

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(1), 1-7(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.1.1

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

굴곡 형상 복합재 구조물의 스프링-인 예측

오재민, 김위대*

Prediction of Spring-in of Curved Laminated Composite Structure

Jae-Min Oh and Wie-Dae Kim*

Department of Aerospace engineering, Pusan National University

ABSTRACT

This paper predicts the spring-in effect of curved laminated composite structure for various stacking sequence using finite element analysis(ABAQUS). In composite manufacturing process, large temperature difference, different coefficient of thermal expansion and chemical shrinkage effect cause distortion of composite parts such as spring-in and warpage. Distortion of composite structure is important issue on quality of product, and it should be considered in manufacturing process. In finite element analysis, a CHILE(Cure Hardening Instantaneously Linear Elastic) model and chemical shrinkage effects are considered developing user subroutine in ABAQUS and some cases are simulated.

초 록

본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재를 적층각과 적층순서에 따라 C-channel 형상에서 발생하는 스프링-인을 유한요소해석(ABAQUS)을 통해 예측하였다. 복합재 제작공정에서 냉각시의 큰 온도차 및 적층각에 따른 열팽창계수 및 화학적 수축계수의 차이로 인해 변형(스프링-인)이 발생한다. 이러한 변형은 제품의 품질과 직결되는 문제이며, 반드시 고려되어야 할 사항이다. 유한요소해석 시 CHILE모델과 화학적 수축을 고려한 서브루틴을 제작하여 적용하였으며, [0/X/Y/90]s case에 대해 X,Y를 0~90°까지 변화시키며 각 case에 대한 스프링-인 발생량을 예측, 분석하였다.

Key Words : Spring-in(스프링-인), CHILE(Cure Hardening Instantaneously Linear Elastic), C-channel, FEM(유한요소해석), User Subroutine(서브루틴), ABAQUS

1. 서 론

탄소섬유강화 복합재료는 일반 금속에 비해 중량 대비 뛰어난 기계적 특성으로 인해 항공우주, 무기, 선박, 자동차 분야 등과 같이 다양한

산업 분야에서 활용되고 있다. 특히 항공우주분야에서 항공기의 성능향상 및 연료절감을 위해 복합재가 가장 많이 쓰이고 있다. 복합재 생산을 위해 다양한 공정이 개발되었으며, 그 중 오토클레이브 공정은 고성능 복합재의 생산을 위한 표

† Received : October 13, 2014 Revised : December 22, 2014 Accepted : December 30, 2014

* Corresponding author, E-mail : wdlim@pusan.ac.kr

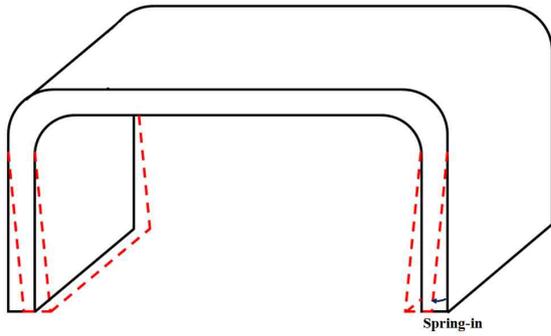


Fig. 1. Spring-in phenomenon

준기술로서 대부분의 고성능 복합재료 부품은 이를 통해 생산되고 있다. 고온, 고압을 사용하는 오토클레이브 공정의 특성상 수지(Resin)와 섬유(Fiber)의 열팽창계수(Coefficient of thermal expansion) 차이, 수지의 화학 수축(Chemical shrinkage), 냉각과정에서의 큰 온도차이, 제품의 형상, 적층각과 적층순서 등 다양한 요인에 의해 제품의 변형이 발생한다. 특히 C-channel 구조물의 경우, Fig. 1과 같이 Flange 부분이 안쪽으로 들어오는 스프링-인 현상이 발생한다.

이러한 제품의 변형으로 인해 공정 후 제품 형상이 초기 설계 형상과의 오차가 발생하게 된다. 이와 같은 오차를 허용 공차 내에서 최소화시키기 위해 실제 제작을 반복하게 되면 몰드의 교체 비용과 제작 시간의 증가를 야기하며, 이는 곧 복합재 구조물의 생산효율을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 사전에 유한요소해석을 통해 복합재 제작 과정 및 결과를 예측해 본다면 복합재 제작기간과 비용을 절감할 수 있다.

이를 위해 국내외에서는 오토클레이브 공정에서 복합재 제품의 정확한 형상을 확보하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔다. Alfred C, et al.⁽¹⁾는 에폭시(Epoxy)의 온도에 따른 경화도(Degree of cure)와 점성(Viscosity)을 고찰 하였으며, 에폭시의 경화를 고려한 복합재료의 거동을 고찰하였다. White, et al.⁽²⁾은 탄소섬유강화 복합재료 중의 하나인 AS4/3501-6의 온도주기(Temperature cycle)에 따른 잔류응력을 점탄성을 고려하여 제시하였다. Fernlund, et al.⁽³⁾은 다양한 적층각과 성형 틀의 재질에 따른 C-channel과 L-shape의 스프링-인(Spring-in)과 뒤틀림(Warpage)을 실험을 통해 고찰하였으며, 정우균 등⁽⁴⁾은 유리섬유 / 탄소섬유 강화 비대칭 하이브리드 복합재료의 스프링 백(Spring back)에 대해 고찰하였다. 이외에도 다양한 복합재료에서의 열 변형에 대한 연구^{(5)~(14)}가 수행되어왔다.

Fernlund, et al.⁽³⁾의 연구 결과, 적층각과 적층순서는 복합재 구조물의 변형을 유발하는 주요 요인 중 하나이다. 적층각과 적층순서에 따라 수많은 경우의 수가 발생하며, 실험을 통해 변형을 예측하는 것은 한계가 있다. 따라서 적층각과 적층순서에 따른 복합재 구조물의 변형을 예측할 수 있는 해석 도구 및 기법이 반드시 필요하다. 현재 복합재 구조물의 구조해석에 사용되는 대표적인 상용 틀인 ABAQUS나 NASTRAN/PATRAN은 수지의 경화도 발달에 따른 물성의 변화나 화학 수축의 변화를 모사하는데 한계가 있다. 그러므로 ABAQUS나 NASTRAN/PATRAN이 제공하는 기본적인 기능으로는 복합재 구조물의 열 변형을 정확하게 예측할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 UMAT과 UEXPAN ABAQUS 서브루틴을 제작, 적용하여 경화도에 따른 물성치의 변화를 모사하고, 적층각과 적층순서에 따른 C-channel 복합재 구조물의 스프링-인을 예측하고자 한다. 서브루틴은 해석에 앞서 기존의 연구결과를 통해 검증을 거친 후 해석에 적용하였으며, 해석 비교모델은 단일적층 및 대칭적층에 대해 적층각과 적층순서를 달리하여 선정하였다.

II. 본 론

2.1 서브루틴의 이론적 접근 방법

2.1.1 경화도

경화도는 수지의 경화정도를 나타내는 척도로서, 0~1의 범위를 가진다. 경화도가 0일 경우 수지는 액체(Liquid) 상태이며, 0.8이상일 경우 고체(Solid) 상태이다. 본 연구에서는 AS4/8552를 사용하였고, 온도와 경화도에 따른 경화율(Cure rate)은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹¹⁾.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{K\alpha^m(1-\alpha)^n}{1 + e^{C\{\alpha - (\alpha_0 + \alpha_{CT})\}}} \quad (1)$$

식 (1)에서 α 는 경화도 K , C , α_0 , α_{CT} , m , n 은 경화율 상수를 의미하며, T 는 온도를 의미한다. 여기서 K 는 Arrhenius Equation으로 나타낼 수 있으며 아래의 식과 같다.

$$K = A \exp(-\Delta E/RT) \quad (2)$$

식 (2)에서 A 는 빈도계수(Pre-exponential factor)이며, ΔE 는 활성화 에너지(Activation energy), R 은 보편기체상수(Universal gas constant), T 는

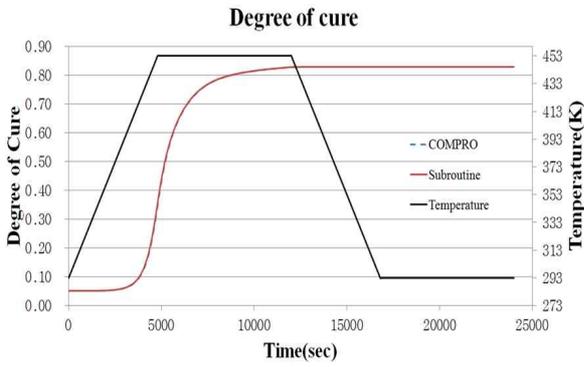


Fig. 2. Comparison of degree of cure

절대 온도(Absolute temperature)를 나타낸다.

식 (1)을 바탕으로 오일러 방법을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\Delta t} = \frac{K_i \alpha_i^m (1 - \alpha_i)^n}{1 + e^{C\{\alpha_i - (\alpha_{c0} + \alpha_{CT} T_i)\}}} \quad (3)$$

식 (3)을 정리하게 되면 최종적으로 경화도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{i+1} = \Delta t \left[\frac{K_i \alpha_i^m (1 - \alpha_i)^n}{1 + e^{C\{\alpha_i - (\alpha_{c0} + \alpha_{CT} T_i)\}}} \right] + \alpha_i \quad (4)$$

식 (4)에 따라서 경화도의 정확도는 해석 시 설정한 시간의 간격에 의존적이며, 시간 간격이 작을수록 정확도가 높아진다. 경화도의 검증에 사용된 온도주기와 경화도 결과 값은 Fig. 2와 같으며, 복합재 구조해석 상용 툴인 COMPRO의 결과 값과 비교하였다. COMPRO의 결과 값은 0.828, 계산 결과는 0.829로 오차율 0.079%를 나타냈다. 따라서 서브루틴에 적용된 경화도의 계산이 올바르게 적용되었다고 판단된다.

2.1.2 구성방정식

복합재는 수지의 경화도에 따라 물성치가 변화하며, 이는 CHILE 모델(Cure hardening instantaneously linear elastic model)을 사용하여 구현할 수 있다. 수지의 탄성계수는 다음과 같은 식을 통해 나타낼 수 있다.⁽¹¹⁾

$$E_m = \begin{cases} E_m^0 & T^* < T_{C1}^* \\ E_m^0 + \frac{(T^* - T_{C1}^*)}{(T_{C2}^* - T_{C1}^*)} (E_m^\infty - E_m^0) & T_{C2}^* < T^* < T_{C1}^* \\ E_m^\infty & T^* > T_{C2}^* \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서의 E_m^0 은 매우 낮은 경화도에서의 수지의 탄성계수, E_m^∞ 은 수지의 완전경화시의 탄

성계수, T^* 는 수지의 온도와 유리 전이 온도와의 차를 의미한다. 특히 T^* 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T^* = (T_g^0 + a_{Tg} \alpha) - T \quad (6)$$

T^* 은 온도와 경화도의 함수로 나타낼 수 있고, 결국 수지의 탄성계수는 경화도의 발달과 동일한 경향을 보이게 된다. 섬유의 탄성계수는 온도에 따른 변화가 수지에 비해 매우 미미하므로 항상 일정하다고 가정할 수 있다. 복합재의 탄성계수는 수지의 탄성계수와 섬유의 탄성계수를 Micromechanics model을 사용하여 구할 수 있다. 따라서 복합재의 구성방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_i(t) &= \int_0^t Q_{ij} \frac{\partial}{\partial \tau} (\epsilon_j(\tau) - \epsilon_j^A(\tau)) d\tau \\ \epsilon_j^A &= \beta_j \Delta T + \eta_j \Delta \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 σ_i 는 주재료방향에 따른 응력, ϵ_j 는 총 변형률(Total strain), ϵ_j^A 는 비기계적 변형률(Non-mechanical strain)을 의미한다. 또한 β_j 와 η_j 는 각각 열팽창계수 및 화학수축계수(Chemical shrinkage coefficient)를 의미한다.

2.2 서브루틴 검증

2.2.1 COMPRO 해석 결과 비교

본 연구에서 C-channel 형상을 해석하기 위해, CHILE 모델을 적용한 UMAT과 경화도와 온도에 따른 열팽창과 화학 수축을 고려한 UEXPAN 서브루틴을 제작하였다. 따라서 서브루틴의 신뢰성을 확인하기 위해 Convergent사에서 개발한 복합재 구조해석 상용 해석 툴인 COMPRO의 해석 결과와 비교하였다. 해석결과 비교를 위해 Fig. 3

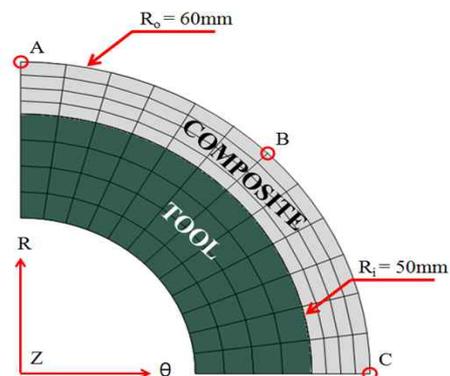


Fig. 3. Corner section model

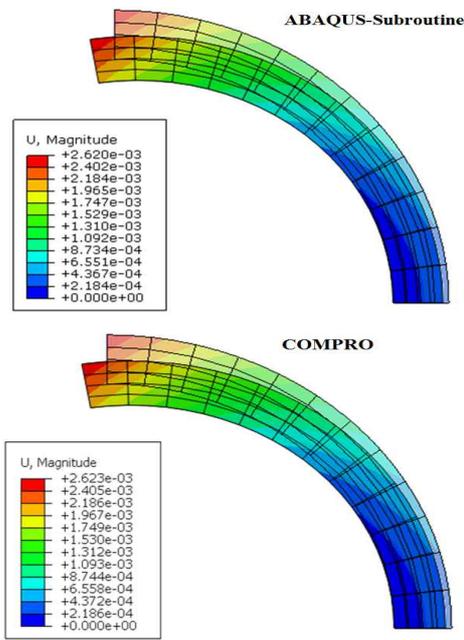


Fig. 4. Comparison of deformation

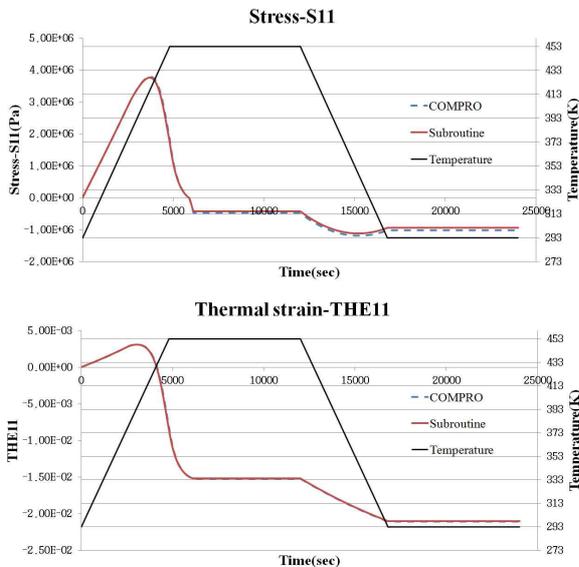


Fig. 5. Comparison of stress and strain

와 같은 Corner section 모델의 해석을 실시하였다.

모델의 형상정보는 Fig. 3과 같으며 복합재는 AS4/8552를 사용하였다. 해당 물성치는 참고 문헌에서 참고하였다. 적층각은 $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$ 로 총 8ply를 적층하였다. 성형틀의 재질은 알루미늄을 사용하였다. 요소 개수는 복합재 부분은 48개, 성형틀 부분 또한 48개로 총 96개로 C3D20 요소 타입을 사용하였다. 해석 모델의 A, B, C 3개의 절점에서 응력과 열변형률, 변위를 측정하였으며,

결과는 Fig. 4, 5와 같다.

해석 결과, 최종 잔류응력은 0.94 Mpa, 열변형률은 -0.021로 COMPRO 결과값과 각각 약 7%, 0.142% 의 오차를 보였다. 변위의 경우, 반경 방향(Radial direction)으로 최대 2.085mm, 원주 방향(Circumference direction)으로 최대 1.587mm 팽창하였다. 이는 COMPRO 결과값인 반경 방향 변위 2.087mm, 원주 방향 변위 1.589mm와 비교할 때 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.

2.2.2 실험 결과 비교

실제 실험과의 경향성 및 변형량 검증을 위해 Albert⁽¹²⁾의 연구 결과와 비교하였다. 실험은 복합재 구조물의 형상, 성형틀의 표면상태와 재질, $[0^\circ]_n$, $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_n$ s 2가지 적층각 및 8ply, 16ply 2가지 두께에 대해 진행되었다. 실험 결과 중 5가지 비교모델을 선정하여 해석 결과와 비교하였으며, 각각의 비교모델은 Table 1과 같다.

성형틀의 표면상태는 매우 매끄러운 상태라 가정하였으며, 복합재 구조물 전체에 동일한 온도분포를 가진다고 가정하였다. 복합재는 AS4/8552를 사용하였다. 온도주기는 AS4/8552의 MRCC(Manufacturer's Recommended Cure Cycle)을 사용하였다. 이 때 AS4/8552의 경화도는 Fig. 6과 같다.

Table 1. Experimental conditions

Case Num.	Part shape	Lay-up	Tool material
1	C	$[0^\circ]_8$	Aluminum
2	C	$[0^\circ]_{16}$	Aluminum
3	C	$[0^\circ]_8$	Steel
4	C	$[0^\circ]_{16}$	Steel
5	C	$[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2s$	Steel

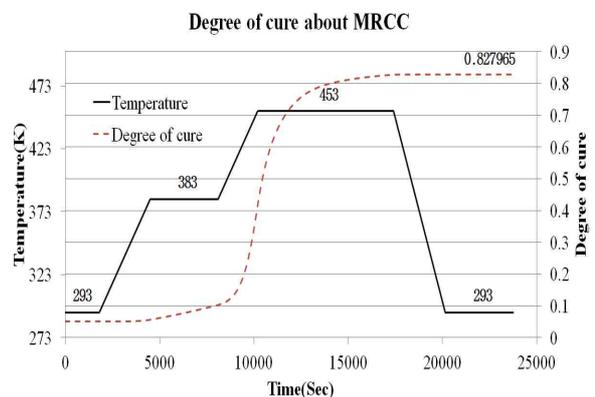


Fig. 6. Degree of cure about MRCC

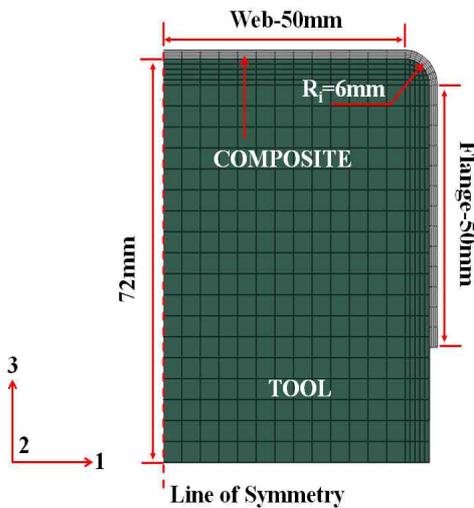


Fig. 7. The geometry information of C-channel

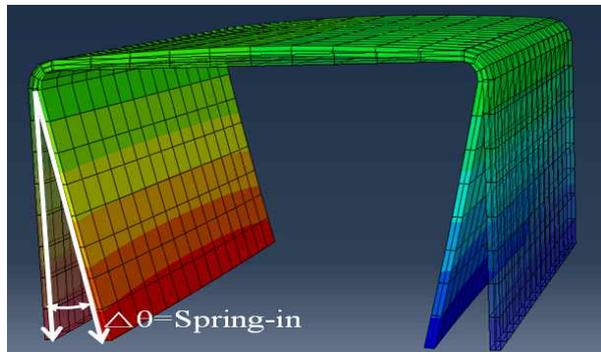


Fig. 8. Definition of spring-in

Comparison of measured and predicted spring-in

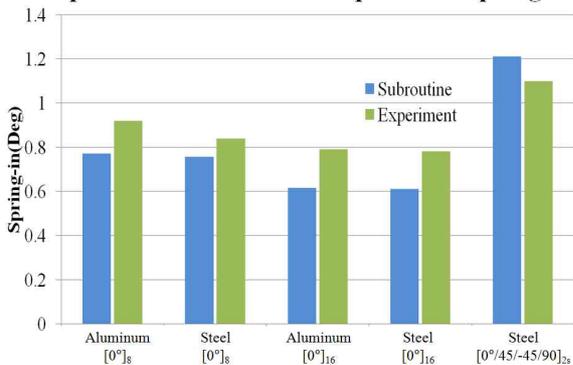


Fig. 9. Comparison of spring-in

해석모델의 형상정보는 Fig. 7과 같다. 요소 개수는 총 7414개이며, 요소 타입은 C3D20을 사용하였다. 1ply 당 두께는 0.2mm 가정하였다.

C-channel 형상의 변형은 스프링-인을 측정하였으며, 스프링-인 측정방법은 Fig. 8과 같다. 스프링-인은 초기 파트의 각도와 변형 후 파트의

차로 정의 하였다. 각 비교모델별 실험값과 해석값의 비교는 Fig. 9와 같다.

해석 결과, 최대 오차는 약 22%로 Case 3이었고, 최소 오차는 약 9%로 Case 2 이었다. 측정값과 해석결과가 다소 차이가 나는 것은 복합재 성형 시 표면 상태와 수지 유동, 복합재 구조물의 불균일한 온도분포 등 다양한 요인들에 의해 차이가 나는 것으로 판단된다. 하지만 두께 증가에 의한 스프링-인 감소, 적층각에 따른 스프링-인의 변화는 동일한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 서브루틴을 적용하여 해석한 결과 또한 충분히 신뢰할 만하다고 판단된다.

2.3 C-channel 유한요소해석

C-channel 복합재 구조물의 해석은 Albert의 실험에서 사용된 [0°/45°/-45°/90°]_s를 바탕으로 적층각과 적층순서에 따라 비교모델을 선정하였다. 해석 모델은 Fig. 7과 동일하며, 온도주기는 Fig. 6과 같다. 성형틀의 재질은 알루미늄을 사용하였다. 해석 비교모델은 적층각과 적층순서가 스프링-인에 미치는 영향을 예측하기 위해 [0°/X°/Y°/90°]_s로 설정하였다. X와 Y는 각각 0°, 30°, 45°, 60°, 90°로 변화한다. 총 25개의 비교모델을 선정하였으며 스프링-인 측정 결과는 Table 2와 같다.

총 25개의 비교모델 중 스프링-인이 가장 작게 발생한 적층각은 [0°/30°/60°/90°]_s 이며, 가장 크게 발생한 적층각은 [0°/90°/0°/90°]_s 이었다. X, Y에 따른 스프링-인 발생량을 살펴보면 다음과 같다.

Figure 10은 X의 각도를 변화시킬 때 스프링-인의 변화를 나타낸 그래프이다. 모든 Case에서 X의 각도가 30°일 때, 가장 작은 스프링-인이 발생하였으며, 30°이후 다시 스프링-인이 증가하는

Table 2. The result of each case about lay-up

Y \ X	0°	30°	45°	60°	90°
0°	1.574°	1.558°	1.555°	1.554°	1.556°
30°	1.361°	1.284°	1.276°	1.274°	1.298°
45°	1.533°	1.453°	1.445°	1.443°	1.462°
60°	1.694°	1.615°	1.608°	1.607°	1.618°
90°	1.797°	1.696°	1.693°	1.689°	1.68°

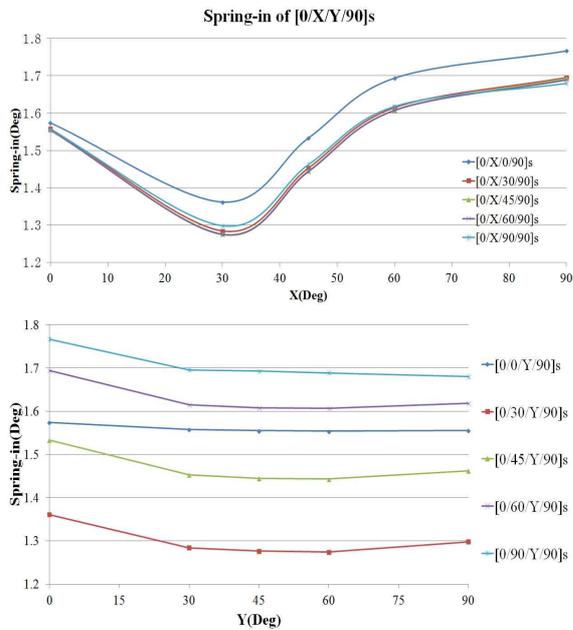


Fig. 10. The result of change of X and Y degree

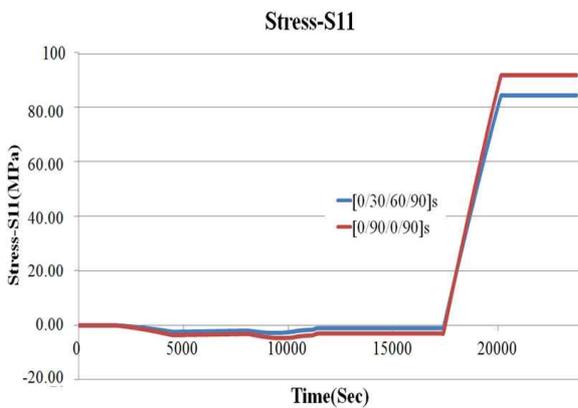


Fig. 11. Residual stress-S11 of [0/30/60/90]s and [0/90/0/90]s

경향을 보였다. 또한 $[0^\circ/X^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ Case에서 가장 큰 스프링-인 분포를 보였다. Y의 각도를 변화시킬 때, 모든 Case에서 Y의 각도가 60° 일 때 가장 작은 스프링-인이 발생하였으며, 60° 이후 다시 스프링-인이 증가하는 경향을 관찰할 수 있었다. 또한 $[0^\circ/90^\circ/Y^\circ/90^\circ]_s$ Case에서 가장 큰 스프링-인 분포를 보였으며, $[0^\circ/30^\circ/Y^\circ/90^\circ]_s$ Case에서 가장 작은 스프링-인 분포를 보였다.

가장 큰 스프링-인이 발생한 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ 와 가장 작은 스프링-인이 발생한 $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/90^\circ]_s$ 의 잔류응력을 살펴보았다. 각각의 적층각에 대한 잔류응력은 아래와 같다. 잔류응력의 측정 은 코너 시작부분에서 하였다.

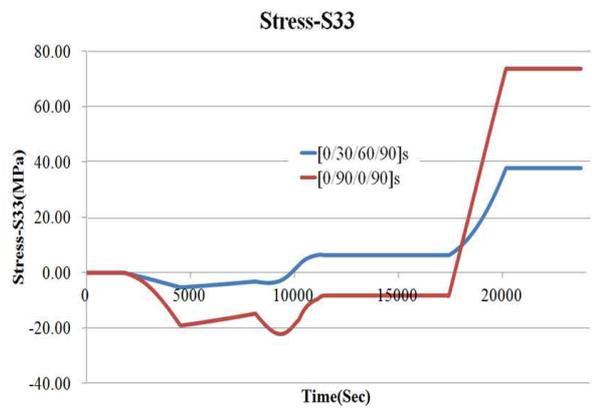


Fig. 12. Residual stress-S33 of [0/30/60/90]s and [0/90/0/90]s

$[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ 의 최종 잔류응력은 S11이 91.8 Mpa, S33이 73.8 Mpa로 계산되었으며, $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/90^\circ]_s$ 의 최종 잔류응력은 S11이 84.4 Mpa, S33이 37.8 Mpa로 계산되었다. 따라서 잔류 응력이 크게 남을수록 스프링-인의 발생이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 연구에서는 CHILE모형을 바탕으로 ABAQUS 서브루틴을 제작하여 적층각과 적층순서에 따른 C-channel의 스프링-인 발생을 예측하였다. COMPRO 해석결과와 참고 문헌의 실험 결과와 비교하여 해석결과의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 또한 해석을 통해 $[0^\circ/X^\circ/Y^\circ/90^\circ]_s$ 적층각을 가지는 C-channel 복합재 구조물의 경우, X가 $30^\circ \sim 45^\circ$ 사이, Y가 $45^\circ \sim 60^\circ$ 의 각을 가질 때, 스프링-인이 가장 작게 발생하는 것을 볼 수 있다.

복합재 구조물의 스프링-인을 유발하는 요인은 적층각, 성형틀의 재질, 성형틀의 표면상태, 구조물의 형상, 적층 두께 등등 여러 가지 내적, 외적 요인들이 존재한다. 스프링-인을 유발하는 내적 요인 중 하나인 적층각과 적층 순서의 변화에 따른 스프링-인 발생량을 예측함으로써, 고가의 성형틀 제작 비용 절감, 제품 생산을 위한 설계 시간 단축 등 복합재 구조물 생산 비용 절감에 기여함과 동시에 복합재 구조물 변형 연구에 기초 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- 1) Alfred C. Loos and George S. Springer, "Curing of Epoxy Matrix Composite" *Journal of Composite Material*. Vol.17, No.2, 1983, pp.135-169
- 2) Scott R. White and Yeong K. Kim, "Process-Induced Residual Stress Analysis of AS4/3501-6 Composite Material" *Mechanics of Composite Materials and Structures*, Vol.5, No.2, 1998, pp:153-186.
- 3) Carolyne Albert and Göran Fernlund, "Spring-In and Warpage of Angled Composite Laminates", *Composite Science and Technology*, Vol.62, Issue14, 2002, pp.1895-1912
- 4) Woo-Kyun Jung, Sung-Hoon Ahn, and Myung -Shik Won, "Spring-back in GFR/CFR Unsymmetric Hybrid Composite Materials", *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol.18, No.6, 2005, pp.1-8
- 5) Yeong K.Kim and Scott R. White, "Process-Induced Stress Relaxation Analysis of AS4/3501-6 Laminate", *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, Vol.16, No.2, 1997, pp.2-16
- 6) Woo Il Lee, Alfred C. Loos and George S. Springer, "Heat of Reaction, Degree of Cure, and Viscosity of Hercules 3501-6 Resin", *Journal of Composite Materials*, Vol.16, No.6, 1982, pp.510-520
- 7) Soo-Yong Lee, Curing Induced Residual Stresses in Laminated Cylindrical Shells, *KSME International Journal*, Vol. 14, No.1, 2000, pp. 19-29
- 8) Yeong K. Kim and Scott R. White, "Viscoelastic Analysis Of Processing-Induced Residual Stresses in Thick Composite Laminates", *Mechanics of Composite Materials and Structures*, Vol. 4, Issue.4, 1997, pp.361-387
- 9) Travis A. Bogetti and John W. Gillespie, Jr, "Two-Dimensional Cure Simulation of Thick Thermosetting Composite", *Journal of Composite Materials*, Vol.25, No.3, 1991, pp.239-273
- 10) Z. Padovec, M. Růžička, V. Stavrovský, "Springback analysis of Thermoplastic Composite Plates", *Applied and Computational Mechanics*, Vol.6, 2012, pp.25-34
- 11) Graham A. Twigg, "Tool-Part Interaction in Composites Processing", Ph.D Thesis, *The University of British Columbia*, CANADA, 2001
- 12) Carolyne I. Albert, "Spring-in of Angled Thermoset Composite Laminates", Ph.D Thesis, *The University of British Columbia*, CANADA, 2001
- 13) Sung-Rok Jung, Wie-dae Kim, Jae-hak Kim, "Analysis of Thermal Deformation of Carbon-fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Considering Viscoelasticity", *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, 2014, Vol.27, pp.174-181
- 14) Hyck Kwon, Seong-Soon Hwang, Won-Jong Choi, Jae-Hwan Lee, Jae-Hak Kim, "Cure Shrinkage Behavior of Polymer Matrix Composite according to Degree of Cure", *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, 2014, Vol.27, pp.90-95