

전산유체역학 코드를 이용한 SMART MCP의 성능곡선 생성
및 1대 펌프 정지시의 성능예측

Performance Curve Generation of SMART MCP and Performance
Prediction with Power Failure on One MCP using CFD Code

김민환, 김종인, 박진석, 허형, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

전산유체역학 코드를 이용하여 SMART MCP의 성능곡선을 생성하였다. 생성된 성능곡선은 전형적인 축류펌프의 성능곡선을 보였으며 실험 전에 타설계분야의 설계입력으로 제공된다. 4대 MCP가 병렬운전 중에 1대 MCP 정지되고 다른 3대는 계속 운전될 때 SMART MCP의 성능예측을 위한 계산 절차를 개발하고 정지된 MCP의 임펠러가 고정된 경우와 자유롭게 회전하는 두 경우에 대한 해석을 수행하였다. 결과에 따르면 정지된 MCP의 임펠러가 고정된 경우에 정상운전의 73%의 유량이 노심으로 공급되고 임펠러가 자유롭게 회전하는 경우엔 정상운전 유량의 62.8%가 노심으로 공급된다.

Abstract

The performance curve of SMART MCP was generated using a computational fluid dynamics code. The generated curve showed the typical type of axial pump performance curve and provided to other design branches as design input. When four MCPs operate in parallel and power of one of them fails while the others continue to operate, a procedure for predicting the performance of SMART MCP was developed and an analysis was performed for two cases: the impeller of failed MCP is locked or free to rotate in reverse direction. According to the results, 73% flow rate of normal operation enters the core in the case of the locked impeller. In case of the impeller free rotation, the flow rate entering the core is 62.8%.

1. 서론

한국원자력연구소에서는 일체형원자로 SMART에 사용될 냉각재순환펌프(Main Coolant Pump: MCP)를 개발 중에 있다. MCP는 축류형 펌프로 원자로 상단에 수직으로 4대가 설치되며 병렬운전 된다^[1]. MCP 축에는 임펠러가 장착되어있으며 임펠러는 MCP에 요구되는 유량과 수두를 생성

하여 노심에서 가열된 냉각재를 증기발생기로 공급하는 역할을 수행한다. 현재까지 임펠러와 디퓨저의 설계절차^[2]가 개발되었으며 모형실험을 통하여 설계의 타당성이 검증되었다. 또한 전산유체 역학을 이용하여 타 설계분야의 설계입력으로 사용될 MCP의 수력학적 성능곡선을 생성하는 절차도 개발되었으며 실험과 비교하여 그 신뢰성이 확인되었다^[3].

4대의 MCP가 병렬운전 중에 1대가 정지할 경우, 정지된 MCP를 통하여 역유동(reverse flow)이 발생한다. 역유동의 유량은 역류방지장치의 존재유무에 따라 다른 결과를 가져오게 되며 SMART MCP의 운전특성에 영향을 미친다. 본 연구에서는 전산유체해석을 이용하여 타 분야의 설계입력으로 사용될 SMART MCP의 특성곡선 생성하고 역류 발생시 MCP의 특성을 예측하고 분석하는데 그 목적이 있다.

2. 계산 모형

SMART MCP의 유동부는 회전하는 임펠러와 안내깃(guide vane)의 역할을 하는 디퓨저로 구성되어 있다. SMART MCP의 설계유량은 $2006\text{m}^3/\text{hr}$, 설계 수두는 17.5m 이고 회전수는 3600rpm 으로 15MPa , 310°C 에서 작동한다. 설계된 임펠러의 형상은 그림 1에 나타나있다. 임펠러의 허브 직경은 110mm 이고 팁 직경은 267mm 이며 팁 간격은 1.5mm 이다. 임펠러와 디퓨저의 단면은 DCA(double circular arc) 형상이며 개수는 각각 5개와 9개이다.



그림 1 설계된 SMART MCP 임펠러와 디퓨저 3차원 형상

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^[4]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 $k-\epsilon$ 모형을 제공하고 있다. 본 연구에 사용된 모형은 벽함수(wall-fuction)을 도입한 표준 $k-\epsilon$ 모형이다.

3. MCP 성능곡선

성능곡선을 생성하기 위하여 임펠러와 디퓨저에 I-형태의 격자를 구성하였다. 그림 2는 블레이드와 블레이드 사이의 통로에 생성된 격자계를 회전방향으로 반복하여 보인 것이다. 블레이드 단면을 제외하고 임펠러에서는 non-matching 주기경계를 가지며 디퓨저에서는 matching 주기경계를 갖는다. 격자계는 3개의 블록으로 구성되었으며 임펠러 영역에 사용된 격자는 반경 방향으로 41개, 회전 방향으로 33개 및 축 방향으로 93개가 사용되었고 팁 간격 영역은 반경 방향과 회전 방향으로 각각 9개의 격자점을 이용하여 블록을 추가하였다. 디퓨저 영역은 반경 방향 33개, 회전 방향 25개 및 축 방향 93개가 사용되었다. 성능곡선 생성에 사용된 총 격자점 수는 205,551개이며 설계유량일 때 벽면에서 y^+ 값은 10~50 사이를 갖는다.

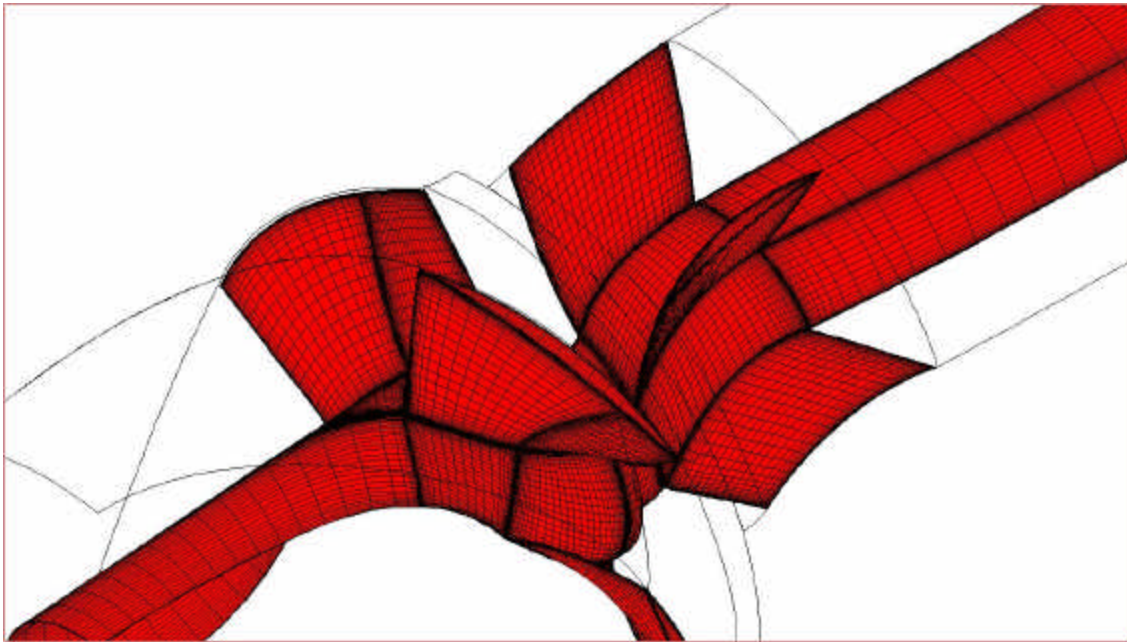


그림 2 성능곡선 생성을 위한 격자계

임펠러 입구경계조건으로 입구에서 유량에 맞는 속도를 고정하였으며 난류강도는 5%로 하였다. 임펠러 출구에서는 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 [5],[6]에 나타나 있다.

MCP 성능곡선을 생성하기 위하여 설계유량의 10%(201m³/hr), 25%(502m³/hr), 40%(802m³/hr), 55%(1103m³/hr), 70%(1404m³/hr), 85%(1705m³/hr), 100%(2006m³/hr), 110%(2207m³/hr) 및 120%(2407m³/hr)의 유량에 대하여 계산을 수행하였으며 수두는 입구와 출구의 총압력차로부터 다

음 식으로 계산된다.

$$H = \frac{\Delta P_t}{\rho g} \quad (1)$$

MCP의 수력학적 효율은 다음 식으로 계산된다.

$$\eta_h = \frac{\rho g Q H}{T \omega} \quad (2)$$

여기서 T 는 축에 작용한 토크(torque)이며 ω 는 회전수를 의미한다.

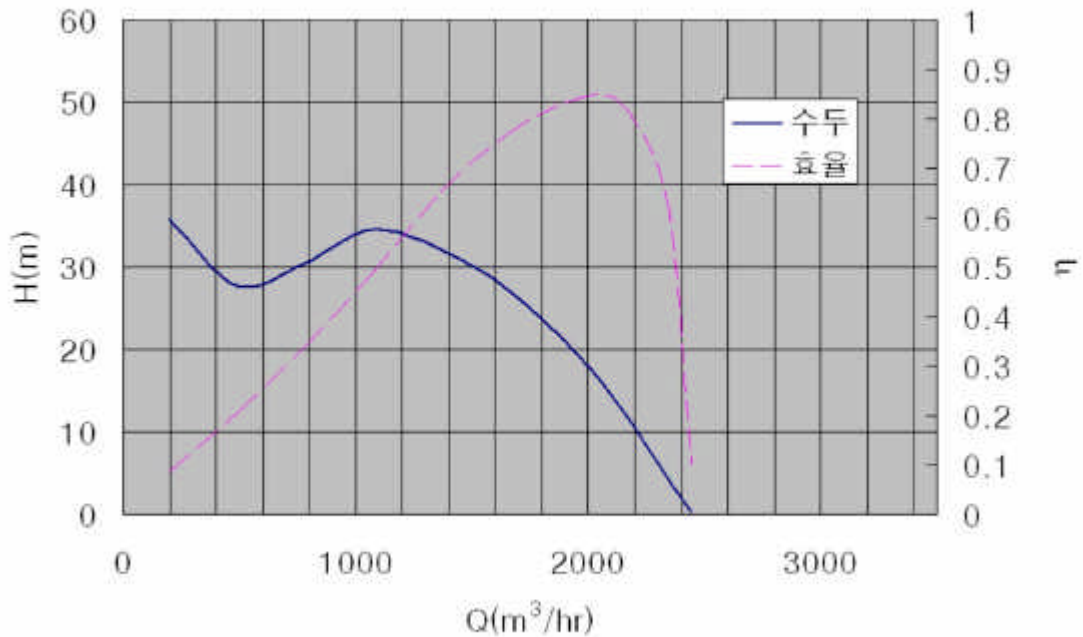


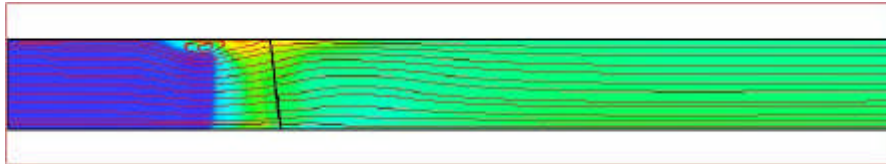
그림 3 SMART MCP의 성능곡선

그림 3은 계산결과로 얻어진 유량-수두 곡선을 나타낸 것이다. 설계유량보다 큰 영역에서는 유량이 증가할수록 거의 선형적인 수두 감소가 발생한다. 유량이 설계유량보다 작은 영역에서는 처음에 유량의 감소에 따라 수두가 선형적이 형태로 증가한다. 유량이 정격유량의 50% 정도에서 성능곡선이 언덕을 형성하고 유량 감소에 수두 감소 형태를 보인 후, 유량이 더 낮아지면 다시 수두가 상승하는 형태를 보이고 있다. 이러한 S-형태의 곡선은 SMART MCP와 같은 축류펌프에서 나타나는 전형적인 모양이다.

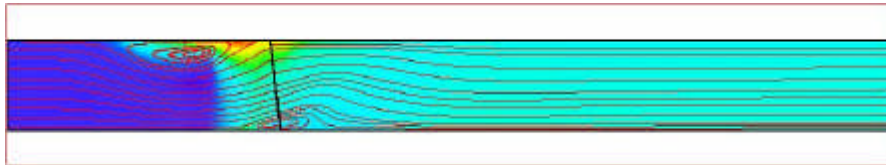
S-형태의 특성곡선은 그림 4로 설명될 수 있다. 그림 4는 유량에 따른 유동 형태를 총압력 분포와 함께 자오선(meridional) 평면에 투영한 것이다. 설계 유량(Q=2006m³/hr)에서는 팁 영역을 제외하고는 흐름의 왜곡 없이 완만한 유동을 보인다. 고유량에서의 분포는 임펠러를 전후한 압력 분포의 변화가 줄어드는 것을 제외하고는 설계유량과 유사한 형태를 나타낸다. 회전수는 일정한데 유량이 감소하기 때문에 임펠러로 유입되는 유동의 입사각(incidence angle)이 증가하게 되고 임펠러가 만드는 수두도 함께 증가한다. 유량의 감소에 의한 입사각이 어떤 값 이상이 되면 압력 변화가 큰 팁 근처의 블레이드 흡입면에서 경계층의 박리가 일어나게 된다.(Q=1404m³/hr). 경계층의 박리는 수두를 생성하는데 필요한 흐름의 굴절각 감소에 영향을 주어 수두를 감소시킨다. 이 박리 현상은 완전히 3차원 형태로 블레이드 전체에 걸치지 않고 부분적으로 나타나는 부분 박리(partial separation)이며 블레이드와 다른 회전수는 갖지만 블레이드와 함께 회전하는 선회실속(rotating



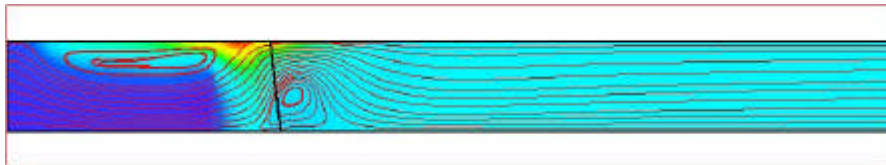
$Q = 2006 \text{ m}^3/\text{hr}(100\%)$



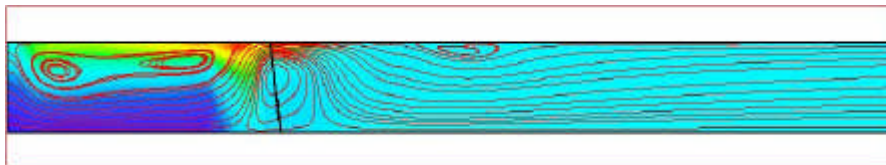
$Q = 1404 \text{ m}^3/\text{hr}(70\%)$



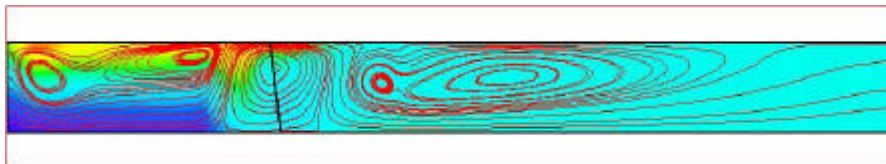
$Q = 1103 \text{ m}^3/\text{hr}(55\%)$



$Q = 802 \text{ m}^3/\text{hr}(40\%)$



$Q = 502 \text{ m}^3/\text{hr}(25\%)$



$Q = 201 \text{ m}^3/\text{hr}(10\%)$

그림 4 자오선 평면에 투영된 유동분포

stall) 현상이다. 이러한 현상은 유량 $1404\text{m}^3/\text{hr}$ 과 $802\text{m}^3/\text{hr}$ 사이의 영역에서 발생한다. 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($Q=502\text{m}^3/\text{hr}$). 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($Q=201\text{m}^3/\text{hr}$). 역유동 영역에 의해 쉬라우드(shroud)에는 축방향 흐름이, 허브(hub)쪽에는 축 반대 방향의 흐름을 발생한다. 이 역유동 현상은 쉬라우드 쪽의 블레이드가 원래의 역할을 수행하도록 하여 비록 효율은 나쁘지만 유량이 감소함에 따라 다시 수두가 증가하는 현상을 보여준다.

4. 역유동시의 MCP를 통한 압력강하 계산

본 연구에서 계산한 역유동은 임펠러가 고정된 경우와 임펠러가 역유동에 의해 자유롭게 회전하는 두 가지 경우에 대하여 수행하였다. 역유동은 디퓨저에서 유입되어 임펠러를 지나 유출되므로 임펠러 뒤쪽 계산영역을 길게 설정하였다. 그림 5는 역유동 해석에 사용된 격자계를 나타낸 것이다.

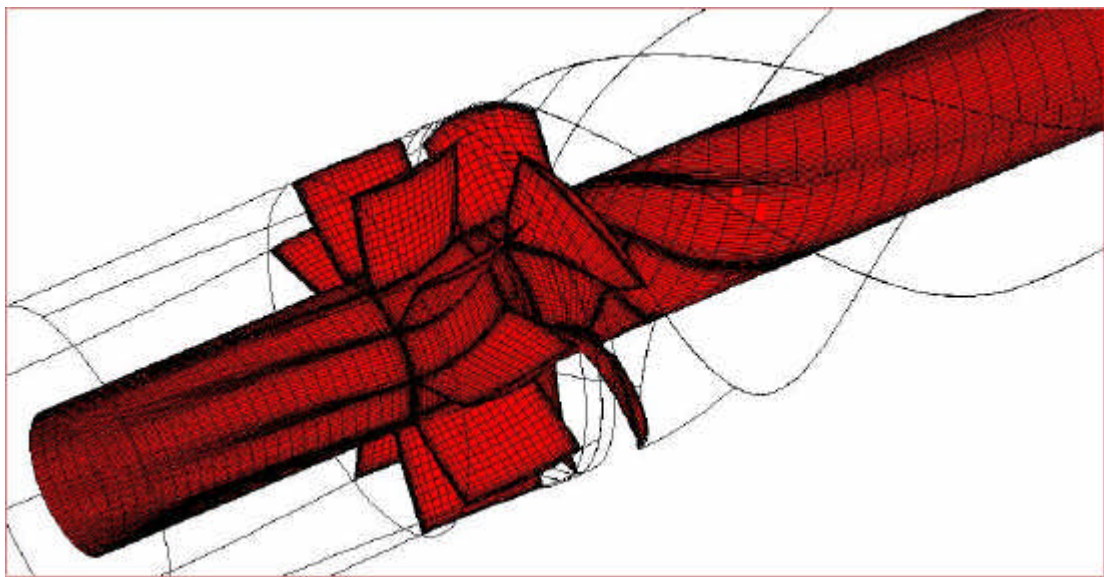


그림 5 역유동 해석을 위한 격자계

먼저 MCP에 역회전 방지장치가 있어 역유동 시에 임펠러가 회전되지 않는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 디퓨저와 임펠러는 고정된 좌표계에서 계산되며 디퓨저 입구에는 유량에 따른 속도값을 고정하였으며 출구에서는 압력값을 고정하였다. 유량에 따른 압력강하 곡선을 얻기 위하여 MCP 정격유량의 10%, 30%, 50%, 70% 및 100%가 역류할 경우에 대하여 계산을 수행하였으며 각 유량에 따른 압력강하를 표 1과 같이 구하였다.

표 1 역류시 고정된 임펠러를 통한 압력강하

유량(%)	유량(m ³ /hr)	압력강하 수두(m)
0	0	0
10	200.6	0.679
30	601.8	5.751
50	1003.0	15.714
70	1404.2	31.547
100	2006.0	65.350

임펠러가 유동에 의해 회전될 경우에 압력강하 계산은 고정된 경우와는 다른 방법으로 접근하여야 하며 수학적 모형은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d\omega}{dt} = T_h - T_m \quad (3)$$

여기서 T_h 는 유동에 의해 축에 작용하는 토크이고 T_m 은 기계적 손실에 의해 반대방향으로 작용하는 토크로 모두 회전수의 함수이다.

역유동에 의해 임펠러가 어떤 일정한 회전수에 도달했다고 가정하자. 이때 축에 작용하는 토크는 영이 아니라 회전수에 대응하는 기계적 손실에 의해 발생하는 손실토크 T_m 과 같게 된다. 즉, 식 (3)으로부터

$$T_h(\omega) = T_m(\omega) \quad (4)$$

이 된다. 따라서 CFD 해석에서는 회전수를 고정하고 유량을 바꿔가면서 유동에 의해 축에 발생하는 토크가 손실토크와 균형을 이루는 유량을 찾아 그 때의 입구와 출구의 압력차를 MCP를 통한 압력강하 값으로 사용하면 될 것이다. 하지만 설계가 진행되고 있는 현 상황에서 손실토크를 계산할 방법이 없다. 알려진 값은 MCP 설계시 가정한 3600rpm에서 기계적 효율(η_m) 값인 0.69 밖에 없다. 회전수 3600rpm에서 축에 전달되는 토크는 다음과 같다.

$$T_1 = \frac{\rho g Q H}{\eta_h \omega} \quad (5)$$

기계적 손실로 작용하는 토크는

$$T_m = \frac{T_1}{1 - \eta_m} = \frac{\rho g Q H}{(1 - \eta_m) \eta_h \omega} \quad (6)$$

이때 회전수 3600rpm, 유량 2006m³/hr, 수두 17.5m, $\eta_h = 0.75$, $\eta_m = 0.69$ 를 대입하면 T_m 은 73.8 N-m의 값을 갖는다.

임펠러의 회전수 3600rpm으로 두고 유동에 의해 축에 작용하는 토크가 73.8 N-m로 수렴되도록 유량을 바꾸면서 계산을 수행하였다. 계산된 값은 다음과 같다.

$$N_1 = 3600 \text{ rpm}, \quad Q_1 = 2195.8 \text{ m}^3/\text{hr}, \quad H_1 = 8.471 \text{ m}$$

다른 회전수에 대한 값은 3600 rpm에서 구한 값을 이용하여 다음의 상사법칙(affinity laws)으로 계산할 수 있다.

$$Q = Q_1 \left(\frac{N}{N_1} \right), \quad H = H_1 \left(\frac{N}{N_1} \right)^2 \quad (7)$$

5. MCP 4대 병렬운전 중 1대 정지시 성능예측

본 연구에서는 정지된 MCP 임펠러가 고정된 경우와 자유롭게 회전하는 경우에 대하여 분석하였다. 그림 6과 그림 7은 각각의 경우에 성능곡선과 저항곡선(system curve)을 나타낸 것이다. MCP 4대가 병렬로 운전될 때에는 전체성능은 유량이 4배가되고 생성 수두는 같다. 그림 6과 그림 7에서 A로 표시된 부분이 정상운전시의 운전점으로 유량은 $2006\text{m}^3/\text{hr}$ 의 4배인 $8024\text{m}^3/\text{hr}$ 이고 수두는 17.5m가 된다.

그림 6은 정지된 MCP 임펠러가 고정된 경우이다. MCP 1대가 정지되면 정지된 MCP를 통한 역류가 형성되며 저항곡선 또한 변하게 된다. 수정된 SMART의 저항곡선은 원래의 저항곡선에 정지된 MCP에서 발생하는 저항곡선을 유량 쪽으로 합하여 구할 수 있다. 1대의 MCP가 정지되었을 경우의 운전점은 3대 MCP의 성능곡선과 수정된 저항곡선이 만나는 B점이 된다. 이때의 유량은 $6650\text{m}^3/\text{hr}$, 수두 10m이다. 하지만 노심으로 공급되는 유량은 B점의 유량에서 1대의 MCP를 통하여 역류되는 C점의 유량을 뺀 값이다. C점에서 유량이 $800\text{m}^3/\text{hr}$ 이므로 결국 정지된 MCP가 회전하지 않고 3대 MCP가 병렬로 운전할 때 노심으로 공급되는 유량은 $5850\text{m}^3/\text{hr}$ 로 정상운전시의 73%이다.

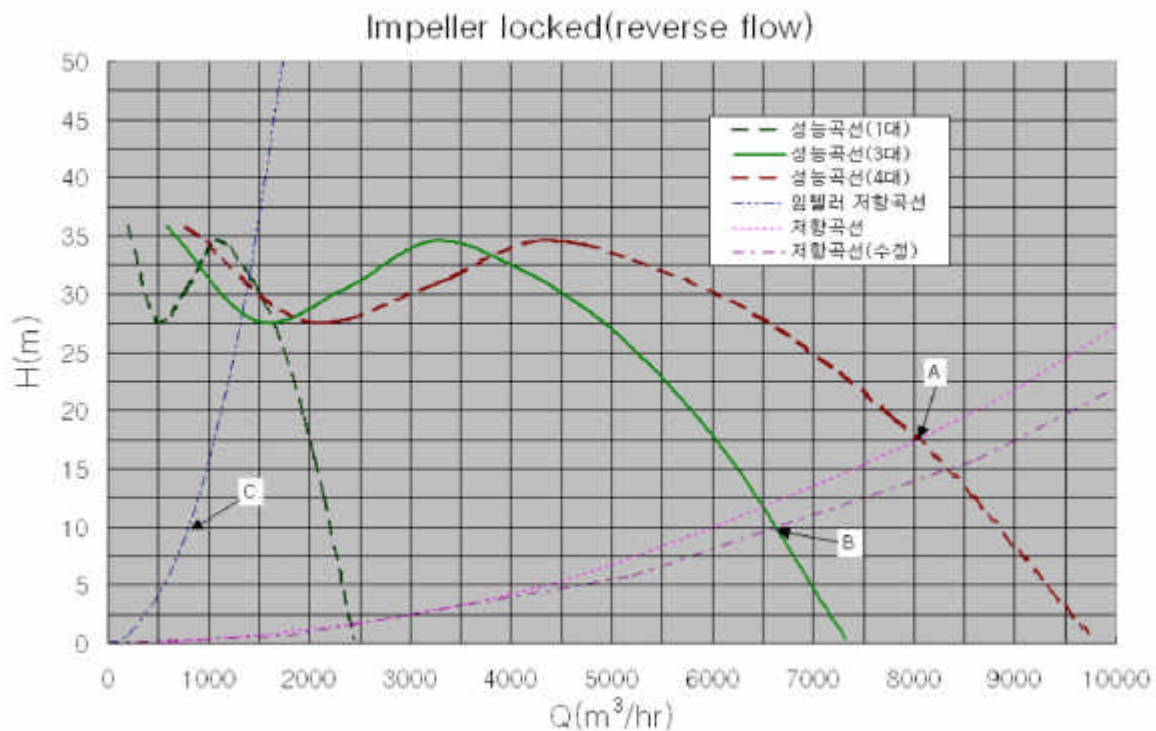


그림 6 정지된 MCP 임펠러가 고정된 경우의 유동특성

그림 7은 정지된 MCP 임펠러가 회전하는 경우이다. 4대운전시 운전점은 A로 앞선 경우와 같다. 회전하는 임펠러의 저항은 고정된 임펠러 경우보다 작기 때문에 저항곡선의 기울기가 작으며 상대적으로 많은 역유량이 발생할 것이다. 이 경우의 운전점은 B로 유량 $6950\text{m}^3/\text{hr}$, 수두 6.7m이다. 정지된 MCP를 통한 역유량은 C점의 유량으로 $1910\text{m}^3/\text{hr}$ 이며 임펠러가 고정된 경우보다 2배 이상의 양이다. 정지된 MCP 임펠러가 자유롭게 회전하고 3대 MCP가 병렬로 운전할 경우 노심으

로 공급되는 유량은 $5040\text{m}^3/\text{hr}$ 로 정상운전시의 62.8%이다.

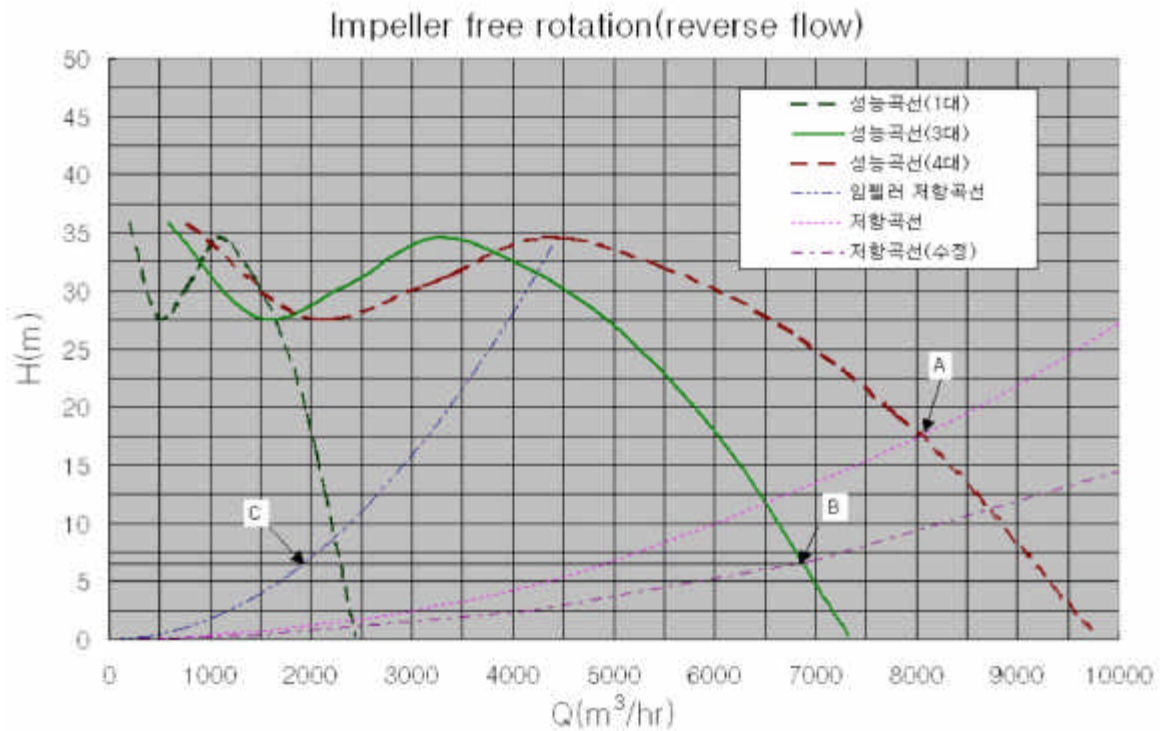


그림 7 정지된 MCP의 임펠러가 자유롭게 회전하는 경우의 유동특성

6. 결론

SMART MCP의 성능예측을 위하여 상용코드를 이용하여 수치적 해석을 수행하였다. 먼저 타 설계분야의 설계입력으로 제공될 MCP 1대의 성능곡선을 얻기 위하여 유량을 바꿔가며 계산을 수행하였다. 계산된 결과는 축류펌프에서 나타나는 전형적인 S-형상의 성능곡선을 나타내어 물리적으로 타당한 결과를 주었다. 다음으로 4대 MCP가 병렬운전 중 1대 MCP가 정지될 경우의 성능예측을 위하여 역유동에 대한 해석절차를 개발하고 수치해석을 수행하였다. 역유동은 정지된 MCP의 임펠러가 고정된 경우와 회전하는 경우에 대하여 수행하였으며 그 결과로부터 SMART MCP의 운전특성을 분석하였다. 해석 결과에 따르면 1대 MCP 정지되고 정지된 MCP 임펠러가 고정된 경우에 3대 MCP가 생성하는 노심으로 공급하는 유량은 정상운전 시 유량의 73%이며 임펠러가 자유롭게 회전하는 경우에 62.8%의 유량이 노심으로 공급된다.

결과를 종합하면, CFD 해석을 이용하여 물리적으로 타당한 MCP의 성능곡선을 생성하였으며 개발된 역유동 해석절차를 통하여 1대 MCP 정지시 SMART MCP의 운전특성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

7. 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] 김민환, 김종인, 박진석, 허형, 김지호, "3차원 Navier-Stokes 계산에 의한 축류펌프의 성능예측," '2000 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000
- [4] 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.
- [5] FINETM Numeca's Flow Integrated Environment, User Manual, Numeca Inc., Feb. 1999.
- [6] 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