'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

3차원 Navier-Stokes 계산에 의한 축류펌프의 성능예측

Prediction of an Axial Pump Performance by Three-Dimensional Navier-Stokes Calculation

김민환, 김종인, 박진석, 허형, 김지호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

축류펌프의 임펠러와 디퓨저에 발생하는 3차원 난류유동에 대한 전산유체역학 해석을 수행하였다. 펌프의 설계점뿐만 아니라 탈 설계점에 대한 계산도 수행하였다. 계산될 결과는 이용 가능한 실험값과 비교하였다. 설계점에서 해석결과는 실험의 수두 값을 정확하게 예측하였다. 고유량 영역에서의 결과도 절대값 뿐만 아니라 곡선의 기울기까지 실험 값과 잘 일치하는 결과를 주었다. 저유량 영역에서는 비교 가능한 실험치가 없지만 계산결과는 축류펌프의 특성인 S-형상의 성능곡선을 잘 모사함을 보여주었다.

Abstract

The CFD analysis of the three-dimensional turbulent flow in the impeller and diffuser of an axial flow pump was performed. Not only the design point but also the off-design points were computed. The results were compared with available experimental data in terms of head generated. At the design point, the analysis accurately predicted the experimental head value. In the range of the higher flow rates, the results were also in very good agreement with the experimental data, in absolute value but also in term of slope. Although experimental data to be compared were not available in the range of the lower flow rates, the results well described the S-shape performance curve of the axial pump characteristic.

1. 서론

최근에 급속하게 발달된 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD)의 기술은 여러 분야에서 설계된 결과를 확인하는 수치적인 실험을 가능하게 만들고 있다. 특히 예전엔 CFD 해석의 복잡성과 계산시간 등으로 인하여 불가능했던 터보기계 분야 해석까지 그 범위를 확장하고 있다. 사용자에 익숙한 CFD 코드의 개발과 하드웨어 비용의 감소는 설계자가 직접 CFD 해석을 하고 결과를 설계에 반영할 수 있도록 도와주고 있다.

한국원자력연구소에서는 일체형원자로 SMART에 사용될 냉각재순환펌프(Main Coolant Pump;

MCP)를 개발 중에 있다[1]. MCP는 축류형 펌프로 원자로 상단에 설치되어 노심에서 발생된 열을 증기발생기로 공급하는 역할을 수행한다. MCP는 설계 후에 원형이 제작되고 성능시험이 수행될 예정이다. SMART MCP의 성능곡선은 실험을 통하여 제공되어야 하는 것이지만 타 설계분야에서 설계입력으로 사용될 MCP의 성능곡선을 요구하고 있다. 따라서 실험 전에 성능곡선을 생성할 방법의 개발이 필요하게 된다.

본 연구의 목적은 CFD 기법을 이용하여 축류펌프(axial pump)의 임펠러 설계 결과의 확인과 실험 전에 타 분야 설계입력 자료로 사용될 성능곡선을 생성할 수 있는 가능성을 조사하는데 있다. CFD 계산은 모형실험이 수행된 축류펌프 임펠러를 대상으로 수행하였다. 먼저 실험에 대하여 간단히 기술하고 계산에 사용된 CFD 코드와 계산방법을 소개한 후, 계산결과를 실험값과 비교하여 CFD 기법의 타당성을 평가하였다.

2. 실험

본 논문의 대상문제는 1단(one stage)의 축류펌프로 회전하는 임펠러와 안내깃(guide vane)의 역할을 하는 디퓨저로 구성되어 있다. 임펠러 설계코드를 개발[2]하면서 코드 검증을 위한 모형을 설계하였다. 모형 임펠러의 설계 유량은 $0.134 m^3/sec$, 설계 수두는 3.47m이고 회전수는 3000rpm으로 1기압, 20°C에서 작동하도록 되어있다.

설계된 임펠러와 디퓨저의 형상데이터는 표 1에 나타내었다. 표에서 R은 반경, l은 코드길이, t는 블레이드 사이의 간격을 나타내는 피치(pitch), 그리고 β_1'과 β_2'은 축방향을 기준으로 블레이드의 입구각과 출구각을 나타낸다. 임펠러와 디퓨저의 단면형상은 DCA(double circular arc) 형상으로 결정되었으며 개수는 각각 5개와 9개이다.

표 1 임펠러와 디퓨저의 설계값

<임펠러>

R (mm)	32.6	40.4	46.8	52.4	57.5	62.2	66.5	70.6	74.5	78.2	81.7
l(mm)	32.9	35.4	37.7	39.8	41.6	43.4	45.2	46.9	48.8	50.6	52.3
t(mm)	41.0	50.7	58.8	65.9	72.3	78.2	83.6	88.8	93.6	98.2	102.6
두께/l(%)	10.	9.23	8.63	8.14	7.72	7.35	7.02	6.73	6.46	6.22	6.00
β_1'(deg)	61.26	65.62	68.57	70.82	72.77	72.41	75.81	77.02	78.08	79.02	79.87
β_2'(deg)	25.94	39.80	47.27	51.99	55.12	57.35	59.02	60.31	61.33	62.14	62.80

<디퓨져>

R (mm)	32.6	40.4	46.8	52.4	57.5	62.2	66.5	70.6	74.5	78.2	81.7
l(mm)	19.1	18.3	18.8	19.7	20.8	22.1	23.3	24.6	25.8	27.0	28.3
t(mm)	22.8	28.2	32.7	36.6	40.1	43.4	46.5	49.3	52.0	54.6	57.7
두께/l(%)	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.
β_1'(deg)	29.39	24.52	21.48	19.35	17.74	16.48	15.46	14.6	13.88	13.25	12.69
β_2'(deg)	-11.6	-11.7	-11.2	-10.6	-10.0	-9.47	-8.97	-8.52	-8.12	-7.75	-7.42

이와 같이 설계된 임펠러와 디퓨저를 선박해양연구소에서 제작하고 그 곳의 수동(water tunnel)에서 실험을 수행하였다. 그림 1에 알루미늄으로 제작된 임펠러와 디퓨저의 형상과 실험장치인 수동에 설치된 모습을 보여주고 있다.

그림 2는 실험 모형의 설치 영역과 설치 위치를 간략하게 도시한 것이다. 임펠러는 앞쪽에 있는 동력계(dynamometer)에 연결하여 회전수를 조절하면서 토오크와 추력을 측정하였다. 임펠러에

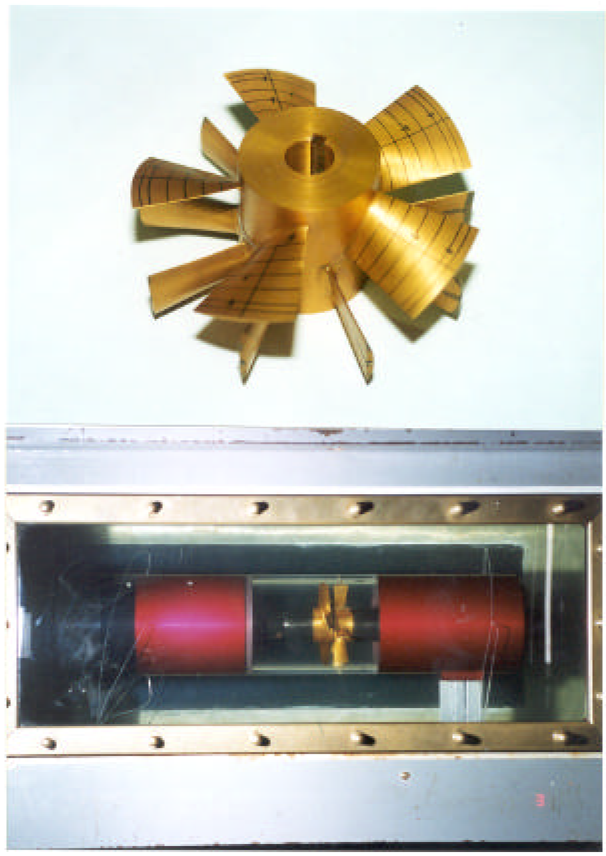

그림 1 임펠러와 디퓨저의 형상과 설치모습

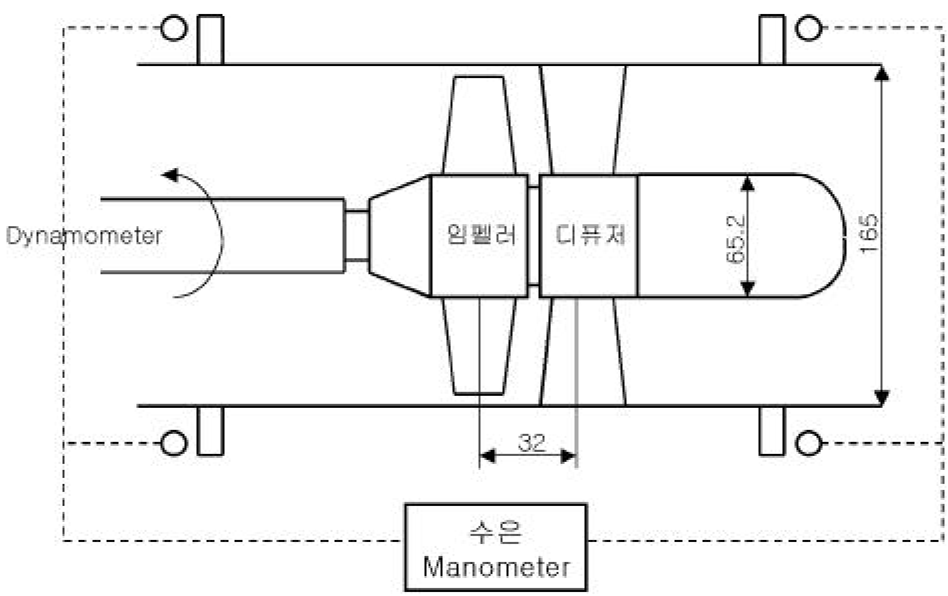

그림 2 실험장치의 구성도

전달되는 토오크 만을 얻기 위해서 성능시험을 하기 전에 임펠러의 허브부분에 해당하는 부분만 제작하여 동력계에 연결하여 토오크를 측정하고 나중에 임펠러를 설치한 후에 측정된 값을 먼저 측정한 값으로 빼주면 순수하게 임펠러에 전달된 토오크를 얻게 된다. 수동이 선박에 사용되는 프로펠러 실험을 위한 목적으로 설계된 것이어서 유량 측정장치가 부착되어 있지 않다. 따라서 LDV(laser doppler velocimeter)를 이용하여 속도를 측정하고 속도분포로부터 유량을 산출하는 방식을 취하였다. 양정을 측정하기 위하여 그림 2에 나타난 바와 같이 임펠러를 기준으로 2D 떨어진 앞 뒤 위치에서 관을 90°로 나눈 4개의 위치에 각각 튜브(tube)를 설치하고 4개의 튜브를 한데 모아 수은 manometer를 이용하여 압력차를 측정하였다.

3. CFD 소프트웨어와 모델링 방법

본 연구에서는 터보기계 전용해석 코드인 FINE/Turbo 소프트웨어를 사용하여 CFD 해석을 수행하였다. 코드는 3차원 다중블록(multi-block) 정렬격자(structured grids)를 사용하며 레이놀즈-평균된 Navier-Stokes 방정식을 해석한다. 공간차분은 Jameson이 제안한 형태의 인공감쇠(artificial dissipation)를 이용한 격자중심식 유한체적법이 사용되었으며 4단(four-stage)의 Runge-Kutta의 시간적분 기법[3]을 이용하여 정상상태의 수렴된 해를 구한다. 나머지(residual) 항의 수렴을 가속하기 위하여 다중격자(multi grid) 방법과 더불어 local time stepping과 implicit residual smoothing 방법이 사용되었다. 난류모형은 Baldwin-Lomax 모형과 몇 개의 선형 및 비선형 $k-\varepsilon$ 모형을 제공하고 있다. 본 연구에 사용된 모형은 표준 $k-\varepsilon$ 모형을 사용하였다.

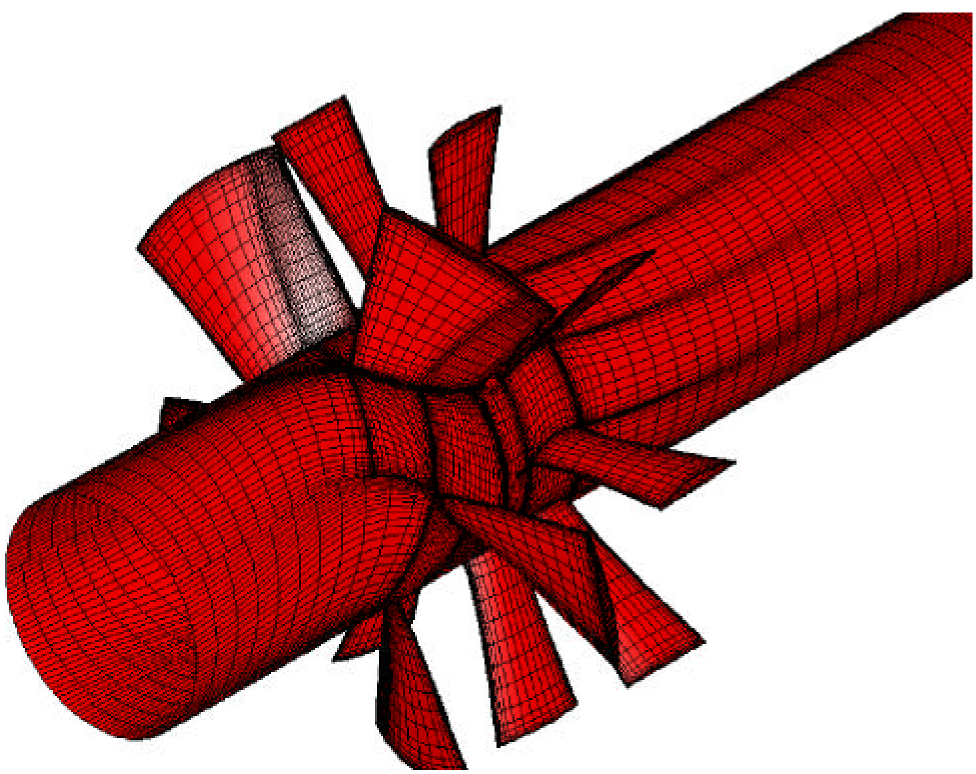

그림 3 계산에 사용된 임펠러와 디퓨저의 표면 격자계

격자는 임펠러와 디퓨저에 대하여 각각 I-형태의 격자를 구성하였다. 블레이드 통로에서는 non-matching 주기경계(periodic boundary)을 갖고 나머지 영역에서는 matching 주기경계를 갖는다. 그림 3은 본 계산에 사용된 격자계의 형태를 임펠러와 디퓨저의 표면에 나타낸 것이다. 격자계는 3개의 블록으로 구성되었으며 임펠러 영역에 사용된 격자는 반경 방향으로 33개, 회전방향으로 29개와 축방향으로 69개가 사용되었고 팁 간격 영역은 반경 방향과 회전방향으로 각각 9개의 격자점을 이용하여 블록을 추가하였다. 디퓨저 영역은 반경방향 21개, 회전방향 17개, 축방향 69개가 사용되었다. 본 계산에 사용된 총 격자점 수는 93,015개이며 정격유량일 때 벽면에서 y+값은 10 20의 값을 갖는다.

계산영역은 각 블레이드의 유로(passage)를 통하여 유량이 일정하게 나누어진다고 가정하고 한 블레이드에 대한 영역을 계산영역으로 설정하였다. 임펠러 입구경계조건으로 입구에서 유량에 맞는 속도를 고정하였으며 임펠러 출구에서는 반경평형을 구속조건으로 압력을 고정하였다. 임펠러 영역은 회전좌표계에서 정의되고 나머지 영역은 고정좌표계로 두었다. 임펠러와 디퓨저가 접하는 경계인 임펠러 출구와 디퓨저 입구는 회전방향으로 평균된 물리량이 경계면을 통하여 보존되는 혼합평면법이 적용되었다. 수치기법과 경계조건에 대한 자세한 사항은 참고문헌 [4],[5]에 나타나 있다.

4. 계산 및 결과

4.1 설계점에서 유동해석

설계점에서 계산결과와 실험의 비교는 CFD 코드가 실험을 대신하여 펌프 성능을 검증하고 설계에 feedback을 주는 것이 가능한지를 판단하는 기준이 될 수 있다.

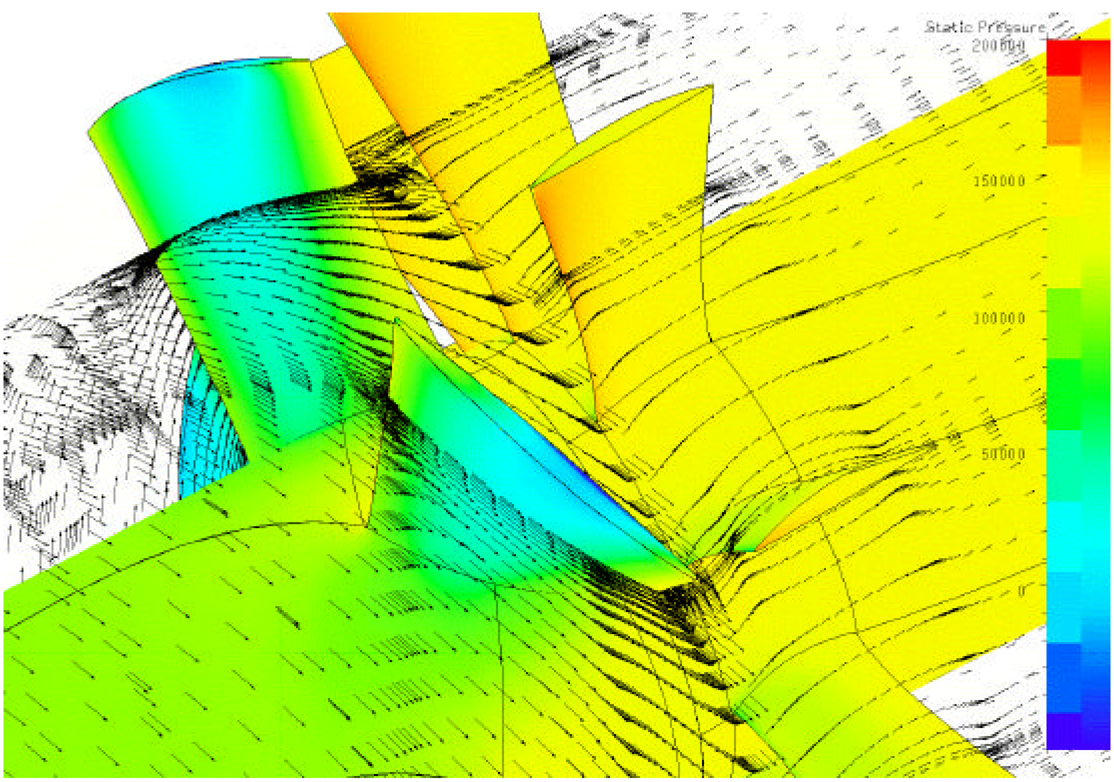

그림 4 평균반경에서 속도벡터와 표면 압력분포

그림 4은 평균반경 위치에서 임펠러의 속도벡터를 임펠러 표면에 작용하는 정압과 함께 도시한 것이다. 임펠러의 팁 부근을 제외하고는 반경방향으로 각 코드를 따라 비슷한 형태의 압력분포를 보이고 있다. 팁에서는 vortex roll-up의 영향으로 압력면(pressure surface)에서 가장 낮은 압력 값을 보이고 있다. 디퓨저의 앞전(leading edge)에서 압력이 가장 높은 것으로 볼 때 임펠러를 빠져 나온 유동이 큰 손실 없이 디퓨저로 잘 유입됨을 짐작하게 한다.

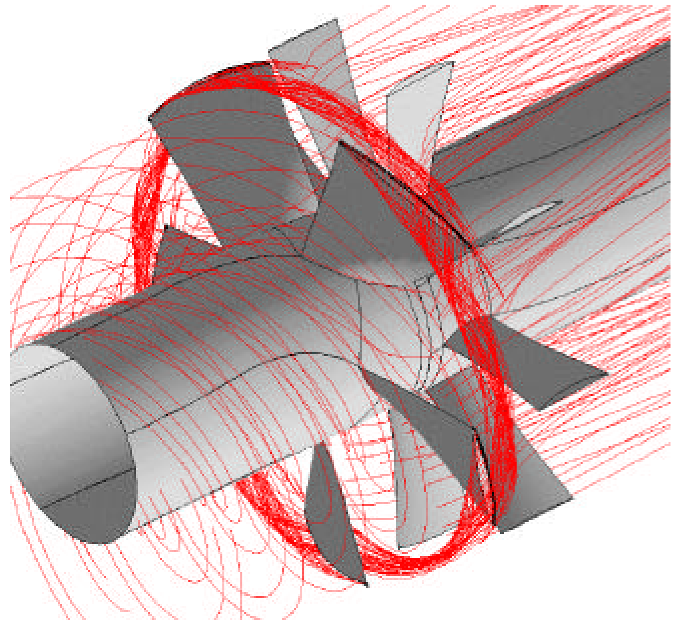

그림 5 유동의 흐름 형태를 보여주는 경로선

그림 5는 임펠러와 디퓨저를 지나는 유동의 경로선(pathline)을 표시한 것이다. 임펠러 영역은 회전하는 좌표계에 대한 것이고 디퓨저는 고정된 좌표계에 대해 나타낸 것이다. 임펠러 팁 영역을 제외하고는 유동이 완만하게 유지되는 것을 알 수 있다. 팁에서는 블레이드의 흡입면(suction surface)과 압력면의 압력차로 발생한 vortex roll-up을 보여주고 있다. vortex roll-up의 영향으로 팁 간격으로 빠져나온 흐름이 디퓨저로 유입되지 못하고 다음 블레이드로 유입되기 때문에 블레이드 면을 지나는 유동보다 뒤처진 흐름을 보여주고 있다.

정격유량에서 실험결과는 4.2m로 3.47m의 설계값보다 20% 정도 높은 결과를 얻었다. 계산된 압력차는 41130 Pa로 수두로 환산하면 4.18m로 실험과 비교하면 1%이내의 정확도를 보여주고 있다. 계산 결과로부터 CFD 코드가 설계된 임펠러의 정격수두 생성 여부를 확인하고 결과에 따른 피이드 백을 설계에 주는 도구로 활용이 가능함을 알 수 있다.

4.2 탈설계점(off-design point)에서의 유동해석

펌프의 성능곡선을 완성하기 위해서는 탈설계점에서 유량변화에 따른 수두를 계산하여야 한다. 본 연구에서는 $40m^3/hr$, $80m^3/hr$, $160m^3/hr$, $240m^3/hr$, $320m^3/hr$, $400m^3/hr$, $480m^3/hr$, $560m^3/hr$ 및 $600m^3/hr$의 유량에 대하여 계산을 수행하였다.

그림 6은 계산결과로 얻어진 수두-유량 곡선을 실험 값과 비교한 것이다. 실험이 수행된 영역이 설계점과 설계점보다 높은 곳에만 분포하는 이유는 실험에 사용된 수동에서 3000rpm을 유지하면서 얻을 수 있는 유량에 한계가 있었기 때문이다. 결과에 따르면 설계점과 고 유량 영역에서 수두뿐 만 아니라 곡선의 기울기가 실험 결과와 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 고유량 영역에서 성능곡선의 기울기는 저유량 영역의 성능곡선의 예측에 미치는 영향이 상당히 크기 때문에 이 기울기의 정확한 예측은 중요하다고 할 수 있다. 저유량 영역에서 계산된 성능곡선은 유량이 감소하면서 수두가 증가하다가 정격유량의 50% 정도에서 언덕을 형성하면서 수두가 감소하는 형태를 보인 후, 유량이 더 낮아지면 다시 수두가 가파르게 상승하는 형태를 보이고 있다. 이러한 S-형태의 곡선은 축류펌프에서 나타나는 전형적인 모양으로 계산결과가 펌프의 특성을 잘 모사하고 있음을 의미한다.

S-형태의 특성곡선을 설명할 수 있는 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7은 유량에 따른 유동의 형태와 총압력 분포를 자오선(meridional) 평면에 평균하여 투영한 것이다. 설계 유량에서는 팁 영역을 제외하고는 흐름이 왜곡 없이 완만하게 형성되고 있다. 고유량에서의 분포는 설계유량과

거의 같은 형태를 나타내었기 때문에 그림에서 생략하고 저유량에 대하여 나타내었다. 유량이 감소하면서 임펠러로 유입되는 유동의 입사각(incidence angle)이 증가하게되고 임펠러가 만드는 수두도 함께 증가한다.

유량의 감소에 의한 입사각이 어떤 값 이상이 되면 압력 변화가 큰 임펠러 블레이드의 흡입면에서 경계층의 박리가 일어나는데 이 현상은 팁 쪽에서 먼저 시작한다(Q=320m^3/hr). 경계층의 박리는 수두를 생성하는데 필요한 흐름의 굴절각 감소에 영향을 주어 수두를 감소시킨다. 이 박리현상은 완전히 3차원 형태로 블레이드 전체에 걸치지 않고 부분적으로 나타나는 부분 박리(partial separation)이며 회전수는 다르지만 블레이드와 함께 회전하는 선회실속(rotating stall) 현상이다. 유량이 320m^3/hr과 160m^3/hr 사이 영역이 이러한 현상이 발생하는 곳이다. 본 연구에 주기조건을 적용한 정상상태 계산을 하였기 때문에 부분박리 또는 선회실속을 포착할 수 없으나 수두 값은 평균된 값의 사용으로 충분하다.

유량이 더욱 감소하면 블레이드 높이에 걸친 전 영역에서 박리가 일어나는 완전 실속이 발생한다(Q=80m^3/hr). 완전실속에서 수두는 가장 낮은 값에 도달한 후, 유량이 감소함에 따라 박리영역은 커지면서 앞으로 이동하게 된다. 이때 임펠러 뒤쪽에서 발생한 역유동(reverse flow) 영역이 증가하면서 임펠러 영역으로 확장한다. 역유동 영역에 의해 쉬라우드(shroud)에는 축방향 흐름이, 허브(hub)쪽에는 축 반대 방향의 흐름을 발생한다. 이 역유동 현상은 쉬라우드 쪽의 블레이드가 원래의 역학을 수행하도록 하여 비록 효율은 나쁘지만 유량이 감소함에 따라 다시 수두가 증가하는 현상을 보여준다.

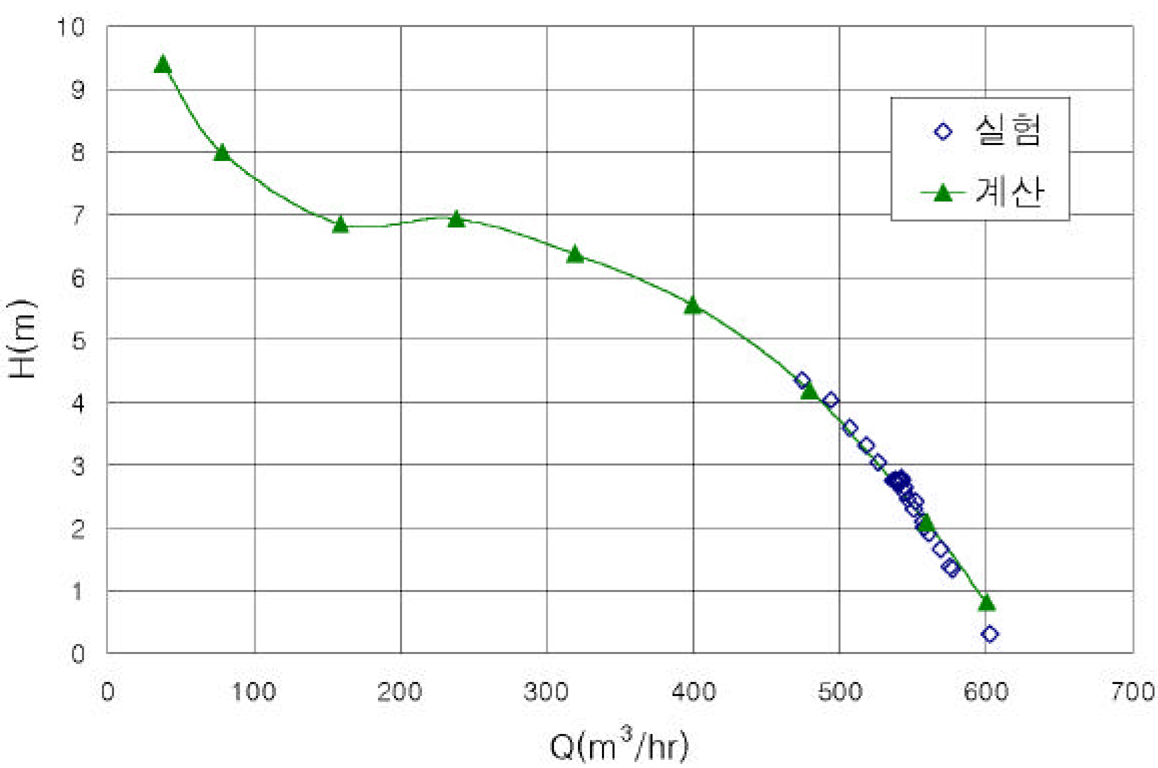

그림 6 수두-유량 특성곡선의 비교

그림 7 자오선면에 투영된 유동형태

그림 7 자오선면에 투영된 유동형태

5. 결론

축류펌프 임펠러와 디퓨저의 내부유동을 레이놀즈 평균된 3차원 Navier-Stokes을 이용하여 수치적으로 해석하고 계산결과를 실험과 비교하여 분석하였다. 설계점에서 계산한 결과는 실험으로 얻어진 수두와 거의 일치하는 결과를 보여주었다. 탈 설계점 해석에서는 펌프의 성능곡선이 고유량 영역에서 실험결과를 잘 모사하고 있음을 확인하였다. 저유량 영역의 결과는 비교할 실험값이 없지만 축류펌프에서 나타나는 전형적인 S-형상의 성능곡선을 보여줌으로써 물리적으로 타당한 결과를 생산하였다.

결과를 종합해 볼 때, CFD 해석을 이용하여 축류펌프 임펠러가 정격유량에서 정격수두를 생성하도록 설계가 되었는지 확인하고 결과에 따른 피이드 백을 설계에 줄 수가 있으며, 또한 실험 전에 타 분야의 설계입력으로 제공되어야 할 펌프의 성능곡선을 생성하는 도구로 활용이 가능함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

6. 참고문헌

[1] 박진석, 허형, 김종인. 구대현, “SMART 냉각재순환펌프 개념설계,” ‘98 춘계학술발표회 논문집(II), 한국원자력학회, pp. 995-890, 1998

[2] 김민환, 김종인, 박진석, 김용완, 김지호, “축류펌프 임펠러의 3차원 형상설계 기술개발,” KAERI TR-1267, 1999.

[3] A. Jameson, W. Schmit and E. Turkel, “Numerical Solutions of the Euler Equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time-Stepping Schemes," AIAA Paper 81-1259.

[4] FINE™ Numeca's Flow Integrated Environment, User Manual, Numeca Inc., Feb. 1999.

[5] Ch. Hirsch, C. Lacor, A. Rizzi, P. Eliasson, I. Lindblad and J. Hauser, "A Multiblock/Multgrid Code for the Efficient Solution of Complex 3D Navier-Stokes Flows," in the Proceedings of the First European Symposium on Aerodynamics for Space Vehicles, pp. 415-420, ESTEC, ESA