

복합재 하니콤 코어의 형상가공 특성에 관한 실험적 연구

한승우*, 김해지#

(*,# 경남과학기술대학교 자동차공학과)

Experimental Study on Shape Machining Characteristics of Composite Honeycomb Core

Seung-Woo Han*, Hae-Ji Kim#

(Received 18 July 2014; received in revised form 7 August 2014; accepted 18 August 2014)

ABSTRACT

A composite honeycomb core is widely used for lightweight aircraft materials. However, the composite honeycomb core coupled with metal-cutting machining processes does not make a very good match. This paper describes an experimental study of the shape-machining characteristics of a composite honeycomb core, in which a five-axis gantry machine is used. The experimental conditions of the offset allowance, tooling condition and feed rate were applied. The shape machining characteristics of a flat surface, a vertical surface, and a concave surface are evaluated by comparing the machining shape and burr characteristics.

Key Words : Composite Honeycomb Core(복합재 하니콤 코어), 5-Axis Shape Machining(5축 형상가공), Hogger Cutter(호거 커터), Ball Endmill(볼엔드밀)

1. 서 론

항공기산업에서는 항공기의 연료소모 최소화, 운항의 장거리화, 수명연장 등을 실현하기 위하여 소재 경량화에 많은 노력을 하고 있는 실정이다. 항공기에 사용되는 부품의 소재 측면에서는 약 70% 이상이 AL합금소재들이 사용되고 있으며, 기존의 금속재질을 대신한 복합

재의 사용 비중이 증가하고 있다.

항공기산업에서 사용되는 복합재료는 큰 밀도

탄성계수를 가지는 재료를 외피로 하고 낮은 밀도와 높은 횡전단계수를 갖는 심재로 제작된다. 심재로는 발사나무와 같은 목재, 폼 등의 발포재 또는 하니콤 코어와 같이 중공 형태의 재료가 사용된다.

심재로 사용되는 다양한 재료 중 하니콤 코어는 Nomex/Phenolic, Kraft 종이, 알루미늄, 유리섬유 등의 박판을 사용하여 사각형, 원형, 벌집, 또는 특수한 형상으로 접합시켜 만들며 각 재질의 특성에 맞는 다양한 샌드위치 판넬의 심재로 선택된다. 하니콤 코어는 기하학적인 벌집구조 형태의 특성 때문에 기계가공에서 일반적으로 적용되는 개념과 다른 가공방법, 절삭공구, 절삭조건이 적용된다.

항공기의 주익을 구성하는 샌드위치 판넬의 주요 구조물은 부분적으로 강성을 보강하기 위해 더블 샌드위치 판넬 형태로 제작되며, 보충심재(filler core)를 사용하여 기존의 샌드위치 판넬과 접합시켜 하나의

* School of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

Corresponding Author :

Dept. of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

E-mail : khji@gntech.ac.kr

샌드위치 판넬로 제작한다. 보충심재는 접합될 면의 형상에 따라 곡면과 날카로운 모서리의 형상으로 이루어지며 복합재 하니컴 코어(composite honeycomb core)와 비교하여 단위면적당 무게가 약 3배 무겁지만 비교적 형상 가공이 쉬운 폼 형태의 신택틱 코어(syntactic core)가 사용된다.

하니컴 소재의 연구에서는 Foo 등^[1]은 노맥스와 노맥스 하니컴 구조의 기계적 특성에 관하여 연구하였고, Grove 등^[2]은 정적실험방법을 사용하여 하니컴 샌드위치 구조의 외피와 심재의 접착에 관하여 연구하였다.

Castanie 등^[3]은 금속외피와 노맥스하니컴 샌드위치 구조의 저에너지, 저속 충격의 모델에 관하여 연구하였다. Eric 등^[4]은 저속 충격에서 그라파이트, 에폭시, 노맥스 하니컴 샌드위치 판넬의 손상에 관하여 연구하였다. Liu 등^[5]은 하니컴 소재의 클램핑 방법에 관하여 연구하였으며, 지속적으로 하니컴 소재의 강성, 구조, 등에 관한 연구들의 수행되고 있다.^[5-12] 그러나 하니컴 재료의 재료학적 측면에서는 많은 연구가 선행되었으나, 하니컴 소재의 기계가공 측면에서는 상대적으로 연구가 미진한 실정이다.

본 논문에서는 금속 절삭가공과 비교하여 형상가공이 난해한 복합재 하니컴 코어 소재를 5축 머시닝센터를 사용하여 평면, 곡면 및 날카로운 모서리부의 형상가공 특성에 관하여 실험적으로 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 모델 선정

복합재 하니컴 코어 소재의 곡면과 날카로운 모서리형상의 가공 특성을 실험하기 위해 기존 신택틱 코어로

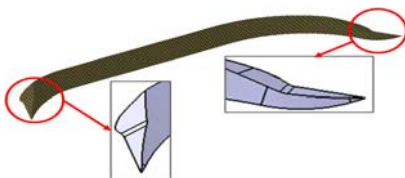


Fig. 1 Test model of composite honeycomb core for shape machining

제작된 다양한 형상을 참고하여 형상을 결정하였다.

Fig. 1에서는 CATIA 프로그램을 이용하여 디자인된 복합재 하니컴 코어의 3차원 형상을 나타내고 있다.

2.2 복합재 하니컴 코어

5축 머시닝센터를 사용하여 곡면과 날카로운 모서리부의 형상가공 특성을 실험하기 위하여 복합재 하니컴 코어 중 BMS8-124, TY V, CL4, GR3.0 규격의 HEXCEL사 HRH-10-1/8-3.0 소재를 사용하였다.

Table 1에서는 BMS8-124의 밀도와 식별 구분에 관한 사항을 나타낸 것이고, Table 2에서는 기계적 요구 특성을 나타낸 것이다.

복합재 하니컴 코어의 제작방법으로는 일반적으로 원소재 시트를 원하는 타입의 성형틀을 이용하여 성형한 다음 각 시트를 접착제로 접합하여 제작되고 있다.

Fig. 2에서는 복합재 하니컴 코어 소재의 사진을 나타내고 있다.

Table 1 Density and identification of composite honeycomb core

BMS8-124 GRADE	NOMINAL DENSITY LB/CUBIC FOOT	DENSITY RANGE LB/CUBIC	IDENTIFICATION COLOR
3.0	3.0	2.7 to 3.3	Orange

Table 2 Mechanical property requirements

GRADE	CLASS 4 (ARAMID PAPER) CORE									
	STAB. COMP. PSI		L SHEAR PROPERTIES				W SHEAR PROPERTIES			
			ULT., PSI		MOD., PSI		ULT., PSI		MOD., PSI	
	MIN. AVG.	MIN. IND.	MIN. AVG.	MIN. IND.	MIN. AVG.	MIN. IND.	MIN. AVG.	MIN. IND.	MIN. AVG.	MIN. IND.
3.0	250	200	155	140	5,200	4,500	84	74	2,800	2,500

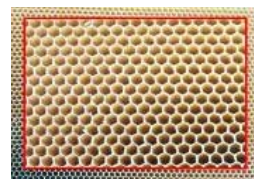


Fig. 2 Shape of composite honeycomb core

2.3 실험장치

복합재 하니컴 코어 소재의 형상가공특성 절삭실험을 위하여 Gentry type의 복합재 가공용 5축 장비를 사용하였다. Table 3에서는 장비의 제원을 나타내고 있고, Fig. 3에서는 Gentry type 장비의 사진을 나타내고 있다.

Table 3 Specification of 5-axis gentry machine

Machine size	12,000mm×6,000mm×4,500mm
Working size	8,000mm×4,000mm×1,170mm
Positioning accuracy	± 0.075mm
Feed rate	6,350 mm/min
Spindle	20,000 rpm, 42Kw
Web clamp manual POGO system	
5 Axis controlled SINUMERIK 840D	

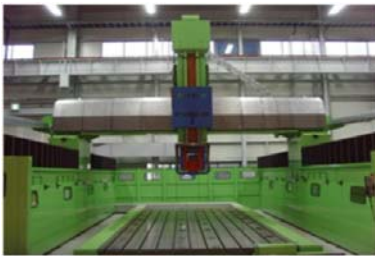


Fig. 3 5-axis gentry machine

2.4 치공구 및 적용공구

복합재 하니컴 코어 소재를 가공하기 위해 소재를 고정하는 방법으로 진공고정구(vacuum fixture)를 사용한다. 진공고정구는 단순한 평면부위나 경사면을 가공할 때 소재를 고정하는 방법으로 적합하다. 본 실험에서 가공하고자 하는 형상은 곡면과 날카로운 모서리로 구성되기 때문에 진공고정구를 사용할 시 소재가 절삭저항의 영향으로 가공 중 고정상태가 불안정해 질 수 있다. 이를 보완 하기위해 치공구를 제작하였다. 수직벽면 부분을 밴드쏘우 장비로 절단하고, 공작물좌표 원점에 소재를 고정하는 방법으로 수직벽면을 기준면으로 치공구를 설계하였다. Fig. 4에서는 제작된 치공구의 사진을 나타내고 있다.

절삭가공 실험에 사용된 공구는 복합재 하니컴 코어 전용가공 커터로 제작된 ONSRUD사의 직경 1.25inch



Fig. 4 Milling fixture

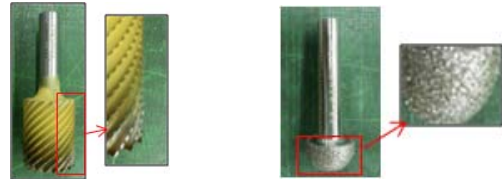


Fig. 5 Hogger cutter and Ball endmill

호거 커터와 EHWA사의 직경 1.0inch 다이아몬드 코팅된 볼엔드밀을 사용하였다. 호거커터는 평면 부위를 황삭 및 경사면 정삭용으로 사용하였고, 볼엔드밀은 곡면 및 날카로운 모서리 부위를 황삭, 정삭용으로 사용하였다. Fig. 5에서는 호거커터와 볼엔드밀의 사진을 나타내고 있다.

2.5 절삭조건

복합재 하니컴 코어 소재는 절삭가공 시 발생하는 칩의 형태가 찢겨진것과 가루형태로 생성된다. 실험에 사용하는 절삭공구는 Fig. 5에서 보는바와 같이 일반적인 엔드밀과 비교하여 날수 및 날의 형태도 차이가 있다. 따라서 기존 절삭조건식을 적용하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 복합재 하니컴 코어 소재의 5축 형상가공 특성을 실험하기 위해 주축의 회전수는 장비부하를 고려하여 85%인 17,000rpm으로 고정하고, 이송속도를 500mm/min 단위로 증감시켜 호거커터 및 볼엔드밀의 형상가공특성을 평가하고자 하였다. Table 4에서는 복합재 하니컴 코어 소재의 형상가공특성 실험을 위한 절삭조건을 나타내고 있다.

Table 4 Cutting conditions of composite honeycomb core

Cutter	Condition	Case 1	Case 2	Case 3
Hogger cutter	rpm	17,000		
	Feed rate (mm/min)	500	1,000	1,500
Ball endmill	rpm	17,000		
	Feed rate (mm/min)	800	1,300	1,800

2.6 NC 데이터 생성

CATIA 프로그램의 머시닝기능을 이용하여 NC 데이터를 생성하였다. 디자인 형상보다 5mm의 가공여유를 남겨둔 황삭가공 데이터와 0.1mm의 가공여유를 남겨 둔 정삭가공 데이터를 생성하였다. Fig. 6과 Fig. 7에서는 생성한 호거커터와 볼엔드밀의 공구경로 및 가공시물레이션을 나타낸 것이다.

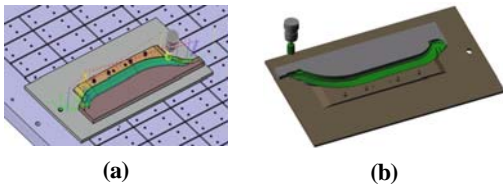


Fig. 6 Tool path generation and machine simulation of hogger cutter

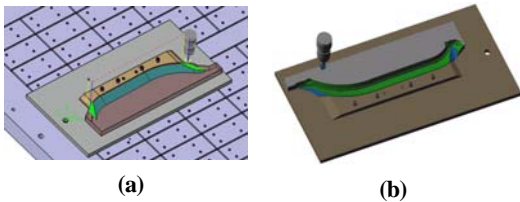


Fig. 7 Tool path generation and machine simulation of ball endmill

2.7 실험방법

복합재 하니컴 코어는 속이 비어있는 중공형태의 기학적 모양으로 인해 일반적으로 사용하는 클램프로는 고정할 수 없다. 이 점을 보완하기 위해 소재의 윗면과 아랫면에 3M사의 Metalbond 1515-3M 0.3PSF를 부착하고, TERAOKA사의 Colth double-stick tape No. 711(T0.5mm) 양면테이프를 사용하여 소재를 고정하였다. 복합재 하니컴 코어 소재의 형상가공 특성을 분석하기 위해 치공구의 적용여부, 바닥면의 offset여유, 이송속도 등을 달리하여 실험하였다. 가공순서로는 호거커터를 사용하여 제품의 평면 및 경사면을 황삭과 정삭을 한 후, 볼엔드밀을 사용하여 곡면 및 날카로운 모서리를 가공하는 순서로 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

5축 머시닝센터를 사용한 복합재 하니컴 코어 소재의 기준면과 곡면의 형상가공 특성을 분석하기 위하여 바닥면 Offset 여유, 치공구 적용여부, 이송속도 등에 관하여 비교 실험하였다.

3.1 바닥면 offset 여유에 따른 형상가공 특성

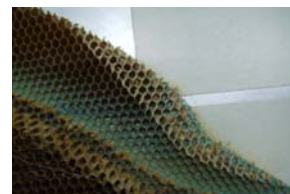
바닥면 offset 여유에 따른 형상가공 특성을 실험하기 위하여 Table 4에서 제안된 호거커터의 회전수 17,000rpm, 이송속도 1,000mm/min와 볼엔드밀 17,000rpm, 1,300mm/min의 절삭조건으로 실험하였다.

Fig. 8(a)에서는 바닥면에 offset 여유를 남기지 않고 가공한 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 평면부위는 양호하게 형상가공이 되었지만, 곡면부위와 날카로운 모서리 부분은 셀이 분리되어 날카로운 모서리 형상은 생성되지 않았다. Fig. 8(b)에서는 바닥면과 접합된 셀의 접착력을 유지하기 위해 바닥면에 1mm offset을 적용하여 가공한 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 셀의 접착력이 유지되어 곡면과 날카로운 모서리부의 형상이 잘 형성됨을 확인할 수 있었다.

바닥면 offset 여유에 따라 곡면부와 날카로운 모서리부의 형상 가공에 영향을 미쳤고, 곡면부와 날카로운 모서리부의 형상가공을 위해서는 최소한의 offset 여유가 필요한 것으로 판단된다.



(a) Non offset



(b) 1mm offset

Fig. 8 Shape machining result according to offset

3.2 치공구 적용 여부에 따른 형상가공 특성

치공구 적용 여부에 따른 형상가공 특성을 실험하기 위하여 Table 4에서 제안된 호거커터의 회전수 17,000rpm, 이송속도 1,000mm/min와 볼엔드밀 17,000rpm, 1,300mm/min의 절삭조건으로 실험하였다.

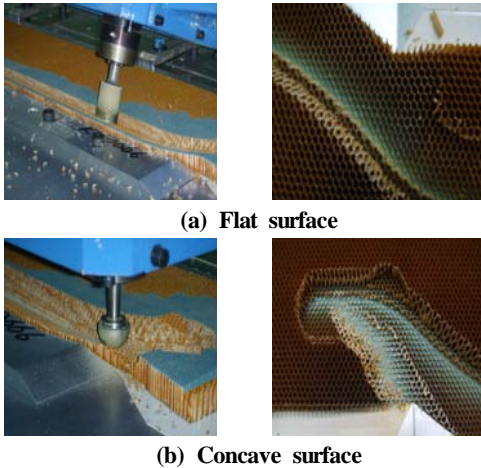


Fig. 9 Shape machining result according to using

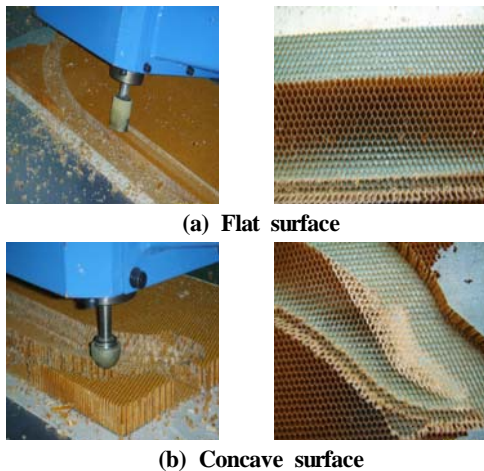


Fig. 10 Shape machining result according to unusing the fixture

Fig. 9에서는 배드의 바닥면에 양면 테잎을 부착한 후, 고정용 치공구를 부착하고, 호거커터와 볼엔드밀로 가공한 형상을 나타내고 있다. Fig. 9(a)와 (b)에서

보는바와 같이, 평면부, 곡면부 및 날카로운 모서리부의 형상이 양호하게 생성되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10에서는 배드의 바닥면에 양면 테잎을 부착하고, 고정용 치공구는 부착하지 않은 상태에서 호거커터와 볼엔드밀로 가공된 형상을 나타내고 있다. Fig. 10(a)와 (b)에서 보는바와 같이, 치공구를 부착하지 않아도 평면부, 곡면부 및 날카로운 모서리부의 형상이 양호하게 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 실험결과에서 보는바와 같이, 복합재 하니콤 코어 소재의 형상가공에서 치공구의 사용여부에 따른 형상가공에 미치는 영향이 없음을 확인할 수 있다.

3.3 이송속도에 따른 형상가공 특성

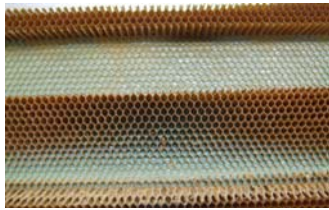
치공구 적용방법의 비교 실험결과로 치공구를 적용하지 않고 이송속도에 따른 형상가공 실험을 수행하였다. 절삭날 형상의 특성상 회전수에 따른 날의 절삭량을 도출하기에는 어려움이 있다. 따라서 스피들 회전수는 동일하게 고정하고, 이송속도를 변경하여 날카로운 형상이 생성되는 부분과 버 발생유무를 통하여 가공 특성을 평가하였다.

Fig. 11에서는 공구의 이송속도를 호거커터 500mm/min, 볼엔드밀 800mm/min로 가공한 형상을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 실험된 복합재 하니콤 코어의 전체적인 형상은 절삭가공이 양호하게 생성되었다. 그러나 Fig. 11의 (a)의 평면 및 경사면 부위는 버가 미미하게 발생하였으며, Fig. 11의 (b), (c), (d)의 측면 및 곡면 부위는 그림에서 보는 바와 같이 상대적 많은 버가 발생하였다.

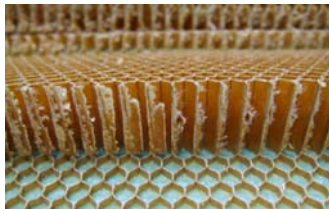
Fig. 12에서는 공구의 이송속도를 호거커터는 1,000mm/min으로, 볼엔드밀은 1,300mm/min의 조건으로 가공한 형상을 나타내고 있다.

Fig. 11의 실험결과와 비교하여 평면 및 경사면 부위는 동일한 품질로 가공되었고, 호거커터의 옆날로 가공된 수직벽면부분과 볼엔드밀로 가공된 곡면부위는 버 발생량이 감소하였다.

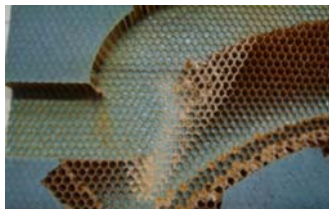
Fig. 13에서는 공구의 이송속도를 호거커터 1,500mm/min, 볼엔드밀 1,800mm/min로 가공한 형상을 나타내고 있다. Fig. 12의 실험결과와 비교하여 평면 및 경사면 부위는 동일한 품질로 가공되었고, 호거커터의 옆날로 가공된 수직벽면부분과 볼엔드밀로 가공된 곡면부위는 버 발생량이 증가하였다.



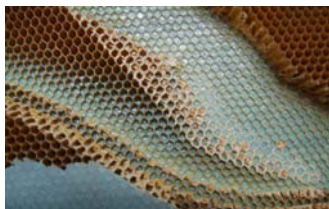
(a) Flat surface(hogger cutter, 500mm/min)



(b) Vertical surface(hogger cutter, 500mm/min)

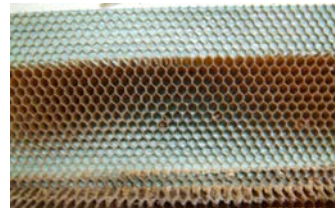


(c) Concave surface left(ball endmill, 800mm/min)



(d) Concave surface right(ball endmill, 800mm/min)

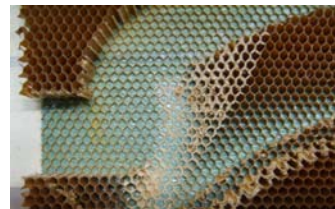
Fig. 11 Shape machining result according to feed rate (500mm/min and 800mm/min)



(a) Flat surface(hogger cutter, 1,000mm/min)



(b) Vertical wall(hogger cutter, 1,000mm/min)

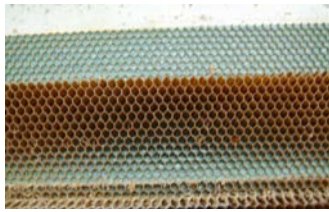


(c) Concave surface left(ball endmill, 1,300mm/min)

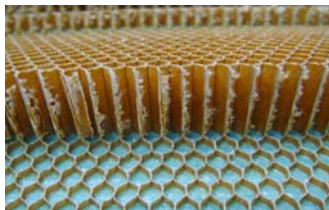


(d) Concave surface right(ball endmill, 1,300mm/min)

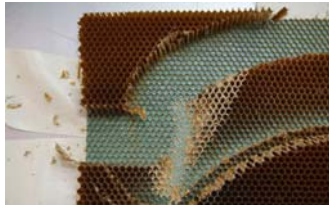
Fig. 12 Shape machining result according to feed rate (1,000mm/min and 1,300mm/min)



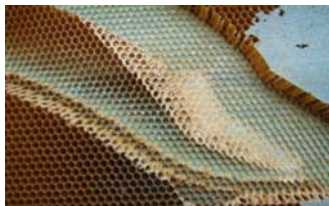
(a) Flat surface(hogger cutter, 1,500mm/min)



(b) Vertical wall(hogger cutter, 1,500mm/min)



(c) Concave surface left(ball endmill, 1,800mm/min)



(d) Concave surface right(ball endmill, 1,800mm/min)

Fig. 13 Shape machining result according to feedrate (1,500mm/min and 1,800mm/min)

실험된 이송속도 범위내에서는 전체적으로 양호한 형상이 가공되었고, 버의 생성측면에서는 호거커터 1,000mm/min으로, 볼엔드밀은 1,300mm/min의 실험조건에서 버가 작게 생성되었다. 특히 평면 및 경사면 가공에서 버가 미미하게 발생하였고, 버가 미미하게 발생한 것은 호거커터의 밀 날로 절삭이 이루어졌기 때문으로 판단된다. 그리고 상대적으로 버가 많이 발생한 수직면은 호거커터의 옆날로 절삭이 이루어져 셀이 절삭이 되기 보다는 소재 특성으로 인한 뜯김 현상이 나타났고, 볼엔드밀로 가공된 곡면부위도 동일하다고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 항공기부품의 경량화를 위해 사용되고 있는 복합재 하니컴 코어 소재의 5축 형상가공 특성에 관한 가공방법과 절삭조건에 대하여 실험적으로 연구되었다. 복합재 하니컴 코어 소재의 5축 형상가공 특성에 관한 주요 실험 결과는 다음과 같다.

복합재 하니컴 코어 소재의 5축 형상가공 특성으로 바닥면 offset 여유에 따라 가공 형상에 영향을 미쳤으며, 날카로운 모서리부의 형상가공을 위해서는 최소한의 offset 여유가 필요하다. 그리고 치공구의 적용 여부에 따라 복합재 하니컴 코어 소재의 형상가공에 미치는 영향은 없었다.

버의 발생측면에서는 호거커터 1,000mm/min으로, 볼엔드밀은 1,300mm/min의 실험된 범위의 조건에서 버가 작게 발생되었다.

복합재 하니컴 코어 소재의 5축 형상가공 시에 버의 주요인은 소재의 특성 때문에 절삭가공에 의한 버 보다는 소재의 뜯김 현상에 기인한다.

참고문헌

1. C.C. Foo, G.B. Chai, L.K. Seah., "Mechanical properties of Nomex material and Nomex Honeycomb structure," Composite Structures, Vol. 80, pp. 588-594, 2007.
2. S.M. Grove, E. Popham, M.E. Miles., "An

- investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques," *composites, Part A* : 37, pp. 804-812, 2006.
3. Castanie B, Bouvet C, Aminanda Y, Barrau JJ, Thevenet P., "Modelling of lowenergy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins," *Int J. Impact Eng* Vol. 35, pp. 620-634, 2008.
 4. Eric J Herup, Anthony N Palazotto, "Low-velocity impact damage initiation in graphite/epoxy/Nomex honeycomb-sandwich plates," *Composites Science and Technology*, Vol. 57, pp. 1581-1598, 1998.
 5. Liu Gang, Ke Ying-Lin., "Study on clamping method for paper honeycomb based on magnetic field and friction principle," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, pp. 65-72, 2007.
 6. Nguyen, M.Q., Jacombs S.S., Thomson RS, Hachenberg D, Scott ML., "Simulation of impact on sandwich structures," *Composite Structures*, Vol. 67, pp. 217-227, 2005.
 7. Giglio M, Manes A, Gilioli A., "Investigations on sandwich core properties through an experimental- numerical approach," *Composites, Part B*:43, pp. 361-374, 2012
 8. Yang MY, Huang JS, Hu JW., "Elastic buckling of hexagonal honeycombs with dual imperfections," *Composite Structures*, Vol. 82, pp. 326-335, 2008.
 9. Li K, Gao XL, Wang J., "Dynamic crushing behavior of honeycomb structures with irregular cell shapes and non-uniform cell wall thickness," *Int. J. Solids Structure*, Vol. 44, pp. 5003-5026, 2007.
 10. Kress G, Winkler M., "Honeycomb sandwich residual stress deformation pattern," *Composite Structures*, Vol. 89, pp. 294-302. 2009.
 11. Wilbert A, Jang WY, Kyriakides S, Floccari JF., "Buckling and progressive crushing of laterally loaded honeycomb," *Int. J. Solids Structure* , Vol. 48, pp. 803-816, 2011.
 12. Mohr D, Doyoyo M., "Deformation-induced folding systems in thin-walled monolithic hexagonal metallic honeycomb," *Int. J. Solids Structure*, Vol. 41, pp. 3353-3377, 2004.