

판형핵연료를 사용하는 노심 하향유동 연구용 원자로의 피동잔열제거를 위한 펌프 설계

김다용*† · 김인국* · 박홍범* · 서경우*

Design of Pump for Passive Residual Heat Removal in Core Downward Flow Research Reactors Using Plate-Type Fuel

Dayong Kim*†, Inguk Kim*, Hongbeom Park*, Kyoungwoo Seo*

Key Words : Coastdown flow(관성서행 유동), Core downward flow(노심 하향유동), Flywheel(관성바퀴), Passive residual heat removal(피동잔열제거), Pump Design(펌프 설계)

ABSTRACT

This study investigates the design of pump for passive residual heat removal in core downward flow research reactors using plate-type fuel. The Jordan Research and Training Reactor(JRTR, 5 MW), the Pakistan Research Reactor-1(PARR-1, 10 MW), and the Japan Research Reactor No. 3(JRR-3, 20 MW) were considered as reference designs for the pumped intended for passive heat removal. For passive residual heat removal in core downward flow research reactors, a sufficient duration of core downward flow shall be maintained by the coastdown flow from the pump's flywheel to ensure fuel integrity until the core decay heat decrease sufficiently. To evaluate the required duration of core downward flow, the Kaminaga correlation was applied for critical heat flux calculations and the decay heat curve from ANSI/ANS-5.1-1971 was used for decay heat analysis. For passive residual heat removal, it was calculated that the low-power JRTR requires core downward flow approximately 3 seconds, while PARR-1 and JRR-3 require approximately 140 seconds and 150 seconds, respectively. This paper presents a design approach for the appropriate moment of inertia for flywheel and the motor capacity for primary cooling system pumps of JRTR, PARR-1 and JRR-3 to enable passive residual heat removal. This study provides a design approach for a pump for the passive residual heat removal in a research reactor with core downward flow using plate-type fuel. It is expected to contribute to the enhancement of safety in future research reactor designs.

1. 서 론

연구용 원자로(이하 연구로)는 핵분열 반응으로 발생하는 중성자를 기초 연구, 의료 방사성 동위원소 제작, 전력반도체 소자 생산 연구 등 광범위한 분야에 걸쳐 이용하는 원자로이다. 그러므로 연구로는 중성자 이용의 용이성을 위해 노심이 개방된 수조에 담겨 있는 개방수조형으로 설계되는 경우가 많다⁽¹⁾. 또한 연구로는 중성자 속 증가를 위해 높은 출력밀도를 가지는 핵연료를 사용한다. 따라서 핵연료의 효율적인 냉각을 위해 발열 체적에 비해 넓은 냉각 표면을 가지

는 판형핵연료를 주로 사용한다. 판형핵연료를 사용하는 경우 핵연료의 고정과 체결의 용이성을 고려하여 노심 하향유동을 가지도록 설계된다⁽²⁾.

이러한 노심 하향유동 설계에서는 Fig. 1과 같이 일차냉각계통 펌프 운전으로 인한 강제대류 냉각 시 노심 유동방향과 원자로 정지 후 자연대류 냉각 시 노심 유동의 방향이 반대이다. 그러므로 원자로 정지 후 노심 유동 하향에서 상향으로 전환되는 유동역전 현상이 발생한다. 유동역전 시에는 노심 내 냉각재가 일정 시간 정체되어 노심 잔열에 의해 핵연료 및 냉각수 온도가 상승하게 되며, 이로 인해 핵연료 손상

* 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)

† 교신저자, E-mail : dayong@kaeri.re.kr

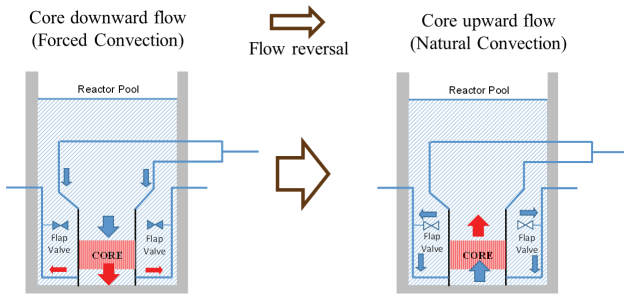


Fig. 1 Core flow stagnant during flow reversal form downward forced convection to upward natural convection

이 발생할 수 있다. 그러므로 유동역전 시 핵연료 손상을 방지하기 위해서는 노심 잔열이 충분히 낮아질 때까지 노심 하향유동을 유지시켜, 유동역전이 발생하더라도 핵연료 건전성에 문제가 없을 만큼 노심을 냉각시켜야 한다.

일차냉각계통 펌프 정지 후에도 노심 하향유동을 유지하는 방법에는 펌프에 설치된 관성바퀴(Flywheel)의 관성력을 통한 관성서행 유량을 이용하는 피동적인 방법과, 추가적인 비상 펌프를 설치하여 노심 하향유동을 유지하는 능동적인 방법이 사용된다. 능동적인 방법을 위해 설치되는 비상 펌프는 원자력 안전등급으로 설계되어야 하며, 다중성 및 독립성의 개념이 적용되어야 한다. 또한 소의 전원상실 시에도 펌프가 작동되기 위해 추가적인 안전등급 비상전원이 공급되어야 하는 등 설계가 매우 복잡해지므로 높은 설계비용이 요구된다. 반면에 펌프의 관성서행 유량을 통한 노심 하향유동을 유지하는 방법은 추가적인 능동기기 설치 없이 관성바퀴의 관성력으로 잔열제거가 가능하므로 설계가 비교적 단순하다.

그러므로 본 논문에서는 판형핵연료를 사용하는 노심 하향유동 연구로의 피동잔열제거를 위한 펌프 설계에 대한 연구를 수행하였다. 요르단의 5 MW급 연구로(Jordan Research and Training Reactor, JRTR)⁽³⁾, 파키스탄의 10 MW급 연구로(Pakistan Research Reactor-1, PARR-1)⁽⁴⁾ 및 일본의 20 MW급 연구로(Japan Research Reactor No. 3, JRR-3)⁽⁵⁾를 본 논문에서 참조 노형으로 선정하였다. 노심 하향유동 유지 시간 평가를 위해 임계열속 계산에는 Kaminaga 상관식⁽²⁾을 적용하였으며, 노심 붕괴열 계산에는 ANSI/ANS-5.1-1971⁽⁶⁾의 붕괴열 곡선을 이용하였다.

2. 노심 하향유동 유지시간 평가

2.1 임계열속 상관식

임계열속(Critical Heat Flux, CHF)은 핵비등에서 천이비등으로 넘어가는 지점에서의 열속이다. 임계열속 지점에서는 많은 양의 기포가 생성되어 냉각재가 핵연료 피복재에 접

촉하지 못하므로 냉각능력이 상실되어 핵연료 피복재 온도가 급격하게 상승한다. 따라서 임계열속이 발생하게 되면 핵연료 건전성을 보장하기 어려우므로 임계열속과 최대 국부 열속의 비로 정의되는 최소 임계열속비(Minimum Critical Heat Flux Ratio, MCHFR)를 선정하여 핵연료의 건전성을 확인하는 지표로 사용한다. 최소 임계열속비는 다음의 식으로 정의된다.

$$MCHFR = \frac{q_{CHF}}{q_{MAX}} = \frac{q_{CHF}}{q_{AVG} \times F_q} \quad (1)$$

식 (1)에서 q_{CHF} 는 핵연료와 냉각수의 임계열속(kW/m^2), q_{MAX} 는 핵연료와 냉각수의 최대임계열속(kW/m^2), q_{AVG} 는 핵연료와 냉각수의 평균열속(kW/m^2)이며, F_q 는 침투계수로 핵연료 최대 열속 대 평균 열속비의 값이다. 판형핵연료를 사용하는 노심 하향유동 연구로의 임계열속 평가에는 Kaminaga 상관식⁽²⁾이 주로 적용된다. Kaminaga 상관식은 고유량 영역, 중간유량 영역 및 저유량 영역의 3가지 상관식으로 나누어지는데, 본 논문은 노심 내 유동역전이 발생하기 전까지의 임계열속 평가가 목적이므로 저유량 영역에서의 임계열속 상관식만을 사용한다. 저유량 영역에서 Kaminaga의 무차원 임계열속 상관식은 다음과 같다.

$$q_{CHF}^* = 0.7 \times \frac{A_f}{A_h} \times \frac{\sqrt{W/\lambda}}{(1 + (\rho_g/\rho_l)^{1/4})^2} (1 + 3 \times \Delta T_{sb,i}^*) \quad (2)$$

$$\lambda = \sqrt{\sigma / \{(\rho_l - \rho_g)g\}} \quad (3)$$

$$\Delta T_{sb,i}^* = (C_p \Delta T_{sub}) / h_{fg} \quad (4)$$

식 (2)에서 q_{CHF}^* 는 무차원 임계열속, A_f 는 핵연료 사각채널에서의 유동 면적(m^2), A_h 는 핵연료 가열 면적(m^2), W 는 핵연료 사각채널 채널폭(m), ρ_g 는 포화 증기 밀도(kg/m^3), ρ_l 는 포화 액체 밀도(kg/m^3)이다. λ 및 $\Delta T_{sb,i}^*$ 는 각각 특성길이(m)와 무차원 입구과냉각 온도로서 식 (3) 및 (4)로 계산된다. 식 (3) 및 (4)에서 σ 는 표면장력(N/m), C_p 는 액체의 정압비열(kJ/kg/K), ΔT_{sub} 는 과냉각 온도(K)이며, h_{fg} 는 물의 증발열(kJ/kg)이다. 식 (2)의 무차원 임계열속은 아래와 같이 차원화된 임계열속으로 나타낼 수 있으며, 그 값은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$q_{CHF} = q_{CHF}^* \times h_{fg} \times \sqrt{\lambda(\rho_l - \rho_g)\rho_g g} \quad (5)$$

연구로의 피동잔열제거를 위한 노심 하향유동 유지시간을 평가하기 위해, 최소 임계열속비를 만족하는 허용 노심 출력

Table 1 Standard decay heat(Infinite reactor operating time)⁽⁶⁾

Time after shutdown (s)	Relative power (P/P ₀)	Time after shutdown (s)	Relative power (P/P ₀)
0.1	0.0675	2.00×10 ²	0.0275
1	0.0625	4.00×10 ²	0.0235
2	0.059	6.00×10 ²	0.0211
4	0.0552	6.00×10 ²	0.0211
6	0.0533	8.00×10 ²	0.0196
8	0.0512	1.00×10 ³	0.0185
1.00×10 ¹	0.05	2.00×10 ³	0.0157
2.00×10 ¹	0.045	4.00×10 ³	0.0128
4.00×10 ¹	0.0396	6.00×10 ³	0.0112
6.00×10 ¹	0.0365	:	:
8.00×10 ¹	0.0346	8.00×10 ⁸	0.000303
1.00×10 ²	0.0331	1.00×10 ⁹	0.000267

(Q_{allow})과 그때의 노심 잔열(Q_{decay})이 이용된다. 노심 잔열(Q_{decay})는 시간에 지남에 따라 감소되므로, 허용 노심 출력(Q_{allow})보다 노심 잔열(Q_{decay})이 작아지는 시점까지 노심 하향유동이 유지되면 유동역전이 발생하더라도 핵연료 건전성은 보장된다. 최소 임계열속비를 만족하는 허용 노심 출력(Q_{allow})과 노심 잔열(Q_{decay})는 각각 식 (6) 및 (7)과 같이 계산된다.

$$Q_{allow} = q_{AVG} \times A_h = \frac{q_{CHF}}{MCHFR \times F_q} \times A_h \quad (6)$$

$$Q_{decay} = K \left(\frac{P}{P_0} (t_s) \right) \times Q_{reactor} \quad (7)$$

식 (7)에서 K는 불확도로 1.2, t_s는 원자로 정지 후 시간(sec), Q_{reactor}는 원자로 출력이며, P/P₀는 운전출력 비율로 Table 1로부터 도출된다.

2.2 노심 하향유동 유지시간 평가

본 절에서는 판형핵연료를 사용하는 노심 하향유동 연구로의 유동역전 시 핵연료 건전성을 보장하기 위한 노심 하향유동 유지시간에 대한 평가를 수행하였다. 본 논문에서 참조 노형으로 고려한 JRTR, PARR-1 및 JRR-3의 핵연료 설계와 운전조건은 Table 2와 같다. 그리고 각 연구로의 핵연료 설계에 대한 형상 변수 도식도는 Fig. 2에 나타나 있다.

노심 하향유동 유지시간을 평가하기 위해서는 최소 임계열속비를 만족하는 노심 출력(Q_{allow})을 산정해야 한다. 해당 값은 최소임계열속비(MCHFR), 첨두계수(F_q), 무차원 임계열속(q''_{CHF}) 및 차원화 임계열속(q_{CHF})으로 도출된다. 최소

Table 2 Fuel design and operating condition for core downward flow research reactors

		JRTR ⁽²⁾	PARR-1 ⁽³⁾⁽⁷⁾	JRR-3 ⁽⁴⁾	
Total power	MW	5	10	20	
No. of fuel assembly(FA)	EA	18	22*	32*	
No. of fuel plate(FP)	EA	21	23	19	
Fuel meat	Width (W _m)	m	0.0621	0.06275	0.062
	Length (L _m)	m	0.64	0.6	0.75
Fuel plate	Gap(G _p)	m	0.00235	0.0021	0.00238
	Width (W _p)	m	0.0666	0.06692	0.0666
Core inlet temp.(T _{in})	°C	37	38	35	
Core Inlet pres.	kPa	180	171.2	152	

* Standard fuel + Control fuel

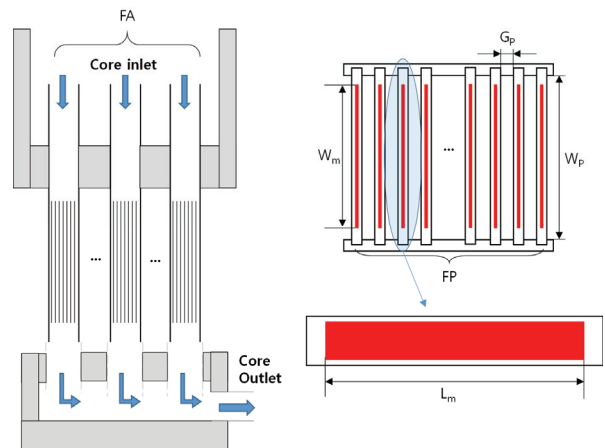


Fig. 2 Schematic and design variables for fuel design

임계열속비(MCHFR)는 기존문헌을 참조하여 1.5⁽⁵⁾를 적용하였으며, 무차원 임계열속(q''_{CHF}) 및 차원화 임계열속(q_{CHF})와 그 계산을 위한 주요 변수는 Table 3과 같다. 최소 임계열속비를 만족하는 허용 노심 출력(Q_{allow})보다 노심 잔열(Q_{decay})이 작아질 때까지 노심 하향유동이 유지되면, 유동역전 시에도 핵연료 건전성이 보장된다. 이에 따라 각 연구로의 허용 노심 출력(Q_{allow})보다 노심 잔열(Q_{decay})이 작은 원자로 정지 후 시간(sec)을 계산하면 Table 4와 같다. JRTR는 낮은 출력으로 인해 약 3초간 노심 하향유동의 유지가 가능하면, 유동역전 시에도 핵연료 건전성이 보장된다. 하지만, PARR-1 및 JRR-3는 높은 출력으로 인해 각각 약 140 및 150초간의 노심 하향유동이 유지되어야 원자로 안전정지가 가능하다.

Table 3 Results of q''_{CHF} , q_{CHF} and main variables for the calculations

		JRTR	PARR-1	JRR-3	Remark
Density of liquid(ρ_l)	kg/m ³	945.6	946.8	949.6	@sat. cond.
Density of gas(ρ_g)	kg/m ³	1.023	0.9762	0.8734	@sat. cond.
Surface tension (σ)	N/m	7.008 ×10 ⁻²	6.992 ×10 ⁻²	7.040 ×10 ⁻²	@inlet cond.
Specific heat(c_p)	kJ/kg/ K	4.179	4.179	4.179	@inlet cond.
SC temp. (ΔT_{sub})	K	80.2	77.4	76.8	$T_{sat}-T_{in}$
Dimless. inlet SC temp. (ΔT_{sub}^*)	-	0.1519	0.1465	0.1453	Eq.(4)
Critical wave length (λ)	m	2.448 ×10 ⁻³	2.745 ×10 ⁻³	2.466 ×10 ⁻³	Eq.(3)
Heated area(A_h)	m ²	30.05	38.10	56.54	2×FA×FP × W_m × L_m
Flow area(A_f)	m ²	5.634 ×10 ⁻²	6.802 ×10 ⁻²	9.130 ×10 ⁻²	FA×(FP-1) × G_p × W_p
Dimless. CHF (q''_{CHF})		6.730 ×10 ⁻³	6.387 ×10 ⁻³	5.793 ×10 ⁻³	Eq.(2)
Critical heat flux (q_{CHF})	kW/m ²	75.83	70.29	60.46	Eq.(5)
Power peaking factor (F_q)		3.0 ⁽²⁾	4.743 ⁽⁷⁾	3.112 ⁽⁴⁾	
Allow. heat (Q_{allow})	kW	506.3	376.4	732.3	Eq.(6)

Table 4 Time after reactor shutdown when Q_{decay} is less than Q_{allow}

		JRTR	PARR-1	JRR-3
Allowable heat (Q_{allow})	kW	506.3	376.4	732.3
Total Power ($Q_{reactor}$)	MW	5	10	20
P/P ₀		0.0622	0.0306	0.0300
Time(t) [$Q_{allow} > Q_{decay}$]	s	3	140	150

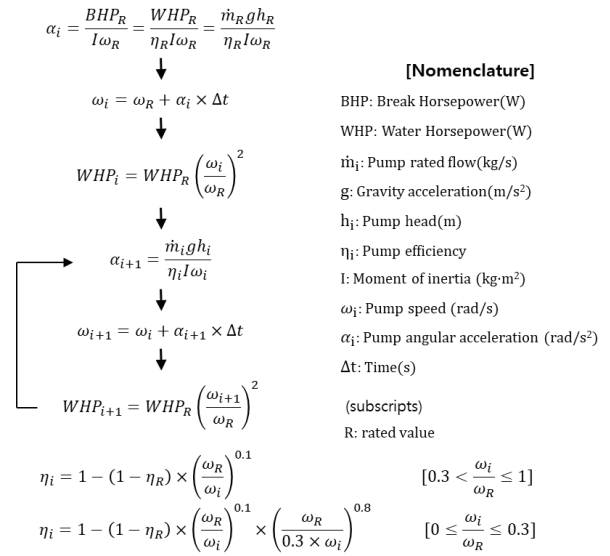


Fig. 3 Calculation diagram of the pump coastdown flow rate⁽⁸⁾

3. 피동잔열제거를 위한 펌프 설계

원자로 정지 후 피동적인 방법으로 노심 하향유동을 유지 하기 위해서는 일차냉각계통 펌프의 관성바퀴에 의한 관성 서행 유량을 이용한다. 펌프의 관성서행 유량을 계산하는 순서는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 관성서행 유량은 펌프의 동력이 증가할수록 감소하고, 회전 운동에너지가 증가할수록 증가한다. 계통의 유량 및 압력강하, 그리고 전력계통의 용량 등을 고려하여 펌프의 정격유량, 양정 및 효율이 결정되기 때문에, 본 평가에서는 펌프의 회전 운동에너지만을 설계 변수로 하여 관성서행 유량을 계산하였다. 펌프의 회전 운동에너지는 펌프의 관성모멘트와 회전속도에 의해 결정되며, 그 값은 다음과 같이 계산된다.

$$KE = 0.5 \times I \times \omega^2 \quad (8)$$

식 (8)에서 KE는 펌프의 회전 운동에너지(kJ), I는 관성바퀴의 관성모멘트(kg · m²), ω 는 펌프 각속도(rad/s)이다. 본 논문에서 고려한 각 연구로의 일차냉각계통 펌프의 정격유

Table 5 Pump design parameters for core downward flow research reactors

		JRTR	PARR-1	JRR-3
Flow(Q)	m ³ /hr	331 ⁽⁹⁾	520 ⁽¹⁰⁾	1200 ⁽¹¹⁾
Head(H)	m	20 ⁽⁹⁾	35 ⁽¹⁰⁾	46 ⁽¹¹⁾
Pump efficiency(η)		0.8 ⁽⁹⁾	0.845 ⁽¹⁰⁾	0.8*
BHP	kW	22.6	62.0	150

* Efficiency of the pump of JRR-3 is assumed to be that of a general centrifugal pump.

량, 수두 및 효율 및 동력은 Table 5와 같으며, 각 연구로에 대하여 일차냉각계통 펌프의 회전 운동에너지에 대한 관성서행 유량을 Fig. 4에 나타내었다. 보수적인 평가를 위해 각 연구로에서 유동 역전 시에도 핵연료 건전성을 보장할 수 있

는 노심 하향유동 유지 시간인 3초(JRTR), 140초(PARR-1) 및 150초(JRR-3)에서 펌프의 무차원화된 관성서행 유량이 0.1 이상이어야만 연구로가 피동잔열제거가 가능하다고 가정하였다. 따라서 JRTR은 6 kJ, PARR-1은 700 kJ 및 JRR-3은 2520 kJ 이상의 회전 운동에너지를 가지는 일차냉각계통 펌프가 설계되어야 피동잔열제거가 가능하다.

펌프의 회전 운동에너지를 증가시키기 위해서는 관성바퀴의 관성모멘트(I)와 펌프 각속도(ω)를 증가시켜야 한다. 펌프의 각속도(ω)는 아래 식 (9)와 같이 모터 인입되는 전력의 주파수(f)에 비례하며, 모터의 극수(P)에 반비례한다.

$$\omega \propto \frac{120 \times f}{P} \quad (9)$$

모터에 인입되는 주파수(f)는 해당 연구로가 건설된 환경에 결정된다. 본 계산에서는 각 연구로가 건설된 환경에 맞게 모터에 인입되는 전력의 주파수를 50 Hz로 가정하였다. 각 연구로에서 일차냉각계통 펌프의 모터 극수(P)에 따른 피동잔열제거에 필요한 펌프 관성바퀴의 최소 관성모멘트(I_{min})를 Table 6과 같이 나타내었다.

Table 6과 같이 JRTR의 일차냉각계통 펌프를 각각 2극, 4극 및 6극 모터로 설계 시, 펌프 관성바퀴의 관성모멘트가 각각 $0.19 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 및 $1.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 를 초과하도록 설계한다면, JRTR은 피동적인 방법으로 잔열제거가 가능하다. PARR-1의 일차냉각계통 펌프를 각각 2극, 4극 및 6극 모터로 설계 시, 펌프 관성바퀴의 관성모멘트가 각각 $14.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $58.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 및 $132 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 를 초과하도록 설계한다면, PARR-1은 피동적인 방법으로 잔열제거가 가능하다. 또한 JRR-3의 일차냉각계통 펌프를 각각 2극, 4극 및 6

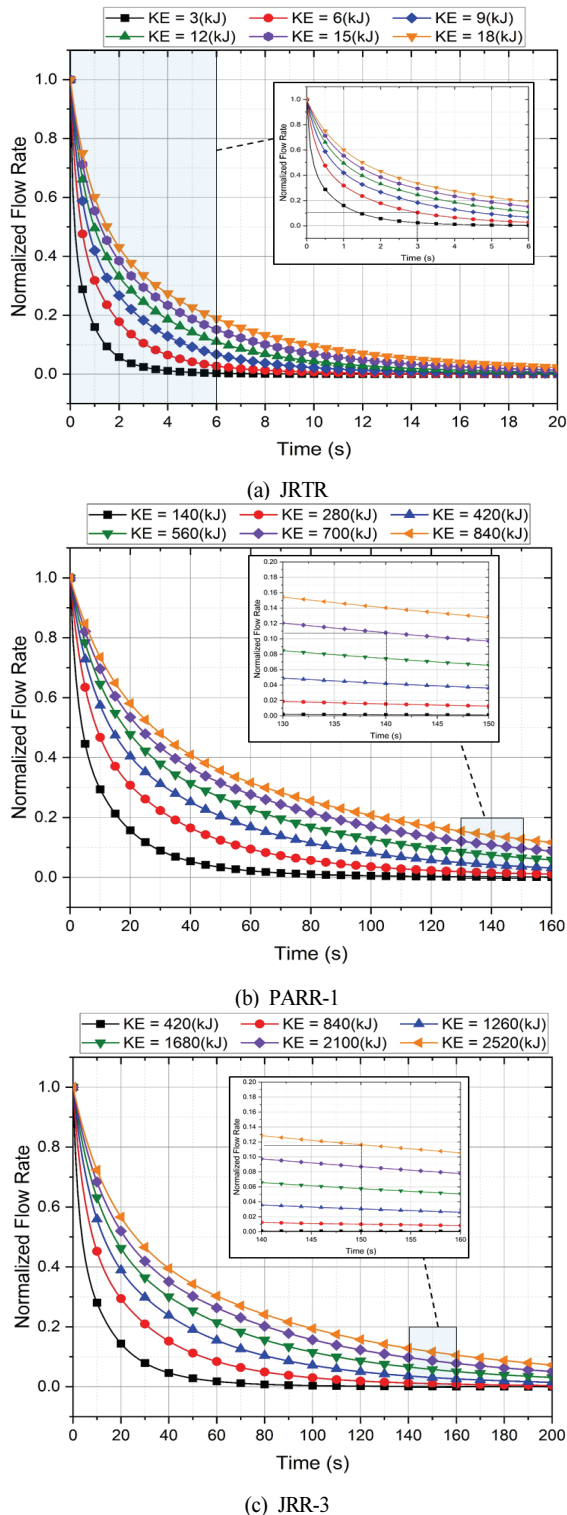


Fig. 4 Coastdown flow rates according to pump rotational kinetic energy for core downward flow research reactors

Table 6 Minimum moment of inertia of the flywheel for passive residual heat removal for core downward flow research reactors

	Req. kinetic en. (KE)	No. of motor pole (P)	RPM	Angular vel. (ω)	Min. moment of inertia (I_{min})
	kJ	Pole	r/min	rad/s	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
JRTR	6	2	2960	310	0.19
		4	1480	155	0.75
		6	985	103	1.70
PARR-1	700	2	2970	311	14.5
		4	1480	155	58.3
		6	985	103	132
JRR-3	2520	2	2961	310	52.5
		4	1481	155	210
		6	987	103	472

극 모터로 설계 시, 펌프 관성바퀴의 관성모멘트가 각각 $52.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $210 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 및 $472 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 를 초과하도록 설계한다면, JRR-3은 피동적인 방법으로 잔열제거가 가능하다.

관성바퀴의 관성모멘트의 증가는 관성서행 유량의 유지시간을 증가시키므로 피동잔열제거를 위해 중요한 요소이다. 하지만 관성바퀴의 관성모멘트 증가는 모터 토크의 증가를 초래하므로 이를 무한히 증가시킬 수는 없다. 모터 제조사의 데이터^{(12),(13)}에서는 각 모터에 따른 허용 가능한 최대 관성모멘트가 명시되어 있다. 이에 따라 각 연구로의 피동잔열제거를 위한 펌프 설계에는 펌프의 제동력과 허용 관성모멘트 둘 다를 만족할 수 있는 모터를 선정해야 한다.

Table 7은 각 연구로에서 일차냉각계통 펌프의 제동력과 피동잔열제거를 위해 요구되는 관성모멘트를 만족할 수 있는 모터 용량을 나타내었다. 예를 들어 JRTR의 일차냉각계통 펌프의 제동력을 만족할 수 있는 모터의 용량은 30 kW이며, 피동잔열제거를 위한 관성모멘트(I_{\min})를 만족할 수 있는

Table 7 Motor capacity for passive residual heat removal for core downward flow research reactors

	Req. Pump BHP	No. of motor pole	I_{\min}	Min. Motor capacity to satisfy I_{\min} ^{(12),(13)}	Motor Cap.
	kW	Pole	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	kW	kW
JRTR	22.6	2	0.19	3 [$I_{\max}=0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]	30 [$I_{\max}=1.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]
		4	0.75	4 [$I_{\max}=1.48 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]	30 [$I_{\max}=9.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]
		6	1.70	2.2 [$I_{\max}=2.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]	30 [$I_{\max}=32.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]
PARR-1	62.0	2	14.5	180 [$I_{\max}=19.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]	180
		4	58.3	90 [$I_{\max}=63 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]	90
		6	132	110 [$I_{\max}=205 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]	110
JRR-3	150	2	52.5	700 [$I_{\max}=58 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]	700
		4	210	400 [$I_{\max}=223 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]	400
		6	472	350 [$I_{\max}=539 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$]	350

* JRTR and PARR-1: low voltage motor

* JRR-3: High voltage motor

모터의 용량은 2극 모터에서 3 kW, 4극 모터에서 4 kW, 그리고 6극 모터에서 2.2 kW이다. 그러므로 JRTR은 모터 극수와 상관없이 30 kW 용량의 모터를 선정할 수 있다. 단, 2극 모터의 최대 허용 관성모멘트인 $1.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 은 4극 및 6극의 모터의 최대 허용 관성모멘트인 $9.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 및 $32.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 보다 매우 작으므로 30 kW 용량의 4극 및 6극 모터가 선호된다.

PARR-1에서 일차냉각계통 펌프의 제동력을 만족할 수 있는 모터의 용량은 75 kW이며, 피동잔열제거에 필요한 최소 관성모멘트(I_{\min})를 만족할 수 있는 모터의 최소 용량은 2극 모터에서 180 kW, 4극 모터에서 90 kW, 그리고 6극 모터에서 110 kW이다. 단, 모터의 제동력과 실제 모터 용량의 차이가 크면 전력 효율 저하로 인한 불필요한 전력 소비가 발생할 수 있으므로 PARR-1의 모터는 제동력과 허용 관성모멘트 간의 간극이 제일 작은 4극의 90 kW의 용량을 가지는 모터가 선정되어야 한다. 이때 펌프 관성바퀴의 관성모멘트는 피동잔열제거와 모터 허용 토크를 고려하여 $58.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \sim 63.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 로 설계되어야 한다.

JRR-3에서 일차냉각계통 펌프의 제동력을 만족할 수 있는 모터의 용량은 150 kW이며, 피동잔열제거에 필요한 펌프 관성바퀴의 최소 관성모멘트(I_{\min})를 만족할 수 있는 모터의 최소 용량은 2극 모터에서 700 kW, 4극 모터에서 400 kW, 그리고 6극 모터에서 350 kW이다. JRR-3 또한 모터의 제동력과 실제 모터 용량의 차이를 감소시키기 위해 6극의 350 kW의 용량을 가지는 모터가 선정되어야 한다. 이때 펌프 관성바퀴의 관성모멘트는 피동잔열제거와 모터 허용 토크를 고려하여 $472 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \sim 539 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 로 설계되어야 한다.

4. 결론

본 논문에서는 판형핵연료를 사용하는 노심 하향유동 연구로의 피동잔열제거를 위한 펌프 설계에 대한 연구를 수행하였다. 요르단의 5 MW급 연구로(JRTR), 파키스탄의 10 MW급 연구로(PARR-1), 및 일본의 20 MW급 연구로(JRR-3)를 본 논문에서 참조 노형으로 고려하였다. 노심 하향유동 연구로에서 피동잔열제거를 위해서는 펌프의 관성바퀴를 이용한 관성서행 유량으로 유동역전이 발생하더라도 핵연료 건전성에 문제가 없을 만큼 충분한 시간동안 노심 하향유동을 유지시켜야 한다. 노심 하향유동 유지시간 평가를 위해 임계열속 계산에는 Kaminaga 상관식을 적용하였으며, 노심 붕괴열 계산에는 ANSI/ANS-5,1-1971을 이용하였다.

피동잔열제거를 위해서는 원자로 정지 후에도 노심 하향유동을 충분히 유지시켜, 유동역전이 발생하더라도 핵연료 건전성에 문제가 없을 만큼 노심을 냉각시켜야 한다. 이에 따라 펌프 관성서행 유량이 최소 임계열속비를 만족하는 허용 노심 출력(Q_{allow})보다 노심 잔열(Q_{decay})이 작아질 때까지

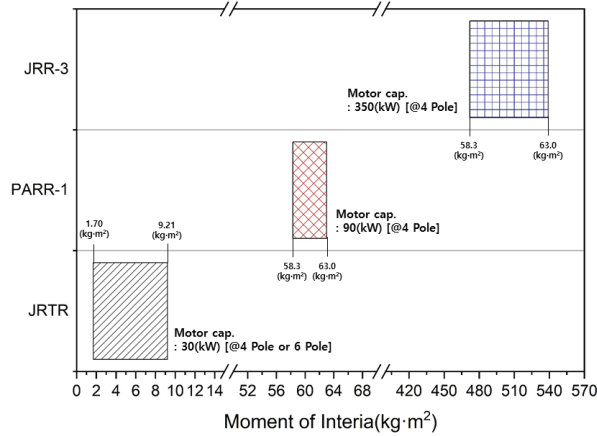


Fig. 5 Required moment of inertia and motor design for primary cooling system pump for passive residual heat removal

유지되어야 한다. JRTR는 약 3초간 노심 하향유동이 유지되면, 유동역전 시에도 핵연료 건전성이 보장된다. 하지만, PARR-1 및 JRR-3는 높은 출력으로 인해 원자로 정지 후 각각 약 140 및 150초간의 노심 하향유동이 유지되어야 원자로 안전정지가 가능하다.

관성바퀴의 관성모멘트가 증가하게 되면, 관성서행 유량의 유지시간이 증가하므로 노심 하향유동 유지에 강점을 가지지만, 관성바퀴의 관성모멘트의 증가는 모터 토크의 증가를 초래하므로 이를 무한히 증가시킬 수는 없다. 또한, 펌프의 모터 설계 시 관성바퀴의 관성모멘트뿐만 아니라 펌프의 제동력과 비교도 수행해야 한다. 최종적으로 본 논문에서 평가대상으로 고려한 연구로인 JRTR, PARR-1 및 JRR-3의 피동전열제거를 위해 일차냉각계통 펌프에 요구되는 관성모멘트 범위와 모터 설계를 도출하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 제시하였다.

본 연구는 관형핵연료를 사용하는 노심 하향유동 연구로의 피동전열제거를 위한 펌프 설계에 대한 방안을 제공하여 향후 연구로의 안전성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부에서 시행한 연구로 공학기술 연구과제의 연구개발 성과임(2710007312).

References

(1) IAEA, 2001, The Application of Research Reactor, IAEA-TECDOC-1234.

(2) Kaminaga, M., Yamamoto, K., and Sudo, Y., 1998, "Improvement of Critical Heat Flux Correlation for Research Reactors using Plate-Type Fuel", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 35, No. 12, pp. 943-951.

(3) Omar S. Al-Yahia, Lee, H., and Jo, D., 2016, "Transient Analyses of the Jordanian 5MW research reactor under LOEP accident", Annals of Nuclear Energy, Vol. 87, pp. 575-583.

(4) Ali, M. R., Khan, R., Chaudri, K. S., and Stummer, T., 2016, "Monte Carlo modeling of the Pakistan Research Reactor-1(PARR-1)", Annals of Nuclear Energy, Vol. 87, pp. 584-590.

(5) Sudi, Y., Ando, H., and Ikawa, H., and Ohnishi N., 1985, "Core Thermohydraulic Design with 20% LEU Fuel for Upgraded Research Reactor JRR-3", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 22, No. 7, pp. 551-564.

(6) ANSI/ANS 5.1, 1971, Decay Energy Release Rates following Shutdown of Uranium-Fueled Thermal Reactors, America Nuclear Society, Illinois.

(7) Mahmood, T., Bokhari, I. H., Iqbal, M., Mahmood, T., Ahmed, N., and Israr M., 2011, "Performance evaluation/analysis of Pakistan Research Reactor-1(PARR-1) current core configuration", Progress in Nuclear Energy, Vol 53, pp. 729-735.

(8) H. Yoon, K. Seo and S. Kim, 2018, "Primacy Cooling System Pump and Flywheel Design in a Research Reactor", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 6, pp. 54-63.

(9) Alatrash, Y., Kang, H., Yoon, H., Seo, K., Chi, D., and Yoon, J., 2015, "Experimental and analytical investigations of primary coolant pump coastdown phenomena for the Jordan Research and Training Reactor", Nuclear Engineering and Design, Vol 286, pp. 60-66.

(10) Khalid, S., Ahmad, I., and Zahur, A., 2019, "Highly Accurate Method for the Solution of Flow Coastdown in Pressurized Water Reactor", Nuclear Technology, Vol. 205, No. 9, pp. 1175-1184.

(11) Hirano, M., and Sudo, Y., 1986, "Analytical Study on Thermal-Hydraulic Behavior of Transient from Forced Circulation to Natural Circulation in JRR-3", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 23, No. 4, pp. 352-368.

(12) Hyundai Electric, 2021, Crown Triton - IEC Metric Data sheet & Curve (50Hz 415V)

(13) Hyosung Heavy Industries, 2014, MV IEC Electric Motors