



## 일체형원자로 SMART 냉각재순환펌프의 성능예측

Performance Prediction of Main Coolant Pump in Integral Reactor SMART

김민환\* 1), 박진석<sup>1)</sup>, 김종인<sup>1)</sup>

Min-Hwan Kim, Jin-Seok Park, Jong-In Kim

The performance prediction of SMART MCP was performed using a computational fluid dynamics code. General capacity-head performance curve of MCP, which is provided to other design branches as design input, was obtained and it showed the typical type of axial pump performance curve. When four MCPs operate in parallel and one of them stops while the others continue to operate, SMART requires reduced power operation. A procedure for predicting the performance of SMART MCP for that case was developed and verified with available experimental data. An analysis based on the developed procedure was performed for two cases; the impeller of stopped MCP is fixed or free to rotate in reverse direction. According to the results, 73% flow rate of normal operation enters the reactor core in the case of the locked impeller. In case of the impeller free rotation, the flow rate entering the reactor core is 62.8%.

### 1. 서 론

한국원자력연구소에서는 일체형원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)와 이에 사용될 냉각재순환펌프(Main Coolant Pump: 이하 MCP)를 개발하고 있다. MCP는 축류형 캔드모터펌프로 원자로 상단에 수직으로 4대가 설치되며 병렬운전 된다[1]. MCP 축에 장착된 임펠러는 노심에서 가열된 냉각재를 증기발생기로 공급하는 유량과 수두를 생성한다. 임펠러와 디퓨저의 설계절차[2]가 이미 개발되었으며 모형실험을 통하여 설계의 타당성이 검증되었다. 또한 전산유체역학을 이용하여 타 설계분야의 설계입력으로 사용될 MCP의 수력학적 성능곡선을 생성하는 절차도 개발되었으며 실험과 비교하여 그 신뢰성이 확인되었다[3].

본 연구에서는 전산유체 코드를 이용하여 타 분야의 설계입력으로 사용될 SMART MCP의 성능곡선을 생성하고 역류 발생시 MCP의 특성을 예측하고 분석하는데 그 목적이 있다. SMART는 4대의 MCP중 1대가 정지되더라도 출력을 감소하여 계속 운전이 가능하도록 설계되고 있다. 이러한 운전모드에서 정지된 MCP의 임펠러에는 역유동이 발생하며 역회전 방지장치의 유무에 따라 임펠러의 회전여부가 결정된다. 따라서 본 연구에서는 이 경우에 대한 MCP의 성능예측을 위한 계산 절차가 개발되었으며 임펠러 모형시험결과와 비교하였다. 개발된 절차를 이용하여 정지된 MCP의 임펠러가 고정된 경우와 자유롭게 회전하는 두 경우에 대한 MCP의 성능을 예측하였다.

### 2. 계산 방법

#### 2.1 MCP 형상

SMART MCP의 유동부는 회전하는 임펠러와 안내깃(guide vane)의 역할을 하는 디퓨저로

1) 한국원자력연구소



구성되어 있다. SMART MCP의 설계유량은 2006 m<sup>3</sup>/hr, 설계 수두는 17.5m이고 회전수는 3600rpm으로 15MPa, 310°C에서 작동한다. 설계된 임펠러의 형상은 그림 1에 나타나있다. 임펠러의 허브 직경은 110mm이고 팁 직경은 267mm이며 팁 간격은 1.5mm이다. 임펠러와 디퓨저의 단면은 DCA(double circular arc) 형상이며 개수는 각각 5개와 9개이다.

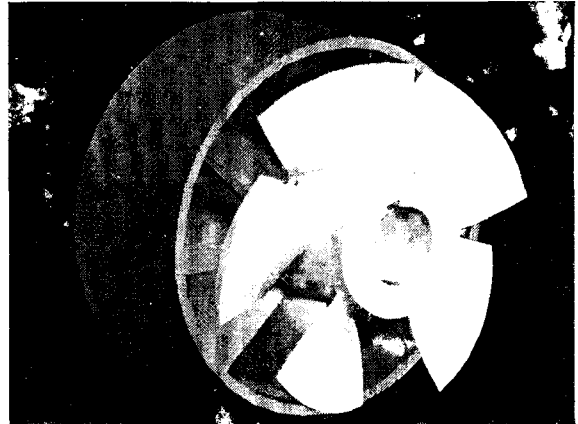


Fig. 1 Three-dimensional model of SMART MCP impeller and diffuser

### 2.2. 계산모형

본 연구에서는 터보기계 전용해석 코드인 FINE/Turbo[4] 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[5]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-function)을 도입한 표준  $k-\epsilon$  모형이다.

### 3. MCP 유량-수두 성능곡선

MCP의 성능곡선을 생성하기 위하여 임펠러와 디퓨저에 I-형태의

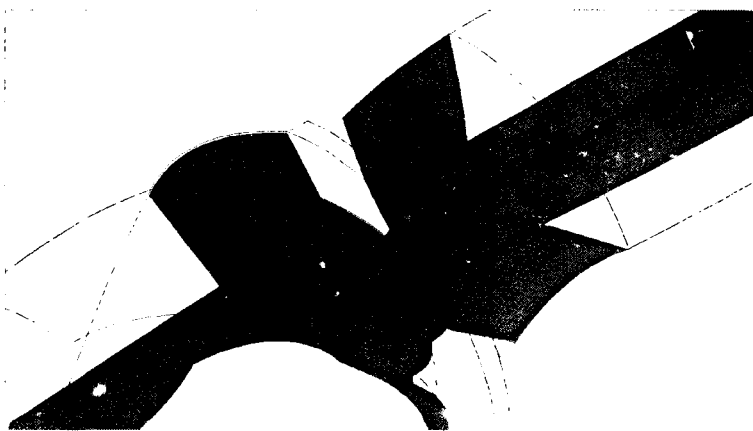


Fig. 2 Grid system for performance curve generation

격자를 구성하였다. Fig. 2는 블레이드와 블레이드 사이의 통로에 생성된 격자계를 회전방향으로 반복하여 보인 것이다. 블레이드 단면을 제외하고 임펠러에서는 non-matching 주기경계(periodic boundary)를 가지며 디퓨저에서는 matching 주기경계를 갖는다. 계산영역은 임펠러와 디퓨저의 경계를 하여 블레이드 높이 H를(78mm)를 기준으로 전방으로 3H를, 후방으로 7H로 선택하였다. 계산영역의 격자계는 총 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<sup>-5</sup>0 사이를

찾는다.

임펠러 입구경계조건으로 입구에서 유량에 맞는 속도를 고정하였으며 난류운동에너지  $k$ 와 난류 소산률  $\epsilon$ 의 입구조건은 다음 식들로부터 구하였다

$$k = 1.5 \times (T_u U_{inlet})^2 \tag{1}$$

$$\epsilon = C_\mu \frac{\mu}{\mu_t} \frac{\rho_{ref} k^2}{\mu} \tag{2}$$

여기서 난류강도 ( $T_u$ )는 5%, 난류점성계수비 ( $\mu_t/\mu$ )는 50으로 가정하였으며  $C_\mu$ 는 0.09이다.

임펠러 출구에서는 압력을 고정하고 나머지 값은 외삽(extrapolation)되었다. 임펠러 영역은 회전 좌표계(3600rpm으로 회전)에서 계산하고 나머지 영역은 고정 좌표계에서 계산하였다. 임펠러와 디퓨저가 접하는 경계인 임펠러 출구와 디퓨저 입구는 회전방향으로 평균된 물리량이 경계면을 통하여

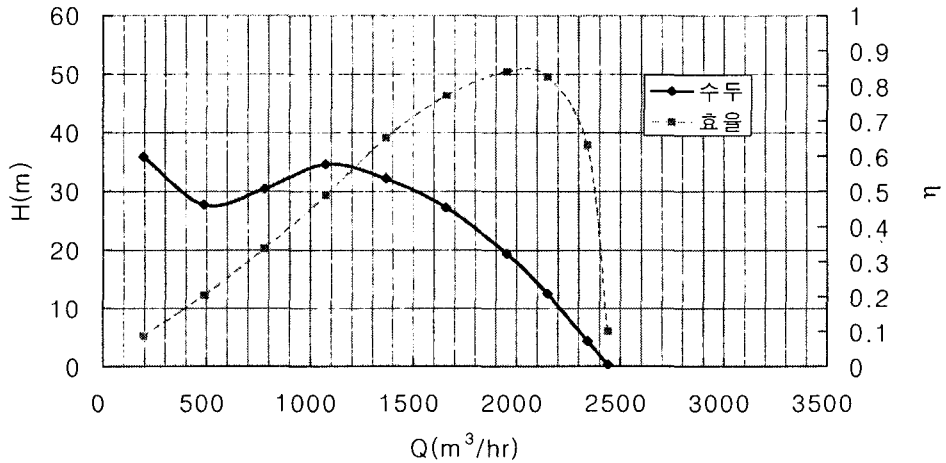


Fig. 3 Capacity-head performance curve for SMART MCP

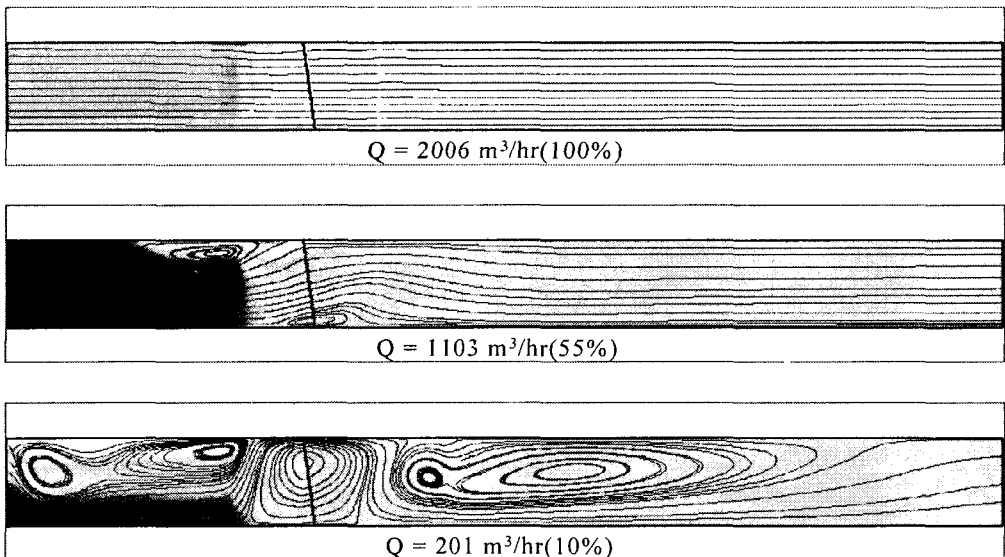


Fig. 4 Flow distributions projected on the meridional plane



보존되는 혼합평면법이 적용되었다. 수치기법과 경계조건에 대한 자세한 사항은 참고문헌 [4,6]에 나타나 있다.

MCP 성능곡선을 생성하기 위하여 설계유량의 10%, 25%, 40%, 55%, 70%, 85%, 100%, 110% 및 120%의 유량에 대하여 계산을 수행하였으며 수두는 입구와 출구의 총 압력차로부터 다음 식으로 산출하였다.

$$H = \frac{\Delta P_t}{\rho g} \quad (3)$$

또한, MCP의 수력학적 효율은 다음 식으로 계산된다.

$$\eta_h = \frac{\rho g Q H}{T \omega} \quad (4)$$

여기서  $T$ 는 축에 작용한 토크(torque)이며  $\omega$ 는 회전수를 의미한다.

Fig. 3은 계산결과로 얻어진 유량-수두 곡선, Fig. 4는 자오선면에 투영된 유동분포를 100%, 50% 및 10%의 유량에 대해 나타낸 것이다. 설계 유량( $Q=2006\text{m}^3/\text{hr}$ )에서는 임펠러에서 발생하는 손실이 가장 적기 때문에 효율도 가장 높다. 고정된 회전수에서 설계점보다 유량이 증가하면 임펠러의 블레이드로 접근하는 입사각(incidence angle) 또는 공격각(angle of attack)이 줄어들기 때문에 블레이드의 흡입면(suction surface)과 압력면(presure surface) 사이의 압력차가 발생하는 수두가 감소하게 되어 유량이 증가할수록 거의 선형적인 수두 감소가 발생한다. 이와 반대로 설계점보다 유량이 감소하면 블레이드의 입사각이 커져 흡입면과 압력면의 압력차가 증가하면서 수두가 증가하게 된다.

유량이 더욱 감소하여 어떤 입사각에서 유동의 박리(separation)가 발생하게되며 임펠러 팁(tip)에서 발생한 박리영역은 허브(hub)로 그 영역이 확대된다. 이 경우에 박리에 의한 압력손실이 커져 수두는 증가하지 못하게 된다. 따라서 유량감소 만큼 수두증가가 이루어지지 못하여 정격유량의 50% 정도에서 성능곡선이 언덕을 형성한 후 유량 감소에 따라 수두가 감소 형태를 보인다. 하지만 유량이 더욱 낮아지면 다시 수두가 상승하는 형태를 보이고 있다. 그 이유를 다음과 같이 설명된다. 그림 4의 50% 유량에서 임펠러 뒤쪽에서 발생한 역유동(reverse flow) 영역이 유량감소와 함께 증가하면서 임펠러 영역으로 확장한다. 결국 역유동 영역에 의해 팁 영역에는 축방향 흐름이, 허브 영역에는 축 반대 방향의 흐름이 발생한다(그림 4의 10% 유량). 이 역유동 현상은 팁에 가까운 블레이드가 원래의 역할을 수행하도록 하여 비록 효율은 나쁘지만 유량이 감소함에 따라 다시 수두가 증가하는 현상을 보여준다. SMART MCP 유량-수두 곡선에 나타난 S-형태의 곡선은 축류펌프에서 나타나는 전형적인 모양이다.

#### 4. 역유동시 MCP를 통한 압력강하 계산

본 연구에서 MCP 4대가 병렬운전 중 1대 정지시 원자로의 운전 특성을 예측하고자 한다. 이 경우에 정지된 MCP를 통하여 역유동이 발생하며 역유동에 의해 임펠러가 회전하느냐 아니면 역전방지장치 등의 설치에 의해 회전하지 않는가에 따라 원자로 계통의 저항곡선이 달라지며 원자로의 운전특성도 달라진다. 임펠러가 고정된 경우는 입구 유동조건을 다르게 하여 해석하면 정지된 MCP를 통한 압력강하를 결정할 수 있지만 자유로이 회전하는 임펠러를 통한 압력강하의 예측은 간단하지 않다. 본 연구에서는 자유 회전하는 임펠러를 통한 압력강하 예측방법을 제시하고 역유동시 MCP의 운전특성을 예측하였다.

##### 4.1 자유 회전하는 임펠러 통한 압력강하 예측

임펠러가 유동에 의해 회전된 경우에 수학적 모형은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d\omega}{dt} = T_h - T_m \tag{5}$$

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 될 것이다. 즉, 식 (5)로부터

$$T_h(\omega) = T_m(\omega) \tag{6}$$

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. 축에서 발생하는 손실토크는 설계에서 사용된 수력학적 효율( $\eta_h$ )와 기계적 효율( $\eta_m$ )로부터 구할 수 있다. 설계조건에서의 회전속도에서 축에 작용하는 수력토크는 다음과 같다.

$$T_1 = \frac{\rho g Q H}{\eta_h \omega} \tag{7}$$

그리고, 기계적 손실로 작용하는 토크는

$$T_m = \frac{T_1}{1 - \eta_m} = \frac{\rho g Q H}{(1 - \eta_m) \eta_h \omega} \tag{8}$$

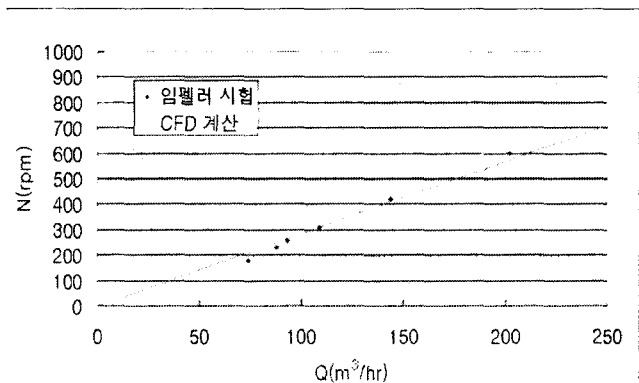
으로 구해진다. 따라서 설계 회전수에서 유동에 의해 작용하는 토크가 식 (8)로 구한 기계적 손실토크와 같도록 입구 유량을 바꾸어가면서 계산을 수행하면 될 것이다. 이때 구한 회전수, 유량 및 수두(압력강하)를  $N_1, Q_1, H_1$ 이라고 두면 다른 회전수에 대한 값은 다음의 상사법칙(affinity laws)으로 계산할 수 있다.

$$Q = Q_1 \left( \frac{N}{N_1} \right) \quad H = H_1 \left( \frac{N}{N_1} \right)^2 \tag{9}$$

본 논문에서 제안된 자유회전하는 임펠러의 압력강하 예측 방법을 MCP 개발 중에 수행한 임펠러 모형시험 결과와 비교하였다. 모형시험에 사용된 임펠러와 캔드모터는 SMART MCP의 설계방법과

**Table. 1** Results of free impeller test

유량(m <sup>3</sup> /hr)	회전수(rpm)
476	1440
406	1220
300	905
202	600
144	420
109	310
93	258
88	230
74	178



**Fig. 5** Comparison of CFD results to experiments

같은 방법으로 설계되었다. 시험용 임펠러와 캔드모터는 정지하고 별도로 부착된 구동펌프를 이용하여 유량을 변경하면서 정방향 유동에 의해 자유회전하는 임펠러의 회전수를 측정하였다. Table. 1은 임펠러 모형시험에서 측정된 유량에 따른 회전수를 나타낸 것이며 Fig. 5는 모형 임펠러에 대한 CFD 해석결과를 실험과 비교한 것이다. 실험결과에서 100m<sup>3</sup>/hr 이하의 유량에서 회전수의 감소가 급격히 발생하는데 이것은 펌프에서 발생하는 마찰토크를 유동이 극복하지 못하여 임펠러가 더 이상 회전하지 못하기 때문이다. 결과에 따르면 CFD 해석에 의한 예측이 낮은 유량영역을 제외하고는 실험치에 근접시키고 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 자유회전하는 임펠러의 특성 예측방법이 타당하다고 볼 수 있다.

**4.2 역유동시 압력강하 계산**

역유동은 디퓨저에서 유입되어 임펠러를 지나 유출되므로 임펠러 뒤쪽 계산영역을 길게 설정하고 격자계를 구성하였다.

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 Table. 2와 같이 구하였다.

**Table. 2** Pressure drop through the locked impeller

유량(%)	유량(m <sup>3</sup> /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

자유회전하는 임펠러를 통한 압력강하 계산을 위해 식 (8)에 회전수 3600rpm, 유량 2006m<sup>3</sup>/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 수립되도록 유량을 바꾸면서 계산을 수행하였다. 계산된 값은 다음과 같으며 나머지 유량에 대한 값은 식(9)에서 구해진다.

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

**5. MCP 4대 병렬운전 중 1대 정지시 성능예측**

본 연구에서는 정지된 MCP 임펠러가 고정된 경우와 자유롭게 회전하는 경우에 대하여 분석하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각의 경우에 성능곡선과 시스템 저항곡선(system resistance curve)을 나타낸 것이다. MCP 4대가 병렬로 운전될 때에는 전체성능은 유량이 4배가되고 생성 수두는 같다. Fig. 6과 Fig. 7에서 A로 표시된 부분이 정상운전시의 운전점으로 유량은 2006m<sup>3</sup>/hr의 4배인 8024m<sup>3</sup>/hr이고 수두는 17.5m가 된다.

Fig. 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 6650m<sup>3</sup>/hr, 수두 10m이다. 하지만 노심으로 공급되는 유량은 B점의 유량에서 1대의 MCP를 통하여 역류되는 C

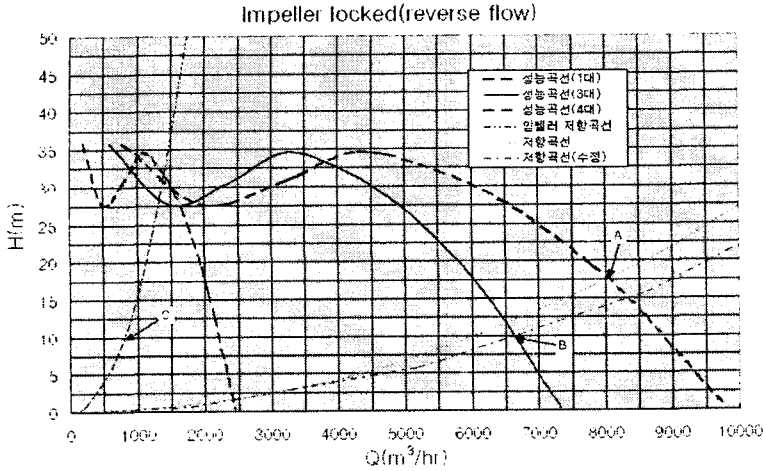


Fig. 6 Flow characteristics for power failure on one MCP with impeller locked

기 때문에 저항곡선의 기울기가 작으며 상대적으로 많은 역유량이 발생할 것이다. 이 경우의 운전점은 B로 유량  $6950\text{m}^3/\text{hr}$ , 수두  $6.7\text{m}$ 이다. 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 노심으로 공급되는 유량은  $5040\text{m}^3/\text{hr}$ 로 정상 운전시의 62.8%이다.

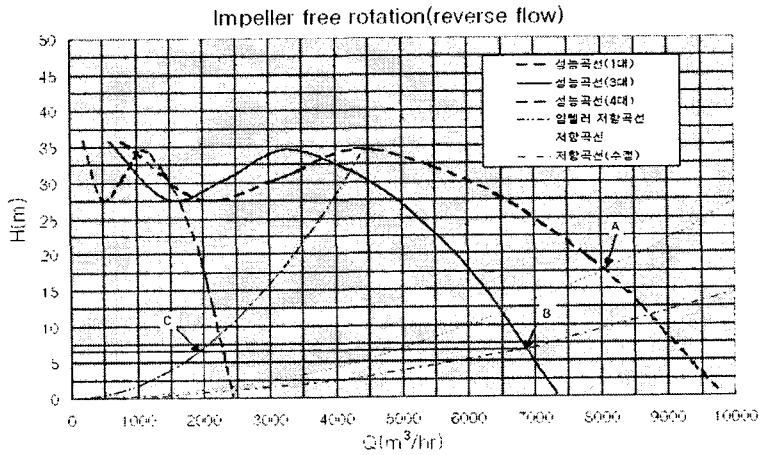


Fig. 7 Flow characteristics for power failure on one MCP with impeller free

점의 유량을 뺀 값이다. C 점에서 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 정상 운전시의 73%이다.

Fig. 7은 정지된 MCP 임펠러가 회전하는 경우이다. 4대 운전시 운전점은 A로 앞선 경우와 같다. 회전하는 임펠러의 저항은 고정된 임펠러 경우보다 작

## 6. 결론

SMART MCP의 성능예측을 위하여 상용코드를 이용하여 수치적 해석을 수행하였다. 먼저 타설계 분야의 설계입력으로 제공될 MCP 1대의 성능곡선을 얻기 위하여 유량을 바꿔가며 계산을 수행하였다. 계산된 결과는 축류펌프에서 나타나는 전형적인 S-형상의 성능곡선을 나타내었으며 물리적으로 타당한 결과를 예측하였다. 다음으로 4대 MCP가 병렬운전 중 1대 MCP가 정지될 경우의 성능예측을 위하여 역유동에 대한 해석절차를 개발하고 비교가능한 시험결과를 이용하여 타당성을 검토하였다. 개발된 절차에 따라 역유동 해석이 정지된 MCP의 임펠러가 고정된 경우와 회전하는 경우에 대하여 수행되었으며 그 결과로부터 SMART MCP의 운전특성을 분석하였다. 해석 결과에 따르면 1대 MCP 정지되고 정지된 MCP 임펠러가 고정된 경우에 3대 MCP가 생성하여 노심으로 공급하는 유량은 정상운전시 유량의 73%이며 임펠러가 자유롭게 회전하는 경우에 62.8%의 유량이 노심으로 공급된다.



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

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 박진석, 외3인 "SMART 냉각재순환펌프 개념설계," '98 춘계학술발표회 논문집(II), 한국원자력학회(1998), p. 885-890.
- [2] 김민환, 외3인, "축류펌프 임펠러의 3차원 형상설계 기술개발," KAERI TR-1267(1999).
- [3] 김민환, 외2인, "전산유체해석을 이용한 축류펌프의 성능예측," 한국전산유체공학회, 6권 제1호 (2001), p.14-20.
- [4] FINE<sup>TM</sup> Numeca's Flow Integrated Environment, User Manual, Numeca Inc., (1999).
- [5] Jameson, A., Schmit, W. and Turkel, E., "Numerical Solutions of the Euler Equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time-Stepping Schemes," AIAA Paper 81-1259.
- [6] Hirsch, Ch., Lacor, C., Rizzi, A., Eliasson, P., Lindblad, I. and Hauser, J., "A Multiblock/Multigrid Code for the Efficient Solution of Complex 3D Navier-Stokes Flows," in the Proceedings of the First European Symposium on Aerodynamics for Space Vehicles, ESTEC, ESA, p. 415-420.