

유도탄용 레이돔 시선각 오차 보정 기법

A Method of Boresight Error Compensation for Missile Radome

김 광 희*

Kim, Gwang-Hee

ABSTRACT

The radome boresight error degrades the microwave seeker ability and the missile guidance performance. It increases the miss distance, also. This paper propose a method of radome boresight error measurement and compensation. The compensation method consist of radome analysis and radome compensation. In the radome analysis stage, we can know that the electromagnetic characteristics distorted by radome. In the compensation stage, the look-up table is built and used for compensation. The test uses a FMS(Flight motion simulator) and adjusts the FMS setup error for more accuracy. The result shows that not using an elaborate radome measurement equipment, the radome boresight error is well compensated easily.

주요기술용어(주제어) : Radome Boresight Error(레이돔 시선각 오차 : BSE), Boresight Error Slope(시선각 오차 변화율 : BSES), Guidance Loop(유도조종 루프), Miss Distance(명중오차 거리), Microwave Seeker(마이크로파 탐색기)

1. 서론

레이돔은 유도탄의 가장 앞부분에 장착되어 유도탄의 공기저항을 최소화시키고 안테나 등 마이크로파 탐색기의 내부 구성품을 외부환경으로부터 보호하는 역할을 한다. 그러나 안테나를 통해 송신되거나 수신되는 전자파를 반사, 굴절, 산란시킴으로서 탐색기의 표적 탐지 및 추적 성능과 유도탄의 유도 성능에 영향을 미칠 수 있으며 안테나 패턴, 투과손실, 시선각 오차 등에 영향을 준다.

레이돔에 의해 안테나 패턴의 부엽레벨이 증가할 경우 탐색기의 탐지 및 추적 성능이 떨어질 수 있으며, 상대방의 전파방해에 취약하게 되어 탐색기의 종합적인 성능에 악영향을 미칠 수 있다. 또한, 투과손실의 경우에는 최대 표적 탐지거리에 영향을 미칠 수 있으며, 실제 표적의 위치가 레이돔에 의해 왜곡되어 안테나가 표적과 다른 곳을 지향하게 되는 레이돔 시선각 오차(Radome BoreSight Error : Radome BSE)가 발생한다. 레이돔 BSE에는 정적인 BSE 원인과 동적인 BSE 원인이 존재하며, 정적인 BSE 원인들에 대해서만 보상이 가능하다^[4].

안테나가 레이돔을 지향하는 각이 변할 때 마다 그 위치의 레이돔 BSE가 달라지며, 이에 대한 변화율(BoreSight Error Slope : BSES)이 클 경우에는 유

† 2005년 7월 28일 접수~2005년 9월 9일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : kshift@add.re.kr

도탄의 유도성능에 영향을 미쳐 심할 경우 유도탄이 표적을 빗나가게 하는 원인이 될 수도 있다. 따라서, 유도무기에 적용될 레이돔을 개발할 경우 안테나를 통해 송/수신되는 전자파가 레이돔에 의해 왜곡되는 특성을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하며, 이러한 예측결과를 바탕으로 안테나패턴이나 투과손실 등에는 큰 영향을 주지 않으면서 레이돔 BSES를 최소화할 수 있는 레이돔의 내부 형상, 가공 공정상 발생하는 가공 오차(두께 및 형상), 레이돔 재질의 비균질성 등으로 인해 실제 얻을 수 있는 BSES 값은 일정한 한계를 가지게 된다. 이러한 경우 별도의 절차를 거쳐 소프트웨어적인 방법으로 레이돔 BSES를 추가적으로 보정하여 유도탄용 레이돔에 요구되는 규격을 만족시켜야 한다.

이에 본 논문에서는 마이크로파 탐색기를 이용하여 레이돔의 전자파적 특성을 측정하고 이를 소프트웨어적으로 보정하는 방법을 제안하고자 한다. 기존의 레이돔 보상과 관련된 방법들과^[1~3] 달리 유도조정 단계에서의 보상이 아니라 탐색기 레벨에서의 보정을 수행함으로써 유도조정 루프의 부하를 줄일 수 있으며, 유도탄의 유도 조정 성능을 개선할 수 있다.

정확한 레이돔 BSE의 보정을 위해서는 정교한 레이돔 측정장비를 이용하여 레이돔의 모든 점을 3차원적으로 측정하여 이에 대한 보정을 수행하여야 하지만, 탐색기에 저장되는 데이터에 한계가 있으므로 간략화된 측정점을 사용한다. 이를 위해 유도탄 및 탐색기의 성능 분석에 사용되는 모의비행시험장치 (Flight Motion Simulator : FMS)를 이용하였다.

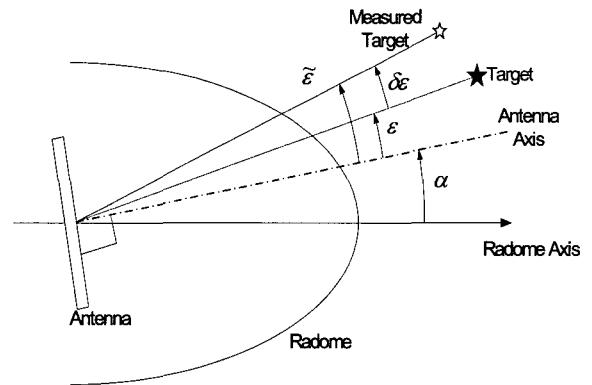
본 논문은 2장에서 BSE의 기본 개념과 보정방법 및 절차에 대해 기술하고 3장에서는 레이돔 BSE 보상 결과를 제시한다. 마지막 4장에서는 제안한 방법 및 실험 결과에 대해 정리하고 결론을 맺는다.

2. 레이돔 시선각 오차(BSE) 보정

가. 레이돔 BSE 개념

레이돔 BSE는 레이돔에 의한 시선각 오차(Boresight

error)를 측정함으로써 구할 수 있다. 그림 1과 같이 안테나가 레이돔 중심에서 일정한 각(α) 만큼 떨어져 있을 때, 먼저 레이돔을 쏘우지 않고 표적을 측정하여 안테나 중심에서 실제 표적까지의 각도(ϵ)를 구한다. 이후 레이돔을 장착한 후 동일한 과정을 거쳐 동일한 표적 위치에 대해 측정된 표적 각도($\tilde{\epsilon}$)를 구한다.

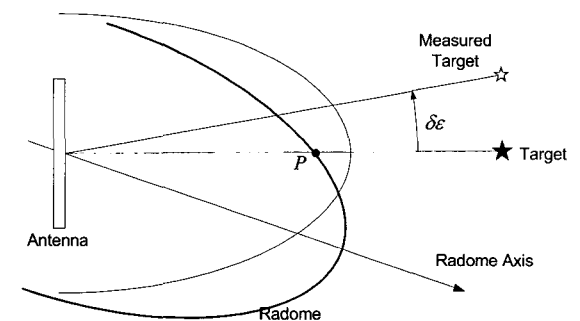


[그림 1] 레이돔 시선각 오차(BSE)

$$\text{레이돔 BSE}(\delta\epsilon) = \tilde{\epsilon} - \epsilon \quad (1)$$

식 (1)과 같이 레이돔 장착 후 측정된 각에서 레이돔 장착하지 않고 측정된 실제 표적 각도를 빼줌으로써 레이돔 BSE를 구할 수 있다.

나. 레이돔 BSE 측정

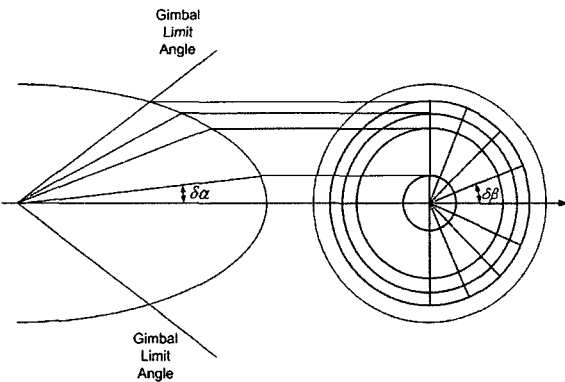


[그림 2] BSE 측정

레이돔 BSE 측정은 그림 2와 같이 수행된다. 먼저

레이돔을 장착한 후 안테나와 표적을 정렬시킨 상태에서, 레이돔을 수평축으로 측정 간격 만큼씩 회전시키면서 표적의 각도를 측정한다. 이 측정값이 레이돔 측정점(P)에서의 BSE이다. 안테나와 표적의 (혼안테나) 극성을 바꾸면서 (롤 회전) 위의 과정을 되풀이하여 측정을 한다. 위와 같은 과정을 거치면 레이돔의 모든 위치에 대해 BSE를 측정할 수 있다.

다. 레이돔 측정점 분포



[그림 3] 레이돔 측정점

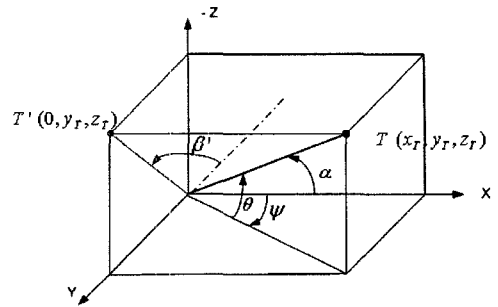
레이돔 BSE 측정점은 레이돔 축과 안테나 축의 사이각 (α)과 롤(roll) 회전방향각(β)으로 구성되며, 측정점 간격은 각각 $\delta\alpha$, $\delta\beta$ 로 나타낸다. 따라서 짐발 제한각과 측정점 간격이 정해지면 총 측정점 수가 결정된다, 예를 들어 안테나 짐발 제한각이 ± 55 도이고, $\delta\alpha=0.25$ 도, $\delta\beta=5$ 도 라고 가정하면, 총 측정점 수는,

$$\text{총 측정점 수} = (110/0.25+1) \times 180/5 = 15,876\text{개}$$

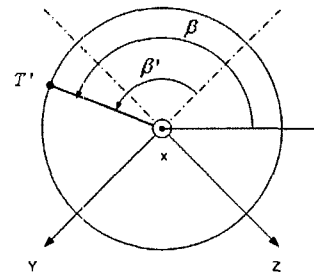
가 된다. 물론 여기서는 등간격을 가정하였지만, 측정점 간격을 위치에 따라 다르게 정할 수도 있다.

라. 측정점 좌표 변환

앞 절에서는 레이돔의 형상 관점에서 측정점을 레이돔 축과 안테나 축의 사이각(α)과 롤 회전방향각(β)으로 정의하였다. 그러나 안테나 각은 짐발의 포텐쇼미터 값(θ , ψ)으로 측정이 되므로 보정을 위해서는 각도 좌표를 변환해 주어야 한다.



(a) FMS 좌표계



(b) 극 좌표계

[그림 4] 짐발각 좌표변환

그림 4에서 그림에서 레이돔의 방향은 x-축방향이고, 안테나의 고각은 θ , 평각은 ψ 이다. 따라서 안테나가 표적 T를 추적중일 때 다음과 같은 식이 성립한다.

$$x_T = \cos\theta \cdot \cos\psi \tag{2}$$

$$y_T = \cos\theta \cdot \sin\psi \tag{3}$$

$$z_T = -\sin\theta \tag{4}$$

$$\tan\theta = \frac{z_T}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2}} \tag{5}$$

$$\tan\psi = \frac{y_T}{x_T} \tag{6}$$

마찬가지로 표적 T는 식 (7), (8)과 같이 α , β' 로 표현할 수 있다.

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{y_T^2 + z_T^2}}{x_T} \quad (7)$$

$$\tan \beta' = \frac{z_T}{-y_T} \quad (8)$$

식 (5)와 식 (6)을 식 (7)과 식 (8)에 대입하면,

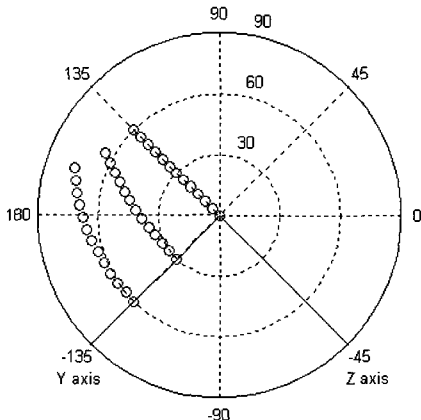
$$\alpha = \tan^{-1}(\sqrt{\tan^2 \psi \tan^2 \theta + \tan^2 \psi \cdot \tan^2 \theta}) \quad (9)$$

$$\beta' = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 + \tan^2 \psi} \cdot \tan \theta}{-\tan \psi}\right) \quad (10)$$

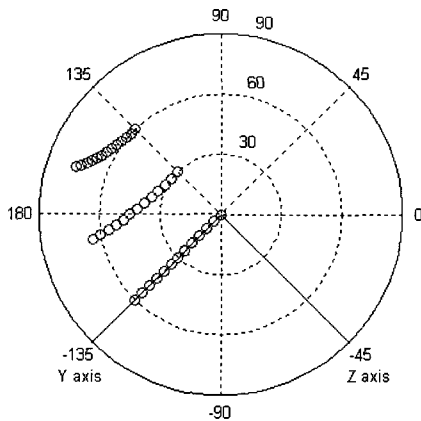
식 (9)과 식 (10)과 같은 변환식을 구할 수 있다. 여기서 β' 는 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 표적 T가 yz-평면에 투영된 T'와 (-y)축이 이루는 각도이므로, β 는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = \beta' + 45 \quad (11)$$

그림 5는 안테나 김발각에 대한 안테나 방향의 각 변화를 그림으로 나타낸 것이다. 먼저 그림 5(a)는 외부 김발(outer gimbal, z축)을 0도, 30도, 60도 돌려놓은 상태에서 내부 김발(inner gimbal, y축)의 변화(0도에서 60도까지 5도 간격)를 나타낸 것이고, 그림 5(b)는 반대로 내부 김발을 0도, 30도, 60도 돌려놓은 상태에서 외부 김발의 변화를 나타낸 그림이다.



(a) 외부 김발 → 내부 김발 구동



(b) 내부 김발 → 외부 김발 구동

[그림 5] 김발각에 대한 안테나 방향

마. 보간법을 이용한 레이돔 BSE 보정

1) BSE 보정 테이블

레이돔 BSE를 소프트웨어적으로 보정하기 위해 먼저 레이돔의 각 측정점에 대해서 BSE를 측정하고, 측정값을 테이블의 형태로 메모리에 저장한다. 실제 운용시에는 측정된 김발각을 이용하여 테이블의 색인을 구하고, 해당 테이블 값을 보정을 수행한다. 테이블의 형태는 표 1과 같이 구성된다. 이전 절에서 언급한 바와 같이 $\delta\alpha$ 는 0.25도 간격이며, $\delta\beta$ 는 5도 간격이다.

보정 테이블의 열(column)은 레이돔과 안테나의 사이각(α)이고 행(row)은 회전각(β)를 나타낸다. 즉, 레이돔 측정 위치를 표현한 것이다. 테이블의 값은 각 측정점에서 레이돔에 의한 BSE ($\delta\epsilon_\theta, \delta\epsilon_\psi$)를 의미하며, 현재 김발각에서 ($\delta\epsilon_\theta, \delta\epsilon_\psi$) 만큼 반대로 김발각을 움직임으로써 보정이 이루어진다.

[표 1] 레이돔 BSE 보정 테이블

레이돔, 안테나 사이각(α)	$\delta\alpha$	$2\delta\alpha$...	$M\delta\alpha$
회전각(β)				
$\delta\beta$				
$2\delta\beta$				
\vdots			$\delta\epsilon_\theta, \delta\epsilon_\psi$	
$N\delta\beta$				

2) 보간법(interpolation)

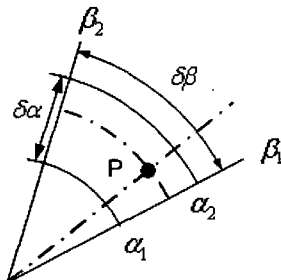
레이돔 BSE를 보정하기 위한 테이블은 앞 절의 표 1과 같이 $\delta\alpha, \delta\beta$ 의 등간격으로 측정된 BSE로 구성되어 있다. 그러나, 보정시 실제 측정된 김발각으로부터 변환된 (α, β) 는 테이블의 정확한 색인값이 아닌 임의의 사이값을 갖게 된다. 따라서, 보다 정확한 레이돔 BSE를 보정하기 위해서는 주위의 값을 이용하여 현재 측정된 지점의 BSE 값을 추측해야 한다. 그림 6은 레이돔 BSE를 위한 보간법을 나타내고 있으며, 점 P에서의 BSE를 추정하려면, 점 P를 포함하는 주위의 4개 측정점에서의 BSE 들로부터 점 P에서의 BSE 값을 산출할 수 있다.

보간법을 이용한 점 P에서의 BSE 계산 공식은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \delta\epsilon = & (1-\Delta\alpha)(1-\Delta\beta) \cdot \delta\epsilon_{11} \\ & + (1-\Delta\alpha) \cdot \Delta\beta \cdot \delta\epsilon_{12} \\ & + (1-\Delta\beta) \cdot \Delta\alpha \cdot \delta\epsilon_{21} \\ & + \Delta\alpha \cdot \Delta\beta \cdot \delta\epsilon_{22} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

- $\delta\epsilon$: 점 P에서의 BSE
- $\delta\epsilon_{11}$: 점 (α_1, β_1) 에서의 BSE
- $\delta\epsilon_{12}$: 점 (α_1, β_2) 에서의 BSE
- $\delta\epsilon_{21}$: 점 (α_2, β_1) 에서의 BSE
- $\delta\epsilon_{22}$: 점 (α_2, β_2) 에서의 BSE
- $\delta\alpha$: 각 α 방향의 측정각 간격 $(\alpha_2 - \alpha_1)$
- $\delta\beta$: 각 β 방향의 측정각 간격 $(\beta_2 - \beta_1)$
- $\Delta\alpha = (\alpha - \alpha_1) / \delta\alpha$
- $\Delta\beta = (\beta - \beta_1) / \delta\beta$

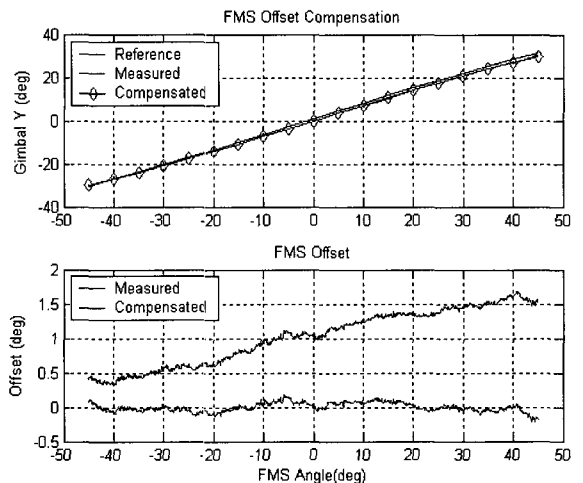


[그림 6] 레이돔 BSE를 위한 보간법

바. FMS offset 보상

모의비행시험장치는 FMS와 PAA(Phase Array Antenna)로 구성된다. FMS는 3개의 축(roll, yaw, pitch)으로 구성되어 있으며, 유압으로 구동된다. 이 FMS에 마이크로와 탐색기 등을 몰려 실제 유도탄의 움직임을 모사할 수 있게 된다. PAA는 표적신호나 재밍신호와 같은 전장 환경 신호를 생성하며, 다수의 안테나로 구성되어 있다. 모의 비행시험장치를 이용한 레이돔 BSE 측정은 두가지 방법으로 수행할 수 있다. 첫 번째 PAA를 이용하는 방법인데, FMS를 고정한 후 PAA를 제어하여 표적 신호의 위치를 변경함으로써 탐색기 안테나 중심과 표적 선상을 지나가는 레이돔 위치의 BSE를 측정한다. 이 방법은 전자적으로 정확한 위치 제어가 가능하므로 표적 위치의 오차가 거의 없으나, 실험실 환경 구성상 ± 10 도의 영역만을 측정할 수 있다.

두 번째 FMS를 이용할 경우, 탐색기 김발 각도 범위에 해당하는 만큼 넓은 영역을 측정할 수 있으나, 유압 구동 장치의 특성상 상대적으로 정확한 위치 지정이 힘든 제약이 있다. 또한, 매 시험마다 약간씩 FMS의 위치가 달라짐으로써 보정 결과에 오차를 야기하며, 탐색기 중심과 FMS 중심의 정확한 정렬이 이루어지지 않으면, 이로 인해 FMS offset이 발생한다. 따라서, 이러한 FMS offset 특징을 제거함으로써 오차를 줄일 수 있다.



[그림 7] FMS offset 보상

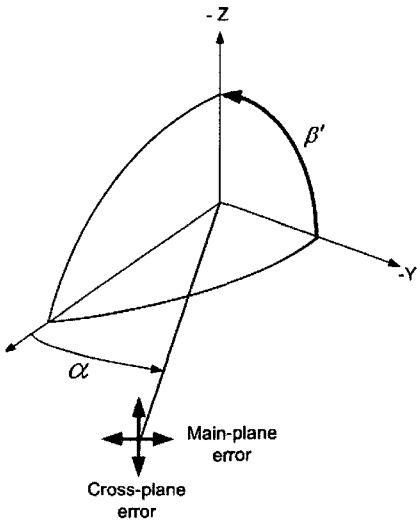
그림 7에 FMS offset 보상 결과를 나타내었으며, 보상 전에는 0.5~1.5도 정도의 offset이 존재하였으나, 보상 후 offset이 거의 0이 됨으로써 FMS의 장착 및 구동 특성으로 인한 offset이 제거되었다.

사. 레이돔 BSES 계산

1) MBSE와 CBSE 정의

레이돔에 대한 규격은 BSES(BSE slope)로 주어지므로, 레이돔 BSE 보정 후 이에 대한 BSES를 구해야 한다. BSES를 구하는데 사용되는 BSE는 Main-plane(In-plane) 성분과 Cross-plane 성분으로 구성된다. MBSE는 측정평면(α -평면)을 따라 나타나는 시선각 벡터의 오차를 나타내며, CBSE는 측정평면에 수직으로 나타나는 시선각 벡터의 오차를 나타낸다.

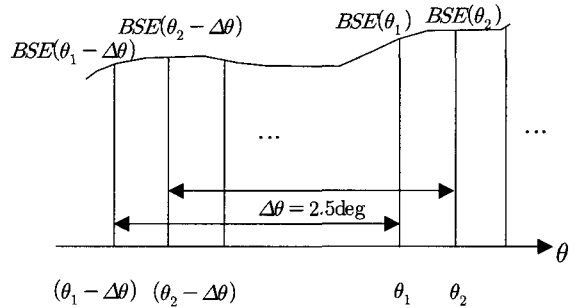
레이돔 규격에는 MBSE와 MBSES만 사용되며, CBSE와 CBSES는 레이돔의 전자과적 특성을 분석하는데 추가적으로 사용된다.



[그림 8] MBSE와 CBSE 정의

2) BSES 계산

임의의 제작된 레이돔이 주어진 규격을 만족하는지의 여부는 그 레이돔의 BSES를 측정함으로써 알 수 있다. 또한, BSES는 BSE로부터 계산되며, 계산 방식에 따라 결과가 어느 정도 영향을 받을 수 있다. 따라서, 짧은 순간 급격하게 변하는 것에 영향 받지



[그림 9] 레이돔 BSE slope 계산

않고 전체적인 BSE의 변화를 잘 나타낼 수 있는 계산 방식이 필요하게 된다.

본 논문에서는 BSES를 구하는데 식 (13)을 사용한다.

$$BSES(\theta_1 - \frac{\Delta\theta}{2}) = \frac{BSE(\theta_1 - \Delta\theta) - BSE(\theta_1)}{\Delta\theta} \quad (13)$$

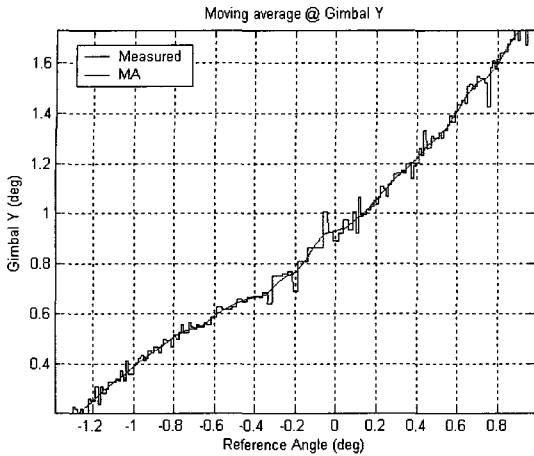
$$= \frac{\Delta BSE(\theta_1)}{\Delta\theta}$$

여기서, $\Delta\theta = 2.5$ 도(Azimuth Angle 기준)

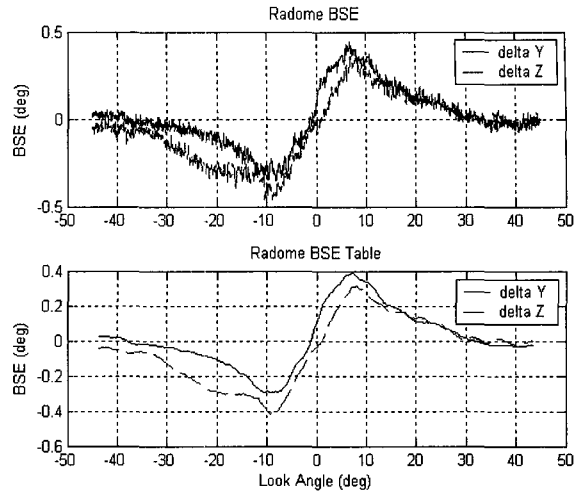
그림 9는 식 (13)에 대한 구체적인 과정을 나타내고 있다. 먼저 임의의 한 지점($\theta_1 - \Delta\theta$)과 이곳으로부터 $\Delta\theta$ (본 논문에서는 2.5도) 만큼 떨어진 지점(θ_1)의 BSE 차이($BSE(\theta_1 - \Delta\theta) - BSE(\theta_1)$)를 두 지점간의 거리($\Delta\theta$)로 나눔으로써 두 지점의 slope(변화율)을 구한다. 이때의 값을 두 지점 사이의 중간점에 대한 변화율로 정의한다. 위와 같은 방식을 사용함으로써 두 지점 사이에 순간적으로 급격히 변화하는 값이 존재하더라도 어느 정도 필터링되는 효과를 기대할 수 있으며, 전체적인 BSE의 변화율을 구할 수 있다.

3. 실험 결과

이미 언급한 바와같이, PAA의 동작 범위($\pm 10^\circ$, 최대 $\pm 20^\circ$)가 좁기 때문에 레이돔의 측정 범위($\pm 55^\circ$)를 모두 측정할 수 없었다. 따라서, PAA기준은 제외하고 FMS($\pm 45^\circ$)기준으로 시험을 수행하였으며, FMS는 0.5deg/s 속도로 이동하였다.



[그림 10] 김발각 moving average



[그림 11] 레이돔 BSE 보정 테이블

가. Pre BSE 측정(without radome)

탐색기에 레이돔을 장착하지 않은 상태로 FMS를 구동하여 안테나 김발의 움직임을 로깅한다. FMS의 유압 구동 특성상 FMS 구동 명령과 실제 움직임과는 차이가 있으므로 로깅된 FMS 데이터(yaw, pitch, roll)를 이용하여 김발각 기준값으로 사용하였다. 이때, 측정된 김발각은 그림 10과 같이 fluctuation이 존재함으로 moving average를 수행한 후 사용하였다.

나. 레이돔 BSE 측정(with radome)

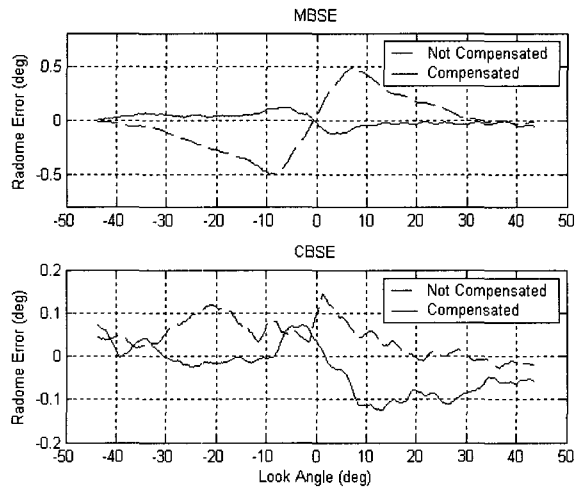
레이돔을 장착한 후 Pre BSE 측정과 동일한 방법으로 FMS를 구동하여 탐색기 안테나 김발의 움직임을 획득하였다.

다. 보정 테이블 계산

레이돔 BSE 측정과 Pre BSE 측정시의 김발각 차이는 곧 레이돔에 의한 BSE가 된다. 이때 기준점은 Pre BSE 측정에서 얻어진 FMS 값이 된다. 완전한 보정을 위해서는 레이돔의 모든 점에 대한 3차원 보정 테이블을 사용해야 하지만 FMS를 이용하기에는 어려움이 많으므로, 한 축에 대한 결과가 다른 모든 축에 대해서도 동일하다고 가정하였다. 그림 11은 레이돔 보정 테이블을 나타내고 있다.

라. 레이돔 BSE 보정(compensation)

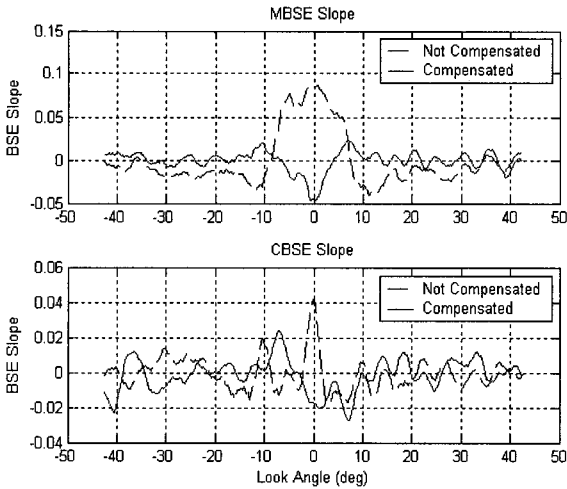
계산된 보정 테이블을 마이크로파 탐색기 운용 프



[그림 12] 보정 전후의 레이돔 BSE

로그래에 적용하고 레이돔을 장착한 상태에서 이전 단계와 동일한 시험을 수행하였다.

보정 테이블을 만드는 과정과 같이 김발각 차이, 즉 보정 후의 레이돔 BSE를 구하고 이를 보정 전의 결과를 비교하여 레이돔 BSE 보정이 이루어졌는지를 확인하였다. 레이돔 BSE는 MBSE 성분과 CBSE 성분으로 분리하였고 그림 12는 보정 전후의 레이돔 BSE를 나타내고 있다. MBSE의 경우 보정 전후로 $\pm 0.5^\circ$ 에서 $\pm 0.2^\circ$ 이내로 줄어들어 보정이 되었음을 확인할 수 있다.



[그림 13] 보정 전후의 레이돔 BSE 변화율

그림 13은 MBSES와 CBSES를 나타내고 있다. MBSES의 경우 최대 8%에서 4% 이내로, CBSES의 경우 4%에서 2% 이내로 레이돔 BSE의 변화율이 줄어들어 보정이 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 마이크로파 탐색기에서 송신되거나 수신되는 전자파를 반사, 굴절, 산란시킴으로서 탐색기의 표적 탐지 및 추적 성능과 유도탄의 유도 성능에 영향을 미칠 수 있으며 안테나 패턴, 투과손실, 시선각 오차 등에 영향을 줄 수 있는 레이돔에 대한 전자파적인 특성을 측정하고 이를 소프트웨어적으로 보정하는 기법에 대해 기술하였다.

레이돔 BSE 보정을 위해 FMS를 이용하였으며, FMS와 탐색기의 장착오차 등을 제거하기 위해 FMS offset 보상을 실시하였다. 레이돔을 장착하지 않은 상태의 Pre 레이돔 BSE 측정과 레이돔을 장착한 후의 레이돔 BSE 측정을 통해 보정 테이블을 구할 수 있었으며, 보정 테이블은 극 좌표계(α , β)로 구성된

다. 측정된 BSE값은 좌표변화를 통하여 FMS 좌표계에서 극 좌표계로 변화되어 테이블에 저장되었다.

이 테이블은 탐색기 운영 프로그램에 적용된 후 레이돔이 장착한 상태에서 다시 한번 레이돔 BSE를 측정함으로써, 레이돔 BSE 보정 여부를 확인할 수 있었다. 레이돔 BSE는 다시 MBSE와 CBSE 성분으로 나뉘어지며, 레이돔 규격과의 비교를 위해 BSE에서 BSE 변화율을(BSES) 구하였다. MBSES의 경우 8%에서 4% 이내로 CBSES의 경우 4%에서 2% 이내로 줄어들었다.

실험결과, 본 논문에서 제안한 레이돔 BSE 보정 방법을 이용하여 보정이 잘 이루어짐을 확인하였고, 비교적 손쉽게 레이돔 보정을 수행할 수 있었다. 추후 측정 축을 늘려 보다 완전한 레이돔 BSE 보정을 수행할 수 있도록 개선해나갈 예정이다.

참고 문헌

- [1] Kuehne, B. E., "An assessment of radome and aero/control models for simulating boresight errors in homing missiles", AIAA, Collection of Technical Papers, 1980, pp.220~229.
- [2] Song, T. L., "Active homing performance enhancement with multiple model radome slope estimation", AIAA, GN&C Conf., 2004-4889.
- [3] Rong H., Guo D., Wu X., Wang X. and Jia Z., "An optimization method for calculating the boresight error of radome", CIE International Conf., Proc., 2001, pp.1132~1135.
- [4] Donald P., James O. and Kenea D., "Radome boresight error and compensation techniques for electronically scanned arrays", AIAA SDIO Interceptor Tech. Conf, 1993, AIAA 93-2648.