수중램제트 추진의 성능특성에 관한 연구

김유택[1] · 이영호[2]

A Study on Performance Characteristics of Underwater Ram-Jet Propulsion

You-Taek Kim · Young-Ho Lee

Abstract

Underwater ram jet is a powerful alternative to the conventional propulsion systems and is adequate to super-speed crafts in the future. This ram-jet having no moving parts in the water phase consists of a simple contoured duct. Many formulations and assumptions based upon thermo-fluid dynamics, continuity equation, Euler and Rayleigh equations, and the bubble motion equation are applied to predict ram-jet propulsion performances. Data for conceptual design are also derived under adequate boundary and initial conditions. To optimize propulsive efficiency, the effects of ram-jet size, water velocity gradient, ambient temperature, ambient pressure, specific density of water, bubble radius, gas velocity, diffuser area ratio, and mass flow rate are discussed. On the bases of the above calculating conditions, it is verified that a compressor of 59,530HP produces 784,000N thrust under the speed of 80 knots for the buried type vessel.

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 보조기관전공
2) 한국해양대학교 이공대학 기계공학과 부교수

1. 서 론

미래의 선박은 속도가 빠르면서도 진동과 소음이 적어 승선감이 뛰어난 첨단기술을 바탕으로한 새로운 설계개념을 필요로 한다. 이렇게 되면 저운임으로 대량의 여객과 화물을 운송할 수 있으며 항공기와도 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 예상한다[1]. 이러한 초고속선을 건조하기 위해서는 무엇보다도 새로운 추진시스템의 개발이 반드시 필요하다.

물분사추진(Water-Jet Propulsion)방식은 원리적으로 수심 수m 이하에서의 정압만을 고려하여야 하는 프로펠러추진과 다르며 터보식 펌프에 의해 발생하는 압력 및 송출유량의 운동량변화를 이용하여 추력을 발생시킴으로서 특히 공동문제에서 많은 장점을 발휘하고 있다[2],[3]. 그러나 이러한 물분사추진방식도 일반적으로 저속시에 효율이 낮고 흡입부 및 임펠러에서의 공동대책이 필요하며 검사 및 보수가 불편한 단점이 지적된다.

항공분야에서는 공기흡입부(air intake)에서의 정압상승을 이용한 램제트추진의 원리가 일찌기 도입되었으며 국외의 극초음속여객기 개발계획에서 보면 초음속연소가 가능한 스크램제트에 관한 연구가 진행중에 있다[4].

이와 같은 램제트의 원리를 수중고속추진에 이용하려는 시도는 1940년대 후반부터이며 이에 관한 이론해석 및 기초실험결과가 보고되어 있다. Gongwer[5]는 당시에 검토되었던 수중제트추진방식에 대하여 몇 가지의 원리를 제시하였으며 Wislicennus[6]는 선박의 중량과 추진장치의 중량과의 관계를 논하면서 램제트와 같이 회전성분이 없는 가벼운 노즐추진방식이 유리함을 보이고 있다.

Witte[7]는 압축공기를 구동력으로 하는 램제트방식을 제안하였고 이에 관한 성능해석을 二相유체의 관점에서 논하였으며 Eilers & Mondrzyk[8]는 물분사추진방식을 채택하여 구동임펠러의 입구부 또는 출구부에 소량의 고압공기를 분사시켜 출발시 추력을 증가시키기 위한 실험을 행하였고 Tsutahara 등[9]은 고압공기 및 2차원의 평면노즐을 이용하여 노즐목 하부에서 고압의 가스를 분사시키는 추진방식을 택하여 노즐내 고압공기 분출상태를 관찰하고 추력발생의 메커니즘 및 그 특성에 대해 연구하였다.

또한 이스라엘의 한 연구소에서 80노트급 램제트선의 시운전이 행해지고 있는

dCollection

것으로 알려져 있다.

국내에서는 아직까지 수중램제트에 관한 연구결과가 발표되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구는 압축공기에 의해 구동되는 초고속선박추진용 램제트의 작동원리를 Witte의 이론에 근거하여 관련된 제반식을 엄밀히 평가하며 또한 이를 기초로 하여 노즐내의 유동특성을 파악할 수 있는 프로그램을 개발하는데 1차 목표를 두었다[10]. 나아가 램제트의 부착형태에 따라 선외부착형, 선내관통형 및 이상형으로 구분하여 각각의 추력을 계산하고 압축기 구동동력과 비교하여 추진효율을 구하였다[11]. 다음으로 각각의 램제트에 대해서 램제트 노즐초기단면적, 작동유체속도구배, 대기온도, 대기압력, 작동유체밀도, 분사되는 기포반경, 공기분사속도, 디퓨저 입·출구 면적비 및 질량유량비 등을 변화시켜 성능특성을 파악하였다[12]. 또한 직용예로서 최대효율을 낼 수 있는 대형램제트선의 개념설계에 필요한 데이터를 제안하였다.

2. 램제트의 작동원리 및 성능해석

2.1. 작동원리

그림1에서 보는 바와 같이 수중램제트는 간단하게 3부분으로 구성되어 있다. 첫번째 부분은 내부에 디퓨저의 형상을 갖는 램흡입부(ram intake)이며 이 곳을 통하여 추진기에 흡입되는 작동유체는 정압이 증가한다. 두번째 부분은 혼합실(mixing chamber)로서 디퓨저에서 증압된 작동유체는 이곳에서 고압으로 분사된 압축공기와 난류혼합을 일으키며 혼합체의 평균밀도는 낮아진다. 세번째 부분은 노즐로서 혼합실을 나온 기액이상류는 노즐을 통과하면서 고압의 기포가 대기압상태까지 팽창하면서 주변유체에 일을 행하며 동시에 혼합유체의 속도를 증가시킨다. 노즐에서의 출구속도가 입구부보다 빠르면 전방으로의 추력이 발생하며 수중램제트는 이와 같이 발생하는 추력을 적극적으로 이용하는 추진방식이다.

그림에서 알 수 있듯이 작동유체는 회전체와 접촉을 하지 않는다. 따라서 축동력을 바로 전달하기 위한 감속기어시스템, 누설방지장치 또는 베어링의 설치가 필요없게 된다. 또한 이물질의 혼입에 의한 블레이드의 손상, 고속회전체의 공동발

dCollection

생문제를 피할 수 있게 된다. 항공기의 경우에는 출발시에 별도의 보조동력장치가 반드시 필요하나 수중램제트의 경우에는 고압의 공기를 노즐후방으로 분사함으로서 공기구동 수이젝터의 역할을 행하여 입구부에서의 작동유체 유입을 가능하게 함으로 자력으로 출발이 가능하다.

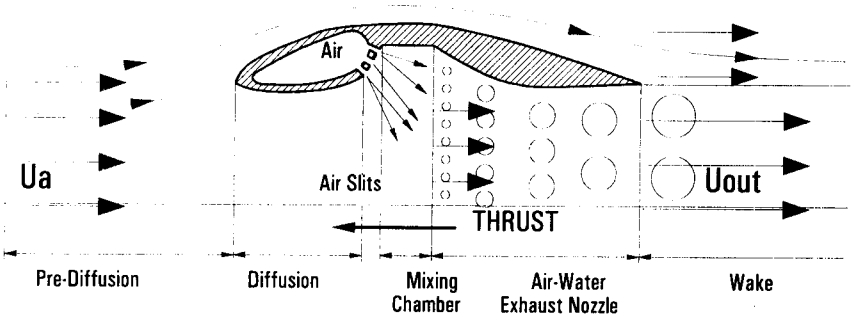

Fig.1 Schematic Diagram of Ram-Jet[7]

2.2. 성능해석

노즐에서의 추력을 계산하는 데 있어서 다음과 같은 점들을 가정하였다.

- 노즐내에서 외견상 1차원유동이다.
- 노즐의 일정단면에서 기포반경 R은 일정하다.
- 기포는 일정한 항력계수 C_D를 갖는다.
- 기포와 노즐벽과의 마찰은 무시한다.
- 기포의 표면장력의 영향은 무시한다($R > 10^{-4}$ m).
- 작동유체온도는 일정하다.
- 노즐내에서 작동유체속도는 선형적으로 증가한다.
- 가스의 질량유량은 매우 작기 때문에 무시한다($\mu << 1$).
- 가스는 이상기체법칙을 따른다.

그러나 본 논문은 가스(기포)와 작동유체의 속도는 같지 않고($V \neq U$), 가스와 작동유체의 압력은 같지 않으며($P_g \neq P$), 가스와 주변작동유체의 온도는 다르다($T_g \neq T_a$)고 가정하여 계산을 행하였다.

그림2는 이러한 가정하에서 램제트효율을 구할 수 있는 프로그램의 플로우차트

Collection

를 보여준 것이다.

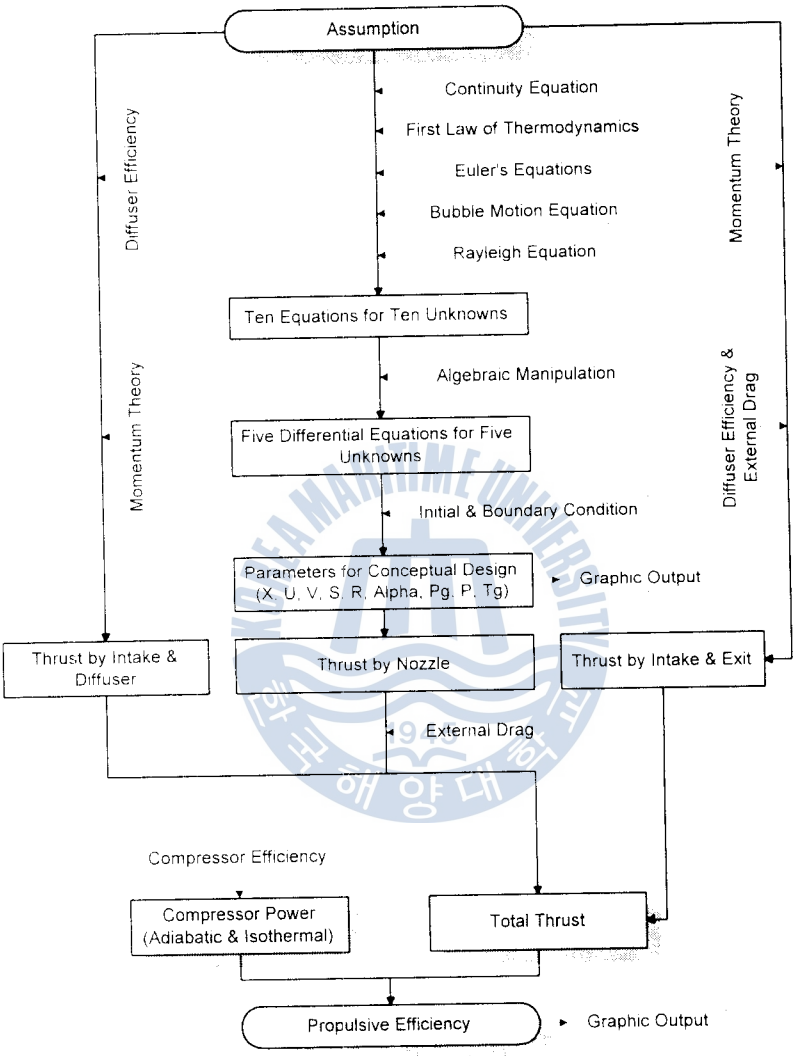

Fig.2 Flow Chart for Performance Prediction Analysis

제반가정을 통하여 얻어진 식들과 연속방정식, 열역학 제1법칙, 오일러의 방정식, 기포의 운동방정식, 레일레이방정식 등을 연립해서 풀면 보이드율 α, 기포생성율 n, 기포반경 R, 가스속도 V, 작동유체속도 U, 노즐단면적 S, 가스밀도 ρ_g, 가스온도 T, 가스압력 P_g와 작동유체압력 P의 10개의 변수를 갖는 10개의 방정식이 되고 여기에 적당한 대수조작을 하면 5개의 변수를 갖는 5개의 미분방정식 문제로 귀

dCollection

착된다. 이 5개의 미분방정식에 초기조건과 경계조건을 주어 오일러법으로 반복계산하면 5개의 미지수를 구할 수 있고 나머지 변수는 이것을 바탕으로 계산된다. 이렇게 변수가 구해지면 노즐출구에서의 제반변수를 구할 수 있고 이것을 이용하여 노즐에 의한 추력을 계산 할 수 있다. 또한 디퓨저와 혼합실에서의 추력은 적당한 디퓨저효율과 운동량이론에 의해서 구할 수 있고 노즐에 의한 추력과 디퓨저 및 혼합실에서의 추력을 더하면 램제트추력을 구할 수 있다. 이렇게 구한 램제트추력은 곧바로 디퓨저입구와 노즐출구에서의 운동량의 차로서 구한 추력과 마찰이 없을 때는 정확히 일치한다. 이러한 방법으로 램제트추력을 구할 수 있다.

효율을 구하기 위해서는 압축기 구동동력을 계산해야 하며 이는 적당한 압축기 효율을 도입하여 쉽게 구할 수 있다. 이와 같이 얻어진 압축기 구동동력과 램제트추력에 선속을 곱한 램제트동력을 비교함으로써 램제트효율을 구할 수 있다.

3. 설계 조건에 따른 성능 특성

계산조건으로서 해수온도 293K(20℃), 해수밀도 1026kg/m^3, 대기압 1.03x10^5 N/m^2(1기압) 상태에서 디퓨저 입·출구 면적비가 2인 디퓨저, 압축기효율 85%, 디퓨저효율 95%, 압축공기와 작동유체의 질량유량비 0.0015, 기체상수 290J/(K·kg), 항력계수 2.5를 사용하였고 디퓨저 입구단면적의 크기에 따라 다음과 같이 소형램제트, 중형램제트 및 대형램제트의 3가지 경우로 나누어 계산을 수행 하였다.

소형램제트는 입구단면적 0.0022m^2, 작동유체속도구배 600sec^{-1}, 중형램제트는 입구단면적 0.22m^2, 작동유체속도구배 60sec^{-1}, 대형램제트는 입구단면적 2.2m^2, 작동유체속도구배 5sec^{-1}이며 기포반경은 소형램제트는 0.001m, 중형과 대형램제트는 0.01m, 공기분사속도 및 선속은 소형과 중형램제트는 각각 25m/sec, 100노트로 하였으며 대형램제트는 20m/sec, 80노트로 하였다.

노즐출구에서 경계조건은 작동유체의 압력이 대기압과 같다는 가정하에 다음과 같이 하였다.

$$P = P_a$$

Collection

램제트 크기에 따른 노즐형상과 효율특성

램제트크기의 영향을 알아보기 위해서 소형과 중형램제트를 등온압축한 경우의 선내관통형과 선외부착형의 경우를 계산하였다. 그림3은 이 경우의 효율을 보여주고 있으며 두 경우에 있어서 크기의 영향은 2~3% 미만임을 알 수 있다.

그림4는 램제트노즐 크기에 따른 노즐형상의 변화를 알아보기 위해서 소형램제트와 중형램제트를 선속 90노트, 등온압축 상태에서 계산된 결과를 보여준다. 소형램제트는 비교의 편의를 위해서 100배로 확대하여 그린 것으로 램제트의 크기에 따른 노즐형상에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

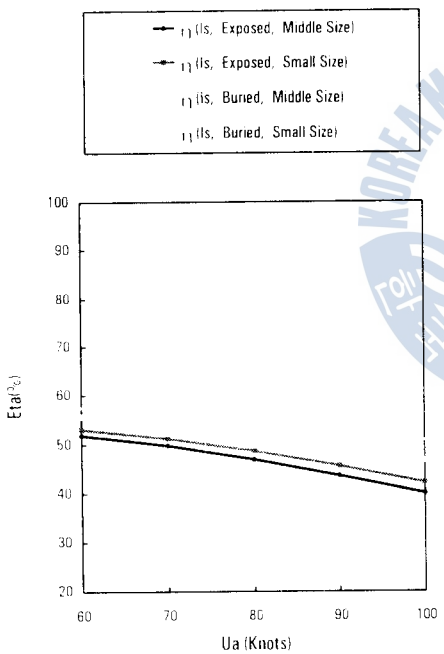

Fig.3 Propulsive Efficiency for Different Types and Size

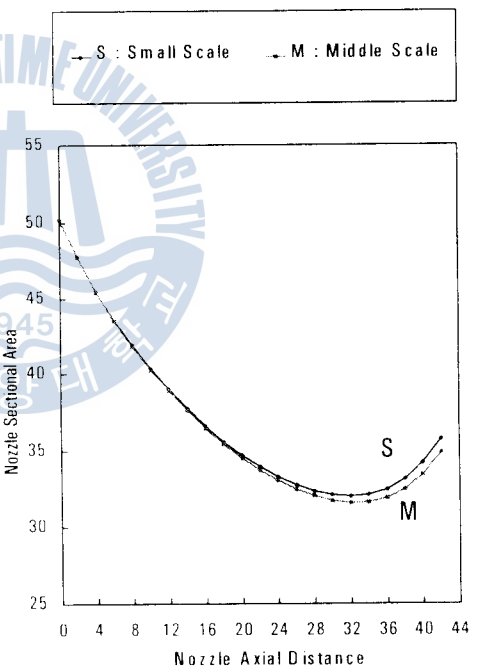

Fig.4 The Effect of Scale on Efficiency

노즐내 작동유체 속도구배의 영향

작동유체속도구배 또는 노즐길이가 추진효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 소형램제트의 경우에 대해 작동유체속도구배를 100에서 1500까지 100씩 증가시킴

Collection

으로써 노즐길이를 점점 줄여가면서 계산 하였다.

초기조건은 $\mu = 0.003$, $q = 100 \sim 1500\ \mathrm{sec}^{-1}$ 를 제외하고는 소형램제트의값과 같다.

그림5는 q를 점차 100씩 증가시킨 경우의 효율변화를 보여준다. 어느 경우에나 등온압축이 단열압축보다 우수하고 마찰손실이 적은 선내관통형이 선외부착형보다 우수하다. 선외부착형의 경우에는 단열압축과정 및 등온압축과정에서 100부터 300까지는 q의 증가와 함께 효율이 증가하다가 300에서 400사이에서 최대효율을 나타내고 다시 q의 증가와 더불어 효율이 감소함을 보여주고 그밖의 4가지 경우에서는 모두 처음부터 q의 증가와 더불어 추진효율이 현저히 감소함을 보여준다.

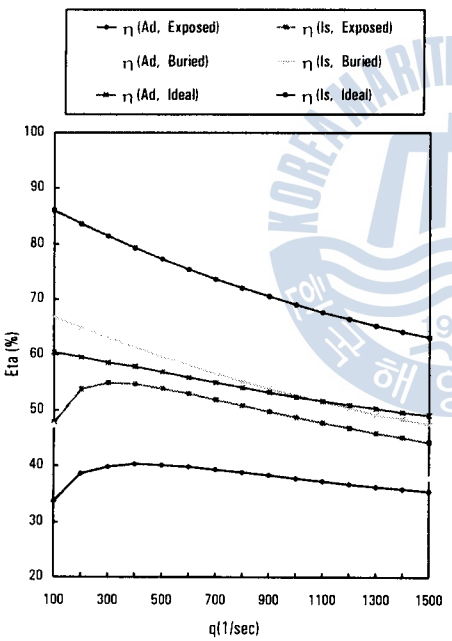

Fig.5 Propulsive Efficiency for Different Water Velocity Gradient

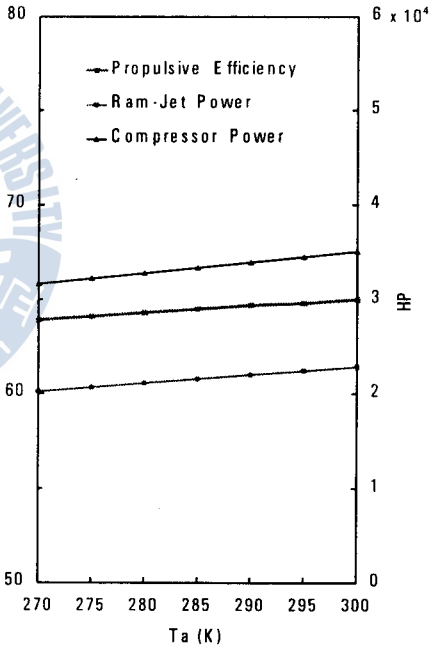

Fig.6 Propulsive Efficiency for Different Ambient Temperature

이러한 이유는 선외부착형의 경우에는 최대효율점인 300에서 400을 기준으로 q가 이 보다 큰 경우(즉, $q = 400 \sim 1500$: 노즐길이가 너무 짧은 경우)에는 노즐축을 따라 압력구배가 증가하기 때문에 슬립손실의 증가와 부족팽창의 증가로 효율이

감소하고 q가 이 보다 작은 경우(즉, q = 100~300: 노즐길이가 너무 긴 경우)에는 외부마찰항력 D_f의 증가가 슬립손실의 감소와 부족팽창의 감소로 인한 효율의 증가보다 더 크게 작용하기 때문이다. 또한 나머지 4가지 경우에는 디퓨저효율과 압축기효율만 고려하고 노즐길이가 증가하는 데 대한 노즐내부의 마찰영향은 고려하지 않았으므로 작동유체속도구배 q가 증가할수록 슬립손실과 부족팽창이 증가하기 때문에 추진효율이 감소한다. 따라서 보다 정확한 효율을 예측하기 위해서는 선내관통형과 선외부착형 모두 노즐내부에서의 마찰에 의한 손실을 고려하여야 하며 무엇보다 노즐내에서 작동유체속도구배 q가 일정하다는 가정에 대한 합리적인 규명이 필요하다.

지금까지의 결과로 램제트는 단열압축에 의해 압축된 공기를 사용하는 것과 노즐길이가 너무 짧은 것은 효율이 낮아서 불리하며 스케일효과에 의한 영향은 거의 없다는 것을 알 수 있었다. 또한 선내관통형이 선외부착형보다 효율이 우수하므로 등온압축과정에 의해 압축된 공기를 사용하는 선내관통형을 이용하여 80노트로 동작하는 대형램제트를 기본모델로 가정하여 제반변수 변화에 따른 성능특성을 파악하고자 한다.

대기온도에 따른 성능특성

그림6은 대기온도변화에 따른 효율의 변화를 보여준다. 전반적으로 추진효율이 약간 증가함을 보여준다. 이것은 대기온도가 올라 갈수록 압축기 구동동력은 약간 증가 하지만 이 보다 추력의 증가가 조금 크기 때문이다. 따라서 추진효율을 더욱 증가시키기 위해서는 압축기 구동마력을 줄이도록 흡입공기를 냉각시킬 필요가 있다. 예를 들면 대기온도가 293K일 경우 압축기로 유입하는 공기를 278K까지 냉각시키면 추진효율을 68.2%까지 증가시킬 수 있다.

기포반경에 따른 성능특성

그림7은 분사되는 기포반경에 따른 효율의 변화를 보여준다. 기포반경이 0.001m에서 0.002m까지 추진효율이 급격히 증가 하다가 0.002m에서 최대추진효율을 보여주고 다시 약간씩 감소함을 보여준다. 이것은 기포반경이 너무 작으면 기포압력과 작동유체 사이의 차압(P_g - P)이 노즐입구부 근처에서 플러스와 마이너스가

dCollection

반복되어 기포압력이 너무 빠르게 대기압력에 도달하여 노즐길이가 짧아지기 때문에 이로 인하여 출구에서 작동유체유속이 감소하여 추력이 크게 떨어지기 때문이다. 그러나 기포반경의 변화는 노즐내 유동변수 전반에 걸쳐 매우 복잡하게 상호작용을 하기 때문에 구체적인 내용은 좀 더 면밀한 검토를 필요로 한다. 외견상, 기포반경은 어떤 일정한 값 이상이 되어야 하며 추진효율에 중요한 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 공기분사구의 최적설계가 매우 중요함을 보여준다.

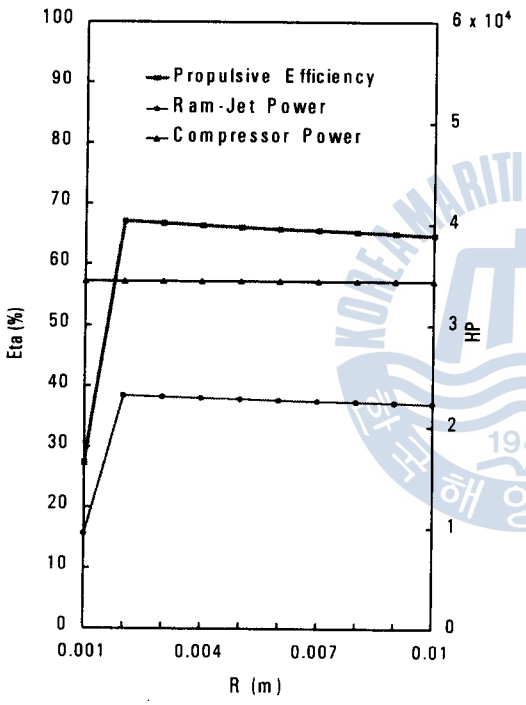

Fig.7 Propulsive Efficiency for Different Bubble Radius

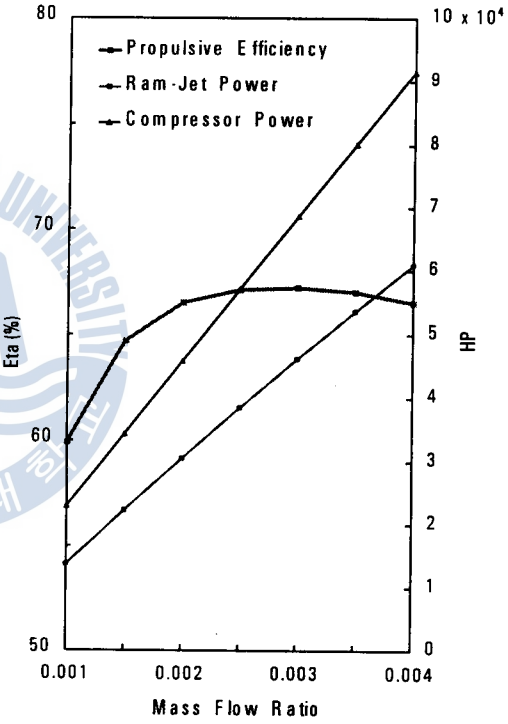

Fig.8 Propulsive Efficiency for Different Mass Flow Ratio

질량유량비에 따른 성능특성

그림8은 질량유량비에 따른 효율의 변화를 보여준다. 이 값이 증가할수록 압축기 구동동력과 추력은 직선적으로 증가하나 그 증가 비율이 서로 다르기 때문에 추진효율은 질량유량비 0.001에서 0.003까지 증가 하다가 0.003에서 최대추진효율

Collection

을 보여주고 다시 약간씩 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 결과로부터 질량유량비는 추진효율에 상당히 중요한 영향을 미침을 알 수가 있고 최적값이 존재함을 나타낸다. 대형램제트의 경우에 0.003 정도가 적당함을 알 수 있다.

4. 대형 램제트의 개념 설계

앞장에서 단열압축과정과 매우 짧은 2상노즐의 조합은 효율이 너무 낮아서 실용성이 없음을 보여주었다. 따라서 램제트는 등온압축과정에 의해 압축된 가스를 이용해서 구동하여야 하나 완전한 등온압축은 실현 불가능하므로 그 대신 중간냉각기에 연결된 다단계의 단열공기압축과정을 이용함으로써 어느 정도의 성과를 거둘 수가 있다. 전체의 형상을 간단하게 하기 위하여 2개의 중간냉각기를 갖는 3단 압축으로 가정하였다. 이 중간냉각기는 내부마찰손실이 작게 설계되어야 한다. 그림10은 약 42,000 마력을 낼 수 있는 80노트급 초고속 램제트선의 일반 배치도를 보여준다.

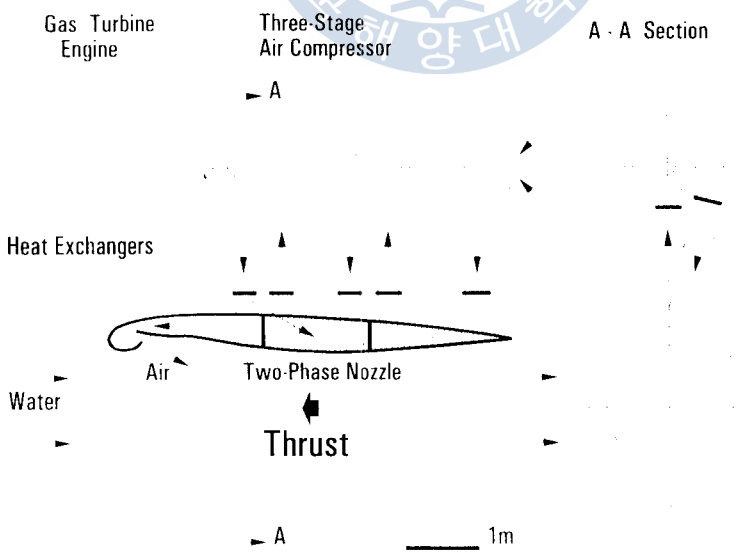

Fig.9 Conceptual Design of Large Water Ram-Jet[7]

Collection

4.1 초기 조건

80노트의 속력을 얻기 위한 이상적인 대형 램제트의 초기 조건은 제3장을 기준으로 다음과 같이 하였다.

$S_a = 2.2m^2$, $U_a = 40\ m/\sec \simeq 80\ knots$, $T_a = 293\,K$, $R_g = 290\ J/K\ kg$,

$P_a = 1.03 \times 10^5\ N/m^2$, $\rho_w = 1026\ kg/m^3$ $q = 5(\sec^{-1})$, $R_o = 0.01\ m$,

$V_o = 20\ m/\sec$, $\varphi_{di} = 2$, $\mu = 0.0015$, $\eta_c = 0.85$, $\eta_{di} = 0.95$, $C_D = 2.5$

4.2 얻어진 램제트 데이터

선외부착형의 경우에는 64.6%의 추진효율과 7.17×10^5 N의 추력(동력으로 환산하면 38,438 HP)이 얻어졌으며 선내관통형에서는 70.6%의 추진효율과 7.84×10^5 N의 추력(동력으로 환산하면 42,042 HP)이 얻어졌다.

두 계산에서 공기의 질량유량은 270kg/sec이며 압축장치의 축마력은 59,530 HP이다.

5. 결 론

램제트의 성능해석을 위한 기존의 이론해석을 기액이상류의 내부유동의 관점에서 고찰하여 제반가정을 통하여 열거한 식들과 연속방정식, 열역학 제1법칙, 오일러의 방정식, 기포의 운동방정식, Rayleigh방정식 등을 이용하여 디퓨저와 혼합실 및 노즐에 의한 추력을 산출하였고 노즐내의 유동특성과 추진효율을 산출할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 그리고 이 프로그램을 이용하여 선외부착형, 선내관통형 및 이상형의 램제트에 대해 공기를 압축하는 방법, 선속, 크기 등을 변화시켜 가며 이 경우의 추력과 추진효율을 산출하였다. 그 결과 램제트는 선내관통형이 선외부착형에 비해 추진효율이 우수하며 등온압축공기를 사용하는 것이 단열압축공기를 사용하는 것에 비해 추진효율에 유리하며 노즐길이가 너무 짧은 것은 효율이 낮아서 불리하고 스케일효과에 의한 영향은 거의 없다는 것을 알았다.

Collection

또한 추진효율을 향상시키기 위하여 선내관통형 대형램제트를 기본모델로하여 대기온도, 대기압력, 작동유체밀도, 기포반경, 공기분사속도, 디퓨저 입·출구 면적비, 질량유량비 등이 추진효율에 어떠한 영향을 미치는 가를 검토하였다. 그 결과 추진효율을 상승시키기 위해서는 압축기의 구동동력을 줄이도록 흡입공기를 냉각시킬 필요가 있으며 압축기의 흡입부도 선속에 의한 동압을 램효과에 의해 정압으로 바꿀 수 있는 형상으로 만들면 상당한 효율의 상승을 기대할 수 있음을 보였다. 그리고 공기분사속도와 디퓨저 입·출구 면적비는 외견상 추진효율에 별다른 영향을 미치지 않으나 램제트의 형상과 출발시 이젝터효과에 의한 자력출발특성 및 디퓨저효율에는 영향을 미칠 수 있음을 보였다. 또한 분사되는 기포반경과 공기와 작동유체의 질량유량비는 어떤 특정한 값에서 최대효율을 나타내며 추진효율에 매우 중요한 영향을 미침을 보였다.

이상의 성능특성을 바탕으로 가장 추진효율이 좋은 램제트의 설계조건을 제안하였다. 약 42,000 마력을 낼 수 있는 80노트급 초고속 램제트선은 약 59,500마력의 압축기 구동동력이 필요하며 이 때의 추진효율은 선내관통형의 경우에 약 70.6%임을 보였다.

참고문헌

1. 조선 일보, 1990년 11월 8일자 신문 12면.
2. 이영호, 박명규, 물분사추진, 대한조선학회지 제29권 제2호, 1992, pp.32-46.
3. 이영호, 물분사추진의 특성 및 개발 현황, 대한조선학회 추계연구발표회 논문집, 1992, pp.26-31.
4. P.Hill and C.Peterson, Mechanics and Thermodynamics of Propulsion, Addison Wesley, 1992, p.21.
5. C.A.Gongwer, Some Aspects of Underwater Jet Propulsion Systems, ARS Journal, December 1960, pp.1148-1151.
6. G.F.Wislicenus, Hydrodynamics and Propulsion of Submerged Bodies, ARS Journal, December 1960, pp.1140-1148.

dCollection

7. J.H.Witte, Predicted Performance of Large Water Ramjet, AIAA Paper No.69-406, 1969.

8. R.E.Eilers & R.J.Mondrzyk, Waterjet Thrust Augmentation by Gas Injection, Polyphase Flow in Turbo-machinery, The Winter Annual Meeting of ASME, JFE Division, Dec. 1978, pp.185-195.

9. M.Tsutahara, M.Sakamoto, T.Kimura and K.Hashimoto, A Study of Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas, Proc. 3rd JSME-KSME Fluids Eng. Conf., 1994, pp.288-293.

10. 김유택, 이영호, 80노트급 수중램제트 추진에 관한 성능예측, 제9회 KTTC 추진기/캐비테이션 기술분과 Workshop Proceeding, 1994, pp.80-122.

11. 김유택, 김춘식, 이영호, 초고속선용 수중램제트 추진의 성능특성, 대한조선학회 춘계연구발표회 논문집, 1995, pp.264-269.

12. 김유택, 김춘식, 이영호, 수중램제트의 설계조건에 따른 성능특성, 대한조선학회 추계연구발표회 논문집, 1995, pp.387-392.

dCollection