

POD형 물분사 추진장치의 설계 및 성능해석

김문찬*, 전호환*, 박원규**, 변태영*, 김종현***, 서성부****

부산대학교 조선해양공학과*, 부산대학교 기계공학부**
(주)로템***, 중소조선기술연구소****

Design and Analysis for the POD Type Waterjet System

Moon-Chan Kim*, Hohwan Chun*, Wonkyu Park**, Tae-Young Byun***
Jong-Hyun Kim**** and Sung Bu Suh*****

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University*
School of Mechanical Engineering, Pusan National University**
ROTEM Company***
Research Institute of Medium & Small Ship Building****

Abstract

A study of design and analysis for the POD type waterjet is conducted. The analysis and design of waterjet system are more difficult than that of conventional propulsor because waterjet is complicatedly composed of many parts which are impeller, stator, inlet, nozzle, etc. The streamline method is traditionally used in the design of pump whose characteristics are similar to those of waterjet. This streamline method, however, has some limitation in analysis of a viscous flow as well as the interaction of inlet part of hull. In the present study, the developed CFD program is applied to the analysis of POD type waterjet. The developed program is first validated by comparing the existed experimental results. The designed waterjet system is also analyzed by the developed CFD program and analyzed results show that the performance of the present POD type waterjet is above the requirement.

※Keywords: POD type waterjet(포드형 워터 제트), Design method(설계 방법), CFD program(CFD 프로그램), Amphibious wheel vehicle(수륙양용차륜차량)

1. 서론

물 분사 추진은 일반 프로펠러와 같이 캐비테이션이 쉽게 발생되지 않아 선박의 고속화에 따라 선박 추진기의 차세대 주자로 각광을 받고 있다. 이러한 워터제트 추진은 선박 뿐 아니라 단위 면적당 높은 부하를 요구하는 도하용 전투차량과 같은 경우에도 효과적으로 사용될 수 있다. 본 연구에서 다루고자하는 차륜 전투차량의 경우 선박에 비하여 무게가 무겁고 차체가 유선형화 되어 있지 못해 큰 추진력이 필요하며 일반 프로펠러를 적용할 경우 프로펠러 직경이 매우 커져야 하며 또한 손상의 위험성이 있기 때문에 워터제트 추진이 적합하다 할 수 있다. 본 차륜 전투차량은 전투차량 중에서는 비교적 무게가 가볍고 폭에 비해 길이가 큰 형상으로 저항 성능이 다른 전투차량에 비해 우수하므로 플러쉬형보다 비교적 부하가 작게 소요되는 POD형 워터제트를 장착하는 것이 가장 최적이라 판단된다.

물 분사 추진을 선박에 도입하기 위한 첫 번째 시도는 이미 17세기부터 있어왔다. 하지만 기술적인 한계와 추진원리에 대한 이해가 없어 실용화되지 못하다가 19세기 중반에 이르러서야 서서히 물 분사 추진을 도입한 선박이 출현하기 시작하였다. 1950년대까지는 펌프 기술의 한계와 추진 효율이 일반 프로펠러에 비해 떨어진다는 이론이 지배적이어서 본격적으로 사용되지 않았지만 근래에 이르러 좀 더 합당한 이론들(Kim et al. 1993)이 발표되면서 물 분사 추진의 도입이 본격화되었다. 부산대학교에서는 소형 플러쉬형 물제트에 대한 연구(전호환 등 2001, 왕정용 등 2001, 전종길 등 2002, Chun et al. 2003, Kim et al. 2003)를 수행한 바 있으며 이를 토대로 본 연구를 수행하게 되었다.

워터제트 및 펌프의 가장 일반적인 분류법은 비속도(specific speed)에 의한 분류를 들 수 있다. 이는 유체량과 압력에 대한 비라 할 수 있는바 비속도가 크면 시간당 유량이 클수록 유리하고 반대의 경우는 압력차이를 크게 하여야 효율적인 워터 제트가 될 수 있다. 이 비속도의 크기에 따라 축류형, 혼합형, 사류형 워터 제트로 분류하고 있으며, 이는 일반 펌프에서의 분류 방법에 따른 것

이다. 즉 축류형의 경우 압력 차에 의한 추진보다는 유체의 유량을 많이 분사시켜 추력을 얻는 개념의 워터제트로서 사류형에 비하여 짧고 단순한 덕트 구조를 하고 있다.

POD형 워터제트의 경우는 비속도가 굉장히 높아 전형적인 축류형이라 할 수 있으며 덕트가 짧아 일반 배에서 사용하는 덕트형 프로펠러와 유사하다 할 수 있다. 유량을 많이 송출하는 형이므로 인렛 노즐 비가 커서 제트 효율은 좋으나 펌프 효율은 프러쉬형에 비하여 다소 떨어진다. 또한 유동의 유입이 매우 용이하여 인테이크 부에서의 손실 및 캐비테이션의 위험성이 없는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 POD형 워터제트에 대한 설계 개념과 개발된 프로그램을 이용한 해석을 통하여 효과적인 POD형 워터제트의 개발이 될 수 있는 방향에 대하여 제시하였다. 개발된 POD형 워터제트를 위한 점성해석프로그램을 잘 알려진 터빈의 기존 실험 결과와 비교하여 검증하였으며 또한 POD형 워터제트에 대한 모형시험결과와 비교하여 타당성을 확인 하였다. 검증된 프로그램을 이용하여 실선 워터제의 성능을 추정하였다.

2. 워터제트 설계

군사용 전투차량을 위한 도하용 추진 장치는 다음과 같은 기본 요건을 충족시키는 설계가 되어야 한다.

- 약조건에서 견딜 수 있는 충분한 강도 유지
- 날개 끝에서 캐비테이션 억제
- 입수 및 출수 시를 위한 충분한 마력 흡수

이와 같은 조건을 만족하기 위하여 날개 끝의 두께 및 폭을 키워 강도 및 캐비테이션 억제를 할 수 있게 하였으며 날개수를 5개로 결정하여 충분한 전개 면적 및 마력 흡수가 될 수 있도록 하였다. 또한 날개 끝에서의 피치를 감소시켜 캐비테이션이 억제되게 하였으며 POD형 워터제트의 특성상 길이가 짧아 스테이터의 날개 수를 11개로 하여 노즐에서 분사되는 물의 회전 에너지를 흡수하여 제트가 직진성을 가질 수 있도록 설계 하였다.

워터제트와 유사한 펌프 설계에서는 통상적으로 평균유선법에 의한 설계 프로그램을 사용하여 왔으

나 그 정도에 있어서 정성을 고려하지 못하고 있기 때문에 특히 워터제트 시스템을 설계하기에는 부적절하다 할 수 있다. 본 연구에서는 개발된 CFD 프로그램을 사용하여 반복적인 방법으로 설계를 시도하였으며 먼저 전체적인 효율 및 필요마력 등을 기존의 유사 모형시험 결과 및 모우멘텀 이론에 의해 간략하게 추정하여 보았다. 추정된 결과를 토대로 덕트형 프로펠러에 대한 자료(Van Manen 1962)를 이용하여 기본재원(평균피치, 전개면적비, 날개수)을 참조하였다. 초기 설계된 POD형 워터제트는 개발된 상세해석 프로그램에 의해 해석되어 주어진 마력과 조건에 부합할 때까지 반복 설계되게 된다. 본 논문에서는 지면상 전 과정을 자세히 다 보여주기 어려워 최종 설계에 대하여 보였다. 본 연구에서 사용한 설계 과정도를 Fig. 1에 보였다.

- Preliminary ship geometry
 - LBP = 6.62m
 - B = 2.7m
 - 흘수 = 1.7m
 - Δ = 16tons
- Preliminary design of pod type waterjet
 - NCR Power = 100 ps per unit
 - RPM = 2200
 - Required speed = 10km/h
 - Diameter = 330mm
 - $Z_{impeller} = 5, Z_{stator} = 11$
 - Impeller
 - $P/D_{mean} = 0.8$
 - $A_E/A_O = 0.6$

설계 조건을 도출하기 위하여 아래 변수들을 참고 자료(Allison 1993)를 통해 결정하였다.

- 설계 속도 10km/h에서 기타 성능들에 대한 가정치
 - Wake Factor, $(1 - w) = 0.97$
 - Pump Efficiency, $\eta_p = 0.65$
 - Inlet Recovery Factor, $\eta_i = 0.95$
 - Relative Rotative Efficiency,

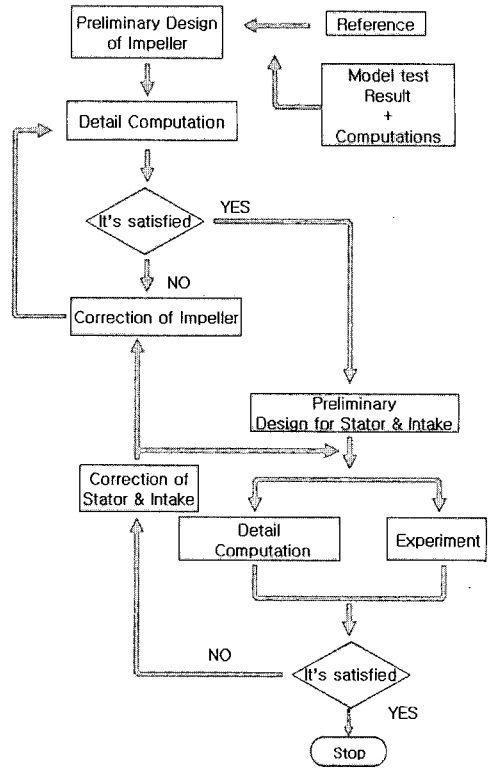


Fig. 1 Design procedure

- $\eta_r = 0.98$
- Height of Nozzle, $h_j = 0m$
- Ratio of Nozzle and Inlet Area
 - $= (0.0380/0.0678) = 0.56$
- Nozzle Efficiency, $\eta_n = 0.99$
- Density of fresh water,
 - $\rho = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$

- 선속 10 km/h에서 펌프조건 도출
 - Nozzle Area, $A_j = 0.0380 \text{ m}^2$

$$2 V_j = V_w + [V_w^2 + 4 Th / (\rho \cdot A_j)]^{1/2}$$

$$= 2.69 + [2.69^2 + 4 \times 418 \times 9.81 / (1000 \times 0.038)]^{1/2}$$

$$= 23.6 \text{ m/s}$$

where Th is predicted from resistance test results

· Jet Velocity, $V_j = 11.8 \text{ m/s}$

· Flow Rate,

$$Q_j = A_j \cdot V_j = 0.038 \times 11.8 = 0.448 \text{ m}^3/\text{s}$$

· Actual Jet efficiency,

$$\eta_j = \frac{1}{(1-w)} \cdot \frac{2\mu(1-\mu)}{1 + \Psi - (1-\zeta)\mu^2 + \frac{2gh_i}{V_j^2}}$$

Where,

$$\mu = V_s / V_j = 0.235, \Psi = 0.01, \zeta = 0.05$$

$$\eta_j = \frac{1}{0.97} \cdot \frac{2 \times 0.235 \times (1 - 0.235)}{1.01 - (1 - 0.05) \times 0.235^2} = 0.387$$

$$OPC = \eta_i \cdot \eta_r \cdot \eta_p \cdot \eta_j \cdot (1-t)$$

$$= 0.97 \times 0.98 \times 0.65 \times 0.387 \times 0.90 = 0.215$$

여기서 OPC는 Overall Performance Coefficient 이다.

여기서 펌프 효율은 앞에서 언급한 바와 같이 0.65로 일반적인 워터제트의 펌프 효율보다 다소 낮게 추정하였으나 제트 효율이 인렛, 노즐 비가 다소 큼에 따라 높아 서로 상쇄되는 면이 있다. 모우멘텀 이론으로 구한 효율과 모형 시험의 저항 값을 이용하여 추정한 전달마력을 Table 1에 정리하였다. Table 1에 보인 바와 같이 펌프의 효율이 0.65정도만 되면 속도가 약 10km/h이상 달성될 수 있으리라 생각된다.

Table 1 Estimation of full-scale required power per a unit based on resistance test results

V_s (km/h)	EHP (ps)	R_T (kN)	t	OPC (pre- diction)	SHP (ps)	DHP (SHP/ η_i)
8.0	6.18	2.52	0.10	0.215	39.5	43.6
9.0	9.56	3.24	0.10	0.215	57.1	63.3
10.0	13.2	4.10	0.10	0.215	84.7	89.0
11.0	17.9	5.24	0.10	0.215	113	125.3

이와 같은 성능을 달성하기 위한 필요 수두를 계산해 보면 다음과 같다.

Pump developed Head

$$= V_j^2/2g \cdot \eta_n - \eta_i \cdot V_w^2/2g + h_j$$

$$= 11.8^2/2g \times 0.99 - 0.95 \times 2.69^2/2g$$

$$= 6.68 \text{ m}$$

즉 필요한 수두가 노즐에서의 수두와 인렛에서의 수두차이인 6.68m이다. 끝으로 펌프의 특성을 결정하는 비속도를 계산하면 다음과 같다.

· 비속도, N_s

$$N_s = N \cdot Q^{1/2} / H^{3/4}$$

$$= 2200 \times (0.448 \times 60)^{1/2} / 6.68^{3/4}$$

$$= 2748 [\text{m}^3 / \text{min}, \text{m}, \text{rpm}]$$

통상 비속도가 1500이 넘으면 축류형으로 분류되는바 현재 계산된 비속도는 2700을 상회하므로 POD형은 축류형 중에서도 극단적으로 치우친 축류형임을 알 수 있다.

계산된 설계점에서 설계된 임펠러의 피치 및 코오드 분포를 Fig. 2에서 보였다. Fig. 2에 보인 바와 같이 팁에서의 캐비테이션을 억제하기 위하여 임펠러 팁에서의 피치를 줄이고 코오드를 비교적 크게 하였다. 최종적으로 설계된 형상을 Fig. 3에 보였다. 스테이터의 설계는 통상의 워터제트에서 사용하는 아크형 단면을 사용하여 유동이 빨리 직진화 되도록 하였으며 비교적 POD 특성상 코오드 길이가 짧아 날개수를 11개로 충분히 많게 하였으며 덕트의 경우는 입구면적 대 출구 면적의 비를 0.56으로 하여 설계 하였다.

3. 성능해석

점성을 고려한 성능해석을 위하여 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 문제를 정식화 하였다. 비압축성 유동을 해석하기 위하여 Park and Sankar(1993)의 "Iterative Time Marching Scheme"을 사용하였다. 인공감쇄를 이용한 유한 차분법을 사용하였으며 복잡한 물체트 해석을 위하

여 다중 격자기법을 사용하였다.

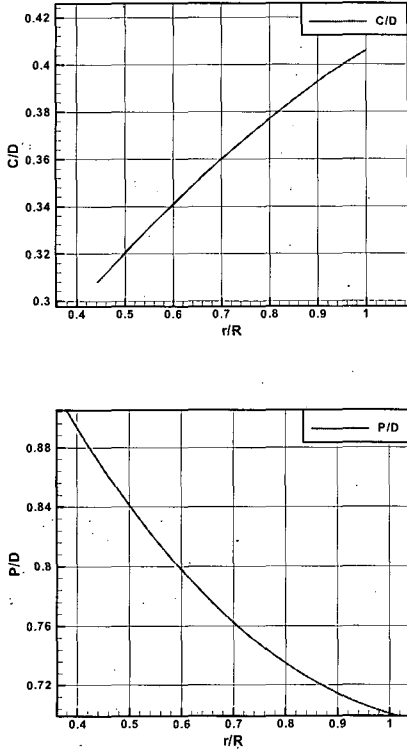


Fig. 2 C/D and P/D distribution of impeller according to radius

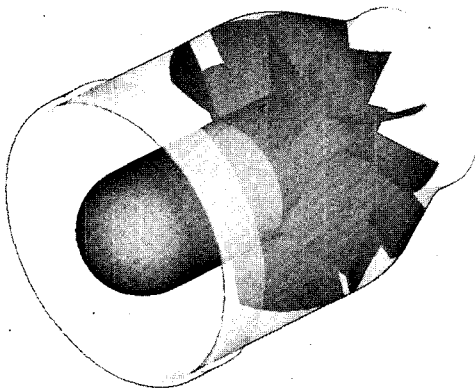
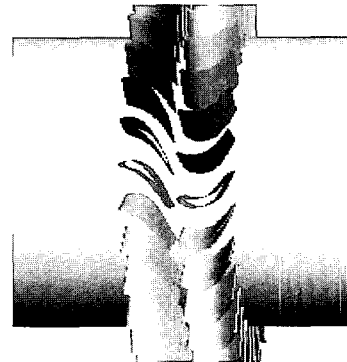


Fig. 3 Profile of the designed POD type waterjet

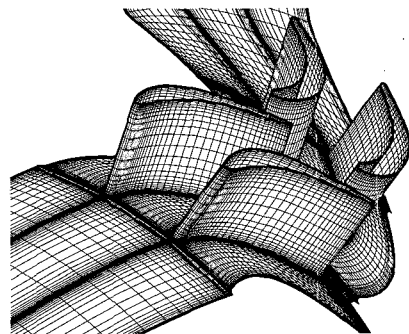
3.1 3차원 터빈을 이용한 코드 검증

본 연구에서는 덕트 내부에 로터와 스테이터가 상호작용을 하는 수중추진체의 유동을 계산하기에 앞서 추진체의 형상과 유사하게 쉬라우드 내부에 로터와 스테이터, 그리고 로터 끝단의 Tip을 가지고 있으며 많은 연구자들에 수치적으로 계산되어진 3차원 터빈에 대해 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 로터와 스테이터는 Dring et al.(1982)에 의해 실험이 수행된 모델을 사용하였다.

스테이터와 로터 각각에 대해 2개의 H형 격자 (85×29×29)를 구성하였으며, 격자생성방법은 대수적 방법과 타원형 미분방정식을 사용하였다. 생성된 격자와 로터 및 스테이터, 그리고 Tip의 형상은 Fig. 4에 나타내었다.



(a) The side view of the turbine

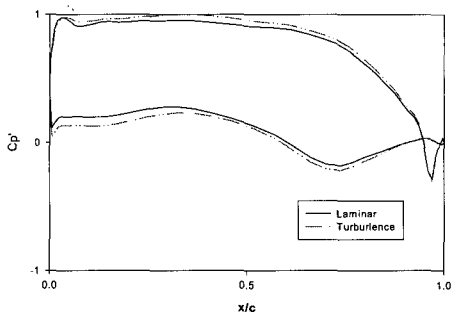


(b) Computational grid system

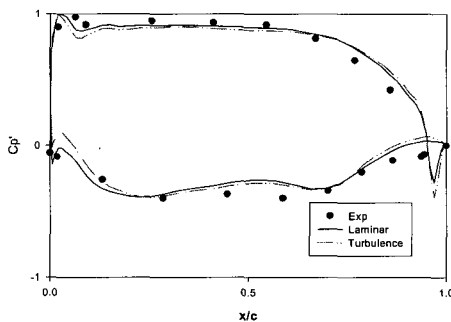
Fig. 4 Geometry and the grid system of rotor-stator turbine

본 연구에서 개발된 3차원 터빈 유동계산용 프로그램의 검증에 위해 Dring et al.(1982)과 동일한 조건과 동일한 형상의 로터와 스테이터에 대해 유동을 계산하였으며 스테이터의 Mid-span에서 시간 평균된 압력계수를 계산하여 실험결과와 비교하였다.

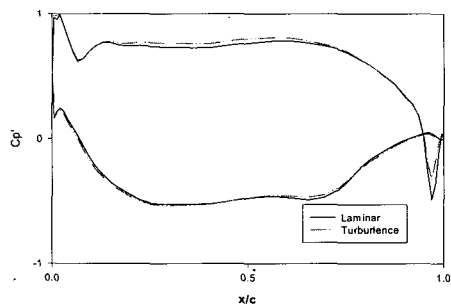
Fig. 5에서는 층류유동과 Baldwin-Lomax 난류 모델에 의한 난류유동에 대해 로터의 반경방향 길



(a) At 1/4H



(b) At 2/4H (mid-span)



(c) At 3/4H

Fig. 5 Time averaged pressure coefficient (H: rotor span)

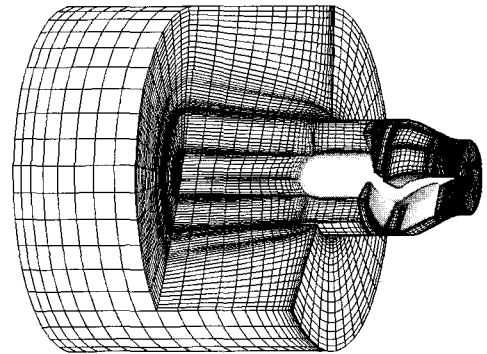


Fig. 6 Grid system for POD type waterjet

이의 1/4(허브쪽), 2/4(Mid span), 3/4(Tip쪽)에서의 시간평균 압력계수를 나타내었으며, 로터 길이의 1/2인 Mid span에서 실험결과(Dring et al. 1982)와 비교하였다.

여기서 사용된 압력계수는 2차원 터빈에서와 마찬가지로 $Cp' = (p - p_{T.E.}) / (p_{max} - p_{T.E.})$ 로 정의되고, $p_{T.E.}$ 는 Trailing edge에서의 압력을 의미하고, p_{max} 는 날개면 전체를 걸쳐 같은 높은 압력을 의미한다.

층류유동과 난류유동에 대한 계산결과는 Trailing edge 부분을 제외하고는 비교적 실험결과와 잘 일치하는 결과를 보였다.

3.2 성능해석 결과

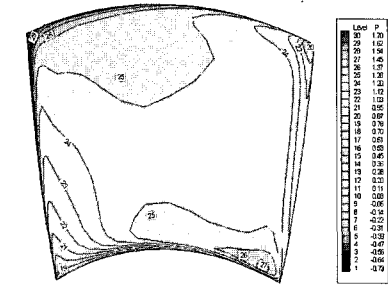
본 연구에서는 pod형 워터제트 추진기의 흡입부인 덕트, 로터, 스테이터 및 노즐의 전 영역에 있어서 유동해석을 수행하였으며, 총 19개 블록으로 격자 수는 550,350개로 구성 되어있으며 구성된 모습을 Fig. 6에 보였다. 모형 시험 결과와의 비교를 위해 모형 시험 조건에서 계산을 수행하였으며 모형 속도 1.48m/s 즉 대응대는 실선속도가 10km/h이며 3400rpm의 회전 속도에서 계산하였다.

먼저 임펠러의 설계를 검증하기 위하여 임펠러에 대한 압력 분포와 유선분포를 살펴보았다. Fig. 7의 a)에서 볼 수 있는 바와 같이 압력면에서의 압력분포를 살펴보면 팁에서의 피치를 상당히 작게 설계하였음에도 불구하고 다소 높은 압력이 날개

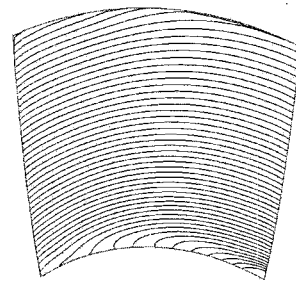
끝부근에 분포함을 볼 수 있다. 이는 펌프와 같은 특성을 가지는 워터제트의 경우 덕트 효과로 인한 팁의 부하가 커지는 현상으로 이해될 수 있다. 흡입면의 경우(Fig. 7c))도 팁의 앞날 부근에서 압력이 가장 낮음을 알 수 있다. 유선의 모습을 살펴보면 전체적으로 박리현상없이 잘 흐르고 있음을 알 수 있으며 흡입면에서의 날개 끝 방향으로 흐르는 흐름은 큰 허브를 타고 오는 유체의 원심력적인 힘이 발생되는 현상이라 생각된다.

스테이터의 경우는 Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 날개면에서 매우 복잡한 흐름이 발생되게 되는 바 이는 임펠러의 강력한 회전 흐름을 직진화 시키기 위한 역할로 생기는 현상이며 본 연구에서 설계된 스테이터는 Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이 노즐에서 나오는 제트의 회전 성분 없이 잘 직진화 시키고 있음을 볼 수 있다. Fig. 9에서는 펌프주위의 압력분포를 보여주고 있으며 임펠러를 기준으로 앞부분에는 압력이 낮고 뒷부분은 압력이 높아지는 모습을 볼 수 있다.

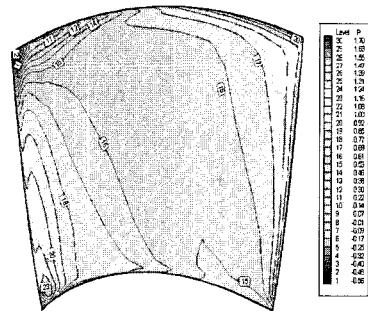
설계된 POD형 워터제트에 대한 모우멘텀과 토오크에 대한 계산 결과를 Table 2에 보였으며 실험 결과와 비교하였다. 노즐에서의 모우멘텀은 잘 일치하고 있으며 앞에서 필요 수두 계산 시 예측하였던 노즐 분사속도(11.8m/s)를 실험치(계산치도 실질적으로 같음)와 비교하면 현재 12m/s로 상당히 비슷하며 이로부터 계산된 필요수두도 처음의 예상치(6.68m)와 비슷함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 설계된 펌프부의 성능이 우수함을 알 수 있다. 여기서 주의할 점은 본 연구에서 계산한 M1은 덕트 입구부에서 계산한 모우멘텀이나 이는 본 POD형과 같이 덕트가 짧은 경우 임펠러의 영향으로 통상의 워터제트에서 이야기하는 인렛 모우멘텀이라 할 수 없다. 본 연구에서는 계산과 실험치의 비교를 위해 계측 및 계산하였으며 실제로는 앞에서 계산하였듯이 선속을 사용하여 전체 모우멘텀을 계산하여야 하리라 생각된다. 토오크의 경우가 차이가 다소 많으며 인렛부에서의 모우멘텀도 차이가 나타나고 있는데 인렛부에서의 차이는 계산에 있어서 실제 차륜차량에 대한 모델링을 수행하지 않았기 때문으로 생각되며 토오크의 차이에 대하여는 실험과 이론 모두 더 연구가 필요



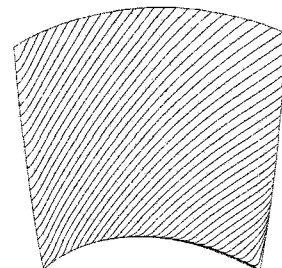
a) pressure side pressure contour



b) pressure side streamline

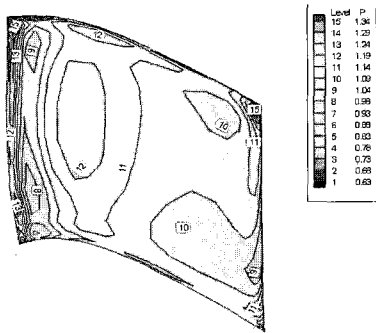


c) suction side pressure contour

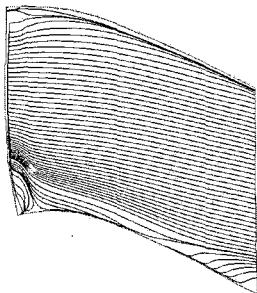


d) suction side streamlines

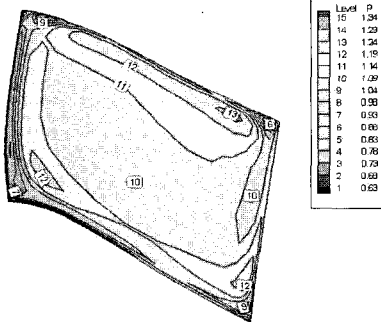
Fig. 7 Pressure and streamlines distribution on rotor surface



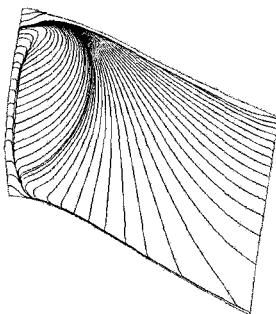
a) pressure side pressure contours



b) pressure side streamlines



c) suction side pressure contours



d) suction side streamlines

Fig. 8 Pressure and streamlines distribution on stator surface

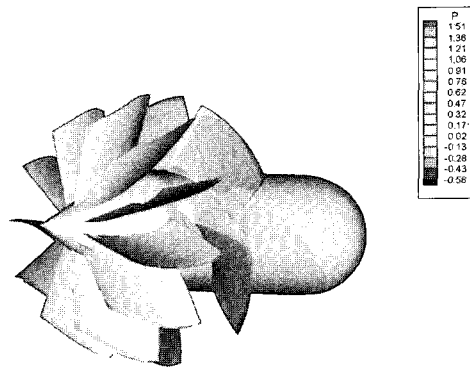


Fig. 9 Pressure distribution on whole pump region

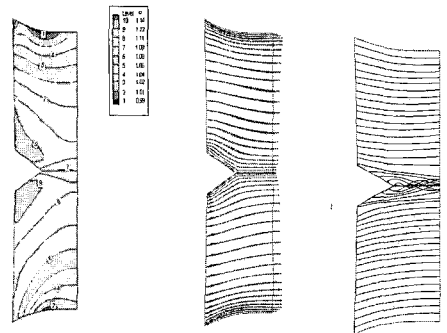


Fig. 10 Pressure contour, vector, and streamlines at nozzle area

Table 2 Comparison of Momentum and torque between computation and model test

Model speed : 1.48m/s, RPM : 3400

	Exp.	Comp.	Relative error
$M_1(N)$	59	64	8.60%
$M_7(N)$	127	126	0.82%
Torque (Nm)	1.64	1.91	16.8%

M_1 : Momentum at inlet region, front region of duct

M_7 : Momentum at nozzle, the end of duct

하리라 생각된다. 이러한 차이에도 불구하고 모형 스케일의 토오르크를 실선화하여 10km/h의 속도를 내는데 필요한 마력을 추정하면 약 70PS로 설계 마력 100PS보다 많이 작아 실제로 10km/h를 상회할 것으로 생각된다. 이는 실제로 설계된 워터제트의 성능이 초기추정치보다 우수하기 때문이라 말할 수 있겠다. 모형시험방법 및 과정에 대한 자세한 내용은 참고자료(Chun et al. 2003)를 참조하기 바란다

4. 결론

본 연구를 통하여 POD형 워터제트 시스템에 대한 설계 및 성능해석 방법을 제시하였으며 또한 이를 토대로 POD형 워터제트 특성 파악 및 성능향상의 방향을 제시하였다. 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 개발된 CFD프로그램을 이용한 해석에 의해 POD형 워터제트의 설계를 수행할수 있음을 보였다.
- 설계된 워터제트의 성능은 초기추정치보다 높았으며 이는 실험결과와 계산결과에서 알수 있었다.
- 개발된 CFD 해석프로그램은 노즐에서의 모우 멘텀값이 실험과 잘 일치하였으나 토오르크 값에서 다소 큰 차이를 보여 이에 대한 비교 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 (주)로템과 첨단조선공학 연구센터의 지원으로 연구되었으며 관련 제위께 심심한 감사를 표한다.

참 고 문 헌

- 왕정용, 전호환, 차상명, 2001, "궤도차량용 물분사 추진기 관내 유동계측 및 점성 유동해석," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 191-194.
- 전종길, 박원규, 전호환, 김문찬, 2002, "로터-스테이터 상호작용을 고려한 물분사 추진기 내부 유동해석," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 140-143.
- 전호환, 안봉환, 차상명, 2001, "물분사추진 궤도차량의 자항성능 시험 및 해석," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 146-150.
- Allison, J.L., 1993, "Marine Waterjet Propulsion," SNAME Transactions, Vol. 101,

pp. 275-335.

- Chun, H.H., Kim, M.C., Ahn, B.H. and Cha, S.M. 2003, "Self-Propulsion Test and Analysis of an Amphibious Tracked Vehicle with Waterjet," SNAME annual meeting, San-fransisco. D6. Room D133.
- Dring, R.P., et al., 1982, "Turbine Rotor-Stator Interaction," Journal of Engineering for Power, Vol. 104, pp. 729-742.
- Kim, M.C., Chun, H.H. and Park, W.G. 2003, "Design of a Waterjet Propulsion System form an Amphibious Tracked Vehicle," Fast 2003 Symposium, Ischia, Italy.
- Kim, Y.G., Lee, J.T., Lee, C.S. and Suh, J.C., 1993, "Prediction of steady performance of a propeller by using a potential-based panel method," Journal of Society of Naval Architect of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 73-86.
- Park, W.G. and Sankar, L.N., 1993, "A Technique for the Prediction of Unsteady Incompressible is Viscous Flows," AIAA Paper 93-30063.
- Van Manen, J.D. 1962, " Effect of Radial Load Distribution on the Performance of Shrouded Propellers," RINA Spring Meeting, pp. 185-196.



< 김 문 찬 >



< 전 호 환 >



< 박 원 규 >



< 변 태 영 >



< 김 종 현 >



< 서 성 부 >