

원자력발전소 복수기 수실 차단밸브 설치 영향 평가

이선기*

동신대학교 에너지기계설비전공 교수

Evaluation the Impact of Installing a Isolation Valve on Condensate System of Nuclear Power Plant

Sun-Ki Lee*

Professor, Dept. of Energy Mechanical System, DongShin University

요 약 원자력발전소의 순환수 계통 해수배관에 차단밸브가 설치되어 있지 않을 경우 복수기 내부 세관(튜브)에서 해수 누설 등의 이상 발생시, 정비 및 보수를 위해 최소한 순환수 펌프 1대를 정지하여야 하며, 최악의 경우에는 발전정지를 하여야 한다. 그러나 순환수 계통 해수배관에 차단밸브를 설치할 경우, 복수기 이상 발생시 병렬로 연결된 복수기의 해당 수실만 차단 가능함으로 발전소 출력 손실을 최소화 할 수 있다. 본 논문에서는 원자력발전소 순환수 계통의 복수기 수실에 차단밸브를 설치할 경우, 순환수 계통의 유량변화, 계통의 구조적 건전성, 복수기 진공도에의 영향을 평가하였다. 평가결과, 복수기 수실 차단밸브 설치에 따른 유량은 밸브 완전 개방시 0.3% 감소하며, 완전 잠금시에는 4.5% 감소하였다. 또한 유량감소에 따라 복수기 진공도는 떨어지나 계통의 건전성은 유지됨을 알았다.

키워드 : 차단밸브, 압력손실, 유량, 복수기, 원자력발전소

Abstract Because there are no isolation valves in condensate system of nuclear power plants, circulating water pump was shutdown for the condenser repair. When circulating water pump was shutdown, power plant output decreased about 45%. These output decreasing can minimize by establishing isolation valves. In this paper, evaluated effect to flow conditions change of condensate system, structural integrity of system, condenser pressure of in case of establish isolation valves to condensate system. Results of the evaluation, the flow rate due to the installation of the isolation valve decreased 0.3% when the valve was fully opened and 4.5% when fully closed. In addition, it was found that the vacuum degree of the condenser decreased with decreasing flow rate, but the integrity of the system was maintained.

Key Words : Isolation Valve, Pressure Loss, Flow Rate, Condensate System, Nuclear Power Plant

1. 서론

원자력발전소의 순환수 계통 해수배관에 차단밸브가 설치되어 있지 않을 경우 복수기 내부 세관(튜브)에서 해수 누설 등의 이상 발생시, 정비 및 보수를 위

해 최소한 순환수 펌프 1대를 정지하여야 하며, 최악의 경우에는 발전정지를 하여야 한다.

순환수 펌프를 1대 정지시킬 경우, 발전소는 해수 온도에 따라 약 45~70%의 출력 저하가 발생한다.

순환수 계통 해수배관에 차단밸브를 설치할 경우,

*Corresponding Author : Sun-Ki Lee(sunkilee@dsu.ac.kr)

복수기 이상 발생시 병렬로 연결된 복수기의 해당 수실만 차단 가능함으로 발전소 출력 손실을 최소화 할 수 있다. 본 논문에서는 원자력발전소 순환수 계통의 복수기 수실에 차단밸브를 설치할 경우, 순환수 계통의 유량변화, 계통의 구조적 건전성, 복수기 진공도에의 영향을 평가하였다.

2. 밸브 설치시 계통유량 평가

Fig. 1은 원자력발전소 순환수 계통의 개략도를 나타낸다. 순환수 펌프는 2대가 각각 유량 30.9m³/s로 운전되고 있다. 각 펌프는 3개의 배관으로 나뉘어서 각 배관당 10.3m³/s의 유량으로 흐르는데, 이 중 0.35m³/s는 2차측 기기냉각계통으로 흐르며 나머지 9.95m³/s가 복수기 수실로 유입된다.

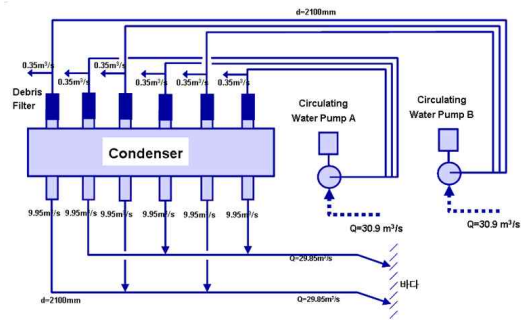


Fig. 1. Circulating water system

복수기 수실의 차단밸브로는 butterfly 밸브를 선정한다. Butterfly 밸브의 특징은 구조가 간단하고 경량이며 다른 밸브에 비해서 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 반면 단점으로는 고압을 차단하기에는 어려운 구조이나 본 순환수계통의 차압(약 3기압)에서는 사용에 무리가 없다.

복수기 수실 전후단에 차단밸브(Butterfly Valve)를 설치할 경우의 압력손실 계수는 다음 식으로 나타내어진다[1,2].

$$\xi = \left(\frac{1.4}{1 - \sin\theta/\sin\theta_0} \right)^2 \quad (1)$$

상기 식에 의해서 계산한 밸브 설치(완전 개방 상태)에 따른 계통의 압력 손실은 0.126m이다. 한편 순환수 펌프 관점에서는 차단밸브 설치로 관로 저항이 증

가하였으므로 이에 대응하여 펌프 유량은 감소하게 된다. 순환수 펌프의 성능곡선으로부터 펌프 유량을 구하면 30.8m³/s로써 정격유량 대비 0.1m³/s 감소한다.

또한 순환수계통 복수기 수실에 차단밸브 설치 및 밸브 조작으로 인하여 순환수 펌프 유량은 감소하게 되며 펌프 유량 감소와 더불어 각 계통(복수기 수실 및 2차측 기기냉각해수계통)의 유량 또한 변하게 된다. 본 논문에서는 복수기 수실 차단밸브 설치 및 조작에 따른 순환수 펌프 유량 변화 및 복수기 수실로의 유입 유량 변화, 2차측 기기냉각해수계통(SRI)으로의 유입 유량 변화를 Flowmaster Code[3]를 사용하여 평가하였다.

2.1 차단밸브 설치 및 밸브 완전 개방시

이 경우는 총 6개의 복수기 수실 전-후단에 차단밸브를 설치하고 밸브를 완전 개방(fully open)시킨 상태이다. Fig. 2에는 순환수 펌프 A, B 두 계열 중 한 개의 계열(계열 B)에 대해서 나타낸다.

순환수 펌프 유량은 30.9m³/s에서 30.8m³/s로 0.1m³/s(정격유량 대비 0.3%) 감소하며 각 복수기 수실로의 유입유량은 9.95m³/s에서 9.92m³/s로 각 수실당 0.03m³/s 감소한다. 2차측 기기냉각해수계통(SRI)의 각 line 유량(0.35m³/s)은 차단밸브 설치 전-후 변화는 없다.

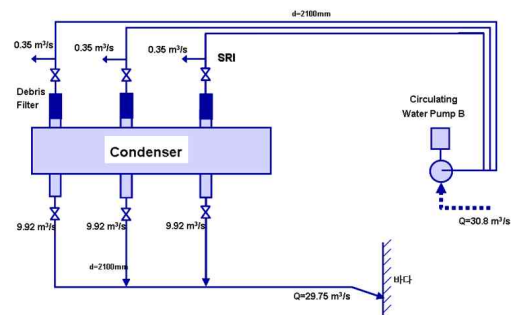


Fig. 2. Valve fully open

2.2 차단밸브 설치 및 1개 Line 유량 차단시

이 경우는 각 복수기 수실 전-후단에 차단밸브를 설치하고 3개의 수실 line중 1개 line의 유량을 차단시킨 상태이다(Fig. 3).

순환수 펌프는 유량 29.8m³/s로 운전되며 차단된 1

개 line 유량은 $0.0\text{m}^3/\text{s}$, 나머지 2개의 수실로 유입되는 유량은 $14.25\text{m}^3/\text{s}$ 이다. 2차측 기기냉각해수계통(SRI)의 각 유량은 $0.35\text{m}^3/\text{s}$ (3개 line 총 유량 $1.05\text{m}^3/\text{s}$)에서 $0.45\text{m}^3/\text{s}$ (3개 line 총 유량 $1.35\text{m}^3/\text{s}$)로 증가한다.

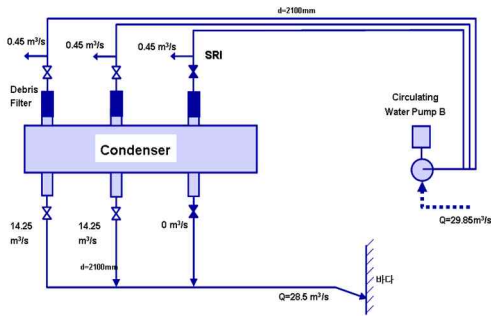


Fig. 3. 2 Line valve open 1 line closed

2.3 차단밸브 설치 및 2개 Line 유량 차단시

이 경우는 각 복수기 수실 전-후단에 차단밸브를 설치하고 3개 line중 2개 line의 유량을 차단시킨 상태이다(Fig. 4).

순환수 펌프는 유량 $28.35\text{m}^3/\text{s}$ 로 운전되며 차단된 2개 line 유량은 $0.0\text{m}^3/\text{s}$, 나머지 1개의 수실로 유입되는 유량은 $26.0\text{m}^3/\text{s}$ 이다. 2차측 기기냉각해수계통(SRI)의 각 line 유량은 $0.78\text{m}^3/\text{s}$ (3개 line 총 유량 $2.34\text{m}^3/\text{s}$)로 증가한다.

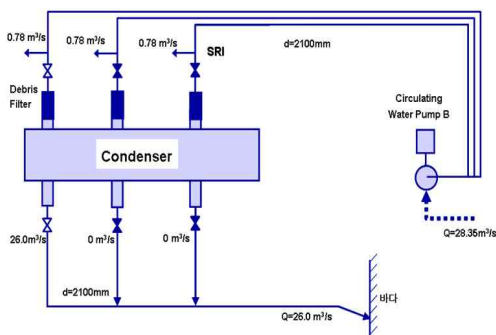


Fig. 4. 1 Line valve open 2 line closed

3. 계통 유량변화에 따른 복수기 성능

복수기는 발전소 증기 사이클에서의 열 제거원으로써 저압 터빈과 주급수 펌프 터빈 배기를 응축시키는 기능을 한다. 또한 우회증기의 응축 및 복수/급수계통

에 대한 서지현상 흡수와 더불어 탈기 기능도 겸한다. 복수기에서의 효율적인 응축을 위해서는 복수기 내부에서 높은 진공도를 유지하여야 한다.

복수기는 single pressure, single pass, 3 shell, 탈기 설비이다. 각 shell은 해당 저압 터빈 아래에 설치되어 있으며 각 shell의 전열관들은 터빈 발전기의 축을 가로지르는 방향으로 설계되어 있다.

복수기 shell에는 분리된 수실(water box)이 설치되어 있고, 각 shell 마다 두개의 전열관 다발(tube bundle)이 있는데 각 다발은 수실을 통해 분리되어 있는 순환수계통과 연결되어 있다. 복수기 shell은 터빈 빌딩 operating floor 아래에 위치하여 터빈 빌딩 기초 위에 지지되어 있다. 터빈 exhaust opening과 복수기의 steam inlet connection은 expansion joint로 연결되어 있으며 3개의 shell은 증기부에 있는 equalizing line을 통해 서로 연결된다.

3.1 복수기 성능 지배인자

복수기의 성능은 열교환 능력으로써 진공도를 높게 (배압을 낮게) 유지하는 능력에 달려 있다. 앞 장에서는 복수기 수실 전-후단에 차단밸브를 설치함으로써 복수기 수실로 유입되는 해수의 유량변화를 검토하였다. 즉, 복수기 수실의 차단밸브 설치 및 유입 해수유량을 차단하는 경우 복수기로의 유입유량이 감소하여 복수기 성능에 영향을 준다. 복수기 성능을 지배하는 인자는 다음과 같다[4-8].

(1) 순환수 입구온도

증기가 유입되는 복수기의 진공도와 순환수 입구온도는 터빈 효율과 직접 관련이 있다. 터빈설계에서는 복수기로 유입되는 순환수 온도가 정해진 상태에서 증기가 나가는 손실을 최소화 하는, 즉 터빈의 열소비를 최소화 하는 영역에서 복수기의 진공도를 설정하기 때문이다. 일반적인 복수기의 설계 진공도는 1.5inHg (5.1kPa)이다.

(2) 전열관 유속

전열관 내부에 흐르는 유체는 유속이 빠를수록 열교환이 잘 이루어지나 유속의 증가에 따른 마찰손실이 증가한다. 한편 전열관 내부의 유체 속도가 느리면 전열관 내에 미생물 서식 가능성이 증가하여 청결도가

떨어질 수 있다. 이에 따라 유속을 보통 경제적으로 선정하게 된다. 일반적인 전열관 내부의 유속은 정상운전조건에서 2.34m/s이다.

(3) 전열관 직경, 두께

복수기 용량과 사용되는 재질에 따라 전열관의 직경과 두께가 선정된다. 올진 1,2호기 복수기 전열관의 내경은 18mm이며, 두께는 0.5mm로써 ASTM B338 Gr.2(티타늄) 재질을 사용하고 있다. 전열관의 직경이 작으면 자주 막힐 수 있으며 직경이 커지면 효과적인 열전달을 위하여 보다 많은 유량이 필요하다.

(4) 전열관 청결도

전열관의 청결도는 열전달계수에 직접적인 영향을 준다. 따라서 복수기 설계에서는 가동에 따른 열전달 감소를 고려하여 여유도를 설정한다. 올진 1,2호기는 청결도 여유를 5%로 설계하여 0.95의 청결도를 사용하고 있다. 청결도를 유지하기 위하여 복수기에는 세정장비가 별도로 설계되어 있다.

(5) 입구 온도차(Initial Temperature Difference), 종단 온도차(Terminal Temperature Difference)

입구 온도차는 복수기 압력에 상응하는 증기 포화온도와 냉각수 입구온도와의 차이를 말하며, 종단 온도차는 응축증기 포화온도와 냉각수 출구온도와의 차이를 말한다. 이 값들은 LMTD(Logarithmic Mean Temperature Difference : 대수 평균 온도차)에 직접적인 영향을 주며 LMTD는 복수기 열부하에 직접적인 영향을 준다.

3.1 복수기 성능 계산방법

(1) 열전달 면적 계산

복수기 열전달에 널리 쓰이는 Heat Exchange Institute(HEI) Standard[4]에 따라 복수기 진공도와 steam load를 구한다.

$$Q = U \times A \times LMTD \quad (2)$$

여기에서, Q : 열전달율(복수기 열부하), U : 복수기의 총괄 열전달 계수, A : 복수기의 열전달 면적, $LMTD$: 응축 증기와 순환수 사이의 대수 평균온도이

다. 한편 상기 식(2)에서 $LMTD$ 는 다음 식(3)으로 계산한다.

$$LMTD = \frac{(T_{SAT} - T_1) - (T_{SAT} - T_2)}{\ln\left(\frac{T_{SAT} - T_1}{T_{SAT} - T_2}\right)} = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_{SAT} - T_1}{T_{SAT} - T_2}\right)} \quad (3)$$

여기에서, T_{SAT} : 복수기 내 증기의 포화온도, T_1 : 순환수 입구온도, T_2 : 순환수 출구온도, $T_2 - T_1$: 순환수 온도 상승, $T_{SAT} - T_2$: 종단온도차, $T_{SAT} - T_1$: 입구온도차이다.

사용하지 않은 청결한 복수기의 총괄 열전달 계수(U)와 열전달 면적(A)는 특정 운전조건에 대한 복수기 설계로 결정된다. 복수기는 정상 사용 조건에서 필요한 열을 전달하고 원하는 진공도를 확보하기 위해 참고문헌[1]의 기준에 따라 설계된다. 그러나 총괄 열전달 계수(U)와 열전달 면적(A) 모두 시간이 경과함에 따라 변할 수 있다.

순환수가 흡수하는 열은 다음 식(4)로 계산된다.

$$Q = w_w C_p (T_2 - T_1) \quad (4)$$

여기에서, Q : 열전달율(복수기 열부하), w_w : 순환수의 증량 유량, C_p : 순환수의 정압비열, $T_2 - T_1$: 앞에서 언급한 순환수 온도상승이다. 복수기에서 발생하는 모든 열은 순환수로 전달되는 것으로 가정하면 식(2), 식(4)로부터 다음 식(5)를 얻는다.

$$UA \frac{(T_2 - T_1)}{\ln\left(\frac{T_{SAT} - T_1}{T_{SAT} - T_2}\right)} = w_w C_p (T_2 - T_1) \quad (5)$$

(2) 진공도 계산

식(5)로부터 T_{SAT} 을 구하면 그 값에 대응하는 진공도를 증기표(steam table)로부터 구할 수 있다.

3.2 복수기 성능 계산 결과

Table 1에 복수기 수실 차단밸브 설치 및 차단밸브 상태에 따른 복수기 성능 평가결과를 나타낸다. Table에서 표시한 각 case 별로 복수기 성능평가 결과에 대해서 검토한다.

(1) Case_0

이 경우는 복수기 설계 상태이다. 각 수실 전-후단에 차단밸브 미설치 상태로써 복수기 유입 steam 온도 32.8℃, 복수기 각 수실 순환수 유입유량 9.95m³/s(복수기 총 유입유량 59.7m³/s), 온도 21.7℃이며 열부하(heat load) 1785.83MW일 때 복수기 진공도는 4.98kPa(설계기준 5.1kPa)을 유지한다.

(2) Case_1

이 경우는 복수기 각 수실 전-후단에 차단밸브를 설치하여 full open 시킨 상태로써 복수기 각 수실 순환수 유입유량 9.92m³/s, 온도 21.7℃이며 heat load 1785.83MW일 때 복수기 진공도는 4.99kPa을 나타낸다. 즉, 복수기 수실 전-후단에 차단밸브를 설치하였을 경우 복수기 각 수실 순환수 유입유량은 9.95m³/s→9.92m³/s로 감소하나(총 유입유량 59.7m³/s→59.5m³/s) 복수기 진공도는 거의 영향을 받지 않으므로 heat load에서도 설계값(1785.83MW)과의 차이는 나타나지 않는다.

(3) Case_2

이 경우는 복수기 각 수실 전-후단에 차단밸브를 설치하여 1개 line은 차단시키고 나머지 2개 line은 full open 시킨 상태로써 2개 line으로 유입하는 순환수 유량은 각각 14.25m³/s이다. 복수기로 유입하는 순환수의 총 유량은 58.25m³/s이며 복수기 진공도를 만족시키기 위해서는 heat load의 감소가 발생한다. Table 1에는 heat load 설계값인 1785.83MW를 기준으로 -3%, -5%, -10% heat load 감소시의 복수기 진공도가 나타내어져 있다. 복수기 설계 진공도 5.1kPa을 만족시키기 위해서는 heat load가 약 4% 감소한다.

(4) Case_3

이 경우는 복수기 각 수실 전-후단에 차단밸브를 설치하여 2개 line은 차단시키고 나머지 1개 line은 full open 시킨 상태로써 1개 line으로 유입하는 순환수 유량은 26.0m³/s이다. 이때 복수기 tube에서의 순환수 유속은 6.67m/s로써 EPRI 기준[9] 3.66m/s(12.0ft/s)를 초과하여 복수기 tube의 건전성을 보장할 수 없으므로 검토 대상에서 제외한다. 또한 향후 복수기 수실 전-후단에 차단밸브를 설치하였을 경우에도 순환수 펌프 1대당 3개 line중 2개 line 동시 차단 운전은 제한되어야 한다.

(5) Case_4

순환수계통에는 2대의 순환수 펌프가 병렬로 연결되어 운전되고 있다. 각 순환수 펌프는 복수기 3개의 수실에 병렬로 연결되어 총 6개의 수실로 해수를 공급한다. 본 경우는 각 순환수 펌프에서 복수기 수실로 연결되는 3개의 line 중 각각 1개의 line을 차단(순환수 펌프 1대당 1개의 line 차단)시킨 상태로써 각 line에 14.25m³/s의 유량으로 복수기 수실로 유입된다(복수기 유입 총 유량 57.0m³/s).

Table 1. Results of condenser performance

Thermal Section	Case_0	Case_1	Case_2			Case_3	Case_4	
			[-3%]	[-5%]	[-10%]		[-10%]	[-15%]
Heat Load(Q) [MW]	1785	1785	1732	1696	1607	1535	1607	1517
Total Abs Press [kPa]	4.98	4.99	5.13	5.06	4.89	5.65	5.19	5.01
Steam Temp [°C]	32.8	32.9	33.3	33.1	32.5	35.1	33.6	32.9
Temp Rise [°C]	7.3	7.3	7.3	7.1	6.7	13.4	6.9	6.5
Cooling Water Temp [°C]	21.7	21.7	21.7			21.7	21.7	
CW Flow Rate [m ³ /s]	59.7	59.5	58.3			55.8	57.0	
CW Velocity Inside Tubes(Max) [m/s]	2.5	2.5	3.7			6.7	3.7	
HEI "U" uncorrected [W/m ² -K]	4368	4361	4676			4327	5076	
No. of Tubes [ea]	91926	91926	76605			61284	61284	
Surface Area [m ²]	65924	65924	54937			43949	43949	

Table 1에서는 heat load 설계값 1785.83MW을 기준으로 -10%, -15% heat load 감소시의 복수기 진공도가 나타내어져 있다. 복수기 설계 진공도 5.1kPa을 만족시키기 위해서는 heat load가 약12% 감소한다.

한편 펌프 성능 및 내구성에 관한 몇몇의 연구가 수행되고 있으나[10, 11, 12] 정상적인 운전 환경에서의 펌프 내구성은 장기간의 운전에도 큰 영향이 없음이 알려져 있으므로[13] 본 논문에서는 다루지 않았다.

4. 결론

원자력발전소 순환수계통 해수배관에 차단 밸브가 설치되어 있지 않은 경우, 복수기 내부 튜브에서 해수 누설 등의 이상 발생시, 정비/보수를 위해 최소한 순환수 펌프 1대 정지, 최악의 경우에는 발전정지를 하여야 한다. 발전소는 순환수 펌프 1대 정지시 해수온도에 따라 약 30~45%의 출력이 감소한다. 순환수계통 해수배관에 차단밸브를 설치할 경우 복수기 이상 발생시 병렬로 연결된 복수기의 해당 수실만 차단 가능함으로 발전소 출력 손실을 최소화할 수 있다. 복수기 수실별 차단밸브를 설치하기 위해서는 밸브설치에 따른 계통 영향평가가 필수적이다.

본 논문에서는 원자력발전소 순환수계통 복수기 수실에 차단밸브 설치의 타당성을 검토하기 위해 밸브 설치에 따른 계통/기기의 성능변화를 평가하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 차단밸브 설치시 순환수계통 유량은 0.3% 감소한다(밸브 완전 개방 조건).
- (2) 밸브 설치로 인한 복수기 진공도 및 열부하(heat load)의 감소는 거의 발생하지 않는다(밸브 완전 개방 조건).
- (3) 복수기 수실 1개 line 차단시 복수기 총 유입유량은 $59.5\text{m}^3/\text{s}$ (밸브 완전 개방 조건) \rightarrow $58.25\text{m}^3/\text{s}$ 로 감소하며 이때 복수기 진공도를 유지하기 위해서는 설계조건 대비 열부하(heat load)는 약 4% 감소한다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 것임(No. 20171520000250).

REFERENCES

- [1] Wieghardt, K. E. G., *Aeronaut. Q.*(1953), pp186.
<https://doi.org/10.1017/S0001925900000871>
- [2] LE. Idelechik and Erwin Fried, *Flow Resistance*, Taylor & Francis, 1989
<https://doi.org/10.1201/9780203755754>
- [3] FLOWMASTER Code. Ver 3.0, 2006.
<http://www.flowsystem.co.kr>
- [4] *Standards for Steam Surface Condenser*, Heat Exchange Institute, Vol. 9.
<http://www.techstreet.com>
- [5] ASME B31.1, 1992 Edition, *Power Piping*.
<https://doi.org/10.1115/1.861981>
- [6] ANSYS 10.0 *Reference Users Manual* .
<http://www.ansys.com>
- [7] ASME *Boiler and Pressure Vessel Code*, Section II, Part D, 1998 Edition, 1998 Addenda.
<http://www.asme.org/asma-bpvc-brochure-webview.pdf>
- [8] ASME *Boiler and Pressure Vessel Code*, Section VIII, Div 1, 1998 Edition, 1998 Addenda.
<http://www.asme.org/asma-bpvc-brochure-webview.pdf>
- [9] EPRI *CS 3844*, Condenser Procurement Guidelines, 1985. <http://www.epri.com>
- [10] D. H. Lee. (2008) Degradation Characteristics of Pumps in Nuclear Power Plants, *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Spring Conference*, 593-598.
- [11] Y. K. Chang & W. S. Song, (2012) A Study on the Pump Performance Analysis by Modifying the Impeller for a Seawater Pump using CFD, *Trans. of the KPVP*, 8(3), 23-27.
DOI : 10.20466/KPVP.2012.8.3.023
- [12] M. W. Heo & J. H. Min, (2017) Consideration of Pressure-Rise and Water Hammer for Pipe System in Rwlation to Start-Up and Sudden Stop of the Pump,

Trans. of the KPVP, 13(1), 69-74

DOI : 10.20466/KPVP.2017.13.1.069

- [13] S. K. Lee. (2020) Evaluation of Performance according to Long Term Operation of Centrifugal Pump, *Journal of Power System Engineering*, 24(2), 23-29.

DOI : 10.9726/KSPSE.2020.24.2.023

이선기(Sun-Ki Lee)

[정회원]



- 1988년 3월 : 일본 쓰쿠바대학 대학원 공학석사
- 1991년 3월 : 일본 쓰쿠바대학 대학원 공학박사
- 1991년 3월~2017년 2월 : 한전 전력연구원, 한수원 중앙연구원
- 2017년 3월~현재 : 동신대학교 에너지기계설비전공 교수

- 관심분야 : 유체공학, 유체기계
- E-Mail : sunkilee@dsu.ac.kr