

論文

후성형 냉각이력에 따른 Glass/PEI 복합재의 치수불안정 및 잔류응력 예측

유 원 재*

Prediction of the Process Induced Internal Stresses and the Dimensional Instability During the Post Mould Cooling of Glass/PEI Laminates

Won J. Yu*

ABSTRACT

The prediction of internal stresses and post forming dimensional instability is crucial for designing of precise composite parts and to determine the optimum processing condition. In the present study, effects of post mould cooling on the dimensional instability and internal stress development within thermoplastic based composites were studied. It was aimed to investigate the potential of a comprehensive viscoelastic approach as a tool to realize the prediction of these problems. Analyses were based on three stage modelling, i.e. the viscous, the viscoelastic and the elastic stage. Simulations were performed of the internal stress developments in $[0_{15}/90_5]$ unbalanced glass/PEI laminates with two different cooling conditions followed by press forming process.

This paper also describes the measurement of residual stresses in $[0_{15}/90_5]$ glass/PEI laminates using the SGT(Successive Grooving Technique) in an effort to investigate the potential of this new technique. The measured stresses correlated well with the predicted stresses, showing the promising possibility of this technique.

초 록

고온에서 성형되는 복합재에 있어서, 고정밀 부품의 설계/제작을 위해서, 또 최적의 공정조건을 찾기 위해서는, 제작시 발생할 수 있는 치수불안정의 문제와 이의 원인인 내부응력의 정도를 예측하는 것이 대단히 중요하며 필요한 요소기술이다. 본 연구에서는, 이 문제에 대한 해석적 예측능력을 평가하기 위한 목적으로 $[0_{15}/90_5]$ glass/PEI 복합재에 있어서 moulding 후 cooling 속도의 영향을 연구하였다. 두 가지 상이한 post moulding cooling 의 이력을 부여하고, 이것이 적층판의 최종형상과 그 내부응력의 발생과 최종적인 잔류응력에 미치는 효과를 점탄성이론에 의한 수치해석적 방법과 SGT방법에 의한 실험적 방법을 통하여 비교 관찰하였다. 해석 및 실험 결과는 moulding 후 냉각의 이력이 적층판의 치수불안정에 심각한 영향을 주는 것을 확인하게 해주었다. 또한, 2 가지 냉각 경우에 대해서, $[0_{15}/90_5]$ glass/PEI 복합재의 치수불안정 문제 및 잔류응력에 대한 해석을 통해 실험의 결과를 명확히 재현, 뒷받침할 수 있음을 입증할 수 있었고, 이로써 이 문제에 대한 점탄성해석과 또한 SGT 방법의 가능성을 확인할 수 있었다.

* (주)대한항공 항공기술연구원

1. 서 론

80 년대의 타당성 연구로 시작된 열가소성수지를 기지로 한 복합재(thermoplastic 복합재)에 대한 관심은, 군용기 구조를 주대상으로 한 실용성 평가과정으로 이어지고, 90 년대에 들어서는 민항기의 일부 양산부품에 적용되는 등, 그 가능성이 기대되고 있다[1]. 이는 복합재 분야에서의 국내의 치열한 경쟁 환경에 대처하여, 부품의 생산비용 절감과 성능 및 정밀도 향상을 위해 경주한 연구/생산현장에서의 노력을 반영하는 것이나, 한편 고온과 고압 하에서 성형되는 열가소성 기지 복합재의 경우 치수불안정(dimensional instability) 문제가 심각한 난제로 등장하고 있다.

300~400°C 이상의 고온에서 consolidation 및 성형이 이루어지고, 열팽창/축소 계수가 열경화성수지 기지를 사용한 복합재에 비해 상대적으로 큰 열가소성 기지 복합재에 있어서, 그 제작시 발생할 수 있는 치수불안정 문제와, 이의 원인인 내부응력의 발생기구를 규명하고 그 크기를 예측하는 것은 정밀한 부품의 설계를 위해 또 최적공정조건을 찾는 데 있어 반드시 필요한 요소기술이다. 따라서, 많은 연구들이 이 문제를 다루어 왔고, 이들은 크게 두 가지 방향에서 접근하여 왔다. 즉, 내부응력의 발생기구 및 그에 따른 크기의 예측분야[2-4]와, 또한 내부응력의 최종상태인 잔류응력의 실험적인 측정분야이다[5,6].

본 연구에서는, 복합재 제작과정에서 발생하는 내부응력의 예측과 그 측정과 관련하여 각각 제안된 점탄성적 modelling 에 의한 해석[7] 및 SGT 실험에 의한 측정방법[8]의 타당성을 평가하는 것을 목적으로, glass/PEI 를 대상으로 일련의 해석과 실험을 수행하였다. 적층판의 성형 후, 급냉-대칭(balanced fast cooling) 과 완냉-비대칭(unbalanced slow cooling) 의 두 가지 냉각조건을 부여하고, 이것이 적층판의 최종형상과 그 내부의 잔류응력에 미치는 효과를 점탄성이론에 근거한 수치해석적 방법과 실험적 방법을 통하여 비교하였다. 이 때, 실험과 해석에 있어서 부여한 냉각조건의 효과가 가급적 극명하게 나타나도록 하기 위해, balance 조건과 symmetry 조건을 벗어난(0, 180/90°) glass/PEI 적층판을 대상으로 연구를 수행하였다.

2. 실 험

2-1. 재료 물성

시편제작에 사용한 소재는, TenCate 사의 glass/PEI 프리프레그로 부피비 52%의 일방향 유리섬유를 함유하고 있다. 본 연구에서 사용된 glass/PEI 소재의 열역학적 물성은 Table 1 에 나타내었다. Table 2 에는, 점탄성 모델링을 위한 재료의 점탄성 물성, 즉 이완함수(relaxation function)들 아래의 식 (1)과 같이 3 개의 Maxwell 요소로 사용한 Prony Series 로 전개하였을 때의 계수들을 나타내었다.

$$C_{ij}(T, t) = C_{ij0} + \sum_{\omega=1}^3 C_{ij\omega} \exp\left(-\frac{t}{\lambda_{ij\omega}(T)}\right) \dots\dots (1)$$

여기서, C_{ij0} 는 재료의 relaxed modulus, $C_{ij\omega}$ 는 unrelaxed modulus, $\lambda_{ij\omega}$ 는 각 unrelaxed modulus 에 대한 relaxation time 을 나타낸다. Table 2 에 나타낸 relaxation function 에서의 첨자 1, 2, 3 은 각각 섬유방향, 횡방향 및 두께방향을 나타낸다.

단축(unidirectional) 프리프레그의 경우 4 개의 relaxation function 으로 점탄성 거동을 표현할 수 있으나, 편의상 Table 2 에서는 6 개의 re-

Table 1. Thermal properties for unidirectional glass/PEI material

Density(kg·m ⁻³)	Specific heat(J·kg ⁻¹ ·K)	Transverse conductivity(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Longitudinal conductivity(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
1878	2096	0.364	0.61

Table 2. Relaxation functions for unidirectional glass/PEI material (unit: GPa, $\lambda_0=5.19, 0.78, 0.07$ for $\omega=1, 2, 3$)

$C_{ij\omega}$	$\omega=0$	$\omega=1$	$\omega=2$	$\omega=3$
C_{11}	20.078	8.404	11.416	5.623
C_{12}	42.209	1.257	1/709	0.838
C_{22}	0.121	3.122	4.245	2.081
C_{23}	0.036	1.068	1.452	0.712
C_{44}	0.030	1.050	1.430	0.700
C_{55}	0.510	1.870	2.540	1.250

laxation function 으로 표현하였으며, 각 component는 다음의 구성방정식으로 정의된다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Table 2 에 나타난 본 재료의 이완함수는, 3 점 굽힘과 torsion 시편을 채택한 응력이완시험(stress relaxation test)을 통해 구한 결과[9]이며, 여기서 특기할 점은, 이를 도시한 Fig. 1 에서 보다 명확하게 관찰할 수 있는 바와 같이, 섬유방향의 물성, 즉 C_{11} 이 215°C 하에서 약 50% 까지 relaxation 될 수 있다는 점이다. 이는, 섬유방향물성의 경우, 온도에 관계없이 100% 탄성인 것으로 일반적으로 가정되는 점을 고려하면 이례적인 결과라 하겠으나, 한편 프리프레그 내 섬유 방향각의 비균질성, 즉 $\pm 2^\circ\text{C}$ 내외의 섬유 방향각 분포(Fiber Orientation Distribution)가 있을 수 있다는 점, 또한 시편제작시의 적층공정과 가공 시에서 각각 역시 $\pm 2^\circ\text{C}$ 내외의 오차가 있을 수 있는 점을 감안하면, 이런 현상은 현실적으로 타당한 것으로

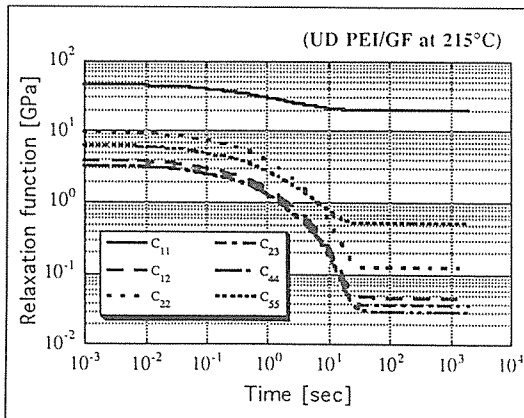


Fig. 1. Relaxation functions for unidirectional glass/PEI material (unit: GPa, $\lambda_\omega = 5.19, 0.78, 0.07$ for $\omega = 1, 2, 3$).

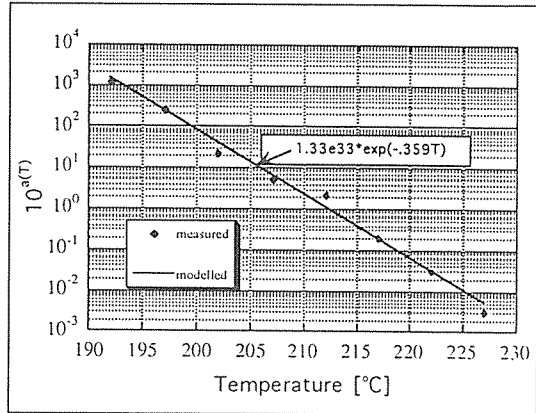


Fig. 2. Shift factor as function of temperature.

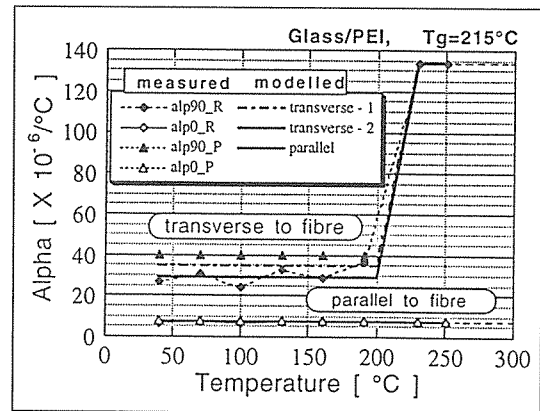


Fig. 3. The CTE (coefficient for thermal expansion) of glass/PEI material.

납득할 수 있다.

각 이완함수(relaxation function)에 대한 온도-시간 천이함수(time temperature superposition shift function), 온도에 따른 재료의 열팽창 특성은 Fig. 2, Fig. 3 에 각각 나타내었다.

2-1. 시편제작

$[0_{15}/90_5]$ 로 적층한 preform 은 수지의 유동이 없도록 한 가운데, 150mm X 150mm 의 mould 속에서 330°C , 40 기압의 조건하에 2 분 동안 두어

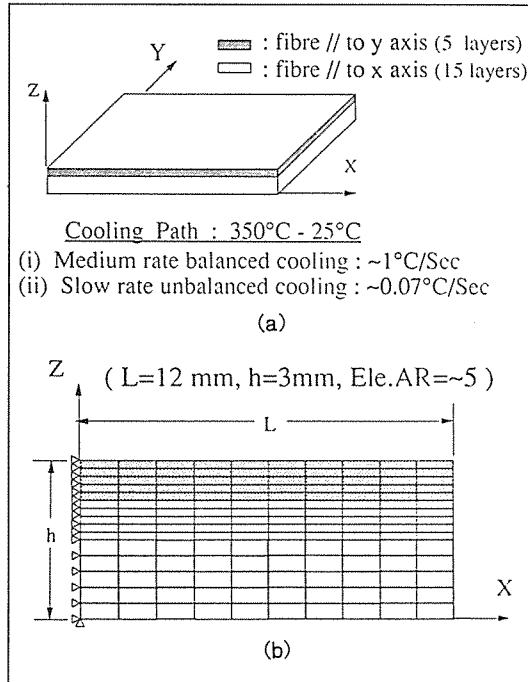


Fig. 4. Geometry of glass/PEI laminate. (a) : laminate, (b) : finite element mesh.

완전히 consolidate 시켰다. 이 때, mould 는 프레스에 설치, 압력을 가할 수 있도록 하였다. 내부응력의 발생정도를 이원화하기 위해, mould 내의 cooling unit 를 가동하여, 급냉과 완냉 두 조건하에서 냉각을 시켰다. 특히 완냉 시에는, 냉각시의 온도구배(cooling profile)의 효과를 함께 관찰하기 위하여, mould 상하면의 cooling unit를 별도로 조작, 적층판 양면에서의 냉각조건을 서로 다르게 하였다. 모든 과정 중, 적층판의 양 표면에는 열전대를 부착, 온도 변화를 지속적으로 측정하였다. Fig. 4(a), (b)에서는 각각 적층판의 형상과 축의 방향 및 3 절 해석에서 사용되는 유한요소모델을 나타내고 있다.

2.2. 탈형시의 칫수불안정성 측정

냉각이 완료된 적층판(두께 $\sim 3\text{ mm}$)은 상온에서 탈형한 후, 길이 65 mm X 넓이 10 mm 의 크기의 시편으로 절단하여 Fig. 5 에 나타낸 바와 같이

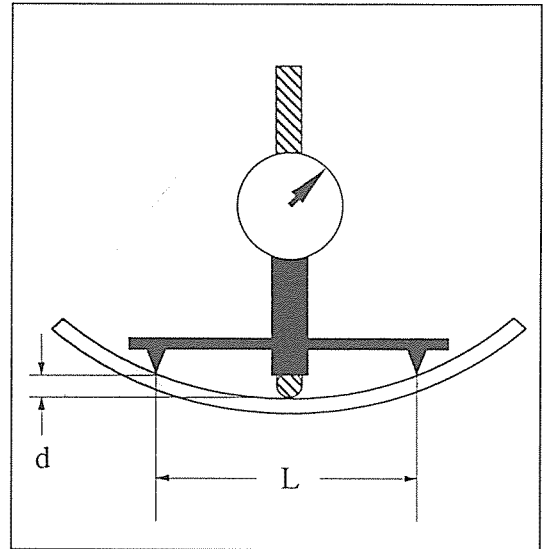


Fig. 5. Experimental apparatus for curvature determination.

dial test indicator 를 사용하여 굽힘 변위의 크기를 측정하였다. 3~5 회의 반복 측정을 통해 평균값 d 와, 다음의 식 (2)를 통해 곡률(curvature, χ)을 계산하였다.

$$\chi = \frac{8d}{L^2 + 4d^2} \quad (3)$$

2.3. 잔류응력의 측정

적층판에서 길이 65 mm X 넓이 10 mm 의 크기로 잘라낸 시편에 대해서 SGT 방법[8]을 이용하여 각 층 내의 잔류응력을 측정하였다. Fig. 6 에서 보는 바와 같이 strain gage 를 한쪽 면에 부착하고 그 반대면에서 홈 중심과 strain gage 의 중심이 같은 축에 오도록 하여, 1 mm 두께의 wheel saw 를 이용, 홈을 layer 한 장 깊이씩 가공하면서 strain 을 연속적으로 측정하였다. 측정된 strain 과, 시편의 기하학적 형상 및 재료물성을 토대로 미리 계산해 둔 compliance 행렬을 사용, 각 층 내의 잔류응력을 계산할 수 있다. 보다 상세한 내용과 절차는 참고문헌[8]을 참조할 수 있다.

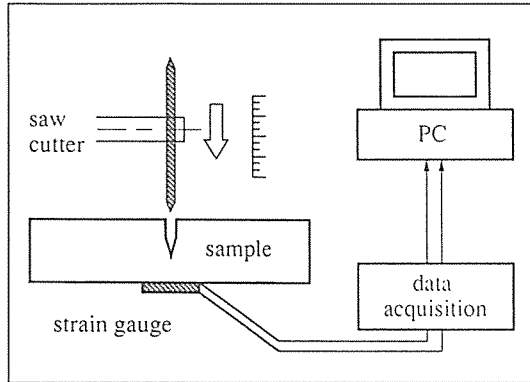


Fig. 6. Experimental apparatus for internal stress determination.

3. 해 석

프레스 성형이 이루어지는 열가소성수지 기지의 복합체에 있어서, 탈형시 관찰되는 변형(warping) 등의 찌수불안정 문제는 그에 앞선 냉각과정에서 생긴 내부응력에 기인한다. 따라서, 탈형 직전의 시점까지 내부에 발생하는 응력을 계산할 수 있으면, 탈형시의 변형에 대한 예측이 가능할 것이다. 탈형이 상온 보다 높은 온도에서 이루어질 경우의, 탈형 이후의 변형 역시 같은 맥락에서 계산할 수 있을 것이며, 다만 이 경우에는 계산 중 기하학적 경계조건이 변하게 된다.

기지가 semi-crystalline 수지인 경우, 성형후의 초기냉각과정에서 냉각속도 등의 조건에 따라 결정조직, 즉 crystallinity가 생기게 된다. 이러한 미세조직 변화는 재료의 relaxation function에 영향을 미치게 되고, 결과적으로 문제를 복잡한 비선형 점탄성영역으로 비화시키게 한다. 모델링과 해석의 관점에서 이 부분에 대한 종합적인 분석은 참고문헌[7]에서 찾을 수 있다. 그러나, 본 연구에서 사용한 glass/PEI 재료는 기지가 비정질(amorphous)의 소재이므로 냉각 중 재료조직의 변화 또는 이에 따른 relaxation function의 변화가 없으므로 선형 중첩법(linear superposition)을 기초로 한, 선형 점탄성 이론적인 접근에 무리가 없다.

점탄성 해석의 출발점은, cooling 과정 중 적층판 내부의 온도분포 이력이다. 본 연구에서는, 이를 계

산하기 위해, cooling의 전 과정을 통해 적층판의 표면에서 측정된 온도를 토대로 하여, ABAQUS Version 5.3[10]을 이용, 내부응력 해석과는 별도로 열전달 해석을 수행하였다. 열전달 특성과 내부응력과의 상호연계성이 없다는 가정이 성립하면 각각의 해석을 분리 수행하여도 무방하며, glass/PEI 재료 또는 여타의 thermoplastic에 있어서 그 열전달특성이 기계적 응력에 의해 영향을 받는다는 연구결과는 아직 없다. 열전달 해석에는 Fig. 4(b)에 나타난 유한요소모델이 사용되었고, 적층판의 단면에 대해서 유한요소해석을 수행하였다. 한편, 점탄성 응력 해석에서도 Fig. 4(b)와 동일한 mesh를 사용하였고(plane strain 가정), 선형연구[7]에서 개발된 algorithm을 program화하여 사용하였다. 열전달 및 응력해석 모두에 2차원 모델링을 사용하였기 때문에, 적층판의 종(longitudinal)방향과 횡(transverse)방향에 대해 각각 $[0_{15}/90_5]$ 와 $[90_{15}/0_5]$ 의 적층각을 주어 해석을 수행하였다.

4. 결과 및 토론

Fig. 7과 Fig. 8은 cooling시 적층판 내의 온도 이력이다. Fig. 7과 Fig. 8에서 적층판 중심 면과 0° 와 90° 층간의 경계면에서의 온도 이력은, 앞의 3절에서 설명한 바와 같이, 표면에서의 측정치를 토대로 한 열전달해석에 의한 것이다. Fig. 8의 비대칭 완냉의 경우, 초기 cooling과정에서의 온도이력에 약간의 동요(fluctuation)가 있는 것을 제외하

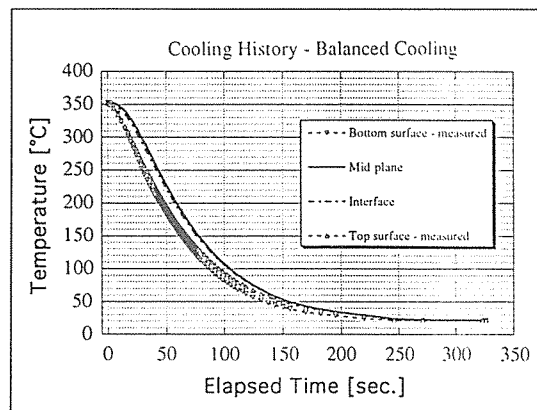


Fig. 7. Temperature evolution on the surface and within the laminate: for balanced cooling.

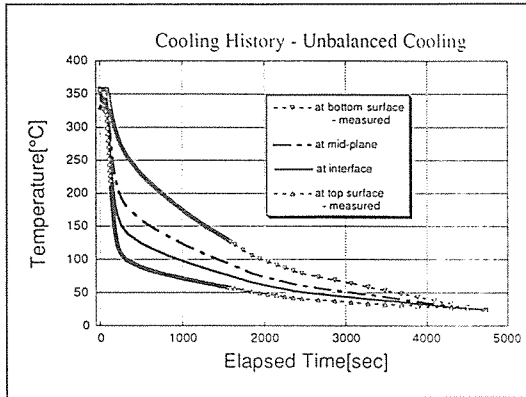


Fig. 8. Temperature evolution on the surface and within the laminate: for unbalanced cooling.

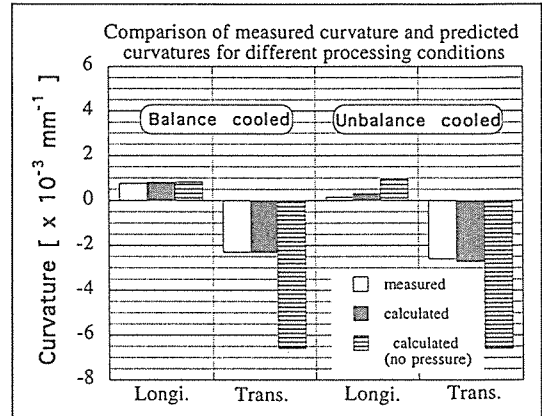


Fig. 9. Curvature of the glass/PEI laminate.

고는 전체적으로 매우 안정적인 것으로 관찰되고 있다. 또한, 이 부분에서의 동요도 대체로 300℃ 이상의 고온에서, 상대적으로 짧은 동안의 현상이므로 내부응력 계산에는 영향을 주지 않는다.

Fig. 9 은 각각의 냉각이력을 가진 적층판에 대해서 측정한 곡률(curvature)의 결과이다. 여기에서는, 측정 결과와 함께 앞의 3 절의 방법에 의한 유한요소해석의 결과도 나타내었다. Fig. 9 에서 'calculated' 으로 표시한 것은 실제 실험 조건과 마찬가지로, 적층판이 mould 안에서, mould 면에 의해 구속된 상태로 냉각될 경우를 해석을 통해 simulation 한 경우를 가리킨다. 냉각 중 mould 에 의한 구속조건은 Fig. 4(b) 의 유한요소 모델에서, 하부면에서는 z 방향의 변위 $u_z = 0$, 상부면에서는 $u_z = \text{constant}$ 라 가정하는 것으로 모사 하였다. 이 경우에 대한 해석 결과, 계산에 의한 예측치와 측정치는 대체로 깨끗하게 일치하는 것을 보여주고 있다. 곡률이 타 경우에 비해 상대적으로 작은 비대칭 완냉에서의 종방향 시편, 즉(0₁₅/90₅)시편의 경우에서, 곡률의 예측치와 측정치간에 다소의 차이가 있으나 그 차이가 크지 않다.

Fig. 9 에서 'no pressure' 으로 표시한 것은, 냉각중의 압력이 적층판의 칫수불안정에 미치는 효과를 연구하기 위해, 실제의 실험조건과는 달리, mould 밖에서 아무 구속조건이 없는 상황에서 냉각을 진행시킨 경우에 대해 simulation 한 것이다. 이 경우, 90° 방향의 layer 가 더 많은 횡(transverse) 방향, 즉(90₁₅/0₅)시편의 경우, 냉각이

력을 불문하고 측정결과에 비해 2배 이상의 곡률을 갖는 것을 보여 주고 있다. 이는, 냉각 중 mould 등에 의한 외부의 constraint 조건은 적층판 내부응력의 이완에 영향을 미치고, 이것이 결과적으로 적층판의 최종 형상, 즉 칫수불안정성에 주요한 영향을 미치는 것 입증하고 있다.

종래의 열탄성적인 접근방법(thermoelastic approach) 으로는, 이 같은 mould 등에 의한 기하학적 구속조건이나 또는 압력 효과와 같은 공정 변수의 영향을 정량적으로 해석할 수 없다. 즉, 응력 발생의 시작점으로 stress free temperature 와 같은 매개변수(parameter)를 도입하고, 냉각 중 발생한 응력이 이를 경계점으로 하여 그 이전과 이후에서는 각각 100% 이완 혹은 100% 보존된다는 지나치게 단순화된 가정을 토대로 한 열탄성 모델링의 경우, 냉각 중 적층판에 작용하는 외부압력 또는 구속조건 등의 중요한 인자들을 해석에 종합적으로 포함시킬 수 없으므로, 정성적인 해석을 할 수밖에 없다. 또한, stress free temperature 는 재료 물성이 아닌 가상의 온도로서, 적층판의 형상이나 적층순서 등의 여러 요인에 따라 달라질 수 있으므로, 실용 적층각을 갖는 부품의 대해 이를 정의하기가 매우 애매하며, 이를 실험적으로 찾아내는 것은 사실상 불가능하다.

냉각과 병행하여, 발생(generation)과 이완(relaxation) 의 과정을 지나는 복합재의 내부응력 및 칫수불안정의 문제에 있어서, 이의 근본적인 이해와 이를 통한 정량적인 해석을 위해서는 불필요

한 가정을 줄이고 직접적으로 현상을 모델링 하는 것이 바람직하며, Fig. 9의 결과는 이를 위한 점탄성적 접근의 필요성과 그 가능성을 시사하고 있다.

Fig. 10 ~ Fig. 13은, 적층판의 냉각 중 발생하는 내부응력의 해석결과이다. 이 그림들에서 내부응력, S_{xx} 는 시편의 길이 방향의 응력을 지칭하며, 그림에서는 시편 두께에서의 분포를 나타내고 있다. 여기서는 냉각과정 중 각각 4가지 단계에서의 응력을 나타내고 있다. 이는 참고문헌[7]에서 해석의 효율성을 위해 나눈 냉각과정의 3 단계가 mould 안에서 진행될 때, 즉 (1) 점성단계(viscous stage : 적층판 전체의 온도가 glass/PEI 재료의 T_g 보다 상당히 높아서, 냉각 중에 발생하는 응력 중 이완 가능한 응력요소는 순간적으로 이완, 소멸되는 영역), (2) 점탄성 단계(viscoelastic stage : 적층판의 온도가 glass/PEI 재료의 T_g 근방인 단계로 응력의 발생과 이완이 같은 order로 공존하는 영역) (3) 탄성단계(elastic stage : 적층판의 온도가 glass/PEI 재료의 T_g 보다 상당히 낮은 단계. 응력의 이완은 거의 일어나지 않고, 냉각에 의해 발생한 응력이 그대로 보존되는 영역)의, 각 단계에서의 마지막 시점(다음 단계로 전환되는 시점 및 냉각이 완료된 시점)에서와, 또한 그 후 mould로부터 적층판을 탈형한 후의 응력 상태 등, 4가지 상태에서 내부응력의 계산 결과이다. 각 단계의 전환점은 참고문헌[7]에서의 특성함수 h 에 대해서, tolerance 값 0.001로 주어 계산함으로써 결정하였다.

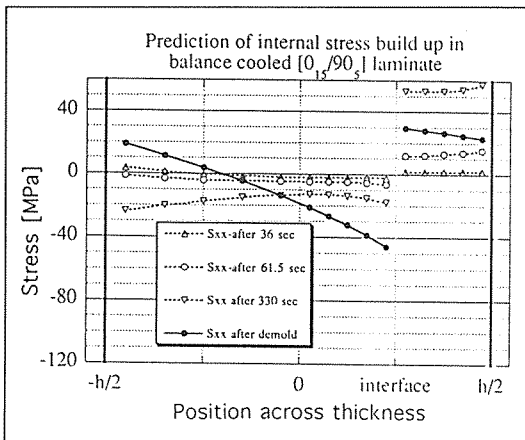


Fig. 10. Evolution of internal stresses in the longitudinal direction during balanced cooling. ($S_{xx} : \sigma_{xx}$)

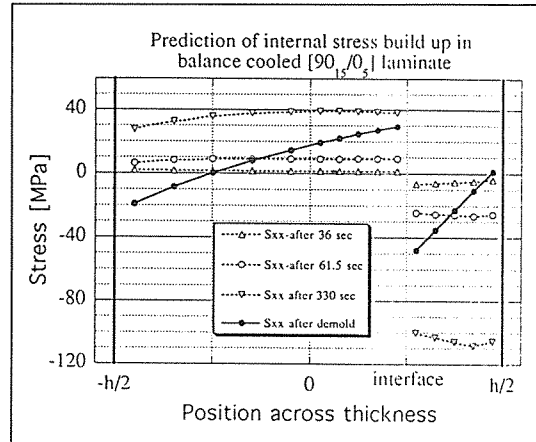


Fig. 11. Evolution of internal stresses in the transverse direction during balanced cooling. ($S_{xx} : \sigma_{yy}$)

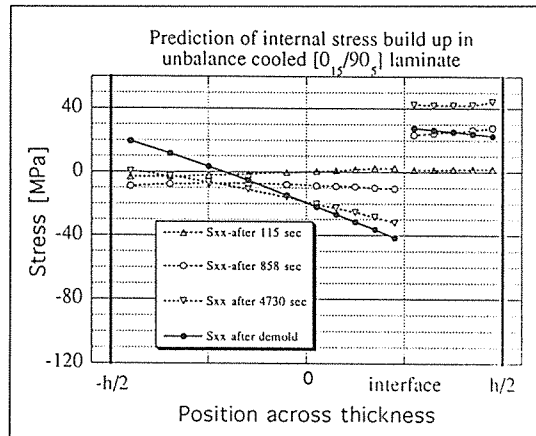


Fig. 12. Evolution of internal stresses in the longitudinal direction during unbalanced cooling. ($S_{xx} : \sigma_{xx}$)

Fig. 10 ~ Fig. 13의 결과들에서는, 상기의 냉각과정의 3 단계 중 첫 단계, 즉 점성단계에서의 발생응력은 냉각이 완료되는 시점까지 발생하는 전체 내부응력에 비해 무시할 수 있을 정도의 것임을 보여주고 있다. 이에 반해, 두 번째 단계, 즉 점탄성 영역에서는 부위에 따라 전체 발생응력의 30 ~ 50%까지의 응력이 발생함을 알 수 있고, 이는 내부응력의 발생과 예측에 있어서 이 영역의 중요성과 또한 점탄성 해석의 필요성을 시사하고 있다. 한편, 50% 이상

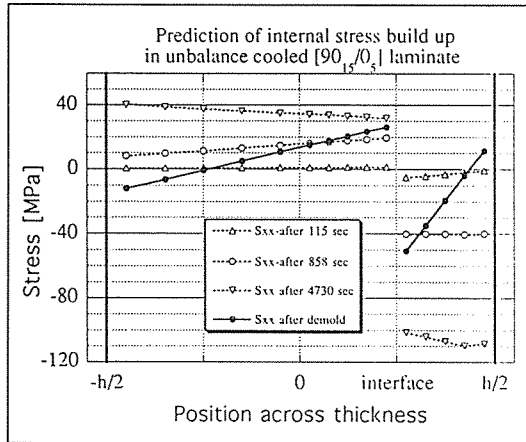


Fig. 13. Evolution of internal stresses in the transverse direction during unbalanced cooling. (S_{xx} : σ_{yy})

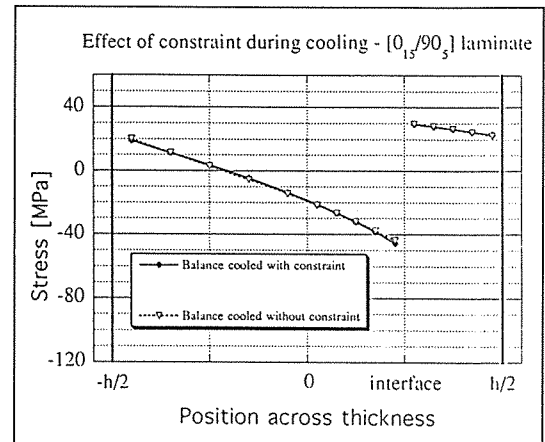


Fig. 14. Comparison of the predicted internal stresses after cooling under different constraint condition: longitudinal direction, balanced cooling. (S_{xx} : σ_{xx})

의 응력은 세 번째의 탄성단계에서 발생하고 있다.

Fig. 10 ~ Fig. 13 에서 관찰할 수 있는 바와 같이, mould 안에서의 냉각이 완료된 시점에서, 적층판 내 응력분포 상황은 그 자체로서는 평형조건을 만족시키지 못하고 있는 상태에 있다. 탈형에 의해 mould 에 의해 구속되어 있는 상태에서부터 해방되어 경계조건이 바뀌게 되면, 내부응력은 평형을 이루도록 재분포가 일어나게 되며 이 과정에서 칫수 불안정 현상이 발생하게 된다. 즉, 탈형 전후의 응력분포간의 차이만큼의 응력이 탈형시 적층판의 변형에 소비되었다고 할 수 있다. 또한, Fig. 10 ~ Fig. 13 에서 점선으로 표시한, 탈형 직전까지의 응력을 내부응력(internal stresses)이라 할 때, 이에 대해 탈형시의 변형 과정을 지나 최종적으로 적층판 내에 잔존하게 되는 응력을 잔류응력(residual stresses)이라 할 수 있다.

Fig.14 ~ Fig.17 에서는 냉각 중의 mould 에 의해 적층판에 부과되는 constraint (또는 압력)가 내부응력의 발전에 미치는 효과를 해석한 결과이다. Fig.14 및 Fig. 16 에서의, 0° 방향의 layer가 많은 적층판의 중(longitudinal) 방향의 경우, constraint 여부가 내부응력의 발생에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있는데, 이는 Fig. 9 의 곡률 비교에서도 동일한 경향을 갖고 있음을 관찰할 수 있다. Fig.15 및 Fig. 17 에서의, 90° 방향의 layer 가 더

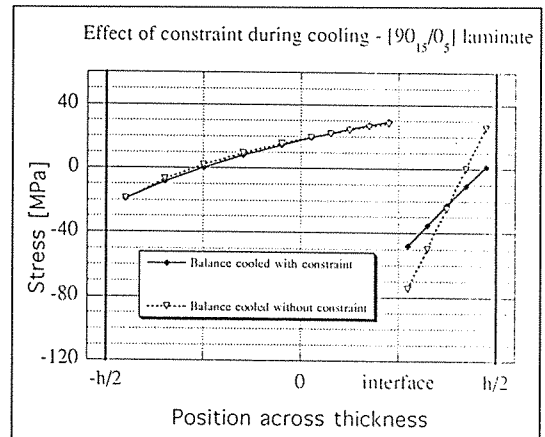


Fig. 15. Comparison of the predicted internal stresses after cooling under different constraint condition: transverse direction, balanced cooling. (S_{xx} : σ_{yy})

많은 transverse 방향의 경우는, constraint 여부가 내부응력의 발생에 큰 영향을 주는 것을 보이고 있다. 역시, Fig. 9의 곡률 비교와 동일한 경향을 갖고 있음을 관찰할 수 있다.

본 연구에서 수행한, 점탄성 해석에 의한 내부 및 잔류응력 예측의 타당성을 평가하기 위해, 실험

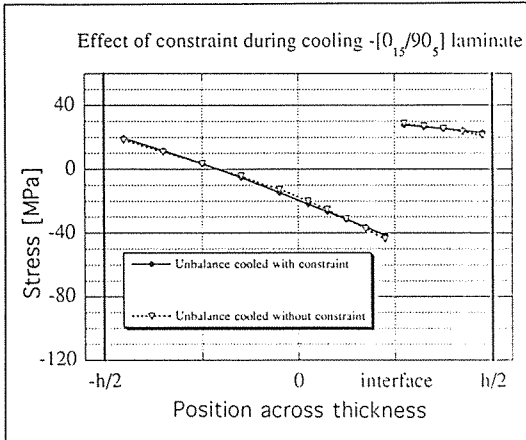


Fig. 16. Comparison of the predicted internal stresses after cooling under different constraint condition: longitudinal direction, unbalanced cooling. ($S_{xx} : \sigma_{xx}$)

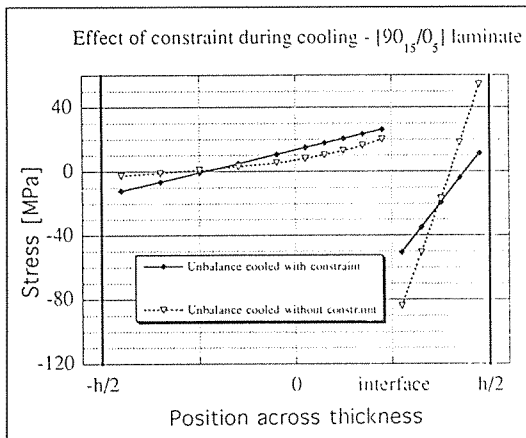


Fig. 17. Comparison of the predicted internal stresses after cooling under different constraint condition: transverse direction, unbalanced cooling. ($S_{yy} : \sigma_{yy}$)

적으로 적층판내의 잔류응력을 측정, 해석치와 비교해 보았다. 측정에는, 이방성 재료내의 잔류응력 측정을 위해 개발된 SGT 방법[8]이 이용되었다. 급냉(balance cooling) 및 완냉(unbalanced cooling)의 이력을 가진 각각의 적층판으로부터 횡방향으로 절취된 시편, 즉 $(90_{15}/0_5)$ 시편에서의 잔류응

력을 측정하였다.

이론적으로는, 참고문헌[8]에 기술된 바와 같이 적층판의 각 layer 에 연속적인 홈의 가공을 통하여 측정한 strain 결과로부터 각 층에서의 잔류응력을 직접 계산할 수 있다. 그러나, 잔류응력의 측정은 실험에 있어서 고도의 정밀성이 요구되며, SGT 실험에 있어서도 오차, 즉 홈가공과 strain 측정시 오차와 시편내의 각 층의 두께나 층 내의 섬유방향각 등이 비균질한 데 따른 compliance 계수의 오차 등은, 잔류응력 계산의 안정성(stability)에 과도하게 영향을 미칠 수 있다. SGT 방법에서는, 적층판의 표면층 으로부터 한 층씩 홈을 가공해 들어가며 반대면에서는 strain을 측정하게 된다. 각 층의 잔류응력에 대한 해석은 홈가공과 병행하여 단계별로 진행되며, 어느 한 층의 응력은 그 이전 층 모두에서의 응력계산 결과와 strain 측정치로부터 계산된다. 이 때, 전술한 요인들에 의해 그 이전 층까지의 응력계산에 오차가 있으면 그 층에서의 응력계산에서의 오차는 증폭되고, 이는 홈가공 및 계산을 진행할수록 더욱 악화될 것이다. 이 문제에 대한 대처 방안으로서, 많은 수의 시편에 대해 정밀성을 높은 실험을 수행하는 직접적 방법과, 또는 실험결과에 해석에 있어 통계처리 방법을 도입 계산의 안정성 문제를 피하는 간접적 방법이 있을 수 있다.

본 연구에서는 최소자승법을 이용, 잔류응력 측정에서의 오차에 의한 계산의 불안정(instability) 문제를 우회토록 하였다. 즉, SGT 실험이 이루어진 $(90_{15}/0_5)$ 시편에서, 90° 와 0° 층 내에서 잔류응력은 선형 분포를 가진다고 가정하면,

$$\sigma_{yy} = ax + b \text{ at } -h/2 \leq z \leq z_i,$$

$$\sigma_{yy} = cx + d \text{ at } z_i \leq z \leq h/2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서, z_i 는 경계면에서의 z 의 값이다.

식 (4)에서, 90° 와 0° 의 각 층 내에서의 잔류응력은 4개의 상수 a, b, c, d 는, 잔류응력 σ_{yy} 의 단면에서의 평형조건 으로부터, 그 개수를 2 개로 줄일 수 있다. 여기서, 단면에서의 힘과 모멘트 평형방정식은 다음과 같다.

$$\sum F_y = \int_{z=-h/2}^{z=h/2} \sigma_{yy}(z) dA = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Sigma M_x = \int_{z=-h/2}^{z=h/2} z \cdot \sigma_{yy}(z) dA = 0 \quad (6)$$

이에 따라, 문제는 2개 상수조합에 의해 정의될 수 있는 가상의 응력분포 중 가장 타당한 것을 찾아내는 것으로 귀결된다.

가장 타당한 응력분포, 즉 SGT 실험시 측정된 것과 가장 근접한 strain 을 줄 수 있는 응력분포는, 다음의 과정으로 요약할 수 있다.

① 2개 상수조합으로, 여러 개의 가상의 응력분

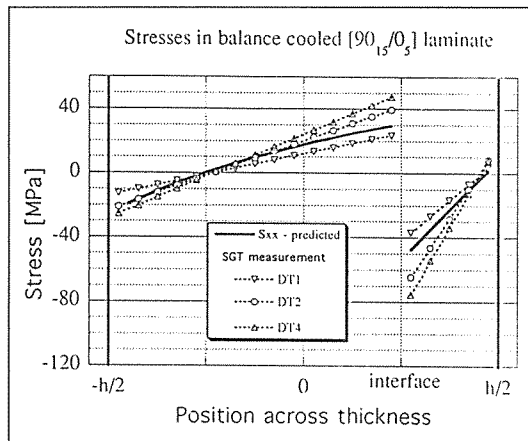


Fig. 18. Comparison of predicted and measured internal stresses: transverse direction, balanced cooled laminate. ($S_{xx} : \sigma_{yy}$)

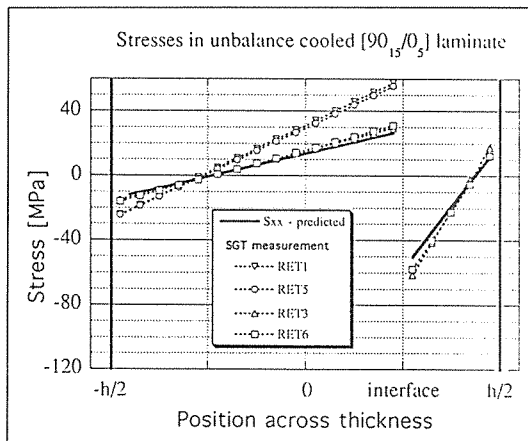


Fig. 19. Comparison of predicted and measured internal stresses: transverse direction, unbalanced cooled laminate. ($S_{xx} : \sigma_{yy}$)

포를 정의하고,

② 가상의 응력분포를 갖는 적층판에 대해, 수치 해석을 통한 모의 SGT 실험을 하여, 가상의 strain 결과치를 구하여,

③ 가상의 strain 과 실제 SGT 시험에 의해 측정된 strain 과 비교, 최소의 자승오차를 갖는 경우의 것을 발해한다.

즉, 실제 SGT 시험에 의해 측정된 strain 과 가장 근접한(최소자승오차를 주는) strain 을 낚는 응력분포를 수치모사(simulation) 할 수 있다.

Fig. 18 과 Fig. 19 는, 이상과 같이 최소자승법을 병행한 SGT 실험에 의해 구한 잔류응력과 해석에 의해 예측한 잔류응력을 비교한 것이다. 전체적으로, 예측치와 실험치가 잘 일치하는 것을 보여주고 있다.

5. 결 론

고온에서 성형되는 복합재의 칫수불안정의 문제와 이의 원인인 내부응력의 정도를 예측하는데 있어서의 해석적 예측능력을 평가하기 위한 목적으로, glass/PEI 적층판을 대상으로 성형(moulding) 후 냉각이력(cooling profile)의 효과를 연구하였다. 2 가지의 상이한 냉각이력, 즉 급냉-대칭(balanced fast cooling) 과 완냉-비대칭(unbalanced slow cooling) 조건을 부여하고, 이것이 적층판의 최종형상과 그 내부의 잔류응력에 미치는 효과를 점탄성이론에 근거한 수치해석적 방법과 실험적 방법을 통하여 관찰하였다.

성형후 냉각이력의 3 단계, 즉 (1)점성(viscous) 단계, (2)점탄성(visco-elastic)단계 및 (3)탄성(elastic)단계에서의 내부응력 발생과, 그 후의 탈형에 따른 적층판의 변형, 즉 칫수불안정 현상을 정량적으로 해석하였으며, 실험적으로 해석의 타당성을 확인하였다. 본 연구에서 사용한 glass/PEI 적층판의 경우, 전술한 냉각 삼단계 중, (2)점탄성단계에서 30% 이상의 내부응력이 발생하는 것을 관찰하였다. 또한 이 과정에서 mould 에 의한 구속(constraint)의 영향이 응력이완에 영향을 주고, 결과적으로 이후의 칫수불안정에 심각한 영향을 미치는 것을 관찰하였으며, 이를 정량적으로 계산하였다. 이를 통해, 제반의 재료 및 공정조건을 해석에 포함시키고 동시에 내부응력 및 잔류응력의 예측에 있어서의 정확도를 높이기 위한 점탄성

적 모델링의 필요성을 확인할 수 있었다.

복합재 적층판내의 잔류응력 측정에 있어서의 SGT 방법의 실용가능성을 조사하기 위한 실험을 실시하였다. (90₁₅/0₅)glass/PEI 적층판내의 잔류응력의 측정에 있어서는, 최소자승법을 이용, 시편제작과 측정에 있어서의 오차에 기인하는 계산상의 안정성 문제를 해결할 수 있었다. 실험과 해석의 결과가 대체로 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있었고, 이로써 SGT 방법의 가능성을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. Werner, W., "Cost Effectiveness of Structural Applications of Fibre Reinforced Thermoplastics", Proc. of the International Symposiums 'Advanced materials for light weight structures', ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp.25-27, March 1992.
2. Barnes, J. A., Byerly, G., LeBouton, M. C. and Zahlan, N., "Dimensional Stability Effects in Thermoplastic Composites - Towards a Predictive Capability", Composite Manufacturing, Vol. 2, No. 3/4, 1991.
3. Nairn, J. A. and Zoller, P., "Matrix Solidification and the Resulting Residual Thermal Stresses in Composites", J. Material Science, 20, pp.355-367, 1985.
4. Nairn, J. A. and Zoller, P., "The Development of Residual Thermal Stress in Amorphous and Semicrystalline Thermoplastic Matrix Composites", Toughened Composites, ASTM STP 937, American Society for Testing and Materials, 1987.
5. Manson, J.-A. E. and Seferis, J. C., "Process Simulated Laminate(PSL): A Methodology to Internal Stress Characterization in Advanced Composite Materials", J. Composite Materials, 26, 1992.
6. W. J. Yu, P. Sunderland and J.-A.E. Manson, "A method for the measurement of internal stresses in laminated composites: the Successive Grooving Technique", Proc. ANTEC 94 II, pp.2045-2049, 1994.
7. 유원재, "섬유강화복합재의 성형시 발생하는 내부응력의 예측을 위한 점탄성 모델링", 한국복합재료학회지, Vol. 10, No. 3, 1997.
8. 유원재, "섬유강화복합재 성형잔류응력의 측정을 위한 연속 흡가공법(SGT)", 한국복합재료학회지, 게재 승인, 1997.
9. Phillips, R., Kim, P., Sunderland, P. and Manson, J.-A., E., "Influence of Processing Parameters on the Dimensional Stability of Polymer Composites", Proc. of the International Workshop on Advanced Materials for High Precision Detectors, Archamps, Haute-Savoie, France, ,28-30, September 1994.
10. ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbit, Karlsson and Sorenson Inc.