

## 액정을 이용한 GFRP의 열적시험법에 관한 연구

김 영 환\* · 권 오 양\*

### Thermal Inspection of GFRP using Liquid Crystal

Y. H. Kim and O. Y. Kwon

**Abstract** Flaws in GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics) were thermally detected using cholesteric liquid crystals. Presence of flaws changes the thermal conductivity of GFRP, and disturbs heat flow. When a uniform heat source is applied, the surface temperature of flawed region is different from that of sound region. The surface temperature distributions were measured by thermo-optic properties of liquid crystal. Since the colors of liquid crystal indicate temperature distribution of GFRP surface, the thermal disturbance by flaws could be detected. The locations of flaws in GFRP could be determined from the distribution of liquid crystal colors.

#### 1. 서 론

복합재료는 다른 일반 재료에 발생하는 결함은 물론이고 복합재료 고유의 결함이 존재할 가능성이 있다. 즉 복합재료에서는 표면의 균열, 각 Layer 사이의 Delamination, Matrix Crack 등의 결함이 존재할 수 있다. 이러한 결함이 존재하는 부위에서는 정상적인 부위에 비하여 열적특성이 달라지게 되므로, 열흐름 또는 온도분포를 가시화하면 결함의 위치 및 형태를 알 수 있다.

일반적으로 열흐름을 가시화하기 보다는 온도분포를 측정하게 된다.

이 열적시험법은 열원을 사용하는 방법에 따라서 Active Heating 및 Passive Heating으로 나눌 수 있다. Active Heating은 소위 SGTF(Stress Generated Thermal Field)<sup>1)</sup>라 불리우는 방법으로, 시험체에 반복적인 하중을 가하였을 때에, 시험체의 손상부위에서 열이 발생하는 원리를 이용하는 방법이다. 이 방법에서 열이 발생하는 원인은 여러가지가 있는데 이 중에서 대표적으로 피로균열의 표면이 서로 마찰하거나, 복합재료의 Matrix 물질의 Hysteresis에 의한 발열현상이다. GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)와 같이 열전도도가 낮은 시험체에서는 발열된 열은 잘 전달되지 않아 국부적으로 온도가 올라가게

\* 한국표준연구소 비파괴평가연구소

접수 : 1990년 9월 3일

본 연구는 과학기술처 특정연구사업의 일환으로 진행되었음.

된다. 따라서 시험체의 온도분포를 측정하면 결합부위를 쉽게 찾아낼 수 있다.

다른 방법으로는 소위 EATE(Externally Applied Thermal Field)라 불리는 Passive Heating으로 이 방법은 시험편의 일부 또는 전체에 외부로부터 열을 가하였을 때의 시험편에서의 온도 분포를 측정하는 방법이다.<sup>2)</sup> 이 경우에는 시험체에서의 결합이 열흐름을 교란시키게 되고 따라서 주위의 온도분포에 영향을 미치게 되어 결합부위의 온도가 정상적인 부위에 비하여 높거나 낮아지게 된다. SGTf의 경우와 마찬가지로 시험체의 열전도도가 낮은 경우는 이 온도분포의 차이는 평형을 이루게 되므로 표면온도를 측정하여 시험체의 이상유무를 확인할 수 있게 된다. 열전도도가 높을 경우는 빠른 속도로 동일 온도를 유지하게 되므로 두 방법 모두 적용하기가 어렵다. 따라서 열적시험법은 주로 복합재료나 세라믹과 같이 열전도도가 낮은 재료에 대하여 사용된다.

EATF 열적 시험법은 일반적으로 시험편에 균일한 열원을 가하고 시험체의 표면에서의 온도분포를 측정하게 된다. 가장 보편적인 열원은 전구를 사용하는 것으로, 한 예로 사진용 Flash를 사용하여 열에너지 펄스를 성공적으로 발생시켰다.<sup>3)</sup> 뜨거운 액체나 공기 건조기 또한 이용되었으며 때로는 점열원이 사용되기도 하였다.<sup>4)</sup> 시험편의 열분포를 기록하기 위해서는 IR 검출기 또는 액정(Liquid Crystal)<sup>5)</sup>을 사용한다. IR 검출기는 전자 기술의 발전에 따라서 많이 발전되고 있으며 원격검출 및 신호처리와의 호환성 등의 장점이 있다. 그럼에도 불구하고 싼 가격, 높은 분해능(약 0.01K, 1 $\mu$ m), 빠른 반응시간, 지속적인 열분포감시 등의 장점때문에 액정도 계속적으로 사용되고 있다. 이 액정은 열-광학적(Thermo-optic) 성질에 의하여 빛을 산란시키는데 이 현상을 이용하기 때문에 시험체의 표면이 검은 색일수록 좋은 결과를 얻을 수 있다.

따라서 액정을 사용한 열적 시험법에서는 낮은 열전도도를 지닌 검은 시험체가 요구되는데, CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)와 GFRP의 두가지 복합재료에 있어서, GFRP는 CFRP에 비하여 색이 흰색이어서 적합하지 않으나 열전도도가 낮으므로, 본 연구에서는 주로 GFRP를 대상시험체로 선정

하였다. EATF 방식으로 가열하고, Cholesteric 액정을 사용하여 표면의 온도를 측정하였고 그 결과로부터 결합의 위치를 판정하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2-1. 열전달에 대한 수학적 모델

열적 시험법의 계산 모델은 V. Vavilov에 의해 수행되었다.<sup>6)</sup> 그는 Fig. 1과 같이 두께 L인 무한한 시험편위에서 선형열원(Q)이 속도 V로 움직인다고 하고 두께가 d이고 한변의 길이가 h인 정사각형 결합(F)이 깊이 l에 존재하는 경우를 가정하였다. 가열되는 표면의 온도를 H, 반대편의 온도를 R이라 하고 Temperature Contrast Parameter  $A = \delta T/T$ 를 구하였다. 여기서  $\delta T$ 는 결합이 존재함으로 달라지는 표면 온도이다. 16,000점의 Grid에 대하여 수식적으로 구한 해 중에서 대표적인 결과는 Fig. 2와 같다.

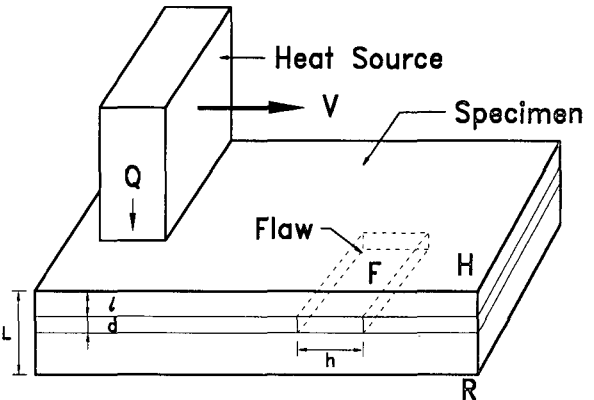


Fig. 1 General scheme for thermal non-destructive testing.

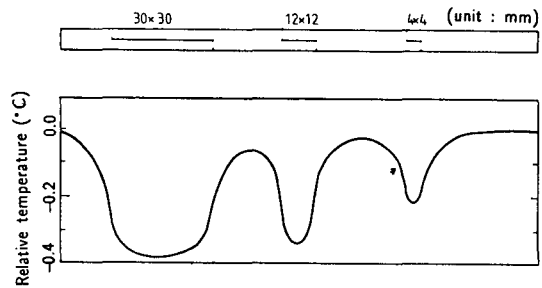


Fig. 2 Typical temperature profile on rear surface.

이 결과에서 보면 시험체 내부에 결함이 존재하면 그 부분에서는 열전달이 방해를 받으므로 열전달이 어렵게 되고 따라서 가열하는 쪽은 주위 온도보다 높아지고, 그 반대편은 주위 온도보다 낮아진다. 결함의 크기에 따라서 이 온도차 및 범위가 달라지게 되므로 결함의 크기에 대한 정보도 얻을 수 있게 된다. 또한 열적시험의 결과는 열원의 위치 및 방법, 결함의 종류와 온도측정 부위에 따라서 결함의 위치에서는 주위의 온도보다 높거나 낮아지게 됨을 알 수 있으며, 따라서 표면의 온도분포로부터 결함의 위치 및 형태를 판정할 수 있게 된다.

2-2. 액정(Liquid Crystal)

액정은 1888년에 오스트리아의 식물학자 F. Reinitzer가 Cholesteryl Benzoate가 145°C 및 179°C의 두 융점을 가짐을 보고하였고<sup>7)</sup>, 1889년 독일의 물리학자 O. Lehman이 이 물질의 분자구조가 Crystal과 비슷하다하여 Liquid Crystal이라는 용어를 사용하기 시작하였다.<sup>8)</sup> 1930년대에 이 액정에 대한 연구가 활발히 진행되었다가 점차 줄어들었고, 1960년대에 부터 액정의 Phase Transition 등에 대한 연구가 다시 활발히 진행되었다. 1922년 G. Friedel은 액정의 구조를 Smectic, Nematic 및 Cholesteric으로 구별하였고<sup>9)</sup> 나중에 Cholesteric은 Twisted Nematic으로 확인되었다.

액정의 분자는 Ellipsoidal 형태로 약한 결합력으로 인하여 액체상태이다. 액정물질은 고체상태에서 가열하게 되면 온도가 올라감에 따라서 점차 고체에서 이방성 액체, 등방성 액체로 바뀌어 진다. 이 이방성 액체는 액체의 성질과 결정의 성질을 동시에 지니게 되어 액정이라 한다. 액정의 역학적인 성질은 약한 결합력으로 액체와 같고, 광학 또는 전기적인 성질은 분자의 규칙적인 배열로 결정과 같은 성질을 나타낸다. 일반적으로 액정의 응용은 열, 전기, 자기 및 역학적인 Field의 변화에 따른 광학적 성질의 변화를 이용한다. 주로 Cholesteric 액정은 온도에 따른 색변화를 일으키고 Nematic은 기계적인 응력에 색변화를 일으킨다. 액정은 외부의 Field 변화와 무관하게 편광평면의 회전, 복굴절현상을 나타내며 특히 Cholesteric은 온도 및 입사각에 따라서 색이 변하는 특징을

지니고 있다.

본 연구에서 가장 관심이 있는 것은 Cholesteric 액정이 온도변화에 따른 색깔의 변화이다. Cholesteric 액정의 Twist 구조는 결정평면 사이의 간격과 Twist의 각도에 따라 산란되는 빛의 파장이 달라지고, 이들은 온도에 민감하여 온도에 따라서 액정의 색이 변하게 된다. 또한 여러 Cholesteric 액정을 혼합하여 원하는 온도와 색깔의 관계를 얻을 수 있는데, 가시광선 영역에서 사용온도의 영역은 -20°C에서 250°C 정도이고 온도변화의 폭이 0.1°C에서 수십°C까지의 조합을 만들 수 있다. 대표적으로 온도에 따른 산란되는 색의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구에서는 주로 28°C에서 적색, 30°C에서 보라색이 되는 Cholesteric 액정을 사용하여 온도분포를 측정하였다.

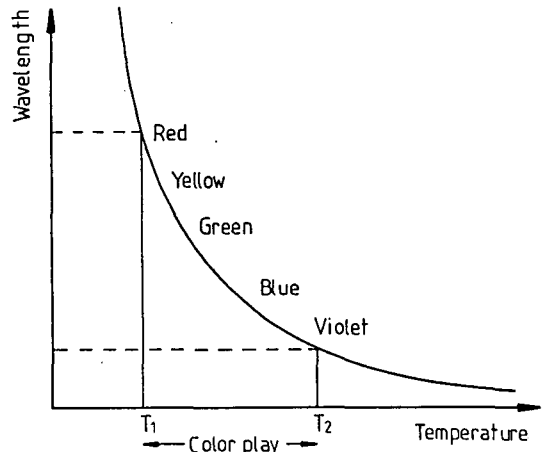


Fig. 3 Typical scattered wavelength(color) vs. temperature response of a cholesteric liquid crystal.

3. 실험

액정의 열-광학적 특성을 보다 정확히 조사하기 위하여 교정장치를 제작하였다. 교정장치는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 'ㄷ'자 형의 알루미늄 띠와 두 온도원으로 이루어져 있다. 알루미늄 띠위의 두 점에 온도센서를 달아서 온도를 측정하여 알루미늄 띠의 온도분포를 측정이 가능하도록 하였다. 알루미늄 띠

에 사용하고자 하는 액정을 발라서 양쪽 끝을 온도가 다른 물 속에 담그고 열평형이 이루어지도록 시간이 지난 후에 액정의 색을 관측하여 온도에 따른 액정의 색의 변화를 측정하였다.

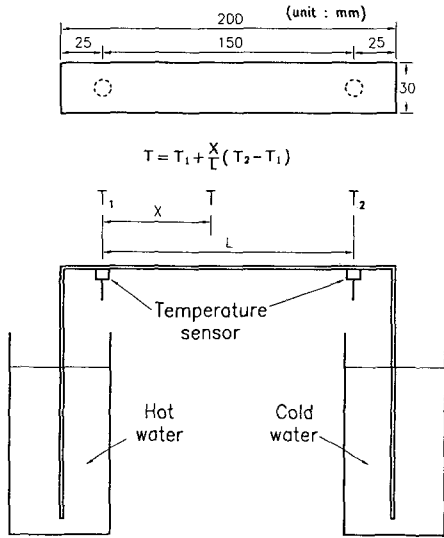


Fig. 4 Schematic diagram of the calibration bridge for liquid crystal.

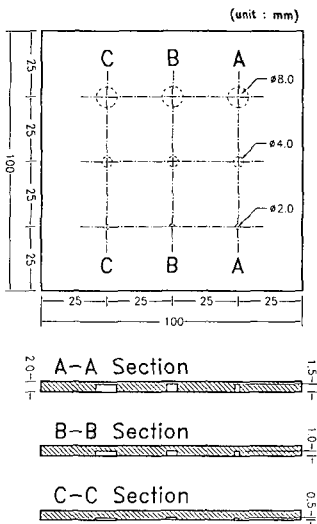


Fig. 5 Specimen of glass fiber reinforced plastics containing artificial flaws.

GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)에 인공적인 결함을 Fig. 5와 같이 만들었다. 본 연구에서 사용된 GFRP는 전자회로기판 제작용으로 시험편의 크기는 가로 10cm, 세로 10cm, 두께 2mm 이었고 결함의 깊이 변화에 따른 검출도를 조사하기 위해서 직경 8mm, 깊이가 0.5mm, 1.0mm 및 1.5mm가 되게 3개의 인공결함을 GFRP 판에 End Mill로 가공하였다. 이 시험편은 결함의 존재로 시험편의 두께가 얇아졌으므로 한쪽 면을 가열하면 결함이 존재하는 부위에서는 열전달이 빨라서 주위보다 높은 온도를 나타낼 것으로 기대된다.

#### 4. 결과 및 고찰

액정이 Coating된 폴리에스테르 필름을 이용하여 열적방법을 시도하였다. 액정의 열에 대한 광학적 특성을 조사하기 위하여 액정 교정시스템을 이용하였다. 28-30℃에서 색이 변하는 액정을 바른 상용화된 폴리에스테르 필름에 대한 교정결과는 Fig. 6과 같다. 이 경우 두 온도 센서에서의 온도는 23℃ 및 33℃이고 따라서 이 액정의 색변화가 일어나는 온도 영역이 28.5-30.5℃로 규격에 명시된 온도와 측정된 온도가 유사하다.

이 필름을 GFRP의 표면에 부착시키고 40℃의 더운 물이 담긴 비이커 위에 올려 놓았을 때의 사진은 Fig. 7(a)-(d)와 같다. Fig. 7(a), (b), (c), (d)는 각각 시간이 12, 14, 18, 20초 경과후의 사진이다. 필름의 더운 물에서 발생되는 열에 의해서 두께가 얇은 부위는 온도가 빨리 상승하게 되므로 주위의 온도보다 높게 되어, 결함부위의 색이 일찍 변하게 되고 차차 다

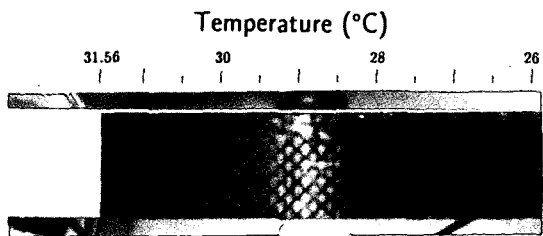


Fig. 6 Calibration results for the polyester film coated by a cholesteric liquid crystal.

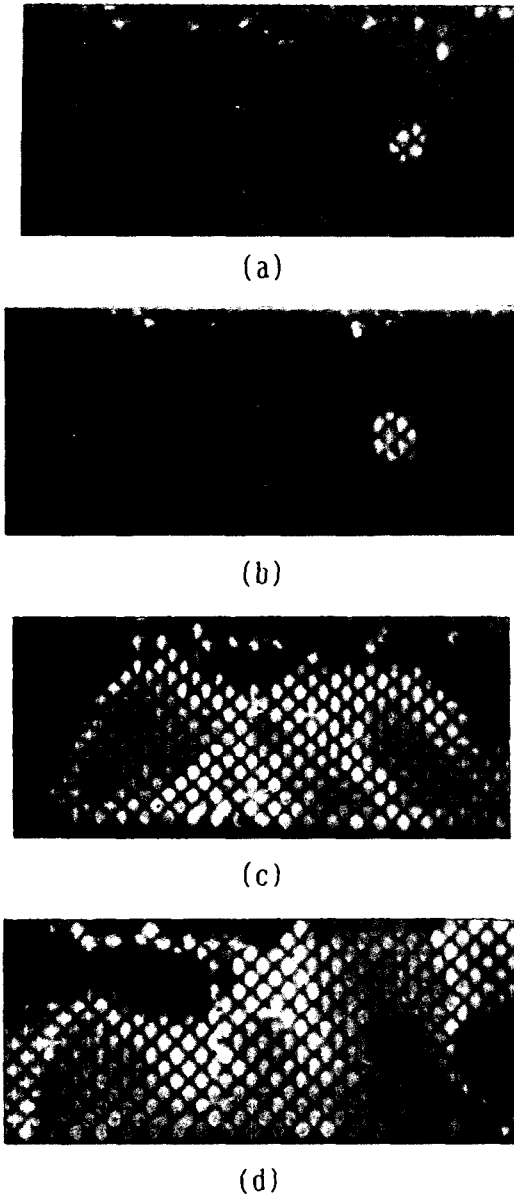


Fig. 7 Results of thermal tests for a GFRP specimen using the polyester film coated by a liquid crystal after (a)  $t=12s$ , (b)  $t=14s$ , (c)  $t=18s$  and (d)  $t=20s$ .

른 부분의 색도 변하게 된다. Fig. 7(a)에서는 직경이 8.0mm, 깊이가 1.5mm인 결함이 존재하는 부위의 온도가 시험체의 다른 부분보다 일찍 상승하여 초록색

으로 변하였고 이 부분은 Fig. 6과 비교하여 29.2℃임을 알 수 있다. Fig. 7(b)에서는 이 초록색 부분의 면적이 점차 확대됨을 알 수 있고, Fig. 7(c)에서는 이 부분의 색이 파랑으로 바뀌어 온도가 29.5℃로 상승되고 다른 두 결함 부위의 온도도 점차 상승됨을 알 수 있다. Fig. 7(d)에서는 전체적으로 푸른 색 부위의 면적이 확장되어 결함의 위치 윤곽이 뚜렷하지 못하나 결함부위의 판정이 가능함을 알 수 있다.

일반적으로 균일하지 못한 열원에 의한 표면온도 차이는 완만한 변화를 나타내고 결함에 의한 온도차이는 급격한 변화를 나타낼 것으로 기대된다. 따라서 시험체의 온도분포와 함께 이 분포의 Gradient를 측정하여 분석하는 것이 바람직하다. 시험결과의 기록을 사진기에 의존하였는데 이는 신호처리를 할 수 없고 순간적인 변화를 연속적으로 기록하기 곤란하여 보다 나은 결과 해석에 장애가 된다. 앞으로 CCD 카메라와 Image Processor를 이용하면 액정을 사용한 열적시험법에 대하여 보다 나은 연구 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

또한 액정의 동작온도 폭을 줄이면 온도분해능은 높아지나 측정할 수 있는 온도의 영역이 좁아지므로 시험체 전체의 온도분포를 동시에 파악할 수 없게 된다. 한편 전체의 온도분포를 측정하기 위하여 동작온도 폭을 넓히면 온도분해능이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 열적시험법을 일반적인 목적으로 사용할 경우는 액정을 사용하여 온도분포를 측정하는 방법보다는 IR Camera를 사용하는 방법이 보다 나은 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

액정을 사용하여 온도분포를 측정함으로써 열적시험법에 의한 복합재료의 결함 판정이 가능함을 알 수 있었다. 열원 개선, 액정 취급에 대한 기술 향상 및 영상처리 기술의 도입을 통하여 열적시험 결과를 향상시킬 수 있다. 또한 IR 카메라를 사용하여 넓은 온도영역에서의 시험이 보완적으로 수행되면 열적시험법은 복합재료의 결함판정에 유용하게 사용될 수 있다.

## References

1. P. V. McLaughlin, E. V. McAssey and R. C. Dietrich, "Nondestructive examination of fibre composite structures by thermal field techniques", NDT Int'l, Vol. 13(2), (1980), pp. 56.
2. W. E. Woodmansee, "Cholesteric liquid crystals and their applications to thermal nondestructive testing", Mat. Eval., Vol. 24, (1966), pp. 564.
3. W. N. Reynolds and G. M. Wells, "Video-compatible thermography", Br. J. NDT, Vol. 26(1), (1984), pp. 40.
4. M. A. Berrie, K. E. Puttick, J. G. Rider, M. Rudman and R. D. Whitehead, "Thermal probe analysis of orientation in polymers and composites", Plast. Rub. Proces. Appl., Vol. 1(2), (1981), pp.129.
5. J. L. Fergason, "Liquid Crystals in Nondestructive Testing", Appl. Opt., Vol. 7(9), (1968), pp.1729.
6. V. Vavilov, "Infra-red nondestructive testing of bonded structures: aspects of theory and practice", Br. J. NDT, Vol. 22(4), (1980), pp. 175
7. F. Reinitzer, "Beitrage zur Kenntniss des Cholesterins", Monatsh, Vol. 9, (1888), pp. 421.
8. O. Lehmann, "Uber Fliessende Krystalle", Z. Phys. Chem., Vol. 4, (1889), pp. 462.
9. G. H. Brown, "Structure, properties, and some applications of liquid crystals", J. Opt. Soc. Am., Vol. 63(12), (1973), pp. 1505.
10. J. L. Fergason, "Cholesteric structure-I, optical properties", Mol. Cryst., Vol. 1(2), (1966), pp.263.