

천안함 어뢰 “1번” 글씨 부위 온도 계산

카이스트 기계공학과
송태호 교수

1. 들어가면서

천안함의 침몰원인에 관한 논란이 계속되고 있다. 합조단의 조사결과에 대하여 다양한 의문이 제시되고 있는 바, 그 중 하나는 “인양된 어뢰 파편의 후부에 쓰인 ‘1번’이라는 글씨는 폭발시 고열의 화염에 타버렸어야 하는데 멀쩡히 남아있는 것을 이해할 수 없다”는 것이다. 이와 관련하여 일부에서는 어뢰의 온도 상승치를 ‘화약의 발열량의 13% / 어뢰의 열용량= 섭씨 약 150도’이라는 계산을 제시하여 그럴듯한 과학적 근거를 제시하기도 하였다.¹

이 보고서에서는 보다 전문적인 계산을 수행하여 실제에 가까운 온도 상승치를 제시하고자 한다. 이후 서술을 돕기 위하여 먼저 해석의 대상이 된 어뢰(CHT-02D)의 개념도를 그림 1에 보였다. 어뢰의 길이는 7,350mm, 직경은 535mm, 무게는 약 1,700kg이다. 어뢰는 앞에서부터 표적탐지부, 탄두부가 있다. 탄두부에는 151리터 체적에 250kg의 폭약이 채워져 있다. 어뢰

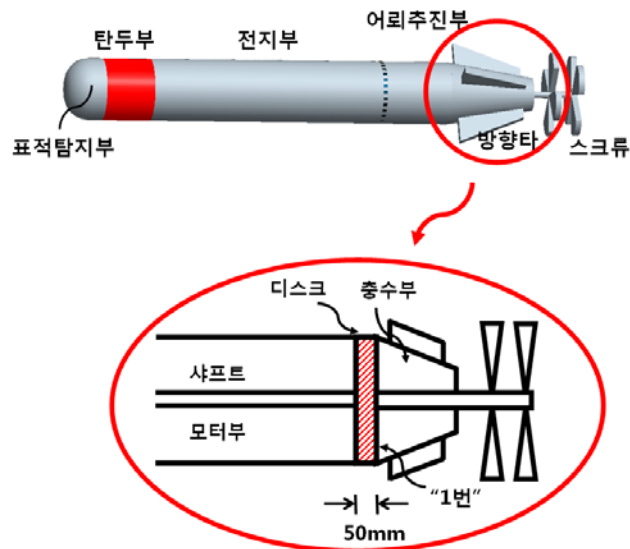


그림 1. 어뢰 개념도 및 후미 글씨 부분 설명도

¹ 프레시안 인터넷 판 2010.5.31.자, ‘미 물리학자 “어뢰폭발했다면 ‘1번’글씨 타버려’” 및, 한겨레신문 인터넷 판, 2010.6.19.자, ‘고열에도 견디는 신기한 ‘1번’글씨’.

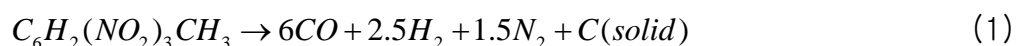
는 전기모터에 의해 항속을 하므로 탄두부 뒤에는 길이 4미터가 넘는 전지부가 있으며, 이어서 모터부터 스크류까지의 어뢰추진부로 이루어져 있다. 어뢰추진부 길이는 1,805mm인데, 이를 50mm 두께의 강판 격벽 디스크가 바닷물로부터 기밀된 전방 모터부와 바닷물이 채워져 있는 후미 충수부를 분할하고 있다. 문제의 글씨는 이 디스크의 뒷면에 쓰여져 있다. 본 해석에 중요한 데이터로서 탄두부 후미에서 디스크까지의 거리는 5,470mm이다.

일단 육안으로 관찰된 바에 의하면, 디스크의 후면은 우유빛의 ‘폴리비닐부티랄’이라는 고분자계열의 코팅이 되어 있고, 그 위에 매직펜으로 ‘1번’이라고 쓰여있다. 코팅과 글씨는 매우 깨끗하게 원형을 유지하고 있고, 어떠한 열손상의 흔적도 보이지 않는다. 또한 샤프트에는 부식을 막기 위해 칠해진 것으로 보이는 검은 색 도장이 손톱만한 크기로 전체에 걸쳐 산포되어 있고, 이 검은 색 도장이 떨어져 나간 부위는 심하게 부식이 되어 있다. 잔존한 도장상태로 보아, 어뢰추진부가 고온에 노출되었었다면, ‘1번’이라는 글씨뿐 아니라, 그 아래의 고분자 코팅, 그리고 아마도 샤프트의 검은 색 도장까지 모두 열손상을 당했어야 할 터인데, 그렇지 않은 것으로 보아, 어뢰추진부가 열손상을 입을 정도의 고온노출은 없었을 것으로 추론된다. 이러한 추론은 항간의 논지와 배치되는 것이므로 본 해석에서 주의 깊게 다룰 것이다.

2. 버블 거동에 관하여

어뢰 폭발은 수심 7내지 9미터에서 일어났을 것으로 추측되고 있다. 이것은 전통적으로 어뢰를 목표물에 직접 타격을 시키는 방식과 다른 소위 ‘버블(제트)’ 방식의 공격형태로서, 초기 폭발 시점에 발생한 고온고압의 화염(버블)이 급속히 팽창하여 주위의 바닷물을 밀쳐내면서 목표물의 함저부에 닿아서 급침 응력을 작용시켜 파괴를 일으킨다. 이 과정에 걸린 시간은 불과 0.2 초 정도의 짧은 시간이지만, 전체 과정에 있어서는 매우 중요한 과정이므로 보다 자세히 살펴볼 필요가 있다.

폭약은 TNT 계열의 고폭제로서 반응(detonation) 속도가 초속 수 km에 이른다. 따라서 폭발 순간 250kg의 폭약이 즉시 체적 151리터의 가스 덩어리로 변한다고 볼 수 있다. 참고로 폭발이 지연될수록 폭약의 파괴력은 떨어지므로 순간폭발한다는 가정은 최대의 파괴력을 상정한 것이다. TNT가 주성분이라고 볼 때, 반응식은 다음과 같다.



TNT 1kg이 일정한 체적을 유지하며 일어나는 정적연소열 Q 는, 1기압 하에서 반응할 때의 정압연소열(4.184MJ/kg)에 1기압 정압 연소시의 팽창일 0.099MJ/kg 만큼 더 높아서 4.283MJ/kg이 된다. 또한, 각 발생종의 질량 성분비를 그 정적 비열로 곱하여 발생가스 1kg의 정적 비열을 온도에 대한 일차함수로 표현하면 다음과 같다.²

$$c_v = 0.8659 + 0.3158 \times 10^{-3} T \text{ kJ/kg-K} \quad (2)$$

여기에서 T 는 절대온도(K)이고, 이 식은 10% 이내의 오차를 가지고 있다. 그러면 표준상태를 첨자 0으로 표현할 때, 발생가스의 내부 에너지 u 의 변화는 열역학 1법칙에서,

$$u(T) - u(T_0) = Q \quad (3)$$

로 표현할 수 있고, 앞서의 데이터들을 대입하여 폭발 직후 가스의 온도를 구하면 3276K(3003°C)가 된다. 또한, (1)식 우변의 총 10몰의 가스가 151/250 리터를 차지하고 있다고 할 때, 그 압력은 19,900기압이 된다. 초기 버블 체적 151리터를 구로 보아 그 반경을 계산하면 0.33미터가 된다. 가스의 질량기준 기체상수 $R = 0.3661 \text{ kJ/kg-K}$ 이고, 정압비열/정적비열의 값, 즉 γ (감마) 값은 온도에 따라 다소의 차이가 있으나, 대략 1.3 정도이다.

폭발 직후 버블은 단열팽창을 하게 된다. 이 과정은 γ 값이 일정하다면, 압력 P (N/m²)와 비체적 v (m³/kg; 비중 ρ 의 역수) 사이에 다음과 관계를 유지하며 팽창한다.

$$Pv^\gamma = const \quad (4)$$

체적은 버블반경의 3승에 비례하므로, 이 식은 $Pr^{3\gamma} = const$ 로 바꾸어 쓸 수도 있다. 예를 들어, 버블이 초기 반경 0.33미터에서 디스크까지의 거리 5.47미터를 진행하여 반경 5.80미터가 되었을 때, 그 압력은 처음보다 $(0.331/5.80)^{3\gamma} = 1.30 \times 10^{-5}$ 배로 감소하여 0.26기압으로 떨어진다. 또한 이때에 버블의 온도는 이상기체 상태방정식,

$$Pv = RT \quad (5)$$

로부터 229K(=-44°C)라는 저온이 된다. 실제에 있어서는 (4)식을 아주 좁은 온도구간에서의 γ 값을 사용하여 보다 정밀하게 계산을 하지만, 여기에 보인 간단한 계산으로도 버블은 팽창하면서 급격히 온도가 떨어진다는 것을 알 수 있다. 이것은 우리가 보통 공기 중에서 폭약이 폭발할 때에 높은 온도와 강한 속도를 동반하여 심한 물리적, 열적 손상을 주는 것과는 다른 예측이다.

² National Bureau of Standards (US), Tables of Thermodynamics Properties of Gas, Circular 564, 1955.

어떻게 이런 예측치가 나왔을까?

그것은 바닷물이 공기보다 훨씬 비중이 커서, 버블이 팽창하면서 바닷물을 밀어내는 데에 그 에너지를 다 쓰기 때문이다. 즉, 공기 중에서는 버블을 둘러싼 공기가 운동에너지를 거의 흡수하지 못하고 따라서 고속의 충격파가 멀리까지 전달되는 데 비하여, 바닷물에서는 마치 자동차 엔진에서처럼 팽창 일을 바닷물이 운동에너지로서 흡수하기 때문이다. 그림 2는 이러한 과정을 보여주고 있다. 버블이 구형을 유지하면서 팽창하는 초기의 단계에 있어서 주위를 둘러싼 바닷물은 오직 반경방향 속도만을 가지고 움직이게 되는데, 바닷물의 비압축성으로 인하여 다음의 연속방정식을 만족하여야 한다.

$$4\pi r^2 v_r = 4\pi r_o^2 \dot{r}_o \quad (6)$$

여기에서 \dot{r}_o 는 버블의 반경이 커지는 속도이다. 따라서 주위 바닷물의 운동에너지(K.E.) 총량은 다음과 같다.

$$K.E. = \int_{r_o}^{\infty} \rho_w \frac{v_r^2}{2} 4\pi r^2 dr = 2\pi \rho_w r_o^3 \dot{r}_o^2 \quad (7)$$

여기에서 ρ_w 는 바닷물의 밀도이다. 버블에서 멀리 떨어진 위치에서의 압력이 p_∞ 라면, (7)식의 운동에너지의 증가율($d(K.E.)/dt$)은 일률($p - p_\infty$) $4\pi r_o^2 \dot{r}_o$ 과 같아야 한다. 이로부터 가속도 \ddot{r}_o 에 관하여³

$$\ddot{r}_o = \frac{(p - p_\infty)}{\rho_w r_o} - \frac{3\dot{r}_o^2}{2r_o} \quad (8)$$

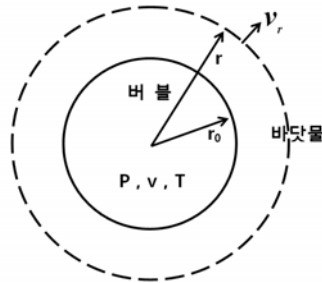


그림 2. 버블 팽창시 주위의 바닷물의 운동

³ 이 식은 구면좌표계의 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 얻을 수도 있다. F.M. White, Fluid Mechanics, 2nd edi., McGraw-Hill, 1986, p.673 참조.

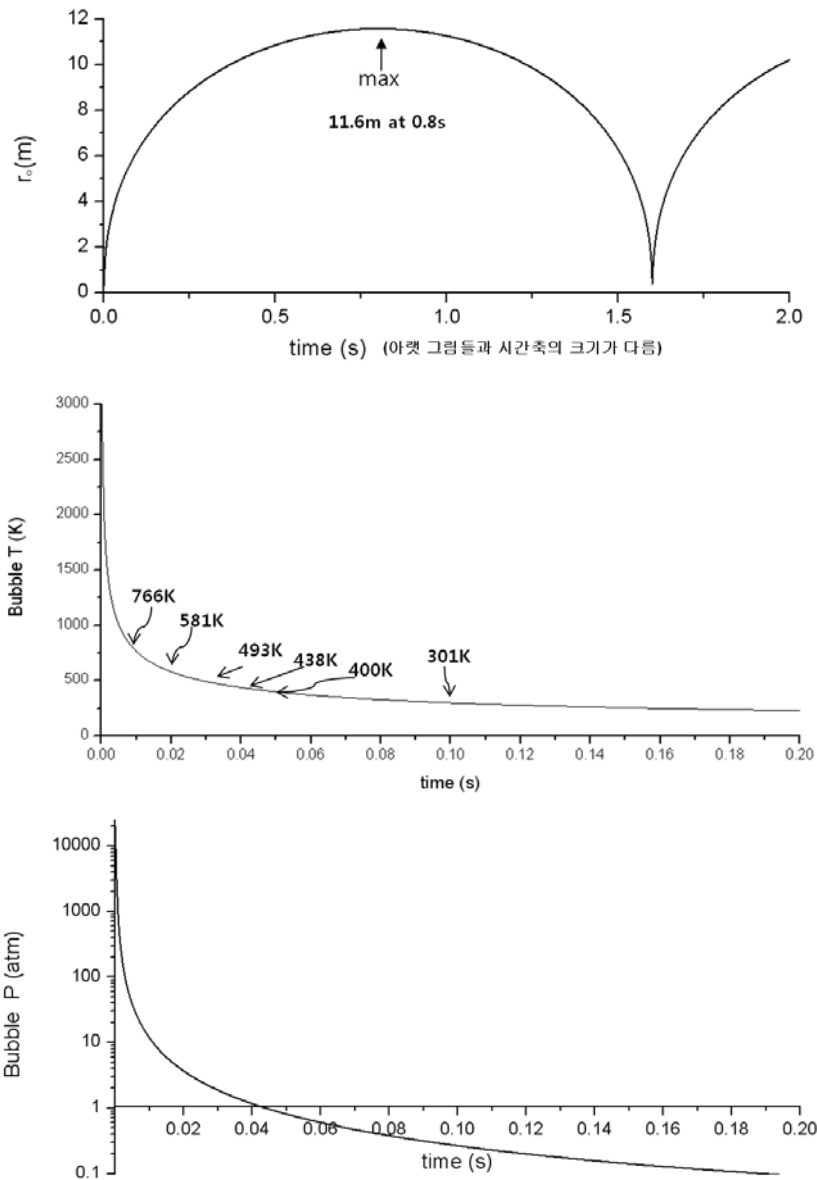


그림 3. 버블의 반경, 온도, 압력의 변화

의 식을 얻을 수 있다. (4), (5), (8)식으로부터 버블의 크기, 압력, 온도를 수치적으로 구할 수 있다. 그림 3은, 외부 압력을 1.8기압(수심 8미터)로 취하였을 때의 구체적인 계산 결과를 보인다. 여기에서, \dot{r}_o , r_o 는 매우 짧은 시간 간격 Δt (향후 계산시 모두 10^{-5} 초)동안 다음과 같이 적분하여 구하였다.

$$\dot{r}_o(t + \Delta t) = \dot{r}_o(t) + \ddot{r}_o \Delta t \quad (9)$$

$$r_o(t + \Delta t) = r_o(t) + \dot{r}_o \Delta t \quad (10)$$

그림 3에서 알 수 있는 바와 같이, 초기의 고온 고압의 버블 상태는 처음 0.03초 이내에 급격히 사라지고 이후에는 앞서 보인 바와 같이 저온 저압의 상태가 됨을 알 수 있다. 즉, 0.03초에는 반경 3.9미터, 1.9기압, 220°C로 떨어지고, 0.1초에 반경 6.3미터, 0.27기압, 28°C가 된다. 이처럼 내부 압력이 주위압력과 같아지더라도 멈추지 않고 계속 팽창하는 이유는 바닷물의 높은 관성 때문인데, 이로 인하여 버블의 내부는 대기압보다도 낮은 상태까지 내려가고, 0.8초 에서는 반경 11.6미터로 최대 팽창한 상태를 지나 다시 수축을 한다.

계산상으로는 1.6초에 이르면 팽창 수축의 한 사이클을 완전히 이루게 되지만 (그림 3 참조), 실제에 있어서는 버블의 반경이 8미터 가량이 되면(0.2초) 버블이 함저에 닿고 이때에 선체 바닥에 대기압보다도 낮은 0.1기압의 음압(陰壓)이 가해지면서 가공할 급힘 응력을 작용시키게 된다. 이때에 처음 반경 8미터 이내에 있었던 바닷물은 반경 8미터와 10미터 사이의 체적에 자리잡게 되고, 따라서 선측의 바닷물 높이는 평상시보다 겨우 2미터가 높게 된다. 또한 해수면 바닷물의 상승속도도 초속 8미터 정도에 불과하다. 이후 실제 버블은 대기에 일부 노출되므로 여기서 계산한 것처럼 팽창을 지속하지는 않는다.

이미 보인 바와 같이 초기의 0.2초 정도가 가장 결정적인 시간이라고 할 수 있는데, 이 시간이 매우 짧으므로 이 동안 버블이 부력에 의하여 떠오르고 변형되는 것은 무시할 수 있다고 보인다. 그러나 계산의 완결성을 위하여 버블의 수직 상승높이를 다음과 같이 계산하여 보자.

버블을 구형으로 보고 부력에 의하여 가속을 받는 경우 이에 따라서 움직이는 바닷물로 인한 부가질량(added mass)⁴은 그 구체 체적의 1/2에 해당되는 물의 질량이다. 또한 높은 레이놀즈 수에서 일정한 속도로 움직이는 구체에서 저항계수 C_D 는 대략 0.8⁵이다. 따라서 버블의 수직 위치, 속도, 가속도를 각각 y, \dot{y}, \ddot{y} 으로 쓸 때에,

$$\frac{4}{3}\pi r_o^3 \rho_w g - C_D \frac{1}{2} \rho_w \dot{y}^2 \pi r_o^2 = \frac{2}{3}\pi r_o^3 \rho_w \ddot{y} \quad (11)$$

⁴ F.M. White, Fluid Mechanics, 2nd edi., McGraw-Hill, 1986, p.494.

⁵ Ibid, p.266.

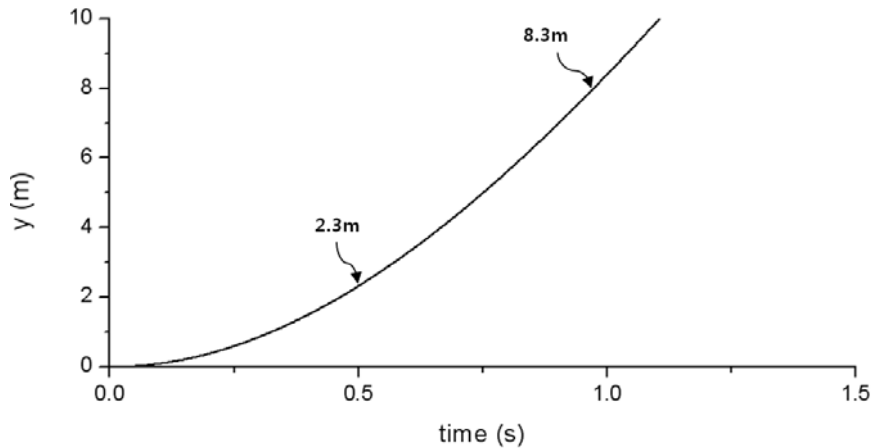


그림 4. 시간에 따른 버블의 상승 높이

의 관계식을 얻을 수 있으며, 이 식을 앞서 구한 각 시간에서의 버블 반경을 대입하여 수치적으로 풀어보면 그림 4와 같은 결과를 얻는다. 즉, 처음 0.5 초까지는 버블이 떠오르는 높이가 2미터 가량에 불과하다. 따라서 앞서 가정한 것처럼 버블이 부력이 의해 떠오르는 현상은 무시해도 좋을 정도의 짧은 시간에 제반 현상이 일어남을 알 수 있다.

3. 온도해석 방법

앞서 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 초기 0.03초 이후에는 버블의 온도가 매우 낮은 상태로 내려가므로 중요한 열적 변화, 특히 온도 상승은 아주 초기에 일어날 것이다. 이때, 디스크의 후면, 즉 ‘1번’ 글씨 부위와 디스크 전면과의 거리(L)가 50mm로써 양면 사이의 푸리에 수,⁶

$$Fo_L = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (12)$$

가 2.16×10^{-4} 으로 극히 작아서 (여기에서 강철의 열확산계수 $\alpha = 18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 시간 $t = 0.03 \text{ s}$ 로 취하였다), 전면에 가해진 열에너지가 후면까지 미처 전달이 안 되는 것을 예측할 수 있다.⁷

어쨌든, 가급적 실제에 가깝게 온도변화를 수치해석하기 위하여 다음과 같은 조건을 상정하였다.

⁶ F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th edi., John Wiley & Sons, 2007, p.283.

⁷ 따라서 사실상 이 문제는 거의 반무한매질에서의 과도 열전도문제와 같아짐을 알 수 있다.

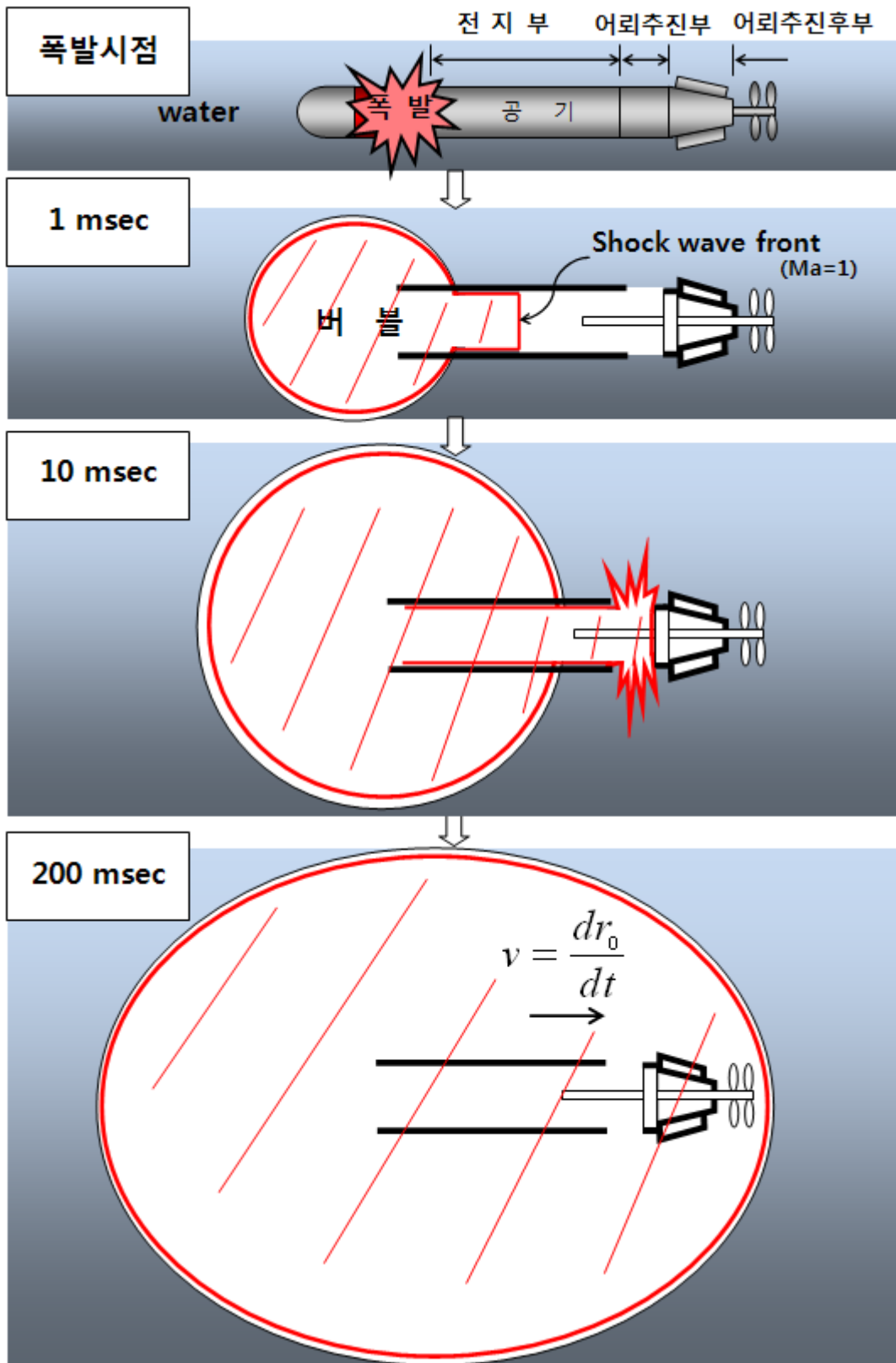


그림 5. 열해석 과정의 도시

첫째, 문제의 어뢰 후부는 버블의 생성, 팽창 내내 뒤로 밀려나지 않고 폭발시의 원래 위치에 정지 상태로 존재한다.

둘째, 어뢰의 전지부와 모터부 내부는 바닷물에 잠겨 있지도 않고, 다른 부품들이 화염(버블)의 전파를 막지도 못하는 빈 공간으로서 충격파의 완전한 통로로 작용한다.

셋째, 디스크는 초기에 충격파가 닿기 전에는 바닷물의 온도와 같으나, 충격파가 디스크 전면에 닿으면 그 유동이 음속으로 정면충돌하는 제트 유동(impinging jet)이 되어 이로부터 가열되며, 뒤이어 버블이 커져서 디스크를 삼키는 시점 이후에서는 버블의 팽창속도에 해당하는 제트 유동으로서 디스크 전면에 열전달을 일으킨다. 이때 충돌가스의 온도는 화염(버블)의 온도와 같다.

넷째, 디스크의 후면이 단열되어 있는 경우와 바닷물에 잠겨 있는 경우를 모두 다룬다.

위의 조건들은 현실성을 잃지 않으면서도 가능한 디스크의 온도가 많이 상승하는 방향으로 택한 것이다. 즉, 순간폭발의 가정도 그러하고, 처음 폭발시의 기계적 충격으로 인하여 어뢰후부가 바닷물 속으로 상당히 후퇴할 것이나, 이 현상을 무시하여 화염으로부터 가열이 많이 된다고 보았고, 전방의 전지부 등도 화염의 전파를 전혀 방해하지 않는다고 본 것 등이다. 또한 디스크 후면이 단열된 경우에는 바닷물로부터의 냉각효과가 없어서 온도상승이 커지게 된다. 그림 5는 위의 과정을 도시한 것이다.

수치해석은 철판의 깊이 방향으로 길이 Δx 마다 계산 절점을 잡고, 앞서 취한 시간 증분 Δt 마다 양함수법(explicit method)으로 행하였다. 양함수법은 절점기준 푸리에 수($Fo_{\Delta x} = \alpha \Delta t / \Delta x^2$)가 충분히 작아야 수치적으로 안정적이고 옳은 해를 주게 되는데, 이 값이 1/10로 되도록 Δx 를 취하였다. 이에 따라 디스크 깊이 방향으로 총 1179개의 절점을 취하였다. 과도 열전도방정식,⁸

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (13)$$

을 양함수법으로 유한차분식을 유도하면 다음과 같아진다. 내부 절점 i 에서,

$$T_i^{p+1} = Fo_{\Delta x} (T_{i+1}^p + T_{i-1}^p) + (1 - 2Fo_{\Delta x}) T_i^p \quad (14)$$

⁸ 이하 (15)식까지, 앞서 F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine 교과서의 5.10절 참조.

여기에서 상첨자는 각 시간단계에서의 값이다. 또, 경계면($i=0$ or m)에 자리 잡은 절점의 온도에 대해서는 다음의 식을 적용한다. 예로써, 디스크 전면 ($i=0$)에서,

$$T_0^{p+1} = 2Fo_{\Delta x}(T_1^p + Bi_{\Delta x} \cdot T_{\infty}) + (1 - 2Fo_{\Delta x} - 2Bi_{\Delta x} \cdot Fo_{\Delta x})T_0^p \quad (15)$$

인데, 여기에서 비오 수는 $Bi_{\Delta x} = h\Delta x/k$ ($k = 50 \text{ W/m-K}$: 강의 열전도계수)로 각 면에서 주어진 것이고, 주위 가스 혹은 물의 온도가 T_{∞} 이다. 단열이 된 후면조건의 경우 $h=0$ 이 된다. 경계면에서는 $(1 + Bi_{\Delta x})Fo_{\Delta x} \leq 1/2$ 이라는 안정 조건이 필요한데, 이 조건이 실제 계산에서 만족됨을 매 경우마다 확인하였다.

디스크 후면이 바닷물에 닿아있는 경우 후면은 강한 냉각효과를 갖게 되어 거의 온도가 오르지 않을 것이 예측된다. 이 조건의 경우 열전달계수 h 를 $1,000 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 로 두었다. 이 값은 물에 의한 냉각효과가 다소 작은 경우에 해당된다. 디스크의 전면에는 정면충돌 제트 유동이 닿는바, 그 열전달계수를 다음과 같은 식을 참고문헌으로부터 직경 D 인 원형 제트 노즐에 직접 닿은 동일 직경의 디스크에 대하여 도출하였다.⁹

$$Nu_D = 0.707 Re_D^{0.536} Pr^{0.42} \quad (16)$$

여기에서, 뉴셀트 수 $Nu_D = hD/k_g$ 로 정의되었고, 가스의 열전도계수 $k_g = 0.05 \text{ W/m-K}$ 이며 프란틀 수 $Pr = 0.7$ 을 주었다. 또한, 레이놀즈 수 $Re_D = \rho VD/\mu$ 로서, 가스의 비중 (ρ)은 앞서 버블기체의 상태방정식(5식)에서 구한 바와 같고, 동점성계수 $\mu = 3 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ 로 주었으며, 가스 속도 V 는 충격파가 닿는 동안에는 마하 수(Ma)가 1이므로 그 음속 $\sqrt{\gamma RT}$ 으로 주었고, 이후 버블에 감싸인 후로는 버블 반경이 움직이는 속도로 주었다. 이로써 디스크 전, 후면에서의 가열량이 실제보다 결코 작지 않은 상황을 상정

⁹ H. Martin, Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces, in Advances in Heat Transfer, V.13, Academic Press, 1977 의 Eq.(41.2), Figs.9, 10으로부터 도출한 식.

하였다.

한편, 추가적으로 샤프트에서의 온도분포를 계산하기 위해서 평면에 평행하게 흐르는 가스유동의 경우에 대하여도 누셀트 수를 구할 필요가 있다. 이 경우, 샤프트 전방 선단으로부터 l 만큼 떨어진 지점에서 난류유동의 경우, 유명한 Chilton-Colburn의 관계식,¹⁰

$$Nu_l = 0.0296 Re_l^{0.8} Pr^{0.33} \quad (17)$$

을 사용하였다. (16)식과 (17)식은 약 30% 이내의 오차를 가지고 있다.

상기 온도계산 프로그램의 정확성을 검증하기 위하여 먼저, 반무한매질에서 노출면이 일정한 열전달계수 및 주위유체에 노출된 경우의 표면온도 변화를 이론해와 비교하였다. 이 해는 초기온도를 0, 주위 유체온도를 1로 두면,¹¹

$$T(x=0) = 1 - \exp\left(-\frac{h^2 \alpha t}{k^2}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{h\sqrt{\alpha t}}{k}\right)\right] \quad (18)$$

이 되며 (여기에서 erf 는 error function이다), 이론해와 수치해를 비교하여 초기 2초까지 서로 상대오차 0.5%이내로 정확히 일치함을 확인하였다. 또한, 노출면이 처음부터 '1' 이라는 온도로 계단 도약하였을 경우의 해,

$$T(x,t) = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (19)$$

와 비교하였을 경우에도 2초에서의 깊이 방향 온도분포가 서로 0.001 이내 오차로 정확히 일치함을 알 수 있었다.

이로써 본 수치해석법이 타당함을 검증하였다.

4. 온도해석 결과 및 논의

지금까지 기술한 조건들을 기준 상태로 취하여 초기 폭발시점에서부터 시작하여 총 1초의 시간이 흐를 때까지 매 10^{-5} 초마다 디스크의 깊이 방향 온도분포를 계산하여 보았다. 전술한 바와 같이 총 1초의 시간은 충분히 긴 시간이다. 그림 6은 디스크 전면과 후면의 온도변화를 보인 것이다.

¹⁰ 앞서 F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine의 교과서, p.411.

¹¹ Ibid, p.286.

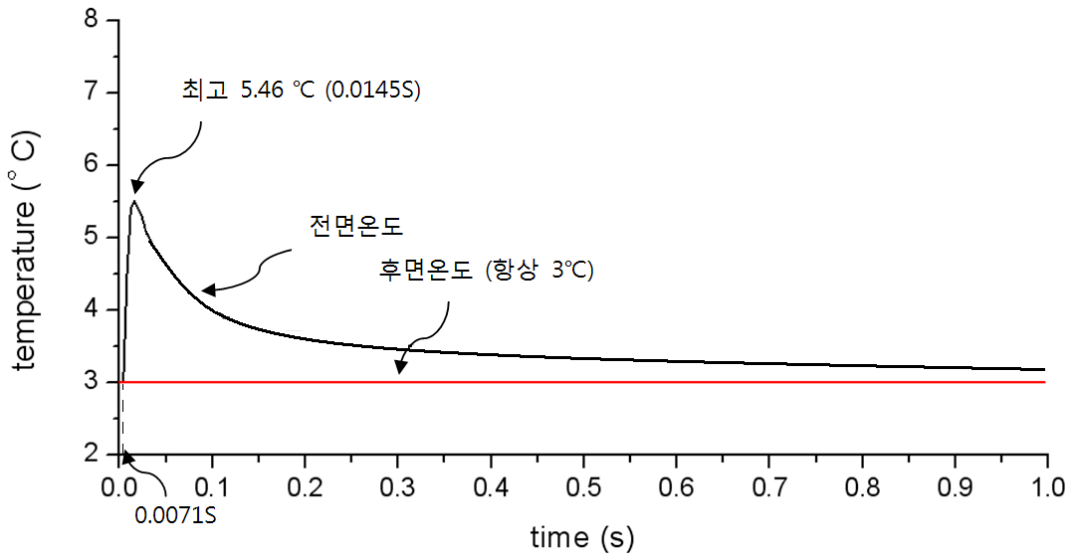


그림 6. 기준 문제의 경우 디스크 전, 후면의 온도변화

계산의 결과는 다소 놀랍고도 평이하다. 한마디로 말해서, ‘1번’ 글씨가 쓰여 있는 디스크 후면의 온도는 바닷물 온도에서 단 0.1도도 올라가지 않는다. 이것은 디스크 후면이 바닷물에 닿아있건, 단열되어 있건 마찬가지이다. 디스크의 전면도 0.0071초에 고온의 충격파(그림에 보이지는 않았으나 이 시점에서 604°C)가 닿는 순간부터 급격히 온도가 상승되나,¹² 이후 가열량이 현저히 떨어지면서 0.0145초에 5.46°C 를 피크로 하여 천천히 냉각된다. 어째서 이러한 결과가 얻어졌을까? 그것은 다음의 두 가지 원인에 기인한다.

첫째, 버블 내 화염의 고온상태가 오래 지속되지 않는다는 것이다. 그림 3에 보인 바와 같이 버블이 단열 팽창하면서 급격히 온도가 낮아지고, 폭발 후 0.05초 후에는 도장면에 열손상을 일으킬 수도 없는 낮은 온도(약 130°C)로 급속히 냉각되고, 0.1초가 지나면 28°C 까지 내려간다. 이 때문에 화염(버블)의 충격파에 직접 노출되는 디스크 전면의 온도라고 해도 기껏 5.5°C (그림 6참조)를 넘지 않게 된다.

둘째, 디스크의 전면으로부터 후면에 열이 전달되는 데에 필요한 시간이 있는데, 이 값은 (12)식의 푸리에 수가 ‘1’이 되기 위한 시간(이 경우 약 140

¹² 이 시점에서 가스온도 880K , 속도 약 650m/s , 레이놀즈수 8×10^7 , 열전달계수는 $1,000\text{W/m}^2\text{-K}$, 열유속은 600kW/m^2 에 이르며, 버블이 도착하는 0.0145초까지 약 4kJ/m^2 의 에너지가 온도과급 깊이 $\sqrt{\alpha t} \approx 0.4\text{mm}$, 체적비열= 2.8MJ/m^3 에 전달되어 온도 상승치는 대략 $4 \times 10^3 / (2.8 \times 10^6 \times 4 \times 10^{-4}) = 3.6$ 도로서 그 개략적 크기가 옳음을 알 수 있다.

초)이다. 이에 비하여 제반 현상이 일어나는 실제 시간은 1초 이하로 너무나 짧아서 이 동안에는 전면의 아주 작은 온도변화마저도 후면까지 미처 전달되지 못한다. 이것은 석고보드 윗면에 뜨거운 불길이 잠시 스쳐 지나갈 때 아랫면에서는 아무런 열기를 느낄 수 없는 것과 같다. 이 때문에 디스크 후면이 바닷물에 닿아있건, 단열이 되어 있건, 초기 온도인 3°C 에서 미동도 않게 된다. 이 논지를 다시 한번 극단적인 경우에 대해 확인하기 위하여, 디스크의 전면이 순간적으로 3000도로 올라갔을 때, 후면의 온도 상승치를 (19)식으로 계산해보면 1초 후에 1억 분의 1도도 올라가지 않음을 알 수 있다.

사실상, 이 기준계산으로서도 어뢰추진부의 온도상승이 아주 미미하다는 것을 입증하기에 충분하다고 보이나, 관련인자의 영향을 보다 깊이 살펴보기 위하여 다음과 같은 인자 변화 계산을 수행하여 보았다.

첫째, 폭약을 420kg으로 늘리고, 1kg당 발열량도 30% 증가시켜 보았다. 또한, 화염(버블)로부터 디스크 전면으로의 열전달계수도 2배로 과장하여 얼마나 디스크의 온도가 더 올라가는지를 알아보았다. 그 결과, 초기 화염온도는 3,917K, 압력은 40,700기압으로 올라가고, 디스크 전면의 최고온도는 0.0143초에서 10.2°C 가 되는데, 디스크 후면은 여전히 3°C 에서 미동도 않는다.

둘째, 탄두에서 디스크가 떨어진 거리를 기준 상태(5.47미터)에서 1.345미터로 줄였을 때 어떻게 되는 지를 알아 보았다. 이 상태는 전지부가 없는 거리이다. 그 결과, 디스크 전면의 온도는 최고 13.0°C (0.0031초) 까지 올라가지만, 후면은 여전히 초기온도에서 미동도 않는다는 것을 알 수 있었다. 이상 모든 계산 결과는 디스크 후면이 단열되어 있건, 바닷물과 접촉하고 있건 동일하다.

셋째, 샤프트의 온도를 추가로 알아보기 위해 샤프트 내부는 단열되어 있고, 두께는 1, 2 혹은 3mm인 세 경우에 대하여 표면의 온도를 계산하여 보았다. 앞서의 추론으로부터도 알 수 있는 바와 같이 이렇게 작은 두께에서도 푸리에 수가 매우 작아서 표면의 최고온도는 두께에 전혀 영향을 받지 않고, 모든 두께에서 표면은 최고 15.5°C (0.0011초)가 됨을 알 수 있었다. 따라서 샤프트 역시 아무런 표면 열손상을 입지 않을 것을 예측할 수 있다.

따라서, 어떠한 극단적인 경우라고 하여도 어뢰추진부의 온도는 기껏 20°C

이내로 상승하여 페인트, 혹은 그 위의 글씨가 열손상을 입을 가능성은 전혀 없으며 더욱이 ‘1번’ 글씨 부분은 단 0.1도도 올라가지 않는다는 것을 알 수 있다.

5. 맺음 말

이 보고서는 천안함 침몰과 관련하여 항간의 서투른 계산으로 인한 열손상 주장이 잘못되었음을 지적하고 있다. 그 결론은 어뢰추진부에서 20°C 이상 온도 상승은 결코 일어나지 않았고 특히 ‘1번’ 글씨 부분은 0.1도의 온도상승도 없었으며, 따라서 이곳의 페인트, 코팅 및 글씨 등이 절대 열손상을 입을 수 없었다는 것이다.

천안함과 어뢰의 잔해에 나타난 여러 가지 현상은 각각 해당 전문가 그룹에 의하여 보다 고도의 분석이 수행되어야 옳게 알려질 수 있다고 판단되며, 해당 분야의 전문지식이 부족한 자들이 선부른 계산을 근거로 여론몰이를 할 경우, 그만큼 우리 사회가 낙후되었음을 보이는 것일 뿐이다.

본 계산은 대학에서 기초적인 열전달을 배운 사람은 누구나 이해할 수 있는 정도로 쓰여졌다. 본 계산에 대한 전문적 토의를 얼마든지 환영하는 바이다.