

수중램제트추진(Ⅱ) : 설계조건에 따른 성능특성의 고찰

김 유 택* · 이 영 호**

Underwater Ram-Jet Propulsion(Ⅱ) : Consideration on Performance Characteristics by Design Conditions

Y. T. Kim · Y. H. Lee

<目 次>	
Abstract	2. 성능특성
I. 서 론	Ⅲ. 대형램제트의 개념설계
Ⅱ. 설계조건에 따른 성능특성	Ⅳ. 결 론
1. 초기조건 및 경계조건	참고문헌

Abstract

Data for conceptual design are 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.

I. 서 론

세계각국은 치열한 기술개발을 통하여 초고속의 고부가가치선을 건조하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 따라서 미래의 선박은 속도가 빠르면서도 진동과 소음이 적어 승선감이 뛰어난 첨단기술을 바탕으로 한 새로운 설계개념을 필요로 한다. 이렇게 되면 저운임으로 대량의 여객과 화물을 운송할 수 있으며 항공

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 이공대학 기계공학과

기외도 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 초고속선을 건조하기 위해서는 무엇보다도 새로운 추진시스템의 개발이 반드시 필요하다. 수증램제트추진은 차세대의 미래형 추진방식으로서 디퓨저, 혼합실 및 노즐의 3부분으로만 간단하게 구성되어 있기 때문에 가볍고 제작이 용이하며, 공기압축기에 의해 혼합실에 분사된 기포가 노즐을 통과하면서 주변작동유체를 가속시켜 그 반동력으로 추력을 얻기 때문에 작동유체가 회전체와 접촉하지 않아 고속에서도 공동발생문제를 피할 수 있고, 출발시에는 고압의 공기를 노즐후방으로 분사하여 공기구동수이젝터 역할을 행하여 자력출발이 가능하기 때문에 항공기와 달리 별도의 보조동력장치가 필요 없다. 램제트의 성능해석을 위한 기존의 이론해석을 기액 이상류의 내부유동의 관점에서 고찰하여 제반가정을 통하여 열거한 식들과 연속방정식, 열역학 제1법칙, 오일러의 방정식, 기포의 운동방정식, Rayleigh방정식 등을 이용하여 디퓨저, 혼합실 및 노즐에 의한 추력을 산출하였고 노즐내의 유동특성과 추진효율을 산출할 수 있는 프로그램을 개발하였다(1), (2).

따라서 본 연구는 성능예측이 가능한 프로그램을 이용하여 램제트의 부착형태에 따라 선외부착형, 선내관통형 및 이상형으로 구분하여 각각의 램제트에 대해서 램제트 노즐초기단면적, 작동유체속도구배, 대기온도, 대기압력, 작동유체밀도, 분사되는 기포반경, 공기분사속도, 디퓨저 입·출구 면적비 및 질량유량비 등을 변화시켜 성능특성을 파악하였다(3). 또한 적용예로서 최대효율을 낼 수 있는 대형램제트선의 개념설계에 필요한 데이터를 제안하였다.

II. 설계조건에 따른 성능특성

1. 초기조건 및 경계조건

계산조건으로서 해수온도 293K(20°C), 해수밀도 1026 kg/m³, 대기압 1.03 × 10⁵N/m²(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 수행하였다.

소형램제트는 입구단면적 0.0022m², 작동유체속도구배 600sec⁻¹, 중형램제트는 입구단면적 0.22m², 작동유체속도구배 60sec⁻¹, 대형램제트는 입구단면적 2.2m², 작동유체속도구배 5sec⁻¹이며 기포반경은 소형램제트는 0.001m, 중형과 대형램제트는 0.01m, 공기분사속도 및 선속은 소형과 중형램제트는 각각 25m/sec, 100노트로 하였으며 대형램제트는 20m/sec, 80노트로 하였다.

소형램제트의 초기조건은 다음과 같다.

$$S_a=0.0022m^2, U_a=50m/sec \approx 100knots, T_a=293K, R_g=290J/K \text{ kg}, P_a=1.03 \times 10^5 N/m^2$$

$$\rho_w=1,026kg/m^3, q=600(sec^{-1}), R_o=0.001m, V_o=25m/sec, \phi_{di}=2, \mu=0.0015, \eta_c=0.85$$

$$\eta_{di}=0.95, C_D=2.5$$

중형램제트의 초기조건은 다음과 같다.

The Value of Y Axis

$V = V$ (m/s)	$U = U$ (m/s)
$S = S \times 10^{-4}$ (m ²)	$R = R \times 1/3 \times 10^{-4}$ (m)
$\alpha = \alpha$ (%)	$P_g = P_g \times 2 \times 10^4$ (N/m ²)
$P = P \times 2 \times 10^4$ (N/m ²)	$T_g = T_g \times 10$ (K)

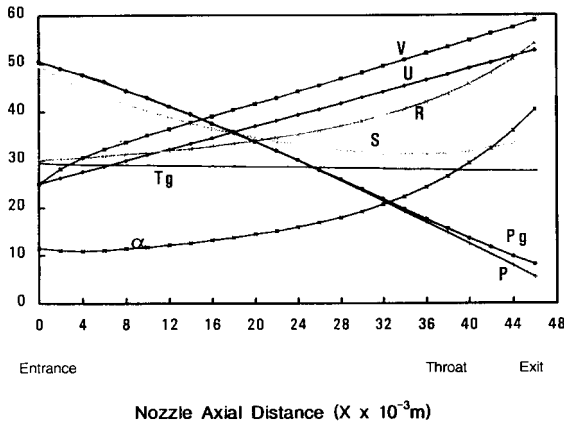


Fig. 2.2 Parameter Characteristics within Nozzle by Isothermal Process

특성을 보여줌을 알 수 있다. 기포내의 공기압력과 작동유체 사이의 차압은 단열압축과 같이 노즐입구 근방에서는 플러스 또는 마이너스이나 더 출구쪽으로 흘러가면 차압은 플러스가 되고 χ 에 비례하여 증가한다. 또한 기포내의 온도 T_g 는 등온압축으로 가정하였으므로 노즐내에서 거의 일정한 온도를 보여준다.

이때 얻어진 램제트 데이터는 다음과 같다.

압축기 구동동력 $N_{is} = 38,662W \approx 52HP$

추력 $T_{is} = 392.5N$

추진효율 $\eta_{is} = 50.8\%$

이상에서 보여주는 바와 같이 단열압축과정은 기포내의 압축열이 노즐내에서 주변 작동유체에 빼앗기므로 등온압축과정에 비해 효율면에서 불리함을 알 수 있다.

1) 부착형태와 압축과정 및 선속에 대한 성능특성

<그림 2.3>은 선외부착형, 선내관통형, 이상형의 부착형태와 압축과정 및 선속에 대한 추진효율을 나타내며 다음과 같은 경향을 보여준다.

효율면에서 등온압축이 단열압축보다 우수하고 마찰손실이 적은 선내관통형이 선외부착형보다 우수하다. 또한 노즐내에서 작동유체속도구배 q 가 일정하다고 가정하였으므로 이 때의 $P_g - P$ 의 값은 선속의 증가에 따라 커짐으로서 부족팽창이 증가하고 이로 인하여 출구에서의 작동유체속도가 감소하므로 추진효율이 서서히 낮아짐을 보여준다. 따라서 선속이 높은 경우에는 q 가 증가하기 때문에 q 를 작게 하여 노즐

이때 얻어진 램제트 데이터는 다음과 같다.

압축기 구동동력 $N_{ad} = 54,539W \approx 73HP$

추력 $T_{ad} = 422.5N$

추진효율 $\eta_{ad} = 38.7\%$

등온압축과정의 노즐길이(χ)에 대한 $U, V, S, R, \alpha, P_g, P, T_g$ 의 값이 <그림 2.2>에서와 같이 나타나며 다음과 같은 특성을 보이고 있다.

공기와 작동유체 사이의 슬립속도($V - U$)는 단열압축인 경우와 마찬가지로 노즐출구쪽으로 갈수록 증가하며 노즐단면적 S 도 단열압축인 경우와 같이 출구쪽으로 갈수록 감소하다가 최소지점을 통과한 후에 다시 증가하는 수축-확대 노즐의 형상을 보여주지만 노즐입구의 단면적은 단열압축에 비해 상대적으로 더 작아짐을 알 수 있다. 또한 보이드율 α 와 기포반경 R 도 단열압축과는 달리 계속 증가하는

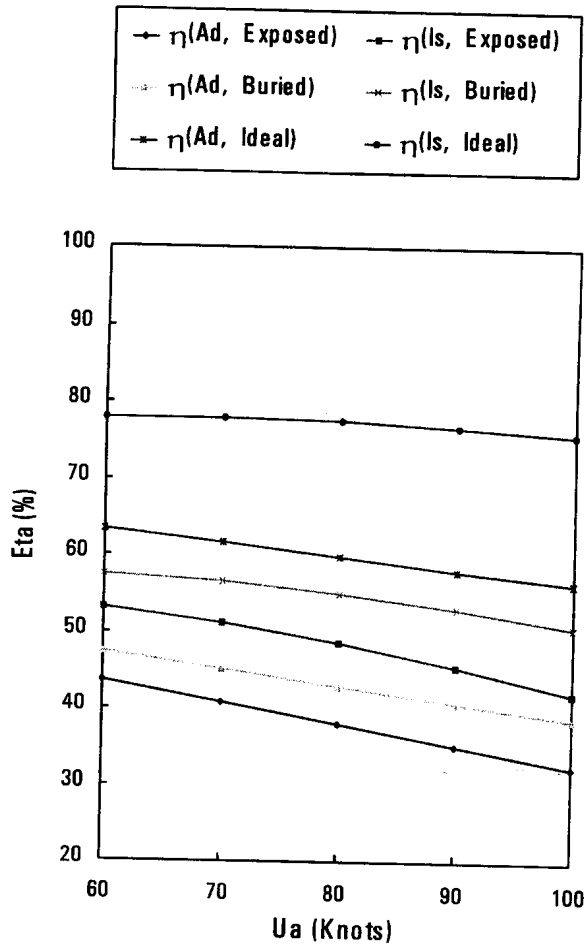


Fig. 2.3 Propulsive Efficiency for Different Types and Cycles

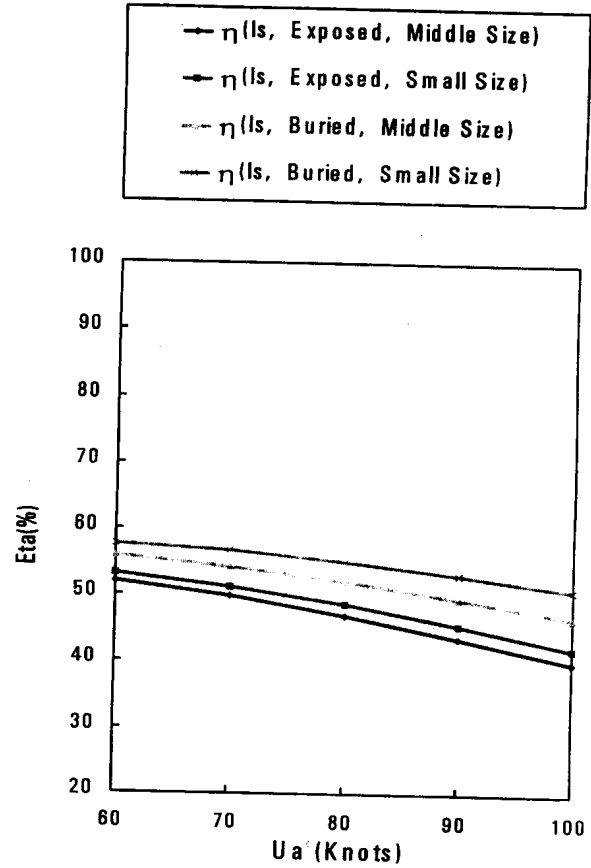


Fig. 2.4 Propulsive Efficiency for Different Types and Size

길이를 길게 하면 고속에서도 높은 효율을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

2) 램제트크기에 따른 성능특성

램제트크기의 영향을 알아보기 위해서 제2.1장의 소형과 중형램제트를 등온압축한 경우의 선내관통형과 선외부착형의 경우를 계산하였다. <그림 2.4>는 이 경우의 효율을 보여주고 있으며 두 경우에 있어서 크기의 영향은 2~3% 미만임을 알 수 있다.

<그림 2.5>는 램제트노즐 크기변화에 따른 노즐형상의 변화를 알아보기 위해서 소형램제트와 중형램제트를 선속 90노트, 등온압축 상태에서 계산된 결과를 보여준다. 소형램제트는 비교의 편의를 위해서 100배로 확대하여 그린 것이다. 두 경우에서 노즐은 유사한 형상을 나타낸다. 노즐끝부분에서 단면적에 약간의 차이가 나타나나 면적으로는 3% 이하이며 직경으로는 1.5% 이하이다. 따라서 램제트의 크기에 따른 노즐형상에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

	The Value of X Axis	The Value of Y Axis
S	$S = S \times 10^{-3}m$	$S = S \times 10^{-4}m^2$
M	$M = M \times 10^{-2}m$	$M = M \times 10^{-2}m^2$

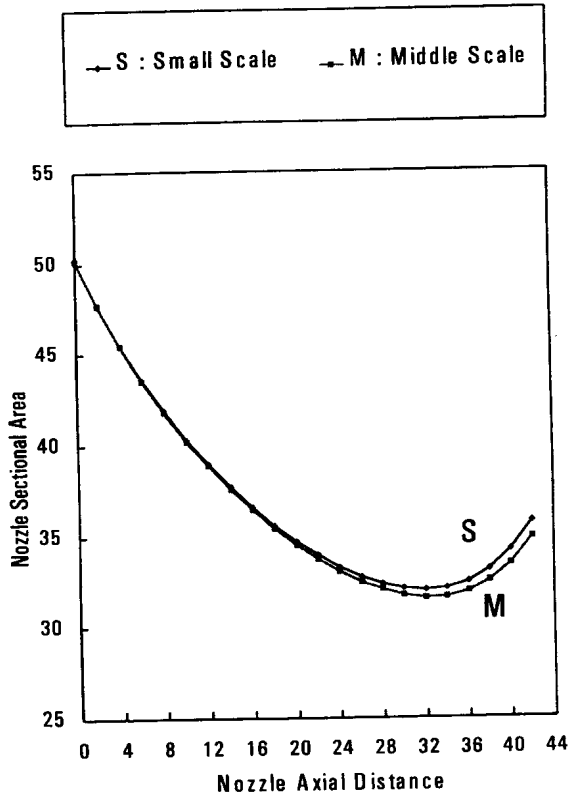


Fig. 2.5 The Effect of Scale on Efficiency

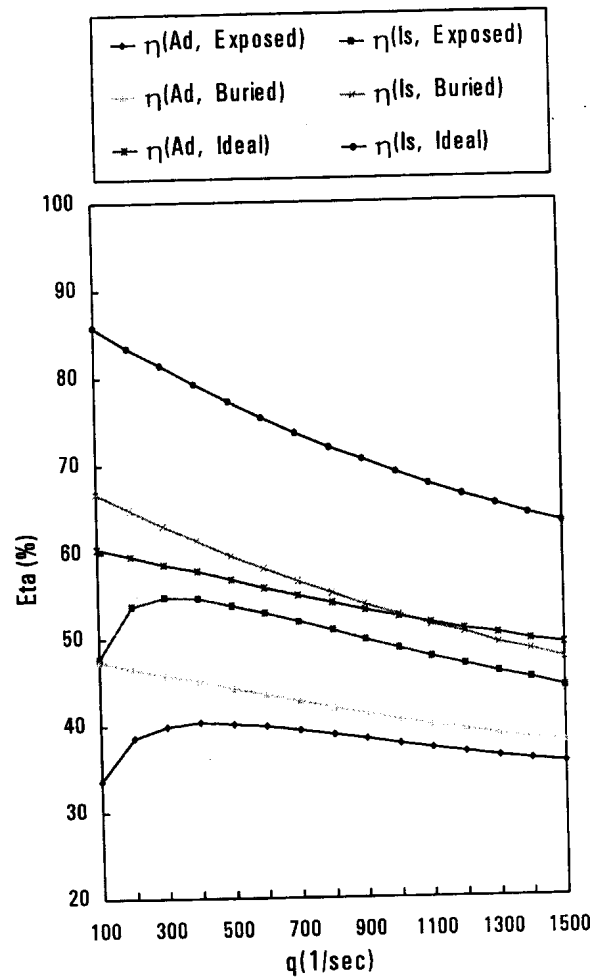


Fig. 2.6 Propulsive Efficiency for Different Water Velocity Gradient

3) 작동유체속도구배에 따른 성능특성

작동유체속도구배 또는 노즐길이가 추진효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 소형램제트의 경우에 대해 작동유체속도구배를 100에서 1500까지 100씩 증가시키므로써 노즐길이를 점점 줄여가면서 계산 하였다.

초기조건은 $\mu=0.003$, $q=100\sim 1500sec^{-1}$ 를 제외하고는 제2.1장의 소형램제트의 값과 같다.

<그림 2.6>은 q를 점차 100씩 증가시킨 경우의 효율변화를 보여준다. 이 때에는 <그림 2.3>과 마찬가지로 어느 경우에도 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 감소

함을 보여주고 그밖의 4가지 경우에는 모두 처음부터 q 의 증가와 더불어 추진효율이 현저히 감소함을 보여준다.

이러한 이유는 선외부착형의 경우에는 최대효율점인 300에서 400을 기준으로 q 가 이보다 큰 경우(즉, $q=400\sim 1500$: 노즐길이가 너무 짧은 경우)에는 노즐축을 따라 압력구배가 증가하기 때문에 슬립손실의 증가와 부족팽창의 증가로 효율이 감소하고 q 가 이보다 작은 경우(즉, $q=100\sim 300$ 인 경우 : 노즐길이가 너무 긴 경우)에는 외부마찰항력 D_f 의 증가가 슬립손실의 감소와 부족팽창의 감소로 인한 효율의 증가보다 더 크게 작용하기 때문이다. 또한 나머지 4가지 경우에는 디퓨저와 압축기효율만 고려하고 노즐길이가 증가하는데 대한 노즐내부의 마찰영향은 고려하지 않았으므로 작동유체속도구배 q 가 증가할수록 슬립손실과 부족팽창이 증가하기 때문에 추진효율이 감소한다. 따라서 보다 정확한 효율을 예측하기 위해서는 선내관통형과 선외부착형 모두 노즐내부에서의 마찰에 의한 손실을 고려하여야 하며 무엇보다도 노즐내에서 작동유체속도구배 q 가 일정하다는 가정에 대한 합리적인 규명이 필요하다.

지금까지의 결과로 램제트는 단일압축에 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. 초기조건과 경계조건은 제2.1장의 대형램제트 조건을 그대로 이용하였다.

4) 대기온도에 따른 성능특성

<그림 2.7>은 대기온도변화에 따른 효율의 변화를 보여준다. 전반적으로 추진효율이 약간 증가함을 보여준다. 이것은 대기온도가 올라갈수록 압축기 구동동력은 약간 증가 하지만 이보다 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.

5) 대기압력에 따른 성능특성

<그림 2.8>은 대기압력변화에 따른 효율의 변화를 보여준다. 전반적으로 추진효율이 매우 미소

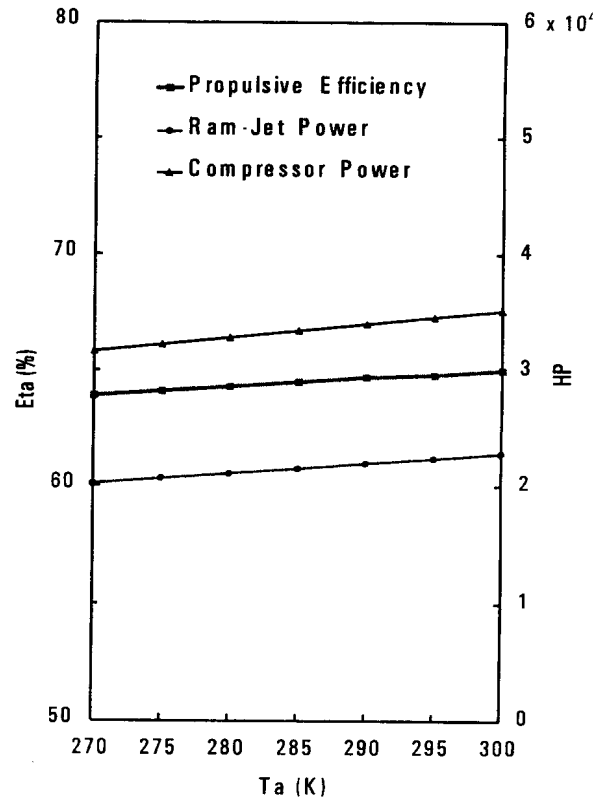


Fig. 2.7 Propulsive Efficiency for Different Ambient Temperature

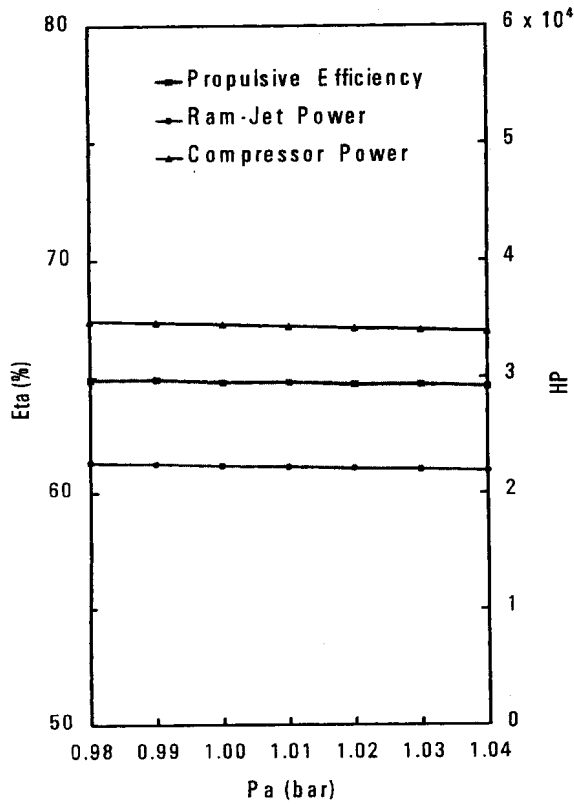


Fig. 2.8 Propulsive Efficiency for Different Ambient Pressure

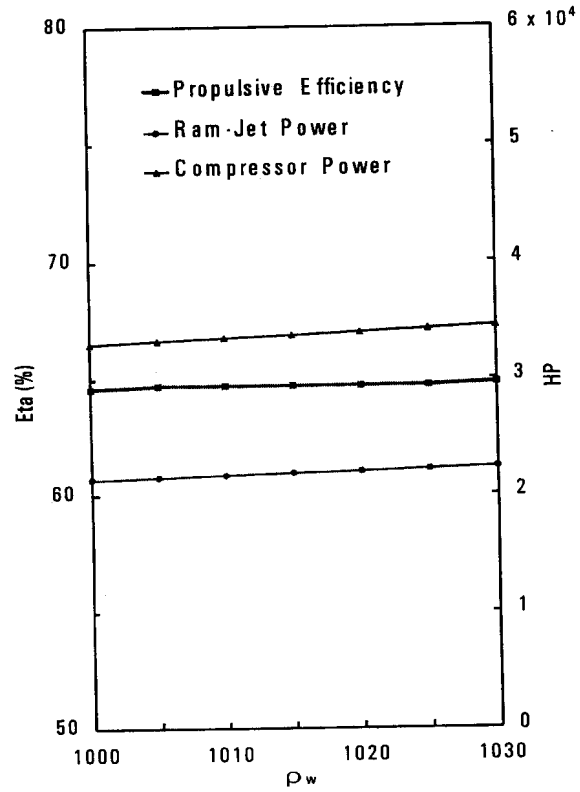


Fig. 2.9 Propulsive Efficiency for Different Water Density

하게 감소함을 보여준다. 이것은 대기압력이 올라 갈수록 압축기 구동동력은 약간 감소하지만 이보다 추력의 감소가 조금 더 크기 때문이다. 따라서 추진효율을 더욱 증가시키기 위해서는 압축기의 흡입부도 선속에 의한 동압을 램효과에 의해 정압으로 바꿀 수 있는 형상으로 만들면 상당한 효율의 상승을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

6) 작동유체밀도에 따른 성능특성

<그림 2.9>는 램제트에 의해 추진되는 선박이 담수 또는 해수에서 운항할 때 어떠한 변화가 일어나는가를 알아보기 위한 것으로서 작동유체밀도변화에 따른 효율의 변화를 보여준다. 전반적으로 추진효율이 매우 미세하게 증가함을 보여준다. 이것은 작동유체밀도가 증가할수록 압축기 구동동력은 약간 증가하지만 이보다 추력의 증가가 크기 때문이다. 그러나 효율에 있어서 작동유체의 밀도변화는 별다른 영향이 없음을 알 수 있다.

7) 기포반경에 따른 성능특성

<그림 2.10>은 분사되는 기포반경의 변화에 따른 효율의 변화를 보여준다. 기포반경이 0.001m에서

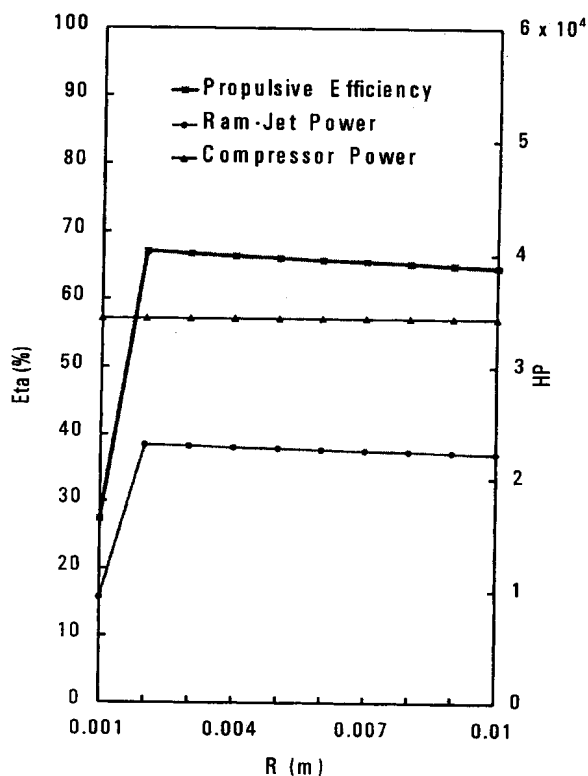


Fig. 2.10 Propulsive Efficiency for Different Bubble Radius

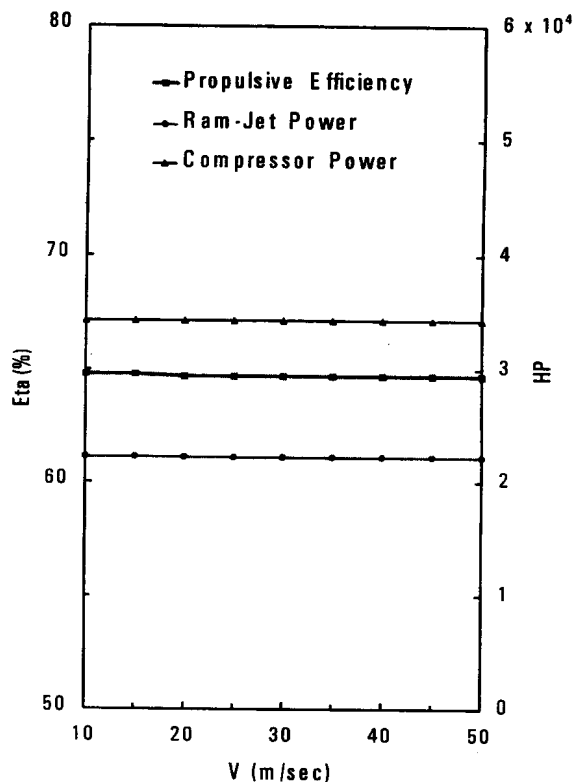


Fig. 2.11 Propulsive Efficiency for Different Gas Velocity

0.002m까지 추진효율이 급격히 증가하다가 0.002m에서 최대추진효율을 보여주고 다시 약간씩 감소함을 보여준다. 이것은 기포반경이 너무 작으면 기포압력과 작동유체 사이의 차압($P_g - P$)이 노즐입구부 근처에서 플러스와 마이너스가 반복되어 기포압력이 너무 빠르게 대기압력에 도달하여 노즐길이 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.

8) 공기분사속도에 따른 성능특성

<그림 2.11>은 공기분사속도에 따른 효율의 변화를 보여준다. 전반적으로 추진효율이 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 이것은 공기분사속도가 바뀌더라도 질량유량비가 일정하기 때문이다. 이렇게 공기분사속도가 효율에는 거의 영향을 미치지 못하나 너무 낮으면 노즐의 입구단면적이 증가해야 하므로 램제트가 커지게 되며 출발시 이젝터효과에 의한 자력출발의 특성에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

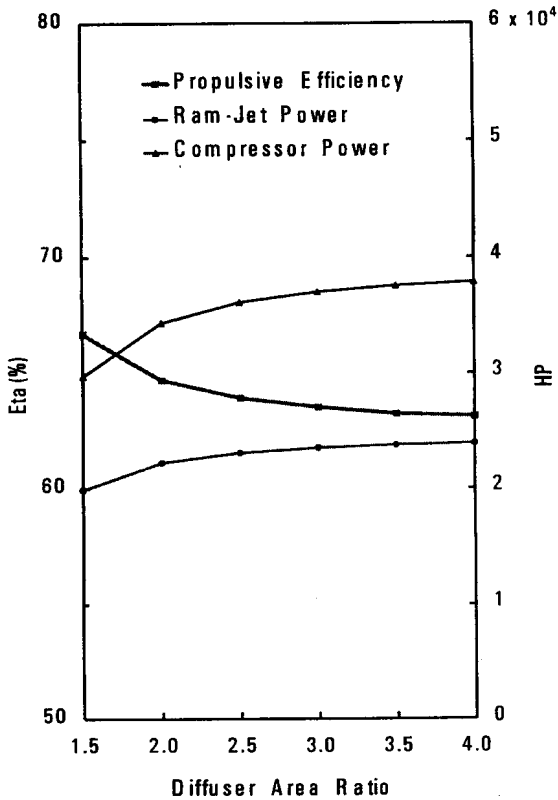


Fig. 2.12 Propulsive Efficiency for Different Diffuser Area Ratio

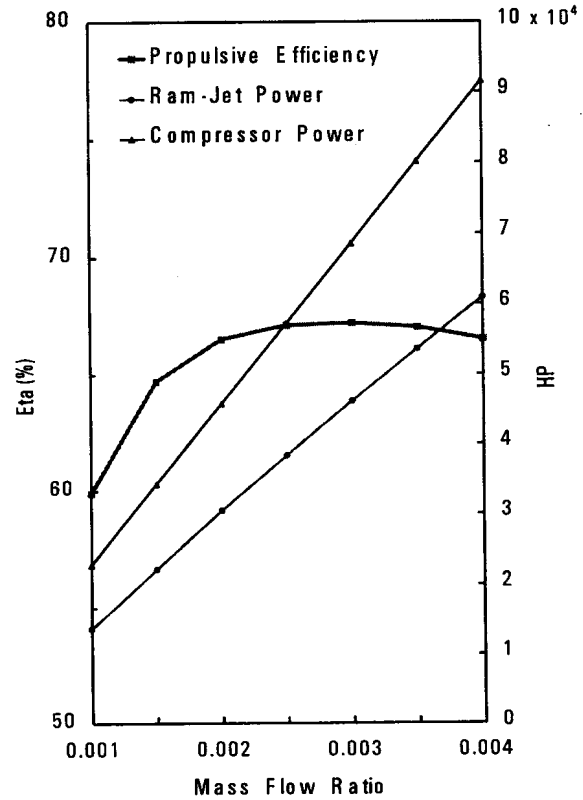


Fig. 2.13 Propulsive Efficiency for Different Mass Flow Ratio

9) 디퓨저 입 · 출구 면적비에 따른 성능특성

<그림 2.12>는 디퓨저의 입 · 출구 면적비에 따른 효율의 변화를 보여준다. 전반적으로 면적비가 커질수록 추진효율이 감소함을 보여준다. 이것은 면적비가 늘어날수록 추력의 증가에 비해 압축기 구동동력이 크게 증가하기 때문이다. 한편 본 연구에서는 디퓨저효율을 95%로 일정하게 부여하였으나 이러한 면적비의 변화가 디퓨저효율에 미치는 영향을 동시에 검토할 필요성이 있다.

10) 질량유량비에 따른 성능특성

<그림 2.13>은 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 최대추진효율을 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.

Ⅲ. 대형램제트의 개념설계

앞장에서 단일압축과정과 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 단일공기압축과정을 이용함으로써 어느 정도의 성과를 거둘 수가 있다. 전체의 형상을 간단하게 하기 위하여 2개의 중간냉각기를 갖는 3단 압축으로 가정하였다. 이 중간냉각기는 내부마찰손실이 작게 설계되어야 한다.

<그림 3.1>은 약 42,000 마력을 낼 수 있는 80노트급 초고속 램제트선의 일반 배치도를 보여준다. 80노트의 속력을 얻기 위한 이상적인 대형램제트의 초기조건은 제2장을 기준으로 다음과 같이 하였다.

$$S_a = 2.2m^2, U_a = 40m/sec \approx 80knots, T_a = 293K, R_g = 290J/K \text{ kg}, P_a = 1.03 \times 10^5 N/m^2$$

$$\rho_w = 1,026kg/m^3, q = 5(sec^{-1}), R_o = 0.002m, V_o = 20m/sec, \phi_{di} = 1.5, \mu = 0.003, \eta_c = 0.85$$

$$\eta_{di} = 0.95, C_D = 2.5$$

얻어진 램제트 데이터는 선외부착형의 경우에는 64.6%의 추진효율과 $7.17 \times 10^6 N$ 의 추력(동력으로 환산하면 38,438 HP)이 얻어졌으며 선내관통형에서는 70.6%의 추진효율과 $7.84 \times 10^6 N$ 의 추력(동력으로 환산하면 42,042 HP)이 얻어졌다.

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

Ⅳ. 결 론

선외부착형, 선내관통형 및 이상형의 램제트에 대해 공기를 압축하는 방법, 선속, 크기 등을 변화시켜가

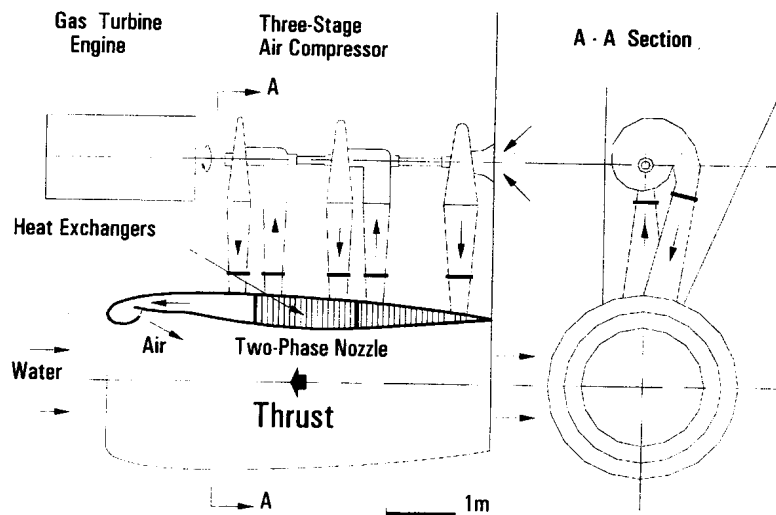


Fig. 3.1 Conceptual Design of Large Water Ram-Jet

며 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.

또한 추진효율을 향상시키기 위하여 선내관통형 대형램제트를 기본모델로 하여 대기온도, 대기압력, 작동유체밀도, 기포반경, 공기분사속도, 디퓨저 입·출구 면적비, 질량유량비 등이 추진효율에 어떠한 영향을 미치는가를 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 이젝터 효과에 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) 김유탉, 이영호, 수중램제트추진(I): 성능해석 프로그램의 개발, 한국해양대학교부설 해사산업연구소 논문집, 1995
- 2) 김유탉, 김춘식, 이영호, 초고속선용 수중램제트 추진의 성능특성, 대한조선학회 춘계연구발표회 논문집, 1995, pp. 264 - 269.
- 3) 김유탉, 김춘식, 이영호, 수중램제트의 설계조건에 따른 성능특성, 대한조선학회 추계연구발표회 논문집, 1995, pp. 387 - 392.