

Lead Plate Blast Pressure Meter를 이용한 근거리 기폭의 발파압 계측

고영훈¹⁾, 장형두²⁾, 양형식^{1)*}

Direct Measurement of Blast Pressure in Near Field with Lead Plate Blast Pressure Meter

Young-Hun Ko, Hyong-Doo Jang, Hyung-Sik Yang

Abstract Deformation of Lead plate blast pressure meter were measured after they were exposed to surface blasting. Blasting pressure was determined by comparing the data with calibration graph which was drawn from the laboratory experiments with gas gun of Hopkinson bar tester. The results were compared with calculated values from the equations of CONWEP (Conventional Weapons Effects Program) and DDESB (Department of Defence Explosives Safety Board). Measured values were lower than calculated values in near field. Gradual decaying tendency of the pressure was observed. It means that estimated blasting pressure of very near field with theoretical equations can be uncertain.

Key words Blast pressure, CONWEP, DDESB, Lead plate blast pressure meter

초 록 노천에서 폭파실험을 통해 납판 발파압계의 변형량을 계측하였다. 홉킨슨 바 시험장치의 가스 건으로 압력 실험하여 구한 보정 그래프에 계측데이터를 적용하여 폭풍압을 산출하였다. 그 결과를 CONWEP, DDESB 등 여러 가지 폭풍압 예측식과 대비하였다. 근거리 폭풍압의 실 계측 값은 폭풍압 예측식의 결과보다 최대압력이 낮게 나타났지만 거리에 따른 압력감쇠는 폭풍압 예측식보다 완만한 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존 이론식으로 추정된 초근접 지점의 발파압은 부정확함을 의미한다.

핵심어 폭풍압, CONWEP, DDESB, 납판 발파압계

1. 서 론

폭발은 여러 가지 효과를 수반한다. 각 폭발 효과는 구조물에 하중으로 가해지므로 군사적인 목적으로의 방호 설계 시 신중히 고려되어야 한다. 폭발효과의 종류는 폭풍파(airblast), 지중파(ground shock), 분출물(ejecta), 파편(fragments) 등이 있다. 이중 폭풍파의 경우 구조물과 폭약의 근거리 기폭 시 폭풍파에 기인한 폭풍압에 의해 구조물에 치명적인 피해를 가할 수 있는 요소라 할 수 있다.

폭풍압을 예측하는 방법으로는 대형폭발실험을 통해

도출된 일반식을 이용하는 방법, 폭원으로부터 거리에 따라 감쇠하는 폭풍압을 예측하는 미 육군 공병단의 CONWEP(Conventional Weapons Effects Program)에 의한 폭풍압 계산식을 이용하는 방법 및 체적에 따른 폭풍압을 예측하는 미 국방부 화학안전위원회 DDESB (Department of Defence Explosives Safety Board)의 폭풍압 계산식을 이용하는 방법 등이 있다. 또한 폭풍압의 실 계측은 lead-plate blastmeter로 직접 계측할 수 있다(Kougyoukayaku, 1985). 본 실험에서는 노천에서의 폭발실험을 통한 납판의 변화량을 사전 압력실험을 통해 구해진 보정 그래프에 적용하여 폭풍압을 산출함과 동시에 제작된 납판 발파압계의 적정성을 평가하였다.

¹⁾ 전남대학교 에너지 자원공학과

²⁾ 호주 Western Australia School of Mines

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2012년 2월 14일

심사 완료일 : 2012년 2월 22일

게재 확정일 : 2012년 2월 22일

2. 폭풍압 개요

폭발에 의한 일반적인 압력이력곡선은 그림 1과 같다 (Department of the Army, 1990). 폭발에 의한 수직에 가까운 급작스러운 압력 증가 부분을 충격전단이라 하고 그 최대값을 최대 입사압력 P_{so} 라고 한다. 입사압력은 충격파가 전파되는 방향과 수평이 되는 면에서의 압력을 나타낸다. 충격파의 형태는 에너지와 밀접한 관계가 있으므로 폭발 중심으로부터 멀어질수록 최대 입사압력과 지속시간은 줄어든다.

폭발에 의한 압력 이력곡선에서 다음과 같은 현상이 관찰될 수 있다. 충격전단이 시간 t_A 에 도달한 후 압력이 증가되면서 최대입사압력이 생성된다. 그 후 입사압력은 시간에 따라 서서히 감소하게 되고 t_A+t_0 에서 대기압과 동일하게 된다. 이 시간 t_A 와 t_A+t_0 사이의 압력상황을 정압단계라고 하며 그때 압력 이력곡선에 의해 둘러싸인 면적을 정압충격량이라고 정의한다. 정압단계를 지나면 대기압보다 작은 압력을 가지는 부압단계를 t_0^- 동안 지속되며, 이때 바람의 방향이 바뀌게 된다. 이러한 부압단계는 최대압력이 작으므로 무시할만하다. 따라서 구조물에 대한 충격량은 정압충격량 i_s 를 지칭하는 것이다.

3. 계산식에 의한 폭풍압 예측

3.1 CONWEP식에 의한 폭풍압 계산식

지표면 폭발 시 폭풍압은 폭약의 양으로부터 얻어지는 환산거리를 도입함으로써 계산할 수 있다(Hsieh, 2008).

폭발물 중심에서부터 측정까지의 거리(m)를 R, TNT기준의 폭약량(kg)을 W라 하면, 환산거리 Z는 다음 식 (1)과 같다.

$$\text{환산거리 } Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

폭풍압의 최대입사압력(p_0)은 구형 전파에서의 최대입사압력을 구하는 것으로 식 (2)와 같으며, p_a 는 101,300 Pa을 사용한다.

$$\frac{P_0}{P_a} = \frac{808[1 + (\frac{Z}{4.5})^2]}{\sqrt{1 + (\frac{Z}{0.048})^2} \sqrt{1 + (\frac{Z}{0.32})^2} \sqrt{1 + (\frac{Z}{1.35})^2}} \quad (2)$$

3.2 일반식에 의한 폭풍압 계산식

대형 폭발시험을 통한 일반적인 폭풍압 계산식은 식 (3)과 같다(출처미상, 기경철, 2002 등에서 재인용).

$$P = 16.75 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.575} \quad (3)$$

식에서, P는 폭풍압 측정기로 측정된 폭풍압(kg/cm²), D는 폭원에서 거리(m), W는 약량(kg)이다.

3.3 DDESB의 폭풍압 계산식

폭풍압에 대한 미국 국방부 화약안전위원회(DDESB)의 제안식(Joachim, 1994)은 밀폐된 체적 내에서 폭약의 폭발로 인한 폭풍압의 크기를 예측하는 식으로 폭약량과 밀폐된 체적의 함수로 다음 식 (4)와 같다.

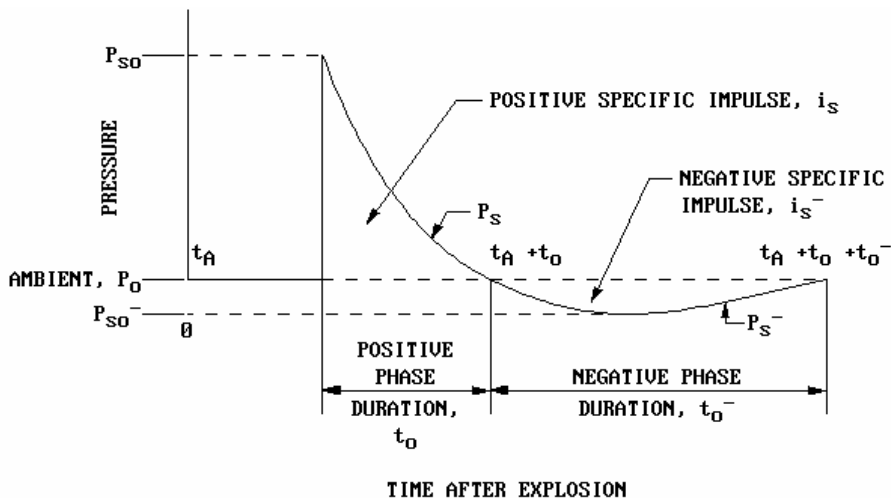


그림 1. 외부 폭발에서의 압력과 시간관계

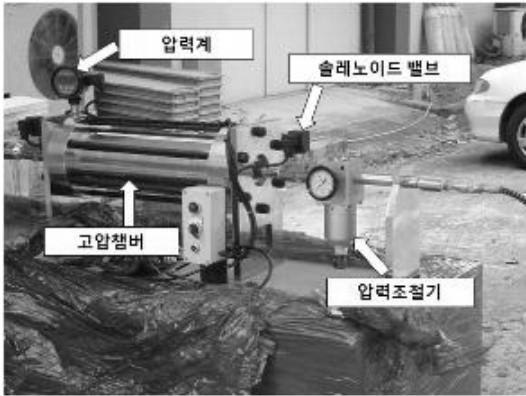


그림 2. Pressure Bar 주요부

$$P_w = 895 \left(\frac{W}{V_T} \right)^{\frac{1.35}{3}} \quad (4)$$

P_w 는 유효과압(psi), W 는 장약량(lb) V_T 는 체적의 총 부피(ft³)이다.

4. 납판센서 제작을 위한 압력실험

4.1 가스건 제원

가스건의 주요부는 그림 2와 같다. 압력조절기를 통해 고압챔버에 질소가스를 채운 뒤 압력계의 게이지만큼의 압력을 방출한다. 고압용 챔버의 제원은 챔버용량 8167 cc, 내압 800 psi, 스테인레스 강, 추진압력 500 psi이다.

4.2 실험용 납판센서 제작

실험용 납판센서는 그림 3의 (a)와 같이 두께 0.8 mm의 납판을 내경 23 mm 너트에 부착한 형태로서, 제작된 센서를 (b)와 같이 가스 건의 압력 방출구에 부착하여 실험을 하였다.

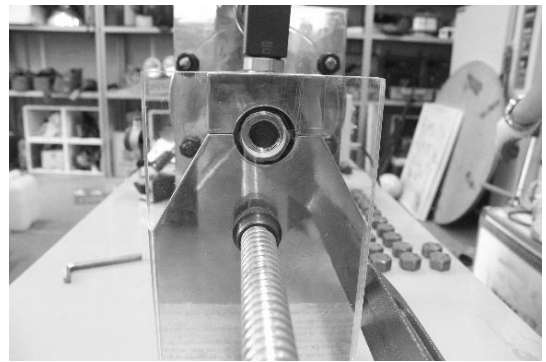
4.3 압력실험 결과

실험용 납판센서를 가스건의 압력 방출구에서 5 mm 이격시킨 뒤 설치하여 약 35 kg/cm²까지 압력에 따른 납판의 길이변화량을 측정하였으며, 그 결과는 다음 그림 4의 그래프와 같다.

그림 4의 그래프의 상관계수 $r^2 = 0.905$ 로서 실험 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 잔차의 범위가 큰 요소들의 경우 압력 방출구와 납판센서의 이격거리 및 결속된 아크릴판의 흔들림에 따른 오차라고 판단되며, 향후 추가적으로 납판센서의 확실한 결속과 이격거리에



(a) 실험용 납판센서



(b) 실험용 납판센서 설치

그림 3. 실험용 납판센서 제작 및 설치

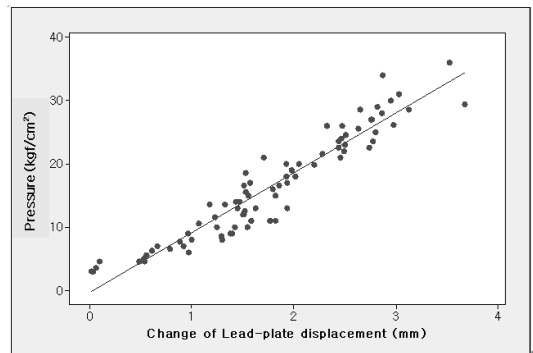


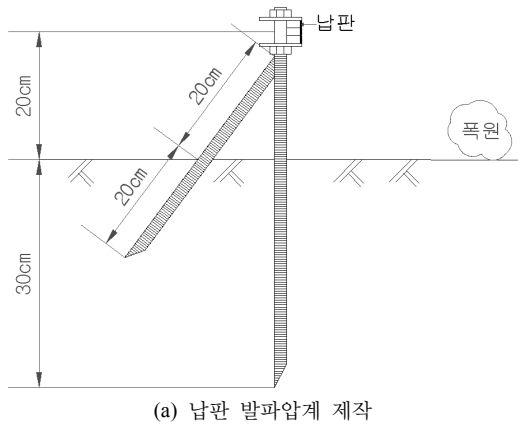
그림 4. 압력에 따른 납판길이 변화

따른 압력손실 및 온도의 영향까지 고려한 실험을 하여야 할 것이라 판단된다.

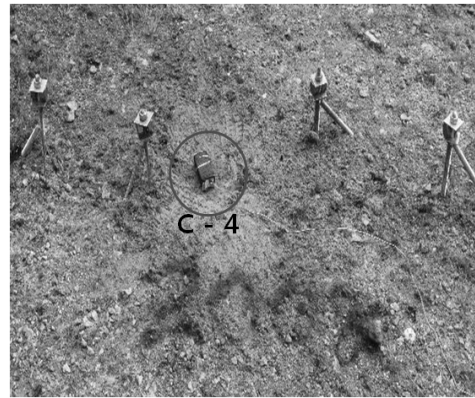
5. 실 폭발 폭풍압 계측실험

5.1 납판 발파압계 제작 및 설치

그림 5의 (a)와 같이 사전에 납판센서를 공업용 와셔



(a) 납판 발파압계 제작



(b) 납판 발파압계 설치

그림 5. 납판 발파압계 제작 및 설치

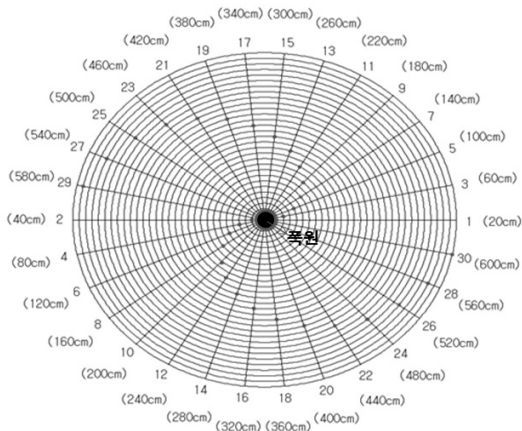


그림 6. 노천에서의 납판 발파압계 배치

로 볼트와 단단히 체결 시킨 후 제작된 납판 발파압계를 지반에 30 cm 깊이로 매설 후 불포화 폴리에스테르 수지를 지반에 살포하여 경질화 시켜서 발파압계를 고정시켰다. 그리고 (b)와 같이 발파압계들의 중앙에 균용 폭약인 컴포지션 C-4를 설치하였다.

그림 6과 같이 중앙의 폭원에서 적색으로 표시된 납판 발파압계를 20 cm씩 늘려가며 이격시킨 뒤 컴포지션 C-4를 50 g, 100 g, 200 g, 260 g의 약량으로 총 4차례 지표면에서 기폭 시켰다.

5.2 폭발실험 결과

총 4회의 폭발실험을 통해 폭약의 약량과 거리에 따른 납판 발파압계의 변형정도를 계측하였으며, 그 변형정도를 사전 압력실험을 통해 얻어진 그림 4의 보정 그

래프에 적용하여 압력을 계산하였다. 그림 7은 납판 발파압계의 변형정도에 따라 폭풍압을 계산하여 도식화한 것이다.

파편에 의해 손실된 몇몇 납판센서를 제외하고 그래프를 그렸을 때 폭원에서의 거리에 따른 압력감쇠의 경향을 확인할 수 있었다.

5.3 실험 검토

데이터의 기록이 심한 측정의 경우, 납판의 두께차이, 온도에 의한 차, 풍향, 풍속 및 지형 등에 따른 변수가 작용 되었을 것이라 판단된다. 향후 위의 변수들을 최대한 고려한 실험이 이루어져야 할 것이다.

노천 폭풍압 실험을 통해 거리별 압력의 감쇠 경향을 확인할 수 있었으며, 그림 7의 압력곡선 그래프를 봤을 때 컴포지션 C-4, 약 260 g 이내의 약량으로 노천 발파한 모든 경우에서 1.5 m 이후의 계측값은 대기압과 의미 있는 차이가 없어 납판 발파압계의 계측 한계로 생각된다. 이는 납판의 탄성변형 한계와 관련이 있을 것으로 판단된다.

CONWEP식의 경우 약량의 대입은 TNT의 약량을 기준으로 하고 있다. 대기중 기폭시 최대 과압과 충격량을 기반으로 한 TNT 등가계수를 통해 컴포지션 C-4의 약량을 압력기반 등가 질량을 통해 TNT로 변환하여 계산할 수 있다. 폭파위력의 기준약인 TNT의 압력기반 등가 계수는 1이며, 이때 컴포지션 C-4의 등가계수는 1.37이다.

따라서 TNT 270 g의 경우 C-4 200 g 정도의 약량과 동일한 압력이 발생할 수 있다고 본다.

그림 8은 폭발실험에서 납판 발파압계에 의해 계측된 폭풍압과 CONWEP의 예측식에 의한 폭풍압을 비교하

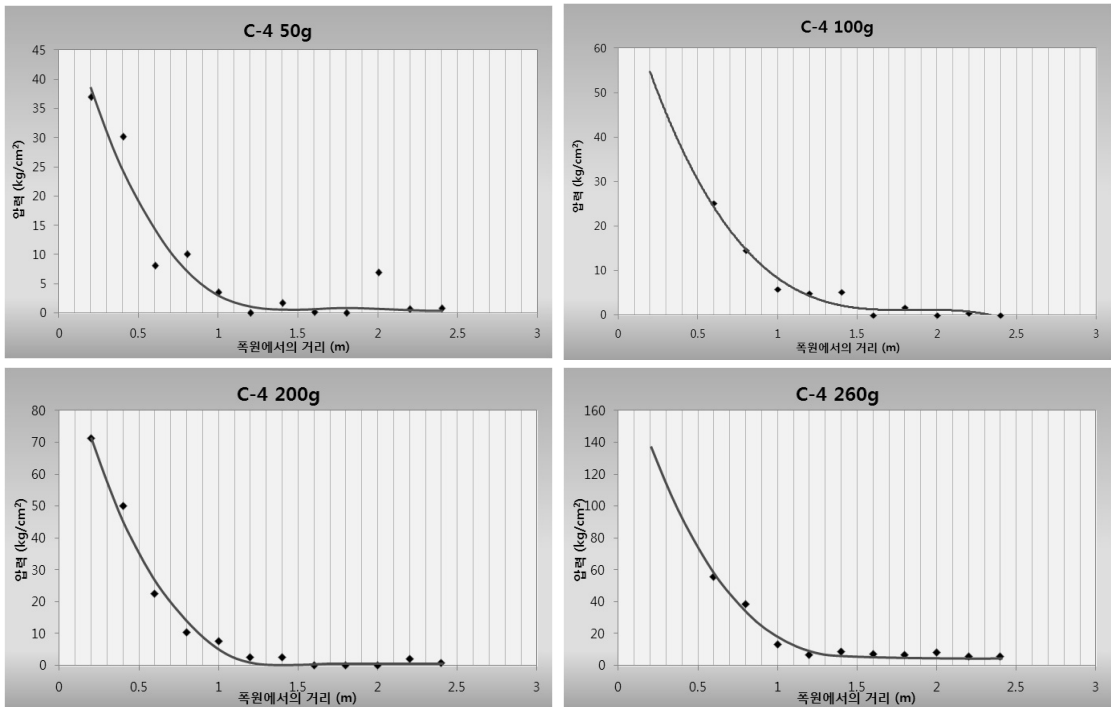


그림 7. 폭원에서 거리 및 약량에 따른 폭풍압 변화

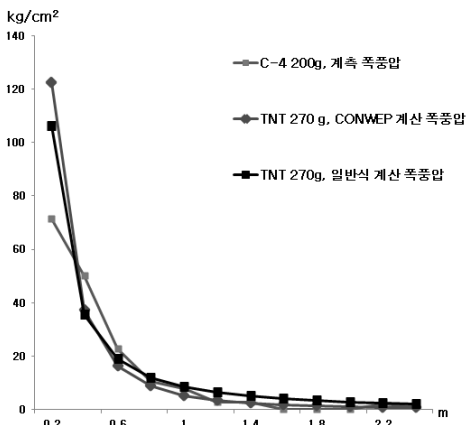


그림 8. 폭풍압 계측 데이터와 예측식의 비교

었다.

그림 8에서 계측된 폭풍압의 경우 그 최대압력은 폭풍압 예측식들의 결과보다 상대적으로 낮은 수치를 나타냈으나 압력 감쇠는 예측식에 비하여 완만한 것을 확인할 수 있었다. 이는 이론식이 지수적으로 감소하는 식이어서 0에 근접할 때 발산하는 특성을 보이는 것과 관련이 있을 것으로 판단된다. 본 실험을 통하여 볼 때

발파원에 초근접한 지점에 이론식을 적용하면 오류의 가능성이 큰 것으로 판단된다.

6. 결론

납판 발파압계를 이용한 근거리 기폭의 발파압 계측 실험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 납판 발파압계를 적용한 외부에서의 폭발실험을 통해 납판 발파압계 센서의 적정성을 확인할 수 있었다.
2. 계측된 최대압력은 폭풍압 예측식들의 경우보다 낮은 값을 보였지만 기폭점에서 0.5 m 지점에서는 예측식들 보다 높은 압력을 나타냈다. 또한 압력감쇠 경향은 완만함을 보였다.
3. 본 실험을 통하여 지수식으로 나타낸 이론식은 초근접 지점의 압력 산정에 오류의 가능성이 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Kougyoukayaku Kyoukai, 1985, Calibration of lead-plate blastmeter, pp. 53.

2. Department of the Army, 1990, Structures to resist the effects of accidental explosive, TM5-1300, Washington D.C, pp. 42-43.
3. Hsieh, M. W., J. P. Hung and D. J. Chen, 2008, Investigation on the blast resistance of a stiffened door structure, J. Marine Science and Techonology, Vol. 16, No. 2, pp. 149-157.
4. 기경철, 김일중, 2002, 산학인을 위한 발파공학, pp. 232-233.
5. Joachim, C. E. and Lunderman C. V., 1994, Parameter study of underground ammunition storage magazines: results of explosion tests in small-scale models, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg, MS, pp. 4-5.

고영훈

2010 강원대학교 공과대학 에너지자원 공학과 학사



Tel: 062-530-0824
E-mail: dddd8401@nate.com
현재 전남대학교 대학원 에너지자원공학과 석사과정

장형두

2003 목포대학교 공과대학 물리학과 학사
2011 전남대학교 대학원 에너지자원공학과 석사



Tel: 062-530-0824
E-mail: albatrossking@hotmail.com
현재 호주 키튼대학(Department of Applied Geology, West Australian School of Mines) 박사과정

양형식

1979 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사
1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사



Tel: 062-530-1724
E-mail: hsyang@chonnam.ac.kr
현재 전남대학교 에너지자원공학과 교수