

대형 액체 이젝터의 성능특성에 관한 연구

김경석* · 이종수 · 김원녕** · 김경근**

A Study on the Performance Characteristics of the Large Liquid Ejector

K.S. Kim, J.S. Lee, W.N.Kim, K.K. Kim

Abstract

The liquid ejector, having no moving, lubricating and leaking parts, is widely used as the various pumps because of its high working confidence and simplicity.

Previously, computer aided design program for the small-sized liquid ejector was developed based on the one-dimensional flow analysis and the systematical laboratory level experiments.

Through the present research, it is confirmed that the previously developed computer program to determine the main design dimensions and to calculate the expected performance curve is satisfactorily applied to design the large liquid ejectors.

기호설명

A	: 단면적
b	: 웨어의 폭
C	: 상수
d	: 직경
f	: 실험정수
H	: 웨어내의 수두
Lt	: 디퓨저 목의 길이
M	: 유량비
N	: 압력비
P	: 압력
Q	: 체적유량
R	: 면적비
Re	: 목에서의 레이놀즈수
η	: 이젝터 효율

<첨 자>

d	: 토출부
m	: 구동노즐의 입구
n	: 노즐 목
s	: 흡입부
t	: 디퓨저 목

1. 서 론

액체 이젝터 내부의 흐름에 관한 이론적 연구는 植田¹⁾ 및 Sanger²⁾에 의하여 최초로 수행되었다. 실제문제에 있어서 주어진 설계조건을 최적상태로 만족시키는 설계를 하기 위하여는 노즐출구와 디퓨저 목과의 단면적비(area ratio), 노즐출구 끝에서 목입구까지의 거리(nozzle spacing), 노즐 외형과 디퓨저 목입구

* 正會員, 韓國海技 研修院

** 正會員, 韓國海洋大學

의 축소부 사이에 형성되는 흡입유로의 형상, 디퓨저 목부의 길이 및 디퓨저의 확대각 등이 매우 중요하다. 디퓨저에 관하여 大島³⁾는 구동유체와 흡입유체의 난류혼합과정(turbulent mixing process)에 관한 이론해석을 통하여 디퓨저 목의 최적길이를 목에서의 혼합유체의 레이놀즈수의 함수로서 결정하는 방법을 이론적으로 제시하고 실험을 통하여 확인하였다.

또한 朴⁴⁾은 면적비가 액체 이젝터의 효율에 미치는 영향에 관하여 중점적인 실험적 연구를 수행하였다. 이상의 일련의 연구결과들은 참고문헌 5)에서 연구 집대성 되어 액체 이젝터를 전산프로그램에 의하여 설계하기 위한 구동유체와 흡입유체의 혼합특성에 영향을 주는 노즐간격, 목부길이와 단면적비의 상세한 결정방법이 얻어졌으며, 소형 이젝터를 이용하여 개발된 전산프로그램의 타당성이 연구실 레벨의 실험에서 실증되었다⁷⁾⁸⁾.

우리나라에서 액체 이젝터를 최초로 국산화

하기 위한 상기의 연구결과들을 토대로 하여 흡입용량 10 m³/hr 이하의 것을 성공적으로 설계생산하여 육상 및 선박용으로 공급하고 있다⁶⁾. 그러나 최근에는 국내 프랜트산업의 발전과 대형선박 건조증가의 추세에 따라서, Fig.1 에서 보는 바와 같이, 흡입용량 1000 m³/hr 까지의 초대형 이젝터가 요구되는 실정이다⁹⁾. 흡입용량 1000 m³/hr의 액체 이젝터 전장은 약 3미터 정도나 되는 초대형 펌프이다.

참고문헌 5)에 보고한 바와 같이 앞서 개발된 전산프로그램에 의한 설계의 한계는 흡입용량이 시간당 수십톤까지 이며, 그 이상의 흡입용량을 갖는 액체 이젝터를 실제로 설계제작하면 대략적으로 평균 10 % 정도의 성능열화를 수반함을 이제까지의 대형선박용의 선상실험결과에서 알게 되었다. 그러나 이와 같은 선상실험결과는, 관내의 흐름에서 일반적으로 두 지점간의 압력차가 일정할 경우 유량은 직경의

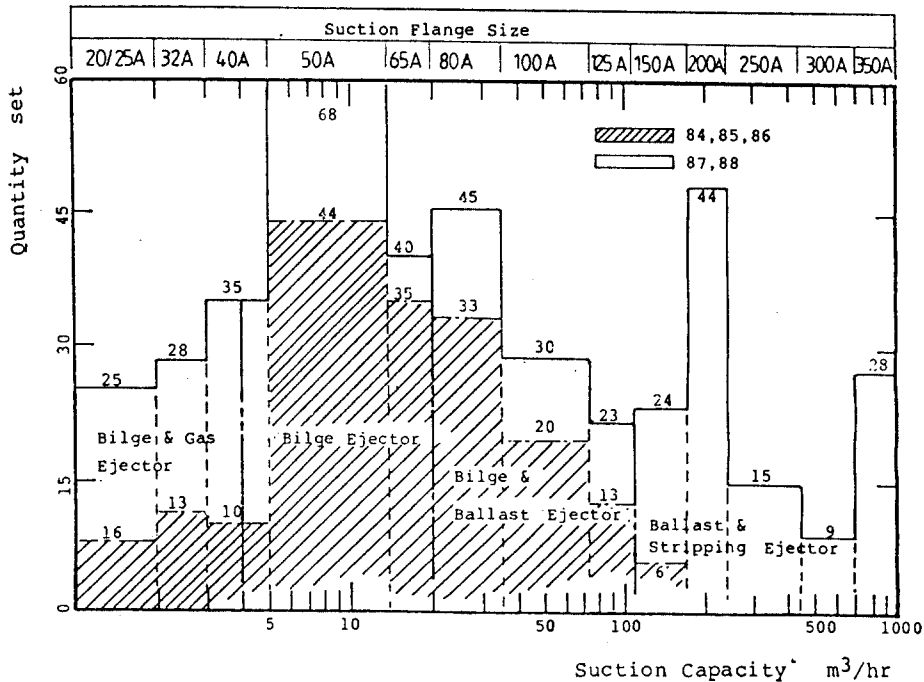


Fig.1 Produced results of water ejectors(KI-WON CO.)

자승에 비례하여 증가하나 관마찰 손실은 직경에 단순비례하므로 대형 이젝터일수록 이젝터의 효율 즉 성능이 좋아지리라고 하는 예상과 상반된다. 따라서 신조선의 해상 시운전 도중에 적당한 두개의 해수 탱크를 이용하여 대형 성능실험을 할 경우의 문제점으로 지적되는 (1)흡입 및 토출 유량계산을 위하여 알아야 할 탱크의 단면적 및 수위 계산이 불명확한 점, (2)흡입양정과 토출양정이 일정히 유지되지 못하고 연속적으로 변화하는 점을 고려하면, 선상의 성능실험결과 자체의 정확도에 대한 의문을 갖지 않을 수 없다.

또한 이젝터는 비교적 구조가 간단함에도 불구하고 내부 흐름이 고속유체와 저속유체의 급격한 혼합과정에 대한 완벽한 이론해석이 불가능하고, 실제의 경우에는 적절한 안전율을 고려하여야 하며, 현장의 배관상의 문제도 설계 계산에 고려되어야 한다. 이러한 문제들을 감안하여 최종적으로 만족할 만한 현장시운전 결과를 얻기 위하여는 1:1 스케일의 실험장치를 이용한 안정적이고 정확한 육상실험이 요구된다고 생각된다. 육상실험의 경우에도 대유량을 정확히 측정하여야 하는 어려움이 동반된다.

본 연구는 위와 같은 관점에서 1:1 스케일

의 대형 실험장치를 이용한 중대형 이젝터에 관하여 체계적인 실험을 수행함으로써, 참고문헌 5)의 전산프로그램의 타당성의 한계를 확인하고 나아가 대형 액체 이젝터의 설계를 완벽히 수행할 수 있는 전산프로그램을 완성하는데 본 연구의 목적이 있다. 본 실험은 Fig. 2에서 보는 절차에 따라서 수행되었다.

2. 실험장치 및 실험

Fig. 3은 본 실험장치의 입체도를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 실험장치는 구동 펌프와 이를 구동하는 엔진, 실험용 이젝터(2대), 흡입유량 및 구동유량 측정용 유량계, 출구유량 측정용 사각형 웨어, 각부 압력계 및 물탱크로 구성되어 있다. 구동수 및 흡입수를 공급하는 공용의 물탱크 크기는 1800×2400×1200 mm로서 약 5.2 m³의 청수를 저장시킬 수 있으며, 실험중에는 일정 수위상태에서 3.8 m³의 물이 탱크내에 담겨있도록 설계되었으며 실험중 공기가 구동수 및 흡입수에 혼입되지 않도록 배려하였다.

182 마력 디젤엔진에 의하여 구동되는 구동 펌프 출구에서는 토출밸브 및 바이패스밸브를 이용하여 구동유체의 유량과 압력이 조절되어 2대의 실험용 이젝터의 구동노즐에 물이 유입된다. 또한 흡입수도 같은 탱크에서 유량이 측정된 다음 실험용 이젝터에 흡입된다.

Fig. 4에는 후술하는 Table 1에서 보는 본 실험용 이젝터 중에서 하나의 예로서 No.1 Liquid Ejector의 상세설계도를 나타내고 있다.

구동수 및 흡입수의 순간유량 측정용 유량계로서는 측정오차가 적은 오리피스 유량계를 검정하여 사용하였으며, 측정오차는 평균 2% 정도이다. 이젝터의 출구유량은 구동유량과 흡입유량의 합과 원칙적으로 같으며, 그림에서 보는 바와 같이 상류측에 정류부를 갖는 사각형 웨어(rectangular weir)를 설치하여 측정하였다. Fig. 5에는 본 실험을 위하여 설계제작

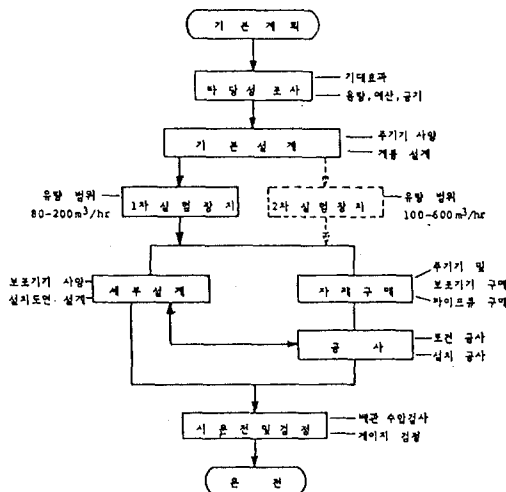


Fig.2 Block diagram of experiment schedule

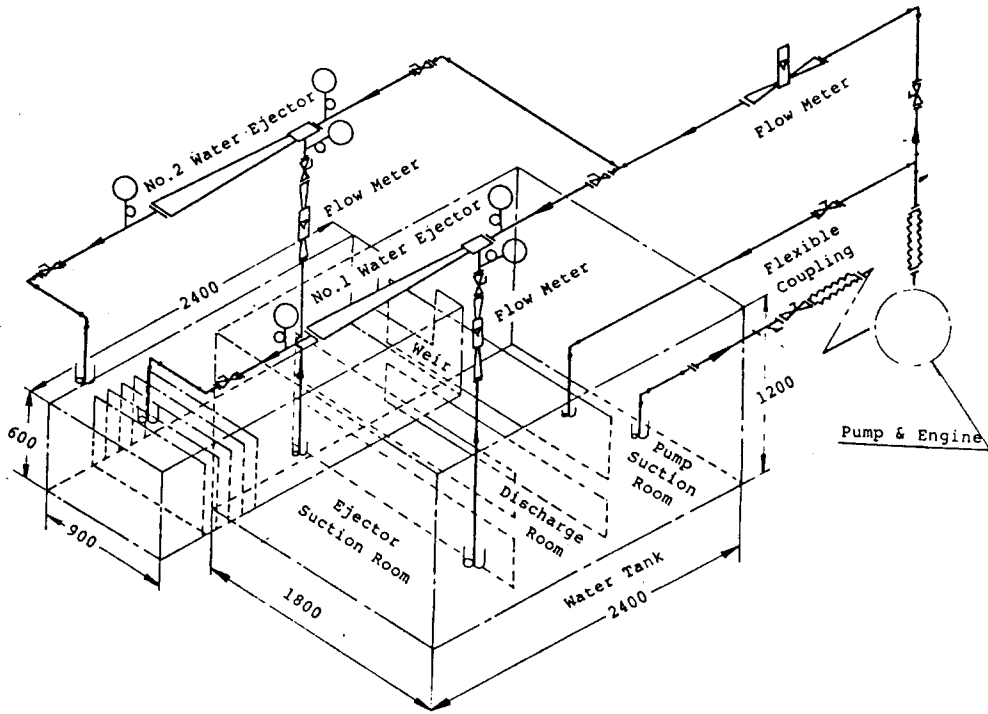


Fig.3 Arrangement of experimental apparatus

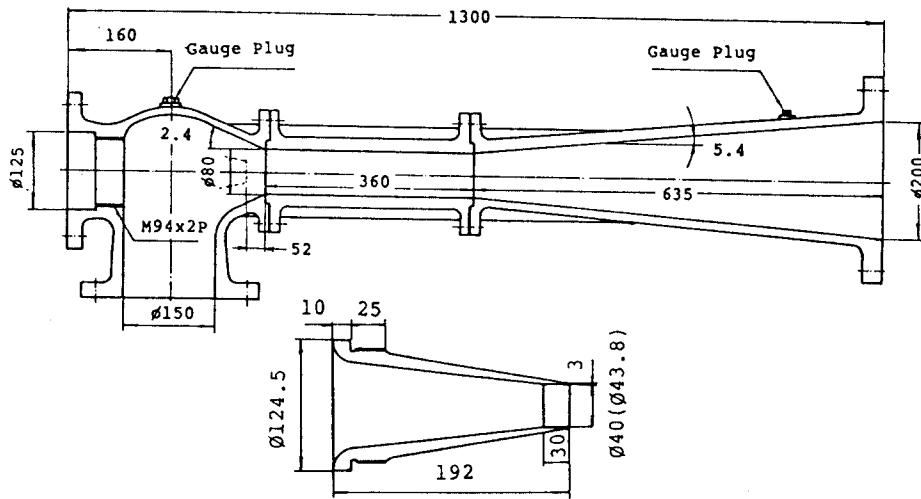


Fig.4 Detailed dimension of No.1 liquid ejector

Table 1. Comparisons of the results at the design point

Liquid Ejector Cond.& Dimension		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Driving	[Head/Cap.]	70/165	90/350	90/350	90/290	100/670
Suction	[-Head/Cap.]	2.0/125	5.0/250	5.0/250	5.0/200	5.0/400
Discharge	[Head]	15.0	20.0	20.0	20.0	25.0
Efficiency	[%]	23.50	25.50	25.50	24.60	23.90
Driving	[Head/Cap.]	70/166	90/350	90/350	90/290	100/670
Suction	[-Head/Cap.]	1.7/150	5.0/268	5.0/268	5.0/214	5.0/428
Discharge	[Head]	15.2	21.9	21.9	22.4	27.6
Efficiency	[%]	27.90	30.18	30.18	29.98	28.75
Driving	[Head/Cap.]	70/166	90/350	90/350	90/285	60/409
Suction	[-Head/Cap.]	1.7/141	4.1/221	1.0/265	4.0/190	3.5/284
Discharge	[Head]	16.8	15.0	18.0	20.0	16.0
Efficiency	[%]	29.50	16.06	19.95	22.90	30.80
Test		Lab.	O n board	On-board	On-board	On-board
Driv. pipe dia.		125A	150A	150A	150A	200A
Suc. pipe dia.		150A	200A	200A	200A	250A
Dis. pipe dia.		200A	250A	250A	200A	300A
Total Length		1300	1880	1880	1720	2400

Demanded Computed Experimental Dimension

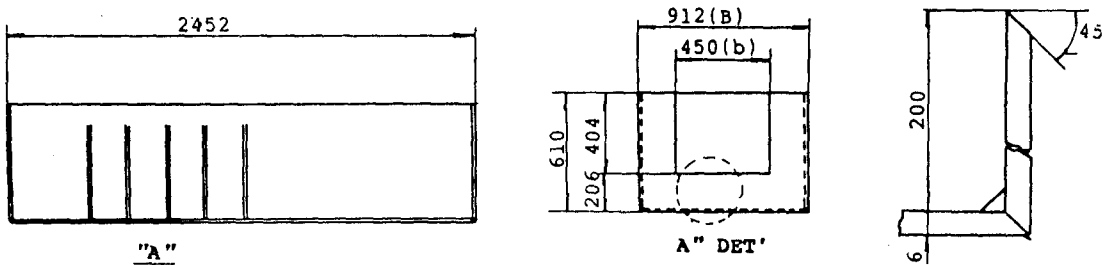


Fig.5 Cross-sectional diagram of rectangular weir

된 웨어의 상세도를 나타낸다.

웨이에 의한 유량측정 공식은 일반적으로,

$$Q = C \frac{1}{2} (2g)^{1/2} bH^{3/2} \quad (1)$$

위식에서 Q는 매분당의 체적유량을, 우변의 C는 실험적으로 결정되는 상수를, b는 웨어의 폭을, 그리고 H는 웨어내의 수두를 각각 나타낸다. 위식의 양변에 로그를 취하고 다시 미분하여 정리하여 보면,

$$\Delta Q/Q \propto \Delta H/H \quad (2)$$

그러므로 웨어내의 수위의 판독오차는 바로

유량의 측정오차와 같은 비율로 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 따라서 실험중에는 정확한 수위 측정을 하여야 한다.

실험용 이젝터의 구동측, 흡입측 및 출구측 관에는 내경 2 mm의 구멍을 가공하여 브로돈 관식 압력계에 연결하였으며, 흡입측에는 보다 정확한 흡입양정의 측정을 위하여 U자형 마노미터를 병렬로 연결하였다. 그리고 각부의 압력과 유량은 밸브로 조절하였다. 실험은 정상 상태하에서 수행되었다. 본 실험에서는, 현장 문제와 관련하여 구동측 압력을 저압력범위 (20-40 mAq)와 고압력범위 (50-100 mAq)로 구분

하여 구동노즐을 두가지로 나누어 제작하여 실험하였다.

3. 실험결과

이젝터 내부의 흐름을 단면 1차원 층류흐름으로 간주하여 이론해석을 한 결과는 참고문헌 5)에 상세히 발표되어 있다.

이젝터 내부의 흐름에 관한 해석에 있어서 중요한 무차원수로서는,

$$\text{Area Ratio : } R = A_n / A_t \quad (3)$$

$$\text{Flow Ratio : } M = Q_s / Q_m \quad (4)$$

$$\text{Pressure Ratio : } \eta = (P_d - P_s) / (P_m - P_d) \quad (5)$$

이렇게 하면 이젝터의 효율은 다음식과 같이 정의된다¹⁰⁾.

$$\text{Ejector Efficiency : } \eta = M * N \quad (6)$$

위식들에서 A_n 은 노즐목의 단면적을, A_t 은 디퓨저 목의 단면적을, Q_s 는 흡입 유량을, Q_m 은 구동유량을, P_d 는 토출압력을, P_s 는 흡입

압력, P_m 은 구동압력을 각각 나타낸다.

Fig. 4의 실험용 No.1 Liquid Ejector는 신조선에 탑재되어 밸러스트 조절 및 원유의 스트립핑용으로 쓰이는 것으로서 구동측, 흡입측 및 토출측의 호칭경은 각각 125A, 150A, 200 A이며, 설계조건(design condition)은 다음과 같다.

Driving head : 70 mAq

Driving rate : 180 m³/hr

Suction head : -5 mAq

Suction rate : 125 m³/hr

Discharge head : 14 mAq

Fig. 6은 참고문헌 7)의 연구결과를 토대로 No.1 Liquid Ejector의 목에서의 레이놀즈수가 1.7×10^6 에 대하여, 유량비 M 및 면적비 R을 동시에 파라미터로 한 압력비 N과 효율 η 의 관계를 계산하여 나타낸 것이다. 전체적으로 이 그림을 개관하여 볼 때, No.1 Liquid Ejector는 유량비 M=0.6, 면적비 R=0.4, 압력비 N=0.7 근처에서 최대효율 $\eta_{max} = 35\%$ 정도가 됨을 알 수 있다.

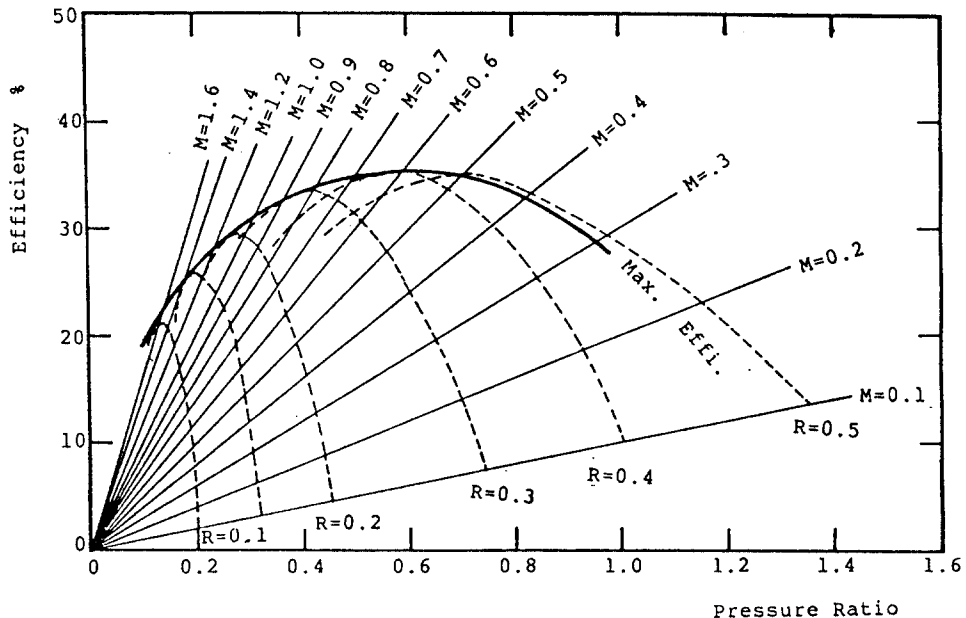


Fig.6 Computed performance curve of No.1 liquid ejector($Re_t = 1.7 \times 10^6$)

구동압력을 6 kg/cm² gauge로 일
 하였을 경우, 면적비 R=0.25인 구
 동노즐을 사용 흡입양정을 파라미터로 하여 압
 력비를 변화시키면서 이에 따른 유량비의 변화
 를 측정된 결과이다. 실험파라미터의 영향을
 우선 살펴보면, 흡입양정이 작을수록 같은 압
 력비에서 유량비가 증가하는 경향을 나타낸다.
 또한 이 그림에서 토출양정을 줄여서 압력비를
 낮추어 가면 이에 따라서 유량비는 점차 증가
 하게 되나, 어느 일정치에 도달하면 더 이상
 흡입유량이 증가하지 못하고 유량비는 일정히
 유지되는 것을 알 수 있다.

더욱 더 압력비를 낮추어 가면 흡입이 갑자
 기 전혀 불가능하게 되는 성능한계에 도달하게
 된다⁸⁾. 그리고 실험을 통하여 압력비가 0.30
 이하이고 흡입양정이 130 mmHg 이하인 경우
 에는 유량비가 최대로 1.0에 도달하여 구동유
 량과 같은 량의 흡입도 가능하다는 것을 실험
 적으로 확인하였다.

Fig. 8은 면적비가 R=0.30으로서 Fig. 7의
 경우보다 구동노즐을 크게 하여 같은 조건하에
 서 실험한 결과를 나타낸다. 앞서의 면적비가
 0.25인 경우에 비교하여 전체적으로 유량비가
 적은 쪽으로 각각의 실험곡선이 이동하고 있으
 며, 면적비가 0.25인 경우에 비교하여 압력비
 의 감소에 따른 유량비의 증가율이 적음을 나
 타내고 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서 약간의 흡입
 양정 변화는 유량비에 큰 영향을 미치는 것을
 알 수 있으므로, 정밀한 실험을 수행하는 경우
 에도 소정의 흡입양정의 유지에 유의를 하여야
 한다.

이젝터는 산업현장에서 대개 필수적인 기계
 요소로서 사용되므로 확실한 성능보장이 되지
 못하면 프랜트 전체의 운전에 치명적인 영향을
 미쳐, 심한 경우에는 프랜트 전체의 작동을 불
 가능하게 한다. 따라서 실수요자에게 공급되는
 이젝터는 주위 운전조건외 변동과 안정성을 고
 려하면 설계제작상 상당한 여유치를 필요로 하
 며, 각부의 유량과 압력에 관한 실제의 운전조
 건은 각 밸브들을 조작하여 만족시킨다. 특히

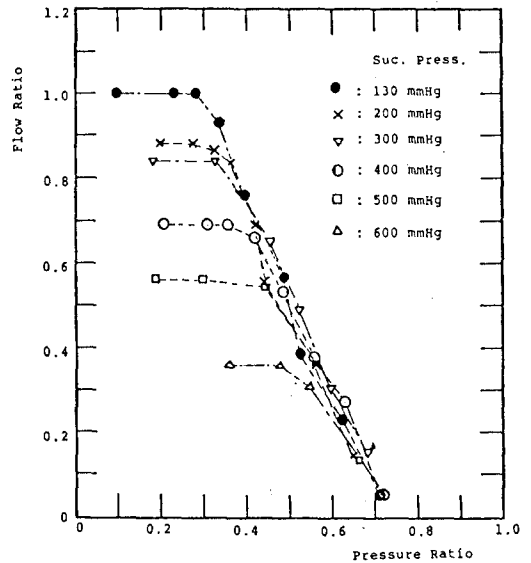


Fig. 7 Experimental results of flow ratio change(R=0.25)

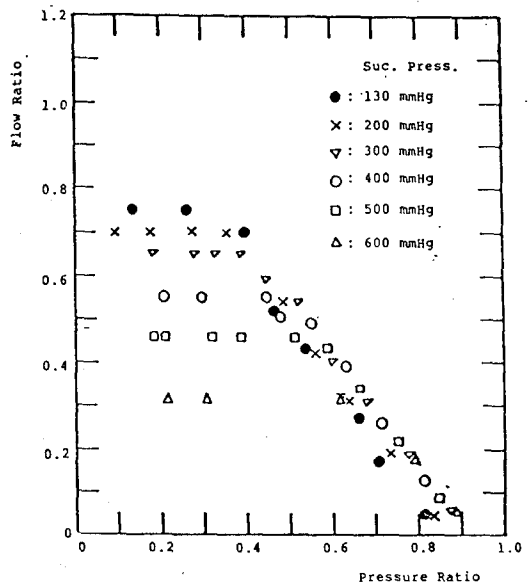


Fig. 8 Experimental results of flow ratio change(R=0.30)

선박용은 적화상태에 따라서 흡입양정과 토출
 양정이 심하게 변동하는데 어떠한 상태에서도
 특히 만족할만한 흡입유량이 보장되어야 한다.

Fig. 9는 No.1 Liquid Ejector에 대하여 구동

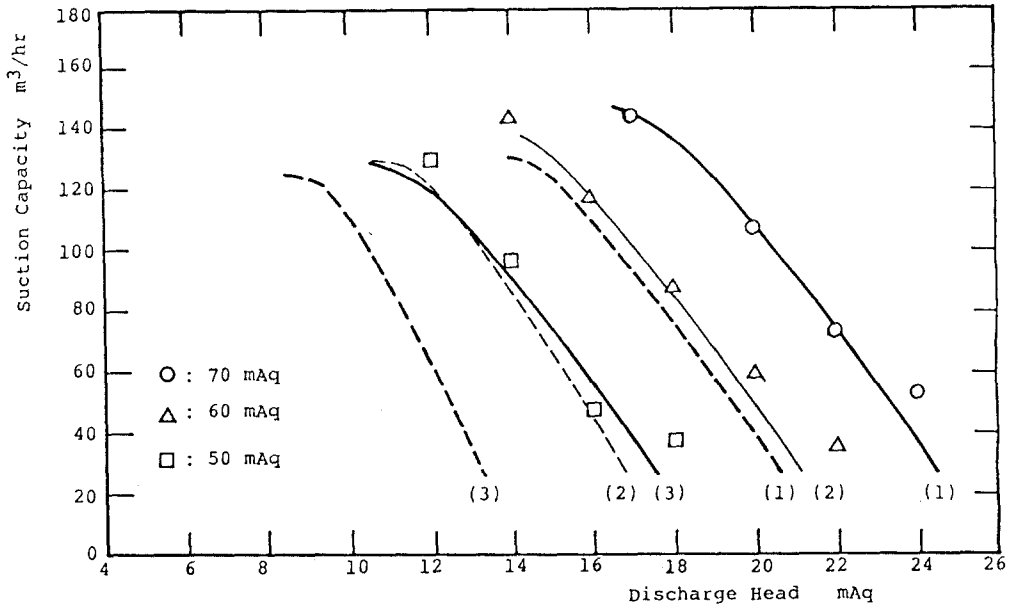


Fig.9 Performance experimental results of No.1 liquid ejector

양정을 파라미터로 하여 토출양정에 대한 흡입 유량의 변화를 비교한 것이다. 그림중의 실선은 참고문헌 5) 및 7)을 토대로 한 계산치를, 점선은 수요자(조선소) 측에 제시한 예상 성능곡선(expected performance curve)을, 그리고 각 심볼은 정밀히 수행된 본 실험의 실험치들을 나타내고있다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 연구실 레벨의 소형 액체 이젝터의 실험을 통하여 앞서 개발된 설계용 전산프로그램은 대형 액체 이젝터의 설계 및 성능예측까지 확장하여 적용시켜도 충분하다는 것을 확인할 수 있다. 즉 서론에서 밝힌 바와 같이 기 개발된 CAD프로그램을 이용하여 대형 액체 이젝터를 설계제작할 경우 선상실험을 통하여 10% 정도의 성능열화를 가져온다는 사실은 열악한 선상 실험조건 때문에 정밀한 측정이 불가능하다는 사실에 기인한다고 판단된다.

실제로 수요자의 요구에 부응하는 메이커측의 예상성능곡선에는, Fig.9에서 보는 바와 같이, 토출양정으로 평가하여 평균 4미터 이상의 여유 수두를 두고서 설계제작되고 있음을 알 수 있다.

앞의 Fig.8의 실험결과에서 기술한 바와 같이 소형 이젝터에 대하여 기 개발된 전산프로그램이 대형 이젝터의 설계제작에도 충분히 사용될 수 있다는 사실은 기본적으로 서론에서 밝힌 바와 같이 대형일수록 단위유량당의 마찰손실이 적다는 사실에 기초하며, 다음의 Table 1로 요약한 본 실험결과에서도 확인되었다.

Table 1은 본 연구를 통하여 수행된 No.1-No.5까지의 대형 액체 이젝터에 대하여 특히 설계점(design point)에서의 계산치와 실험치를 요약하여 나타내었으며, 참고로 주요치수도 병기하였다. 5개의 대형 액체 이젝터중에서 No.1을 제외하고는 신조선의 해상 시운전시에 얻어진 실험결과이다. 먼저 효율에 관점을 두어 기술하면 수요자측의 요구에 비하여 설계계산에서는 약 3-5%의 여유치를 두고 있음을 보이고 있다. 다음으로 계산결과와 실험결과를 비교하여 보면 육상실험을 행한 No.1은 계산치보다 실험결과가 오히려 양호하나, 선상실험을 한 No.2, No.3, No.4 이젝터의 실험치들은 계산치보다 훨씬 뒤떨어지며, 같은 선상실

험을 한 No.5 이젝터는 No.1 이젝터와 거의 같은 양호한 실험결과를 얻고 있다. 이러한 결과는 단적으로 흡입 및 구동유량을 탱크내 수위 상승의 측정으로부터 계산하기 위한 탱크의 형상이 불확실하고 더우기 흡입양정과 토출양정등이 연속적으로 변화하여 정밀한 실험이 불가능하였기 때문이라고 판단된다.

4. 결 론

흡입용량 100-500 m³/hr의 대형 액체용 이젝터의 성능특성실험을 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 연구실 레벨의 소형 액체 이젝터 실험결과를 토대로 기 개발된 설계용 전산프로그램은 대형 이젝터에도 수정없이 그대로 적용될 수 있다.

2) 수요자측의 요구설계조건에 대하여 효율로 언급하여 약 3-5 %정도 여유를 두고 설계의 제작설계가 수행되어야 한다.

3) 현장 설치후에는 흡입 및 구동측의 대유량 측정이 기술상 매우 곤란하고 또한 일정 수두의 유지가 거의 불가능하므로 제작자측에서 사전에 정밀한 성능실험이 수행되어야 한다.

4) 밴딩부, 밸브, 관 길이 등의 파이핑에 따라서 결정되는 흡입유로의 마찰손실 수두 등은 결국 대형 액체 이젝터의 유량비 등의 성능에 지대한 영향을 미치므로, 흡입, 구동, 토출측 유로내의 유체역학적 손실을 감안한 상태의 컴퓨터 지원설계가 급후 이루어져야 한다.

끝으로 본 연구는 산학협동재단(이사장 : 남덕우 전국무총리)의 Matching Fund System에 의하여 수행되었음을 밝히며, 제반 실험설비와 연구비 일부를 지원한 기원산업사와 산학협동

재단에 심심한 사의를 표한다.

參考文獻

- 1) 植田辰洋, “水噴射ポンプに関する研究”, 日本機械學會 論文集, 第20卷, 89號(1954).
- 2) N.L.Sanger, “Noncavitating Performance of Two Area Ratio Water Jet Pumps Having Throat Length of 7.25 Diameters”, NASA TN-4445(1968).
- 3) 大島亮一郎, “ジェットポンプの研究[第1報:スロート長さの寸度効果]”, 日本機械學會 講演論文集, No. 700-7, pp. 239~242(1970).
- 4) 朴炳翰, “물噴射컴프에 있어서 面積比가 効率에 미치는 影響”, 韓國海洋大學 大學院 舶用機關學科, 碩士學位論文(1985).
- 5) 金京根, 金鎔模, “船舶用 水이젝터의 自動設計를 위한 電算프로그램의 開發”, 韓國舶用機關學會誌, 第10卷, 第1號, pp. 35~45(1986).
- 6) 金京根, “第11回 産學協同賞 受賞”, 財團法人 産學協同財團, 季刊産學協同, 第51號, pp. 9~10(1987).
- 7) 金京根, 高相喆, “液體用 이젝터 性能의 CAD와 實驗結果와의 比較에 關한 研究”, 韓國海洋大學 大學院 船舶機械工學科, 碩士學位論文(1988).
- 8) 金京根, 金明煥, 高相喆, “液體用 이젝터의 컴퓨터 設計 및 實驗에 關한 研究”, 韓國動力資源研究所 [에너지 R & D], 第10卷, 第1號, pp. 24~34(1988).
- 9) 姜信丕, “液體 이젝터의 實際設計 및 産業實績 關係資料”, 基元産業社(1989).
- 10) 金京根, 金鍾憲, “水驅動-空氣吸入 이젝터의 性能特性에 關한 研究”, 韓國海洋大學 大學院 船舶機械工學科, 碩士學位論文(1988).