

# CFRP Prepreg 적층조건과 금형 마찰계수를 고려한 Double-dome 형상 성형해석 연구

김영주<sup>1</sup> · 이산호<sup>2</sup> · 김홍규<sup>†</sup>

국민대학교 자동차공학전문대학원<sup>1</sup> · LG하우시스<sup>2</sup> · 국민대학교 자동차공학과<sup>†</sup>

## A study on the forming analysis of double-dome model considering CFRP prepreg laminate condition and coefficient of friction

Young-Ju Kim<sup>1</sup> · San-Ho Lee<sup>2</sup> · Heung-Kyu Kim<sup>†</sup>

Graduate School of Automotive Engineering Kookmin University<sup>1</sup>,

LG Hausys<sup>2</sup>,

Kookmin University<sup>†</sup>

(Received May 03, 2016 / Revised May 31, 2016 / Accepted June 03, 2016)

**Abstract:** Recently, lightweight material is attracting attention as a solution to the problem of fuel efficiency and increasing the need for development. CFRP has been attracting attention as lightweight materials for automobile because it has a high specific stiffness and specific strength compared to steel material. CFRP have a wide range of mechanical properties depending on the laminate condition. In this paper, study on the forming analysis of double-dome model was performed considering CFRP prepreg laminate condition and coefficient of friction. After forming analysis, the result has compared with wrinkling area and vertical strain of fiber to the laminated condition. And then compared with inflow of blank to the laminate condition. Through this paper, we propose the forming analysis methods of CFRP material.

**Key Words:** CFRP, Friction coefficient, Prepreg, Specific strength, Specific stiffness, Wrinkling area

### 1. 서 론

전 세계적으로 자동차 연비규제에 대한 문제 해결 방법으로 경량화 소재에 대한 관심이 커지고 있으며, 경량화 소재 개발에 대한 필요성이 증대되고 있다. 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP, carbon fiber reinforced plastic)은 철강소재 대비 높은 비강성과 비강도 특성을 가지고 있기 때문에 자동차용 경량화 소재로 주목받고 있다. CFRP는 프리프레그(prepreg)로 구성된 이방성 소재로서 플라이(ply)의 적층 조건에 따라 다양한 기계적 물성을 갖게 된다.

본 연구에서는 Double-dome 모델을 사용하여 CFRP 프리프레그의 적층 조건에 따른 성형해석을

수행하였다. 성형해석시 적층 조건에 따른 주름 발생량을 비교 검토하였고, 섬유 수직 방향 변형률을 통하여 성형시 수지와 섬유간 파단특성을 평가하였다. 또한, 공정 영향 인자인 마찰계수에 따른 프리프레그 블랭크 유입량을 예측하고 플라이간 블랭크 유입량 차이를 비교하였다. 이를 통하여 자동차 경량화 소재로서 주목받고 있는 CFRP 소재의 성형성 분석 방안을 제안하고자 하였다.

### 2. 적층 조건별 굽힘 특성 평가

#### 2.1. 1ply 굽힘 특성 평가

CFRP 프리프레그의 적층패턴에 따른 기계적 물성 평가에 앞서 섬유 방향에 따른 굽힘 강도 의존성을 판단하기 위하여 단일 플라이에 대한 기계적 물성 평가를 진행하였다. 기계적 물성 평가 방법으로

<sup>1</sup> 국민대학교 자동차공학전문대학원

<sup>†</sup> 교신저자: 국민대학교 자동차공학과

Email: krystal@kookmin.ac.kr

ASTM D790에 따라 3점 굽힘 시험(3-point bending test)<sup>1)</sup>을 Fig. 1과 같이 LS-DYNA를 통하여 모델링 하였으며, UD 0°, 45°, 90°의 3방향에 대하여 각각 평가를 진행하였다.

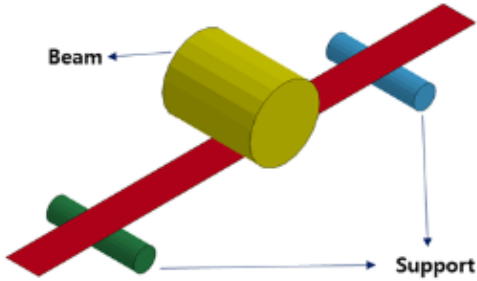


Fig. 1 Modeling of 3-point bending test, LS-DYNA

이때 사용된 재료의 물성은 Table 1과 같이 T社의 T700 모델 물성을 적용하였다<sup>2)</sup>.

Table 1 Composite material property

UD				
RO	EA	EB	EC	
1.5e-9	126863.52	8411.60	0	
GAB	GBC	GCA		
4205.80	4205.80	4205.80		
XC	XT	YC	YT	SC
1468.58	2199.42	198.56	48.88	154.44

해석 결과에서 Beam에 걸리는 굽힘 하중(load deflection)값을 사용하여 식(1)에 대입하게 되면 섬유 방향에 따른 굽힘 응력 값을 확인할 수 있다<sup>3)</sup>.

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (1)$$

$\sigma_f$  = Stress in the outer fibers at midpoint, MPa

P = Load at a given point on the load-deflection curve, N

L = Support span, mm

b = Width of specimen, mm

d = Thickness of specimen, mm

섬유 방향에 따른 굽힘 강도 데이터를 Table 2와 같이 정리하였고 섬유 방향 0°에서 159.63MPa로 가장 높은 굽힘 강도 값을 나타내는 것을 알 수 있었

다. 이와 동시에 과단 굽힘 깊이(failure deflection depth)를 측정하였을 때 0°에서 1.78mm로 가장 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 2와 같

Table 2 Bending strength and Failure deflection depth

Angle	Force (N)	Bending strength (MPa)	Failure deflection depth(mm)
0°	199.54	159.63	1.78
45°	21.02	16.82	1.95
90°	32.41	25.93	-

이 휨(deflection)과 합력(resultant force)를 종합적으로 비교하였을 때 동일한 변위 내에서 합력은 0, 45, 90°의 순서로 우수한 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

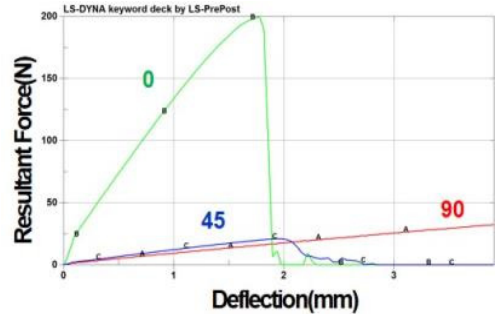


Fig. 2 Result of 3-point bending test for 1ply

## 2.2. 2plies 굽힘 특성 평가

앞에서 진행된 1ply 굽힘 특성 평가 결과를 바탕으로 적층순서에 따른 의존도를 평가하기 위하여 2plies를 적층하여 동일한 방법으로 3점 굽힘 시험을 진행하였다. 적층 순서는 Table 3과 같이 서로 다른 방향으로 적층을 하였으며, 총 6가지의 적층 조건을 선정하여 해석을 진행하였다.

Table 3 Laminate condition of 2plies

구분	#1	#2	#3	#4	#5	#6
위	0	45	0	90	45	90
아래	45	0	90	0	90	45

해석결과 Fig. 3과 같이 휨과 합력 데이터를 확인할 수 있었다.

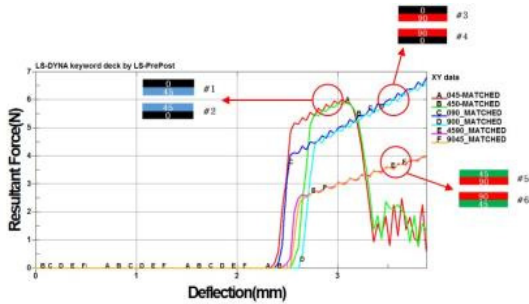


Fig. 3 Result of 3-point bending test for 2plies

#1, 3, 5번의 적층 조건과 위/아래의 적층순서를 바꾼 #2, 4, 6번의 적층 조건의 데이터를 비교해보면 최종 합력은 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 2plies 적층 조건에서 적층 순서에 다른 굽힘 강도의 차이는 거의 없다고 볼 수 있다. 해당 결과를 바탕으로 동일한 범위 내에서 가장 높은 반력을 나타내는 [0/45°] 적층 조건을 고정인자로 선정하여 4plies 적층에 반영하였다.

### 2.3. 4plies 굽힘 특성 평가

2plies 굽힘 특성 평가에서 가장 높은 반력을 나타내는 [0/45°] 적층 조건을 고정 조건으로 선정하여 4plies 적층 조건에 반영하였으며, 여러 가지 적층조건 중 대칭성이 있거나 굽힘 특성이 좋은 0°플라이가 포함된 7가지 적층조건을 Table 4와 같이 선정하였다. 이렇게 선정된 7가지 적층조건을 반영하여 3점 굽힘 시험을 진행한 결과 데이터는 Table 5와 같다. 파단 굽힘은 [0/45/45/0°] 적층조건이 1.02mm로 가장 낮은 값을 나타내었으며 굽힘 강도는 1ply 굽힘 특성 평가시 가장 높은 값을 나타냈던 0°플라이가 많이 포함된 [0/0/45/0°] 적층조건이 111.65MPa로 가장 높게 나타났다.

Table 4 Laminate condition of 4plies

구분	← 위		아래 →	
#1	0	45	45	0
#2	0	45	0	0
#3	0	45	0	45
#4	45	0	45	0
#5	0	0	45	0
#6	45	0	0	45
#7	0	0	0	45

Table 5 Result of Failure deflection and Bending strength for 4plies

구분	Failure deflection (mm)	Bending strength (MPa)
#1	1.02	79.36
#2	1.35	111.65
#3	1.11	57.60
#4	1.14	57.53
#5	1.34	111.33
#6	1.47	42.48
#7	1.22	70.70



Fig. 4 Result of Failure deflection and Bending strength for 4plies

해석 결과에 대한 그래프는 Fig. 4와 같으며 파단 굽힘과 굽힘 강도의 결과를 바탕으로 이 두 가지 결과에 대한 상관관계를 고려하였을 때 경향성은 거의 없다고 판단하였다.

## 3. 적층 조건별 성형성 평가

### 3.1. Double-dome model 적용 성형해석

4plies 굽힘 특성 평가에서 선정하였던 7가지 적층 패턴에 대하여 복합재(Composite) 성형해석 전용 프로그램인 PAM-FORM으로 Fig. 5와 같이 Double-dome

형상에 적용하여 성형해석을 수행하였다.

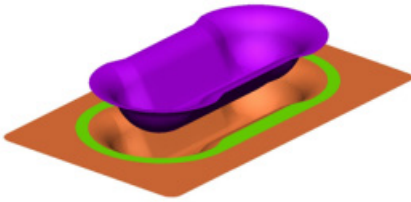


Fig. 5 Double-dome stamping simulator, PAM-FORM

성형해석 후 성형성을 판단하는 기준으로 두께 감소 면적(thinning area)값에서 음수로 나타나는 결과 값의 비교를 통한 주름 발생량 평가, 섬유 수직방향의 최대 변형률(strain)을 고려한 파단 가능성 평가, 전단 각도(shear angle)의 비교를 통한 파단 가능성 평가를 진행하였다. 또한 마찰계수에 따른 프리프레그 유입량 비교를 통하여 금형과 프리프레그, 프리프레그와 프리프레그 사이의 마찰력이 성형에 주는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

### 3.2. 주름 발생 면적비교

제품 성형시 발생하는 주름은 제품의 중요 불량원인중의 하나로 소재의 유입과 동시에 좁아지는 엣지부에서 소재가 겹쳐지면서 나타나게 되는 굴곡을 통하여 판단할 수 있다<sup>4)</sup>. 성형해석에서 주름은 두께감소 면적 값에서 음수로 나타나는 결과를 통하여 예측할 수 있다. 4plies 굽힘 특성 평가에서 선정된 7가지 적층 조건을 적용하여 주름면적을 Contour값으로 비교한 결과는 Fig. 6과 같다. 적층 조건에 따른 주름 면적 값은 Table 6과 같으며 [0, 45, 0, 0°] 적층조건이 4644.04mm<sup>2</sup>으로 가장 낮게 해석되었다.

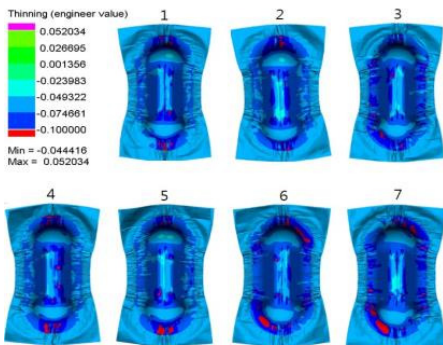


Fig. 6 Result of thinning contour for 7 cases

Table 6 Result of wrinkling area for 7 cases

구분	Wrinkling area(mm <sup>2</sup> )
#1	4681.37
#2	4644.04
#3	5893.80
#4	6157.98
#5	5321.03
#6	6885.06
#7	6100.43

### 3.3. 섬유 수직방향 변형률 비교

성형 공정에서 발생하는 불량원인 중 두 번째로 섬유의 갈라짐이나 파단을 예로 들 수 있으며, 성형해석시 이러한 결함에 대한 현상을 섬유 수직방향 변형률을 통하여 예측할 수 있다. 적층조건별 섬유 수직방향의 최대 변형률 값을 측정하고 이 값이 낮을수록 파단 가능성이 낮다고 예측할 수 있다. 7가지 적층조건을 적용하여 섬유 수직방향 변형률을 Contour로 비교한 결과는 Fig. 7과 같다. 적층 조건에 따른 섬유 수직방향 변형률 결과 값은 Table 7과 같으며 [0, 45, 0, 0°]적층조건이 0.048로 가장 낮은 값으로 나타났다.

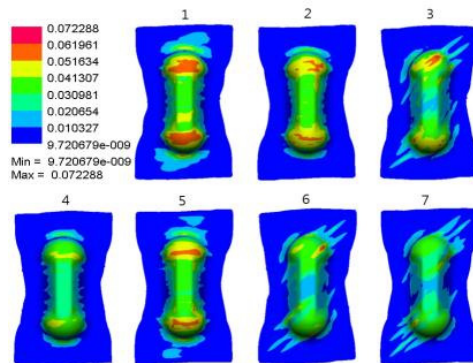


Fig. 7 Vertical strain contour of fiber for 7 cases

Table 7 Vertical strain of fiber for 7 cases

구분	Vertical strain of fiber
#1	0.051
#2	0.048
#3	0.049
#4	0.072
#5	0.056
#6	0.060
#7	0.066

### 3.4 전단 각도 비교

성형 공정에서 결함의 발생 가능성을 예측할 수 있는 또 다른 방법으로 성형해석 후 전단 각도 값을 활용하는 방법이 있다<sup>9)</sup>. 동일 플라이에서 서로 인접한 요소간의 전단 각도의 변화를 확인하는 방법으로 적층조건별 전단 각도의 최대값 비교 및 최대값 발생 위치 확인을 통한 성형성 평가가 가능하며, 전단 각도가 높은 부위에서 실제 성형 공정시 결함 발생 가능성이 높은 것을 예측할 수 있다. 7가지 적층조건을 적용하여 전단 각도를 Contour 로 비교한 결과는 Fig. 8과 같다. 적층 조건에 따른 최대 전단 각도 결과 값은 Table 8과 같이 [45/0/45/0°] 적층조건이 49.65°로 가장 낮은 결과로 해석되었다.

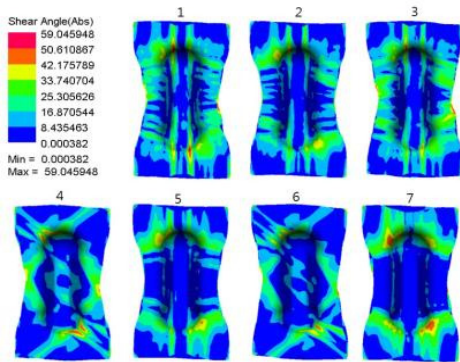


Fig. 8 Result of shear angle for 7 cases

Table 8 Result of shear angle(max.) for 7 cases

구분	Shear angle(Max.)
#1	50.55
#2	59.05
#3	54.33
#4	49.65
#5	57.73
#6	58.21
#7	49.80

## 4. 마찰계수에 따른 성형성 평가

### 4.1 금형-프리프레그 마찰계수 변경

성형 해석시 금형과 프리프레그 사이의 마찰계수를 변경함에 따라 섬유유입량 및 제품의 최종 형상을 예측할 수 있다. 마찰계수의 경우에는 금형 표면에 이형제를 도포하거나 프리프레그에 윤활성분을 추가함으로써 변경이 가능한 공정인자로 성형해

석을 통해 이를 예측하고 실제 공정에 적용하는 것이 중요하다. 이를 통하여 블랭크 사이즈를 결정하게 되면 제품 성형 후 버려지는 부분을 절감할 수 있으므로 제조 원가 절감에도 기여할 수 있다. 본 연구에서는 마찰계수를 0.1, 0.3, 0.5, 1.0의 4가지로 변경하여 성형해석을 진행하였으며 성형해석 후 블랭크 유입형상 및 최대 유입량은 Fig. 9와 같다. 해석결과 금형 표면과 프리프레그 사이의 마찰계수가 0.1에서 1.0으로 증가함에 따라 블랭크의 유입량은 일정하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 금형과 프리프레그 사이의 마찰력이 높을수록 블랭크의 유입을 방해하고 있다고 생각할 수 있으며, 섬유의 유입이 원활하게 이루어지지 않을 경우 금형의 펀치와 프리프레그가 맞닿는 부분에서 응력이 높아질 가능성이 있다고 해석할 수 있다. 따라서 실제 공정에서는 금형과 프리프레그 사이에 마찰계수의 변경을 통하여 프리프레그에 걸리는 응력을 감소시키거나 유입량에 대한 조절이 가능할 것으로 생각된다.

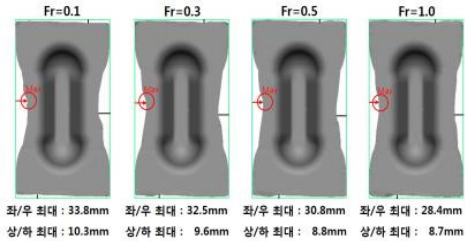


Fig. 9 Result of changing friction coefficient between mold and prepreg

### 4.2 프리프레그-프리프레그 마찰계수 변경

프리프레그간의 마찰계수가 블랭크 유입량 및 유입형상에 어떤 결과는 미치는지 확인하기 위하여 앞의 경우와 동일하게 마찰계수를 0.1, 0.3, 0.5, 1.0의 4가지로 변경하여 성형해석을 진행하였다. 성형해석 결과는 Fig. 10과 같으며 마찰계수가 0.1에서 1.0으로 증가함에 따라 좌/우 최대 유입량은 감소하는 반면 상/하 최대 유입량은 증가하는 비교적 일정하지 않은 결과로 나타났다.

이러한 결과에 대한 원인을 찾기 위하여 마찰계수 0.1과 1.0의 결과에 대하여 각 플라이의 유입형상 및 유입량을 확인해 보았을 때 결과는 Fig. 11과 같다. 마찰계수 0.1과 1.0의 경우에 대하여 성형해석 후 Ply1과 Ply2의 유입량 차이를 확인하

였을 때 마찰계수가 0.1에서 1.0으로 증가함에 따라 좌/우 및 상/하 최대 값이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 프리프레그 간의 마찰계수를 변경하였을 때 전체적인 유입량은 일정하지 않았지만 플라이간의 마찰로 인하여 플라이끼리 서로 유입이 잘 이루어지도록 상호작용 하고 있음을 확인할 수 있었다.

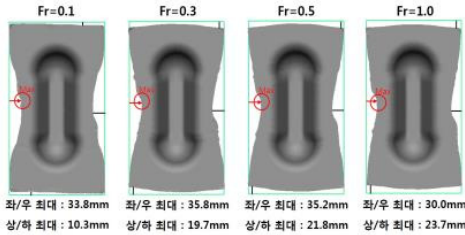


Fig. 10 Result of changing friction coefficient between prepreg -prepreg

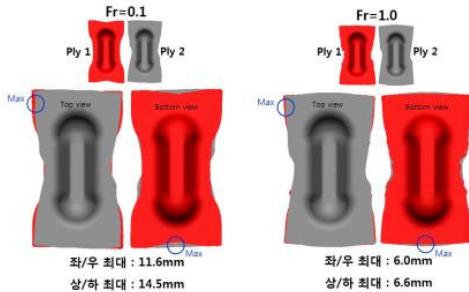


Fig. 11 Result of changing friction coefficient between ply1 -ply2

## 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 UD(unidirectional) 프리프레그를 사용하여 적층하였을 때 적층조건에 따른 기계적 물성 평가 및 성형성 평가에 대한 고찰을 수행하였다. 1Ply의 기계적 물성을 바탕으로 4Plies를 적층하고 그에 따른 성형해석을 수행하였을 때 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) LS-DYNA를 사용하여 3점 굽힘 시험을 모델링하고 1Ply일 때 섬유 방향에 따른 굽힘 강도 해석 시 0, 45, 90°의 순서로 우수한 성능을 나타냈다.
- 2) 2Plies 적층시 적층 순서에 따른 굽힘 강도의 준도는 낮았으며, 0/45°적층조건이 가장 높은 굽힘

강도 성능을 나타내어 고정인자로 사용하였다.

- 3) 4Plies 적층시 [0/0/45/0°]적층조건에 굽힘 특성이 가장 우수하게 나타났다.

- 4) 성형성 평가를 위하여 주름면적, 섬유 수직방향 변형률, 전단 각도에 대한 성형해석을 진행하였으며 적층 조건에 따른 결함발생 가능성을 비교할 수 있었다.

- 5) 마찰계수에 따른 성형성 평가에서 프리프레그 간의 마찰계수가 각 플라이의 유입에 도움을 주는 현상을 확인할 수 있었다.

위의 결과들을 토대로 볼 때, 본 연구에서는 적층 패턴에 따라 기계적 특성 및 성형성이 차이가 날 수 있음을 확인할 수 있었고 실제 제품 성형시 불량 발생될 수 있는 부분을 해석적으로 예측함으로써 불량을 감소 및 원가 절감에 기여할 수 있을 것으로 판단하였다. 향후 철강소재 대비 동등특성 또는 그 이상의 특성을 나타낼 수 있는 적층조건을 확립하게 된다면 적층두께 및 경량화가 가능할 것으로 예상된다. 또한, 신뢰성 높은 해석 결과를 얻기 위해서는 해석결과와 실제 실험결과와의 비교 검증에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- 1) D790-03, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”, ASTM International.
- 2) Bonnie Wade, Paolo Feraboli, Morgan Osborne, “Simulating laminated composites using LS-DYNA material model MAT54 part I: [0] and [90] ply single-element investigation”, University of Washington, Seattle, The Boeing Company, Seattle.
- 3) Ali I. Al-Mosawi, Dr. Mustafa A. Rijab, Nawal Abdullah, Saleh Mahdi, “Flexural strength of fiber reinforced composite”, International Journal Of Enhanced Research In Science Technology & Engineering, Vol. 2 Issue 1, 2013.
- 4) Timothy J. Dodwell, Richard Butler, Giles W. Hunt, “A semi-analytical model for the wrinkling of laminates during consolidation over a corner radius”, 2013.
- 5) P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Salle, F. Dumont, “Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses”, 2011.