

극초음속활강체의 특성과 군사적 함의: 한반도 내에서 활용될 경우를 중심으로

조홍일*

- I. 서론
- II. 극초음속활강체 활강궤적의 모델링 및 시뮬레이션
- III. 북한 극초음속활강체 시험발사 재현
- IV. 단거리 극초음속활강체의 특성
- V. 북한 극초음속활강체 개발의 군사적 함의
- VI. 결론

Abstract

Performance Analysis of Short Range Hypersonic Glide Vehicle and its Military Implications in Korean Peninsula

In this study, a computational model of trajectory of hypersonic glide vehicle(HGV) is presented. Using the model, performance of short range HGV applicable to Korean theater of operation is analyzed. There is a possibility that short range HGV could break or evade anti-ballistic missile defense system due to its maneuverability and low gliding altitude. However, HGV is not utterly immune to intercept because its speed is comparable with ballistic missiles. Characteristics of short-range HGV and North Korea's traditional strategies on ballistic missiles imply that North Korea could exploit HGV to threat or attack Republic of Korea in the future. To build response capabilities against HGV threat, Republic of Korea needs to enhance its WMD Response System capabilities such as space-based missile detection.

Key Words : Hypersonic Weapon System, Hypersonic Glide Vehicle, North Korea's hypersonic missile test,, WMD Response System, Missile Defense, M&S

* 한국국방연구원 연구위원, 합동군사대학교 합동고급과정, 이학박사, hongilcho82@gmail.com

I. 서론

1. 문제제기

2018년 3월 1일 러시아의 푸틴 대통령은 연례 국정연설을 통해 미국의 탄도탄요격미사일제한조약 탈퇴에 대한 대응으로 6종의 첨단 전략무기¹⁾를 개발하고 있다고 발표하였다. 그중의 하나인 극초음속무기체계(HWS: hypersonic weapon system) 아방가르드(avangard)는 최초로 전력을 앞둔 극초음속활강체²⁾(HGV: Hypersonic Glide Vehicle)로 알려져 전 세계의 비상한 관심을 모았다. 러시아 관영방송국(Sputnik, 2018.)이 선전한 컴퓨터 그래픽 영상에서 아방가르드는 마하 20 이상의 속력으로 활강(gliding)하여 약 6000km 거리의 목표를 타격할 수 있는 것으로 표현되었다. 푸틴 대통령은 극초음속활강체 아방가르드가 잠재적인 적국이 보유한 미사일방어체계의 대응을 회피할 수 있다고 주장하였다.(Ruptly, 2018. 12. 26.)

이렇듯 극초음속활강체는 기존 탄도미사일과 다르게 변칙적으로 기동하고, 높은 속력으로 목표에 더 빨리 도달하며, 더 낮게 활강하기에 적절한 대응이 어렵다고 알려져 있다. 일각에서는 극초음속활강체를 미사일전(missile warfare)의 양상을 획기적으로 바꿀 ‘게임체인저(game-changer)’로 인식하기 시작하였다.(The New York Times, 2020. 1. 2., The Opinion) 이러한 흐름에 따라 우리 군 안팎에서도 극초음속무기체계에 대한 다양한 수준의 분석이 수행되었으며, 극초음속무기체계의 개념, 개발현황 및 강대국 간 군비경쟁의 첨단에 있는 무기체계로서의 전략적 함의가 주로 논의되었다. 그러나 극초음속무기체계가 한반도 내에서 활용될 경우 어떠한 위협으로 다가올지, 그리고 군사적인 대응을 위해서는 어떠한 대비가 요구될지에 대한 실질적 논의는 다소 부족하였다. 이는 극초음속무기체계가 먼 미래의 무기체계로 여겨짐에 따라 이에 대한 위협인식이 다소 추상적이었다는 점에도 기인

1) 아방가르드 외에 러시아가 공개한 새로운 전략무기는 핵추진순항미사일, 신형ICBM RS-28, 핵수중드론, 극초음속순항미사일 및 레이저체계이다.

2) 이외에도 극초음속활공체, 극초음속비행체 등의 표기가 혼용되고 있다. 북한은 2021년 8차 당대회, 김정은 사업총화 보고에서 ‘극초음속활공비행전투부’라 지칭한 바 있다.

하였다고 볼 수 있다.

이러한 상황은 2021년 1월 북한이 8차 당대회에서 극초음속활강체의 개발을 공식적으로 언급함으로써 전환점을 맞았다.³⁾ 그리고 2021년 9월 28일 화성-8형 미사일이 시험 발사된 후 북한이 이를 ‘극초음속미사일’이라고 주장하면서 극초음속무기체계에 대한 위협은 현실로 다가오게 되었다. 2022년 1월에도 두 차례 연속적으로 새로운 ‘극초음속미사일’을 시험 발사함으로써 북한 극초음속무기체계의 위협은 더욱 가시화되고 있다.

그러나 현시점에서도 새로운 무기체계의 유형인 극초음속무기체계, 그중에서도 특히 극초음속활강체에 대한 이해는 피상적이고 모호한 상황이며 이에 따라 극초음속활강체의 위협 판단에 혼란이 있는 것이 사실이다. 2022년 1월 5일의 북한 미사일 시험발사에 대한 국방부와 전문가의 상반된 평가⁴⁾와 논란은 아직 우리 국방커뮤니티 안에서 극초음속활강체에 대한 이해가 명확히 정립되지 않았음을 방증하는 사례라고도 볼 수 있다.

극초음속활강체의 위협이 가시화된 만큼 우리군도 실제적인 대응 방향을 고민할 필요가 높아지고 있으며, 이는 무엇보다 극초음속활강체의 특성에 대한 명확한 이해를 요구한다. 본 논문에서는 한반도 안에서 활용될 수 있는 단거리⁵⁾ 극초음속활강체의 주요한 특성을 분석할 것이다. 이를 바탕으로 북한의 극초음속활강체 개발에 따른 군사적인 함의를 고찰함으로써 극초음속활강체 위협에 대한 군사적 대응 방향 설정에 기여하고자 한다.

3) ‘국방과학연구 부문에서 ...(중략).... 신형탄도로켓에 적용할 극초음속 활공전투부를 비롯한 각종 .. (중략)... 개별 연구를 끝내고 시험 제작에 들어가기 위한 준비를 하고 있다’(연합뉴스, 2021. 1. 9.)

4) 군 당국은 1월 7일 북한이 발사한 미사일이 “기동형 날개를 붙인 탄도미사일로 북한 주장처럼 극초음속미사일이 아니다”라고 밝힌 바 있다. 통상 극초음속미사일은 전체 비행 중 3분의 2 이상의 구간에서 속도가 마하 5를 넘지만 5일 북한이 발사한 미사일은 최고속도가 마하 6이고 이후에는 속도가 훨씬 떨어졌을 것으로 보이며 활공체(탄두부)가 원통형이라 수평비행이 불가하다는 이유에서였다.(중앙일보, 2022. 1. 7) 그러나 일부 전문가는 이러한 군의 발표에 대하여 미 육군이 개발한 장거리극초음속무기(LRHW) 역시 원뿔형이며, 이러한 형태의 탄두부도 우수한 제어능력을 보유하여 활공이 충분히 가능하기에 이를 극초음속활강체가 아니라고 예단하지 말라는 반박을 하였다.(중앙일보, 2022. 1. 10)

5) 본 논문에서 단거리 극초음속미사일은 탄도미사일 기준으로 SRBM급 이하(1000km 이하)의 사거리를 갖는 극초음속활강체를 의미한다. 북한이 한국을 향하여 극초음속활강체 사용을 위협하거나 실제로 활용한다면 한반도의 지정학적인 여건상 단거리 극초음속활강체를 활용할 것은 자명하다.

2. 선행연구 및 본 연구의 특징

극초음속무기체계의 일반적 특성과 군사·전략적 의미에 대한 분석은 다양한 문헌에서 확인할 수 있다. Speier et. al.(2017)는 극초음속무기체계의 개념적 특성과 함께 극초음속무기체계의 전 세계적 확산 현황 및 함의를 제시함으로써 극초음속무기체계에 대한 포괄적 이해를 제공하였다. Acton(2013)은 미국의 재래식신속범지구타격(CPGS: Conventional Prompt Global Strike) 무기체계로서 극초음속무기체계의 다양한 특성과 이의 전략적 함의를 분석하였다.

극초음속무기체계 중 극초음속활강체의 특성에 집중한 분석으로 주목할 만한 연구로는 Acton(2015)이 있다. Acton(2015)은 극초음속활강체의 특성을 수리적으로 모델링하였으며 다양한 군사적 효과를 도출하였다. Tracy와 Wright(2020) 역시 극초음속활강체의 특성을 모델링하고 이를 기반으로 극초음속활강체의 다양한 특성을 유도하였다. Tracy와 Wright(2020)는 세간에 알려진 극초음속활강체의 군사적 효과가 실제보다 과장된 측면이 있다는 인상적인 주장을 제시하였다. 극초음속활강체의 특성과 군사적 대응 방향을 국내에 소개한 연구로는 엄종선(2019), 조홍일 외(2020)가 있다. 특히, 조홍일 외(2020)는 극초음속활강체의 궤적을 모델링 및 시뮬레이션하고 이를 통하여 극초음속활강체의 기본적 특성을 유추한 바 있다. 북한이 현재 개발하고 있는 극초음속활강체에 대한 연구로는 신승기(2022), 이선희(2022)가 있으며 각각 북한 극초음속활강체의 기술적 성숙도 및 개발 의도에 대한 분석을 담고 있다.

본 논문은 극초음속활강체에 대한 정량적인 모델링 및 시뮬레이션⁶⁾을 통하여 극초음속활강체의 다양한 특성을 고찰할 것이다. 이는 Acton(2015), Tracy와 Wright(2020)의 접근법과 유사하다. 그러나 상술한 연구의 관심사가 주로 수천 킬로미터 이상급 사거리의 장거리 극초음속활강체에 집중되었다면 본 논문은 극초음

6) 본 논문의 모델링 및 시뮬레이션 방법은 조홍일 외(2020)의 방법을 기반으로 하되 새로운 요소를 추가하여 확장했음을 밝힌다. 기존 방법대비 본 논문의 방법에서 신규로 추가된 항목은 풀업(pull-up) 단계의 명시적 고려, 활강궤적의 제한요소인 최대열속한계 반영 및 종말단계에서 배면비행(inverted flight)을 활용한 낙하 등이 있다. 구체적인 모델링 및 시뮬레이션 방법은 II장에 서술하였다.

속활강체가 한반도 내에서 활용되었을 경우 발현되는 군사적 특성을 중심으로 한다는 점에서 차이가 있다. 그리고 본 논문은 단거리 극초음속활강체의 특성에 기초하여 북한이 극초음속활강체를 전력화하였을 경우 예상되는 위협을 분석하고 이에 대한 우리 군의 대응개념을 구상할 것이다.

또한, 본 논문은 극초음속활강체에 대한 방어적 측면에 논의를 한정할 것이다. 우리 군이 활용할 수 있는 공격무기체계로써 극초음속활강체의 적합도, 역할 등을 분석하는 것은 본 논문의 범위를 벗어난다. 마지막으로 본 논문에서 고찰하는 극초음속활강체의 다양한 특성은 현재 주어진 정보를 바탕으로 내릴 수 있는 ‘추정’의 의미를 지님을 미리 밝힌다. 이는 아직 극초음속활강체가 전력화하여 배치된 사례가 부족하여 실제 무기체계에 대한 분석이 제한되기 때문이다.

Ⅱ. 극초음속활강체 활강궤적의 모델링 및 시뮬레이션

1. 극초음속활강체의 개념

극초음속이란 음속보다 다섯 배 이상 빠른 속력을 말한다. NASA는 극초음속임무(hypersonic mission)를 크게 세 유형으로 분류한 바 있다.(NASA’s guide to hypersonic, 2021) 첫째는 지구궤도로부터의 재진입(re-entry from orbit)이다. 재진입은 마하 10 이상의 높은 속도로 시작하며 대기에서 발생하는 항력으로 인하여 지속적인 감속 과정을 거치게 된다. 또 다른 극초음속 비행방식은 공기흡입식 순항(air-breathing cruiser)이다. 이러한 유형을 따르는 비행체는 극초음속 속력의 하한인 마하 5~7수준의 속력으로 비행하며 공기를 흡입하는(air-breathing) 연소기관을 활용하여 추력을 발생시킨다. 마지막 극초음속 비행방식은 공기흡입식 가속(air-breathing accelerator)이 있다. 이러한 비행체는 극초음속으로 순항하는 비행체와는 다르게 추가적인 추력을 발생시켜 가속해야 하며 지구궤도(earth orbit)로 향하는 단일 추진체로 활용될 가능성이 있다.

극초음속임무 중 현재 군사적인 활용이 가시화되는 비행방식, 즉 극초음속무기체가 활용하는 비행방식은 지구궤도로부터의 재진입과 공기흡입식 순항방식이다. 통상적으로 공기흡입식 순항방식을 채택하는 무기체계를 극초음속순항미사일(hypersonic cruise missile)이라고 지칭하며, 지구궤도로부터의 재진입 방식을 활용하여 높은 속력을 획득하고 대기권 상층에서 활강하는 무기체계를 극초음속활강체(HGV 혹은 HBG: Hypersonic Boost-Glider)라고 부르고 있다. 극초음속활강체는 스크램제트, 램제트 엔진과 같은 공기흡입식 연소기관을 통해 비행 과정에서 추력을 발생시키는 극초음속순항미사일과 달리 대기권에서 동력 공급 없이 활강하는 것이 가장 중요한 특징이라고 할 수 있다. 활강체의 운동에너지는 활강 과정에서 지속적으로 감소하기에 요망하는 속력, 사거리를 달성하기 위해서는 발사초기에 높은 속력으로 가속하는 것이 필요하다. 따라서 극초음속활강체는 탄도미사일과 같이 로켓추진체(booster)에 탑재되어 발사되는 것이 일반적이다. Tracy와 Wright(2020)에 따르면 로켓추진체에서 분리된 극초음속활강체의 활강궤적은 다음과 같이 구분된다. 먼저, 추진체에서 분리된 후 활강체는 중력의 영향을 주로 받으며 상승 및 하강하게 되는데 이를 탄도비행단계라고 지칭한다.⁷⁾ 탄도비행단계 이후에는 대기권 상층에서 하강 속도를 늦추며 안정된 활강단계로 진입하는 폴업(pull-up) 단계가 이어지며 폴업을 마친 활강체는 대기권에서 지속적으로 양력을 발생시켜 목표 인근까지 비행하는 활강단계를 거치게 된다. 마지막 단계는 활강체가 목표를 향하여 낙하(dive)하는 종말단계이다.

상술하였듯 극초음속활강체의 비행개념은 비교적 명확히 기술될 수 있는 반면에, 널리 통용되는 극초음속활강체의 엄격한 정의⁸⁾ 혹은 요건은 찾기 어렵다. 오히려,

7) 원문에서는 지구 대기권 밖으로 상승하는 탄도비행단계와 지구 대기권으로 다시 하강하는 재진입단계(re-entry)를 구분하였다. 그러나 본 논문에서는 재진입단계까지를 포함하여 ‘탄도비행단계’라고 구분한다. 이는 북한 극초음속활강체 시험발사에서 볼 수 있듯이 대기권(약 100km 혹은 80km) 이상으로 상승하는 것이 극초음속활강체 비행을 위하여 반드시 필요한 것은 아니기 때문이다. 그리고 추진체 분리 후 상승 후 정점(apogee)을 지나 외기권 혹은 대기권 상층에서 하강하는 비행은 중력의 영향이 지배적이기에 이를 ‘탄도비행’이라고 지칭함에 무리가 없다고 판단하였기 때문이다.

8) 예를 들어, 활강단계가 전체 비행단계의 중 얼마만큼의 비율 이상이어야 하는지 혹은 전체 비행 과정 중 극초음속이 유지되어야 하는 시간과 거리의 비율이 어느 정도여야 하는지에 대한 정량적인 기준은 찾아보기 어렵다.

극초음속활강체의 본질적이며 고유한 특성은 유사한 무기체계인 탄도미사일 및 종말단계기동형미사일(MaRV: Maneuverable Reentry Vehicle)과의 비교·대조를 통하여 확인할 수 있다.

극초음속활강체는 탄도미사일에 탑재되어 발사되기에 초기 비행궤적은 탄도미사일과 유사하다. 그러나 탄도미사일의 추진체 연소 후 나머지 전 비행과정⁹⁾이 탄도궤도를 따르는 것과는 달리, 극초음속활강체는 추진체 연소 후 분리되어 폴업 단계부터 공기역학적으로 대기권에서 활강한다. 따라서, 같은 사거리를 갖는 탄도미사일¹⁰⁾에 비하여 극초음속활강체는 더 낮은 고도로 활강한다.

종말단계기동형미사일 역시 보통의 탄도미사일과 달리 공기역학적 비행을 수행한다는 점에서 극초음속활강체와 유사한 측면이 있다. 그러나 종말단계기동형미사일의 경우 대부분 탄도비행 궤적을 따르며 공기역학적 기동은 재진입 후 종말단계에서만 발생하는 반면, 극초음속활강체는 전체 비행기간에서 탄도궤적을 따르는 시간이 크지 않다는 점에서 차이를 발견할 수 있다.(Speier et. al., 2017., pp. 8~9) 다만 종말단계기동형미사일과 극초음속활강체의 구분은 다소 정성적이다. 미사일의 사거리가 짧아질수록, 즉 중간단계 비행(활강)시간의 비율이 낮아질수록, 종말단계기동형미사일과 극초음속활강체의 구분은 모호해진다.¹¹⁾

마지막으로 특기할 만한 점은 극초음속활강체를 규정하는 개념에서 ‘극초음속’이 유일한 특성이 아니라는 것이다. 앞서 탄도미사일 및 종말단계기동형미사일과의 비교에서도 확인하였듯이 극초음속활강체의 고유하고도 가장 중요한 특성은 상승단계 이후 대부분의 활강 시간에 대기권 상층에서 위치하며 공기역학적 제어를 통하여 무동력으로 활강한다는 것이다. ‘극초음속’, 즉 높은 속력은 극초음속활강체의 다른 주요 특성인 자유로운 기동성, 낮은 활강고도와 함께 활강과정에서 발현하는 하나의 특성이자 장점이라고 이해하는 것이 타당하다. 또한, 극초음속활강체

9) 추진체 연소 후의 상승단계, 중간단계 및 종말단계를 포함한다.

10) 탄도미사일의 정점고도는 일반적으로 사거리의 20~25% 수준에서 형성되는 것으로 알려져 있다.(K. Lee & K. Oh, 2016, p. 17)

11) 탄도미사일, 종말단계기동형미사일, 극초음속활강체, 극초음속순항미사일의 비행개념도는 이선희(2022, p. 3)에서 확인할 수 있다. 다만 해당 문헌에서는 종말단계기동형미사일을 ‘기동형재진입체미사일’로 표기하였음에 유의하라.

뿐만이 아니라 일반적인 탄도미사일도 극초음속으로 비행한다는 사실(Brockmann & Schiller. 2022. 2. 4.) 역시 극초음속활강체를 극초음속이라는 특성만으로 규정하기는 어렵다는 점을 말하고 있다.

2. 극초음속활강체 활강궤적의 수리적 모델링

극초음속활강체 활강궤적에 대한 수리적 모델링은 다양한 연구(P. Lu 2013; G. Li et. al., 2015; Acton 2015; Tracy와 Wright 2020)에서 확인할 수 있다. 본 논문에서는 G. Li et. al.(2015)에서 제시된 다음 식 (1)~(6)을 준용하여 극초음속활강체의 활강궤적을 모델링하였다.

$$\dot{V} = -D - g \sin(\theta) \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = [L \cos(\nu) + (V^2/r - g) \cos(\theta)] / V, \quad (2)$$

$$\dot{\sigma} = L \sin(\nu) / (V \cos(\theta)) + V \tan(\phi) \cos(\theta) \sin(\sigma) / r, \quad (3)$$

$$\dot{r} = V \sin(\theta), \quad (4)$$

$$\dot{\lambda} = -V \cos(\theta) \sin(\sigma) / (r \cos(\phi)), \quad (5)$$

$$\dot{\phi} = V \cos(\phi) \cos(\sigma) / r. \quad (6)$$

여기서 V , θ , σ , r , λ , ϕ 는 각각 속력, 비행경로각도(flight path angle: 국지적 수평면과 활행체의 속도벡터가 이루는 각도), 속도방향각도(velocity heading angle: 북쪽으로부터 시계방향을 향하여 측정한 속도벡터의 각도), 지구중심으로부터의 거리, 경도, 위도를 의미한다. 그리고 L 과 D 는 각각 극초음속활강체에 작용하는 양력과 항력 방향의 가속도로서 (7)에 의해 결정된다. C_L , C_D , ρ , S_M , m 은 각각 양력계수, 항력계수, 대기압, 활강체의 유효면적 및 질량을 의미한다.

$$L = \frac{\rho}{2m} C_L V^2 S_M, \quad D = \frac{\rho}{2m} C_D V^2 S_M \quad (7)$$

(1)~(6)의 ν 는 극초음속활강체의 경사각(bank angle)으로서 극초음속활강체의 받음각(angle of attack) α 와 함께 극초음속의 비행경로를 결정하는 통제변수이다. 받음각 α 는 비록 (1)~(6)에 명시적으로 등장하지 않으나 극초음속활강체의 양·항력 계수인 C_L 및 C_D 에 영향을 미침으로써 활강체의 기동을 조정한다.¹²⁾

3. 극초음속활강체 활강궤적의 시뮬레이션

극초음속활강체는 충분한 초기에너지를 확보하기 위하여 준중거리급(MRBM) 이상의 탄도미사일에 탑재되어 발사되는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 북한이 극초음속활강체 시험발사 시 활용하였던 미사일¹³⁾과 유사한 유형의 미사일에 탑재되어 극초음속활강체가 발사될 것임을 전제하였다. 이는 본 논문이 아방가르드와 같이 초장거리 사거리를 갖는 극초음속활강체를 분석하고자 하는 것이 아니라, 극초음속활강체가 상대적으로 종심이 짧은 한반도 전장환경에서 활용될 경우에 발현되는 특성을 분석하고자 하기 때문이다. 실제로 시뮬레이션에서 활용한 미사일의 주요 제원은 북한이 2022년 1월 극초음속활강체 시험발사 시 활용한 ‘극초음속 미사일 2형¹⁴⁾’에 대하여 분석한 자료(Savelsberg & Kawaguchi, 2022. 2. 16.)를 활용하였음을 밝힌다. 그리고 높은 속도와 낮은 정점고도¹⁵⁾를 달성하기 위하여 저각발사(depressed) 방식을 활용하였다. 상술한 전제사항을 바탕으로 극초음속활강체의 상승단계, 즉 로켓추진체에 의한 상승궤적은 통합방공작전분석모형

12) 양력계수와 항력계수는 일반적으로 받음각과 마하수(해당 비행체의 속력을 음속으로 나눈 값)의 함수이다. 따라서 양력계수 및 항력계수는 비행체의 받음각, 속력 및 고도에 영향을 받는다는 사실을 유추할 수 있다. 음속은 고도에 따라 변동하기 때문이다.

13) 북한이 2021년 9월 시험발사한 극초음속활강체는 화성-8형 미사일에 탑재되어 발사되었다. 화성-8형의 정확한 제원은 공개되어 있지 않으나 추진체 엔진이 IRBM급인 화성-12호와 동일한 것으로 보이기에(OneEarthFuture, 2021. 9. 27) 최소 MRBM급 이상의 사거리를 갖는 미사일로 추정된다. 또한, 2022년 1월에 북한이 시험 발사한 극초음속활강체 역시 MRBM급 이상의 미사일에 탑재된 것으로 알려져 있다(Van Diepen, 2022. 1. 18).

14) 공개된 공식명칭이 부재하므로 흔히 통용되는 명칭인 ‘극초음속미사일 2형’을 활용하였다.

15) 이는 공자입장에서 극초음속활강체의 장점을 최대화하기 위한 방법이다. 극초음속활강체는 무동력으로 사출되기에 초기 사출속도가 높을 수록 내부적인 에너지가 높아지며 이는 사거리 및 기동성을 확보하기에 더 유리한 조건을 형성한다. 그리고 낮은 정점고도로 사출될 경우 원거리에 위치한 지해상 탄도탄감시체계에 의한 탐지가 제한되기에 방자의 대응시간을 제한시킬 수 있다.

(EADSIM)¹⁶⁾을 활용하여 도출하였다.

로켓추진체의 연소종료 및 극초음속활강체 사출 이후의 활강궤적은 (1)~(6)을 수치적분(numerical integration)하여 도출하였다. 활강체의 공기역학적 활강궤적을 결정하는 대기모형은 1976년 판 미국표준대기¹⁷⁾를 활용하였다.

상술한 내용과 더불어 극초음속활강체의 활강궤적을 결정하는 핵심 요소는 활강체의 제원과 활강체의 궤적 유도방법이다. 본 논문의 활강궤적 시뮬레이션 시 적용한 방법은 다음과 같다.

가. 극초음속활강체의 제원

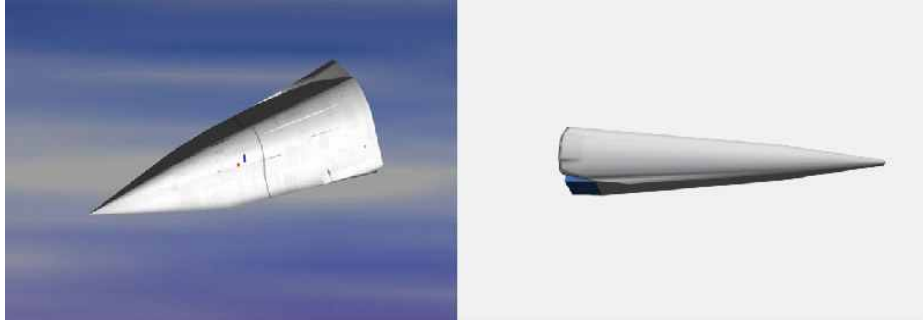
극초음속활강체의 특성을 다룬 여러 문헌(Jorris, 2007; P. Lu, 2013; G. Li et al., 2015; Tan et. al., 2019)과 마찬가지로 본 논문은 CAV(Common Aero Vehicle)를 활강체로 활용하였다. CAV는 공동 공기역학적 셀을 사용하여 다양한 자탄, 관통탄두 및 ISR 플랫폼과 센서를 운반할 수 있는 비행체를 일컫는다. 1994년과 1995년에 발표된 다수의 브리핑에서는 이를 극초음속무기(hypersonic weapon)라고 명명하였으나 1996년 TRW사에서 개최된 회의에서 그 명칭을 CAV로 변경하였다.(Philips, 2003, p. 2)

CAV 개념에 적합하다고 알려진 다양한 발사체 중 두 종류의 활강체 CAV-L과 CAV-H가 공개된 연구에서 주로 활용되고 있다.¹⁸⁾ 보잉사의 aMaRV에 기반한 CAV-L은 반원통(biconic)의 형상이며 CAV-H는 썰기(wedge)와 유사한 양력몸체(lifting-body) 형상으로 CAV-L 대비 더 높은 공기역학적 성능을 갖는다. CAV-L과 CAV-H의 양항비(lift to drag ratio)는 각각 약 1.8~2.4 그리고 약 2.2~3.5 수준인 것으로 알려져 있다.(Philips, 2003, pp. 11~12)

16) EADSIM(Extended Air Defense Simulation)은 미국 Teledyne&Brown에서 개발한 임무급(mission-level) 방공작전분석모형이다.

17) 미국표준대기(U.S. Standard Atmosphere): 지구 대기의 압력, 온도, 밀도 및 점도가 광범위한 고도에서 어떻게 변화하는지에 대한 정적 대기 모델로, 1958년 미국 표준대기확장위원회에서 처음 제정되었으며 62년, 66년 및 76년에 걸쳐 최신화되었다.

18) L과 H는 공기역학적 특성이 상대적으로 낮고(Low-lift), 높음(High-lift)을 의미한다.



*출처: Phillips, 2003, pp. 4~5

<그림 1> CAV-H(左)와 CAV-L(右)의 형상

물론 CAV가 개발 중이거나 전력화된 실제 극초음속활강체와 동일한 특성을 보유한다고 보기는 어렵다. 그러나 CAV는 그 제원이 공개되어 있기에 극초음속활강체의 특성을 유추함에 있어 활용이 용이할 뿐만이 아니라, 시험 결과가 일부 공개된 미국의 극초음속활강체 HTV-2와도 일부 특성이 유사¹⁹⁾하기에 현실적인 극초음속활강체의 비행궤적을 도출하기에 적합하다고 볼 수 있다. 그리고 CAV는 낮은 비행성능을 갖는 원통형상의 CAV-L과 상대적으로 발전된 썰기형상의 CAV-H로 구성되어있기에 다양한 수준의 극초음속활강체를 분석할 수 있다는 장점이 있다. 특히, 북한이 극초음속미사일-2형 발사를 통하여 원통형 극초음속활강체를 시험하는 동시에 화성-8형을 통해 썰기형 극초음속활강체를 전시하고 있는 현 상황에서 CAV-L/H는 북한 극초음속활강체의 현재 및 미래의 능력을 유추해 볼 수 있는 좋은 예시가 될 것이다. 본 논문에서 활용한 CAV의 제원은 기본적으로 Philips(2003)를 참조하였으며 활강궤적을 도출함에 있어 핵심이 되는 양·항력계수의 값은 Miller와 Rao(2021)가 근사한 방법²⁰⁾을 준용하여 적용하였다.

19) Tracy와 Wright(2020)에 따르면 HTV-2는 약 2.6의 양항비를 갖는 것으로 알려져 있다.

20) CAV-L/H 양력, 항력 계수의 원출처는 Philips(2003)이며 받음각 10, 15, 20도와 마하 3.5~23 범위의 양·항력 계수값을 표로 기술하였다. Miller와 Rao(2021)는 Philips(2003)의 양·항력 계수값 표를 활용하여 다양한 받음각, 마하수에 대해 양·항력 계수를 보간(interpolate)하였다.

나. 극초음속활강체의 활강단계별 궤적 유도방법

추진체에서 분리된 극초음속활강체는 첫 번째로 탄도비행단계를 거치게 된다. 이때 활강체는 외력의 작용 없이 중력과 공기저항에 의해 결정되는 궤적을 비행하며, 사출되는 방향으로 상승하여 정점고도에 달한 후 하강한다. 이 기간에는 공기역학적 기동이 요구되지 않으므로 받음각이 0이 되도록 설정하여 활강궤적을 도출한다.

탄도비행단계 이후 활강체가 적절한 고도로 하강하고 나면 활강체는 하강 속도를 늦추어 안정된 활강단계로 진입하는 폴업단계에 돌입한다. 이때 활강체는 고양력, 저항력을 발생시킬 수 있는 자세로 회전한다.(Acton, 2015, p. 198) 폴업단계는 역학적으로 복잡하기에 일반에게 공개된 극초음속활강체의 개략적인 제원만으로 폴업단계에 놓인 활강체의 활강궤적을 충실히 시뮬레이션하기 어렵다.(Tracy와 Wright, 2022, p. 3) 이러한 점을 반영하여 다양한 연구(Acton 2015; Tracy와 Wright 2020)에서 폴업단계는 개략적으로 모델링되거나 일부 연구(P. Lu. 2013; G. Li et. al. 2015; 조홍일 외. 2020)에서는 폴업단계를 활강단계와 명시적으로 구분하지 않기도 한다. 본 논문에서는 폴업단계 시작 시점부터 활강체가 지속적으로 양의 받음각을 유지하게 함으로써 하강속도를 낮추며 비행경로각도를 높이는 폴업단계를 수행하도록 설정하였다. 그리고 Acton(2015)과 마찬가지로 활강체의 비행경로각이 음의 값에서 상승하여 0에 이르렀을 때, 즉 하강하던 활강체가 하강을 멈추게 되었을 때 폴업단계가 종료된다고 보았다.

폴업단계 이후 활강체는 대기권 상층에서 무동력으로 목표 인근까지 활강하는 활강단계를 거치게 된다. 로켓추진체 연소종료 시점에서 이후의 궤적이 결정되는 탄도미사일과 달리, 극초음속활강체는 받음각과 경사각 변경을 통해 활강궤적을 상시 조정할 수 있다. 따라서 출발점과 도착지가 정해진 비행기가 취할 수 있는 경로의 수가 다양하듯이, 극초음속활강체가 목표 인근까지 활강하는 궤적은 무수히 많다. G. Li et. al.(2015)은 이러한 극초음속활강체의 활강방법이 종적기동(longitudinal maneuver mode)과 횡적기동(lateral maneuver mode)으로 구성된다고 분류하였다.²¹⁾

21) 종적기동과 횡적기동은 동시에 발생할 수도 있으며 개별적으로 발생할 수도 있다.

그리고 종적기동은 준평형기동(quasi-equilibrium glide mode)²²⁾ 및 종적스킵기동(longitudinal skip maneuver mode)²³⁾으로 나누어지며, 횡적기동은 횡적왕복기동(lateral weaving mode)과 횡적회전기동(lateral turning mode)으로 구분된다고 보았다. 본 논문에서는 극초음속활강체가 횡적회전기동과 함께 준평형기동 혹은 종적스킵기동을 통하여 목표에 접근함을 전제하고 이를 달성하기 위한 경사각, 받음각 조정방법을 적용하였다.²⁴⁾

활강단계를 통해 목표에 접근한 극초음속활강체는 마지막으로 종말단계에 진입한 후 목표에 낙하한다. 극초음속활강체가 미사일방어체계를 돌파(break)하여 목표에 성공적으로 탄착할 수 있을지의 여부는 종말단계에서의 활강궤적에 의하여 결정된다. 따라서 효과적인 낙하는 극초음속활강체의 임무 전 과정 중에서도 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다.(Tan et. al., 2019, p. 63495) 특히, 방자의 미사일방어체계에 의한 요격을 회피하기 위해서는 높은 속력을 유지하는 것이 중요하기에 Tan et. al.(2019)은 종말단계에서 극초음속활강체의 감속을 최소화하기 위한 방법으로 써 활강체의 배면비행(inverted flight)²⁵⁾을 제시하였다. Tracy와 Wright(2020) 역시 이러한 방법을 활용하여 활강체의 종말단계 비행궤적을 생성하였다. 본 논문에서도

- 22) 준평형기동이란 극초음속활강체가 준평형활강조건(quasi-equilibrium gliding condition)을 만족시키며 기동하는 상태를 말한다.(G. Li. et. al., 2015) 준평형활강조건이란 비행경로각 θ 가 0에 가깝고 ($\cos(\theta) \approx 1$), 그 변화율 역시 0에 가깝다($\dot{\theta} \approx 0$)는 전제하에 (2)를 바탕으로 $L \cos(\nu) = g - V^2/r$ 을 만족하는 것을 의미한다. 그리고 경사각이 0이고 횡기동이 이루어지지 않는 준평형활강조건 특별한 상황을 평형활강조건(equilibrium gliding condition)이라고 지칭한다. 임의의 시점에서 비행체의 상태와 경사각이 주어진다면, 준평형활강조건을 만족시키기 위한 양력방향의 가속도 L 을 구할 수 있으며 이를 기반으로 요구되는 받음각의 크기를 추정할 수 있다.
- 23) 준평형활강조건이 만족되지 않을 경우 극초음속활강체는 활강단계 동안 재상승과 하강을 반복하는 스킵(skip)궤적을 따라 활강하게 된다. 이는 활강체가 하강하면서 속력이 높아지고 공기밀도가 상승함에 따라 양력이 증가하고, 반대로 활강체가 재상승 시 속력이 감소하고 공기밀도가 하강함에 따라 양력이 감소하기 때문이다. 활강체의 받음각을 특정한 값으로 고정할 경우 전형적인 종적스킵기동이 발생하게 된다.
- 24) 필자가 아는 선에서, 횡적왕복기동은 극초음속활강체 시험발사 사례에서 활용되었다고 관찰된 적이 없기에 이를 시뮬레이션 시 제외하였다. Acton(2015)에 따르면 미국의 극초음속활강체 HTV-2는 시험발사 시 준평형기동으로 임무에 따라 횡적회전기동을 수행하거나(임무 B) 수행하지 않을(임무 A) 계획이었음을 알 수 있다. 그리고 북한이 2022년 1월 노출한 극초음속활강체 시험발사 요도에 따르면 북한은 종적스킵기동과 횡적왕복기동이 동시에 이루어지는 형태의 실험을 계획한 것으로 보인다.
- 25) 활강체의 자세를 뒤집어 양력이 지면으로 향하는 기동방식을 일컫는다.

상기한 여러 연구에서와 마찬가지로 종말단계의 활강체가 배면비행을 수행하여 목표에 낙하하도록 하였다.

본 논문에서 적용한 활강궤적 도출방법은 일종의 중해상도(mid-fidelity) 모델링 및 시뮬레이션(M&S)으로서 실제 활강체의 궤적을 결정하는 다양한 공학적 고려요소는 활강궤적 조정 시 반영하지 않았음을 밝힌다. 다만, 활강체의 현실적인 궤적을 도출하기 위해서, 활강체의 기동을 제한하는 핵심 요소인 공력가열(aerodynamic heating)은 시뮬레이션의 제한조건으로 고려하였다.²⁶⁾ 이를 위하여 활강 시 활강체가 감내할 수 있는 최대열속(heating transfer rate)²⁷⁾을 설정하고 이를 고려하여 해당 한계를 초과하지 않는 범위 내에서 기동이 이루어지도록 활강체의 받음각 및 경사각을 조정하였다. 물론 현재 무기화된 극초음속활강체에 대한 정보를 획득할 수 없기에 최대열속값에 대한 구체적인 정보 역시 부재한 상황이다. 다만, 본 논문에서는 극초음속활강체의 최적화된 기동방법을 설계하기 위한 다양한 연구(Rizvi, He 및 Xu 2015; Thomas, Marayikkottu 및 Levin 2022)에서 일반적으로 준용하고 있는 최대열속 $4MW/m^2$ ²⁸⁾을 한계로 설정하였다.

Ⅲ. 북한 극초음속활강체 시험발사 재현

제8차 당대회에서 ‘극초음속전투활공부’의 개발을 천명한 이래 지금까지 북한은 극초음속활강체라고 주장하는 미사일을 세 차례 시험 발사하였다.²⁹⁾ 특히, 2022년

26) CAV의 성능을 제한하는 가장 주요한 요소 중 하나는 기동 시 발생하는 열에 대한 방호체계(TPS: thermal protection system)라고 알려져 있다. CAV는 받음각이 10도가 되었을 때 양항비(L/D)가 최대가 되나, 열방호적 측면을 고려하여 일반적으로 받음각을 15~20도 수준으로 유지하며, 최대 비행시간도 약 800초 수준으로 제한한다(Phillips. 2003. p. 8).

27) 열속은 단위 면적당 열에너지의 전달률을 의미하며 단위는 W/m^2 를 활용한다. 본 논문에서는 Thomas et. al.(2022)에서 제시한 열속 계산법을 준용하였다. 이때 열속은 활강체의 첨단(leading edge)에 가해지는 값을 기준으로 하였다.

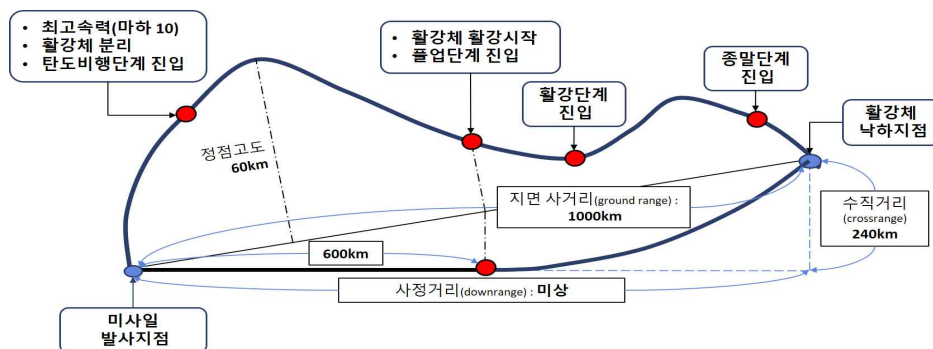
28) Rizvi et. al.(2015)에 따르면 탄소섬유(carbon-carbon composite)는 최대 2900K까지 견딜 수 있으며 이는 대략 열속이 $4MW/m^2$ 이하인 경우에 해당한다.

29) 2021년 9월 28일에는 북한이 극초음속미사일이라고 주장하는 화성-8형에 대한 시험발사가 있었다. 양력몸체(썰기)형의 화성-8형과는 달리 원뿔형의 활강체를 활용한 극초음속미사일-2형(가칭)은

1월 11일에 수행한 최근의 활강체 시험 발사는 김정은이 직접 참관한 것으로 알려져 더욱 이목을 집중시켰다. 북한은 해당 시험 발사를 통하여 “극초음속활공비행전투부의 뛰어난 기동능력이 더욱 뚜렷히 확증” 되었다며 극초음속활강체 개발의 ‘대성공’을 내외에 선포하였다.(연합뉴스, 2022. 1. 12) 합참 역시 11일에 “북한이 발사한 미사일이 극초음속미사일임을 확인하였으며 1월 5일에 발사한 탄도미사일보다 기술적으로 진전된 것으로 평가하고 있다”라고 밝혔다.(연합뉴스, 2022. 1. 11)

본 논문에서 제안한 극초음속활강체 활강궤적의 모델링 및 시뮬레이션 방법을 활용하여 2022년 1월 11일의 북한 극초음속활강체 시험발사 궤적을 재현하고자 한다.

먼저 북한과 우리군의 발표를 통하여 1월 11일에 발사된 활강체의 활강궤적을 추정하였다. 북한은 “발사된 미사일로부터 분리된 극초음속활공비행전투부는 거리 600km 계선에서부터 활공 재도약하였으며 초기발사방위각으로부터 목표점 방위각 방향으로 240km 강한 선회기동을 수행하여 1000km 수역의 설정표적을 명중하였다”라고 언급하였다. 그리고 우리군의 발표에 따르면 북한 활강체의 비행거리는 700km이상, 최대고도 약 60km, 최고속도는 마하 10 내외인 것으로 추정된다. 또한, 북한이 관영매체를 통하여 노출한 미사일 활강궤적의 개요도(중앙일보, 2022. 1. 13)로부터 활강체가 활강단계에서 준평형기동이 아니라 종적스킵기동을 하였다는



※ 출처: 북한 극초음속미사일 시험발사(2022. 1. 11)에 대한 언론보도를 활용하여 필자가 직접 작성

<그림 2> 북한 극초음속미사일 2형 시험발사 활강궤적 개요도

2022년 1월 5일 및 11일에 시험 발사되었다.

사실을 확인할 수 있다. 이는 북한의 미사일 활강궤적 개요도에서 활강단계의 활강체가 지면에 평탄하게 기동하는 것이 아니라 재상승과 하강을 반복하는 형태로 기동하는 것이 관찰되기 때문이다. 상술한 내용을 종합하여 활강체의 활강단계별로 활강궤적을 정리하면 <그림 2>와 같다.

본 논문에서 제안한 극초음속활강체 활강궤적의 모델링 및 시뮬레이션 방법을 활용하기 위하여 설정한 세부 조건은 다음과 같다.

우선 Savelsberg와 Kawaguchi(2022)의 분석을 활용하여 극초음속활강체를 탑재하고 상승하는 로켓추진체를 구성하였다. 해당 분석에 따르면 극초음속미사일-2형은 화성-12와 유사한 엔진을 활용하였으나 그 크기와 길이가 다소 축소된 개정판으로 추측된다. 시뮬레이션 시 적용한 로켓추진체의 주요 제원은 <표 1>과 같다.³⁰⁾ 그리고 북한이 2021년 9월 발사한 화성-8형과는 달리 2022년 1월에 발사한 극초음속활강체는 원통형 형상이다. 일반적으로 원통형 형상은 썰기형 활강체보다 양항비가 낮고 이에 따라 최대 사정거리(downrange) 및 수직거리(crossrange) 역시 보다 단거리에 형성되는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 재현에서도 CAV-L/H 중 원통형과 유사하며 양항비가 낮은 CAV-L을 활용하였다.

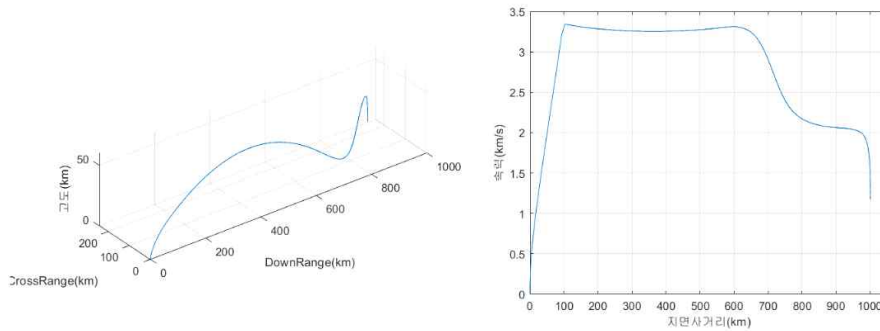
마지막으로, 본 재현에서 적용한 활강궤적의 유도 방법은 아래와 같다. 우선, 북한의 발표와 마찬가지로 활강체의 지면사거리(ground range)가 600km가 넘기 시작한 시점부터 양의 반음각을 발생시켜 폴업단계에 진입하도록 하였다. 북한의 개요도에서 준평형기동이 아닌 종적스킵기동이 관찰되었기 때문에 활강단계에서는 이를 재현하기 위하여 반음각의 크기를 고정하여 활강체의 재상승이 발생하도록 유도하였다. 또한, 활강체의 선회기동을 재현하기 위하여 일정한 경사각을 설정함으로써 목표한 수직거리인 240km에 도달할 수 있도록 하였다. 마지막으로 계획된

<표 1> 북한 극초음속미사일 로켓추진체 재현 모의를 위한 주요 제원

동체 길이(m)	9	발사체중량(kg)	12,900
직경(m)	1.37	연료중량(kg)	10,800

※ 출처: Savelsberg & Kawaguchi(2022)

30) 미사일의 항력계수는 김지원과 권용수(2016)의 방법을 준용하여 도출하고 적용하였다.



※ 출처: 필자가 직접 작성

<그림 3> 북한 극초음속활강체 시험발사 재현결과(左: 활강궤적, 右: 속도)

지면사거리인 1000km에 근접한 시점에서 배면비행을 시행하여 종말단계에 진입하고 목표에 낙하하도록 활강체를 유도하였다.

본 재현의 결과로 도출된 극초음속활강체의 활강궤적은 <그림 3>의 좌측과 같다. 우리군에서 확인한 바와 같이 정점은 약 고도 60km에서 형성되었으며, 사거리 600km를 지난 지점부터 양력을 발생시켜 하강 속도를 둔화시키고 약 700km 지점에서 재상승을 시작하며 활강단계에 진입하는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 양력이 발생하기 시작한 시점부터 선회기동을 시작하여 최종적으로 수직거리 약 240km 지점에 있는 목표물에 낙하하는 것도 확인할 수 있다.

<그림 3>의 우측은 활강체의 속력을 나타낸 것이다. 합참의 발표와 마찬가지로 최대속력은 발사체 연소종료 후 마하 10에 달한다.³¹⁾ 그리고 양력이 본격적으로 발생하는 시점인 600km 지점에서부터 동시에 증가하는 항력³²⁾으로 말미암아 활강체의 속력이 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 최종적으로 활강체가 종말단계에 진입하게 되면 고도가 낮아지며 많은 항력이 발생하여 속력이 급격히 감속된다. 그럼에도 활강체의 속력은 목표 탄착 인근 시점을 제외한 대부분의 활강궤적에서 1.5km/s 이상으로 형성된다. 다시 말하여, 본 재현의 활강체는 대부분의 활강궤적에

31) 최고속력은 3.34 km/s 으로 도출되었으며, 지상(섭씨 25도)의 음속(343 m/s) 기준으로 마하 9.8 수준이다. 실제 고도(35km)와 그에 따른 대기온도를 반영한 마하수는 약 10.3이다.

32) 양력과 마찬가지로 항력 역시 활강체의 받음각이 커질수록 단조증가하는 특성이 있다.

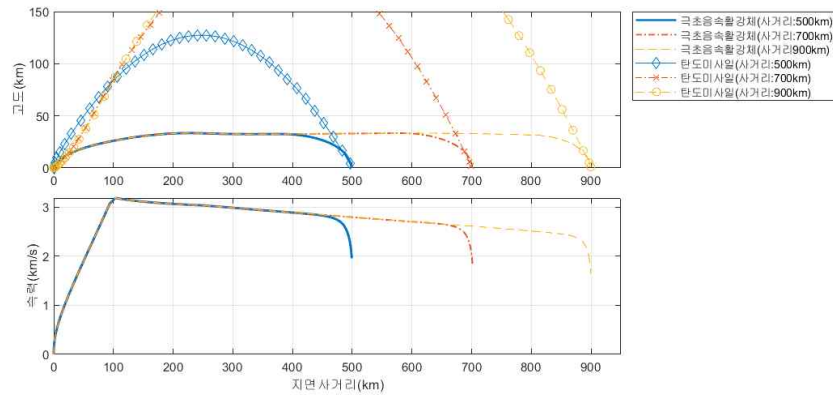
서 마하 5이상인 극초음속으로 활강한다. 이는 짧은 종심의 전장환경인 한반도 내에서도 극초음속활강체가 활용될 수 있다는 가능성을 보여준다.

다만, 이러한 재현을 근거로 북한이 2022년 1월 11일에 발사한 발사체가 북한 주장처럼 ‘극초음속활강체’라고 단정하기는 어렵다. 본 재현 시 활용한 활강체 제원은 북한이 시험발사 시 활용한 활강체의 공학적 특성을 분석하여 작성된 것이 아니라, 공개된 문헌에서 극초음속활강체의 특성을 연구할 때 주로 활용되는 활강체인 CAV를 기반으로 하였기 때문이다. 그리고 본 재현은 북한의 극초음속미사일 시험발사 결과에 대한 발표가 사실이라는 가정하에 수행되었음에 유의할 필요가 있다.

오히려 본 재현은 본 논문에서 제안한 극초음속활강체 모델링 및 시뮬레이션 방법이 북한이 주장하는 시험발사 활강궤적을 유사하게 재현해 낼 수 있다는 사실을 말하고 있다. 다시 말하여 본 논문의 방법이 한반도 내에서 활용될 수 있는 극초음속활강체, 즉 단거리 극초음속활강체의 특성을 전망할 때 유용하게 활용될 수 있음을 시사한다.

IV. 단거리 극초음속활강체의 특성

극초음속활강체는 초기발사방식, 사거리 및 속력에 있어 탄도미사일과 유사한 유형의 무기체계이다. 따라서 극초음속활강체의 군사적인 특성은 탄도미사일과의 비교를 통하여 가장 선명하게 드러난다. 본 논문에서도 단거리 극초음속활강체의 핵심 특성인 기동성 및 속력을 유사한 사거리의 단거리 탄도미사일(SRBM)과 비교하여 설명할 것이다. 본 장에서 논할 극초음속활강체의 다양한 특성은 II장에서 기술한 모델링 및 시뮬레이션을 바탕으로 하였음을 밝힌다.



※ 출처: 필자가 직접 작성

<그림 4> 단거리 극초음속활강체의 지면사거리 별 고도(上) 및 속도(下)

1. 기동성

탄도미사일은 원거리에 화력을 투사할 수 있는 가장 빠른 수단 중 하나이며, 이러한 장점은 방자가 탄도미사일에 대한 효과적인 대응 및 요격을 하기 어렵게 만드는 근본적인 이유가 된다. 그러나 상승단계 이후의 비행궤적은 변동성이 적기에 방자는 이러한 특성을 활용하여 탄도미사일의 낙하지역을 예측하고 요격을 수행할 수 있다. 잘 알려진 바와 같이 극초음속활강체는 빠른 속도로 활강하면서 동시에 탄도미사일과 다른 비정형적인 비탄도기동을 수행할 수 있기에 방자의 대응을 더욱 어렵게 만든다. 이러한 변칙적 기동은 일반적으로 알려진 대륙간급(ICBM) 사거리의 극초음속활강체 뿐 아니라, 한반도 내에서 활용될 수 있는 단거리 극초음속활강체에서도 충분히 위협적으로 실현될 수 있다.

<그림 4>는 500, 700 및 900km에 위치한 목표를 향하여 활강하는 극초음속활강체의 활강고도와 속력을 표기한 것이다. 그리고 비교의 목적으로 같은 사거리를 갖는 일반적 탄도미사일의 비행고도를 같이 표기하였다. 활강체는 저각발사방식으로 발사된 발사체에 탑재되어 연소종료 후 사출되었으며, 지면사거리 기준으로 약 250km

이후부터 풀업기동을 시작하도록 하였다. 이후 활강단계에서는 준평형활강기동으로 지면과 수평하게 활강을 한 후 목표 인근에서 종말단계로 진입하여 목표를 향하여 낙하하도록 하였다. 비교목적으로 병기한 일반 탄도미사일의 궤적은 Schiller와 Schmucker(2016)가 분석한 스커드-ER의 제원에 기반하였다. 해당 궤적은 통합방공 작전분석모형을 활용하여 도출하였으며, 발사방식은 최소에너지방식을 적용하였다.

<그림 4>에서 볼 수 있듯이, 상이한 목표에 탄착하는 극초음속활강체라 하더라도 활강체가 종말단계, 즉 목표로 낙하를 시작하기 이전 시점까지는 궤적의 특성인 고도나 속력을 확인하여 이를 구분하기 어렵다. 이는 다른 지점의 목표를 향한 탄도미사일 궤적들이 상승단계 이후부터 확연히 구분되는 것과 대조적이다. 극초음속활강체의 이러한 기동적 특성은 미사일대응체계³³⁾의 능력을 교란할 가능성이 높다. 통상적으로 미사일 탐지, 방어체계는 비행체의 궤적을 분석하고 탄착점예측(impact point prediction)을 통하여 대응·교전 필요성 및 가용성을 판단하기 때문이다. 특히, 미사일방어체계의 유형 중 방어영역이 넓고 교전고도가 높기에 종말단계 하층방어체계 대비 상대적으로 이른 교전 결심이 요구되는 종말단계상층방어체계 및 중간단계요격체계의 대응이 더욱 제한될 것으로 전망된다.

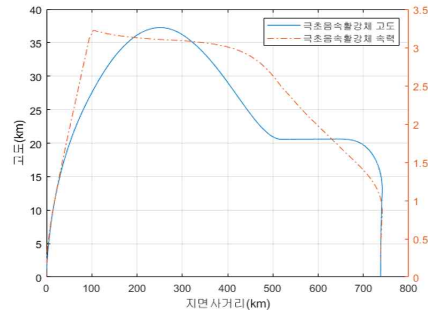
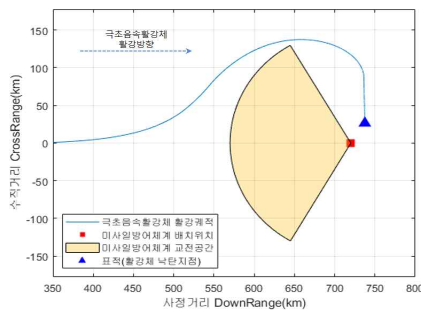
극초음속활강체의 횡적인 기동도 미사일대응체계의 대응능력을 교란할 수 있다. 일반적인 탄도미사일은 최초로 발사된 방향인 사정거리(downrange) 방향으로만 비행한다. 따라서 보통의 탄도미사일에 대응하도록, 즉 주된 위협방향에 대비하여 최고의 능력을 발휘하도록 설계된 미사일대응체계는 극초음속활강체를 원활히 탐지하거나 교전하지 못할 수도 있다.³⁴⁾ 특히, 극초음속활강체는 횡적인 기동으로 미사일방어체계의 교전공간³⁵⁾을 능동적으로 회피할 수도 있을 것으로 보인다. 하나의 예시로서, 미사일방어체계의 교전공간을 우회하여 방어체계의 방어제공지역(defended area)에 위치한 목표에 낙탄하는 극초음속활강체의 활강궤적이 <그림

33) 본 논문에서의 미사일대응체계란 발사된 적 미사일의 탐지, 식별, 결심, 교전(방어) 및 소극방어에 관련된 총체적 전력을 의미한다.

34) 예를 들어, 패트리엇 미사일방어체계의 경우 포대(battery) 주사격방향(PTL: Primary Target Line) 설정이 매우 중요하다(U.S. Headquarters department of the army, 2002. p. 52).

35) 교전공간(battlespace)은 미사일방어체계의 유도탄이 성공적으로(일정 확률 이상으로) 탄도미사일을 요격할 수 있는 공간상 지점(interception point)들의 집합을 의미한다.

5>에 표기되어 있다. 활강체는 발사된 후 약 300km 지점부터 폴업기동으로 양력을 발생시키며, 동시에 수직거리(crossrange)로 나아가게 하는 횡기동을 통하여 좌측 그림에 표시된 미사일방어체계³⁶⁾의 교전공간을 우회하기 시작한다. 이후 사정거리가 약 550km에 미치는 시점부터 횡기동의 방향을 반대로 변환하여 최종적으로 미사일방어체계 후방에 위치한 목표에 낙탄한다. 횡기동을 할 수 없는 일반적인 탄도미사일의 경우 <그림 5>의 목표에 낙탄하기 위해서는 반드시 미사일방어체계의 교전공간을 관통해야 하며, 방자의 미사일방어체계에 의한 요격의 위험을 감수해야만 한다. 따라서 <그림 5>에서 표현된 극초음속활강체의 횡기동은 활강체가 성공적으로 목표에 낙탄할 수 있는 확률을 높이는 중요한 특성이라고 볼 수 있다.



※ 출처: 필자가 직접 작성

<그림 5> 극초음속활강체의 횡기동을 활용한 미사일방어체계 교전공간 회피 예시
(左: 활강궤적 부감도, 右: 지면사거리별 고도 및 속력)

다만 활강체의 지속적인 횡기동은 다량의 항력을 유발하며 이에 따른 속력의 감소는 필연적이다. <그림 5>의 우측 그림에서 볼 수 있듯이 지속적인 횡기동을 수행한 활강체는 급격하게 속력이 감소한다. 유사한 사거리인 700km에 위치한 목표에 낙탄하였으나 횡기동을 수행하지 않았던 <그림 4>의 활강체가 낙탄 직전까지

36) <그림 5>의 미사일방어체계는 전력화되거나 전력화예정인 실제의 미사일방어무기체계가 아니며 설명을 위하여 임의로 설정한 가상의 체계임을 밝힌다. 미사일방어체계 교전공간의 반지름은 150km이며 방위각은 120도로 설정하였다. 이러한 교전공간은 일반적으로 종말단계상층방어체계의 교전공간과 유사한 수준이라고 볼 수 있다.

2km/s의 속력을 유지할 수 있었던 것에 반하여, <그림 5>의 활강체는 낙탄 전 100km 지점부터 마하 5 이하의 속력으로 활강하는 것으로도 알 수 있다.³⁷⁾ 이렇게 저하된 활강체의 속력은, 낙탄 목표 근방에 종말단계하층방어체계가 배치되었을 경우, 방어체계에게 요격의 기회를 부여할 가능성이 있다.

2. 속력

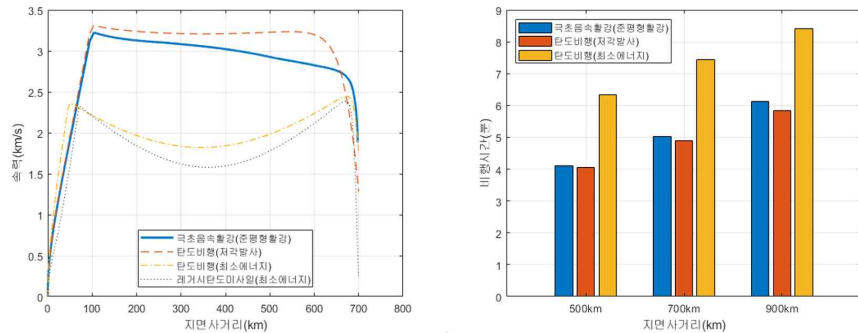
잘 알려진바와 같이 극초음속활강체는 대부분의 활강기간 동안 음속의 5배가 넘는 속력으로 목표에 빠르게 접근한다. 이러한 속력은 방자의 적절한 대응을 제한하는 중요한 장점이 될 수 있다. 특히, 아음속 및 초음속의 일반적인 순항미사일에 비교하면 극초음속활강체는 월등히 신속하게 목표에 화력을 투사할 수 있는 수단이다. 다만 극초음속활강체는 주로 탄도미사일과 비교되는 전략적 무기체계이기에 극초음속활강체의 속력 역시 유사한 사거리의 탄도미사일과 비교하는 것이 의미를 지닌다고 볼 수 있다. 따라서 500, 700 및 900km 사거리를 갖는 극초음속활강방식과 일반적인 탄도비행방식의 속력과 비행시간을 비교하였으며 이를 <그림 6>에 도식하였다.³⁸⁾ 이러한 분석을 통해 확인할 수 있는 사항은 다음과 같다.

<그림 6>의 좌측에서 볼 수 있듯이 공기역학적으로 폴업 및 활강기동을 하는 극초음속활강방식과 더불어 일반적인 탄도비행 방식 역시 대부분의 비행기간 동안 마하 5이상의 속력을 형성한다. 이는 기존의 탄도미사일도 마찬가지로 대부분의 비행기간 동안 극초음속의 속력으로 목표에 접근한다.

그리고 극초음속활강방식은 최소에너지 방식의 탄도비행보다 더 높은 속력을, 저각발사방식의 탄도비행과는 유사한 수준의 속력을 형성하는 것을 알 수 있다.

37) 다만, <그림 5>의 활강체는 최대의 사거리를 달성하기 위하여 낙하단계에서 배면비행을 생략하였음을 밝힌다. 배면비행을 적용하더라도 활강체는 미사일방어체계의 교전공간을 회피하며, 최종속력이 <그림 5> 대비 다소 증가하기는 하나 <그림 4>보다는 낮게 도출된다.

38) 비행방식(극초음속활강/탄도비행)이 미사일 속력에 미치는 영향을 확인하기 위하여 미사일추진체와 탄두(활강체)는 동일하게 설정하였다. 다만 비교의 목적으로 잘 알려진 기존의 중단거리 탄도미사일(스커드-ER)의 속력도 병기하였다. 이는 <그림 6> 좌측에서 ‘레거시탄도미사일’이라는 항목으로 도식되어 있다.



※ 출처: 필자가 직접 작성

<그림 6> 극초음속활강방식 및 일반적 탄도비행방식의 비행속력 및 시간

높은 고도에서 장시간 체공(coast)하는 최소에너지 방식의 탄도비행방식은 연소종료 시점이 빠르고 탄두 사출 시의 속력이 상대적으로 저각발사방식 대비 낮기에 이후의 비행기간에서 더 낮은 속력이 형성된다. 극초음속활강체의 경우 저각발사방식으로 발사되기에 초기 사출속도는 저각발사방식의 탄도비행과 유사하나 활강기간동안 대기권 상층에서 지속적인 항력에 노출된다. 이러한 이유로 더 높은 고도에서 비행하여 더 적은 항력을 경험하는 저각발사방식 대비 낮은 속력을 형성하게 된다. 다만, 저각발사 탄도비행은 종말단계에 이르면 얕은(shallow) 각도로 목표에 접근하며 대기의 항력에 노출되어 급격한 속력감소가 발생하는 반면에 극초음속활강 방식은 배면비행을 통해 목표에 효율적으로 낙하하기에 종말단계에서의 속력감소가 두드러지지 않는다.(Tracy와 Wright. 2020. pp. 13~14) 이러한 점은 종말단계에서 급격한 낙하궤적을 보이는 최소에너지발사 탄도비행의 최종속력³⁹⁾과 극초음속활강체의 최종속력이 유사하게 형성되는 이유가 된다. 상술한 내용을 종합하면, 극초음속활강체의 속력은 상승단계 및 활강단계에서는 저각발사 탄도비행의 속력과 유사한 수준이며 종말단계에서는 최소에너지방식 탄도비행의 속력에 수렴하게 됨을 알 수 있다. 마지막으로 이러한 특성은, <그림 6>의 우측에서도 확인할 수

39) 급격한 각도의 궤적으로 낙하함에 따라 대기의 항력에 노출되는 시간이 최소화되며 속력의 감소 수준이 가장 낮게 형성된다.

있듯이, 저각발사 방식의 탄도비행이 가장 먼저 목표에 도달하며 뒤를 이어 극초음속활강체, 그리고 마지막으로 최소에너지 방식의 탄도비행이 가장 늦게 목표에 도달하게 만드는 요인이 된다.

상술한 분석은 단거리 극초음속활강체 역시 장거리 극초음속활강체와 마찬가지로 동 사거리 탄도미사일과 유사한 수준의 속력 및 비행시간을 갖는다는 사실을 시사한다. 따라서, 일부에서 말하는 바와 같이 극초음속활강체가 일반적인 미사일 대비 더욱 빠른 속력인 ‘극초음속’으로 비행하기에 미사일대응체계의 대응이 제한된다는 분석은 정확한 표현이라고 보기 어렵다.

3. 활강고도

극초음속활강체의 주요한 특징 중 하나는 낮은 활강고도이다. 탄도미사일의 경우 로켓추진체에 의해 동력을 공급받는 상승단계 후 목표까지 무동력으로 탄도비행하기에 목표와의 거리가 증가할수록 정점고도 역시 상승하게 된다. 탄도미사일의 정점고도는 일반적으로 사거리의 20~25% 수준에서 형성된다고 알려져 있다.(K. Lee와 K. Oh, 2016, p. 17) 따라서 500km 이상의 사거리를 갖는 탄도미사일은 일반적으로 외기권에서 중간단계 비행과정을 수행한다. 중간단계의 탄도미사일은 높은 고도에서 비행하기에 지·해상에 위치한 미사일탐지체계가 이를 탐지하기 용이하며, 비행경로의 변동성이 적기에 SM-3와 같은 중간단계미사일방어체계가 요격할 수 있다. 이와는 대조적으로 극초음속활강체는 보통의 탄도미사일 대비 낮은 고도인 대기권 상층에서 활강하여 장거리에 있는 목표에 접근한다. 따라서 지·해상 미사일탐지체계에 잘 노출되지 않으며 중간단계미사일방어체계에 요격의 기회를 허용하지 않은 것으로 알려져 있다.

한반도 내에서 활용될 가능성이 높은 단거리 극초음속활강체 역시 유사한 사거리의 탄도미사일 대비 낮은 고도로 활강하여 목표에 도달한다. <그림 4>에서 볼 수

40) 수천 킬로미터 이상의 사거리를 갖는 탄도미사일 및 극초음속활강체의 속력 및 비행시간 비교는 Tracy와 Wright(2020)에서 확인할 수 있다.

있듯이 500~900km 사거리의 탄도미사일이 100km 이상의 고도인 외기권으로 상승한 후 대기권에 재진입하는 것과 다르게 극초음속활강체는 50km 이내의 고도에서 활강하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 수천 킬로미터급 사거리의 극초음속활강체와 마찬가지로 단거리 극초음속활강체 역시 중간단계미사일방어체계로는 요격하기 어려운 가능성이 있다.

다만 상대적으로 중심이 짧은 한국적 전장환경을 고려하였을 때, 최초탐지시각 측면에서 낮은 활강고도로 인한 지연효과는 두드러지지 않을 것으로 보인다. 미사일 발사지점과 탐지체계 사이의 거리가 짧을수록 지구곡률로 인한 차폐효과가 제한되며, 미사일이 상대적으로 낮은 고도에 위치하더라도 지·해상에서 조기에 탐지할 수 있기 때문이다. 물론 공중물체의 탐지 여부는 피탐체의 레이더반사면적, 탐지체계의 출력 등 다양한 요소에 의하여 결정되지만, 이론적인 레이더가시거리⁴¹⁾(radar horizon) 분석에 의하면 한반도 전장환경에서는 극초음속활강체가 발사되었을 경우 초기인 상승단계에서 탐지될 가능성이 높다. 극초음속활강체의 상승단계는 저각발사방식의 탄도미사일 상승단계와 유사하기에, 단거리 극초음속활강체의 최초탐지시각은 일반적인 단거리 탄도미사일과 유사하거나 조금 더 지연되는 수준일 것으로 유추할 수 있다.

V. 북한 극초음속활강체 개발의 군사적 함의

1. 북한 극초음속활강체 개발의도 및 활용전략

이선희(2022)가 분석한 바와 같이, 북한이 극초음속활강체를 개발하는 주요한 의도는 전술적으로 미 본토타격의 신뢰성 제고이며, 전략적으로는 핵투발능력의 완전성을 높임으로써 대미억제력을 확보하는 것이라고 추정된다. 미사일방어보고

41) 레이더가시거리(radar horizon)는 지구곡률을 고려하여 탐지할 수 있는 목표의 최대거리로서 탐지를 위한 최소한의 필요조건이다. 일반적으로 레이더전자파는 대기에서 지면 방향으로 굴절되기에 광학적 가시거리(optical horizon)보다 더 멀리 형성된다.

서(MDR: Missile Defense Review)에 따르면 미국은 북한 혹은 이란과 같은 불량국가(rogue state)의 제한된(limited) 대륙간탄도미사일 공격으로부터 미 본토를 방어하기 위하여 지상기반외기권방어체계(GMD: Ground-based Midcourse Defense)를 유일한 적극방공⁴²⁾(active air defense) 수단으로써 확충하고 있다.(U.S. DoD. 2019. pp. 30~31, p. 41) 극초음속활강체는 일반적으로 대기권 상층에서 활강하여 목표에 접근하므로 외기권의 탄도미사일을 요격할 수 있도록 설계된 지상기반외기권방어체계의 대응을 원천적으로 회피할 수 있다. 따라서 러시아의 극초음속활강체인 아방가르드와 마찬가지로, 북한 역시 미국의 미사일방어체계를 돌파, 회피하여 미 본토에 타격을 감행할 수 있는 장거리 핵미사일을 최종 목표로 삼아 극초음속활강체를 발전시킬 것이다.

비록 극초음속활강체를 개발하는 북한의 주된 목적이 대미억제력 강화라고 할지라도 북한의 극초음속활강체가 한국에게 직접적인 위협으로 다가오리라는 것은 의심할 바 없다. 본 논문의 IV장에서 고찰한 바와 같이, 한반도 전장환경에서 활용될 수 있는 단거리 극초음속활강체는 높은 속력으로 변칙적인 기동을 할 수 있으며, 우리군의 미사일대응체계를 교란 및 무력화할 가능성이 있기 때문이다. 극초음속활강체는 속력이나 발사방식 측면에서 탄도미사일과 가장 유사하기에 북한의 극초음속활강체 활용전략을 전망하기 위해서는 북한의 탄도미사일 활용전략을 고찰해 볼 필요가 있다. 본 논문에서는 박창권(2012)이 제시한 북한의 탄도미사일 활용전략을 출발점으로 삼아 개별 탄도미사일 활용전략별 극초음속활강체의 활용 개연성을 고찰할 것이며, 이를 통하여 북한 극초음속활강체의 활용전략을 전망할 것이다.

박창권(2012)에 따르면 북한의 탄도미사일 전략은 크게 정치·경제적 활용전략과 군사적 활용전략으로 구분된다. 또한, 북한 탄도미사일의 정치·경제적 활용목적은 첫 번째로 핵·미사일능력을 대내외에 과시하여 내부의 결속을 유지하는 것, 두 번째로 미사일 수출을 활용한 외화 확보, 마지막으로 핵·미사일 활용 위협을 통한 한국의

42) 적 공중공격을 제거하거나 그 효율성을 감소시키기 위하여 적극적으로 실시하는 방어활동(합참, 2020). 미사일방어작전에서는 이미 발사된 미사일을 공중에서 요격하는 방법 등으로 위협을 무력화하는 것을 일컫는다.

정치적 양보 유도, 전쟁 의지 약화 및 한미동맹 균열 획책으로 구분하였다.

현 단계에서 북한 극초음속활강체의 기술적 성숙도를 높이 평가할만한 근거는 부족⁴³⁾하기에 이를 통한 외화 확보의 가능성은 다소 낮은 것으로 판단할 수 있으나, 이 외의 정치·경제적 탄도미사일 활용전략에는 극초음속활강체가 매우 적합한 활용 수단일 것이다. 일반적으로 극초음속활강체는 군사적 강대국만이 개발, 보유할 수 있는 첨단 전략무기로 인식되고 있기에 초보적인 수준일지라도 북한이 극초음속활강체 개발에 성공할 경우 대내외적인 선전효과가 극대화될 것은 자명하기 때문이다. 그리고 앞서 살펴본 바와 같이 극초음속활강체는 우리군의 미사일대응체계를 교란, 회피할 수 있으리라 여겨지기에 한국을 향한 핵·WMD 강압의 주요한 수단으로 활용될 개연성이 높다.

정치·경제적 탄도미사일 활용전략과 더불어 박창권(2012)은 북한 탄도미사일의 군사적 활용전략을 다음과 같은 유형으로 분류하였다. 첫째는 유사시 핵·WMD 탄두를 포함한 다량의 탄도미사일 공격을 감행하여 전장의 주도권을 장악하고 조기에 전승을 달성하는 것이다. 둘째는 중거리 탄도미사일을 활용하여 일본에 위협을 가함으로써 일본이 한국을 군사적으로 지원하고 미군 증원전력에게 중간기지를 제공하지 못하게 차단하는 것이다. 마지막으로 박창권(2012)은 북한이 유사시 한미동맹이 공세적 작전을 수행하여 북한정권의 생존이 위기에 봉착했을 경우 이를 타개하기 위한 방법으로 벼랑 끝 전술을 수행할 것이며 탄도미사일을 핵투발수단으로 사용할 수 있음을 말하고 있다.

상술한 북한의 군사적 탄도미사일 활용전략 중 한국에 직접적인 미사일 공격을 감행하는 전략에는 모두 극초음속활강체가 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다.

우선, 북한은 개전초 탄도미사일 대량공격 시 기보유하고 있는 일반적 탄도미사일과 함께 극초음속활강체를 혼합하여 활용할 수 있을 것이다. 이를테면 북한은 후방의 주요도시 및 국가시설 등에 다량의 탄도미사일을 활용하여 민간의 공포와 혼란을 조성하는 동시에, 한미동맹의 군사력 창출의 근간이 되는 주요 전략시설인

43) 신승기(2022)는 북한의 관련 기술 수준을 고려하였을 때 완전하고 신뢰성 있는 극초음속활강체를 북한이 단기간 내에 개발하는 것은 현실적으로 어려울 것이라고 지적한 바 있다.

지휘시설, 비행기지·항만 및 미사일기지 등에 극초음속활강체를 활용한다면 더욱 효과적으로 한미동맹의 전쟁수행능력을 저하, 무력화할 수 있을 것으로 판단할 수 있다. 극초음속활강체는 기존의 탄도미사일만큼 대량으로 전력화하여 운용하기는 어려울 것이나, 일반적 탄도미사일 대비 미사일대응체계의 대응을 회피하여 성공적으로 목표에 타격을 가할 수 있는 확률이 높기에, 한국 내 한미동맹의 군사적 중심이 되며 동시에 미사일대응체계가 방어를 제공하는 핵심 군사시설에 선별적으로 활용될 가능성이 있다. 일반적인 고폭탄두보다는 WMD 탄두를 장착하고, 사용 시 반드시 성공적으로 낙탄시키는 것이 요구되는 목표에 활용될 경우 그 효용성이 극대화될 것이다.

그리고 최근 북한은 군사적 목적으로 전술핵을 활용할 수 있다는 메시지를 전달하고 있으며⁴⁴⁾, 함형필(2021)은 북한 핵전략이 억제전략에서 핵·재래식 통합운용을 통한 핵전수행전략(nuclear war fighting)으로 확장되고 있다고 진단한 바 있다. 만약 북한이 단거리 극초음속활강체를 개발, 전력화한다면 이는 북한이 최근 개발 중인 신형 전술유도무기체계와 함께 전술핵을 투발할 수 있는 가장 유망한 수단 중 하나가 될 것이다. 전술핵을 활용할 경우 공격을 계획한 목표에 정확하게, 적시에, 성공적으로 낙탄할 수 있는 능력이 북한 입장에서 무엇보다도 중요할 것이기 때문이다.⁴⁵⁾ 따라서 표적에 이르기까지 지속적인 공기역학적 유도를 실시하여 궤적을 조정할 수 있는 극초음속활강체는 전술핵사용을 위한 이상적인 투발수단이라고 볼 수 있다.

마지막으로 북한이 유사시 한미동맹의 공세작전에 대응하여 벼랑 끝 전술의 일환으로 최후의 핵사용을 위협할 경우에도 극초음속활강체는 유용한 투발수단으로

44) 2022년 4월 25일에 개최된 조선인민혁명군 창건 90주년 기념 열병식에서 김정은은 “우리 핵무력의 기본사명은 전쟁을 억제함에 있지만, 이 땅에서 우리가 결코 바라지 않는 상황이 조성되는 경우엔까지 우리의 핵이 전쟁 방지라는 하나의 사명에만 속박되어 있을 수는 없다”고 말했다. 이어 “어떤 세력이든 우리 국가의 근본 이익을 침탈하려 든다면 우리 핵 무력은 의외의 자기의 둘째가는 사명을 결단코 결행하지 않을 수 없을 것”이라고 덧붙였다(연합뉴스, 2022. 4. 26).

45) 북한은 핵사용에 따른 위험을 감수할만한 가치가 높은 표적이나 보복 위험 자체를 배제할 수 있는 표적들을 선택하여 전술핵사용을 할 것으로 추정된다(함형필, 2021, p. 36). 이 경우, 핵 사용의 효과를 최대화하고 보복의 위험을 최소화하기 위해서는, 적합한 표적을 선택하는 것과 더불어 요구되는 표적에 한하여 정확하게 핵을 투발하는 것도 매우 중요할 것이다.

활용될 가능성이 있다. 극초음속활강체는 기존의 탄도미사일 대비 미사일방어체계에 의한 요격 확률이 낮다고 인식되기에 극초음속활강체는 북한의 핵위협 역량 및 신뢰성을 제고할 것이다. 이는 결과적으로 한국 내 그리고 한미 간 군사작전 방향에 대한 논쟁과 혼란을 야기할 수 있다.(박창권, 2012. p. 29)

2. 북한 단거리 극초음속활강체와 우리군의 대응개념

앞서 분석한 바와 같이 북한이 단거리 극초음속활강체를 전력화하는데 성공할 경우 이를 기존의 탄도미사일과 더불어 핵심 비대칭전력으로써 다양한 전략적, 작전적 목표를 달성하기 위하여 활용할 개연성이 충분하다. 따라서 북한의 단거리 극초음속활강체 위협에 대한 우리 군의 대응개념을 정립하고 대응능력을 확보하는 것은 중요한 과제가 될 것이다.

현재 한미동맹은 북한 핵·미사일 위협에 대응하기 위하여 정치, 군사, 경제 및 외교적 요소를 포괄하는 맞춤형억제전략⁴⁶⁾을 발전시키고 있다. 특히, 동맹의 군사적 대응개념은 흔히 ‘4D전략’이라고 명명되는 ‘동맹의 포괄적 미사일 대응전략’으로서 개별 요소는 각각 탐지(detect), 결심(decide), 격퇴(defeat) 및 방어(defend)를 의미한다.⁴⁷⁾ 우리 군은 4D전략을 구현해 나가는 가운데, 전방위 안보위협에 대비한 독자적인 억제·대응능력을 확보하기 위해 ‘전략적 타격체계’와 ‘한국형 미사일 방어체계’로 구성된 ‘핵·WMD 대응체계’를 구축해 나가고 있다.(국방백서, 2020. p. 61)

북한 단거리 극초음속활강체에 대한 군사적 대응개념을 구상함에 있어 가장 중요한 질문 중 하나는 과연 기존 탄도미사일 위협에 대응할 수 있도록 설계된 4D전략과 우리 군의 핵·WMD 대응체계가 새로운 위협인 극초음속활강체에도 여전히 유효한

46) 국방백서(2020)에 따르면 맞춤형 억제전략은 한반도 특성에 최적화된 한미 공동의 대응전략으로서 북한의 핵사용 위협, 실행수준별로 이행 가능한 군사·비군사적 대응방안을 포괄한다.

47) 한미는 2014년 탐지(detect), 교란(disrupt), 파괴(destroy) 및 방어(defend)로 구성된 ‘4D 작전개념’을 작성하였다. 2019년에는 4D 작전개념을 작전적 차원에서 실질적으로 이행하기 위하여 탐지(detect), 결심(decide), 격퇴(defeat) 및 방어(defend)로 구성된 한미공동의 작전수행단계인 ‘4D 작전수행개념’을 발전시켰다. 최근에는 ‘4D 작전개념’과 ‘4D 작전수행개념’을 통합하여 ‘4D 전략’이라고 명명하기로 합의하였다(국방백서, 2020, p. 61).

접근법인지에 대한 여부일 것이다. 일각의 주장대로 극초음속활강체가 진정한 의미의 ‘게임체인저’로서 기존 미사일대응체계를 완전히 무력화할 수 있는, 즉 미사일전의 문법을 초월하는 무기체계인 것이 사실이라면 이는 핵·WMD 대응체계와는 다른 새로운 군사적 대비 방향을 고민할 필요가 있음을 의미하기 때문이다.

상술하였듯이 핵·WMD 대응체계는 4D전략을 근간으로 하고 있으며 4D전략은 상대의 미사일 전력에 접근하여 대응하는 전 군사적 방법(ways)을 포괄한다. 또한, 4D전략은 개별 요소가 유기적으로 연계되어 미사일위협을 효과적으로 감소시킬 수 있다는 가능성을 전제로 한다. 따라서 탐지, 결심, 격퇴 및 방어의 각 요소가 극초음속활강체에 대하여 실행 가능하며, 각각의 요소가 결합되었을 때 극초음속활강체 위협의 감소가 예측될 경우, 4D전략은 그 적용대상을 극초음속활강체까지 확장시켜도 무방할 것이라고 판단할 수 있다.

현재 전력화된 북한의 극초음속활강체가 부재하기에 예단하기는 어려우나, 본 논문에서 고찰한 단거리 극초음속활강체의 특성으로 미루어 보았을 때 극초음속활강체가 우리 군 핵·WMD 대응체계를 완벽하게 무력화할 수 있지는 않을 것으로 전망된다. IV장에서 살펴본 바와 같이 기존 탄도미사일 대비 저고도로 활강하는 극초음속활강체는 분명 탐지 측면에서의 제한사항을 부과할 것이나, 중심이 짧은 한반도 작전 환경상 그 효과는 크지 않을 것이다. 그리고 극초음속활강체는 비탄도 기동 및 저고도 활강을 통해 미사일방어체계를 교란할 가능성이 있으나, 일반적 탄도미사일과 유사한 수준의 속력으로 목표에 접근할 것으로 보이며 이에 따라 적절한 교전조건이 충족될 경우 미사일방어체계의 대응 가능성이 있을 것으로 전망된다. 또한, 4D전략 요소 중 격퇴에 해당하는 전략적 타격체계는 발사하기 이전의 미사일체계를 대상으로 삼기에 극초음속활강체와 일반적 탄도미사일 사이에 유의미한 차이가 있다고 보기 어렵다. 상술한 내용을 종합하면, 한미동맹의 4D전략과 우리 군의 핵·WMD 대응체계는 극초음속활강체를 포괄할 수 있도록 방어대상을 확장하더라도 여전히 유효함을 알 수 있다. 즉, 극초음속활강체에 대한 우리군의 대응개념 및 수단도 일반적인 핵·미사일 위협과 마찬가지로 4D전략과 핵·WMD 대응체계를 근간으로 해야 할 것이다.

3. 극초음속활강체 대응을 위한 핵·WMD 대응체계 발전 방향⁴⁸⁾

한미동맹의 4D전략과 더불어 전략적타격 및 한국형미사일방어를 골자로 하는 우리 군의 핵·WMD 대응체계로 극초음속활강체를 대응하는 개념 자체는 유효하더라도, 기술적으로 진보된 미사일인 극초음속활강체는 우리 군 핵·WMD 대응체계에 다양한 도전요소를 부여할 것이다. 본 논문에서는 4D전략의 개별 요소별로 단거리 극초음속활강체가 핵·WMD 대응체계에 부과하는 도전요소를 살펴볼 것이며, 이를 극복하기 위한 핵·WMD 대응체계의 발전 방향을 논의한다.

가. 탐지(detect) 관련 도전요소와 발전방향

본 논문의 IV장에서 분석하였듯이, 극초음속활강체는 일반적인 탄도미사일 대비 저고도로 활강하기에 지·해상에 위치한 미사일탐지체계로는 이를 조기에 탐지하기 어려울 수 있다. 이러한 시간적 지연은 적극방공⁴⁹⁾ 뿐만이 아니라 소극방공(passive air defense)⁵⁰⁾ 측면에서도 부정적 영향을 미칠 가능성이 있기에 이러한 제한점을 해소하기 위해서는 지구곡률 및 지형의 차폐 효과로부터 자유로운 공중 혹은 우주 영역에서의 미사일 탐지·추적능력을 확보하는 것이 필요할 것이다. 그리고, 극초음속활강체의 기동성으로 말미암아 주된 접근방향을 예측하기가 어렵기에 전방위(360도) 미사일감시능력이 요구될 것이다. 상술한 능력을 달성하기 위한 발전 방향은 다음과 같은 것을 고려할 수 있다.

우선 동맹의 발전된 감시정찰자산과의 상호연동성을 강화하는 방안을 검토할 필요가 있다. 예를 들어, 미국이 운용 중이거나 전력화할 탄도미사일 탐지 적외선센

48) 본 절의 내용은 조홍일 외(2020)와 이에 기반한 후속연구인 이선희(2022)를 기초로 하되 일부 내용을 보강하여 새롭게 구성하였음을 밝힌다.

49) 다만, 본 논문 IV장에서 분석한 바와 같이, 중심이 짧은 한반도 전장환경을 고려하였을 때 극초음속활강체의 저고도 활강으로 인한 최초탐지시각 지연의 수준은 크지 않을 것으로 예상된다. 이러한 탐지의 지연이 미사일 요격능력에 미치는 영향을 구체적으로 말하기 위해서는 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다.

50) 적의 공중공격 효과를 최소한으로 제한하기 위하여 취하는 제반 조치. 은폐와 엄폐, 위장, 소산, 방호물의 사용과 위진지 운용 등이 있다(합참, 2020).

서 위성⁵¹⁾의 탐지·추적정보를 실시간으로 제공받을 수 있다면, 극초음속활강체에 대한 탐지확률과 이에 대한 미사일방어작전의 효과가 제고될 것이다. 우리 군의 독자적인 핵·WMD 대응체계 능력 제고의 일환으로써 지상에서 운용중인 탄도탄조기경보레이더의 체계성능을 향상시키거나 탐지체계의 수량을 증가시켜 무중단으로 360도 전방위 감시를 수행할 수 있게 하는 방안도 검토할 필요가 있다. 장기적인 관점에서는 우리 군의 우주기반 미사일 탐지, 추적 적외선위성을 전력화하여 북한의 일반적인 탄도미사일 뿐만이 아니라 극초음속활강체에 대한 조기탐지 능력을 확보할 필요가 있을 것이다.

나. 결심(decide) 및 격퇴(defeat) 관련 도전요소와 발전방향

극초음속활강체의 궤적은 일반 탄도미사일의 그것과 본질적으로 상이하며, 일반적인 공기흡입식(air-breating) 공중항적(track)과도 속력 및 고도의 측면에서 확연하게 다르다. 이러한 이유로 설령 극초음속활강체를 탐지하더라도 우리 군의 C4I체계에서 미사일방어작전에서 활용할 수 있는 적절한 항적으로 분류하는 데에 어려움이 발생할 가능성이 있다.

그리고 일반적인 탄도미사일은 비행궤적의 변동성이 크지 않기에 탐지 및 지속적인 추적 시 탄착점예측 및 발사점예측(launch point prediction)이 가능하다. 탄착점예측은 해당 미사일에 대응하는 적절한 교전포대를 할당하는 과정에서 중요한 정보로 활용되며 발사점예측은 미사일 발사원점을 식별하여 효과적으로 상대의 미사일 발사능력을 제거하는 공격작전 임무에 활용된다. 극초음속활강체는 궤적의 특성이 일반적인 탄도미사일과 상이하며, 지속적인 유도로 궤적을 실시간으로 수정할 수 있기에 탐지·추적을 통한 탄착점예측이 제한될 가능성이 있다. 또한, 이미 공기역학

51) 미국은 탄도미사일 탐지 및 추적을 위하여 정지궤도, 저궤도에서 운용할 수 있는 우주적외선위성체계(SBIRS: Space Based Infrared System)를 구축하여 활용 중이다. SBIRS의 구성요소 중 2009년 발사가 시작된 저궤도위성 2기로 구성된 STSS(Space Tracking and Surveillance System)은 미사일 비행의 전단계(상승-중간-종말)를 추적할 수 있으며, 교전체계에 탐지정보를 제공하여 요격능력을 제고할 수 있는 것으로 알려져 있다.

적 기동을 시작한 활강단계 이후의 극초음속활강체를 탐지한다면 신뢰성 있는 발사 점예측은 어려울 것이다.

상술한 제한점을 극복하기 위해서는 극초음속활강체의 특성을 충분히 반영하여 우리 군의 작전수행절차를 발전시킬 필요가 있으며 관련된 C4I전력의 성능을 개량하여 처리할 수 있는 미사일위협의 범위를 극초음속활강체까지 포함할 수 있도록 확장할 필요가 있다. 예를 들어, 반복되는 북한 극초음속활강체 시험발사 궤적에 대한 상세분석을 수행하고 핵심적인 특성을 식별하여 이를 미사일 항적분류 등 미사일방어작전 수행절차에 반영하거나 미사일방어 C4I체계 성능개량 시 고려하는 것도 하나의 방법이 될 것이다.

또한, 극초음속활강체 발사점예측에 대한 제한을 극복하기 위해서는, 탐지제한요소 극복을 위한 발전 방향과 유사하게, 공중·우주기반 탐지능력을 구비할 필요가 있다. 지형과 지구곡률의 영향에서 자유로운 고고도에서 탐지할수록 극초음속활강체의 조기탐지 확률이 상승하고, 이는 곧 발사점예측의 신뢰성을 높이기 때문이다.

다. 방어(defend) 관련 도전요소와 발전방향

극초음속활강체의 낮은 활강고도와 기동성은 중간단계미사일방어체계 혹은 종말단계상층방어체계의 대응을 어렵게 할 가능성이 있다. 중간단계방어체계나 상층방어체계의 요격유도탄은 일반적으로 적외선영상탐색기를 활용⁵²⁾하여 탄도미사일을 포착하고 요격한다. 대기와의 마찰로 다량의 발열이 발생하는 저고도에서는 이러한 적외선 영상 탐색기의 운용이 제한되며, 대기권 상층에서 활강하는 극초음속활강체에 대한 요격이 제한될 수 있다. 그리고 IV장에서 살펴본 바와 같이 극초음속활강체의 변칙적인 기동은 활강단계에 있는 극초음속활강체의 탄착점예측을 어렵게 만든다. 이는 방어영역이 넓고 교전고도가 높기에 상대적으로 이른, 즉 극초음속활강체의 종말낙하단계 이전인 활강단계에서의 교전 결심이 요구되는 중간단계 미사일방어체계 및 종말단계상층방어체계의 대응능력을 제한할 것이다.

52) 요격유도탄에 적외선 영상 탐색기를 활용하는 방어체계로는 SM-3, THAAD 등이 있다.

극초음속활강체의 기동성은 종말단계하층방어체계에도 유사한 도전요소로 작용할 것이다. 그러나 하층방어체계는 교전공간과 방어영역이 상대적으로 작기에 그 안에서 극초음속활강체의 기동성이 발휘될 여지가 상대적으로 제한된다. IV장에서 분석한 바와 같이 극초음속활강체는 일반적 탄도미사일과 유사한 수준의 속력으로 목표에 낙하할 것으로 추정되기에 적절한 교전조건이 충족될 경우 하층방어체계에 의한 극초음속활강체의 요격은 불가능하지 않을 것으로 판단된다. 따라서 극초음속활강체에 대한 요격능력을 구비하기 위해서는 하층방어체계의 능력을 보강하는 방법을 우선적으로 고려할 필요가 있다. 극초음속활강체의 기동성에 대비하여 하층방어체계 자체적으로 전방위(360도) 탐지, 추적 및 교전능력을 갖추게 하는 것도 하나의 방안이 될 것이다.

기존 미사일방어체계의 능력을 보강하는 방법 외에도 극초음속활강체의 취약성을 활용하거나 강점을 상쇄시킬 수 있는 새로운 미사일방어개념의 발전 역시 필요할 것이다. 극초음속활강체의 군사적 강점의 핵심은 변칙적인 기동성이나, 한편으로는 이러한 기동을 위하여 지속적인 정밀유도를 요구할 가능성이 있다. 이 경우 관성유도장치만으로는 정밀유도에 한계가 있기에 위성항법시스템을 추가적으로 활용하여 오차를 보정할 개연성이 높다. 따라서 극초음속활강체를 대상으로 적절한 재밍을 가하여 내재된 정밀유도장치를 교란한다면 극초음속활강체의 효과를 일정 부분 감소시킬 수도 있을 것이다. 마지막으로, 극초음속활강체의 기동성이 발휘되기 이전, 즉 취약성이 가장 높은 단계인 상승단계에서의 미사일 요격능력 확보도 고려할 필요가 있다. 또한, 극초음속활강체의 기동성 자체를 상쇄할 수 있는 지향성 에너지(레이저) 요격능력⁵³⁾의 도입도 하나의 대안이 될 수 있다.

53) 비록 레이저무기체계는 표적이 열에 강한 구조이거나 반사해낼 수 있는 경우 파괴효과가 제한되며 기상여건에 따라 효과가 감소될 수 있는 단점이 있으나, 다량의 에너지를 광속으로 전달하여 상대 미사일의 기동성을 무력화할 수 있고 발사 및 운용비용이 상대적으로 저렴한 이점이 있다. 이에 미국의 미사일방어보고서에서도 레이저무기체계를 활용한 미사일 요격을 언급하고 있다.

VI. 결론

지금까지 극초음속활강체의 모델링 및 시뮬레이션을 통해 한반도 내에서 활용될 수 있는 단거리 극초음속활강체의 특성을 살펴보았으며, 이를 기반으로 북한 극초음속활강체의 개발 의도 및 활용전략을 고찰하였다. 그리고 이에 대한 우리군의 대응개념과 발전방향을 도출하였다.

단거리 극초음속활강체는 진화된 형태의 탄도미사일로서 낮은 활강고도, 빠른 속력 및 변칙적인 기동성으로 우리군 미사일대응체계에 다양한 도전요소를 부여할 것으로 보인다. 북한은 극초음속활강체를 개발·전력화하여 우선적으로 대미억제력을 확보하려 할 것으로 보이나, 한국을 향해서도 사용을 위협하거나 실제로 활용할 개연성이 충분하다. 이러한 위협에 군사적으로 대응하기 위해서 기존의 4D전략을 고수하며 우리 군의 핵·WMD 대응체계를 활용할 필요가 있다. 다만, 우주기반 미사일탐지체계의 확충, 미사일방어체계의 전방위적 교전능력 확보 등 다양한 측면에서 핵·WMD 대응체계의 능력을 제고함으로써 극초음속활강체의 변칙적인 기동성, 낮은 활강고도와 같은 장점을 상쇄해야 할 것이다.

본 논문의 분석은 실제 북한이 개발하고 있는 극초음속활강체를 대상으로 한 것은 아님에 유의할 필요가 있다. 대신, 공개된 문헌에서 획득할 수 있는 자료에 기초하였으며, 극초음속활강체가 단거리에 활용되었을 경우 발현될 수 있는 일반적인 특성을 말하고 있다. 향후 우리 군이 북한 극초음속활강체 위협을 분석하고 이에 대한 대응방안을 발전시킴에 있어 본 논문에서 제시한 방법 및 결과가 유용하게 활용될 수 있기를 기대한다.

마지막으로 극초음속활강체에 대한 우리 군의 합리적인 대비태세 정립을 위하여 다음 두 사항을 제언한다. 첫째, 일각에서 말하는 것처럼 극초음속활강체를 군사적으로 대응할 방법이 없는 ‘무적’의 무기체계로 여기는 시각에서 벗어나 기술적으로 진화한 탄도미사일의 하나로 바라보는 인식의 재정립이 필요하다. 극초음속활강체에 대한 합리적인 군사적 대응개념을 도출하고 적절한 대응능력을 발전시키기 위해

서는 이러한 인식의 전환이 선행되어야 할 것이다. 물론 극초음속활강체만의 고유한 장점이 있는 것은 사실이다. 그러나 Tracy와 Wright(2020) 및 본 논문에서 분석한 바와 같이 일반적 탄도미사일과 비교하였을 때 월등히 빠른 속력을 보이는 것은 아니며 더 많은 기동을 수행할수록 속력이 감소한다는 일반적 특성은 미사일방어체계에 의한 대응의 기회가 열려 있음을 시사한다. 오히려, 극초음속활강체는 종말단계기동형재진입체, 기동형단거리미사일⁵⁴⁾ 등과 함께 공기역학적 제어능력을 추가하여 작전적 효과를 배가시키는 탄도미사일 유형의 연속체(continuum)를 이룬다고 보는 것이 타당할 것이다. 조홍일 외(2020)에서는 이러한 미사일 유형을 통칭하여 ‘준탄도미사일(quasi-ballistic missile)’이라고 명명할 것을 제안한 바 있다.

둘째, 극초음속활강체에 대한 논의를 발판으로 삼아 우리 군 핵·WMD 대응체계가 진화적 능력 발전을 요구하고 있음을 인식해야 한다. 비단 극초음속활강체 뿐만 아니라 신형전술단거리미사일을 개발하는 등 북한은 우리 군의 핵·WMD 대응체계를 우회, 돌파하기 위하여 지속적으로 미사일 능력을 발전시킬 것이 자명하기 때문이다. 천문학적인 비용을 들인 미사일방어체계가 유사시 제 기능을 발휘하기 위해서는 우리의 미사일대응능력이 언제나 북한 미사일위협보다 선제적으로 한발 앞서나갈 필요가 있다. 그러므로 핵·WMD 대응체계는 미래의 특정 시점에 ‘완성’될 수 있는 것이 아니다. 오히려, 변화하는 미사일위협에 대응하기 위하여 그 능력을 꾸준히 확충해야 할 대상으로서 핵·WMD 대응체계를 바라보는 것이 타당할 것이다. 이러한 인식과 함께 핵·WMD 대응체계의 진화적 발전이 보장된다면 우리 군은 미래의 극초음속활강체 위협에 대응할 수 있을 것이다.

논문 접수 : 2022년 5월 2일

논문 수정 : 2022년 7월 7일

게재 확정 : 2022년 7월 12일

54) 종말단계에서 기동능력이 있는 단거리 미사일을 의미한다. 북한이 ‘북판 이스칸데르’라 명명하는 KN-24 등이 포함된다.

참고문헌

- 국방부. (2020). 『2020 국방백서』. 서울: 대한민국 국방부.
- 김지원·권용수. (2016). “항력을 고려한 탄도미사일 비행궤적 특성 해석”. 『한국항공학회논문지』 20권 2호. (2016년 4월 30일).
- 박창권. (2012). “북한의 탄도미사일 위협과 한국의 대응체제 발전방향”. 『국방정책연구』, 제28권 2호. 서울:한국국방연구원. pp. 7-50.
- 신승기. (2022). “북한의 신형 탄도미사일 시험 발사 평가 및 함의”. 『동북아안보정세분석 (NASA)』. 한국국방연구원.
- 엄종선. (2019). “극초음속 무기체계 특성과 우리의 대응방향”. 『국방이슈브리핑(DIB)』. 한국국방연구원. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ajy2Q3hXowY>. (검색일: 2022. 4. 27).
- 『연합뉴스』. (2021년 1월 9일). “[요약] 북한 노동당 8차 대회 김정은 사업총화보고 주요 내용”.
- . (2022년 1월 11일) “북 탄도미사일 ‘속도 마하 10’ 극초음속 가능성...옛새전보다 진전”.
- . (2022년 1월 12일) “북 ‘극초음속 미사일 발사 성공·1천km 비행’...김정은 참관(종합)”
- . (2022년 4월 26일) “[2보] 北김정은 ‘핵무력 더욱 강화...국가이익 침탈시 사명 결행’”
- 이선희. (2022) “북한 극초음속활강체 개발 의도와 함의”. 『국방논단』, 제1884호. 한국국방연구원.
- 『중앙일보』. (2022년 1월 7일) “군 ‘북이 쏜 건 극초음속 미사일 아니다...기술 진전 없어’”
- . (2022년 1월 10일) “북 미사일 극초음속 아니라는 軍, 전문가는 ‘예단 말라’ 반박”
- . (2022년 1월 13일) “한국 보란듯...김정은이 공개한 극초음속 미사일 궤적”
- 조홍일·박용진·김아름·이경혜. (2020). “연구보고서”. 한국국방연구원.
- 함형필. (2021). “북한의 핵전략 변화 고찰: 전술핵 개발의 전략적 함의”. 『국방정책연구』, 제37권, 3호. 서울:한국국방연구원. pp. 7-43.
- 합동참모본부. (2020). 『합동·연합작전 군사용어사전』. 서울: 합동참모본부.

- Acton, James M. (2013). *Silver Bullet?: Asking the Right Questions about Conventional Prompt Global Strike*. Carnegie Endowment for International Peace.
- . (2015). “Hypersonic Boost-Glide Weapons.” *Science & Global Security*, vol. 23, no. 3, pp. 191–219.
- Brockmaan K., Schiller M. (2022). *A matter of speed? Understanding hypersonic missile systems*. Stockholm International Peace Research Institute. [Online] Available: <https://www.sipri.org/commentary/topical-backgrounder/2022/matter-speed-understanding-hypersonic-missile-systems>. (검색일: 2022. 4. 27).
- Lee K., Oh. K. (2016). “Prediction of Possible Intercept Time by Considering Flight Trajectory of Nodong Missile”, *International Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 3, no. 2., pp. 14-21.
- NASA. (2021). *Hypersonic Missions*. NASA Glenn Research Center. [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/BGH/hmission.html>. (검색일: 2022. 4. 27).
- Van Diepen, V. H. (2022. 1. 18.). *Implications of the Second Launch of North Korea's Second 'Hypersonic' Missile - 38 North: Informed Analysis of North Korea*. 38 North. <https://www.38north.org/2022/01/implications-of-the-second-launch-of-north-koreas-second-hypersonic-missile/>. (검색일: 2022. 4. 27).
- Jorris, Timothy R. (2007). “Common aero vehicle autonomous reentry trajectory optimization satisfying waypoint and no-fly zone constraints.” Ph. D. Dissertation, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- Savelsberg R. and Kawaguchi T. (2022). North Korea's Hypersonic Missile Claims Are Credible, Exclusive Analysis Shows. *Breaking Defense*. <https://breakingdefense.sites.breakingmedia.com/2022/02/north-koreas-hypersonic-missile-claims-are-credible-exclusive-analysis-shows/>. (검색일: 2022. 4. 27).
- Li G., Zhang H. and Tang G. (2015). “Maneuver Characteristics Analysis for Hypersonic Glide Vehicles”. *Aerospace Science and Technology*, vol. 43. pp. 321–28.
- Lu P., Forbes S. and Baldwin M. (2013). “Gliding Guidance of High L/D Hypersonic Vehicles”, AIAA Guidance, Navigation and Control (GNC) Conference. Boston MA. 2013. 8. 19.
- Miller A. T. and Rao A. V. (2021). “End-to-End Performance Optimization for High-Speed Ascent-Entry Missions”. *Journal of Spacecraft and Rockets*. pp. 1–18.

- OpenNuclearNetwork. (2021). Observations on the 28 September 2021 Hypersonic Missile Test of the Democratic People's Republic of Korea. OpenNuclearNetwork. <https://opennuclear.org/news/2021-09-27-observations-28-september-2021-hypersonic-missile-test-democratic-peoples-republic>. (검색일: 2022. 4. 27).
- U.S. Department of Defense. (2019). *2019 Missile Defense Review*.
- U.S. Headquarters Department of the Army, (2002). *Patriot Battalion and Battery Operations(FM 3-01.85)*.
- Phillips, T. H. (2003). "A common aero vehicle (CAV) model, description, and employment guide." *Technical Report*. Schafer Corporation for AFRL and AFSPC. pp. 1-12.
- Rizvi, He and Xu. (2015). "Optimal Trajectory and Heat Load Analysis of Different Shape Lifting Reentry Vehicles for Medium Range Application." *Defence Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 350-361.
- 『Ruptly』. (2018. 12. 26.). Russia: Watch FIRST-EVER public test launch of Russia's Avangard hypersonic glider.
- Schiller, Markus, and Schmucker. (2016. 11. 8.). *Flashback to the Past: North Korea's 'New' Extended-Range Scud*. 38 North. <https://www.38north.org/2016/11/scuder110816/>. (검색일: 2022. 4. 27).
- Simon, Steven. (2020. 1. 2.). "Hypersonic Missiles Are a Game Changer." The New York Times, sec Opinion.
- Speier R. H., Nacouzi, Lee and Moore. (2017). *Hypersonic Missile Nonproliferation: Hindering the Spread of a New Class of Weapons*. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- 『Sputnik』. (2018). Putin Unveils Newest Strategic Hypersonic Missile System Avangard.
- Tan, Lei and Liu. (2019). "Optimal maneuver trajectory for hypersonic missiles in dive phase using inverted flight". *IEEE Access*, vol. 7. pp. 63493-503.
- Thomas, Marayikkottu and Levin. (2022). "Heat Transfer Study of a Conically Shaped Hypersonic Vehicle in Glide." AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego, CA & Virtual. 3-7. Jan. 2022.
- Tracy, Cameron L. and David Wright. (2020). "Modelling the Performance of Hypersonic Boost-Glide Missiles." *Science & Global Security*, vol. 28, no. 3. pp. 135-70.