

# 터보펌프 Cavitation 성능시험기 개발 및 성능시험에 관한 연구

손동기\* · 김춘택\* · 윤민수\* · 차봉준\* · 김진한\* · 양수석\*

## Development of Turbopump Cavitation Performance Test Facility and the Test of Inducer Performance

Dong Kee Sohn, Chuntak Kim, Minsoo Yoon, Bongjun Cha, Jinhan Kim, Sooseok Yang

**Key Words** : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Cavitation(공동화),  
Hydraulic performance(수력성능)

### Abstract

A performance test facility for turbopump inducer cavitation was developed and the inducer cavitation performance tests were performed. Major components of the performance test facility are driving unit, test section, piping, water tank, and data acquisition and control system. The maximum of testing capability of this facility are as follows : flow rate - 30kg/s; pressure - 13 bar; rotational speed - 10,000rpm. This cavitation test facility is characterized by the booster pump installed at the outlet of the pump that extends the flow rate range, and by the pressure control system that makes the line pressure down to vapor pressure. The vacuum pump is used for removing the dissolved air in the water as well as the line pressure.

Performance tests were carried out and preliminary data of test model inducer were obtained. The cavitation performance test and cavitation bubble flow visualization were also made. This facility is originally designed for turbopump inducer performance test and cavitation test. However it can be applied to the pump impeller performance test in the future with little modification.

### 1. 서 론

본 성능시험기는 현재 한국항공우주연구원에서 민군겸용기술개발 사업으로 수행하고 있는 로켓 엔진용 산화제 펌프개발 및 터보펌프 핵심부품 성능시험 과제의 일부로서 터보펌프용 인듀서의 수력 및 캐비테이션 성능특성을 시험하기 위하여 개발되었다.

고압펌프 임펠러에서는 높은 원주속도로 인하여 공동화 현상이 매우 쉽게 일어나게 되며 이를 방지하기 위하여 주 임펠러 전방에 인듀서를 장착함으로써 정압상승을 통한 공동화 현상의 발생이 최대한 억제되도록 한다. 액체로켓의 경우

터보펌프에서 발생하는 공동화 현상으로 인하여 진동발생 및 구조적인 문제를 초래하기도 하며 토출압력의 불안정으로 인한 연소불안정까지 야기한다.

액체로켓용 터보펌프 인듀서에 대한 일반적인 사항은 Jakobsen<sup>(1)</sup>에 의해 잘 정리되어 있으며 연구동향은 Lakshminarayana<sup>(2)</sup>의 검토논문에서 나타나 있다.

본 연구는 민군겸용개발과제인 산화제 펌프 개발 및 터보펌프 핵심부품 성능시험 사업의 일환으로 수행중이다. 10ton급 고압펌프에 대한 물을 유동매체로 사용하는 터보펌프 캐비테이션 성능시험기의 설계, 제작 및 고려되어야 할 시험기의 특성과 사양, 구성품 설계사양 결정과정을 다루며 이렇게 제작된 성능시험기를 이용하여 측정된 인듀서의 성능시험결과, 공동화 성능시험결과,

\* 한국항공우주연구원, 터보기계연구그룹

공동화 가시화결과를 소개하였다..

## 2. 케비테이션 시험기

성능시험기는 크게 구동부, 시험부, 배관부 및 물저장 탱크와 제어계측부를 구성되며 Fig. 1에 나타난 기본 개념도와 같다.

시험기는 폐쇄형으로 전기모터를 이용하여 시험대상펌프를 구동하도록 되어 있다. 시험기의 사양은 본 연구의 대상인 10ton급 터보펌프를 기준으로 인두서의 경우 크기를 2배로 증가하여 시험할 수 있고 인두서와 임펠러를 함께 시험할 경우 실제 크기로 시험할 수 있도록 설계되었다. 본 연구대상 터보펌프의 산화제펌프의 설계사양과 시험모델 사양이 Table 1에 제시되었다. 시험모델 사양은 설계사양을 기준으로 상사법칙에 의하여 결정하였다.

### 2.1 시험부

인두서 펌프가 설치되어 있는 시험부의 단면형상과 각종 측정센서의 장착위치를 Fig. 3에 나타내었다. 시험부는 최대 직경이 100 mm인 인두서 펌프 및 원심형 펌프를 시험할 수 있도록 설계되었다. 시험부의 설계 조건은 최대 유량 0.03 m<sup>3</sup>/s, 최대 압력 1,500 kPa이다.

인두서의 입구부분은 실제 터보펌프에서는 축으로 연결되어 추가의 boost 인두서를 설치하도록 되어 있으나 본 연구에서는 인두서만을 시험하기 위하여 1:2 타원체를 가공하여 설치하였다. 인두서 후방 집수부 쪽에는 축에 메카니컬 씬을

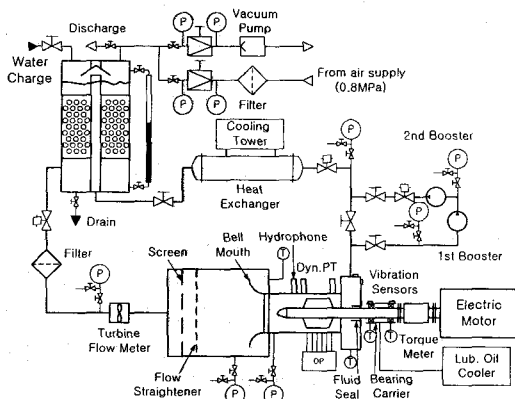


Fig. 1 Schematic diagram of the turbopump inducer cavitation test facility

설치하여 누수를 방지하였다. 본 연구에 사용된 메카니컬 씬은 선속도 35m/s의 고속 씬로서 30,000rpm까지 사용할 수 있다.

Fig. 2에 나타나는 단면도에서 중심선을 기준으로 하반부는 현재 설치되어 있는 축계이며 진동해석결과 1차 bending mode가 7,400rpm으로 나타나고 있으나 그 변위가 크지 않아 운전모드를 조절하여 10,000rpm까지 시험이 가능하지만 틱간격이 작은 경우에는 위험할 수 있다. 이에 따라 중심선 기준 상반부와 같은 축을 설계하였고 진동해석 결과 1차 bending mode는 13,000rpm에서 나타나고 있으며 이와 같은 경우 전체 시험범위에서 안정된 운전이 가능하다.

구동용 모터는 brushless DC motor로 0-10,000 rpm까지 회전수를 정밀도 1rpm에서 자유롭게 변화시킬 수 있으며 35kW의 일정 토크 운전이 가능하다. 구동용 모터와 인두서를 장착한 축 사이에는 토크미터를 설치하였다. 토크미터는 20Nm까지 측정 가능한 것으로 0.1%의 정밀도를 가지며 비접촉식이다.

정체실에서 측정된 압력이 차압측정시의 기준

Table 1 Design parameters of the real and test model inducer and impeller

| Real Model       |                   |         |           |
|------------------|-------------------|---------|-----------|
|                  | unit              | Inducer | Impeller  |
| Liquid density   | kg/m <sup>3</sup> | 1,110   | 1,110     |
| Inlet tip radius | mm                | 49      | 44        |
| Flow rate        | m <sup>3</sup> /s | 0.0229  | 0.0229    |
| Pressure rise    | Pa                | 460,000 | 9,480,000 |
| Required power   | W                 | 14,200  | 278,000   |
| Rotational speed | rpm               | 50,000  | 50,000    |
| Test Model       |                   |         |           |
| Liquid density   | kg/m <sup>3</sup> | 998     | 998       |
| Inlet tip radius | mm                | 98      | 88        |
| Rotational speed |                   | 10,000  | 10,000    |
| Flow rate        | m <sup>3</sup> /s | 0.0366  | 0.0366    |
| Pressure rise    | Pa                | 73,500  | 1,517,000 |
| Required power   | W                 | 3,270   | 64,000    |
| Rotational speed |                   | 6,000   | 6,000     |
| Flow rate        | m <sup>3</sup> /s | 0.0220  | 0.0220    |
| Pressure rise    | Pa                | 26,500  | 546,000   |
| Required power   | W                 | 706     | 13,800    |
| Rotational speed |                   | 4,000   | 4,000     |
| Flow rate        | m <sup>3</sup> /s | 0.0147  | 0.0147    |
| Pressure rise    | Pa                | 11,800  | 243,000   |
| Required power   | W                 | 209     | 4100      |

압이 되며, 압력분포를 나타낼 때 P09위치는 입구 기준압이 되며 P10위치에는 Kulite센서를 원주방향으로 6개 설치하여 회전 공동화 관련 데이터를 측정할 수 있도록 하였다. P09의 상류에는 hydrophone을 설치하여 초기 공동화 공기방울의 형성을 포착할 수 있도록 하였다. 향후 LDV나 3공 pitot tube를 이용하여 인듀서 출구의 유동분포를 파악할 수 있도록 인듀서 출구에는 블레이드 높이만큼의 공간을 축방향으로 확보하였다. 또한, 인듀서 출구에서 콜렉터까지는 지나친 면적 변화에 따른 유동의 재순환을 방지하기 위해서 유동 단면적이 일정하게 유지되도록 설계하였다. 콜렉터에서는 원주 방향으로 균일한 압력분포를 유지시키기 위해 동압이 전압의 2% 이하가 되도록 설계하였고, 출구 배관도 90도 간격으로 4개소에 설치하였다.

## 2.2 시험기 구성

본 연구에 사용된 시험기는 Fig. 3와 같이 폐쇄 회로로 구성되었다. 시험기 배관은 지상에서 0.8m에 위치하며 4인치 배관으로 설치되었다.

본 시험기는 0.9 톤 용량의 탱크에 저장된 물을 순환하여 사용하며 진공 펌프 및 압축공기를 이용하여 탱크 상부를 차지하는 공기의 압력을 변화시켜 전체 배관내 물의 압력을 조절하다. 본 시험기의 압력조절범위는 진공에서 8기압까지 가능하다. 탱크상부의 공기와 하부의 물이 이루는 자유표면이 시험부에 미치는 압력을 최소화하기 위해 탱크 내부에 4장의 다공판(plate)을 90° 간격으로 설치하였다. 시험부로 공급되는 배관은 탱크 바닥면에서 285mm에 위치하며, 탱크로 유입되는 배관은 탱크의 하부에서 공급되어 배관을 통해 탱

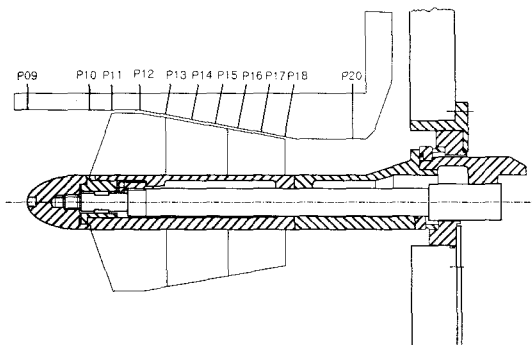


Fig. 2 Test section detail drawing with pressure measurement position

크상부의 cone에 분사됨으로써 자유표면으로 균일하게 떨어지도록 구성되었다.

탱크에서 공급된 물은 압력조절밸브와 필터를 거쳐 유량계를 통과한다. 유량이 측정된 후 물은 안정실로 들어가서 유질이 정류된 후 벨마우스를 거쳐 시험부로 유입된다. 100 $\mu$ m의 입자가 통과할 수 있는 크기를 가지는 필터를 유량계 전방에 설치하였고, 유량 측정에는 터빈 유량계가 사용되었으며 최대 270  $m^3/hr$ 의 용량을 가진다. 유량계 전후에는 유량계에서 요구하는 최소 직관부(전방 10d, 후방 5d)이상을 유지하였다.

안정실의 단면적은 안정실에서의 유속이 주 유속의 10% 이내가 되도록 배관단면적의 16배가 되도록 설계/제작하였으며, 확관부 직후에 내경 10mm의 구멍을 갖는 다공판(perforated plate)을 설치하였으며 이후에 Mitsubishi flow conditioner를 설치하여 유질을 제어하였다. 안정실 내부의 물은 KS 규격의 벨마우스를 통하여 시험부로 공급된다. 이때 벨마우스에 설치된 정압탭을 이용하여 유량을 측정할 수 있도록 보정하여 사용하였으며 시험중에 터빈 유량계의 측정값과 항상 비교되도록 구성되었다.

시험부를 나온 물은 flexible tube를 지나서 부스터 펌프로 들어가거나 부스터 펌프를 바이패스하여 배압조절밸브를 거친 후 열교환기를 지나 탱크로 다시 유입된다.

본 연구에서는 인듀서를 시험하였으므로 설계점에서 인듀서의 압력상승은 Fig. 4와 같이 배관

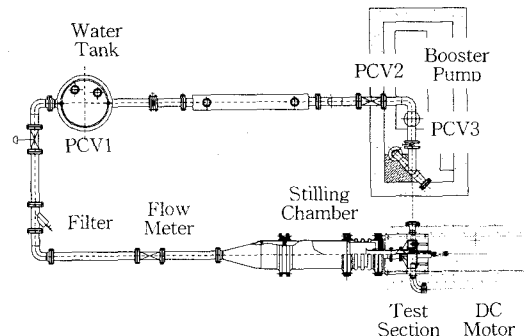


Fig. 3 Turbopump inducer cavitation performance test facility layout

전체의 압력손실에 비하여 작으므로 부스터 펌프를 사용하여 Fig. 5와 같이 NPSH(Net Positive Suction Head)여유를 가지고 설계점에서 시험이 가능하도록 하였다. 부스터 펌프는 인듀서와 부스터 펌프 사이의 배관 손실과 부스터 펌프의 NPSH<sub>re</sub>(NPSH required)를 고려하여 지하 3m 위치에 설치하였다. NPSH<sub>a</sub> (NPSH available)와 NPSH<sub>re</sub>사이의 관계는 Fig. 5와 같이 설계유량에서 2.3m의 여유를 갖도록 설계되었다.

본 시험기에는 2대의 부스터 펌프가 사용되었는데, 1단 부스터 펌프는 설계유량에서 양정 13m로 선정되었으며 2단 부스터 펌프는 인라인 펌프로 양정 40m로 선정하였다. 그 이유는 1단 부스터 펌프의 NPSH<sub>re</sub>는 1m이며, 2단 부스터 펌프의 NPSH<sub>re</sub>는 3.4m로서 1단 부스터 펌프를 고양정으로 선정할 경우 1단 부스터 펌프의 NPSH<sub>re</sub>가 증가하여 NPSH의 마진이 감소하므로 2단 부스터 펌프에서 대부분의 압력이 상승하도록 설계하였다. 부스터 펌프 출구에는 부스터 펌프 유량을 조절하기 위하여 배압 조절 밸브를 설치하였다.

각종 펌프 및 배관의 손실에 의하여 온도가 상승되므로 탱크 직전에 수냉식 열교환기를 설치하여 시험중의 온도상승 효과를 배제하였다. 셀-튜브방식의 열교환기를 역류형(counter flow)으로 설치하였으며 이 열교환기는 30,400 Kcal/hr의 용량을 가진다.

### 2.3 제어 및 계측부

제어부에서는 압력조절 밸브 3개와 구동모터 속도 제어를 하도록 되어 있다. Analogue out board를 써서 밸브의 경우 전류를 출력하여 제어하고 구동모터속도는 전압을 출력하여 제어한다.

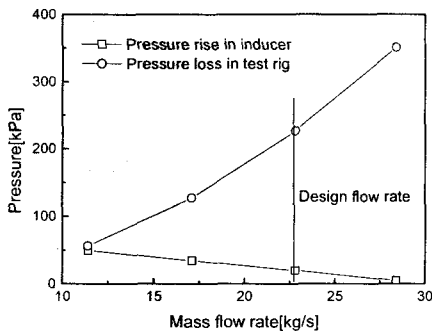


Fig. 4 Pressure losses in pipes

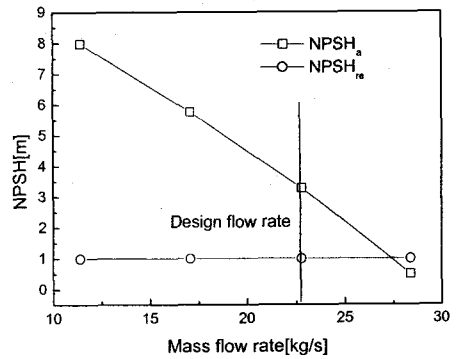


Fig. 5 The variation of the NPSH for primary booster pump

계측부는 크게 저속 데이터 획득장치(SDAS)와 고속 데이터 획득장치(DDAS)로 구분되어진다. SDAS에서는 성능시험에 필요한 데이터를 얻고 아울러 시험기의 운용상태를 확인해 줄 수 있도록 되어 있으며 DDAS에서는 캐비테이션 시험시 주파수 해석 등에 필요한 데이터를 얻을 수 있다. 전체적인 구성을 Table 2에 나타내었다.

## 3. 성능시험

### 3.1 인듀서 수력시험

성능시험 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었

Table 2 Channel specification of the data acquisition system

|                      |  | Measuring item        | No. of channels |
|----------------------|--|-----------------------|-----------------|
|                      |  | Pressure              | 11              |
|                      |  | Temperature           | 6               |
|                      |  | Water tank level      | 1               |
| SDAS<br>(HP34970)    |  | Flow rate             | 1               |
|                      |  | Vibration             | 4               |
|                      |  | Torque                | 1               |
|                      |  | Rotational speed      | 1               |
|                      |  | Control valve opening | 3               |
|                      |  | Dynamic pressure      | 6               |
| DDAS                 |  | Vibration             | 1               |
|                      |  | Hydrophone            | 1               |
| Control<br>(NI-6704) |  | Control valve         | 3               |
|                      |  | Rotational speed      | 1               |

다. 시험기의 특성상 동압을 측정을 하지 못하므로 정압상승량을 사용하여 양정계수를 나타내었으며 효율특성에서도 정압상승으로부터 계산된 효율을 사용하였다. Fig. 6에 Brennen<sup>(3)</sup>의 손실이 없는 경우에 대한 성능식을 실선으로 함께 나타내었다. 실선으로 나타낸 양정계수는 전압상승에 대한 성능식이므로 동압상승분 만큼의 차이를 보이게 된다. 유량이 큰 경우는 점성손실의 부분이 미약하여 잘 일치하며 유량이 작아질수록 손실이 커져서 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 팁 간극의 경우 실제 설계 사양은  $\delta/h = 0.029$ 이며 시험에 사용된 모델의 경우 0.035로 다소 증가하였으며 이것의 효과로 인하여 유량이 작은 경우에 손실이 더욱 증가한 것으로 보여진다. 팁 간극의 효과는 이 외에도 공극화에도 매우 큰 영향을 미치며 추후 팁 간극의 변화에 대한 연구를 수행할 예정이다. Fig. 7에는 성능효율 특성을 나타내었다. 설계점 부근에서 1차원 설계 결과와 잘 일치하는 값을 나타내었다. 설계점과 최대효율점이 정확히 일치하지는 않는 것을 볼 수 있다. 설계 개념이 최대효율점에서 작동하기 보다는 공극화를 효율적으로 제거하는데 주안점을 두는 것으로 되어 있기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 8에는 인듀서 입구에서 출구로 가면서 정압을 측정된 압력분포를 나타내었다. 본 시험에 사용된 인듀서는 pitch 각이 입구에서 출구로 가면서 2번 바뀌게 되는데 시험결과를 보면 2번째 pitch 각이 바뀌는 곳까지 압력이 증가하고 이후에서 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 수치

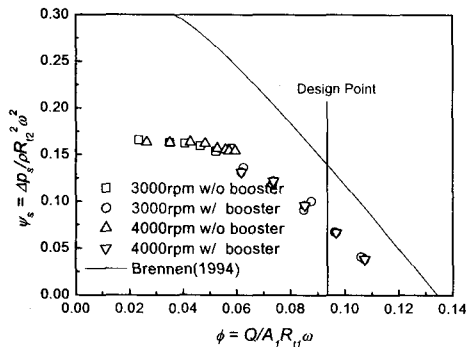


Fig. 6 Performance Characteristics of the test model inducer

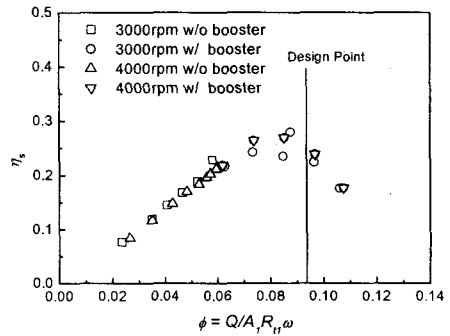


Fig. 7 Efficiency characteristics of the test model inducer

해석에서도 유사한 결과를 나타내었으며 실제 펌프에서의 인듀서는 임펠러와 함께 사용될 때 2번째 pitch각이 바뀌는 곳, 즉 압력이 감소하는 부분에서 임펠러와 겹쳐져서 작동하도록 설계되어 있어 전체적으로 보았을 때는 디자인이 잘못되었다고 볼 수는 없겠으나 인듀서 자체로 보았을 때는 바람직하지 않은 결과로 여겨진다.

### 3.2 인듀서 공동화 성능시험

공동화 성능시험은 입구압력을 감소시켜가면서 양정을 측정하여 결과를 얻게 된다. 유량계수 0.04와 0.054에서 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다. cavitation breakdown이 발생하기 전에는 일정한 양정을 유지하다가 breakdown이 발생하기 조금 전에서 양정이 다소 증가하고 이후

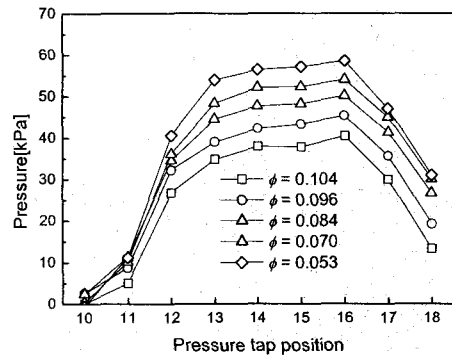


Fig. 8 Static pressure distributions along the inducer housing

breakdown을 거치면서 양정이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에 나타난 결과는 유량이 매우 작은 영역이며 이러한 경우에는 양정감소가 급격히 발생하고 그림에는 나타내지 않았지만 유량이 큰 경우에는 양정감소가 완만히 발생하게 되는 전형적인 공동화 성능특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3 가시화 기법

공동화 현상을 현상에 의하여 발생하는 공기 방울을 관찰하기 위하여 2kW의 조명을 써서 후방에서 조명하고 전방에서 고속 digital camera로 기록하였다. 본 시험에 사용된 고속 디지털 카메라는 1,000fps에서 240X210 pixel의 해상도를 가지며 다음의 그림에서 1 pixel은 0.7mm에 해당

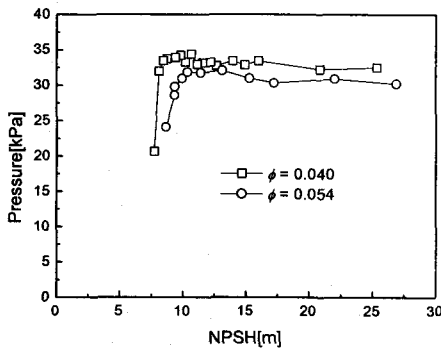


Fig. 9 Cavitation performance at 3000rpm



Fig. 10 Visualization result at the moment of the cavitation break down

한다. Fig. 10에 보이는 사진은 1,000fps, 1/2,000sec, NPSH 4.75m, 3000rpm 입구온도 17°C에서 얻은 결과로 입구 날개 끝에서 심하게 공동화 현상이 발생하고 인듀서 중간쪽 hub에서 새로운 공동화 현상이 발생되어 인듀서 출구로 나가는 것을 관찰할 수 있었다.

## 4. 결론

터보펌프의 인듀서 캐비테이션 특성을 시험하기 위한 성능시험기를 개발하였다. 성능시험기는 크게 구동부, 시험부, 배관부 및 물 저장 탱크와 제어계측부로 구성되어 있으며 주요 재원은 최대 유량 30kg/s, 압력 13bar, 최대 회전수 10,000 rpm으로 설계/제작되었다. 특히, 시험부 출구에 부스터 펌프를 설치하여 시험가능 영역을 극대화시켰으며 진공펌프를 이용하여 물속에 함유되어 있는 용존기체를 뽑아낼 수 있도록 구성하였다.

시험결과로 기본 성능시험을 수행하여 넓은 유량범위에서 양정곡선과 효율곡선을 얻을 수 있었다. 측정결과로 얻은 압력분포로부터 인듀서 설계에 대한 검토가 이루어 졌다. 입구 압력을 감소시키면서 캐비테이션 성능을 측정하였고 이를 가시화를 통하여 확인하였다. 향후 본 시험기의 신뢰성을 높이기 위하여 지속적으로 측정 정밀도를 향상시킬 예정이다.

## 후기

본 연구결과는 과학기술부 주관 민간검용과제인 "산화제 펌프 개발 및 터보펌프 핵심부품 성능시험" 사업의 지원을 받아 수행된 내용의 일부이며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Jakobsen, J. K., 1971, Rocket Engine Turbopump Inducers, NASA SP-8052
- (2) Lakshminarayana, B., 1982, "Fluid Dynamics of Inducers-A Review," Journal of Fluids Engineering, ASME Trans., Vol.104, pp.411-427
- (3) Brennen, C. E., 1994, Hydrodynamics of Pumps, Concepts ETI, Inc.