

폭발이 인체에 미치는 영향

정창기

(방재시험연구소 개발연구팀장)

1. 머리말

폭발이 인체에 영향을 미치는 요소는 폭풍파(Blast-Wave)에 의한 과압, 폭발풍(Explosions-Wind), 파편, 건물의 붕괴 및 열복사로 요약할 수 있다. 이러한 위험성(Hazards)은 인명에 대한 피해로 계량화하면 그 위험성을 이해하기가 훨씬 쉬울 것이다.

위험분석은 바꾸어 말하면 그러한 위험성(Hazards)을 위험도(Risk)로 전환하는 과정이라고 할 수 있다. 여기에서 위험도는 위험사상의 발생빈도(Frequency)와 위험사상의 크기, 즉 심도(Severity)의 곱으로 표현된다. 보험회사에서는 보유량 결정시 이미 사고가 발생한 후의 피해액을 예측하고자 하므로 빈도보다는 심도 측면이 더 중요하다. 폭발 에너지가 미치는 범위와 그 영향에 대한 계산은 화재보험에서 신체손해배상책임의 보유나 근재보험, 상해보험 등의 보험종목에서 활용 가능하리라 생각된다.

본고에서는 폭발 피해의 구분을 직접피해와 간접피해로 구분한다. 직접피해는 1차 결과로 나타내고, 간접피해는 2차와 3차 결과로 구분한다. 또한, 본고에서는 그러한 과정을 통해 폭발사고에 의한 인명피해의 치명도를 계산하기 위한 방법을 검토한다.

2. 치명도 계산 기준

가. 직접피해

폭발이 인체에 미치는 주요 결과는 직접, 즉 1차 피해이며, 이것은 폭풍파가 지나가면서 일어나는 갑작스런 압력 증가로 일어난다. 이로 인해 사람의 신체기관 중 압력에 민감한 폐와 고막이 피해를 입는다.

나. 간접피해

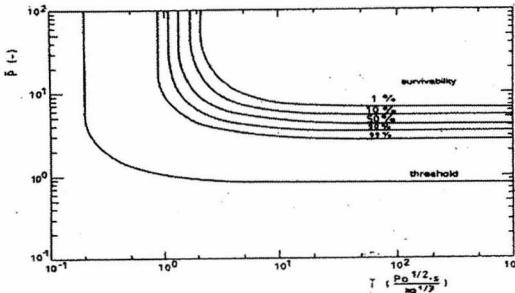
1차 결과에 의한 파편은 폭발원 즉, 압력 용기로부터 발생된다. 그러한 파편은 일반적으로 속도가 매우 빠르다. 폭발과 직접 상관이 없는 파편에 의한 충격은 2차 결과이다. 2차 결과에 의한 파편은 작은 조각, 예를 들면 벽돌, 지붕타일, 유리와 같은 것들이 폭풍파에 의해 구조물에서 떨어져 나감으로써 일어난다. 유리를 제외한 파편은 상대적으로 둔감하며 속도도 낮은 편이다. 그러나, 유리파편은 작고 날카로우며, 때때로 빠른 속도를 낼 수 있다. 따라서, 이들은 통상 다른 2차 결과의 파편에 의해 발생하는 결과보다 폭발 중심으로부터 훨씬 더 먼 거리까지 상해를 입힐 수 있다.

건물의 붕괴는 2차 결과로 간주될 수도 있으나, 일반적으로 2차 결과로 분류하지는 않는다. 폭풍파에 이은 폭발풍(폭풍파가 지나가면서 일으키는 바람)은 사람을 멀리 날려버릴 수 있어서 굴러 넘어지거나 또는 장애물과 충돌함으로써 상해를 입히는 원인이 된다. 이러한 결과는 3차 결과에 속한다.

3. 1차 결과

가. 폐출혈에 의한 치명성

인체의 가슴(흉곽)에 대한 외부 압력은 폭풍파가 통과하는 기간중에 내부 압력보다 더 커지게 되므로 흉곽이 안쪽으로 이동하거나 함몰되어 그 결과로 상해를 입는다. 흉곽 내부로 이동은 시간이 소요되므로 폭풍파의 지속기간이 중요하다. 동물 실험 결과 과압은 상대적으로 장시간이며, Impulse(충격)는 짧은 기간에 일어난다고 한다. 이러한 데이터는 대부분 Bowen(1968) 등이 연구한 결과로부터 얻을 수 있다. 기간 대 압력과의 상관 도표는 여러 가지 신체적 위치에 대한 폭풍파로 나타내고 있는데, 그것으로부터 생존 가능성이 계산될 수 있다. 이 도표는 압력-임펄스와의 관계를 연결하여 (그림 1)로 보여주고 있다.



(그림 1) 폐출혈에 대한 압력-임펄스 관계도

과압(Scaled Overpressure) \bar{P} 는 p/p_0 와 같다. 여기서, P는 신체에 작용하는 실제압력이고, p_0 는 주변 압력이다. 임펄스 \bar{i} 는 다음과 같다.

$$i = i(p_0^{1/2} m^{1/3}) \dots \dots \dots (1)$$

여기서, i : impulse, m : 신체의 질량

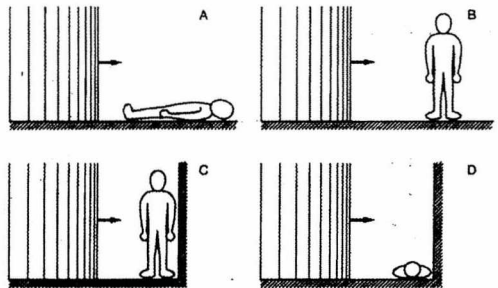
임펄스는 폭풍파 기간에 대한 과압이다. 초기 계산을 위하여, 임펄스는 다음과 같이 약기할 수 있다.

$$i = 1/2 P t_p \dots \dots \dots (2)$$

여기서, t_p : 폭풍파에서 과압기간

과압 P는 인체의 위치에 따라 다르다(그림 2). 인체와 사고파 사이에 아무런 장애가 없다면 P는 폭풍파의 측면과압 P_s 와 같다(그림 2A). 만일 인체가 서 있는 상태라면, 사고파는 혼란상태가 된다. 즉, 인체는 폭풍파의 길이(파장)에 비하여 작기 때문에 반사단계는 무시될 수 있다. 이 때에 흉곽에 대해 미치는 과압은 인체에 대한 당김계수(Drag Coefficient) Cd 가 곱해진 폭발풍에 의하여 야기된 압력 Q 에 측면 과압(P_s)를 더한 값과 같다.

$$Q = \frac{5P_s^2}{2P_s^2 + 14 \times 10^5} \dots \dots \dots (3)$$



(그림 2) 신체의 위치

- (A) 사고에 대하여 장애물이 없는 경우: $P = P_s$
- (B) 사고파에 대한 회절: $P = P_s + Q$
- (C) 반사파에 지배되는 위치(서 있는 상태): $P = Pr$
- (D) 반사파에 지배되는 위치(엎드린 상태): $P = Pr$

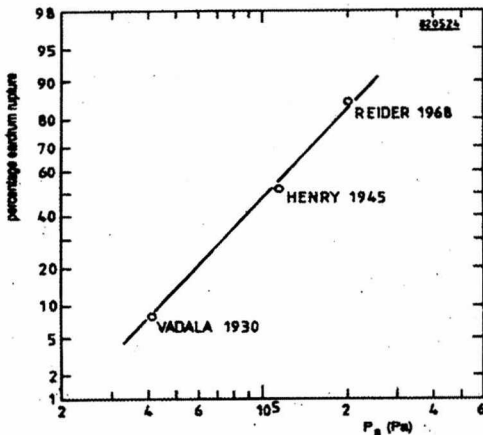
당김계수는 구조물의 모양에 따라 다르다. 인체가 폭풍파의 반사 표면 가까이에 있다면, 인체에 작용하는 압력 P는 반사압 Pr 과 같으며, 반사압 Pr 은 다음과 같이 정의된다.

$$Pr = 2P_s + \frac{(r-1)P_s^2}{(r-1)P_s + 2p_0} \dots \dots \dots (4)$$

나. 고막손상

고막은 아주 작은 압력 변화에도 매우 민감하게 작용하는 복잡한 기관이다. 폭풍파에 따른 고막 손상에 대한 논란은 Hirsh가 제기하였으며, (그림 3)은 측면 과압 Ps의 함수로서 고막파열에 대한 백분율을 보여주고 있다.

과압 기간은 고막 손상에 몇 가지 영향을 미치지만, 이러한 주제에 대한 데이터는 거의 찾아볼 수가 없다. 고막은 고주파에 반응할 수 있으므로, 폭풍파로 인한 하중은 통상 임펄스 영역에 속하기보다는 압력 영역에 속한다.



(그림 3) 과압의 함수로서 고막 파열(Hirsh 1968)

4. 2차 결과

가. 파편에 의한 충격

인체에 대해 파편이 미치는 영향의 결정을 위하여, 절단 또는 비절단 파편을 서로 구분할 필요가 있다. 절단 파편으로 인한 상해는 피부를 관통함으로써 일어나는데 반하여, 비절단 파편으로 인한 상해는 압력과 접촉에 의하여 일어난다. 이에 대해 알려진 문헌은 거의 없으며, 몇 가지 불완전한 데이터가 있을 뿐이다. 그럼에도 불구하고, 두부(頭部)에 4.5kg의 질량이 미치는 영향을 기술한 기준이 발견되었는데 그 결과를 (표 1)에 제시한다.

(표 1) 질량 4.5kg에 의한 두부파열 기준

속도 (m/s)	상해 수준
3.1	대부분 안전
4.6	임계점
7.0	거의 100% 치명적

파편의 운동에너지가 최소한 79 Joule이 된다면 이는 일반적으로 치명적인 것으로 간주되며, 40 ~ 60 Joule은 심각한 부상을 야기하는 것으로 보고되고 있다.

운동에너지 E_k 는 다음과 같이 정의된다.

$$E_k = 1/2 m_f v_f^2$$

여기서, m_f : 파편의 질량(kg), V_f : 영향을 미치는 속도(m/sec)

운동 에너지에 대한 기준은 질량이 4.5~0.1kg인 파편에 대하여 적용 가능하다. 좀더 작은 질량에 대하여는 다음 방정식을 이용할 수 있다:

$$v_{50} = 1247 k^{2/3} m_f^{1/3} + 22.03$$

여기서, v_{50} : 파편의 50%가 피부를 관통하는 속도
 k : 파편의 모양 Factor로서 가장 큰 손해를 끼치는 파편에 대해서는 $4740 \text{kg/m}^{3/2}$
 m_f : 파편의 질량

이 방정식은 동물, 절단된 피부 및 피부와 유사한 물질에 대한 실험으로부터 유도된 것이다.

나. 건물의 붕괴

붕괴 건물 내부의 사람들은 구조물로 인하여 매우 심각한 영향을 받을 수 있다. 지진이나 폭탄에 의한 공습 이후의 모습을 보면 상부를 지탱하고 있는 수직 부재는 부서지고 부서진 잔해를 바닥판에 남겨두게 된다. 건물이 완전 붕괴되었다 하더라도, 아마도 몇 사람은 붕괴된 구조물의 공간 내부에서 생존할 수도 있다. 지진관련 통계에 의하면 붕괴된 건물 내부에서 약 50%의 사람은 즉각적으로 또는 지속된 상해의 결과로 사망한다고 한다. 데이터가 부족하여

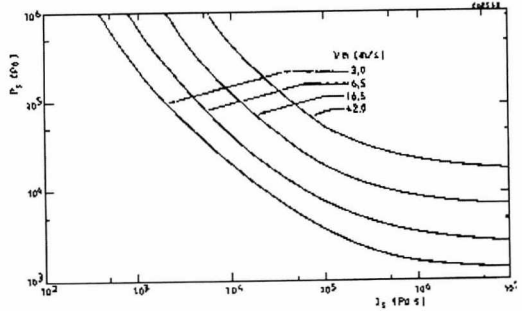
폭풍의 결과로 붕괴된 건물 내부의 사람에 대하여 비슷한 비율로 가정하였다. 이러한 가정은 갑작스럽거나 예기치 못했던 사고가 발생하였을 경우 모두 사실로 입증되고 있는데, 다른 피난처를 찾을 수 없거나 찾을 시간 여유가 없기 때문인 것으로 사료된다.

5. 3차 결과

폭풍과 속의 공기는 폭풍파가 전파되는 방향으로 어떤 속도를 갖고 흐르게 된다. 이 폭발풍은 사람을 날려버리거나 장애물에 부딪치게 할 수 있다. 서 있는 사람이 이런 경우에 처하기 쉽다(그림 2B). 사람을 지면에 나뒹굴게 하거나 미끄러지게 하는 것은 치명상을 입힐 가능성은 거의 없지만, 상부 장애물과의 충돌은 치사의 가능성이 높다. 그러한 결과는 영향을 미치는 속도, 장애물의 견고성 및 모양, 충돌하는 신체의 부위에 따라 다르다. (표 2)는 그러한 상해에 대한 기준을 제시한 것이다.

(표 2) 전신에 영향을 미치는 상해 기준

속도(m/s)	상 해
3.0	대부분 안전
6.4	치명도의 임계점
16.5	약 50% 사망
42.0	거의 100% 사망



(그림 4) 측압과 Impulse의 함수로서 Impact 속도와 상해 기준

사고파의 압력과 임펄스에 근거한 최대 속도는 폭발풍에 의한 인체의 이동으로 계산될 수 있다. (그림 4)는 측면과압 P_s 와 임펄스 I_s 의 함수로서 전신에 미치는 영향에 대한 치명성을 나타내는 기준으로서 영향을 미치는 속도 V_m 을 나내고 있다.

6. 맺는 말

상기 검토에서 폭발에 의한 피해 요소는 3차에 걸쳐 일어남을 알 수 있다. 이를 요약하면 1차 영향은 폭풍압(Blast wave)에 의한 폐출혈이고, 2차 영향은 파편에 의한 피격과 건물의 붕괴, 3차 영향은 폭발풍(Explosion wind)이다. 이들에 대한 데이터를 통하여 폭발사고에 대한 인명피해의 치명도를 계산할 수 있을 것이다. ☹