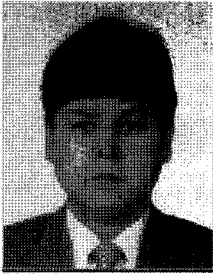


## 핵실험과 지각변동

Underground Nuclear Test and Crustal Deformation



글 | 金翼坤  
(Kim, Ik Gon)

지질 및 지반기술사  
(주)지지컨설턴트 대표이사

E-mail: ggcon@hitel.net

*Huge amount of energy produced by an underground nuclear test is released into the surrounding rock. Depending on the properties of the bed rock surrounding the detonation and overlaying it a variety of effects can occur. At some particular depth the increasing amount of material thrown upward is exactly balanced by the decreasing fraction escaping the crater, the crater volume reaches to a maximum. This depth is called the optimum depth of burial and varies somewhat with the geology of the site, being greater for less dense and structurally weaker material.*

지난 주 휴일에 모처럼 가족과 함께 해적으로 유명한 조니 뎀과 안젤리나 졸리가 출연하는 '투어리스트'라는 영화를 봤다. 영화 속에서 조니 뎀은 모든 사람이 찾고 있는 금고를 희망과 절망이 공존하는 야누스 상 뒤에 숨긴다. 나는 이 장면을 보면서 지금 핵의 야누스 뒤에서 선택의 기로에 처해진 한반도를 생각했다. 북한은 선군정치, 즉 군대를 앞세우는 강성대국으로의 핵무장 길에 들어섰고 남한은 '원전 르네상스'를 녹색성장의 미래 발전 동력으로 삼고 있다. 즉, 한반도는 현재 남아 있는 유일한 분단국가로서 핵문제에 있어서도 극명하게 양면이 공존하고 있는 셈이다.

핵폭탄이나 원자력 발전의 에너지는 모두 아

인슈타인의 유명한 공식,  $E=mc^2$ , 즉 핵분열에 따른 질량 감소에 비례하여 아주 미량의 질량으로도 엄청난 에너지를 내게 되며, 핵분열을 일으키는 우라늄 U-235와 관련이 있다. 천연 우라늄의 99%를 차지하는 U-238은 핵분열 물질이 아닌 반면에, 핵물질인 U-235는 자연 상태에서는 0.7%밖에 되지 않는다. 이를 분리하여 3~5%로 농축하면 원자력발전에 필요한 핵연료가 되며, 90% 이상이 되면 핵무기 원료가 된다. 핵연료에 있는 U-235가 분열할 때 발생하는 중성자가 U-238에 흡수되면 플루토늄이 되는데 원자로에서 타고남은 연료봉에 남아있게 된다. 플루토늄은 우라늄보다도 적은 양으로도 핵분열 연쇄반응을 일으킬 수 있기

때문에 이를 분리하여 농축하게 되면 핵폭탄이 되는 것이다.

북한은 2006년 10월 9일 1차 핵실험에 이어 2009년 5월 25일 2차 핵실험을 풍계리 산악 지역에서 실시하였다. 두 차례의 핵실험은 모두 플루토늄원자탄으로 영변의 5메가와트 원자로의 연료봉에서 추출하여 농축한 것으로 알려져 있다. 북한이 1985년에 가입한 핵확산금지조약인 NPT (Non-Proliferation Treaty)와, 1991년에 서명한 남북한의 '한반도 비핵화 공동선언', 그리고 1994년에 미국과 북한이 합의한 '제네바 기본합의문' 모두 핵재처리 및 농축을 금지하고 있다. 북한은 탈퇴와 파기를 거듭하며 플루토늄을 30~50킬로그램 정도 농축하였고 이중 10킬로그램 정도를 핵실험에 사용한 것으로 추정하고 있다.

지하 핵실험은 직경 1~2m로 수 백 미터 깊이까지 굴착한 수직 갱도(Vertical shaft) 또는 산악지역에 뚫은 수평갱도(Adit) 내에서 실시하는 것이 보통이다. 북한이 수행한 두 차례 핵실험은 모두 수평갱도 내에서 이루어진 것으로 파악되고 있다. 어떤 방식이든 핵실험 시에는 우리가 실생활에서는 경험할 수 없는 아주 큰 에너지가 나오기 때문에 흔히 그 크기를 지진 규모로 나타내기도 한다. 폭발력이 1kt 정도인 핵폭탄이 터질 때 나오는 에너지를 지진 규모로 환산하면 약 4정도가 된다. 참고로 지진규모가 1씩 증가함에 따라 에너지는 약 32배씩 증가한다. 따라서 핵실험 시 관측된 지진파로부터 계산한 지진규모가 5라면 이는 약 32kt의 폭발력을 갖는 핵폭탄이 터진 것을 의

미한다.

지하 핵실험 시에는 이와 같이 중규모 정도의 지진에 버금가는 큰 에너지가 방출되기 때문에 지각 내에 변형이 생기게 된다. 지각변형의 정도와 양상은 핵폭탄의 폭발력, 핵실험 깊이, 핵실험 장소의 지질조건에 따라 달라진다. 폭발깊이가 얕으면 분화구(Crater)가 생기면서 지표면이 함몰되거나, 불룩하게 솟아오르기도 하며 주변에 산사태를 일으키는 등 지각 내부와 지표면이 변형된다. 지하 핵실험 시 가장 우선적으로 고려해야 할 사항은 대기 중으로 방출되는 방사능량이 최소가 되도록 하는 것이다. 미국 네바다 시험장(Nevada Test Site)에서 수행한 실험결과에 따르면 폭발력이 1kt인 핵폭탄을 지하에서 터트릴 때 방사능 유출이 최소가 되는 최소 깊이는 약 122m이며, 폭발력이  $Y$ 일 때 최소 깊이는  $d=122Y^{1/3}$  관계식으로부터 계산할 수 있다. 예를 들어, 폭발력이 10kt인 경우에는 방사능 유출이 최소가 되는 깊이는 약 263m이다. 여기서 말하는 최소 깊이는 방사능 유출이 최소가 된다는 의미로 이 정도 깊이에서 핵실험을 하면 지표면은 함몰된다.

앞서 언급한 바와 같이 지하 핵실험에 따른 지각변형 정도는 핵 실험장 주변의 지질조건, 핵실험이 이루어지는 깊이 및 폭발력에 좌우된다. 여기서 핵실험이 이루어지는 깊이( $d$ )와 폭발력( $Y$ )간의 관계로 정의되는 비례 깊이(SDoB, Scaled Depth of Burst)라는 척도를 도입하면 지각의 변형 양상과 정도를 쉽게 나타낼 수 있다. 비례깊이 SDoB는  $d/Y^{1/3}$ 로 정

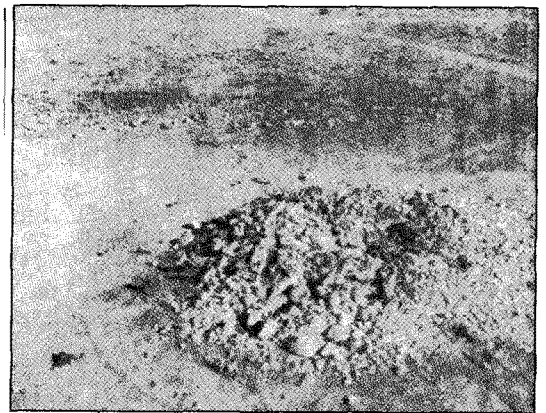
의된다. 일반적으로 SDoB가 60보다 작은 경우에는 분화구(Crater)가 생성되고, 이 값의 범위가 90~175일 때는 지표함몰(Surface collapse)이 일어나고 175이상일 때는 지표면에 거의 흔적을 남기지 않고 지각 내에 공동(Cavity)과 침니(Chimney)가 형성된다. 여기서 특이한 점은 이 값이 60~90일 때는 분화구나 지표함몰대신 분화구를 거꾸로 뒤집어 놓은 모양으로 볼록하게 지표면이 솟아오르는데 이를 역 분화구(Inverse crater) 또는 Retarc라 부른다(그림 참조). Retarc는 지표변형 양상이 분화구와 반대라서 Crater의 철자를 거꾸로 나열하여 만든 용어이다. 이로부터 폭발력이 1kt인 핵폭탄을 지하에서 터트릴 때 지표면에 흔적이 남지 않는 최소깊이는 약 175m인 것을 알 수 있다. 참고로 지하 핵실험 시 생기는 공동의 크기는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$R = C(Y^{1/3} / (\rho * h)^{0.25}),$$

여기서  $R$ 은 공동의 반경(m),  $C$ 는 주변암석에 의해 결정되는 상수,  $Y$ 는 폭발력(kt),  $\rho$ 는 암석의 밀도 그리고  $h$ 는 깊이(m)이다. 참고로 응회암(Tuff)의  $C$ 값은 74.75~77.66이고 화강암은 57.70~60.48로 폭발력이 같더라도 화강암지역에서 핵실험을 하면 이 때 생기는 공동의 크기가 더 작은 것을 알 수 있다.

올해 세인의 관심을 끈 뉴스 가운데 하나가 백두산 폭발 가능성과 관련된 것이다. 그 가운데 하나가 북한이 앞으로 좀 더 큰 규모의 핵실험을 한다면 그로 인해 백두산 폭발이 촉발될

지도 모른다는 주장이었다. 핵실험 시 발생하는 에너지 양이 상상을 초월할 만큼 크기는 하지만 우리가 밭 딛고 사는 지각 역시 대단히 안정적이고 지각변형이 핵 실험장 주변에 국한되기 때문에 양자의 관련성은 거의 없다고 해도 과언이 아니다. 이는 화산과 지진활동이 가장 활발한 일본이나 인도네시아에서도 양자의 상관관계가 아직까지 명확하게 밝혀지지 않을 것을 보면 금방 알 수 있다. 그러나 지금까지 연구결과에 따르면 백두산 밑에는 분명히 마그마가 존재하고 미소지진이 간헐적으로 관측되기 때문에 폭발 가능성에 대한 연구는 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 그렇지만 불확실하고 제한적인 자료만 가지고 무리하게 폭발 가능성을 제기하는 자세도 지양해야 할 것이다.



▲ 대규모 지하 폭발로 생긴 Retarc. Retarc는 지표 지형의 변형양상이 분화구와는 반대로 볼록하게 솟아올라 Crater의 철자를 거꾸로 배열하여 만든 용어이다.

끝으로 핵실험 금지조약의 역사를 살펴보자. 1945년 7월 16일 새벽 인류역사상 최초의 핵실험이 이루어진 후 미국, 영국, 소련은 핵실험에 의한 방사능 피해와 그 위험성을 인식하

고 1963년 10월 대기권, 수중 그리고 우주공간에서의 핵실험을 금지하는 제한적 핵실험 금지조약(Limited Test Ban Treaty)을 체결하였으며, 우리나라도 1964년에 이 조약에 가입하였다. 그 후 1974년에는 이를 좀 더 강화하여 미국과 소련이 주축으로 지하 핵실험일지라도 폭발력을 150kt 이하로 제한하는 배경치 금지조약(Threshold Test Ban Treaty)을 체결하였다. 1996년에는 장소불문하고 지구상에서 어떠한 형태의 핵실험도 금지하는 포괄적 핵실험 금지조약(Comprehensive Test Ban Treaty)이 제 50차 UN총회에서 채택되었다. 이때 한국지질자원연구원이 한국의 국가자료센터 NDC(National Data Center)로 지정되어 주변국가의 핵실험이나 대규모발파(TNT 300ton 이상)를 탐지·분석하여 이를 자국 정부와 CTBT에 보고하는 업무를 수행하고 있다. 오스트리아 수도 비엔나에 있는 포괄적 핵실험 금지조약기구는 비밀리에 수행하는 핵실험을 감시할 목적으로 321개의 지진파, 공중음파, 수중음파 및 방사능 관측소로 이루어진 전 지구적인 감시망(International Monitoring System)을 구축하여 운영하고 있다. 1960대 후반부터 주한 미 공군이 운영하고 있던 원주에 있는 KSRS 지진관측소도 이 가운데 하나로 2006년 한·미간에 체결된 이관협정에 따라 지금은 그 소유권이 우리나라로 이관되어 한국지질자원연구원과 미 공군이 공동으로 운영하면서 주변국의 핵실험 활동을 감시하고 있다.

북한의 핵개발 정책이 우리의 '원전 르네상스'에도 보이지 않는 피해를 주고 있다. 분

리·농축은 핵무기 제조에만 국한되는 것이 아니라 단지 농축 정도의 차이일 뿐 연료봉의 제작이나 폐연료봉의 재처리에도 필요하다. 하지만 남북한의 '한반도 비핵화 공동선언'이나 한미원자력협정에 의해 남한에서도 금지되어 있다. 이런 한반도의 핵 문제를 상징적으로 보여주는 것이 신포 원자력발전소의 건설 중단이다. 1994년의 제네바 합의문에 의해 연간 중유 50만톤 제공과 함께 신포에 2기의 경수로를 2003년까지 건설하기로 하였으나 북한의 우라늄 농축 가능성이 제기되면서 2003년에 중단된 것이다.

북핵과 관련하여 6자회담 재개가 조심스럽게 논의되고 있다. 미국, 러시아 그리고 중국은 유엔안보리 상임이사국이면서도 핵 강국이다. 남한과 북한은 일본과 같은 비핵 국가이지만 일본은 우라늄 농축·재처리가 허용된 나라이다. 초유의 핵 강국으로 둘러싸인 한반도의 가장 합리적인 선택은 비핵 지역으로 남아서 우라늄 농축이나 폐연료봉의·재처리 등 핵의 평화적 이용에 대한 보장을 받는 것이라고 생각한다. 이를 위해서는 북한의 비핵화가 반드시 이루어져야 하고 그 결실로 신포 원자력발전소의 준공을 손꼽아 기대해 본다.

〈원고접수일 2010년 12월 24일(금)〉