

論文

하이브리드 복합재를 이용한 레이더 흡수 셸의 제작 및 레이더 단면적 평가

정우균*, 안성훈+, 안병철**, 박성배**, 원명식***

Fabrication of Radar Absorbing Shells Made of Hybrid Composites and Evaluation of Radar Cross Section

Woo-Kyun Jung*, Sung-Hoon Ahn+, Bierng-Chearl Ahn**, Seoung-Bae Park** and Myung-Shik Won***

ABSTRACT

The avoidance of enemy's radar detection is very important issue in the modern electronic weapon system. Researchers have studied to minimize reflected signals of radar. In this research, two types of radar absorbing structure (RAS), "C"-type shell and "U"-type shell, were fabricated using fiber-reinforced composite materials and their radar cross section (RCS) were evaluated. The absorption layer was composed of glass fiber reinforced epoxy and nano size carbon-black, and the reflection layer was fabricated with carbon fiber reinforced epoxy. During their manufacturing process, undesired thermal deformation (so called spring-back) was observed. In order to reduce spring-back, the bending angle of mold was controlled by a series of experiments. The spring-back of parts fabricated by using compensated mold was predicted by finite element analysis (ANSYS). The RCS of RAS shells were measured by compact range and predicted by physical optics method. The measured RCS data was well matched with the predicted data.

초 록

첨단 전자무기체계의 지속적인 발전으로 인하여 현대전의 승패는 적 레이더 탐지의 회피에 크게 좌우된다고 할 수 있다. 반사되는 레이더의 탐지신호를 최소화시키기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔는데, 본 연구에서는 뛰어난 기계적, 전자기적 물성으로 응용분야가 지속적으로 확대되고 있는 섬유강화 복합재료를 이용하여 레이더 전자파 흡수체(Radar absorbing structure, RAS)를 제작하고 레이더 단면적(Radar cross section, RCS)을 평가하였다. 유리섬유 복합재에 뛰어난 유전적 특성을 지닌 나노 크기의 카본블랙(Carbon-black)을 첨가하여 흡수층을 구성하고, 반사특성이 탁월한 탄소섬유 복합재를 후면의 반사층으로 배치하여 "C" 및 "U" 형상의 하이브리드 복합재 RAS 셸을 제작하였다. RAS 셸의 제작간 서로 다른 두 재료의 열적 물성치 차이로 스프링 백이라 불리는 변형이 발생하였는데, 금형의 굽힘각도 제어를 통하여 효과적으로 보정할 수 있었다. 또한 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 스프링 백 보정 결과를 예측하고 실험결과와 비교하였다. 제작된 RAS 셸의 RCS는 근사적 계산기법인 물리광학법을 이용하여 예측하고 컴팩트 레인지(Compact range)를 이용하여 측정된 실험결과와 비교하였다. 두가지 형상의 RAS 모두 측정결과와 예측된 RCS 값이 일치하며 우수한 레이더 전자파 흡수 특성을 지닌 것을 확인하였다.

Key Words : 레이더 흡수 구조체(Radar absorbing structure, RAS), 레이더 단면적(Radar cross section, RCS), 하이브리드 복합재(Hybrid composite materials), 스프링 백 보정(Spring-back compensation)

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

+ 서울대학교 기계항공공학부 교신저자(E-mail:ahnsh@snu.ac.kr)

** 충북대학교 전기컴퓨터공학부

*** 국방과학연구소

1. 서론

첨단 전자 무기체계로 수행되는 현대전에 있어 레이더 탐지의 회피는 성공적인 작전수행의 핵심관건이라 할 수 있다. 레이더는 전장(Electric field)과 자장(Magnetic field)으로 구성된 전자파를 목표물에 주사하여, 반사되어 되돌아오는 신호의 세기를 통해 목표의 위치와 속도, 형상의 크기 등을 판단하게 되는데, 레이더에서 발사된 전자파를 흡수하거나 산란시켜 레이더 단면적(Radar Cross Section, RCS)을 최소화함으로써 레이더 탐지로부터의 회피가 가능하다. 스텔스(Stealth) 기술로 불리는 이러한 레이더 전자파 흡수 기술은 카본블랙(Carbon-black) 등의 유전재료나 페라이트(Ferrite) 등의 자성재료 등 특별한 전자기적 특성을 지니는 재료를 이용하거나[1-5], 다층구조와 같은 구조적 특성을 이용하여 구현[1, 6, 7]하고자 하는 연구들이 수행되어 왔다. 최근에는 뛰어난 전자기적 특성을 지닌 나노입자 등을 이용한 연구들[8-10]이 수행되고 있다.

한편, 섬유강화 복합체는 뛰어난 기계적, 전자기적 물성 등으로 항공, 자동차, 선박 등의 산업뿐만 아니라 군사 무기체계 등까지 응용범위가 지속적으로 확대되고 있다. 다양한 섬유강화 복합재종 에폭시와 같은 열경화성 수지를 기지로 사용하는 경우, 경화온도와 사용온도간의 온도차로 인하여 스프링 백(Spring-back)이라 불리는 열적 변형이 발생하게 되는데, 이러한 스프링 백은 정확한 형상의 구현을 위하여 반드시 보정되어야 할 부분이다. 스프링 백의 보정을 위하여 제작공정에서의 조건[11-14]이나 재료의 열적 물성치[15-17]에 관한 연구들이 수행되었으나 서로 상이한 두 재료로 구성된 하이브리드 복합체에 대한 연구결과는 많지 않다.

본 연구에서는 전자파 흡수 특성을 가지는 재료를 첨가한 유리섬유강화 복합체와 탄소섬유강화 복합체로 구성된 하이브리드 구조의 레이더 흡수 구조체(Radar Absorbing Structure, RAS)를 제작하고 레이더 감쇄특성을 측정하여 이론적으로 계산된 값과 비교하였다. RAS는 glass/epoxy에 유전재료인 카본블랙을 첨가하여 재료에 의한 전자파 흡수와 적층구조 내에서 다중반사에 의한 전자파 산란을 유도하고 carbon/epoxy로 구성된 반사층에서 후면으로의 전자파 투과를 차단함과 동시에 입사방향으로 반사시킴으로써 2중의 감쇄효과를 유도하도록 설계하였다. RAS는 간단한 셸(Shell) 구조인 “C”형상과 “U”형상으로 제작하였는데, 성형과정간 유리섬유와 탄소섬유의 각기 다른 물성으로 인한 스프링 백의 발생이 확인되었다. 스프링 백은 금형의 형상 제어 실험을 통하여 보정이 시도되었으며, ANSYS를 이용한 유한요소해석으로 보정결과를 예측하고 실험결과와 비교하였다. 제작된 RAS는 콤팩트 레인지(Compact range)를 이용하여 일반적인 군사용 레이더 운용 중심주파수인 10GHz에서의 레이더 전자파 흡수 특성을 측정하고 레이더 감쇄 이론을 통하여 도출된 예측값과 비교하였다.

2. 레이더 단면적의 예측

RCS는 물체에 전자파가 입사될 때 반사되는 정도를 나타내는 척도로서 식 (1)과 같이 정의되며 물체에 입사되는 전자파의 전력밀도와 물체에 의해 산란되는 전력밀도의 비에 의해 결정된다[18].

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \right] = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{P^s}{P^i} \right] \tag{1}$$

이때, E^i 는 입사 전자파의 세기, E^s 는 산란전자파의 세기, P^i 는 입사 전력밀도, P^s 는 산란 전력밀도를 각각 의미한다.

RCS 값은 범위가 상당히 넓기 때문에 식 (2)와 같이 데시벨(dB) 단위가 흔히 사용된다.

$$\sigma (dBsm) = dB(Bm^2) = 10 \log_{10}[\sigma (m^2)] \tag{2}$$

레이더를 이용하여 물체를 탐지하고자 할 경우 수신전력은 식 (3)과 같은 레이더 방정식으로 표현되며, 레이더의 수신전력은 물체의 RCS에 비례하게 되어 만약 RCS를 40dB 줄일수 있다면 수신전력이 10,000배로 감소하여 감소전의 최대 탐지거리보다 10배 가까운 곳에 도달해야 물체를 감지할 수 있게 된다.

$$P_r = \frac{\sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} G_t G_r P_t \tag{3}$$

이때, P_r , λ , R , G_t , G_r , P_t 는 각각 반사되어 수신된 레이더 신호의 강도, 파장, 레이더와 목표물간의 거리, 투과손실, 반사손실, 그리고 투과된 레이더 신호의 강도를 의미한다.

형상이 복잡한 물체의 RCS는 전자파 산란과정이 매우 복잡하나 평판, 원통, 구, 원뿔 등의 단순형상에 대한 RCS의 특성을 통하여 유추가 가능하다. 파장에 비해 넓은 면을 가지는 물체에 수직으로 입사되는 전자파의 경우 RCS는 기하광학 이론에 바탕을 둔 식 (4)를 이용하여 근사적으로 구할 수 있다.

$$\sigma = 4\pi a_1 a_2 |\Gamma|^2 \tag{4}$$

이때, Γ 은 물체가 평면일 경우 수직입사 반사계수이며, a_1 , a_2 는 전자파 반사점에서의 물체의 두 주 회전반경이다.

이와 유사하게 파장에 비해 큰 평판, 원통, 구에 대한 전자파의 수직 입사시 RCS는 각각 식 (5)-(7)을 이용하여 근사적으로 구할 수 있다.

$$\sigma_{plate} = 4\pi(ab/\lambda)^2|\Gamma|^2 \tag{5}$$

$$\sigma_{cylinder} = 2\pi(ah^2/\lambda)|\Gamma|^2 \tag{6}$$

$$\sigma_{sphere} = \pi a^2|\Gamma|^2 \tag{7}$$

3. 실험

3.1 레이더 흡수 구조체의 제작

하이브리드 복합재 RAS 쉘은 카본블랙 5wt%가 첨가된 유리섬유강화 복합재 프리프레그(KN 7628 EPC BLACK, ply thickness : 168 μ m, KPI Co., Ltd.)와 탄소섬유강화 복합재 프리프레그(KN C125 EPC, ply thickness : 198 μ m, KPI Co., Ltd.)를 이용하여 제작하였다. 카본블랙이 첨가된 유리섬유강화 복합재 프리프레그는 나노크기의 카본블랙입자(40nm of avg. diameter, Fig. 1)를 에폭시 수지(YBD-500A80, Kukdo chemical Co., Ltd.)에 5wt% 함량으로 첨가하여 교반기를 이용하여 30분간 분산시킨 후, 평직 유리섬유 직물(E-glass, Vetrotex Co., Ltd.)을 함침시켜 약 120 $^{\circ}$ C의 고온에서 1분간 건조시켜 제작하였다. 한편, 탄소섬유강화 복합재 프리프레그는 평직 탄소섬유(TR30S, plain weave)와 에폭시 수지(YDB-500A80, Kukdo Chemical Co., Ltd.)를 이용하여 제작하였다.

RAS는 "C"형상과 "U"형상으로 제작되었는데(Fig. 2), 프리프레그를 요구되는 치수에 맞게 재단하여 Fig. 3과 같이 먼저 탄소섬유 프리프레그 8장을 적층하고 그 위에 카본블랙 첨가 유리섬유 16장을 적층한 후 진공패키징하여 120 $^{\circ}$ C의 온도와 5.5기압의 압력조건에서 약 두시간 동안 경화시켜 제작하였다(Fig. 4).

부가하여 RAS의 레이더 흡수특성을 평가하기 위하여 금속과 유사한 반사특성을 지녀 완전전도체(Perfect electronic conductor, PEC)로 판단된 탄소섬유 복합재 만으로 "C", "U" 형상의 복합재 시편을 제작하였다.

3.2 RAS 쉘의 스프링 백 보정

제작된 RAS 쉘의 스프링 백을 판단하기 위하여 Fig. 5와 같이 설계된 형상으로부터 발생된 스프링 백의 크기를 θ ($^{\circ}$)로 정의하였다. 또한 쉘의 제작에 사용된 금형의 굽힘각도를 Fig. 6과 같이 θ ($^{\circ}$)으로 정의하였다. 선행 연구[19]를 통하여 확인된 일반적인 {carbon/epoxy}+{glass/epoxy} 하이브리드 복합재의 스프링 백 추세를 참조하여 금형의 굽힘각도를 조절함으로써 스프링 백 크기가 "0"으로 수렴되는 금형의 굽힘각도를 확인하였다.

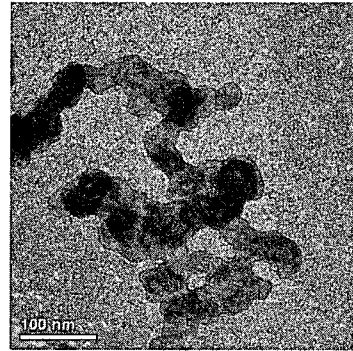


Fig. 1 TEM picture of carbon-black particles used in this study.

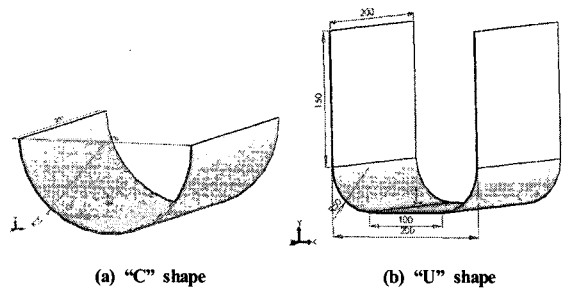


Fig. 2 Dimensions of RAS shells(mm).

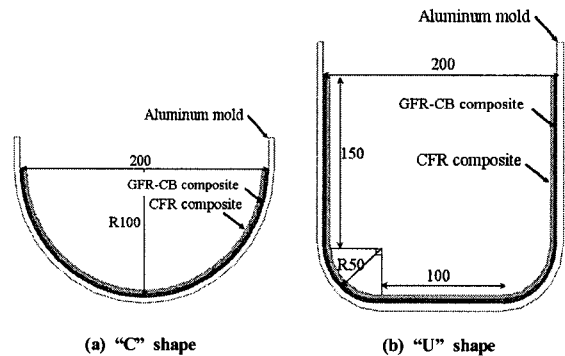


Fig. 3 Mold geometry and lay-up of RAS shells(mm).

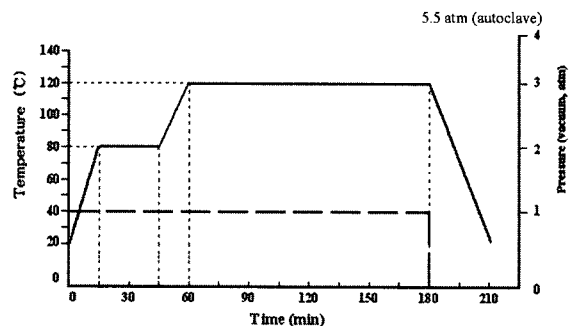


Fig. 4 Cure cycle used in fabrication of RAS shells.

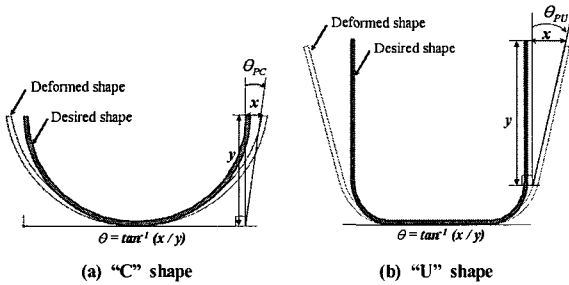


Fig. 5 Definition of spring-back angle of parts (θ_p).

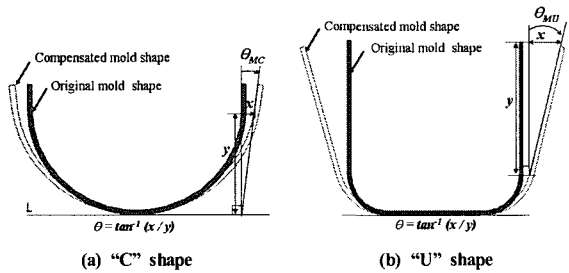


Fig. 6 Definition of bending angle of molds (θ_M).

Table 1 Mechanical and thermal properties used in ANSYS analysis

Material	Elastic Modulus (x direction)	Poisson's ratio (x direction)	CTE of x dir. (α_x)	CTE of y dir. (α_y)
Glass/CB/epoxy	20.8 GPa	0.270	8.55e-6	8.39e-6
Carbon/epoxy	25.7 GPa	0.351	-1.54e-6	-1.54e-6

부가하여 상용유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 8.0을 이용하여 스프링 백을 예측하고 실험결과와 비교였다. 3차원 적 층구조물 해석 모델인 SOLID 191을 이용하여 실험결과 스프링 백이 완전히 제거된 급형의 굽힘각도를 기준으로 “C”, “U” 형상의 RAS를 모델링 하였다. 해석에 사용된 물성은 강성과 프와송 비, 열 팽창계수(Coefficient of thermal expansion, CTE) 등인데, 강성과 프와송 비는 ASTM D638에 의거 INSTRON 8516을 이용하여 3개의 시편에 대한 인장시험을 수행하여 구하였으며, CTE는 Netzsch DIL402PC를 이용하여 알루미늄 표준 시편으로 보정한 후에 3개의 시편에 대하여 측정하였다. 해석 시 사용된 물성치를 Table 1에 정리하였다. 해석간 적용된 조건으로는 모델링된 형상 전체에 균일하게 120℃의 온도를 부여 하였으며 상온은 20℃로 판단하여 실험과 동일하여 100℃의 온도변화를 반영하였다.

3.3 RCS의 예측과 측정

일반적인 형상의 물체에 의한 전자파 산란은 수치해석적 계산

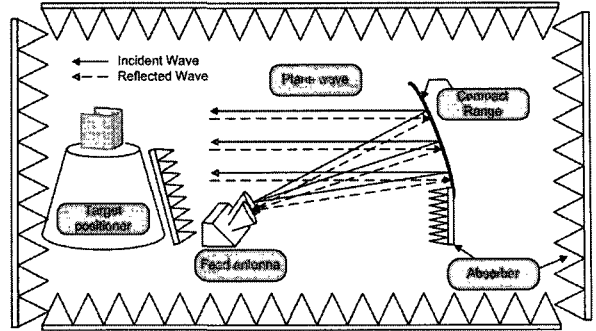


Fig. 7 Test setup for measurement of RCS.

Table 2 Electromagnetic properties of RAS materials used in prediction of RCS

Material	Frequency (GHz)	Real permittivity (ϵ')	Imaginary permittivity (ϵ'')	Loss tangent (δ)
Glass/CB/epoxy	10	6.9	-	0
Carbon/epoxy	10	25	26.6	1.08

기법이나 근사적인 계산기법을 사용하여 RCS를 계산하게 되는데, 수치해석적 계산기법은 비교적 정확한 결과를 도출할 수 있으나 메모리의 한계와 과도한 계산시간 등으로 최근에는 기하광학법이나 물리광학법 등의 고주파 근사기법을 통하여 RCS를 계산하고 있다 [20-23]. 본 연구에서는 물리광학법을 이용하여 제작된 RAS 셀에 대한 RCS를 예측하였다. 물리광학법은 물체의 표면 각 부분에서 산란되는 현상이 다른 부분에서의 산란에 관계없이 발생하며 각 표면에서의 산란 계산을 위해 표면의 각 점에서 표면의 곡률반경이 무한히 크다고 가정 한 후 입사파에 의해 유도되는 등가전류를 놓는다. 이 등가전류가 산란파를 발생시켜 임의의 위치에서의 산란파 계산에는 Stratton-Chu의 공식이 사용되며 원거리에서의 산란파는 간단한 적분공식 또는 이를 보다 단순화시킨 closed-form 공식이 사용된다. Table 2는 RCS의 계산에 사용된 RAS 각 재료의 전자기적 물성으로 HP8510 Vector Network Analyzer system 을 이용하여 측정하였다.

RCS의 측정은 POSTECH compact range (Fig. 7)를 이용하여 측정하였는데, Target positioner에 RAS 시편을 고정하고 Pulse generator와 Signal source에서 발생되어 혼합된 전파를 Feed antenna를 통하여 방사한다. 방사된 전파는 Reflector antenna에 의해 평면파로 전환되어 목표물에 주사되게 되는데, 이때 반사신호는 다시 Feed antenna를 통하여 수신기로 돌아 오게 되고 감지된 반사신호를 통하여 RCS를 계산하게 된다.

측정은 먼저 완전반사체(PEC)로 판단한 carbon/epoxy만으로 제작된 시편을 주사주파수를 10GHz로 고정하여 지그를 90° 회전시키며 RCS를 측정하고, 동일한 방법으로 RAS의

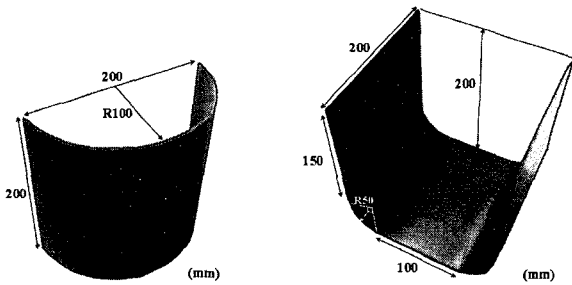


Fig. 8 Spring-back compensated RAS shells.

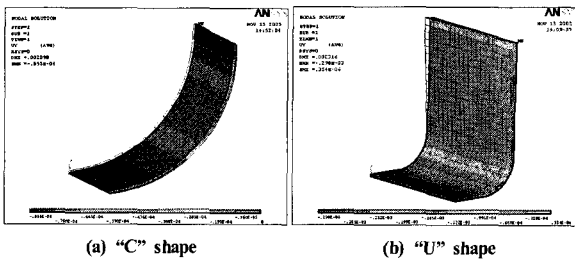


Fig. 9 Analysis result by ANSYS : bending angle of mold at zero spring-back.

RCS를 측정하였다. PEC의 RCS를 측정한 이유는 금속과 같은 완전반사체와 비교하여 RAS의 레이더 흡수특성을 평가하기 위해서이며, 주사주파수를 10GHz로 고정시킨 이유는 일반적인 레이더 운용 주파수의 중심주파수 대역을 고려하여 선정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 RAS 쉘의 스프링 백 보정 결과

Fig. 8은 금형의 굽힘각도 조절을 통하여 제작된 스프링 백이 제거된 RAS 쉘의 모습이다. 일련의 실험을 통하여 금형의 굽힘각도를 조정함으로써 “C”, “U” 형상 RAS의 스프링 백을 효과적으로 제거할 수 있었는데, “C”형상의 경우, 금형의 굽힘각도인 θ_{MC} 가 -4.29° 일때 RAS의 스프링 백(θ_{PC})이 0° 를 나타내었으며, “U”형상의 경우에는 θ_{MU} 가 -1.9° 일때 θ_{PU} 가 0° 인 RAS가 제작되었다.

Fig. 9는 실험을 통하여 확인된 RAS의 스프링 백이 제거되는 조건의 금형 굽힘각도를 적용하여 해석한 유한요소해석 결과이다. 해석을 통하여 “C”형상(Fig. 9(a))는 0.49° 로 확인되었으며, 유사하게 “U”형상(Fig. 9(b))의 경우 실험결과보다 0.88° 큰 스프링 백을 보였다. 해석결과와 실험결과는 약 21.8%의 오차를 보였는데, 이러한 오차는 최고온도에서의 경화시간, 경화 사이클 상의 스텝(80℃, 30min), 냉각속도 등의 경화 조건과 금형의 재질 등 유한요소해석에서는 반영이 제한되는 인자들에 의한 것으로 판단된다.

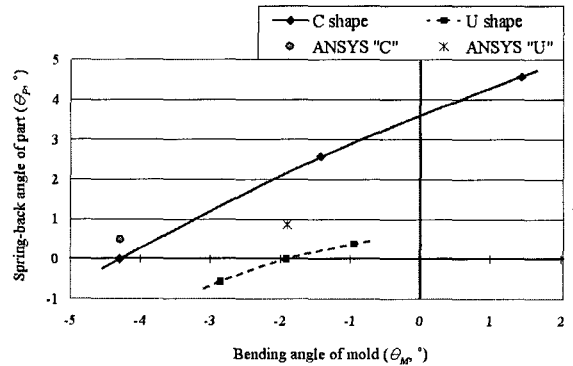


Fig. 10 Result of spring-back compensation.

Fig. 10은 스프링 백 보정 실험결과와 해석결과를 정리한 것으로, “C”형상 RAS의 스프링 백 보정 실험결과는 약 0.79의 기울기($\theta_{PC} / \theta_{MC}$)를 가지는 추세선을 보인 반면, “U”형상의 경우 이에 약 60% 정도인 0.49의 기울기($\theta_{PU} / \theta_{MU}$)를 가지는 추세선이 관찰되었다. 이는 굴곡부위의 크기(“C”형상 : R100, “U”형상 : R50)와 관련된 현상으로 추정되며, 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다고 할 수 있다.

4.2 RAS 쉘의 레이더 흡수 효율

Fig. 11은 compact range를 이용하여 측정된 RCS값과 물리광학법을 이용하여 계산한 RCS 예측값의 비교결과이다. “C”형상의 경우 (Fig. 11(a)), PEC와 비교하여 RAS가 전체적으로 약 -11.5dB 정도의 흡수특성을 보임을 알 수 있다. RAS의 경우 회전각도 30° 주변을 제외한 전 구간에서 -10dB이상의 양호한 흡수특성을 나타내었으며 특히 회전각도 50° 주변의 구간에서는 -15dB이상의 높은 흡수특성을 보였다. PEC 및 RAS 모두 예측값과 실험값이 대체적으로 잘 일치하는 경향을 보임을 알 수 있다.

한편, “U”형상의 경우는 “C”형상과 달리 회전각도 0° 및 90° 주변에서 흡수특성이 상당히 낮아지는 현상을 보였는데, 이는 “C”형상의 경우 0° 에서 90° 까지의 기하학적 형상이 동일한 곡률을 가지는 형상이나 “U”형상의 경우 각도에 따라 상이한 기하학적 형상이 반영되기 때문인 것으로 판단된다. 계산결과와 측정결과는 “U”형상의 경우도 예측값과 측정값은 잘 일치하는 경향을 보였으며, 전체적으로 PEC에 비하여 약 -11.2dB 정도의 흡수특성을 보였다. 부가하여 “U”형상 RAS의 경우 모서리를 제외한 5° 및 85° 구간에서 -10dB 이상의 흡수특성을 보였다.

비록 예측값과 실험결과는 잘 일치하는 경향을 보였으나, “C”형상의 경우 약 6.3%, “U”형상의 경우는 약 3.5%의 오차가 발생하였는데, 이는 실험간 반영된 Compact range 내의 대기상태 등의 실험환경에 의한 영향과 함께 RAS 쉘의 모서리에서 발생하는 전자파의 산란에 의한 것으로 판단된다.

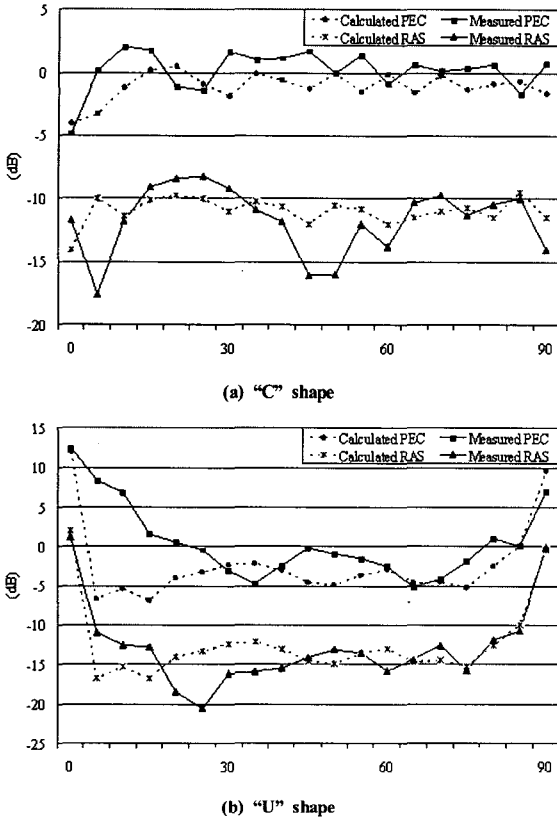


Fig. 11 RCS of RAS shells on 10GHz frequency range.

5. 결론

일련의 실험과 유한요소해석 및 근사적 계산기법을 통하여 carbon/epoxy와 나노크기의 카본블랙이 첨가된 glass/CB/epoxy를 이용하여 “C”형상 및 “U”형상의 하이브리드 RAS 셸을 제작하고, 제작간 발생하는 스프링 백을 보정함과 동시에 RCS의 예측 및 측정을 통하여 레이더 흡수특성을 고찰하였다.

서로 다른 두 재료의 열적, 기계적 물성차로 발생하는 스프링 백은 금형의 굽힘각도 제어를 통하여 효과적으로 보정할 수 있었으며, ANSYS를 이용한 유한요소 해석결과는 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 제작된 RAS 셸의 레이더 흡수특성을 예측하기 위해 물리광학법을 이용하여 RCS를 예측하고 compact range를 이용하여 측정된 실험결과와 비교하였다. 실험결과와 계산값은 잘 일치함을 확인하였으며, 제작된 RAS의 레이더 흡수 구조재료로의 응용가능성을 확인하였다.

항공기나 유도탄, 또는 전투차량 등의 무기체계는 상당히 복잡한 기하학적 형상을 가지며 운용환경 또한 온도와 습도의 변화 및 이물질의 유입이 많은 악조건인 경우가 많다. 따라서,

본 연구를 통하여 가능성을 확인한 섬유강화 복합재 기반의 RAS의 실제적 적용을 위해서는 보다 복잡한 기하학적 형상에 대한 성형성 연구와 함께 환경성 평가 등의 추가연구가 요구된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 “광대역 전자파 흡수구조체 설계 / 해석 연구(ADD-03-11-01)”와 BK21 및 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, RCS 측정을 도와주신 Postech Electromagnetic technology Lab. 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Oh, J. H., Oh, K. S., Kim, C. G. and Hong, C. S., “Design of radar absorbing structures using Glass/epoxy composite containing carbon black in X-band ranges,” *Composites Part B*, Vol. 35, 2004, pp. 49-56.
- 2) Pinho, M. S., Gregori, M. L., Nunes, R. C. R. and Soares, B. G., “Performance of radar absorbing materials by waveguide measurements for X and Ku-band frequencies,” *European Polymer Journal*, Vol. 38, 2002, pp. 2321-2327.
- 3) Chung, D. D. L., “Electromagnetic interference shielding effectiveness of materials,” *Carbon*, Vol. 39, 2001, pp. 279-285.
- 4) Li, G., Hu, G. G., Zhou, H. D., Fan, X. J. and Li, X. G., “Absorption of microwaves $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ manganese powders over a wide bandwidth,” *Journal of Physics*, Vol. 90, 2001, pp. 5512-5514.
- 5) Cheng, K. B., Ramakrishna, S. and Lee, K. C., “Electromagnetic shielding of copper/glass fiber knitted fabric reinforced poly-propylene composites,” *Composites Part A*, Vol. 31, 2000, pp. 1039-1045.
- 6) Tretyakov, S. A. and Maslovski, S. I., “Thin Absorbing Structure for all incidence angles based on the use of a high-impedance surface,” *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 38, 2003, pp. 175-178.
- 7) Matous, K. and Dvorak, G. J., “Optimization of Electromagnetic Absorption in Laminated Composite Plate,” *Transactions on Magnetics*, Vol. 39, 2003, pp. 1827-1835.
- 8) Kajima, A., Nakayama, R., Fujii, T. and Inoue, M., “Variation of dielectric permeability by applying magnetic field in Bi_2O_3 - Fe_2O_3 - $PbTiO_3$ sputtered films,” *Journal*

- of magnetism and magnetic materials*, Vol. 258, 2003, pp. 597-599.
- 9) Trakhtenberg, L. I., Axelrod, E., Gerasimov, G. N., Nikolaeva, E. V. and Smirnova, E. I. "New nano-composite metal-polymer materials : dielectric behavior," *Non-Crystalline Solids*, Vol. 305, 2002, pp. 190-196.
 - 10) Talbot, P., Konn, A. M. and Brosseau, C., "Electromagnetic characterization of fine scale particulate composite materials," *Journal of magnetism and magnetic materials*, Vol. 249, 2002, pp. 481-485.
 - 11) Sarrazin, H., Kim, B. K., Ahn, S. H. and Springer, G. S., "Effect of Processing Temperature and Layup on Springback," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 10, 1995, pp. 1278-1293.
 - 12) Fernlund, G., Rahman, N., Courdji, R., Bresslauer, M., Poursartip, A., Willden, K. and Melson, K., "Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, geometry, and lay-up on the dimensional fidelity of autoclave-processed composite parts," *Composites: Part A*, Vol. 33, No. 2, 2002, pp. 341-351.
 - 13) Giliotti, M., Wisnom, M. R. and Potter, K. D., "Development of curvature during the cure of AS4/8552 [0/90] unsymmetric composite plates," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 2, 2003, pp. 187-197.
 - 14) Giliotti, M., Jacquemin, F. and Vautrin, A., "On the maximum curvatures of 0/90 plates under thermal stress," *Composite Structures*, 2004, Article in press.
 - 15) Barucci, M., Bianchini, G., Rosso, T. D., Gottardi, E., Peroni, I. and Ventura, G., "Thermal expansion and thermal conductivity of glass fibre reinforced nylon at low temperature," *Cryogenics*, Vol. 40, 2000, pp. 465-467.
 - 16) Korab, J., Stefanik, P., Kavecky, S., Sebo, P. and Korb, G., "Thermal expansion of cross-ply and woven carbon fibre copper matrix composites," *Composites : Part A*, Vol. 33, No. 1, 2002, pp. 133-136.
 - 17) Kanagaraj, S. and Pattanayak, S., "Simultaneous measurements of thermal expansion and thermal conductivity of FRPs by employing a hybrid measuring head on a GM refrigerator," *Cryogenics*, Vol. 43, No. 8 2003, pp. 451-458.
 - 18) Knott, E. F., Shaeffer, J. F. and Tuley, M. T., "Radar Cross Section," 2nd Edition., *Artech House*, 1993.
 - 19) Jung, W. K., Kim, B., Won, M. S. and Ahn, S. H., "Fabrication of Radar Absorbing Structure (RAS) Using GFR-nano Composite and Spring-back Compensation of Hybrid-Composite RAS Shells," *Proceeding of 13th International Conference on Composite Structures*, Monash Univ., Melbourne, Australia. November 14-16. 2005.
 - 20) Bowman, J. C., "Methods for rapid computation of RCS in aircraft design," *Dig. IEEE National Aerospace and Electronics Conf.*, 10-12 Oct. 2000, pp. 118-125.
 - 21) Rius, J. M., Ferrando, M. and Jofre, L., "High-frequency RCS of complex radar targets in real-time," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 41, No. 9, 1993, pp. 1308-1319.
 - 22) Knott, E. F., "The relationship between Mitzner's ILDC and Michaeli's equivalent currents," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 33, No.1, 1985, pp. 112-114.
 - 23) Knott, E. F., "A progression of high-frequency RCS prediction techniques," *Proc. IEEE*, Vol. 73, No. 2, 1985, pp. 252-264.