

수중 추진제 (W. P) 를 사용한 수중엔진에 관한 연구

인하대학교

채재우 (기계공학과 교수)
문종인 (대학원)
이정석 (로켓연구회)

V. Shmelev (Institute of Chemical Physics RAS)

서 론

1. 연구배경

세계 2차대전 이후 어뢰의 고속화에 대한 관심과 연구가 활기를 띠기 시작하였고 이러한 연구는 기존의 로켓 기술에 힘입어 급진전이 가능하였다.

미국의 자료를 참고하면 60 ~ 70 년대에 이르러 수중에서 고속으로 운동을 가능하게 하는 혁신적인 기술인 수중에서의 Cavitation [공동(空洞)화] 기술이 제시되었으나 90년대 초 까지도 U. S. A와 NATO에서는 이러한 기술의 완성된 성과를 거두지는 못했다. 그러나 소련은 어뢰의 속력을 200~300 mile/hour까지 향상시키는 성과를 거두었다고 한다. 이러한 미국의 객관적 자료와 비교해보면 러시아는 미국이나 일본, 나토보다 앞선 성과를 이루었고 이로써 러시아의 어뢰는 속도에 있어서 어느 것 보다 우수하다고 할 수 있다. 이것은 러시아 수중로켓이 특수한 방식임에 기인한다. 물의 저항

감소를 위한 설계와 특수한 추진제를 사용한 고효율의 엔진이 그것이다. 일반적으로 수중로켓에 있어서 물과의 마찰 항력을 감소시켜 고속화를 시키기 위한 연구의 방향은 두가지로 요약할 수 있다. 물과의 마찰감소를 위한 주 해결책은 앞서 제시된 어뢰 주변의 Cavitation 이다. 따라서 첫번째는, 수중에서 어뢰가 진행되는동안 효과적인 Cavitation을 위해 발생시키는, 어뢰표면 주위를 둘러 싸는 거품의 흐름에 관한 연구이다. 두번째는 어뢰표면에 거품을 효과적으로 발생시키기 위한 방법이다. 우선 거품, 즉 가스가 어뢰표면 내부에서 외부로 방출되기 위해서는 내부압이 외부압보다 커야한다. 만일 내부압이 외부압과 같다면 거품은 방출되지 못하게 된다. 러시아에서는 이와는 다른 방식으로 공동화를 기하였다. 러시아의 어뢰는 선두부에있는 특이한 형상의 Cavitator에서 만드는 거품속에서 진행되는 형태를 보인다. 어뢰의 표면과 물 사

이에 존재하는 거품층의 두께는 특이하게 설계된 어뢰의 형태와 가스의 방출에 좌우된다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 이러한 고속 어뢰는 로켓 엔진에 의해 추진된다. 또한 이러한 수중엔진에 사용하는 연료의 산화제는 해수(海水), 즉 물이다.

근거리용 무유도 수중로켓의 고속화 는 Cavitation을 위한 공기방울의 효과적 분출법의 개발과 더불어 발전하였으며 이런류의 수중로켓의 속도는 수백 m/sec에 달한다. 미국의 자료로써 직경 150mm의 수중 로켓이 물속에서 330m/sec로 진행할 수 있다는 것을 알 수 있지만 러시아의 근거리 수중로켓의 속도는 이를 능가할 수 있다. 러시아는 Al, Mg, 기타의 기본성분에 다른 성분과의 조합에 관한 연구를 발달 시켜 왔고, 열공정과 로켓의 고속화를 위한 실제적인 발사에 대한 연구가 진행되어 왔다. 또한 수중추진제, 시스템, 그리고 엔진에 관한 전반적인 시험과 측정을 위한 실험장치와 방법도 고안되었다. 이와 같은 엔진의 성능은 근본적으로 고체추진제 로켓모터나 액체추진제 로켓엔진 보다 뛰어나다.

상기한 바 이러한 고효율의 수중엔진에 의해 추진되는 고속의 어뢰가 최소의 저항 그리고 안정된 진행과 유도성을 가지게 하는 핵심적 과제는 성능 좋은 HRE (Hydro Reactive Engine) 과 그 연료 및 Cavitation을 위한 효과적인 거품의 분출이다.

러시아에서는 이 문제를 해결하여 개발을 완료하였다.

2. 수중추진제

기존 어뢰등의 추진은 현재까지 다양한 방법들이 이용되어 왔다. 그 중에 대표적인 예로 전기모터나 액체연료를 사용하여 한개 또는 두개의 프로펠러로 추진되는 방법이 사용되어 왔다. 이에 대해 근래에 선진국에서의 연구동향은 금속이 고함유(70-80%)되어 있는 고체추진제에 의해 어뢰를 추진하는 방법에 대한 것이며, 이 연구결과에 의

해 기존의 상용 로켓의 고체추진제와는 달리 금속성분이 많이 포함되어 있는 수중 고체추진제가 어뢰에 적용되고 있다. Table. 1은 각 추진방식에 따른 특성과 속도에 관한 것이다. 여기서 수중추진제를 사용한 엔진의 성능을 볼 수 있다.

수중추진제의 원리

수중추진제는 소모성 수중분사식엔진의 추진제로 산화제와 연료를 포함하는 추진제의 성격도 있지만 수중의 물을 주산화제로 사용하므로 연료적인 성격도 크다고 할 수 있다.

수중추진제의 주성분은 Al 또는 Mg, Li, B, Zr 등과 같은 금속 분말이며 이러한 금속과 물이 반응하기 위해서는 고온상태로 환경을 조성해 주어야 한다. 만일 이러한 환경을 기계적 장치에 의해 조성하려 한다면 구조가 복잡하여 비경제적이며 신뢰도가 저하된다.

본 방식은 수중 연료 자체에 적합한 특성을 부여하고 장치의 단순화를 기하여 상기의 문제들을 해결한 것이다. 추진제의 연소반응은 1차 2차에 걸쳐 나타나며 1차 반응은 금속 연료의 용융과 효과적인 비산을 위한 고체추진제의 연소과정이며 2차 반응에서 추진력을 발생한다. Fig. 2는 수중추진제 방식의 어뢰의 원리도이다.

1차 반응

Al-F 폴리머

고분자에 포함된 F성분은 활성산화제로 작용하며 고에너지를 함유하므로 효과적이다. 여기서 Al은 10 ~ 80%(질량) 까지 함유된다.

연소속도는 F-폴리머 중의 수소함유량과도 관련되며 F함유량이 클수록 연소온도가 높

Table. 1 어뢰의 추진방식과 특징

속도 (m/s)	동력원	Engine Type	추진방식
20 이하	Battery Fuel Cell	Electric Engine	Propeller
30이하		Piston Engine	Propeller
35 이하	Combustion Chamber Liquid Propellant	Turbine	Propeller
	Combustion Chamber Liquid or Solid Propellant		Jet Nozzle
90이하	Combustion Chamber Solid Propellant	Turbo- Ventilated Engine	Water Jet
100이상	Combustion Chamber Water Propellant	Single Pass W.P Engine	Gas Jet

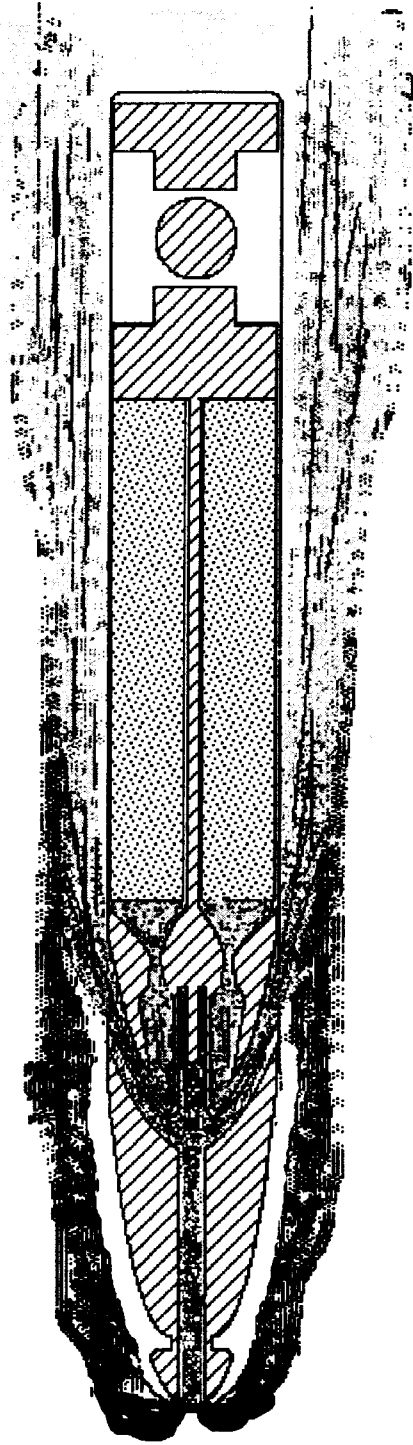


Fig.1 수중추진제 사용어뢰의 수중진행 모습

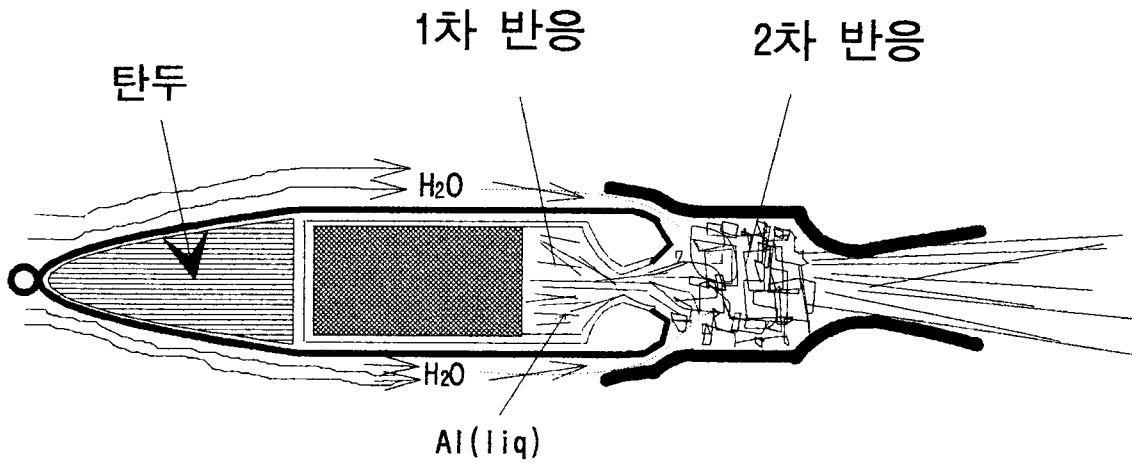


Fig. 2 수중추진제를 사용한 어뢰의 원리도

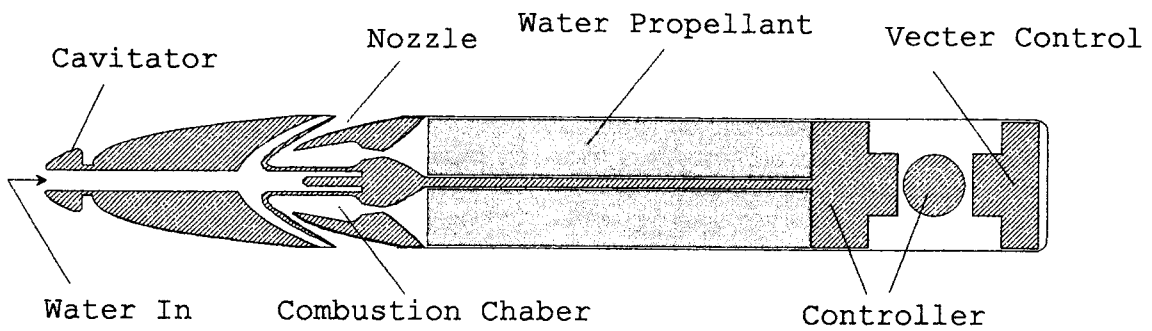
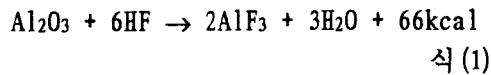


Fig.3 수중추진제를 사용한 어뢰의 구조도

고 연소속도도 증가한다. 압력지수 n 값의 범위는 0.2 ~ 0.5, 금속연료 함유량 $C_m = 50 \sim 55\%$ (완전반응비 $C_m=25\%$) 일때 연소속도 최대

연소온도는 F-폴리머 : Al = 30% : 70% 일때 측정값 1270°C ~ 1650°C

산화막 제거 : 고분자 분해시 생성되는 HF는 Al입자 표면의 산화막을 제거한다. 고분자에 H₂가 1%만 함유되어도 70%이하가 함유된 Al의 산화막을 모두 제거할 량이 된다.



입자의 비산 : 금속의 고함유로 예상되는 용융응집 현상은 연소생성물인 Al₂C₃가 금속입자 표면에 흡착되어 입자간 접촉과 결합을 막는다.

붕소의 함유

F-폴리머와 Al에 붕소(B) 함유: B의 함유량은 60%이하여야 하며 Al:B = 50%:50% 일때 연소속도는 1 ~ 15mm/sec범위이며 압력지수 n 은 0.15 ~ 0.60의 범위이다.

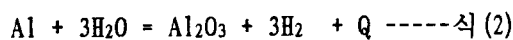
붕소(B)는 Al이나 Mg에 비해 반응력이 약한 것을 실험을 통해 알 수 있다.

2차반응

Al과 물의 반응

1차 반응에서 용융, 비산으로 활성화된 Al과 외부로부터 유입된 해수와 반응하여 더욱 안정한 물질이 되면서 열에너지를 방출하는 과정이다.

다음의 화학식은 그 반응이다.



이러한 반응으로 발생한 열은 2차 반응으로 2차 연소실의 압력은 급상승하여 노즐 출구에서 강한 분사가 일어나게 하는 원동력이 된다. 용융 Al과 물이 반응비는 2차 반응에 있어서 중요하며 식(2)에 의한 완전반응비는 다음과 같다.

완전 반응식에 의한 질량비 ($K_m = H_2O\text{질량} / Al\text{질량}$)

$$K_m = gH_2O/gAl = (3 \times 18) / (2 \times 27) = 1$$

식 (3)

Fig. 4는 K_m 에 따른 연소실의 반응온도이다.

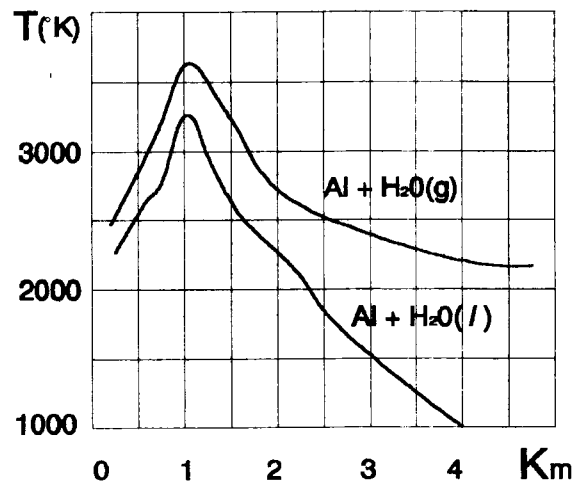


Fig. 4 연소실온도- 질량비

Fig. 5는 K_m 에 따른 반응물질의 분압이다.

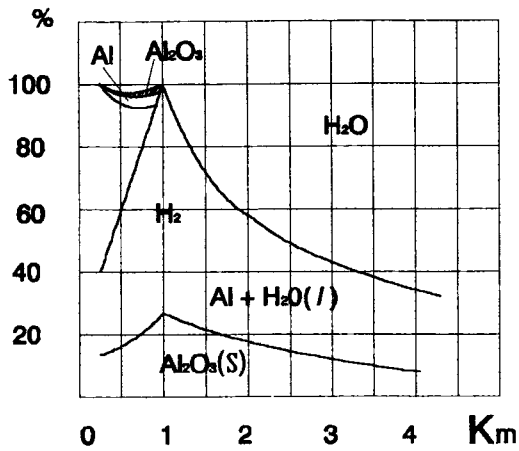


Fig. 5 연소생성물의 분압

수중추진제의 비추력

일반적으로 로케트의 비추력은 2000 N. S/kg - 4800 N. S/kg의 범위로 고체추진제는 보통 2500N. S/kg이하의 값을 가지며 액체산소와 액체수소의 혼합물은 4800N. S/kg에 달한다. 그러나 본방식의 경우는 7500N. S/kg로 성능 좋은 액체 추진제의 비추력을 증가한다. 이것은 산화제의 대부분은 수증의 물로써 충당하기 때문이다.

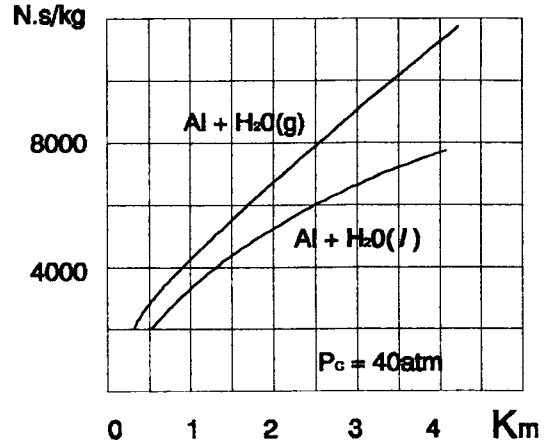


Fig. 6 본 수중추진제의 비추력

- 부피 비추력

수중에서는 엔진추력에 대한 저항요소로 물의 저항이 큰 비중을 차지하며 추진체의 중량은 상대적으로 중요하지 않다. 수중추진제의 중량은 총중량의 50% 이하를 차지하는데 연료의 중량에 대한 비추력 보다는 부피에 대한 비추력이 더 유용하다. 부피의 증가는 물의 저항증가로 나타나기 때문이다. 입도가 $30\mu m$, $3\mu m$ 인 혼합 알루미늄의 밀도는 $2000kg/m^3$ 이므로 부피 비추력은 2배인 15000N. S/l 가 된다.

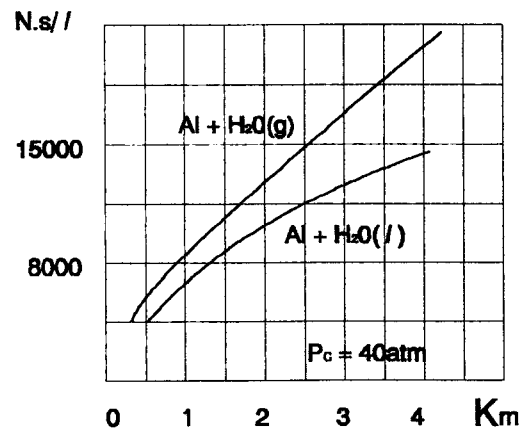


Fig. 7 부피 비추력

본 론

그래프

1. 실험장치

본 연소속도측정장치는 연소용 bombe에 고압 질소로 압력을 가하여 각 압력에 따른 연소 속도를 측정할 수 있도록 제작되었으며 연소속도의 측정은 압력센서와 팽센서를 사용하여 서로 비교, 검토할 수 있도록 하였다.

특성치가 주어진 추진제를 연소시키는 실험을 통해 각 센서 신호의 신뢰성이나 신호의 분석 방법, 기타 본 측정기기의 특성상 고려해 주어야 할 사항들과 장단점을 알아보고 여기서 얻은 자료를 토대로 미지의 추진제의 특성을 알아내거나 새로운 추진제의 개발, 성능향상을 위한 측정기로 신뢰할 수 있도록 하기 위한 필수적인 기초 연구라 믿는다.

Fig. 8은 연소속도 측정장치를 나타낸 것이며 다음은 각부분에 대한 설명이다.

- 1) 고압질소 2) 레귤레이터 3) 흡기밸브 4) 압력계
- 5) 연소용기 ①개방용 손잡이
②기밀 링: 우레탄 링
- 6) 압력 센서 7) 팽센서 8) 팽신호 처리 회로 9) 배기밸브
- 10) 슬라이더스 11) 접화 스위치 12) 니크롬선 13) 추진제
- 14) Thermocouple 5) Thermocouple Meter
- 16) 오실로스코프

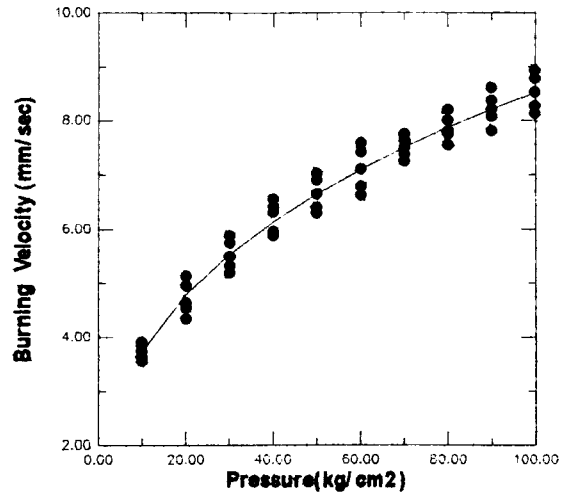


Fig. 9 수중추진제의 압력-연소속도 그래프

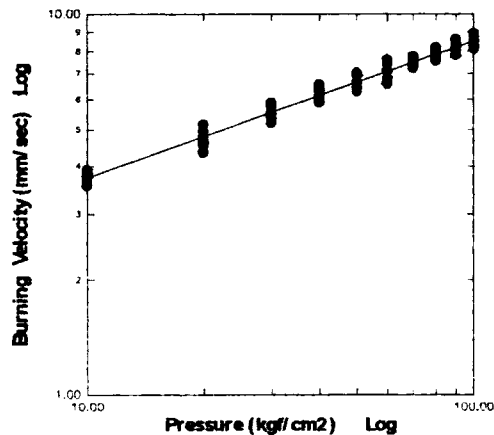


Fig. 10 수중추진제의 압력-연소속도 그래프 (Log)

수중추진제의 연소특성 분석

시료 및 측정값

Al 70% 와 테프론 30%를 성분으로 하는 수중추진제에서 다음과 같은 연소특성을 얻었다.

계산결과

$$a = 1.1650 \quad n = 0.3578$$

실험장치

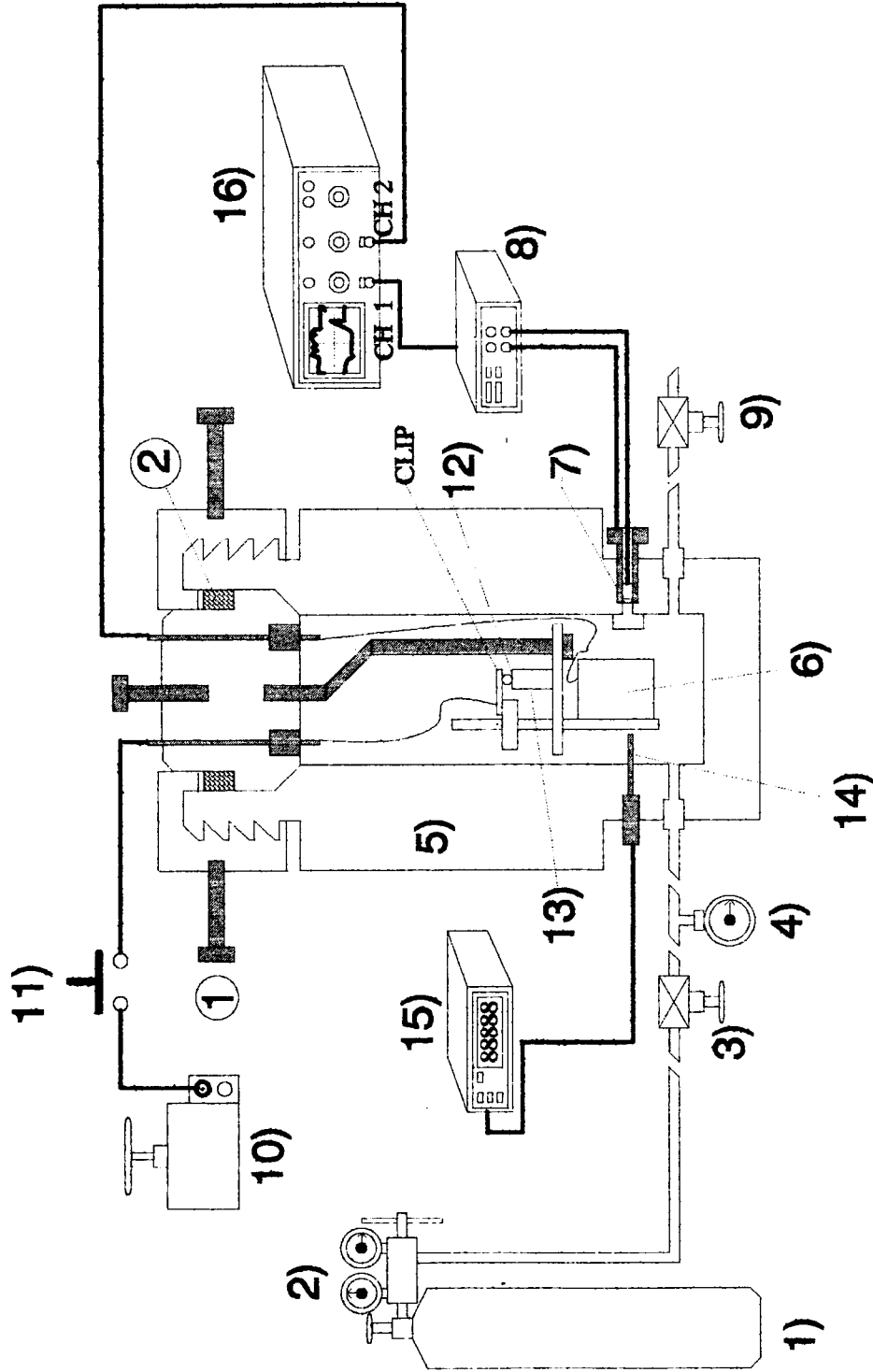


Fig. 8 실험장치의 전체도

결 론

- 수중추진제에 대한 전반적인 개념 및 일반 고체추진제와의 공통점 및 차이점을 검토하였다. 특히 수중추진제의 1차 반응시의 연소특성은 일반 고체추진제와 같은 개념이다.

- 수중추진제의 압력지수는 0.2~0.5의 범위이다. 실험결과 수중추진제의 압력지수 n 값은 0.3578로 나타났고 압력계수 a 값은 1.695로 70 kg/cm²의 압력하에서 7.5mm/s의 연소속도를 가지므로 적합하다고 할 수 있다.

- 본 연구는 수중추진제를 사용한 고속어뢰 개발을 위한 전체의 일부이지만 그 가능성을 평가하는데 있어 매우 중요한 과제이다. 연구 수행중 수집한 자료와 러시아 'Region'의 책임자의 방한 강연회를 통하여 고속 추진어뢰에 관한 가능성 볼 수 있었다. 정책적인 지원과 러시아와의 공동연구가 이루어 진다면 이러한 어뢰의 개발 및 보유가 어렵지 않다고 본다.

차후의 진행방향

- 수중추진제의 연소특성에 관한 보다 전문적인 연구가 필요하다. 특히 2차반응에 대한 1차반응의 역할에 착안하여 연소율 이외에 효과적인 비산에 관한 연구와 물과의 원활한 반응을 위한 수중추진제 자체의 성분 및 화학적 특성에 관한 연구를 요한다.

- 알루미늄 분말의 입도에 따른 연소특성 변화.

- 엔진 설계의 필수 과제인 보다 다양한 성

분에 의한 연소속도 변화에 관한 실험적 자료 확보

- 수중추진제 자체의 기계적 강도에 관한 연구

Reference

1. Merrill K. King, "Erosive Burning of Composite Solid Propellants", AIAA/SEA Joint Propulsion Conference, Las Vegas, Nev, July 25~27, 1978

2. N.Kubota, H. Okuhara, "Burning Rate Temperature Sensitivity of HMX Propellant", AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Huntsville Al., June 16~18, 1986.

3. S.D.Heister, R.J Davis, "Predicting Buning Time Variation in Solid Rocket Motors", Sept 1990, Journal of Propulsion & Power

4. 민경주, 이수용, 손원경, 홍성완, '과학 관측용 로켓용 고체추진제 개발', 1992, 항공우주 학회지.

5. 채재우, 문종인, 이정석, '고체추진제 연소속도 측정장치 보정에 관한 연구', 1994, 11, 추진공학회.