 모르타르에 대해 배합조건을 달리하여 각각 초기저항값을 다르게 한 후, 해당 시험체에 대해 각 하중단계별 균열발생 전후에서의 전기저항값과 AE특성치 변화 등을 검토하여 시험체의 파괴예측 거동과 이들 각 인자간의 관련 특성을 분석하였다.

특히 전기저항 재료 중 가장 많은 첨가량을 사용한 코크스는 전도성(전기저항)을 나타냄은 물론 부산물(하기에 설명) 활용 효과도 있고 가격도 저렴하여, 본 연구에서 양호한 성과가 얻어질 경우 자가진단 소재로서의 경제성도 충분히 만족할 것으로 기대된다. 또한, 본 연구의 검토결과를 바탕으로 향후 철근콘크리트나 프리스트레스콘크리트에 대해서도 검토할 예정이다.

2. 전도성 자가진단 소재

본 연구에서 자가진단용 모르타르 시험체 제작 시에 첨가 혼합물로 사용한 전도성 자가진단 소재로서는 코크스와 미분쇄 탄소섬유를 선정하였다. 이하에 이들 소재의 주요특성에 대해 소개한다.

2.1 코크스

코크스(Cokes)란 역청탄을 1000-1200℃에서 보통 16-20시간 정도 건류하면서 발생되는 각종 부산물 중에서 최종적으로 정제된 고체상태의 숯 덩어리를 말한다. 석탄을 정제하는 과정에서 생산되는 코크스는 제철소의 코크스 공장에서 생산된다. 우리나라에서 코크스를 가장 많이 사용하는 곳은 제철소로 직접 제조하여 사용하고 있으며 여기에서 나오는 각종 부산물은 다른 화학 공장에서 다시 정제하여 콜타르와 수많은 유기물들을 생산해 내고 있다. 코크스도 어느 정도의 전도성을 가지고 있어 본 연구에서의 전도성 부가 물질로 사용하였다. 시멘트와의 배합조건에 따라 우수한 전자파 흡수능을 보여 주고 있으나, 코크스 자체의 강도가 약하기 때문에 시멘트 모르타르의 역학적 특성을 개선하기 위해 탄소섬유 같은 강도개선 물질의 첨가가 필요하게 된다.

2.2 미분쇄(微粉碎) 탄소섬유

탄소섬유는 주로 탄소로 구성된 섬유이다. 원료는 폴리아크릴로니트릴(PAN)계와 피치(pitch)계가 대부분을 점하고 있다. PAN계 탄소섬유는 폴리아크릴로니트릴을 불연화한 후 무산소 상태 하에서 약 1천℃에서 쪄서 구어 얻는다. 피치계는 석탄을 쪄서 구어 나온 피치를 섬유화해서 PAN계와 거의 같은 공정으로 얻는다. 가벼우면서도 강도나 탄력성, 내열성이 있는 꿈의 소재라고 불리어지고 있다.

이 탄소섬유는 높은 전도성을 가지고 있 때문에 본 연구에서의 전도성 부가물질로 사용하였다. 본 연구에서는 피치계 보다 PAN계의 탄소섬유를 첨가였을 때 더욱 우수한 특성을 보여 주었다.

미분쇄 탄소섬유(Milled carbon fiber)는 탄소섬유를 미분쇄한 것이다. 결과적으로는 탄소분말보다는 비중이 높고, 입자가 섬유상이며, 입자 크기가 비교적 큰 특징을 가지고 있다. 일반적으로 탄소섬유에는 수지로 코팅을 하기 때문에 분쇄하였다하더라도 수지가 일부 존재한다고 볼 수 있다. 전기전도성은 전도성 탄소분말 보다는 좋지 않으나, 혼용하여 쓸 때 작업성이 탄소분말에 비하여 우수하다.

3. 탄소섬유 복합재료의 자가진단 적용 특성

3.1 전도성 복합재료 모르타르의 배합

자가진단기능이 있는 전도성 복합재료 모르타르의 배합조건은 Table 1과 같이 4가지 조건을 선정하여 실험하였다. 선정조건은 각 시험체의 초기 전기저항값 변화를 목표로 배합을 정하였다. 초기 전기저항값의 목표치는 5Ω~350Ω의 범위로 하였다. 데이터를 범위로 나타낸 것은 본 연구의 보안을 위해서이나, 범위만으로도 실험결과의 경향성이나 특성을 파악하는 데는 큰 무리가 없을 것으로 판단하였다.

3.2 전도성 자가진단 모르타르의 실험개요

각 하중 재하 단계별 시험체의 균열발생 전후의 전기저항 및 변위 변화와 AE의 발생특성을 조사하기 위한 실험개요를 Fig. 1에 나타내었다. 이 때 모르타르 시험체는 무근상태에 있으므로 급격한 시험체의 파괴에 따른 측정치의 획득에 문제가 있을 것으로 예상되어, 시험체의 밑면에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 연속섬유시트를 부착하여 시험체의 취성파괴를 방지하였다.

Table 1 전도성 모르타르의 배합조건

Specimen No.	Flow (cm)	Mix proportion range (%)			Chemical agent
		OPC	Water	Cokes and Milled carbon	
DJ1	180	35-42	18-22	40-55	Plasticizer, Viscosity modifying admixture
DJ2	120				
DJ3	160				
DJ4	120				

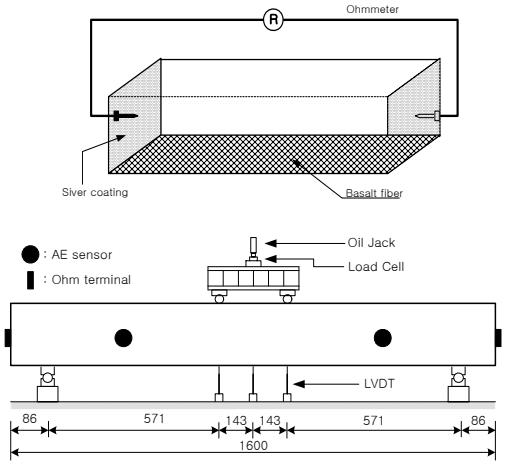


Fig. 1 시험체 및 실험 개요도

부착한 섬유시트는 전기저항변화를 무시할 수 있는 현무암계 원료의 Basalt섬유시트를 사용하여, 전도성 모르타르의 균열발생에 따른 전기저항 측정치의 변화에 영향을 미치지 않도록 하였다.

또한, 본 실험에서 AE계측은 균열발생 현황만을 관찰하는 데 그 목적을 둔 것으로 균열발생 위치를 탐색하는 것은 논외로 하였다. 이에 따라 센서의 배치는 2개소로 한정하였다. 전기저항측정 등 이들 각 센서의 배치도를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 2는 Basalt섬유시트(인장강도:108.7MPa)를 부착한 전도성 모르타르 시험체와 실험장면을 나타내었다.

3.3 실험결과 및 고찰

3.3.1 전도성 모르타르의 기본 물성

먼저 본 실험에 사용된 전도성 모르타르의 기본물성을 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다. 기본물성은 모르타르의 재령이 28일 일 때 측정하였고, 일정 온도와 습도조건의 항온항습실에서 양생하였다. 한편, 초기 전기저항값은 코크스와 미분쇄 탄소섬유의 양에 의해, 강도값은 W/C에 의해 조절이 가능한 데, Table 2와 Fig. 3의 결과에서도 알 수 있는 바와 같이, 이들 전기저항 소재의 첨가량(전기저항값이 높을수록 첨가량이 높음)과 압축강도와는 뚜렷한 상관이 없음을 알 수

Fig. 2 전도성 모르타르(상)와 실험 장면(하)

있어 본 소재의 사용에 따른 강도저하 문제는 크게 우려할 필요가 없음을 알 수 있다.

Table 2 전도성 모르타르의 기초물성

Specimen No.	Compressive strength (N/mm^2)	Electric resistance (Ω)
DJ1	23.1	6.1
DJ2	42.8	52.0
DJ3	36.1	110.4
DJ4	36.3	345.0

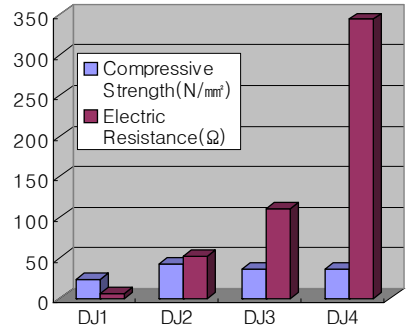
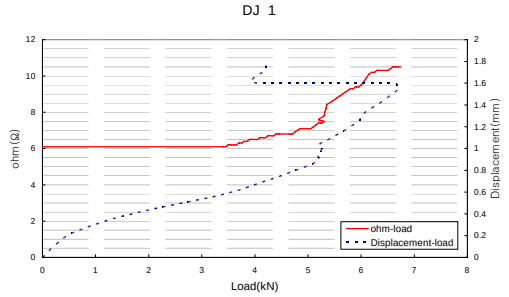


Fig. 3 전도성 모르타르의 기초물성 비교도

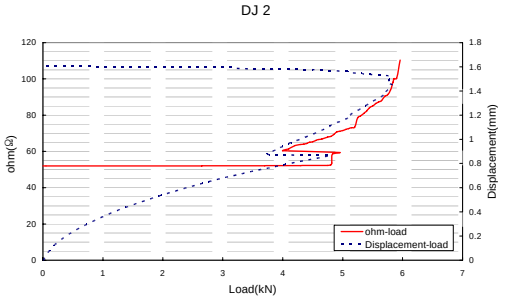
3.3.2 하중단계별 균열발생 양상과 전기저항 및 변위 변화의 관계

이상의 시험조건에 의해 각 시험체 종류에 대해 하중재하단계별 균열발생 개시시점과 진전상태에 따른 전기저항(ohm) 변화 및 변위(displacement) 변화의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 변위 변화는 주 검토대상은 아니고 다만 참고자료로 활용하기 위한 것이다. 이들 결과로부터 알 수 있는 바와 같이, 하중의 증가와 더불어 전기저항은 균열이 개시될 때부터 다소의 산포는 있지만, 거의 점증적으로 증가해 가고 있어 발생 균열량에 비례하여 전기저항 값이 변화함을 나타내고 있다. 특히, DJ1과 DJ3시험체의 경우에는 이러한 현상이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편 DJ2의 경우는 균열발생 개시부터 순간적으로 급격한 전기저항변화가 있었지만, 그 후로는 DJ1과 DJ3의 경우와 같은 안정적인 변화를 보이고 있으며, 이러한 현상은 복합재료 모르타르 시험체의 불규칙한 파괴양상이 순간적으로 발생하였기 때문으로 추정되나 계측시의 오차에 의한 영향도 배제할 수 없을 것으로 사료된다. 한편, DJ4시험체의 경우는 균열 개시 초기 단계에서는 점증적인 증가양상을 보이다가 갑자기 전기저항이 급격히 커지는 양상을 나타내고 있는데 이는 이 단계에서 균열진전이 급속히 진행되었기 때문으로 사료된다. 이후 다시 점증적 변화 특성을 나타내는 것은 Basalt섬유시트가 모르타르의 취성파괴 이후의 거동을 막아주는 역할을 하였기 때문인 것으로 사료된다. 특히 이러한 취성파괴범위에서는 하중변화는 미소함에 반해 저항변화량은 급격히 변화하는 영역이 존재함을 알 수 있다.

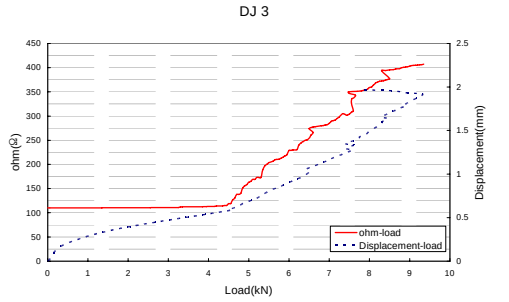
참고로, 각 하중재하 및 균열발생 단계에 따른 변위(displacement)의 변화는 DJ4의 경우를 제외하고는 전기저항 변화와 유사한 경향을 보이기는 하였으나, 균열개시 시점에서는 전기저항 변화와 같은 뚜렷한 변화는 포착할 수 없음을 알 수 있다. 이에 대한 원인은 Basalt섬유시트의 보강효과나 부착형태에 따른 영향도 배제할 수 없지만, 결국은 변위 만에 의한 센서기능은 본 연구에서와 같은 정밀한 파괴예측거동(특히 균열발생 초기단계)을 파악하는 데에는 어느 정도 한계가 있음을 보여주고 있다고 할 수 있다.



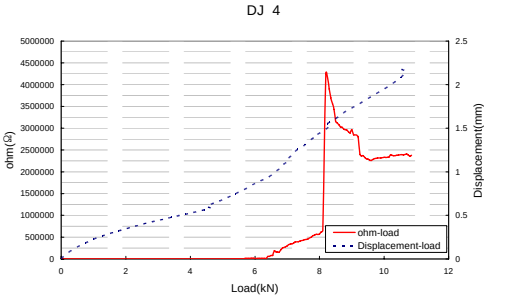
(a) 시험체 번호 DJ1



(b) 시험체 번호 DJ2



(c) 시험체 번호 DJ3



(d) 시험체 번호 DJ4

Fig. 4 전도성 모르타르의 하중재하단계별 전기저항과 변위 측정결과(시험체 번호 DJ1～DJ4)

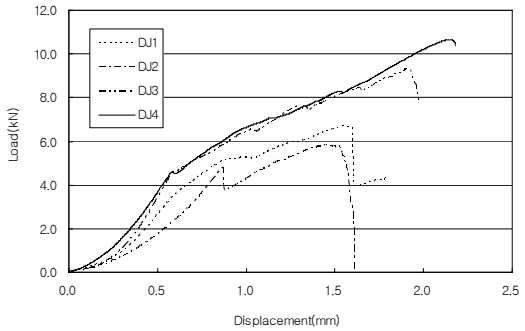


Fig. 5 전도성 모르타르의 하중재하단계별 변위 측정결과 (시험체 번호 DJ1~DJ4)

또한, 참고로 Fig. 5에는 혼동을 피하기 위해 Fig. 4의 표기방식(축)을 바꾸어 각 시험체에 대한 하중재하단계별 변위 측정결과를 재구성하여 나타내었다.

따라서 이상의 결과로부터, 본 시험체에 대한 계측은 균열개시 시점의 파악은 물론(전기저항이 균열발생 전에는 직선적으로 안정되어 있다가 균열발생시 전기저항값이 변화되기 시작), 파괴에 이르는 양상과 시기, 경향까지 예측 가능함을 알 수 있어, 자가진단 기능을 충분히 보유하고 있음을 알 수 있다. 흥미로운 사실은 이들 결과가 각 시험체의 초기 전기저항값의 차이(Table 2 참고)와는 거의 무관하게 나타나 전기저항 소재의 첨가량 범위를 자유롭게 조절해도 큰 지장이 없음을 알 수 있었다. 따라서 재료비에 따른 부담을 더욱 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3.3.3 하중단계별 균열발생양상과 AE특성치 관계

본 실험에서는 균열이 발생할 때의 하중치가 전기저항과 AE히트수간에 어떠한 경향으로 나타나는지를 검토하기 위해 수행된 것으로서, AE에 위한 균열발생 위치추정은 대상 외로 하였다. 각 시험체 종류에 대한 하중단계별 균열발생양상과 AE특성치의 관계 중에서 대표적인 결과를 Fig. 6~Fig. 8에 나타내었다. 이들 그림에는 각 시험체의 파괴양상을 포함하여 각 조건별 시험체에 따른 각 하중단계별 균열발생시간과 진전에 따른 AE 특성치의 변화를 나타내고 있다.

시험체 DJ1의 파괴 양상을 살펴보면, Fig. 6(상)에서 보는 바와 같이 모르타르의 인장면에 Basalt섬

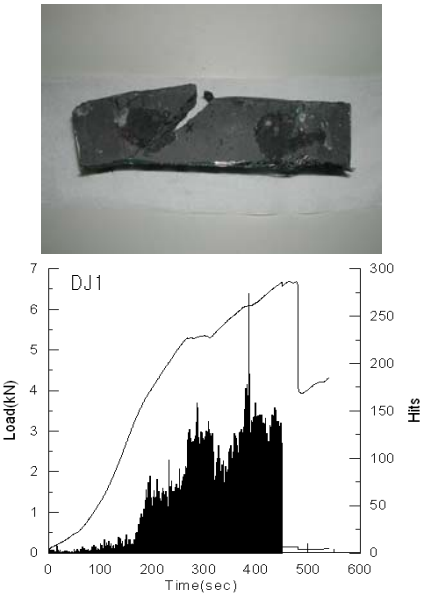


Fig. 6 시험체 DJ1의 파괴 형상(상)과 AE히트 수 측정결과(하)

유시트를 부착시킨 시험체에 하중을 재하한 경우, Basalt섬유시트가 휨인장응력의 보강효과를 발휘해 모르타르 시편은 휨파괴를 일으키지 않고 휨전단 파괴의 양상을 나타내었다.

한편, AE의 발생은 모르타르 내부의 미소한 파괴 혹은 파괴와 동시에 에너지 해방과정에 의해서 발생하는 탄성파동이 모르타르에 부착한 AE센서에서 검출되었다. Fig. 6(하)는 하중재하와 AE피라미터 중에서 AE활동성을 비교분석한 결과로서, 파괴하중은 약 6.69kN이었으나, AE 히트의 활동성은 이보다 빠른 6.66kN까지만 검출되었다. 이러한 경향을 나타낸 이유는 모르타르 자체는 파괴에 도달하였지만, 추가 내력을 Basalt섬유시트가 저항하고 있기 때문이다.

즉, 모르타르의 휨전단 파괴후에는 AE는 검출되지 않았고, 추가적인 내력은 Basalt섬유시트가 저항하는 상태에서, Basalt섬유시트의 인장 미소파괴로 인한 AE파는 검출되지 않았음을 의미한다. 결국, Basalt섬유시트의 인장파괴보다 극히 작은 영역에서 모르타르의 휨전단파괴에 의해서만 파괴거동을 나타내고 있음을 나타낸다.

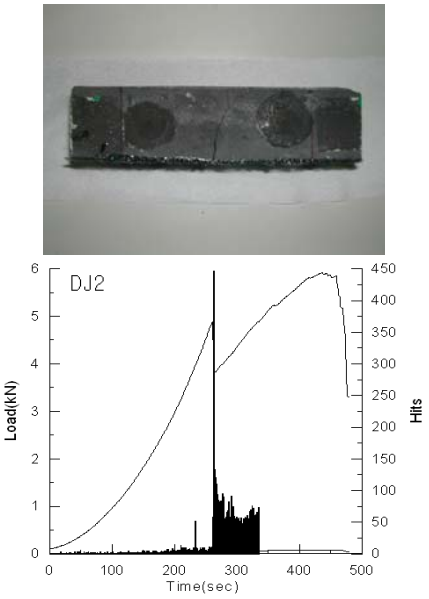


Fig. 7 시험체 DJ2의 파괴 형상(상)과 AE히트 수 측정 결과(하)

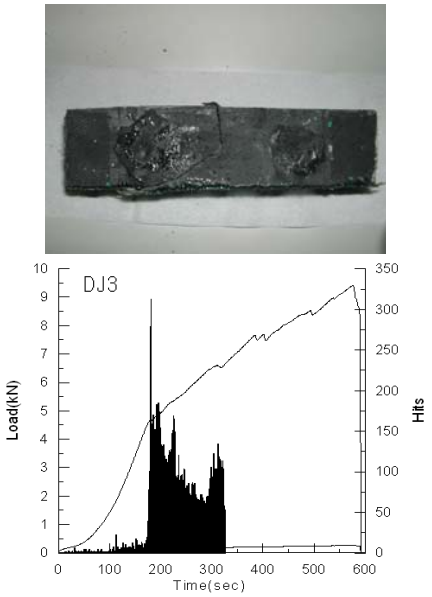


Fig. 8 시험체 DJ3의 파괴 형상(상)과 AE히트 수 측정 결과(하)

시험체 DJ2는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 휨파괴에 의해 파괴가 발생하였으며, 시험체 DJ1과 같이 AE의 발생은 모르타르 내부의 미소한 파괴 혹은 파괴와 동시에 검출되었다.

그러나 모르타르의 휨파괴 후에도 Basalt섬유시트가 휨내력에 저항하고 있지만, Basalt섬유시트에서는 AE파동은 검출되지 않았다. 본 시험결과에 의하면, 모르타르의 휨파괴 시점은 약 4.88kN이고, 이 하중 이후는 Basalt섬유시트에 의해 휨저항을 유지하고 있은 것으로 판단된다.

이상의 결과는 비록 휨파괴 시점은 각 조건별로 다르게 나타났으나, 시험체 DJ3인 경우의 Fig. 8에서도 Fig. 6의 경우와 휨전단파괴 양상을 나타내었고, 파괴하중은 4.6kN이다. 다만, 이들 각 시험체에 대한 압축강도(Table 2와 Fig. 3 참고)와 휨파괴강도와는 서로 비례관계를 보이지 않고 다른 경향으로 나타났는데 이는 앞서 설명한 바와 같이 Basalt섬유시트의 보강효과 또는 부착특성 차이에 기인한 것으로 사료된다.

이상의 결과와 원인에서 알 수 있는 바와 같이, 각 하중 재하 단계별 시험체의 균열발생 전후의 전기저항 및 변위 변화와 AE의 발생특성 간에는 명확한 상관성을 찾아내기는 어려웠다. 그러나 균열이 발생할 때의 하중치 변화에 따른 전기저항과 AE히트수의 변화양상이 서로 거의 유사하게 나타나는 것은 알 수 있어, 이들(전기저항과 AE히트수) 간에는 일정 상관이 있음을 알 수 있었다. 따라서 코크스와 미분쇄 탄소섬유를 전도성 재료로 첨가한 모르타르는 우선 자가진단 소재로서 적용 가능성이 있음을 알 수 있었다.

앞으로는 실용적인 연구를 위해 전도성 문제에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되는 철근콘크리트 시험체에 대해 추가연구를 수행할 예정이다.

4. 결 론

코크스와 미분쇄 탄소섬유를 전도성 재료로 첨가한 모르타르를 이용하여 자가진단 소재로서의 적용 가능성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하중단계별 균열발생 양상과 전기저항 변화의 관계를 검토한 결과, 본 연구에서 사용된 재료의 시험

체에 대해서는 하중단계별 균열개시 시점의 파악이 가능함을 알 수 있어, 파괴 예측 정보로서의 자가진단 기능을 보유하고 있음을 알 수 있었다.

2) 자가진단 기능이 각 시험체의 초기 전기저항값의 차이와는 거의 무관하게 나타나, 전기저항 소재의 첨가량 범위를 자유롭게 조절해도 큰 지장이 없음을 알 수 있어 재료비에 따른 부담을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
3) 하중단계별 균열발생 양상과 AE특성치의 관계를 검토한 결과, 섬유시트 부착영향으로 이들 만의 상관을 명확히 파악하기는 어려웠지만, 일부결과에서는 초기균열 발생시의 전기저항변화와 AE히트수의 발생양상이 유사하게 나타나 이들 간의 상관성이 일부 나타났다.
4) 코크스와 미분쇄 탄소섬유를 전도성 재료로 첨가한 모르타르는 자가진단 소재로서 적용이 가능하고, 전도성 첨가재의 사용에 따른 강도저하 문제도 발생되지 않아 자가진단 재료로서의 구조적 안정성도 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구의 일부 결과는 한국건설기술평가원 연구개발사업에 의한 연구비 지원에 의해 수행된 것으로서 이에 감사드립니다. 또한, 시료제작에 협조하여 주신 (주)인트켐의 안상욱 대표이사님과 시험에 협조하여 주신 충남대 이병재 대학원생, 쌍용중앙연구소의 이웅종박사, 한국과학기술원의 김정수 대학원생, 자문에 응하여 주신 김진근 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

1. 박석균, 김대훈, 하이브리드 FRP보강근 콘크리트의 손상 자가진단, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집 Vol.17, No.2, 2005, pp.233-237.
2. 박석균, 김대훈, 탄소섬유를 전기저항센서로 이용한 하이브리드 섬유보강근 콘크리트의 파괴거동 예측, 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 1995, pp.322.
3. N.Muto, H.Yanagida, T.Nakatsuji, M.Sugita, Y.Ohtsuka, Y.Arai and C.Saito, “Materials design of CFGFRP-reinforced concretes with diagnosing function for preventing fatal fracture”, Advanced Composite Materials, Vol. 4, No. 4, 1995.
4. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, CFGFRP筋によるコンクリート構造材の破壊檢知, セメント・コンクリート論文集, No. 48, 1994.
5. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, 炭素・ガラス複合纖維補强筋コンクリートにおける損傷の自己診斷, セメント・コンクリート論文集, No. 576, 1995.
6. 杉田 外, スマートコンポジット-VI, 日本複合材料學會誌, Vol. 23, No. 5, 1997.
7. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔 外, “CFGFRP複合材料とCFGFRP筋コンクリートの破壞自己診斷”, 日本窯業學會紙, 100 [12], 1992, pp. 1429-1434.
8. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, コンクリート損傷に對する自己診斷, セメント・コンクリート論文集, No. 47. 1993, pp.826-831.

(접수일자 : 2006년 5월 25일)