

PIV에 의한 수중램제트의 기초실험

양창조*, 김춘식**, 최민선***, 김진구****, 이영호*****

Fundamental Experiment of Underwater Ram-jet by PIV Measurement

C.J. Yang*, C.S. Kim**, M.S. Choi***, J.G. Kim****, Y.H. Lee*****

Abstract : A fundamental experimental study for a substitute proposal to super-speed craft propulsion system called underwater ram-jet propulsion by high pressure air ejection as driving force was investigated. For basic study of effect of ram-jet propulsion performances, simple underwater ram-jet flow field was established and PIV(Particle Image Velocimetry) method was adopted to analyse the jet-induced flow appearing at ram intake, mixing chamber and nozzle. Some flow dynamics relating to the high-speed ejector effect were discussed for the basic understanding of the ram-jet propulsion principle.

Key words : Underwater Ram-Jet(수중램제트), High-Speed Craft(초고속선), PIV(입자영상유속계), AOM(광음향 변조기), Image Intenifier CCD Camera(영상강화 카메라)

1. 서론

물류수송의 고속화가 크게 요구될 것으로 전망되는 21세기에는 특히 대량의 물동량을 취급하는 해상 수송분야에 있어서 이를 위한 혁신적인 수송방식의 실현이 요청된다. 이와 같은 배경으로부터 기존의 추진체계와는 다른 새로운 수중램제트(underwater ram-jet)의 방식이 원리적으로 초고속선의 추진장치로서 대안이 될 수가 있다.

수중램제트는 새로운 선박추진 시스템으로서 일찍이 Witte⁽¹⁾에 의해 기본적인 성능해석이 이루어졌으며, 물분사 추진^{(2) (3)}과 비교해서 임펠러와 같은 고속 회전부가 없기 때문에 캐비테이션 문제에서 완전히 해방될 수 있다.

그림1에서와 같이 수중램제트는 크게 나누어서 램흡입부(ram intake), 혼합실(mixing

chamber) 및 노즐의 세부분으로 구성되어 있다. 램흡입부에서 작동유체는 압력이 증가하며, 혼합실에서는 공기압축기로부터의 고압공기가 이와 같이 증압된 작동유체에 분사되며 혼합실을 나온 기액이상류는 노즐을 통과하면서 대기압까지 팽창을 하여 작동유체를 고속으로 가속시켜 노즐출구에서 추력(thrust)을 얻는 방식이다.

한편, 이와 같은 램제트의 원리를 수중고속추진에 이용하려는 시도는 1940년대 후반부터이며 이에 관한 이론해석 및 기초 실험결과가 보고되어 있다. Gongwer⁽⁴⁾는 수중제트추진방식에 대하여 강력한 열원을 갖는 추진제를 이용하여 해수를 증기화하여 분사시키는 원리를 제안하였고, Tsutahara 등⁽⁵⁾은 고압공기 및 2차원의 평면 노즐을 이용하여 노즐목 하부에서 고압의 가스를 분사시키는 추진방식으로 노즐내의 고압공기 분출상태를 관찰하고 추력발생의 메커니즘 및 그 특성에 대해 연구하였다. 또한 Lee 등⁽⁶⁾은 최적 노즐형상을 갖는 수중램제트의 추진특성에 대한 이론해석을 통해 80노트급 초고속 램제트선을 제안하였다.

이러한 배경으로부터 본 연구에서는 벽면에

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

*** 목포해양대학교 기관공학부

**** 우천신문대학 기계학과

***** 한국해양대학교 기계·정보공학부

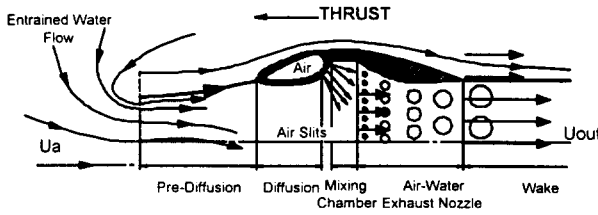


Fig. 1 Schematic Diagram of Ram-jet

고압의 공기를 분사할 수 있는 8개의 분사노즐이 설치된 원관에 대하여 45도의 각도로 분사된 고압공기가 작동유체와 혼합하여 노즐을 통과하면서 고압의 기포가 대기압 상태까지 팽창하면서 혼합유체에 속도를 증가시켜 추력을 얻는 실험장치를 구성하고, 고속유동장의 계측을 위하여 비정상 유동장의 동시다점 계측이 가능한 PIV 시스템을 구축하고 실험을 행하였고 램홀입부, 혼합실 그리고 노즐에서의 순간 및 평균 속도벡터, 운동에너지분포 등으로 나타내었다.

PIV 계측결과 램제트 내부에서 공기와 작동유체 사이의 슬립속도는 노즐출구쪽으로 갈수록 증가하며 또한, 임의의 순간 속도벡터를 해석함으로써 램제트유동에 관련된 유동특성을 고찰할 수가 있었다.

2. 실험장치 및 방법

그림2는 본 실험에서 채택한 실험장치의 구성도이다. 가로, 세로, 높이가 각각 약 1m인 형상을 갖는 수조를 두께 20mm인 투명 아크릴로

제작하였다. 램제트추진장치는 외경이 60mm, 내경 49mm의 원통형 투명 아크릴로 제작하였다.

조명으로서 5W출력의 연속광 Argon-Ion 레이저(Coherent사)를 사용하였으며, 두께 2mm 내외의 2차원 시트라이트가 Fiber optic cable 및 Cylindrical lens를 통해서 유동장에 직접 조사된다. 그림3는 계측영역의 위치 및 크기를 나타내고 있다. 계측영역(Region A, B, C)의 크기는 각각 49×70 mm이다. 혼합실(Mixing Chamber)은 45도 간격으로 8개소에서 공기를 분사하였다. 고압공기로는 압축기(Hyosung사, 2.2kw 3HP)를 사용하여 압축공기를 혼합실에 공급하였다. 실험조건으로서 1, 3, 그리고 5 kg/m³의 압축공기를 혼합실에 분사하여 유동의 가시화를 통한 제반 유동특성을 고찰하였다.

사진1은 PIV 실험장치를 보여주고 있다. 유동장의 유체입자의 거동을 가시화하기 위하여 추종성이 우수한 입자를 선택하여야 하며 입자의 선별은 광원과 함께 PIV계측 정도에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 수중에서는 작동수와 비중이 유사한 구형입자를 사용하며 그 크기는 계측 유동장의 공간스케일을 충분히 재현할 수 있도록 작아야 하지만 이때는 충분한 산란광을 필요로 하므로 강력한 광원이 부담이 된다. 이 실험에서는 비중이 1.02전후로서 물과 비중차가 작은 나일론12입자를 사용하였다. 유동장이 충분히 발달하면 직경 120미크론 전후의 PVC 백색 구형입자를 약 80ml 선별하여 정전기를 방지하기 위하여 계면 활성제를 소량 혼합한 다음 수조상부에서 주사기로 투입하였다. 레이저 광원으로 계측영역에 sheet light를 형성하면 산란광이 발생하므로 sheet light가 형

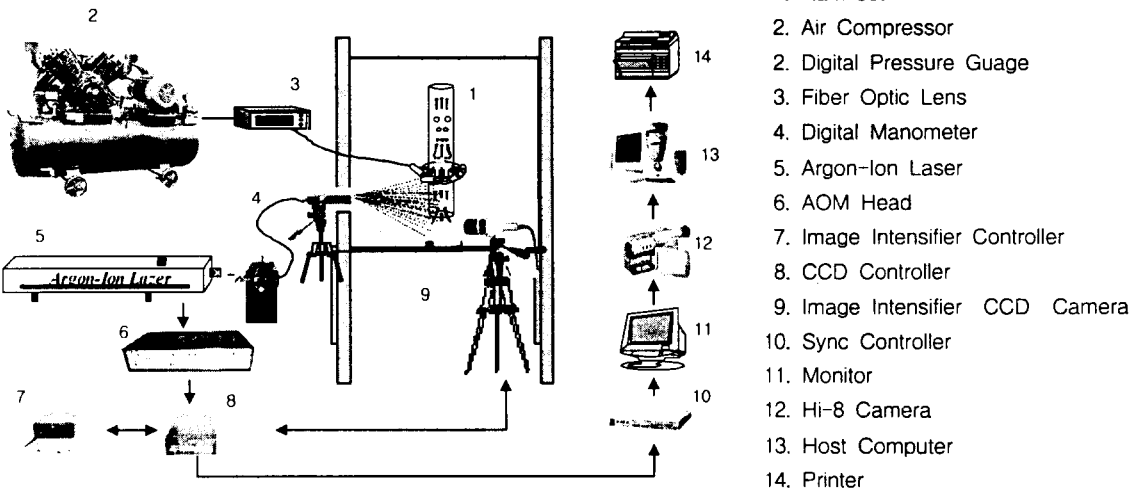


Fig. 2 Schematic Arrangement of PIV System

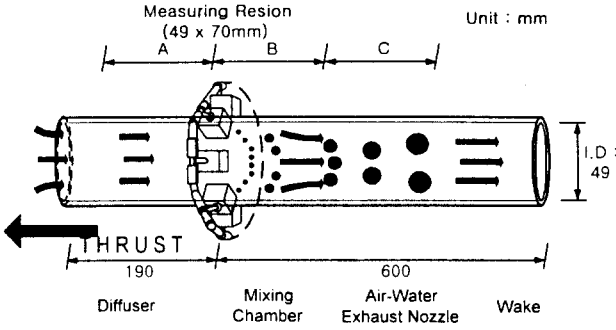


Fig. 3 Definition of Measuring Resion

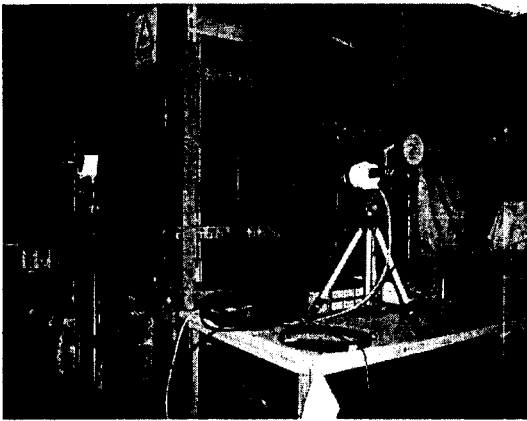


Photo 1 View of Experimental Equipment

성된 부분을 제외한 수조의 외벽, 원관을 지지하는 스테인레스 본체를 검은 색 코팅지로 부착하여 산란광을 없앴고 계측영역에 나타날 수 있는 잡음성분을 최소로 하였다.

유동장의 기록을 위하여 AOM(Acousto-Optical Modulator, Kanomax사, $10\mu s$), 영상강화 CCD카메라(Image Intensifier CCD Camera, Hamamatsu사, C4273MOD)등 관련 시스템을 배치하였다. NTSC방식의 TV주사에서 1초간 영상은 30프레임의 연속화면으로 구성되어 있고 1프레임은 1/60초간의 시간간격을 갖는 짝수 피일드와 홀수 피일드의 화면으로 구성된다. 펄스발생기는 가시화 조명을 위한 레이저의 빛을 단속적으로 제어하고, 그 신호만큼 영상강화 CCD 카메라에 축적하여 기록하므로 실제 Hi-8mm에 기록되는 기산간격은 펄스발생기에 의하여 제한된다. 그림4는 펄스간격과 펄스폭의 설정관계를 보여주고 있다. 고속유동장에서는 가시화를 위하여 분포시킨 추적입자의 이동

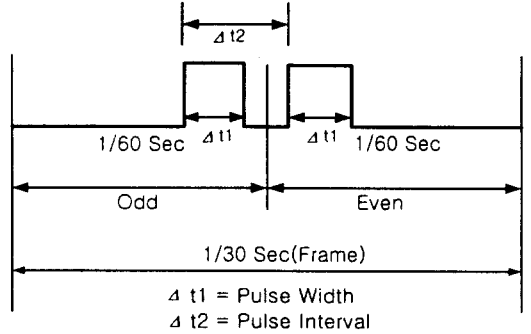


Fig. 4 Video Signal and Pulse Arrangement

변위가 매우 커진다. 이 때에는 펄스간격을 작게 하여야 하므로 홀수 피일드와 짝수 피일드의 미소시간 동안의 이동한 거리를 8~12pixel 전후가 되도록 최적의 펄스간격과 폭을 경험적으로 구하였다. 이 경우에는 펄스폭의 감소로 인한 조명과 탐색반경내의 유효입자의 수의 감소로 인한 에러성분의 증폭은 영상강화 CCD카메라를 이용하였으며, 이 장치의 게인을 조절하여 적절한 영상의 획득이 가능하도록 하였다.

3. PIV Identification

본 가시화 실험에 있어서는 먼저 유동장을 형성하고, 추적입자를 유동장에 주입시킨 다음에 적당한 조명을 제공한다. 영상강화 카메라로 촬영된 영상은 Hi-8mm 캠코더에 기록되고 저장된 유동장은 다시 재생과정을 거쳐 영상처리 장치에 입력된다. 영상처리장치로는 이미지 그레버(DT3155, 640×480 pixel, B&W)를 CPU(400MHz)의 호스트 컴퓨터에 내장하여 사용하였다. 이 연구에서 사용된 DT3155보드는 영상 저장장치로부터 공급된 유동장의 아날로그 신호를 2차원의 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하며 각종 전처리 조작은 전용의 처리 소프트웨어(CACTUS 2000)를 이용하였다.

이미지 보드로부터 디지털 화상정보를 공급받아 전처리과정으로 잡음제거, 회전보정 등을 거친다. 전처리과정이 끝나면 계산영역을 설정하고 장애물 처리를 하여 계조치상호상관법⁽⁷⁾을 이용한 동일입자 확인을 위하여 탐색반경을 결정한 다음 유동장의 분위기에 따라 상관영역을 설정하였다.

영상을 기록할 때에는 유동장과 카메라의 위치를 조정하여 수평을 유지하여야 하지만 대부

분 카메라 축을 중심으로 약간의 회전각도를 갖게된다. 따라서 기록된 영상은 전체적으로 회전된 상태이므로 회전된 각도만큼 모든 픽셀좌표를 변환하여야 한다. 따라서 잡음이 제거된 영상에 대해서 계측영역내 직선윤곽선을 이용하여 영상강화 카메라의 위치에 대한 회전보정을 행하였다. 전처리가 끝나면 계산영역을 설정하고 장애물처리를 하여 계조치 상호상관법을 이용한 동일입자 확인을 실시하였다. 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상의 계조치에 대하여 식(1)과 같은 상호상관계수를 이용하여 최대상관계수의 위치를 속도벡터의 종점좌표로 정하는 방법의 원리를 이용하였다.

$$C_{fk} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (1)$$

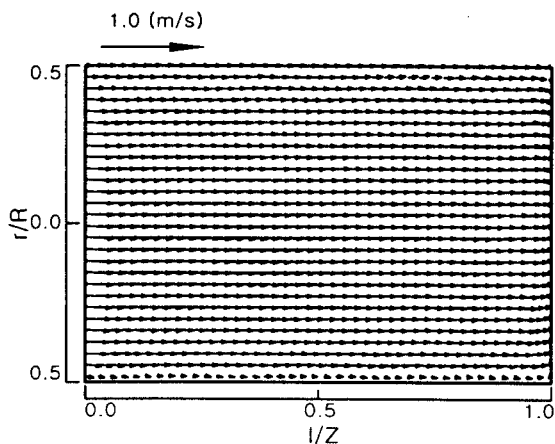
단, f_i , g_i 는 상관영역내의 각 pixel의 계조치를 의미하여 $\bar{\quad}$ 는 평균을 뜻한다. 계조치 상호상관법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 신뢰성뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 전 계측영역에서 속도벡터의 격자수는 40×40 이고 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 8픽셀이다. 상관영역의 크기는 40픽셀이며 하나의 순간유동장에 대한 처리시간은 펜티엄 기종(CPU 400MHz)에서 약 20~30초가 소요되었다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러성분인 이상치를 판별하여 파오벡터를 제거하는 에러제거, 격자점 재배치, pixel 단위를 m/sec 단위로 바꾸는 단위환산, 각각의 실험을 통해 얻은 데이터를 합치는 합성등을 실시하였다. 에러에 의한 이상치는 속도 발산치에 의한 검출방법으로 자동 에러처리를 한 후 대화형의 화면처리로 제거하였고 유효한 동일입자만으로 속도벡터를 구하였으며 제거된 벡터는 주위의 값으로부터 보간하여 도시하였다.

4. 결과 및 고찰

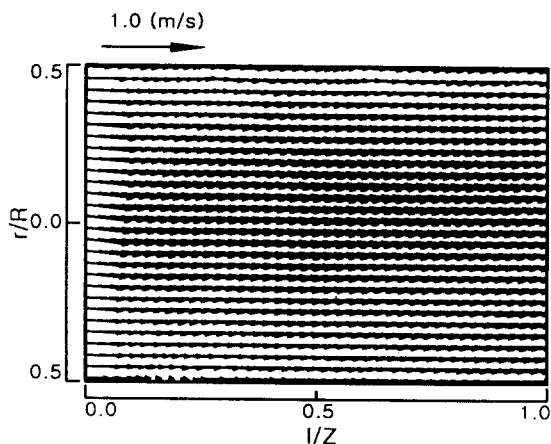
수중램제트는 선박의 추진기중 전형적인 내부류(Internal flow)의 영역에 속하며 이것은 디퓨저, 혼합실 및 노즐을 포함한 나셀관 내부에서의 압축공기의 혼입에 따른 기액이상류

(Air-liquid two-phase flow)의 특성이 지배적이다. 디퓨저의 형상을 갖는 램흡입부를 통하여 흡입되는 작동유체는 정압이 증가하고 증압된 작동유체는 혼합실에서 고압으로 분사된 압축공기와 난류혼합작용을 일으키며 혼합체의 평균밀도는 낮아진다. 혼합실에서 나온 기액이상류는 노즐을 통과하면서 고압의 기포가 대기압 상태까지 팽창하면서 주변유체에 일을 행하며 동시에 혼합유체의 속도를 증가시킨다. 노즐에서의 출구속도가 입구부보다 빠르므로 전방으로의 추력이 발생한다. 그림5(a)는 램흡입부(Resion A), (b)는 노즐(Resion C)에서의 평균속도분포를 나타낸다. 그림6(a),(b)는 혼합실(Resion B)에서의 각 분사압력에 대한 순간의 속도분포를 나타낸다. 3kg/cm^2 보다 5kg/cm^2 에서 상대적으로 큰 속도분포를 나타내며, 흡입부에서의 혼합실로 유도되는 작동유체는 공통적으로 분사노즐의 직하보다는 노즐의 연장선에서부터 일정거리가 떨어진 지점에서 상대적으로 크고 불규칙적인 공간적 특성을 나타내고 있으며, 고압공기의 분사속도가 증가함에 따라서 혼합거리도 증가함을 알 수 있다. 이것은 또한 램제트의 성능해석에 대한 기액이상류의 내부유동관점에서 압축공기의 분사속도가 증가할수록 작동유체의 유입속도의 증가와 함께 속도구배를 증가시키면서 추진효율을 증가시킬 것으로 판단된다. 위와 같은 램제트 유동장을 공학적으로 응용하기 위한 핵심적인 것 중의 한가지로 기액이상류의 혼합작용을 이해하는 것은 매우 중요하고 혼합실내의 고압의 압축공기의 분사와 함께 압력강하와 기액이상류가 어떻게 거동하는지 정량화하기 위해서는 보다 정량적인 계측이 수반되어야 한다고 보여진다.

그림8은 혼합실(Resion B)에서의 각 분사압력에 대한 운동에너지 분포를 나타낸다. 운동에너지 분포는 속도분포에서 알 수 있는 바와 같이 구동노즐의 연장선에서 크게 나타나고 있다. 전체적으로 계측영역의 관점에서 살펴볼 때 고압공기의 분사압력이 감소하는 노즐의 출구 근방으로 갈수록 운동에너지 분포가 벽면에 완만한 포물선으로 접근하고 있다. 운동에너지는 속도 및 압력구배에 의하여 압축공기와 작동유체 사이에 불규칙적으로 일어나는 전단혼합영역에서 에너지의 교환을 파악할 수 있게 한다. 또한 혼합실로 분사된 고압공기는 노즐 출구부근에서 복잡한 유동영역을 갖고 있기 때문에 추력을 위한 에너지 변환 효율은 이상적인 것보다 감소할 것으로 판단된다.

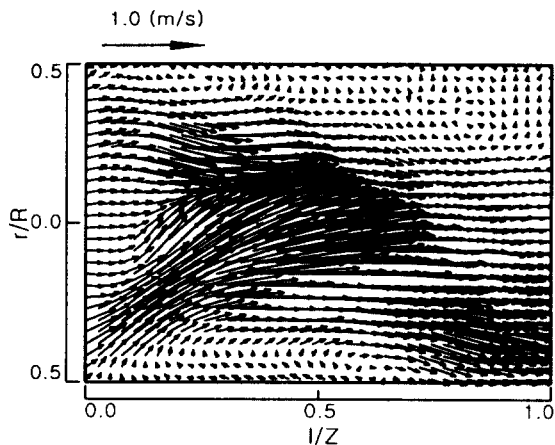


(a) Ram Intake(3kg/cm²)

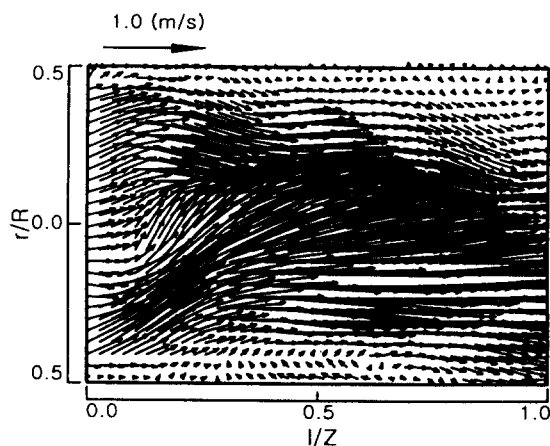


(b) Nozzle(3kg/cm²)

Fig. 6 Time-mean Velocity Distribution

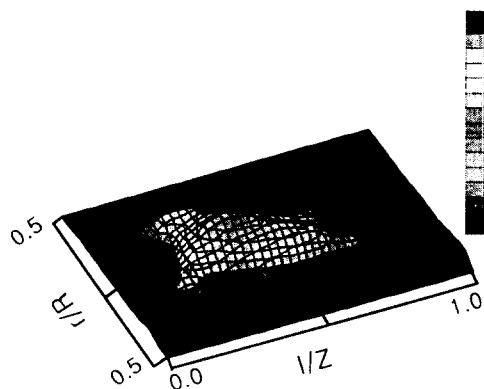


(a) Mixing Chamber(3kg/cm²)

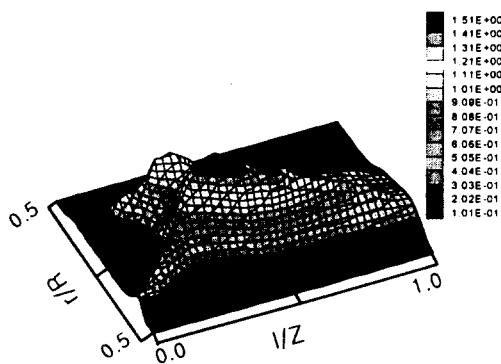


(b) Mixing Chamber(5kg/cm²)

Fig. 7 Instantaneous Velocity Distribution



(a) Mixing Chamber(3kg/cm²)



(b) Mixing Chamber(5kg/cm²)

Fig. 8 Kintic Energy Distribution

5. 결 론

차세대의 선박 추진장치로서 고압의 공기를 추진동력으로 이용하는 램제트에서 디퓨저에 의한 정압 형성 및 기포의 팽창을 응용하여 추력을 발생하는 노즐에서의 기본적인 특성을 실험적인 방법으로 검토하고, PIV를 적용하여 램제트의 유동특성의 알아보기 위하여 실험장치를 구성하였다.

각 계측영역의 관점에서 살펴볼 때 램흡입부에서 유입된 작동유체는 혼합실에서의 고압공기와 상호작용 그리고 노즐부에서의 팽창공기에 따른 추력에 영향을 미치는 작동수로의 운동량 전달과 혼합영역에서 에너지의 교환 등을 파악할 수 있었다.

향후 수중 램제트에 대한 보다 체계적인 성능예측을 위해서는 제반 난류혼합손실을 최소화하는 혼합실 및 노즐내부유동의 확립과 이에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) J. H. Witte, "Predicted Performance of Large Water Ramjet", AIAA Paper No.69-406, 1969.
- (2) 이영호, 박명규, "물분사추진", 대한조선학회 지 제29권 제2호, 1992, pp.32-46.
- (3) 이영호, "물분사추진의 특성 및 개발 현황", 대한 조선학회 추계연구발표회의 논문집, 1992, pp.26-31.
- (4) C. A. Gongwer, "Some Aspects of Underwater Jet Propulsion System", ARS Journal, December 1960, pp.1140-1148.
- (5) M.Tsutahara, M.Sakamoto, T.Kimura and K. Hashimoto, "A Study of Ship of Ship Propulsion Equipment Driven by High-Pressure Gas", Proc. 3rd JSME-KSME Fluids Eng. Conf., 1994, pp.288-293.
- (6) 강호근, 김유택, 이영호, "최적 노즐형상을 갖는 수중램제트의 추진성능에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제34권 제4호, 1997, pp.42-52.
- (7) 최장윤, 이영호, "PIV에서의 계조치 상호상관법 개발", 대한기계학회 춘계학술대회, 논문집(II), 1996, pp.396-400.