2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

다구치 방법을 이용한 정지냉각열교환기의 설계 인자에 관한 연구

Parametric Study on Design Factors for the SCS Heat Exchanger Using the Taguchi Method

김성훈, 최병선, 윤주현, 장문희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

다구치 방법을 채택하여 정지냉각열교환기의 설계인자 즉 제어인자가 정지냉각계통이 운전시작후 정지냉각에 이르는 시간에 미치는 영향을 고려하였다. 제어인자의 수준은 효율-NTU 방법을 이용하여 얻을 수 있었다. KDESCENT 프로그램을 통한 18번의 모의를 통해서 영향이 큰 제어 인자는 통 쪽으로 흐르는 기기냉각수와 관 쪽으로 흐르는 원자로 냉각재의 유량으로 밝혀졌다. 다구치 방법을 통해서 제어인자 중 설계나 계통의 운전에서 주의하여 조절되어야 할 인자를 알아낼 수 있었다. 이 방법은 계통의 설계에서 제어인자가 계통의 성능에 끼치는 영향력을 평가하는 효율적인 수단을 제공한다.

Abstract

Using Taguchi method, design factors, i.e. control factors of the shutdown cooling heat exchanger were investigated to qualify the effect for the time elapsed after the beginning of the system operation. Levels of the control factors were selected from calculations based on the effectiveness-NTU method. From 18 simulations with the KDESCENT program, it was found that the performance of the system is greatly influenced by inlet temperature from the component cooling water at the shell side and mass flow rate of the reactor coolant at the tube side. The Taguchi method makes it possible to select the control factor that has to be controlled and designed with caution. The method gives the effective way to estimate the influence of each control factor to the system performance.

1. 서론

SMART-P의 정지냉각계통은 원자로냉각재를 고온정지상태에서 재장전온도까지 떨어뜨리는 역할을 한다. 정지냉각계통에서 중요한 역할을 하는 기기는 정지냉각열교환기이다. 정지냉각 열교환기는 정지냉각운전 중 원자로냉각재를 냉각시키기 위한 목적으로 사용되며 다관원통형 열교환기가 사용된다. 정지냉각 열교환기의 관 쪽으로는 원자로냉각재계통에서 흘러나온 원자로냉각재가 흐르고, 기기냉각계통에서 공급되는 냉각수가 통 쪽으로 흐른다.

계통의 목적에 맞도록 정지냉각 열교환기의 설계를 하기 위해서 선정해야 할 여러 가지 설계변수들이 존재한다. 각 설계변수들에 대한 대략적인 거동은 유추할 수 있지만, 설계변수의 변화가 열교환기의 성능이나 계통전체에 미치는 영향의 크기를 알기는 어렵다. 각각의 변수들에 대해서 고려할 수 있는 모든 상황에 대해서 실험을 하여 각 변수의 영향력을 알아낼 수 있겠으나, 비용과 시간이 많이 투자되어야 하며, 경우에 따라 실험을 수행하기 불가능한 경우도 있다. 계통이 비선형적이고, 변수가 많을 때, 이를 효율적으로 분석하고 실험할 수 있는 방법이 있다면 계통을 이해하고 분석하며, 설계를 할 때 도움을 받을 수 있다. 이 연구에서는 다구치 방법을 선택하였다.

다구치 방법[1,2)]은 변수가 많고, 비선형적인 시스템을 비교적 적은 수의 실험을 통해서 분석할 수 있는 직교행렬이라는 수학적인 방법을 이용한다. 이 방법은 전기, 기계 등 여러 산업분야의 제조공정에 도입되어 사용되고 있다. 또, 비등경수로와 다른 여러 분야에서 사용되는 이상유동 자연순환루프(Two-Phase Natural Circulation Loops)과 같은 복잡한 시스템에 대한 연구에서도 사용되었다[3)].

다구치 방법을 통한 설계인자의 대략적인 수준을 알기 위해서 열교환기를 설계하는데 사용되는 방법중의 하나인 효율-NTU 방법을 사용하였다. 열교환기의 설계 시에 LMTD (Log-Mean Temperature Difference)를 사용하면 반복수행을 통해서 해를 구하는 어려움이 따르지만, 이 방법을 통하면 반복 수행 없이 설계를 진행할 수 있는 장점이 있다.

각 설계 인자들이 계통의 성능에 끼치는 영향을 따지기 위해서 비교가 되도록 선정된 값은 최종 목표온도인 50℃에 도달하는데 걸리는 시간이다. 정지냉각 열교환기의 성능은 재장전온도에서 잔열과 현열을 제거하는 것도 있지만 재장전온도까지 원자로냉각재의 온도를 떨어뜨리는 능력으로 판단이 가능하다. 추가적으로 저온정지의 온도인 90℃에 도달하는 시간도 변수로 선정하였다. 운전에 걸리는 시간을 예측하기 위해서 정지냉각운전을 모의하는 KDESCENT 프로그램을 사용하였다. 다구치 방법에서 제시하는 직교행렬을 이용하여 프로그램의 입력조건으로 삼았다. 프로그램의 해석결과로 나온 정지냉각에 걸리는 시간을 기초로 하여 각 설계인자들이 열교환기의 성능에 끼치는 영향을 판단해 보았다.

본 연구에서는 다구치 방법을 통하여 정지냉각 열교환기의 제어인자를 분석하고, 더 나아가 설계 시에 관심을 두어야 할 제어인자를 찾아내보고자 한다. 2장에서는 효율-NTU

방법을 통해서 제어인자의 수준을 도출하고, 3장에서는 다구치방법을 통해서 제어인자들이 정지냉각계통의 운전에 끼치는 영향에 대한 분석을 할 것이다.

2. 효율-NTU 방법

열교환기의 입구조건과 전열면적을 대략적으로 선정하기 위해서 효율-NTU 방법을 사용하였다. 선정된 경우들에 대한 자세한 검토는 정지냉각계통의 열교환기의 성능해석을 위한 프로그램인 KDESCENT를 이용하여 수행한다.

2.1. 계산 조건

열교환기에서 제거시켜야 할 열은 붕괴열(decay heat), 현열(sensible heat)이 있다. 붕괴곡선에 의하면 100,000초(1.2일)이후에는 0.4%이며, 1,000,000초(11.6일) 이후에는 0.185%이다. 이를 토대로 하여 fraction이 0.25%라고 가정하였다.

$$Q_{decay} = 65MWt \times 0.25\% = 0.16 \times 10^{6}\,Wt \tag{1}$$

현열을 계산하기 위해서 1시간에 1℃만큼 떨어진다고 가정하였다. 원자로냉각재의 양은 10톤으로 가정하였다.

$$\begin{aligned} Q_{sensible} &= \frac{d}{dt}\left(mCT\right) = mC\frac{dT}{dt} \\ &= 10 \times 10^{3}kg \times 4200J/kg \cdot {}^{\circ}C \times 1^{\circ}C/hr \times \frac{1hr}{3600\sec} = 0.012 \times 10^{6}Wt \end{aligned} \tag{2}$$

현열의 양은 붕괴열의 7%정도의 작은 양을 갖는다.

열교환기의 전열면적을 정하기 위해 기준이 되는 설계시점의 조건을 아래와 같이 가정하였다. 정지냉각운전이 시작한지 5일이 지난 후에는 원자로냉각재가 재장전온도(50℃)로 유지되는 상태이며, 열교환기는 붕괴열만을 제거하고 있다고 생각할 수 있다. 이 시점에서 온도의 변화는 식 (2)의 계산에서 가정하였던 것에 비해서 작아지므로 현열은 식 (2)의 계산 결과에 비해서 작은 크기를 갖는다. 열교환기에서 감소시켜야 할 열은 붕괴열만을 고려하고 10%의 여유도를 삽입하여 대략 0.18MWt라고 정할 수 있다. 열교환기의 열제거율은 온도차에 비례하므로 냉각의 초기에서는 더 많은 열을 제거할 것으로 예상된다.

그림 1은 정지냉각 열교환기의 개략도이다. 원자로냉각재는 관 쪽으로 흐르며 기기냉각계통(CCW)에서 공급되는 냉각수는 통 쪽으로 흐른다. 열교환기의 입구조건으로 다음과

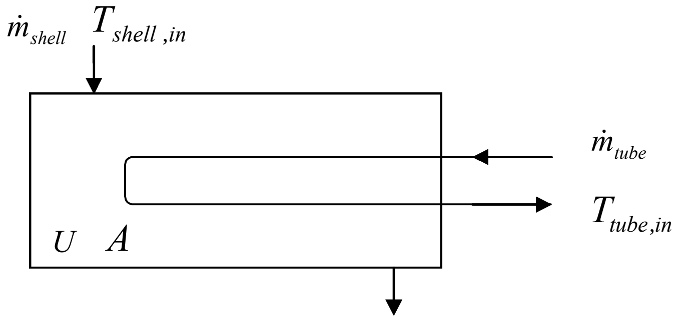


Figure 1. 정지냉각 열교환기의 개략도

같이 가정하였다.

$$T_{shell,in} = T_{CCW,i} = 35^{\circ}C \tag{3}$$

$$T_{tube,in} = T_{RCS} = 50^{\circ}C \tag{4}$$

2.2. 효율-NTU를 이용한 계산

작동유체의 입 출구 온도가 알려져 있는 경우에는 LMTD(Log Mean Temperature Difference)를 이용해서 열교환기를 해석할 수 있다. 그러나, 입구 측의 온도만이 알려져 있는 경우에는 LMTD를 이용할 때 반복계산이 필요하게 된다. 본 계산에서도 입구 측의 온도만이 알려져 있으므로, 다른 해석방법인 효율-NTU(Number of transfer units)방법을 채택하여 열교환기를 해석하였다.

작동유체는 관 쪽과 통 쪽이 모두 물이므로 비열이 같다고 가정하였다. 작동유체의 밀도와 비열은 1000kg/m^{3}과 4200J/kg℃로 가정하였다.

$$Q = e\, C_{\min}\left(T_{h,i} - T_{c,i}\right) \approx e\, \dot{m}_{\min} C\left(T_{tube,i} - T_{CCW,i}\right) \tag{5}$$

$$Q = e\, \dot{m}_{\min} \times 4200 \times (50 - 35) = 0.063 \times 10^{6} \times e\, \dot{m}_{\min} \tag{6}$$

$$e\, \dot{m}_{\min} = \frac{0.18 \times 10^{6}}{0.063 \times 10^{6}} = 2.86 \tag{7}$$

위 식에서 $\dot{m}_{\min}$은 $\dot{m}_{tube}$와 $\dot{m}_{CCW}$ 중 작은 유량이다.

다관원통형 열교환기에서 한 개의 통에 2개의 관이 지나가는 형태로 이루어진 열교환기에 대한 효율(effectiveness)에 대한 관계식은 다음과 같다[4)].

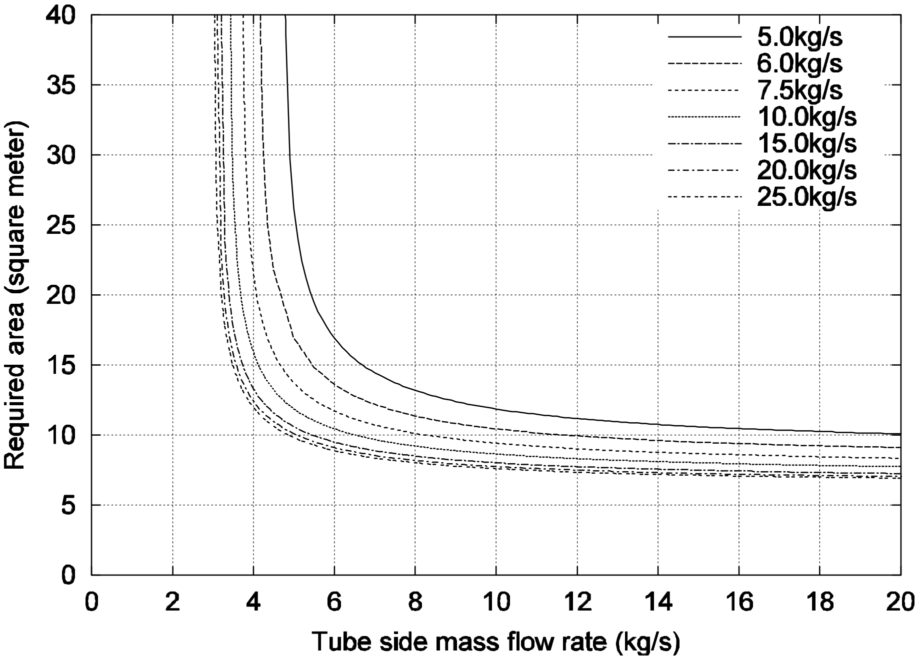


Figure 2. 0.18MWt의 열제거율을 갖는 열교환기의 관 쪽 유량에 대해 요구되는 면적

$$e = 2\left(1 + C_r + \sqrt{1 + C_r^2} \times \frac{1 + \exp\left(-NTU\sqrt{1 + C_r^2}\right)}{1 - \exp\left(-NTU\sqrt{1 + C_r^2}\right)}\right)^{-1} \tag{8}$$

열교환기의 총괄 열전달 계수(overall heat transfer coefficients)는 약 2000W/㎡·℃를 갖는다고 가정하였다. KDESCENT의 소스 프로그램에 입력되어 있는 값에 의하면 상용원자로에 사용되는 정지냉각 열교환기의 총괄 열전달 계수는 1500~2200W/㎡·℃의 크기를 갖는다. 식 (8)에서 C_r과 NTU는 다음과 같다.

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \tag{9}$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \approx \frac{UA}{\dot{m}_{\min} C_p} = \frac{2.0 \times 10^3 A}{4200 \dot{m}_{\min}} \approx 0.476 \frac{A}{\dot{m}_{\min}} \tag{10}$$

식 (9), (10)을 이용하면 지정된 $\dot{m}_{tube}$, $\dot{m}_{CCW}$ 일 때 앞 절에서 계산한 열량을 제거하기 위

해 필요한 전열면적을 얻을 수 있다. CCW에서부터 공급되는 유량을 5, 6, 7.5, 10, 15, 20 그리고 25kg/s에 대해서 관 측의 유량을 변화시켜 가면서 필요한 전열면적을 얻었다.
그림 2에서 보이는 것처럼 CCW으로부터의 유량이 증가할수록 필요한 면적은 감소하는 경향을 보인다. 그러나, CCW으로부터의 유량의 증가에 대한 면적의 감소율은 유량이 증가할수록 작아지며, 15kg/s 이상의 유량이 CCW에서부터 공급되면 필요한 전열면적은 거의 같다고 볼 수 있다. 관측의 유량이 특정유량 이하로 감소하면 필요한 전열면적이 급격하게 늘어난다.
계통에서의 배관이 50mm(약 2inch)의 내경을 가지고 있으므로 침식을 막기 위해서 3~4m/s이하의 유속으로 제한되어야 한다. 평균유속의 제한치가 4m/s이면 작동유체가 물일 경우에 내경이 50mm인 관의 유량은 약 7.8kg/s이하로 제한 받게 된다.
이 절에서 계산한 결과와 침식에 의거한 제한조건을 바탕으로 하여 KDESCENT의 입력으로 사용될 유량의 범위와 면적을 결정하였다. 계산에서 가정된 낮은 온도차로 말미암아 열전달에 필요한 전열면적이 과도하게 예측되었을 가능성도 함께 고려하였다.

3. 다구치 방법을 통한 제어인자의 영향 비교

앞장에서는 운전의 최종단계에서도 열 제거가 가능한 열교환기에 대한 전열면적을 예측하였다. 정지냉각운전에서 중요한 다른 요인으로는 원자로냉각재의 온도가 정지냉각개시 온도부터 최종 온도까지 떨어지는데 걸리는 시간이다. 이것을 그림 2에 나타난 결과를 기준으로 하여 정지냉각계통의 성능에 영향을 미칠 제어인자의 수준을 선택하였다. 선정된 제어인자를 KDESCENT의 입력조건으로 하여 모의를 수행하였다. 모의 결과를 이용하면 제어인자들의 각 수준이 계통성능에 주는 영향을 알 수 있다.

3.1. KDESCENT를 이용한 온도 천이 계산

앞장에서 얻은 결과는 재장전 온도에서 안정 상태로 머물러 있는 동안 붕괴열을 제거하도록 가정이 되었다. 정지냉각 운전 초기에는 높은 온도 차이로 말미암아 열전달양이 클 것으로 예상된다. 정지냉각 운전 개시 온도에서 재장전 온도까지 떨어지는 동안 원자로냉각재의 온도 변화와 소요시간을 예측하기 위해서 정지냉각 운전 과정을 해석하는 프로그램인 KDESCENT[5)]를 사용하였다.
계산을 하는 동안 정지냉각 열교환기를 통해 제거되는 열은 붕괴곡선에 의거하여 계산되는 붕괴열과 냉각재의 현열이다. 그 외에 발생할 수 있는 구조재의 현열과 펌프에서 발생하는 열은 모의에서 고려하지 않았다. 정지냉각의 초기에는 관 쪽과 통 쪽을 흐르는 유동의 높은 온도 차이로 인해 제한치보다 큰 냉각률을 갖게 된다. 이 프로그램에서는 정지냉각 열교환기를 우회하는 유량을 계산하여 지정된 냉각률을 맞추게 된다. 정지냉각 계통은 두 열로 설계되어있으나, 각 열의 정지냉각 열교환기는 100% 용량으로 설계된다.

이 연구에서 KDESCENT의 입력조건으로 한 열의 정지냉각계통만이 사용되는 것으로 가정하였다.

3.2. 시험적인 접근

여러 개의 매개변수가 특정한 시스템에 주는 영향을 검사하기 위해서는 여러 번의 시험이 필요하다. 두세 개의 작은 수의 매개변수가 있을 때는 가능한 모든 경우에 대해서 시험을 실시하여 매개변수의 영향을 검사할 수 있다. 그러나, 매개변수의 개수가 증가하면 모든 경우에 대해서 시험하는 것은 비용과 시간 등의 문제로 인해 불가능해진다. 이를 극복하기 위해서 실험의 설계에 대한 연구가 진행되었다. 이 연구중의 한 결과인 다구치 방법을 이용하여 정지냉각 열교환기의 설계변수들이 정지냉각계통의 성능에 끼치는 영향을 알아보기로 한다.

정지냉각 열교환기의 성능에 영향을 미칠 수 있는 인자들은 표 1에 정리되어있다. 관 쪽으로 들어가는 유량($\dot{m}_{tube}$)과 원자로냉각재계통에 정지냉각계통이 물렸을 때 원자로냉각재의 온도인 관 쪽의 입구온도($T_{tube,in}$), 통 쪽의 유량($\dot{m}_{shell}$)과 입구온도($T_{shell,in}$), 총괄열전달계수(U)와 전열면적(A)이 성능에 영향을 미치는 인자이다. 그리고, 정지냉각운전 중에 허용되는 원자로냉각재계통의 냉각률도 성능에 영향을 미치는 인자로 포함하였다.

각 설계 인자의 수준은 다음과 같이 결정되었다. 상용로에서 정지냉각의 최대 냉각률은 75°F/hr (41.7℃/hr) 이며, SMART-P의 경우에는 100℃/hr를 허용한다. 관 쪽의 입구온도는 한국형 표준원전의 정지냉각계통이 운전을 시작하는 온도인 180℃와 SMART-P에서의 정지냉각운전 개시온도인 200℃, 그리고, 220℃를 선정하여 영향을 살펴보았다. 관 쪽의 유량과 통 쪽의 유량은 그림 2을 참고로 하여 선정하였다. 통 쪽으로 흐르게 되는 기기냉각수계통의 온도는 30, 35, 40℃일 때 성능에 대한 영향을 살펴보았다. 열교환기의 설계인자 중에 중요한 총괄 열전달계수와 전열면적에 대해서도 세 가지의 크기를 정하여 성능에 끼치는 영향을 살펴보았다. 각 인자들의 수준도 표 1에 정리가 되어있다.

두 개의 수준을 갖는 인자가 한 개이고, 세 개의 수준을 갖는 인자는 6개이다. 각 인자들이 정지냉각계통의 운전에 끼치는 영향을 살펴보기 위해서 실행한 모의에 사용하기 위해서 L18 직교행렬(orthogonal array)이 사용되었다. L18 직교행렬은 두 개의 수준을 갖는 한 개의 인자와 세 개의 수준을 갖는 7개의 인자에 대한 직교행렬로서, 18번의 수행으로 각 인자의 영향을 검토할 수 있다. 만약에 동일한 실험조건에 대해서 모든 가능성에 대한 실험을 모두 수행한다면 약 4000번의 실험이 수행되어야 한다. 표 2는 각 모의조건에 대해서 정리를 하였다.

직교행렬은 완전 가능한 조합 중 일부만을 가지고 실험계획을 수립하는 방법이다. 한 제어 인자의 각 수준이 나머지 제어 인자의 수준을 같은 비율로 경험하도록 직교행렬이 이루어져 있다. 즉 각 수준이 경험하는 나머지 제어 인자의 수준에 따른 영향은 고르게 분

배되어있다. 이런 이유로 인해 각 수준이 계통에 끼치는 평균적인 영향을 검사할 수 있다.

3.3. 결과 분석

표 2의 각 모의 조건을 입력조건으로 하여 KDESCENT를 수행하였다. 표 2의 마지막 두 열은 모의의 결과로서, 원자로 냉각재의 온도가 정지냉각운전에 들어갔을 때부터 저온정지에 이르는 온도인 90℃에 도달하는 시간과 운전의 최종 목표인 50℃에 도달하는 시간을 보여준다.

90℃에 도달하는 시간은 1.5시간부터 8.0시간의 분포를 가지고 있으며, 최종온도인 50℃에 도달하는 시간은 18.6시간에서부터 552.1시간으로 나타나고 있다. 이를 기초로 해서 각 인자가 성능에 미치는 영향을 검토하기로 한다.

그림 3은 각 인자들이 90℃에 도달할 때 걸리는 시간의 평균값을 보여주고 있다. 관 쪽이나 통 쪽 모두 온도는 낮고 유량은 많을수록 90℃에 도달하는 시간이 짧아진다. 또, 냉각률은 크고 전열면적은 클수록 도달시간이 짧아진다. 총괄열전달계수는 거의 변화가 없는 것으로 보이고 있다.

가장 큰 영향을 미치는 인자는 관 쪽으로 흐르는 유량 즉 정지냉각계통으로 흐르는 원자로 냉각재의 유량이다. 그 이후에는 전열면적과 통 쪽으로 흐르는 유체의 온도가 중요하다. 냉각률이나, 정지냉각운전에 들어갈 때 원자로냉각재의 온도, 총괄 열전달 계수 등은 상대적으로 작은 영향을 보인다.

원자로냉각재에서 정지냉각계통으로 흐르는 유량이 작을 경우에는 90℃에 이르기 전에

Factors		Level		
		1	2	3
A	Cool down rate(℃/hr)	41.7	100	
B	Tube side temperature (℃)	180	200	220
C	Tube side mass flow rate (kg/s)	2.5	5.0	7.5
D	Shell side temperature (℃)	30	35	40
E	Shell side mass flow rate (kg/s)	5.0	7.5	10.0
F	Overall heat transfer coefficient (W/m^2℃)	1500	1750	2000
G	Heat transfer area (m^2)	10	15	20

Table 1. Control factors and their levels

열교환기를 우회하는 유량이 없이 전 유량이 열교환기를 통과한다. 그 결과로 긴 90℃ 도달시간을 갖는다. 총괄열전달계수는 수준에 따른 시간변화가 거의 없게 예측된다.

각 인자들이 최종 목표인 50℃에 도달할 때 걸리는 시간의 평균값이 그림 4에서 비교되고 있다. 관 쪽이나 통 쪽 모두 온도는 낮고 유량은 많을수록 50℃에 도달하는 시간이 짧아진다. 냉각률은 작고, 전열면적과 총괄열전달계수는 클수록 도달시간이 짧아진다.

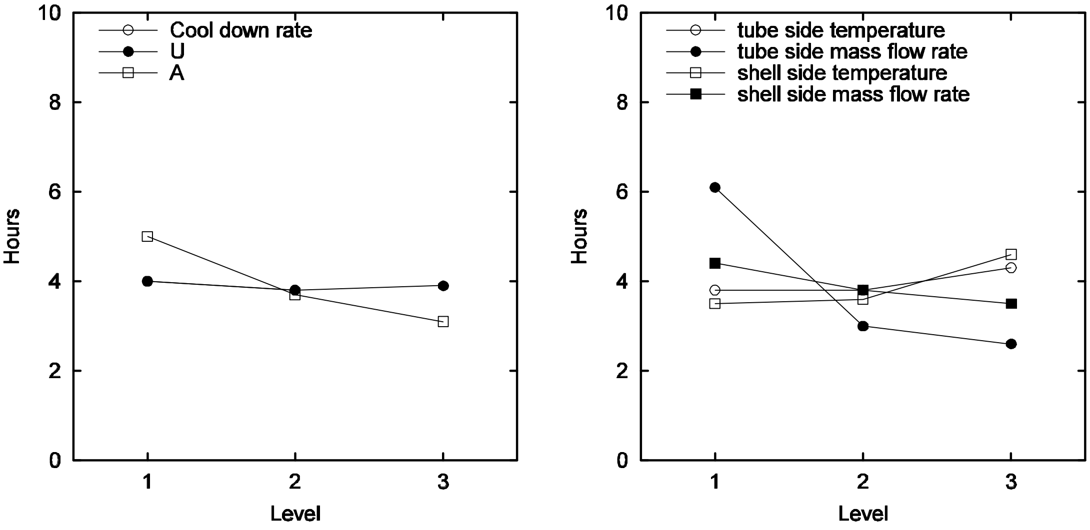
그림에서 알 수 있듯이 통 쪽의 입구온도가 가장 큰 영향을 미치며, 원자로냉각재에서 정지냉각계통으로 들어오는 유량과 전열면적이 큰 영향을 미치는 인자이다. 냉각률이나 정지냉각운전에 들어갈 때의 원자로 냉각재의 온도 및 총괄 열전달 계수는 상대적으로 작은 영향을 미치는 인자로 나타나고 있다.

큰 영향을 미치는 인자일수록 설계나 운전시에 주안점을 두어야 하며, 영향이 적은 인자를 이용하여 비용절감등에 사용할 수 있을 것이다. 통 쪽의 입구온도 즉 기기냉각계통에서 공급되는 기기냉각수의 온도와 원자로냉각재계통에서 정지냉각계통으로 공급되는 유량이 운전시 주의하여 운전되어야 할 인자로 생각된다.

각 제어인자의 영향을 검사하기 위해서 아래와 같은 식으로 정리하였다.

$$h = -10\log_{10}\left(time^2\right) \tag{11}$$

이 값은 신호 대 잡음비(S/N)으로서 이 값이 클수록 최종온도에 도달하는 시간이 작다는 것을 의미한다. 실제 정의된 값은 실험에 대한 방법으로 정의가 되어있으나, 전산모의의



a) b)

Figure 3. 각 인자들의 90℃에 도달하는 평균 시간

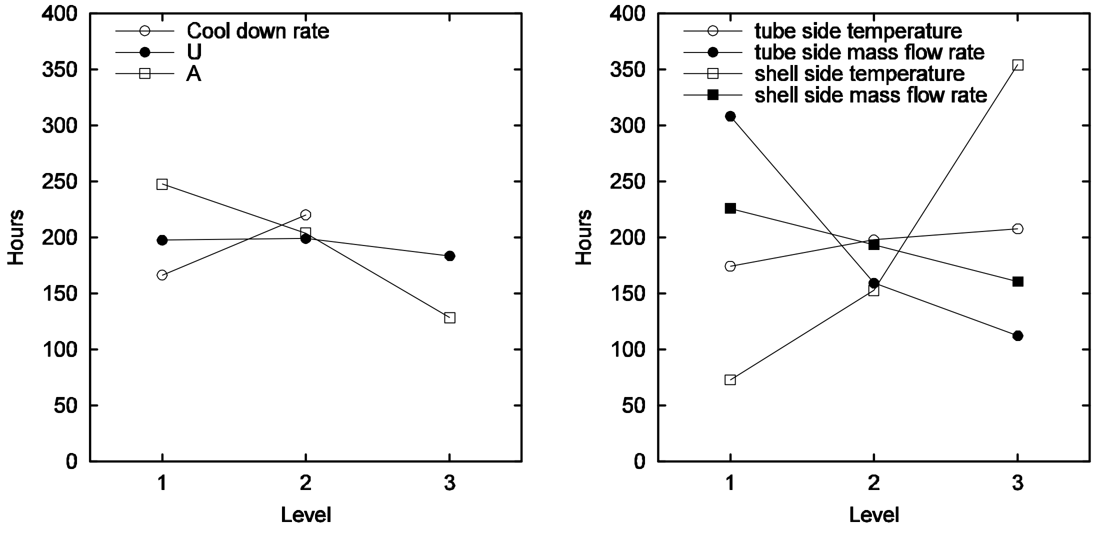
경우에는 한 번의 실험으로 결정이 되기 때문에 식 (11)처럼 정의하게 되었다.
50℃에 도달하는데 걸리는 시간이 최소로 나타나기 위해서는 냉각률은 41.7℃/hr며, 총괄열전달계수는 2000W/m^2°C이고, 전열면적은 20m^{2}이어야 한다. 또, 관 쪽의 초기 입구온도와 유량은 각각 180℃, 7.5kg/s 이어야 하며, 통 쪽의 입구온도와 유량은 각각 30℃, 10kg/s 이어야 한다. 이 때의 값은 다음 식을 통해서 예측할 수 있다$^{1)}$.

$$\eta_{predicted} = \overline{\eta}_{exp} + \left(\overline{\eta}_A - \overline{\eta}_{exp}\right) + \left(\overline{\eta}_B - \overline{\eta}_{exp}\right) + \left(\overline{\eta}_C - \overline{\eta}_{exp}\right) + \cdots \qquad (12)$$

위 식에서 $\overline{\eta}_{exp}$ 는 전체 직교행렬에 대한 평균값이다. 이 연구에서는 $\overline{\eta}_{exp}$ = -42.2dB이다. 식 (12)를 이용해서 50℃에 도달하는 최소 시간을 구해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\eta_{predicted} &= \overline{\eta}_{exp} + \left(\overline{\eta}_{A,1} - \overline{\eta}_{exp}\right) + \left(\overline{\eta}_{B,1} - \overline{\eta}_{exp}\right) + \left(\overline{\eta}_{C,3} - \overline{\eta}_{exp}\right) + \left(\overline{\eta}_{D,1} - \overline{\eta}_{exp}\right) \\
&\quad + \left(\overline{\eta}_{E,3} - \overline{\eta}_{exp}\right) + \left(\overline{\eta}_{F,3} - \overline{\eta}_{exp}\right) + \left(\overline{\eta}_{G,3} - \overline{\eta}_{exp}\right) \\
&= -42.2 + (-41.7 + 42.2) + (-41.9 + 42.2) + (-37.6 + 42.2) + (-34.3 + 42.2) \qquad (13) \\
&\quad + (-40.4 + 42.2) + (-40.1 + 42.2) + (-40.3 + 42.2) \\
&= -42.2 + 18.9 = -23.3 dB
\end{aligned}$$

위에서 얻은 값을 다시 시간의 형태로 바꾸면 14.7시간에 해당한다. 이를 확인하기 위해서 같은 조건으로 KDESCENT 프로그램을 돌렸다. 예측과 같은 조건을 이용하여



a) b)

Figure 4. 각 인자들의 50℃에 도달하는 평균 시간

KDESCENT를 실행한 결과, 최종온도에 도달하는 시간은 13.0시간이었다. 식(13)의 예측과 비교하여 비교적 근사의 결과를 보이고 있다. 제어 인자가 다른 수준에 있는 경우에도 식 (13)을 이용하면 근사값을 구할 수 있을 것으로 보인다. 다른 경우에 있어서도 비슷한 형태의 결과가 나올 것으로 예측된다. 식 (13)과 KDESCENT의 모사 결과가 차이가 나는 이유는 각 제어인자간의 상호작용과 계통의 비선형성으로 인해 발생한 것으로 보인다. 식 (13)의 예측이 모사결과와 비교적 근사한 결과를 보인다면 인자간의 상호작용이 작다는 것을 알 수 있다. 현재의 논문에서는 제어인자간의 상호작용에 대한 더 자세한 부분은 다루지 않았다.

냉각률을 제외한 다른 인자들은 두 경우 모두 같은 경향을 보이고 있으며, 경향성은 굳이 모의를 통하지 않더라도 모두 예측 가능한 것이다. 그러나, 각 인자 별로 영향의 정도를 찾아낼 수 있기 때문에 실제 설계를 할 때 각 제어인자 중에서 경중을 둘 수 있다. 냉각률의 경우는 일반적인 예측과는 반대의 경향이 나왔다.

4. 결론

다구치 방법을 이용하여 제어인자 즉 설계요인이 정지냉각 열교환기의 성능에 끼치는 영향을 검토하였다. 각 제어인자는 일반적으로 예측할 수 있는 경향을 보이고 있다. 이 방법을 통해서 각 제어인자가 성능에 끼치는 영향력의 상대적인 비교를 할 수 있었다. 정지냉각 열교환기에서 통 쪽으로 유입되어 흐르는 기기냉각수의 온도와 관 쪽으로 흐르는 정지냉각 열교환기의 유량이 정지냉각운전에 걸리는 시간을 지배하는 중요한 변수임을 알아낼 수 있었다. 또한 비교적 작은 횟수인 18번의 모의를 통해서 7개의 설계변수가 끼치는 영향을 알아낼 수 있어서 효율적인 예측을 할 수 있었다. 각 설계인자의 평균값을 이용하면 설계인자가 임의로 선택된 수준일 때 정지냉각에 걸리는 시간을 예측할 수 있는 수단도 제공한다.

정지냉각열교환기와 같이 여러 인자를 포함하는 계통에 대한 해석이 필요한 경우에 다구치 방법은 매우 효율적이다. 각 인자별 영향력을 조사도 가능하다. 설계시 요구되는 성능을 맞출 때, 영향력이 큰 인자를 이용하여 요구되는 성능을 만족시키고, 나머지 인자로는 제작단가와 같은 요구 성능 이외의 특성을 조절할 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Run	냉각률 (°C/hr)	$T_{tube,in}$ (°C)	$\dot{m}_{tube}$ (kg/s)	$T_{shell,in}$ (°C)	$\dot{m}_{shell}$ (kg/s)	U ($W/m^2{}^\circ C$)	A (m^2)	90°C 도달시간 (hr)	60°C 도달시간 (hr)
1	41.7	180	2.5	30	5.0	1500	10	7.6	210.0
2	41.7	180	5.0	35	7.5	1750	15	2.5	86.3
3	41.7	180	7.5	40	10.0	2000	20	2.2	92.7
4	41.7	200	2.5	30	7.5	1750	20	4.2	97.7
5	41.7	200	5.0	35	10.0	2000	10	3.2	103.7
6	41.7	200	7.5	40	5.0	1500	15	3.4	313.7
7	41.7	220	2.5	35	5.0	2000	15	6.5	296.2
8	41.7	220	5.0	40	7.5	1500	20	3.5	259.1
9	41.7	220	7.5	30	10.0	1750	10	3.3	38.0
10	100	180	2.5	40	10.0	1750	15	5.8	473.2
11	100	180	5.0	30	5.0	2000	20	1.9	37.0
12	100	180	7.5	35	7.5	1500	10	3.0	146.3
13	100	200	2.5	35	10.0	1500	20	4.5	219.8
14	100	200	5.0	40	5.0	1750	10	4.9	434.0
15	100	200	7.5	30	7.5	2000	15	1.5	18.6
16	100	220	2.5	40	7.5	2000	10	8.0	552.1
17	100	220	5.0	30	10.0	1500	15	2.2	35.8
18	100	220	7.5	35	5.0	1750	20	2.1	64.4

Table 2. 모의조건과 그 결과

5. 참고 문헌

1) Fowlkes, W. Y. and Creveling, C. M., "Engineering Methods for Robust Product Design," 1st Ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
2) Benjamin, P. C., "Using Simulation for Robust System Design," Simulation, Vol.65, No. 2, pp. 116-128, 1995.
3) Wang, S. B., Pan, Chin, "Two-Phase Flow Instability Experiment in a Natural Circulation Loop Using the Taguchi Method," Vol. 17, Experimental Thermal and Fluid Science, pp. 189-201, 1998.
4) Incropera, F. P. and De Witt, D. P., "Introduction to Heat Transfer," 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1990.
5) 양준석, "울진 3,4호기 원전의 부분충수운전을 위한 설계변경 및 인허가 추진방안, 기술보고서," KAERI/TR-529/95, 1995.

Factors	90℃ 도달시간의 평균(dB)			50℃ 도달시간의 평균(dB)		
	1	2	3	1	2	3
Cool down rate	-11.5	-10.2		-42.6	-41.7	
Tube side temperature	-10.5	-10.6	-11.5	-42.1	-42.5	-41.9
Tube side mass flow rate	-15.5	-9.2	-7.9	-48.5	-40.4	-37.6
Shell side temperature	-9.4	-10.6	-12.6	-34.3	-42.5	-49.8
Shell side mass flow rate	-11.7	-10.4	-10.4	-44.3	-41.7	-40.4
Heat tansfer coefficient	-11.4	-11.1	-10.1	-44.3	-42.1	-40.1
Heat transfer area	-13.2	-10.1	-9.2	-44.9	-41.3	-40.3

Table 3. The analysis of mean