

원자로 냉각재 계통을 지지하는 대구경 유압식 스너버의 이동거리 해석 Stroke Analysis of Large Bore Hydraulic Snubber Supporting Reactor Coolant System

이 상 호*, 윤 기 석*, 전 장 환*, 박 명 규*, 엄 세 윤*

Sang-Ho Rhee, Ki-Seok Yoon, Jang-Hwan Jheon, Myung-Gyu Park, Se-Yun Eom

ABSTRACT

The steam generator, one of the major components in the reactor coolant system, plays an important role in transferring the thermal energy made in the reactor during normal operation to the secondary side and producing steam to drive turbine. A hydraulic snubber system is used in order to protect the steam generator under the dynamic loading condition and to absorb the thermal expansion transmitted by the reactor coolant piping due to high temperature and pressure during normal operation.

In this study, the model for a geometrical linkage system is presented to analyze the snubber stroke of the steam generator and the parameters in the snubber stroke analysis are investigated. A method to analyze lever ratio of the linkage system which is required in the process of determining the snubber stiffness value is also presented. To discuss the validation of the suggested analysis, the analysis results are compared with the measured data during the hot functional test for the standardized 1000 Mwe pressurized water reactor plant under the construction.

1. 서론

1000 Mwe급 표준 가압형 경수로의 원자로 냉각재 계통은 2개의 루프(Loop)로 구성되어 있으며, 1개의 원자로, 2개의 증기발생기, 4개의 원자로 냉각재 펌프 및 각 기기를 연결하는 주배관으로 구성되어 있다. 원자로 냉각재 계통의 정상운전 압력은 2250 Psia이고, 정상운전 온도는 621.2 °F이다. 원자로 냉각재 계통의 증기발생기는 정상운전 과정에서 발생하는 일차 측의 열에너지를 이차 측으로 전달하는 열교환기 역할을 수행하며, 원자로 냉각재 계통의 전체적인 열수력학 환경에 중요한 역할을 담당한다. 표준 가압형 경수로는 원자로의 구조적 건전성을 극대화하기 위하여 정상운전시 발생하는 열팽창을 증기발생기와 원자로 냉각재 펌프의 지지구조물로 전달토록

* 한국원자력연구소

구성되었으며[1], 증기발생기와 원자로 냉각재 펌프에는 유압식 스너버와 열팽창 흡수가 용이한 지지구조물이 설치되어 있다.

증기발생기는 주배관으로부터 전달되는 열팽창을 흡수하기 위하여 자유로운 이동을 할 수 있도록 미끄럼 지지대(Sliding Base)위에 설치되며, 상부에는 레버(Lever)와 링크(Link)를 이용한 링크장치 계통(Linkage system)에 한 쌍의 대구경 유압식 스너버로 지지하고, 열팽창 흡수방향, 즉 스너버 작동방향과 직교하는 수평 동적하중을 지지하기 위한 2개의 키(Key)가 상부와 하부에 각각 설치되어 있다. Fig. 1는 증기발생기에 설치된 스너버 링크장치 계통을 표시한 것이다. 증기발생기의 스너버 링크장치 계통은 정상운전 상태(Normal operation condition)에서는 원자로 냉각재 계통의 열팽창을 흡수하고, 동적하중 상태에서는 이를 지지하여 증기발생기의 건전성을 보장하여야 한다. 만일 스너버가 정상운전 상태나 열적과도 상태(Thermal Transient)에서 발생하는 열팽창량을 흡수할 수 있는 정확한 이동거리(Stroke)와 동적하중 상태에서 요구되는 강성값(Stiffness Value)을 가지지 못하면, 증기발생기와 원자로 냉각재 계통의 건전성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그러므로, 스너버 링크장치 계통의 해석에 가장 중요한 인자는 정상운전 상태에서의 스너버 이동거리와 동적하중 상태에서 요구되는 강성값을 결정하는 것이다. 보편적인 해석방법은 증기발생기의 변위와 동적하중을 기준으로 하여 보수적인 이동거리와 강성값을 결정하고, 원자로 냉각재 계통의 고온성능시험(Hot Functional Test) 과정을 통하여 해석 결과를 확인한다. 스너버의 이동거리가 과다하게 보수적으로 해석되면, 동일한 제원의 스너버는 강성이 감소하므로, 보다 큰 용량의 스너버를 사용하여 강성값을 증가시켜야 한다. 따라서 정상운전 상태에서 정확한 스너버의 이동거리를 해석하는 것은 충분한 설계여유를 가진 스너버의 설계에 필수적이며, 지나친 보수성을 제거하여 보다 효율적인 스너버의 설계를 위한 가장 중요한 인자가 된다.

본 연구에서는 증기발생기 스너버의 이동거리를 해석하기 위한 링크장치의 기하학적 계통을 모델링하여 제시하고, 스너버의 이동거리 해석에 영향을 미치는 인자를 추출하여 검토하였다. 또한 스너버의 강성값 결정과정에서 요구되는 레버 기구의 하중분담율(Lever Ratio)을 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 해석결과의 타당성을 검토하기 위하여 현재 건설중인 1000 Mwe급 가압경수로형 발전소의 고온성능시험 과정에서 실측한 결과와 비교 검토하였다.

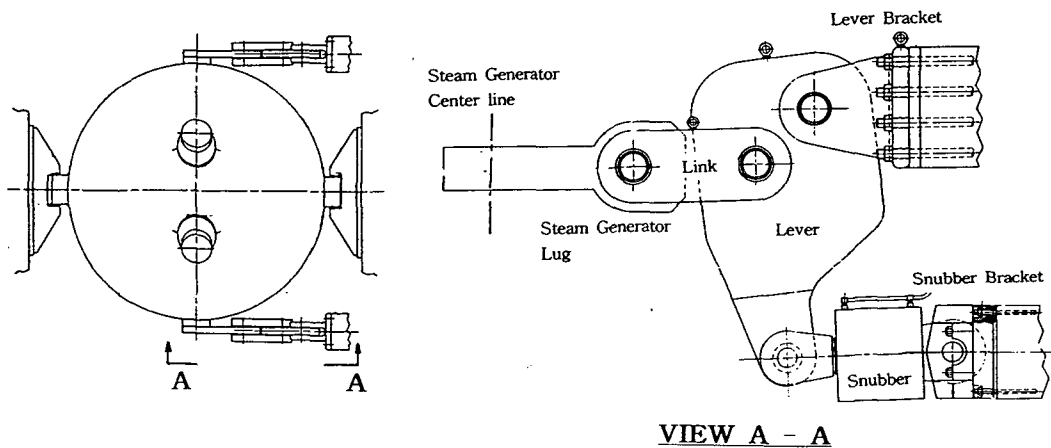


Fig. 1. Configuration of the Steam Generator Snubber Linkage System

2. 본론

2.1. 증기발생기 스너버 링크장치 계통의 해석

2.1.1 증기발생기 스너버 링크장치 계통의 구조

스너버 링크장치 계통은 1개의 레버, 2개의 링크, 브라킷(Bracket) 및 유압식 스너버로 구성되며, 증기발생기당 2개가 설치되어 있다. Fig. 1는 스너버 링크장치 계통의 구성도를 표시한 것이다. Fig. 2은 증기발생기 링크장치의 기하학적 계통을 모델로 표시한 것이다. Fig. 2에 표시한 것과 같이 링크장치 계통은 지렛대의 원리를 이용하여 동적하중을 스너버와 지지구조물로 분산시키고, 정상운전 상태에서 발생하는 원자로 냉각재 계통의 열팽창을 효율적으로 스너버에 전달토록 구성된다. 링크장치 계통은 상온 상태(Cold condition)에서 점 선과 같이 설치되며, 원자로 냉각재 계통이 열 팽창되는 정상운전 상태에서는 실 선의 위치로 이동하여 스너버에 전달한다. 링크장치 계통은 상온 상태로부터 열팽창을 함에 따라 정상운전 상태에서는 점(Point) 1,2,3이 +X방향 및 -Y방향으로 이동하여, 원자로와 주냉각재 배관에서의 열팽창을 흡수하여 증기발생기에서 열용력의 발생을 최대한으로 억제하는 기능을 하게된다.

2.1.2 기본가정

증기발생기의 스너버 링크장치 계통을 해석하기 위하여 다음과 같은 사항을 가정하였다.

1. 스너버 링크장치 계통의 모든 부품은 탄성변형 이론이 적용되는 범위 내에서 설계 제작된다.
2. 스너버의 이동거리는 최초의 장착위치와 정상운전 상태의 위치로부터 계산되는 스너버길이만으로 정의한다.
3. 정상운전 상태에서 스너버 링크장치 계통의 온도는 안정상태를 유지하며, 평균 열팽창율을 적용한다.
4. 동적하중 상태나 열적과도 상태에서 스너버 링크장치 계통에 가해지는 하중에 의한 변형은 스너버의 이동거리에 비하여 무시될 수 있으므로, 링크장치 계통의 강체 이동량만을 고려한다.
5. 정상운전 상태에서 스너버의 강성값은 0으로 가정한다.
6. 열전달 해석시 증기발생기 외부표면은 단열된 것으로 가정하였으며, 공기와 접촉하고 있는 링크장치 계통의 각 부품은 자연대류에 의해 냉각되는 것으로 가정하였다.

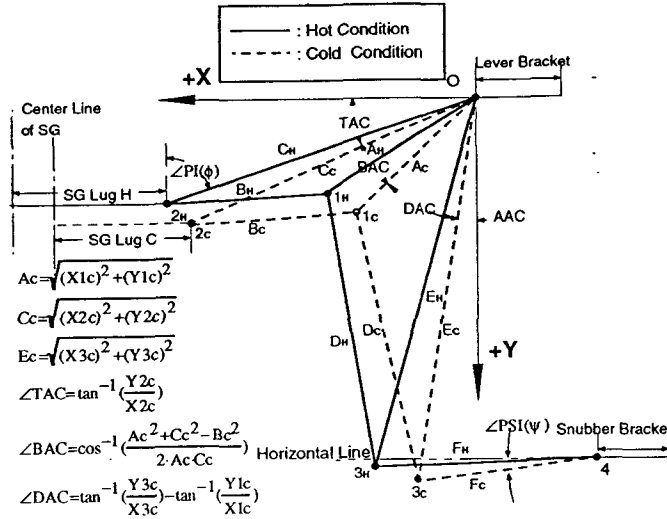


Fig. 2. Geometrical Configuration of the Snubber Linkage System

2.1.3 원자로 냉각재 계통의 정상운전 해석과 스너버 링크장치 계통 부품의 열전달 해석

스너버의 이동거리에 영향을 미치는 인자는 원자로 냉각재 계통 및 스너버 링크장치 계통의 열 팽창 특성과 각 부품의 설계공차 및 스너버 자체의 특성 등으로 구분할 수 있다. 스너버 자체의 특성은 일반적인 해석에서는 고려할 수 없는 불확실성을 포함하므로 본 연구에서는 제외하였다. 원자로 냉각재 계통의 열팽창에 의한 증기발생기의 변위량을 구하기 위하여 원자로 냉각재 계통

의 정상운전 해석을 통하여 증기발생기와 링크장치 계통의 연결위치에서의 변위량을 산출하였다 [1]. 정상운전 상태에서 스너버 링크장치 계통은 증기발생기로부터 전달되는 열에 의하여 온도변화가 발생하고 국부적인 열팽창을 하게된다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 스너버 링크장치 계통의 각 부품에 대한 열전달 해석을 수행하였으며, 유한요소모델을 Fig. 3에 표시하였다 [2],[3]. 해석 결과 레버의 평균온도는 204.3 °F이며, 링크의 평균온도는 292 °F로 나타났다. 열 전달에 의한 각 부품의 열팽창 량(δl)을 평균 열팽창계수[4]를 이용하여 (1)식으로 나타낸다[5],[6].

$$\delta l = l_c \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \text{ -----(1)}$$

여기서, l_c 는 상온 상태에서의 길이를 나타내며, ΔT 는 온도차이고, α 는 평균 열팽창계수이다. 원자로 냉각재 계통의 정상운전 해석과 열전달 해석에 의한 Fig. 2에 표시한 점 2의 변위량을 Table 1에 표시하였다. 점 2는 정상운전 상태에서 -Y방향(윗방향)으로 움직이므로 (-)로 표기하였다. Table 1에서 0 % 출력 상태는 원자로 냉각재 계통의 온도가 565 °F일 경우를 표시한 것이며, 고온성능시험 상태와 동일한 운전상태를 나타낸다.

Table 1. Thermal movement of Point 2(Lug pin hole) at normal operation condition

Direction	0 % Power(565 °F)	100% Power(625 °F)
X-direction motion of Point 2	1.684"	1.924"
Y-direction motion of Point 2	-2.208"	-2.233"

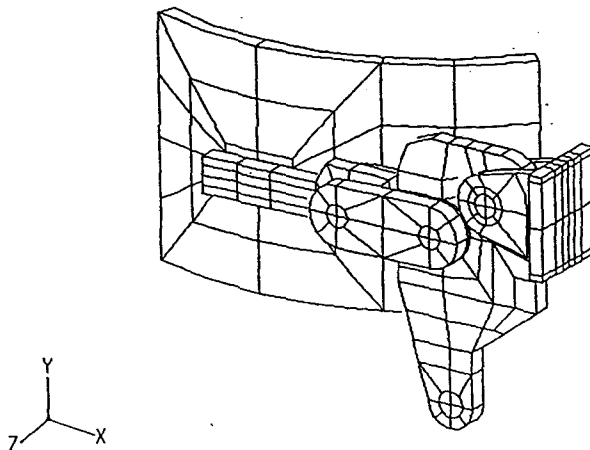


Fig. 3. Finite Element Model of the Snubber Linkage System

2.1.4 설계공차에 의한 스너버 이동거리의 해석

Fig. 1에 표시한 것과 같이 스너버 링크장치 계통은 각 부분이 5개의 핀(Pin)으로 연결되어 설계 허용공차(Design allowable tolerance)를 각각 가지게 된다. 따라서 각 핀에서의 공차 및 핀과 핀 사이의 거리공차를 고려하면, 총 2^{10} 에 해당하는 경우의 공차 해석을 필요로 하고, 호칭치수(Nominal dimension)에 대한 해석이 추가로 요구된다. 본 연구에서는 각각의 공차를 고려할 수 있는 프로그램을 작성하고, 공차를 고려한 최대, 최소값과 호칭치수에 의한 표준 값을 구하여 스너버의 이동거리 해석에 고려하였다. 초기값을 각 점에서 설계공차를 포함한 값으로 설정한 후, 차례로 10개의 변수에 대해 설계허용공차를 포함한 경우와, 포함하지 않은 경우를 조합하여 고려하였으며($2^{10}=1024$ 회), 마지막 1025번째는 공차를 포함하지 않은 호칭치수로 계산하였다.

2.1.5 이동거리 결정

Fig. 2에서 F_C 는 상온 조건에서의 스너버의 설치위치를 나타내며, F_H 는 정상운전 조건에서의 스너버의 위치를 나타낸다. Fig. 2으로부터 스너버의 이동거리 St 는 (2)식으로 정의한다.

$$S_f = F_H - F_C \dots\dots\dots(2)$$

모든 점에서의 이동량은 원자로 냉각재 계통의 정상운전 해석과 스너버 링크장치 계통의 각 부품의 열전달 해석에 의한 변형량과 설계공차에 따른 이동거리 변수를 모두 포함하여 결정되므로, Table 3, 4와 같이 스너버 이동거리는 최대, 최소 이동거리 및 표준 이동거리를 가지게 된다.

2.1.6 하중분담율의 결정

레버는 원자로 냉각재 계통의 열팽창을 증폭하여 스너버의 이동거리를 증가시키지만, 동적 하중은 스너버와 고정지지물로 분산시켜 증기발생기를 보호한다. 따라서 레버의 구조는 스너버의 이동거리와 강성계산에 있어서 가장 중요한 인자로서, 스너버의 이동거리와 강성계산에 선행되어야 한다. Fig. 4는 레버를 통하여 스너버와 고정지지물에 전달되는 하중을 자유물체도(Free body diagram)로 표시한 것이며, 스너버가 분담하는 하중분담율은 Fig. 4로부터 (3)식과 같이 정의된다.

$$L.R. = \frac{P_{2x}}{R_4} \dots\dots\dots(3)$$

따라서, 레버의 하중분담율은 레버에 대한 정적 구조해석(Static structure analysis)을 통하여 구할 수 있다. Fig. 6의 자유물체도로부터 힘과 모멘트에 대한 2차원 평형방정식은 (4), (5) 및(6)식과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0; & \quad P_{2x} - R_{0x} - R_{4x} = 0 \dots\dots\dots(4) \\ \sum F_y = 0; & \quad P_{2y} - R_{0y} - R_{4y} = 0 \dots\dots\dots(5) \\ \sum M_0 = 0; & \quad P_2 \cdot A \cdot \cos(180 - \theta - \phi) - R_4 \cdot E \cdot \cos(\alpha + \psi) = 0 \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

스너버에 작용하는 힘 R_4 는 (6)식으로부터 (7)식과 같이 주어진다.

$$R_4 = \frac{P_2 \cdot A \cdot \cos(180 - \theta - \phi)}{E \cdot \cos(\alpha + \psi)} \dots\dots\dots(7)$$

하중분담율은 (3)식의 정의와 (7)식을 이용하여 (8)식으로 표시된다.

$$L.R. = \frac{P_{2x}}{R_4} = \frac{P_2 \cdot \cos(90 - \phi)}{R_4} = \frac{E \cdot \cos(90 - \phi) \cdot \cos(\alpha + \psi)}{A \cdot \cos(180 - \theta - \phi)} \dots\dots\dots(8)$$

(8)식에 표시한 것과 같이 하중분담율은 상온상태와 정상운전 상태에서 발생하는 냉각재 계통의 열팽창현상에 의해서 서로 다른 값을 가지게 되며, Table 2에 이를 표시하였다.

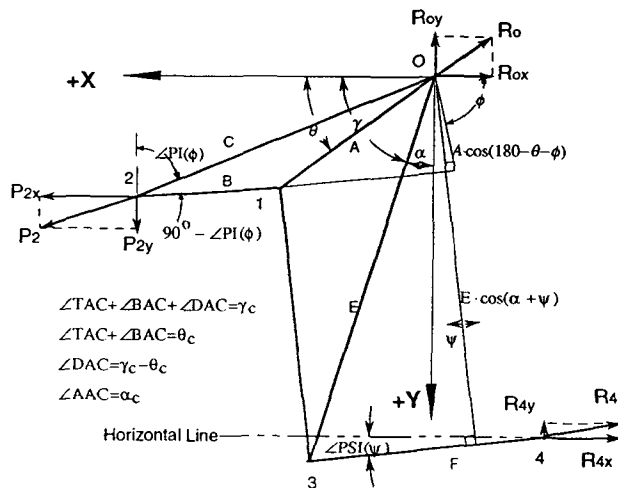


Fig. 4. Equilibrium of the Snubber Linkage System

Table 2. Lever Ratio

Condition	Lever Ratio
Cold Condition	4.65
Hot Condition	5.2

3. 해석 및 고찰

본 연구에서 제시한 스너버 이동거리 해석의 타당성을 검토하기 위하여, 건설중인 표준 가압형 경수로의 고온성능시험에서 실측한 스너버의 이동거리를 비교 검토하였다. 고온성능시험에서는 원자로 냉각재 계통의 온도를 상온 상태(68 °F)로부터 0 % 출력의 565 °F상태까지 냉각재의 온도와 압력을 상승시킨다. 스너버의 설치위치를 기준으로 하여, 스너버의 이동거리를 측정하여 Fig. 5에 표시하였다. Fig. 5에 표시한 것과 같이 온도에 따른 스너버의 길이는 선형적인 거동을 보이고 있다. Table 3과 4는 고온성능시험에서 실측한 스너버의 이동거리와 본 연구에서 제시한 해석방법을 통하여 얻은 결과를 표시한 것이다. Table 3과 4에 표시한 것과 같이, 실측한 이동거리와 스너버의 이동거리에 영향을 미치는 인자를 고려하여 계산한 치수들중 호칭치수만을 고려하면 최대 21.2 % (1.657")와 최소 17.6 % (1.377")의 오차를 얻는다.

스너버의 이동거리에 영향을 미치는 인자는 증기발생기의 이동거리, 링크장치 계통의 설계허용공차, 열팽창량 및 하중분담율로 구분할 수 있다. 원자로 냉각재 계통의 온도상승에 따른 격납 건물의 상대적인 열팽창량도 영향을 미칠 수 있다[1]. 스너버의 이동거리는 레버의 하중분담율에 의해 증폭되므로 스너버이동거리의 오차는 증기발생기를 중심으로 한 레버 기구의 이동거리를 기준으로 이해하여야 한다. 실측 이동거리의 평균 오차를(1.517") 레버에서의 이동거리로 환산하면 0.293" (1.517/5.2)로서 Table 1에서의 증기발생기 이동거리 1.684"만을 비교할 때 약 17.4 %의 편차를 보이고 있다. 원자로 냉각재 계통의 해석에 의한 증기발생기의 이동거리는 실측 결과에 대하여 4 - 8 % 크게 나타나는 것으로 관찰되고 있다[1]. 링크장치 계통의 열전달 해석에서 도입된 보수성과 구조물의 제작 과정에서 발생하는 치수효과 및 격납구조물의 상대적인 열팽창량을 고려하면 대체적으로 10 % 내외의 오차를 가지는 것으로 판단되며, 측정 과정상의 오차도 고려하여야 할 것이다. 열적과도 상태의 불확실성을 고려하면, 본 연구에 제시한 해석결과는 정해에 접근하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제시한 해석 방법은 효율적인 스너버이동거리의 설정에 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Steam Generator No. 1

Snubber No.	Measured Data			Calculated Data Snubber Stroke (Max/Nom/Min)	Error (Nominal)
	Cold Condition (68 °F) Snubber Length	Hot Functional Test (565 °F) Snubber Length	Snubber Stroke		
1	47.1"	53.55"	6.45"	7.886/7.827/7.769	1.377"(17.6%)
2	47.1"	53.46"	6.36"	7.886/7.827/7.769	1.467"(18.7%)

Table 4. Steam Generator No. 2

Snubber No.	Measured Data			Calculated Data Snubber Stroke (Max/Nom/Min)	Error (Nominal)
	Cold Condition (68 °F) Snubber Length	Hot Functional Test (565 °F) Snubber Length	Snubber Stroke		
1	47.06"	53.26"	6.20"	7.886/7.827/7.769	1.627"(20.8%)
2	47.09"	53.26"	6.17"	7.886/7.827/7.769	1.657"(21.2%)

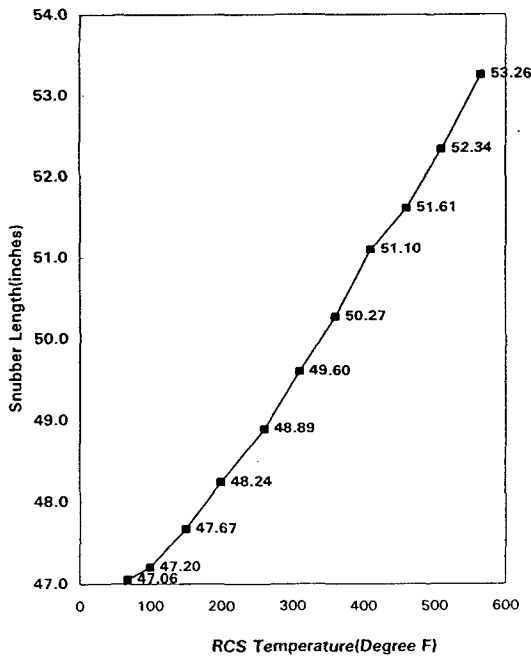


Fig. 5. Measured Snubber Length

4. 결론

증기발생기의 스너버 링크장치 계통의 기하학적인 모델을 사용하여 증기발생기의 스너버의 이동 거리를 해석하고, 건설중인 1000 MWe 가압경수로의 고온성능시험동안에 실측한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스너버의 이동거리를 해석할 수 있는 기하학적 기구를 규명하였으며, 평형방정식을 이용하여 레버기구의 하중분담을 해석 방법을 제시하였다.
2. 실측 결과와 비교한 결과 본 연구에서 제시한 해석 결과는 10 % 내외의 정확도를 가지는 것으로 확인되었으며, 스너버 이동거리의 설계 기준으로 활용할 수 있음을 알았다.
3. 스너버의 이동거리는 증기발생기의 이동거리가 레버기구의 하중분담율에 의하여 증폭됨으로, 스너버의 이동거리를 설정할 경우 열적과도 상태에 대한 충분한 보수성을 고려하여 설계하여야 한다.

참고문헌

1. 윤기석 외 3인 '가압 경수로의 냉각재 계통 열팽창과 거동에 관한 연구', 한국원자력학회 논문집, Vol. 27, No.3, 1995
2. J. P. Holman, 'Heat Transfer', 4th edition.
3. PATRAN, Release 2.4, 1990, An interactive computer modeling program, PDA Engineering
4. ASME CODE Section III, Boiler & Pressure Vessel, 1989 edition, including 1989 Addenda.
5. Warren C Young, 'ROARK'S Formulas for Stress & Strain', 6th edition, McGraw-Hill Book Company.
6. S. P. Timoshenko, J.N.Goodier 'Theory of Elasticity', 3rd, edition, McGraw-Hill Book Company.