

리브를 가진 장섬유 복합재료 커버 플레이트의 최적설계

한민구* · 배지훈* · 이성우** · 장승환*†

Optimal Design of Long-fiber Composite Cover Plate with Ribs

Min-Gu Han*, Ji-Hun Bae*, Sung-Woo Lee**, Seung-Hwan Chang*†

ABSTRACT: Carbon fiber reinforced composites have light weight and high mechanical properties. These materials are only applicable in limited shape structure cause by complex curing process and low drapability. To solve this problem, Long Fiber Prepreg Sheet (LFPS) has been proposed. In this research, electric device cover plate was selected and designed by using LFPS. Before the design process, we analyzed the target structure to which the rib structures were applied. And 8-inch tablet PC product was selected. For FE analysis, simple loading and boundary conditions were applied. Stiffness of rib structure was investigated according to the rib pattern and shape changes. Rib pattern and shape were selected based on fixed volume condition analysis results. And uneven rib width model was selected for the best case whose deflection was reduced 6~10% than uniform rib model.

초 록: 일방향 탄소섬유 복합재료는 복잡한 성형 공정과 낮은 드레이핑능을 보여 비교적 단순한 형태의 구조물 제작에 제한적으로 사용되어 왔으나, 최근 이를 해결하고자 성형성과 생산효율이 우수한 장섬유 복합재료(Long Fiber Prepreg Sheet; LFPS)가 제안되었다. 본 연구에서는 단순한 성형 공정과 높은 성형 정밀도를 갖는 LFPS를 활용하여 전자 기기용 커버 플레이트 설계를 수행하였다. 설계에 앞서 리브 구조가 적용되는 대상 구조물을 8-inch 태블릿 PC 제품의 뒷 커버로 선정하였다. 해당 구조물에 평판에 적용되는 대표적인 하중 조건을 선정하여 유한 요소해석에 적용하였고, 이를 활용하여 리브 구조물의 패턴과 리브 형상 변화에 따른 구조물의 구조 강성을 확인하였다. 해석 결과 제한된 부피 내에서 최적의 리브 패턴과 형상을 확보하였으며, 리브 폭이 균일하지 않은 경우가 균일한 경우에 비해 6~10% 처짐량이 감소함을 확인하였다.

Key Words: Long Fiber Prepreg Sheet(LFPS), 리브 구조체(Rib Structure), 군집화(Clustering), 유한요소해석(FEA)

1. 서 론

경량화를 통한 편의성과 복합재료에 대한 관심도가 높아지면서 탄소섬유강화 복합재료는 다양한 방면으로 연구가 이뤄짐과 동시에 다양한 시제품에 적용되고 있다. 이러한 복합재료는 구조물의 고강성·고강도 확보와 동시에 경량화 효과를 확보할 수 있어 산업 분야와 연구자들에게 매

력적인 재료로 각광받고 있다. 기존에 금속이나 플라스틱 중합체 등으로 제작되던 구조물은 상대적으로 높은 이점을 갖는 섬유강화 복합재료로 대체되고 있으며, 특히 경량화와 안전성 등이 요구되는 항공기, 인공 위성 등 특수 분야에서는 이미 높은 비율로 사용되고 있다. 최근에는 연료 문제와 환경 오염 문제를 해결하고자 대중 교통 및 승용차에도 섬유강화 복합재료가 사용되고 있으며[1,2], 동시에

Received 13 December 2016, received in revised form 22 February 2017, accepted 23 February 2017

*Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

*†School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Corresponding author (E-mail: phigs4@cau.ac.kr)

**School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

스포츠 산업에도 활용되어 그 장점을 다방면으로 부각시키고 있다.

전통적인 탄소섬유강화 복합재료의 경우 기존 활용되던 등방성 금속과는 다르게 이방성 특성과 적층을 통한 재료 설계가 수행되기 때문에 설계의 복잡성을 해결하기 위한 연구가 진행되고 있다. 장섬유 복합재료(Long Fiber Prepreg Sheet; LFPS)는 일반 탄소섬유강화 복합재료 프리프레그를 2~3 inch 크기로 절단 후 무작위 분포(random distribution)를 통하여 준 등방성 물성을 갖도록 제작한 복합재료이다[3-5]. 재료의 물성은 단섬유 복합재료와 장섬유 복합재료 사이의 물성을 보이고 준 등방성 물성 특성을 가지고 있어 설계자가 보다 용이하게 구조물에 적용할 수 있다. 또한 기존 오토클레이브 공법과 같은 복잡한 성형 방식이 아닌 핫프레싱 공법 등과 같은 단순한 성형 방식으로 제품을 생산할 수 있어 비교적 높은 생산성을 확보할 수 있는 재료이다.

본 연구에서는 생산성과 설계의 복잡성을 해결하기 위해 LFPS를 활용한 복합재료 구조물 설계에 관한 연구를 수행하였으며, 태블릿 PC의 뒷 커버를 대상으로 정하였다. 구조물의 구조 강성과 경량성을 확보하고자 일반 평판이 아닌 리브 구조를 적용하였으며[6-11], 평판형 구조에 일반적으로 작용하는 하중 조건과 경계 조건을 부여하여 설계를 진행하였다. 리브의 패턴과 형상 정보를 확보하기 위하여 파라메트릭 연구와 해석적 연구를 수행하였고, 이후 최적화 프로그램을 활용하여 리브의 최종 형상을 확보하는 연구를 수행하였다.

2. 구조 및 재료

2.1 형상 및 재료 정보

본 연구에서는 전자 기기용 커버 플레이트 설계를 수행하기 앞서 다양한 사이즈의 태블릿 PC 중 연구에 활용할 대표적 형상을 선정하고자 관련 동향 분석을 수행하였다[12, 13]. 휴대성과 사용자의 편의성을 반영하여 분석하였을 때 8-inch 화면 크기의 태블릿 PC가 약 30%의 시장 점유율을 보여 본 연구의 설계 대상으로 선정하였다. 해당 구조물의 부품 중 리브 구조가 필요하고 현재 실 기기에도 적용중인 뒷 커버(Back cover)로 설계 대상물을 구체화하였고 태블릿 PC 커버 플레이트의 크기는 시판중인 8-inch 제품의 크기를 측정하여 가로×세로×높이를 205 mm × 145 mm × 6 mm으로 설정하였다(Fig. 1). 리브 구조가 없는 초기 모델의 기저판 두께는 사용할 LFPS 재료의 성형 전 기본 두께인 2.3 mm로 설정하였다.

대량으로 생산하고 형상변화가 급격한 태블릿 PC 부품의 경우 기존에 사용되는 섬유강화 복합재료를 활용할 경우 제품 생산성과 성형성 측면에서 부적합하다. 본 연구에서는 경량화와 적합한 물성을 갖는 재료인 LFPS를 선정하여 해석적 연구에 활용하였다. 사용한 LFPS는 Quantum사

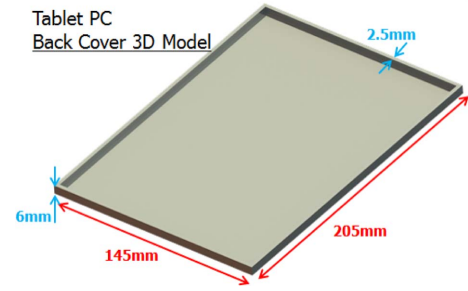


Fig. 1. Target Structure

Table 1. Material Properties

LFPS - Lytex 4197			
E	34.5 GPa	Thickness	2.3 mm
X_t	255 MPa	Density	1360 kg/m ³

에서 개발한 Lytex 4197이며, 해당 재료는 준등방성 재료 특성과 높은 성형 정밀성을 보여 본 연구의 태블릿 PC 뒷 커버 재료로 적합하다. 유한요소해석에 활용한 LFPS 재료의 기본적 물성은 Table 1에 정리하였다.

2.2 파라메트릭 연구

유한요소해석을 수행하기에 앞서 효율적으로 해석을 수행하고자 파라메트릭 분석을 통하여 주요 설계변수와 그 범위를 결정하는 연구를 수행하였다. 6가지의 리브 패턴과 6가지의 부피 조건을 활용하여 1차적으로 총 36가지에 대한 구조물의 일반적인 구조 강성인 가로×세로 방향별 단면에 관한 2차 관성모멘트를 분석하였다. 리브 폭과 높이는 기존 모델의 치수를 참고하여 1.25 mm로 설정하였고 이를 ' W_{Rib} '로 표기하여 파라메트릭 연구 및 추후 수행하는 최적설계에 주요 변수로 활용하였다. 각 조건은 'Pattern-[Rib Pattern]-[Volume]'의 형태로 명명하였으며, 각 조건의 기본 정보 및 리브 패턴은 Table 2와 Fig. 2에 표기하였다. 리브 간 간격은 리브 중심에서 리브 중심까지이며, 리브의 개수는 가로·세로 길이에 들어갈 수 있는 최대 개수만큼 추가하였다.

각 방향별 단면에 관한 2차 관성모멘트를 계산한 결과 부피가 동일한 조건에서 리브 패턴이 C 또는 D인 경우 다른 리브 패턴에 비하여 높은 값을 보이기에 뒷 커버의 구

Table 2. Rib Pattern & Volume

Type	Rib Pattern	Volume [mm ³]
A	11W _{Rib} , 13W _{Rib} , 15W _{Rib} ...	85538.75
B	11W _{Rib} , 15W _{Rib} , 19W _{Rib} ...	84506.25
C	7W _{Rib} , 9W _{Rib} , 11W _{Rib} ...	86631.25
D	7W _{Rib} , 11W _{Rib} , 15W _{Rib} ...	85538.75
E	7W _{Rib} , 7W _{Rib} , 7W _{Rib} ...	92193.75
F	11W _{Rib} , 11W _{Rib} , 11W _{Rib} ...	87068.75

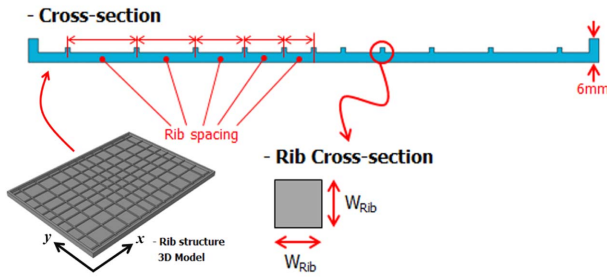


Fig. 2. Rib structure information

Table 3. Recommended pattern under same volume condition

Pattern		Moment of Inertia	
		Horizontal Dir. [mm ⁴]	Vertical Dir. [mm ⁴]
[D]-[A]	I_{XX}	400	492
	I_{YY}	741051	2015227
[D]-[B]	I_{XX}	392	481
	I_{YY}	732362	1989894
[C]-[D]	I_{XX}	401	490
	I_{YY}	737773	1992648

조 강성이 더 뛰어난 것으로 분석되었다(Table 3). 이후 유한요소해석에서는 패턴 C와 D를 중점적으로 활용하여 연구를 수행하였다.

3. 유한요소해석

3.1 하중 및 경계 조건 정립

테블릿 PC 뒷 커버의 구조물 형상과 환경 분석을 통하여 유한요소해석에서 활용할 적합 하중 및 경계 조건을 선정하였다. 대상물의 형상은 단순 평판과 유사하기 때문에 평판 구조물에 대표적으로 활용되는 두가지 하중 조건을 해석에 적용하였다. 설계된 구조물의 전반적인 구조 강성을 분석하기 위하여 뒷 커버의 모서리를 단순 지지하고 중심부에 100N의 집중 하중을 부여하는 방식(Fig. 3-a)과 평판형 구조에 가장 일반적으로 작용하는 한쪽 고정 - 끝단 하중 조건이다(Fig. 3-b). 두번째 방식에서 하중이 분포된 모서리 면적에는 100 N의 하중을 부여하였다.

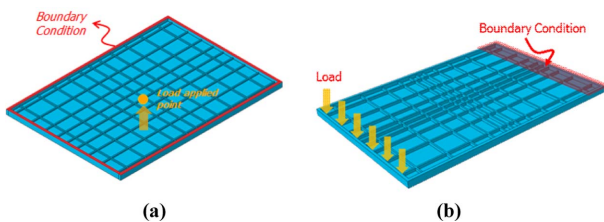


Fig. 3. Analysis boundary condition; (a) General case, (b) User pattern case

3.2 구조물 모델링 및 리브 패턴 영향 분석

앞서 파라메트릭 연구로 수행한 36가지의 모델의 구조 해석과 추가 모델 해석을 수행하기 위하여 모델링 작업의 효율성을 높이고자 Solidworks 2012 CAD Tool을 활용하였다. 가로방향 리브와 세로방향 리브, 뒷 커버를 독립적인 부품으로 생성 후 패턴 정보를 활용하여 반자동적으로 어셈블리 작업이 이뤄지도록 하였으며, 생성된 3D 모델은 형상 추출 작업을 통해 구조 강성의 변화를 분석할 수 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.14-2로 옮겨 해석을 수행하였다.

파라메트릭 연구로 수행된 36가지 모델의 경우 전반적 구조 강성을 파악하는 집중 하중 조건을 적용하여 해석을 수행하였으며, 요소와 절점 수는 패턴별로 차이가 있으나 68,000~70,000개의 C3D8R 선형 탄성 솔리드 요소와 6,000~8,000개의 S4R 쉘 요소, 44,000~45,000개의 절점으로 해석 모델을 구성하였다. 요소의 크기는 1.25 mm가 되도록 설정하였으며, 해석의 정확도를 확보하고자 요소 크기의 균일성, 형상 변화가 급격하게 발생하는 부분에서 파티션

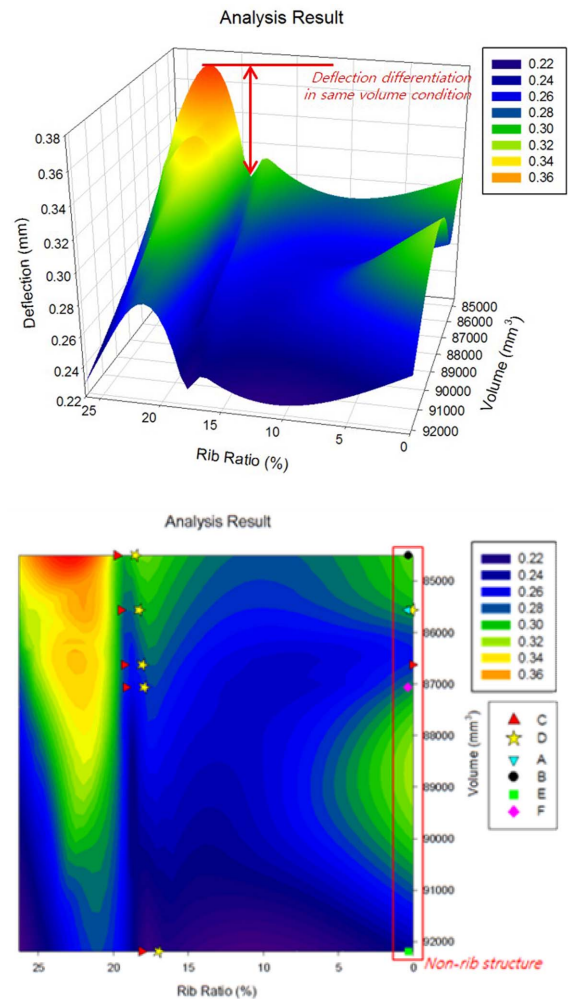


Fig. 4. Deflection analysis results

작업 수행을 통해 요소의 형상이 왜곡되지 않도록 하였다.

유한요소해석 수행 결과 앞서 파라메트릭 연구로 수행한 분석 결과와 유사한 결과를 확인하였다. 해석결과 질량이 고정된 상황에서 리브 비율보다 리브 패턴이 주요한 인자로 작용하여 리브 구조물의 처짐량에 지배적인 현상을 보이며, 재료의 부피가 증가할수록 구조물의 처짐량이 감소되는 경향을 확인하였다. 위 결과를 종합하여 3축 도표를 통해 분석한 결과 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 동일 부피에서 처짐량의 차이가 패턴에 따라 극명하게 나타남을 확인할 수 있다. 리브 패턴이 변화할 때 처짐량이 가장 적게 발생하는 리브 패턴은 D 패턴이며, C 패턴 역시 미소한 차이를 보이며 D 패턴과 유사한 값을 보이기 때문에 두 패턴을 중점적으로 활용하여 추가 해석을 수행하였다.

3.3 리브 비율 영향 분석

앞서 수행한 해석 결과 리브 패턴 C와 D의 경우 다른 4가지 패턴에 비하여 처짐량이 적음을 확인하였다. 선정된 리브 패턴 C와 D를 활용하여 LFPS 재료 한장이 금형 면적의 90%만큼 장입되어 성형되는 실제 제작 환경을 반영하였으며, 부피 고정 후 유한요소해석을 수행하였다. 사용된 재료의 부피는 약 61531 mm^3 이며, 해당 조건에서는 한쪽 고정 - 끝단 하중 경계 조건을 활용하였다. 본 해석에는 리브 패턴과 함께 리브 높이를 변경하였으며, 리브 높이는 기관 등 부품이 들어가는 것을 고려하여 기저판과 리브 높이의 합이 4 mm를 넘지 않도록 하였다. 리브 높이는 리브 폭 대비 총횡비가 2를 넘지 않도록 범위를 설정하였다. 총횡비가 커질 경우 리브의 효과가 무의미해지는 높이를 갖거나 반대로 높이값이 너무 커져 기저판과 리브 높이 총합이 4 mm 이내인 제약 조건을 위반하게 된다. 이를 반영하여 총 4가지 리브 높이를 설정하였으며, 각 높이에 따른 리브 부피를 제외한 남은 부피 계산을 통하여 기저판의 두께를 설정하였다. 사용된 4가지의 리브 높이는 Table 4에 표기하였다. 두 가지 패턴과 4가지 리브 높이를 활용하여 재료 부피 고정 조건 하에서 정적 처짐 해석과 비강성(EI/ ρ) 확인을 위한 고유진동수 해석 등 총 8가지 조건에 대하여 추가 해석을 수행하였다.

각 조건에 대한 고유진동수 해석과 정적 처짐 해석을 수행한 결과 기저판의 두께가 감소하여도 기저판과 리브 높이 총합이 증가할수록 구조물의 강성이 증가함을 확인할 수 있으며(Table 4), 패턴 D 보다 패턴 C의 경우 동일 리브 높이를 갖는 조건에서 처짐량이 적고 고유진동수가 높은 결과를 보였다(Fig. 5). 리브 높이가 구조물의 구조 강성에 지배적인 영향을 보임을 확인할 수 있으며, 설계 조건에서 최대값으로 설정할 수 있는 2.5 mm의 리브 높이와 C 패턴을 갖는 조건을 활용하여 최종적으로 리브 폭을 선정하는 해석을 수행하였다.

Table 4. Rib information and Natural frequency

Rib Pattern	Rib height [mm]	Base plate thickness [mm]	Natural Frequency [Hz]
C	0.625	1.62	342.46
	1.25	1.51	353.05
	1.875	1.40	377.28
	2.5	1.30	409.19
D	0.625	1.63	341.83
	1.25	1.55	351.22
	1.875	1.46	372.32
	2.5	1.37	403.83

Analysis Results - [Fixed Volume]

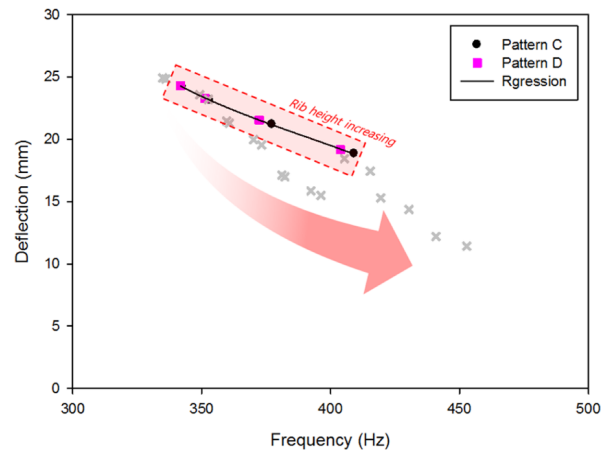


Fig. 5. Deflection results in fixed volume condition

3.4 리브 폭 최적설계

기 수행한 총 40여가지의 해석 결과를 활용하여 확보한 리브 패턴 C, 2.5 mm 리브 높이 구조물의 리브 폭 선정에 의하여 최적화 해석을 수행하였다. 리브 폭의 최적화 작업은 ABAQUS 6.10-1과 해당 툴에서 제공하는 Add-on 모듈인 Tosca를 활용하여 수행하였으며, 구조물의 최적화 수행에 앞서 제품 생산에 타당성을 확보하고자 제약 조건 부여를 통해 리브의 형상 변화에 제한 범위를 설정하였다. 리브 폭의 초기값은 앞서 해석한 모델들과 동일하게 1.25 mm이며, 리브 폭의 최소 두께는 1 mm로 제한하였다. 리브 폭이 1 mm 이하로 내려가게 될 경우 성형성 및 탈형에 문제가 발생하여 제품 생산이 불가하다. 부피의 경우 성형 전과 성형 후에 일정하다는 전제 조건을 부여하여 금형 면적의 90%에 장입된 LFPS 한장의 부피를 설정하였다. 중심을 기준으로 동일한 거리에 있는 리브의 경우 최적화 작업 후 동일한 두께의 리브를 유지하지 않을 경우 국부적 물성 차이로 인하여 완성된 구조물의 초기 뒤틀림을 발생시킬 수 있다. 따라서 구조물의 기하학적 비평형 상태로 인한 뒤틀림을 방지하고자 리브 클러스터링 작업을 추가적으로 수행하였다(Fig.

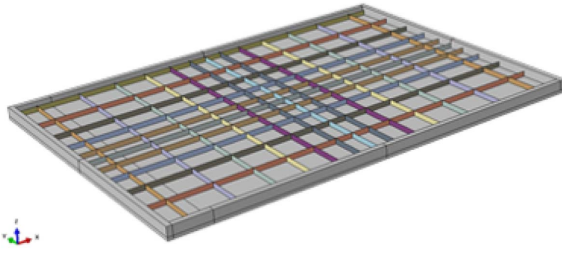


Fig. 6. Define the rib clustering groups

6. 가로×세로 리브와 대칭 조건에 있는 리브를 분류하였으며, 이 조건을 통해 클러스터링으로 분류된 리브는 최적화 결과에 따라 동일한 두께를 유지할 수 있다[14]. 해석에 사용된 경계 조건은 앞서 제시한 두가지 방식의 경계 조건을 모두 활용하였으며, 초기 단계에서는 초기 경계 조건 부여, Step-1 에서 중심부 집중 하중 부여, Step-2 한쪽 고정 - 끝단 하중 부여 순으로 설정하였다. 최적화 수행을 위해 설정한 목적 함수는 하중이 부여된 절점들의 처짐량 값의 총합이 최소값을 갖는 것이다.

총 16회의 최적화 반복 계산 작업이 수행되었으며, 해석 결과물은 적용된 제한 조건을 반영하여 부피 일정, 최소 리브 폭은 1 mm로 나타났다. 처짐량을 최소로 하는 리브 폭은 1 mm, 1.4 mm, 1.5 mm 총 3가지 군으로 분류되었으며, 클러스터링 작업이 반영되어 대칭 조건을 갖는 리브의 경우 동일한 두께가 나타났다(Fig. 7). 이 결과 구조물의 기하학적 뒤틀림이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

최적화 수행 결과 세 가지 군으로 리브 폭이 나뉜 최종 뒷커버의 경우 최적화 전보다 각 조건에서의 처짐량이 6~9% 감소함을 확인할 수 있었다. Step-1에서는 중심부에서 최대 처짐값이 0.42 mm에서 0.39 mm로 약 6.1% 감소하였고 Step-2에서는 17.9 mm에서 16.4 mm로 9.2% 감소하였다. 목적 함수가 하중이 부여된 절점에서의 처짐량의 총합을 최소로 하는 함수이기 때문에 처짐량이 상대적으로 작은 Step-1에 비해 Step-2가 지배적인 영향을 미쳤으며, 그 결과 가로 방향 리브 폭에 상대적으로 높은 비율로 변화가 발생하였다. 동시에 구조물의 부피는 고정되어 있기 때문에 가로 방향 리브 부피의 증가량만큼 세로 방향 리브의 폭은 감소한

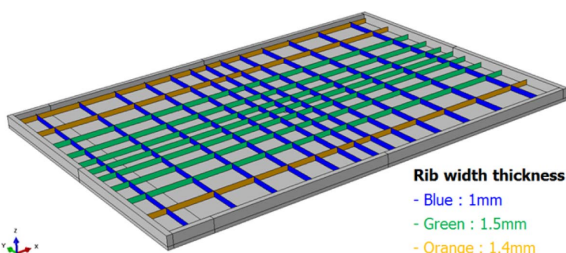


Fig. 7. Rib thickness variation after optimization

결과를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 LFPS 복합재료를 적용한 태블릿 PC 뒷커버 리브 구조의 형상과 패턴을 최적화하였다. 초기 선정된 6가지 리브 패턴은 파라메트릭 연구를 통하여 2가지 패턴으로 압축시켰으며, 이후 리브 높이 조절을 통한 구조물 강성 분석을 해석적으로 수행하여 리브 패턴과 높이를 결정하였다. 태블릿 PC에 들어가는 기판과 같은 추가 부품들을 고려하여 리브와 기저판의 최대 높이의 합은 4 mm가 넘지 않도록 하였으며, 그 결과 기저판의 두께가 얇아지더라도 리브의 높이가 가장 높은 2.5 mm에서 가장 작은 처짐량과 높은 고유진동수를 보여 구조물의 강성이 높음을 확인하였다. 또한 근소한 차이를 보였으나 패턴 D보다 C가 구조적으로 유용함을 확인할 수 있었다. 이는 리브의 절대적 개수가 D에 비해 C가 많기 때문에 발생하는 현상으로 기저판의 두께보다는 리브의 개수가 더 유효한 인자임을 보여준다. 이후 균일한 리브 폭을 가지는 구조물에 최적화 과정을 통하여 리브 폭을 최종적으로 선정하여 3가지 군으로 분류한 최종 모델을 설계하였다. 해당 모델은 처짐량의 총합을 최소화하는 목적 함수를 기준으로 해석을 수행하였으며, 16회의 반복 해석 결과 기존 균일한 폭을 갖는 모델에서 처짐량이 6~10% 감소한 결과를 보였다. 본 결과를 활용하여 전자기기의 뒷커버에 활용될 초기 모델의 설계를 유한요소해석을 수행하였으며, 해당 LFPS 재료와 결과를 활용하여 전자기기에 적용할 경우 금속에 비해서는 더 효율적인 가공성, ABS 수지에 비해서는 더 높은 구조 강성을 확보할 수 있어 추후 연구에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업과 국방부 민군기술협력사업(드레이핑용 탄소 장섬유 강화 열경화성 Sheet 제조 및 부품 성형기술 개발)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

1. Davoodi, M.M., Sapuan, S.M., and Yunus, R., "Conceptual Design of a Polymer Composite Automotive Bumper Energy Absorber," *Materials & Design*, Vol. 29, No. 7, 2008, pp. 1447-1452.
2. Jeon, S.W., Han, M.G., Chang, S.H., Cho, Y.H., and Park, C.M., "Design of CFRP-Metal Hybrid Pantograph Upper-arm," *Composites Research*, Vol. 28, No. 5, 2015, pp. 321-326.

3. Feraboli, P., Peitso, E., Deleo, F., Cleveland, T., and Stickler, P.B., "Characterization of Prepreg-based Discontinuous Carbon Fiber/epoxy Systems," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 28, No. 10, 2008, pp. 1991-1214.
4. Taketa, I., Okabe, T., Matsutani, H., and Kitano, A., "Flowability of Unidirectionally Arrayed Chopped Strands in Compression Molding," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 6, 2011, pp.1764-1769.
5. Wan, Y., and Takahashi, J., "Tensile and Compressive Properties of Chopped Carbon Fiber Tapes Reinforced Thermoplastics with Different Fiber Lengths and Molding Pressures," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 87, No. 2016, pp.271-281.
6. Vasiliev, V.V., Barynin, V.A., and Razin, A.F., "Anisogrid Composite Lattice Structures - Development and Aerospace Applications," *Composite Structures*, Vol. 94, No. 3, 2012, pp.1117-1127.
7. Lam, Y.C., and Santhikumar, S., "Automated Rib Location and Optimization for Plate Structures," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 25, No. 1, 2003, pp.35-45.
8. Chen, T., and Wang, C., "Topological and Sizing Optimization of Reinforced Ribs for a Machining Centre," *Engineering Optimization*, Vol. 40, No. 1, 2008, pp.33-45.
9. Chung, J., and Lee, K., "Optimal Design of Rib Structures Using the Topology Optimization Technique," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 211, No. 6, 1997, pp.425-437.
10. Krog, L., Tucker, A., and Rollema, G., "Application of Topology, Sizing and Shape Optimization Methods to Optimal Design of Aircraft Components," *Proceeding of 3rd Altair UK HyperWorks Users Conferences*, 2002.
11. Mou, J., Lai, F., See, I., and Lin, W., "Analysis of Notebook Computer Chassis Design for Hard Disk Drive and Speaker Mounting," *Proceedings of the International Conference on Computer Design (CDES)*, 2012, pp.1.
12. Iwashita, M., "A Method of Identifying Improvement Factors for Tablet Services," *Information Engineering Express*, Vol. 2, No. 2, 2016, pp.27-36.
13. Kim, K., Lim, J.H., Proctor, R.W., and Salvendy, G., "User Satisfaction with Tablet PC Features," *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, Vol. 26, No. 2, 2016, pp.149-158.
14. Miguel, A., Matos, P.M., and Claus, B., "Sizing Optimization for Industrial Applications," *Proceeding of 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Sydney, Australia, June, 2015, pp. 1-6.