

열팽창 치공구를 이용한 복합재료의 성형 및 압축압력 연구

구미경 · 금성우 · 이영관* · 남재도[†] · 하종민** · 최홍섭** · 이석현*** · 서문호***

성균관대학교 고분자공학과, *화학공학과

**대한항공 항공기술연구원

***이주대학교 공업화학과, 화학공학과

(1998년 1월 21일 접수, 1998년 6월 12일 채택)

Consolidation Pressure Control in Thermally-Expandable Rubber-Tool Process for Polymeric Composite Materials

Mi-Kyung Ku, Sung-Woo Keum, Young Kwan Lee*, Jae-Do Nam[†], Jong Min Hah**,
Heong Soab Choi**, Suck-Hyun Lee*** and Moon Ho Suh***

Dept. of Polymer Science and Engineering and *Chemical Engineering,
Sung Kyun Kwan University, Suwon, Korea

**Korea Institute of Aerospace Technology, Taejon, Korea

***Division of Chem. Eng. and Bio Tech., Ajou University

(Received 21 January 1998; accepted 12 June 1998)

요 약

본 연구에서는 복합재료의 가공에 있어서 압축(consolidation) 또는 함침(infusion)에 필요한 압력을 열팽창치공구를 이용하여 생성시키는 열팽창치공구 공정을 연구하였다. 항공용 복합재료의 가공에 적합한 실리콘 계통의 고무치공구를 선정하였고 이 소재에 대하여 온도가 상승함에 따라 열팽창으로 생성되는 압력을 예측하기 위하여 열팽창계수와 effective bulk modulus를 측정하였다. 또한 1-D radial constrained expansion계를 설정하여 온도에 따른 압력형성을 실험적으로 측정하였고 이론과 비교하였다. 온도에 따른 압력생성을 예측하기 위한 모델링을 통하여 온도에 따른 압력증가를 열팽창계수와 bulk modulus의 함수로 나타낼 수 있었으며, 압력은 자유부피와 몰드 configuration에 따라 영향을 받는 것으로 확인되었으며 이에 대한 정량적인 예측도 가능하였다.

Abstract—As a novel composite manufacturing process, the thermally-expandable rubber-tool process was investigated in order to obtain the enhanced laminate consolidation and resin infusion in both thermoplastic- and thermoset-based composite systems. A silicon-based rubber tool was chosen for the primary applications in aircraft environments. The thermal expansion coefficient and bulk modulus of the rubber tool were measured by a 1-D radial expansion system and subsequently used to predict the pressure generated by the expanding rubber tool as a function of temperature. The generated pressure was expressed by the thermo-physical properties and as a function of processing temperature. Finally, the mold configurations including the relative gap and rubber tool volumes influenced the characteristic features of the pressure build-up in rubber-tool based thermal processing.

Key words: Thermally-Expandable Rubber Tool, Bulk Modulus, Consolidation, Composite Material

1. 서 론

고성능 섬유보강 복합재료(high performance fiber reinforced composites)는 무게, 부식, 강도, 탄성, 피로강도 등의 기계적 물성이 우수하고 특히 가공 및 디자인에 있어서 유연성이 있기 때문에 다양한 용도의 구조 재료로서 금속 재료와 경쟁하면서 계속 그 사용 범위를 넓히고 있다. 현재 복합재료는 직접 하중을 받는 1차 구조물로 사용

되기 시작하면서 고기능화 고성능화 되는 추세에 있다. 이러한 복합재료의 제조과정은 크게 2가지로 나뉘는데 유체인 수지가 경화되기 까지 한번의 공정으로 형성되고 섬유와 매트릭스와의 혼합도 공정 중에 행해지는 wet forming process와 compounding과 lay-up이 분리되어 있는 premix나 prepreg를 사용하는 공정이다[1-4].

현재 대부분의 항공기용 복합재료 구조물은 프리프레그/오토클레이브(prepreg/autoclave) 공정에 의하여 제작되고 있다. Autoclave 공정은 적당한 온도와 압력을 주어 복합재료의 consolidation을 유도하는 공정이며 결과적으로 적층된 프리프레그에 균일하고 우수한 물

[†]E-mail: jdnam@yurim.skku.ac.kr

성의 복합재료를 생산할 수 있는 공정이다. 그러나 autoclave 장치는 매우 고가이고 노동인력이 많이 요구되는 등 생산성이 매우 낮다. 이와 더불어 항공기의 rudder 등과 같은 3차원의 복잡한 구조물에서는 모든 부위를 균일하게 consolidation을 시키기가 어렵고 그것을 조절, 향상시키는데에도 어려움이 있다고 지적되어 왔다. 특히 부품이 크고 복잡한 경우에는 더욱 어려움이 큰데, 예를 들어 항공기의 러더, 에일러론, 스폐일러, 플랩 등의 구조물은 매우 유사한 구조형태를 띠고 있으나 이들이 고성능 민항기에 사용되는 경우에는 구조가 복잡해지고 크기가 커짐으로 해서 cocuring 공정을 수행하는 것이 유리하고 이때에는 균일한 consolidation을 유도하는 것이 주요한 문제로 대두되는 것이다[5-7].

Cocuring 공정은 adhesive bonding 공정과 비교되는데 adhesive bonding 공정은 rib이나 skin, spar 등의 부품을 개별적으로 경화시킨 후 이를 접착제를 사용하여 접합시키는 공정이다. 공정이 쉬운 반면 부품이 커지고 복잡해지면 접착효율이 떨어지고 경우에 따라서는 접착이 불가능해지기도 하며 결국 균일한 압력을 주기가 어려운 것이다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 공정의 향상을 위한 다양한 연구가 진행되고 있는데 열팽창몰드 방법(thermal expansion molding method)이 그 중의 하나이다[8-12].

이 방법은 열팽창계수의 차이가 큰 두 재료를 사용하는데 온도변화에 따른 체적변화의 차이를 이용하여 성형에 필요한 압력을 생성하는 것이다[9]. 이것은 고무치공구와 금속 몰드 사이에 프리프레그를 넣고, 온도가 상승함에 따라 고무치공구의 부피가 팽창하고자 하는 것을 몰드가 억제함으로써 압력을 생성하는 것으로서, Trapped Rubber System이라고도 불린다[10]. 이 고무치공구의 configuration에 대하여 Fig. 1에 정리해 보았다. 가공할 재료가 열경화성수지인 경우에는 경화온도까지, 만일 가공하고자 하는 복합재료의 수지가 열가소성수지인 경우에는 용융온도까지 온도를 상승시키게 되는데 이러한 온도의 상승에 의하여 고무치공구는 팽창을 하게 된다. 이때 고무치공구의 열팽창이 다른 재료에 비해 매우 크므로 팽창된 부피에 의해 laminate의 consolidation을 위한 압력이 형성되는 것이다. 이러한 압축 압력에 의해 결국 void가 감소하게 되며 균일한 압력을 가할 수도 있게 된다. 균일한 압력은 성형시 표면에 생기기 쉬운 wrinkling 현상이나, 각도가 있는 복합재료 성형에서는 mold각보다 적게 성형이 되는 spring-back 현상, 그리고 모서리 부분에 흔히 발생하는 resin

starvation 현상 등을 억제할 수 있다고 여겨진다[13-15].

이 공정은 제조할 부분의 형식이 복잡한 경우 외에도 크기가 큰 경우에 bagging없이도 가공이 가능하다는 장점이 있고, 온도가 올라감에 따라 압력이 생성하는 것이기 때문에 적절한 고무치공구를 선정하면 원하는 만큼 높은 압력을 생성시키는 것도 가능하다. 또한 조작성 및 적응이 매우 간단하여 안전하고 경제적인 공정이며 사용한 고무치공구의 재사용이 가능하다는 면에서도 다른 복합재료 성형법보다 우수한 장점을 가지고 있다. 여기서 중요한 고무치공구의 물성인 bulk modulus(K)는 hydrostatic pressure를 가했을 때 가한 압력과 줄어드는 부피와의 관계에서 정의되는 물성으로서 Young's modulus(E)나 shear modulus(G) 그리고 Poisson's ratio(ν)와의 관계로 표시할 수 있는 물성이다[16]. 고무치공구의 부피팽창에 따른 압력의 형성은 K와 밀접한 관계를 가지며 특히 온도의 변화에 의하여 변화하는 부피팽창률이 주요한 요인이 된다. 따라서 본 연구에서는 열팽창치공구 공정을 개발하기 위하여 열팽창계수가 금속의 10배 이상이며 Poisson's ratio가 0.5에 가까운 합성고무계통의 탄성중합체를 선정하고, 이 소재의 열적 안정성 등의 기초 물성을 측정하였다. 또 consolidation의 향상을 위하여 밀폐된 공간에서 rubber의 열팽창과 이에 따른 압력을 측정하여 경화 반응 중에 발생하는 prepreg의 viscoelastic consolidation 현상을 정량적으로 해석하는데에 그 목적이 있다.

2. 이 론

2-1. Thermodynamic Properties of Rubber

몰드 안에서 rubber와 prepreg 사이의 복잡한 압력(P), 부피(V), 온도(T)와의 관계를 알아야 consolidation을 해석할 수 있게 된다. 이 관계는 온도에 따른 bulk modulus(K)와 열팽창계수(α)로부터 얻어지는 thermal pressure coefficient(γ)에 의하여 표현된다[17, 18]. γ 는 부피가 일정할 때 온도변화에 따른 압력을 나타내는 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \left[\frac{\partial P}{\partial T} \right]_V \quad (1)$$

이밖에 일정한 압력조건하에서 온도가 상승함에 따라 부피가 변하는 정도를 나타내는 열팽창계수(α)는 아래와 같이 표현된다.

$$\alpha = \left(\frac{1}{V} \right) \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad (2)$$

또 등온조건에서 부피 변화에 따라 압력의 생성을 나타내는 compressibility(B)가 정의되며, 공학적인 관점에서 많이 사용되는 bulk modulus는 compressibility의 역수로 정의된다. Compressibility(B)와 bulk modulus(K)는 다음과 같이 표현된다.

$$B = - \left(\frac{1}{V_0} \right) \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = \left(\frac{1}{K} \right)_T \quad (3)$$

(1)-(3)식에 의하여 정의된 물성은 P, V, T 관계를 규명하는 물질상수로서 이들은 각기 응용목적에 따라 선택적으로 사용될 수 있다. 그리고 이들은 사용되는 온도, 압력 범위에 따라 상수로 사용되기도 하지만 그 범위가 넓고 범위내에서 변화가 큰 경우엔 온도 또는 압력의 함수로 표현되기도 한다.

$$\frac{\alpha}{B} = \gamma, \quad K = \frac{\gamma}{\alpha} \quad (4)$$

여기서 정의된 물성들은 서로 의존적이기 때문에 식 (4)와 같은 관

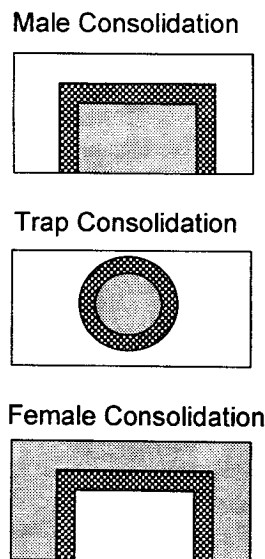


Fig. 1. Rubber tool configurations : rubber tool, prepreg, mold.

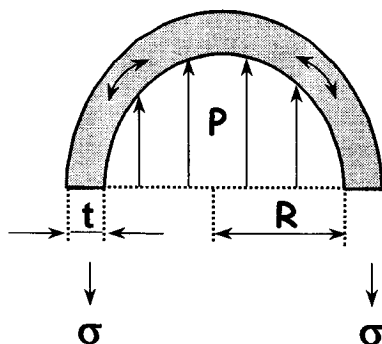


Fig. 2. Thermal pressure of rubber-tool in 1-D radial expansion.

계가 성립한다. 즉 온도상승에 따른 압력생성률은 열팽창계수와 압축계수와와의 관계로 나타내어질 수 있는 것이다.

2-2. Pressure Development in 1-D Radial Constrained Expansion

원통에 채워진 물질의 부피가 원통의 부피보다 클 경우 물질은 원통 안에 갇혀서 압력을 형성하게 된다. 이때 원통의 두께가 원통의 지름에 비해 매우 작고 그 안의 고체가 등방성 재료이면 1차원으로 가정할 수 있다. 원통 안에 채워진 물질의 압력은 원통의 반경방향으로 팽창하며 이는 원통주위의 hoop stress로 작용하게 된다. 이때의 모습을 반원으로 나타낸 것이 Fig. 2이다. 원통 안에 작용하는 모든 힘의 합인 ΣF 는 0이 된다. 따라서 원통 안의 원통의 단면적 t 가 받는 두 stress에 단면적 t 를 곱한 두 힘의 합(F_1)과, 내부에 P 로 작용하는 압력을 단면적 $2R$ 이 받는 힘(F_2)이 같다고 볼 수 있다. 이때 단면적 t 가 받는 stress는 아래의 식과 같이 원통의 탄성률(E)과 변형률(strain)의 곱으로 나타내어질 수 있다[19].

$$F_1 = 2\sigma \times t = 4E\epsilon t \quad (5)$$

또 고체의 잉여 부피에 의한 압력(P)을 원통의 내부 반지름이 받는 힘(F_2)으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_2 = 2RP \quad (6)$$

이 두 힘이 평형을 이루면 식 (5)와 (6)으로부터 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$P = \frac{Et}{R} \epsilon \quad (7)$$

이 식은 원통의 modulus(E)와 두께(t) 그리고 내부반경(R)을 알 때 원통 표면의 변형(strain)을 측정함으로써 내부의 압력을 계산할 수 있게 하는 식이다.

2-3. Stress Distribution in 1-D Parallel Plate Compression

상하 판과 미끄러짐이 없는 두께가 얇은 고무 block을 압축하게 되면 변형이 생기는데 이것은 고무의 중요한 특성 중 하나이다. 이 변형에서 일반적인 고무의 물성과 같이 수직방향으로의 압축 stress(σ_1)는 shear modulus(G)의 3배와 압축변형의 곱으로 표현된다[16]. 이 고무의 변형은 순수한 homogeneous한 압축 stress(σ_1)에 의한 변형과, 미끄러짐이 없이 결합된 표면이 그들의 원래 위치로의 비틀림에 의한 shear 변형 두 가지에 의해서 표현된다.

$$\sigma_1 = 3G\epsilon \quad (8)$$

고무 원통시편의 반경을 a 라 하고 높이를 h 라 하면 두 번째 변형을 일으키는 shear stress, τ_{12} 는 반지름방향으로 선형적인 증가를 보

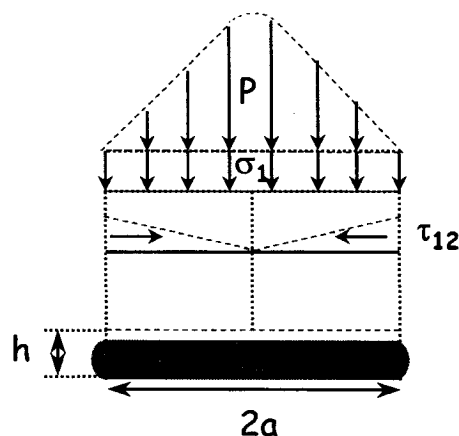


Fig. 3. Normal and shear stress distributions in 1-D parallel-plate compression.

여 다음과 같이 표현된다[17].

$$\tau_{12} = 3G \left(\frac{r}{h} \right) \epsilon \quad (9)$$

이 식은 반지름의 위치(r)에 따른 shear stress를 나타내는 식으로 이 shear stress를 normal stress로 표현되는 압력, P 로 표현해 보면 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\tau_{12} = \left(\frac{h}{2} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right) \quad (10)$$

식 (9)를 이용하여 식 (10)을 압력으로 정리한 후 적분하면 shear stress에 대한 효과를 normal stress로 나타낼 수 있게 되어 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$P = 3G\epsilon \left[\frac{a^2}{h^2} \right] \left[1 - \left(\frac{r^2}{h^2} \right) \right] \quad (11)$$

이 stress 분포를 Fig. 3에 나타내었는데 변형을 주는 σ_1 와 τ_{12} 를 수직방향으로 작용하는 두 힘 P 와 σ_1 로 나타낸 것이다. 이 식은 단순한 shear 변형을 가정하여 얻어진 결과이다. 그렇지만 결합된 표면의 주된 부분에서의 접근은 만족할만한 실험결과가 있다[20]. 고무의 변형에 작용하는 두 stress를 결합된 표면에 작용하는 normal stress($P + \sigma_1$)로 적분함으로써 압축에 작용하는 전체 힘을 구할 수 있다. 이 힘을 면적으로 나누면 그때 strain에 따른 stress가 다음과 같이 정리된다.

$$P = 3G\epsilon \left[1 + \frac{a^2}{2h^2} \right] \quad (12)$$

식 (12)는 결합된 표면에서 억제되는 효과로 인해 실제 보여지는 effective compression modulus(E_e)는 실제 표면에 작용하는 stress인 P 를 변형(ϵ)으로 나눈 값으로 표현되며 이 값은 shear modulus의 3배로 표현되는 E 에서부터 $(1 + a^2/2h^2)$ 의 비율로 증가하는 것을 나타낸다. 즉 원통의 높이인 h 값이 같다면 반경 a 가 클수록 같은 변형을 일으키기 위해 필요한 힘이 고무의 실제 modulus(E)값에 의한 것보다 더 많이 든다는 것을 나타낸다. 그것은 앞에서 언급한 shear stress에 의한 것이며 반경이 커질수록 훨씬 더 많은 shear stress가 작용하기 때문인데 이 힘은 반지름방향으로 적분된 값이기 때문에 반경이

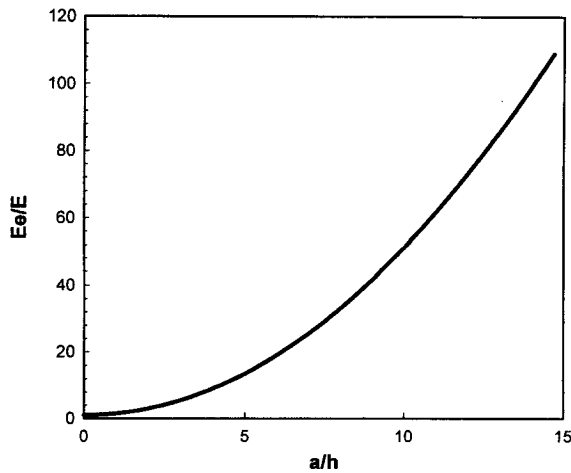


Fig. 4. Thermal relation of effective Young's modulus(E_e) against geometric factor(a/h).

커질수록 훨씬 더 많은 힘을 가해야 하는 것이다. 식 (12)를 이용하여 이 관계를 나타낸 결과가 Fig. 4이다. 이 그림에서 보여지는 것과 같이 a/h 가 약 13 이상이 되면 effective Young's modulus(E_e)가 실제의 modulus(E)보다 100배 이상으로까지도 상승되는 것을 볼 수 있다.

3. 실험

3-1. Materials

본 연구에서는 고무치공구로서 열안정성과 화학안정성이 우수하며 선형적인 열팽창을 하는 소재가 요구되며 이에 따라 silicon rubber 계통인 Aircast 3700(AIRTECH사)을 선정하였다. Aircast 3700은 액체상의 수지와 경화제를 적정비율(10:1.2)로 혼합하여 진공(0.084 MPa 이하)하에서 20여분간 degasing한 후 몰드에서 경화시켜 사용하였다. 본 실험에서는 상온에서 24시간 경화시켰다. 경화현상을 연구하고 consolidation 현상을 규명하기 위하여 McDonnell Douglas의 소재인증을 얻은 규격명 DMS 2224의 Hercules 3501-6/AS4가 사용되었다[6].

고무치공구의 열팽창계수를 측정하기 위하여 TA Instruments사의 TMA 943(Thermo Mechanical Analyzer)으로 상온에서 2.6 °C/min으로 온도를 상승시키면서 300 °C까지 측정하였다. 이때 시편의 두께는 1.4 mm였고 macro expansion probe를 사용하였다. 또 TA Instruments사의 DSC 2910(Differential Scanning Calorimetry)을 사용하여 상온에서 350 °C까지 10 °C/min과 2.6 °C/min으로 상승시켜가며 피크의 변화를 관찰하였다.

3-2. 1-D Parallel Plate Compression Test

평면형태의 성형에서 생성하는 고무치공구의 압력을 측정하기 위한 몰드의 치수는 안쪽 바다이 100×100 mm이며 높이는 고정되어 있지 않다. 최소로 줄일 수 있는 높이는 5 mm이며, 실험이 가능한 최대 높이는 15 mm로 높이를 자유로 이용할 수 있게 고안했으며, 고정시키지 않아 이쪽으로 작용하는 힘이 생기면 몰드의 윗면이 밀리게 되어 있으며 위 판을 UTM load cell에 연결하였다. 몰드의 아래 부분은 시편의 탈착을 용이하게 하기 위하여 5조각으로 되어 있으며 16개의 나사로 고정시키게 제작하였다. 이 몰드의 재질은 stainless steel이며 가공 후 열처리하였다. 또 100×100 mm의 면적을 갖고 두께가 1, 2 mm인 철판을 제작하였다. 몰드 안의 온도를 측정하기 위한 열선의 삽입경로를 위 판의 중앙에 2 mm 안쪽까지 뚫었다.

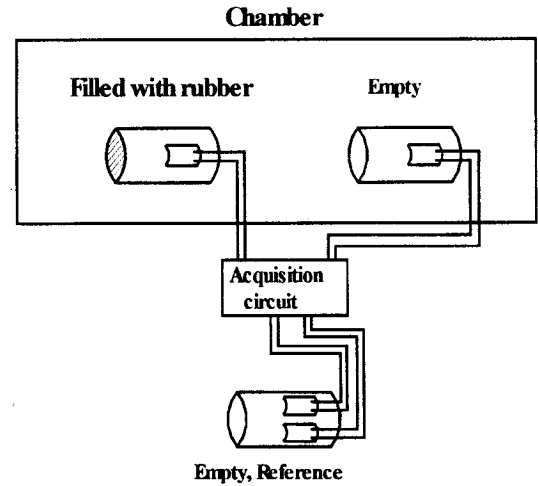


Fig. 5. Schematic diagram of 1-D radial expansion test system for thermal strain calibration of metal mold.

고무치공구의 압축실험과 열팽창에 의한 압력을 측정하기 위하여 United Calibration Corporation사의 SFM Smart-1을 사용하였으며 20 klb load cell을 사용하였다. 이때 고무치공구의 높이는 7 mm로 몰드에서 직접 경화시킨 것으로 몰드 안에 넣어서 압축실험을 하였다. 몰드에 고무치공구를 가득 채운 경우와 자유팽창할 수 있는 여유공간(gap volume)을 20 % 준 경우의 상온에서의 압축실험을 하였다.

3-3. 1-D Radial Thermal Expansion Test

몰드 안에 생성되는 압력을 이론값과 비교하기 위해서 실제 몰드 안에 생성되는 압력을 직접 측정하여 확인하기 위하여 본 연구에서는 얇은 두께의 알루미늄 원통형 몰드에서의 팽창을 반경방향의 1차 원으로 유도하여 알루미늄 원통에 작용하는 hoop strain 및 stress를 측정하는 실험을 수행하였다. 즉 몰드에 고무치공구를 가득 채우고 oven에 넣어 온도를 상승시키면서 몰드의 hoop strain을 측정하였다. 이때 Fig. 5에 나타나 있듯이 온도에 의한 알루미늄의 열팽창을 배제하기 위하여 빈 원통을 dummy gage로 사용하여 빈 원통의 strain 값을 제하여 주었다. 얇은 두께를 갖는 원통 안에서 고무치공구가 열에 의해 팽창할 때의 압력은 온도와 시간에 따라 측정하였다. 온도 상승은 strain이 평형을 이룰 때 50, 60, 70, 80, 90 °C로 올려가며 측정하였고 이때의 strain과 온도의 측정은 Strawberry Tree Inc.(USA)의 data acquisition system을 이용해 시간에 따라 측정하였다.

사용한 strain gage는 single-element였고 표준 저항인 120 Ω이었으며 Measurements Group Inc.(USA)의 상품명 CEA-06-240UZ-120이였다. 이 gage를 몰드 표면에 붙이기 위한 재료는 polyurethane류의 접착제와 cellophane tape를 사용하였으며 gage와 같은 회사의 제품명 M-Bond 200kit, M-Coat A kit, 326-DFV 100Ft Std., PCT-2A cellophane tape를 사용하였다. Gage는 원통의 길이방향의 strain을 측정하도록 부착되었다[21]. 사용한 알루미늄 원통의 두께는 0.117 mm, 지름은 52.185 mm, 길이는 135 mm였으며 modulus는 55 MPa이었다.

4. 결과 및 토론

고무치공구의 온도가 상승함에 따라 변화하는 부피를 예측할 수 있는 기본적인 물성인 고무치공구의 열팽창계수를 알아보기 위한 TMA 실험결과는 Fig. 6과 같다. TMA로 분석한 결과 고무치공구의 1차원적인 선형열팽창은 온도에 따라 linear한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었으며 그때의 열팽창계수는 2.67×10^{-4} m/m/°C이

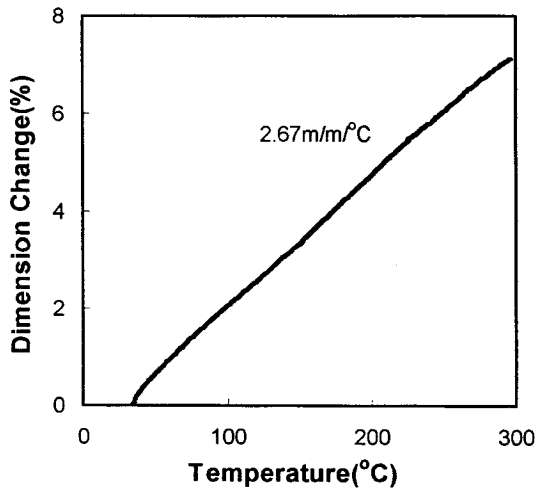


Fig. 6. TMA scanning thermogram of AIRCAST3700 rubber tool measured at 2.6 °C/min using macro-expansion probe.

었다. 이 값은 일반적인 철의 열팽창계수가 약 1×10^{-5} m/m/°C인 것과 비교하면 약 20배 이상의 큰 부피팽창을 예측할 수 있으며, 이러한 특성이 복합재료의 consolidation에 필요한 높은 압력을 생성시키는 주원인이 된다. 부피의 팽창은 보통 선형열팽창계수의 3배로 나타내어지므로 온도에 따른 부피의 변화는 약 8×10^{-4} m/m/°C이 되며 이 값은 200 °C를 상승시켰을 경우 약 16%의 부피 증가를 가져오는 수치이다. 온도가 상승함에 따라 선형적으로 증가하는 압력을 얻기 위해서는 열팽창계수는 온도에 따라 선형적인 증가를 보여야 한다.

또 DSC로 350 °C까지 실험한 결과 heat flow에 아무런 변화가 없는 것으로 미경화물이 남아있지 않는 것을 알 수 있었고, TGA로 300 °C까지 온도를 높이며 무게 변화를 측정된 결과 무게 감소가 관찰되지 않아 고온에서도 열적으로 안정하다고 할 수 있다. 또 가열과 냉각을 반복하는 열주기 후에도 hysteresis가 없는 열팽창이 안정한 것을 확인할 수 있었다.

4-1. Effective Bulk Modulus Measurement

모든 물체의 부피를 축소시키는데 있어서 같은 힘이 드는 것이 아

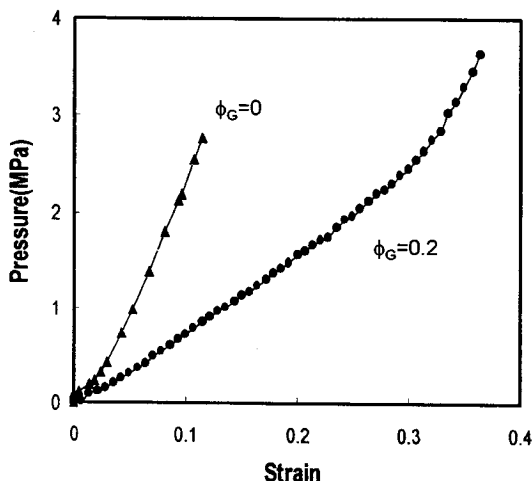


Fig. 7. Effective pressure and effective bulk modulus for 0 % and 20 % gap volume rubber tool measured by 1-D parallel plate compression test.

니기 때문에 온도에 따른 열팽창이 크다고 그만큼 압력생성이 큰 것은 아니다. 예를 들어 열팽창계수가 큰 incompressible 재료의 경우에 부피를 줄일 경우에는 이론적으로 무한대의 압력이 얻어지는 것과 같다. 완전탄성체의 경우에는 incompressible하다고 알려져 있으나 실제 고무에 있어서도 이 물성을 만족시킬 Poisson's ratio가 0.5에는 미치지 못하는 것으로 알려져 있다[22]. 따라서 열에 의해 팽창된 고무치공구의 부피가 고정된 부피를 갖는 몰드에 갇히게 되면서 생성하는 압력을 나타내기 위해서는 식 (3)으로 표현되는 K가 필요한데, 이는 정의에 의해 부피변화의 비가 같더라도 K에 따라서 다른 압력 P를 형성하는 것을 나타낸다.

Fig. 7은 몰드에 고무치공구를 가득 채우고 압축실험을 수행하여 K를 측정된 결과이다. 몰드 안에 갇힌 고무치공구를 압축할 때 높이의 변화는 고무치공구의 부피변화로 나타내어지기 때문에 압축실험에 의한 응력이 바로 부피변화, 즉 부피감소에 따른 압력형성이 되어 그 기울기가 식 (3)에 의하여 K를 나타내는 것이 되는 것이다.

이 압축실험 결과 고무치공구를 가득 채운 경우인 gap volume이 없는 경우에는 선형적으로 증가하는 압력형성을 관찰할 수 있었지만 20 %의 여분공간(gap volume)이 주어진 경우에는 압력형성이 선형적으로 증가하는 경향을 보이다가 그 기울기가 증가하는 경향을 나타내었다. 여기서 기울기가 변한다는 것은 K의 변화를 의미하는데 이 결과로 여분공간의 변화가 effective bulk modulus의 변화를 가져온다는 가정을 하게 되었고 이를 effective bulk modulus로 표시했다. 이는 반경이 a이고 높이가 h인 원통형 고무 시편의 압축실험에서 a/h에 따라 압축실험에서 얻을 수 있는 E값이 다른데 a/h가 10을 넘으면 측정되는 값이 실제 값보다 70배 이상 증가하게 된다. 이것은 실제 누르는 힘과 고무의 E의 1/3배인 G에 의해 radial 방향으로 내부 압력분포가 생기는 것에 기인한 것이다. a/h가 10 이상이면 사실 strain의 변화가 부피변화와 밀접한 관계가 있고 따라서 압축실험의 결과로 얻은 E값이 K값에 가까워진다는 것이다[17]. 이때 얻어진 고무치공구의 effective bulk modulus는 몰드에 여분공간이 없는 경우는 28 MPa, 몰드의 여분공간이 20 %인 경우에는 8.3 MPa이었다.

4-2. 1-D Radial Thermal Expansion

실제 원통 안에서 온도가 상승함에 따라 팽창하는 고무치공구에 의하여 생성되는 원통의 strain 측정결과는 Fig. 8과 같다. 50 °C부터 strain이 변하지 않는 평형에 이르렀을 때 10 °C씩 상승시켜가며 시간에 따라 측정된 것이다. 온도가 증가함에 따라 strain도 증가하다

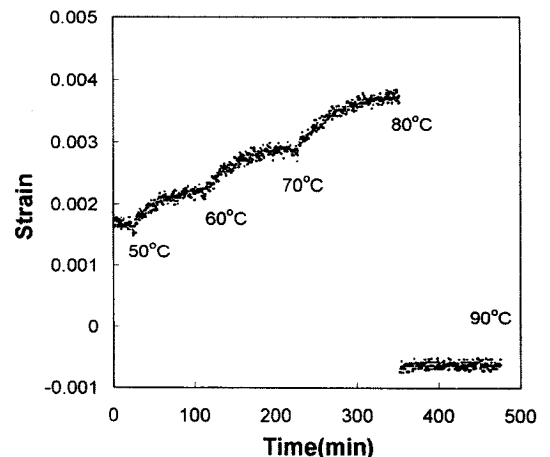


Fig. 8. Thermal strain measured by 1-D radial thermal expansion experiment equilibrated at different temperatures.

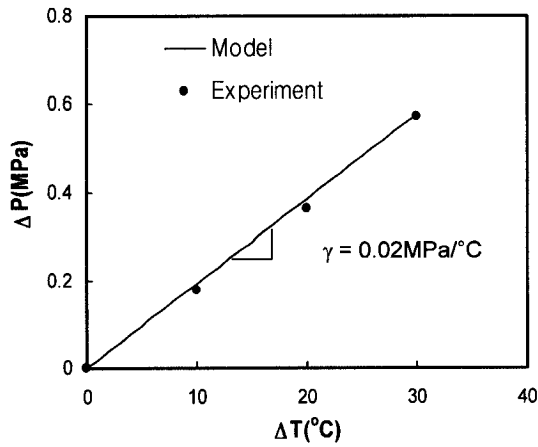


Fig. 9. Thermal pressure in 1-D radial thermal expansion experiment compared with model equation using $K^R=28$ Mpa and $a^R=8 \times 10^{-4}$.

가 더 이상 증가하지 않는 평형 strain을 보인다. 90 °C에서는 금속 원통의 modulus가 고무치공구가 생성하는 내부 압력을 견디지 못하고 파괴됨으로 인해 더 이상의 strain값을 측정할 수 없었다. 이 결과를 각각의 온도에서 평형에 도달했을 때의 strain으로 50 °C를 기준 온도로 하여 상승온도와 식 (6)을 이용하여 얻어진, 상승압력으로 표현한 결과가 Fig. 9이다.

$$P_2 = K^R \frac{\alpha^R \Delta T}{1 + \alpha^R \Delta T} \quad (13)$$

식 (13)은 식 (3)을 이용하여, 고무치공구만의 부피팽창에 따른 압력 생성을 K 를 이용하여 나타내었다. 여기서 P 는 온도상승에 의하여 증가한 gage 압력, ΔT 는 50 °C로부터 상승한 온도 즉 $\Delta T = T - 50$ °C, α 은 열팽창계수를 나타내며 위첨자 R 은 고무치공구를 나타낸다. 또 아래첨자는 상승된 온도에서의 물성을 나타낸다. Fig. 9의 결과는 식 (13)으로 표현되는 압력생성과 비교하였을 때 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 bulk modulus는 측정값인 28 MPa을, 열팽창계수는 8×10^{-4} m/m/°C를 대입하였다.

4.3. Thermal Pressure Model Development

온도의 상승에 따른 고무치공구만의 압력생성은 rubber tool의 열팽창계수와 bulk modulus에 관계된 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$P^R = 3 \alpha^R \cdot K^R \cdot \Delta T \quad (14)$$

여기서 cubic coefficient of thermal expansion은 선형열팽창계수의 3배로 나타내었다. 한편 실험에서의 압력생성은 성형온도에서 팽창된 몰드의 부피와 팽창된 고무치공구의 부피의 차이에 기인한다. 몰드와 고무치공구 모두 열에 의해 팽창을 하지만 열팽창이 큰 고무치공구가 온도를 상승시켰을 경우 더 큰 부피팽창을 하게 된다. 따라서 이 고무치공구의 부피에서 몰드의 부피를 빼준 부피가 압력을 형성하는데 참여한 부피가 되며 이 관계를 나타낸 것이 Fig. 10이고 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = K^R \left(\frac{V^R - V^M}{V^R} \right) \quad (15)$$

여기서 V 는 부피를 나타내며, 위첨자 M 은 몰드를 나타낸다. 온도가 상승했을 때 몰드의 팽창부피와 고무치공구의 팽창부피는 차이가 있

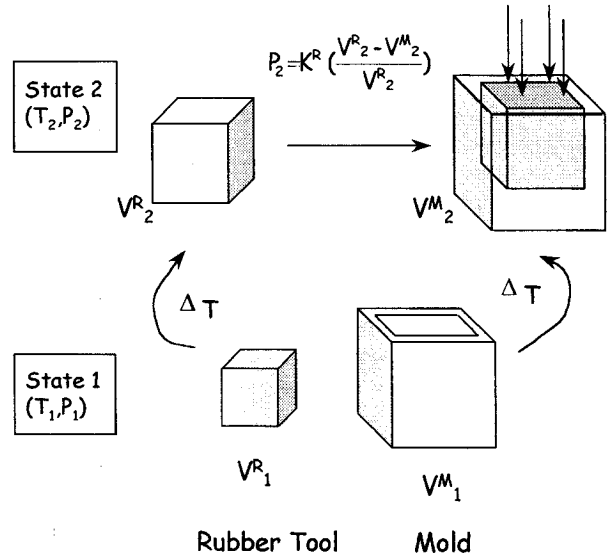


Fig. 10. Schematic representation of thermally-expanding rubber tool and mold resulting in thermal pressure P_2 by ΔT increase.

으나 실제로는 몰드 안에 갇혀 있는 것이므로 성형온도에서의 두 부피는 같다고 볼 수 있다. 따라서 상승된 온도에서 몰드와 고무치공구의 열팽창에 의한 부피에 대한 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_1^M + V_1^R \cdot 3\alpha^M \Delta T = V_1^R + V_1^R \cdot 3\alpha^R \Delta T \quad (16)$$

여기서 아래첨자 1은 상승시키기 전 온도인 T_1 에서의 물성을 의미한다. 이 식에서 실제 우리가 조절할 수 있는 상온에서 몰드와 고무치공구의 부피차이에 관해 정리하면 아래와 같고 이를 여분공간(gap volume)으로 정의한다.

$$V_1^M - V_1^R = \Delta T(3\alpha^R V_1^R - 3\alpha^M V_1^M) = V_1^G \quad (17)$$

이때 위첨자 G 는 여분공간(gap volume)을 의미한다. 첨자 2로 표현되는 성형온도, T_2 에서의 여분공간은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_2^G = \frac{V_1^G}{V_1^M} 100 - \left[\frac{\alpha^R - \alpha^M}{\alpha^R + \frac{1}{3(T_2 - T_1)}} \right] 100 \quad (18)$$

온도가 상승함에 따라 고무치공구와 몰드 이외에 그 안의 laminate도 팽창을 하는데 그 팽창계수는 각각 다르다. 그러므로 그 안에 생성되는 압력을 계산하기 위해서는 몰드와 laminate의 부피변화를 고려하여야 한다. 식 (3)을 이용한 부피변화의 비율과 bulk modulus의 곱으로 표현되는 압력은 온도 T_2 에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_2 = K^R \left(1 - \frac{V_2^M}{V_2^R} + \frac{V_2^L}{V_2^R} \right) \quad (19)$$

T_2 에서의 압력은 laminate와 고무치공구의 팽창된 부피와 몰드의 부피의 차이로부터 얻어진다는 것을 알 수 있다. 결국 압력은 몰드와 laminate, 여분공간의 상대부피에 의하여 결정되기 때문에 각 부피는 몰드의 부피(V_1^M)에 대한 상대부피 분율(ϕ)로 나타낼 수 있으며 이는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\phi^R = \frac{V^R}{V^M}, \quad \phi^G = \frac{V^G}{V^M}, \quad \phi^L = \frac{V^L}{V^M} \quad (20)$$

이 식은 고무치공구의 부피를 몰드 부피에 대한 비율로 나타낸 것이다. 몰드에 채워지는 고무치공구의 부피를 비율로 정리함으로써 정량적인 해석을 할 수 있도록 일반화하였다. 또 ϕ_1^G 은 온도 T_1 에서의 몰드에 대한 여유공간의 비를 의미하는데 위에서 정리한 몰드에 대한 비로 표현하면 아래와 같다.

$$\phi_1^G = 1 - \phi_1^R - \phi_1^L \quad (21)$$

식 (19)의 압력생성을 나타내는 식은 상온이 아닌 T_2 에서의 부피를 이용한 식이다. 실제 T_2 에서의 부피를 측정하기는 곤란하므로 상온에서의 상수로 바꾸어 정리하는 것이 필요한데 이를 위해서는 상온에서의 부피와 온도에 따른 팽창계수인 각각의 α 가 필요하다. 또 식 (20)에서 정리한 몰드에 대한 부피비로 표현하여 일반화하면 다음과 같다.

$$P_2 = K^R \frac{(\alpha^L \phi_1^L + \alpha^R \phi_1^R - \alpha^M) \Delta T - \phi_1^G}{\phi_1^R (1 + \alpha^R \Delta T)} \quad (22)$$

Laminate와 고무치공구의 부피비율과 열팽창계수의 곱에 몰드의 열팽창계수를 빼주어 온도에 따른 전체 부피 변화 비를 나타내고 여기에서 초기의 여유공간 비를 빼주므로 온도상승으로 인한 부피변화율을 나타내었다. Fig. 10에서 보여지듯이 압력으로 환산하는 초기 부피는 고무치공구가 자유 팽창했을 때의 부피이므로 자유 팽창했을 때의 부피비로 나누어 bulk modulus값을 곱하여 온도 T_2 에서의 압력을 계산하였다. 역으로 온도 T_2 에서 원하는 압력과 상승온도 그리고 고무치공구의 물성과 그 외의 물성을 안다면 다음과 같이 정리한 식으로 상온에서 필요한 고무치공구의 몰드에 대한 부피비를 계산할 수 있다.

$$\phi_1^R = \frac{(1 + \alpha^M \Delta T) - \phi_1^L (1 + \alpha^L \Delta T)}{(1 - P_2/K^R)(1 + \alpha^R \Delta T)} \quad (23)$$

이 식에 의하면 분자에서 몰드의 팽창비에서 laminate의 팽창비를 laminate가 차지하는 부피비로 환산해 뺀 값에 고무치공구가 팽창하는 비율로 나누어 준 값, 다시 말해 부피 변화의 비율을 고무치공구의 몰드에 대한 비로 조절할 수 있는 식이 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 열팽창치공구를 이용하여 복합재료의 가공에 있어서 압축(consolidation) 또는 함침(infusion)을 발생시키는 정량적인 압력을 생성시키는 연구를 하였다. 이 공정은 경화과정의 온도조건에 의하여 고압을 얻는 공정이며 이 공정은 열역학적으로 정의되는 물질상수들과 경화 kinetics, 가공 공정변수들의 상호관계를 이해함으로써 정량적인 해석이 가능하다.

본 연구에서는 고무치공구가 생성하는 압력을 예측 및 측정하기 위하여 기본적인 열팽창치공구의 물성을 조사하였다. 열에 의해 생성되는 압력을 예측하기 위하여 열팽창계수와 bulk modulus, 그리고 상승온도에 따른 압력생성을 모델링하였다. 즉 가공온도에서 생성시키고자 하는 압력을 몰드 안의 고무치공구와 laminate의 상대적인 부피비에 대하여 가공을 하기 위해 상승시킨 온도(ΔT)와 고무치공구와 몰드 그리고 laminate의 열팽창계수(α), 그리고 고무치공구의 bulk modulus(K)로 표현하였다. 특히 몰드 안의 빈 공간(gap volume)을 정의하여 이 빈 공간의 비율에 따른 압력생성으로 나타내어 보았

으며 이는 실험결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국과학재단 특정연구 연구비(96-0502-06-01-3) 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Agarwal, B. D. and Broutman, L. J.: "Analysis and Performance of Fiber Composites", 2nd Ed., A Wiley-Interscience, Canada(1990).
2. Jang, B. Z.: "Advanced Polymer Composites", ASM International, USA(1994).
3. Nam, J. D. and Ahn, K.: *Polymer Science and Technology*, **6**, 459(1995).
4. Suh, D. W., Ku, M. K., Nam, J. D., Choi, H., Chung, K. M. and Ahn, K.: *Polymer(Korea)*, **21**, 1029(1997).
5. Jung, W., Choi, H. and Ahn, K.: *Conf. Korea Comp. Mat.*, May 8-10, Taejon, 222(1997).
6. Jung, W., Choi, H., Um, Y., Ahn, K. and Nam, J. D.: *Conf. Korea Comp. Mat.*, Nov. 25, Seoul, 95(1994).
7. Um, Y., Jung, W., Ahn, K. and Seferis, J. C.: *Conf. Korea Comp. Mat.*, Nov. 25, Seoul, 50(1994).
8. Lee, J. W., You, J. K., Han, Y. M., Kuk, K. C. and Lee, S. J.: *Conf. Korea Comp. Mat.*, May 8-10, Taejon, 216(1994).
9. Erik, S. and Robert, M.: *J. Adv. Mat.*, **26**, 2(1994).
10. Peterson, A. L., Cull, R. A. and McMahon, D. F.: 36th International SAMPE Symposium, April, 959(1991).
11. Cull, R. A., Jacobson, L. and McMahon, D. F.: 36th International SAMPE Symposium, April, 944(1991).
12. McLarty, D. L.: 34th International SAMPE Symposium, May, 1294(1989).
13. Sarrazin, H., Kim, B., Ahn, S. H. and Springer, G. S.: *J. of Comp. Mat.*, **29**, 1278(1995).
14. Kim, C. G., Kim, T. W., Kim, I. G. and Jun, E. J.: *The Processing of the 7th Int. Conference on Composite Materials*, **1**, 839(1989).
15. Namgung, C., Lee, J. H. and Rhee, J. M.: *Conf. Korea Comp. Mat.*, May 25, Pusan(1997).
16. Van Klevenen, D. W.: "Properties of Polymers", Elsevier, USA(1972).
17. Gent, A. N.: "Engineering with Rubber", Oxford University Press, New York(1992).
18. Brandup, J. and Immergut, E. H.: "Polymer Handbook", 3rd ed., Wiley, New York(1989).
19. Krishnamachari, S. I.: "Applied Stress Analysis of Plastics", Van Nostrand Reinhold, New York(1993).
20. Gent, A. N., Henry, R. L. and Roxbury, M. L.: *J. Appl. Mech.*, **41**, 855(1974).
21. Dally, J. W. and Riley, W. F.: "Experimental Stress Analysis", 3rd ed., McGraw Hill, USA(1991).
22. Mark, J. E.: "Physical Properties of Polymer HandBook", America Institute of Physics, New York(1996).