

항력리본이 장착된 자탄의 공력 해석 연구

강 승 희,^{*1} 김 진 석,² 안 성 호³

A STUDY ON AERODYNAMIC ANALYSIS OF A SUB-MUNITION WITH DRAG RIBBON

Seung-Hee Kang,^{*1} Jin-Suk Kim² and Sung-Ho Ahn³

The initial unfolding motion simulation of a sub-munition with drag ribbon for precision guidance and reliable operation has been investigated by analyzing its unsteady aerodynamic load and fluid structure interaction. The effects of change in the ribbon configuration and flow angle are numerically studied using a commercial software "XFLOW" based on Lattice-Boltzmann Method. It is shown that the motion is affected adversely by the separation bubble formed posterior part of the fuselage. The rolling moment for arming of the sub-munition is increased with angle of attack and rotational movement.

Key Words : 항력리본(Drag Ribbon), 자탄(Sub-munition), 유체-구조연계(Fluid-Structure Interaction), Lattice-Boltzmann Method, XFLOW

1. 서 론

클러스터 탄(cluster bomblet, 집속탄)은 항공기에 의한 투하 또는 로켓, 포 등에 의해 발사되어 탄도식 자유비행을 한 후 일정한 거리나 시간이 지나 목표지점에 도달되면 수많은 자탄(sub-munition, bomblet)을 퍼뜨려 투하시킴으로써 넓은 지역을 파괴하는 포탄을 말한다. 이러한 종류의 탄은 세계 2차 대전 이후 베트남전, 걸프전, 코소보와 유고슬라비아 전, 아프가니스탄 전, 이라크 전 그리고 최근에는 이스라엘의 레바논 침공전 등에 광범위하게 사용되어 왔다[1].

이러한 자탄은 크게 다음과 같이 나눌 수 있다. 미국의 Mk 118 'Rockeye'와 같이 비교적 고전적 형태의 자탄에 고정핀을 사용한 자탄(fin-stabilised anti-amour bomblet), 미국 BLU-3/B 자탄의 경우처럼 핀을 사용한 파편 자탄(fin-stabilised fragmentation bomblet), BLU 26, 61과 같이 항공기 등으로부터 투하하는 클러스터 탄인 회전자탄(spin-armed sub-munition),

BLU 97과 같이 작은 낙하산 또는 유연한 재질의 제동장치(flexible air brake)가 장착된 자탄(parachute stabilised sub-munition) 그리고 Fig. 1에서 보는 바와 같이 항력리본(drag ribbon)이 장착된 자탄이 있다고 알려져 있다[1].

항력리본을 장착한 자탄의 경우는 다음과 같이 작동하는 것으로 알려져 있다. 탄두가 로켓 등에 의해 일정한 거리를 비행한 후 목표지점에 도달하면 신관의 기폭관 및 연결화약의 기폭으로 탄두 중심에 위치한 자탄 분산장치(center core burster)가 폭발한다. 이러한 폭발압력에 의해 탄두 외피가 파괴되면 자탄이 분산된다. 분산된 자탄은 비행시 항력리본에 의해 자세를 잡고 자중에 의해 자유낙하하면서 리본에 거동에 의해 자탄신관의 장전 나사가 반시계방향으로 회전되면서 무장(arming)된다[2, 3].

이러한 자탄의 경우 항력리본이 적절한 회전을 하지 않게 되면 안전장치가 작동하지 않게 되고 불발탄이 발생할 수 있다고 알려져 있다[2, 4]. 일반적인 자탄의 경우 약간의 차이는 있지만 불발율(dud rate)은 2 ~ 30% 정도 되는 것으로 보고되고 있으며, 이러한 불발탄에 의해 민간인 등이 부상되는 경우도 많은 것으로 보고되고 있다[1]. 또한 이러한 자탄은 발사 후 비유도로 자유낙하 시키기 때문에 정밀한 유도가 어렵다는 단점이 있어 이 자탄의 성능 및 효율을 극대화하기 위해서는 리본의 거동에 따른 정확한 공력분석이 필수적이다.

본 연구는 항력리본이 장착된 자탄의 성능 극대화 및 효율

접수일: 2011년 9월 26일, 수정일: 2011년 11월 7일,

계재확정일: 2011년 11월 8일.

1 정희원, 전북대학교 항공우주공학과

2 국방과학연구소

3 정희원, 국방과학연구소

* Corresponding author, E-mail: ksh@jnbu.ac.kr



Fig. 1 FRY LB-1 (left) and US M42 (right) sub-munitions

적인 운용을 위한 리본의 초기 전개과정 분석과 자탄의 최적형상설계 및 확산모델 예측에 필요한 기본적인 공력자료를 제공하기 위해 저속 흐름 영역에서의 비정상 유동장을 해석하였다. 이를 위해 상용 전산유체역학 프로그램을 사용하여 유체-구조연계(fluid-structure interaction, FSI) 해석을 수행하여 항력리본 전개 및 자탄 주위의 공기역학적 현상을 연구하였다.

2. 수치적 기법

공기 중을 움직이는 탄과 같은 물체 주위의 유동장 해석과 성능해석에 전산유체역학 기법(Computational Fluid Method, CFD)이 광범위하게 사용되고 있다. 전통적인 방식의 전산유체역학 기법은 주로 유한요소법(finite element method)이나 유한체적법(finite volume method)등을 사용하여 연속체 유체의 유동장을 지배하는 비선형 편미분 방정식인 Navier-Stokes 방정식을 계산한다. 이러한 수치적 기법은 물체 주위의 정밀한 유동장을 얻기 위해서는 격자(mesh)를 조밀하고 효율적으로 구성해야한다. 많은 연구자들은 이러한 효율적인 격자를 만들기 위해 많은 노력을 투자하고 있는 것이 현실이다[5].

1950년대 이후부터 격자를 만들지 않고 유동 수치해석을 위한 많은 노력들이 시도되어 왔다. 이 중에서 연속체 개념을 사용하지 않고 분자 운동론을 따르는 유동의 지배방정식으로, 입자의 분포가 확률적으로 표현되고 입자간의 운동학이론을 통하여 압력, 속도, 밀도와 같은 거시적 물리량과 입자의 분포함수가 연관되어 입자의 흐름과 충돌 향으로 표현하는 볼츠만(Boltzmann) 방정식을 사용한 LBM(lattice Boltzmann method)이 1990년대 중반이후 개발되어 사용되고 있다.

LBM 기법은 역사적으로 LGA(lattice gas automata)로부터 발전되었으며, 볼츠만 방정식에서 직접 격자볼츠만 방정식(LBE)이 유도됨으로써 이론적인 바탕이 세워지게 되었다. 여

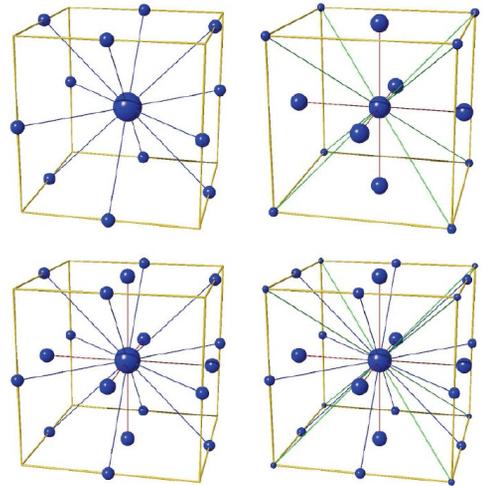


Fig. 2 The most commonly used Lattice Boltzmann models(D3Q13, D3Q15, D3Q19 and D3Q27)

기에 입자들 간의 충돌 항을 선형충돌 모형인 BGK(Bhatnagar-Gross-Krook)근사로 대체하고, Chapman-Enskog 가정을 적용하여 이산화 방정식을 구한 후 수치계산을 수행하는 방법이다.

i 방향으로의 국소분포함수(distribution function) f_i , 이동속도 c_i 를 사용하면 볼츠만의 이송 방정식(Boltzmann's transport equation)은 다음과 같다.

$$f_i(\vec{r} + \vec{c}_i dt, t + dt) = f_i(\vec{r}, t) + \Omega_i^B(f_1, \dots, f_b) \quad (1)$$

여기서 Ω_i^B 는 국소지역 충돌함수(collision operator)이다.

충돌함수가 선형충돌 모형인 BGK(Bhatnagar-Gross- Krook) 근사로 대체하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega_i^B = \frac{1}{\tau}(f_i^{eq} - f_i) \quad (2)$$

여기서 f_i^{eq} 는 국소등가분포함수 (local equilibrium distribution)를 τ 는 완화시간(relaxation characteristic time)으로 $1/\tau$ 는 등가 점근율이며, τ 값의 설정에 의해서 유체 점성을 선택할 수 있다[6-8].

일반적으로 국소등가분포함수는 다음 식을 사용하여 나타낼 수 있다[6].

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left(1 + \frac{c_i u}{c_s^2} + \frac{(c_i u)^2 - c_s^2 |u|^2}{2c_s^4} \right) \quad (3)$$

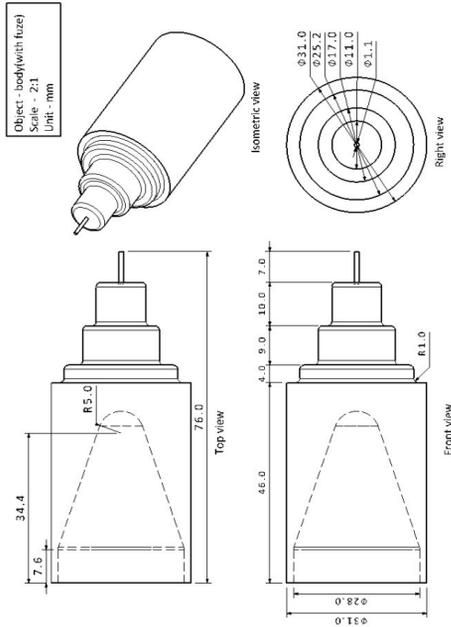


Fig. 3 Body configuration model

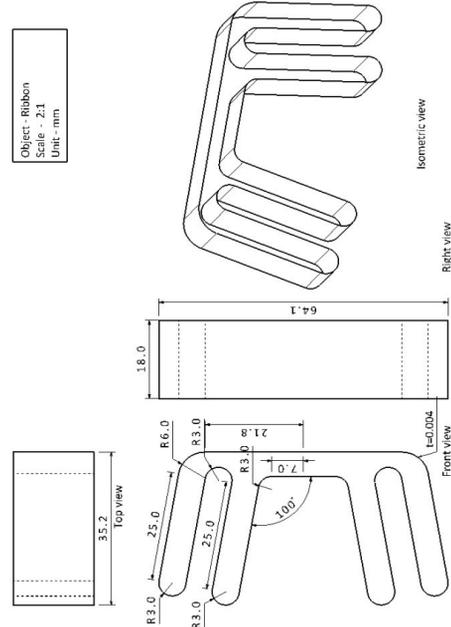


Fig. 4 Drag ribbon model (folded configuration)

여기서 c_s 는 음속(speed of sound)을 u 는 속도를 나타낸다.

LBM 기법은 공간차원(spatial dimension) d 와 분포함수 수(number of distribution function) b 로 나타낼 수 있으며 $DdQb$ 로 표시한다. 삼차원의 경우 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다 [6].

본 연구에서는 Next Limit Technology사의 LBM과 SPH(smoothed particle hydrodynamic)의 연동 해석 솔버를 채택한 XFLOW ver. 0.968과 ver. 0.969[9]를 사용하여 해석을 수행하였다. 난류는 Wall-Adapting Local-Eddy LES(Large Eddy Simulation) 기법을 사용하여 모델링하였으며, 비압축성 Isothermal model 모듈과 XFLOW에서 제공되는 유체-구조 연계 해석(fluid-structure interaction, FSI) 모듈을 사용하여 자탄 주위의 비정상 흐름에 따른 항력리본 거동 해석을 수행하였다. 계산은 표준대기 조건에서 속도 및 자세변화 그리고 회전각 변화에 따른 전개과정을 해석하였다. 공기역학적 힘은 동압 및 자탄 동체의 단면적을 기준으로 무차원화 하였으며, 모멘트는 자탄 동체 직경을 사용하여 무차원화 하였다.

2. 사용된 항력리본 형상

본 연구에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같은 자탄 동체에 폭이 18.0 mm, 두께 4 mm인 나일론 천이 직경 170 mm 원형 항력리본과 접혀진 형상의 리본(Fig. 4)에 대한 거동에 따른 구조-유체 연동 해석을 수행하였다. 사용된 항력 리본은 나일

론 소재로 제작된 것으로 가정하였다.

3. 결과 검토

3.1 수치적 기법 및 프로그램 검증

사용된 수치적기법의 정확도 및 구조격자 크기에 따른 천의 거동변화가 유동장에 끼치는 영향을 확인하기 위해 깃발(flag)에 대한 거동을 해석하여 실험치[10]와 비교하였다. 깃발의 폭(c)과 길이(b)는 각각 1.219 m($c/b = 1$)이다. 밀도 1,200 kg/m³, 포아송 비 0.4, 두께 2 mm 그리고 영율 4 GPa 이다. 천의 구조격자 변화에 따른 항력계수 변화를 확인하기 위해 천 폭의 1/25, 1/50 및 1/100 격자간격(Δ)에 대해 계산을 수행하였다. 계산은 속도 24.384 m/sec, Courant 수 1 조건으로 수행하였다.

계산 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 구조격자의 크기를 천 길이의 1/100으로 나눈 결과의 경우 실험치와 약 2 % 차이만을 보여 본 연구에서 사용한 수치적 기법이 상당히 정확함을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 접혀진 형상 항력리본 주위길이의 약 1/100 간격으로 구조격자를 구성하여 계산을 수행하였다.

3.2 자탄 동체에 의한 영향

자탄 동체 주위의 기본 유동장의 해석 뿐 아니라 항력리본이 장착된 경우 항력리본 거동에 따른 상대 비교를 위해 자

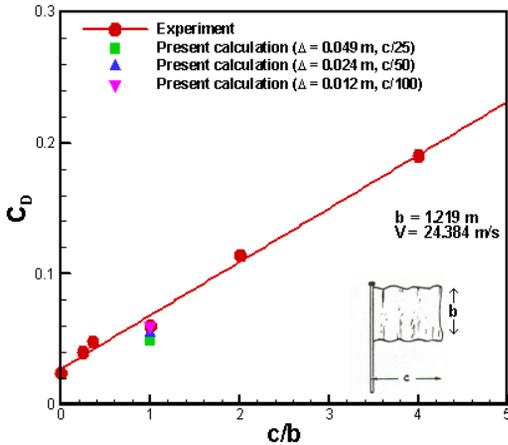


Fig. 5 Calculated drag coefficient for fluttering flag

탄 동체의 받음각(α) 변화에 따른 주위 유동장 변화를 계산하였다. 계산은 표준대기, 속도 50 m/sec (마하수(M) = 0.15) 그리고 직경기준 레이놀즈 수(Re_D) = 1.1×10^6 조건에서 수행하였다. 동체의 받음각은 0° 와 10° 의 경우에 대해 계산하였다.

계산 결과는 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 받음각 0° 의 경우 동체 주위에 원통 형상과 유사하게 동체 전방부의 상·하 면에서 흐름의 가속과 후방부에서의 흐름 박리영역 특성을 보인다. 그러나 Fig. 7의 받음각 10° 의 경우를 보면 날카로운 동체 앞부분의 영향으로 인하여 흐름의 박리가 앞전에서 발생되며 이러한 와류가 후류 방향으로 전파됨을 볼 수 있다. 이러한 와류의 발생 및 전파는 동체 후방부에 설치될 항력리본에 보다 많은 진동 등을 유발 시킬 수 있을 것으로 예측된다.

3.3 항력리본에 의한 영향

가. 원형 항력리본

일반적으로 자탄에 사용하는 형태와 유사한 원형 항력리본을 장착한 자탄의 초기 전개과정에 따른 주위 유동장 변화를 계산하기 위해 원형 항력리본에 대한 계산을 수행하였다. 리본의 직경은 170 mm이며 나일론 소재로 영률(Young's Modulus)은 2.2 GPa, 포아송비(Poisson ratio)는 0.4 그리고 밀도는 $1,100 \text{ kg/m}^3$ 이다[11]. 사용된 리본의 투과율(permeability)는 없는 것으로 그리고 표면은 매끈한 것으로 가정하여 계산을 수행하였다. 계산은 고정된 자탄 동체에 리본이 주위 흐름 변화에 따라 자유롭게 거동할 수 있도록 유체-구조연계 모형을 사용하여 계산을 수행하였다.

원형 항력리본 거동에 따른 리본 표면에서의 응력분포 및 주위 유동장의 와도분포를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 흐름 속도의 변화가 동체 앞부분과 후방부에서

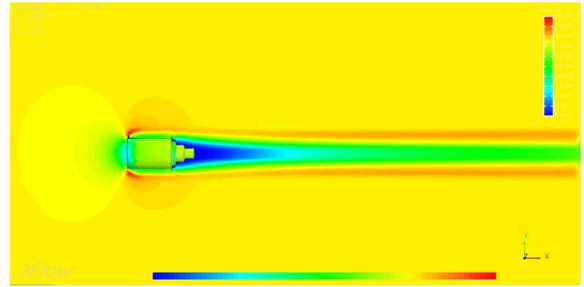


Fig. 6 Pressure and velocity contours for the body configuration ($\alpha=0^\circ$, $V=50 \text{ m/sec}$)

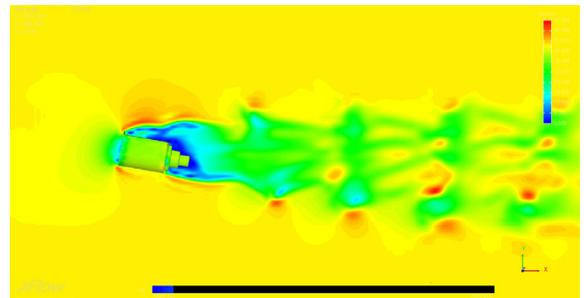


Fig. 7 Pressure and velocity contours for the body configuration ($\alpha=10^\circ$, $V=50 \text{ m/sec}$)

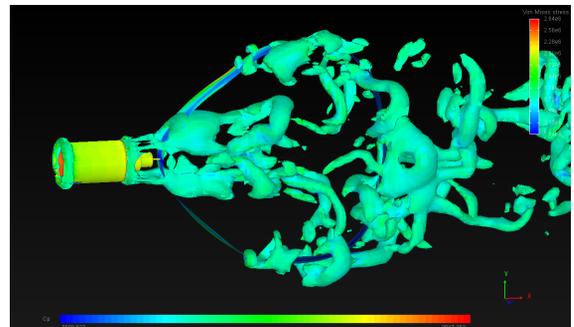


Fig. 8 Pressure and iso-vorticity contours for the circular ribbon configuration ($\alpha=0^\circ$, $V=50 \text{ m/sec}$, $t=0.043 \text{ sec}$)

의 흐름의 변화가 크게 나타나며, 이러한 변화가 리본의 초기 거동에 상당한 영향을 줄을 예측할 수 있었다. 또한, 그림에서 보는 바와 같이 리본 자체에 의해 흐름의 교란이 발생되는 것을 볼 수 있었다. 이는 사용된 리본의 강한 강성으로 리본에 의한 흐름 교란을 유발하여 이에 대한 영향이 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다. 본 계산에 사용된 나일론의 경우는 동일한 물리적 성질의 나일론 원 소재가 균일하게 분포되어 있다고 가정된 결과이다. 그러나 나일론 천의 경우

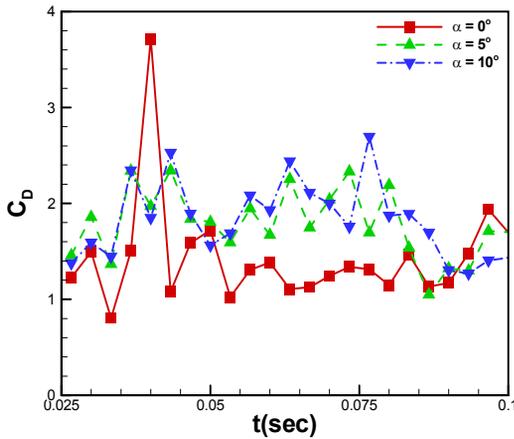


Fig. 9 Unsteady drag coefficient of the circular ribbon configuration (V=50 m/sec)

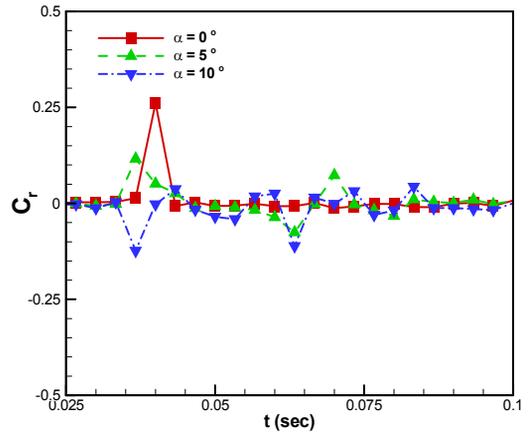


Fig. 12 Rolling moment coefficient of the circular ribbon configuration (V=50 m/sec)

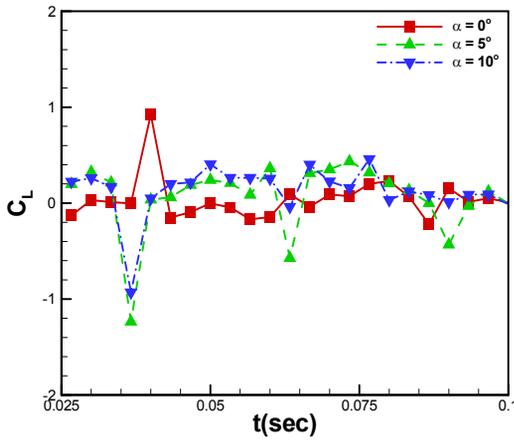


Fig. 10 Unsteady lift coefficient of the circular ribbon configuration (V=50 m/sec)

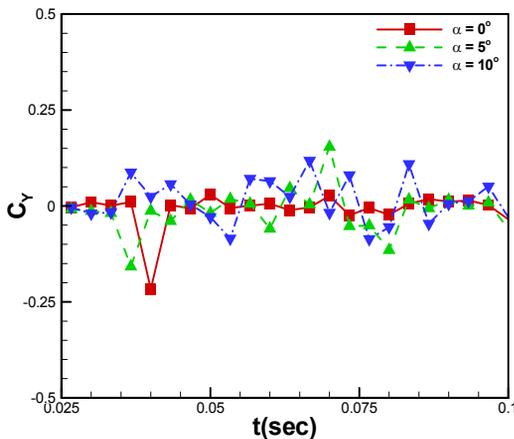


Fig. 11 Unsteady side force coefficient of the circular ribbon configuration (V=50 m/sec)

는 나일론 원 소재 뿐 아니라 천을 만드는 조직에 따라 구조적 특성이 다르게 나타나고 천의 경우 압축력에 대한 저항력이 거의 없으므로[12, 13] 보다 정확한 거동 해석을 위해서는 사용될 천의 소재 특성 모사가 필요할 것으로 판단된다.

이 리본 형상의 비정상 거동에 따른 항력, 양력 그리고 측력계수를 Fig. 9 ~ Fig. 11에 나타내었으며, 그 평균치를 table 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 동체에 의한 흐름 박리와 리본 자체에서 발생하는 흐름 교란이 큰 경우 급격한 공기역학적 변화를 보임을 볼 수 있으며 이러한 현상은 받음각이 증가 할수록 커짐을 확인 할 수 있었다. 평균 항력계수의 경우는 리본이 없는 동체의 경우와 비교시 받음각 0°에서 약 48%의 증가를 받음각 10°에서는 41.7%의 증가함을 보여 항력리본을 장착한 자탄의 정밀한 유도 및 확산모델 예측을 위해서는 리본의 거동에 따른 공기력 해석이 필요함을 알 수 있다.

자탄의 무장을 위해서는 안전장치의 해제가 필수적이며 이는 동체의 롤링모멘트와 항력리본의 롤링모멘트 차이가 매우 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 이에 대한 영향을 확인하기 위해 동체에서 발생하는 롤링모멘트계수(Cr)와 리본에서 발생하는 롤링모멘트계수의 차이를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 원형 항력리본의 경우 흐름의 박리에

Table 1 Force coefficients for the circular ribbon configuration

Config.	0°		10°	
	body only	body+ribbon	body only	body+ribbon
C _D	0.960	1.424	1.819	1.284
C _L	-0.007	0.032	0.124	0.465
C _Y	-0.000	-0.008	0.011	-0.001

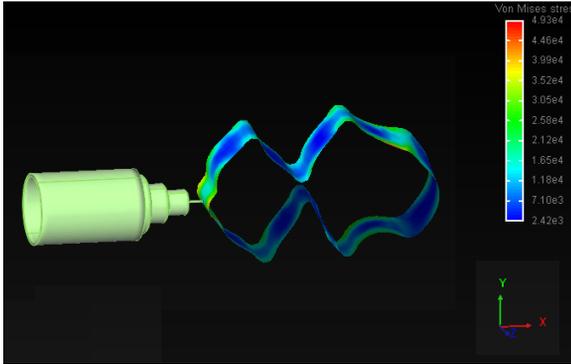


Fig. 13 Initial unfolding motion of the folded ribbon configuration ($\alpha=0^\circ$, $V=50$ m/sec, $t=0.093$ sec)

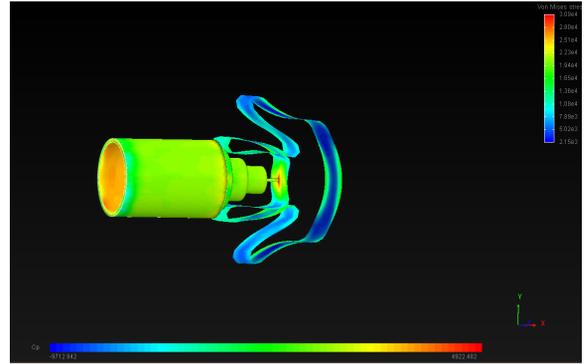


Fig. 15 Pressure contour on the body surface and stress distribution on the folded ribbon configuration in a rotating motion ($\alpha=0^\circ$, $V=50$ m/sec, $\omega=29$ rps, $t=0.02$ sec)

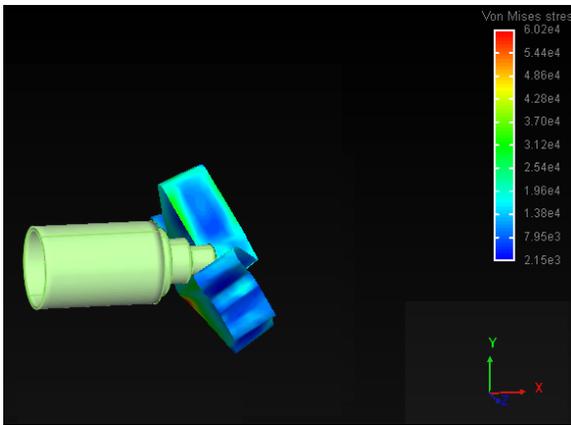


Fig. 14 Initial unfolding motion of the folded ribbon configuration ($\alpha=0^\circ$, $V=50$ m/sec, $t=0.430$ sec)

의한 비정상 흐름에 의해 롤링모멘트 계수가 약간 증가하는 경향을 보이며 받음각이 증가할수록 모멘트 계수의 절대 값이 증가하는 경향을 보임을 확인 할 수 있었다. 또한 그림에서 받음각 10도의 경우처럼 비정상 유동장에 의해 롤링모멘트의 방향이 변하는 현상을 보이게 됨으로 보다 안정화된 무장을 위해서는 받음각 변화에 따라 리본의 거동이 안정화 될 수 있는 방안에 대한 연구가 추후 필요할 것으로 판단된다.

나. 접힌 형상 항력리본

실제 항력리본의 경우 Fig. 1에서 보는 바와 같이 리본이 접힌 상태로 설치되며, 자탄 분리 후 리본이 주위 흐름에 의해 전개되게 된다. 이러한 거동을 모사하기 위해 Fig. 4에서 제시한 접힌 형상 항력리본의 초기 거동에 대한 연구를 수행하였다. 계산은 강성이 보다 작은 영율 22.0 MPa, 밀도 1,100 kg/m³, 포아송 비 0.4 그리고 두께 0.4 mm 소재에 대해 계산

을 수행하였다. 자탄은 고정된 상태에서 리본이 자유거동을 하도록 하는 경우와 일정한 방향으로 회전운동하는 경우에 대해 계산을 수행하였다. 받음각 0°, 흐름속도(V)는 50 m/sec에 대해 계산을 수행하여 받음각 변화에 따른 영향을 파악하였다.

받음각 0°에서 고정된 자탄 동체에 설치된 항력리본의 초기 전개 과정시 리본표면에서의 응력 분포 및 주위 와도분포를 Fig. 13 ~ Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 항력리본이 초기에는 후방부로 전개되기 시작한다. 그러나 이렇게 전개된 리본은 다시 동체 쪽으로 끌려와 더 이상 전개되지 못하는 경향을 보임을 확인 할 수 있었다. 일반적으로 흐름이 박리되면 주위에 비해 낮은 압력을 갖게 된다. 따라서, 이러한 현상이 발생된 이유는 동체 후방부에서 발생된 흐름의 박리로 인해 주위 유동장보다 낮은 압력이 형성되어 결국 리본을 끌어 들이는 효과가 나타나게 된 것으로 판단된다. 이렇게 끌려온 리본은 박리영역에 갇히게 되고 결국 더 이상 전개되지 못하는 현상이 발생된 것으로 판단된다. 이러한 현상은 받음각을 증가하여도 유사한 현상이 발생됨을 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 최소화 하거나 방지하기 위해서는 흐름의 박리영역을 벗어날 수 있도록 항력리본의 길이를 크게 하거나 또는 동체의 흐름박리 영역을 최소화시킬 수 있는 동체 형상설계 등이 필요할 것으로 판단된다.

항력리본의 회전에 따른 거동 특성을 파악하기 위해 받음각 0°의 자세로 속도 50 m/sec의 유동장에서 각속도(ω) 29 rps로 회전하는 접힌 형상 항력리본 자탄 형상의 주위 유동장을 해석하였다. 결과는 Fig. 15에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 자탄과 항력리본을 회전시킨 경우 초기에는 항력리본이 원심력에 의해 회전축과 수직인 방향으로 거동하면서 후류 방향으로 전개되는 경향을 보인다. 그러나 완전 전개되

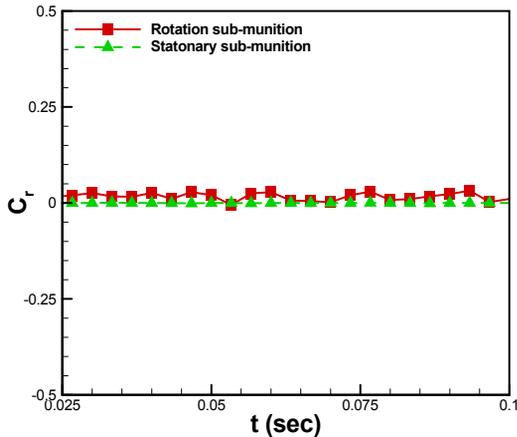


Fig. 16 Rolling moment coefficient of the folded ribbon configuration in a rotation motion ($\omega=29$ rps, $V=50$ m/sec)

기 전에 동체 후류에서의 흐름 박리 등에 의해 다시 동체에 부착되는 경향을 보임을 볼 수 있었다. 이러한 현상이 발생된 이유는 천의 두께가 얇아 작은 관성력에 의해 리본이 충분히 전개되지 못하면서 흐름의 박리에 의한 낮은 압력으로 인해 리본이 다시 동체 쪽으로 끌려온 것으로 판단된다.

자탄이 고정된 경우와 자탄 회전시 동체와 리본의 롤링모멘트 계수의 차이를 Fig. 16에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 자탄 회전시 롤링모멘트 계수가 전반적으로 약간 증가하는 경향을 보였다. 이는 리본의 회전에 따른 공기 저항력이 상대적으로 커 발생된 것으로 판단된다. 추후 보다 그러나 보다 정확한 거동에 따른 항력리본 자탄 거동해석을 위해서는 리본 천의 구조적 물성치 및 제조 조건 등의 적절한 모사와 풍동 시험 등을 통한 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 연구계획

항력리본이 장착된 자탄의 성능 극대화 및 효율적인 운용을 위한 리본의 초기 전개과정 분석과 자탄의 최적 형상설계 및 확산모델 예측에 필요한 기본적인 공력자료를 제공하기 위해 아음속 흐름 영역에서의 구조연계 비정상 유동장을 해석하였다. 이를 위해 XFLOW를 사용하여 유체-구조연계 해석을 수행하여 리본 형상의 초기 전개과정 및 자탄 주위의 공기역학적 현상 해석 연구를 수행하였다. 그 결과 항력리본의

전개는 자탄 주위의 흐름에 큰 영향을 받음을 확인 할 수 있었다. 또한, 자탄 동체에서 발생되는 박리흐름이 항력리본의 전개에 매우 부정적인 영향을 끼침을 알 수 있었다. 자탄 동체와 항력리본의 롤링모멘트는 차이는 받음각이 증가할수록 증가하며 회전을 주는 경우 정지된 경우보다 증가함을 알 수 있었다. 그러나 항력리본의 정확한 공기력 추출 및 형상변화에 따른 전개과정을 수치적으로 해석하기 위해서는 천의 종횡비 등의 형상 변화와, 실제 천의 투과율, 표면거칠기 등의 구조적 물성치 및 제조 조건 등의 적절한 모사 등에 대한 영향을 풍동시험과 병행 연구하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] <http://maic.jmu.edu/journal/10.2/focus/resslerwise/resslerwise.htm>
- [2] 2008, "Clearance of Cluster Munitions based on Experience in Lebanon," TNMA 09.30/60.
- [3] "MLRS 로켓탄은 표적까지 어떻게 비행하여 작동되는가?," http://dapa.go.kr/open_content/images/atg/pdf/006/6-5.pdf
- [4] Sub-munitions and cluster bomblets - Render Safe Procedures (RSP), GICHD Advisory Note, Ver.1.
- [5] 2009, 원영수, "Meshless CFD S/W를 이용한 터보기계 CFD 해석," *유체기계저널*, 제12권 제 3호.
- [6] 2009, XFLOW CFD, Next Limit Technology.
- [7] 2009, 정노택, "Lattice-Boltzmann Method를 이용한 기체-액체 상분리 시뮬레이션," *한국해양환경공학회지*, Vol.12, No.3.
- [8] 1998, Chen, S. and Doolen, G. D., "Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows," *Annu. Rev. Fluid Mech.*
- [9] 2010, XFLOW User's Guide, Next Limit Technology.
- [10] 1965, Hoerner, S. F., "Fluid-Dynamic Drag, Hoerner Fluid Dynamics".
- [11] 1984, Gere, J. M. and Timosenko, S. P., *Mechanics of Materials*, 2nd Ed., Brooks/Cple Engineering Division.
- [12] "Fabric Structure, Properties and Testing," <http://textilefabric.yolasite.com/resources>
- [13] 2004, Khondker, O. A., Inoda, F., M., Nakai, A., and Hamada, H., "Fabrication and Mechanical Properties of Aramid/Nylon Plain Knitted Composites," *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*.