

하나로 NR 설비 Bi-여과기 냉각 설계 해석 및 실험

Design Analysis and Experimental Results for the Cooling of HANARO NR Bi-Filter

임인철, 남기용, 김양곤, 심철무, 김이경, 이창희, 이지복

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 NR(Neutron Radiography)용 빔포트의 집속관(Collimator)에는 감마선을 차폐하기 위한 Bi(Bismuth) 여과기가 달려있다. 여과기에서는 감마선의 흡수에 의해서 열이 발생하는데 여과기의 건전성을 유지하기 위해서는 적절한 냉각이 이루어져야 한다. 설계시에 해석을 통하여 여과기의 건전성이 유지될 것으로 판단하였고, 실험을 통하여 설계 해석의 보수성을 입증하였다.

ABSTRACT

In the in-pile collimator of NR(Neutron Radiography) beam port of HANARO, a Bi(Bismuth) filter is installed for the shielding of γ ray. γ heat is generated in this filter and adequate heat removal passes should be provided to maintain the integrity of the filter. In the design of the filter, it was judged through an analysis that the filter temperature would be low enough to maintain the integrity. The experimental results also proved the conservatism in the design analysis.

1. 서 론

하나로에는 비파괴 검사 및 관련 연구의 수행을 위하여 NR 설비가 설치되어 있다. NR 설비의 일부인 NR 빔포트에는 중성자속의 집속을 위하여 그림 1과 같은 집속관이 설치되어 있다. NR에서 좋은 질의 상(image)을 얻으려면 감마선을 최소화하여야 하는데 이를 위하여 집속관 입구에는 그림 2와 같은 Bi 여과기가 설치되어 있다. Bi 여과기에서는 감마선의 흡수에 의해서 열이 발생하는데 여과기의 건전성을 유지하기 위해서는 이 열을 적절히 제거하여야 한다. 따라서, 집속관 외부에 있는 원자로 수조수에 의한 자연 대류와 Bi 여과기 주변을 감싸고 있는 냉각수 코일 내부를 흐르는 냉각수에 의하여 감마열이 제거되도록 Bi 여과기를 설계하였다. 설계 시에 해석을 통하여 여과기의 건전성이 유지될 것으로 판단하였고, 실험을 통하여 설계 해석의 보수성을 입증하였다.

본 논문에는 Bi 여과기 열해석 모형 및 해석 결과와 실험 결과를 기술하였다.

2. Bismuth 여과기 냉각 시스템 구조

그림 2의 (a)는 집속관 앞쪽에 Bi 여과기와 냉각 파이프가 장착된 aluminium access 설계도이다. Al-access는 Bi 여과기, 냉각수 코일과 그리고 2 개의 열전대로 구성되어 있다. 그림 2의 원형 점선 부분을 확대해서 나타낸 것이 (b)이다. 이 그림에는 열전대가 고정된 상태가 잘 나타나 있는데 2개의 열전대는 여과기 주변에 서로 180°의 각을 이루면서 설치되어 있다. 그림 3은 나선형 냉각 코일의 자세한 모습이다. 이 냉각 코일은 납으로 된 주물 속에 들어 있으며 그림 2에서와 같이 Al-access에 삽입된다. 이 나선형 냉각 코일에 공급되는 입/출구 파이프에 냉각수의 유량을 제어하고 온도와 압력을 측정하기 위해서 그림 4와 같은 냉각수 순환 회로를 원자로 외벽에 장착하였다.

3. 해석 모형과 해석 결과

3.1 해석 모형

Bi 여과기에서 발생하는 열원과 열제거 경로를 기술하면 아래와 같다. 또한, 열원 및 제거 경로를 그림 5에 도시하였다.

- Bi에서 발생하는 감마열(Q1)
 - 수조수로의 열전달(QW1)
 - 전단부 주위의 Al 틀 표면을 통한 자연 대류(QW1P)
 - 전단부 후위의 Al 틀을 거친 자연 대류(QW1F)
 - 들어오는 냉각수를 통한 강제 대류 열전달(QC1)
 - 돌아 나가는 냉각수를 통한 강제 대류 열전달(QC3)
- Pb에서 발생하는 감마열(Q2)
 - 수조수로의 열전달(QW2)
 - 전단부 주위의 Al 틀 표면을 통한 자연 대류(QW2P)
 - 전단부 후위의 Al 틀을 거친 자연 대류(QW2F)
 - 들어오는 냉각수를 통한 강제 대류 열전달(QC2)

30 MW 운전시에 납에서 발생하는 감마열량은 91 W이고, 이 열의 대부분이 원자로를 향한 쪽 전단 5 cm 부위에서 발생한다. Bi에서 발생하는 열량은 10 W인데 이 열의 대부분이 원자로를 향한 쪽에서 전단 1 cm 부위에서 발생한다. 따라서, 감마열은 원자로를 향한 쪽 전단에서 모두 발생한다고 가정하였다. 또한, 납의 경우에는 냉각 코일이 감겨있는 내부에서 모두 발생한다고 가정하였다.

각 열전달량 및 각 부위의 온도는 아래의 관계식들을 이용하여 계산하였다. 이들 식에 사용된 기호가 의미하는 바는 그림 5와 그림 6에 표시하였다.

집속관 표면의 평균 온도는 전체 열생성량에서 강제 대류 열전달량을 제외한 열량과 자연 대류 열전달 계수를 알면 구할 수 있는데 이를 구하는 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
QW &= QTOT - QC \\
&= (Q1 + Q2) - (QC1 + QC2 + QC3) \\
&= H1 \times 2\pi R(7) \times AL1 \times (T(13) - TB) \\
H1 &= 0.53 \times \frac{k}{2 \cdot R(7)} (Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad (Gr \cdot Pr < 10^9) \\
&= 0.13 \times \frac{k}{2 \cdot R(7)} (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (Gr \cdot Pr > 10^9) \\
Gr &= \frac{g\beta(T(13) - TB) \cdot (2 \cdot R(7))^3}{\nu^2}
\end{aligned} \tag{1}$$

납 전단부에서 냉각수 파이프가 지나가는 주변의 온도인 T(9)와 전단부 위치에서의 집속관 표면 온도인 T(11)은 QW2P와 QW2F를 알면 구할 수 있다. QW2P와 T(11)의 관계는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
R2 &= \frac{1}{2\pi R(7) \cdot H1 \cdot AL2} + \frac{\ln(R(7)/R(6))}{2\pi k_{ss} \cdot AL2} + \frac{\ln(R(6)/R(5))}{2\pi k_{He} \cdot AL2} \\
QW2P &= (T(11) - TB)/R2
\end{aligned} \tag{2}$$

QW2F와 T(11)의 관계는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
QW2F &= RRR2 \cdot (T(11) - TB) \\
RRR2 &= \sqrt{k_{Al} \cdot A / RF} \cdot \tanh(M \cdot AL9) \\
RF &= \frac{1}{2\pi R(7) \cdot H1} + \frac{\ln(R(7)/R(6))}{2\pi k_{ss}} + \frac{\ln(R(6)/R(5))}{2\pi k_{He}} \\
A &= \pi(R(5)^2 - R(4)^2) \\
M &= \sqrt{\frac{1}{K_{Al} \cdot A \cdot RF}}
\end{aligned} \tag{3}$$

위의 식 (2)와 식 (3)에 있는 QW2P와 QW2F의 합을 QW2를 라고 하면 T(11)은 아래의 식에 따라 계산할 수 있다.

$$T(11) = TB + QW2 \times R2 / (RRR2 \times R2 + 1) \tag{4}$$

T(9)는 위에서 구한 T(11)로부터 다음 식을 이용하여 구한다.

$$\begin{aligned}
R24 &= \frac{\ln(R(5)/R(4))}{2\pi \cdot k_{Al} \cdot AL2} + \frac{\ln(R(4)/R(9))}{2\pi \cdot k_{pb} \cdot AL2} \\
T(9) &= T(11) + QW2 \times R24
\end{aligned} \tag{5}$$

Bi 전단부에서 냉각수 파이프가 지나가는 주변의 온도인 T(5)와 전단부 위치에서의 집속관 표면 온도인 T(7)은 QW1P와 QW1F를 알면 구할 수 있다. QW1P와 T(7)의 관계는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
R1 &= \frac{1}{2\pi R(7) \cdot H1 \cdot AL3} + \frac{\ln(R(7)/R(6))}{2\pi k_{ss} \cdot AL3} + \frac{\ln(R(6)/R(5))}{2\pi k_{He} \cdot AL3} \\
QW1P &= (T(7) - TB)/R2
\end{aligned} \tag{6}$$

QW1F와 T(7)의 관계는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
QW1F &= RRR \cdot (T(7) - TB) \\
RRR &= \sqrt{k_{Al} \cdot A / RF} \cdot \tanh(M \cdot AL7) \\
RF &= \frac{1}{2\pi R(7) \cdot H1} + \frac{\ln(R(7)/R(6))}{2\pi k_{ss}} + \frac{\ln(R(6)/R(5))}{2\pi k_{He}} \\
A &= \pi(R(5)^2 - R(4)^2) \\
M &= \sqrt{\frac{1}{K_{Al} \cdot A \cdot RF}}
\end{aligned} \tag{7}$$

위의 식 (6)과 식 (7)에 있는 QW1P와 QW1F의 합을 QW1라고 하면 T(7)은 아래의 식에 따라 계

산할 수 있다.

$$T(7)=TB+QW1 \times R1/(RRR \times R1+1) \quad (8)$$

T(5)는 위에서 구한 T(7)로부터 다음 식을 이용하여 구한다.

$$R57 = \frac{\ln(R(5)/R(4))}{2\pi \cdot k_{Al} \cdot AL3} + \frac{\ln(R(4)/R(10))}{2\pi \cdot k_{Pb} \cdot AL3} \quad (9)$$

$$T(9) = T(11) + QW2 \times R57$$

냉각수 코일로 들어온 냉각수가 Bi 전단부를 지난 다음의 온도인 T(2), 냉각수가 납 전단부를 돌아온 다음에 Bi 전단 부위를 지날 때의 온도인 T(3), Bi 전단부를 다시 돌아서 나갈 때의 온도인 T(4)는 냉각수 코일과 Bi 및 납 전단부 사이의 전열계수(Overall Heat Transfer Coefficient)와 강제 대류에 의한 열전달량을 알면 구할 수 있다. 전열계수를 구하기 위해서는 냉각수와 냉각수 코일 사이의 열전달 계수가 필요한데, 이를 위해서는 다음 식을 사용하였다.

$$H2 = 0.023 \frac{k}{D} Re^{0.85} Pr^{0.4} \left[\frac{D}{2R(10)} \right]^{0.1} \quad (10)$$

$$H3 = 0.023 \frac{k}{D} Re^{0.85} Pr^{0.4} \left[\frac{D}{2R(9)} \right]^{0.1}$$

여기서, D는 코일의 내경이며, R(9)는 납 전단부에 감긴 코일의 반경이고, R(10)은 Bi 전단부에 감긴 코일의 반경이다.

Bi 전단부에서 냉각수 파이프가 지나가는 주변의 온도인 T(5)와 냉각수 사이의 전열계수를 구하는 식은 아래와 같다.

$$U2 = \frac{1}{\frac{1}{H2} + \frac{ALL1}{k_{ss}} + \frac{AL4}{k_{Pb}}} \quad (11)$$

또한, 납 전단부에서 냉각수 파이프가 지나가는 주변의 온도인 T(9)와 냉각수 사이의 전열계수를 구하는 식은 아래와 같다.

$$U3 = \frac{1}{\frac{1}{H3} + \frac{ALL1}{k_{ss}} + \frac{AL8}{k_{Pb}}} \quad (12)$$

납 및 Bi와 냉각수 사이의 열전달량은 냉각수가 지나가는 주변의 온도가 일정하게 유지된다고 가정하고 구하였는데[2] 이 열전달량 식으로부터 TC(2), TC(3), TC(4)를 구하면 아래와 같다.

$$TC(2) = T(5) + (TC(1) - T(5)) \exp\left[-\frac{U2 \cdot \pi D}{2m_c \cdot C_p} AL5\right]$$

$$TC(3) = T(9) + (TC(2) - T(9)) \exp\left[-\frac{U3 \cdot \pi D}{2m_c \cdot C_p} AL6\right] \quad (13)$$

$$TC(4) = T(5) + (TC(3) - T(5)) \exp\left[-\frac{U2 \cdot \pi D}{2m_c \cdot C_p} AL5\right]$$

여기서 m_c 는 코일 내부를 흐르는 냉각수량이다.

식 (15)를 이용하여 구한 온도를 이용하여 강제 대류 열전달량은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$QC1 = m_c \cdot C_p (TC(2) - TC(1))$$

$$QC2 = m_c \cdot C_p (TC(3) - TC(2)) \quad (14)$$

$$QC3 = m_c \cdot C_p (TC(4) - TC(3))$$

이 식에서 m_c 는 냉각수 유량을 의미한다.

Bi 및 납에서의 최고 온도인 $T(1)$ 과 $T(8)$ 은 각각 $T(5)$ 와 $T(9)$ 로부터 열전도 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

위의 식들을 이용하여 온도들과 열전달량을 반복법을 사용하여 구하였는데 그 절차는 그림 7과 같다.

3.2 해석 결과와 설계에의 반영

냉각수에 의한 강제 대류가 있는 경우와 강제 대류가 없는 경우에 대하여 해석을 수행하였고 또한 납을 알루미늄으로 대체한 경우에 대한 해석도 수행하였는데 해석 결과는 표 1과 같다. 해석 과정에서 주요 열전달 경로는 자연 대류를 통한 수조로의 열전달임을 확인하였다. 납의 용융 온도는 327°C 이고 Bi 의 용융 온도는 271°C 인데, 표 1의 해석 결과와 이 융점들을 비교하여 보았을 때, Bi 여과기의 열적 건전성에는 문제가 없는 것으로 판단되었다. 특히, 강제 대류가 없는 경우에도 문제가 없는 것으로 판단되었다. 그러나, 처음으로 시도하는 제품임을 감안하여 강제 대류를 위한 냉각수 코일을 설치하고 추후에 실험 결과를 보아 강제 대류의 실시 여부를 결정하기로 하였다.

4. 실험 결과와 해석 결과와의 비교

강제 대류에 의한 열전달 효과를 측정하고 강제 대류가 없는 경우에 여과기의 온도가 어느 정도로 유지되는가를 시험하였다. 시험 당시에 원자로 출력은 24 MW이었다. 강제 대류를 유지하다가 그림 4의 냉각수 순환 회로에 있는 냉각수 유입 밸브를 잠그고 온도 변화를 측정하였는데 측정 결과는 그림 8과 같다.

강제 대류가 있을 때에 유량은 0.3 kg/s 이었고 납 전단부의 온도는 40°C 정도로 유지되었으며, 강제 대류를 중단하였을 때의 온도는 60°C 정도에 이르렀다. 이로부터 30 MW 운전시의 온도를 추정하여 보면 각각 41°C , 66°C 이다. 이 결과를 표 1에 있는 값과 비교하여 보면, 강제 대류가 있는 경우의 값은 해석치와 실험으로부터의 추정치가 매우 유사하나 강제 대류가 없는 경우에 대해서는 해석치가 매우 보수적임을 알 수 있다. 따라서, Bi 여과기는 강제 대류 없이도 그 건전성이 유지되는 것으로 판단된다.

강제 대류가 없는 경우에 있어 실험치가 해석치보다 훨씬 적은 이유는 두 가지 정도로 추정된다. 첫째는 해석에 있어 납에서 감마열이 매우 국부적인 곳에서 집중적으로 발생한다고 가정하였으나 실제로는 그보다 넓은 곳에서 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 둘째는 해석에서 고려한 열전달 경로 이외에 다른 열전달 경로가 존재할 수도 있다는 것이다. 그림 8을 보면 원자로실 공기 온도가 상승하는 시기에 여과기 온도도 상승함을 알 수 있다. 이로부터 여과기에서 원자로 벽체를 통하여 공기 중으로 열이 전달되는 경로가 존재함을 알 수 있다.

5. 결론

NR 설비에 있는 Bi 여과기의 열적 건전성에 대한 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 보았다. 이로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 설계 시에 적용하였던 해석 모형이 보수적이었다.
- Bi 여과기는 강제 대류없이도 열적 건전성이 유지된다.
- Bi 여과기로부터의 열전달 경로로는 수조수로의 자연대류, 냉각수를 통한 강제 대류이 외에 원자로 벽체를 통한 전달 경로가 있다.

감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 기관고유사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고 문헌

1. F. Kreith, "Principles of Heat Transfer", 3rd Ed., Intext Educational Publishers, 1976.
2. W.M. Rohsenow, "Handbook of Heat Transfer Fundamentals", 2nd Ed., McGraw-Hill, 1985.

표 1. Bi 여과기 온도 해석 결과

강제 대류가 있는 경우					강제 대류가 없는 경우	
냉각수 유량 (kg/s)	0.25	0.5	0.75	1.0	납이 있는 경우	납이 없는 경우
Bi의 최고 온도 (°C)	52.0	51.9	51.9	51.9	65.8	64.0
납의 최고 온도 (°C)	42.6	42.4	42.3	42.3	131.3	

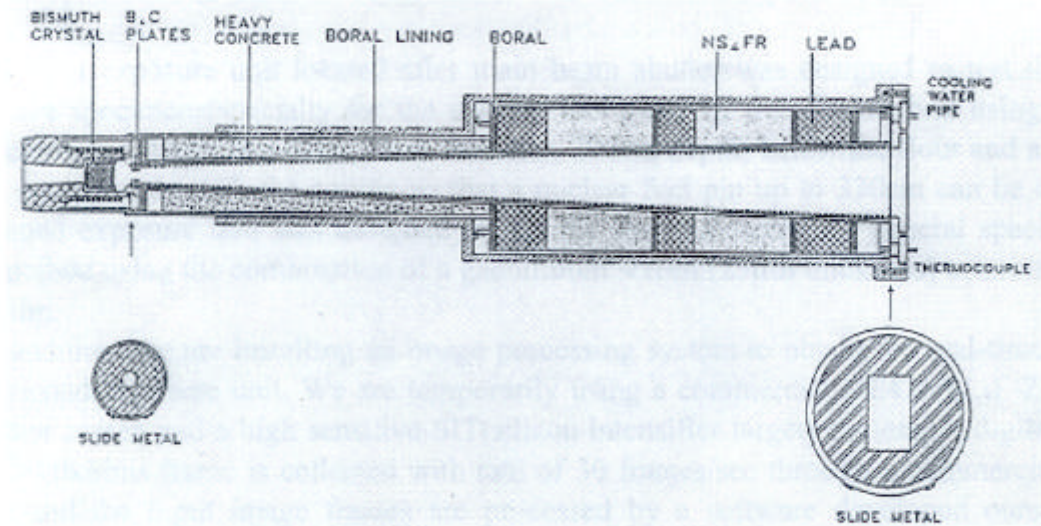
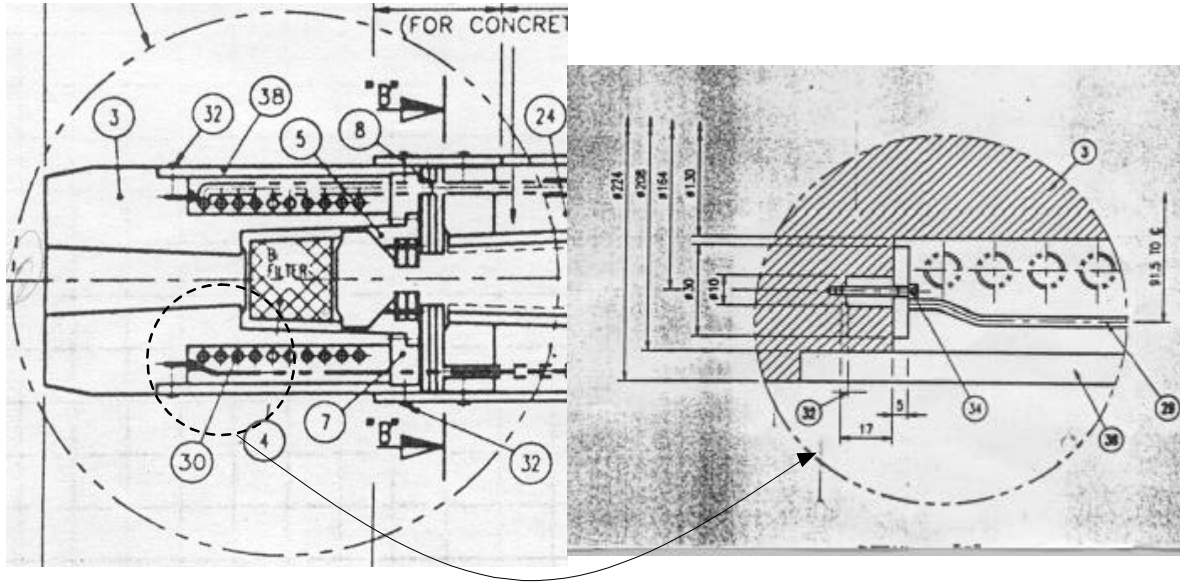


그림 1. 하나로 NR 빔 포트에 설치된 집속관(Collimator)



(a)

(b)

- ③ Al-access ④ Bi-filter ⑤ EUB6 holder ⑦ Cooling line guider
- ⑧ Boral plate ⑭ Concrete ⑳ 1/2" SUS tube ㉑ Hex socket head bolt
- ㉒ Al-access cover

그림 2. NR 집속관 내에 장착된 Bismuth 여과기와 냉각수 코일

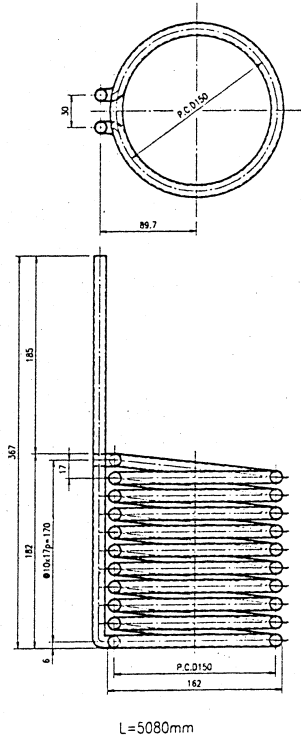


그림 3. 냉각 코일

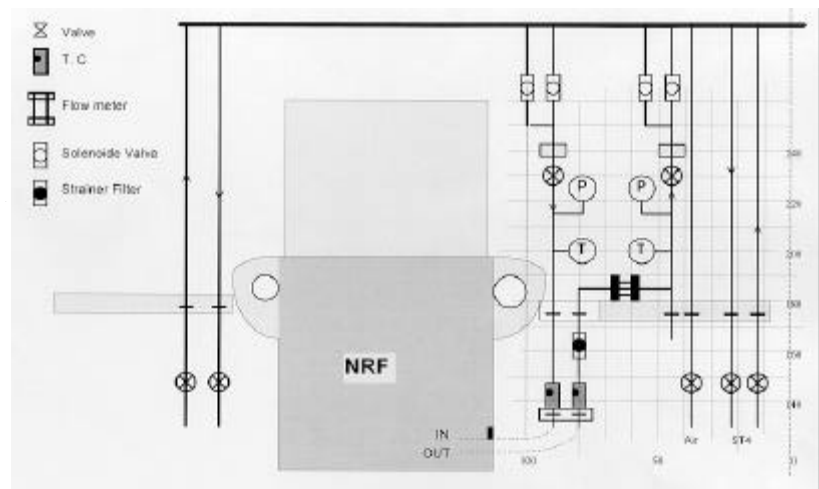


그림 4. Bi 여과기 냉각수 순환 회로

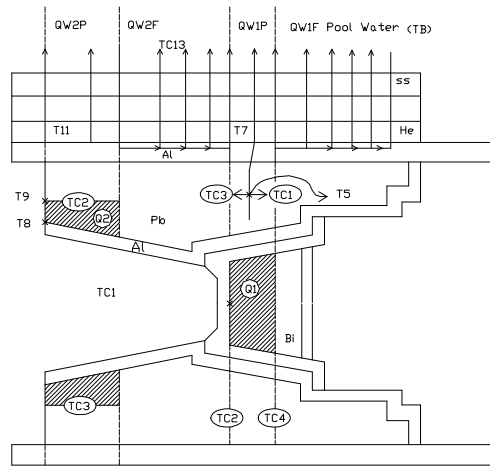


그림 5. Bi 여과기에서의 감마열 주요 생성 부위 및 열전달 경로

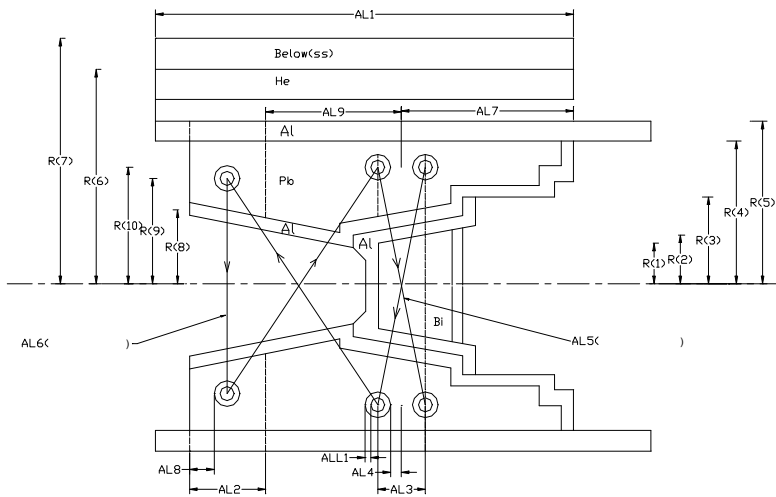


그림 6. Bi 여과기 열해석에 사용된 용어의 정의

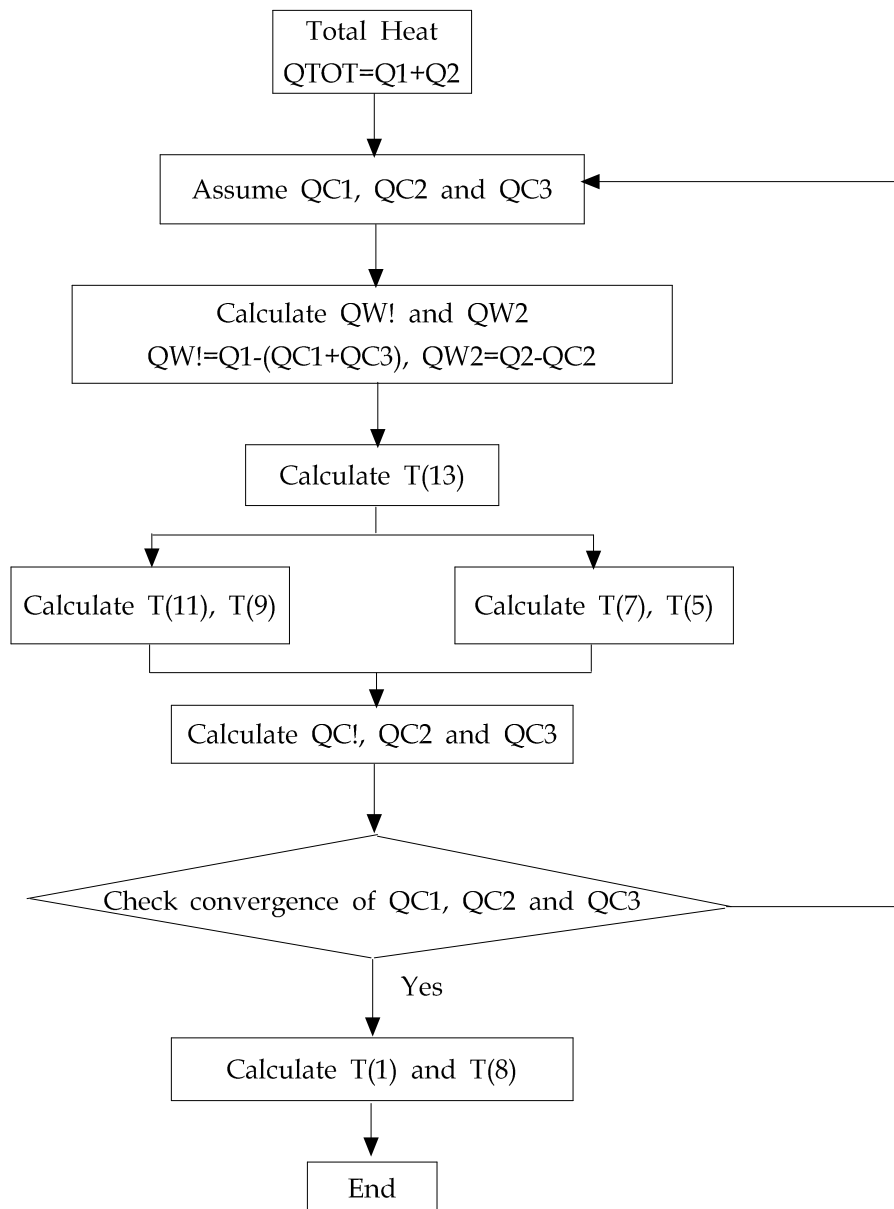


그림 7. 온도 및 열전달량을 구하는 순서도

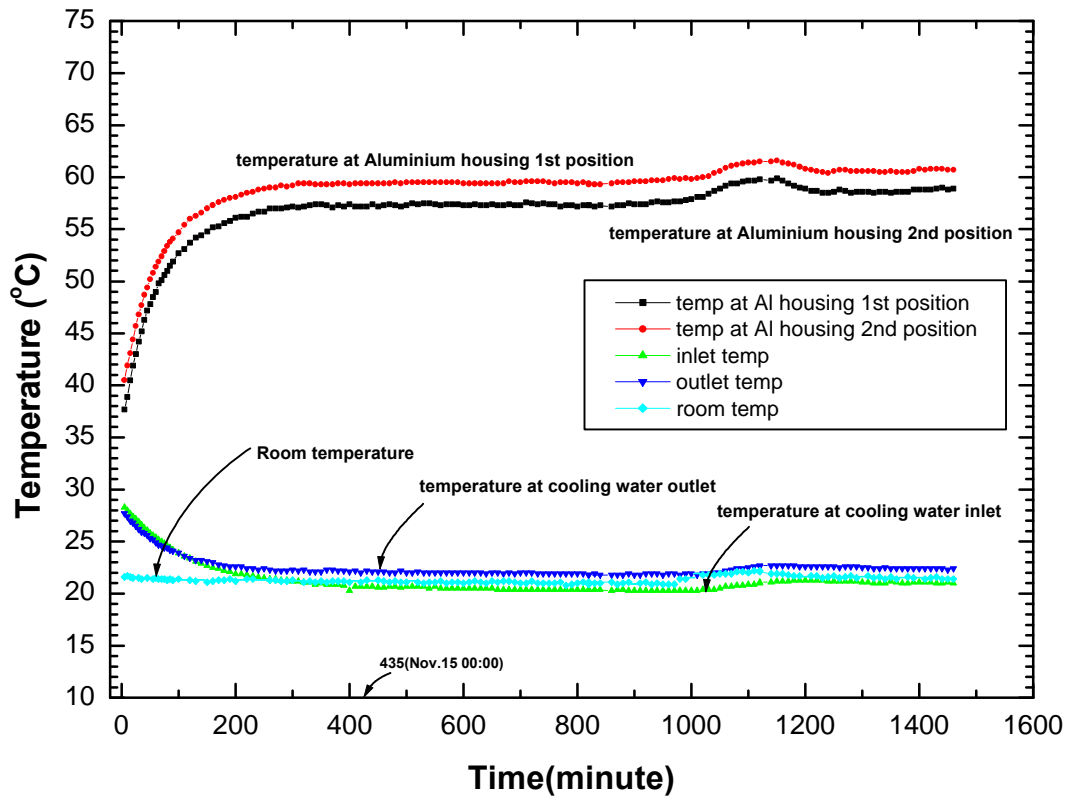


그림 8. NR 집속기에 설치된 여과기 온도 측정 결과