

온도 및 광파장을 감지하는 스마트 복합재료에 관한 연구

강승구, Delbert E. Day*, James O. Stoffer*

경기대학교 재료공학과, 수원, 440-760

* *Materials Research Center, University of Missouri-Rolla, MO 65401, USA*

Study on the temperature and optical wavelength sensing composites as smart materials

Seunggu Kang, Delbert E. Day* and James O. Stoffer*

Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 440-760 Korea

* *Materials Research Center, University of Missouri-Rolla, MO 65401, USA*

요 약 광투과성 BK10 glass fiber/PMMA 복합재료의 합성조건을 변화시켜 복합재료가 온도와 파장을 감지하는 센서로서의 응용 가능성이 있는지를 연구하였다. 유리섬유 제조시 뽑아내는 속도와 온도등의 공정조건에 따른 유리섬유의 직경 및 굴절율을 측정하였고 유리섬유에 코팅되는 coupling agent의 용매 및 코팅방법에 대하여 연구하였다. 복합재료의 최대광투과도를 나타내는 온도($T_{max\%}$)는 복합재료에 강화되는 유리섬유의 크기(굴절율), 유리섬유 vol%, PMMA의 분자량등을 변화시키면 13~50°C 범위에서 조정될 수 있었으며, 측정파장을 변화시킬 경우 $T_{max\%}$ 값이 35~55°C 범위가 되도록 합성하는 것이 가능하였다. 한편 복합재료를 파장의 함수로서 광투과도를 측정하였을 때 최대광투과도가 나타나는 파장($\lambda_{max\%}$)은 나타나지 않았다.

Abstract The possibility of application for the transparent BK10 glass fiber/PMMA composites as a temperature- or wavelength- sensors was studied. Measurement of diameter and refractive index for glass fibers to be reinforced to PMMA as a function of drawing speed and temperature was done and the appropriate coating methods and solvent for coupling agent was researched. $T_{max\%}$ value at which the maximum transmission for the composites occurs could be controlled to be in 31~50°C by the processing factors such as fiber diameter, fiber vol%, molecular wt. of PMMA. Furthermore, with different wavelength other than 589.3 nm, the $T_{max\%}$ value could be controlled to be in 35~55°C. For the sensibility of wavelength for the compos-

ites, there was not a wavelength ($\lambda_{\max\%}$) showing maximum transmission.

1. 서 론

C. Christiansen[1]은 glass powder와 굴절율이 비슷한 액체를 혼합하여 광특성을 연구한 결과, 그 혼합체는 두 물질의 굴절율이 일치하는 파장 영역에서만 투명해지는 현상을 발견하였다. 이러한 Christiansen현상은 Christiansen filter로 알려진 monochromatizer에 응용될 뿐만 아니라 유리공업 분야에서 유리의 화학적 균질성과 상분리 현상을 분석하는 데에도 이용되어 왔다[2-4].

한편 유리섬유를 고체상인 폴리머에 강화시킨 복합재료는 높은 기계적 강도는 물론 우수한 광 투과도를 갖게되므로 지난 십여년간 glass fiber/PMMA 복합재료에 관한 연구[5-7]가 꾸준히 이루어져 왔다. 복합재료의 투명도는 유리섬유와 폴리머의 굴절율이 일치해야 가능하므로 이러한 투명복합재료는 Christiansen 현상을 응용한 예로 볼 수 있다. 그런데 유리섬유와 폴리머의 굴절율은 각각 그 온도 및 파장 의존성이 서로 다르므로 유리섬유/폴리머 복합재료는 기존 목적과는 다른 온도, 파장을 감지하는 감응소자로 응용될 가능성이 있다. 예를 들어 유리섬유/폴리머 복합재료는 어떤 광 시스템에 설치하였을 때 주변온도가 임계값 부근에서 변화되면 그 광투과도는 증가 또는 감소하게 되므로 이러한 복합재료는 광 시스템을 자동적으로 제어할 수 있는 스위치, 또는 actuator로 사용될 수 있다.

본 연구에서는 glass fiber/PMMA 복합재료의 제조조건을 고찰하고 그 광투과도를 온도와 파장의 함수로 측정하여 이러한 복합재료가 온도 및 파장을 감지할 수 있는 스마트

재료로서의 응용이 가능한지를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1. 유리섬유 제조

본 연구에서 사용되는 유리섬유는 바닥에 10개의 노즐이 있는 백금 도가니에 분쇄된 유리를 넣고 1200°C의 온도에서 용융한 상태에서 뽑아내었다. 본 연구에서는 Schott Glass Co.의 BK-10 유리(그 굴절율 값이 소수 여섯째 자리까지 측정되어 있음)을 사용하기 때문에 출발 물질의 조성은 변하지 않는 것으로 본다. 유리섬유를 뽑아내는 속도는 10~1000 cm/sec 범위내였으며, 유리섬유를 감는 알루미늄 원통(직경=20 cm, 길이=30 cm)에는 모터를 장착시켜 0.5~5.0 cm/sec의 속도로 좌우로 이동할 수 있도록 하였다.

2.2. 유리섬유 코팅

유리섬유를 PMMA에 보강할 때 두 재료의 계면에서 화학결합을 유도하기 위하여, 유리섬유표면에 coupling agent를 코팅한다. 본 연구에서는 유리섬유를 뽑아내면서 유리섬유가 중간에 위치한 코팅조를 통과되도록 하여 코팅이 이루어지도록 하는 pull coating 방법을 사용하였다. 이 때 코팅용기와 섬유를 감는 원통 사이에 튜브를 장착하여 코팅액이 빠르게 건조되게 함으로써 섬유끼리 달라붙는 현상을 억제시켰다. 유리섬유 코팅에 쓰이는 coupling agent는 Petrarch

System Inc.의 M8550(trialkoxo silane)을 사용하였다.

2.3. 복합재료의 합성

복합재료의 전 단계 시편인 prepreg은 유리섬유가 뽑아져 원통드럼에 감아질 때 그 위에 MMA(Fisher Scientific Co.)에 용해된 3M Inc.의 PMMA 용액(PMMA : MMA = 1 : 9 wt.%)를 분무시켜 제조한다. PMMA의 분자량을 변화시킬 때는 Aldrich Chemical Co.의 PMMA powder를 사용하였으며, 분자량은 high(Mwt=996,000 by GPC), medium (120,000), low(15,000)의 3가지 종류였다.

Prepregs를 규격대로 절단하고 여러장 적층한 후 hot pressing하여 투명한 복합재료를 합성하였다. 시편합성시 표면이 평활한 두 장의 판유리(15 cm×10 cm×0.2 cm) 사이에 prepregs을 놓고 hot press를 행하였으며, 합성조건은 100°C/4 hrs/1.7 MPa이었다.

2.4. 특성 평가

유리섬유의 직경은 광학현미경으로 측정하였으며 한 종류의 유리섬유에 대하여 30회 측정하여 평균값을 취하였다. 유리섬유의 굴절율은 liquid immersion 방법으로 측정하였으며 굴절액은 온도계수가 소수 6째 자리까지 알려져 있는 Cargille Laboratories Inc.의 Laser Liquid를 사용하였다.

복합재료의 가시광선 투과도는 Beckman Instruments의 spectrophotometer Model 26을 사용하여 온도 10~80°C, 파장 300~850 nm의 범위에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유리섬유

광투과도가 높은 복합재료를 합성하기 위하여는 유리섬유의 굴절율을 PMMA에 가까이 일치시켜야 하며 유리섬유는 그 내부에 기공이나 불순물이 없는 고순도이어야 한다. 유리섬유의 굴절율에 영향을 미치는 인자는 유리조성과 냉각속도이다. 특히 유리섬유의 굴절율을 미세하게 제어하는 것이 복합재료의 광특성을 향상시키는데 매우 중요하다. 유리섬유의 굴절율을 제어하는데 영향이 큰 인자중의 하나는 유리섬유의 직경이다. 주어진 백금도가니로 부터 뽑아져 나오는 유리섬유는 여러이유로 그 직경이 변하게 되며 유리섬유의 굴절율은 유리섬유의 직경이 감소할수록 같이 감소한다. 따라서 PMMA matrix 내에 유리섬유의 크기가 일정하지 않으면 PMMA의 굴절율과 모든 유리섬유의 굴절율이 일치되지 않게 된다.

일정한 규격의 백금도가니에서 유리섬유를 뽑아낼 때 유리섬유의 크기를 제어하는 변수는 세가지로 첫째, 도가니 노즐을 통해서 나오는 유리의 흐름속도, 둘째, 유리흐름속도에서의 유리의 점도 그리고 셋째, 유리섬유를 감는 원통의 회전속도이다. 이러한 모든 변수가 일정하게 잡혀진다면 뽑아진 유리섬유들의 직경은 모두 일정할 것이다. 질량흐름 속도는 주어진 노즐을 통해서 시간당 흐르는 유리의 양으로 정의한다. Poiseuille[8]의 식에 따르면 노즐을 통한 유리의 흐름속도는 노즐 직경의 4승에 비례한다. 유리섬유의 크기는 다음식으로부터 계산될 수 있다.

$$d = 2\{\omega/(\pi\rho v)\}^{1/2} \quad (1)$$

여기서 ω 은 유리 melt의 흐름속도(gm/s), ρ 는 유리밀도(gm/cm³), 그리고 v 는 섬유를 뽑는 속도(cm/sec)를 나타낸다. 유리흐름속도가 일정할 때(즉 온도가 일정할 때), 섬유의 직경은 뽑는 속도에 반비례함을 알 수 있다. Fig. 1에서 ●으로 표시된 섬유직경은 식 (1)로부터 계산된 것으로서 BK-10유리섬유를 뽑아낼 때 섬유의 직경이 뽑아내는 속도에 얼마나 변화하는지 예측하게 한다. 제조된 BK-10 섬유의 직경은 식 (1)에서 계산된 값보다 약 20 % 작게 측정되었다. 이렇게 작으나마 차이가 있는 것은 여러 변수들(섬유를 감는 원통드럼의 속도, 도가니내의 온도, 도가니내 유리충전량의 변동 등)의 복합적인 이유 때문이라고 생각된다. Fig. 2는 1180°C와 1200°C에서 뽑은 유리섬유의 직경에 대한 측정치를 나타낸 것이다. 고온에서 뽑아진 유리섬유의 직경이 저온에서의 경우에 비해 크다. 그 이유는 고온의 경우 유리의 점도가 낮아지므로 노즐을 통한 유리의 흐름이 빠르게 되어 제조되는 유리섬유의 직

경이 작아지기 때문으로 생각된다.

백금도가니내의 용융유리의 깊이의 영향도 조사하였다. Table 1에 도가니내의 용융유리가 100 %와 50 % 채워졌을 때의 섬유직경 및 두경우의 직경차이를 나타내었다. 도가니내의 용융유리 충전높이에 따라 섬유의 직경 크기가 20 %까지 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 백금도가니에 용융유리가 100 % 채워져있으면 유리흐름속도는 그만큼의 정수압으로 증가되므로 유리섬유의 직경이 증가된다고 생각된다. 따라서 섬유제조시 균일한 섬유크기를 유지하려면 용융유리의 충전높이는 항상 일정해야 한다. 본 실험에서는 유리섬유를 제조하는 동안 연속적으로 유리가 빠져나가는 양만큼 도가니에 충전시킴으로서 유리섬유크기의 균일함을 유지하도록 하였다.

모양이 변형된 도가니로부터 유리섬유를 뽑아낼 때는 정상적인 도가니 경우에 비해 그 섬유 직경크기에 차이가 생긴다(작아진다). 변형된 노즐로부터 뽑아낸 유리섬유는

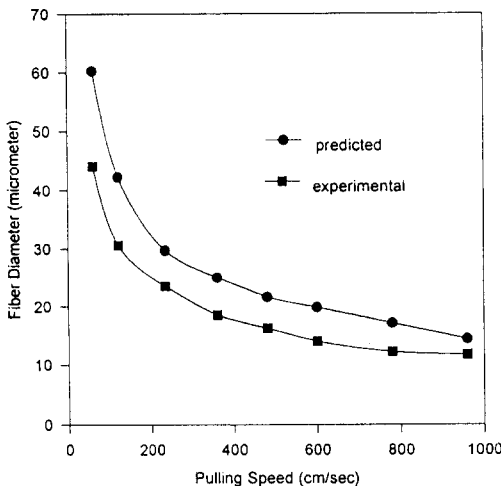


Fig. 1. Diameter for BK10 glass fiber as a function of pulling speed for fibers pulled at 1200°C.

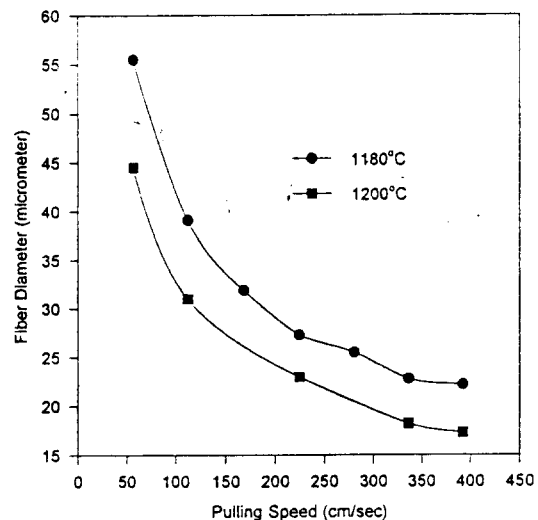


Fig. 2. Comparison of diameter for BK10 glass fibers pulled at different temperatures.

Table 1

Diameter of BK10 glass fibers pulled with platinum crucible 100 % and 50 % full of glass (1200°C)

Pulling speed	Fiber diameter (μm)		
	100 % full crucible	50 % full crucible	Difference (%)
57	44.0	36.2	17.7
113	29.5	28.7	2.7
226	24.0	20.6	14.2
339	18.0	15.8	12.5
452	16.4	13.0	20.7
565	13.8	11.4	17.4
734	12.0	10.0	16.6
904	11.5	9.2	20.4

도가니 바닥에 대하여 수직인 노즐로부터 뽑아낸 유리섬유보다 직경이 작는데 그 이유는 노즐직경의 유효 단면적이 감소하기 때문이다. 유리섬유를 제조한 후 섬유제조기 전원을 단락시켜 백금도가니의 온도를 상온으로 내리는 것은 도가니의 변형을 초래하는 원인으로 생각된다. 백금도가니의 바닥면에 접해 있는 용융유리가 냉각되면 유리가 수축하면서 도가니바닥을 윗쪽으로 끌어올려 도가니의 변형을 가속시키는 것으로 생각된다. 본 실험에서는 유리섬유 제조 후 전원을 끊지 않고 약 700°C (유리가 흘러내리지 않는 최고온도)까지만 냉각시켜 유지함으로써 백금도가니 변형과 노즐의 각도가 변하는 현상이 억제시켰다.

3.2. 유리섬유의 굴절율

유리섬유의 굴절율은 유리섬유 직경이 증

가하면 함께 증가한다. 유리섬유를 뽑아내는 속도가 느릴수록 단위시간당 노즐을 통과하는 유리용융체의 양이 많아져 섬유의 직경이 커지게 된다. 이 때 뽑는 속도가 느리면 냉각속도도 느리게 되므로 빠르게 냉각된 유리섬유보다 느린속도로 뽑아낸 유리섬유의 밀도가 증가한다고 생각된다. Table 2에 유리섬유의 직경과 589.3 nm에서 측정된 굴절율 값을 나타내었다.

Table 2

Refractive index at 589.3 nm for BK10 glass fibers of different diameter

Diameter of BK10 glass fiber (μm)	Refractive index at 589.3 nm
7	1.4892
13 ^a	1.4900
15	1.4903
20	1.4908
25	1.4911
30	1.4912
35	1.4914
40	1.4915
45	1.4917

3.3. 유리섬유의 코팅

BK-10 유리섬유에 적절한 coupling agent 를 얇고 균일하게 코팅을 하면 유리섬유의 표면을 보호하여 광학복합재료의 강도를 높일 수 있으나 이러한 코팅이 기대하는 광학적 특성 즉, 높은 광투과도 및 온도와 파장에 대한 감도에 나쁜 영향을 주어서는 안된다. Pull-coating법으로 코팅된 유리섬유들은 상호간에 서로 점착하여 섬유다발로 뭉쳐지는 경향이 강하였다. 이렇게 되면 그 섬유

다발은 PMMA 용액에 wetting이 잘 되지 않아 최종 복합재료에 기공이 남는 결과를 초래한다. 이 기공들은 그 굴절율이 매우 낮아 PMMA와 유리섬유의 굴절율과 일치하지 않으므로 결국 복합재료의 광투과도를 감소시키고 온도와 파장에 대한 감응도를 저하시키게 된다. 본 실험에서는 코팅조와 회전원통사이에 튜브로(1200°C로 유지)를 장치하였다. 그 결과 각 유리섬유들이 coupling agent가 코팅된 후 서로 접촉되어 뭉치기 전에 튜브로를 통과하면서 건조가 되어 유리섬유의 표면이 깨끗하였고 그 유리섬유에 대한 PMMA용액의 wetting성도 향상되었다.

Coupling agent에 대한 용매는 여러 용매의 유리섬유에 대한 wetting성을 실험하여 결정하였다. 일반 소다 라임계 판유리를 물과 산으로 깨끗이 세척한 뒤 그 위에 각종 용액을 주사기로 일정량을 점적하여 그 액상의 퍼짐반경을 측정하여 용매의 유리에 대한 wetting성을 비교하였다(Table 3). 방울의 퍼짐반경은 표면장력에 관계하지만 용액의 증발속도와 점도가 고려되지 않으면 상대비

Table 3
Wettability of a droplet of various solvents, and M8550 (trialkoxo silane) to a soda lime glass plate

Composition	Wettability to glass (arbitrary unit)
Methanol	34
Ethanol	39
Methyl methacrylate (MMA)	14
3% M8550 in MeOH	37
3% M8550 in EtOH	34
M8550	100

교만이 가능하다. 이상의 결과로부터 silane coupling agent의 용매로서 메탄올을 선택하였는데, 또 다른 이유는 메탄올의 끓는점이 에탄올보다 낮아 비교적 저온에서도 건조하기에 용이하기 때문이다.

유리섬유를 뽑아 내는 동안 코팅을 하면 섬유가 대기중에 오염되는 것이 방지되어 표면이 보호되는 부수적 효과가 있다. 즉 섬유 제조시 coupling agent를 코팅하면 섬유의 물리적 마모를 방지하여 유리섬유의 강도를 증가시키고 따라서 최종 복합재료의 기계적 강도가 향상된다. Fig. 3은 같은 코팅액을 사용했지만 코팅방법이 다르면 복합재료(fiber vol%=8%)의 강도가 차이가 나는 것을 보여준다. Coupling agent가 첨가된 복합재료라도 그 코팅시기가 유리섬유를 뽑은 후라면 복합재료의 강도증진에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 한편 뽑으면서 코팅된 유리섬유를 사용한 복합재료는 뽑은 후 코팅한 유리섬유를 사용한 복합재료보다 그 인장강

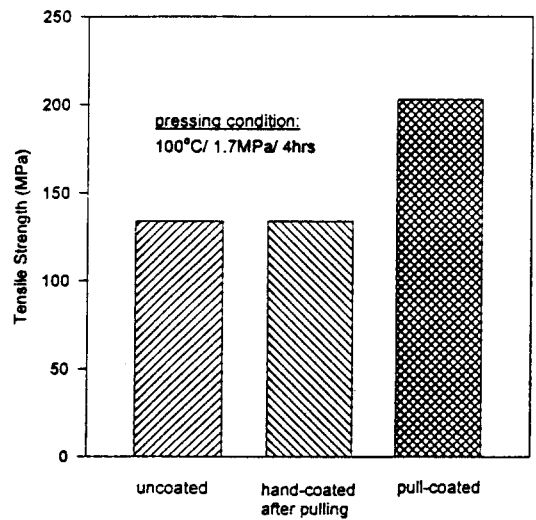


Fig. 3. Tensile strength of hot pressed PMMA composites reinforced with uncoated and coated BK10 fibers.

도가 50 % 이상 증가된 것을 알 수 있다.

코팅액내의 silane coupling agent는 계속적인 용매의 증발로 인한 농도와 점도에 변동이 생기며 이는 균일하지 못한 코팅을 초래하여 결국 복합재료의 광투과성을 저해하는 잠재적 요인이 된다. 본 연구에서는 유리섬유제조시 코팅조내의 코팅액을 연속적으로 충전하여 코팅에 균일성을 유지하였다.

3.4. 복합재료의 특성

유리섬유와 PMMA의 굴절율의 온도의존성이 서로 다르기 때문에 BK10 유리섬유/PMMA 복합재료는 그 광투과도가 온도에 따라 변하게 된다. Fig. 4에 여러종류의 유리섬유를 보강한 복합재료의 광투과도를 온도의 함수로 나타내었다. 복합재료의 광투과도는 어떤 한 온도(T_{max})에서 최대치를 나타

내고 그 이하 또는 이상의 온도에서는 감소함을 알 수 있다. 이것은 T_{max} 에서만 유리섬유의 굴절율이 PMMA의 굴절율과 일치하기 때문이다. 굴절율이 1.4917인 유리섬유를 강화한 복합재료는 T_{max} 가 31°C이었다. 굴절율이 1.4917보다 낮은 유리섬유를 넣어 합성된 복합재료는 T_{max} 가 31°C보다 높게 나타났다. 굴절율이 1.4892인 유리섬유를 강화시킨 복합재료의 경우 T_{max} 값이 50°C 부근에서 나타났다. Fig. 4에 나타난 그래프들의 폭이 큰 이유는 강화된 유리섬유의 vol.%가 5%로 작기 때문이다. 그래프의 폭이 작을수록 그 전이점(T_{max})값이 예리하게 나타나며 그러려면 유리섬유의 vol.%가 증가되어야 한다. 빛이 통과할 때 만나는 계면의 수가 많을수록 온도에 따른 투과도 감소의 정도가 커지기 때문이다. Fig. 4로부터 유리섬유의 굴절율을 1.4917~1.4892로 변화시킬 경우, 복합재료의 최대 광투과도가 나타나는 온도가 31~50°C 범위에서 조정될 수 있음을 알 수 있다.

유리섬유의 굴절율 값이 같아도 복합재료에 보강되는 유리섬유의 vol.%가 변화되면 복합재료의 T_{max} 도 변화되었다. Fig. 5을 보면 보강된 유리섬유의 굴절율이 일정할 때 보강되는 유리섬유를 9~25%로 증가시켰을 때 각 복합재료의 T_{max} 의 값은 43°C에서 32°C로 감소되었음을 알 수 있다. 이것은 복합재료에 강화되는 유리섬유의 vol.%가 증가될수록 복합재료에 인장응력이 증가되며 또한 유리섬유가 PMMA의 열적 팽창 및 수축을 제한한다는 사실과 연관성이 있을 것으로 사료되나, 정성·정량적인 설명은 앞으로 추가 실험과 연구가 필요하다고 생각된다. 한편, 최대 광투과도는 유리섬유의 양이 증가할수록 감소하고 있다. 즉 9%의 섬유가 보강된 경우는 최대투과도가 83%인데 비하

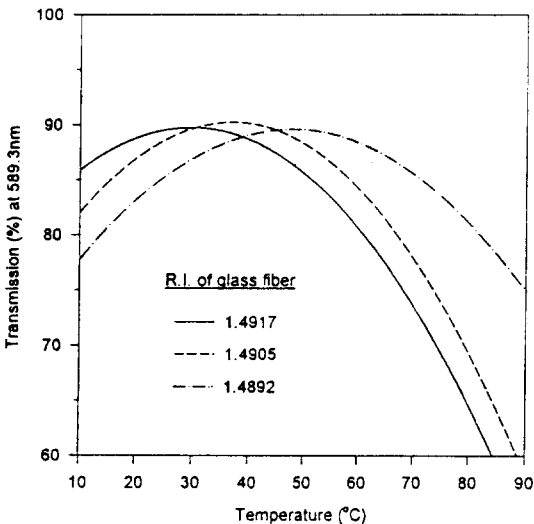


Fig. 4. Transmission at 589.3 nm as a function of temperature for composites reinforced with BK10 glass fibers of 3 different refractive index. Composites contain 5 vol% fibers.

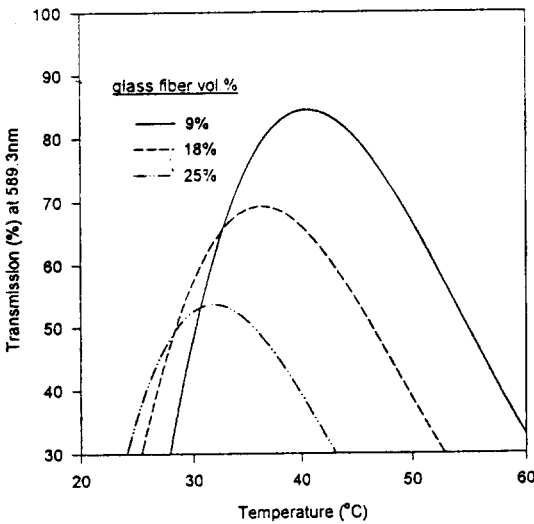


Fig. 5. Transmission at 589.3 nm as a function of temperature for composites containing BK10 glass fibers of various vol%.

여 28 vol.%가 보강된 복합재료의 경우는 그 최대투과도가 52%로 크게 감소하였다. 이는 유리섬유의 양 증가에 따른 유리섬유-PMMA간의 계면이 증가하였고 그 결과 빛이 산란될 계면이 증가하였으므로 빛의 투과도가 감소한 것으로 판단된다. 따라서 유리섬유의 vol.%만으로 $T_{max\%}$ 값을 조정할 경우 광투과도의 감소로 인한 감응도의 저하문제를 고려하여야 한다. 더우기 유리섬유의 vol.% 증가에 따른 응력효과가 정량적으로 밝혀져 있지 않으므로 정확한 $T_{max\%}$ 값을 예측하기 어렵다는 것도 고려되어야 한다.

복합재료의 광투과도 및 $T_{max\%}$ 값을 변화시키기 위해서는 주로 유리섬유의 굴절율을 변화시키는 방법이 이용되지만 PMMA의 굴절율을 변화시키는 것도 온도감응범위를 변화시키는 또 다른 방법이 된다. Fig. 6에 matrix인 PMMA의 분자량을 변화시킬 때 각 복합재료의 광투과도를 나타내었다. PMMA

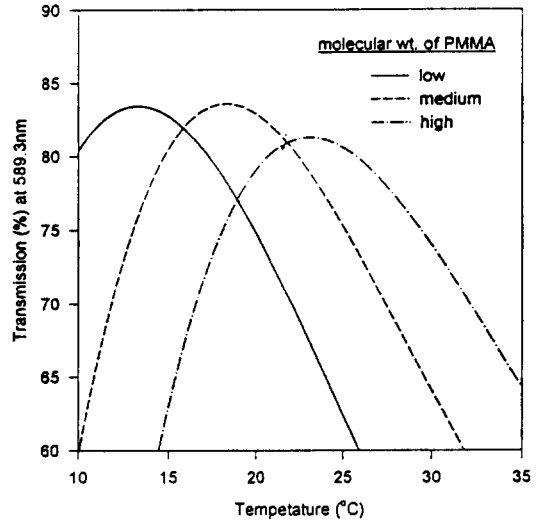


Fig. 6. Transmission at 589.3 nm composites made with various molecular wt. of PMMA. Refractive index at 589.3 nm for glass fiber is 1.4915 and vol% fiber in composites is 11%.

의 분자량이 클수록 복합재료의 $T_{max\%}$ 값이 증가하며 최대 광투과도에는 큰 변동이 없다. PMMA의 분자량이 low, medium, high로 바뀔 때 복합재료의 $T_{max\%}$ 는 각각 13, 18, 23°C로 이동하였다. 단 PMMA의 분자량 변화를 주어 복합재료의 광특성을 변화시키는 것은 특히 분자량이 high인 PMMA는 용매에 잘 용해되지 않으므로 합성공정에서 많은 시간이 소요되는 단점이 있다.

시편의 가시광 특성을 측정하는 데는 백광을 사용하기도 하나 통상 가시광의 대표로서 sodium D line인 589.3 nm를 사용한다. Fig. 7에는 여러가지 파장에 대한 시편의 광투과도 특성을 온도의 함수로 나타내었다. 사용하는 파장이 길어질수록 $T_{max\%}$ 의 값이 저온 영역으로 이동하고 최대투과도는 증가하였다. 또한 그래프의 폭도 증가하는 경향을 나

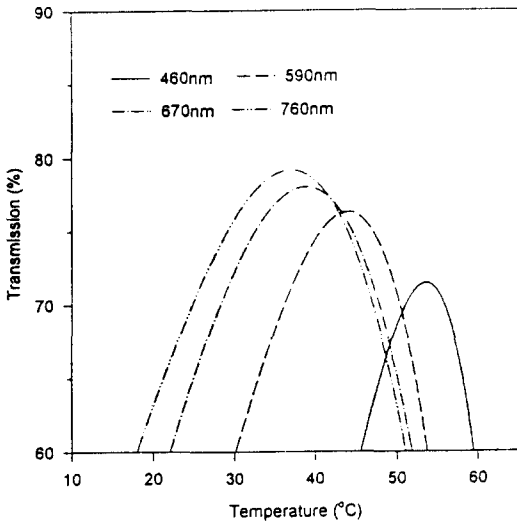


Fig. 7. Transmission as a function of temperature for composites at various wavelength. Refractive index at 589.3 nm for fiber is 1.4895 and fiber vol% in composites is 8%.

타내었다. 파장에 따라 감지온도가 변하는 것은 유리섬유와 PMMA의 굴절율의 파장의존성($dn/d\lambda$)이 서로 다르기 때문이며, 파장이 길어질수록 유리섬유와 PMMA의 굴절율 일치온도가 저온으로 이동하기 때문이다. 측정파장의 범위가 460~760 nm일 때 복합재료의 $T_{max\%}$ 의 값이 35~55°C 범위였으며, 이는 측정파장을 바꾸어도 복합재료의 온도감지특성을 변화시킬 수 있음을 보여준다.

여러종류의 유리섬유가 보강된 복합재료들에 대한 광투과도의 파장의존성을 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 최대 광투과도 값을 갖는 파장($\lambda_{max\%}$)이 나타나지 않았으며 유리섬유의 굴절율이 감소할수록 짧은 파장에서의 광투과도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 유리섬유와 PMMA의 굴절율이 일치하는 파장($\lambda_{max\%}$)이 유리섬유의 굴절율이 낮아질수록 장파장쪽으로 이동하기 때문이다. 또한

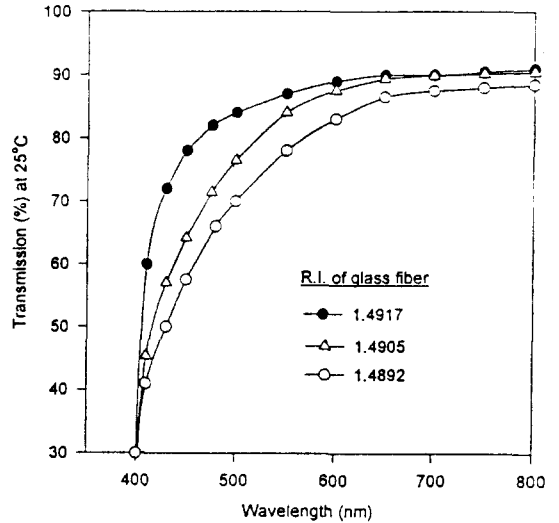


Fig. 8. Transmission at 25°C as a function of wavelength for composites made with BK10 glass fibers of various refractive index. Composites contain 5 vol% fibers.

$dn/d\lambda$ 값이 유리섬유와 PMMA가 비슷하기 때문에 $\lambda_{max\%}$ 을 측정하기가 실제로 가능하지 않다고 판단된다.

4. 결 론

BK10 glass fiber/PMMA 복합재료를 합성하기 위하여 유리섬유의 제조조건 및 coupling agent의 코팅조건을 연구하고, 합성된 복합재료의 온도 및 파장 감지영역을 제어하기 위하여 유리섬유의 굴절율, 유리섬유 vol%, PMMA의 분자량등을 변화시켜 조사하였다.

1) 유리섬유를 뽑는 속도가 10~100 cm/sec 범위내에서 제조되는 섬유의 직경은 7~45 μm 였으며 이를 굴절율로 환산하면 1.4917~1.4892 범위였다.

2) 유리섬유에 coupling agent를 코팅시

유리섬유의 제조와 동시에 코팅하는 pull coating법을 사용하였다. 이 방법은 유리섬유와 PMMA 용액과의 wetting이 양호하고 복합재료의 강도도 증진시키는 효과를 나타내었다. 코팅액의 용매로서는 메탄올이 가장 적합하였다.

3) 복합재료에 보강되는 유리섬유의 굴절율을 조절하여 복합재료의 $T_{max\%}$ ($^{\circ}C$)값을 이동시킬 수 있었다. 유리섬유의 굴절율이 1.4892~1.4917 범위내일 때 그에 따른 복합재료의 $T_{max\%}$ 값은 31~50 $^{\circ}C$ 였다.

4) 유리섬유의 vol%를 증가시키면 $T_{max\%}$ 값이 저온으로 이동하는 효과는 있으나 복합재료의 광투과도가 감소하고 유리섬유의 증가에 따른 matrix내 응력증가로 $T_{max\%}$ 값의 예측이 어렵다는 단점이 있다.

5) Matrix인 PMMA의 분자량을 low에서 high로 증가시키면 PMMA의 굴절율도 함께 증가하여 복합재료의 $T_{max\%}$ 값이 13 $^{\circ}C$ 에서 23 $^{\circ}C$ 로 이동시킬 수 있다.

6) 측정 파장을 변화시키면 $T_{max\%}$ 값을 35~55 $^{\circ}C$ 범위에서 나타나게 할 수 있다.

7) 복합재료의 광투과도를 파장의 함수로 측정하였을 때 광투과도가 최대가 되는 파장($\lambda_{max\%}$)은 나타나지 않았다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 한국학술진흥재단의 신진교수과제 연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] C. Christiansen, Ann der Physik und Chemie 23(10) (1984) 298.
- [2] V.I. Shelyubskii, Steklo Keram 17(8) (1960) 17.
- [3] M. Cable and C. Bower, Glass Technology 6(6) (1965) 197.
- [4] M. Afghan and M. Cable, J. Non-Cryst. Solids 38-39 (1980) 3.
- [5] E. Pope, M. Asami and J.D. Mackenzi, J. Mater. Res. 4(4) (1989) 1018.
- [6] J.R. Olson, D.E. Day and J.O. Stoffer, J. Composite Mater. 26(8) (1992) 1181.
- [7] H. Lin, D.E. Day and J.O. Stoffer, Polymer Eng. Sci. 32(7) (1992) 241.
- [8] J.A. Liggett, Fluid Mechanics, (McGraw-Hill Co., 1993).