

# 열가소성 수지 복합재료

임 순 호

## 1. 서 론

열가소성 수지 복합재료는 크게 분류하여 세 가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 오래 전부터 사용되어온 사출성형이나 압축성형을 할 수 있는 단섬유보강 폼파우드이며 두번째는 최근에 개발되고 있는 1인치 이상의 장섬유로 보강된 열가소성 수지 복합재료이고, 세번째 부류는 고성능 재료로 사용되는 연속섬유 보강 열가소성 수지 복합재료이다. 본 장에서는 세번째 부류인 고성능 연속섬유 보강 열가소성 수지 복합재료에 대해 살펴보고자 한다.

역사적으로 살펴볼 때 열가소성 수지 복합재료는 단섬유 강화 플라스틱에 국한되어 발달되어 왔으나 보강효과의 극대화를 위해서는 연속섬유의 사용이 불가피하나 공정기술 개발의 어려움으로 인해 연속섬유 보강 열가소성 수지 복합재료는 널리 사용되지 못하는 실정이다. 1980년대부터 열가소성 수지를 연속섬유로 보강하는 연구가 활발하게 진행되어 왔으며 미래에 있어서 이러한 새로운 복합재료가 금속이나 열경화성 수지 복합재료의 역할을 분담하게 될 것이 확실하다. 본 장에서는 고성능 열가소성 수지의 종류에 대해 알아보고 이들 수지를 사용하여 제조된 열가소성 수지 복합재료의 물성 및 특성에 대해 살펴보고자 한다.

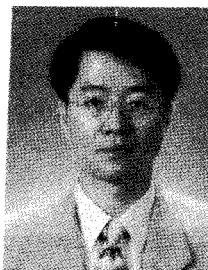
## 2. 고성능 열가소성 수지

현재까지도 복합재료에 주로 사용되는 수지는 열경화성 수지이다. 열경화성 수지는 낮은 점도로 인해 보강섬유와의 함침성이 좋고 기계적 물성이 우수하여 널리 사용되고 있으나 유리전이온도가 낮고 충격에 약한 단점을 지니고 있다. 1980년대 초부터 항공기 산업의 요구에 의해

충격물성이 보다 우수한 열가소성 수지 복합재료에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 일반적으로 열가소성 수지는 열경화성 수지에 비해 가공이 용이하고 생산속도가 높으며 또 충격에 강한 특징을 가지고 있지만, 열에 약하고 여러 가지 화학 약품에 잘 견디지 못하는 약점을 지니고 있다. 따라서 탄소섬유 강화 복합재료의 연구개발 목표가 구조재료용이기 때문에 에폭시 수지보다 열에 약한 열가소성 수지는 고려의 대상이 되지 못했다. 그러나 내열성이 에폭시를 능가하는 새로운 고성능 열가소성 수지들이 알려지면서 이들을 탄소섬유와 조합하는 연구에 대한 관심이 쏠리게 되었다.

열가소성 수지가 연속섬유 보강 복합재료에 본격적으로 사용되기 시작한 것은 높은 점도의 고성능 열가소성 수지와 연속섬유를 함침하는 연속 공정 기술이 개발됨으로써 가능하게 되었다. 표 1은 열가소성 수지 복합재료와 열경화성 수지 복합재료 및 알루미늄 금속을 비교하여 장단점을 열거한 표인데 열가소성 수지 복합재료가 열경화성 수지 복합재료에 비해 물성이나 경제성 면에서 많은 장점을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

Johnston과 Hergenrother<sup>1</sup>가 복합재료에 사용가능한 고성능 열가소성 수지들을 화학구조에 따라 다섯 부류로



임순호

1980 서울대 공업화학과(학사)  
 1983 KAIST 화학공학과(석사)  
 1983~ KIST 고분자공정실  
 1986  
 1986~ U. of Akron, 고분자공학과  
 1991 (Ph.D.)  
 1990~ Principal Scientist, Polymer Blending & Compounding Center  
 1992  
 1992~ KIST 고분자부  
 현재 (선임연구원)

### High Performance Thermoplastic Composites

KIST(Soonho Lim, Korea Institute of Science and Technology, Division of Polymer, P. O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea)

표 1. 열가소성 수지 복합재료와 열경화성 수지 복합재료와 알루미늄 금속의 장단점 비교

| Material Property                     | Thermosets | Thermoplastics | Metal |
|---------------------------------------|------------|----------------|-------|
| Weight                                | +          | +              |       |
| Material cost                         | +          | +              | +     |
| Processing cost-reduction potential   |            | +              |       |
| Simplicity of chemistry               |            | +              |       |
| Melt flow                             | +          |                | +     |
| Prepreg tack and drape                | +          |                |       |
| Long prepreg shelf life               |            | +              |       |
| Low processing temperature            | +          |                |       |
| Low processing pressure               | +          |                |       |
| Low processing cycle time             |            | +              |       |
| Low cure shrinkage                    |            | +              |       |
| Quality control data base             | +          |                |       |
| Mechanical property data base         | +          |                |       |
| Ability to translate fiber properties | +          | +              |       |
| Solvent resistance                    | +          |                |       |
| Corrosion resistance                  | +          | +              |       |
| Resilience                            | +          |                |       |
| Toughness                             |            | +              | +     |
| Lack of time-dependence               | +          |                | +     |
| Interfacial adhesion                  | +          |                |       |
| Repairability                         |            |                | +     |
| Low thermal expansion                 | +          |                |       |

나누어 표 2에 정리하였다. 이들 열가소성 수지들 중에는 현재 상업적으로 복합재료의 프리프레그 물질로 사용되는 수지들도 있으나 아직 공정상의 문제로 인해 프리프레그 물질로 사용되지 못하는 수지들도 있다. 이들 수지들의 특징은 고온에서의 열안정성이 좋고 화학저항성이 높으며 강인성이 뛰어나다는 것이다. 항공기 구조물에 사용되기 위해서는 유리전이온도가 177°C 이상이어야 하는데 표 2에서 살펴보면 대부분의 열가소성 수지들이 이 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 특히 결정성 고분자의 경우에는 결정화도가 높은 경우 유리전이온도 이상에서도 기계적 물성이 큰 손실없이 유지되므로 상당히 고온 까지도 사용할 수 있다.

폴리설펀 계통의 열가소성 수지에 가공성을 부여하기 위해서는 고분자의 주쇄에 ether linkage를 넣어줌으로써 가능해진다. 이런 형태의 수지들은 (Udel, Radel, Victrex) 규칙적인 화학 구조를 갖고 있으나 결정을 형성하지 못하는 무정형 고분자들이다. 이들 수지들은 강인하고 방사선에 대한 저항성이 좋으나 UV에 약하며 대기 중에서 응력에 의해 분해되는 경향이 있다. 대부분의 산, 알칼리나 지방족 탄화수소에 대한 저항성은 좋으나 진한 황산이나 항공기 유체에 약한 단점을 지니고 있다. 폴리설펀의 용제로는 dimethyl formamide, dimethyl acetamide, dichloromethane과 N-methyl pyrrolidone 등이 있으며 300°C 이상의 가공온도 요구한다.

PEEK는 결정성 고분자로서 방사선 및 대부분의 화학약품이나 용제에 대한 저항성이 좋으나 진한 황산이나 불화수소산에 약한 단점을 지니고 있다. PEEK는 강인성이 좋고 대기 중에서 응력에 의한 분해 현상이 거의 없으며 가공온도가 370°C 이상으로서 가공하기가 폴리설펀보다 상당히 어렵다. 또한 최종제품 생산에 있어서 냉각 속도를 조절하여 결정화도를 높여 주어야 원하는 물성을 얻을 수 있다.

Torlon이란 상품명으로 Amoco 회사에 의해 개발된 폴리아마이드이미드 계통의 고분자는 폴리이미드의 열안정성을 유지시키면서 가공을 용이하게 하기 위하여 개발된 제품이다. 이들 고분자는 알칼리를 제외한 대부분의 화학물질에 의해 손상 받지 아니하며 특히 방사선이나 UV에 강한 특성을 지니고 있다. 용제로는 N-methyl pyrrolidone이 사용된다. 가공온도는 350°C 이상이며 최종제품의 물성을 극대화하기 위해서는 100시간 이상의 열처리 시간이 요구된다. Ultem이란 상품명으로 개발된 polyetherimide(PEI)는 방사선이나 UV, 무기산, 또는 할로젠화 탄화수소에 대한 저항성이 좋으나 대기 중에서 응력에 의해 분해되는 경향이 있다. 특히 PEI는 연소시 연기가 거의 나지 않으며 생성되는 가스도 몸에 해롭지 않은 무독성이며 가공온도는 340°C 이상이다.

고성능 열가소성 수지 중에서 생산량이 가장 많은 것은 Phillips Petroleum 회사에서 Ryton이란 상품명으로 개발된 polyphenylene sulfide(PPS) 수지이다. PPS 계통의 수지는 Phillips Petroleum 회사 외에도 Bayer, Ciba Geigy, Solvey, Celanese 회사들에 의해 생산되고 있다. Celanese사 제품은 선형고분자로서 순도가 높으며 Idemitsu사는 최근에 분자량이 더 높으며 순도가 더욱 좋은 PPS를 개발하였다. 이들 선형 PPS는 결정화도가 매우 높으며 산, 염기, 할로젠화 탄화수소 및 알코올에 대한 저항성이 좋으나 진한 황산이나 아민 계통에 약한 단점을 지니고 있다. 고온에서 chloronaphthalene에 용해되며 취약한 물성에도 불구하고 대기 중에서 응력에 의해 쉽게 분해되지 않으며 방사선에 대한 저항성이 좋으나 UV에 약하다. 연소시 PEI와 마찬가지로 독성이 없으며 연기가 거의 생성되지 않는 장점을 가지고 있다.

Xydar라는 상표로 개발된 고성능 열가소성 수지는 액정고분자로서 냉각시 분자들이 방향성을 갖게 됨으로써 다른 고성능 열가소성 수지에 비해 탄성율이나 강도가 월등히 높은 특성을 가지고 있다. 열이나 화학물질에 대한 저항성이 우수하며 산이나 염기, 알코올, 에스테르 등에 대해 안정한 특성을 지니고 있다. 공정온도가 400°C 정도이며 용융점도가 Celanese 사에서 액정고분자로 개발된 Vectra보다 몇백배 이상의 고점도를 보여준다. 이들 고성능 열가소성 수지들의 화학구조식을 표 3에 나타내었다.

표 2. 고성능 열가소성 수지의 제조회사 및 온도 특성

|   | Supplier           | $T_g$ (°C) |     | $T_m$ (°C) | Processing temperature (°C) |
|---|--------------------|------------|-----|------------|-----------------------------|
|   |                    | dry        | wet |            |                             |
| <b>Polyarylene ether or sulfide</b>     |                    |            |     |            |                             |
| Polyetheretherketone(PEEK)              | ICI                | 143        | 143 | 343        | 371                         |
| Polyarylene ketone(APC-HTX)             | ICI                | 205        | —   | 386        | 420                         |
| Polyarylene ketone(PXM 8505)            | Amoco              | 247        | 208 | —          | 345                         |
| Polyarylenesulfide(PPS, RYTON)          | Phillips Petroleum | 88         | 88  | 273        | 325                         |
| Polyarylenesulfide(PAS-2)               | Phillips Petroleum | 215        | 210 | —          | 329                         |
| <b>Amide or amideimide compositions</b> |                    |            |     |            |                             |
| Polyarylamide(J-polymer)                | DuPont             | 160        | 110 | 279        | 343                         |
| Polyamideimide(Torlon C)                | Amoco              | 275        | —   | —          | 350-400                     |
| Polyamideimide (Torlon AIX 638/696)     | Amoco              | 243        | 243 | —          | 350                         |
| <b>Polyimide</b>                        |                    |            |     |            |                             |
| Polyetherimide(Ultem 1000)              | G. E.              | 225        | 205 | —          | 343                         |
| Polyimide(K-III)                        | DuPont             | 250        | 234 | —          | 343-360                     |
| Polyimide(LARC-TPI)                     | Mitsui Toatsu      | 264        | —   | 275        | 350                         |
| Polyimidesulfone(PISO <sub>2</sub> )    | High Tech Sev.     | 273        | —   | —          | 350                         |
| <b>Polysulfone</b>                      |                    |            |     |            |                             |
| Polysulfone(Udel P1700)                 | Amoco              | 190        | —   | —          | 300                         |
| Polyarylsulfone(Radel A400)             | Amoco              | 220        | —   | —          | 330                         |
| Polyarylethersulfone(Victrex 4100G)     | ICI                | 230        | —   | —          | 300                         |
| <b>Polyester</b>                        |                    |            |     |            |                             |
| Polyester(Xydar SRT-300)                | Amoco              | 350        | —   | 421        | 400                         |

### 2.1 고성능 열가소성 수지의 기계적 물성

고성능 열가소성 수지들의 기계적 물성을 표 4에 나타내었다. 일반적으로 고성능 열가소성 수지가 되기 위해 요구되는 물성치는 인장강도가 70 MPa (10 ksi) 이상, 인장탄성율은 2 GPa (0.3 Msi) 이상이어야 하며 실제로 기대되는 물성치는 인장강도 및 인장탄성율이 각각 100 MPa (14.5 ksi)과 3 GPa (0.44 Msi) 이상이므로 대부분의 수지들이 이들 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

고성능 열가소성 수지가 되기 위해서는 좋은 기계적 물성 뿐만 아니라 내화학성 및 내용제성이 우수하여야 한다. 특히 항공기의 재료로 사용되기 위해서는 하중이 걸린 상태에서도 항공기 유체나 윤활유 및 용제에 대한 저항성이 뛰어나야 한다. 내화학성이 뛰어난 수지로는 결정성 고분자인 PPS와 PEEK를 대표적으로 뽑을 수 있다. 무정형 열가소성 수지는 결정성 수지에 비해 대체적으로 할로젠 약품이나 키톤 또는 저분자량의 산화화합물에 약한 특성을 지니고 있다. 표 5는 유리전이온도가 높은 무정형 열가소성 수지를 93°C의 용제에 2주일 담근 후에 측정된 인장실험 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 polyarylene sulfide와 같은 수지는 혹독한 화학 환경 하에서도 저항성이 뛰어난 것을 알 수 있다.

### 2.2 가공성

일반적으로 기계적 물성, 고온안정성 및 내화학성이 뛰어난 열가소성 수지는 유리전이온도나 용융온도가 높기

때문에 가공하기가 힘든 단점이 있다. 따라서 고성능 복합재료의 열가소성 수지로 사용되기 위한 가장 우선적인 조건은 복합재료 제조시 가공성이 우수하여야 한다는 것이다. 고성능 열가소성 수지들에 대한 가공 온도를 표 2에 나타내었으며, 표에서 보는 바와 같이 가공온도가 모두 300°C 이상의 고온임을 알 수 있다. 가공온도가 높으면 높을수록 수지들이 산화되거나 열분해 되기 쉬우므로 복합재료 제조 공정이 어려워진다.

## 3. 열가소성 수지 복합재료의 물성

열가소성 수지 복합재료가 항공기나 방위산업에서의 구조물질로 사용됨에 따라 이들 복합재료의 기계적 성능 개발이 중요한 자리를 차지하게 되었다. 고성능 열가소성 수지 복합재료 분야는 새로운 물질 개발이기 때문에 복합재료의 디자인 엔지니어들은 열가소성 수지 복합재료가 열경화성 수지 복합재료에 비해 여러 가지 장점을 갖고 있다는 사실을 알고 있으면서도 실제로 응용분야에 대한 자료, 특히 기계적 물성에 대한 전반적인 자료 부족 때문에 이들 물질을 구조물에 사용하기를 꺼려하고 있다.

고성능 열가소성 수지 복합재료에 대한 대부분의 기계적 물성 측정은 개발된 고성능 수지의 물성평가를 위한 목적으로 주로 행해져 왔다. 고로 표 2에서 보여준 고성

표 3. 고성능 열가소성 수지의 화학구조식

| Materials          | Supplier           | Chemical structure |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| PEEK               | ICI                |                    |
| APC-HTX            | ICI                | N/A                |
| PXM 8505           | Amoco              | N/A                |
| PPS, RYTON         | Phillips Petroleum |                    |
| PAS-2              | Phillips Petroleum | N/A                |
| Torlon C           | Amoco              |                    |
| Torlon AIX 638/696 | Amoco              | N/A                |
| Ultem 1000         | G.E.               |                    |
| K-III              | DuPont             | N/A                |
| LARC-TPI           | Mitsui Toatsu      |                    |
| PISO2              | High Tech Sev.     |                    |
| Udel P1700         | Amoco              |                    |
| Radel A400         | Amoco              |                    |
| Victrax 4100G      | ICI                |                    |
| Xydar SRT-300      | Amoco              |                    |

능 열가소성 수지들의 복합재료에 대해 체계적으로 비교할 수 있는 물성치 자료를 얻는 것은 현시점에서는 불가능하며 본 장에서 보여줄 기계적 물성치들도 여러 문헌으로부터 조합한 불완전한 값들이다.<sup>1-16</sup> 보강섬유의 종류, 함량, 시편제조 방법 및 물성테스트 방법이 문헌마다 각기 다르기 때문에 독자들은 이들 복합재료의 성능을 비교하기 위해 앞에 열거할 데이터들을 직접 사용하는데 있어

서 주의를 해야 한다.

### 3.1 직조형태의 보강섬유를 사용한 열가소성 수지 복합재료

직조형태의 보강섬유를 사용하여 복합재료를 제조하는 경우는 공정상의 여러 장점을 지니고 있다. 예를 들어 복잡한 형상의 구조물 제조가 용이하므로 치수안정성 등이 요구되는 분야에 사용이 적합하다. 직조 형태의 보강섬유

**표 4. 고성능 열가소성 수지의 기계적 물성**

| Materials       | Tensile                |                       | Flexural               |                       | Fracture Toughness<br>(kJ/m <sup>2</sup> ) <sup>a</sup> |      |      |      |      |
|-----------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---|------|------|------|------|
|                 | Strength<br>(MPa)(ksi) | Modulus<br>(GPa)(Msi) | Strength<br>(MPa)(ksi) | Modulus<br>(GPa)(Msi) |   |      |      |      |      |
| PPS(Ryton)      | 78                     | 11.4                  | 3.50                   | 0.50                  | 147   | 21.3 | 3.50 | 0.50 | 0.72 |
| PAS-2           | 100                    | 14.5                  | -                      | -                     | 177   | 25.7 | 3.24 | 0.47 | -    |
| PEEK            | 91                     | 13.2                  | 3.80                   | 0.55                  | -   | -    | 3.80 | 0.55 | 1.89 |
| PEI(Ultem 1000) | 104                    | 15.2                  | 3.00                   | 0.43                  | 145   | 21.0 | 3.40 | 0.48 | 0.95 |
| PAI             | 186                    | 27                    | 4.40                   | 0.64                  | 241   | 35   | 4.80 | 0.70 | 1.10 |
| PES(Victrex)    | 83                     | 12                    | 2.41                   | 0.35                  | -   | -    | -    | -    | -    |
| PS(Udel P1700)  | 76                     | 11                    | 2.20                   | 0.32                  | -   | -    | -    | -    | 1.23 |
| J-2             | 104                    | 15                    | 3.2                    | 0.46                  | -   | -    | -    | -    | -    |
| K-III           | 104                    | 15                    | 3.5                    | 0.51                  | -   | -    | -    | -    | -    |
| PS(Udel)        | 69                     | 10                    | -                      | -                     | -   | -    | 2.80 | 0.40 | -    |

<sup>a</sup> Interlaminar fracture toughness of carbon-fiber composite.

**표 5. 고성능 무정형 열가소성 수지의 내화학 물성<sup>a</sup>**

| Solvent         | Tensile strength retention (%) |                 |                  |                  |
|-----------------|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------|
|                 | PAS-2 <sup>b</sup>             | PS <sup>b</sup> | PES <sup>b</sup> | PEI <sup>b</sup> |
| Toluene         | 73                             | F <sup>c</sup>  | F                | F                |
| Cyclohexane     | 94                             | 103             | 101              | 102              |
| MEK             | 38                             | F               | F                | F                |
| Ethyl acetate   | 83                             | F               | F                | F                |
| Dichloroethane  | F                              | F               | F                | F                |
| Methanol        | 90                             | 110             | 98               | 93               |
| Butylamine      | 76                             | F               | F                | F                |
| Gl. acetic acid | 83                             | F               | 19               | 91               |
| 15% Phos. acid  | 115                            | 105             | 74               | 101              |
| 15% NaOH        | 113                            | 106             | 106              | F                |
| Unleaded gas    | 104                            | 104             | 103              | 102              |
| Mobil HFA 5606a | 114                            | 103             | 103              | 102              |
| JP-4 jet fuel   | 110                            | 104             | 104              | 104              |
| Turco Air Tec   | 111                            | 106             | 68               | 30               |

<sup>a</sup> Samples aged at 93°C for 2 weeks.

<sup>b</sup> PAS-2; polyarylene sulfide, PS; polysulfone, PES; polyethersulfone, PEI; polyetherimide.

<sup>c</sup> F indicates that the sample failed.

로는 주로 유리섬유와 탄소섬유가 사용된다. 표 6에서 보여주는 기계적 물성은 보강섬유로는 직조형태의 유리섬유를 사용하고 수지로는 PEI와 PPS를 사용한 열가소성 수지 복합재료에 대한 물성이다. 직조형태는 plain과 8 harness stain weave를 사용하였으며 PPS 복합재료(AG 31-60)의 경우는 유리섬유의 함량이 PEI 복합재료보다 작기 때문에 전체적으로 낮은 수치를 보여주고 있다.

직조형태의 탄소섬유 보강 열가소성 수지 복합재료의 기계적 물성치를 표 7에 나타내었는데 이들은 현재 항공기의 2차구조물에 사용되어지고 있다. 수지로는 PEI, PPS와 PEEK를 사용하였으며, 보강재료로는 직조형태의 plain, 5-H와 8-H (harness stain)를 사용하였다. 이들 복합재료들에 있어서 섬유 직조형태 및 섬유함량이 다르기 때문에 직접적인 성능 비교는 사실상 불가능하다.

### 3.2 보강섬유가 일축 방향으로 배향된 열가소성 수지 복합재료

**표 6. 직조형태의 유리섬유를 사용한 열가소성 수지 복합재료의 기계적 물성**

| Property                       | Composite      |                |         |
|--------------------------------|----------------|----------------|---------|
|                                | CYPAC<br>X7005 | CYPAC<br>X7005 | AG31-60 |
| Resin                          | PEI            | PEI            | PPS     |
| Weave form                     | plain          | 8-H            | 8-H     |
| Fiber volume(%)                | 53             | 52             | 45      |
| Tensile modulus(GPa)           | 21             | 26             | 23      |
| Tensile strength(MPa)          | 338            | 469            | 352     |
| Compressive modulus(GPa)       | 24             | 29             | -       |
| Compressive strength(MPa)      | 582.1          | 524            | 345     |
| Flexural modulus(GPa)          | 21             | 26             | 21      |
| Flexural strength(MPa)         | 410            | 580            | 480     |
| Short beam shear strength(MPa) | 70             | 76             | -       |

**표 7. 직조형태의 탄소섬유를 사용한 열가소성 수지 복합재료의 기계적 물성**

| Property                       | Composite      |                |             |       |
|--------------------------------|----------------|----------------|-------------|-------|
|                                | CYPAC<br>X7005 | CYPAC<br>X7005 | AG32<br>-60 | APC-2 |
| Resin                          | PEI            | PEI            | PPS         | PEEK  |
| Weave form                     | plain          | 8-H            | 5-H         | 5-H   |
| Fiber volume(%)                | 54             | 56             | 52          | 60    |
| Tensile modulus(GPa)           | 56             | 52             | 57          | 60    |
| Tensile strength(MPa)          | 724            | 676            | 676         | 779   |
| Compressive modulus(GPa)       | 55             | 57             | 75          | -     |
| Compressive strength(MPa)      | 503            | 573            | 310         | 717   |
| Flexural modulus(GPa)          | 53             | 40             | 58          | 64    |
| Flexural strength(MPa)         | 1210           | 1190           | 570         | 1035  |
| Short beam shear strength(MPa) | 66             | 46             | -           | -     |

보강섬유가 일축 방향으로 배향된 열가소성 수지 복합재료는 섬유함량을 높일 수 있고 성능을 극대화할 수 있는 장점을 지니고 있으며 더욱이 프리프레그의 적층 순서를 달리 함으로써 구조 디자인을 다양하게 할 수 있는 특징을 지니고 있다.

일축 방향 열가소성 수지 복합재료는 하중에 견디는 힘이 큰 관계로 주로 항공기 등의 구조물에 응용되고 있으며, 유리섬유의 경우는 가격이 낮은 장점으로 인해 항공기 2차구조물이나 방위산업 구조물에 많이 사용되고 있다. 일축 방향의 유리섬유로 보강된 열가소성 수지인 PEEK와 PPS의 복합재료 물성을 표 8에 나타내었다.

부피 비율로 60%의 탄소섬유로 보강된 열가소성 수지 복합재료의 인장물성을 계산해보면 AS4 탄소섬유의 인장탄성률 및 강도가 각각 228 GPa과 3620 MPa이고 인장물성은 보강섬유에 거의 의존한다고 볼 수 있으므로 보강재료의 인장탄성률 및 강도는 137 GPa과 2170 MPa 이어야 한다. 표 9에서 살펴보면 인장탄성률은 계산치와 유사하다는 것을 알 수 있으나 인장강도는 계산치보다 떨어지는 것을 보여주고 있는데 그 이유는 섬유들의 배향이 완벽할 수 없을 뿐 아니라 제조공정중 섬유에 손상이 생겼을 가능성 때문인 것으로 사료된다. 열가소성 수지 복합

표 8. 일방향으로 배향된 유리섬유를 사용한 열가소성 수지 복합재료의 기계적 물성

| Property                               | Composite        |                        |
|--|------------------|------------------------|
|  | PEEK/<br>E-glass | PPS/E-glass<br>AG40-70 |
| Resin                                  | PEEK             | PPS                    |
| Fiber                                  | E-glass          | E-glass                |
| Fiber volume(%)                        | 62               | 52                     |
| Longitudinal tensile modulus(GPa)      | 55               | 41                     |
| Longitudinal tensile strength(MPa)     | 1124             | 917                    |
| Longitudinal compressive strength(MPa) | 1040             | 835                    |
| Longitudinal flexural modulus(GPa)     | 53               | 40                     |
| Longitudinal flexural strength(MPa)    | 1214             | 1193                   |

표 9. 일방향으로 배향된 탄소섬유를 사용한 열가소성 수지 복합재료의 인장물성

| Matrix              | Fiber | V <sub>f</sub><br>(%) | Strength                |                         | Modulus    |            |
|---------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------|------------|
|                     |       |                       | L <sup>a</sup><br>(MPa) | T <sup>b</sup><br>(MPa) | L<br>(GPa) | T<br>(GPa) |
| Polyaryletherketone |       |                       |                         |                         |            |            |
| APC-2               | AS4   | 61                    | 2130                    | 80                      | 134        | 9          |
| APC-HTX             | AS4   | 58                    | 1986                    | -                       | 132        | -          |
| Polyarylenesulfide  |       |                       |                         |                         |            |            |
| PPS                 | AS4   | 60                    | 1828                    | 26                      | 134        | 9.7        |
| PAS-2               | AS4   | 60                    | 1483                    | 32                      | 131        | 8.3        |
| Polyamide           |       |                       |                         |                         |            |            |
| J-II                | AS4   | 60                    | 2130                    | -                       | 131        | -          |
| Polyamideimide      |       |                       |                         |                         |            |            |
| Torlon C            | C3000 | 54                    | 1380                    | -                       | 142        | -          |
| Polyetherimide      |       |                       |                         |                         |            |            |
| Ultem 1000          | T300  | -                     | -                       | -                       | 136        | 8.3        |
| Polyimide           |       |                       |                         |                         |            |            |
| K-III               | AS4   | 60                    | 2130                    | 41                      | -          | 9          |
| Polysulfone         |       |                       |                         |                         |            |            |
| Udel P1700          | AS4   | -                     | 1330                    | 59                      | 129        | 7          |
| 3501 Epoxy          | AS4   | 66                    | 1965                    | 52                      | 128        | 9          |

<sup>a</sup> Longitudinal tensile properties.

<sup>b</sup> Transverse tensile properties.

재료의 수직방향 인장강도는 PEEK의 경우를 제외하고는 일반적으로 상당히 낮은 값을 보여주고 있다. 순수한 수지의 물성보다 더 낮은 값을 보여주는 이유는 열경화성 수지에 비해 열가소성 수지와 섬유의 계면 상태가 좋지 않기 때문이다.

열가소성 수지 복합재료의 압축강도는 열가소성 수지 복합재료의 물성 중에서 가장 취약한 물성으로 알려져 있다. 표 10에서 보는 바와 같이 에폭시 수지의 압축강도 (1317 MPa)에 비해 열가소성 수지의 경우 모든 복합재료에 대해 상당히 낮은 값을 보여주고 있다. 이는 열경화성 수지 복합재료에 비해 계면 접착 상태가 떨어질 뿐 아니라 열가소성 수지의 유연성으로 인해 압축 하중 하에서 수지의 변형이 섬유들을 빨리 굽어지게 하기 때문이다. 수지자체의 인장탄성률과 복합재료의 압축강도 관계를 Hahn과 Williams<sup>16</sup>가 그림 1과 같이 나타내었는데 이 그림으로부터 열가소성 수지 복합재료의 압축강도를

표 10. 일축 방향으로 배향된 탄소섬유 보강 열가소성 수지 복합재료의 압축물성

| Matrix              | V <sub>f</sub><br>(%) | Strength<br>(MPa) | Modulus<br>(GPa) |
|---------------------|-----------------------|-------------------|------------------|
| Polyaryletherketone |                       |                   |                  |
| APC-2               | 61                    | 1100              | 117              |
| APC-HTX             | 58                    | 1138              | -                |
| Polyarylenesulfide  |                       |                   |                  |
| PPS                 | 60                    | 938               | 130              |
| PAS-2               | 60                    | 897               | 123              |
| Polyamide           |                       |                   |                  |
| J-II                | 60                    | 1100              | -                |
| Polyamideimide      |                       |                   |                  |
| Torlon C            | 60                    | 1380              | -                |
| Polyimide           |                       |                   |                  |
| K-III               | 60                    | 1007              | 110              |
| Polysulfone         |                       |                   |                  |
| Udel P1700          | -                     | 1041              | -                |
| 3501 Epoxy          | 66                    | 1317              | 137              |

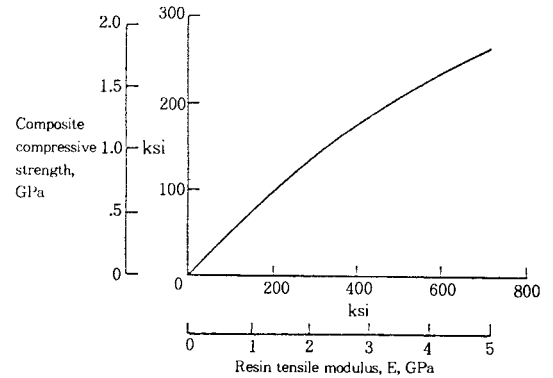


그림 1. 고분자 복합재료에 있어서 수지의 인장탄성률이 복합재료의 압축강도에 미치는 영향.

높이기 위해서는 수지의 인장탄성률을 높여야 한다는 사실을 알 수 있다.

열가소성 수지 복합재료의 굴곡특성을 살펴보면 60 vol% AS4 탄소섬유 보강 복합재료의 경우 굴곡탄성을 계산치가 110~138 GPa 범위이므로 표 11의 Larc TPI와 Udel P1700을 제외하고는 계산치와 유사하다는 것을 알 수 있다. 굴곡물성은 인장물성과 압축물성이 함께 결합되어 나타나므로 섬유축 방향으로의 굴곡물성은 섬유의 인장물성에 의해 좌우된다는 것을 알 수 있다.

표 12는 탄소섬유로 보강된 열가소성 수지 복합재료의 충격후 압축강도와 강인화도를 보여주고 있다. 충격후 압축변형을 살펴보면 충격에너지가 1000과 1500 in-lb/in의 경우 알루미늄에 대비해서 요구되는 변형치인 0.6% 이상의 만족된 수치를 보여주고 있다. 강인화도 ( $G_{IC}$ ) 수치를 살펴보면 모든 열가소성 수지 복합재료에 있어서 열경화성 수지 복합재료에 대해 요구하는 값인 4~6 in-lb/in<sup>2</sup>(700~1000 J/m<sup>2</sup>)와 유사하거나 큰 값을 보여줌을

표 11. 일축 방향으로 배향된 탄소섬유 보강 열가소성 수지 복합재료의 굴곡물성

| Matrix              | V <sub>f</sub> (%) | Strength (MPa) | Modulus (GPa) |
|---------------------|--------------------|----------------|---------------|
| Polyaryletherketone |                    |                |               |
| APC-2               | 61                 | 1880           | 117           |
| APC-HTX             | 58                 | 1770           | 122           |
| Polyarylenesulfide  |                    |                |               |
| PPS                 | 60                 | 1900           | 117           |
| PAS-2               | 60                 | 1660           | 110           |
| Polyamide           |                    |                |               |
| J-II                | 60                 | 1450           | —             |
| Polyamideimide      |                    |                |               |
| Torlon C            | 54                 | 2070           | 128           |
| Polyimide           |                    |                |               |
| K-III               | 60                 | 1530           | 124           |
| LARC TPI            | —                  | 1970           | 97            |
| Polyimidesulfon     |                    |                |               |
| PISO <sub>2</sub>   | —                  | 2070           | 130           |
| Polysulfone         |                    |                |               |
| Udel P1700          | —                  | 1480           | 97            |
| 3501 Epoxy          | 66                 | 1875           | 128           |

표 12. 탄소섬유 보강 열가소성 수지 복합재료의 충격후 압축강도 및 강인화도

| Thermoplastic Fiber         | Compression After Impact <sup>a</sup> |            |            |            |            |            | G <sub>IC</sub><br>in.-lb/in. <sup>2</sup> |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
|                             | 1000                                  |            | 1500       |            | 2000       |            |  |
|                             | in.-lb/in.                            | in.-lb/in. | in.-lb/in. | in.-lb/in. | in.-lb/in. | in.-lb/in. |  |
| PEEK APC-2 AS4              | —                                     | 48         | —          | 45         | —          | 42         | 10.7                                       |
| APC-HTX AS4                 | —                                     | —          | 0.63       | 40         | —          | —          | 12.7                                       |
| PXM-8505                    | —                                     | —          | —          | —          | —          | —          | —  |
| Ryton PPS AS4 <sup>b</sup>  | 0.63                                  | 32         | 0.52       | 26         | —          | —          | 5.1  |
| Ryton PAS-S                 | —                                     | —          | —          | —          | —          | —          | —  |
| Torlon C C3000 <sup>c</sup> | 0.96                                  | 53         | 0.93       | 50         | 0.83       | 46         | 10.0                                       |
| Torlon AIX 638/696          | —                                     | —          | —          | —          | —          | —          | 7.5  |
| J-2 AS4                     | —                                     | —          | 0.75       | 50         | —          | —          | 6.1  |
| Ultem 1000 AS4              | —                                     | —          | —          | —          | —          | —          | 4.8  |
| LARC-TPI AS4                | —                                     | —          | —          | —          | —          | —          | 7.0  |
| PISO2 AS4                   | —                                     | —          | —          | 40         | —          | —          | —  |
| LARC-TPI                    | —                                     | —          | —          | —          | —          | —          | 8.1  |
| Avimid K-III IM6            | 0.60                                  | 43         | 0.57       | 40         | 0.51       | 37         | 6.9-7.7                                    |
| Udel P1700 AS               | —                                     | —          | —          | —          | —          | —          | 1.0  |
| 3501-6 AS4                  | 0.32                                  | 26         | 0.34       | 21         | 0.31       | 19         | 3.1  |
| 8551-7 IM7                  | —                                     | —          | 0.79       | 53         | —          | —          | —  |

<sup>a</sup> Quasi-isotropic panels; data normalized to 1 in. thick specimens.

<sup>b</sup> Additional values:

500 in.-lb/in.  $\epsilon=0.73$ ,  $\sigma=35$  ksi

2500 in.-lb/in.  $\epsilon=0.41$ ,  $\sigma=19$  ksi

3325 in.-lb/in.  $\epsilon=0.40$ ,  $\sigma=18$  ksi

<sup>c</sup> 24 ply CSW ( $\pm 45$ )/(0,90)<sub>3S</sub>.

알 수 있다. 그림 2는 수지 자체의 강인화도와 복합재료의 강인화도를 연관시킨 그림이다.<sup>17</sup> 복합재료의 강인화도를 700~1000 J/m<sup>2</sup> 이상으로 유지시키기 위해서는 수

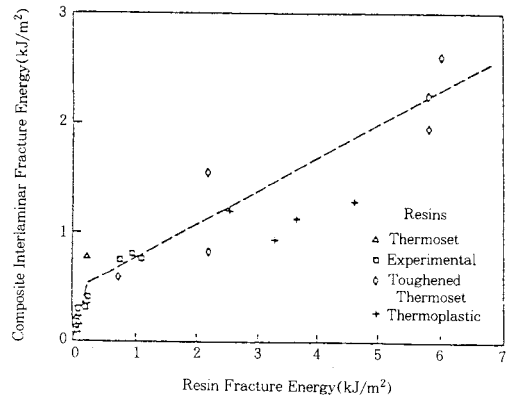


그림 2. 고분자 복합재료에 있어서 수지의 강인화도가 복합재료의 강인화도에 미치는 영향.

표 13. 열가소성 수지 복합재료의 고온에서의 기계적강도<sup>a</sup>

| Matrix              | V <sub>f</sub> (%) | Temperature (°C) | Tensile (MPa)    | Compressive (MPa) | Flexural (MPa)  |
|---------------------|--------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| Polyaryletherketone |                    |                  |                  |                   |                 |
| APC-2               | 61                 | 121              | 221 <sup>b</sup> | —                 | —               |
| APC-HTX             | 58                 | 177              | —                | 88                | —               |
| Polyarylenesulfide  |                    |                  |                  |                   |                 |
| PPS                 | 60                 | 177              | 690              | —                 | —               |
| PAS-2               | 60                 | 177              | 1276             | —                 | 100             |
| Polyamideimide      |                    |                  |                  |                   |                 |
| Torlon C            | 54                 | 93               | —                | 1138              | —               |
| Polyimide           |                    |                  |                  |                   |                 |
| K-III               | 60                 | 177              | —                | —                 | 65 <sup>c</sup> |

<sup>a</sup> Unidirectional except as noted.

<sup>b</sup> 45° lay-up.

<sup>c</sup> QI lay-up.

지 자체의 강인화도가 800~1800 J/m<sup>2</sup> 이상이어야 함을 보여주고 있다. 이 그림에서 가장 높은 강인화도를 보여주는 시스템은 고무 강화 열경화성 수지 복합재료이다. 그러나 이 경우 hot/wet 물성이 매우 나쁘기 때문에 실지 구조재에 사용하기는 어려움이 많다.

열가소성 수지 복합재료에 대해 고온에서의 기계적 물성을 측정하는 경우는 매우 드물다. 표 13은 고온에서의 기계적 물성을 보여주는 데이터로서 주로 열가소성 수지 제조회사들이 필요에 따라서 측정된 데이터이므로 상당히 한정된 것임을 알 수 있다. 열가소성 수지 복합재료가 항공기 구조물에 적극적으로 사용되기 위해서는 이러한 고온에서의 기계적 물성에 대한 데이터 베이스가 먼저 선행되어야 한다.

## 참 고 문 헌

1. N. J. Johnston and P. M. Hergenrother, High Performance Thermoplastics: A Review of Neat Resin and

- Composite Properties, Proc. 32nd Int. SAMPE Symp., p. 1400, April (1987)
2. U. Measuria and F. N. Cogswell, Aromatic Polymer Composites : Broadening the Range, *SAMPE J.*, 21(5), 26 (1985)
  3. Preliminary Data, American Cyanamid Company, Wayne, NJ (1987)
  4. F. N. Cogswell, D.C. Leach, P. T. McGrail, H. M. Colquhoun, P. MacKenziea, and R. M. Turner, Semicrystalline Thermoplastic Matrix Composites for Service at 350° F, Proc. 32nd SAMPE Int. Symp., p. 382 (1987)
  5. S. L. Peake, A. Maranci, and E. Sturm, Thermoplastic Matrix Composites Based on Polyetherimides, Proc. 32nd SAMPE Int. Symp., p. 420 (1987)
  6. R. M. Turner and F. N. Cogswell, The Effect of Fiber Characteristics on the Morphology and Performance of Semicrystalline Thermoplastic Composites," *SAMPE J.*, 23 (1), 40 (1987)
  7. L. A. Carlsson and J. Backland, Advanced Thermoplastic Composites-An Overview of their Structure, Processing and Mechanical Performance, The Royal Institute of Technology, Report No. 85-7, Stockholm, Sweden (1985)
  8. J. E. O'Connor, T. P. Murtha, A. South, M. R. Lindstrom, and A.Y. Lou, Polyarylene Sulfide High Performance Thermoplastic Composites, Proc. ICCM-VI, Vol. 1, p. 433 (1987)
  9. K. B. Su, Mechanisms of Interlaminar Fracture in a Thermoplastic Matrix Composite Laminate, Proc. ICCM-V, p. 995 (1985)
  10. B. Cole, TORLON-C Graphite Composites, Proc. 30th Int. SAMPE Symp., p. 799, March (1985)
  11. I. Y. Chang, Thermoplastic Matrix Continuous Filament Composites of Kevlar Aramid or Graphite Fiber, Int. Composite Symp.(U. of Delaware, Newark, DE, September (1984)
  12. R. J. Boyce, T. P. Gannett, H. H. Gibbs, and A. R. Wedgewood, Processing Properties of K-Polymer Composite Materials Based on AVIMID K-III Prepregs, Proc. 32nd Int. SAMPE Symp., p. 169, April (1987)
  13. H. H. Gibbs, The Processing and Properties of Damage Tolerant Composites Based K-Polymer Composite Materials, Proc. ICCM-V, p. 971 (1985)
  14. A. Lustiger, F. S. Uralil, G. M. Newaz, and B. D. Prushing, Processing and Structural Optimization of PEEK Composites, Phase 1 : Final Report (Battelle, Columbus, OH, July 1986), p. 62.
  15. L. A. Carlsson and R. B. Pipes, Experimental Characterization of Advanced Composite Materials (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987).
  16. H. T. Hahn and J. G. Williams, NASA TM-85834. Washington, D. C. : National Aeronautics and Space Administration (1984)
  17. D. L. Hunston, *Composite Tech Review*, 16(4), 176-81 (1984)