

항공기 날개 구조의 RCS 저감을 위한 니켈 코팅 유리섬유 기반 허니콤 샌드위치 구조 제작

Fabrication of honeycomb sandwich structure based on the nickel-coated glass fabric for RCS reduction of aircraft wing structure

초록

본 연구에서는 무전해 도금을 통해 니켈이 코팅된 유리섬유를 기반으로 하는 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조를 설계하고 제작하였다. 기존의 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조를 연구한 대부분의 논문에서는 전자기파를 흡수할 수 있는 허니콤 코어의 연구에만 집중하였으나, 본 연구에서는 허니콤 코어 샌드위치 구조의 레이더 흡수 성능에 대해 연구하였다. 기존의 샌드위치 구조와는 달리 본 연구에서 제시한 구조는 전자기파 흡수 성능을 극대화하기 위하여 2개의 허니콤 코어와 3개의 외피로 구성된다. 구조의 전자기파 흡수 성능은 반사 손실 및 레이더 반사 면적 측정으로 확인되었다. 또한 구조의 하중 지지 능력을 평가하기 위해 샌드위치 구조의 평면 방향 압축 시험을 수행하였다. NACA 0012 날개 모델의 앞전에 본 연구에서 개발한 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조를 적용하였고 다양한 입사 조건에서 날개 구조의 레이더 반사 면적 저감에 미치는 영향을 확인하였다. 수행된 모든 해석 및 실험결과 개발된 허니콤 샌드위치 구조의 스텔스 항공기 날개 구조에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

1. 서론

레이더 반사 면적 (RCS)은 전자기파가 물체로 입사 되었을 때 레이더 수신기 방향으로 산란되어 돌아오는 전력밀도의 정량적 수치이며, 이 RCS 저감 기술은 현대전에서 항공기의 생존성을 증가시키기 위한 가장 중요한 기술 중 하나이다. 저피탐 항공기의 RCS를 저감시키기 위하여 형상설계기술 (Shaping Technology), 레이더 흡수 물질 (Radar Absorbing Material)의 적용 등의 스텔스 기술이 개발되었다. 항공기의 외부 형상을 변형시켜 입사된 전자기파를 입사된 방향으로 반사되지 못하도록 하는 형상설계기술은 스텔스 기술의 가장 기초가 되는 기술이다. 그러나 Bi-static 레이더 시스템과 같이 송신기와 수신기가 다른 장소에 설치되어 있다면, 형상설계기술 만으로 항공기 생존성을 보장하기 어려우며, 과도한 형상의 변화는 공기역학적 특성 및 구조의 건정성을 해칠 수 있다. 이러한 형상설계기술의 한계를 극복하기 위하여 레이더 흡수 물질이 개발되었다. 레이더 흡수 물질은 페인팅과 같은 방식으로 항공기 구조에 적용되며, 물질 자체가 스스로 전자기파를 흡수한다. 하지만, 레이더 흡수 물질이 우수한 전자기파 흡수 성능을 보일지라도 중량증가, 낮은 내구성, 유독성 등의 치명적인 단점이 수반된다. 레이더 흡수 구조 (Radar Absorbing Structure)는 전자기파 흡수체이자 동시에 구조적 하중을 지지할 수 있는 구조이다. 레이더 흡수 구조는 레이더 흡수 물질에서 나타났던 문제점을 극복할 수 있기 때문에 스텔스 기술 분야에서 많은 관심을 받고 있다.

높은 강도와 강성을 나타내는 복합재 외피와 낮은 중량의 허니콤 코어로 구성되는 허니콤 샌드위치 구조는 낮은 중량 증가로 높은 굽힘강성을 획득할 수 있는 효율적인 구조이다. 이러한 장점으로 인해 허니콤 샌드위치 구조는 다양한 산업 분야에 적용되고 있으며, 레이더 흡수 구조로 사용될 가능성이 있어 많은 연구자들의 관심이 되고 있다. 그러나 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조를 연구한 대부분의 저자들은 허니콤 코어의 전자기파 흡수 성능에만 집중 하였다. 하지만 허니콤 샌드위치 구조의 레이더 흡수 성능은 허니콤 코어뿐만 아니라 외피에 의해서도 영향을 크게 받으므로, 샌드위치 구조의 레이더 흡수 성능이 반드시 연구되어야 한다. 허니콤 코어와 외피로 구성된 샌드위치 구조의 레이더 흡수 성능을 연구한 논문이 있었지만, 외피로 하중 지지 능력이 부족한 고무를 사용하였으며 이는 레이더 흡수 구조로 적절치 않다.

본 연구에서는 니켈이 코팅된 유리섬유를 사용하여 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조를 설계하고

제작하였다. 제시된 구조는 전자기파 흡수 성능을 극대화하기 위해 2개의 허니콤 코어와 3개의 외피로 구성된다. 제작된 구조의 레이더 흡수 성능은 반사 손실 및 RCS 감소 성능 측정으로 평가되었으며 구조의 하중 지지 능력은 샌드위치 구조의 평면 방향 압축 시험으로 확인되었다. 다양한 전자기파 입사 조건 하에서 설계된 허니콤 샌드위치 구조의 RCS 감소 성능을 확인하기 위하여 제시된 구조를 NACA 0012 날개 에어포일 모델의 앞전에 적용하여 RCS 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 모든 시뮬레이션 및 실험의 결과, 본 연구에서 제시된 2층형 허니콤 샌드위치 구조는 항공기의 날개 구조에 적용되어 우수한 스텔스 성능을 나타낼 것으로 판단된다.

2. 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조 설계

본 논문에서는 전자기파를 흡수할 수 있는 허니콤 샌드위치 구조 제작을 위하여 무전해 도금 기법으로 니켈이 코팅된 유리섬유를 사용하였다. 니켈 코팅으로 인해 유리섬유의 전자기 물성은 변화되며, 니켈 코팅된 유리섬유를 이용하여 복합재 적층판을 제작하였고, 제작된 적층판의 복소 유전율을 자유공간 측정 시스템을 사용하여 측정하였다. 니켈이 코팅되지 않은 유리섬유로 제작된 적층판의 복소 유전율은 10 GHz에서 $4.57 - j0.05$ 이었으나, 무전해 도금을 수행한 유리섬유로 제작된 적층판의 복소 유전율은 10 GHz에서 $8.06 - j12.68$ (sample #01)와 $11.23 - j21.86$ (sample #02)으로 증가하였다.

전자기파를 효과적으로 흡수할 수 있는 허니콤 샌드위치 구조를 설계하기 위해 CST software를 이용하여 인자 연구를 수행하였다. 사전 연구를 통해 확인한 결과 니켈이 코팅된 섬유를 사용하여 제작된 허니콤 코어는 전자기파 흡수 성능을 나타내는 것을 확인하였고 본 연구에서는 허니콤 코어의 재료 상수로 니켈이 코팅된 유리섬유 (sample #02)의 유전율을 사용하였다. 허니콤 샌드위치 구조의 구성, 외피의 두께 및 재료상수, 허니콤 코어의 두께가 인자로 고려되었다. 샌드위치 구조의 구성의 경우, 광대역에서 우수한 흡수 성능을 나타내기 위해서는 허니콤 코어가 2개 또는 그 이상이어야 하며, 본 연구에서는 허니콤 코어의 개수를 2개로 선정하였으며 이에 따라 외피의 수는 3개로 결정되었다. 3개의 외피(Top, Middle, Bottom)의 최적 두께 및 재료 구성을 획득하기위해 코어의 두께를 10 mm로 고정하고, Parameter Sweep 해석을 수행하였다. 해석 결과 Top 및 Bottom 외피의 두께는 0.25 mm이며 재료는 니켈이 코팅 되지 않은 유리섬유로 구성된다. Middle 외피의 경우, 0.375 mm의 니켈이 코팅된 유리섬유 (sample #01)와 0.125 mm의 니켈이 코팅 되지 않은 유리섬유로 구성되며 총 두께는 0.5 mm이다. 코어의 개수, 외피의 구성 및 두께를 고정하고, 허니콤 코어의 두께에 따른 샌드위치 구조의 전자기파 흡수 성능을 확인하였다. 코어의 두께는 1~20 mm로 설정하였고 반복해석을 수행하였다. 코어의 두께가 두꺼울수록 전자기파 흡수 성능도 함께 증가 되었지만, 허니콤 코어의 두께의 증가는 전체 샌드위치 구조의 두께 증가로 이어지기 때문에 흡수 성능과 두께를 고려하여 허니콤 코어의 두께는 4 mm로 선정하였고, 이에 따라 전체 샌드위치 구조의 두께는 9 mm이다.

3. 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조의 제작 및 흡수 성능 평가

3.1. 제작

인자 연구를 통해 획득한 허니콤 샌드위치 구조의 구성에 따라 전자기파 흡수 허니콤 샌드위치 구조를 제작하였다. 두 장의 니켈이 코팅된 유리섬유와 에폭시로 구성된 전자기파 흡수 층을 두께 25 mm로 재단하고 재단된 흡수 층을 전용 제작치구를 이용하여 적층하였다. 적층이 완료된 후 제작된 허니콤 코어 구조가 균일한 셀 벽의 두께와 셀 사이즈를 갖도록 하기 위하여, 3개의 클램프를 이용하여 적층된 구조를 압착하여 주었고, 오토클레이브를 이용하여 경화를 수행하였다. 제작된 허니콤 코어의 두께는 25 mm 이기 때문에 4 mm의 두께로 가공이 필요하였다. 허니콤 코어를 가공할 때 코어의 손상을 줄이기 위하여, 가공 전 수용성 몰드를 이용하여 코어를 보강하였고 가공 후 수돗물을 이용하여 몰드를 제거하였다. 외피의 경우, 설계된 구성에 따라 니켈이 코팅 되거나 코팅 되지 않은 유리섬유와 에폭시를 이용하여 Wet-layup 방식으로 적층하였고, 코어와 마찬가지로 오토클레이브를 이용하여 경화를 수행하였다. 제작이 완료된 2개의 허니콤 코어와 3개의 외피는 필름형 접착제를 이용하여 접착하였고 제작된 구조를 통하여 허니콤 샌드위치 구조의 반사 손실 및 레이더 반사 면적 측정을 수행하였다.

3.2. 반사 손실 및 레이더 반사 면적 측정

제작된 구조의 반사 손실 및 레이더 반사 면적 측정 시험을 수행하였다. 반사 손실 시뮬레이션은 2-18 GHz에서 수행되었지만 측정은 장비의 한계로 인해 5.8-18 GHz에서 수행되었다. 시뮬레이션 결과, 제작된 샌드위치 구조는 4.7-18 GHz 에서 -10 dB 이상의 반사 손실을 나타내었고, 7.2 GHz에서 강한 피크를 나타내었다. 반사 손실 측정결과 5.8-16.3 GHz에서 90% 이상의 전자기파 흡수 성능을 나타내었다. 시뮬레이션 결과와 측정결과는 유사한 경향을 나타내었으나 반사 손실의 크기 및 피크가 발생한 주파수 대역에는 약간의 차이가 발생하였다. 이 차이는 제작 공정에 기인한것으로, 시뮬레이션에서는 접착을 위한 필름형 접착제가 고려되지 않았으나, 실제 제작에는 접착제가 사용되어 이러한 결과나 발생한것으로 판단된다. 레이더 반사 면적 저감 성능 평가의 경우 샌드위치 구조와 크기가 같은 구리판의 시뮬레이션 및 측정이 함께 수행되었다. 구리판의 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교하였을 때 상당히 유사한 결과를 나타내었으며, 이러한 결과로부터 측정에 사용된 시스템의 정확도가 높다는 것이 입증되었다. 4.5-18 GHz 주파수 대역에서 제시된 허니콤 샌드위치 구조는 10 dB 이상의 레이더 반사 면적 저감 성능을 보이는 것을 시뮬레이션을 통해 확인되었으며, 측정 결과도 시뮬레이션 결과와 유사한 양상을 나타내었다. 입사된 대부분의 전자기파가 입사된 방향으로 반사되는 평판 형태의 샌드위치 구조를 제작하여 레이더 반사 면적을 측정하였을 지라도 상당히 높은 레이더 반사 면적 저감 성능을 보이는 것을 확인하였다.

4. 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조의 날개 구조에 적용

니켈이 코팅된 유리섬유 (sample #02)로 구성된 2개의 허니콤 코어와 니켈이 코팅된 유리섬유 (sample #01) 또는 코팅 되지 않은 유리섬유로 구성된 3개의 외피를 가지는 허니콤 샌드위치 구조를 NACA 0012 날개 에어포일 모델에 적용하였다. 제시한 샌드위치 구조가 적용된 날개 모델의 레이더 반사 면적 시뮬레이션을 수행하였고, 레이더 흡수 성능을 비교를 위해 앞전이 PEC로 적용된 날개 모델의 해석도 함께 수행되었다. 전자기파의 TM 및 TE mode가 고려되었으며, 넓은 각도로 전자기파가 입사 될 경우에 레이더 흡수 성능을 확인하기 위해 수직 입사 (0°)와 경사 입사 (20°, 40°) 조건이 고려되었다. 시뮬레이션 결과, TE 모드의 경우 제안된 샌드위치 구조가 날개 구조에 적용되었을 때 PEC가 적용된 날개 모델과 비교하여 레이더 반사 면적이 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 수직 입사의 경우 4-16.2 GHz 에서 10 dB 이상의 반사 면적 감소가 나타났으며 최대 감소량은 32.4 dB로 6.3 GHz 에서 나타났다. 20°의 경사 입사 조건 에서는 4.6-16.2 GHz 주파수 대역에서 10dB 이상의 레이더 반사 면적 감소가 나타났으며, 40° 입사의 경우에도 다른 입사 각도와 유사한 경향을 나타내었다. TM 모드의 해석 결과는 TE 모드와 유사하였으며 40°의 경사 입사 조건일지라도 5.8-16.6 GHz에서 10dB 이상의 레이더 반사 면적 저감 효과를 가져오는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 수행된 날개 구조의 레이더 반사 면적 시뮬레이션 결과, 제안된 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조가 날개 구조에 적용되면 큰 각도로 전자기파가 날개로 입사 되더라도 레이더 반사 면적을 상당히 줄일 수 있음이 확인되었다.

5. 하중 지지 성능 평가

5.1. 허니콤 샌드위치 구조의 평면 방향 압축 시험

본 연구에서 제작된 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조의 하중 지지 능력을 평가 하기 위해 구조의 평면 방향 압축 시험을 수행하였다. 시편은 75 mm × 75 mm의 단면을 가지며 샌드위치 구조의 구성에 따라 두께는 9 mm 이다. 시편과 시험은 ASTM C365를 준수하여 준비되고 수행되었다. 시험 결과 평균 압축 파손하중은 22.2 kN 으로 나타났고, 표준편차는 2.3 kN 이었으며, 대표적인 파손모드는 코어의 압축 파손으로 나타났다. 알루미늄 코어와는 달리 본 연구에서 사용된 허니콤 코어는 유리섬유와 에폭시 레진으로 제작이 되었으므로, 이러한 파손 모드가 발생한 것으로 판단된다. 사전 연구를 통해 확인한 결과 샌드위치 구조에 적용된 허니콤 코어는 코어 자체로도 전자기파를 흡수 할 수 있으며, 허니콤 코어의 셀의 크기, 셀 벽의 두께 등을 변경 하여도 레이더 흡수 성능이 크게 저하되지 않는것으로 나타났다. 따라서 허니콤 코어의 셀의 크기를 감소시키거나 셀 벽의 두께를 증가 시킨다면,

샌드위치 구조는 훨씬 높은 압축 하중을 지지할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 무전해 도금 기법으로 니켈이 코팅된 유리섬유를 사용하여 제작된 허니콤 코어 및 복합재 외피로 이루어진 레이더 흡수 허니콤 샌드위치 구조가 설계되고 제작되었다. 기존의 허니콤 샌드위치 구조와는 달리 전자기파 흡수 성능을 극대화하기 위하여 본 연구에서 제작된 허니콤 코어 구조는 코어가 2개, 외피가 3개로 구성된다. 샌드위치 구조의 전자기파 흡수 성능을 평가하기 위해 반사 손실 및 레이더 반사 면적 측정을 수행하였으며, 그 결과 제시된 구조가 높은 레이더 흡수 성능을 나타내는 것이 확인되었다. 레이더 흡수 허니콤 코어 구조는 NACA 0012 날개 에어포일 모델의 앞전에 적용되었으며, 샌드위치 구조가 적용된 날개 모델의 레이더 반사 면적 저감 효과를 시뮬레이션으로 확인하였다. 시뮬레이션 결과 본 연구에서 제안한 샌드위치 구조는 전자기파가 높은 각도로 입사 되더라도 우수한 레이더 반사 면적 저감 성능을 나타내는 것으로 확인되었다. 샌드위치 구조의 하중 지지 능력을 평가하기 위하여 평면 반향 압축 시험 또한 수행되었다. 시험 결과 본 연구에서 제시한 구조는 하중을 지지 할 수 있는 구조로써 역할이 가능한 것으로 평가되었다. 수행된 모든 시뮬레이션 및 실험 결과, 본 연구에서 설계되고 제작된 허니콤 샌드위치 구조는 레이더 흡수 성능과 하중 지지 능력을 동시에 나타내는 레이더 흡수 구조로써 적용이 될 수 있음이 증명되었다.