

## 카울플레이트 적용을 통한 라미네이트 특성 평가

박동철\* · 김윤해\*\*†

### Evaluation of Laminate Property using Caulplate Application

Dong-Cheol Park\*, Yun-Hae Kim\*\*†

**ABSTRACT:** In this study, integrated co-bonded panels with the same configuration of hat stiffeners were fabricated and measured for ply waviness phenomenon. Total specimens consisted of 2 types; 1) the general co-bonded panel and 2) the co-bonded panel with caul plate made of carbon epoxy composite materials. The first general co-bonded panel specimen exhibited that laminate thickness on the stiffener location area was much thicker than the non-stiffener area and, there was ply waviness with 0.61 mm height and 3.29 mm length. In the second co-bonded panel specimen, the reduced waviness with 0.22 mm height and 1.37 length resulted in more than 50% improvements, which is due to the uniform pressure distribution of co-bonded interface by caul plate.

**초 록:** 본 연구에서는 동일한 구조의 모자형 보강재를 이용하여 일체형 동시접착 구조의 보강패널시편을 제작하였다. 일반적인 동시접착 보강패널 시편과 탄소에폭시 복합재를 이용하여 제작된 카울플레이트(Caul Plate)를 적용한 동시접착 보강패널 시편의 2가지 형태 시편을 제작하였으며 일반 동시접착 보강패널 시편에서는 패널 상에서 보강재가 적용되지 않은 부위가 적용된 부위보다 더 두꺼운 패널 두께를 가지고 그 연결부위에는 0.61 mm 높이 및 3.29 mm 길이의 플라이웨이브 현상이 나타났다. 카울플레이트가 적용된 보강패널 시편에서는 보다 균일한 압력 전달로 인하여 0.22 mm 높이와 1.37 mm 길이의 완화된 웨이브 현상을 보이면서 약 50% 이상 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

**Key Words:** 복합재(Composites), 일체형구조(Integrated structure), 동시접착구조(Co-bonded structure), 플라이 웨이브(Ply waviness)

## 1. 서 론

복합재료는 우수한 물성치 및 경량화 특성의 장점으로 인하여 항공, 자동차 및 해양선박 등의 다양한 산업에서 널리 확대 적용되고 있다[1].

복합재료 소재의 발전과 함께 자동적층장비와 같은 적용 장비 기술 발전에 힘입어 그 적용 부품은 점점 더 대형화 되고 복잡해져 가고 있으며 이와 더불어 전체 제작비용의 50% 이상을 차지하는 조립작업을 줄이기 위하여 두 개

이상의 복합재 부품을 1~2회의 경화공정을 통해 일체형 복합재 부품으로 제작하는 방법이 많이 개발/적용되고 있다[2,3].

최근 각광받고 있는 일체형 복합재 구조물은 주로 아래와 같은 동시경화(Co-cure), 동시접착(Co-bond) 이차접착(Secondary bond) 공정이 있다[4].

동시접착공정의 경우 보강패널의 비강도와 비강성을 높이기 위하여 다양한 형상으로 설계할 수 있는데 주로 오토클레이브를 이용한 진공백 성형으로 이루어지며 선 경화 제작된 보강재가 미 경화 패널에 위치된 후 경화시 추가적

Received 26 September 2016, received in revised form 28 October 2016, accepted 28 October 2016

\*Tech Center, Korean Air

\*\*†Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Corresponding author (E-mail: [yunheak@kmou.ac.kr](mailto:yunheak@kmou.ac.kr))

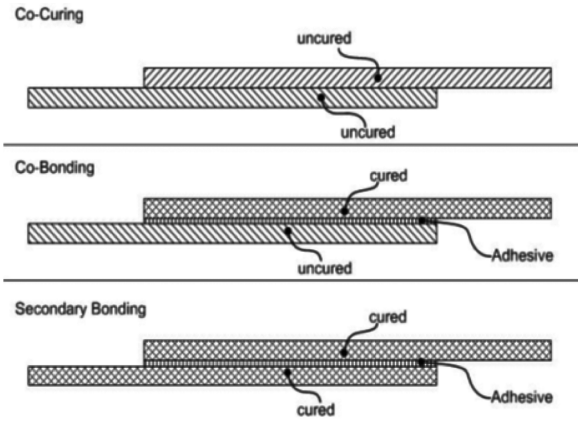


Fig. 1. Classification of composite bonded joints

인 압력이 가해진다[5]. 실제 동시접착 구조물 표면에 가해지는 압력은 동시접착 구조물의 형상 및 표면조건에 따라 다르게 나타나는데 패널 위에 위치한 보강재 부품 또는 진공백 등의 상태에 따라 적용되는 오토클레이브 압력의 차이가 접착계면에서 발생하고 이에 의해 플라이 웨이브가 발생한다.

플라이웨이브를 가진 복합재 부품에서는 내부응력집중을 유발하여 섬유플라이의 층간분리현상이 일어난 뒤 하중이 재분배되어 최종적으로 섬유의 파괴가 일어나게 된다[6]. 따라서 정상상태의 섬유를 가진 복합재에 비하여 웨이브가 있는 경우는 피로하중하에 압축 강도가 50%까지 손실될 수 있으며 인장강도에 있어서도 8°의 웨이브 각도에서는 29%, 11.9°의 각도에서는 49%의 강도저하가 일어난다고 알려져 있다[7,8].

본 연구에서는 동시접착공정으로 제작된 모자형 보강구조에서 일어나는 플라이웨이브 현상을 확인 관찰하고 일반 산업현장에서 널리 적용되는 방법 중 하나인 카울플레이트를 적용하였을 때 그 적용조건에 따른 플라이웨이브 영향 및 개선효과를 평가하였다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 재료 준비

본 연구에 사용된 자재는 고온경화용 에폭시 수지가 함침된 탄소섬유 일 방향 프리프레그(Toray, P2352W-19)와 부분적으로 탄소섬유 평직 프리프레그(Toray, FL76673G-37K) 및 유리섬유 프리프레그(Toray, FGF-108 29M)가 사용되었다. 또한 추가적으로 모자형 보강재와 보강패널을 동시접착하기 위하여 접착필름으로 3M사의 고온용 AF555M 필름이 사용되었다. 카울플레이트는 부품과의 열팽창계수 차이를 최소화하기 위하여 치공구 제작용 탄소에폭시 프리프레그를 사용하여 제작하였다.

### 2.2 시편 제작 및 평가 방법

시편은 동일한 구조의 모자형 보강재를 사용하여 동시접착 보강패널을 제작하는데 일반적인 보강재만 적용된 보강패널 시편과 카울플레이트가 함께 적용된 보강패널 2가지 형태로 제작하였다.

#### 2.2.1 동시접착 보강패널 시편

모자형 보강재는 접착면에 필플라이(Peel Ply)를 적용하여 경화 제작한 후 추가적인 기계가공을 하지 않고 원래형상 그대로 사용하였다. 후속으로 필플라이를 제거하고 접착필름을 적용해서 별도의 평판 치공구에 적용된 보강패널위에 위치시켜 동시접착시켰다.

보강재와 보강패널의 동시접착 구조물은 진공백 성형하여 오토클레이브 경화를 시켰으며 경화 사이클은 Fig. 3과 같다.

#### 2.2.2 카울플레이트 적용 보강패널 시편

동일한 형상의 긴 모자형 보강재를 부품 최종 형상에 맞게 6개의 시편으로 절단, 기계 가공하여 동시접착 보강패널을 제작하는데 추가적으로 카울플레이트를 적용하였다. 보강재와 카울플레이트 사이 간격(Caul Gap)은 0.0~2.5 mm

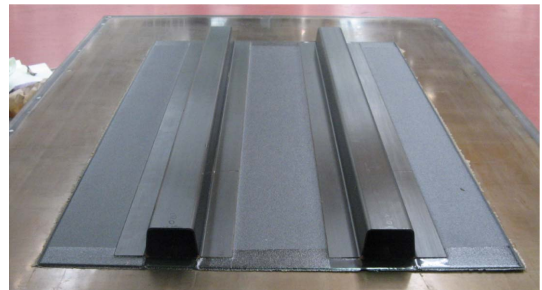


Fig. 2. Co-bonded panel specimen without caul plate

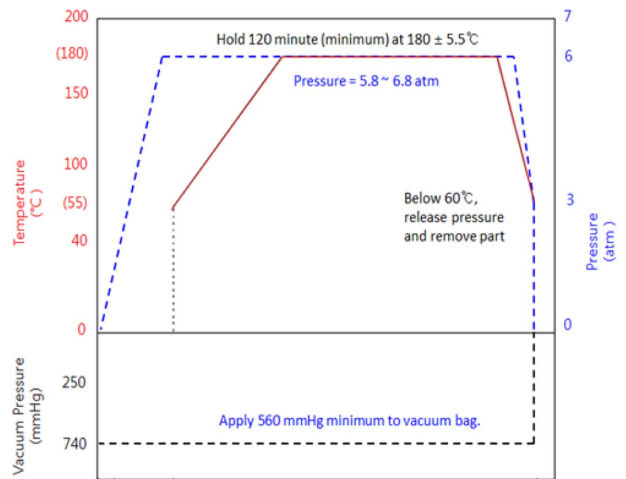


Fig. 3. Cure cycle

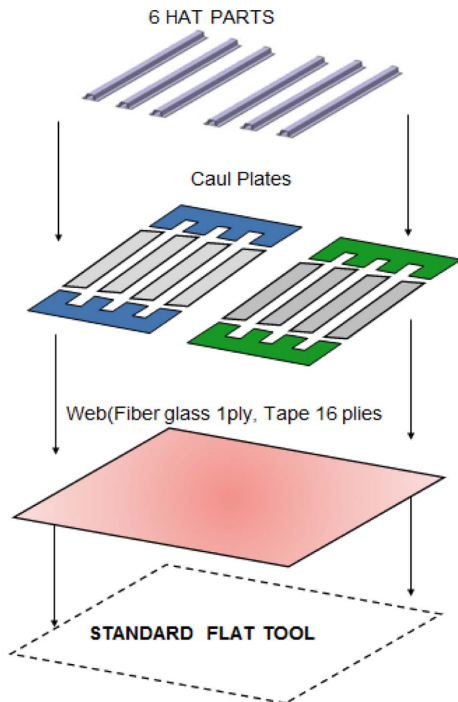


Fig. 4. Test scope of co-bond with caul plate



Fig. 5. Co-bonded Panel specimen with caul plate

를 유지하며 그 차이에 따른 영향을 확인하고자 하였으며, 보강재와 동일한 2.5 mm 두께의 카울 플레이트가 적용되었다.

2.3 평가방법

시편의 해당 부위는 단면을 절단하여 연마한 뒤 스캐닝 하여 Macro Photography를 통하여 플라이웨이브의 크기를 측정하였다.

복합재에서 발생하는 플라이웨이브 현상은 여러 가지 형태로 나타나는 데 동시접착 구조의 보강재 끝단 부위에서는 Hump 형태로 발생된다[9]. 따라서, 여기에서는 발생하는 웨이브의 길이(Length)와 깊이(Depth)를 측정하고 그 값

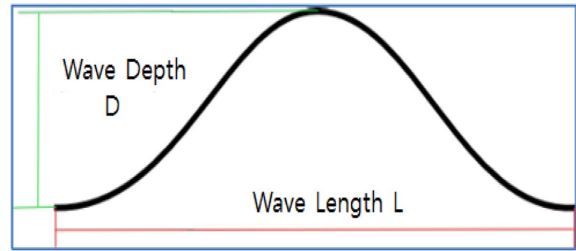


Fig. 6. Waviness profile

들을 비교하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 동시접착 보강패널

실제 시편의 단면에서는 Fig. 7에서와 같이 일종의 Semi-hump 형태를 보이고 있다. 시편에서 전체 16부위의 단면을 100 mm 간격으로 균일하게 절단, 연마하여 Table 1과 같은 값을 얻었는데 웨이브 깊이는 평균 0.61 mm(0.25~0.76 mm), 길이는 평균 3.29 mm(1.27~5.08 mm) 값을 나타내었다. 경화 시 보강패널에 가해지는 압력은 보강재와 같은 구조물이 적용된 부위와 적용되지 않은 부위와의 구조차이에 따른 압력차이가 발생하며 이로 인하여 압착정도 및 수지유동에 의한 패널위치별 두께의 차이를 초래하는 것으로 판단된다.

보강재가 적용된 부위에서는 접착면에서의 균일한 압력으로 인하여 일정한 두께의 라미네이트가 형성됨을 볼 수 있으며, 그 외에 보강재가 적용되지 않은 부분에서는 패널

Table 1. Waviness measurement without caul plate

No.	D (mm)	L (mm)
1	0.76	5.08
2	0.25	3.81
3	0.76	1.78
4	0.25	1.27
5	0.38	1.78
6	0.51	2.54
7	0.76	2.54
8	0.51	3.30
9	0.76	2.29
10	0.51	3.56
11	0.76	3.56
12	0.76	2.79
13	0.51	4.32
14	0.76	4.57
15	0.76	4.57
16	0.76	4.83

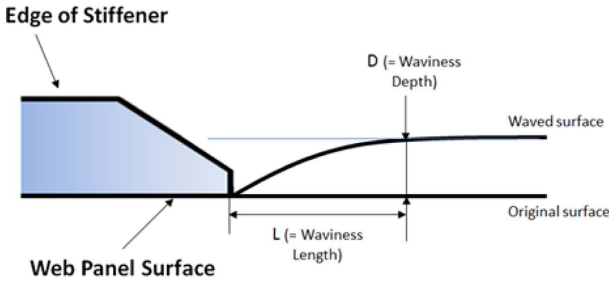


Fig. 7. Ply waviness pattern without caul plate

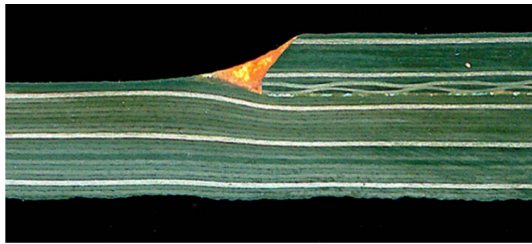


Fig. 8. Cross section of co-bonded panel without caul plate

위에 놓여진 Bagging material 등을 통한 상대적으로 낮은 압력이 패널에 적용됨에 따라 상대적으로 더 두꺼운 두께의 라미네이트가 형성됨을 확인하였다.

3.2 카울플레이트 적용 보강패널

카울플레이트를 사용한 시편에서 전체 18부위를 절단 및 단면을 연마한 뒤 플라이웨이브 현상을 측정관찰하여 Table 2와 같은 값을 얻었다.

카울플레이트가 적용된 동시접착 보강패널에서는 접착 경계면에서의 압력차이가 카울플레이트를 적용하지 않은 경우에 비하여 훨씬 줄어들고 이로 인하여 웨이브 현상이 크게 줄어드는 것을 관찰할 수 있는데 웨이브의 깊이는 평균 0.22 mm(0.00~0.41 mm)의 값을, 길이는 평균 1.37 mm (0.00~2.31 mm) 값을 확인하였다. 이는 카울플레이트를 사용함으로써 접착계면에서 보다 균일한 압력이 적용될 수 있기 때문으로 사료된다.

보강재와 카울플레이트가 놓여진 부위는 경화시 균일한 오토클레이브 압력이 가해지는 반면에 Caul Gap 부위는 상대적으로 낮은 압력이 가해지므로 이 압력 차이에 의하여 플라이웨이브 현상이 일어나고 수지 유동에 의한 수지과다현상이 나타난다.

Fig. 11과 12에서 나타난 바와 같이 보강재와 카울플레이트 사이의 간격 (Caul Gap)이 넓을수록 웨이브 깊이 (또는 높이)가 높아지고 웨이브의 넓이가 더 넓어지는 것을 확인할 수 있는데 이는 Caul Gap에 따른 웨이브 깊이와 넓이 인자들이 결정계수 0.7 이상의 강한 양적 상관 관계를 가지면서 유의미함을 보여준다.

이는 동시접착 보강패널 상에서 보강재가 놓여진 부위와 카울플레이트가 위치한 부위 사이의 간격이 넓을수록

Table 2. Waviness measurement with caul plate

No.	Caul Gap (mm)	D (mm)	L (mm)
1	0.76	0.20	1.47
2	1.02	0.20	0.61
3	1.68	0.28	1.85
4	0.51	0.13	0.64
5	2.16	0.33	2.26
6	0.00	0.00	0.00
7	0.74	0.18	1.50
8	1.02	0.18	1.78
9	1.02	0.25	1.73
10	1.07	0.36	2.18
11	1.57	0.38	2.24
12	1.22	0.28	1.27
13	0.36	0.15	0.99
14	0.74	0.18	1.19
15	2.18	0.41	2.29
16	2.39	0.33	2.31
17	0.00	0.00	0.00
18	0.36	0.10	0.33

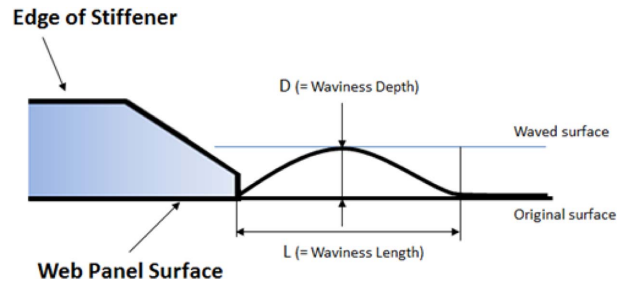


Fig. 9. Ply waviness pattern with caul plate

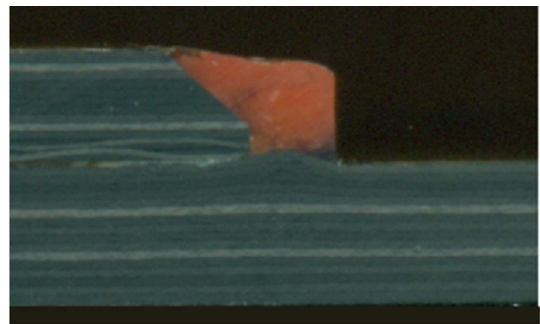


Fig. 10. Cross section of co-bonded panel with caul plate

상대적으로 낮은 압력이 적용되는 중간부위가 더 늘어나고 보강재와 카울플레이트가 위치한 부위에서 적용 받는 압력과 그 사이 중간부위에서 받는 압력의 차이가 더 커지기 때문으로 판단된다.

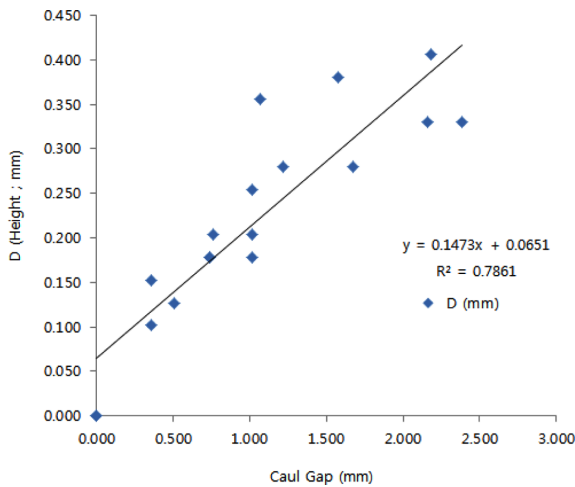


Fig. 11. Correlation between caul gap and waviness depth

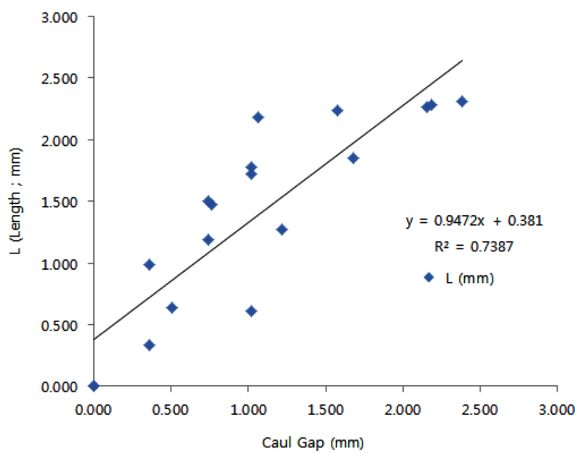


Fig. 12. Correlation between caul gap and waviness length

#### 4. 결 론

본 연구에서는 모자형 보강재를 이용하여 동시접착 보강패널 구조물을 제작하고 그에 따라 발생하는 플라이웨이브 현상 측정 및 카울플레이트 적용에 따른 영향성을 평가 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 동시접착 보강패널에서 보강재 끝 부위의 접착계면에서 발생하는 플라이웨이브 현상은 접착 경계면의 조건에 따라 서로 다른 형태로 나타나는데 그 압력차이가 클수록 웨이브현상이 증가된다.

2) 일반적인 보강패널에서는 보강재가 적용되지 않은 패널부위가 보강재가 적용된 부위보다 더 두껍게 나타나는 웨이브 형태가 나타나며 그 크기는 평균 0.61 mm 높이, 3.29 mm의 길이를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

3) 보강재가 적용되지 않은 부위에 카울플레이트를 사용함으로써 웨이브 현상이 완화되는 것을 관찰할 수 있으며 웨이브의 크기는 평균 0.22 mm, 길이는 1.37 mm로 나타났다.

4) 카울플레이트를 사용하는 경우 플라이웨이브의 높이와 길이가 사용하지 않은 경우에 비하여 각각 64% 및 58% 더 낮아지고 짧아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 카울플레이트를 사용함으로써 동시접착 경계면에서의 압력차이가 크게 줄어들어 보다 균일한 압력이 적용될 수 있기 때문으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2015년도 중소기업 기술개발지원사업(No. S2328725)의 연구수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. Kim, K.S., Bae, K.M., Oh, S.Y., Seo, M.K., Kang, C.G., and Park, S.J., "Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles," *Journal of the Elastomers and Composites*, Vol. 47, No. 1, 2012, pp. 65-74.
2. Andrew Taylor, "RTM Material Development for Improved Processability and Performance," *Journal of the Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, Vol. 36, No. 4, 2000, pp. 17-24.
3. Campbell, F.C., *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier Ltd, Oxford UK, 2004.
4. Thomas Kruse, Thomas Korwien, and Matthias Geistheck, "Bonding of CFRP Primary Aerospace Structures – Boundary Conditions for Certification in Relation with New Design and Technology Developments," *Proceeding of the Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, Seattle, Washington, June 2014, pp. 2-4.
5. Kim, G.H., Lim, D.W., Choi, J.H., Kweon, J.H., Lee, T.J., Song, M.H., and Shin, S.J., "Fabrication and Evaluation of Composite Panel with Hat-shaped Stiffeners," *Journal of the Korean society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 2, 2010, pp. 31-33.
6. Galappaththi, U.I.K., Anthony Picker, Milos Draskovic, Mark Capellaro, and De Silva, A.K.M., "The Effect of Ply Waviness for the Fatigue Life of Composite Wind Turbine Blades", *Proceeding of International Conference on Renewal Energies and Power Quality*, Bilbao Spain, March 2013.
7. Hsiao, H.M., and Daniel, I.M., "Effect of Fiber Waviness on Stiffness and Strength Reduction of Unidirectional Composites under Compressive Loading," *Journal of Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 581-593.
8. Stephen R. Hallet, Mike I. Jones, and Michael R. Wisnom, "Tension and Compression Testing of Multi-directional Laminates with Artificial Out of Plane Wrinkling Defects", *Proceeding of 6<sup>th</sup> International Conference on Composites Testing and Model Identification*, Aalborg, Denmark, 2013.
9. Cimini Jr. Carlos A., and Tsai, Stephen, W., "Ply Waviness on In-plane Stiffness of Composite Laminates", *Proceeding of ICCM12 Europe*, 1999.