

## 論文

## Composite 판스프링 제작시의 동적유전성분석

유원재\* · 김호철\*\*

Dynamic Dielectric Analysis During Cure Process of the  
Glass/Epoxy Composite Leaf Spring

Won Jae Yu\* and Ho Chul Kim\*\*

## ABSTRACT

Dynamic dielectric analysis method was investigated to find out the parameter of monitoring the viscosity change of epoxy resin in composite leaf spring during the initial dwelling time of the curing process. Prototype hyperbolic Glass/Epoxy composite leaf springs have been fabricated with compression molding method. During the early stage of cure, dynamic dielectric analysis was performed to pick up the optimum compression onset point. The equivalent capacitance  $C$  and the equivalent conductance  $G$  have been measured at the frequencies 10KHz, 50KHz, 100KHz and 500KHz. The dipole relaxation time in the epoxy(or in the preform) was proven to be the  $10E-4$  sec. order.

## 요 약

Composite 판스프링 제작시 수지의 점성변화를 관찰하기 위한 수단으로서의 동적 유전성분석 방법을 고찰하였으며, 복소 유전상수의 실수부가 점성변화를 반영하는 인자임을 증명하였다. Glass/Epoxy를 소재로 하여, Hyperbolic형 Composite 판스프링을 Compression Molding 방법으로 제작하였고, 성형시 동적유전성분석방법으로 10KHz, 50KHz, 100KHz, 및 500KHz.의 주파수 영역에서 등가

\* 정회원, (주) 대한항공 한국항공기술연구원

\*\* 정회원, 한국과학기술원 물리학과

Capacitance C와 등가 Conductance G를 연속적으로 측정하였다. 이를 통해, 성형 초기 수지의 점성변화를 관찰, 최적시점을 찾아내어 가압함으로써 설계목표를 만족하는 Prototype를 제작할 수 있었다. Glass/Epoxy 판스프링 제작시의 동적유전성분석에는 10KHz의 주파수 영역이 적합하였고, 이로써 Epoxy의 Relaxation 시간은  $10^{-4}$ 초의 Order를 갖는 것을 알 수 있었다.

## 1. 서 론

자동차의 경량화는 연비 향상의 측면에서 뿐만 아니라, 특히 Unsprung Mass를 구성하는 구조요소의 경우 경량화를 통해서 차량의 진동 특성을 개선함으로써 조종성 향상, 승차감 개선 등을 도모할 수 있으므로, 성능 향상의 측면에서도 매우 주요한 설계목표가 되어 왔다[1,2]. 70년대 중반의 Oil Shock를 경험하면서 차량의 경량화에 대한 필요성이 더욱 증대되었으며, 이에 따라 철강재료로 설계제작되어온 차체구조 및 요소부품들을 고강도 저비중의 섬유강화복합재료로 대체하기 위한 연구가 진행되어왔다. 그 대표적인 예가 동력 전달 장치의 Drive Shaft와 현가장치의 판스프링이다.

Composite 판스프링에 관한 연구는 60년대 중반에 타당성 연구로 시작되었고, 그 본격적인 개발 연구는 70년대 중반 이후에 활발히 진행되었다[3]. 기본소재로 보강강재료는 Carbon섬유, Glass섬유 또는 그 Hybrid로, 수지로는 Epoxy, Polyester, Vinylester 등으로 하여, Triangular[4], Parabolic[5,6] 및 Hyperbolic[7,8] 형상을 갖는 여러 Prototype들이 시제 개발되었고, 그 특성에 대한 연구결과가 발표되어왔다. 이러한 연구결과, 수지의 경우 피로강도 및 Creep강도가 우수한 Epoxy가, 섬유의 경우 저가이면서 Energy Storage Capacity의 측면에서 우수한 Glass섬유가 Composite 판스프링의 소재로 적합한 것으로 파악되었고, 80년대에 들어서는 GM의 Corvette[9], Nissan의 Vanette[10] 등에 Hyperbolic 형상을 갖는 Glass/Epoxy 소재의 Transverse형 Composite판스프링이 채택되기에 이르렀다.

그러나, 이러한 연구 및 실용화 사례에도 불구하고 Composite 판스프링의 실용화에는, Composite 판스프링의 체결부(중앙 Clamp부 및 Eye부) 설계의

어려움과 더불어 성형공정의 설계문제가 주요한 제약요인이 되고 있다. 특히, 생산성이 비교적 덜 문제가 되는 항공우주분야에서와는 달리, 자동차분야의 경우, Mass Production이 가능한 공정설계가 매우 중요하며 반드시 선결되어야 하는 문제이다[11].

이에따라 본 연구에서는, Composite 판스프링의 성형공정설계와 공정최적화를 위한 기본방향을 설정하기 위하여, Composite 판스프링의 성형시 수지의 점성변화를 탐지하여 Void Content를 최소화할 수 있는 최적의 가압시점을 찾아내기 위한 방안으로서 동적유전성분석(Dynamic Dielectric Analysis)방법을 고찰하였다. 또한, 이를 이용, Compression Molding방식에 의한 Glass/Epoxy소재의 Hyperbolic형 판스프링의 시험제작시, 동적유전성분석(Dynamic Dielectric Analysis)방법으로 등가 Capacitance와 등가 Conductance를 측정, 수지의 초기점성변화를 연속적으로 관찰하여 최적의 가압(Compression)시점인 수지의 Gellation점을 탐지하여 가압, 성형함으로써 Prototype스프링을 제작하였다.

## 2. Composite판스프링의 제작공정 및 동적유전성분석

### 2-1. 판스프링 형상과 제작공정

섬유 강화 복합재 (Fiber Composite)의 뛰어난 Energy Storage Capacity( $=1/2 E \epsilon_f^2$ , E : Young율,  $\epsilon_f$  : Failure Strain)는 판스프링 형상설계에 있어 Design Flexibility를 제공하게 되었다. 이에 따라 철강재 판스프링이 주로 Triangular형(접판)으로 설계될 수 밖에 없는데 비해 Composite 판스프링의 경우, Parabolic형(스프링 길이에 따라 폭은 일정, 두께가 Parabolic한 테이퍼를 갖는 형상) 또는 Hy-

perbolic형 (스프링 길이에 따라 단면적이 일정, 두께는 선형적으로 변하고 폭이 Hyperbolic하게 변하는 형상)등의 단매(Mono-Leaf)의 테이퍼 판스프링으로 설계될 수 있다.

Composite 판스프링의 제작공정 또는 제작방식은, 이러한 스프링의 형상에 의한 영향을 받게 된다. Parabolic형의 스프링은, 스프링 길이에 따른 테이퍼를 주기 위해 Prepreg제단→적층→성형의 공정이 필수적이다. 이 경우, 적층시 Prepreg배열을 조정함으로써, 스프링 폭(Width) 방향의 보강이 가능하고, 따라서 Bolt등의 Mechanical Fastening방법으로 차체체결을 위한 Fitting을 스프링 몸체에 장착하기가 비교적 용이하다. 반면, Cost 및 생산성의 측면에서는 바람직하지 않은 것으로 보인다.

보강섬유가 스프링길이 방향으로만 배열되는 Hyperbolic 스프링의 경우, Pulforming(Curved Pultrusion)방식 또는 Compression Molding방식으로 제작될 수 있다. 이 두 방식은, 거의 유사하나, Compression Molding 방식의 경우 Preform의 제작공정이 있는 점이 다르다. 이 경우, Preform은 Filament Winding에 의해 제작될 수 있고, 비교적 단순한 설비를 사용하여서 Preform을 성형하여 스프링을 제작할 수 있으므로 Cost 및 생산성 양면에서 Mass Production의 수단으로 적합한 것으로 보인다.

## 2-2. 동적유전성분석(Dynamic Dielectric Analysis)

### 2-2-1. 동적유전성분석의 이론

유전물질(Dielectric Material)이 A.C.Field  $\vec{E} = \vec{E}_m e^{i\omega t}$  하에 있을때(그림 1a) 물질 내에서는 Polarization이 생긴다. 이 과정에서의 Time Delay 때문에 전기변위(Electric Displacement)  $\vec{D}$ 가  $\vec{E}$ 와 Phase 차이를 갖게 되는 Relaxation 현상이 발생하고, 이 경우  $\vec{E}$ 와  $\vec{D}$ 의 관계는,

$$\vec{D} = \epsilon^* \vec{E} = \vec{D}_m e^{i(\omega t - \delta)} \quad (1)$$

이는, 유전상수  $\epsilon^*$ 가 복소함수임을 나타낸다. 즉,

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (2)$$

복소 유전 상수  $\epsilon^*$ 는 A.C.Field의 주파수에 의해 영향을 받게 되고, 주파수가  $10^4 \sim 10^6$  Hz의 영역인 경우, Relaxation은 주로 Dipole Orientation에 기인한다[12]. Relaxation현상은 Relaxation Time  $\tau$  (외부에서 걸어준 전기장  $\vec{E}$ 를 제거했을때 평형 상태로 돌아가는 시간)로 특성지을 수 있고,  $\tau$ 와  $\epsilon^*$ 의 관계는 Debye[13]에 의해 다음과 같은 식으로 표기된다.

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty)/(1 + i\omega\tau) \quad (3)$$

이때  $\epsilon_s : \omega \rightarrow 0$ 일때 물질의 유전상수

$\epsilon_\infty : \omega \rightarrow \infty$  일때 물질의 유전상수

(2), (3)식으로부터

$$\begin{aligned} \epsilon' &= \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty)/(1 + \omega^2 \tau^2) \\ \epsilon'' &= (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \omega \tau / (1 + \omega^2 \tau^2) \end{aligned} \quad (4)$$

Dipole Orientation에 의한 Relaxation은 물질 내부 분자들의 회전운동을 야기시키고, 분자의 회전운동은 물질의 점성에 의해 영향을 받는다. 따라서 Relaxation Time  $\tau$ 는 물질의 Viscosity  $\eta$ 에 의해 영향을 받게 된다. 일반적인 점성유체의 경우,  $\tau$ 와  $\eta$ 와의 관계는 다음과 같이 표시된다[14].

$$\tau = f(\eta/T) \quad (5)$$

T: 온도

(4), (5)식에서 보는 바와 같이,  $10^4 \sim 10^6$  Hz의 A.C.Field 하에서 물질의 복소유전상수는, 특히 실수부는, 물질의 Viscosity의 변화를 직접적으로 반영하는 Parameter인 것을 알 수 있다. 이를 이용하여, 복소유전상수의 변화를 Monitoring함으로써 물질의 Viscosity의 변화를 비파괴적인 방법으로 탐지할 수 있다.

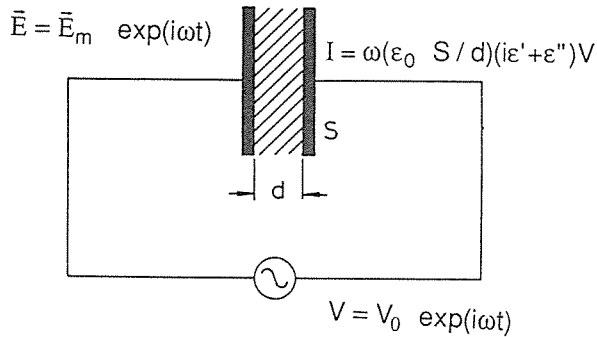


Fig. 1. (a) The current in dielectric materials under A.C. Field.

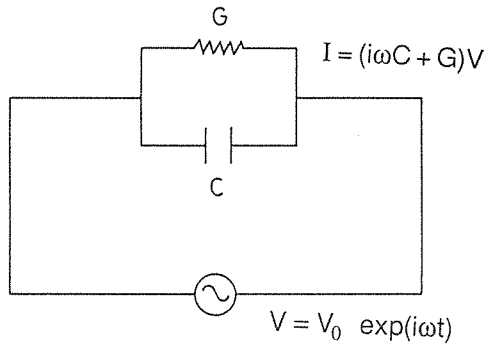


Fig. 1. (b) The equivalent circuit for dielectric materials

### 2-2-2. 복소유전상수의 측정

그림1(a)에서, 전압  $V = V_0 e^{i\omega t}$ 가 걸릴때, Capacitor에는 Charge  $Q = C^* V$ 가 유도되고 복소 Capacitance  $C^*$ 는 다음과 같다.

$$C^* = \frac{\epsilon^* \epsilon_0}{d} S \quad (6)$$

$\epsilon_0$  : 진공(Vacuum)의 유전상수

$d$  : 전극간 거리

$S$  : 전극면적

이때 전류는,

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{\epsilon_0 S}{d} (i\epsilon' + \epsilon'') \omega V \quad (7)$$

(7)식으로 표시되는 전류는 그림 1 (b)에서 보는 바와 같은 A.C. Resistance - Capacitance 병렬회로에서의 전류와 유사하고((8)식), 따라서 유전물질은 그림 1 (b)의 등가회로로 나타낼 수 있다.

$$I = (i\omega C + G)V \quad (8)$$

$C$  : 등가 Capacitance

$G$  : 등가 Conductance ( $=1/R$ )

이에 따라 (6), (7)식과 더불어, 그림1 (b)의 R - C 등가회로를 이용하여 측정한  $G$ ,  $C$ 와 복소유전상수  $\epsilon^*$ 를 다음과 같이 관계지을 수 있다.

$$\epsilon' = C/\epsilon_0 \cdot d/S \quad (9)$$

$$\epsilon'' = G/\omega\epsilon_0 \cdot d/S$$

(2), (4) 및 (9)식으로 표시되는 복소유전상수는 실수부  $\epsilon'$ 와 허수부  $\epsilon''$ 의  $\omega\tau$ 에 대한 의존성을 그래프로 나타내면 그림 2에 보는 바와 같다. Composite 스프링을 성형하기 위해 Preform을 금형에 삽입하였을때, 수지는 초지 Melting(Liquid)→Gellation(Rubber)→Vitrification(Glass)의 Phase변화를 하

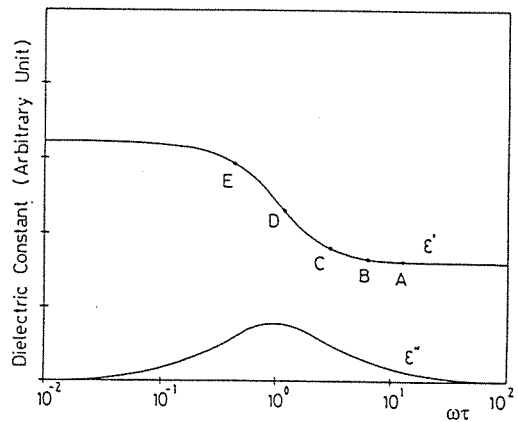


Fig. 2. The  $\omega\tau$  dependence of  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$

게 되고 따라서 수지점도(또는 Relaxation 시간  $\tau$ )는 초기의 수지 Melting에 의해 점차 감소하다가 Gelation 시작 이후 급격히 증가하는 경향을 갖게 된다. 이와 같은  $\tau$ 의 변화추이에 따라 ( $\omega$ 는 일정), 복소 유전상수의 실수부( $\epsilon'$ )는 그림 2에서 보는 바와 같이 초기의 임의의 점으로부터 점차 증가하다가 다시 감소하는 A→B→C→D→C→B→A의 형태로 변하게 될 것으로 추정된다. 이 경우,  $\epsilon'$ 가 최대가 되는, 즉 수지점도가 최소를 나타내는 영역이 수지의 Liquid → Rubber Phase 변화점인 Gellation점이며, 성형 압력을 수지에 가하기 위한 최적의 시점이다.

### 3. 실험 및 결과분석

그림 3은 본 연구에서 시험제작한 Composite 판스프링의 제작공정에 대한 개요도이다. 스프링 형상 설계 및 설계목표 (Design Goal)는 참고문헌[8]에 나타난 바와 같다. Composite 판스프링의 제작을 위한 소재는 다음과 같다.

섬유 : E-Glass(Owens Corning Co. 475KA-2.275 Roving)

Epoxy수지 : Ciba Geigy LY-556(DGEBA Type)

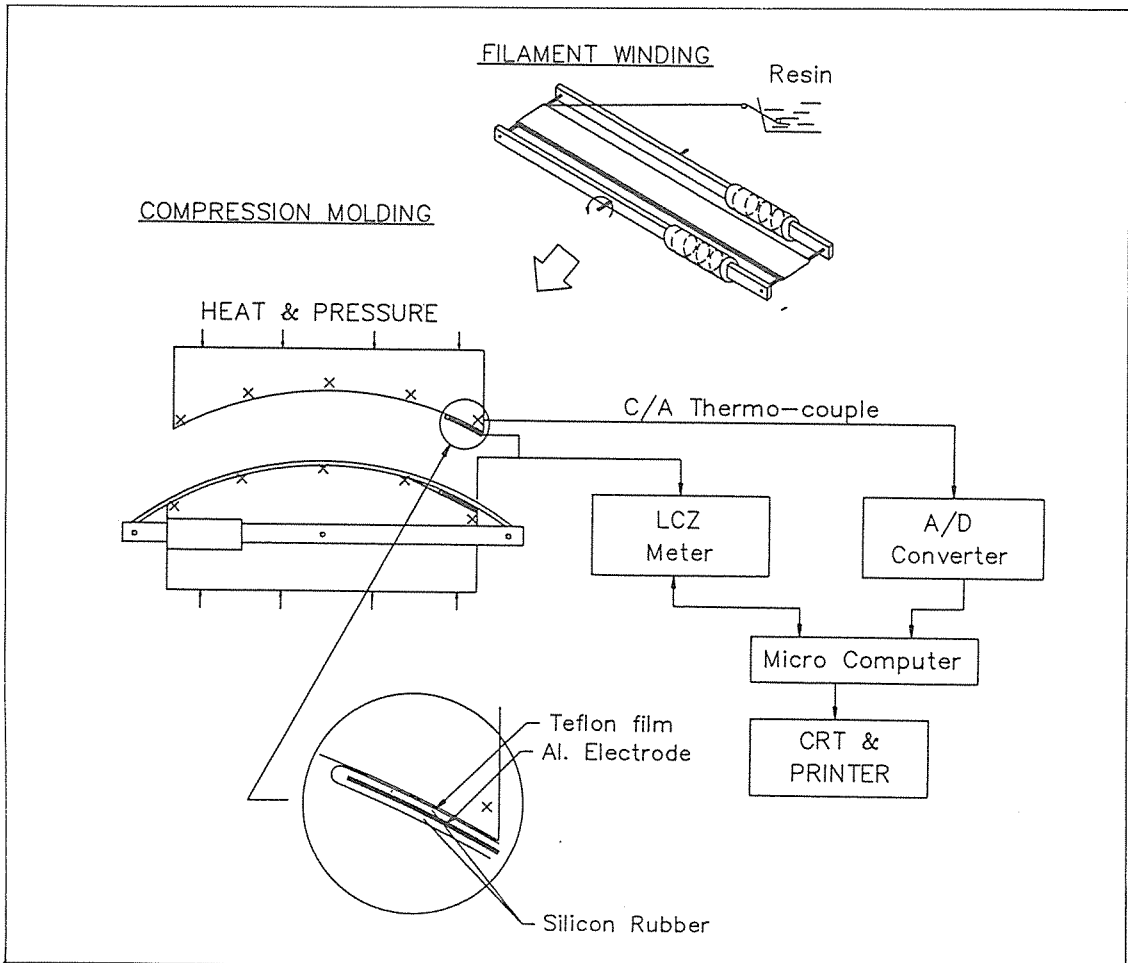


Fig. 3. Schematic diagram of fabrication and the dynamic dielectric analysis.

Hardener : Ciba Geigy MY-917(Anhydride)  
Accelerator : Ciba Geigy DY-070(Meterocyclic Amine)

Filament Winding방식에 의한 Preform제작시, Mandrel의 Frame에는 Spring을 장착하여, Roving에 일정한 인장력을 걸리도록 함으로써, Preform내 각 Roving(또는 섬유)의 길이가 균일하게 배열되도록 하였다. Mandrel의 회전속도는 수지의 함침을 고려 120회/분으로 하였고, 수지함침이 원활히 이루어지도록 하기 위해 수지온도를 40°C가 유지되도록 하였다.

제작된 Preform은 알루미늄 금형에 삽입하여 Hot Pressing방식으로 시편을 성형하였다. 상·하부금형에는 각각 5군데에서 Chromel-Alumel 열전대를 사용, 연속적으로 온도를 측정하였고 상호간의 온도구배가 5°C이내에 들도록 Heat Unit을 제어하였다.

동적유전성분석을 위해, Al. 전극을 상하부 금형 끝부분에 부착하였고, 전극은 테프론 필름 및 Silicon Rubber를 이용하여 Insulation하였다. 동적유전성 분석에는 Hewlet Packard 4277A LCZ Meter를 사용하였으며 10KHz, 50KHz, 100KHz, 500KHz의 주파수 영역에서 30초 간격으로 등가 Capacitance C와 등가 Conductance G를 측정하였다. 그 전형적

인 측정결과(C의 변화추이)를 그림 4에 나타내었으며, 이는 초기치를 1로 하여 Nomalize한 결과이다.

동적 유전성 분석시(그림 4),  $\omega=10\text{KHz}$ 일때의 등가 Capacitance  $C(\omega\epsilon')$ 가 가장 민감하게 반응하였다. 이것은 연구에 사용된 DGEBA type의 에폭시 수지내 Dipole의 Relaxation time  $\tau$ 는  $10^{-4}$ 의 Order를 갖는 것을 보여준다. Gellation은 Preform이 120°C의 금형내에서 약 7분 경과후에 시작되었고, 이 시점에서 가압을 단계적으로 하였다. 그림 4에서는 Gellation이후  $C(\omega\epsilon')$ 의 값은 급격히 감소되는 경향을 보여주고 있는데 이는 수지의 Liquid→Rubber Phase 변화에 의한 영향과 함께, 또 가압으로 인한 전극간 거리 d의 감소에 의한 영향이 혼합되어 나타난 것이다. (전극간 거리 d는, 가압에 따라 초기치의 약 1/2 정도로 감소하였다).

그림 5는 Composite 판스프링 성형을 위한 Curing Cycle이다. 초기 가압과정은 Composite 판스프링 내부의 Void제거와 설계 치수 획득을 위한 매우 중요한 공정이다. 성형시 압력크기(성형압력)는 금형의 형상 및 수지 유동특성에 의해 영향을 받게 되므로, 반복시행에 의해 표준공정압력을 Set Up하는 것이 불가피하다. Preform의 초기 가압시, 스프링 몸체에 걸리는 압력의 크기는 5~10Kg중/Cm<sup>2</sup>정도가 적당한 것으로 보인다. 그림 5의 압력변화는, Press Hydraulic 실린더 RAM의 압력으로, 금형이 서로

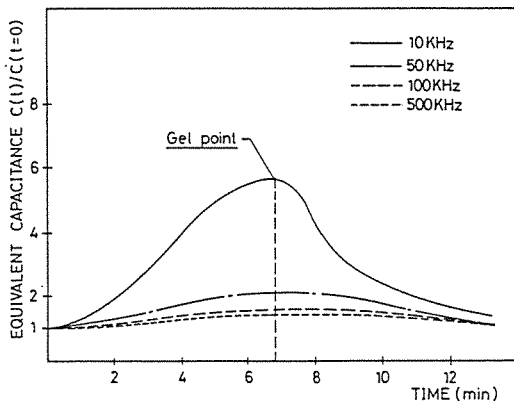


Fig. 4. The typical result for measurement of C during the early stage (initial dwelling period) of the curing process.

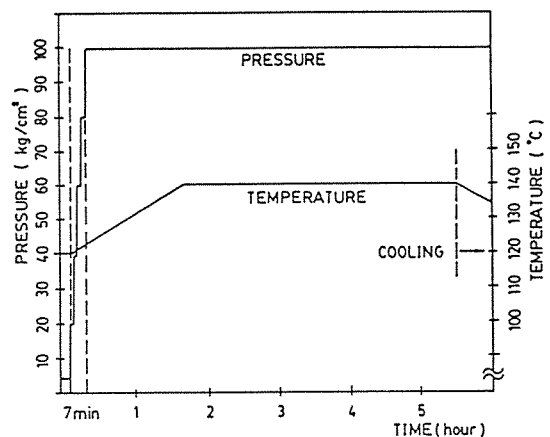


Fig. 5. The typical curing cycle

달은 이후까지(판스프링의 설계 치수(두께)를 얻기 위해)가압한 결과이고, 따라서 스프링 자체에 걸리는 압력과, 상하부 금형의 접촉 압력이 합해진 값이다.

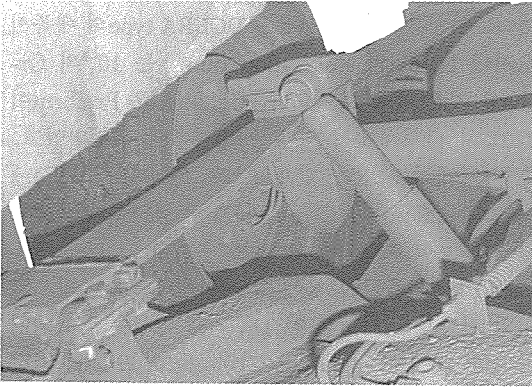


Fig. 6. The car installation of the prototype composite leaf spring

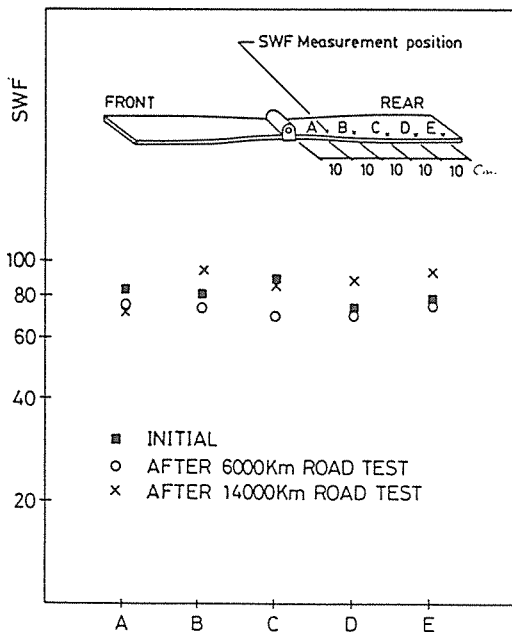


Fig. 7. The result of the SWF (stress wave factor) measurement during road test.

제작된 Prototype Composite 판스프링은 육안 검사결과 별다른 결함이 없는 것으로 판단되었고,

Bench Test결과 참고문헌[8]에서 제시된 설계목표 [스프링 상수, 강도, 피로수명등]를 만족시켰다. 이에 따라, Prototype 스프링을 실차 주행시험(Road Test)을 실시하였다. 그림 6은 Prototype Composite 판스프링을 차체에 체결한 형상이다. 주행시험은 총 14,000Km를 실시하였으며, 주행시험중 육안 검사 및 Acousto-Ultrasonic방법[15]에 의한 Stress Wave Factor 측정을 실시하였다. 이로써 Damage의 생성이 없음을 확인할 수 있었다. Stress Wave Factor의 측정결과는 그림 7에 나타내었다. 주행시험 전과 시험후의 Stress Wave Factor가 변동이 없음을 보여주고 있다.

#### 4. 결론 및 향후 전망

본 연구에서는, Compression Molding방식에 의한 Composite 판스프링의 제작시 수지의 초기 점성 변화를 Monitoring함으로써 가장 적절한 가압시점을 찾아내기 위한 방안으로서 동적유전성분석을 시행하였다. 또한 이를 응용하여, 별다른 시행착오없이, 설계목표를 만족하는 기계적 특성을 갖는 Prototype Composite 판스프링을 성형할 수 있었으며, 이에 따라 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 복소유전상수의 실수부( $\epsilon'$ )은, 수지의 점성 변화를 직접적으로 반영하는 Parameter이고, R-C등가회로를 이용, 등가 Capacitance C를 측정함으로써,  $\epsilon'$ 의 변화를 관찰할 수 있다.

(2) Prototype Composite 판스프링의 초기성형 과정(Initial Dwelling)중의 동적유전성분석시,  $\omega = 10\text{KHz}$ 일때  $C(\propto \epsilon')$ 가 가장 민감하게 변화하였고, 이로써 연구에 사용된 DGEBA type Epoxy 수지의 Dipole Relaxation시간  $\tau$ 가  $10^{-4}\text{sec.}$ 의 Order (특히 Gellation Point부근에서)임을 알 수 있다.

본 연구에서 Prototype 1개의 성형에는 약 14시간 (Preform제작 3시간+성형 5.5시간+후경화 6시간)이 소요되었다. 이는 연구에 사용된 수지가 일반수지(Standard Epoxy System)였고, 또한 금형에 냉각장치를 설치하지 않았기 때문이나, 급속경화수지(Fast Curing Resin System)의 응용과, 금형의 개선(Cooling Unit의 설치 등)으로 제작시간을 단축할

수 있을 것이다. 또한 성형시 수지의 Vitrification (Rubber→Glass Phase변화)을 Monitoring함으로써[16] 성형과 후경화 공정을 최적화시킬 수 있을 것으로 전망된다.

## 참 고 문 헌

1. K.H.Bayer, Engineering design handbook, AMC Pamphelt AMCP 706-356, Headquarters, U.S. Army Material Command, April, 1967.
2. J.B.Cady and R.A.H.Aston, Vehicle suspension design to reduce road damage, Automotive Engineer, IMechE, 1975. pp57-60
3. T. Goette, R.Jakobi and A.Puck, Fundamentals of the dimensioning of fibre/plastics composite leaf spring of commercial vehicle application, Kunststoffe 75(1985)2. pp17-19
4. R.L.Daugherty, Composite leaf springs in heavy truck applications, Composite Materials Japan-US Conference, 1981. pp529-538
5. M.Lea and J.Dimmock, The development of composite leaf springs for commercial vehicle application, Fibre Reinforced Composites, International Conference, Liverpool, April, 1984. pp 10.1-10.7
6. K.Tanabe, T.Seino and Y.Kajio, Characteristics of carbon/glass reinforced plastic leaf spring, SAE Technical Paper 820403. pp1628-1636
7. C.J.Morris, Composite intergrated rear suspension, Composite Structures, 5(1986). pp233-242
8. W.J.Yu and H.C.Kim, Double tapered FRP beam for automotive suspension leaf spring, Composite Structures, 9, 1988. pp279-300
9. B.E.Kirkham, L.S.Sullivan and R.E.Bauerle, Development of LITEFLEXtm suspension leaf spring, SAE Paper 820160. pp663-673
10. N.Yamamoto and S.Hiromoto, GFRP leaf spring for Vanette, Reinforced Plastics(in Japanese), Vol.32, No.9, pp30-31
11. P.Beardmore, Composite structures for automobiles, Composite Structures, 5, 1986. pp 163-176
12. R.Coelho, Physics of dielectrics for the engineer, Elsevier Scientific Publishing Co., New York, 1979. p75
13. P.Debye, Polar molecules, Dover, New York, 1945.
14. V.Daniel, Dielectric relaxation, Academic Press, New York, 1967. Ch11
15. A.Vary and K.J.Bowles, NASA TM X-73646, 1977.
16. S.S.Yoon, W.J.Yu and H.C.Kim, Phase transition of epoxy resin during the curing at constant ambient temperature monitored by ultrasonic velocity, to be published.