

뽀족한 원추꼴 RV로 정확도 높이고 요격률 낮춘다

글 | 정규수_ 박사 root20@kornet.net

로켓 추진에 의해 램베르트 속도에 도달하게 되면 탄두는 로켓으로부터 분리되어 탄도비행을 시작한다. 이 때 고도는 대략 180~200km 전후가 되며 이곳의 공기밀도는 아주 낮아 진공으로 취급해도 무방하다. 로켓으로부터 분리된 탄두는 상승 비행을 계속하게 되며 대략 1천km의 최고 고도에 도달하게 된다. 최고 고도를 지난 탄두는 표적을 향해 다시 떨어지기 시작한다. 대륙간 탄도탄(ICBM)이나 잠수함발사 미사일(SLBM)의 표적은 지표면에 위치하므로 탄두가 표적을 명중시키기 위해서는 대기권으로 재진입해야 한다. 이렇게 로켓에 실려 대기권 밖으로 나갔던 탄두가 다시 대기권으로 들어오는 과정을 재돌입이라 부른다.

일반적으로 우주공간의 진공 상태에서부터 어떤 행성이나 천체의 대기 속으로 비행체가 들어가는 것을 진입이라고 부른다. 그러나 지구로부터 출발하여 우주공간을 지나 다시 지구 대기권으로 들어오는 것을 지칭할 때는 특별히 재돌입이라고 부른다. 흥미로운 사실은 우주에서 대기권으로 들어오는 비행체는 군사용이나 아니냐에 따라 부르는 명칭이 달라진다는 것이다. 비군사용 비행체를 말할 때는 그냥 EV라고 부르는 반면 재돌입하는 비행체가 탄두를 포함한 경우 미 공군에서는 RV라고 부르고 해군에서는 RB라고 부르는 것이 관례로 되어 있다. 여기에서는 편의상 모든 군사용 페이로드를 탑재한 재돌입체를 RV라고 부르기로 한다.

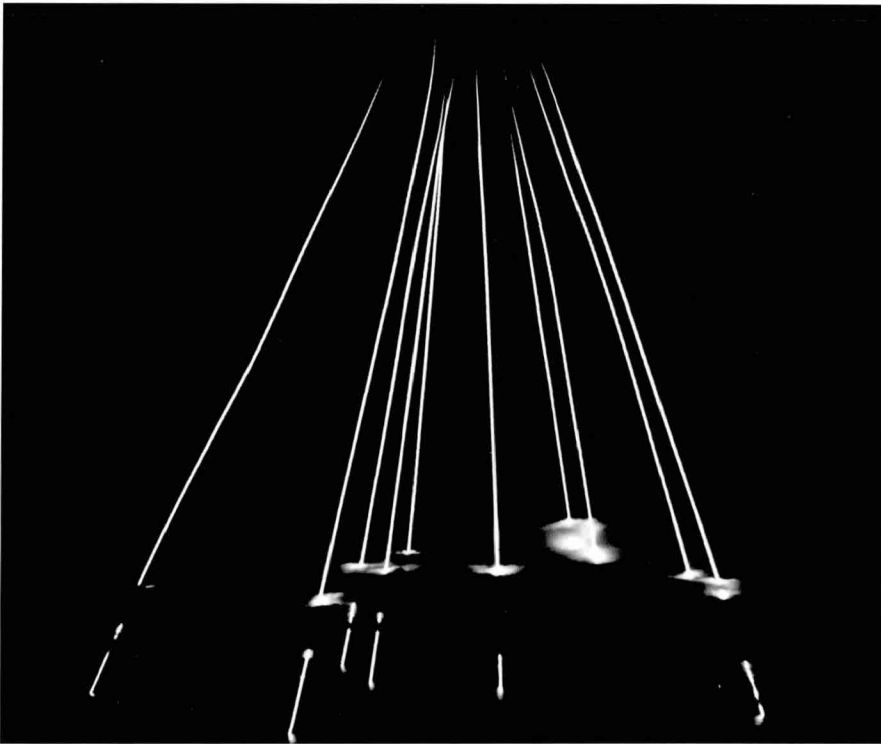
RV 재돌입 시 강한 충격파·고열 발생

재돌입하는 탄두는 연소 종료 속도보다 다소 빠른 속도로 재돌



10기의 RV를 탑재한 보이보드가 발사된 가상도

입을 시작하게 된다. 재돌입 고도(~120km)가 연소 종료 고도보다 다소 낮기 때문에 고도차만큼 낙하하면서 중력에 의해 가속되기 때문이다. 초속 7km/s로 재돌입하는 탄두의 운동에너지는 같은 무게의 TNT 폭발 에너지의 약 6배에 달한다. 이러한 극초음속 RV가 대기권에 진입하는 과정에서 RV 주변의 공기는 두 가지 다른 메커니즘에 의해 가열되고 RV는 그에 해당하는 운동에너지를 잃게 되어 속도가 줄어든다.



다탄두 미사일에 실린 탄두가 떨어지고 있는 모습

첫 번째 메커니즘으로 7km/s의 극초고속으로 움직이는 RV의 끝부분에서 공기는 강하게 압축되어 강력한 충격파를 형성한다. 이러한 RV의 끝부분을 정체점이라고 한다. 이 영역에서 공기의 온도는 섭씨 수만도 이상 올라갈 수 있다. RV의 정체점 근방은 가열되는 속도도 가장 높고 열 충격도 가장 심하게 받는 부분이다. 두 번째 메커니즘으로 RV의 측면 근방의 공기흐름은 속도변화가 아주 심한 층류를 형성하기 때문에 강한 마찰에 의해 많은 열이 발생하고 그 결과 RV 측면을 따라 고온의 공기층이 형성된다. 현대식 RV처럼 RV 모양이 뾰족하고 긴원뿔 모양에 가까울수록 충격파는 측면에 더욱 가까워지고 훨씬 많은 양의 마찰열이 발생한다. 재돌입이 진행되는 과정에서 저고도로 내려올수록 공기밀도는 높아지고 RV 속도는 줄어들게 된다. 대략 20~30km 고도에 이르면 RV 측면의 공기흐름이 층류에서 난류로 바뀌면서 더욱 많은 마찰열을 발생시킨다.

이상에서 설명한 두 가지 메커니즘에 의해 RV의 운동에너지가 주변 공기의 충격파 에너지와 열에너지로 변환된다. 즉 RV는 급격히 감속되며, 이 때 잃어버린 운동에너지는 주변공기흐름에 열량으로 축적되고 온도도 섭씨 수천도(원추면)에서 수만도(RV 끝부분)

까지 올라간다. 7km/s로 재돌입하는 1kg의 질량을 가진 물체의 운동에너지는 대략 TNT 6kg의 폭발에너지와 같다. RV의 지표면 충돌속도가 재돌입속도의 절반인 3.5km/s라고 가정해도 공기층으로 유입되는 열량은 TNT 4.4kg에 해당되는 양이다. 이 열량은 2.4kg 이상의 쇠를 완전히 증발시키거나 15kg의 쇠를 녹여버리기에 충분한 열량이다. 이 열량 중 7%만 RV에 흡수되어도 1kg의 쇠를 녹일 수 있다. 따라서 특별한 탄두 보호대책이 마련되지 않는 한 탄두는 재돌입과정에서 녹거나 타버릴 것이 거의 확실하다. 어떻게든지 탄두를 안전하게 재돌입시켜야 하는 초창기 ICBM 엔지니어들에게 이러한 계산 결과는 아주 골치 아픈 문제로 대두되었다.

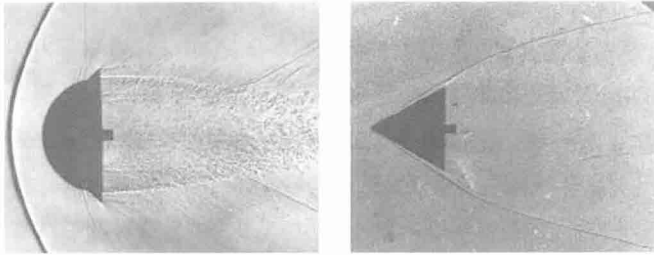
RV의 끝이 뾰족한 경우에는 RV 표면에서 좀 떨어져서 충격파가 발생한다. 이러한 충격파를 '디테취드 바우 쇼크'라고 하며 이

러한 경우에는 공기의 압축으로 발생한 열이 전체 열 발생량의 대부분을 차지한다. 온도가 최고로 올라가는 영역은 RV 표면에서 좀 떨어진 충격파면에 존재한다. 반면 끝이 뾰족한 RV 경우에는 충격파가 RV 경계면에 거의 붙어서 형성되므로 면에서 수직인 방향으로 거리에 따라 공기흐름의 속도차가 매우 크다. 따라서 이곳에서는 심한 공기 마찰이 일어난다. 이 경우에는 마찰열이 전체 열 발생량의 대부분을 차지하게 되며 RV 표면과 충격파 사이의 좁은 영역에 축적돼 RV 표면과 접촉하는 공기의 온도가 아주 높게 올라간다.

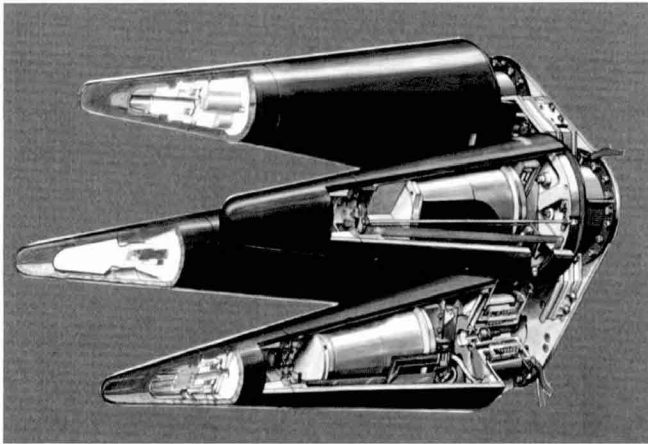
뾰족한 형태는 정확도 낮고 요격을 높여

이와 같이 대기권으로 아주 빠른 속도로 재돌입하는 RV는 충격파와 마찰에 의해 공기 중에 에너지를 빼앗기고 속도는 줄어들지만 대신 고온으로 가열된 공기로 둘러싸이게 된다. RV의 모양에 따라 열이 발생하는 메커니즘과 열이 공기 중에 분포되는 영역, 즉 고온 영역이 달라진다.

뾰족한 형태의 RV는 초창기 ICBM이나 중거리 탄도탄에 많이 이용되었고 지금도 유인우주선과 무인 탐사선의 회수나 천체 착륙



RV가 만든 충격파



다수의 독립목표를 정할 수 있는 미공군의 MIRV 모형도

선에 이용되고 있다. 이러한 형태의 재돌입체는 공기밀도가 적은 공기 상층부에서 급격히 감속되고 발생된 열의 대부분이 RV에 흡수되지 않고 공기 중에 흩어지게 한다. 공기 밀도가 높은 고도에 도달할 즈음에는 속도가 충분히 낮아져서 열 발생이 크게 문제가 되지 않는다. 그러나 뾰족한 RV의 경우에는 사정이 좀 더 심각하다. 뾰족한 RV는 거의 감속이 되지 않은 상태로 공기가 희박한 고도를 통과하여 공기밀도가 큰 고도로 진입하게 된다. 따라서 열 발생률이 아주 높고 그 결과 RV 끝이나 표면은 수 만도에서 수 천도에 이르는 고온의 공기층을 직접 접하게 된다.

가열된 공기로부터 RV로의 열전달은 주로 대류현상에 의해 이루어진다. 물론 RV의 속도가 아주 높은 경우에는 열복사에 의한 열 유입이 중요한 인자로 작용하겠지만 탄도탄에서는 그리 중요한 요인은 아니다. 정체점 근방에서 단위면적 당 RV 표면으로 열 유입률은 RV 속도의 3제곱에 비례하고 RV 원추면을 따른 유입률은 원뿔 꼭지점으로부터 거리와 속도에 따라 달라진다. 원추면을 따른 유입률은 층류에 대해서는 속도의 3.2 제곱에 비례하고 난류가 되면 3.4 제곱에서 3.7 제곱 사이에서 변화할 수 있다. 일반적으로

RV에 흡수되는 열의 대부분은 난류에 의해 발생된 열이다.

앞서 말한 바와 같이 RV가 뾰족한 형태의 앞부분을 가지고 있으면 공기층으로부터 RV로 열 유입은 비교적 적기 때문에 내부의 페이로드를 보호하기가 쉬운 편이다. 하지만 저고도에서 속도가 느리기 때문에 정확도가 기상조건에 따라 많이 좌우되고 탄도탄요격미사일(ABM)에 의해 요격될 확률도 크다. 반면 RV의 앞쪽이 뾰족하고 무거운 원추 꼴인 경우 RV는 거의 감속 없이 대기권을 통과하여 빠른 속도로 지상에 충돌하게 된다. 따라서 RV의 정확도는 바람 등 기상조건에 의한 영향을 덜 받게 되고 ABM에 의해 요격될 확률도 많이 줄어들게 된다. 이러한 이유로 현대식 다탄두 RV는 모두 이러한 형태를 취하는 것이다. 뾰족한 원추꼴 RV의 최대 감속과 최대 열 발생률은 공기밀도가 높은 비교적 낮은 고도에서 일어나게 된다. 따라서 공기 마찰에 의한 열 발생률도 아주 높고 가열된 공기로부터 RV로 열전달률도 훨씬 높아 특별한 열 차단 방법으로 RV 내부가 가열되는 것을 막아주지 않는 한 RV 내부의 페이로드는 타버릴 것이다.

용제물질로 외피 제작해 효과적으로 열 차단

RV는 내부에 페이로드를 장착하기 위한 알루미늄 같은 금속으로 만든 가벼운 구조물과 이를 둘러싼 열 차단용 구조물로 되어 있다. 열 차단 구조는 고온으로 달궈진 공기로부터 직접 유입되는 열량을 대부분 막아주는 외피와 외피를 통과해 들어오는 비교적 적은 양의 열을 일정시간 차단해주는 단열재로 만든 내피의 복합구조로 되어 있다. 현재 최소한 세 가지 이상의 서로 다른 외피 설계개념이 사용되고 있다.

첫 번째는 가장 간단한 방법으로 유입되는 모든 열을 흡수할 수 있도록 충분한 질량을 가진 열용량이 큰 물질로 RV의 외피를 만들어서 내부의 페이로드를 보호하는 히트싱크 타입의 구조다. 열전도와 열용량이 큰 베릴륨-구리 합금 같은 금속을 사용한 뾰족한 RV가 초창기 ICBM과 중거리 탄도탄에 사용되었으며, 지금도 대기가 두터운 행성탐사용 착륙선에 이용되고 있다. 가파른 각도의 재돌입으로 고고도에서는 급격히 감속되고 밀도가 낮은 저고도에서는 비교적 느린 속도로 낙하하는 궤도에 적합하다. 그러나 히트싱크 타입 RV는 무게가 많이 나간다는 치명적 약점이 있다.

두 번째 방법은 복사냉각에 의한 열 차단 방법을 사용하는 외피 구조다. 재돌입궤도를 적절히 선정하면 가열된 공기로부터 RV로 열이 전달되는 속도가 RV 표면으로부터 방사되는 복사선 양보다



타이탄2 재돌입체

크지 않게 표면을 설계하는 것이 가능하다. 이 경우 RV의 외피는 열용량이 작은 금속으로 만든 얇은 막 형태로 설계된다. 히트싱크 타입의 RV의 재돌입궤도가 양력이 별로 없는 탄도인데 반해 복사 냉각 타입의 RV는 활공궤도를 택하는 것이 특징이라 할 수 있다.

세 번째는 용제 메커니즘을 이용하는 열 차단 방법이다. 물질의 온도가 수천에서 수 만도에 이르면 거의 모든 물질이 고체에서 기체로 승화하게 된다. 특히 물질의 표면이 초고온으로 가열된 공기와 같은 외부의 열 소스에 의해 표면부터 승화되는 현상을 용제현상이라고 부른다. 용제현상이 일어나는 온도는 물질마다 고유하고 용제현상이 일어나는 한 물질 표면 온도는 용제온도 이상으로 올라가지 않는다. 아무리 열을 많이 가해도 물이 있는 한 격렬하게 끓을 뿐이지 온도가 100℃ 이상 안 올라가는 것과 마찬가지로 이치다. 용제물질로 자주 쓰이는 실리카 페놀릭과 탄소-탄소 복합체의 용제 온도는 각각 2천700℃와 3천700℃다. 이들 물질로 용제물질층을 만들면 접촉하고 있는 공기의 온도가 아무리 높아도 용제물질이 남

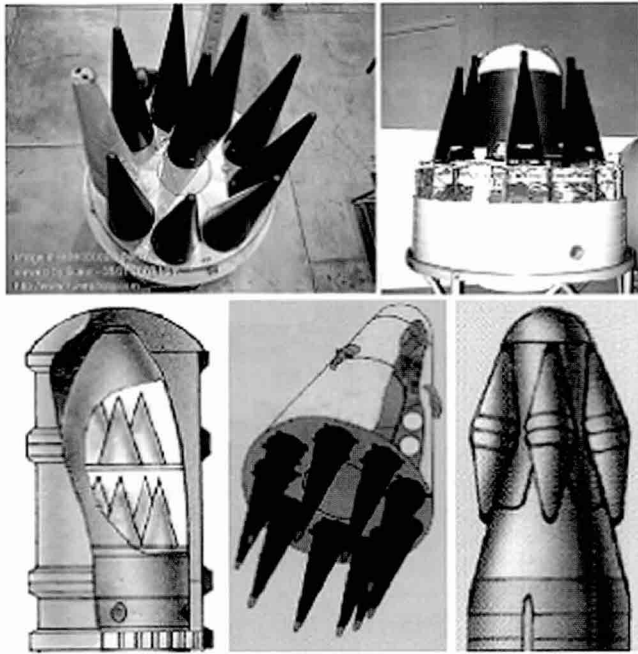
아 있는 한 표면의 온도는 2천700℃와 3천700℃를 넘지 않는다.

앞서도 언급했지만 끝이 뾰족한 원추꼴 RV에서 가열된 공기로 부터 RV 표면으로 열 유입은 층류보다 난류일 때 훨씬 크다. 원추의 옆면을 따른 공기흐름은 고고도에서는 층류지만 20~30km 고도에 이르면 난류로 바뀔 것으로 추정된다. 더구나 RV 표면에서 용제과정이 진행됨에 따라 표면이 거칠어지고 용제된 물질이 공기 흐름에 유입됨에 따라 층류가 난류로 바뀌는 경향은 더욱 가속될 수 있다. 용제과정에서 승화된 용제물질 가스는 공기흐름 속으로 빠른 속도로 팽창한다. 이러한 현상은 고온의 공기에서 RV 표면으로 유입되는 열을 효과적으로 차단하는 역할도 한다. 용제현상은 유입된 열을 용제잠열로 제거할 뿐 아니라 열 유입자체를 차단하는 효과도 크다. 무엇보다도 용제식 RV는 같은 열 차단 효과를 가지는 어떤 RV보다도 무게가 가볍다.

탄소는 용제온도가 3천700℃로 높고 열전도도 높기 때문에 시간이 지나면 열이 표면으로부터 탄소층을 통해 안으로 전도된다. 따라서 재돌입 과정에서 열이 가장 많이 발생하는 충돌 전 10~15초 동안 꽤 많은 양의 열이 탄소를 통해 페이로드로 유입될 수 있다. 특히 외부의 온도가 탄소의 용제 온도보다 낮아지면 문제는 더욱 심각해질 수 있다. 이러한 경우에 대비해 외피를 적당한 두께를 가진 외부의 탄소층과 내부의 실리카페놀릭층으로 다시 나누는 것이 훨씬 효과적일 수 있다.

용제식 외피를 가진 RV를 탑재하면 미사일은 최대사거리 탄도(MET)나 저궤도 탄도(DT) 중 어느 것이나 택할 수 있다. MET는 주어진 속도로 가장 멀리 비행할 수 있는 탄도로서 사거리에 따라 램베르트 각도가 달라진다. 만약 지구가 평평하고 중력 가속도가 일정하다면 초기위치에서 각도가 45도일 때 MET가 된다는 것은 우리가 이미 잘 알고 있는 사실이다. 탄도의 램베르트 각도가 MET의 램베르트 각도보다 작으면 DT가 되고 크면 고궤도 탄도(LT)가 된다. 물론 DT 궤도를 택할 경우 MET에 비해 재돌입 각도가 작아 재돌입시간도 길어지기 때문에 RV 내부로 전달되는 열도 많아진다.

페이로드 온도를 안전하게 유지하기 위해서는 더 두꺼운 단열재를 사용하는 것이 필수적이다. 이 경우 RV의 단열재(내피) 두께는 MET 때에 비해 몇 배 늘어나야 하기 때문에 RV의 직경 증가와 무게 증가가 부담이 되겠지만 다른 선택의 여지는 없다. 이러한 이유로 모든 현대식 다탄두 RV는 외피는 용제물질로 제작되었고, 정확도와 ABM 돌파를 위해서 빠른 속도로 지상까지 도달하도록 뾰족하고 긴 원추 형태로 제작되는 것이 특징이다.



RV배열-탄두부에 탑재한 다양한 RV배열방법

연료 소진과 동시에 람베르트 속도 · 위치 도달

다탄두 미사일의 탄두는 뾰족한 원뿔 형태의 RV 안에 내장되어 있다. 이러한 RV를 미사일 탄두부에 탑재하는 방법은 RV 배열 그림에서 보는 바와 같이 다양하다. 그림의 RV 배열방법 중 특히 우리의 관심을 끄는 그림은 윗줄 두 번째 사진과 아랫 줄 두 번째 그림이다.

윗줄 두 번째 사진은 트라이던트-I C4의 버스에 탑재된 RV 배열을 보여주고 있으며, 아랫 줄 두 번째 그림은 소련의 타이푼 잠수함에 탑재되었던 3단 고체 로켓 미사일 R-39의 버스를 보여주고 있다. 이들 그림에서 초장거리 SLBM의 RV는 탄두 장착면의 가장 자리에만 배열되고 버스의 가운데는 3단 모터를 배치하기 위한 공간으로 비워두고 있음을 알 수 있다. 이러한 방법으로 3단을 추가함으로써 SLBM의 높이를 별로 키우지 않고도 SLBM의 사거리를 대폭 늘리는데 성공할 수 있었다. 굳이 3단 모터가 필요 없는 액체 로켓 SLBM 경우도 미사일의 길이를 키우지 않으면서 연료 탑재를 극대화하기 위해 같은 방법을 사용하고 있다. 여기서 C4나 R-39와 같은 RV 배열을 취하는 경우 추력중단배기구(TTP) 방법으로는 로켓모터를 중단시킬 수가 없다. TTP가 작동할 때 분출하는 고온 고압가스가 RV를 파괴할 수 있기 때문에, 이러한 RV 배열 구조에

서는 연소 중인 3단 모터를 임의로 중지시키기 위해 TTP를 사용하는 것은 불가능하다.

C4나 D5에서는 3단-모터를 람베르트 속도에서 인위적으로 중단시키는 대신 3단 모터 연료가 소진되는 순간에 정확하게 람베르트 속도가 되도록 부스팅 단계의 궤도를 조작하여 잉여 에너지를 미리 소비한다. 이와 같은 궤도 조작은 유도 컴퓨터의 지시에 의해 수행되며, 표적지정 프로그램에 미리 입력하여 둔다.

TTP 혹은 에너지관리조정기법(GEMS)에 의해 마지막 단의 로켓모터가 연료 종료되고 나면 단일탄두 미사일인 경우 RV는 로켓에서 분리되고 표적을 향해 긴 자유낙하를 시작한다. 그러나 다탄두 미사일인 경우 PBV(버스 : 추진후온반체)는 연소가 종료될 때 첫 번째 표적에 대한 대략적인 람베르트 속도와 위치에 도달한다. 각 RV가 각자 표적을 정확히 겨냥하기 위해서는 이 시점에서 버스의 위치와 속도를 좀 더 정확한 정보로 경신할 필요가 생긴다. 이러한 위치와 속도 데이터 경신에는 미리 정해 놓은 별의 각도를 측정하여 위치를 측정하는 천측관성유도방법(SIG)이 주로 사용되었지만 근래에 와서는 항법위성(GPS 혹은 GLONASS)을 이용하는 GPS-관성항법도 차츰 사용되고 있다.

경신된 데이터에 따라 첫 번째 표적에 대한 람베르트 속도를 다시 정밀 계산하고 PBV는 자체에 내장된 주 모터를 이용해 첫 번째 RV를 방출할 위치로 이동하고 방향제어 로켓으로 자세를 제어한 후 RV를 살그머니 내려놓고 뒤로 빠진다. RV 방출 과정에서 PBV는 정밀 조종된 RV의 람베르트 속도에 영향을 끼치지 않도록 섭동을 최소화 하는 노력이 필요한 것은 두말할 필요가 없다. 이 단계에서 람베르트 속력에 1cm/s의 우연오차가 생긴다면 표적에서는 20m에 가까운 원형공산오차(CEP) 증가로 나타난다. 여기서 CEP는 여러 발의 미사일을 발사할 때 발사된 미사일의 50%가 낙하하는 원의 반경을 의미한다.

MET가 아닌 경우 초기 각도 오차는 때에 따라 더욱 심한 CEP 오차를 야기할 수도 있다. 첫 번째 RV 방출이 끝나면 PBV는 다시 주 모터를 이용해 두 번째 RV 방출을 위한 새로운 지점으로 이동하여 두 번째 표적에 필요한 람베르트 속도에 도달한다. 첫 번째와 같은 방법으로 두 번째 RV를 방출한다. 모든 RV가 방출될 때까지 버스는 같은 방법을 반복한다. (다음 호에 계속) **ST**



글쓰이는 서울대학교 물리학과 졸업 후 피츠버그대학교에서 박사학위를 받았으며, 국방과학연구소에서 30년 간 연구원으로 근무 후 2006년 정년퇴직했다.