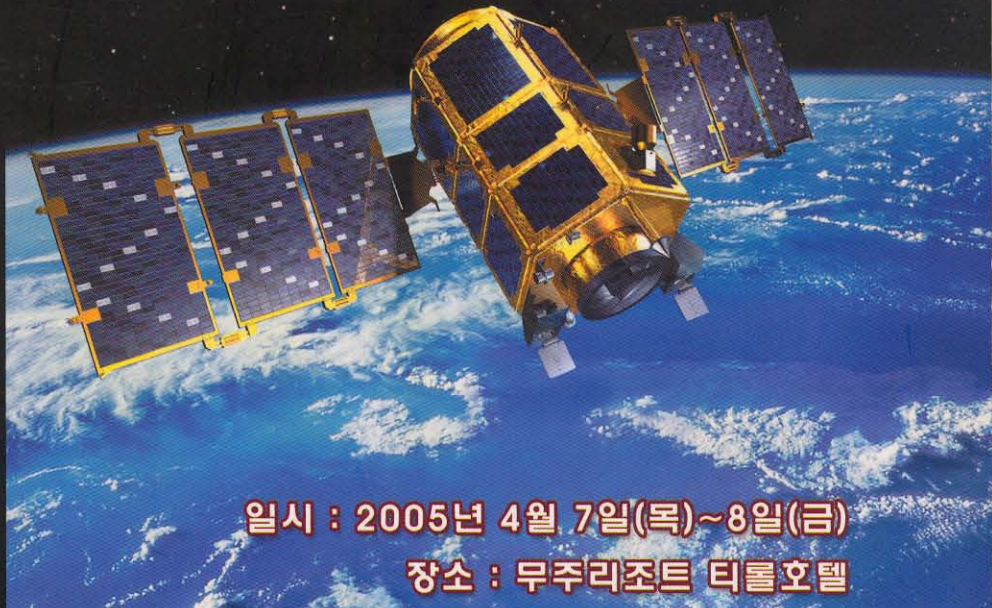




# 2005 춘계학술발표회 논문집

Proceedings of the 2005 KSAS Spring Conference



일시 : 2005년 4월 7일(목)~8일(금)

장소 : 무주리조트 티롤호텔

주최 : 사단 한국항공우주학회

후원 : 한국과학기술단체총연합회

한국항공우주산업(주)

이에이디에스 코리아

**SK** C&C

경주전장(주)



• 복합재 구조에 삽입된 광섬유 센서의 개선된 Ingress/Egress 기법 개발 .....	377
박상오*, 윤혁진, 박상욱, 김천곤(KAIST)	
• 열환경 하에서의 경사기능재료의 비선형 정적해석 .....	381
나경수*, 김지환(서울대)	
• 압전 섬유 작동기의 열팽창 계수 특성 .....	385
박재상*, 김지환(서울대)	
• 시소형 2-블레이드 틸트로터 블레이드의 Whirl 필터 안정성 해석 .....	389
김태성*, 신상준(서울대)	
• 틸트로터 휠필터 안정성 기초 연구 .....	393
김도형*, 이명규, 황창진(KARI)	
• Smart UAV 프로펠러 블레이드 설계 .....	397
이명규, 이주영*, 최성욱, 김재무(KARI)	
• 플랩-래그 연계를 고려한 틸트로터 허브 진동 해석 .....	401
박일주*, 정성남(전북대), 이주영, 이정진(KARI)	
• KF-16D 항공기 지상 진동 시험 .....	405
변관화*, 박찬익, 김종현(ADD)	
• T-50 외부연료탱크 날개에 적용된 진동 응력 생성 기법 .....	409
곽동일*, 백승길, 박구환, 김영익(KAI)	
• 기총 폭발파에 의한 항공기 진동 해석 .....	413
김대관*, 한재홍(KAIST), 장재호(KAI)	
• 부분공간 시스템 식별 기법을 이용한 진동 모드 필터링 .....	417
백승길*(KAI)	
• 열기계학적 완전 연계 해석을 위한 유한요소 부영역 결합법의 적용 .....	421
진지만*, 신의섭(전북대)	
• 초대형 구조해석 결과 후처리를 위한 고해상도 타일 가시화 시스템 구현 .....	425
김홍성*, 강정근, 송유미, 조진연(인하대)	
• 정밀 모델링 기법을 사용한 볼트 체결 구조부재 거동 해석 .....	429
윤태호*, 박시형, 김승조(서울대 비행체특화연구센터)	
• 비등방성 멤브레인의 주름 해석 .....	433
우경식, 남덕현*(충북대)	
• 실험계획법을 적용한 크리킹 메타모델의 효율성 검증 .....	437
노영희*, 임중빈, 박정선(한국항공대)	
• 회전중심합성 실험계획법을 적용한 보 형상의 최적화 .....	442
이동주*, 임중빈, 박정선, 이수용(한국항공대)	
• 돌풍하중을 받는 날개의 강도 최적화 .....	446
김태욱*, 이상욱(KARI)	
• 연료전지 분리판의 비선형 구조해석과 최적화 .....	450
조선영*, 임중빈, 박정선(한국항공대)	
• 직방성 복합재료에서 혼합모드균열의 진전 .....	454
강석진, 조형석, 임원균*(명지대)	

# 기총 폭발파에 의한 항공기 진동 해석

## Analysis of Aircraft Vibration Caused by Gun Blast Wave

김대관\*, 한재홍(KAIST), 장재호(한국항공우주산업)

### 1. 서 론

항공기에 장착된 기총의 사격시에는 반복적인 폭발파에 의한 진동과 기계적 진동(반탄력, 탄약운동) 등이 유발되어 진다. 특히, 반복적인 기총 폭발파 진동현상은 비행체의 심한 동적 환경 중의 하나로 고려되어진다. 이러한 진동현상은 정상 비행시의 진동 수준보다 매우 큰 진폭 및 가속도를 발생시키게 되므로 항공기의 탑재장비를 포함한 주요 계통 및 구조물들은 이러한 진동 가진원들로부터 안전성이 입증되어야 한다.

기총 발사에 의해 유발되는 진동해석에 관한 문헌 및 데이터는 군사적 기밀성 등의 이유로 매우 부족한 실정이다. McCathy[1]는 AH-64D Apache 공격형 헬기의 배면에 장착된 30mm Chain Gun의 기총 폭발파에 대한 구조표면의 시간응답과 변형율을 MSC/NASTRAN을 이용하여 해석하였으며, 측정된 변형율과의 비교를 수행하였다. Turkmen[2]은 원통형 패널 구조물의 돌풍 하중에 대한 동적응답 해석을 연구하였다. Fansler[3]는 Friedlander Waveform을 이용한 기총 폭발파의 에너지 유출에 따른 특성 소산 시간에 대하여 연구를 수행하였다. Heaps[4] 등은 스케일 기법(scaling technique)을 기반으로 기총 폭발파의 등고선 맵(contour map)을 산출하는 컴퓨터 코드를 개발하였다.

본 연구에서는 기총 폭발파의 특성을 고찰하여 총기특성과 발사조건에 따른 기총 폭발파 모델(GUNBLAST)을 수립하였다. 또한 수립된 기총 폭발파 모델을 평판구조에 적용하여 총구 거리에 대한 폭발파 모델링 효과를 고찰하였으며, MSC/NASTRAN을 이용하여 기총 폭발파에 대한 항공기 날개 구조의 과도 응답(transient response) 해석을 수행하였다.

### 2. 기총 폭발파 모델 수립

기총 발사시에 총구로부터 방사되는 기총 폭발파는 일종의 압력파로서 총구와 구조표면 사이의 자유영역(free field)에서 전파되는 유도 압력파(incident pressure wave)와 구조표면에서 반사되는 반사 압력파(reflected pressure wave)로 크게 나눌 수 있다. 또한 반사 압력파는 유도 압력파의 크기와 유도각에 따라서 정규반사(regular reflection)와 마하반사(mach reflection) 압력파로 나눌 수 있다.

#### 2.1 유도 압력파 모델링

일반적으로 기총으로부터 방출되는 유도 압력파는 식 (1)과 같이 Friedlander Waveform[3]으로 표현될 수 있다.

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

여기서,  $P_{\infty}$ ,  $\bar{P}$ ,  $t_a$ ,  $\tau$ 는 각각 주변압, 최대 유도 과잉압력, 폭발파 도착시간 그리고 양압력 지속시간을 의미한다.

그림 1은 자유영역의 임의의 위치에 대한 유도 압력파의 시간이력을 보이고 있다.

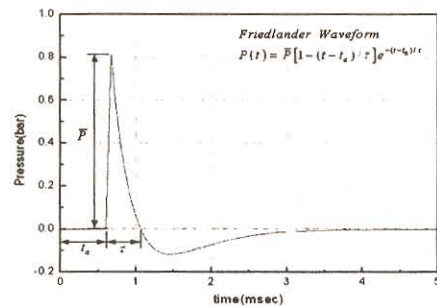


그림 1. Friedlander Waveform 유도 압력파



식(1)의 Friedlander Waveform을 이용하여 정확한 유도 압력파를 모델링하기 위해서는 자유영역의 임의의 위치에 대하여 독립적인  $\bar{P}$ ,  $t_a$ ,  $\tau$ 가 계산되어야 한다. 이와 같은 세 가지 변수들은 총기특성과 발사조건에 따라서 변화된다. 그러나 기존의 기총 폭발에 관한 연구들 [2,3]에서는 폭발파를 Friedlander Waveform의 균일한 압력파로 가정하였으며, 이러한 가정으로는 실질적인 압력파를 모델링하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실질적인 압력파 모델링을 위하여 참고문헌[4]에서 제시한 스케일 기법을 이용하여 식 (1)의 변수들을 계산하였으며 각 변수들은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{P} = 2.4Z \quad (2)$$

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

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

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

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

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

총기 출구 유동이 아음속인 경우 ( $V_p < a_m$ )

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

총기 출구 유동이 초음속인 경우 ( $V_p > a_m$ )

$$l = (9.28 \times 10^{-2}) D \left[ \frac{P_m V_p}{(\gamma - 1) P_\infty a_\infty} \left( 1 + \frac{\gamma(\gamma - 1) V_p^2}{2a_\infty^2} \right) \right] \quad (9)$$

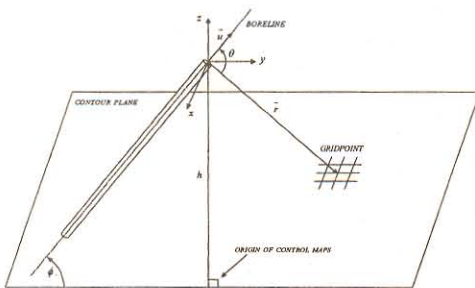


그림 2. 총기 발사조건 형상

여기서  $a_\infty$ ,  $P_\infty$ ,  $\mu$ ,  $D$ ,  $a_m$ ,  $P_m$ ,  $V_p$ ,  $\gamma$ 는 총기 특성에 관한 변수들이며, 각각 주변음속, 주변압, 운동량 지수, 총구 직경, 총구 음속, 총구 압력, 탄환 발사 속도, 비열비를 의미한다.

식(2)~(9)의 유도과정 및 총기 특성 변수들의 자세한 내용은 참고문헌 [4]을 통하여 확인할 수 있다. 또한  $r$ ,  $\theta$ 는 기총 발사조건에 관한 변수들이며 이러한 발사조건 변수들은 그림 2와 같이 기총 발사조건 형상에 의해 결정되어진다.

## 2.2 반사 압력파 모델링

총구로부터 방출된 유도 압력파는 구조표면에서 반사된다. 이러한 반사 압력파는 유도 압력파의 동일한  $t_a$ 와  $\tau$ 를 가지며, 반사 압력파의 크기는 유도 압력파의 크기와 유도각에 따라서 정규반사와 마하반사로 나뉘어진다. 정규반사는 작은 유도각내에서 발생하며 그 크기는 경사 충격파이론(oblique shock theory)을 통하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{P_R}{P_I} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M_2^2 \sin^2 \theta_2 - 1) + 1 \quad (10)$$

여기서  $P_R$ ,  $P_I$ ,  $\gamma$ ,  $M_2$ ,  $\theta_2$ 는 각각 반사 압력파 크기, 유도 압력파 크기, 비열비, 유도 압력파 내의 마하수, 반사각을 의미한다.

정규반사 유도각 이상의 영역에서 발생하는 마하반사의 크기를 구하기 위해서는 유도 압력파의 크기와 유도각의 변화에 대한 마하반사의 직접적인 측정 및 유동장의 해석이 필요하다. 본 연구에서는 마하반사의 크기를 구하기 위하여 그림 3과 같이 Fluent를 이용한 유동장 해석을 수행하였다. 해석 유동장은 압력입구조건이며 유동장 내부에 있는 반사대의 반사각은 중심점을 기준으로 변화된다.

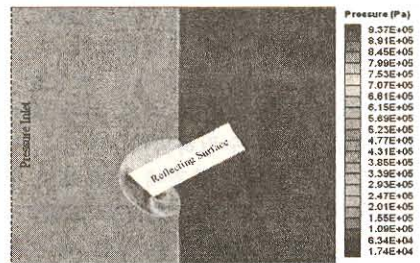


그림 3. 반사 압력파 유동장 해석(유도각: 60°, 유도 과잉압력: 50psi)

해석은 2 ~ 60psi의 유도 과잉압력영역과 0 ~ 90°의 유도각 영역에 대하여 수행되었다. 유도 압력파의 크기와 유도각에 따른 반사 압력파의 크기는 그림 4와 같이 식(10)과 마하반사 영역에 대한 3차와 1차 적합식들의 조합으로 표현될 수 있다. 따라서 반사 압력파의 크기에 대한 연속함수와 식(3)과 (4)를 이용하여 기총 폭발파에 대한 모델(GUNBLAST)를 수립하였으며, 그림 5와 같이 GUNBLAST의 예측 결과와 참고문헌[4]의 30mm 기총에 대한 실험결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

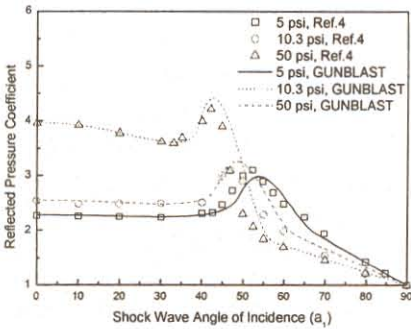


그림 4. 유도각에 따른 반사 압력파의 실험결과 및 GUNBLAST 예측

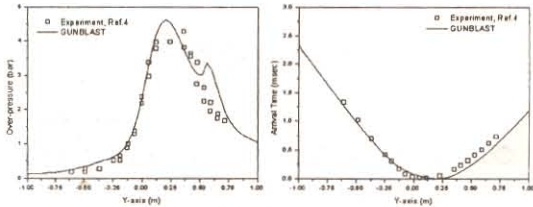


그림 5. 반사파 과잉압력과 폭발파 도착시간에 대한 GUNBLAST와 실험결과 비교

### 3. 구조해석을 위한 GUNBLAST 적용

#### 3.1 평판구조에 대한 적용

수립된 폭발파 모델 GUNBLAST의 첫 번째 적용으로서 구조표면과 총구와의 총구거리에 대한 폭발파 모델링 특성을 파악하였다. 이를 위하여 복합재 평판에 대한 폭발파하중을 계산하여 균일하중과의 오차를 비교하였다. 해석에 사용된 평판의 형상과 기총 발사 조건은 그림 6과 같으며 12.7mm 기총에 대하여 최대 10m의 총구거리에 대한 해석을 수행하였다.

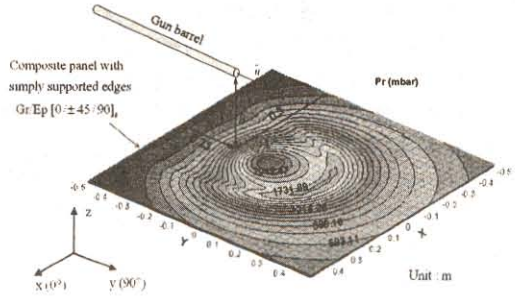


그림 6. GUNBLAST로 예측된 반사 폭발파의 크기 (12.7mm gun, h=20cm)

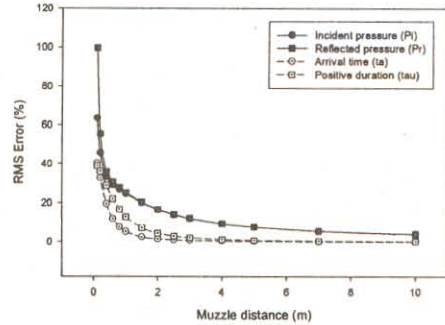


그림 7. 총구거리에 따른 반사 폭발파와 균일 하중과의 RMS 오차

그림 6은 또한 GUNBLAST로 예측된 20cm의 총구거리에 대한 반사 폭발파의 크기를 보이고 있다. 그림 7은 예측된 폭발파와 균일 하중에 대한 각 변수들( $P_I$ ,  $P_R$ ,  $t_a$ ,  $\tau$ )의 정규화된 RMS 오차(normalized rms error)를 보이고 있다. 정규화 RMS 오차의 정의는 식(11)과 같으며, 각각의 총구거리에 대한 균일 하중의 변수들은 GUNBLAST로 예측된 폭발파 변수들의 평판에 대한 평균값들을 이용하였다.

$$\varepsilon[\hat{\phi}] = \frac{\sqrt{E[(\hat{\phi} - \phi)^2]}}{\hat{\phi}} \quad (11)$$

여기서  $\hat{\phi}$ 는 평균값( $E[\phi]$ )을 의미한다.

그림 7의 결과를 통하여 특정 총구거리(~4m) 이하의 영역에서 두 결과의 오차가 매우 커짐을 확인할 수 있다. 따라서 구조 표면에 근접한 기총에 대하여 균일 하중조건 적용은 부적합하며, 폭발파의 강한 방향 의존성을 고려한 실질적인 모델수립이 필요함을 확인할 수 있다.



### 3.2 항공기 날개의 천이응답

GUNBLAST의 두 번째 적용으로서 그림 8과 같이 외부 연료탱크와 기총을 장착한 비행체 날개에 대하여 MSC/NASTRAN을 이용한 천이응답 해석을 수행하였다. 날개의 하단은 고정되어 있으며 외부 장착물은 하단을 기준으로 연료탱크와 기총의 순으로 장착되어 있다. 장착된 기총의 총구직경과 발사율(firing rate)은 각각 12.7mm와 17Hz이다.

해석은 1발과 50발 연속발사에 대하여 수행하였다. 그림 9는 50발 연속발사에 대한 날개 끝단의 변위를 보이고 있으며, 그림 10은 천이응답 해석을 통한 날개끝단의 가속도 PSD(power spectral density)를 보이고 있다. 실질적인 비행 조건에 비해서 날개 하단의 구속조건에 의해 과잉응답이 발생할 수 있으나, 이러한 결과를 통하여 기총 폭발파 하중은 큰 구조 변위와 가속도를 유발 시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 기총 폭발파에 의해 유발되는 구조 진동은 넓은 주파수 영역의 랜덤(random) 진동과 기총 발사율의 조화가진(harmonic excitation)의 조합으로 이루어짐을 확인할 수 있다.

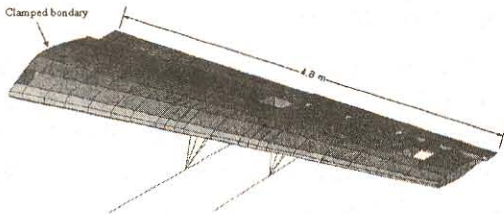


그림 8. 비행체 날개 구조형상

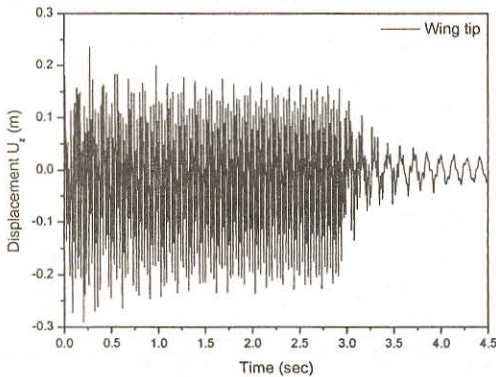


그림 9. 기총 폭발파에 대한 날개 끝단 변위

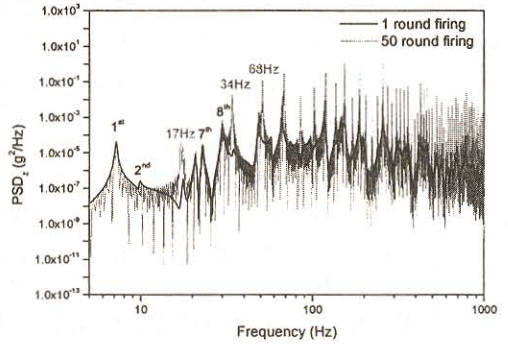


그림 10. 날개 끝단의 가속도 PSD

### 4. 결론

항공기에 장착된 기총에 대한 폭발파 모델을 수립하였다. Friedlander Waveform과 스케일 기법을 이용하여 유도 압력파를 모델링 하였으며, 경사충격파이론과 Fluent를 이용한 유동장 해석을 통하여 반사 압력파를 모델링 하여 실험 결과와의 검증을 수행하였다.

수립된 폭발파 모델은 평판 및 항공기 날개의 구조해석에 적용되었으며 폭발파에 의해 유발되는 진동은 구조뿐만 아니라 항공기에 탑재된 장비에 고주파수 영역의 피해를 유발 시킬 수 있음을 확인하였다.

### 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, 2002, pp. 663-678.
- 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, 1986, pp. 203-212.
- 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, 1986, pp. 213-229.