

상호 작용 계수를 이용한 측추력 제트와 초음속 자유류 상호 작용에 관한 연구

Analysis of the Interaction Between Side Jet and Supersonic Free Stream Using K-factor

김민규* 이광섭*
Min-Gyu Kim Kwang-Seop Lee

Abstract

The side jet effects between jet flow and free-stream on a missile body were investigated by experimentally and numerically for modeling aerodynamic coefficients in pitch plane. K-factors for normal force and pitching moment were introduced to estimate the side jet effects. The main parameters of the jet interaction phenomena were angle of attack, jet pressure ratio, Mach number and jet bank angle. The K-factors for normal force coefficient and pitching moment coefficients in pitch plane were analysed.

Keywords : Side Jet, Missile Body, Wind Tunnel Test, CFD(Computational Fluid Dynamics), K factor

1. 서론

유도탄을 제어하는 수단으로 측추력 제트를 사용하는 경우가 있다. 공력에 의한 기동력보다 큰 기동을 원하는 경우나 혹은 밀도가 낮은 고 고도 영역에서 공력이 기능을 발휘하지 못하는 경우에는 측추력 제어가 유도탄의 기동성을 확보하는 유력한 대안이다. 무게 중심의 앞이나 뒤쪽에서 측방향 제트류를 발생 시켜서 모멘트를 이용하거나, 무게 중심점에서 옆방향 제트류로서 제어력을 발생시키는 측추력 유도탄 제어 기법은, 동압이 작은 경우에 매우 유용한 방법이나 측

추력 유동과 유도탄의 비행에 의한 초음속 대기 흐름 간의 상호 작용 현상을 유발시킨다^[1]. 상호 작용 현상은 유도탄의 비행 속도, 자세 및 고도와 측추력 제트의 분사 압력과 위치 등에 따른 매우 복잡한 현상이며 상호 작용의 결과로 측추력에 의해 얻어진 모멘트 또는 제어력이 증가, 감소할 수 있기에 측추력에 의한 제어 시에 반드시 연구되어야 하고 공력계수 모델링에 반영되어야 한다^[2,3].

2. 측추력 상호 간섭 현상

가. 측추력 간섭 현상

측추력 제트와 초음속 대기 흐름의 상호 작용은 대략 세 가지 효과로 분석할 수 있다^[3]. 첫 번째는 충격

† 2011년 12월 1일 접수~2012년 1월 27일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김민규(mgkim@add.re.kr)

과 효과이다. 측추력 제트 분사에 의해 분사 노즐 주변에서 발생하는 충격파와 충격파, 경계층 사이의 상호 작용 그리고 재압축 충격파의 형태 및 측추력 제트 전방의 압력 변화를 Fig. 1a 및 Fig. 1b에 각각 도시하였다. 충격과 효과는 제트 전방의 압력을 상승시킨다. 두 번째로 측추력 제트가 일종의 블록처럼 작용하여 측추력 제트 바로 뒤에서 압력 하강을 유발시키는 블록 효과이다. 블록 효과가 넓게 나타날 때는 동체 후방에서 동체 와류가 변형된다. 세 번째는 휘어짐 효과이다. 이는 측추력 제트가, 특히 바람이 불어오는 방향(windward)으로 분사될 경우, 외부 대기와의 간섭으로 인하여 유도탄 후방으로 되돌아와서 동체에 미치는 영향이다.

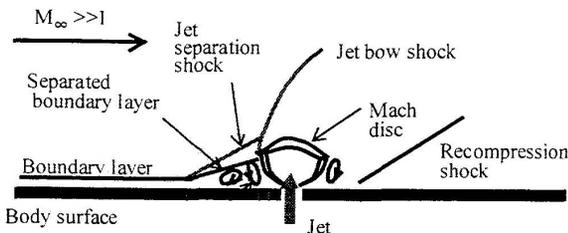


Fig. 1a. 측추력과 초음속 흐름의 상호 작용 개략도^[3]

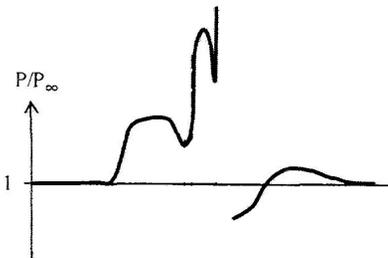


Fig. 1b. 측추력 중심선을 따르는 압력 분포도^[3]

측추력 유동과 초음속 대기 흐름의 상호 작용에 영향을 미치는 변수를 생각해보면, 먼저 측추력 자체에 의한 영향을 고려할 수 있다. 측추력 제트의 마하 수, 측추력 제트의 위치, 측추력 제트의 노즐 출구 압력, 측추력 제트의 온도에 의한 영향과 동시 점화 개수 등이다. 외부 대기의 변수로는 유도탄의 뱅크각, 마하 수, 받음각, 조종 날개 변위각 그리고 고도 등을 고려할 수 있다.

이런 변수를 바탕으로 하는 측추력과 외부 대기의 상호 작용에 대한 연구는 1960년대 실험을 통한 상관관계(correlation) 해석부터 시작하여^[4], 전산유체역학의

발전에 따라 실험적 결과에 해석적인 방법을 보완하여 마하 수의 영향, 받음각 및 제트 압력의 영향 등에 대하여 활발히 수행되고 있다^[3-10]. 최근에는 동체 효과와 조종 날개 효과를 구분하여 해석하기도 하고^[7], 제트에 의한 후방 와류 흐름 영향^[8], 제트와 외부 대기의 화학적 반응에 의한 영향^[9], 및 뜨거운 제트 흐름에 따른 영향^[10]까지도 고려하여 상호 작용 현상에 대한 연구의 깊이를 더하고 있다. 그러나 상호 작용에 영향을 미치는 제트의 위치에 관한 연구는 바람이 불어가는(leeward) 방향과 바람이 불어오는(windward) 방향으로 한정되어 있으며, 분사된 제트가 후방 동체에 미치는 영향 및 조종 날개와의 간섭 연구도 계속 진행 중인 영역이다.

본 연구에서는 복잡한 측추력 현상을 동체만의 현상에 대하여 단순화하고 측추력 제트 값을 고정하여 측추력 자체에 의한 영향보다 외부 대기의 변화에 초점을 맞추어 분석하였다. 분석 변수로 외부 대기의 마하 수, 받음각과 고도 및 측추력 제트 뱅크각의 네 가지 변수를 사용하였다. 동체와 조종 날개가 있는 현상에 대한 분석과 측추력 자체의 특성에 따른 분석은 차후에 계속 진행될 예정이다.

나. 상호 작용 계수

고도에 의한 효과를 분석하기 위해 제트 압력비율 식 (1)과 같이 정의하였다. 이는 측추력과 고도의 효과를 살펴볼 수 있는 장점이 있다. 고도에 따라 대기의 압력은 감소하기 때문에, 제트 압력비(PR)는 커지게 된다.

$$PR = \frac{P_{jet}}{P_{\infty}} \tag{1}$$

측추력 상호 작용 분석은 공력 계수뿐만 아니라 측추력과의 상대 변화도 중요하기 때문에, 힘에 대하여 식 (2)와 같은 힘 상호 작용 계수(K_{Normal} factor)를 정의하고, 모멘트에 대하여는 식 (3)과 같은 모멘트 상호 작용 계수(K_{Moment} factor)을 도입하였다. 상호 작용 계수는 제트 뱅크각을 고려하여 벡터로 정의되어, 힘과 방향을 모두 나타낸다.

$$K_{Normal} = \frac{C_{N_{Jet}} + \frac{T_{Jet}}{Q \cdot S} - C_{N_{withoutJet}}}{\frac{T_{Jet}}{Q \cdot S}} \tag{2}$$

$$K_{Moment} = \frac{C_{M_{jet}} + \frac{T_{jet}}{Q \cdot S} \frac{L_{jet}}{L_{ref}} - C_{M_{without, jet}}}{\frac{T_{jet}}{Q \cdot S} \frac{L_{jet}}{L_{ref}}} \quad (3)$$

여기서 T_{jet} 는 측추력에 의해 발생하는 정적 하중이다. $C_{N_{jet}}$ 는 제트 분사 후의 힘 공력 계수를, $C_{N_{without, jet}}$ 은 제트 분사 이전의 힘 공력 계수를 나타낸다. Q 는 해당 고도에서의 동압을 의미하고, S 는 기준 면적을 나타내며, L_{jet} 는 무게 중심에서 제트 분사 위치까지의 길이, L_{ref} 는 기준 길이이다. 상호 작용 계수가 1 보다 크면 측추력의 추력보다 더 큰 힘이 발생되고 계수가 1보다 작으면 측추력의 추력보다 더 작은 추력이 발생되며, 상호 작용 계수가 1이면 상호 작용이 없다^[11]. 상호작용 계수가 음수이면 측추력 방향과 반대방향의 추력발생을 의미한다.

본 연구에서는 풍동 실험으로 획득된 상호 작용 계수를 바탕으로 추가 분석이 필요한 경우에 대하여 전산유체역학 수행하였다. 해석 결과 분석을 통하여 상호 작용에 대한 물리적인 이해와 풍동 실험의 타당성을 검토하였다. 여섯 개의 힘 상호 작용 계수 중, 측추력 상호 작용에 영향이 큰 수직력(K_z)과 피칭 모멘트 상호 작용 계수(K_M)에 대해서만 분석을 수행하였다.

3. 측추력 상호 작용 현상 분석

가. 풍동 시험

측추력 제트와 초음속 대기 유동의 상호 작용에 대한 실험은 프랑스 오네라 풍동시설을 사용하여 이차에 걸쳐서 수행되었다. 주요 변수로 마하 수, 뱅크각, 제트 압력비, 동시 점화 제트 개수, 받음각과 제트 뱅크각 및 꼬리 날개의 변위 등이다^[12,13]. 동체만의 형상과 동체 및 조종 날개 형상에 대한 실험을 수행하였으며 본 연구에서는 동체만의 형상에 대한 결과를 사용하였다. Fig. 2는 풍동 실험에서 촬영된 솔리렌 영상으로 외부 충격파의 형상 및 측추력 제트 분사에 의한 노즐 주변의 복잡한 현상들이 Fig. 1a의 개략도와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

나. 전산 유체 역학 기법

본 연구에서 사용된 전산유체역학 기법은, 지배방정식으로 3차원 RANS 방정식을 사용하고, 비점성 플러

스의 계산을 위하여 Jameson 타입의 인공 점성항을 이용하여 중심차분법을 적용하였다. 그리고 수렴 가속화를 위하여 D/ADI(Diagonalized ADI) 기법과 국소 시간 전진 기법(local time stepping) 기법을 적용하였다. 난류 모델로는 압축성 효과가 고려된 Spalart-Allmaras의 1 방정식 난류 모델을 사용하였으며 제트 상호 작용 해석에 기 적용되어 검증되었다^[14].

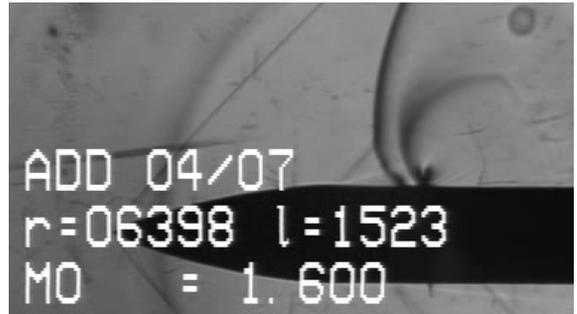


Fig. 2. ONERA 풍동 실험 솔리렌 영상

다. 받음각에 따른 상호 작용 현상 분석

Fig. 3에는 측추력 상호 작용 계수의 받음각에 대한 변화를 각 마하수에 대하여 도시하였다. Fig. 3에서 실선과 점선은 각각 제트 뱅크각 0도와 180도인 경우이다. 제트 뱅크각 0도(leeward)는 바람이 불어가는 방향 즉, 유도탄이 유동을 등지는 위치이고, 제트 뱅크각 180도(windward)는 바람이 불어오는 방향 즉, 유도탄이 유동에 맞이하는 방향이다.

수직력 상호 작용 계수는 받음각 5도까지는 제트 뱅크각과 무관하게 상호 작용 계수의 변화가 거의 없으나, 받음각 5도 이후부터는 차이가 발생하며 마하수가 증가할수록 그 차이는 크게 나타난다. 특히 제트 뱅크각 180도 방향 측추력의 경우 마하 수가 높아지게 되면, 수직력 상호 작용 계수가 음수로 변하게 된다. 이는 측추력 제트 사용 시 원했던 방향과 반대 방향으로 유도탄이 힘을 받게 되는 것을 의미하므로, 실제 측추력 제트 사용 시의 유의 영역에 해당한다.

피칭 모멘트 상호 작용 계수는 받음각 5도 이내에서는 수직력 상호 작용 계수 경향과 유사하다. 그러나 받음각이 5도와 18도 영역에서 제트 뱅크각 180도 방향 측추력의 경우 급격한 증가를 나타낸 후 감소한다. 제트 뱅크각 0도 측추력은 받음각 증가에 따라서 꾸준히 증가하는 경향을 보여준다. 피칭 모멘트 상호 작용에서 모멘트 기준점이 동체의 중앙에 위치한다. 따

라서 충격파에 의한 압력 상승 영역은 모멘트 길이가 길게 되고 블록 효과가 발생하는 영역은 모멘트 중심에 근접하여 모멘트 길이가 짧게 된다. 그러므로 수직력 상호 작용 계수에서 보다 피칭 모멘트 상호 계수에서 충격파 효과가 더 유효하게 된다.

바람이 불어가는 방향으로는 충격과 효과가 블록 효과보다 크기 때문에 피칭 모멘트 상호 작용 계수는 1보다 큰 값을 가진다. 바람이 불어오는 방향으로는 받음각에 따라 블록 효과의 영향이 달라지는데, 고 받음각에서는 감소하는 효과를 발생시킨다. 받음각 5도에

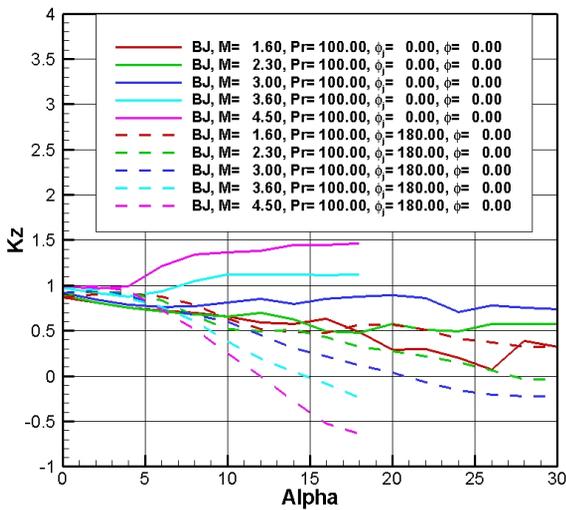


Fig. 3a. 수직력 상호 작용 계수(받음각)

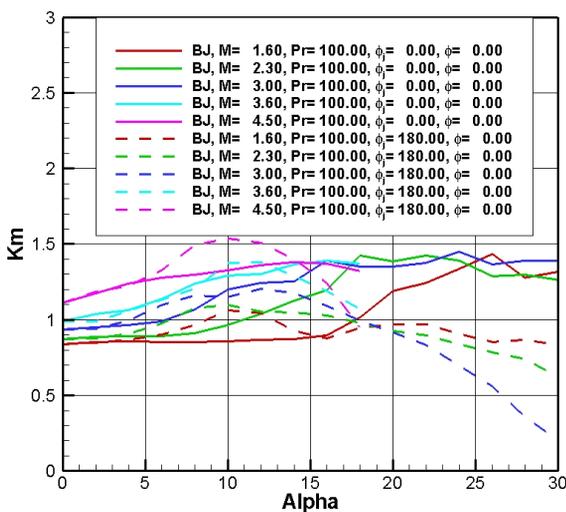


Fig. 3b. 피칭 모멘트 상호 작용 계수(받음각)

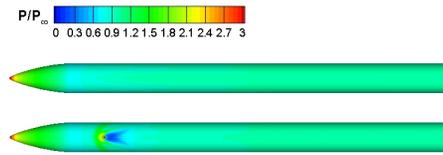


Fig. 4a. 측추력 제트 분사 전/후 표면 압력 분포

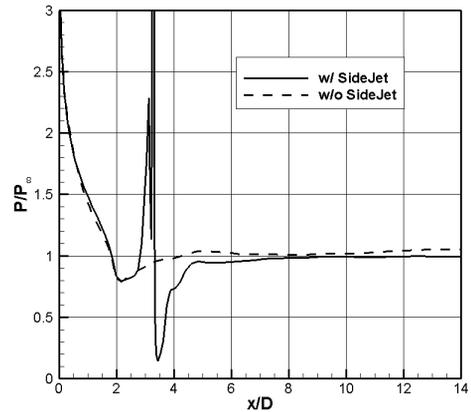


Fig. 4b. 측추력 제트 분사 전/후 중심선 압력 분포(마하 수 1.6, 받음각 10도, 제트 뱅크각 0도)

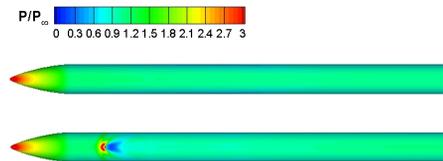


Fig. 5a. 측추력 제트 분사 전/후 표면 압력 분포

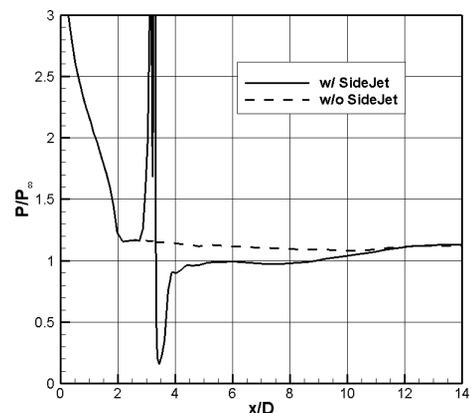


Fig. 5b. 측추력 제트 분사 전/후 중심선 압력 분포(마하 수 1.6, 받음각 10도, 제트 뱅크각 180도)

서 받음각 18도 영역까지 발생하는 피칭 모멘트 상호 작용 계수의 상승은 블록 효과가 모멘트 기준점 이상으로 동체 후방까지 길게 나타나서 발생하는 현상으로 판단되며, 전산유체역학 해석을 통하여 유동 특성을 파악하여 이에 대한 규명을 하였다.

Fig. 4와 Fig. 5에는 피칭 모멘트 상호작용 계수가 커지는 영역 중, 마하 수는 1.6이고 받음각은 10도인 경우에 대한 전산 해석 결과를 제시하였다. Fig. 4a와 Fig. 5a는 각각 제트 뱅크각 0도와 제트 뱅크각 18도로, 측추력 제트 분사 전, 후의 표면 압력 분포를 제시하였고, Fig. 4b와 Fig. 5b에는 측추력 노즐 중앙을 지나 중심축을 따르는 중심선에 대한 측추력 분사 전, 후의 압력 분포를 제시하였다. 점선은 제트 분사 전의 압력 분포이고, 실선은 제트 분사 후의 압력 분포이다. 충격파 효과는 노즐 앞부분의 압력 차에 해당하고, 블록 효과는 노즐 뒤로의 압력 차에 해당한다. Fig. 4b와 Fig. 5b를 비교하면, 충격파에 의한 압력 상승 효과는 큰 차이를 보이지 않으나, 블록 효과에 의한 압력 하강은, 제트 뱅크각 180도의 경우 동체 축을 따라 후방까지 길게 나타난다. 이로 인해 피칭 모멘트 상호 작용이 증가하게 된다. 받음각 5도에서 18도의 영역에서 Fig 5와 같이 블록 효과가 동체 후방까지 발생하여 피칭 모멘트 상호 작용 계수가 상승하는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에는 마하 수 2.3에 받음각이 30도이며 제트 뱅크각이 0도인 경우와, 180도인 경우에 대한 측추력 분사 전, 후의 표면 압력 분포와 중심선을 따르는 압력 분포를 나타내었다. 제트 뱅크각이 0도인 경우는 상호 작용 자체가 크지 않으며, 블록 효과에 의한 압력 하강도 작다. 따라서 수직력 상호 작용 계수는 1 에서 큰 변화를 보이지 않게 되나 압력 하강 영역이 후방까지 길게 나타나서, 피칭 모멘트 상호 작용 계수는 1 보다 커지게 된다.

마하 수의 증가에 따라 충격파 효과가 크게 나타나면 수직력 상호 작용 계수는 1 보다 커지게 되며, 이에 따른 피칭 모멘트 상호 작용 계수도 커지게 되는 것을 유추할 수 있다. Fig. 7의 제트 뱅크각 180도의 경우에는 충격파 효과보다 블록 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 압력 하강 영역이 동체 후방까지는 미치지 못하는 것도 알 수 있다. 이에 따라 수직력 상호 작용 계수도 작아지고 피칭 모멘트 상호 작용 계수도 점차 작아지는 경향으로 나타나게 되는 것을 확인할 수 있다.

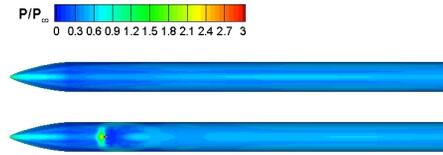


Fig. 6a. 측추력 제트 분사 전/후 표면 압력 분포

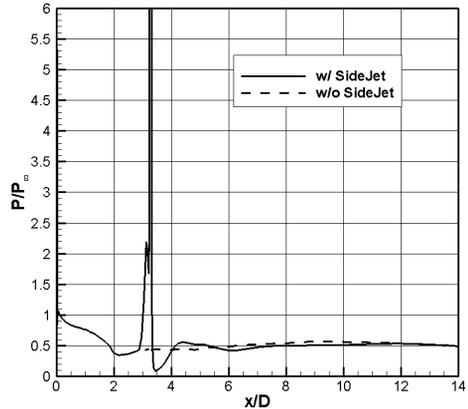


Fig. 6b. 측추력 제트 분사 전/후 중심선 압력 분포(마하 수 2.3, 받음각 30도, 제트 뱅크각 0도)

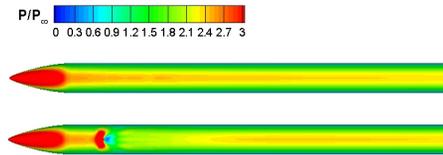


Fig. 7a. 측추력 제트 분사 전/후 표면 압력 분포

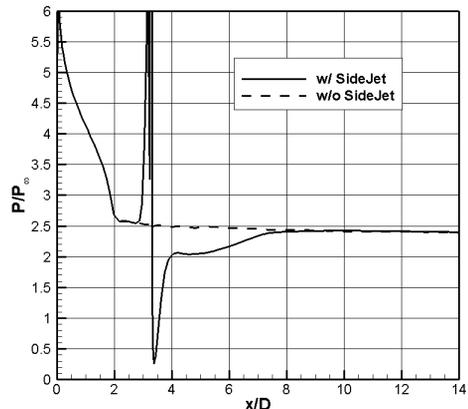


Fig. 7b. 측추력 제트 분사 전/후 중심선 압력 분포(마하 수 2.3, 받음각 30도, 제트 뱅크각 180도)

라. 마하 수에 따른 상호 작용 현상 분석

받음각에 따른 상호 작용 현상 분석에서 기 살펴본 내용을 마하 수 중심으로 살펴보고자 한다. Fig. 3과 동일한 내용을 마하 수에 대한 변화로 Fig. 8에 제시하였다.

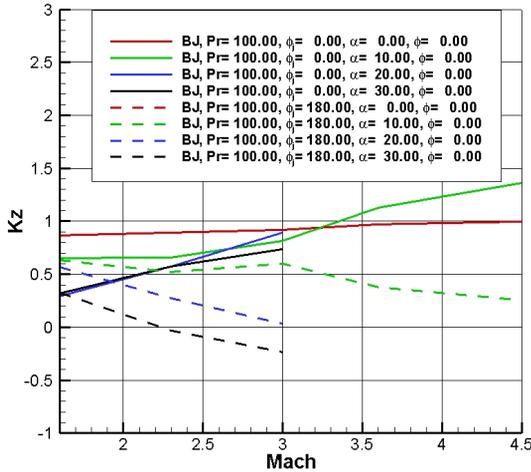


Fig. 8a. 수직력 상호 작용 계수(마하 수)

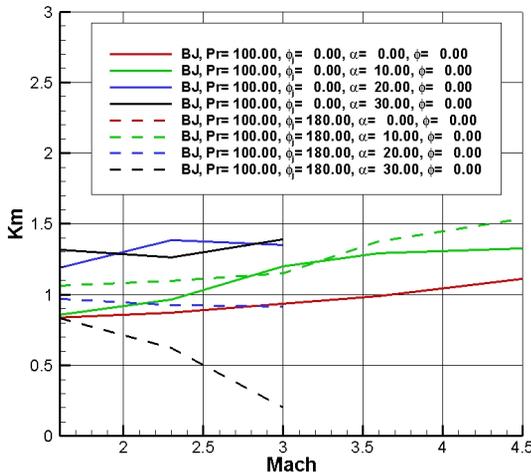


Fig. 8b. 피칭 모멘트 상호 작용 계수(마하 수)

수직력 상호 작용 계수는 받음각 0도에서는 1에 가까운 값으로 약간씩 증가하는 현상을 보이며, 받음각 10도 이상의 경우에서는 제트 뱅크각 0도인 경우는 증가, 제트 뱅크각 180도인 경우는 감소하는 현상을 보인다. 이런 경향은 받음각이 증가함에 따라 더 커지게 된다. 제트 뱅크각 180도의 경우, 받음각 20도에서

는 마하 수 3.0을, 받음각 30도에서는 마하 수 2.3을 넘게 되면 수직력 상호 작용 계수가 0보다 작아지게 되는 영역으로 진입한다.

피칭 모멘트 상호 작용 계수는 받음각 0도에서 약간씩 증가하며, 받음각 10도에 대해서도 증가하는 현상을 보인다. 받음각 20도 이상에 대해서는 수직력 상호 작용 계수와 유사하게 제트 뱅크각 0도의 경우는 증가, 제트 뱅크각 180도의 경우는 감소하는 경향을 보인다. 특히 받음각 30도의 경우는 추세로 보아, 마하 수 3.5 이전에 음의 값을 갖게 될 것으로 예측되며 해당 영역은 수직력 상호 작용 계수와 피칭 모멘트 상호 작용 계수가 모두 음의 값을 가지게 되어, 측추력에 의한 효과가 측추력의 추력을 이기고 완전히 반대 방향으로 발생하는 영역으로 판단된다.

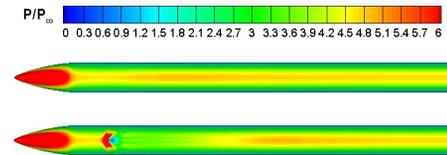


Fig. 9a. 측추력 제트 분사 전/후 표면 압력 분포

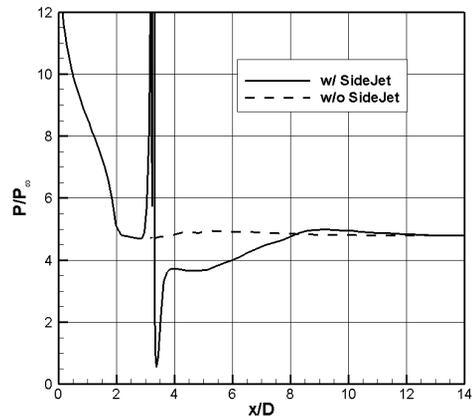


Fig. 9b. 측추력 제트 분사 전/후 중심선 압력 분포(마하 수 3.6, 받음각 30도, 제트 뱅크각 180도)

수직력 상호 작용 계수와 피칭 모멘트 상호 작용 계수가 모두 음수가 되는 영역에 대한 전산유체역학 해석을 통하여 해당 영역의 간섭 현상 특징을 파악하였다. Fig. 9에는 마하 수 3.6, 받음각 30도, 제트 뱅크각 180도인 경우의 해석 결과를 제시하였다. 기 결과들과 달리 동체 후방의 압력이 측추력 제트 분사 이

전보다 높아진 것을 알 수 있다. 이는 측추력 간섭 현상의 세 번째 효과로, 측추력 제트 유동이 휘어져서 후방 동체에 직접 부딪히는 것을 의미한다. 따라서 후방 동체의 압력 분포도 피칭 모멘트 상호 작용을 감소시키는 방향으로 작용하게 되어 피칭 모멘트 상호 작용 계수가 작아진다.

마. 제트 압력비에 따른 상호 작용 현상 분석

제트 압력비에 대한 마하 수 별, 상호 작용 계수를 Fig. 10에 도시하였다. 수직력 상호 작용 계수와 피칭 모멘트 상호 계수는 제트 압력비 100 미만에 대하여 약간의 변화를 보이나, 그 이상에 대하여 매우 유사한 결과를 보여 줌을 알 수 있다.

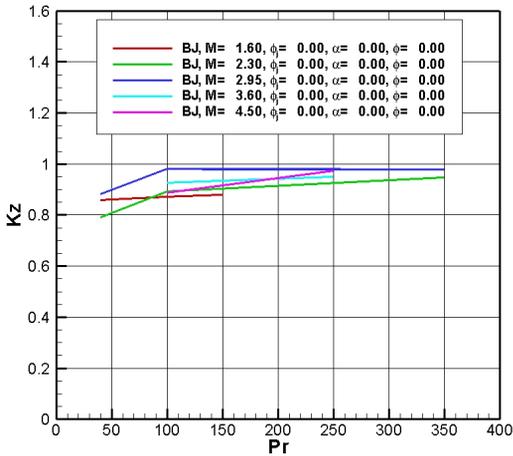


Fig. 10a. 수직력 상호 작용 계수(제트 압력비)

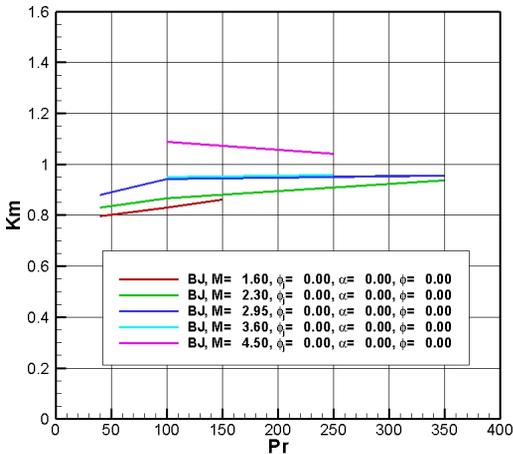


Fig. 10b. 피칭 모멘트 상호 작용 계수(제트 압력비)

마하 수 2.3에 대하여 제트 뱅크각 0도와 180도에서 받음각 별로의 상호 작용 계수를 Fig. 11에 제시하였다. 수직력 상호 작용 계수는 0도 받음각에서는 1 근처의 비교적 균일한 값을 유지한다. 나머지 받음각에 대해서는 압력비에 따라 증가하는 경향을 보인다.

피칭 모멘트 상호 작용 계수도 0도 받음각에서는 1에 근접한 값을 유지한다. 그러나 제트 뱅크각 0도의 경우는 큰 차이를 보이지 않고 일정하게 유지되나, 제트 뱅크각 180도의 경우는 증가한다.

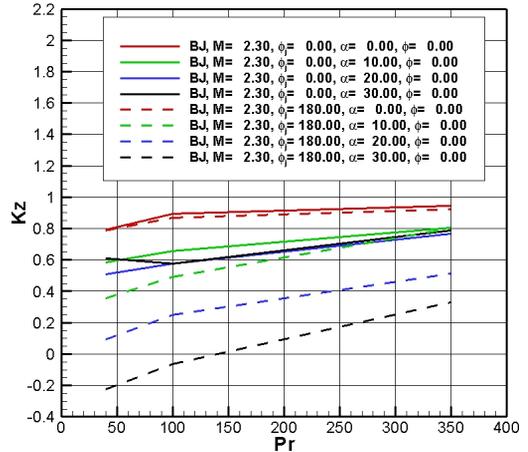


Fig. 11a. 수직력 상호 작용 계수(제트 압력비)

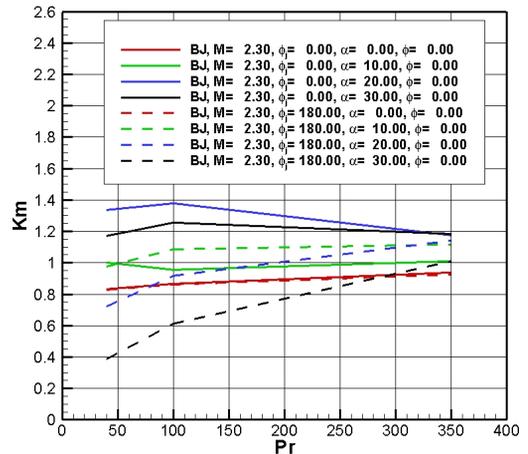


Fig. 11b. 피칭 모멘트 상호 작용 계수(제트 압력비)

바. 제트 위치에 따른 상호 작용 현상 분석

제트 위치에 따른 측추력 상호 작용을 분석하기 위해, 마하 수 2.3, 제트 압력비 100에 대하여 받음각 별

제트 뱅크각에 따른 상호 작용 계수를 Fig. 12에 제시하였다.

받음각 0도에서는 제트 뱅크각에 대하여 동일한 결과를 보여준다. 기 분석은 제트 뱅크각이 0도인 경우와 180도인 경우 위주로 수행하였으므로, 그 외의 제트 뱅크각을 살펴보면, 받음각 10도에서는 제트 뱅크각 67.5도 부근에서 수직력 상호 작용 계수가 커지게 되고, 90도에서는 감소하고, 180도에서는 더 감소한다. 20도 이상의 받음각에서는 제트 뱅크각 90도 부근에서 제일 큰 수직력 상호 작용 계수 값을 가지게 된다.

피칭 모멘트 상호 작용 계수에서는 수직력 상호 작용 계수가 크게 나타난 받음각 10도에 제트 뱅크각 67.5도 부근에서 오히려 값이 작아지고 받음각 20도에 제트 뱅크각 67.5에서 큰 값을 가진다.

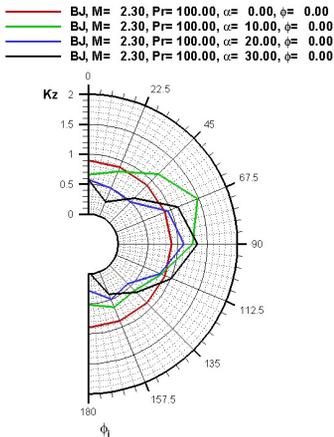


Fig. 12a. 수직력 상호 작용 계수(제트 뱅크각)

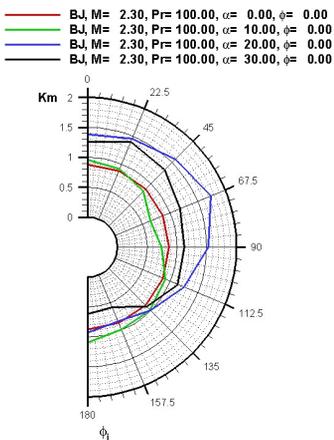


Fig. 12b. 피칭 모멘트 상호 작용 계수(제트 뱅크각)

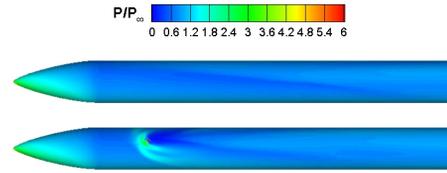


Fig. 13a. 측추력 제트 분사 전/후 표면 압력 분포

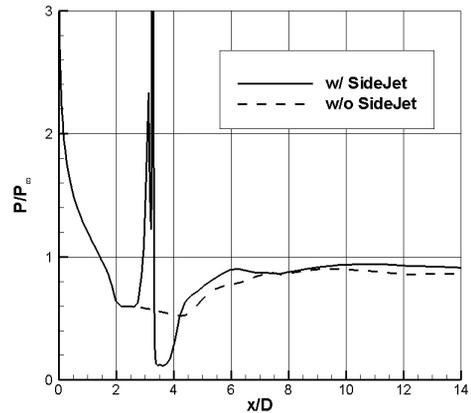


Fig. 13b. 측추력 제트 분사 전/후 중심선 압력 분포(마하 수 2.3, 받음각 10도, 제트 뱅크각 67.5도)

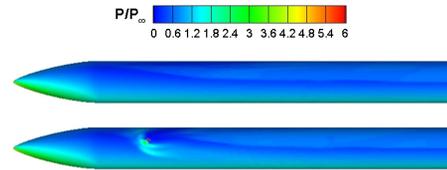


Fig. 14a 측추력 제트 분사 전/후 표면 압력 분포

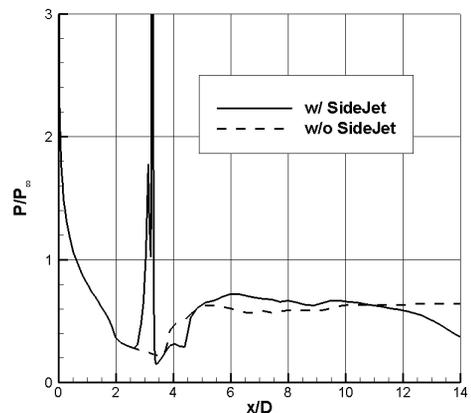


Fig. 14b. 측추력 제트 분사 전/후 중심선 압력 분포(마하 수 2.3, 받음각 20도, 제트 뱅크각 67.5도)

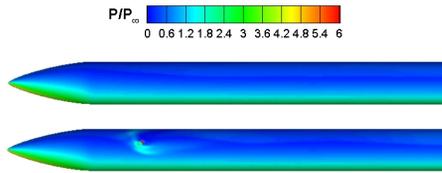


Fig. 15a. 측추력 제트 분사 전/후 표면 압력 분포

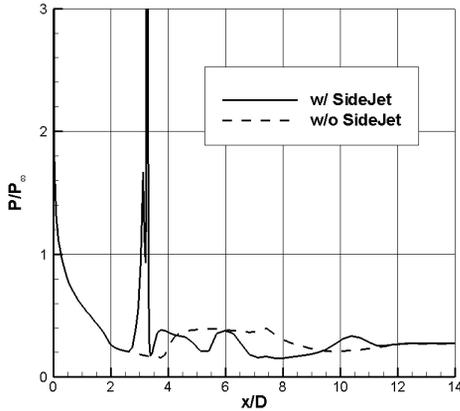


Fig. 15b. 측추력 제트 분사 전/후 중심선 압력 분포(마하 수 2.3, 받음각 30도, 제트 뱅크각 67.5도)

전산유체역학 해석을 통해 이에 대한 유동의 구체적인 흐름 변화를 살펴보았다. Fig. 13부터 Fig. 15까지 마하 수 2.3, 제트 뱅크각 67.5도에 대한 받음각 10도에서 30도까지의 해석 결과를 제시하였다. 해석 결과로부터 제트 뱅크각 67.5도의 경우도 제트 뱅크각 0도나 제트 뱅크각 180도의 경우와 유사하게 측추력 제트 전방으로는 충격파 효과에 의한 압력 증가와 후방으로 블록 효과에 의한 압력 하강이 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 유도탄 최후방 영역에서 차이가 발생하는데, 외부 유동이 유도탄 동체를 감아 둔 후, 동체 와류를 형성하는 과정에서 측추력 제트의 영향을 받는 것으로 판단된다.

유도탄 최후방에서 Fig. 13의 받음각 10도 결과에서는 측추력 제트 분사 후 압력이 증가하였고, Fig. 14의 받음각 20도 결과에서는 오히려 감소하였으며, Fig. 15의 받음각 30도 결과에서는 변화가 없는 것으로 해석되었다. 이에 따라 받음각 10도에서는 후방 압력 증가로 인하여 수직력 상호 작용 계수는 증가하고 피칭 모멘트 상호 작용 계수는 감소하고, 받음각 20도에서는 후방 압력 감소로 인하여 수직력 상호 작용 계수는 감소하고, 피칭 모멘트 상호 작용 계수는 증가한다. 받음

각 30도에서는 최후방 압력 변화가 거의 없으므로 수직력 상호 작용 계수도 1 근처의 값을 갖고, 피칭 모멘트 상호 작용 계수도 1 근처의 값을 유지하게 된다.

4 결론

본 연구에서는 측추력과 초음속 대기 흐름의 상호 작용 현상 분석을 위해 풍동 실험과 전산유체역학 기법에 의한 해석을 사용하였다. 풍동 실험 결과를 통해 측추력 상호 간섭 현상의 특징을 확인하였으며, 전산유체역학 해석을 통해 구체적인 간섭 효과를 실증하였다. 상호 작용 현상은 매우 복잡한 현상으로 이를 분석하기 위해 상호 작용 계수를 도입하였으며, 분석을 위한 변수로 대기 유동의 마하 수, 유도탄의 받음각, 고도에 해당하는 압력비 및 측추력 제트의 위치에 해당하는 제트 뱅크각 등을 고려하였다.

받음각에 따라 수직력 상호 작용 계수는 약 5도까지 변화가 없고, 그 이후 제트 뱅크각에 따라 증가 또는 감소한다. 피칭 모멘트 상호 작용 계수도 받음각 5도까지 제트 뱅크각에 따른 변화가 미약하나 이후, 바람이 불어오는 방향으로 급격한 증가가 발생한다. 이는 블록 효과가 동체 후방까지 영향을 주기 때문이다. 마하 수에 따른 상호 작용 계수는 받음각 0도에서는 변화가 거의 없으나, 받음각이 증가하면 바람이 불어오는 방향은 하강, 바람이 불어가는 방향은 상승한다. 제트 압력비에 따른 상호 작용 계수는 마하 수에 따라 크게 변하지 않으나, 받음각에 따라 제트 압력비 100을 넘으면 증가하는 경향을 보인다. 제트 뱅크각의 변화에 따른 상호 작용 계수는 받음각에 따라 특정 제트 뱅크각에서 커지거나 작아지며, 이는 측추력 상호 작용이 동체 후방 와류에 영향을 미치기 때문이다.

상호 작용 현상은 각 변수의 조합에 따라 매우 다양한 결과를 보여주며 동체와 조종 날개 형상에 대한 연구가 계속될 예정이다.

References

- [1] 오승민, 홍승규, “로켓의 공기역학적 형상 설계 고찰”, Physics and High Technology 제7권, 제5호, 1998.
- [2] S. K. Hong, J. Bardina, C. K. Lombard, D. Wang,

- and W. Coddling, "A Matrix of 3-D Turbulent CFD Solutions for JI Control with Interacting Lateral and Attitude Thrusters", AIAA Paper 91-2099, 1991.
- [3] M. Kurita, T. Inoue, and Y. Nakamura, "Aerodynamic Interaction due to Side Jet from a Blunted Cone in Hypersonic Flow", AIAA Paper 2000-4518, 2000.
- [4] W. T. Strike and C. J. Schueler, "Investigation of Interference Effects Produced by Lateral Jets on Surfaces in a Supersonic Stream", AIAA 63-184, LA, California, 1963.
- [5] B. Srivastava, "Computational Analysis and Validation for Lateral Jet Controlled Missiles", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 34, No. 5, 1997.
- [6] P. Gnemmi, R. Adeli and J. Longo, "Computational Comparisons fo the Interaction of a Lateral Jet on a Supersonic Generic Missile", AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, 2008.
- [7] M. Graham, P. Weinacht and Julius Brandeis, "Numerical Investigation of Supersonic Jet Interaction for Finned Bodies", Jornal of Spacecraft and Rockets, Vol. 39, No. 3, 2002.
- [8] B.-Y. Min, J.-W. Lee, and Y.-H. Byun, "Investigation of the Shock Interaction Effect on the Lateral Jet Controlled Missile", 21st Applied Aerodynamics Conference, Orlando, Florida, 2003.
- [9] H. B. Ebrahimi, "Numerical Invesitagion of Jet Interaction in a Supersonic Freestream", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 45, No. 1, 2008.
- [10] B. Stahl, F. Siebe, and A. Gulhan, "Hot-Gas Side Jet in a Supersonic Freestream", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 47, No. 6, 2010.
- [11] S. K. Hong, C. S. Ahn, and W. J. Sung, "Aerodynamic Modeling of Side Jet Influence on Body-Tail Configuration", Computational Fluid Dynamics Journal, Vol. 13, No. 4, pp. 630~636, 2005.
- [12] 홍승규, 안창수, 선철, 성용제, "측추력 풍동시험", 국방과학연구소 보고서 MADC-616-031425, 2003.
- [13] 김민규, 이광섭, "측추력 및 고양각 풍동 시험", 국방과학연구소 보고서 ADDR-161-111915, 2011.
- [14] 허기훈, 홍승규, 안창수, J. Seidel, "Cavity가 있는 평판에서의 제트의 영향", 2005년 한국군사과학 기술학회 종합학술대회, 서울, 2005.