

## 論文

## 에폭시 수지 시스템의 기계 및 열적 특성에 관한 연구

정광섭\* · 전두환\* · 이대길\*\*

## A Study on the Mechanical and Thermomechanical Properties of Epoxy Resin Systems

Kwang Seop Jeong\*, Du Hwan Chun\* and Dai Gil Lee\*\*

## ABSTRACT

The mechanical and thermomechanical properties of two epoxy structural adhesives, IPCO 9923 and HYSOL EA 9309.2 NA, and one epoxy matrix resin, SKR 2514 were tested and compared.

The mechanical properties such as, the tensile, lap and bulk shear were measured at room temperature, and the measurement of the thermomechanical properties carried out from room temperature up to of 250℃ by using dynamic mechanical analyses.

It was found from the experimental results that HYSOL EA 9309.2 NA has better performance in static properties at room temperature and also in thermal properties at elevated temperature than those of IPCO 9923, and tensile and shear strength of SKR 2514 epoxy resin was 1.5 times higher than those of two structural adhesive systems. The storage moduli of SKR 2514 epoxy resin systems were decreased drastically above the temperatures of resin cure, and the damping coefficients of the resin were increased rapidly at the elevated temperature beyond the cure points of the resin, having maximum value near the glass transition temperature of the resin.

## 초 록

본 연구에서는 오늘날 산업용 복합 구조물의 접착용 재료로 널리 사용되고 있는 에폭시계열 구조물 접착제인 IPCO 9923, HYSOL EA 9309.2 NA와 탄소섬유 또는 유리섬유 강화 복합재료 등의 기지재로 사용되는 SKR 2514 수지의 기계적 특성과 열적 특성을 실험적으로 규명하고 비교 검토하였다. 먼저, 재료들의 기계적 특성을 관찰하기 위하여 인장시험, 랩 전단시험, 벌크 전단시험을 상온에서 수행하였고, 다음으로는 온도변화에 따른 재료의 기계적 특성 변화를 관찰하기 위하여 상온에서 250℃까지 온도를 상승시키면서 DMA를 수행하였다.

실험결과 HYSOL EA 9309.2 NA 접착제가 IPCO 9923에 비하여 정적특성 및 열적 특성이 더 우수하다는 것을 알 수 있었으며, 복합재료 기지재인 SKR 2514 에폭시 수지의 인장강도 및 전단강도는 접착제용 수지의 경우보다 약 1.5배이상 더 크게 나타났다. 또한, 수지들의 동 탄성계수는 수지의 경화온도(cure temperature)를 넘어서면서 급격히 감소하는 반면 감쇠계수는 경화온도를 넘어서면서 급격히 상승하여 유리전이온도(glass transition temperature) 부근에서 최대치를 나타냄을 알 수 있었다.

\* 영남대학교 섬유학부

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

## 1. 서 론

오늘날 항공기, 자동차 및 공작기계의 구조물 재료로 응용되고 있는 섬유강화 고분자 복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 비강성 및 비강도가 크고 감쇠 특성이 우수하여 산업전반에 걸쳐 각광받고 있는 새로운 구조용 재료로 등장하게 되었다[1-3]. 그런데, 섬유강화 고분자 복합재료를 사용하는 구조물은 복합재료 단독만으로 사용되는 경우는 거의 없고, 대부분 기존의 금속 구조물과 접합기법 등으로 연계하여 사용한다[4].

복합재료 구조물과 금속재료 구조물과의 접합방법에는 볼트 및 리벳을 사용하는 기계적 접합과 접착제에 의한 접합으로 대별된다. 접착제에 의한 접합을 사용하면, 접합부위의 응력분포를 넓게 함으로써 응력집중을 줄일 수 있을 뿐 아니라 접합으로 인한 접합부위의 질량 증가를 줄이고, 피 접합체에 구멍가공 등의 기계적 가공을 하지 않아도 되는 것 등의 장점이 있다[5-6]. 따라서, 복합재료 구조물이 응용되고 있는 대부분의 경우에는 주로 접착제에 의한 접합을 사용하고 있다.

복합재료 구조물과 금속재료 구조물을 접합하여 사용하는 복합 구조물에 있어서 가장 취약한 부분은 조인트(접합)부가 된다[7-8]. 따라서, 조인트를 설계하는 기술은 중요한 연구분야로 등장하였다[9]. 그런데, 조인트의 기계적 특성은 접착제의 물성과 두 피 접합체의 접합조건 등에 크게 지배를 받는다. 따라서, 안정된 조인트를 설계하기 위해서는 무엇보다도 먼저 접착제의 기계적 특성을 알고 있어야 한다. 특히 접착제의 열적 특성은 조인트 구조물의 사용 온도 환경을 결정지을 수 있는 중요한 인자가 될 수 있으므로 반드시 고려되어야 할 사항이다[10]. 그런데, 산업현장에서 사용되고 있는 대부분의 에폭시 수지 시스템은 순수한 에폭시 수지 시스템이 아니고 사용목적에 따라서 적절한 화합물을 첨가한 수정된 에폭시 수지 시스템이고, 에폭시 수지 시스템의 제조과정에서 첨가하게 되는 화합물의 종류나 양은 제조회사의 기술적인 노하우로 되어 있으므로 공개가 되지 않고 있는 것이 현실이다. 따라서, 사용하기를 원하는 접착제 또는 수지의 물성을 신뢰성 있게 파악하고 있기 위해서는 직접 실험을 통하여 필요한 자료를 수집하는 것이 가장 바람직하다고 할 수 있다. 그러나, 에폭시

접착제 및 수지는 상온에서의 점성이 높아서 취급이 용이하지 않으며, 대기 상태에서 수지와 경화제를 혼합하게 되면 다량의 기포가 생성되기 때문에 기포 없는 순수 접착제 시험편을 제조하기란 매우 어려운 일이다. 수지 속에 내재하는 다량의 기포를 제거하지 않을 경우에는 제조된 시험편에 결함이 생기기 쉽고 실험결과에 대한 신뢰성도 낮아질 수밖에 없다.

본 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 에폭시 수지 시험편 내의 기포를 최소화할 수 있도록 하기 위해서 진공펌프와 압축기를 이용하는 새로운 방법의 에폭시 수지 제조장치를 개발하고, 현재 국내에서 복합재료 구조물과 금속재료 구조물의 접착제로 많이 사용되고 있는 IPCO 9923, HYSOL EA 9309.2 NA 등 에폭시 접착제와 탄소섬유 또는 유리섬유 강화 복합재료 등의 기지재(matrix)로 사용되는 SKR 2514 에폭시 수지 시스템을 사용하여 상온에서의 기계적 특성과 온도상승에 따른 열적 특성을 실험적으로 비교하고 검토하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 시험편 제조 시스템의 개발

Table 1은 본 연구에서 사용한 에폭시 수지 SKR 2514, IPCO 9923 및 HYSOL EA 9309.2 NA에 대한 점성 및 추천 경화조건을 나타낸 것이다[11-13].

Table 1에서 알 수 있는 것과 같이 복합재료의 기지재 수지나 접착제 등은 상온에서 매우 높은 점성을 나타내고 있다. 또한, 경화 시에는 일시적으로 화학적인 발열반응이 일어나면서 다량의 기포가 발생하게 되기 때문에 기포가 없는 순수한 수지 시험편을 제조하는 것은 대단히 어렵다. 따라서, 에폭

Table 1. Viscosity and cure condition of the epoxy resin

	Mixing ratio (wt. %)		Cure condition	Mixing viscosity (Poise)	
	Resin	Hardener		25 °C	70 °C
SKR 2514	100	7	Fig. 1 참조	Above 25,000	4.5±0.5
IPCO 9923	100	100	16h/80°C	5,000±1,000	2.5±0.5
HYSOL EA 9309.2 NA	100	22	2.5h/80°C	1,500±500	2.5±0.5

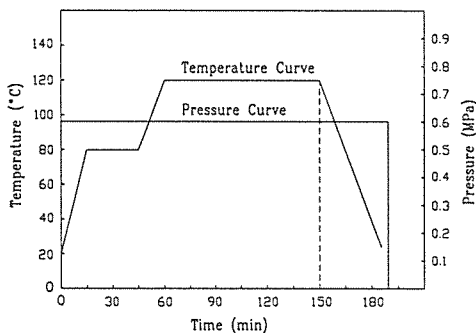


Fig. 1. Cure Cycle for SKR 2514 Resin System.

시 수지 시스템의 물성을 실험적으로 규명하기가 어려우며 많은 오차를 수반할 수가 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 Fig. 2와 같은 특수한 방식의 수지 시험편 제조장치를 개발하였다.

Fig. 2에서 진공펌프는 수지 내에 발생하는 기포를 제거하기 위한 것이며 공압 피스톤 시스템은 일

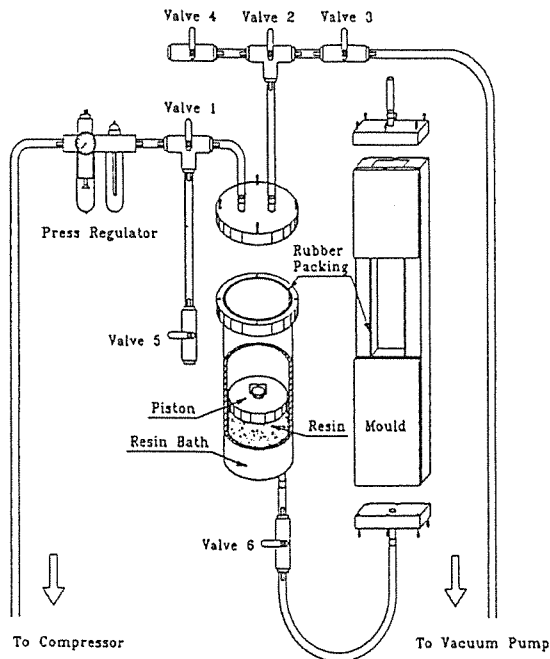


Fig. 2. Vacuum added resin specimen manufacturing system.

정한 압력상태를 유지하면서 수지를 금형 속으로 주입시킬 뿐만 아니라 경화 중에 발생하는 기포의 부파를 최소화시키기 위한 것이다. Fig. 2에서 밸브 1과 밸브 2는 양쪽 방향의 유체 흐름을 제어할 수 있는 밸브이고 나머지 밸브들은 모두 한쪽 방향의 유체 흐름만을 제어할 수 있는 밸브이다.

## 2-2. 시험편의 제조

본 연구를 위해서 채택한 세 가지의 에폭시 수지 시스템은 Table 1에서 알 수 있듯이 상온에서의 점성은 매우 크지만 70℃에서는 200~500 cP(centi-Poise) 정도로 감소한다. 따라서, 본 연구에서는 수지 시험편의 제조를 쉽게 할 목적으로 상온에서 경화제와 혼합시킨 수지를, 수지용기(resin bath)에 넣기 전에 금형과 수지용기를 온도 70℃로 조절할 수 있는 오토클레이브 속에 넣어 30분 이상 충분히 예열시켰으며 예열된 수지용기 속에 수지를 넣고 다시 약 5분간 동일한 온도의 오토클레이브 내에 유지시킴으로써 수지의 점성을 감소시켰다. 작업도 중에 충분히 예열된 수지용기와 금형의 온도가 하강하고 수지의 점성이 높아지는 것을 방지하기 위해서 수지용기와 금형을 오토클레이브 내에서 밖으로 옮기기 전에 두꺼운 천으로 감싸주었다. 다음에는 진공 펌프 쪽 밸브 라인과 압축기 쪽 밸브 라인 등 두 개의 밸브 라인이 연결된 수지용기의 뚜껑을 수지용기와 조립하여 줌으로써 전체 수지 시험편 제조 시스템 내에 외부 공기의 유동이 생기지 않도록 하였다. 이렇게 준비된 상태에서 우선적으로 밸브 2의 우측 방향의 통로를 열고 밸브 3을 열어 수지용기와 진공 펌프 쪽 라인이 서로 연결되도록 하고 진공 펌프를 약 3~5분간 작동시켜서 수지 내에 함유되어 있는 기포를 뽑아내었다. 미세 기포들을 제거한 다음에는 밸브 3을 닫아서 진공 펌프 쪽으로의 공기유동을 막고 이번에는 밸브 2의 우측 통로를 막고 좌측 통로를 열어 밸브 4의 통로와 연결한 다음 밸브 4를 열어 대기압 상태의 공기를 수지용기 속으로 유입시켜 줌으로써 수지용기 내의 압력상태를 대기압 상태로 만들어 주었다. 진공 펌프를 통해 수지용기 내의 공기들이 빠져나간 상태에서는 대기압과 수지용기내의 압력차이가 커서 수지용기의 뚜껑을 열기 전에 이와 같은 공정을 거치지 않으면 대기와 수지용기 내의 압력차이로 인하여 수지용기의 뚜껑을 열기가 매우 어려워질

뿐만 아니라 극히 위험한 일을 당할 수 있기 때문에 주의를 해야만 한다. 충분한 공기가 수지용기의 공간을 채워서 수지용기 내의 압력이 대기압과 같아진 후에 수지용기의 뚜껑을 열고 이번에는 미리 약 70℃로 예열되어 있는 피스톤을 수지용기 속에 집어넣고 다시 수지용기의 뚜껑을 닫은 다음 밸브 4를 닫아서 수지용기 내에서 대기압 상태의 공기 유동을 막아 주었다. 다음으로는 압축공기의 유입 통로를 만들어 주기 위해서 밸브 1을 열어주었다. 이 상태에서 압축기(compressor)를 가동시키고 압력 조절기를 사용하여 수지용기 내 피스톤 상부의 압력을 약 3기압 정도가 유지 되도록 하였다. 수지용기 내의 기압이 약 3기압 정도로 유지되었을 때 밸브 6을 열어 수지용기 내의 수지가 일정한 압력상태를 유지하면서 금형 속으로 유입될 수 있도록 하였다. 수지가 금형을 통과하여 충분한 높이만큼 올라왔을 때 밸브 6을 닫음으로써 금형 내로 더 이상 수지의 유입이 생기지 않도록 해 주었다. 이와 같은 상태에서 이번에는 압력 조절기를 닫고 밸브 1을 밸브 5와 연결되도록 방향을 바꾸어준 다음 밸브 5를 열어 수지용기 내의 기압이 대기압 상태가 되도록 하였다. 끝으로, 밸브 6과 연결된 호스를 잘라서 금형 내에서 더 이상 수지의 유동이 없도록 양 끝단의 높이를 일치시키고 오토클레이브 내에서 Table 1의 추천된 경화조건으로 경화시켰다. 이 때 압력을 약 6기압 정도 가하면서 경화시켰다. 그 이유는 경화 시에 발생할 수 있는 기포의 팽창을 최대한 줄여주기 위한 것이다.

Fig. 3에서는 인장 시험편의 제조를 위해 분리형으로 설계 제조한 금형의 형상과 성형된 수지 시험편을 보여주고 있다. 여기서, 인장시험편의 규격은 ASTM D 638-89의 기준을 따랐으며 시험편 제조

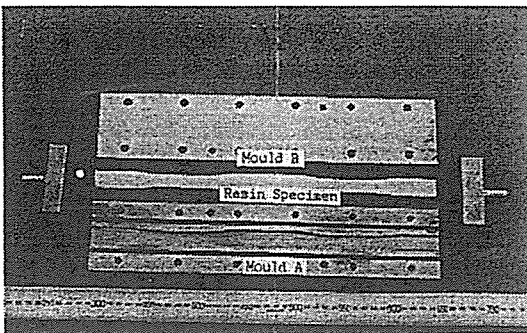


Fig. 3. Separative type mould and resin specimen.

의 편의를 위하여 2개의 시험편을 한번에 만들 수 있도록 금형을 설계하고 제작하였다.

## 2-3. 실험방법

IPCO 9923 및 HYSOL EA 9309.2 NA 에폭시 계열 접착제와 SKR 2514 기지재 에폭시 수지의 상온 정적 특성과 고온 동적 특성을 규명하기 위하여 상온에서의 정적 특성실험과 온도를 상승시키는 조건에서의 진동실험을 수행하였다.

상온 정적 실험은 모두 세 가지 방법으로 수행하였다. 첫째는 에폭시 수지 시스템의 인장강도를 측정하기 위하여 ASTM D 638-89에 준한 인장시험을 수행하였고, 둘째는 램 전단강도를 평가하기 위하여 ASTM D 1002-72에 준한 램 전단시험(lap shear test)을 수행하였으며 끝으로 벌크 전단시험(bulk shear test)을 수행하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 수행한 3가지 정적 특성 실험 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 (a)는 ASTM D 638-89에서 추천하는 시험편의 형태 중에서 Type I의 형상과 치수를 나타낸 것이며[14], 이 시험편의 두께는 실험의 편의를 고려하여 3 mm로 제조하였다. Fig. 4의 (b)는 ASTM D 1002-72에서 제시하는 그리퍼들(grips)의 형상[15]을 수정하여 수지 면의 중앙선(glue line)에서 전단력이 발생될 수 있도록 하였다. 램 전단실험을 위해 사용한 접착 수지의 두께는 0.2 mm로 하였다. Fig. 4의 (c)는 본 연구를 위해 제조한 벌크 전단시험용 지그와 시험편이 장착된 모습이다. 실험 시에 발생할 수 있는 힘의 불균형적인 배열을 방지하기 위하여 그리퍼와 시험편 사이에 충분한 거리를 두었으며 두 지그 사이의 배열을 일정하게 유지하기 위하여 두 지그 사이에 충분한 접촉면이 생길 수 있도록 고려하여 제조하였다.

온도변화에 따른 에폭시 수지 시스템의 동적 특성을 실험적으로 규명하기 위하여 Du Pont 983 DMA(dynamic mechanical analysis)[16]를 사용하여 온도상승에 따른 세 가지 수지의 기계적 특성을 규명하였다. DMA에서 이용 가능한 동특성 모드에는 공진 주파수 모드(resonant frequency mode), 고정주파수 모드(fixed frequency mode), 응력 회복 모드(stress relaxation mode) 및 크리프 모드(creep mode) 등 4가지가 있다. 본 연구에서는 이들 중에서 고정 주파수 모드를 사용하여 실험

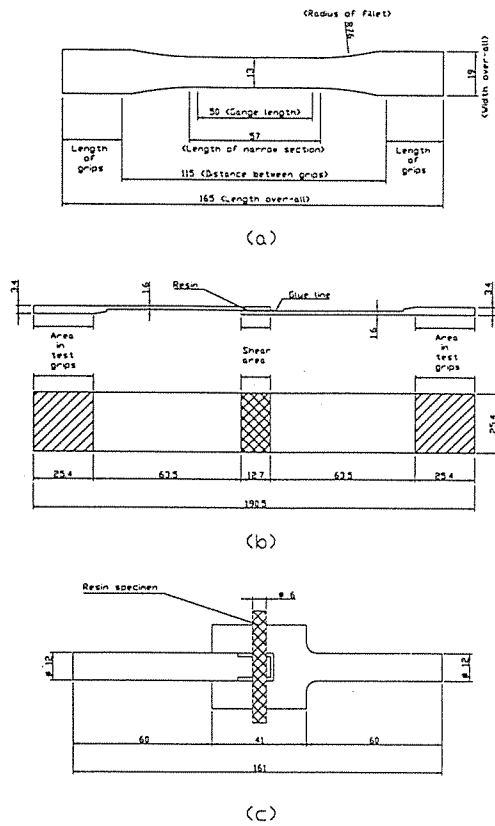


Fig. 4. Shapes and dimensions of specimens.

험을 수행하였고, 수지의 탄성계수와 손실계수가 진폭과 주파수에 대한 함수관계가 있음을 명백히 하기 위하여 공진 주파수 모드에 대한 실험도 일부 수행하였다.

본 실험에서 사용한 Du Pont 983 DMA의 고정 주파수 모드에서의 실험 가능한 고정 주파수는 0.001~10 Hz 이고, 본 실험에서는 고정 주파수를 0.1 Hz, 1 Hz 및 5 Hz 등 세 가지의 조건으로 실험하였다. 실험온도 범위는 30℃~250℃이었으며, 온도상승률은 10℃/min으로 하였다.

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3-1. 상온특성

Fig. 5, Fig. 6 및 Fig. 7은 실험을 통하여 얻은 복합재료 프리프레그용 수지 및 두 접착제의 인장

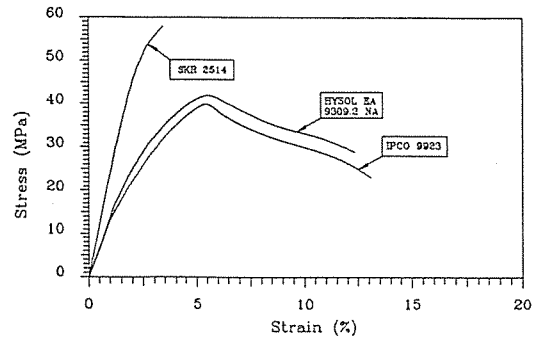


Fig. 5. Tensile stress-strain curves.

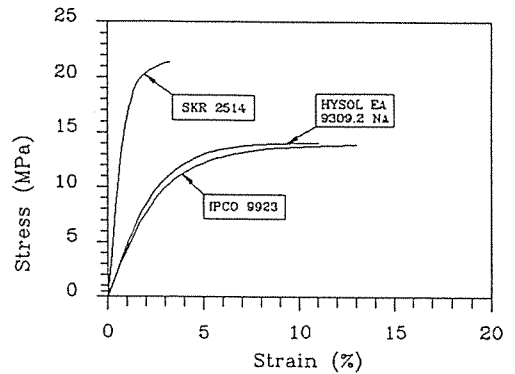


Fig. 6. Lap shear stress-strain curves.

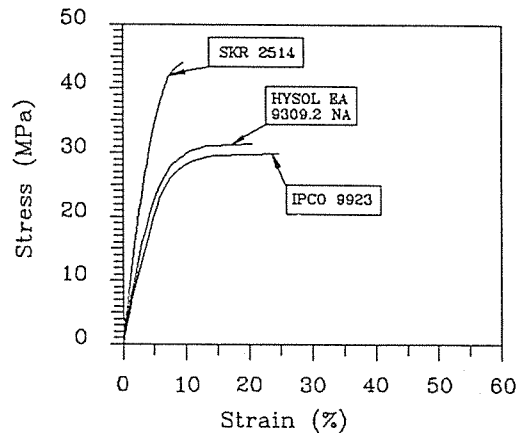


Fig. 7. Bulk shear stress-strain curves.

실험, 랩 전단시험 그리고, 벌크 전단시험에 따른 응력-변형률 관계곡선이다.

세 가지 종류의 정적 인장실험의 결과를 통하여 알 수 있듯이 프리프레그용 수지는 접착제용 수지에 비하여 훨씬 높은 강도를 갖지만 취성 또한 큰 것으로 나타났다. 그리고, 두 종류의 접착제에 대해서는 IPCO 9923 보다 HYSOL EA 9309.2 NA 에폭시 접착제의 기계적 특성이 약간 더 우수하다는 것을 알 수 있었다.

### 3-2. 온도상승에 따른 동특성

Fig. 8은 HYSOL EA 9309.2 NA 접착제의 온도 변화에 따른 굽힘 탄성계수, 전단 탄성계수, 손실계수를 각각 나타낸 것이다.

굽힘 탄성계수 및 전단 탄성계수는 70℃를 넘어서면서 급격히 감소한다는 것을 알 수 있으며 손실계수는 100℃ 부근에서 최대치를 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 고정 주파수가 높아짐에 따라서 탄성계수는 더 높은 값을 나타내었고 손실계수는 더 낮은 값을 나타내었다. 이러한 현상은 에폭시 수지 시스템의 탄성계수와 손실계수는 진폭과 주파수의 함수관계를 갖는다는 것을 말해주는 것이다. 에폭시 수지 재료의 탄성계수와 손실계수가 진폭과 주파수에 대한 함수관계에 있다는 사실을 추가적으로 더 명백하게 나타내기 위하여 공진 주파수 모드에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9의 결과를 통해서도 Fig. 8에서와 동일한 현상을 얻을 수 있었다. 따라서, Fig. 8과 Fig. 9에 의해서 실험에 사용된 3가지의 에폭시 수지 시스템 모두의 탄성계수와 손실계수는 진폭과 주파수에 대한 함수관계에 있다고 말할 수 있다. 이러한 함수관계는 금속재료 및 복합재료 등 구조용 재료에서는 잘 알려져 있는 일반적인 특성이다. 따라서, 실험결과를 통해서 비록 에폭시 수지 시스템이 열경화성이고 금속재료에 비하여 비 선형성이 강하다고 할 수는 있지만 진동에 대응하는 재료의 특성은 일반 금속재료에서와 유사한 함수관계에 지배된다고 할 수 있다.

Fig. 10, Fig. 11 및 Fig. 12는 고정 주파수 모드에서 세 종류의 에폭시 수지의 온도변화에 따른 굽힘 탄성계수의 변화, 전단 탄성계수의 변화 그리고, 손실계수의 변화를 각각 나타낸 것이다.

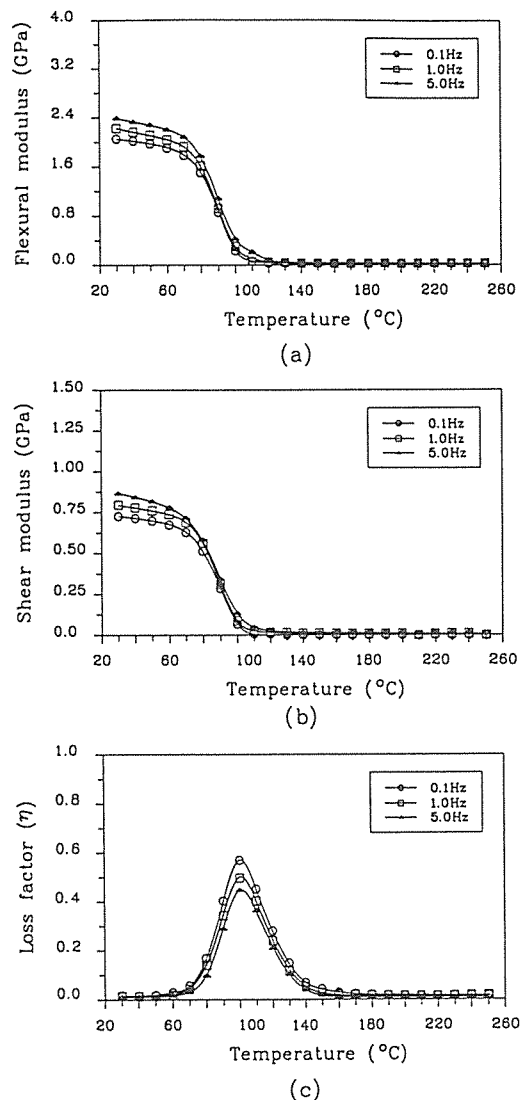
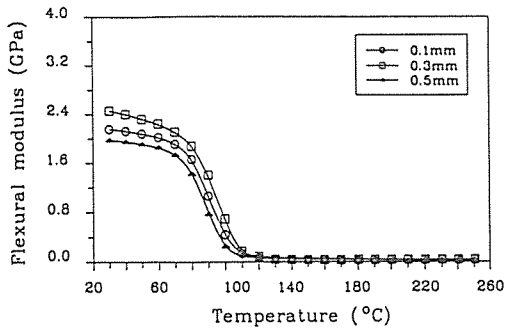
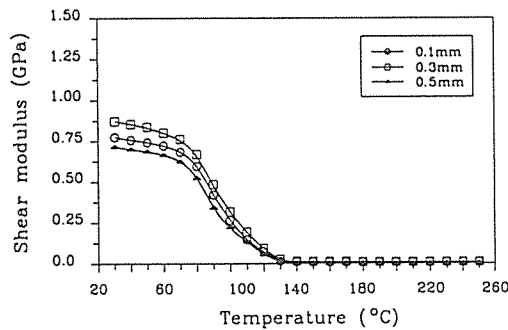


Fig. 8. Thermal properties of the HYSOL EA 9309.2 NA by fixed frequency mode test.

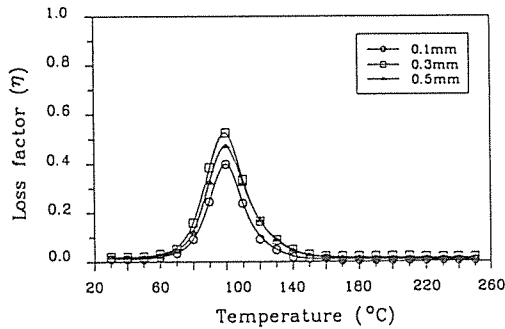
세 종류의 수지 모두 다 온도상승에 따른 경향은 비슷하게 나타나지만 프리프레그용 수지의 경우는 다른 두 수지에 비하여 경화온도가 더 높기 때문에 상당히 높은 온도에 대해서도 우수한 기계적 특성을 나타낸다. 반면에 IPCO 9923 접착제 수지인 경우에는 경화온도 이하의 온도에서도 물리적 특성이 급격



(a)

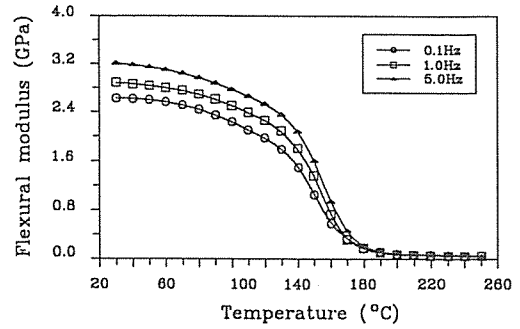


(b)

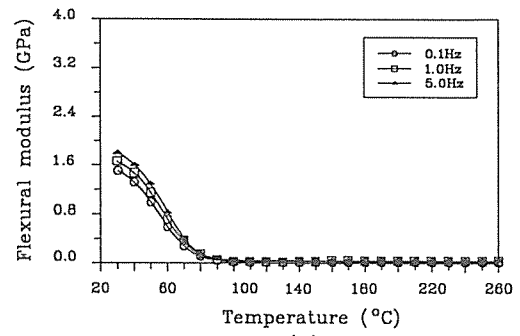


(c)

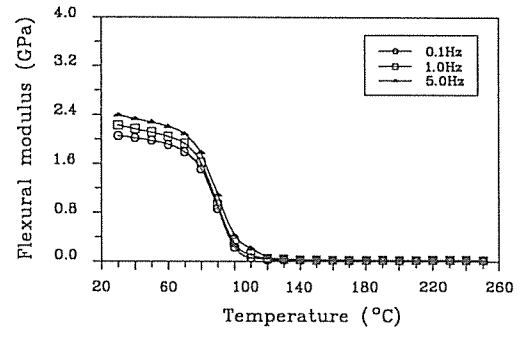
Fig. 9. Thermal properties of the HYSOL EA 9309.2 NA by resonant frequency mode test.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Variation of the flexural modulus by fixed frequency mode test: (a) SKR 2514, (b) IPCO 9923, and (c) HYSOL EA 9309.2 NA.

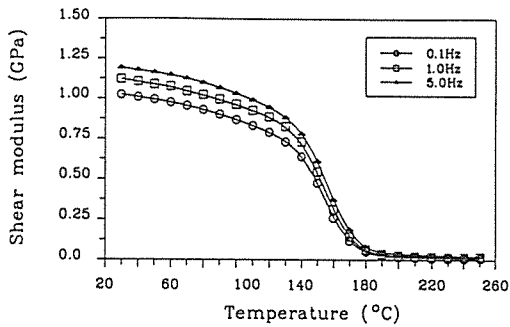
히 떨어진다. 이 실험결과에 인해서, 접착제의 고온 특성은 HYSOL EA 9309.2 NA가 IPCO 9923에 비하여 월등하게 우수하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 고정 주파수 모드에서 주파수를 5 Hz로 실험하였을 때 세 종류의 에폭시 수지의 동탄성계수, 전단 동탄성계수 그리고, 손실계수의 변화

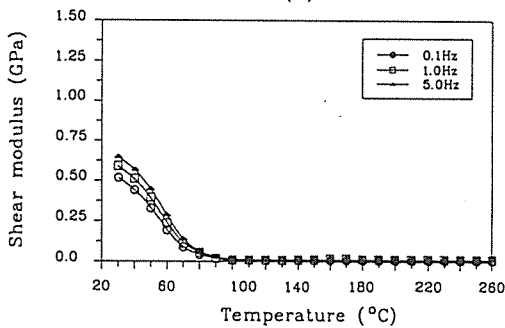
를 온도의 변화에 따라 비교하여 일목요연하게 나타낸 것이다.

#### 4. 결 론

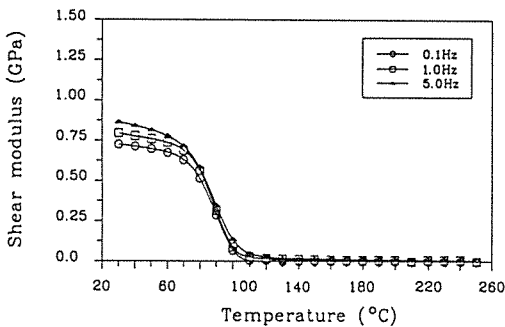
접착제를 사용하는 조인트의 기계적인 특성과



(a)

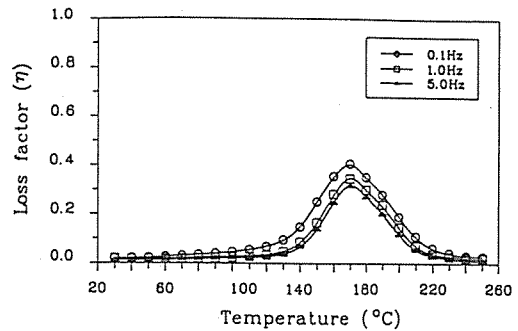


(b)

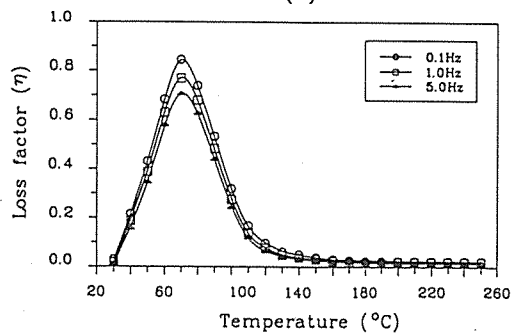


(c)

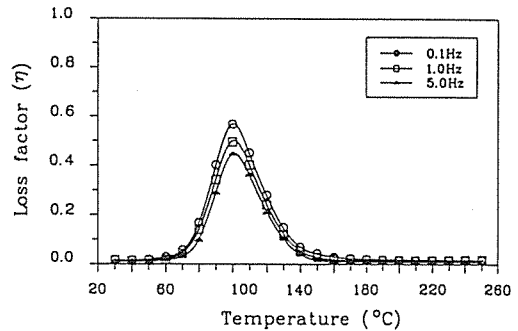
Fig. 11. Variation of the shear modulus by fixed frequency mode test: (a) SKR 2514, (b) IPCO 9923, and (c) HYSOL EA 9309.2 NA.



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Variation of the loss factor by fixed frequency mode test: (a) SKR 2514, (b) IPCO 9923, and (c) HYSOL EA 9309.2 NA.

열적 특성을 연구하기 위하여 SKR 2514 에폭시 수지와 IPCO 9923 및 HYSOL EA 9309.2 NA 등 에폭시 접착제의 특성실험을 수행하였다. 먼저, 상온에서의 기계적 특성을 규명하기 위하여 인장실험, 랩 전단실험, 벌크 전단실험을, 온도변화에 따

른 기계적 특성을 규명하기 위해서 Du Pont 983 DMA를 사용하여 동특성 실험을 수행하였다. 에폭시 수지의 동특성 실험은 진폭 및 주파수의 변화에 따른 진동특성의 변화를 관찰하기 위하여 고정 주파수 모드를 사용하여 실험을 수행하였고, 수지의



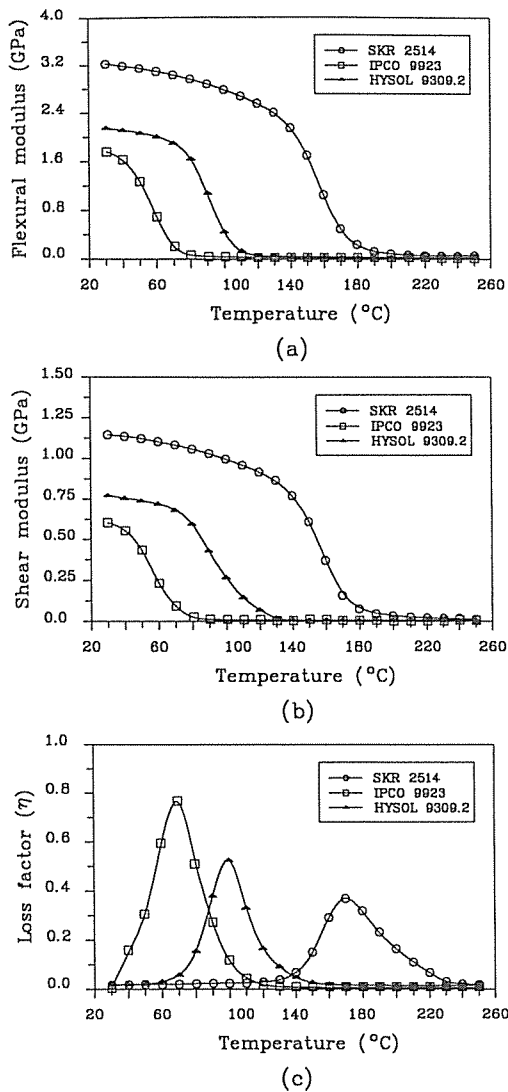


Fig. 13. Variation of the flexural modulus, shear modulus and, loss factor by fixed frequency mode test when the fixed frequency is 5 Hz: (a) flexural modulus, (b) shear modulus, and (c) loss factor.

탄성계수와 손실계수가 진폭과 주파수에 대한 함수관계를 명확히 하기 위하여 공진 주파수 모드에 대한 실험을 일부 수행하였다. 본 연구에서 사용한 고정 주파수는 0.1 Hz, 1 Hz 및 5 Hz 등 세 가지이

다.

이상의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 접착제용 수지는 비선형 거동이 지배적이지만 프리프레그용 수지는 선형 거동을 하며, 상온에서의 접착제용 수지의 인장강도 및 전단강도는 프리프레그용 수지에 비하여 약 1.5배이상 작다.
- (2) 에폭시 수지의 벌크 전단강도는 랩 전단강도에 비해 약 2배이상 크게 평가되었다.
- (3) 수지의 동 탄성계수는 추천한 경화온도를 넘어서면서 급격히 떨어진다.
- (4) DMA에 의해 평가된 재료의 탄성계수는 인장 실험에 의해 평가된 값보다 20-30% 더 크게 나타난다.
- (5) HYSOL EA 9309.2 NA가 IPCO 9923에 비하여 정적 및 열적 특성이 더 우수하다.

## 후 기

본 연구는 영남대학교 학술연구조성비중 1995년 후반기 신입교원 정착연구지원비에 의해 수행된 것으로서 연구비를 지원해준 것에 대해 감사사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. P. McMullen, "Fiber/resin composites for aircraft primary structures: a short history, 1936-1984," *Composites*, Vol. 15(3), 1987, pp. 222~1984.
2. P. K. Mallick, *Fiber reinforced composites - materials, manufacturing, and design*, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, Chapter 1, 1988.
3. S. W. Tsai(Eds.), *Composites design*, 4th ed., Think Composites, Dayton, Section 1, 1988.
4. R. W. Messler, Jr., *Joining of Advanced Materials*, Butterworth-Heinemann, Boston, Chapter 5, 1993.
5. T. J. Reinhart, *Composite*, ASTM International, pp.479~495, 1987.

6. J. R. Vinson and R. L. Sierakowski, *The Behavior of Structure Composed of Composite Materials*, MARTINUS NIJHOFF PUBLISHERS, Chapter 8, 1987.
  7. J. K. Choi and D. G. Lee, "Torque Transmission Capabilities of Bonded Polygonal Lap Joints for Carbon Fiber Epoxy Composites," *Journal of Adhesion*, Vol. 48, 1995, pp.235-250.
  8. D. G. Lee, K. S. Jeong and J. H. Choi, "Analysis of the Tubular Single Lap Joint with Nonlinear Adhesive Properties," *Journal of Adhesion*, Vol. 49, 1995, pp.37-56.
  9. K. S. Jeong, D. G. Lee, and Y. K. Kwak, "Application of Adhesive Joining Technology for Manufacturing of the Composite Flexspline for a Harmonic Drive", *Journal of Adhesion*, Vol. 48, 1995, pp.195-216.
  10. Y. G. Kim, S. J. Lee, D. G. Lee, and K. S. Jeong, "Strength Analysis of Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Steel-Steel Joints Under Axial Loads Considering Residual Thermal Stresses", *Journal of Adhesion*, Vol. 60, 1997, pp.125-140.
  11. Sunkyong Fiber Co. Ltd., Seoul, Korea.
  12. Imperial Polychemical Co., Ltd., Seoul, Korea.
  13. Hysol Aerospace and Industrial Products Division, DEXTER Co., Pittsburg, U.S.A.
  14. Annual Book of ASTM STANDARDS, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," D 638-89, Vol. 08.01, 1989, pp.156-167.
  15. Annual Book of ASTM STANDARDS, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal-to-Metal)," D 1002-72, Vol. 15.06, 1989, pp.46-49.
  16. Du Pont de Nemours & Co. (Inc.), Concord Plaza - Quillen Building, Wilmington, DE 19898.
-