



2004년

종합학술대회논문집

Proceedings of 2004 Annual Conference

Volume II

일시 : 2004년 8월 26일(목)

장소 : KAIST 창익학습관



사단법인 한국군사과학기술학회

● 일체형 로켓 램제트의 천이과정 수치해석	613
고 현, 박병훈, 정승채, 윤웅섭(연세대)	
● 추진제 점화용 플라즈마 발생장치의 특성 분석	617
김진성, 김성호, 이영현, 양경승(국과연)	
● 신궁 비행모터 추진제 온·습도 노화 특성 분석	621
이경주, 유지창, 류백능, 황갑성, 현형수(국과연)	
● 실리카 함량에 따른 실리콘 내열재의 내열삭마특성	624
류병태, 고승원, 이경주(국과연), 주혁중(충남대)	
● 새로운 금속 불활성 안정제의 합성과 고체 추진제 적용연구	628
박영철, 현형수, 민병선, 이경주(국과연)	
● 함대함 복합재 연소관 공정 개발	631
김중석, 이원복[(주)한화]	

에너지 부문

● 알루미늄 첨가 화약의 연소열과 폭발파 성능의 상관관계	635
이근득, 이기봉, 김현수, 박보영, 김정국(국과연)	
● 화약의 폭발위력 측정 및 분석	639
박정수, 김성호, 이근득, 이재민(국과연)	
● 기총 폭발파의 특성과 모델 수립	643
김대관, 한재홍, 이 인(KAIST), 장재호[한국항공우주산업주]	
● 대기층을 통한 파장별 태양복사를 고려한 3차원 지상표적의 온도 분포 해석 연구	647
최준혁, 김태국(중앙대), 정진수, 김필수(국과연)	
● 초소형 전지를 위한 LiCoO ₂ 박막의 전극 특성에 대한 연구	651
박호영, 남상철, 임영창, 이기창, 최규길, 박기백[(주)누리셀], 조성백(국과연)	
● 소형경량 1.5 μm 대역 발진용 레이저 결정 및 수동형 큐 스위치	655
박도현, 오승일, 배효욱, 김대성(고등기술연구원)	
● 화학레이저 분사각 변화에 따른 특성변화 및 성능향상에 관한 수치적 연구	659
박준성, 백승욱(KAIST)	

기총 폭발파의 특성과 모델 수립 Characteristics and Model Establishment of Gun Blast Wave

김대관 한재홍 이인 장재호*

Dae-Kwan Kim Jae-Hung Han In Lee Jae-Ho Jang

한국과학기술원 항공우주공학전공, 대전 305-701

* 한국항공우주산업(주) KT-1 제품기술팀, 사천 664-802

(발표자 연락처: dkk@asdl.kaist.ac.kr)

ABSTRACT Gun blast is a shock wave emitted from the muzzle, which travels as a free field shock wave in the open space and as a reflected shock wave on the surface adjacent to the gun. In the present study, the blast wave model, GUNBLAST, is established using the scaling approach for the free field blast, and the oblique shock theory and CFD calculations with Fluent v6.0 for the reflected blast wave. The established blast wave model is verified with experimental data of 30mm chain gun and shows a good agreement.

Keyword : Blast wave, Free field shock, Reflected shock

1. 서론

군용 항공기의 구조와 탑재 장비 등은 운항중 발생될 수 있는 심한 동적현상(flutter, turbulence, buffet, 엔진, 무장 발사 등)을 고려하여 설계 되어야 하며 관련된 안정성이 입증되어야 한다. 특히, 항공기 날개에 장착된 기총 발사에 따른 반복적인 총구폭발에 의해 유발되는 진동현상은 가장심한 동적 환경 중의 하나로 고려될 수 있다. 기총 발사에 의해 유발되는 진동 가진원으로는 총구로부터 방사되는 압력 펄스와 기총 메커니즘에 의한 기계적 진동 환경(반탄력, 탄약운동) 등이 있다.

반복적 총구 폭발에 의한 진동은 정상 비행시의 진동 수준보다 매우 큰 진폭 및 가속도를 발생시키고, 일시적인 전기계통의 혼선 및 파괴와 유압계통의 기능장애, 구조적 피로/파괴나 불안정 공탄성 응답현상 등을 발생시킬 수 있다. 따라서 항공기 주요 계통과 구조물들이 이러한 진동 가진원들로부터 안전성이 입증될 수 있어야 한다.

McCathy[1]는 AH-64D Apache 공격형 헬기의 배면에 장착된 30mm Chain Gun의 총구로부터 사격 시에 유발되는 압력파에 대한 EFAB(Extended Forward Avionics Bay) 구조표면의 시간응답과 변형율을 MSC/Nastran을 이용하여 해석하였으며, 측정된 변형율과의 비교를 수행하였다. Turkmen[2]은 최근에 항공우주 산업에 많이 사용되고 있는 원통형 곡물을 갖는 패널 구조물의 돌풍 하중에 대한 동적응답 해석을 연구하였다. Fansler[3]는 Friedlander Waveform을 이용한 기총폭발 압력파의 에너지 유출에 대한 특성 소산 시간에 대하여 연구를 수행하였다. Heaps[4] 등은 자유영역에서의 총구폭발 스케일 기법(scaling technique)을 기반으로 최대 유도 과압력(peak incident overpressure), 폭발파 도착시간(blast wave

time of arrival) 그리고 양압력 지속시간(blast wave positive phase duration)에 대한 등고선 맵(contour map)을 산출하는 컴퓨터 코드를 개발하였으며, 구조 표면에 대한 폭발파의 반사에 대하여 코드의 확장을 수행하였다. Ishii[5] 등은 펄스렛의 흐름 특성을 예측하기 위하여 Euler 방정식을 이용한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교하였다.

본 연구에서는 기총 발사에 따른 총구에서 방사되는 압력 펄스의 특징을 고찰하였으며, 기총특성과 발사조건에 따른 기총 폭발파 압력 모델을 수립하였다. 또한 실험결과와의 비교를 통하여 수립된 압력 모델의 검증을 수행하였다.

2. 기총 폭발 압력과 모델 수립

기총발사에 따른 총구로부터 방사되는 압력파는 크게 자유영역(free field)에서의 유도 압력파(incident pressure wave)와 구조표면에서의 반사 압력파(reflected pressure wave)로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 유도 압력파를 모델링 하기 위하여 Friedlander Waveform[3]과 참고문헌[4]에서 제시한 스케일 기법을 적용하였으며, Matlab을 이용하여 모델링을 수행하였다.

유도 압력파로부터 구조 표면에서의 반사 압력파를 계산하기 위해서는 마하파(mach wave)의 정규반사(regular reflection)와 마하반사(mach reflection)을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 정규반사를 고려하기 위하여 경사충격파이론(oblique shock theory)을 사용하였으며, 마하반사를 해석하기 위하여 Fluent를 이용한 유동장 해석을 수행하였다.

2.1 기총 폭발파 특성 및 유도 압력파 모델링

기총으로부터 방사되는 압력파는 자유영역에서 유도 압력파(incident pressure wave)로 전파된다. 시간이 지날

수축 총구로부터 방사되는 유도압력파의 최대 크기는 줄어들며 압력파의 표면면적은 상대적으로 넓어진다.

Fig. 1 은 임의의 방향으로 지향된 기총의 발사조건 형상을 보여주고 있다. 좌표축의 원점은 총구에 위치하며 가상의 등고선 평면(contour plane)은 개방공간상에서 총구로부터 임의의 위치에 존재한다. $Y-Z$ 평면은 등고선 평면과 수직을 이루고, 등고선 평면에 존재하는 임의의 격자점(grid point)과 총구와의 상대적 위치는 \vec{r} 과 θ 에 의하여 결정된다. 여기서 \vec{r} , \vec{u} , θ , ϕ 그리고 h 는 각각 총구로부터 격자점까지의 거리벡터, 총구의 단위벡터, 거리벡터와 총구단위벡터와의 사잇각 그리고 총구와 등고선 평면의 수직거리를 의미한다.

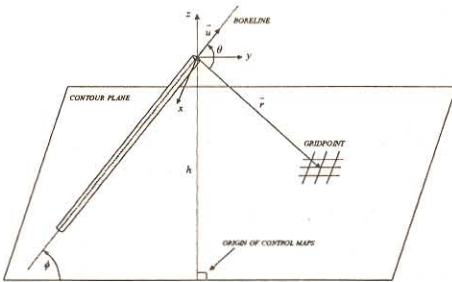


Fig. 1 Geometry of the problem determining r and θ at a point in a plane with arbitrary orientation with respect to the boreline.

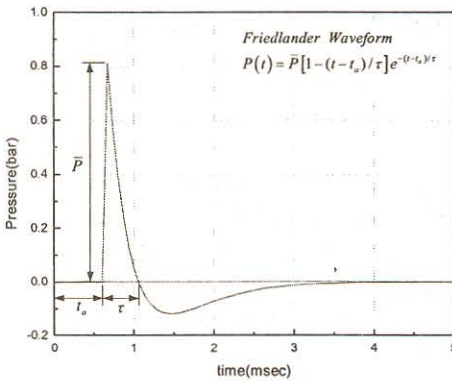


Fig. 2 Blast wave overpressure vs. time (Friedlander Waveform).

총구로부터 방사되는 유도 압력파는 Friedlander Waveform 을 이용하여 표현할 수 있다. 등고선 평면에 위치하는 임의의 격자점을 지나는 압력파는 Fig. 2 와 같이 폭발파 도착시간(t_a : blast wave time of arrival), 최대 유도 과압력(\bar{P} : peak incident overpressure) 그리고 양압력 지속시간(τ : blast wave positive phase duration)의 세가지 변수에 의하여 표현된다. 총구로부터 방사된 압력파는 t_a 이후에 임펄스 형태의 양의 압력으로 τ 동안 유지되고 이후에 음의 압력으로 나타나며 시간이 지날수록

압력은 감소하게 된다. 과압력(overpressure)의 Friedlander Waveform 은 식 1 과 같다.

$$(P - P_\infty) / P_\infty = \bar{P} [1 - (t - t_a) / \tau] e^{-(\gamma - 1) \gamma t / \tau} \tag{1}$$

식 1 을 이용하여 자유영역에서의 유도 압력파를 수립하기 위하여 압력파의 세가지 변수들은 스케일 기법을 적용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{P} = 2.4Z \tag{2}$$

$$t_a = \frac{r}{a_m} f(Z) - \frac{l'}{a_m} (0.94 \cos \theta + 9.24) \tag{3}$$

$$\tau = \left(\frac{l'}{a_m} \right) \left[1 + 0.13 \left(\frac{r}{l'} \right) \right] \tag{4}$$

$$l' = l \left[\mu \cos \theta + (1 - \mu^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \right] \tag{5}$$

$$Z = (r/l')^{-1.1} \tag{6}$$

$$f(Z) = 1 + 10Z - (Z^2/1.2) + (Z^3/2.3) - (Z^4/3.4) + (Z^5/4.5) - (Z^6/5.6) \tag{7}$$

$$l = D \left\{ \frac{(8.62 \times 10^{-3}) P_m a_m}{(\gamma - 1) P_\infty a_\infty} \left[1 + \frac{\gamma(\gamma - 1)}{2} \right] \times \left[\frac{2}{\gamma + 1} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \frac{V_p}{a_m} \right) \right]^{\frac{3\gamma - 1}{\gamma - 1}} \right\}^{1/2} \tag{8}$$

여기서, r , θ 는 기총 발사조건에 관한 변수들이며, a_∞ , P_∞ , μ , D , a_m , P_m , V_p , γ 는 총기 특성에 관한 변수들이다. 총기 특성 변수들의 자세한 내용은 참고문헌[4]를 통하여 확인할 수 있다.

식 1 ~ 8 을 이용하여 임의의 발사조건과 총기 특성에 따른 유도 압력파 모델을 수립하였다. Table 1 은 30mm Chain Gun 의 총기 특성과 발사조건을 보이고 있다.

Table 1 Parameter values of firing conditions and weapon characteristics of 30mm Chain Gun.

Parameter	Value
a_m	920.0 m/s
V_p	780.0 m/s
ϕ	0.00 deg
h	0.26 m
D	30 mm
P_m/P_∞	330.0
γ	1.24
μ	0.78

Fig. 3 은 등고선 평면상의 유도 압력파의 시간에 따른 압력 형상을 보여주고 있다. 수립된 유도 압력파의 특성은 시간과 방향에 대하여 뚜렷한 의존성을 보이고 있으며, 특히 총구의 전방영역이 보다 큰 압력하중에

놓이게 됨을 예측할 수 있다. 또한 기존의 단순화된 압력과 모델과는 다르게 초기 양압력 영역 이후에 음압력 영역이 존재함을 확인할 수 있다.

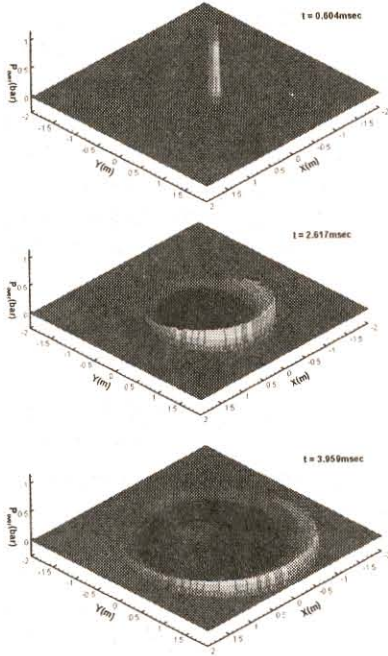


Fig. 3 Simulation results of blast wave overpressure for free field flow.

2.2 반사 압력과 모델링

기초의 충구로부터 방사되는 유도 압력파는 자유공간 상에서 확장되며 구조표면에 접하게 되면 반사가 이루어진다. 압력파의 반사는 크게 정규반사(regular reflection)와 마하반사(mach reflection)로 나눌 수 있다.

구조표면에서의 압력파 반사는 유도 압력파의 크기 P_1 와 유도 압력각 α_1 에 의해 결정된다. 작은 유도 압력각내에서 발생하는 정규반사는 경사충격파 이론으로 표현될 수 있다. 그러나 유도 압력각이 큰 영역에서 발생하는 마하반사에 대하여 경사충격파 이론의 적용은 불가능하다.

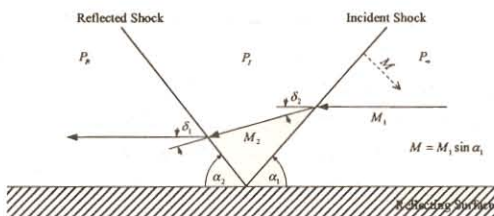


Fig. 4 The oblique shock wave solution for reflected shock.

작은 유도 압력각내에서 발생하는 압력파의 정규반사를 표현하기 위하여, Fig. 4와 같이 고정된 기준좌표

를 충격파와 같은 속도로 반사면을 따라 움직이는 이동좌표로 변환하면 충격파는 정지상태가 되며 반사표면에 평행한 유선을 갖는다. 이러한 유동장 내에서는 압축성 유동의 경사충격파이론[6]을 적용하면 정규반사 압력은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_2^2 \sin^2 \theta_1 - 1) + 1 \tag{9}$$

정규반사 압력파를 이용한 반사 압력파의 표현이 불가능한 압력각 영역에서는 마하반사가 발생하며 이러한 압력파의 반사를 얻기 위해서는 직접적인 측정 또는 유동장의 해석이 필요하다

본 연구에서는 압력파의 마하반사를 구하기 위하여 Fig. 5와 같이 Fluent를 이용한 유동장 해석을 수행하였다. 유동장은 압력입구조건(pressure inlet condition)이며 유동장 내부에 있는 반사대(reflecting block)는 중심점을 기준으로 회전이 가능하다. 유체의 비열비가 클수록 마하반사의 최대 크기가 커지므로 보수적인 결과를 얻기 위하여 해석 유동장의 비열비 $\gamma = 1.4$ 로 가정하였다. 해석은 $P = 2 \sim 60 \text{ psi}$ 의 유도 과압력영역에 대하여 그리고 각 유도압력에 대한 $\alpha_i = 0 \sim 90 \text{ psi}$ 의 압력각 영역에 대하여 수행되었다.

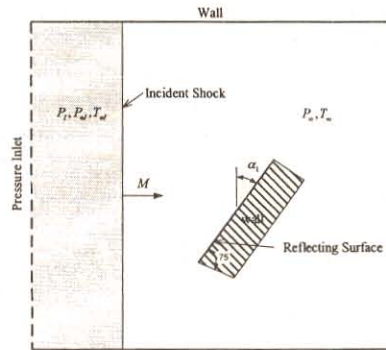


Fig. 5 Solution domain, boundary conditions.

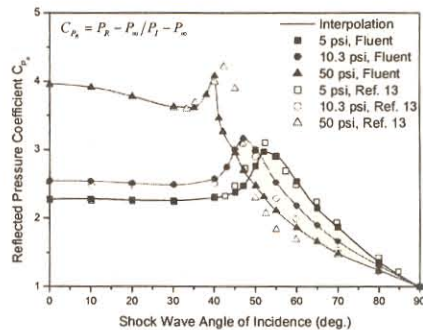


Fig. 6 Comparison between reflected pressure results obtained with Fluent and experimental data.

Fig. 6은 해석된 마하 압력값의 결과와 참고문헌[4]의 실험결과를 보이고 있다. 정규반사가 발생하는 작은 압력각 영역과 큰 압력각 영역에서는 두 결과가 매우 잘 일치함을 보이고 있으며, 마하반사가 발생하는 영역에서는 두 결과의 차이를 보이고 있다.

압력각과 유도압력값에 따른 반사압력은 정규반사 표현식과 유동장 해석결과의 1차와 3차 적합(linear and cubic fits)식들로 표현할 수 있다. 이러한 표현식들로부터 구조표면에서의 기총 폭발과 압력 모델(GUNBLAST)을 수립하였다. Fig. 7은 GUNBLAST로부터 구한 압력파와 실험 결과를 보이고 있으며, 두 결과가 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다.

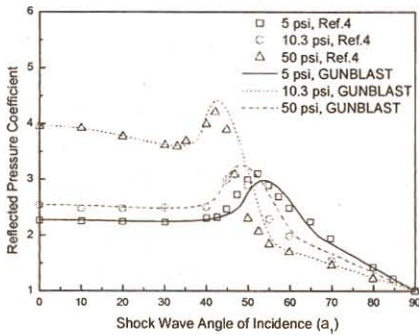


Fig. 7 Comparison the reflected pressure results obtained from GUNBLAST with Ref.4.

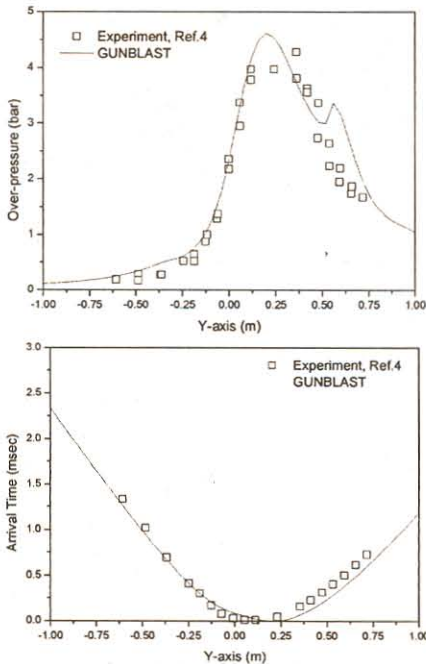


Fig. 8 Comparison of predicted peak reflected overpressure and blast wave time of arrival with experiment.

3. 기총 폭발 압력과 모델 검증

수립된 압력파의 검증을 위하여 참고문헌[4]의 30mm Chain Gun에 대한 실험 결과와 GUNBLAST로부터 구한 결과를 비교하였다.

Fig. 8은 반사표면에서의 최대 반사 과압력 값과 폭발과 도착시간을 보여주고 있다. 최대 반사 과압력은 실험 결과와 약간의 차이를 보이고 있으며, 이러한 차이는 Fluent를 이용한 반사압력 유동장 해석에 사용된 비열비의 차이에 따른 것으로 판단된다. 유도 압력파와 같이 총구 방향에 대한 뚜렷한 방향성을 보이고 있다. 폭발과 도착시간은 실험 결과와 잘 일치함을 보이고 있다.

4. 결론

항공기에 장착된 기총 발사에 따른 반복적 총구폭발에 의해 유발되는 폭발파의 특성을 고찰하였다. 기총 폭발과 모델을 수립하기 위하여 Friedlander Waveform과 스케일 기법을 이용한 자유영역에서의 유도 압력파 모델을 수립하였다. 구조표면에서의 반사압력파 모델을 수립하기 위하여 정규반사영역에 대하여 경사충격파 이론을 적용하였으며, Fluent를 이용한 마하반사영역의 유동장 해석을 수행하였다. 구조표면에 부과되는 압력파 모델인 GUNBLAST를 수립하였으며, 실험결과와의 비교를 통한 검증을 수행하였다.

본 연구에서 수립된 기총 폭발과 모델 GUNBLAST는 총구폭발에 의해서 항공기 구조물 및 내부에 장착된 장비에 미치는 진동의 영향도 예측과 건전성 평가에 유용한 수단으로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] McCarthy, D. K., "Analysis and Test of Gun Blast Resistant Composite Structure," Boeing Company.
- [2] Turkmen, H. S., "Structural Response of Laminated Composite Shells Subjected to Blast loading: Comparison of Experimental and Theoretical Methods," Journal of Sound and Vibration, Vol. 249, No. 4, pp. 663-678, 2002.
- [3] Fansler, K. S., "Dependence of Free-Field Impulse on the Decay Time of Energy Efflux for a Jet Flow," The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 56, pp. 203-212, 1986.
- [4] Heaps, C. W., Fansler, K. S., and Schmidt, E. M., "Computer Implementation of a Muzzle Blast Prediction Technique," The Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 56, pp. 213-229, 1986.
- [5] Ishii, R., Fujimoto, H., Hatta, N., and Umeda, Y., "Experimental and Numerical Analysis of Circular Pulse Jets," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 392, pp. 129-153, 1999.
- [6] Liepmann, H. W., and Roshko, A., "Elements of Gasdynamics," J. Wiley, New York, 1957.