

일체형원자로 SMART 냉각재순환펌프의 코스트다운 곡선 예측

Prediction of Coastdown Curve of Main Coolant Pump for Integral Reactor SMART

김민환, 박진석, 김종인, 김동욱, 장문희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로 SMART 냉각재순환펌프 원형의 성능시험에 앞서 안전해석분야의 입력으로 제공될 코스트다운 곡선을 예측하기 위한 해석절차를 개발하였다. 회전수와 유량에 대한 지배방정식을 세우고 미지의 계수들을 이론적 방법과 전산유체해석으로 결정한 후 SMART MCP의 코스트다운 곡선을 계산하였다. 결과에 따르면 원래의 MCP는 회전관성이 부족하여 안전해석에서 요구하는 코스트다운 곡선을 만족하지 못하였다. MCP 회전관성을 증가시키기 위하여 전동기 설계를 수정하고 내부여유공간에 관성질량을 추가하였다. 관성질량의 재질로 스텐인레스 강을 사용할 경우에 안전해석에서 추천한 코스트다운보다 빠른 코스트다운을 보여주었지만 비중이 높은 감손우라늄을 사용한 경우에 추천 곡선을 만족하는 코스트다운 곡선을 얻을 수 있었다.

Abstract

An analysis procedure was developed to predict MCP coastdown curve which should be provided to safety analysis branch as design input before the performance test of the prototype. Governing equations for rotational speed and flow rate were established and unknown coefficients were obtained from theoretical and computational methods. The equations were applied for SMART MCP and resulted that the rotational moment of inertia of the original MCP cannot satisfy the coastdown requirement for safety analysis. To increase the rotational moment of inertia, we redesigned the MCP motor and added inertia masses to internal spaces. When stainless steel is used as the material for inertia mass, the result shows faster coastdown than a recommended one. The case using depleted uranium gives us a coastdown curve satisfying the recommended one.

1. 서론

한국원자력연구소에서는 일체형원자로 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor)를 개발하고 있다. SMART는 상용원자로와 다르게 주기기인 펌프와 증기발생기가 배관으로 연결되지 않고 원자로에 일체로 설치되어 원자로의 안전성이 높아지며, 계통을 단순화시켜 경제성이 높기 때문에 발전용 뿐 만 아니라 지역난방 및 해수담수화 등에 이용될 수 있는 장점이 있다.

일체형원자로에 사용될 펌프는 기계적 밀봉이 필요 없기 때문에 운전성과 안정성이 우수한 캔드모터형 축류식 펌프로 개발되었으며 냉각재순환펌프(Main Coolant Pump; 이하 MCP)라 칭한다¹⁾. MCP는 원자로 상단에 수직으로 설치되어 노심에서 가열된 냉각재를 증기발생기로 순환시키는 역할을 수행한다.

일체형원자로는 여러 설계분야의 업무가 함께 수행되므로 유관 설계분야 간의 연계업무가 중요하며 각 분야에 필요한 설계입력을 제공하여야 한다. 일례로 MCP의 성능곡선(performance curve)이 그것이다. MCP의 성능곡선은 펌프 원형이 제작되고 성능시험을 통하여 제공되어야 하지만 시험 전에 타 분야의 설계입력으로 제공하여야 한다. 따라서 MCP의 성능곡선을 예측하는 방법을 개발하고 예측된 결과가 타 분야의 설계입력으로 제공되었다.²⁾ 안전해석분야에서는 시험 전에 제공할 또 다른 설계입력으로 냉각재순환펌프의 코스트다운(coastdown) 곡선을 요구하고 있다. 코스트다운 곡선은 MCP 운전 중에 전원상실과 같은 사고가 갑자기 발생했을 때 MCP가 완전히 정지하는 동안 시간에 따른 회전수의 변화를 나타낸 것이다. MCP의 코스트다운 시간과 곡선의 기울기는 사고시 원자로의 안전성에 중요한 영향을 미치는 변수이다. 코스트다운 곡선도 MCP 원형에 대한 특성시험을 통하여 제공되어야 할 입력 값이지만 MCP 성능곡선과 마찬가지로 예측방법의 개발이 필요하다.

본 연구의 목적은 안전해석의 예비입력자료로 사용될 수 있는 코스트다운 곡선을 생성하는 절차를 개발하는 것이다. 이를 위하여 이론식을 정의하고 도입된 항들의 계수를 이론 및 해석적인 방법으로 결정하였다. 제안된 코스트다운 곡선 생성절차는 MCP 모형에 대한 코스트다운 곡선에 적용하여 타당성을 검증하고, 결과를 바탕으로 SMART MCP의 코스트다운 곡선을 생성하였으며, 안전해석에서 요구하는 코스트다운 곡선을 만족하기 위하여 MCP의 설계를 수정하였다.

2. 코스트다운 지배방정식

2.1 회전수에 대한 지배방정식

MCP의 회전수에 대한 코스트다운을 지배하는 방정식은 다음과 같은 항들로 구성될 수 있다.

$$-J_o \frac{d\omega}{dt} = (\quad) + (\quad) - (\quad) \quad (1)$$

임펠러 손실토크는 임펠러의 블레이드가 유체 속에서 회전할 때 발생하는 수력학적 손실에 의한 토크이며, 기계적 손실토크는 MCP 내부에서 축의 회전과 관련하여 발생하는

손실에 대한 토크를 의미한다. 유동 관성토크는 임펠러를 통과하는 유동이 임펠러를 회전시키는 힘을 나타낸다.

임펠러 손실토크는 수력학적 손실로 회전수 ω 의 함수이다. 어떤 물체가 유체 속을 지날 때 발생하는 저항력은 속도의 제곱에 비례하므로 임펠러 손실토크도 회전수의 제곱에 비례할 것이다. 또한 임펠러의 수력 손실토크에 펌프의 회전수에 대한 상사법칙³⁾을 적용할 수 있다.

$$\text{임펠러 손실토크} = C_1\omega^2 = \left(\frac{T_0}{\omega_0^2}\right)\omega^2 \quad (2)$$

여기서 T_0 는 MCP의 전원이 차단될 경우 초기 회전속도 ω_0 , 즉 3600 rpm으로 임펠러를 회전시키기 위하여 모터의 축에 필요한 토크가 전부 손실로 바뀐다고 보수적인 가정을 하였다.

$$T_0 = \frac{\rho g Q H}{\omega \eta_h} \quad (3)$$

MCP 내부에서 발생하는 기계적 손실토크는 유체마찰토크, 추력베어링 마찰토크 및 보조임펠러의 저항을 포함하는 나머지 손실토크로 나눌 수 있다.

유체마찰토크는 실린더가 유체 속에서 회전할 때 발생하는 마찰 손실로 속도에 비례하며 층류 couette flow로 가정하고 유체마찰력을 적분하면 다음과 같다.

$$\text{유체마찰} = C_2\omega = \left(\sum_i \frac{2\pi\mu r_i^3 L_i}{h_i}\right)\omega \quad (4)$$

여기서 i 는 유체마찰력이 작용하는 각 회전축을 의미하고, r 은 반경, L 은 회전부의 길이(높이)를 나타내며 h 는 반경방향의 간극이다. μ 는 점성계수로 MCP 내부 조건인 150 기압, 100°C 기준으로 0.000286 N-s/m²이다.

추력베어링의 마찰토크는 국부 마찰토크를 반경방향에 대해 적분하여 구한다.

$$\text{추력베어링 마찰토크} = C_3 = \int_{r_i}^{r_o} \mu_b P \cdot r \cdot 2\pi r dr = \frac{2}{3} \pi \mu_b P (r_o^3 - r_i^3) \quad (5)$$

여기서 μ_b 는 추력베어링의 마찰계수이며 P 는 추력베어링에 작용하는 하중이다.

기계적 손실토크에는 위에 언급된 유체 마찰, 추력베어링 마찰에 의한 손실을 제외하고도 보조임펠러와 같이 유체와 간섭이 있는 곳에서 발생하는 손실도 포함되어야 한다. 그러나 이러한 값들을 정확히 예측하는 것은 불가능하므로 MCP 설계에 사용된 설계점(3600rpm)의 기계손실로부터 설계점에서 유체 마찰 및 추력베어링 마찰에 의한 것을 제외한 값을 나머지 기계적 손실로 계산하였다. 각 회전수에 대해서는 상사법칙³⁾을 적용하여 계산한다.

$$\text{나머지 기계손실토크} = C_1'\omega^2 = \left(\frac{T_m - C_2\omega_0 - C_3}{\omega_0^2}\right)\omega^2 \quad (6)$$

여기서 T_m 는 ω_0 에서 기계적 손실토크로 다음 식으로 계산된다.

$$T_m = \frac{\rho g Q H (1 - \eta_m)}{\omega \eta_h \eta_m} \quad (7)$$

유동의 관성이 임펠러에 작용하는 토크는 기준 유량에 대한 토크를 계산하여 유량에 대

한 상사법칙³⁾으로 계산할 수 있다.

$$\text{유동 관성토크} = C_{1f}Q^2 = \left(\frac{T_0}{Q_0^2}\right)Q^2 \quad (8)$$

여기서 Q_0 는 유동에 의해 임펠러를 ω_0 로 회전시키는데 필요한 유량이고, T_0 는 이때 유동에 의해 회전축에 작용하는 토크이다. Q_0 와 T_0 는 전산유체(computational fluid dynamics; CFD) 해석을 통하여 구하여 진다.

위의 결과로부터 결정된 회전수에 대한 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$-J_0 \frac{d\omega}{dt} = C_1\omega^2 + C_1'\omega^2 + C_2\omega + C_3 - C_{1f}Q^2 \quad (9)$$

2.2 유량에 대한 지배방정식

시스템의 유량을 지배하는 방정식을 임펠러 전후의 제어체적에 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m} \frac{dV}{dt} = -(\quad) + (\quad) \quad (10)$$

유로저항은 유로저항계수 ζ 를 이용하여 나타낼 수 있으며 임펠러 관성력은 수두에 의한 압력으로 시스템에 작용한다.

$$\dot{m} \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} \zeta \rho V^2 A + \rho g H A \quad (11)$$

위 식에서 $\dot{m} = \rho Q$, $Q = VA$, $H = H_0(\omega/\omega_0)^2$ 를 적용하면

$$-\frac{dQ}{dt} = C_4Q + \frac{C_5}{Q} \quad (12)$$

이고 여기서

$$C_4 = \frac{\zeta}{2}, \quad C_5 = -gH_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 A_{flow}^2$$

이다.

3. 코스트다운 곡선의 계산

3.1 입력값 결정

전원차단 직전에 MCP는 다음의 정상상태로 고속운전하고 있다고 가정한다.

$$Q_0 = 2006 \text{ m}^3/\text{hr}, \quad \omega_0 = 3600 \text{ rpm}, \quad H_0 = 17.5 \text{ m}$$

식 (3)에서 ω_0 에서 수력효율 $\eta_h = 0.75$ 이며 MCP의 작동유체 밀도 ρ 는 15MPa, 310°C에서 703.6 kg/m^3 이므로,

$$T_0 = 238 \text{ N-m}$$

유체마찰토크의 계수 C_2 는 그림 1에 나타난 MCP 내부의 회전축 사이의 간격에 대하여

각각 계산하여 표 1과 같이 구할 수 있다.

베어링 마찰토크를 계산하기 위하여 식 (3)에 μ_b 는 0.1, 하중 P는 회전축 무게로 608kg이며 추력베어링의 작용면의 내경(r_i)과 외경(r_o)은 각각 61.5mm와 97.5mm이다.

MCP의 기계적효율(η_m)은 0.69이므로 기계적손실토크는 (7)식으로부터

$$T_{m0} = 107 \text{ N-m}$$

유로저항계수 ζ 는 펌프의 수두로부터

$$\zeta = \frac{2gH_o}{(Q_0/A_{flow})^2} = 2.52$$

여기서 유로단면적 A_{flow} 는 임펠러의 팁직경(D_t) 270mm, 허브직경(D_h) 110mm로부터 계산되었다. MCP 코스트다운을 결정하는 중요한 변수인 관성모멘트 J_0 는 1.19kg-m^2 의 값을 갖는다.

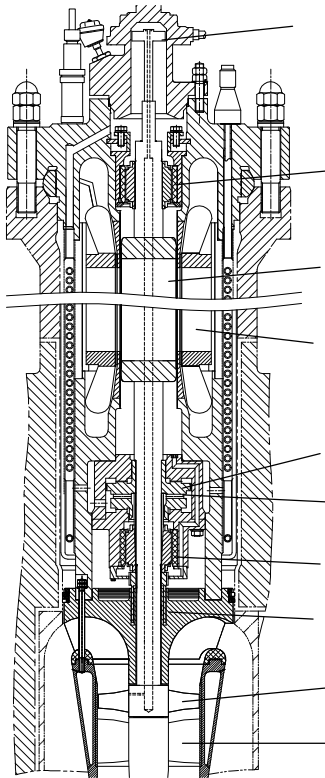


그림 1 MCP의 구조

표 1 유체마찰력 계산

위치	반경 r (m)	간극 h (m)	길이 L (m)	C_2
회전축 측정기	0.048	0.003	0.0265	1.755E-06
상부저널	0.0675	0.00008	0.087	0.000601
전동기	0.0925	0.0018	0.87	0.000687
보조임펠러	0.0483	0.0009	0.051	1.147E-05
하부저널	0.0675	0.00008	0.087	0.000601
유동저감장치 (외부)	0.0492	0.001	0.1025	2.193E-05
유동저감장치 (중간)	0.0432	0.001	0.1025	1.484E-05
유동저감장치 (내부)	0.037	0.0025	0.24	8.738E-06
합계				0.0019482

3.2 CFD 해석에 의한 유동관성토크 결정

식 (8)의 유동관성토크 계산에 필요한 Q_0 를 구하기 위하여 CFD 해석을 수행하였다. 임펠러가 유동에 의해 회전할 때 회전수를 지배하는 방정식은 다음과 같다.

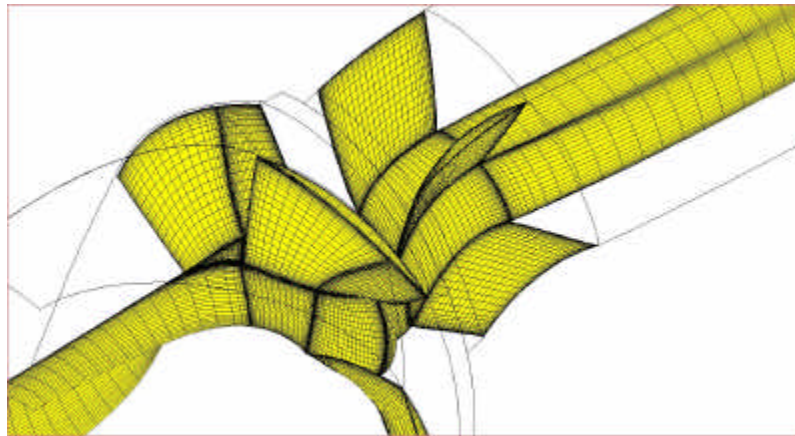
$$\frac{d\omega}{dt} = T_f - T_m \quad (13)$$

여기서 T_f 는 유동에 의해 축에 작용하는 토크이고 T_m 은 기계적 손실에 의해 반대방향으로 작용하는 토크로 모두 회전수의 함수이다. 임펠러를 어떤 일정한 유량이 통과하면 임펠러의 회전수도 일정한 값으로 도달된다. 이때 축에 작용하는 토크는 영이 아니라 회전수에 대응하는 기계적 손실에 의해 발생하는 손실토크 T_m 과 같게 된다. 즉, 식 (13)로부터

$$T_h(\omega) = T_m(\omega) \quad (14)$$

MCP를 회전수 ω_0 로 회전시키는 유량 Q_0 를 CFD해석으로 구하기 위해서는 임펠러의 회전수 ω_0 를 고정하고 유량을 바꿔가면서 CFD 해석을 수행하면서 임펠러에 작용하는 수력토크 T_{h0} 가 T_{m0} 와 같아지는 유량을 구하면 그 유량이 바로 Q_0 가 된다.

본 연구에서는 터보기계 전용해석 코드인 FINE/Turbo 소프트웨어⁴⁾를 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 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 벽 함수(wall-fuction)을 도입한 표준 $k-\epsilon$ 모형을 적용하였다. 그림 2는 CFD 해석에 사용된 격자계를 나타낸 것이다.



2 CFD

유량 Q_0 를 구하기 위하여 회전수를 3600rpm으로 고정하고 유량을 바꾸면서 임펠러에 작용하는 수력토크 T_{h0} 가 T_{m0} 와 같아지는 유량을 구하였다. 계산된 결과는 다음과 같다.

$$Q_0 = 2834.5\text{m}^3/\text{hr}, \quad T_{h0} = 214.4 \text{ N-m}$$

3.2 코스트다운 계산절차

본 논문에서 SMART MCP의 coastdown 곡선을 구한 절차는 다음과 같다.

- (i) 초기 변수값을 결정한다. 예) $\omega_1 = 3600$ rpm, $Q_1 = 2006$ m³/hr
- (ii) $\Delta\omega$ 를 작은 값으로 주고 식 (9)로부터 다음과 같이 Δt 를 구한다.

$$\Delta t = \frac{-J_0}{C_1\omega_i^2 + C_1'\omega_i^2 + C_2\omega_i + C_3 - C_{1f}Q_i^2}$$

- (iii) $\omega_{i+1} = \omega_i + \Delta\omega$, $t_{i+1} = t_i + \Delta t$

- (iv) 식 (10)으로부터 t_{i+1} 에서의 유량을 구한다.

$$\Delta Q = -\left(C_4Q + \frac{C_5}{Q}\right)\Delta t$$

$$Q_{i+1} = Q_i + \Delta Q$$

- (v) $\omega_{i+1} < \varepsilon$ 까지 (ii)-(iv)의 반복 계산을 수행한다.

4. SMART MCP의 코스트다운 곡선

본 연구에서 개발된 코스트다운 해석절차를 SMART MCP에 적용하기에 앞서 모형 펌프에 적용하여 시험결과와 비교함으로써 해석절차의 타당성을 검토하였다.

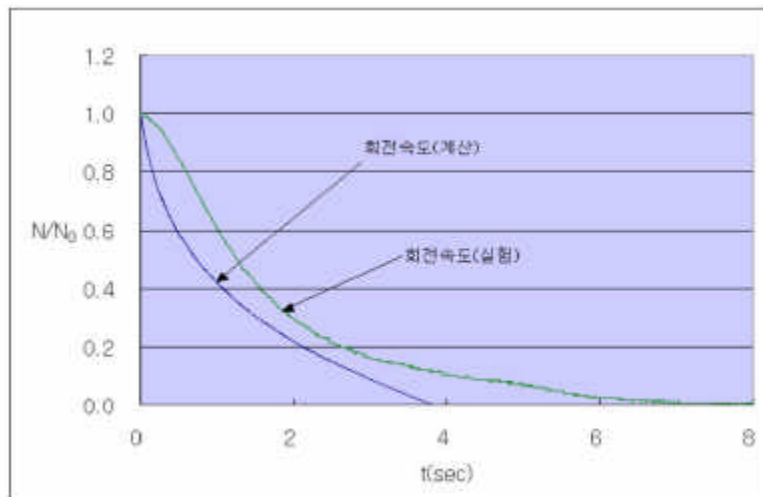


그림 3 모형펌프에 대한 coastdown 곡선 비교

모형 펌프는 SMART MCP와 같은 형태의 축류형 캔드모터로 두 개의 저널베어링과 하나의 추력베어링으로 지지된다. 모형 펌프의 코스트다운을 측정하기 위하여 정상상태 운전 중에 갑자기 전원을 차단하고 모형 펌프에 설치된 회전속도 측정기에서 감지되는 시간에 따른 회전속도 신호를 오실로스코프로 받아 기록하였다. 그림 3은 모형 펌프의 코스트다운 시험 결과와 본 연구에서 개발된 해석절차로 구한 코스트다운 결과를 비교한 것이다. 계산으로 구한 곡선이 실험에 의한 곡선과 유사한 형태로 코스트다운 됨을 보여주

며, 코스트다운 시간은 계산결과가 실험보다 빠른 코스트다운을 나타내고 있다. 그 이유는 식 (2)의 임펠러 손실토크를 결정할 때 도입된 보수적인 가정 때문으로 추정된다. 실험과 계산의 비교결과로부터 본 연구에서 사용한 코스트다운 계산절차는 타당하며 또한 보수적인 결과를 생산하기 때문에 SMART MCP의 코스트다운 계산에 적용 가능하다고 판단된다.

그림 4에 계산된 SMART MCP의 coastdown 곡선을 나타내었다. 결과에 따르면 총 coastdown 시간 중 초기 30%이내에서 급격한 coastdown이 발생하는 것을 보여준다. 또, 회전속도에 대한 coastdown이 유량에 대한 것보다 상대적으로 빨리 나타나고 있다. 그러나 계산된 coastdown 곡선은 안전해석 분야에서 요구하는 회전속도에 대한 coastdown의 최저한계 값에 못 미치고 있다. 따라서 SMART MCP의 coastdown 곡선의 수정이 요구된다.

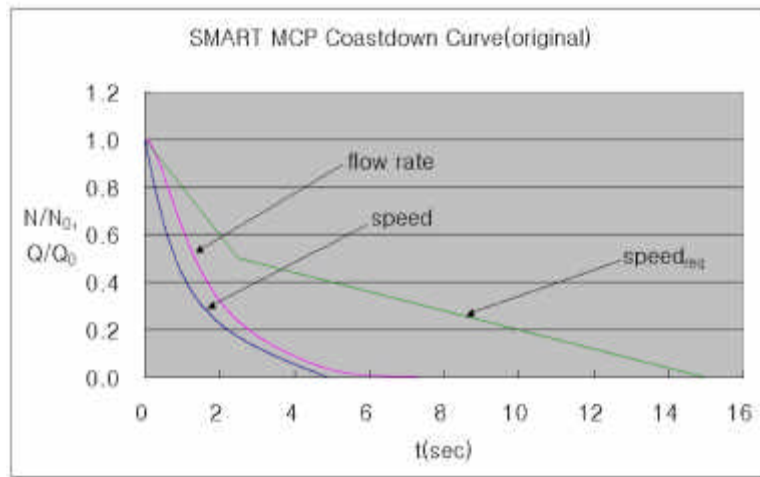


그림 4 SMART MCP의 Coastdown 곡선

현재 SMART MCP의 coastdown 곡선을 수정할 수 있는 방법은 회전축의 관성을 증가시키는 것이 유일한 방법이지만 SMART MCP는 원자로와 일체로 설치되어 공간적인 제약이 있으므로 관성을 무한정 늘릴 수는 없는 상태이다. 따라서 현재 가능한 공간 내에서 최대한 관성을 증가시키는 방법을 고려하였다.

먼저 전동기 회전자(rotor)의 설계를 변경하였다. 표 2에 보인 바와 같이 회전자의 길이를 0.747m에서 0.47m로 줄이고 직경을 0.185m에서 0.24m로 늘이는 설계변경으로 관성을 증가시켰다. 전동기를 재 설계함으로써 회전축 관성모멘트는 1.19kg-m²에서 1.7kg-m²로 증가되었다. 또한 MCP 내부공간을 최대한 활용하여 회전관성을 증가시킬 수 있도록 설계 변경하였다.

회전관성을 증가시킬 수 있는 여유공간은 전동기 회전자의 길이 축소에 따라 발생한 여유공간, 원래의 MCP에 존재했던 상부저널과 회전자 사이, 그리고 회전자와 하부베어링 집합체 사이의 공간이 있다. 그림 2에 관성질량 추가를 위한 여유공간을 나타내었다. 표 2에 나타난 바와 같이 이들 영역을 이용하여 관성질량을 증가시켰다.

먼저 관성질량의 재질을 회전축과 같은 재질인 STS(stainless steel)를 사용하였을 경우에 대한 계산을 수행하였다. 이 때의 회전축 총 관성모멘트는 2.7kg-m²이다. 설계 변경된

회전 관성모멘트를 이용하여 coastdown 곡선을 그림 3에 나타내었다. 이 경우 안전해석에서 요구한 최저한계 값은 넘었지만 엄격한 SMART 사고해석 결과로부터 추천되는 coastdown 곡선(speed_{rec})에는 미치지 못하고 있다. 따라서 관성질량을 더욱 증가시킬 필요가 있다.

표 2 회전축 관성모멘트 계산 표

항목	값	단위	비고
전동기 재설계 전			
회전자 크기			
직경	0.185	m	
길이	0.747	m	
회전축 관성모멘트	1.19	kg·m ²	
질량	292	kg	
전동기 재설계 후			
회전자 크기			
직경	0.24	m	
길이	0.47	m	
회전축 관성모멘트	1.7	kg·m ²	
질량	300	kg	
관성질량 추가			
SUS 사용	8027	kg/m ³	밀도 8027kg/m ³
여유공간(전동기 변경)			
외경	0.24	m	
내경	0.0825	m	
길이	0.277	m	
추가 관성모멘트(SUS)	0.71412	kg·m ²	$I = \pi \rho L (D_o^4 - D_i^4) / 32$
추가 질량	88.7	kg	
상부 여유공간			
외경	0.24	m	
내경	0.0825	m	
길이	0.05	m	
추가 관성모멘트(SUS)	0.128903	kg·m ²	
추가 질량	16.01	kg	
하부 여유공간			
외경	0.24	m	
내경	0.825	m	
길이	0.06	m	
추가 관성모멘트(SUS)	0.154683	kg·m ²	
추가 질량	19.21	kg	
총 관성 모멘트	2.6977	kg·m ²	
회전축 총 질량	410.46	kg	
감손우라늄(DU) 사용			밀도 18962kg/m ³
여유공간 1			
추가 관성모멘트(DU)	1.68695	kg·m ²	
추가 질량	209.54	kg	
상부 여유공간			
추가 관성모멘트(SUS)	0.128903	kg·m ²	
추가 질량	16.01	kg	
하부 여유공간			
추가 관성모멘트(DU)	1.094534	kg·m ²	
추가 질량	82.58	kg	
총 관성 모멘트	4.61	kg·m ²	
회전축 총 질량	608.13	kg	

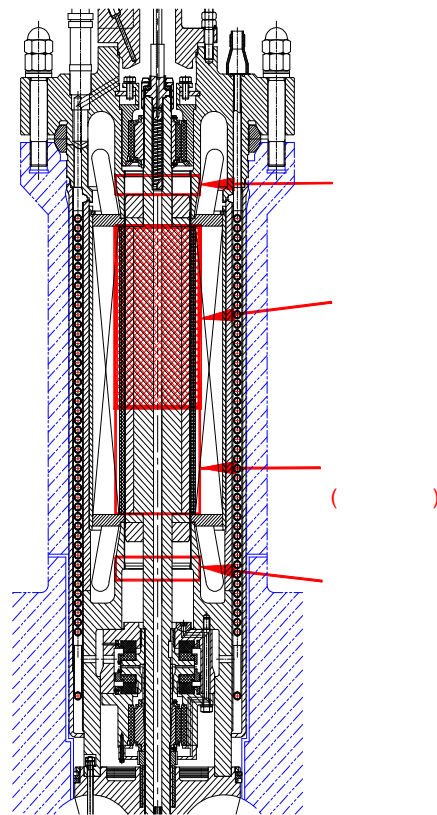


그림 5 관성질량 추가를 위한 여유공간

현재 SMART MCP의 배치와 설계로 관성질량을 설치할 수 있는 공간을 더 확보하는데는 어려움이 있다. 따라서 현 설치공간에서 관성질량을 증가시키는 방법은 SUS 보다 밀도가 높은 재질을 사용하는 방법밖에 없다. 본 연구에서는 밀도가 SUS보다 2배 이상 큰 감손우라늄(DU)을 사용하였다. 이때의 총 회전관성모멘트는 4.61kg·m²가 된다. 그림 4는 DU를 사용했을 때의 coastdown 곡선을 나타낸 것이다. SMART MCP의 회전속도에 대한 coastdown 곡선이 안전해석에 추천하는 곡선보다 천천히 coastdown됨을 보여주고 있다.

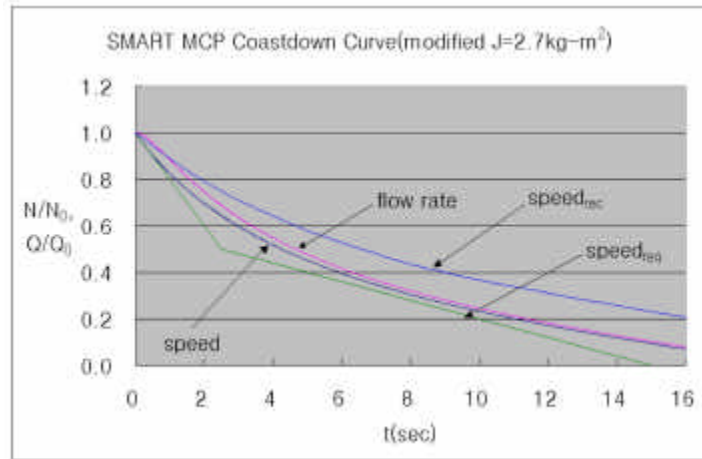


그림 6 수정된 SMART MCP의 Coastdown 곡선
(관성질량재질로 STS를 사용한 경우)

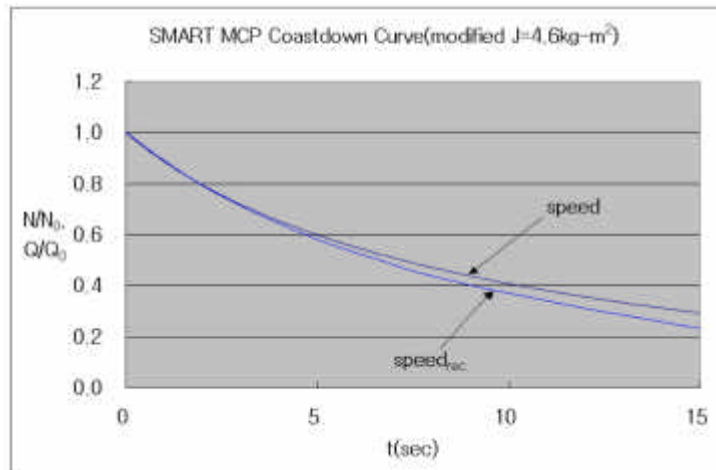


그림 7 수정된 SMART MCP의 Coastdown 곡선
(관성질량재질로 DU를 사용한 경우)

5. 결론

본 연구에서는 SMART MCP 코스트다운 곡선을 해석적으로 구하기 위하여 코스트다운에 영향을 미치는 항들을 정의하고 현 SMART MCP의 설계에서 이용 가능한 데이터로부터 각 항에 대한 모델을 제시하고 해석을 수행하였다.

해석된 결과에 따르면 현재의 MCP 설계로는 안전해석분야에서 추천한 coastdown 곡선뿐만 아니라 기본적으로 요구하는 최저 coastdown 곡선도 만족하지 못하였다. 따라서 coastdown을 증가시키기 위하여 MCP의 설계변경이 요구된다. 본 연구에서는 MCP 전동기 설계변경과 그에 따라 발생하는 내부공간을 이용하여 관성을 증가시키고 증가된 관성

을 이용하여 coastdown 곡선을 평가하였다. 관성질량 증가를 위한 재질로 STS를 사용할 경우는 총 회전관성모멘트가 $1.19\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 에서 $2.7\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 로 증가되었지만 안전해석에서 추천하는 coastdown 곡선을 만족하지 못하였다. 관성질량 재질을 감손우라늄(DU)을 사용했을 경우엔 총 회전관성모멘트가 $4.61\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 로 증가되었으며 안전해석에서 추천하는 coastdown 곡선을 만족함을 보여주었다. 따라서 안전해석에서 요구하는 coastdown 곡선을 만족하기 위해서는 SMART MCP 설계의 수정이 요구된다.

본 연구에서 제시한 SMART MCP의 coastdown 곡선과 해석절차는 안전해석 입력을 위하여 예비로 작성된 것으로 추후 MCP 원형에 대한 성능시험을 통하여 수정 및 보완 되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 박진석 외 6인, SMART 냉각재순환펌프의 기본설계보고서, KAERI/TR-2135/2002.
- [2] 김민환, “전산유체역학 코드를 이용한 SMART MCP의 성능곡선 생성과 1대 펌프 정지시의 성능예측,” ‘01 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2001.
- [3] A. J. Stepanoff, Centrifugal and Axial Flow Pumps, John Wiley & Sons Inc., 1957.
- [4] FINETM Numeca’s Flow Integrated Environment, User Manual, Numeca Inc., Feb. 1999.