

전산유체해석을 이용한 축류펌프의 호모로고스 곡선 예측

Prediction of an Axial Pump Homologous Curves Using CFD Analysis

김민환, 김종인, 박진석, 김동욱, 지성균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART에서 안전해석 입력자료로 사용될 냉각재순환펌프의 예비 호모로고스 곡선을 생성하는 절차를 개발하였다. 계산절차에 사용된 도구는 상용 전산유체역학 코드를 이용하였다. 호모로고스 곡선을 생성하기 위하여 호모로고스 변수를 정의하고 계산 매트릭스를 구성하였다. 계산 매트릭스에 따라 계산을 수행하고 호모로고스 곡선을 대표하는 계산점에 대하여 비교, 분석하였다. 계산된 결과로부터 호모로고스 곡선을 구하기 위하여 상사법칙을 이용하여 계산결과에 대한 수정 방법을 제시하고 완성된 호모로고스 곡선을 구하였다. 또한 이용 가능한 상온 시험 결과와 비교하여 호모로고스 곡선 생성 절차의 타당성을 검토하였다.

Abstract

A procedure for generating preliminary homologous curves, which are used as an input for safety analysis of SMART, was developed. A commercial code for computational fluid dynamics was adopted as a tool for the procedure. To generate homologous curves, we define homologous variables and construct a computational matrix. Computations were performed according to the matrix, and the results were compared and analysed for representative computational points among the matrix. A modification method to obtain homologous curves from the results was suggested by using similarity laws and the complete curves were generated. The curves were compared to available experimental data and the validity of the procedure was investigated.

1. 서론

한국원자력연구소는 일체형원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)에 사용될 냉각재순환펌프(Main Coolant Pump; MCP)에 대한 설계 및 개발을 수행하여 왔다.^[1] MCP는 축류형 펌프로 원자로 상단에 설치되어 노심에서 발생된 열을 증기발생기로 이동시키는 냉각재를 순환시키는 역할을 수행한다. 그 동안 수행된 MCP의 설계 개발을 통하여 냉각재를 순환시키는 수력학적인 수두를 생성하는 임펠러 설계 기술^[2], 임펠러를 정격 속도로 회전시키는데 필요한 토크를 제공하는 전동기 설계 기술^[3], 고온 고압 하에 작동하는 베어링 설계 기술^[4] 등을

획득하였다.

설계 개발된 MCP는 원형이 제작되고 검증시험이 수행될 예정이다. 검증시험에서는 MCP의 작동성과 성능확인뿐만 아니라 안전해석의 입력자료를 생산하는 것이 중요하다. 특히 호모로고스 곡선은 MCP의 정상상태뿐만 아니라 비정상 상태에서의 특성을 대표하는 입력자료로 설계기준 사건 및 사고 해석에 사용된다.

SMART에서는 이미 개발된 펌프를 사용하는 것이 아니라 개발이 함께 진행되고 있기 때문에 시험으로 구한 MCP의 호모로고스 곡선을 입력자료로 제공하는 것은 불가능하다. 따라서 시험 전에 호모로고스 곡선을 생성할 방법의 개발이 필요하게 된다. 현재 호모로고스 곡선을 구할 수 있는 이론 또는 해석적인 방법 중에서 가장 타당한 방법은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic: CFD)을 이용하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 상용 CFD 해석용 전산코드를 사용하여 MCP 모형에 대한 호모로고스 곡선을 생성하고 그 절차의 타당성을 평가하고자 한다.

2. 전산해석코드

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 방정식의 수치적 적분을 수행한다. 공간차분은 Jameson이 제안한 형태의 인공감쇠(artificial dissipation)를 이용한 격자중심식 유한체적법이 사용되며 4단(four-stage)의 Runge-Kutta의 시간적분 기법을 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. 전산 코드와 관련된 지배방정식, 난류모델 및 수치기법 등에 대하여 간단히 소개하면 다음과 같다. 자세한 내용은 참고문헌 [5]을 참조하기 바란다.

2.1 지배방정식

레이놀즈 평균된(Reynolds-averaged) Navier-Stokes 방정식은 각속도(angular velocity) ω 를 갖는 회전 직교좌표계에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla F_I + \nabla F_V = ST$$

F_I 와 F_V 는 각각 비점성(inviscid)과 점성(viscid) 플럭스 벡터(flux vector)이고 ST 는 원천항(source term) 벡터를 나타낸다.

$$U = \begin{bmatrix} \bar{\rho} \\ \bar{\rho} \tilde{w}_1 \\ \bar{\rho} \tilde{w}_2 \\ \bar{\rho} \tilde{w}_3 \\ \bar{\rho} E \end{bmatrix}, \quad F_{Ii} = \begin{bmatrix} \bar{\rho} \tilde{w}_i \\ p^* \delta_{1i} + \bar{\rho} \tilde{w}_i \tilde{w}_1 \\ p^* \delta_{2i} + \bar{\rho} \tilde{w}_i \tilde{w}_2 \\ p^* \delta_{3i} + \bar{\rho} \tilde{w}_i \tilde{w}_3 \\ (\bar{\rho} E + p^*) \tilde{w}_i \end{bmatrix}, \quad -F_{Vi} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{i1} \\ \tau_{i2} \\ \tau_{i3} \\ q_i + \tilde{w}_j \tau_{ij} \end{bmatrix}.$$

여기서 F_{Vi} 의 약자 i 는 x_i 에 대한 미분을 나타낸다.

원천항 벡터 ST 는 Coriolis force와 원심력(centrifugal force)을 포함하고 있으며 다음과 같다.

$$ST = \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{\rho} [2\vec{\omega} \times \vec{w} + (\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}))] \\ \bar{\rho} \vec{w} \nabla (0.5 \omega^2 r^2) \end{bmatrix}$$

난류운동에서는 정압(static pressure)과 총에너지(total energy)는 난류운동에너지(turbulent

kinetic energy) k 의 기여도를 포함하여 정의된다.

$$\overline{p^*} = \overline{p} + \frac{2}{3} \overline{\rho k}, \quad \overline{E} = \overline{e} + \frac{1}{2} \overline{w_i w_i} + \overline{k}$$

응력(stress)과 열속(heat flux) 성분은 다음 식으로 주어진다.

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left[\frac{\partial \tilde{w}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{w}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{w}) \delta_{ij} \right], \quad q_i = (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

2.2 난류모델

주냉각재펌프의 내부유동은 대부분이 난류로 존재하며 이를 모사하기 위하여 난류모형을 도입하게 된다. 본 연구에서는 공학분야 해석에서 가장 많이 사용되는 표준 $k-\varepsilon$ 난류모형^[6]을 사용하였다. 표준 $k-\varepsilon$ 난류모형에서는 와점성 계수를 다음과 같이 정의한다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

여기서 C_μ 는 0.09의 값을 갖는다.

난류에너지 k 와 난류소산율 ε 은 다음 식으로 결정된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \vec{w} k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] &= - \left(\overline{\rho \vec{w}'' \otimes \vec{w}''} S \right) - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \vec{w} \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] &= - \frac{\varepsilon}{k} \left[C_{\varepsilon 1} \left(\overline{\rho \vec{w}'' \otimes \vec{w}''} S \right) + C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon \right] \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} - \left(\overline{\rho \vec{w}'' \otimes \vec{w}''} S \right)_{ij} &= 2\mu_t \left[S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{w}) \delta_{ij} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \\ S_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{w}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{w}_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned}$$

이며 $C_{\varepsilon 1}$ 은 1.44, $C_{\varepsilon 2}$ 는 1.92, σ_k 는 1.0, 그리고 σ_ε 은 1.3의 값이 사용된다.

2.3 수치기법

공간차분(space discretization)을 위해 격자중심식(cell centered) 유한체적법을 적용하면 지배방정식은 다음과 같이 차분된다.

$$\int_{\Omega} \frac{\partial U}{\partial t} d\Omega + \sum_{faces} \vec{F}_I \Delta \vec{S} + \sum_{faces} \vec{F}_V \Delta \vec{S} = \int_{\Omega} Q d\Omega$$

여기서 $\vec{F}_I \Delta \vec{S}$, $\vec{F}_V \Delta \vec{S}$ 는 각각 비점성과 점성 플럭스이다.

점성 플럭스는 완전한 중앙차분으로 결정되어진다. 점성항 중에서 구배(gradient)를 포함하는 경우 구배는 격자 표면에서 계산되어진다. 비점성 플럭스는 Jameson 형태의 인공감쇠^[7]를 갖는 중앙차분기법이 적용된다.

시간적분(time integration)은 다단(multi-stage)의 Runge-Kutta 기법^[7]이 사용되었다.

$$\begin{aligned} U^{(1)} &= U^{(n)} + \alpha_1 \Delta t F(U^{(n)}) \\ U^{(2)} &= U^{(n)} + \alpha_2 \Delta t F(U^{(1)}) \\ &\dots \end{aligned}$$

$$U^{(q)} = U^{(n)} + \alpha_q \Delta t F(U^{(q-1)})$$

$$U^{(n+1)} = U^{(q)}$$

계수 α_q 는 Runge-Kutta 기법의 차수와 안정성을 결정하는 계수이다. 본 연구에는 4차의 기법을 사용하였으며 이때 사용된 계수는 다음과 같다.

$$\alpha_1 = 0.125; \quad \alpha_2 = 0.306; \quad \alpha_3 = 0.587; \quad \alpha_4 = 1$$

수렴을 가속시키기 위하여 Local Time Stepping을 사용하였다. Local Time Stepping은 해를 구하는 영역 전체에 대해 똑 같은 시간 간격을 주는 방법과는 달리 각 격자마다 같은 CFL 수를 주어 각기 다른 시간 간격을 주는 것이다. 이것은 해 영역에서 각 부분마다 유동흐름과 격자의 크기와 조건이 틀리다는 것을 이용한 것으로 격자마다 stability에 영향을 미치지 않는 최대 시간간격을 주어 수렴을 가속시키는 방법으로 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta t}{\Omega} = \frac{CFL}{|\vec{w} \cdot \vec{S}_i| + |\vec{w} \cdot \vec{S}_j| + |\vec{w} \cdot \vec{S}_k| + c[|\vec{S}_i| + |\vec{S}_j| + |\vec{S}_k|]}$$

여기서 CFL은 입력으로 주어지는 값이고, S는 격자중심에서 i, j, k 방향의 법선 벡터를 나타낸다.

Implicit Residual Smoothing 방법을 사용하여 CFL 수가 증가시킬 수 있도록 하였다. 이 방법은 불안정한 해의 고주파 오차를 감쇄시켜 안정성을 유지하도록 한다. Runge-Kutta 기법의 1 단계를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$U^{(m+1)} = U^{(n)} + \alpha_m \Delta t F(U^{(m)}) = U^{(n)} + \alpha_m R(U^{(m)})$$

윗 식에서 residual R 대신에 다음 식으로 smoothing된 R 이 사용된다.

$$(I - \varepsilon_i A_i^2)(I - \varepsilon_j A_j^2)(I - \varepsilon_k A_k^2)R = R$$

여기서

$$A_i^2 R = R_{i-1} - 2R_i + R_{i+1}$$

Smoothing parameter ε 의 안전성 기준은 다음과 같다.

$$\varepsilon > \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\sigma^*}{\sigma} \right)^2 - 1 \right]$$

여기서 σ 와 σ^* 는 smoothing 전과 후의 CFL 수를 나타낸다. 경험상으로 $\sigma^*/\sigma = 2$ 가 최적이며 ε 은 다음 식으로 결정되었다.

$$\varepsilon_i = \frac{1}{4} \left[\left[\left(\frac{\sigma^*}{\sigma} \right) \frac{1 + \max(\sqrt{(\lambda_j^*/\lambda_i^*)}, \sqrt{(\lambda_k^*/\lambda_i^*)})}{1 + \max(\lambda_j^*/\lambda_i^*, \lambda_k^*/\lambda_i^*)} \right] - 1 \right]$$

여기서 spectral radius는 $\lambda_i^* = [(\vec{u}\vec{m} + c) \cdot S]_i$ 이다.

2.4 저속 및 비압축성 해석방법

아주 낮은 속도와 마하수(Mach number) 영역에서 압축성유동해석을 위해 고안된 알고리즘은 상당히 나쁜 효율을 나타낸다. 유동의 속도가 음속(acoustic speed)에 비하여 아주 작을 때 압축성 코드로 수렴된 해를 얻기가 어렵다. 낮은 마하수에서 압축성 코드가 직면하는 문제는 대류 고유치(convective eigenvalue)와 음향 고유치(acoustic eigenvalue) 사이에 큰 불균형에 의해 아주 작은 시간간격(time step)이 사용되어 수렴성이 나빠질 뿐만 아니라 운동방정식에 절대 압력을 사용함에 따른 round-off 오차의 증가로 인하여 비압축유동에 사용이 불가능하다는 것이다. 따라서 이러한 결점을 극복하기 위하여 preconditioning 기법이 개발되어 마하수가 영에 접근할 때도 압축성 코드로 빠른 수렴성과 정확한 해를 얻을 수 있게 되었다. Preconditioning 기법은 시간전진기법

(time marching algorithm)으로 정상상태를 해석할 때 유동방정식의 미지수(unknown)에 대한 시간미분은 물리적 의미가 없으며 시간 미분을 수정하여도 최종 해석결과에는 영향을 미치지 않는다는 점에서 착안된 방법이다.

압축성 유체에 대해 precondition된 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) &= 0 \\ \frac{\alpha \vec{v}}{\beta^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{\nabla} p &= \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} \\ \rho \frac{de}{dt} + p \vec{\nabla} \cdot \vec{v} &= \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + (\vec{\tau} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{v} \end{aligned}$$

위 식은 아래와 같은 conservative form으로 쓰여지고 앞서 소개된 수치기법으로 해석될 수 있다.

$$\frac{\partial Q_E}{\partial t} + \Gamma_E \vec{\nabla} \cdot \vec{F} = 0$$

여기서 사용된 종속변수와 preconditioning matrix는 다음과 같다.

$$\Gamma_E = \begin{pmatrix} \beta^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(1+\alpha)u/\rho & 1/\rho & 0 & 0 & 0 \\ -(1+\alpha)v/\rho & 0 & 1/\rho & 0 & 0 \\ -(1+\alpha)w/\rho & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ (\beta^2 - \alpha \vec{v}^2 - H_g)/\rho & 0 & 0 & -(1+\alpha)u/\rho & 0 & 1/\rho \end{pmatrix}$$

$$Q_E = (P_g, u, v, w, H_g)^T$$

열역학적 변수는

$$H_g = C_p(T - T_{ref}) + \frac{\vec{v}^2}{2}$$

으로 정의된다.

3. 호모로고스 곡선

펌프의 성능을 나타내는 일반적인 방법은 그림 1과 같이 펌프의 수두와 토크를 유량(또는 용량)과 회전속도의 함수로 표시하는 것이다. 그림 1을 정격에서의 유량(Q_R), 수두(H_R), 회전수(N_R) 및 토크(T_{hR})로 다음과 같이 무차원하여 나타낼 수 있는데 이때 무차원된 변수를 호모로고스 변수라고 칭한다.

$$\nu = \frac{Q}{Q_R}, \quad h = \frac{H}{H_R}, \quad \alpha_N = \frac{N}{N_R}, \quad \beta_h = \frac{T_h}{T_{hR}} \frac{\rho}{\rho_R}$$

이들 호모로고스 변수에 상사법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{Q/ND^3}{Q_R/N_R D^3} = \frac{Q/N}{Q_R/N_R} = \frac{Q/Q_R}{N/N_R} = \frac{\nu}{\alpha_N}$$

$$\frac{H/(ND)^2}{H_R/(N_R D)^2} = \left(\frac{H}{H_R} \right) \left(\frac{N_R}{N} \right)^2 = \frac{h}{\alpha_N^2}$$

$$\frac{T_h/\rho N^2 D^5}{T_{hR}/\rho_R N_R^2 D^5} = \left(\frac{T_h}{T_{hR}} \right) \left(\frac{\rho_R}{\rho} \right)^2 \left(\frac{N_R}{N} \right)^2 = \frac{\beta_h}{\alpha_N^2}$$

이와 같이 상사법칙을 적용하여 호모로고스 변수를 나타내면 유량-수두 및 유량-토크 곡선은 그

림 2와 같이 하나의 호모로고스 곡선으로 표시된다. 큰 값의 ν/α_N 을 간단히 표현하는 방법은 $|\nu/\alpha_N| > 1$ 경우에 수학적으로 등가인, 즉 $\alpha_N \sim \nu$, $h \sim \nu^2$, $\beta_h \sim \nu^2$ 으로 나타내는 것이다^[8]. 성능 곡선을 이와 같이 나타내면 그림 3과 같은 뒤로 접힌 형태의 호모로고스 곡선을 얻을 수 있다. 곡선의 각 부분을 편의상 HAN, HVN 등과 같이 약어로 표기하는데 각 문자의 의미는 다음과 같다.

- H - Head function
- B - Hydraulic torque function
- A - Function with α_N in denominator
- V - Function with ν in denominator, used when $|\nu/\alpha_N| > 1$
- N - Normal pumping quadrant with forward flows and speeds
- D - Dissipation quadrant with reverse flow and forward speed
- T - Normal turbining quadrant with reverse flow and speed
- R - Reverse pumping quadrant with forward flow and reverse speed

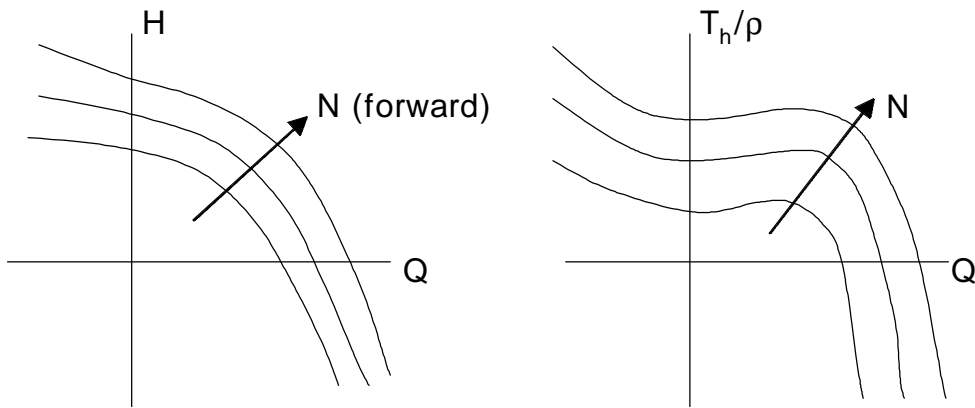


그림 1 일반적인 펌프의 수두 및 토크 성능곡선

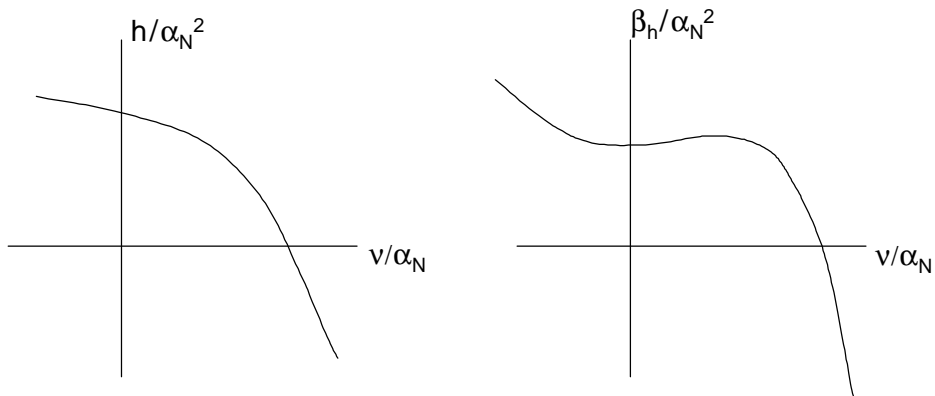


그림 2 펌프의 호모로고스 수두 및 토크 성능곡선

그림 4에 각 약어에 해당하는 위치는 $\nu - \alpha_N$ 의 4상한 곡선에 표시하였다. 표기법의 예로 호모로고스 곡선 상의 HAN은 정유동과 정방향 회전속도에 대하여 ν/α_N 을 x축에 h/α_N^2 을 y축에 나타낸 것이며, BVD는 역유동과 정방향 회전속도에 대하여 α_N/ν 을 x축에 β_h/ν^2 을 y축에 나타낸 것이다.

MCP의 호모로고스 곡선을 생성하기 위하여 4상한 곡선에서 MCP 운전 발생 가능한 영역을 확인하여야 한다. 원자로의 사고 중에서 펌프에 가장 영향을 미치는 LOCA에서 역방향 회전속도와 정방향 유동의 조합은 발생하지 않는다. 따라서 그림 4에서 4상한인 AR, VR 영역은 배제된다. 또한 MCP에는 토출구에 역류방지장치가 부착되어 역방향 유동은 발생하지 않기 때문에 그림 4의 2상한과 3상한 영역 또한 제외된다. 따라서 MCP가 제공하는 호모로고스 곡선은 1상한 영역의 수두함수 HAN과 HVN, 수력토크함수 BAN, BVN이다.

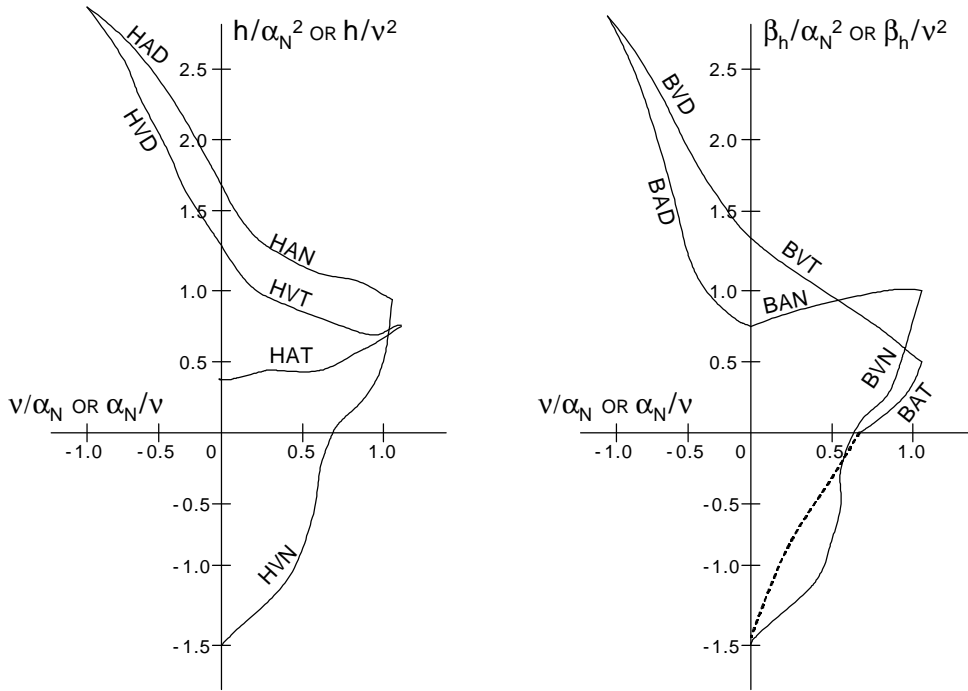


그림 3 전형적인 원자로 냉각재 펌프의 homologous 수두 및 토크 곡선

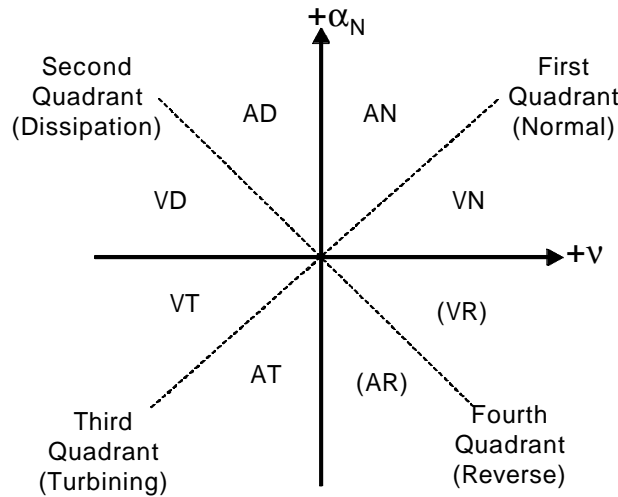


그림 4 호모로고스 곡선 상의 약어 표기 방법

4. 해석절차

4.1 격자생성

해석에 사용된 모형 펌프는 회전수 3600rpm에서 유량 922m³/hr, 수두 9m로 설계된 축류펌프이다. 설계된 임펠러와 디퓨저의 형상데이터는 표 1에 나타내었다. 표에서 R 은 반경, l 은 코드길이, 그리고 β_1' 과 β_2' 은 축방향을 기준으로 블레이드의 입구각과 출구각을 나타낸다. 임펠러와 디퓨저의 단면형상은 DCA(double circular arc) 형상으로 되었으며 개수는 각각 5개와 9개이다.

표 1 임펠러와 디퓨저의 설계값

<임펠러>

R (mm)	38.00	47.33	55.11	61.92	68.04	73.66	78.89	83.78	88.41	92.80	97.00
l (mm)	57.30	63.84	70.08	75.27	79.69	83.53	86.93	89.97	92.72	95.22	97.22
두께/ l (%)	12.11	10.84	9.88	9.11	8.47	7.92	7.44	7.02	6.65	6.31	6.00
β_1' (deg)	58.95	62.96	65.51	67.43	68.89	70.02	70.92	71.62	72.16	72.57	72.86
β_2' (deg)	15.35	36.62	47.09	53.38	57.69	60.91	63.46	65.58	67.41	69.04	70.53

<디퓨저>

R (mm)	38.00	47.33	55.11	61.92	68.04	73.66	78.89	83.78	88.41	92.80	98.00
l (mm)	81.78	84.02	85.16	85.84	86.30	86.63	86.88	87.07	87.23	87.35	87.46
두께/ l (%)	6.	6.	6.	6.	6.	6.	6.	6.	6.	6.	6.
β_1' (deg)	39.87	33.84	29.94	27.14	25.00	23.31	21.91	20.75	19.75	18.88	18.12
β_2' (deg)	-6.93	-6.59	-6.34	-6.14	-5.98	-5.84	-5.72	-5.62	-5.53	-5.45	-5.37

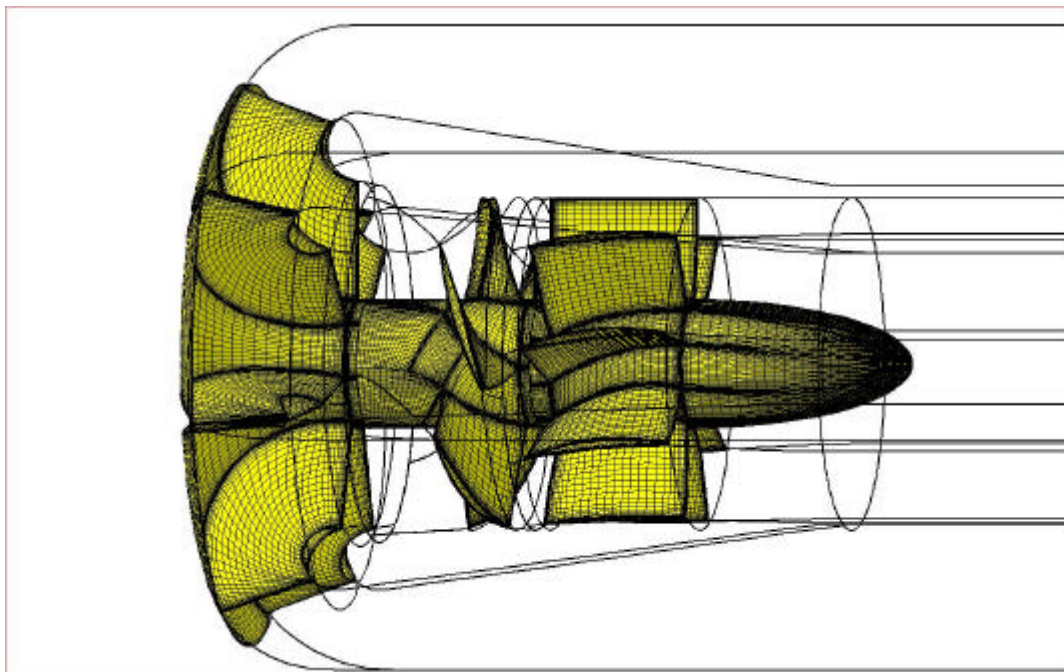


그림 5 계산에 사용된 격자계

전산해석을 위하여 안내깃, 임펠러 및 디퓨저에 대하여 각각 I-형태의 격자를 구성하였다. 그림 1은 본 계산에 사용된 안내깃, 임펠러 및 디퓨저에 대한 격자계의 형태를 회전방향으로 반복하

여 나타낸 것이다. 격자계는 흡입구의 환형공간을 포함하는 안내깃 영역, 안내깃과 디퓨저 사이의 임펠러 영역, 임펠러 팁간격 영역, 디퓨저 영역, 토출구 영역으로 모두 5개의 블록으로 구성되었다. 사용된 격자(회전방향×반경방향×축방향)는 안내깃 영역은 29×30×101, 임펠러 영역은 33×41×85, 임펠러 팁 영역은, 9×9×29, 디퓨저 영역은 29×33×73, 토출구 영역은 28×33×53으로 총 격자수가 334,593개이다. 임펠러 영역을 제외한 영역은 회전방향의 경계면의 격자가 일치하는 matching 주기경계를 갖는다. 임펠러 영역은 블레이드의 축방향에 대한 비틀림 각이 크기 때문에 matching 격자를 사용할 경우 격자의 찌그러짐(skewness)이 증가되어 수치해석의 오차를 증가시킨다. 본 연구에서는 격자의 찌그러짐을 줄이기 위하여 그림 6과 같이 임펠러 영역에 non-matching 주기경계를 갖도록 격자를 사용하였다. 격자계는 FINE/Turbo의 IGG/Autogrid^[9]로 생성되었다.

4.2 계산 매트릭스

먼저 MCP의 유량-수두 성능곡선을 구하기 위하여 회전속도 3600rpm에 대하여 정격유량 922m³/hr의 5%, 10%, 25%, 40%, 55%, 70%, 85%, 100%, 110%, 120%에 대하여 계산점을 설정하였다. 이 계산점들은 AN 영역(x축이 v/a_N)과 함께 VN(x축이 a_N/v) 영역을 일부 포함하고 있다. 유량-수두 성능곡선과 함께 VN 영역을 계산하기 위하여 회전수와 유량을 바꿔가면서 시험점을 표 2와 같이 구성하였다.

표 2 호모로고스 곡선 생성을 위한 계산 매트릭스

N(rpm)	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
Q(%)	5	10	25	40	55	70	85	100	110
a_N	1	1	1	1	1	1	1	1	1
v	0.05	0.1	0.25	0.4	0.55	0.7	0.85	1.0	1.1
a_N/v									0.9091
v/a_N	0.05	0.1	0.25	0.4	0.55	0.7	0.85	1.0	
N(rpm)	3600	3000	2500	1500	1200	800	600	300	0
Q(%)	120	100	100	70	70	50	50	50	30
a_N	1.0	0.8333	0.6994	0.4167	0.3333	0.2222	0.1667	0.0833	0
v	1.2	1.0	1.0	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.3
a_N/v	0.8333	0.8333	0.6944	0.5952	0.4762	0.4444	0.3333	0.1667	0
v/a_N									

4.3 초기 및 경계조건

MCP의 작동 유체인 냉각재는 비압축성으로 가정하였으며 물성치는 다음의 값을 사용하였다.

- 밀도 : 702.9 kg/m³(일정)
- 동점성계수 : 1.1977E-07m²/s(일정)

입구경계조건을 위하여 각 계산점에 해당하는 유량이 계산영역인 안내깃, 임펠러, 디퓨저의 각 블레이드 사이의 유로를 통하여 일정하게 나누어진다고 가정하였다. 입구유량에 맞도록 속도를 균일하게 고정하였으며 경계층을 모사하기 위한 별도의 함수는 사용하지 않았다. 레이놀즈수는 5×10⁶(정격유량에서 블레이드 높이 기준)으로 유동은 난류영역에 있다. 입구에서 속도, 난류에너지, 난류소산율은 다음 식으로 결정되었다.

$$V_{inlet} = \frac{Q}{3600\pi(r_{o,inlet}^2 - r_{i,inlet}^2)}, \quad k_{inlet} = \frac{3}{2}(I_t V_{inlet})^2, \quad \varepsilon_{inlet} = C_\mu \frac{\mu}{\mu_t} \frac{\rho_{ref} k^2}{\mu}$$

여기서 $I_t = 0.05$, $\mu/\mu_t = 50$ 가 사용되었다.

벽면에서는 점착조건(no-slip condition)과 난류 경계층을 모사하기 위한 벽함수(wall function) 조건을 적용하였으며 벽면에서 첫 번째 격자의 y^+ 는 10~50 사이에 위치한다. 안내깃, 임펠러 및 디퓨저 영역들의 경계조건을 처리하기 위하여 임펠러 영역은 회전좌표계에서 정의되고 나머지 영역은 고정좌표계로 두었다. 안내깃과 임펠러가 접하는 경계(안내깃 출구와 임펠러 입구) 및 임펠러와 디퓨저가 접하는 경계(임펠러 출구와 디퓨저 입구)는 회전방향으로 평균된 물리량이 경계면을 통하여 보존되는 혼합평면법이 적용되었다. 경계조건에 대한 자세한 사항은 참고문헌 [5]에 나타나 있다.

5. 계산결과

5.1 유동비교

호모로고스 곡선의 유동특성을 조사하기 위하여 설계점, AN 구간과 VN 구간에서의 각각 하나의 계산점에 대한 유동형태를 비교하였다. 설계점에서는 ν/α_N 또는 α_N/ν 이 1이고, AN 구간에서는 회전수 3600 rpm, 유량 55%가 선택되었으며 ν/α_N 이 0.55에 해당한다. VN 구간에서는 회전수 1200 rpm과 유량이 70%인 곳이며 α_N/ν 은 0.4762의 값을 갖는다.

그림 6, 7과 8은 벽면에서의 정압분포를 나타낸 것이며 설계점(그림 6)의 경우에 안내깃의 쉬라우드(shroud)에서 유동의 방향전환이 허브 영역보다 빠르게 일어나면서 쉬라우드에서 낮은 압력분포를 나타내고 있다. 임펠러의 팁 부근을 제외하고는 반경방향으로 각 코드를 따라 비슷한 형태의 압력분포를 보이고 있다. 디퓨저의 앞전(leading edge)에서 압력이 가장 높은 것으로 볼 때 임펠러를 빠져 나온 유동이 큰 손실 없이 디퓨저로 잘 유입

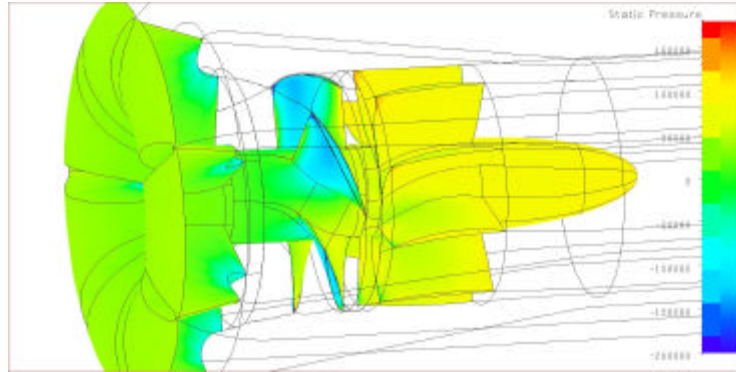


그림 6 벽면에서의 정압분포(회전수 3600rpm, 유량 100%)

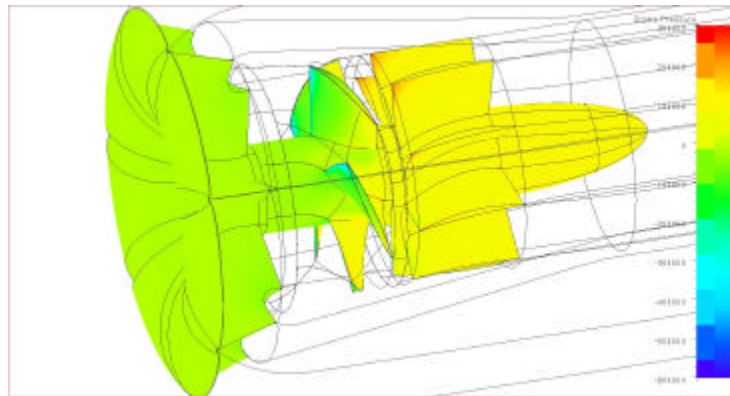


그림 7 벽면에서의 정압분포(회전수 3600rpm, 유량 55%)

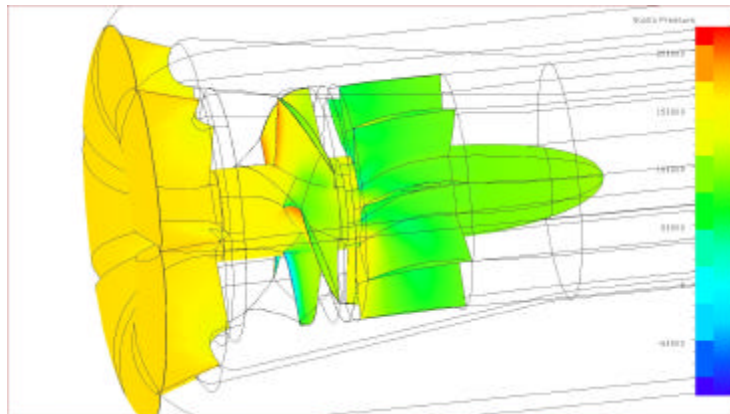


그림 8 벽면에서의 정압분포(회전수 1200rpm, 유량 70%)

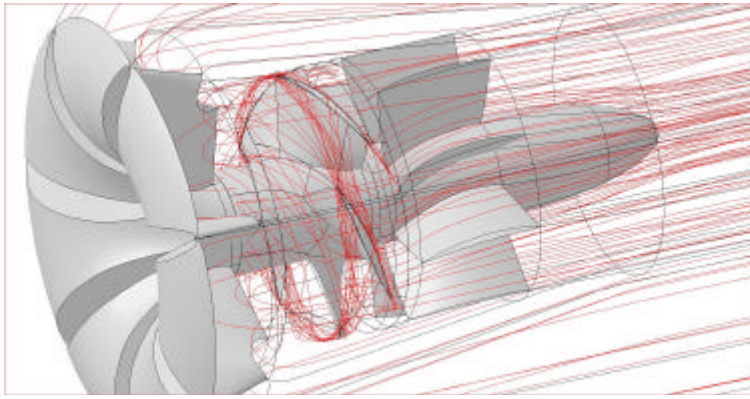


그림 9 유동 경로선(회전속도 3600rpm, 유량 100%)

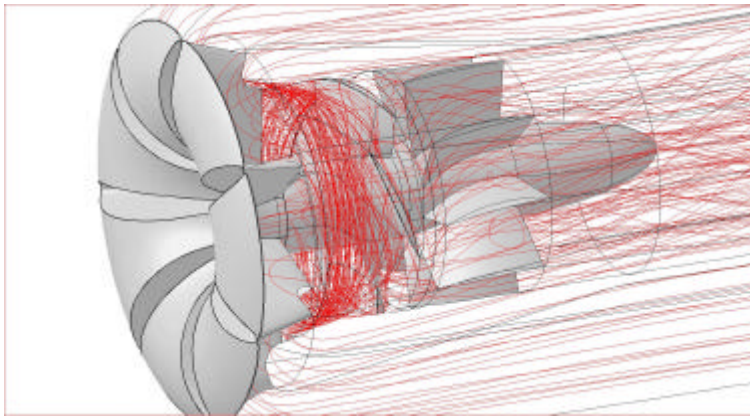


그림 10 유동 경로선(회전수 3600rpm, 유량 55%)

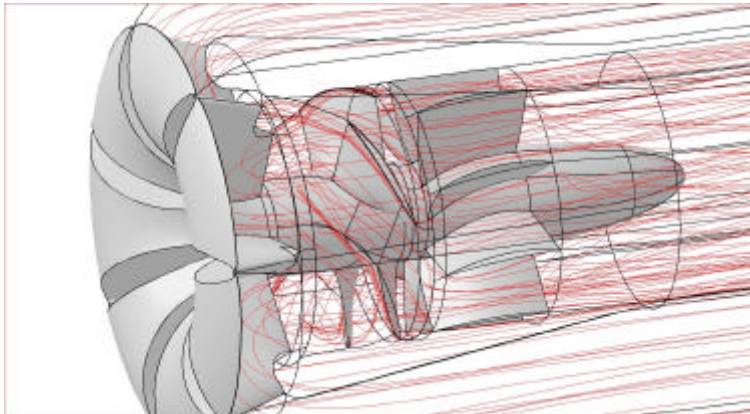


그림 11 유동 경로선(회전수 1200rpm, 유량 70%)

됨을 짐작하게 한다. 그림 7은 AN 영역의 경우로 유량이 감소하면서 MCP 임펠러로 유입되는 입사각이 증가하게 되고 일정부분까지는 입사각의 증가가 수두의 증가로 이어지지만 일정 범위를 벗어나면 임펠러에서 유동의 박리가 발생하게 된다. 이 박리현상은 상대속도가 큰 임펠러의 팁 부근에서 먼저 발생하고 유량이 감소할수록 허브로 박리영역이 확대되면서 앞으로 이동한다. 그림7을 정격의 경우인 그림 6과 비교하면, 코드의 중심에 위치하던 임펠러 표면 압력의 최저점이 박리현상과 함께 앞전(leading edge)으로 이동된 것을 보여주고 있다. 그림 8의 회전수 1200rpm과 유량 70%은 회전수 3600rpm과 유량 210%에 상사된다. 따라서 계산점에서 유동은 설계점보다 유량이 상당히 증가한 경우이다. MCP의 유량이 증가하면 임펠러로 유입되는 입사각이 줄어 임펠러의 생성 수두가 감소되는 결과가 된다. 유량이 어떤 범위를 넘어가면 회전하는 임펠러가 더 이상 수두 생성에 기여하지 못하고 유동의 저항으로 작용하여 수두 손실에 참여하게 된다. 정격에서는 임펠러 흡입면의 압력이 낮았지만 반대로 그림 8에서는 압력면이 더 낮은 압력을 보이고 있으며 임펠러와 디퓨저를 통과한 후의 압력도 감소됨을 알 수 있다.

그림 9, 10과 11은 임펠러를 통과하는 경로선을 나타낸 것이다. 경로선은 임펠러 영역은 회전하

는 좌표계에 대해 나타낸 것이고 나머지 영역은 고정된 좌표계에 대해 나타낸 것이다. 설계점에서는 임펠러 팁 영역을 제외하고는 유로를 따라 안정된 유동이 형성되고 있음을 알 수 있다. 팁에서는 블레이드의 흡입면(suction surface)과 압력면(pressure surface)의 압력차로 발생한 vortex roll-up을 보여주고 있다. vortex roll-up의 영향으로 팁간격으로 빠져나온 흐름이 디퓨저로 유입되지 못하고 다음 블레이드로 유입되기 때문에 블레이드 면을 지나는 유동보다 뒤쳐진 흐름을 보여주고 있다. 그림 10의 AN 영역에서는 임펠러 팁 영역의 앞쪽에 형성된 낮은 압력의 영향으로

유동이 박리 영역에 간혀 복잡한 경로선이 형성되고 있다. 임펠러의 박리영역은 디퓨저로 유입되는 흐름까지 영향을 미쳐 디퓨저에서도 박리유동이 나타나고 있다. VN 영역(그림 11)의 경로선에서는 임펠러로 유입된 흐름은 흡입면으로 직접 유입되고 있어 흡입면에서 수두 생성에 필요한 낮은 압력을 형성하지 못하게 되며 오히려 압력손실을 발생시킬 수 있음을 보여준다. 디퓨저에서의 흐름도 원활하지 않아 후류가 발생하여 압력손실을 증가시키고 있다.

그림 12, 13과 14는 자오선면(meridional plane)에 투영된 유동의 형태와 정압(static pressure)과 동압(dynamic pressure)을 합한 총압력(total pressure) 분포를 함께 나타낸 것이다. 설계점에서는 안내깃 쉬라우드 영역의 국부적인 압력저하가 임펠러로 유입되는 경계층의 두께를 증가시키고 있는 곳을 제외하고는 안정된 흐름과 압력분포를 보여주고 있다. AN 영역(그림 13)에서는 앞서 설명된 임펠러 앞 부분에 형성된 박리영역과 그에 따른 흐름의 왜곡으로 허브영역에서 발생된 박리영역의 형태를 명확히 보여주고 있다. VN 영역(그림 14)에서는 수두손실이 임펠러에서 대부분 발생하고 있지만 큰 박리영역은 관찰되지 않고 있다.

5.2 호모로고스 곡선

표 2에서 구성한 계산 매트릭스에 따라 수행된 결과를 정리하면 표 3과 같다. 수두 H는 다음 식으로 계산되었다.

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

정격(회전속도 3600rpm, 유량 100%)에서 계산 결과를 보면 수두가 10.46m로 정격인 9m보다 크다. 만약 호모로고스 변수 h 를 구하기 위하여 정격인 9m로 무차원하면 $\alpha_N = 1$, $\nu = 1$ 에서 $h =$

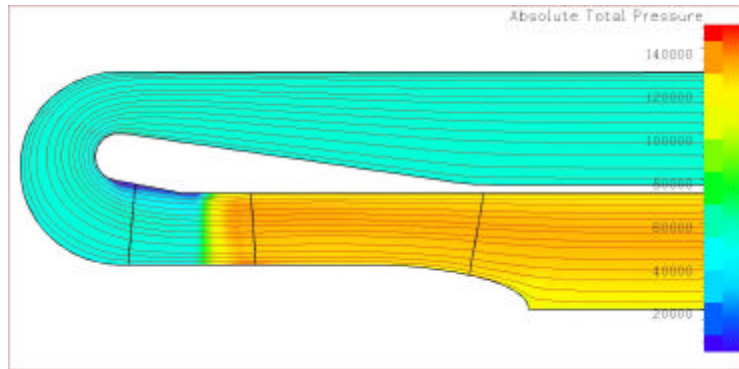


그림 12 자오선면에 투영된 총압력 분포와 유동형태(회전속도 3600rpm, 유량 100%)

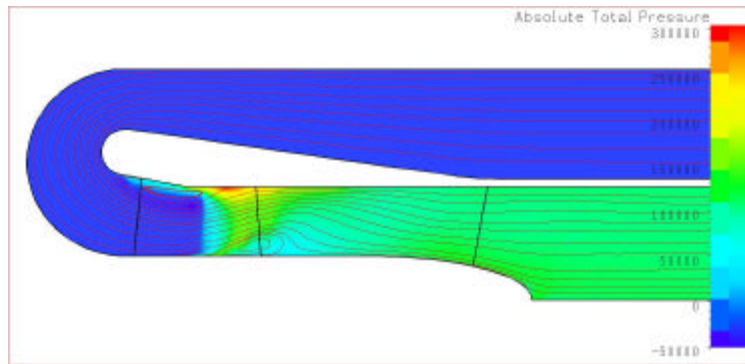


그림 13 자오선 평면에 투영된 총압력 분포와 유동형태(회전수 3600rpm, 유량 55%)

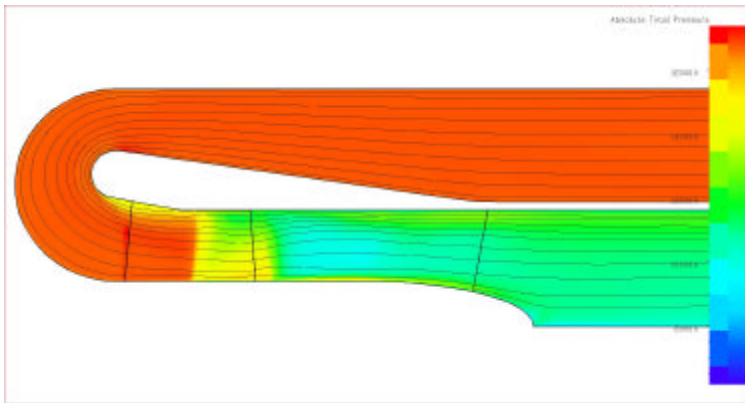


그림 14 자오선 평면에 투영된 총압력 분포와 유동 형태(회전수 1200rpm, 유량 70%)

1.162이 되어 h/α_N^2 도 1.162가 되기 때문에 $\alpha_N = 1$, $\nu = 1$ 에서 h 가 1이 되도록 수정이 필요하다. 펌프의 고유 특성에 영향 없이 특성곡선을 수정하는 방법은 상사법칙을 적용하는 것이다. 유량, 수두, 토크는 다음과 같은 상사법칙을 갖는다.

$$Q \sim ND^3, \quad H \sim (ND)^2, \quad T \sim N^2 D^5$$

만약 정격에서 10.46m의 수두를 9m로 낮추기 위해 임펠러의 직경을 D_1 으로 줄인다면 변경된 유량, 수두 및 토크는 다음과 같다.

$$Q_1 = Q \left(\frac{D_1}{D} \right)^3, \quad H_1 = H \left(\frac{D_1}{D} \right)^2, \quad T_1 = T \left(\frac{D_1}{D} \right)^5$$

위의 식으로부터 회전수 3600rpm에서 D_1/D 을 바꾸면서 계산결과로부터 Q_1 , H_1 을 구한 후, 보간법(interpolation)으로 100% 유량에서 수두를 계산하여 만약 정격인 9m에 근접하지 않는다면 D_1/D 의 값을 다시 바꾸어 수두가 9m에 근접할 때까지 계산을 반복한다. 이와 같이 구한 D_1/D 의 값은 0.989이고 이 때의 수두는 9.04m이다. 이 값으로부터 결정된 Q_1 , H_1 , T_1 과 이 값들을 정격으로 무차원된 호모로고스 변수 값이 표 3에 나타나 있다. 그림 15와 16에 MCP의 호모로고스 수두 곡선과 토크 곡선을 나타내었다. 수두곡선은 본 계산에 사용된 모델 임펠러에 대한 상온 시험 결과와 비교되었다. 비록 시험결과가 AN 영역에 한정되어있지만 본 절차로 구한 호모로고스 곡선이 타당한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

표 3 호모로고스 곡선 생성을 위한 계산 결과표

N (rpm)	Q (%)	Q (m ³ /hr)	ΔP (Pa)	H (m)	T (N-m)	Q ₁ (m ³ /hr)	H ₁ (m)	T ₁ (N-m)	α_N	ν	h	β_h	ν/α_N 또는 α_N/ν	h/α_N^2 또는 h/ν^2	β_h/α_N^2 또는 β_h/ν^2
3600	5	46.1	229878	33.34	168	44.6	32.6	159	1	0.048	3.606	2.855	0.048	3.606	2.855
3600	10	92.2	223490	32.41	163.2	89.2	31.7	154	1	0.097	3.506	2.773	0.097	3.506	2.773
3600	25	230.5	189409	27.47	136.3	223	26.9	129	1	0.242	2.971	2.316	0.242	2.971	2.316
3600	40	368.8	154112	22.35	112.6	357	21.9	107	1	0.387	2.417	1.913	0.387	2.417	1.913
3600	55	507.1	132430	19.21	97	491	18.8	91.8	1	0.532	2.077	1.648	0.532	2.077	1.648
3600	70	645.4	122300	17.74	94	624	17.3	88.9	1	0.677	1.918	1.597	0.677	1.918	1.597
3600	85	783.7	103512	15.01	77.7	758	14.7	73.5	1	0.822	1.624	1.32	0.822	1.624	1.32
3600	100	922	72108	10.46	62.57	892	10.2	59.2	1	0.967	1.131	1.063	0.967	1.131	1.063
						922	9.04	55.7	1	1	1	1	1	1	1
3600	110	1014.2	47339	6.865	51.53	981	6.72	48.8	1	1.064	0.743	0.876	0.94	0.656	0.773
3000	100	922	13767	1.997	22.08	892	1.95	20.9	0.833	0.967	0.216	0.375	0.861	0.231	0.401
2500	100	922	-38779	-5.62	-13.66	892	-5.5	-12.9	0.694	0.967	-0.608	-0.232	0.718	-0.65	-0.248
1500	70	645.4	-35779	-5.19	-17.49	624	-5.08	-16.5	0.417	0.677	-0.561	-0.297	0.615	-1.224	-0.648
1200	70	645.4	-55874	-8.1	-31.03	624	-7.93	-29.4	0.333	0.677	-0.876	-0.527	0.492	-1.911	-1.15
800	50	461	-31794	-4.61	-17.74	446	-4.51	-16.8	0.222	0.484	-0.499	-0.301	0.459	-2.132	-1.289
600	50	461	-43868	-6.36	-25.73	446	-6.22	-24.3	0.167	0.484	-0.688	-0.437	0.345	-2.941	-1.869
300	50	461	-67267	-9.76	-41.25	446	-9.54	-39	0.083	0.484	-1.055	-0.701	0.172	-4.51	-2.996
0	30	276.6	-32456	-4.71	-20.43	268	-4.6	-19.3	0	0.29	-0.509	-0.347	0	-6.045	-4.122

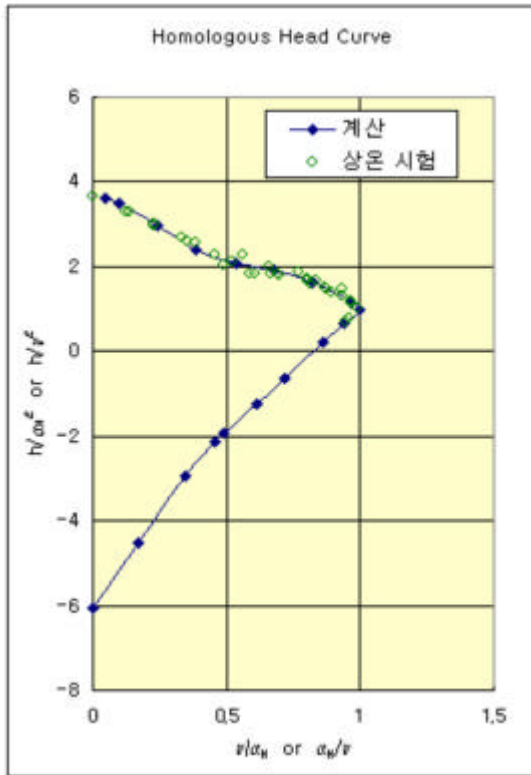


그림 15 호모로고스 수두 곡선

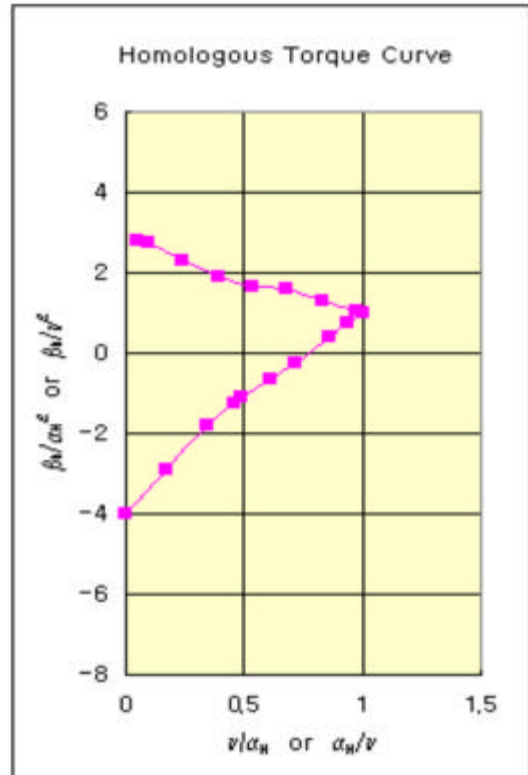


그림 16 호모로고스 토크 곡선

6. 결론

안적해석 예비 입력자료로 사용될 MCP의 호모로고스 곡선을 생성하기 위하여 상용 터보기계 해석코드인 FINE/Turbo를 이용하여 전산해석을 수행하였다. 이를 위하여 MCP의 안내깃, 임펠러 및 디퓨저를 포함하는 격자계를 구성하였으며 호모로고스 곡선을 구하기 위한 계산 매트릭스를 작성하였다.

계산된 결과에 따르면 정격 유량에서의 유동에서도 임펠러 팁 영역에서 발생하는 vortex roll-up을 제외하고는 안정된 흐름을 나타내었다. 유량이 정격보다 감소하는 AN 영역에서는 임펠러로 접근하는 입사각의 증가로 인하여 수두가 증가하지만 팁 영역에서 발생된 박리영역이 유량이 감소함에 따라 크기가 증가되며 위치도 앞으로 이동하는 경향을 보여준다. 또한 임펠러 앞에서 발생한 박리의 영향으로 디퓨저 허브영역에서도 또 다른 박리가 발생하여 대단히 복잡한 유동형태를 띄고 있음을 보여주었다. VN 영역에서는 α_N/v 가 감소될수록 수두가 감소하고 일정 영역을 벗어나면 유동의 박리에 의해 더 이상의 수두를 생성하지 못하고 저항으로만 작용하고 있음을 보여주었다.

계산 매트릭스에 따라 계산된 결과로부터 수두와 토크를 계산하고 상사법칙을 이용하여 호모로고스 곡선 생성에 필요한 변수를 구하여 호모로고스 수두 및 토크 곡선을 생성하였다. 계산결과를 같은 모델의 임펠러에 대한 상온 시험결과와 비교할 때, 본 절차가 MCP 성능시험에 앞서 안전해석에 제공될 예비 호모로고스 곡선을 생성하는데 사용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 박진석 외 6인, SMART 냉각재순환펌프의 기본설계보고서, KAERI/TR-2135/2002.
- [2] 김민환, 김종인, 박진석, 김용완, 김지호, “축류펌프 임펠러의 3차원 형상설계 기술개발,” KAERI TR-1267, 1999.
- [3] H. Huh, J.S. Park and J. I. Kim, “The Design, Fabricaiton and Characteristics Experiment of Canned Induction Motor of Main Coolant Pump for System-integrated Modular Advanced Reactor”, IEEE Industry Application Society, OTIM 2002.
- [4] 이재선, 박진석, 김지호, 김종인, 장문희, “SMART 냉각재순환펌프용 베어링 재질의 마찰특성에 관한 연구”, 한국원자력학회 춘계학술대회, 2000.
- [5] FINE™ Numeca’s Flow Integrated Environment, User Manual, Numeca Inc., Feb. 2000.
- [6] W.P. Jones and B.E. Launder, “ The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301-314, 1972
- [7] 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.
- [8] Pump Two-Phase Performance Program, Volume 2: Steady-State Tests, EPRI Report, NP-1556, 1981.
- [9] IGG/Autogrid™ , Numeca’s Full Automatic Grid Generator for Turbomachinery, User Manual, Numeca Inc., Feb. 2000.