

알기 쉬운 군사과학 (XXIII)



崔潤大
 • 육군 제3사관학교 교수
 • 육군 대령, 공학 박사

95. 공중 폭발시 파편의 최초 비산 속도

폭격기에서 투하된 폭탄이 공중에서 폭발하여 파편이 사방으로 비산한다고 생각해 보자. 파편의 비산속도는 얼마나 될까? 파편의 초기 비산속도를 계산하는 방법이 1943년에 Gurney(그루네이)에 의하여 연구되었다. 계산 방법이 매우 간단하고, 유용하기 때문에 여기 소개하고자 한다.

그는 폭발물(작약)이 긴 원통형 금속 용기에 들어 있고, 공중에서 폭발한다고 가정하고 문제를 풀었다. 또한 용기 속에 들어 있는 폭발물이 갖고 있는 화학적 에너지(CE : Chemical Energy)가 작약의 운동에너지(KE : Kinetic Energy)와 금속용기의 운동에너지로 완전히 변환된다고 가정하였다.

$$\text{작약의 CE} = \text{작약(고온기체)의 KE} + \text{금속 파편의 KE} \dots\dots\dots (1)$$

부연 설명하면, 폭발순간 용기 속에 들어 있는 작약은 순간적으로 원통형의 고온 기체로 변하며, 고온 기체의 밀도는 작약의 밀도와 같다고 가정하여 작약의 화학적에너지가 고온 기체를 통하여 금속 파편에 운동에너지 형태로 전달되고, 나머지는 고온기체(작약이 변환됨) 자체의 운동에너지로 공기 중으로 배출된다는 것이다. 이렇게 가정하고 얻어진 계산식은 다음과 같다.

$$V_0 = \left[\frac{\frac{c}{m}}{1 + \frac{c}{2m}} \right] \sqrt{2E} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 V_0 = 폭발시 파편의 비산속도로서 우리가 알고자 하는 값이며, c = 작약의 질량, m = 파편을 형성하는 원통형 금속의 전체질량, $\sqrt{2E}$ = Gurney 상수라 부르며, Gurney 이론

몇 가지 폭발물(작약)의 Gurney 상수값($\sqrt{2E}$)

폭 발 물	$\sqrt{2E} (m/s)$	폭 발 물	$\sqrt{2E} (m/s)$
COMPT B	2402	TNT	2115
OCTOL	2560	Explosive D	1942

에서 E = 폭발물(작약) 단위 질량당 에너지 (Joule/kg)를 의미한다. E 의 단위는 m^2/s^2 이므로 E 의 단위는 m/s 이다.

폭발물에 대한 Gurney 상수값($\sqrt{2E}$)은 실험적으로 측정할 수 있으며, 몇 가지 실험치의 위의 표에 제시되었다. 더 자세한 내용은 해군 사관학교 기계공학과 편 「무기체계공학」(연경문화사)을 참고하면 된다.

이제 공중에서 원통형 모양의 탄두가 폭발할 때 금속 파편의 비산속도를 계산하기 위한 실 예를 한 가지 들어보자.

파편형 원통 모양의 탄두가 공중에서 폭발하였다. 탄두 속에는 폭발작약(Octol) 10kg이 채워져 있으며, 원통형 탄두는 각각의 질량이 0.648g 짜리 파편 23,100개로 둘러싸여 있다. 탄두는 통상 원통형탄두 표면에 흠을 파두어 폭발시 파편효과를 극대화시킨다.

(2)식을 이용하여 파편의 비산속도를 구하기 위해서는 c/m (작약의 질량/금속의 질량)을 구해야 한다. 금속의 질량(m)은 $23,100 \times 0.648 = 15kg$ 이고, $c/m = 0.667$ 이다.

위의 표에서 Octol의 경우 Gurney 상수는 2,560 m/s 이므로, 이들 값을 (2)

식에 대입하면 파편의 비산속도는 $V_0 = 1,810m/s$ 로 계산된다.

이제 (2)식을 이용하면 수류탄이 공중에서 폭발했을 때, 미사일이 공중에서 폭발할 때, 또는 포병 포탄이 공중에서 폭발할 때 파편의 비산속도도 계산할 수 있다.

그러나 폭탄 폭발 후 파편은 대기를 통하여 비산되므로 비산속도는 속도의 제곱에 비례하는 마찰 저항을 받아 거리가 멀어지면 비산속도는 현저히 감소한다. 다른 계산에 의하면, 앞의 예에서 15m비산 후 파편의 속도는 초기 속도 1,810m/s에서 약 870m/s로 현저히 감소함을 알 수 있다.

FA/18 호넷에서 투하한 폭탄의 폭발 모습



96. 세열파편의 표적타격 속도

포 탄이 폭발하면 그 파편들이 사방으로 비산해 나간다. 폭발시 파편이 가지는 초속도에 대해서는 pp.64~65에서 Gurney(그루네이)식을 이용하여 이미 계산해 보았다.

이번에는 어떤 초속도를 가지고 사방으로 퍼져 나가는 작게 부서진 세열(細裂) 파편들이 일정거리를 날아가서 표적을 타격할 때의 속도(표적타격 속도)를 계산해 보자.

계산에 앞서 세열파편의 두께에 대하여 살펴보자. 지난 절에서 살펴본 바와 같이 파편의 초속도를 크게 하기 위해서는 c/m (폭발작용의 질량/탄두 외피 금속의 질량)비를 높여야 한다.

이를 위해서는 작약을 둘러싸고 있는 금속 외피 두께를 얇게 해야 하나, 포 발사시 발생되는 반동력(setback force)을 견딜 수 있는 정도의 두께는 갖도록 설계되어야 한다. 외피를 너무 얇게 만들면 발사시 포신 내의 반동력을 견디지 못하고 폭발해 버리고 말 것이기 때문이다.

그러면, 이제 포탄이 공중 폭발하여 초속도(V_0)를 가지고 날아간 세열파편이 목표물을 타격할 때의 표적타격속도(V_r)에 대하여 생각해 보자. 폭발 후 파편들이 목표물까지 날아가는 동안에는 대기를 통과하기 때문에 공기 저항으로 파편의 속도는 크게 감소될 것이다.

여기서는 파편의 초기속도(V_0)를 이용하여 목표물을 향해 날아가는 세열파편의 속도(V_r)를 거리의 함수로 계산하려고 한다.

세열파편이 목표물을 향해 날아가는 동안

에는 2가지 힘이 작용한다. 첫번째 힘은 중력인데, 파편의 비행시간이 짧고 속도가 빠름으로 해서 이는 무시될 수 있다. 대략 파편은 수천m/s 이상의 초속도를 가지고 날아가며, 목표물까지 거리는 기껏해야 100m 정도이기 때문에 비행 시간은 매우 짧다. 만일 1/10초 정도 걸린다면 중력은 속도를 $9.8 \times 0.1 = 0.98\text{m/s}$ 정도만 변화시킬 것이며, 이것은 초속도(V_0)의 수천m/s와 비교하면 매우 작기 때문에 무시될 수 있다.

두번째 힘은 공기 저항력인데 이는 매우 중요하다. 공기는 점성유체이고 파편의 비행과 같이 속도가 큰 경우 저항력(마찰력)은 속도의 제곱에 비례한다. 이때 저항력은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\text{마찰력} = -kV^2 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 k 는 파편 형상과 대기의 성질에 따른 마찰 상수이고, “-”는 저항력이 운동방향과 반대로 작용함을 의미한다.

힘에 관한 Newton 법칙을 미분방정식 형태로 쓰고, 방정식을 풀어서 파편의 표적 타격 속도를 거리의 함수로 기술하면 아래 식과 같다.

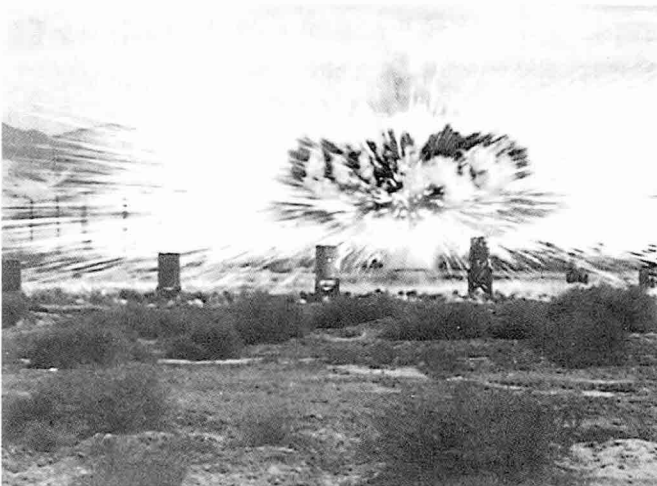
$$V_r = V_0 \exp\left[\frac{-kr}{m^{\frac{1}{3}}}\right] \dots\dots\dots (2)$$

여기서 m = 파편의 질량(kg), k = 파편 형상과 대기의 성질에 따른 마찰 상수로서 대략 0.0043이다.

이 식에 따르면 표적타격속도는 폭발지점에서부터 거리가 멀어져 감에 따라 지수함수



폭발된 파편의 비산 장면



편들이 초속도 (V_0) 1,640m/s의 속도로 사방으로 비산하고 있다. 질량이 5g인 세열파편 중 하나가 폭발지점으로부터 90m를 날아가 표적을 타격하였을 때 표적타격 속도 (V_r)를 알아보자.

(2)식을 이용하여 계산해 보면 표적타격 속도 (V_r)는 170m/s로서 초속도의 10분의 1에 지나지 않음을 알 수 있다.

따라서 이 파편이 표적

(exponential)적으로 감소함을 알 수 있다.

여기서는 문제의 해석을 보다 간단하게 하기 위하여 공중폭발의 경우를 생각하였는데, 공중폭발에서 생기는 파편의 초속도는 지상폭발에서 생긴 파편의 초속도보다 크다.

왜냐하면 지상폭발시는 지면과의 마찰이 있기 때문이다. 이것이 바로 접근신관이나 시한신관을 사용한 탄자가 더 효과적인 세열효과를 일으키게 하는 이유중 하나이다.

이해를 돕기 위하여 다음 예제를 생각해 보자. 원통형 탄두가 공중에서 폭발하여 세열파

을 타격할 때 가지는 운동에너지(KE : Kinetic Energy)는 약 72Joule로 계산되어 인체에 치명상을 입힐 정도의 에너지임을 알 수 있다. 선행 연구에 의하면 소총탄이 인체를 관통하는데 필요한 에너지는 약 80Joule 정도로 알려져 있다.

만일 폭탄이 상당히 높은 고도에서 폭발한다면 공기의 밀도가 낮아 세열파편에 미치는 공기 저항력이 적어질 것이기 때문에 낮은 고도에서의 폭발에 비해 파편의 비산속도는 거리가 멀어져도 크게 감소되지 않을 것이다.

97. 점착포탄(HESH)의 작동원리

1 차 세계대전 중 전차가 등장하자 이것을 공격하기 위한 대전차무기가 새롭게 개발되었다. 대전차무기에 의하여 전차가 공격당하자, 이제는 전차의 생존성을 보장하여 특수한 장갑으로 무장하거나, 장갑을 두껍게 만들거나, 장갑을 경사지게 만들고 있다.

이렇게 되자 대전차무기가 또 성능을 보장하여 생존성이 보장된 전차를 공격하고 있다. 이렇듯 지금도 전차와 대전차무기간의 경쟁은 끝없이 진행되고 있다.

최근 전차는 여러 겹의 장갑으로 이루어진 적층장갑이나, 장갑판 사이가 비어있는 공간장갑, 또는 장갑판 사이에 세라믹과 같은 고강도 재료를 삽입하는 초밤(Chobham)장갑으로 덮여 있다.

따라서 기존의 대전차포탄인 성형작약탄(Shaped Charge)의 효과가 크게 감소되었다.

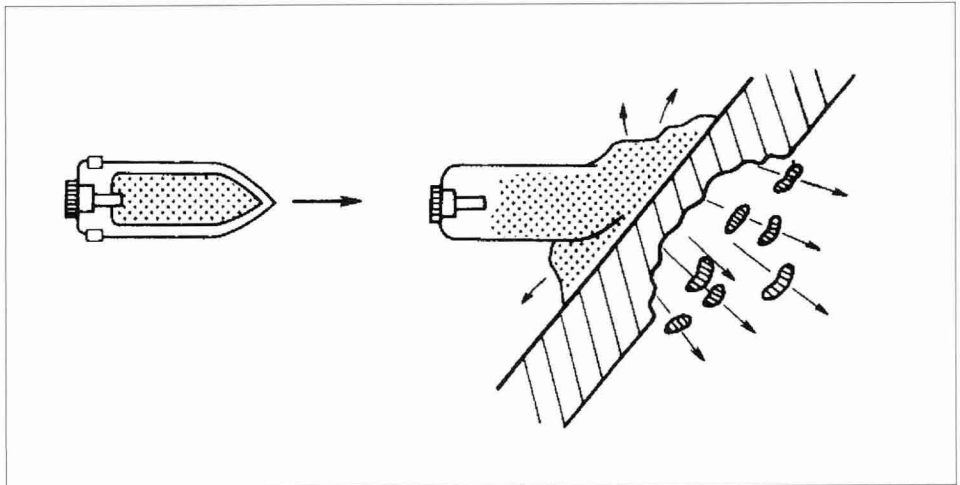
다시 말하면 장갑판이 두꺼워지고, 고강도 재질로 되어 있어 직접 관통에 의하여 장갑을 공격할 수 없게 되었다는 말이다.

이처럼 두껍고 고강도 장갑으로 덮혀진 전차를 효과적으로 공격할 수 있는 방법은 없을까? 어렸을 때 우리는 개울속 바위 틈에 있는 개구리를 잡기 위해 해머로 바위를 내리치면 충격에 의하여 개구리가 떠오르는 것을 경험하였을 것이다.

만일 전차 장갑 표면에 이러한 충격을 주면 어떻게 될까? 물론 장갑은 관통되지 않겠지만 내부의 승무원과 전자장비들은 충격에 의하여 피해를 입을 것이 분명하다.

미국에서 개발한 '점착포탄(HESH : High Explosive Squash Head)' 이 바로 이러한 원리를 적용하는 탄이다. 이 탄은 2차 세계대전 중에 벙커와 같은 콘크리트 구조물을 파괴할 목

HESH탄에 의한 전차 장갑 공격 효과



적으로 개발된 것으로, 이후 장갑 공격에도 효과적으로 사용되었다.

이 탄이 충격파 효과를 이용하여 장갑을 파괴하는 원리는 매우 간단하다. 이 탄은 탄 자체가 진흙 덩어리처럼 매우 무른 재질로 되어 있다. 탄의 물렁물렁한 폭발작용이 장갑판에 붙어 폭발할 때 발생된 충격파는 파동의 형태를 가지고 장갑 내부로 전파된다.

P.68의 그림에 나타난 바와 같이 충격파(입사응력과 = 입사압축파)가 장갑 후면(자유면)에 도달하면 장갑 외부로 소멸되지 않고 밀도가 높은 장갑 쪽으로 다시 반사되어 반사파(반사응력파 = 반사인장파) 형태로 되돌아 전파된다.

반사된 인장파는 계속해서 전파되어 오는 입사 압축파를 뚫고 장갑 표면쪽으로 전파된다. 이때 반사파는 밀도가 높아진 재료를 통과하므로 입사파보다 빠른 속도를 갖는다.

따라서 장갑 내부 임의 지점에서의 순간 압력은 입사파와 반사파의 대수 합으로 결정되

기 때문에 압력이 처음보다 더 커질 수 있다. 따라서 순간 압력이 재료의 항복응력을 초과할 경우, 장갑판 뒷면이 부서지는 '후면파쇄(spalling, scabbing)' 현상이 일어나게 된다.

이러한 원리가 바로 점착포탄에 적용되었다. 따라서 전차 내부 승무원이나 전자장비들은 탄이 폭발할 때 발생된 충격 및 반사파에 의하여 피해를 입는 것이다. 이것은 마치 해머로 바위를 내리칠 때 발생하는 현상과 같은 결과이다.

대부분의 취성재료(잘 부서지는 재료, 예를 들면 사기그릇)는 타격이 일어나는 부위에서의 국부적인 항복현상을 제외하고는, 반사파에 대하여 저항성이 매우 강하다. 따라서 장갑판은 이 같은 반사파에 의하여 관통되지는 않는다. 반면, 충격파에 대해서는 저항성이 약해서 쉽게 파쇄된다. 이는 재료 내부에 존재하는 불순물이나 공극 등 취약 부분이 인장응력에 의해서 쉽게 떨어져 나가기 때문이다.



98. 잠수함 선체 제작 재료의 강도

우 리 나라 제1호 잠수함은 장보고함이다. 옛날 신라가 해상 왕국을 건설할 때 활약한 장보고 장군을 기념하기 위하여 붙여진 이름이다. 1992년 독일에서 1500억원을 들여 제작하였다. 크기는 1200톤이고, 평균속력은 22노트(40.7km/hr)이다.

우리 잠수함이나 미국의 원자력 잠수함은 모두 HY80강으로 선체가 제작되었다. 최근에 선보인 미국의 “시울프” 잠수함은 HY130강을 사용했다고 한다. 그러면 ‘HY80’이나 ‘HY130’은 어떤 의미를 갖는가 알아보자.

잠수함이라면 말 그대로 물 속으로 잠수하는 배다. 그런데 물 속으로 깊이 들어갈수록 위에서 누르는 물기둥의 무게 만큼에 해당하는 수압을 받게 되고, 그 크기는 수심 100m에서는 100ton/m²나 된다.

물의 밀도는 1g/cm³이기 때문에 부피 1m³의 물은 질량이 1000kg, 즉, 1ton이다. 따라서 수심이 100m라면 물기둥 높이는 100m이고, 1m²의 면적 위에 질량 100톤의 물기둥을 올려놓는 셈이다.

이것은 약 10기압에 해당되는데, 가정용 수도꼭지를 세계 틀었을 때 2기압이고, 소방호스에서 물이 나갈 때의 압력이 7기압 정도임을 생각하면 대략 그 크기를 짐작할 수 있겠다. 아무튼, 물 속으로 들어갈수록 수압이 커져서 심하면 강철로 된 선체가 형태를 유지하지 못하고 변형되고 만다.

재료의 강도(Strength)를 측정하기 위해 ‘인장시험’이라는 것을 수행한다. 이때 단위면적

당 얼마만한 힘을 가하면 재료가 변형을 일으키는가 하는 점을 찾는데, 이처럼 재료가 변형을 일으켜서 끊어지는 점을 항복점(Yield Point)이라고 한다.

HY는 High Yield를 나타내는 약자이고, 수치 ‘80’은 1000psi(파운드 퍼 스퀘어 인치, lb/in²)를 단위로 표시한 재료의 항복점이다. 따라서 장보고함의 선체 재료는 항복점이 80,000psi인 특수강으로 건조되었다는 말이다.

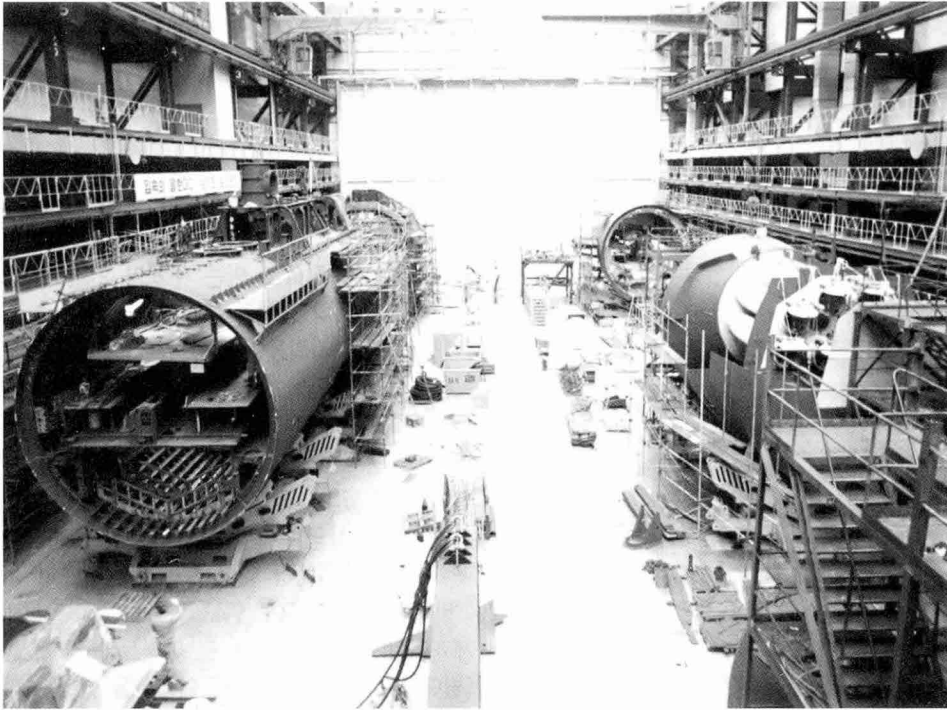
시울프호는 그 재료가 더 강해서 항복점이 130,000psi인 것을 사용했다는 말이다. 보통 철합금의 경우 이 값이 24,000~43,000psi인 것을 생각하면 비교가 된다. 항복점을 높이기 위해서는 통상 철에 니켈, 망간, 크롬 등을 넣고 합금을 만든다.

당연히 더 강한 특수강은 더 비쌀 것이다. 그러나 바다 밑으로 더 깊이 들어갈 생각이라면, 더 강한 재료로 잠수함을 제작해야 한다.

이제 잠수함은 얼마나 깊은 곳에서 활동하는가에 대하여 알아보자. 해군 김혁수 제독이 지은 “잠수함(을유문화사 1999)”을 보면 잠수함 심도라고 해서 몇 가지를 설명하고 있다.

‘잠망경심도(Periscopes Depth)’란 잠망경이 수면 위로 올라오는 심도이고, ‘작전심도(Operating Depth)’란 해양 조건을 고려해서 적으로부터 탐지가 잘 안 되는 심도이며, 최대 작전심도는 통상 파괴심도의 2분의 1 값으로 한다.

‘파괴심도(Collaps Depth)’는 수압에 의해



HY 80 압력 선체의 연결 공정

잠수함의 선체가 파괴되는 계산상의 심도인데, 통상 400m 이상이고, 시울프 잠수함의 경우는 1200m 이상이라고 한다.

이제 잠수함이 어떻게 뜨고, 잠수하는지 알아보자. 잠수함에는 ‘밸러스트 탱크(main ballast tank)’ 라는 것이 있다. 잠수함이 잠수(잠항) 할 때는 이 탱크에 물을 집어넣어 무겁게 하고, 부상할 때는 압축공기로 물을 뱉어내어 위로 떠오른다.

이러한 밸러스트 탱크는 잠수함의 앞 부분(함수)과 뒷 부분(함미)에 각각 위치하는데, 어뢰를 발사하거나, 연료를 사용하고 나면 가벼워지고, 해수의 성질이 달라지면 밀도가 달라서 부력이 커지기도 한다. 따라서 잠수함이 일정한 깊이를 유지하기 위해서는 꼼꼼하게 잠수함의 무게와 해수 밀도 등을 파악해야 한

다.

또한 잠수함 안에서 사람이 앞으로 움직인 다든지, 뒤로 움직이면 함수가 내려가거나 올라간다. 함수가 올라가 있는 상태에서 속도를 내면 그냥 물 밖으로 올라와 버리고, 함수가 내려가 있는 상태에서 속도를 내면 물 밑으로 더 들어가 버린다. 그래서 잠수함의 수평을 맞추기 위해 ‘트림탱크’ 라는 것을 두어서 물을 앞 뒤로 보낸다.

잠수함에 부착된 방향조정타에는 수직타, 함미수평타, 함수좌현타, 함수우현타 등이 있는데, 이런 것들을 통틀어 타기(舵機)라고 한다. 만일 이것이 고장나면 빨리 수면으로 올라와야 하는데, 이때는 승조원들을 모두 함미로 이동시키면 함수가 들리고 올라오게 된다고 한다.