

최적 노즐형상을 갖는 수중램제트의 추진특성에 관한 연구

강 호 근¹⁾, 李 英 浩²⁾

A Study on Propulsion Performance of Underwater Ram-Jet with Optimized Nozzle Configuration

Ho-Keun Kang, Young-Ho Lee

ABSTRACT

The underwater ram-jet is a propulsion device in which the energy of an expanding air imparts additional moment to a stream of water through mixing as a unique marine propulsion concept promising characterizing the very high cruise speed range(e.g. 80-100 knots). This paper is to investigate the propulsive efficiency of the nozzle flow of underwater ram-jet under the speed of 80 knots for the buried type vessel. The basic assumption of the theoretical analysis is that a mixture of water and air can be treated as a incompressible gas. For an optimized nozzle configuration obtained from the performance analysis, preliminary data for performance evaluation are obtained and effects of nozzle inner wall friction, ambient temperature, ambient pressure, water density, gas velocity, bubble radius, flow velocity,

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 열유체전공

2) 한국해양대학교 기계공학과 부교수

diffuser area ratio, mass flow ratio and water velocity gradient are investigated. The main results are summarized as follows:

- 1) An optimum size of bubble radius exists to obtain maximum propulsion efficiency.
- 2) Increase of compressed air velocity accompanies small increment of propulsion thrust.
- 3) The change of atmospheric temperature, pressure and operating liquid density does not make little difference in performance estimation.
- 4) An optimal mass flow ratio is found for maximum propulsion efficiency.
- 5) Propulsion efficiency depends greatly on the change of the area ratio of diffuser inlet and outlet.

1. 서론

기존의 선박추진장치로서 이용되고 있는 스크류 프로펠러를 대체하는 차세대 초고속 선박추진 시스템으로서 Witte는 수중램제트의 원리를 제안하였다^[1]. 김 등은^{[2]~[4]} Witte의 이론을 바탕으로 램제트의 성능해석을 위한 기존의 이론을 기·액이상류의 내부유동의 관점에서 고찰하였으며 제반가정 및 연속방정식, 열역학 제1법칙, 오일러의 방정식, 기포의 운동방정식, Rayleigh 방정식 등을 이용하여 디퓨저와 혼합실 및 노즐에 의한 추력을 산출하였다. 그리고 노즐내의 유동특성과 추진효율을 산출할 수 있는 프로그램을 개발하여 선외부착형, 선내관통형 및 이상형의 램제트에 대해 공기를 압축하는 방법, 선속, 크기 등을 변화시키면서 추력과 추진효율을 검토하였다.

또한 추진효율을 향상시키기 위하여 선내관통형 대형램제트를 기본 모델로 하여 유동변수들의 변화가 추진효율에 어떠한 영향을 미치는가를 검토하였다.

그러나 지금까지의 결과는 주어진 운전조건에 대하여 노즐의 형상이 자동적으로 결정됨으로써 최적설계의 관점에서는 매우 유리하나, 정해진 노즐형상에 대한 운전조건의 변화에 대응하는 성능해석이 어려운 점이 지적되었다.

따라서 본 연구에는 80노트를 낼 수 있는 대형 램제트를 기본 모델로 계산하여 나온 최적형상의 노즐에 대하여 제반성능특성을 규명하기 위한 데이터를 확보하였고, 구체적으로 벽마찰계수, 공기분사속도, 기포반경, 대기온도, 질량유량비, 디퓨저의 입·출구 면적비 및 작동유체의 유입속도등의 운전조건의 변화가 미치는 추진특성의 고찰을 행하였다.

2. 이론해석

그림1에서와 같이 수중램제트는 크게 나누어서 램흡입부(ram intake), 혼합실(mixing chamber) 및 노즐의 3부분으로 구성되어 있다. 램흡입부에서 작동유체의 압력이 증가하며, 혼합실에서는 공기압축기로부터의 고압공기가 증압된 작동유체로 분사되며 혼합실을 나온 기·액이상류는 노즐을 통과하면서 대기압까지 팽창을 하여 작동유체를 고속으로 가속시켜 노즐출구에서 추력을 얻는 방식이다.

한편, 디퓨저, 혼합실 및 배기노즐에서 발생하는 유동현상은 서로 다르게 나타나며 이들에 관한 거동해석은 이러한 부분들을 개별적으로 고려해 봄으로써 해결할 수가 있으며, 또한 추력을 얻기 위해서는 노즐내의 유체유동 특성이 추력 및 추진효율에 어떠한 영향을 미치는가 파악할 필요성이 있다.

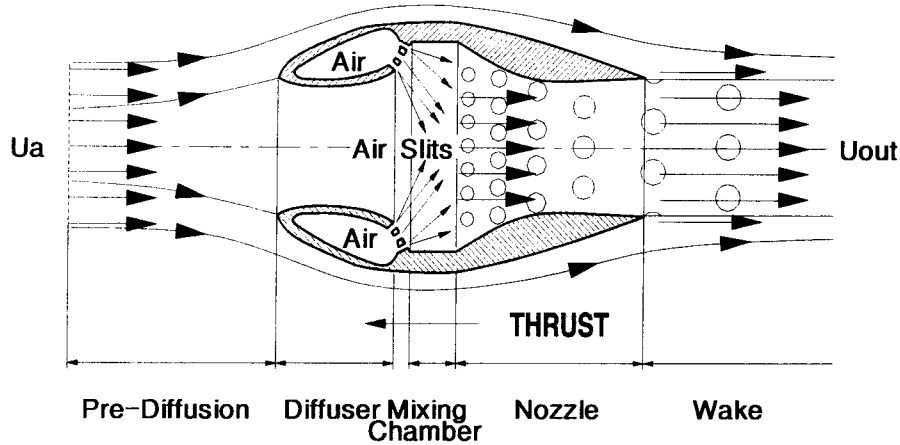


Fig.1 Schematic Diagram of Ram-Jet[1]

먼저 운동량정리에 의한 흡입부와 디퓨저에 작용하는 전진추력은 다음과 같이 구해질 수가 있다.

$$t_1 = \frac{1}{2} \rho_w U_a^2 S_a \left\{ (\varphi_{di} - 1)^2 / \varphi_{di} \right\} \quad (1)$$

혼합실에 작용하는 추력은 다음과 같다.

$$t_2 = \frac{1}{2} \rho_w U_a^2 S_a \left(\varphi_{di} - \frac{1}{\varphi_{di}} \right) \left(\frac{\alpha_o}{1 - \alpha_o} \right) \quad (2)$$

따라서 디퓨저 및 혼합실에서 발생하는 전진추력은 식(1)과 식(2)의 추력을 더함으로서 구할 수 있다.

$$r_1 = \frac{1}{2} \rho_w U_a^2 S_a \left\{ \frac{(\varphi_{di} - 1)^2}{\varphi_{di}} + \left(\varphi_{di} - \frac{1}{\varphi_{di}} \right) \left(\frac{\alpha_o}{1 - \alpha_o} \right) \right\} \quad (3)$$

다음으로는 노즐에 관련된 지배방정식은 다음과 같다.

노즐에서의 2상 연속방정식은 식(4)과 식(5)으로 표현된다.

$$(\partial / \partial x) [\rho_g \alpha S V] = 0 \quad (\text{공기질량보존}) \quad (4)$$

$$(\partial / \partial x)[\rho_w(1 - \alpha)SU] = 0 \quad (\text{작동유체질량보존}) \quad (5)$$

한편, 노즐내에서 기포는 같이 합쳐지거나 나누어지지 않는다는 가정 하에 기포의 보이드율은 다음 식으로 나타낸다.

$$\alpha = \left(\frac{4}{3}\right) \pi nR^3 / VS \quad (6)$$

열역학 제1법칙을 기포에 적용하여 기포에너지의 보존방정식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$4\pi R^2 \gamma (T_g - T_a) + C_v \frac{D}{D_t} \left(\frac{4}{3}\right) \pi R^3 \rho_g T_g + P_g \frac{D}{D_t} \left(\frac{4}{3}\right) \pi R^3 = 0 \quad (7)$$

기포 열전달계수의 값은 대류열전달을 γ 이 작동유체에 상대적으로 작용한 기포운동에 근거한 레이놀즈수와 프란틀(Prandtl)수의 경험적인 함수로 Vliet와 Leppert^[5]이 산출한 식으로부터 구할 수가 있으며, $1 < Re < 3 \times 10^5$ 의 범위에서 적용하면 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{\lambda_w}{2R} (1.3Pr^{0.15} + 0.66Pr^{0.31}Re^{0.5}) \quad (8)$$

$$Nu = 2\gamma R / \lambda_w \quad \text{단, } \lambda_w = 0.59 \text{ W/mK} \quad (9)$$

$$Re = 2R|V - U| / \nu_w \quad \text{단, } \nu_w = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec} \quad (10)$$

고레이놀즈 영역에서 Harberman과 Morton은 수직물기둥에서 솟아 오르는 기포를 함유하는 실험결과^[6]를 제시하고 있으며, 다음의 레이놀즈수의 범위에서 기포항력계수의 값을 적용할 수가 있다.

$$C_D = 2.5 \quad 1000 < Re \quad (11)$$

한편, 수평으로 작용하는 노즐단면에서의 Euler의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (1 - \alpha) \rho_w U \frac{\partial U}{\partial x} + \alpha \rho_g V \frac{\partial V}{\partial x} \\ = -\frac{4\tau}{d} - \frac{\partial}{\partial x} \{ (1 - \alpha)P_w + \alpha P_g \} \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)의 오른쪽 식에서 첫 번째 항은 노즐벽이 유체에 작용한 마

찰력의 영향이며^[7], τ 는 벽에서의 전단응력, a 는 노즐직경이다.

기포가 노즐을 통하여 이동하면서 항력과 부가질량효과에 의한 저항을 받는다. 항력은 기포의 속력이 주위의 물에 관계된 것이며, 부가질량효과는 기포의 가속력에 달려 있기 때문에 기포 한 개의 운동 방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_g \frac{DV}{Dt} + \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{\partial P_w}{\partial x} + \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{1}{2} \rho_w \left(\frac{DV}{Dt} - \frac{DU}{Dt} \right) \\ + C_D \frac{1}{2} \rho_w \pi R^2 (V-U) |V-U| = 0 \quad (13) \end{aligned}$$

위의 식에서 두 번째 항은 압력변화 때문에 기포에 발생한 힘을 의미하고, 세 번째 항은 기포의 부가질량에 기인한 관성력을 의미하며^[8], 네 번째 항은 주변유체에 상대적으로 움직였을 때 기포에 작용하는 항력을 나타낸다.

내부질량전달이 존재하지 않을 때의 기포벽의 변위는 식(14)으로 표현된다.

$$\frac{P_g - P_w}{\rho_w} = -R \frac{D^2 R}{Dt^2} - \frac{3}{2} \left(\frac{DR}{Dt} \right)^2 + \frac{1}{4} (V-U)^2 - \frac{4\nu_w V}{R} \frac{DR}{Dt} \quad (14)$$

여기에서 오른쪽 식의 세 번째 항과 네 번째 항은 각각 내상슬립(interphase slip)과 점도의 효과를 나타내고 있다^[9].

또한 노즐내에서 작동유체의 속도가 선형적으로 증가한다고 가정 하였으므로 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$U = U_o + \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) x \quad \text{여기서} \quad \frac{\partial U}{\partial x} = q \quad \text{일정하다.} \quad (15)$$

3. 계산 순서 및 방법

앞의 식들을 조합해 보면 10개의 미지수에 대한 일차미분방정식으로 귀착되며 관련된 변수는 $S, \alpha, n, R, V, U, \rho_g, T, P_g$ 와 P_w 이다. 그러

나 노즐 단면적 S 값은 최적노즐 형상의 값으로 주어지므로 미지수는 9개가 된다.

미분방정식을 해석하기 위하여 물질미분을 Euler적 관점으로 표현하면 다음과 같다.

$$D_g/Dt = V(\partial/\partial x), \quad D_w/Dt = U(\partial/\partial x),$$

$$D^2R/Dt^2 = V(\partial V)(\partial R/\partial x) + V^2(\partial^2 R/\partial x^2) \quad (16)$$

한편 노즐에서의 적용방정식들을 조합하면 다음과 같다.

$$n = const \quad (17)$$

$$\alpha = R^3 U / (R^3 U + CV) \quad (18)$$

$$T_g = T_0 (P_g R^3 / P_{g0} R_0^3) \quad (19)$$

위의 (18),(19)식들을 이용하여 $\partial\alpha/\partial x, \partial T_g/\partial x$ 를 계산하고 n 은 식 (17), $\partial U/\partial x$ 는 식(15)에서 구할 수가 있으며, 나머지 4개의 변수 R, V, P_g, P_w 는 $\partial^2 R/\partial x^2$ 을 1계 연립미분방정식으로 변환하면 5개의 미분방정식 $\partial R/\partial x, \partial P_g/\partial x, \partial V/\partial x, \partial W/\partial x, \partial P_w/\partial x$ 으로 재조정될 수 있다. 이들 방정식의 해는 노즐을 따라서 흐르는 혼합체가 대기상태의 압력까지 팽창할 때까지 오일러(Euler)의 시간 적분기법으로 진행된다.

따라서 이상과 같이 하여 나온 방정식의 해는 다음의 식에 대입하여 사용하면 노즐에 의한 추력을 계산할 수 있다.

$$r_2 = \int_0^{X_{P=P_a}} [\{P_w - \alpha(P_w - P_g)\} - P_a] \frac{\partial S}{\partial x} dx \quad (20)$$

여기에서 $\frac{\partial S}{\partial x}$ 는 최적노즐형상의 값으로 주어지며, 램제트의 전체적인 추력은 식(3)과 식(20)의 추력을 더한 값으로 구할 수 있다.

$$r = r_1 + r_2 \quad (21)$$

그림2은 지금까지의 계산 순서를 플로우차트로 나타낸 것이다.

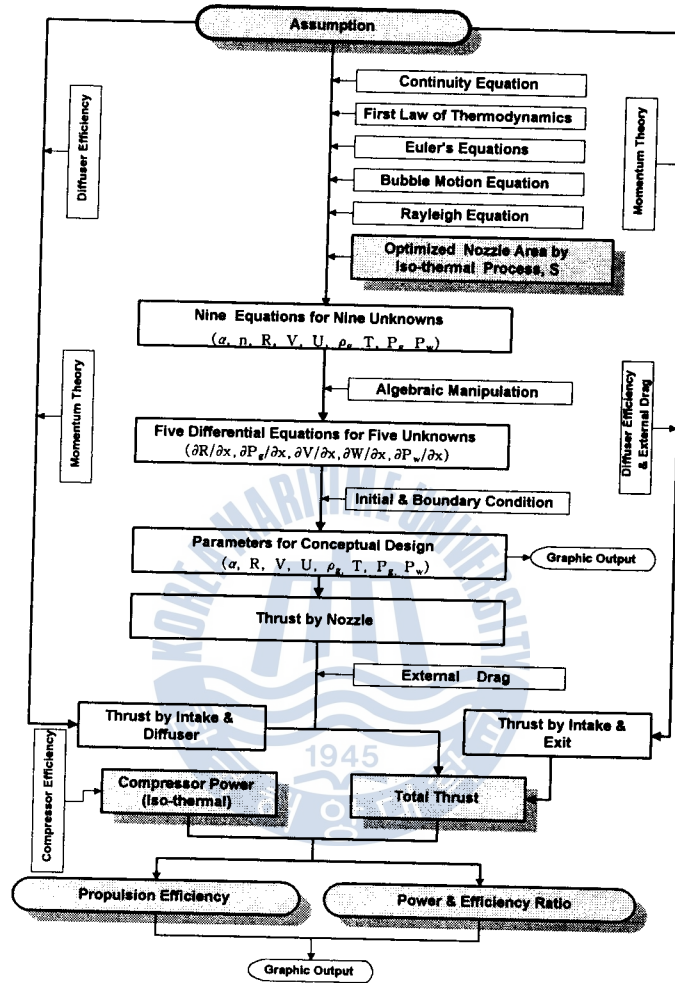


Fig.2 Flow Chart of Performance Prediction Analysis

4. 계산결과 및 검토

이론해석에 기초를 두고, 램제트의 성능해석(Solution)은 2상 노즐 흐름에서 흐름특성에 대한 제반변수들의 영향을 파악함으로써 얻어질 수가 있다.

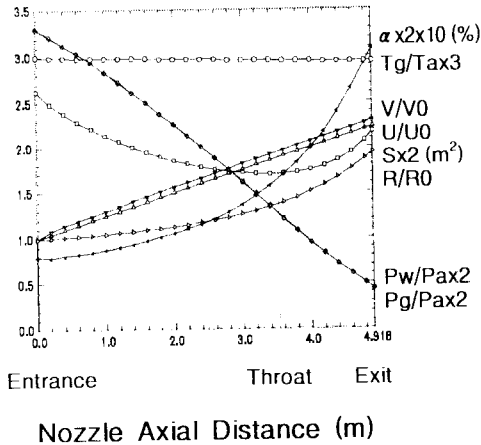


Fig.3 Parameter Characteristics within Nozzle

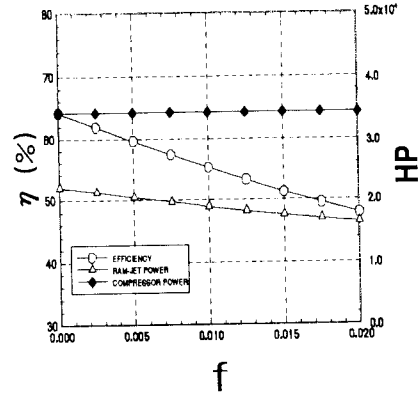


Fig.4 Propulsion Efficiency for Friction Coefficient

그림3는 고압공기기포를 함유하는 노즐흐름의 주요한 성질의 변화를 나타내고 있으며, 그래프상의 편의를 위하여 각 값들을 확대하거나 축소하여 나타내었다. 보이드올과 기포반경은 노즐목 이후부터는 급속하게 증가를 나타내고 있으며 이것은 기포가 노즐목 이후부터는 급속·가속팽창을 나타내고 있으며, 기포의 온도는 노즐을 통하여 흐르면서 거의 변화가 없음을 알 수가 있다. 작동유체의 속도와 기포의 속도는 선형적으로 증가하는 것을 알 수가 있으며, 압력은 대기압의 상태에까지 점점 감소를 나타내고 있다.

그림4는 마찰계수의 변화에 따른 추력의 변화와 효율의 변화를 나타낸다. 노즐벽면에서의 마찰손실은 선체의 성능특성에 있어 매우 중요하다. 그 중에서도 출구유속과 마하수는 노즐벽면의 마찰손실에 가장 민감하게 영향을 받는다(본 연구에서는 마하수에 대한 고려는 하지 않았다).

노즐추력과 효율은 마찰계수가 감소할 때 증가한다는 것을 알 수가 있다. 그러나 비록 노즐출구에서의 추력이 마찰계수에 단지 미소하게 변하다 하더라도 그 효과는 사실상 매우 중요할 수도 있음을 유의하

여야 한다.

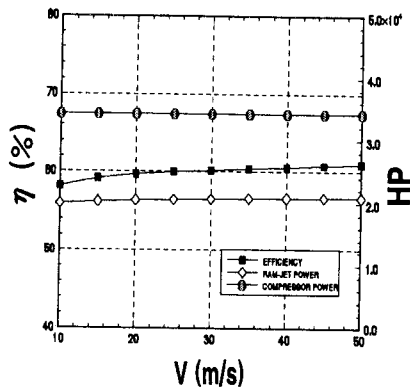


Fig.5 Propulsion Efficiency for Air Velocity

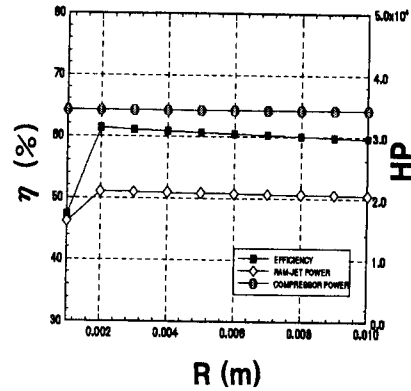


Fig.6 Propulsion Efficiency for Bubble Radius

그림5은 공기분사속도가 효율 및 추력에 미치는 영향을 나타내고 있는 것으로서 공기분사속도의 증가에 따라 추력은 조금씩 증가를 하고 있지만 압축기의 구동마력은 변하지 않기 때문에 효율도 서서히 증가를 하고 있다. 공기분사속도를 상승시켜도 질량유량비가 일정하기 때문에 급격하게 증가하지 않음을 알 수가 있다.

그림6은 기포반경의 변화에 따른 효율과 추력을 나타내고 있다. 기포반경이 너무 작으면 기포압력과 작동유체 사이의 차압이 노즐목부 근처에서 플러스와 마이너스가 반복되어 기포압력이 너무 빠르게 대기압력에 도달한다. 결과적으로 노즐길이가 짧게 되는 것 같이 되어 출구에서 작동유체유속이 감소하여 추력이 크게 떨어지기 때문에 효율이 급격히 증가하다가 다시 약간씩 감소하고 있다. 기포반경이 0.002m에서 최대 추진효율을 보여주다가 다시 약간씩 감소하고 있다. 또한 기포반경이 너무 적으면 노즐목 부에서 너무 빠르게 대기압이

그림7은 대기온도의 변화에 대한 영향을 나타내고 있다. 대기온도가 올라갈수록 램제트 추력이나 압축기의 구동은 미소하게 증가하는데 반하여 효율은 미소한 감소를 보이고 있다. 대기온도의 변화는 추

진효율의 향상이나 추력의 증가에 거의 영향이 없다는 것을 알 수가 있다.

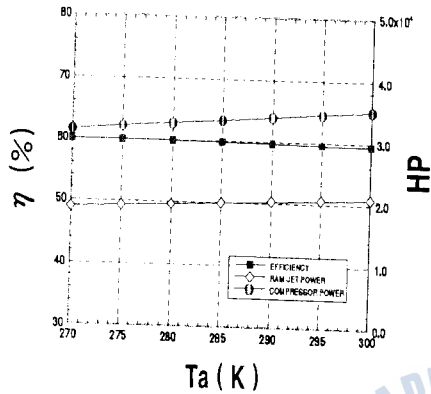


Fig.7 Propulsion Efficiency for Temperature

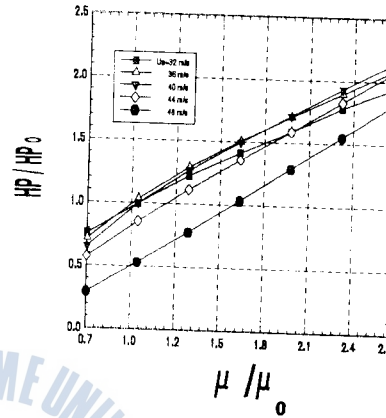


Fig.8 Propulsion Ratio for μ Ratio ($\mu_0 = 0.0015$)

그림8은 작동유체의 유입속력에 따른 질량유량비의 변화가 추력비에 미치는 영향을 나타내고 있다. 미소한 질량유량비의 변화에도 추력비가 급격하게 변하는 것을 알 수가 있으며, 추력은 질량유량비가 커질수록 급격한 증가를 나타내고 있다.

기포는 급속하게 팽창가속을 하여 대기압 이하까지 팽창한다. 따라서 작동유체와의 혼합에 의한 가속의 결과로서 추력은 급상승하고 있다. 추력은 약 80노트(40 m/s)부근에서 최대를 보이고 있으며, 그 이상의 속도에서는 대기압까지 팽창을 하지 못하여 80노트의 최대추력을 넘지 못하고 있다.

그림9은 디퓨저 입·출구 면적비의 변화가 동압형성에 미치는 영향과 그에 따른 추력에 미치는 영향을 살펴보기 위한 것이다.

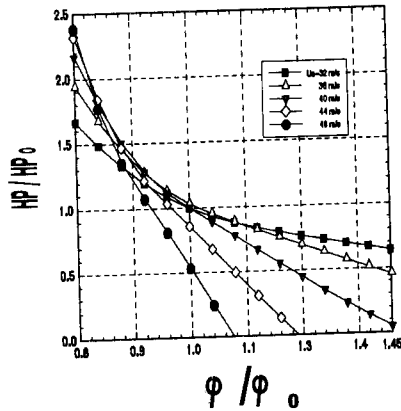


Fig.9 Propulsion Ratio for
 ϕ Ratio ($\phi_0 = 2$)

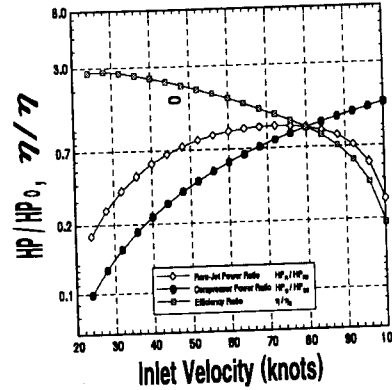


Fig.10 Propulsion Efficiency Ratio for
Inlet Water Velocity

흡입부와 디퓨저에서 작동유체는 비압축, 비점성이라고 가정하고 입·출구의 면적비가 작동유체의 정압형성에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하기 위해서 면적비를 다르게 하여 성능특성을 살펴보았다. 미소한 면적비의 변화에도 추력에 많은 영향을 미치는 것을 알 수가 있다. 따라서 적절한 동압형성은 램제트장치에서 매우 중요하며, 각 노즐마다 동압을 가장 잘 형성시키는 최적의 디퓨저 입·출구 면적비가 존재한다.

그림10은 작동유체의 유입속도의 영향을 나타내고 있다. 압축기 동력비는 작동유체 유입속도가 증가할수록 큰 폭으로 증가하지만 이에 반하여 추력비는 75 노트부근에서 최고를 나타내고 그 이후는 감소하고 있다. 작동유체 유입속도가 낮을 때 효율이 좋은 것은 기포가 노즐목 부근에서 대기압 이하까지 과대팽창을 하여 초기에는 추력이 크게 발생하나 작동유체 유입속도가 증가할수록 공기기포는 과소팽창을 하는 결과가 되기 때문이다.

이상에서 최적 노즐형상을 갖는 수중램제트의 노즐에서 유동변수들의 변화가 추진특성에 미치는 영향들을 살펴보았다. 그러나 보다 정확하게 노즐내에서의 유동특성을 알기 위해서는 몇 가지 점들이 고려되어야 한다.

우선, 노즐벽면에서의 마찰손실은 흐름의 발달에 있어서 출구유속과 마하수에 매우 커다란 영향을 미치기 때문에 이에 대한 상세한 고찰이 필요하며, 기·액이상류가 혼합하는 동안에 응축은 기포질량의 일부분이 액체로 전환되기 때문에 출구흐름에서 동일한 초기의 전체적인 기포체적률을 사용할 때의 비응축 기포의 경우와 비교해 마하수 및 속도의 감소를 가져오기 때문에 열전달 뿐만 아니라 질량 전달 까지도 검토되어야 한다.

또한, 디퓨저에서의 정압회복을 위한 디퓨저 형상에 관한 정확한 데이터의 확보와 함께 출발시 이젝터효과를 이용하여 가속성을 개선시키는 문제, 그리고 출구에서의 팽창효과 및 충격파 등을 고려한 압축성 및 나셀외부의 항력계산의 산출이 계산과정에 포함되어야 한다.

그리고 혼합실에 분사되는 고압 분사공기가 최적의 분사각도에서 분사되어 기·액 이상류의 혼합이 효과적으로 이루어지도록 분사각도와 혼합실의 적정길이에 대한 고려도 필요하다.

5. 결론

선박의 추진장치로서의 새로운 선박추진원리를 적용한 램제트에서 디퓨저에 의한 동압 형성 및 기포의 팽창을 응용하여 추력을 발생시키는 노즐을 제안하여 그 제반특성을 조사하였다. 즉 80노트를 낼 수 있는 대형 램제트를 기본 모델로 계산하여 나온 최적형상의 노즐에서의 유동특성과 추진효율을 산출할 수 있는 프로그램을 개발하여 여러 가지 유동변수들을 변화시키면서 여러 효율특성을 압축기의 구동 동력과 비교하면서 추력 및 추진효율을 살펴보았다. 그 결과 벽면 마찰계수의 증가는 추력 및 효율을 크게 떨어뜨리며, 기포반경은 각 노즐마다 최적의 크기를 갖고 있으며, 대기온도는 램제트의 성능특성에 거의 관계가 없다는 것을 알았다. 또한 질량유량비, 디퓨저 입·출구 면적비의 변화는 추력 및 추진효율에 상당한 영향을 미치는

것을 알 수가 있었다.

참고문헌

1. Witte, J. H., "Predicted Performance of Large Water Ramjet", AIAA, 1969.
2. 김유탉, 김춘식, 이영호, "초고속선용 수중램제트 추진의 성능특성", 대한조선학회 춘계연구발표회 논문집, 1995.
3. 김유탉, 김춘식, 이영호, "수중램제트의 설계조건에 따른 성능특성", 대한조선학회 추계연구발표회 논문집, 1995.
4. 강호근, 김유탉, 이영호, "수중램제트의 노즐형상에 따른 유동특성", 대한조선학회 추계연구발표회 논문집, 1996.
5. Vliet, G. C. and Leppert, G., "Forced Convection Heat Transfer", Vol.83, May 1961.
6. Harberman, W. L. and Morton, R. K., "An Experimental Investigation in the Drag and Shape of Air Bubbles Rising in Various Liquids", D. T. M. B. Rept. 802, 1953.
7. Albagli, D. and Gany, A., "Two-Phase Bubbly Flow Through A Convergent-Divergent Nozzle with Interphase Heat and Mass Transfer", Paper 18-TPF-01 . 9th International Heat Transfer Conf.. Jerusalem. Israel. Aug. 1990.
8. Wallis, G. B., "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill, Inc, 1969.
9. Soo, S. L., "Fluid Dynamics of Multiphase Systems", Blaisdell, New York, 1967.
10. Knapp, R. T., Daily, J. W. & Hammitt, F. G., "Cavitation", McGraw-Hill, New York, 1970.