

잉여 전기 저항 측정을 이용한 탄소 섬유 강화 복합재의 파손 측정

Self-Diagnosis of Damage in Carbon Fiber Reinforced Composites Using Electrical Residual Resistance Measurement

강지호

Ji Ho Kang

초 록 본 연구의 목적은 전기 저항 측정을 통한 탄소 섬유 강화 복합재의 파손 감지를 위한 효과적인 방법을 개발하는 것이다. 이를 위하여 복합재 적층판에 특정 파손을 인위적으로 모사하고 전기 저항의 변화와 모사된 파손과의 관계를 정립하려 하였다. 많은 량의 측정치를 효과적으로 처리하기 위하여 자동화된 측정 시스템을 개발하였다. 전기 저항 측정을 위하여 시편 표면에 전극을 제작하는 방법을 개발하였다. 쿠폰과 평판 형태의 탄소 섬유 강화 복합재 적층 시편에 인위적인 파손을 부과하고 전기 저항을 측정하고 그 결과를 후처리하는 과정으로 파손을 검출하였다. 쿠폰 형태의 시편은 제작시에 다양한 크기의 테플론 필름을 삽입하여 층간 분리를 모사하였다. 전기 저항 측정 결과 층간 분리 크기가 증가함에 따라 전기 저항도 증가하는 경향을 보였으며, 이를 통해 층간 분리의 존재와 그 크기를 검출할 수 있음을 보였다. 평판 시편은 초기에는 인위적인 파손 없이 제작하여 전기저항을 측정하고, 이후 특정 위치에 원공을 뚫고 원공의 직경을 증가시켜 가며 전기저항의 변화를 관찰하였다. 실험에 사용한 평판은 각 변에 6개의 전극을 설치하여 총 24개의 전극을 갖도록 하였으며 수직, 수평, 대각선 방향의 전극간의 전기 저항을 측정하였다. 측정 결과는 탄소 섬유 강화 복합재 구조물의 파손 검출을 위하여 전기 저항 측정법의 가능성을 보였다.

주요용어: 탄소 섬유 강화 복합재, 전기 저항 측정, 파손, 층간 분리, 건전성 진단

Abstract The objective of this research was to develop a practical integrated approach using extracted features from electrical resistance measurements and coupled electromechanical models of damage, for in-situ damage detection and sensing in carbon fiber reinforced plastic(CFRP) composites. To achieve this objective, we introduced specific known damage (in terms of type, size, and location) into CFRP laminates and established quantitative relationships with the electrical resistance measurements. For processing of numerous measurement data, an autonomous data acquisition system was devised. We also established a specimen preparation procedure and a method for electrode setup. Coupon and panel CFRP laminate specimens with several known damage were tested. Coupon specimens with various sizes of artificial delaminations obtained by inserting Teflon film were manufactured and the resistance was measured. The measurement results showed that increase of delamination size led to increase of resistance implying that it is possible to sense the existence and size of delamination. A quasi-isotropic panel was manufactured and electrical resistance was measured. Then three different sizes of holes were drilled at a chosen location. The panel was prepared using the established procedures with six electrode connections on each side making a total of twenty-four electrodes. Vertical, horizontal, and diagonal pairs of electrodes were chosen and the resistance was measured. The measurement results showed the possibility of the established measurement system for an in-situ damage detection method for CFRP composite structures.

Keywords: CFRP, Electrical Resistance, Damage, Delamination, Health Monitoring

1. 서론

탄소 섬유 강화 복합재료는 높은 비강성, 비강도의 장점을 가지며 그 사용 범위를 넓혀가고 있다. 그러나 탄소 섬유 강화 복합재 적층판은 충격과 굽힘 하중에 매우 취약하며 또한 이러한 하중에 의한 파손은 재료 내부에서 발생하여 검출이 쉽지 않아 많은 탄소 강화 복합재 적층 구조물의 건전성 평가 기법들이 개발되어 왔다. 이러한 건전성 평가 방법 중의 하나는 복합재 자체의 전기 전도도의 변화, 즉 전기 저항의 변화를 측정하는 기법이다. 탄소 섬유는 전기 전도도가 매우 높은 물질이므로 탄소 섬유 강화 복합재에서 섬유 파단, 모재 파손과 층간 분리에 의한 섬유간의 전기 전도 경로의 변화 등을 이용하면 재료 자체가 센서의 역할을 할 수 있다.

기존의 연구 동향을 살펴보면, 일방향 탄소 강화 복합재에서 섬유 파단은 복합재의 섬유 방향으로의 전기 저항을 증가시키고 이를 이용하여 파손을 검출할 수 있다는 연구가 초기에 진행되었다[1-5]. 섬유 방향으로는 측정된 전기 저항이 전기 전도성 섬유의 개수와 직접적으로 비례적인 관계를 가진다. 그러나 섬유의 직각 방향으로는 전기 저항이 매우 크며, 그 결과 탄소 섬유 강화 복합재는 두께방향으로 유전체로서 역할을 하며, 교류 전기장에서 특정 유전율을 가지게 된다[6-7]. 두께 방향의 전기 저항 측정 또한 층간분리를 위하여 사용되었다[8]. 층간분리의 검출을 위해서는 복합재 표면의 전극을 전류가 두께 방향으로 일정하게 흐르도록 배치하는 것이 중요하다. 참고문헌[9-15]에서는 층간 분리의 검출을 위하여 다양한 연구를 수행하였고, 전극 주위에 등글게 돌아가는 형태의 전류 흐름이 발생하고, 층간 분리에 의해 단절되는 두께 방향으로의 전류 흐름이 층간 분리 검출에 주요 역할을 함을 보였다. 또한 파손 검출을 위한 전극의 위치와 개수를 최적화하기 위해 반응면 기법을 사용하였다. 참고문헌[16]에서는 2-probe 방법이 적절하지 않다고 밝히고 있는데, 이는 전극에서의 전기 저항의 변화를 피하기 어렵기 때문이다. 이들은 4-probe 방법을 사용하여 전기 저항 측정 대신 전위 변화를 측정하였다. 참고문헌[17]에서는 탄소 단섬유의 변형률과 전기 저항의 선형 관계식을 실험적으로 구하고, 또한 쿠펜 형태의 시편의 전기 저항 변화를 측정하였다. 그들은 게이지 길이는 전기 저항 변화에 영향을 끼치지 않음을 발견하였고, 그들의 결과

를 설명하기 위하여 electrical ineffective length라는 새로운 개념을 제안하였다. 또한 electrical impedance tomography(EIT) 기법을 적용하였는데 이는 전위의 변화와 기계적 물성의 변화를 매핑하는 방법이다. 참고문헌[18]에서는 기존의 EIT를 수정하여 이방성 전기 전도도를 갖는 재료에 적용하도록 하였고, 직교 이방성(orthotropic) 탄소 섬유 강화 복합재 적층판상의 원공의 크기와 위치를 실시간으로 추정하였다. 실제 구조물에의 적용 사례로는 참고문헌[19]에서 전기 저항 측정 기법을 Comanche 헬리콥터의 landing door에 적용한 사례가 있다. 이들은 4-probe 기법을 적용하여 전위 변화를 측정하였고, 또한 측정 결과의 재연을 위한 여러 가지 종류의 전극을 적용하여 측정 결과를 비교한 결과, 원공을 관통하고 은 에폭시(silver epoxy)로 접착된 구리 리벳이 가장 좋은 결과를 보였고, 반면 리벳 없이 은 에폭시만을 사용한 전극은 가장 나쁜 결과를 보였다. 또한 FEM 코드를 개발하여 각 전극에서의 전압 강하를 예측하였으며, 실험과 예측이 잘 일치함을 보고하였다.

본 연구의 목표는 실질적이고 보다 완성된 전기 저항 측정 기법을 이용하여 내재된 탄소 섬유 강화 복합재 구조물의 파손을 측정하는 것이다. 이를 위하여 자동화된 데이터 수집 장치와 GUI 운용 소프트웨어를 개발하였다. 전기 저항 측정을 위한 전극 제작 방법을 정립하고, 쿠펜과 평판 형태의 시편에 인위적으로 내재시킨 파손을 이용하여 전기 저항 변화를 관찰하였다

2. 전기 저항 측정 시스템

전기 저항 측정 데이터 취득 시스템은 두 개의 Keithley Model 7011-S Multiplexer 보드를 탑재한 Keithley Model 7001 Switching System 메인 프레임과 Keithley Model 2400 Source Meter, 그리고 Keithley Model 2182 Digital Nanovoltmeter로 구성되어 있다. 각 multiplexer 보드는 채널 변경을 위한 40개의 릴레이로 구성되어 있고, 한 개의 보드는 양극을 다른 보드는 음극의 전극을 담당하도록 회로를 구성하였다. 각 전극은 두 가닥의 전선을 이용하여 스위칭 보드의 두 개의 채널과 연결되는데, 한 개의 전선은 전류, 다른 한 개는 전압 측정을 위한 것으로, 이를 통하여 4-wire 회로구성이 되어 불필요한 와이어와 릴레이 스위칭 회로로 인

한 전압 강하를 무시할 수 있다. 각 전극당 두 개의 채널을 사용하므로 총 40개의 전극을 사용할 수 있고, 스위칭 보드를 이용하여 전류 소스와 전압계를 적절히 연결함으로써 어떠한 두 전극 사이에서도 전기 저항을 측정할 수 있다. 이 기기들은 IEEE-488 인터페이스를 사용하여 상호 연결되고, 한 대의 컴퓨터를 사용하여 측정 과정을 컨트롤 한다. 전체적인 시스템 구성은 Fig. 1과 같다. 측정 과정 컨트롤을 위하여 컨트롤 프로그램이 개발되었고, 프로그램 상에서 시편 형태와 전극 배치를 선택하면 자동적으로 모든 가능한 전극 쌍에서 자동적으로 전압 강하를 측정한다. 컨트롤 프로그램의 유저 인터페이스는 Fig. 2와 같다. Fig. 2는 모든 40개의 전극을 다 사용한 예를 보여주는데, 그림에서 좌측 상단은 전극의 배치로 이 전극의 배치는 사용자가 임의로 바꿀 수 있다. 전극의 번호는 상단 좌측의 전극을 0번으로 하여 시계방향으로 돌아가며 번호 매김을 한다. 시스템 자체의 전압 강하를 무

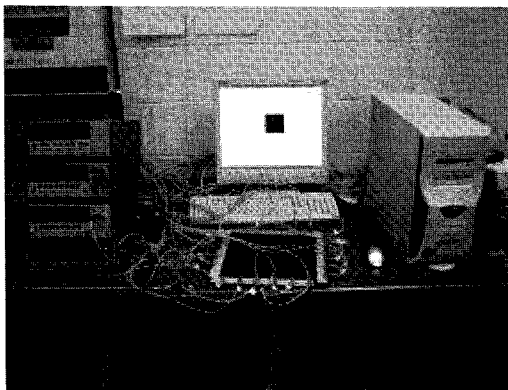


Fig. 1 Data acquisition system for resistance measurement

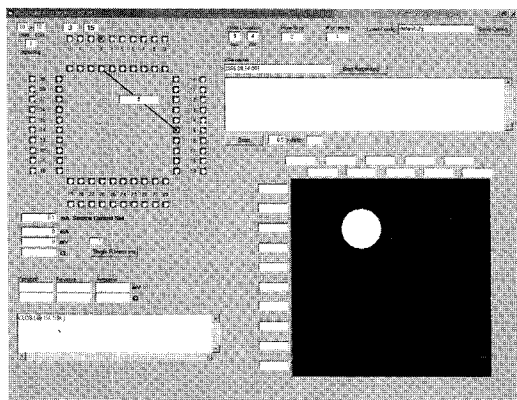


Fig. 2 User interface for DC-resistance measurement system using all 40 electrodes

시하기 위하여 전압 측정 후 자동적으로 전류의 방향을 역전시켜 다시 측정하고 평균값을 취한다. 전기 저항 측정은 자동 혹은 수동 모드로 진행될 수 있으며, 수동 모드인 경우 사용자가 직접 두 개의 전극을 지정하여 둘 사이의 전기 저항을 측정한다. 탄소 섬유 강화 복합재의 표면은 모재인 에폭시가 덮고 있어 그대로는 전극을 부착할 수가 없다. 탄소 섬유를 표면에 노출시키기 위해서 사포를 사용하여 표면의 에폭시를 제거한다. 표면으로 노출된 탄소 섬유는 전극과의 접촉 상태에 따라 전기 저항이 바뀌게 되므로, 이를 방지하기 위해 연마된 표면 위에 은 페인트(silver paint)를 도포하여 접촉면을 평탄화하고 다수의 탄소 섬유가 균일하게 탐침과 접촉하도록 한다. 은 페인트 위에는 구리로 제작된 전극을 부착하고 시편의 반대편은 볼트를 사용하여 일정한 토크를 가한다. 볼트 끝부분에 의한 시편의 손상과 원치 않는 전류 누전을 막기 위하여 비전도성 물질을 볼트와 시편 사이에 삽입한다. 전형적인 전극 부착 형태는 Fig. 3과 같다.

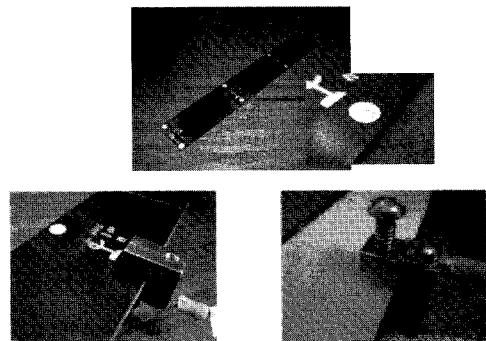


Fig. 3 Electrode connection to specimen

3. 층간분리를 내재한 복합재 시편의 전기 저항 측정

길이 12인치, 폭 1인치의 크기로 [0/45/90/-45]S의 준등방성 적층의 중립면에 0.4, 0.75, 1.25, 1.6, 2.0 인치 길이의 테플론 필름을 삽입하여 층간분리를 모사한 쿠편 형태의 시편을 제작하였다. 전기 저항 측정을 위해 사용된 전극의 배열은 다음과 같다. 4개의 전극 A, B, C, D를 시편 윗면에 3인치 간격으로 제작하고 반대면에도 윗면의 전극과 동일 위치에 a, b, c, d의 4개의 전극을 제작하였다. 테플론 필름에 의한 층간분리는 전극 A와 B사이에 위치하도록 하였다. 제작된 시편 형태와 테플론 필

름의 삽입위치, 전극의 위치는 Fig. 4, 5와 같다. 전기 저항 측정은 우선 시편의 표면을 측정하기 위하여 전극쌍 AB, BC, CD, ab, bc, cd 에서 측정하였고, 층간분리에 의한 영향을 가장 잘 표현할 수 있는 전극쌍 Ab와 그에 대응하는 층간분리가 없는 부분의 전극쌍인 Bc, Cd과 그 반대 방향인 전극쌍 aB, bC, cD에서도 측정이 이루어졌다. 마지막으로 윗면과 아랫면의 차이를 무시하기 위하여 윗면의 전극과 아랫면의 전극을 동시에 사용하는 방법을 사용하였다. 이때 사용된 전극쌍을 AB*, BC*, CD*으로 표시한다. 층간분리 크기별로 9개의 시편의 전기 저항을 측정하였으며 측정된 결과는 Fig. 6 과 같다. 층간분리는 전극 A, B 사이에 존재하므로 일반적으로 전극쌍 AB, ab, 또는 Ab, aB 사이의 전기 저항은 다른 곳에 비해 크며, 또한 층간분리의 크기가 커짐에 따라 커질 것으로 예상되었다. 그리고 층간분리는 대칭 적층판의 중립면에 존재하므로 윗면과 아랫면의 전기 저항은 거의 동일할 것으로 예상되었다. 그러나 실제 측정 결과는 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 예상과는 약간 다른 결과를 보였다. 윗면과 아랫면은 거의 동일한 상태임에도 불구하고 같은 시편의 같은 위치에서도 전기 저항의 값이 다르다. 그리고 층간분리의 크기에 대해 전기 저항이 커지는 경향은 보이고 있으나 특이하게도 층간분리의 길이가 1.25인치인 경우에는 모든 측정 결과에서 동일하게 전기 저항이 낮아지는 경향을 보였다. 더욱이 층간분리에 의한 영향이 적을 것으로 예상된 전극 C, D 사이에서도 층간분리의

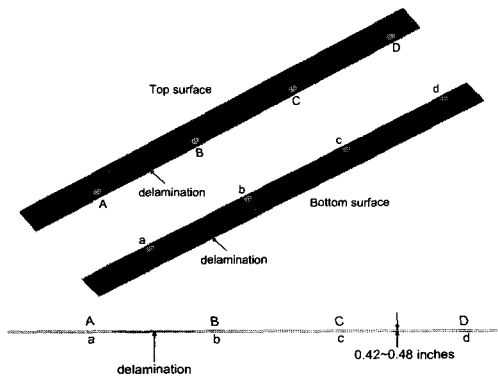


Fig. 4 Configuration of coupon specimens

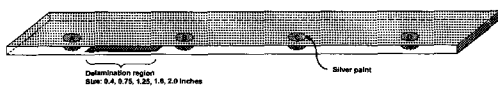
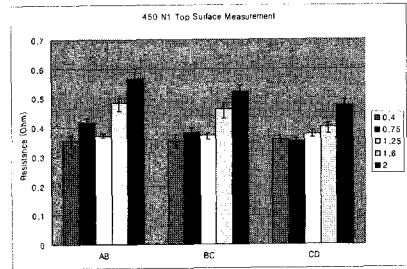
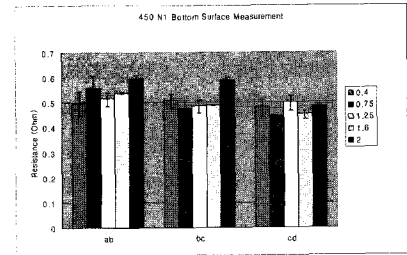


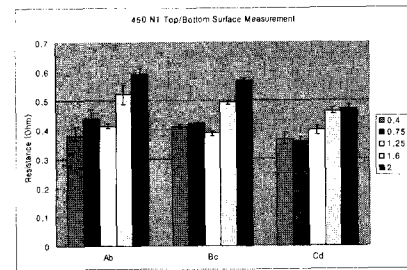
Fig. 5 Electrode positions for coupon specimens



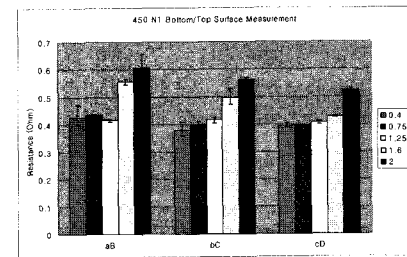
(a)



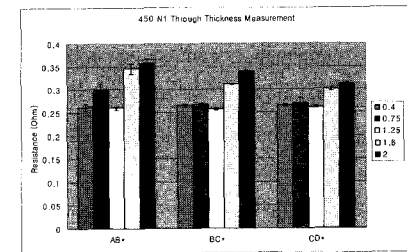
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 6 Measurement results of coupon specimen using (a) top surface electrodes, (b) bottom surface electrodes, (c) top surface to bottom surface electrodes, (d) bottom to top surface electrodes, and (e) through thickness electrodes

길이가 1.6 인치를 넘기면 전기 저항이 증가하는 경향이 뒷면 측정결과에 제외하고 다른 측정결과에서는 모두 나타나고 있다. 이는 시편 제작시 한 종류의 층간분리 크기에 대해 한 개의 12인치 × 12인치 평판을 절단하여 시편을 제작함으로써, 각 층간분리 크기 별로 제작에 의한 차이의 영향이 있는 것으로 생각되나 정확한 원인에 대해서는 향후 추가 연구가 필요하다. 그러나 층간분리의 길이가 1.25 인치인 경우를 제외하면 전체적으로 층간분리의 크기에 대해 전기 저항이 증가하는 경향을 보이며, 특히 층간분리에서 어느 정도 떨어진 전극 C, D와 같은 위치에서도 층간분리의 크기에 따라 전기 저항이 증가할 수 있다는 것을 알 수 있다. 층간분리의 영향만을 고려하기 위해 잉여(residual) 전기 저항을 전극 A, B (또는 a, b) 사이에서 측정된 전기 저항에서 전극 C, D (또는 c, d) 사이에서 측정된 전기 저항으로 뺀 값으로 정의를 하고, 실제 측정치에 대해 잉여 전기 저항을 그려보면 Fig. 7과 같다. 잉여 전기 저항은 시편 자체의 전기 저항은 제거하고 층간분리에 의한 전기 저항 변화라고 가정하면, 층간분리의 길이가 1.25 인치인 경우를 제외할 경우 층간분리의 길이가 증가함에 따라 전기 저항이 변화하며 그 경향은 증가하는 경향성이 있음을 보여주고 있다. 그러나 앞서 설명했듯이 복합재의 전기 저항은 시편 별로 편차가 크므로 보다 정확한 결과를 위해서는 동일 시편에서의 층간분리 크기 변화에 따른 전기 저항 변화에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 원공이 있는 복합재 평판의 전기 저항 측정

가로세로 12인치인 준등방성 [0/45/90/-45]_{2S} 탄소 섬유 강화 복합재 적층 평판에서 원공에 의한 전기 저항 변화를 관찰하였다. 원공에 의한 영향을

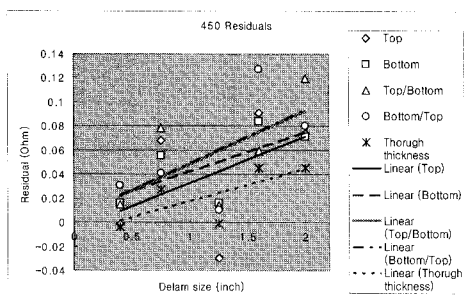


Fig. 7 Residual resistance of coupon specimens

살펴보기 위해 원공을 뚫기 전, 원공을 뚫은 후, 그리고 원공의 직경을 증가시켜 가며 전기 저항을 측정하였다. 평판의 형태와 실험 장치 셋업은 Fig. 8과 같다. 평판의 각 변에 6개씩의 전극을 제작하였고 전극은 위 아래면에 동일한 위치에 제작되었고, 은 페인트를 사용하여 위아래 전극과 평판의 옆면을 연결하였다. 원공을 뚫기 전에 baseline 데이터를 측정하였다. 전기 저항 측정은 수직, 수평, 45도 대각선, 135도 대각선 방향의 4가지 방향으로 전극 쌍을 선택하여 측정하였다. Baseline 데이터 취득 이후 직경 0.5, 1.5, 3.0 인치의 원공을 동일 위치에 차례로 뚫고 각 직경에 대해서 전기 저항 측정을 동일하게 반복하여 전기 저항의 변화를 관찰하였다. 잉여 전기 저항을 각 원공 직경에 대해 측정된 전기 저항에서 baseline으로 측정된 전기 저항을 뺀 값으로 정의하고 Fig. 9에 도시하였다. 원공 직경의 증가는 모든 방향의 전기 저항을 증가시키고

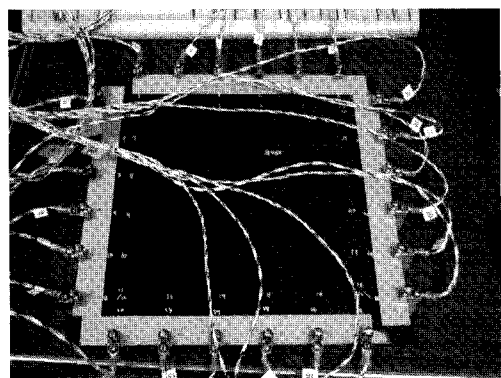
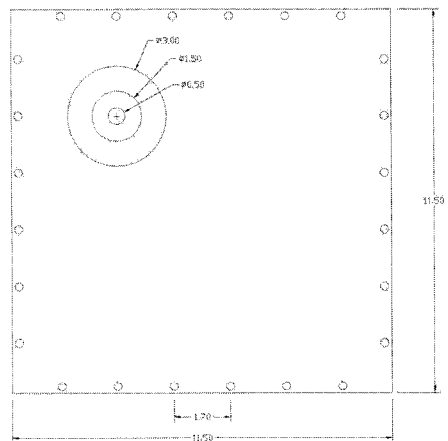


Fig. 8 Configuration of a quasi-isotropic panel with a hole and resistance measurement set-up

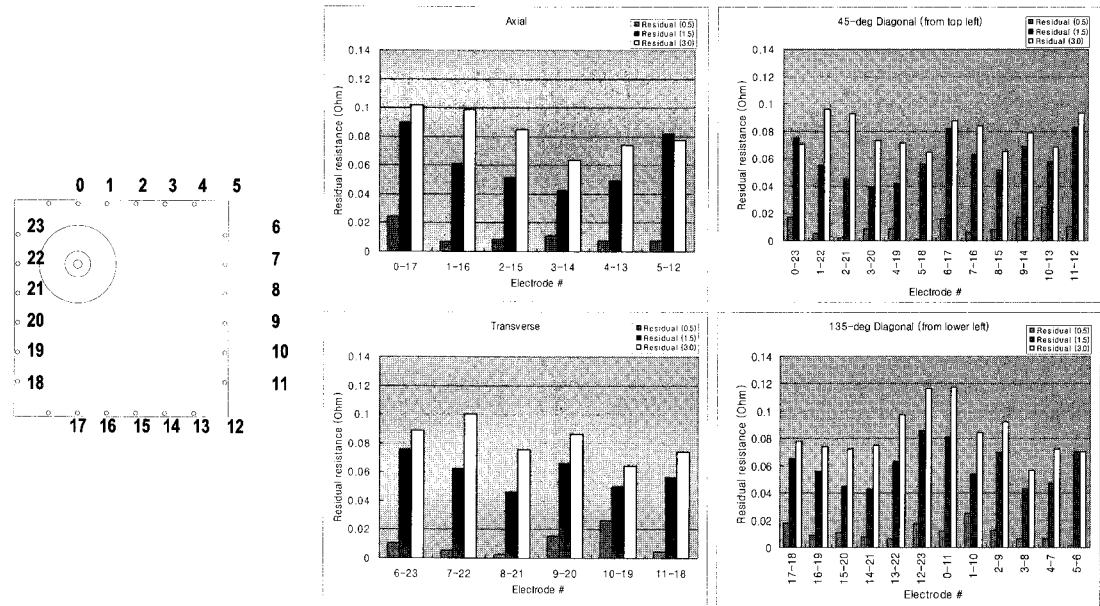


Fig. 9 Hole size effect on residual measurements of a quasi-isotropic panel

있음을 알 수 있는데, 이는 전류의 경로가 전극과 전극 사이를 직선으로만 이루어지는 것이 아니라 평판 전체를 모두 관통하기 때문이다. 그러나 전기 저항 측정에 사용된 전극 사이를 직선으로 연결한 경로를 따라 전류가 가장 많이 흐르기 때문에 전극과 전극 사이를 직선으로 연결한 경로가 원공에 의해 막히는 경우에 전기 저항의 증가가 보다 두드러지는 경향을 볼 수 있다. 예를 들어 수직 방향의 0-17, 1-16, 2-15은 3-14, 4-13, 5-12에 비해 전기 저항 증가가 더욱 크다. 마찬가지로 수평 방향의 7-22는 다른 수평 방향의 전기 저항보다 더 크게 증가하고 있다. 또한 대각선 45도 방향의 1-22, 2-21과 135도 방향의 12-23, 0-11의 측정도 동일한 경향을 보인다. 이 실험 결과로 내재된 원공의 직경 변화는 전기 저항 변화에 매우 민감하게 영향을 끼치며, 원공 주위에 배치된 전극간에 전기 저항 변화는 원공과 전극과의 위치에 의해 차이가 있다는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 전기 저항 측정 시스템을 구축하고 탄소 섬유 강화 복합재의 파손 측정에 적용하였다. 파손 측정은 인위적으로 모사된 층간분리를 갖는 쿠편 형태의 시편과 원공이 뚫린 평판에 대해

수행되었다. 전기 저항을 측정하도록 시편의 표면에 전극을 제작하고 특정 두 전극을 선택하여 두 전극 간에 전압 강하를 측정하여 전기 저항을 계산하였다. 각각의 시편에 대해 층간분리의 크기와 원공의 위치, 크기에 의한 전기 저항 변화를 관찰하였다. 측정 결과는 탄소 섬유 강화 복합재의 전기 저항 변화는 층간분리의 존재와 그 크기에 의해 민감하게 변화함을 알 수 있었고, 층간분리가 커짐에 따라 전기 저항이 커지는 경향을 알 수 있었다. 복합재 평판에 존재하는 원공은 그 직경이 커짐에 따라 평판의 전체적인 전기 저항을 증가시켰고, 특정 위치의 배치된 전극에 의해 측정되는 전기 저항 변화는 원공의 존재에 의해 보다 민감하게 변화함을 알 수 있었다. 본 연구의 결과를 바탕으로 향후 보다 다양한 종류의 시편과 파손에 대해 전기 저항 측정법을 적용하여 파손을 정량화하는 연구가 필요하다. 또한 전극과 복합재 시편 표면과의 접촉저항을 최소화하기 위하여 4-probe 방법을 적용하는 연구도 진행되어야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)의 원자력연구개발사업 수소 생산용 초고온가스로 설계기술개발과제(2009-0062528)의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] K. Schulte and C. H. Baron, "Load and failure analysis of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements," *Composites Science and Technology*, Vol. 36, pp. 63-76, (1989)
- [2] N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsuji, M. Sugita and Y. Ohtsuka, "Preventing fatal fractures in carbon-fiber-glass-fiber-reinforced composites by monitoring changes in electrical resistance," *Journal American Ceramic Society*, Vol. 76, pp. 875-879, (1992)
- [3] X. Wang and D. D. L. Chung, "Self-monitoring of fatigue damage and dynamic strain in carbon fiber polymer-matrix composite," *Composites, Part B*, Vol. 29, pp. 63-73, (1998)
- [4] J. C. Abry, S. Bochart, A. Chateauminois, M. Salvia and G. Giraud, "In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 925-935, (1999)
- [5] X. J. Wang, S. K. Wang and D. D. L. Chung, "Sensing damage in carbon fiber and its polymer-matrix and carbon-matrix composites by electrical resistance measurement," *J. Material Science*, Vol. 34, pp. 2703-2713, (1999)
- [6] J. C. Abry, Y. K. Choi, A. Chateauminois, B. Dalloz, G. Giraud and M. Salvia, "In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 855-864, (2001)
- [7] M. Kupke, K. Schulte and R. Schuler, "Non-destructive testing of FRP by D.C. and A.C. electrical methods," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 837-847, (2001)
- [8] P. E. Irving and C. Thiagarajan, "Fatigue damage characterization in carbon fiber composite materials using an electrical potential technique," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, pp. 456-466, (1998)
- [9] A. Todoroki, "The effect of number of electrodes and diagnostic tool for monitoring the delamination of CFRP laminates by changes in electrical resistance," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 1871-1880, (2001)
- [10] A. Todoroki and Y. Tanaka, "Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 629-639, (2002)
- [11] A. Todoroki, M. Tanaka and Y. Shimamura, "Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 619-628, (2002)
- [12] A. Todoroki, Y. Tanaka and Y. Shimamura, "Delamination monitoring of graphite/epoxy laminated composite plate of electric resistance change method," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1151-1160, (2002)
- [13] A. Todoroki, M. Tanaka and Y. Shimamura, "High performance estimation of delamination of graphite/epoxy laminates with electric resistance change method," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 1911-1920, (2003)
- [14] A. Todoroki, Y. Tanaka and Y. Shimamura, "Identifying delamination in cross-ply and quasi-isotropic beams of CFRP by a standardized electrical resistance method," *Polymers & Polymer Composites*, Vol. 12, No. 1, pp. 75-86, (2004)
- [15] A. Todoroki, M. Tanaka and Y. Shimamura, "Electrical resistance change method for monitoring delaminations of CFRP laminates: effect of spacing between electrodes," *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 37-46, (2005)

-
- [16] K. Omagen, A. Todoroki, Y. Shimamura and H. Kobayashi, "Detection of matrix cracking of CFRP using electrical resistance changes," *Key Engineering Materials*, 297-300, pp. 2096-2101, (2005)
- [17] J. B. Park, T. Okabe, N. Takeda, and W. A. Curtin, "Electromechanical modeling of unidirectional CFRP composites under tensile loading condition," *Composites: Part A*, Vol. 33, pp. 267-275, (2002)
- [18] Ruediger Schueler, Shiv P. Joshi and Karl Schulte, "Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 921-930, (2001)
- [19] Marthinus van Schoor, Andrew Cutler, Marcel Huigsloot, and Jared Keegan, "Resistance-based structural health monitoring of electrically conductive composites," 61st AHS Forum, Grapevine TX, (2005)