

논문 2008-45TC-10-6

# T-103 항공기에 대한 JEM 스펙트럼 추출

## ( JEM Spectrum Extraction from T-103 Aircraft )

김 윤 석\*, 정 주 호\*\*, 김 후\*

( Yoon-Suk Kim, Joo-Ho Jung, and Hoo Kim )

### 요 약

본고 및 연구를 통하여 JEM(Jet Engine Modulation)의 특성 및 기본원리를 파악하며, 실제 항공기 중 저속항공기의 RCS 및 JEM을 측정하는 것이 목적이다. 측정시에는 원하지 않는 여러 오차들이 발생하게 되는데 여러 오차를 제거하기 위해 교정(Calibration)방법을 사용하게 되는데 본고에서는 IACT(Isolated Antenna Calibration Technique)방법을 사용하였다. 측정은 옥외(Outdoor)에서 이루어졌으며 항공기는 공군에서 운용하고 있는 T-103을 표적으로 측정하였다. T-103에 대한 JEM스펙트럼을 추출하며 고정된 표적에 대한 주파수 특성과 도플러에 의한 변화를 판단하는 것이다. 주파수는 일반적인 공대공 항공기에서 운용되는 X밴드를 사용하여 측정하였으며 공대공 항공기에서 저속항공기를 식별하는데 있어 측정을 통하여 분석하였다.

### Abstract

Characteristics of JEM(Jet Engine Modulation) are measured and principal meanings are grasped in this paper. This study's object is to measure RCS and JEM for actual aircraft, especially low speed craft. In experiment, various error are generated from unknown cause and for removal these, calibration technique known as IACT(Isolated Antenna Calibration Technique) is used. Experiment is executed at outdoor and target is T-103 which play in beginner course for ROKAF pilot. JEM spectrum of T-103 and frequency characteristics, doppler effects are extracted. X-band used in military aircraft for air-to-air fighting are selected. The data obtained through this study are analyzed to discriminate target especially low speed aircraft for current using radar(X-band)'s performance.

**Keywords :** RCS, JEM, NCTR, Calibration

### I. 서 론

현대전에 있어서 전투기는 전장상황에 관계없이 승패의 필수 요인으로 작용한다. 따라서 많은 국가들이 자국의 안보와 전쟁 억지력을 위해 되도록 많은 수의 전투기 보유를 원하지만 전투기 도입비용이 매우 고가인데다, 날이 갈수록 그 비용 또한 높아짐으로서 그 경제적 비용이 막대하다. 따라서 어떻게 하면 적은 수의 항공기를 효율적으로 활용할 수 있을가의 문제가 군사

력 운영측면에서 대단히 중요하게 되었다. 적의 전력에 따라 아군의 전력배치 및 전력집중 등의 군사력 운영측면에서의 효율성을 증대시키고, 적에 대한 정보를 정확하게 판단하고 획득하기 위하여 군사 선진국들에서는 이미 오래전에 자동표적식별장치(ATR : Automatic Target Recognition 또는 NCTR : Non-Cooperative Target Recognition)에 대한 연구를 시작하였으며 미국을 비롯한 몇몇 국가에선 실용화되어 운영되고 있다. 자동표적식별장치를 구현하기 위하여 사용되는 기본 자료가 레이더신호(RCS, JEM, Polarization), 음향, 적외선, 사진등 여러 가지가 있을 수 있으나 본 연구에서 지향하고자 하는 연구분야는 JEM이다. 차세대 전투기 사업의 일환으로 도입되는 차기 전투기 F-15K에는 항공기 표적식별장치도 함께 도입되는데 이 장비에 사용된 기본 자료가 바로 JEM이다.

\* 정회원, 공군사관학교  
(Korea Air Force Academy)

\*\* 정회원, 공군 11전투비행단  
(Republic of Korea Air Force)

※ 본 논문은 '06년도 공군사관학교 교육진흥재단 동환학술연구비 지원으로 수행된 것임.

접수일자: 2008년7월2일, 수정완료일: 2008년10월16일

레이더가 개발된 이후 50년 이상 표적물의 RCS (Radar Cross Section)은 오직 반사신호의 크기만을 나타내는 스칼라 숫자였고 안테나는 단일 편파만을 사용하였다<sup>[1]</sup>. 1960년부터, 보다 많은 표적물의 정보를 얻기 위하여 스칼라 RCS에서 위상정보를 내포하고 있는 복소 RCS로 확장되었으며 복소 RCS의 위상정보는 표적물 자체의 위상정보인 절대위상과 각 편파간의 차이를 나타내는 상대위상으로 나누어진다. 이 위상정보들은 시간축 상의 신호추출과 target decomposition 개념에서 중요한 요소이다<sup>[2~3]</sup>.

본 연구를 통하여 JEM의 특성 및 기본원리를 파악하며, 실제 항공기를 측정하는 것이 목적이다. 측정시에는 원하지 않는 여러 오차들이 발생하게 되고, 여러 오차를 제거하기 위해 교정(Calibration)방법을 사용하게 되는데 본 연구에서는 IACT(Isolated Antenna Calibration Technique) 방법을 사용하였다. 측정은 옥외(Outdoor)에서 이루어졌으며 항공기는 공군에서 운용하고 있는 T-103을 표적으로 측정하였다. T-103에 대한 JEM스펙트럼을 추출하며 고정된 표적에 대한 주파수 특성과 도플러에 의한 변화를 판단하는 것이다.<sup>[4]</sup>

## II. 본 론

### 1. RCS 교정방법(Calibration Techniques)

RCS(Radar Cross Section, 레이더 단면적)는 단순히 크기 정보만을 가지고 있는 스칼라 RCS와 위상 정보를 포함하는 복소 RCS가 있다. 이 위상정보는 표적물 자체의 위상특성인 절대위상과 어떤 기준면을 가지고 비교 측정하는 상대위상으로 나누어진다. 표적물의 RCS를 구하기 위해 사용되는 RCS 교정은 여러 가지 잡음 및 거리 요소 등의 오차에 의해 왜곡된 수신 신호를 표적물이 가지는 실제 신호로 교정하는 과정이다. 이 장에서는 상대위상의 정보를 가지는 복소 RCS를 측정하기 위하여, 크기와 위상에 대한 calibration 방법에 대하여 언급하였다.<sup>[1]</sup>

#### 가. RCS 정의

현재 대부분의 경우, 항공기나 배 또는 지상에 설치된 레이더들은 대부분 단일 주파수와 단일 편파를 사용하고 있다. 단지, 거의 적은 수의 레이더에서만 광대역 주파수와 다수의 편파상태를 이용하고 있다. 레이더 표적물의 다양한 정보를 획득하고자 하는 요구에 의해 광대역 주파수와 다수 편파상태를 이용하게 되었다. 그것

에 보조를 맞추어 RCS 개념도 스칼라 RCS 개념에서 복소 RCS개념으로 확장되었다.

#### (1) 스칼라 RCS(Scalar RCS)

우리가 일반적으로 사용하는 RCS개념은 식(1)과 같은 스칼라 RCS로서 특정한 aspect angle에서 하나의 주파수와 편파를 이용한 개념이다. 여기에는 표적물의 크기만 고려되었고 위상정보는 전혀 고려하지 않았다.

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{\vec{E}^r \cdot \vec{E}^{r*}}{E^i \cdot E^{i*}} \quad (1)$$

$\vec{E}^r$  : 산란파,  $\vec{E}^i$  : 입사파

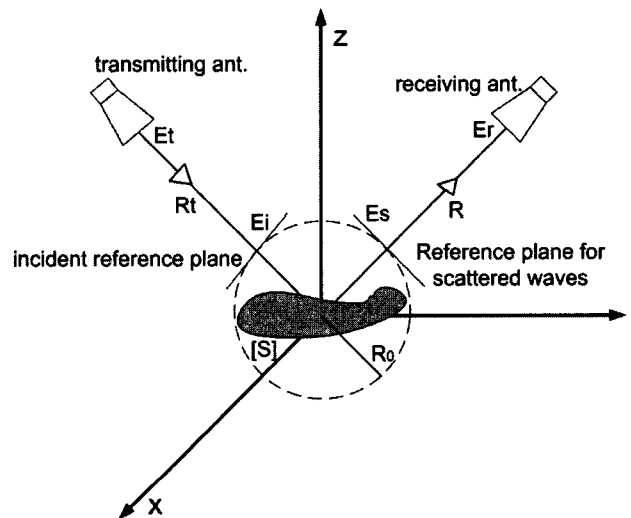


그림 1. RCS 측정 개념도  
Fig. 1. Scheme of RCS measurement.

#### (2) 복소 RCS(Complex RCS)

표적물의 상대 위상을 측정하기 위해서는 복소 (complex) RCS 개념이 필요하며 위상의 기준점을 찾기 위해 기준면이 필요하다. 그림 1에서  $E_s$ 는 가상 field이며 원점을 기준으로  $R_o$  에서 등방향으로 전파되는 것이다.

$$\vec{E}^s = \frac{\sqrt{4\pi R^2}}{\sqrt{4\pi R_o^2}} \exp[j\beta(R - R_o)] \vec{E}^r(R) \quad (2)$$

식(2)를 스칼라 RCS 개념의 식(1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|\vec{E}^r|^2}{|E^i|^2} \exp[2j\beta(R - R_o)] \quad (3)$$

$$= 4\pi R_o^2 \frac{|E^r|^2}{|E^t|^2} \exp[2j(\psi_s - \psi_i)] \quad (4)$$

여기서  $\psi_s$  :  $R_o$ 에서 산란된 파의 위상

$\psi_i$  :  $R_o$ 에서 입사된 파의 위상

예를 들어 완전 도체 구를 monostatic에서 측정하며 차이는 180°가 된다.

나. 교정방법(Calibration method)

레이더시스템에서 교정은 측정된 자료에 대한 결과의 정확도를 높이기 위하여 필요하다. 그래서 센서를 포함한 데이터 획득 장비인 전체 측정시스템에는 교정이 반드시 필요하다. 정확한 교정은 레이더 장비에 있어 가장 중요한 요구조건 중에 하나이다. 전체 편파(Fully polarimetric), 코히어런트 레이더(coherent radar)를 위해서는 세 가지 영역, 즉 크기(amplitude), 위상(phase) 그리고 편파(polarization)에 있어서 문제가 없어야한다. 이것을 해결하기 위하여 많은 방법과 기법들이 사용되어 지는데, 이번 실험에서는 JEM(Jet Engine Modulation)을 구하기 위하여 크기와 위상을 주로 교정하는 방법을 선택하여 절대(absolute) 교정방법을 선택하였다<sup>[5-6]</sup>.

(1) RCS 측정 시스템 환경 체계도(Schematic Measurement System Configuration)

RCS 교정은 여러 가지 잡음 및 거리 요소 등의 오차에 의해 왜곡된 수신 신호를 표적물이 가지는 실제 신호로 교정하는 과정이다. 일반적으로 RCS 교정방법은 이론값과 측정값을 비교하는 직접 교정과 시스템의 각 부분들의 변수를 측정하여 추출하는 간접 교정, 그리고 이 두 가지를 혼합한 혼합 교정 등이 있다. 이중에 실제 대표적으로 사용되는 것은 직접교정방법 중에서 오차 보정 행렬을 모두 이용한 벡터 교정 방법(Vector Calibration Techniques)과 오차 보정 행렬 중에 안테나 결합(coupling)을 무시한 IACT(Isolated Antenna Calibration Technique)방법이다. 이 방법들은 시스템에 대한 오차를 도시화함으로써 쉽게 설명되고 유도될 수 있다<sup>[1]</sup>.

RCS 측정은 안테나의 편파 상태가 모두 포함되도록 측정하는 것이다. 따라서 송신 및 수신부에서 직교 편파 안테나가 필요하다. 측정에서는 일반적으로 코히어런트 다중 주파수 측정 시스템(or CW-Radar)을 보여준

다. 식 (5)에서  $a_h$ 와  $a_v$ 는 레이더 시스템에서 송신부의 출력신호를,  $b_h$ 와  $b_v$ 은 수신부의 입력신호를 나타낸다. 그리고 침자  $h$ 와  $v$ 는 수평 및 수직 편파 상태를 나타낸다. 결과적으로 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} b_h \\ b_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_h \\ a_v \end{bmatrix} \quad (5)$$

측정 시 발생하는 오차는 시스템의 불안정성에 의해 시간과 주파수에 따라 결과가 변화하는 오차인 통계오차와 표적물 지지 장비, 그리고 각 부분들의 부정합 등의 요인에 의해 발생하는 시스템오차로 나누어진다.

통계 오차

통계 오차는 시스템이 시간 또는 주파수에 따라 변화하는 오차이다. 그러므로 시간과 주파수에 따라 여러 번 측정하여 평균을 취함으로써 줄일 수 있다. 평균을 취하는 동안 전체적인 측정환경 및 각종 변수의 변화가 없어야 한다.

시스템 오차

교정방법을 이용하여 줄일 수 있는 오차는 시스템오차이다. 시스템오차는 다음 여러 가지 원인에 의해 발생한다.

- 전파무향실의 반사
- 송신 및 수신 안테나 사이의 결합(coupling) (격리 오차)
- 주파수 응답과 케이블, 안테나, 기타 커넥터 등의 소자로 인한 부정합(주파수 응답 오차)
- 송신 및 수신 안테나의 편파특성(편파오차)

(2) IACT(Isolated Antenna Calibration Technique) 방법

직접적인 절대 교정방법은 교정 기준, 즉 구 또는 코너 리플렉터(corner reflector)를 사용하여야 하며, 실제 RCS를 추론하기 위하여 측정코자하는 표적에서 들어오는 레이더 반사 신호를 기준표적의 RCS와 비교하여 구하는 방법이다. 이상적으로는 기준반사 표적의 이론 RCS와 측정치가 같은 레이더반사면적(RCS)을 가져야 하며 구하고자하는 표적의 RCS를 구하기 위하여 기준 반사 표적과 같은 거리에 존재하여야 한다. 종종 기준 반사표적과 실제 구하고자 하는 표적의 거리가 같지 않기 때문에 학문적으로 사용하는 것 외에 실제로 적용하기는 어려운 방법이다. 하지만 본 논문에서는 실험을

통한 표적의 JEM특성을 얻는 것이 중요하기 때문에 (6)식에서 보인 것과 같은 절대교정방법을 사용하였다.

$$RCS(\sigma^w) = \frac{(E^w - E^b)^2}{(E^r - E^b)^2} \times e^{i2k_0(r_o - r_u)} \times \left(\frac{r_u}{r_r}\right)^2 \times \sigma^r \quad (6)$$

여기서

- w : 구하고자하는 값
- b : 배경잡음에 대한 값
- r : 기준 표적물에 대한 값

식 (6)에서 기준 표적물과 실제 측정하고자 하는 표적물의 거리를 구하는 것은 쉽지 않은 문제이다. 옥내 측정(Indoor measurement) 중 compact range를 이용할 경우에는 거리는 무한대가 되기 때문에  $r_u/r_r$  는 약 1 이 된다. 그러나 문제는 옥외(outdoor) 측정이나 근접 전개 측정시 특히 문제가 된다. 그러나 우리 역시 문제는 되지만 JEM 즉 실제로 필요한 부분이 도플러 효과가 있기 때문에 거리영역은 compact range에서의 방법은 다음 식 (7)과 같이 요약하여 측정하였다.

$$RCS(\sigma^w) = \frac{(E^w - E^b)^2}{(E^r - E^b)^2} \times \sigma^r \quad (7)$$

대신 복소 RCS개념으로 구하기 위해 표적물 자체에 내재된 위상정보를 구하기 위해 전개값을 절대 값이 아닌 복소수로 계산하였다. 이 방법은 대각 행렬로 식을 구하기 때문에 기준 표적물은 실제 하나만 있어도 쉽게 추출할 수 있다. 그러나 안테나의 편파 격리가 좋지 못하면 큰 오차를 발생시킬 수 있다.

## 2. JEM(Jet Engine Modulation)

JEM은 미국의 Gardner와 Hynes, Mensa 등에 의해 연구되어지고 현재도 활발하게 연구 중인 분야이다. JEM은 터빈 즉 회전력을 가지는 엔진, 제트엔진 또는 헬기의 로터 등을 사용하는 항공기에 대한 레이더 신호 중 도플러 신호를 의미한다. 즉 레이더에서 송신신호를 보낸 후 원신호가 항공기의 엔진부분 중 컴프레서(Compressor)와 블레이드(blade)에 부딪혀서 수신될 때 발생하는 원 신호에 대한 위상의 차이, 쉽게 표현하면 컴프레서와 블레이드의 움직이는 요소인 도플러를 분석하는 것을 의미한다. 모든 항공기의 엔진은 이 움직이는 신호 즉 JEM의 특성이 다르게 되는데 이러한 항공기의 특성을 이용하여 엔진종류를 판단한 다음 항공기의 기종을 판단하는 기술이다. 적 항공기 중에 아군에

가장 위협적인 요소는 아군을 향해 공격해 들어오는 것으로서 적이 공격해 들어올 때 항공기의 각도는 정면에서 볼 때 ± 30도로 총 60도가 된다. 물론 지상에 위치한 방공탐지 레이더인 경우는 측면 및 후면도 탐지가 가능하겠지만, 가장 위협적인 방향은 정면이 될 것이다. JEM을 이용한 기술이 항공기의 정면 60도에서만 관측이 가능하다는 단점이 있을 수 있으나, 항공기 운영상 필요한 각도를 고려해 본다면 이 점 또한 크게 문제가 되지는 않을 것이다.

### 가. 엔진 블레이드에 대한 신호분석

JEM의 궁극적인 목표는 표적을 식별하는 것이다. JEM은 NCTR(Non Cooperative Target Recognition)을 구축하는 기본자료로 사용된다. 일반적으로 NCTR을 이루기 위해서 사용되는 특성벡터(feature vector)는 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)영상 또는 Range Profile과 함께 JEM이 많이 사용되어진다.<sup>[8-9]</sup> 일반적으로 항공기의 블레이드는 깊이에 따라 크기가 작아진다. 일반적인 블레이드의 크기의 형태는 그림 2와 같고, 많은 종류의 제트엔진의 형태가 있지만 JEM 측정측면에서의 원리는 거의 유사하다. 제트엔진 전단에서 공기가 유입되면서 블레이드가 1분당 몇 천 번의 회전에 의하여 공기가 압축되며 엔진의 성능에 따라 다양한 블레이드 단계를 거친다. 레이더 신호가 엔진의 로터에 따라 전개해 들어갈 때 로터 블레이드에 의하여 일부 에너지가 반사되고 나머지는 다음 단계의 로터 단계를 통하여 반사가 된다. 신호가 엔진 깊숙이 들어갈 때 블레이드가 점점 더 작아짐에 따라 그 간격 역시 줄어든다. 그로 인하여 다음 단계에서 발생하는 반사신

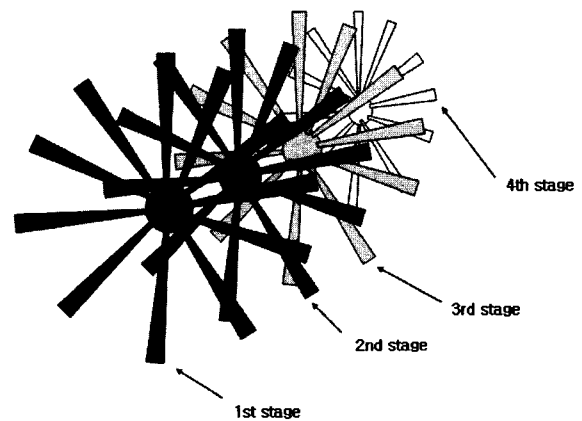


그림 2. 제트엔진의 블레이드 형태  
Fig. 2. Rotor blade stages at the front of a jet engine.

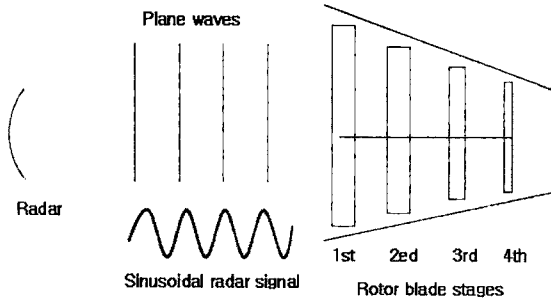


그림 3. 레이더 신호에 대한 제트엔진의 흐름도  
Fig. 3. Illumination of jet engine with radar signal.

호 역시 작아진다. 이런 반사 신호에 대한 도플러 효과를 특히 군사용에 대하여 응용할 수 있는 자료를 획득하기 위해서는 10GHz이상의 주파수가 필요하며 좋은 JEM특성을 획득하기 위해서는 파장이 3cm 이하가 되어야한다는 것이 일반적인 견해이다. 민간용으로 사용되어지는 엔진을 구분하기 위해서는 3GHz 이하도 가능한 것으로 알려져 있다.<sup>[7]</sup>

나. 전단계에 있어서 스펙트럼 변화

본 연구에서는 1차적으로 프롭을 장착한 경항공기를 측정하였으며 이 경항공기 역시 제트엔진과 같은 도플러 효과를 가지고 있다. 프롭의 블레이드가 N개 존재하는 단일 로터체계라고 가정하여 분석해보자. 그림 4에서처럼 블레이드가 systematic하게 N개가 구성되어 있다면 매번 1/N 사이클이 회전하게 되며 기계적으로 반복하게 된다.

레이더 측면에서는 각 블레이드는 동일하게 반응하게 되며 레이더 신호는 임의의 시간에서도 모든 블레

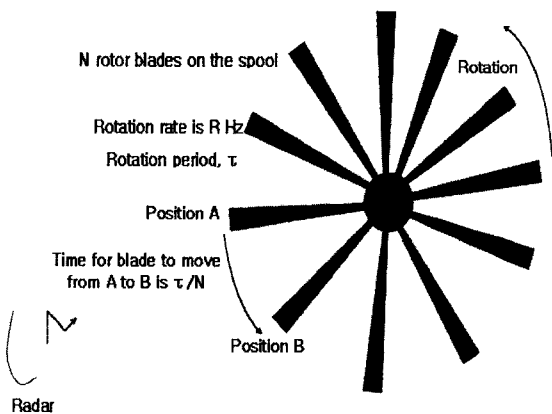
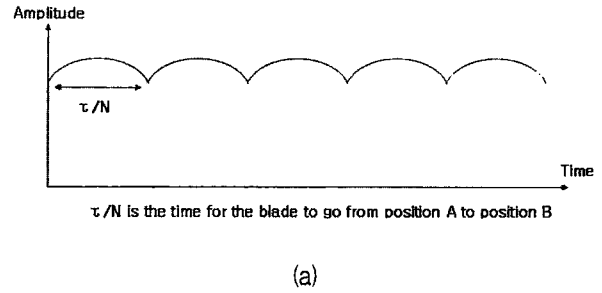
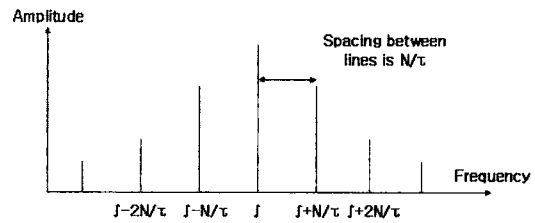


그림 4. N개 블레이드의 로터형태  
Fig. 4. Single rotor stage at front of engine with N blades.



(a)



(b)

그림 5. (a) 블레이더 N개에 따라 크기의 변화  
(b) JEM 스펙트럼

Fig. 5. (a) Amplitude against time characteristics of rotor stage with N blades  
(b) JEM spectrum.

이드가 동시에 반응하게 된다. 그림5(a)처럼 블레이드에 의한 레이더의 신호의 반복되는 크기의 특성을 간단하게 표현하였다. 실제로는 크기와 위상의 특성이 매우 복잡하지만, 블레이드 근처에 위치하여 움직이는 단일 블레이드의 움직이는 시간은 동일하게 반복된다는 것이 중요하다. 그 예가 그림 4의 위치 A와 B에 표현되어 있다.

레이더 신호는 회전주기  $\tau$  로 블레이드 개수  $N$  을 나눈  $\tau/N$  의 시간 간격으로 반복하게 된다. 주파수 측면에서 판단할 때 주파수 간격은 반대로  $N/\tau$  간격으로 반복이 됨을 알 수 있으며 그림 5(b)에 표현되어 있다.<sup>[8]</sup>

표적을 식별하기 위해선 이런 스펙트럼의 변화 또는 분포로 구하게 된다. 어떤 것을 NCTR을 위한 특성벡터(feature vector)로 사용할 지는 그 목적에 따라 달라질 수 있다.

다. 엔진 회전을 배음(Engine rotational rate harmonics)

엔진의 단일 사이클에 대하여 레이더는 단일의 크기와 위상의 특성이 포함된 반산신호를 얻을 수 있으며 이 특성은 엔진의 형태와 레이더 주파수, 각 변수 그리

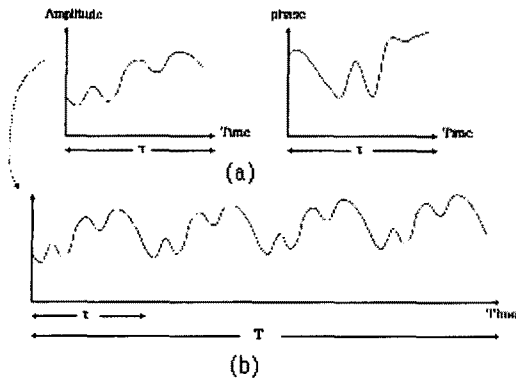


그림 6. 단일 회전주기와 레이더 집적주기에 대한 제트 엔진의 크기와 위상의 특성

Fig. 6. Amplitude and phase characteristics of jet engine over single rotation period and over radar integration period.

고 받음각에 따라 의존적이다. 엔진의 기계적 특성은 엔진의 사이클마다 정확하게 반복되어진다고 가정할 수 있는데, 그 기본개념은 그림 6에 표현되어 있다. 그림 6(a)는 단일 엔진에 의한 회전 주기를 레이더가 획득한 크기와 위상을, 그림 6(b)는  $N_R$  사이클에 대한 집적주기(integration period)를 나타낸다.

JEM 스펙트럼을 구하기 위해서는 시간영역의 복소 레이더 신호가 필요하다. 복소 신호가 단일 엔진 회전 사이클이  $\tau$  이며 신호는  $a(t)$  라 두면 엔진의 사이클이  $N_R$  인 시간영역의 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$a(t) * D_{NR}(t) = \int a(t') D_{NR}(t-t') dt' \quad (8)$$

여기서  $D_{NR}(t)$ 는  $N_R$  델타함수의 합을 의미하며 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$D_{NR}(t) = \sum_{n=1}^{N_R} \delta(n\tau) \quad (9)$$

콘볼루션(convolution)은  $N_R$  으로, 회전하는 엔진에

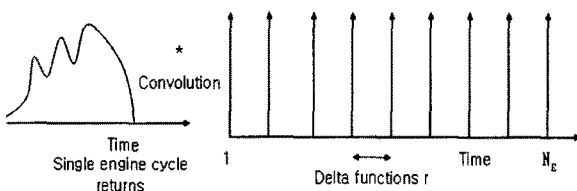


그림 7. 레이더 집적 주기에 대한 시간영역의 반사  
Fig. 7. Time domain returns over radar integration period

서 나오는 신호는 그림 7과 같이  $\tau$  로 이격된  $N_R$  델타 함수의 콘볼루션 형태로 표현된다.

따라서 JEM 스펙트럼은  $a(t)$ 의 푸리에 변환과  $D_{NR}(t)$ 의 푸리에 변환에 대한 곱으로 표현된다.

$$JEM = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) e^{-2\pi f t} dt \int_{-\infty}^{+\infty} D_{NR}(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (10)$$

### III. 실험

#### 1. 측정시스템(Measurement system)

RCS 측정은 원계거리 요구조건과 지면간섭을 고려하여 이루어진다. 먼저, 원계거리 요구조건을 고려하면, 안테나와 표적물간의 유한한 거리와 송신 안테나에서 방사되는 전자파의 패턴이 구형인 것을 가만하여 표적물의 거리가 충분히 멀게 위치시킨다.

지면 간섭의 경우 테스트 장소의 지면에 대한 산란에 의한 오차를 고려하는 것으로써 측정 시 지면과 표적물의 간섭 효과를 최소화하는 것을 목적으로 한다. 지면 간섭의 경우 측정 후 보상하는 것이 불가능 하므로 적절한 안테나의 높이 및 펄스 기반의 측정 장치를 사용하여 간섭 효과를 최소화 하는 것이 필요하다. 또한, 산란파의 경로를 예측하여 지면에 산란되어 수신되어지는 산란파를 흡수하는 흡수체, 혹은 산란파의 경로를 바꾸어주는 반사체 등을 이용하여 그 오차를 줄일 수 있겠다. 이를 바탕으로 측정 시스템은 전자파 산란 측정 시스템 구성도를 바탕으로 네트워크 아날라이저 8722C를 통해 전달된 파워를 하나의 안테나로 송수신 하는 monostatic 방법으로 RCS를 측정하였으며 측정 안테나로는 10 GHz 혼 안테나를 사용하였다. 그림 8은 실험에 사용한 시스템 개략도이고, 실제 측정했던 시스템은 그림 9와 같다.

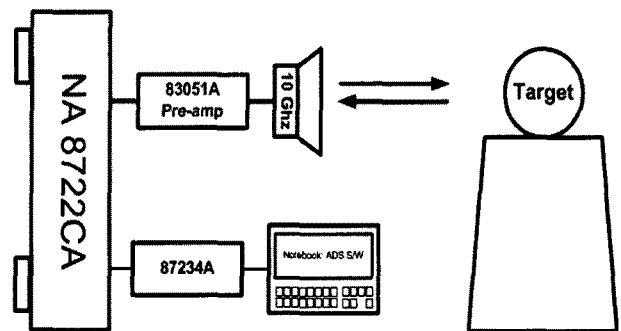
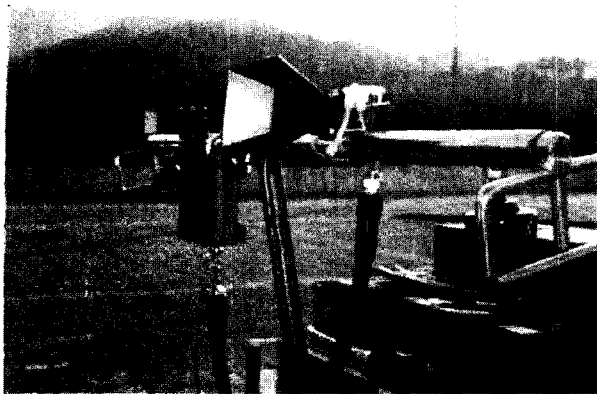
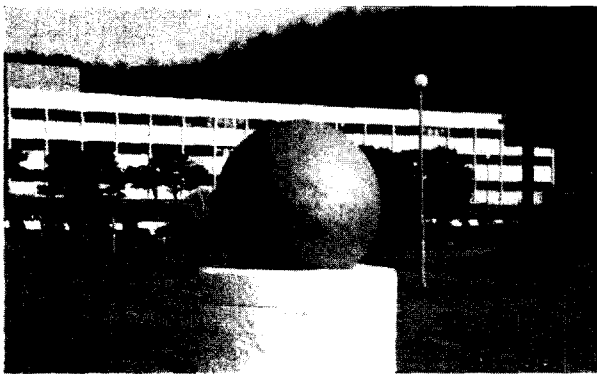


그림 8. 측정시스템 개략도  
Fig. 8. Scheme of measurement system.



(a)



(b)

그림 9. (a) 측정시스템, (b) 기준표적  
Fig. 9. (a) measurement system, (b) reference target.

2. 실험방법(Experimental method)

가. 게이팅(Gating)

충분한 평면파 형성 조건에 대한 거리를 확보하기 위해 6m 이상의 거리에서 측정되어야 한다. 이 때 Time domain에서는 모든 주파수의 전파 성분이 표현되므로 전파가 표적에 의해 산란되어 돌아오는 시간을 계산하여 표적에 의한 산란 정보만을 추출하여 다른 산란파들을 제거하며 이를 소프트웨어적으로 유효한 정보만을 추출한다고 하여 소프트웨어 게이팅이라고 한다. 그림 10은 소프트웨어 게이팅의 개념과 게이팅에 있어서의 표적과의 거리 설정을 나타낸다. 측정 거리를 고려하여 약 30 nsec 이하에서 피크가 발생하는 것을 확인할 수 있고 30 nsec 이후의 값들은 표적이 아닌 다른 물체를 통해 들어온 전파로 간주하여 게이팅을 한다. 이번 실험에서는 항공기 표적을 10m 거리에 두고, 각도는 항공기 기수 중심에서 좌우측으로 30도씩 5도 간격으로 측정하였다.

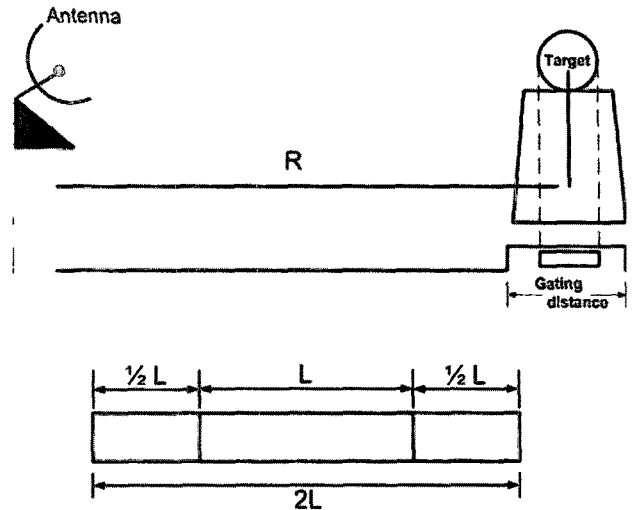


그림 10. 소프트웨어 게이팅, L : 표적의 크기, 2L : 게이팅 범위  
Fig. 10. Software Gating, L : length of target, 2L : Extent of Gating

나. 측정표적(Target)

JEM 측정을 위하여 공군이 보유한 T-103 항공기를 사용하였는데 그 제원은 표 1과 같고, 항공기 개략도는 그림 11과 같다.

다. 실험절차(Experimental procedure)

실제 항공기에 대한 JEM을 측정 실험을 위하여 배경잡음제거와 교정작업을 수행하여야한다. 실험방법은 그림 12와 같다. 측정 받음 각도는 항공기 기수를 기준으로 -30도에서 +30이며, 측정주파수는 1.95GHz에서 2.1 GHz까지 대역폭은 150MHz이며 간격은 4MHz로 증가시켰다. 일반적으로 군사용은 10GHz이상의 주파수에서 200MHz대역폭을 보장하여야하지만 이번 실험에 있어서 표적이 민간용이며 블레이드(blade)갯수가 2개인 점을 고려할 경

표 1. T-103 항공기 제원  
Table 1. The general performances of T-103 aircraft.

| 항 목   | 내 용               |
|-------|-------------------|
| 높 이   | 3.14 m            |
| 길 이   | 8 m               |
| 넓 이   | 10.56m            |
| 무 게   | 1,285 kg          |
| 최대속도  | 340 km/h          |
| 회 전 율 | 900 rpm (idle 상태) |
| 블레이드  | 2 개               |

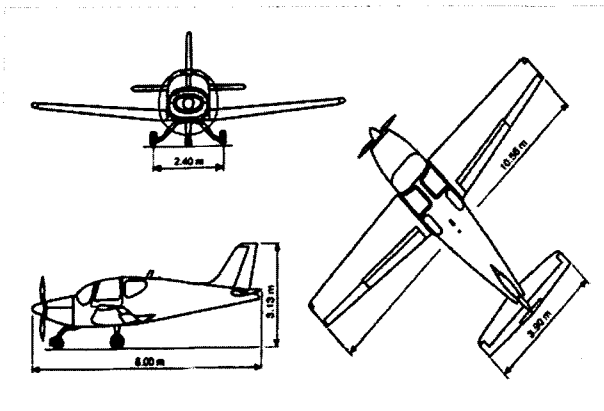


그림 11. T-103 항공기의 구조  
Fig. 11. Construction of T-103 aircraft.

우에는 30dB보다 낮은 주파수 대역에서도 가능하다고 판단되고, 측정거리는 8m를 기준으로 했다.

(1) 배경잡음제거(Remove the background noise)

배경잡음을 제거하기 위하여 표적을 측정하고 하는 동일한 주파수대역으로 표적만 제거한 상태로 배경을 측정하여야한다. 물론 배경은 측정했던 시간적 차이가 발생할 수 있지만 그 부분은 고려하지 않고 배경을 측정하였다. 이렇게 측정한 배경에 대한 신호는 식 (7)에 대입하여 제거하였다.

(2) 기준 표적 RCS 측정

기준 표적을 측정하기 위하여 RCS 반사가 높고 140cm인 거의 없는 스티로폼을 이용하였으며 기준 표적은 반지름이 24cm인 쇠구를 올려놓고 측정하였고, 주파수와 각도는 동일하다.

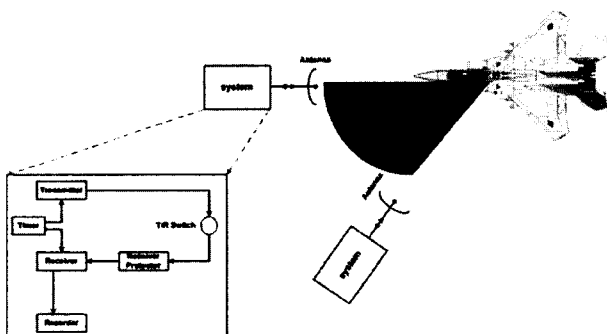


그림 12. JEM추출을 위한 실험 방법  
Fig. 12. Experiment for JEM extraction from real aircraft target.

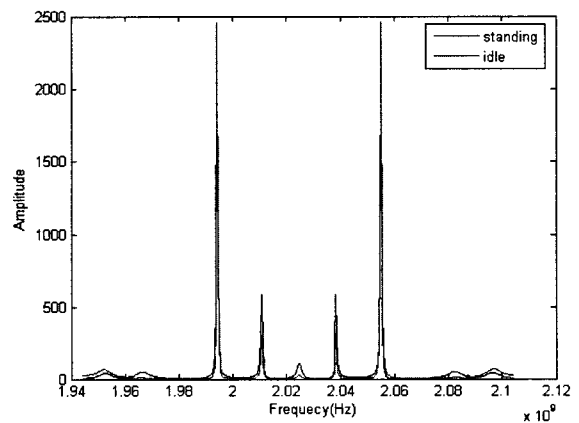
(3) 고정표적의 RCS 제거

JEM을 추출하기 위해선 항공기의 고정 RCS 역시

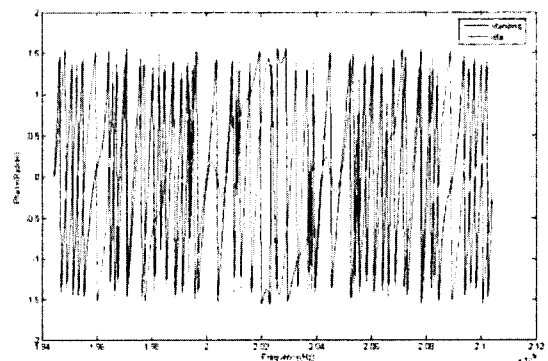
잡음으로 분류된다. JEM의 도플러 천이를 측정하기 위하여 먼저 항공기 엔진을 중지시킨 상태에서 RCS를 측정하고 다음에 항공기 시동을 켜 상태에서 RCS를 다시 측정한다. 항공기 시동을 켜 상태의 데이터에서 고정된 항공기 RCS를 제거함으로써 실제 JEM 데이터를 확보하게 된다.

라. 실험결과(Results)

실험결과에 따라 주파수별 신호는 그림 13과 같이 나타났다. 엔진이 멈춘 상태에서 배경잡음제거와 실제 표적거리에 대한 게이팅을 한 결과이다. 주파수가 공진하여 표적의 신호가 특정주파수에서 커짐을 알 수 있다. T-103인 경우 저속항공기로서 블레이드가 2개이며, idle상태에서 회전율(rotation period)이 900rpm인 항공기이다. 그래서 주파수 반복주기는 30Hz가 된다. 짧은 주기로 인하여 실제 고정된 상태에서와 엔진 idle상태를



(a)



(b)

그림 13. T-103항공기에 대한 JEM스펙트럼(정면 기수방향)  
(a) 크기신호 (b) 위상신호

Fig. 13. JEM Spectrum for T-103 at heading of aircraft.  
(a) Amplitude (b) Phase



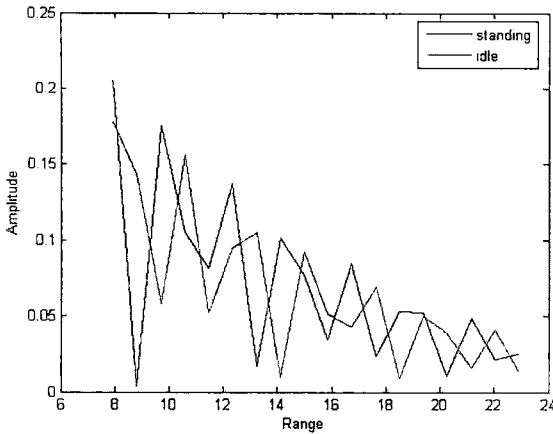


그림 14. T-103항공기에 대한 Range Profile(정면 기수방향)

Fig. 14. Range profile for T-103 at heading of aircraft

비교해 보면 엔진이 기동하게 되면 주파수가 도플러효과(doppler effect)로 인하여 퍼짐효과를 볼 수 있다.

시간영역으로 보면 도플러 효과에 의하여 고정된 상태 보다 엔진의 도플러에 의하여 시간 지연현상이 발생함을 알 수 있으며 그림 14에 표현되어있다. 정면에서 바라본 항공기의 RCS 형태를 보면 실제로 헤드부분에 가장 큰 산란점(scattering center)이 있음을 알 수 있었고, 가장 큰 산란점이 항공기의 헤드 부분임에 따라 시간지연현상이 전체적으로 변함을 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 논문을 통하여 실제 항공기에 대한 RCS 시간영역과 실험결과에 따라 주파수별 신호를 구할 수 있었으며 JEM특성은 저속 항공기인 경우 반복된 신호가 많음을 알 수 있었다. 현재 공군에서 운용되고 있는 T-103 항공기의 경우 저속 항공기로서 블레이드가 2개이며, idle 상태에서 회전율(rotation period)이 900rpm인 항공기이며 주파수 반복주기는 30hz가 된다. 이번 실험을 통하여 얻은 결과로부터, 주파수가 공진하여 표적의 신호가 특정주파수에서 커지는 것을 확인하였다. 또한 짧은 주기로 인하여 실제 고정된 상태에서와 엔진 idle상태를 비교해 보면 엔진 기동 시 주파수가 도플러효과(doppler effect)로 인하여 퍼짐효과를 볼 수 있었다.

시간영역으로 보면 도플러 효과에 의하여 고정된 상태 보다 엔진의 도플러에 의하여 시간 지연현상이 발생함을 알 수 있었으며 추후 연구과제로서 이렇게 구한 시간영역(time bin)을 이용하여 cepstrum을 이용한 실

제 반복 주기 형태를 뽑아내는 작업을 수행하여야 한다. 이와 같이 실제 반복 주기 형태를 추출하여 실제 분포로 표적을 식별하는 것이 유리한 것인지 변수형태를 이용하는 것이 유리한 것인지를 연구하는 것이 향후 과제라 하겠다.

#### 감사의 글

본 연구를 수행할 수 있도록 재정지원을 해주신 공군사관학교 교육재단과 동환학술 연구기금을 출연해주신 최동환 회장님께 진심으로 감사드립니다. 또한 본 연구에 사용된 장비대여, 실험협조 및 조언을 해주신, RF core사의 전계익 사장님과, 충북대 안병철 교수님, 충남대 우종명 교수님, 그리고 공군의 212 비행대대에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Sebastian Rigger, "Wide-Band Polarimetry and Complex Radar Cross Section Signature" Proceeding of IEEE, Vol. 77, No.5, May 1989.
- [2] Shane Robert Cloude, "A Review of Target Decomposition Theorem in Radar Polarimetry" IEEE Trans. on Geoscience and Remote sensing, Vol.34, No.2, March 1996.
- [3] Shane Robert Cloude, "Target Decomposition Theorem in Radar Scattering" Electronics letters 3rd, Vol.21, No.1, January 1985.
- [4] Eugen F. Knott, Radar Cross Section Measurement
- [5] J. R. Huynen "Theory and Measurement of Surface-Torsion" Direct and Inverse Method in Radar Polarimetry, Part I, NATO Scientific Affairs, pp. 581-623
- [6] J. R. Huynen "Phenomenology Theory of Radar Targets" Ph. D. Dissertation, Drukkerij Bronder-Offerset, N. V. Rotterdam, 1970.
- [7] Martin, J. and Mulgrew, B. "Analysis of the Theoretical Return Signal from Aircraft Propeller Blade", IEEE International Radar Conference, Brighton, UK, 1990.
- [8] Martin, J. and Mulgrew, B. "Analysis of the Effect of Blade Pitch on the Return Signal from Rotating Aircraft Blades". IEE Radar 92 International Conference, Brighton, UK, 1992, pp. 446-9
- [9] Bell, M. R., and Grubbs, R. A. "JEM Modelling and Measurement for Radar Target Identification", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1), pp. 73-87

[10] Pardini, S., Pellegrini, P. F., and Piccini, P. "Use of Target Spectrum for Detection Enhancement and Identification". AGARD Conference, Ottawa, Canada, 1994.

---

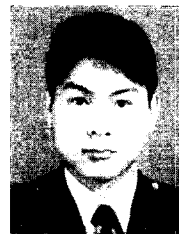
저 자 소 개

---



**김 윤 석**(정회원)  
 1988년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 1993년 서울대학교 전자공학과 석사 졸업.  
 1999년 Oregon State University 전기공학과 박사 졸업.  
 2003년 University of Kentucky 방문교수  
 1999년~현재 공군사관학교 전자공학과 조교수/부교수

<주관심분야 : 전자파 해석, 초고주파 회로 설계 및 해석, 수치해석, 레이더 신호처리>



**정 주 호**(정회원)  
 1995년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 1998년 포항공과대학교 전자공학과 석사 졸업.  
 2007년 포항공과대학교 전자공학과 박사 졸업.  
 1995년 공군전투발전단 사전분석장교  
 1998년 백령 관제부대 전자중대장  
 1999년~2003년 공본 지휘통신 참모부 전자전 장교 및 중장기발전담당

<주관심분야 : 레이더 및 전자전, C4I, ATR>



**김 후**(정회원)  
 2004년 포항공과대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 2006년 포항공과대학교 전자공학과 석사 졸업.  
 2006년~현재 공군사관학교 전자공학과 전임강사

<주관심분야 : 초고주파 공학, 수동소자 및 안테나 설계, 레이더 신호처리>