

북한 4·5차 핵실험의 기술적 평가

이호찬^{*,1)} · 이상규¹⁾ · 정 관¹⁾

¹⁾ 육군사관학교 물리화학과

Technical Assessment of North Korea 4th and 5th Nuclear Test

Hochan Lee^{*,1)} · Sangkyu Lee¹⁾ · Kwan Jeong¹⁾

¹⁾ Department of Physics and Chemistry, Korea Military Academy, Korea

(Received 3 February 2017 / Revised 20 March 2017 / Accepted 12 May 2017)

ABSTRACT

North Korea intended to increase the power of its nuclear weapons and standardize warhead to be loaded in ballistic missiles through the 4th and 5th nuclear tests. In this study, three kinds of nuclear weapons that North Korea might have used in the 4th and 5th nuclear tests to achieve their technical goals were suggested. Monte Carlo modeling and various technical assessments have shown that boosted fission weapons are most likely to be used. Also, using the empirical formula considering the burial depth of explosion, we found that the yield of the 4th and 5th nuclear tests is at least twice as strong as that is expected it could be and the initial design power could reach 8kt before amplification. This means that North Korea has already achieved a substantial level of nuclear fusion technology through the 4th test and has made a breakthrough in the miniaturization of nuclear weapons through the 5th test. After two or three additional tests, North Korea is expected to have nuclear missiles equipped with nuclear warhead by 2020, which is expected to complete ballistic missile development.

Key Words : Boosted Fission Weapon(증폭핵분열무기), Nuclear Weapon Yield(핵무기 위력), Burial Depth of Explosion(폭발깊이), Monte-Carlo Modeling(몬테칼로 모델링), Empirical Formula(실험식)

1. 서론

북한은 2006년 10월 9일 1차 핵실험을 시작으로 2016년 1월까지 매 3~4년 간격으로 4차에 걸쳐 핵실험을 실시하여 왔다. 이후 그동안 지켜왔던 3, 4년의 주

기를 앞당겨 2016년 1월 6일 4차 핵실험 후 8개월만인 지난 2016년 9월 9일에 5차 핵실험을 실시하였다. 4차 핵실험 직후 북한은 조선중앙 TV를 통해 “수소탄 시험 완전성공”을 대외적으로 발표하면서 북한의 순수 기술을 통해 수소탄 개발에 성공했다고 주장했다. 또한 5차 핵실험 이후에는 전략폭격기에 실어서 중력에 의해 떨어뜨리는 폭탄(bomb)의 형태에서 벗어나 미사일에 실을 수 있는 형태의 핵탄두의 위력관정을

* Corresponding author, E-mail: optichan@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

위한 시험에 성공했다고 발표했다.

북한의 주장에 의하면 북한은 4차 핵실험을 통해 핵무기 개발의 마지막 단계인 수소폭탄, 즉 핵융합무기의 기술을 확보하였고, 5차 핵실험을 통해 탄두의 소형화와 경량화에도 성공하여 다양한 미사일에 핵무기를 실을 수 있게 되었다. 그러나 현재까지 국제사회의 평가에 비춰볼 때 북한이 가장 진보된 형태의 핵무기인 수소폭탄을 개발했다고 보기에는 석연찮은 점이 많고 4차와 5차 핵실험에 사용된 핵무기를 수소폭탄이 아닌 증폭핵분열무기로 보는 견해가 지배적이다.

핵무기 종류를 판단할 때 가장 기초적인 자료는 핵무기의 위력이다. 수소폭탄이라면 핵무기 위력이 최소 100 kt 이상이 되어야 한다. 핵실험에 사용된 핵무기의 위력은 측정된 지진파의 규모를 이용하여 간접적으로 추정할 수 있는데, Table 1은 측정된 지진파의 규모 M_b 1)와 핵무기의 위력 Y 사이의 관계를 나타내는 다양한 지진규모-폭발력 실험식이다. 한국 지형과 다른 암석지역으로부터 구한 실험식이라 정확도는 떨어지겠지만, 북한 핵실험에 사용된 핵무기의 위력을 판단하는데 활용할 수 있을 것이다.

Table 1. Empirical relation between earthquake scale (M_b) and nuclear weapon yield(kt)

관 계 식	출 처	실험지 (암석종류)
$M_b = 4.00 + \log Y$	CTBTO IMS 관계식	임의지형
$M_b = 3.92 + 0.81 \log Y$	Murphy(1981) ^[1]	미국 Nevada 응회암/유문암
$M_b = 4.45 + 0.75 \log Y$	Ringdal(1992) ^[2]	카자흐스탄 Shagan 혈암
$M_b = 4.38 + 0.83 \log Y$	Murphy et al. (2001) ^[3]	Algeria Sahara 화강암

한반도와 중국, 그리고 UN산하 포괄적 핵실험 금지 조약기구(CTBTO) 등 여러 단체에서 운용하는 관측소에서 측정된 지진파를 이용해 예측한 북한 핵실험에 사용된 핵무기 위력은 Table 2와 같다. 이에 따르면

1) M_b : Body Wave Magnitude. 인공적인 지진파 규모. 특히 핵실험 지진파의 경우 리히터 규모인 M_L 보다 M_b 를 사용하는 것이 일반적인데, CTBTO, USGS 등의 기관에서도 핵실험에 의한 인공지진파의 크기를 M_b 의 단위로 발표한다.

북한의 4차 핵실험은 약 6~10 kt의 위력을, 5차는 약 10~12 kt 위력을 가진 것으로 알려졌다. 4차와 5차 핵실험 시 관측된 지진파의 규모는 각각 4.8~5.1 M_b , 5.1~5.3 M_b 로 관측되었는데 이를 Table 1의 지진규모-폭발력 실험식을 통해 산출하면 최소 3 kt에서 최대 50 kt까지 차이가 매우 커진다. 이는 과거 한반도에서 핵실험이 이루어진 전례가 없어 인공 지진의 규모와 폭발력 사이의 실험식이 한국 지형에 맞게 정립된 바가 없어서 생기는 혼란이다. 이에 한국지질자원연구원(KIGAM)에서는 1차 핵실험 이후 지진파의 규모를 직접 관측하고, CTBTO의 IMS 관계식을 기초로 한반도 지형특성에 맞게 고위력 핵실험의 위력을 추정하는 관계식을 발표하였는데²⁾ KIGAM이 발표한 핵실험의 지진파 규모와 핵무기 추정 위력은 각각 4.8 M_b /4~6 kt(4차), 5.0 M_b /10 kt(5차)이다.

Table 2. Summary for North Korea's nuclear testing

구분	1차	2차	3차	4차	5차
일 자	2006. 10.9	2009. 5.25	2013. 2.12	2016. 1.6	2016. 9.9
인공지진 규모(M_b)	4	4.5	4.9	4.8~5.1	5.1~5.3
핵무기 위력	1 kt 이하	~2 kt	~8 kt	6~10 kt	10~12 kt
핵무기 종류	Pu-239	Pu-239	U-235	증폭 핵분열	증폭 핵분열

그런데 Murphy, 2010^[4]에 의하면 핵실험장의 지하 깊이와 핵무기 위력 사이에 교환관계(trade-off)가 있다는 것이 발표되었다. 깊이 200 m에서 2.7 kt의 핵무기가 폭발했을 때의 지진파와 지하 800 m에서 4.8 kt의 핵무기가 폭발했을 때의 지진파의 크기가 똑같이 측정되므로 정확한 폭발 깊이를 모른다면 지진파의 위력만으로 이 둘을 구분하기가 어렵다는 것이다. Ni, 2010^[5]도 연구에서 핵무기 위력 예측 시 깊이에 따른 보정이 필요하다는 점을 지적하였다. 또한 Rougier, 2011^[6]은 북한 핵실험장 주변과 동일한 화강암 지반에 대해 시뮬레이션을 실시하여 2009년 2차 핵실험의 위력을 예측하였는데, 지하 100 m에서 800 m 깊이까지 다양하게 고려한 결과 깊이 550 m에서 4.6 kt의 위력

2) $M_b = 4.28 + 0.84 \log Y$

을 가진 핵실험으로 결론지었다. 이와 같이 핵실험장의 지하 깊이에 따라 핵무기 위력은 다르게 추정될 수 있으며, 북한 핵실험장의 위치와 지하 깊이에 대한 정보를 알 수 있다면 북한 핵실험의 실제 위력을 좀 더 정확하게 판단할 수 있을 것이다.

북한이 4차와 5차 핵실험을 연속적으로 실시했다는 점은 실험의 성공과 실패 여부를 떠나서 북한의 핵 위협이 점점 더 가까워지고 있다는 점을 시사해 준다. 특히 북한은 핵무기의 전략적 투발수단인 무수단 미사일, SLBM(Submarine-Launched Ballistic Missile)을 잇따라 시험 발사하여 기술적인 완성도를 높여가고 있다. 이에 4, 5차 핵실험에 사용된 핵무기의 종류를 정확히 판단함과 동시에 핵실험의 기술적인 의미를 면밀하게 분석하여, 향후 북한의 핵위협에 대한 대응전략을 수립하는 과학적 근거 마련이 필요하다.

본 연구에서는 북한 핵개발의 기술적 목표에 대해 간략히 언급하고, 실험식과 몬테칼로 모델링을 이용하여 지난 4, 5차 북한 핵실험의 위력을 분석한 후 가능성 있는 핵무기의 종류를 제시할 것이다. 또한 폭발 깊이를 고려한 핵무기 위력 산출 실험식을 이용하여 북한의 4, 5차 핵실험의 설계위력에 대한 기술적 분석을 실시하고 두 차례의 핵실험이 가지는 의미에 대해서 논의할 것이다. 마지막으로, 북한 핵기술의 현주소를 재조명하고 향후 북한 핵 실험의 가능성을 예측해 봄으로써 북핵문제 해결의 과학적 근거를 제시할 예정이다.

2. 북한의 4, 5차 핵실험 종류

2.1 북한 핵실험의 기술적 목표

국제사회의 강도 높은 비난과 제재 속에서도 북한이

핵무기개발을 포기하지 못하는 데는 여러 가지 정치적, 군사적 이유가 있겠지만 본 연구에서는 그들의 기술적 목표에 집중하고자 한다. 핵실험과 더불어 북한은 핵무기의 주요 투발수단인 탄도미사일 기술 확보와 전력화를 위해 끊임없이 미사일 발사 시험을 해왔다. 2016년만 하더라도 4월 15일을 시작으로 지난 10월 15일까지 8차례에 걸쳐 사거리가 3,500 km에 달하는 무수단 미사일을 시험 발사했고, 이중 6월 22일 6차 시험발사 시에는 수평거리 약 400 km, 수직고도 약 1,400 km를 비행하는데 성공했다. 또한 Second-Strike, 즉 핵전쟁에서 반격용으로 사용되는 잠수함발사 탄도탄 SLBM은 2015년 5월 9일, 김정은이 직접 참관하는 가운데 최초로 수중발사 실험을 실시한 후 3차례의 실패 끝에 2016년 8월 24일 동해상에서 약 500 km를 시험 비행하는데 성공했다. 시험 발사 당시 고각으로 발사했기 때문에 만약 정상 각도로 발사 되었다면 약 1,000 km를 비행했을 것으로 예측되는데, 이 추세대로라면 북한이 2020년까지 SLBM을 전력화 할 가능성이 있다는 점에서 볼 때 한반도 안보에 매우 우려되는 상황이라 할 수 있다⁷⁾.

북한이 이처럼 탄도미사일과 SLBM 개발에 열을 올리는 이유는 핵무기의 투발수단이 확보되어야 비로소 핵무기의 구성요건을 갖추 수 있기 때문이다. 현실적으로 미국이나 기타 주변국에 비해 제공권에서 열세인 북한이 장거리 전략 폭격기에 의한 폭탄 형태의 핵무기를 확보한다고 하더라도 이는 큰 위협이 될 수 없다. 결국 일본이나 미국 본토까지 사거리를 두고 위협할 수 있는 탄도 미사일 형태의 핵무기를 확보하는 것이 북한 핵무기 개발의 기술적 목표라고 할 수 있다.

북한이 계속된 시험발사를 통해 전력화를 시도하고 있는 무수단 미사일을 비롯하여 다양한 중장거리 탄도미사일의 제원을 살펴보면 북한 핵실험의 기술적 목

Table 3. List of North Korea ballistic missiles

구분	대포동-3	대포동-2	대포동-1	무수단	노동	KN-02	KN-11
형식	ICBM	ICBM	IRBM	IRBM	MRBM	SRBM	SLBM
길이	30 m	29 m	24 m	11.5 m	15.5-16.0 m	6.40 m	~9 m
탄두 지름	2.4/1.50/1.25 m	2.4/1.25/0.88 m	1.25/0.88 m	1.5 m	1.25-1.30 m	0.65 m	~1.5 m
탑재 중량	100-1000 kg	100-500 kg	100-200 kg	500 kg	250-700 kg	250-500 kg	650 kg
사거리	10,000+ km	6,000-9,000 km	2,000-2,900 km	4,000 km	1,300-1,500 km	100-120 km	unknown

표를 어느 정도 추정할 수 있다. Table 3^[8]에서 북한이 보유하고 있거나 전력화를 추진하고 있는 미사일들이 실을 수 있는 탄두의 중량이 1,000 kg 이하인 점과 2016년 8월 시험발사에 성공한 SLBM의 경우에도 탄두 중량이 650 kg 정도라는 점에 주목하면, 북한의 핵실험은 자신들이 가지고 있는 투발수단의 역량에 맞게 핵무기를 탄두(warhead)의 형태로 소형화, 경량화 하는데 그 목표가 있다고 추정할 수 있다^[9].



Fig. 1. North Korea shows off a miniaturized nuclear device

Fig. 1은 지난 3월 9일 북한이 개발에 성공했다고 주장한 내폭형 탄두로 추정되는 사진이다^[10]. 옆에 서있는 김정은의 신체 사이즈에 비추어 추정한 탄두의 크기는 지름이 약 60~70 cm 가량인데, 이 경우 핵탄두의 질량은 Table 4에서 보는 바와 같이 대략 300~400 kg 이다^[11]. 그림 속의 장치가 4, 5차 핵실험에 실제로 사용된 것인지에 대한 확인은 쉽지 않지만, 적어도 북한이 개발하고자 하는 핵무기의 목표가 미사일에 탑재 가능한 탄두화라는 것을 짐작할 수 있다.

Table 4. Relation between weight and diameter of nuclear warhead

탄두중량(kg)	200	400	600	1,000
탄두직경(cm)	52	70	81	98

2.2 북한은 수소폭탄을 개발했을까?

Fig. 2는 3, 4차 핵실험 당시의 지진파를 측정한 자료다³⁾. 눈으로 보기에 4차 핵실험의 위력은 3차 핵실험과 유사하거나 혹은 약간 더 작기 때문에 3, 4차

핵실험의 위력만을 가지고 4차 핵실험의 핵무기 종류를 판단하기에는 어려움이 있다. 결국 4차 핵실험 시 사용된 핵무기의 위력이 3차 핵실험 때의 위력(8 kt)과 거의 유사한 것으로 본다면, 북한은 수소폭탄이 아닌 3차와 동일한 핵분열무기를 실험했을 가능성도 적지 않다고 볼 수 있다^[12]. 하지만 수소폭탄 개발을 강하게 주장하는 북한의 일관된 태도를 고려해 볼 때, 위력이 작은 소규모 시험용 수소폭탄 혹은 수소핵융합 반응을 일부 사용한 증폭핵분열무기일 가능성 또한 열려있다고 할 수 있다.

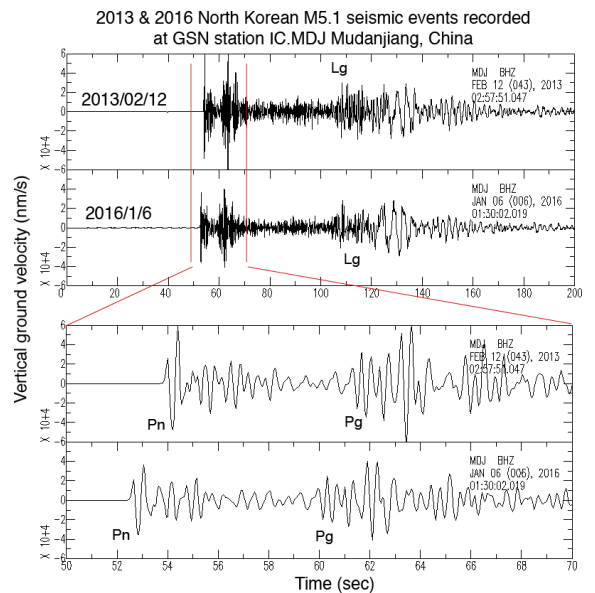


Fig. 2. Seismic events recorded for North Korea 3rd and 4th nuclear test

5차 핵실험의 경우에는 4차에 비해서 더 큰 위력을 보였는데, 4차 핵실험 이후 고작 8개월 만에 이뤄진 실험이라는 점에서 4차 핵실험과는 분리해서 생각해야 한다는 주장이 있다. 즉, 기존의 1~4차 핵실험은 핵분열 기술을 완성함과 동시에 위력을 증가시키고, 나아가 핵융합무기의 기술을 습득하려는 단계를 밟아 나가는 과정이었다면, 5차는 핵무기의 위력증가보다 소형화·경량화, 그리고 표준화를 통한 대량생산, 즉 전력화를 위한 실험에 초점을 맞추고 있다는 것이다. 5

3) IRIS(Incorporated Research Institutions for Seismology), <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/specialevents/2016/01/05/2016-no-rth-korean-nuclear-test/>

차 핵실험 이후 실시한 북한의 언론보도에서도 4차 핵실험 때 사용했던 수소탄의 표현보다 ‘핵탄두’라는 표현을 계속 강조한 점도 이 주장을 뒷받침 해준다. 결국 5차 핵실험을 실시한 핵무기의 종류는 핵융합무기인 수소폭탄보다 좀 더 정밀하고 완성된 기술을 토대로 한 핵분열무기 혹은 증폭핵분열무기일 가능성이 더욱 크다고 할 수 있다.

결국 논의의 중심은 다시 4차 핵실험으로 돌아간다. 앞서 논의된 바와 같이 4차 핵실험에 사용된 핵무기의 종류에 대한 다양한 추정 가운데 가능성 있는 시나리오를 크게 세 가지로 압축해 볼 수 있는데, 기존과 같이 Pu-239나 고농축우라늄(HEU)을 이용한 핵분열무기, 위력을 축소한 소형 핵융합무기, 그리고 증폭핵분열무기가 그것이다.

2.3 북한의 핵분열무기 개발 가능성

먼저 핵연료 재처리에 의한 Pu-239나 우라늄 농축프로그램(UEP)에 의한 U-235를 이용한 핵분열무기 실험의 가능성을 살펴보자. 과거 1~2차 핵실험을 통해 북한은 재래식 핵무기의 탄두를 개량해 나가고 있다는 평가를 받았다. 이후 3차 핵실험을 통해 어느 정도 핵물질의 압축비를 높일 수 있는 기술을 이용해서 핵연료의 소요량을 줄일 수 있는 기술을 습득했다고 본다 면, 4차 핵실험을 통해 초보적인 핵분열무기에서 벗어나 탄두화 기술의 성숙도를 높이기 위한 핵분열무기 실험을 다시 실시했을 가능성이 있다. 1~2차 핵실험의 핵물질로는 Pu-239가 사용되었다고 알려져 있는데, 3차 핵실험은 그 종류가 명확하게 밝혀지지 않았다. 하지만 대체로 U-235가 이때부터 사용되었다는 주장들이 더 힘을 얻고 있는 가운데, 그동안 영변 원심분리기 시설에서 농축해 왔던 U-235를 활용한 핵분열무기 기술의 완전함을 높이기 위해 핵분열무기를 실험했을 가능성이 있다. 핵무기 선진국들은 핵분열 기술만 가지고도 1 kt 미만의 소형화된 핵탄두를 개발하였다. 이에 북한은 자신들이 가지고 있는 많은 수의 장사정포를 이용한 전술핵 활용과 미사일 전력을 사용하기 위해 핵분열탄 기술의 완전한 고도화를 이를 목적으로 기존의 핵분열무기의 실험을 실시했을 수도 있다. 그러나 강도를 더해가는 국제사회의 압박 속에서 추가적인 핵연료 확보가 쉽지 않다는 점을 고려했을 때, 이미 확보한 한정된 자원을 좀 더 효과적으로 쓰면서 핵무기의 전략적 가치를 높일 필요가 있는 북한으로서는 한번의 기회조차 소중히 생각해야 할 것이다. 즉 국제적

비난과 제재를 감당하면서까지 이미 3차례나 실험한 핵분열무기 실험을 또다시 실시했다는 주장보다, 앞서 살펴본 탄도미사일에 실을 수 있을 정도의 크기를 가지면서도 고위력을 내는 소형 열핵무기, 혹은 증폭핵분열무기를 실험했을 가능성에 좀 더 무게가 실린다.

2.4 북한의 소형 핵융합무기(수소폭탄) 개발 가능성

북한의 주장에 의하면, 그들은 2009년 제대로 된 2차 핵실험 후 2013년 단 1차례의 추가 실험만으로 핵분열무기의 개발에 성공했으며, 이후 또 다시 3년 만인 2016년에 핵융합무기의 개발에 성공했다. 또한 같은 해에 핵무기의 소형화에도 성공함으로써 규격화된 핵탄두 개발을 통해 핵무기를 대량생산하고 전력화할 수 있다는 것이 그들의 주장이다. 이는 아무리 북한의 핵개발 속도가 빠르다고 하더라도 쉽게 납득이 가지 않는다. 핵융합무기는 핵무기 중에서도 가장 높은 기술 수준을 요구하는 무기로서 핵개발의 최종단계이기 때문에, 북한이 핵무기로서 간주될 수 있는 위력을 보인 2009년 2차 핵실험 이후 7년 만에 핵융합무기를 개발했다고 보기에는 다소 무리가 따른다.

Table 5에서 보는 바와 같이, 미국의 경우 최초 핵분열무기 실험 후 핵융합무기 개발까지 7년이 걸렸고 기타 핵보유국들의 경우에도 짧게는 3년, 길게는 8년 정도 걸렸다. 단순히 수치로 비교한다면 북한의 핵융합무기 개발이 가능하다는 생각을 할 수도 있지만, 미국의 경우 1945년 최초 실험 후 1946년 2차례, 1948년 3차례, 그리고 1951년에는 16차례, 도합 21차례나 핵실험을 실시한 후 수소폭탄을 개발하였다¹³⁾. 이런 미국의 예를 통해서 볼 때 강도 높은 국제사회의 제재로 인해 정치적, 경제적으로 궁지에 몰린 북한이 단순히 벼랑 끝 전술의 ‘절박함’ 만으로 2차례의 핵분열무기 실험 후 핵융합무기 기술을 개발했을 것이라고 판단하기에는 뭔가 석연치 않다.

만약 북한의 주장을 그대로 받아들여 4차 핵실험에 사용된 핵무기가 핵융합반응으로부터 주로 그 에너지를 얻는 열핵무기라고 가정한다면, 8 kt 정도로 추정되는 위력에 비취볼 때 북한은 아주 작은 형태의 열핵무기를 시험했을 가능성이 있다. 미국이 1960년대 개발한 W47 탄두는 600 kt의 위력(직경 46 cm, 길이 120 cm, 중량 약 332 kg)을 가진 최초의 소형화된 열핵무기 탄두이다. 일반적으로 알려진 열핵무기가 1 Mt 정도의 위력과 1 t 내외의 무게를 가지는 것에 비하면 소형화된 형태라 하겠다. 이러한 핵탄두 소형화를 위

한 가장 중요한 점은 핵장치, 즉 폭약과 압축렌즈, 반사재와 핵연료로 이루어진 핵장치의 부피와 무게를 줄이는 것이다¹⁴⁾. 그런데 열핵무기는 2단계 융합반응이 일어나기 위해 1단계 핵무기가 우선 폭발하여 적절한 온도를 만들어 주어야 한다. W47의 1단계 탄(Primary)은 53.5 kg의 질량을 가지는 Robin(W48) 핵분열탄두(nuclear fission warhead)이며 이는 15.5 cm × 84.5 cm의 크기를 가지는데, 북한의 경우 3차 핵실험까지 이 정도 수준의 소형화 기술을 습득했다고 볼만한 근거가 아직은 부족하다. 4차 핵실험 이후 북한이 공개한 탄두의 크기가 60~70 cm 정도였기 때문이다.

Table 5. Years of first nuclear and hydrogen bomb test of nuclear weapon states

국 가	최초 핵실험	수소폭탄 실험	소요기간
미 국	1945	1952	7년
구소련	1949	1953	4년
영 국	1952	1957	5년
프랑스	1960	1968	8년
중 국	1964	1967	3년

북한이 7년 전 2차 핵실험 당시 터뜨린 약 2 kt의 Pu-239 핵분열무기(Pu-239 2 kg 이 약 5 %의 효율로 폭발)는 재래식 핵무기의 기폭효율보다는 낮지만 1차에 비해서는 비교적 성공적이었다고 평가받고 있는데¹⁴⁾, 이것을 소형 열핵무기의 1단계 탄으로 이용했다고 가정해보자. 또한 2단계 탄에서 융합반응을 일으킨 중수소(D)-삼중수소(T)가 1 kg 정도의 적은 양이라고 가정한다면 이 수소폭탄의 설계위력은 80 kt급의 핵무기였다고 할 수 있다⁴⁾. 이 경우 1단계 탄 폭발 후 2단계 탄의 완전한 융합반응이 이루어지지 않은 “실패한” 핵융합무기 실험이 될 것이다. 그런데 4차 핵실험 당시 북한이 매우 자신 있게 자신들의 수소폭탄 소형화 기술에 대해서 수차례 언급하였고 자연환경에 피해를 주지 않는 안전한 실험이었다는 점을 거듭 강조한 점으로 미루어볼 때, 핵분열 무기에 비해 방사성 물질의 방출이 적은 핵융합무기를 사용했을 가능성이 여전히 남아있다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 수차례~수십 차례 실험을 통해 기술을 습득한 후에야 핵

4) D-T 1 kg이 융합할 때 발생하는 위력은 80 kt이다.

융합무기를 개발한 핵무기 보유 국가들의 전례를 보더라도, 제한된 자원과 국제사회의 제재 속에서 실험 횟수 또한 제한을 받는 북한이 완성된 형태의 소형화된 핵융합무기를 개발했다고 믿기에는 근거가 부족하다. Table 6은 주요 국가에서 실험한 핵융합무기의 위력을 보여준다. 일반적으로 핵융합을 이용한 열핵무기는 최소 100 kt의 위력을 넘어가는데, 4차 핵실험을 통해 북한이 보여준 핵무기의 위력은 핵융합무기를 개발했다는 주장을 뒷받침하기에 부족해 보인다.

Table 6. Comparison between Richter magnitude scale (M_L) and yield of nuclear fusion weapon detonated underground

국 가	일 자	지하 핵실험 위력(kt)	지진파규모 (리히터규모)
미국	1968.1.19	1000	6.30
구소련	1970.10.14	1001	6.6-6.8
중국	1992.5.21	660	6.5

2.5 북한의 증폭 핵분열무기 개발 가능성

4차 핵실험 이후 다수의 국내외 북한 핵 전문가가 추측한 핵무기의 종류가 바로 증폭핵분열무기이다. 단계화된 열핵무기, 특히 소형화된 핵융합무기는 핵무기 기술 스펙트럼의 가장 마지막에 위치한 만큼 이제 막 핵분열무기의 기술을 습득했을 것으로 추정되는 북한이 열핵무기 실험에 성공했다는 주장보다는 수 g의 D-T 혼합물을 핵분열연료 피트(pit) 내부에 주입시켜 핵분열의 효율을 증폭시켰다는 주장이 좀 더 설득력이 있다.

증폭핵분열무기에서는 핵융합반응으로부터 생성된 중성자가 핵분열의 효율을 증폭시키는데 사용된다. Fig. 3의 몬테칼로 모델링은 핵분열로부터 나오는 중성자 스펙트럼보다 핵분열과 핵융합으로부터 발생한 중성자 스펙트럼에서 중성자 선량(flux)이 증가하였음을 보여준다. 중성자의 선량이 증가하면 핵분열반응에서 필요한 중성자를 더 많이 확보할 수 있기 때문에 분열 효율성이 증가하게 된다.

Table 7은 핵융합에너지의 기여도에 따른 중성자 선량 기여도를 보여준다. 표에서 보는 바와 같이 5 %의 에너지 기여도만 있어도 약 30 %의 중성자 증대효과를 보였다.

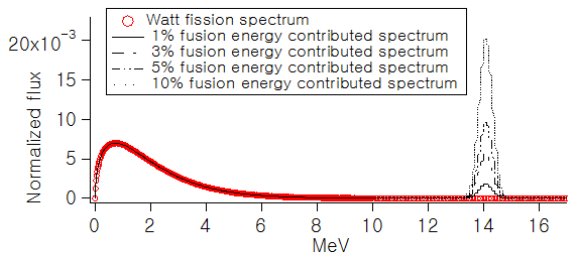


Fig. 3. Neutron energy spectrum produced by fission and fusion energy contribution using MCNP6 code

Table 7. Neutron flux contribution based on fusion energy contribution from MCNP modeling

핵융합 에너지 기여도 (%)	1	3	5	10
중성자 선량 기여도 (%)	5.82	17.34	29.48	61.93

다시 말해 증폭핵분열무기는 핵융합으로부터 얻는 에너지보다 중성자의 선량 기여도가 높기 때문에 소형화의 핵심인 핵분열의 효율을 향상시켜주게 된다. 따라서 북한이 2003년부터 D-T 융합을 위한 원료추출 연구를 시작한 점, 그리고 기체 상태가 아니라도 Li-6D 화합물을 이용하여 삼중수소를 생산할 수 있는 원료가 북한에 풍부하다는 점 등은 4차 핵실험 시 북한이 실험한 무기는 증폭핵분열무기라는 주장을 뒷받침 해 준다. 또한 소형화된 핵탄두를 실험했다고 주장하는 5차 핵실험 시에도 이 증폭핵분열기술이 사용되었을 가능성이 크다는 점을 시사해 준다. 왜냐하면 같은 위력의 핵분열무기에 비해 적은 양의 핵분열물질과 반사재, 기폭제 등을 사용하여 핵무기 개발의 기술적 목표인 소형화와 경량화를 달성할 수 있기 때문이다.

3. 북한의 핵무기 설계위력에 대한 기술적 논의

이제 남은 의문점은 4차 핵실험 당시 원래의 설계 위력이 얼마나 될까 하는 문제이고, 이는 북한의 핵 기술을 알려주는 중요한 지표가 될 수 있다. 북한이 공개하지 않는 한 북한 핵무기의 설계 위력을 측정하는 가장 좋은 방법은 지진파를 이용한 측정방법이다. 앞서 논의 되었듯이 많은 수의 연구에서 4차 핵실험

은 약 6~10 kt의 위력을, 5차는 약 10~12 kt의 위력을 가졌다고 보고 있다. 그런데 Zhang, 2013^[15]은 그의 연구에서 깊이에 따른 보정이 추가된 지진파-핵무기위력의 실험식을 다음과 같이 도출하였다.

$$M_b = 1.0125 \log(Y) - 0.7875 \log(h) + 5.887 \quad (1)$$

여기서 Y 는 yield 즉 핵무기의 위력이고, h 는 폭발깊이 즉 지표면으로부터의 깊이를 나타낸다. Table 8에서 보이는 바와 같이 Zhang, 2013^[15]은 이 연구를 통해 깊이에 대한 데이터를 획득하여 2차 핵실험의 장소의 깊이와 위력을 각각 610 m, 7.0 ± 1.9 kt로 계산하였고, 3차 핵실험은 각각 430 m, 12.2 ± 3.8 kt로 계산하였다. 특히 3차 핵실험의 경우는 지금까지 미국을 비롯해 국방부, 각종 언론이 보도한 8 kt의 위력보다 최대 2배 가까이 될 만큼 큰 수치이다.

대부분의 전문가들과 언론매체는 5차 핵실험에 이르러서야 처음으로 10 kt의 위력을 넘었다고 주장하였는데, 폭발깊이까지 고려한 위 연구에서는 북한이 이미 3차 핵실험에서 10 kt의 벽을 넘어서 히로시마에 투하된 핵무기의 위력 15 kt에 이르는 핵무기를 개발했을 수 있다는 가능성을 처음으로 확인하였다.

결국 실험장의 깊이 즉 폭발위치를 정확하게 측정하는 것이 중요한데, 본 연구에서는 포괄적 핵실험 금지기구(CTBTO)와 미국 지질조사국(USGS)등의 자료를 토대로 4, 5차 핵실험의 위치를 Google map에 표시하고, 북한이 수평경도를 이용하여 핵실험장을 구축했다는 점에 착안하여 깊이를 예측하였다.

Fig. 4는 함북 풍계리 만담산에 위치한 북한의 핵실험장 위성사진이며, 각 갱구의 위치와 핵실험 장소의 평면 위치를 표시한 것이다. 1차 핵실험은 동쪽에 위치한 1번 갱구에서 실시되었으나 핵 실험 후 붕괴되어 이후 사용되지 않았고, 2~5차 핵실험은 북쪽에 위치한 2번 갱구의 여러 가지갱도에서 실시된 것으로 알려져 있다.

남쪽 3번 갱구는 이미 2번 갱구에서 실험을 시작할 당시 예비로 만들어 놓은 것인데, 아직 2번 갱구에 몇 개의 가지갱도가 더 남아 있는지는 확인되지 않지만 이미 다 사용했다고 가정한다면, 지난해 말에 존재가 관측된 서쪽 4번 갱구가 완성되는 순간 3번 갱구내의 갱도에서 핵실험이 이루어질 것이라고 예측된다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 4, 5차 핵실험은 거의 만담산 정상부근에서 실험이 이루어진 것으로 관측되었다.

Table 8. Nuclear weapon yield calculation based on various methodology

차수	시기	지진파 규모 (M _b) 출처:CTBTO	핵무기 위력 추정				
			Zhang 2007	Chun 2011 ^[16]	KIGAM	Zhang 2013	
			Yield(kt)	Yield(kt)	Yield(kt)	Yield(kt)	Depth(m)
1	2006	4	0.54	0.56	0.46	0.48a	-
2	2009	4.5	1.76	2.15	1.83	7.0 ± 1.9a	610a
3	2013	4.9	4.53	7.36	5.47	12.2 ± 3.8a	430a
4	2016.1	4.9	4.53	7.36	5.47	15.9 ± 1.1c	724 ± 65b
5	2016.9	5.1	7.27	13.59	9.47	27.0 ± 3.2c	694 ± 107b

^a Zhang, 2013 연구에서 발표된 값을 인용

^b 각종 기관 및 연구에서 발표된 폭발위치를 이용해 추정된 폭발 깊이(Table 9 참조)

^c 식 (1)과 추정된 폭발위치를 이용해 본 연구에서 계산한 값임



Fig. 4. North Korea nuclear test site and entrances

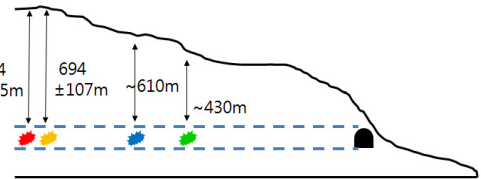
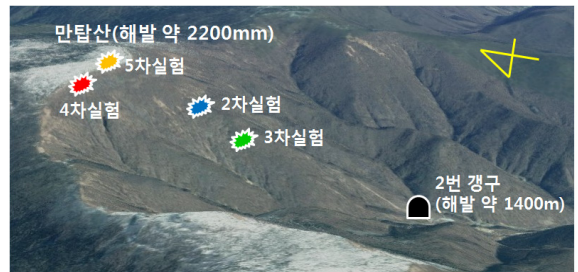


Fig. 5. Side view of Mt. Mantap and estimated burial depth of test site

Fig. 5의 Google Map을 통하여 확인한 2번 갱구의 높이는 해발 약 1,400 m인데 수평갱도를 이용하여 핵실험을 실시했다고 가정한다면, 4차(적색), 5차(황색) 핵실험장의 위치를 통해 지표면으로부터의 깊이를 유추할 수 있다.

USGS를 비롯한 여러 기관과 연구에서 측정한 4, 5차 핵실험장의 좌표가 Table 9에 나와 있다. 이 좌표를 이용하여 판단한 4, 5차 핵실험장의 깊이는 각각 724 ± 65 m, 694 ± 107 m이고 이 값을 앞선 식 (1)에 대입하여 계산한 핵무기 위력이 Table 8의 가장 오른쪽 열에 있는 데이터이다.

우선 여기서 4차 핵실험의 위력인 15.9 ± 1.1 kt에 주목해보자. 이는 기존에 공개된 6~10 kt의 위력에 적게는 1.5배, 많게는 2.8배가량 차이가 난다. 오차를 고려한다 하더라도 이 값은 기존에 알고 있었던 북한의 핵 능력을 훨씬 뛰어넘는 수준이다.

만약 2차 핵실험 때 사용했을 것으로 추측되는 4 kt 정도의 위력으로 최초 핵무기를 설계했다면^[14] 4차 핵실험의 증폭률은 최대 4.25배에 달하고 이는 통상적인 증폭핵분열무기의 2~5배 증폭률을 모두 달성한 것이라고 봐야 한다. 이때 증폭률이 최소한 3.7배는 된다고 볼 수 있는데, 이 경우 북한은 지난 4차 핵실험을 통해 증폭핵분열무기의 기술을 온전히 확보하였다고 할 수 있다. 만약 최초 설계위력이 그 두 배인 8 kt 정도라고 한다면 약 2배 정도 증폭된 위력을 가졌다는 것인데, 이 경우에도 북한이 핵무기 소형화에 필요한 융합을 이용한 증폭기술을 상당한 수준으로 확보

했다고 볼 수 있다. 어느 경우이든 북한은 증폭핵분열 기술을 어느 정도 확보하고 있고, 이는 핵분열무기의 기술 또한 일정 수준 이상으로 가지고 있다는 것을 의미한다. 결국 5차 핵실험의 시기가 4차와 불과 8개월 차이밖에 나지 않는다는 점도 충분히 납득이 갈 수 있는 대목이다.

Table 9. Estimation of the burial depth by the test location

출 처	4차 핵실험		5차 핵실험	
	실험좌표	고도(m)	실험좌표	고도(m)
USGS	41.300°N 129.047°E	2,060	41.323°N 128.987°E	1,987
중국과학 기술대	41.298°N 129.072°E	2,086	41.298°N 129.078°E	2,189
한국 기상청	41.300°N 129.090°E	2,066	41.299°N 129.079°E	2,200
<i>Gibbons 2016</i> ^[17]	41.296°N 129.079°E	2,189	41.297°N 129.084°E	2,150
독일지질 연구센터	41.310°N 129.070°E	2,072	41.300°N 129.08°E	2,197

그런데 핵융합에 의한 증폭이 최대 10배까지도 이루어 질 수 있기 때문에 최초 8 kt 위력 설계 시 최대 위력이 80 kt에 도달할 수 있게 되고 이 경우 주변 가지갱도 및 갱구 자체의 붕괴가 우려된다는 점에서 핵무기의 최대 증폭위력 설계를 20 kt 이하(5배 증폭 시), 즉 증폭 전 4 kt 정도가 북한의 최초 설계위력이고, 8 kt는 고려대상이 아니라는 주장도 있다^[18]. 물론 1차 핵실험 당시 갱도가 붕괴되어 1번 갱도에서는 더

이상 후속 실험을 할 수 없게 된 전례가 있으니 이런 주장도 일견 타당해 보인다. 하지만 본 연구에서는 조금 다른 시각으로 접근해 보았다. 이미 4차 핵실험 당시 3번 갱도가 구축되어 있었고, 4번 갱도의 건설도 시작된 상황이었다. 결국 2번 갱도의 붕괴를 우려했다고는 하지만 이미 예비 갱도들이 건설되었거나 건설 중 이었다는 점과, 하루 빨리 재래식 핵분열무기의 기술에서 벗어나 핵무기를 전술, 전략적으로 이용하기 위해 고위력을 가진 핵무기의 소형화와 경량화가 시급한 북한의 입장을 고려했을 때, 붕괴를 감수하고서라도 고위력의 증폭실험을 했을 가능성도 있다. 따라서 3차 핵실험의 위력인 8 kt를 그대로 사용하여 증폭 핵분열무기를 실험했다는 주장도 전혀 설득력이 없는 것은 아니다.

이론적으로 0.5 mole의 T(1.5 g)와 D(1.0 g)가 융합할 때 발생하는 중성자의 수는 약 3.00×10^{23} 개인데 U-235 1 kg 안에는 U-235원자의 개수가 약 2.60×10^{24} 개인 것을 고려한다면 이상적으로는 약 120 g의 U-235를 분열시킬 수 있다. 1차 분열에 의해 생산되는 2차 반응중성자까지 고려한다면 분열시킬 수 있는 U-235의 최대량은 대략 360 g까지 높아진다. 이 360 g의 U-235가 핵분열 시 약 7.2 kt의 위력을 발생시킬 수 있는데, 이는 D-T 0.5 mole에 의한 증폭효과가 7.2 kt이라는 것이고, 만약 증폭 전 핵분열무기의 설계위력이 8 kt이라면 총 위력은 약 15.2 kt이 된다. 이는 증폭률 약 2배에 해당되며, 앞선 몬테칼로 모델링 결과와 본 연구에서 예측한 4차 핵실험의 위력과도 잘 일치한다.

4차 핵실험의 최초 설계위력이 8 kt일 수도 있다는 가정은 지하핵실험의 안전심도 분석을 통해서도 짚어 볼 필요가 있다. 안전심도는 Table 10과 11에서 보는 바와 같이 핵무기의 폭발위력과 지하 암석의 재질에 따라 바뀌며 아래의 식을 통해 계산할 수 있다.

Table 10. Proportional depth coefficient and Safety depth for underground nuclear test for various medium

위력[kt]	비례심도계수 [$m/kt^{1/3}$]			최소 안전심도[m]		
	혈암	화강암	규산염암	혈암	화강암	규산염암
2	107	201	128	134.8	253.2	161.3
20	100	170	82	271.4	461.4	222.6
200	90	128	55	526.3	748.5	321.6
2000	70	82	30	881.9	1033.1	377.9

Table 11. Safety depth for underground nuclear test yield for granite ground

위력(kT)	3.5	15	35	100	300	1000
안전심도(m)	295	410	490	620	720	880

$$\text{안전심도[m]} = \text{비례심도계수 [m/kT}^{1/3}] \times (\text{폭발력[kT]})^{1/3} \quad (2)$$

핵실험장 일대가 한반도에 혼한 지하 화강암 지역인 것을 감안하고 북한이 지하 핵실험을 실시한 깊이를 앞서 추정한 600~700 m로 본다면, 100 kt의 위력에도 안전할 수 있다는 점을 확인할 수 있다. 결국 4차 핵실험이 실시된 핵실험장에서 최초 설계위력 8 kt, 최대 80 kt의 핵실험도 전혀 불가능한 것이 아니다.

또한 거듭되는 국제사회의 제재 속에서, 4차 핵실험 강행 시 더욱 강력한 제재가 뒤따를 것이라는 점을 잘 알고 있는 북한으로서는 핵실험 한 번의 소중한 기회를 단지 작은 설계위력의 탄을 시험하기 위한 기회로 사용해버리기에 아까운 점도 있을 것이라 생각해 볼 수 있다. 따라서 북한이 증폭핵분열무기의 기술을 충분히 보유하고 있다는 가정 하에, 물리적 안전이 담보된 상태에서 국제사회에 자신들의 핵기술의 우수함을 알릴 수 있을 정도의 큰 위력의 실험(증폭 전 8 kt)을 계획했을 가능성도 충분히 높다고 볼 수 있다.

이번에는 5차 핵실험의 위력에 대해 살펴보자. Table 8에서 확인할 수 있듯이 Zhang, 2013의 식으로 계산한 5차 핵실험의 위력은 27.0 ± 3.2 kt이고, Zhang, 2007과 chun, 2011의 식으로 계산하면 7.27~13.59 kt 이다. 전자의 경우 4차 핵실험과 같은 증폭 전 설계 위력 8 kt를 3~4배 증폭하면 비슷한 위력을 얻을 수 있고, 후자의 경우에도 순수 핵분열무기만으로도 달성할 수 있는 위력이다. 어느 경우이든 5차 핵실험에서 북한은 4차 핵실험 당시의 핵분열무기 설계위력 8 kt 정도를 가지고 증폭핵분열무기 혹은 순수 핵분열무기를 이용한 핵탄두 위력 실험을 했을 것이라는 가능성이 높다고 볼 수 있다.

순수 핵분열무기를 사용했을 경우를 좀 더 살펴보자. 2차 핵실험의 설계위력 4 kt를 위해 사용되었을 것으로 추측되는 Pu-239의 양은 대략 2 kg이다^[14].

실제 2차 핵실험의 위력이 Table 8에서 살펴보듯 최

소 2 kt, 최대 5~9 kt이라고 할 때, Table 12^[20]과 Fig. 6^[20]에서 살펴보면 북한은 최소한 중간단계의 핵기술을 가졌었다고 볼 수 있다. 따라서 2차 핵실험 이후 7년이 지난 5차 핵실험 시 북한은 최소 중간~높음 사이의 기술수준을 가지고 있고, 순수 핵분열무기를 사용했다고 가정한다면 7.27~13.59 kt의 위력 달성을 위해 2~3 kg, 27.0 ± 3.2 kt의 위력을 달성하기 위해서 3.5~4 kg의 Pu-239를 사용했을 것이라는 판단이 가능하다. 일반적으로 알려진 임계질량 4~5 kg 보다 적은 양의 Pu-239를 이용하여 핵분열무기를 만들 수 있기 때문에 이는 북한이 핵무기 소형화 기술에 한발 더 다가갔다는 의미이다.

Table 12. Approximate fissile material requirements for pure fission nuclear weapons

위력 (kt)	Pu-239(kg)			U-235(kg)		
	기술 수준			기술 수준		
	낮음	중간	높음	낮음	중간	높음
1	3	1.5	1	8	4	2.5
5	4	2.5	1.5	11	6	3.5
10	5	3	2	13	7	4
20	6	3.5	3	16	9	5

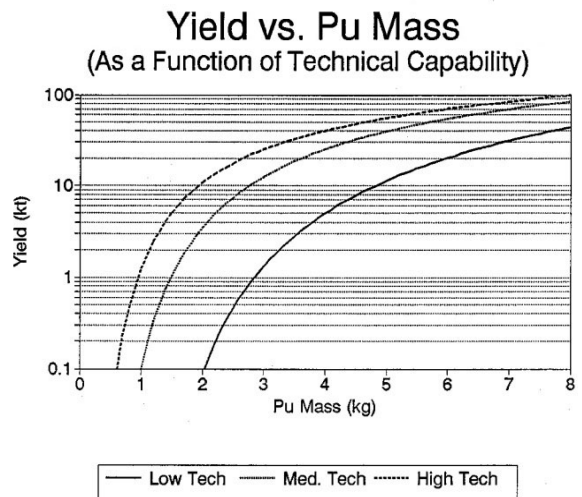


Fig. 6. Nuclear weapon yield vs. Plutonium critical mass as a function of technical capability

물론 아주 정밀한 수준의 핵무기 위력측정은 북한 핵실험장 현장에서 직접 측정하지 않는 이상, 지진파 위력 측정의 오차, 핵실험장 깊이추정의 오차, 그리고 관계식의 오차 등으로 인해 정확성의 한계가 분명하게 존재한다고 할 수 있다. 그러나 그러한 오차까지 감안한다 하더라도 앞서 논의한 바와 같이 북한의 4, 5차 핵실험의 설계위력 및 실제 폭발위력이 기존 KIGAM에 의해 발표된 것보다 더 클 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

4. 북한 4, 5차 핵실험의 의의와 향후 핵실험 예측

북한의 4, 5차 핵실험의 가장 큰 의미는 두 번의 핵실험을 통해 핵무기의 기술을 비약적으로 발전시켜 국제사회의 인정과는 무관하게 실질적 핵보유국에 한발 더 다가섰다는 것이며, 역으로 우리의 안보현실은 더욱 악화되었다는 점이다.

구체적으로 북한은 4차 핵실험을 통해 증폭핵분열무기의 개발을 거의 완료하였다고 볼 수 있다. 앞선 기술적 분석에서 살펴보았듯이, 기존 설계위력 8 kt를 2배정도 증폭시킴으로써 증폭핵분열무기 기술을 확보하였다는 가정이 충분히 설득력이 있다. 또한 핵무기의 주요 투발수단인 미사일 개발 속도에 맞춰서 5차 핵실험을 통해 소형화·경량화 된 핵탄두의 위력을 검증하고, 증폭핵분열 혹은 순수 핵분열방식에 관계없이 핵무기의 대량생산을 위한 표준화가 시기적으로 멀지 않았다.

북한의 2~5차 핵실험은 2번 갱구의 가지갱도들에서 실시된 것으로 알려져 있는데, 아직까지 사용하지 않은 남쪽 3번 갱구를 통한 갱도들과 새로 건설 중인 서쪽 4갱구가 변수이다. 1차 핵실험 이후 붕괴된 동쪽갱도의 사례를 바탕으로, 북한은 적어도 한 개의 예비갱도가 준비된 상태에서 핵실험을 실시할 것으로 판단되며, 결국 4번째 갱구의 내부 갱도가 완성되는 순간이 3번 갱구의 갱도에서 실험을 실시하는 시기가 될 것이다. 물론 이는 2번 갱구 내의 가지갱도가 더 이상 없다는 가정하에서의 예측이다. 그리고 이 갱도들이 기존의 수평식 갱도의 구조를 가지면서 좀 더 아래로 파고드는 형태가 된다면, 북한은 4차, 5차 때보다 더 깊은 안전심도를 확보할 수 있게 되고, 이는 더 큰 위력을 가지면서도 소형화·경량화된 ‘증폭핵분열무기’ 실험이 될 것이라고 판단할 수 있다. 현재의 북한의 핵무

기 개발속도에 비추본다면 위와 같은 형태의 2~3차례의 추가적인 핵실험을 통해 완전한 핵기술을 습득함과 동시에, 늦어도 궤도 재진입 기술의 확보를 통한 ICBM 전력화²¹⁾ 및 SLBM의 전력화¹⁷⁾ 시기인 2020년 이내에 북한은 고위력·소형화된 핵탄두 개발을 완료할 수 있는 기술적 발판을 마련할 것이라는 예측이 가능하다.

5. 결론

2006년 1차 핵실험 이후 북한은 매우 빠른 속도로 핵 개발을 가속해왔다. 핵 개발 역사를 영변의 핵시설이 들어선 1986년으로 거슬러 올라간다면 북한은 30년간 꾸준히 핵보유를 추진해 왔고, 5차에 걸친 핵 실험을 통해 상당한 수준의 핵무기 기술을 보유하게 되었다고 추측할 만한 근거가 충분하다.

4차 핵실험을 통해 핵분열을 증폭할 수 있는 기술을 확보하였고 이를 통해 핵무기의 최종 단계인 핵융합무기, 일명 수소폭탄을 만들 수 있는 발판을 마련하였을 것이라고 짐작된다. 또한 5차 핵실험을 통해 소형화된 핵무기의 전력화를 위한 시험을 실시하여 핵무기의 투발수단인 미사일 개발과 함께, 핵무기를 전략적으로 이용할 수 있는 초석을 마련했을 것이라고 판단된다.

현재 북한의 핵기술 개발 속도로 판단해 볼 때 북한의 핵능력은 매우 빠르게 진화하고 있는데, 2020년까지 보유하는 핵무기가 약 20기에 이르고 보유 가능한 핵무기의 최댓값이 29기에 이른다는 연구결과도 있다²²⁾. 결국 앞으로 3~5년이 북한의 핵기술을 억제할 수 있는 이른바 골든타임으로 여겨질 수 있는데, 이후 완전한 형태의 증폭핵분열무기와 소형화된 핵탄두가 적절한 투발수단과 결합되는 시기가 온다면 북한의 핵 개발을 억제하기가 더욱 어려워 질 수 있다.

결국 북핵 문제는 우리가 생각하지 못한 속도로 더욱 악화되고 있으며, 이는 우리에게 이 문제를 평화적으로 해결 할 수 있는 시간이 얼마 남지 않았다는 무거운 화두를 던져준다.

후 기

본 연구는 육군사관학교 화랑대연구소의 2016년도 (과제번호 20160529) 국고과제연구지원비를 지원받아 작성되었음.

References

- [1] J. Murphy, "P-wave Coupling of Underground Explosions in Various Geologic Media," in E. S. Husebye and S. Mykkeltveit(eds.), Identification of Seismic Sources-Earthquake or Explosion, pp. 201-205, 1981.
- [2] Ringdal et al., "Seismic Yield Determination of Soviet Underground Nuclear Explosions at the Shagan River Test Site," *Geophys. J. Int.*, Vol. 109, pp. 65-77, 1992.
- [3] Murphy et al., "Application of Network - Averaged Teleseismic P-wave Spectra to Seismic Yield Estimation of Underground Nuclear Explosions," *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 158, pp. 2123-2171, 2001.
- [4] Murphy et al., "Exploitation of the IMS and Other Data for a Comprehensive, Advance Analysis of the North Korean Nuclear Tests," *Monitoring Research Review, Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, 2010.
- [5] Ni et al., "Rapid Source Estimation from Global Calibrated Paths," *Seismol. Res. Lett.* 81, pp. 498-504, 2010.
- [6] Rougier et al., "Constraints on Burial Depth and Yield of the 25 May 2009 North Korean Test from Hydrodynamic Simulations in a Granite Medium," *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L16316, 2011.
- [7] John Schilling, A New Submarine-Launched Ballistic Missile for North Korea, U.S.-Korea Institute at the Paul H. Nitze School of Advanced International Studies(SAIS), Johns Hopkins University, <http://38north.org/>, 2016.
- [8] North Korean Ballistic Missile Models. Retrieved April 16, 2017, from <http://www.nti.org/analysis/articles/north-korean-ballistic-missile-models/>
- [9] Mary Beth Nikitin, "North Korea's Nuclear Weapons: Technical Issues," CRS Report for Congress, Congressional Research Service, 2013.
- [10] Tal Inbar, "Credible Threat? DPRK(North Korea) Missile Program Technical Analysis and Global Implications," *Addressing The North Korean Ballistic Missile Threat To The United States(Presentation at the MDAA Congressional Roundtable Discussion)*, Washington, D.C., April, 2016.
- [11] Zhang Hui, "Revisiting North Korea's Nuclear Test," *China Security*, Vol. 3, No. 3, pp. 119-130, 2007.
- [12] Mary Beth D. Nikitin, "North Korea's January 6, 2016, Nuclear Test," *CRS Insight*, 2016. 1. 7.
- [13] "United States Nuclear Tests July 1945 through September 1992," U.S. Department of Energy Nevada Operations Office, DOE/NV-209-REV 15 December 2000.
- [14] Joo Hyun Moon, "Assessment of North Korea's Nuclear Capability through Nuclear Tests' Yields," *The Korean Journal of Unification Affairs*, Vol. 53, 2010.
- [15] Zhang et al., "High-precision location and yield of North Korea's 2013 Nuclear Test," *Geophysics Research Letters*, Vol. 40, 2941-2946, 2013.
- [16] Chun et al., "Magnitude Estimation and Source DiscriminationL A Close Look at the 2006 and 2009 North Korean Underground Nuclear Explosions," *Seismological Society of America*, Vol. 101, pp. 1315-1329, 2011.
- [17] Gibbons et al., "Accurate Relative Location Estimaties for the North Korean Nuclear Tests using Empirical Slowness Corrections," *Geophys. J. Int.*, Vol. 208, pp. 101-117, 2017.
- [18] Sangmin Lee, "The Technological Assessment of the Fourth North Korean Nuclear Test and the Prospect of Future Tests," *Korea Defense Issue and Analysis*, Vol. 1606(16-7), 2016. 2. 15.
- [19] Choon Geun Lee, "Scientific Understanding of the Under Ground Nuclear Test," *Science and Technology Policy Institute*, 2007.
- [20] Thomas B. Cochran, Christopher E. Paine, "The amount of Plutonium and Highly-Enriched Uranium Needed for Pure Fission Nuclear Weapons," *Natural Resources Defense Council Report*, 1994.
- [21] John Schilling, North Korea's Large Rocket Engine Test: A Significant Step Forward for Pyongyang's ICBM Program, U.S.-Korea Institute at the Paul H. Nitze School of Advanced International Studies (SAIS), Johns Hopkins University, <http://38north.org/>,

2016.
[22] David Albright, “Future Direction in the DPRK’s

nuclear Weapons Program: Three Scenarios for
2020,” US-Korea Institute at SAIS, p. 24, 2015.