2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

존슨 노이즈 온도계측기술에 대한 고찰

Survey on Johnson Noise Thermometry for Temperature Instrumentation

황인구, 김용균, 김정수, 문병수

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요　약

존슨 노이즈를 이용하는 온도측정법은 기존의 저항체온도계 및 열전대 온도계를 사용할 때 보다 높은 온도를 교정작업 없이도 장기간 사용할 수 있다는 점에서 매우 유익한 온도계측방법이다. 그러나 낮은 전기적 신호를 주변의 불필요한 환경잡음으로부터 격리하는 것이 어렵고, 추가적인 신호처리를 위한 전자회로와 방법이 충분히 개발되지 못하여 실험단계에 머무르고 있다. 본 논문은 존슨 노이즈 온도측정기술에 대한 원리와 구현방법에 대한 지금까지의 현황에 대한 내용을 기술하였다. 노이즈 온도계측방식의 핵심은 적절한 방법과 수단으로 주변잡음을 차단하고 미약한 존슨 노이즈 신호를 검출하여 절대 온도에 비례하는 전기적 신호를 도출하는 것이다. 최근의 디지털 기술에 의한 고속 신호처리방법을 이용하면 이 존슨 노이즈 온도계를 기존방법보다 용이하게 구현하는 데 있어서 더욱 용이할 것으로 추정된다.

Abstract

Johnson Noise Thermometry is an drift-free temperature measurement method which is able to maintain the best accuracy without calibration for a long period. Resistance Temperature Detectors (RTDs) and Thermocouples used widely in power plants have the drift problem which causes a measurement error. Despite the advantage of Johnson Noise thermometry, it has not been used because it is very sensitive to electromagnetic noise and environment. It also requires more complicated signal processing methods. This paper presents the characteristics of Johnson Noise thermometry and various implementation method proposed over the past decades time period. The key factor in development of a noise thermometer is how to extract the tiny noise signal from the sensor and discriminate out the unnecessary noise interference from the environments. The new digital technology of fast signal processing skill will useful to challenge the existing problems fir commercialization of noise thermometry.

1.　서론

발전소에 사용되는 온도 계측기는 주로 RTD(Resistance Temperature Detector)와 열전대(T/C : Thermocouple)의 두 가지 형태가 주로 사용된다. 이 온도계는 모두 교정을 한 후 사용하여도 시간이 경과 함에 따라 재질의 변동이나 환경적 영향으로 편차(Drift)가 발생하게 된다[1]. 이 특성변화에 대한 측정오차를 줄이기 위해서는 주기적으로 온도 센서를 표준센서나 온도표준 등의 장치를 이용하여 교정작업을 수행하여야 한다. 존슨 노이즈 온도센서는 이 Drift 현상이 없이 절대온도를 측정할 수 있으므로 매우 정확도가 높고 안정적인 온도측정을

할 수 있다. 그러나 이 것은 매우 미세한 전기적 잡음의 크기를 측정해야 하므로 전자기파 등의 주변환경에 매우 예민하고 신호처리가 복잡하게 되어 산업용 계측기로 제작하기가 곤란한 단점이 있다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 주기적 교정작업이 어려운 우주산업이나 기타의 고온측정에 적용하기 위한 방안의 하나로 다양한 방안이 제시되어왔다[2-7]. 원자력발전소의 운전주기가 늘어남에 따라 이 기간동안의 각종 계측기의 드리프트 편차를 고려해야 하고 또한 차세대 원자로로 고려되는 액금로, 개스 냉각로 등은 고온을 좀더 정확하게 측정해야 되므로 드리프트 편차가 없는 존슨 노이즈 온도측정방식이 대안이 될 수 있다. 본 논문은 이 온도 측정방식의 개념을 소개하고 기존에 발표되거나 제안된 존슨 노이즈 온도측정 실현방식을 조사하여 기술한 것이다. 노이즈 온도측정방법에서는 측정점 온도에 비례하여 발생한 잡음과 측정회로에서 생기는 잡음을 구분하여 순수한 온도관련 잡음신호만을 추출하는 것이 가장 중요한 관건이 된다.

2. 존슨 노이즈 온도측정의 이론적 배경

어떤 저항체든지 그 물질의 전기 전도성을 결정하는 전자(conduction electron)는 온도에너지에 의해서 불규칙 운동을 하게 된다. 이 불규칙 운동으로 말미암아 각 순간 순간에는 이 저항체의 전기적 불균형이 형성된다[2]. 물론 평균적으로는 영(zero)전위가 되지만 온도가 올라 갈수록 전자의 운동이 활발하여 지므로 이 불균형성으로 인한 전기적 잡음의 크기는 커지게 된다. 이 현상은 H, Nyquist 의 이론적 근거와 J. B. Johnson 의 실험적 결과에 의해서 밝혀졌다[3]. 부하가 연결되지 않은 개방회로에서 이 존슨 잡음에 의해서 저항체의 양단에 발생되는 전기적 교류신호전압은 다음식과 같이 표시된다[2-4].

$$e_n^2 = \frac{4hfR}{e^{hf/kT} - 1} \quad [V^2/Hz] \quad \text{------(1)}$$

여기서 h 는 플랭크 상수(6.626 x 10 $^{-34}$ [Joule-sec], k 는 볼츠만 상수(1.68 x 10 $^{-23}$ [Joule/K], f 는 주파수, R 은 저항값, 그리고 T 는 절대온도이다. (1)식에서 온도 100°K 이상이고 주파수가 1GHz 이하의 범위에서는 hf/kT << 1 이므로 (1)식은

$$e_n^2 = \frac{4hfR}{e^{hf/kT} - 1} = 4hfR\Big/\left(1 + \tfrac{hf}{kT} + \tfrac{1}{2}\left(\tfrac{hf}{kT}\right)^2 ..... - 1\right) \quad [V^2/Hz] \quad \text{------ (2)}$$
$$\approx 4hfR\Big/\left(\tfrac{hf}{kT}\right) = 4kTR \quad [V^2/Hz]$$

가 된다.

(2)식은 주파수에 관계없는 백색잡음(white noise)을 나타낸다. 실질적인 측정에서는 측정 주파수 대역폭에 해당하는 신호가 측정되는 것이므로 측정전압의 RMS 값은

$$\sqrt{v_n^2} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad [V] \quad \text{------ (3)}$$

이 된다. 여기서 Δf 는 측정 주파수대역폭이다.

이 개방전압신호에 대한 단락 전류신호는 (4)식과 같이 될 것이다.

$$\sqrt{i_n^2} = \sqrt{4kT\Delta f \tfrac{1}{R}} \quad [A] \quad \text{------ (4)}$$

(3)과 (4)를 곱하면 이 존슨 노이즈 신호의 전력(Power)을 (5)식과 같이 구할 수 있다.

$$p_n = 4k\Delta fT \quad [w] \quad \text{------ (5)}$$

이 식에서 전력신호는 단지 측정 대역폭과 절대온도에만 영향을 받으므로 재료의 특성변

화에 의한 저항 R 의 변동에도 불구하고 측정 대역폭을 일정하게 하면 항상 정확한 절대온도를 측정할 수 있게 된다. 그림 1 은 존슨 노이즈 온도측정의 개념을 그림으로 나타낸 것이다.

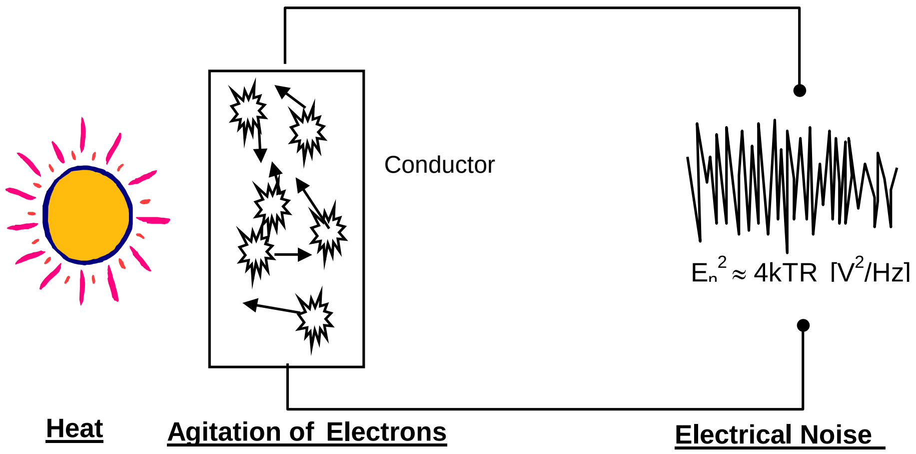

그림 1. 존슨노이즈 온도계측의 원리

3. 존슨 노이즈 신호 측정방법

노이즈 온도계는 2 절에서 도출한 세가지 물리량, 즉 전압, 전류, 혹은 전력을 측정하여 이를 바탕으로 온도를 계산하게 된다. 세가지 모두 절대 온도 값을 제공해 줄 수 있다. 그러나 센서로부터 나오는 신호의 크기가 전압단위로는 1 마이크로 볼트보다 작고, 전류로는 수 나노 암페어(nano-Ampere) 정도이기 때문에 이 미세한 신호를 직접 측정하여 온도로 변환하여 사용되기에는 어려움이 많다. 존슨 노이즈의 측정회로를 구성하였을 경우 증폭기의 내부잡음, 케이블로부터 나오는 조그만 전기적 잡음 등에 매우 취약하여 다른 노이즈 신호와 센서로부터 오는 존슨 노이즈와의 구분이 매우 어려운 것이다. 오랫동안 이 문제를 극복하기 위하여 여러 가지 측정방법이 제안 되었다. 다음은 그 동안 발표되었던 대표적인 존슨 노이즈 측정방법을 개념적으로 기술한 것이다.

3.1. 비교 측정법(Ratio Method)

비교 측정법은 1949 년 Garisson 과 Lawson 에 의해 제안되었다[4-6]. 이것은 두 개의 저항체를 센서로 이용하여 하나는 피측정 온도에 대한 센서로 사용하고 하나는 기준점 온도에 대한 기준점 센서로 사용하여 두 개의 저항체의 비와 기준점의 온도를 이용하여 측정하는 방식이다. 그림 2 에서 기준점의 저항값 Rr 을 조절하여 측정점의 노이즈 수준과 같은 값이 되도록 한다. Ts 와 Rs 는 피측정 지점의 온도와 저항값이고 Rr 은 알고 있는 온도의 기준점에 설치된 가변 저항이다. 식(3)으로부터 두 저항체로부터 측정되는 신호가 같으면 TsRs = TrRr 이 성립한다. 증폭기에서 발생되는 증폭율 변동 및 비선형성 오차는 두 저항체에 모두 공통적으로 반영되므로 두 신호간의 차이는 존슨 노이즈에 의한 차이가 되고 두 측정신호가 같으면 위의 식으로부터

$$Ts = \frac{TrRr}{Rs} \quad [^{\circ}K] \qquad (6)$$

가 된다.

이 방식의 단점은 기준점의 온도 Tr, 저항 Rr, 측정점의 저항 Rs 의 측정과정에서 오차를 유발하고, 신호증폭기의 내부 임피던스와 각 저항체 소자간의 소스 임피던스 정합이 같지 않으므로 생기는 노이즈에 의한 오차가 있다. 임피던스 부정합을 극복하기 위해 같은 값의 저항치를 사용하면서 노이즈 전압의 균형은 감쇄기를 사용하여 이 감쇄비에 의하여 피측정점의 온도를 추정하는 방법이 제안되기도 하였다[5]. 또한 전치증폭기의 고주파 잡음을 제거하기 위해서 저주파영역의 대역필터(Band-pass filter)를 주로 사용한다.

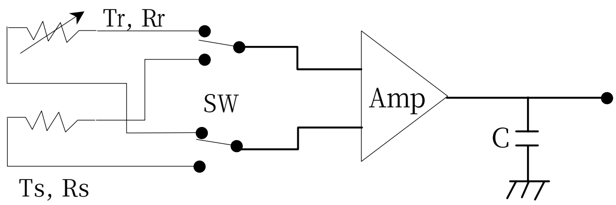

그림 2. 비교법에 의한 측정법

3.2. Correlation 방법

증폭기 및 회로에서 발생하는 잡음의 상쇄를 위해 Correlation 방법을 사용할 수 있다[4-6]. 센서를 제외한 신호전달 및 처리회로를 이중으로 설치하여 두 채널에서 나오는 각 신호를 Correlation 시키면 잡음이 제거된다. Correlation 의 원리는 그림 3 에서와 같이 두개의 채널에서 오는 신호를 서로 적산(multiplication)하면 센서로부터 오는 공통신호는 같은 극성과 같은 크기를 가지고 있으므로 강조가 되고 분리된 두 채널에서 발생된 불규칙 잡음은 극성과 크기가 다르므로 크기가 작아지거나 제거된다. 이 Correlator-Amplifier 구조는 실험실 등에서 낮은 온도를 측정하는데 유용하다. 그러나 이 방법 또한 3.1 절의 방법과 마찬 가지로 센서의 저항을 측정해야 하는 부담이 있다.

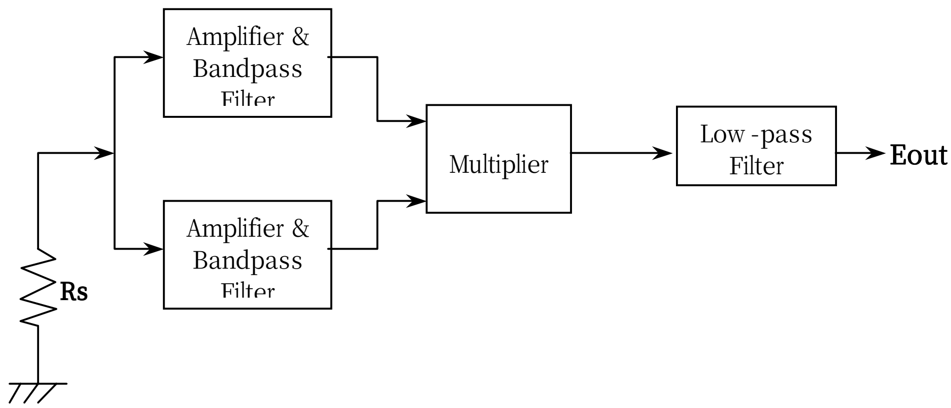

그림 3. Correlator-Amplifier 를 이용하는 존슨 온도측정기 구성도

3.3. Noise Power 방법

센서의 저항치를 측정해야 하는 부담을 덜기 위하여 존슨 노이즈 신호의 전력량(전류 x 전압)을 측정하는 방안이 1974 년 Borkowski 와 Blalock 에 의해서 제안되었다[4,5,7]. 전압을

측정하는 방법보다 전력을 측정하는 것은 두 가지 장점이 있다. 식(5)에서 알 수 있는 바와 같이 측정값이 온도와 선형적으로 비례하므로 어떤 계산(전압인 경우 제곱)이나 처리가 필요 없이 간단하다는 것이며, 또 하나의 장점은 센서의 저항을 측정할 필요가 없으므로 저항 측정에서 오는 오차를 줄일 수 있다. 그러나 전력량을 측정하는 방법은 연결케이블에 유도되는 외부잡음 및 열잡음, 그리고 증폭기에서 생기는 내부잡음에 더 예민하게 된다[4].

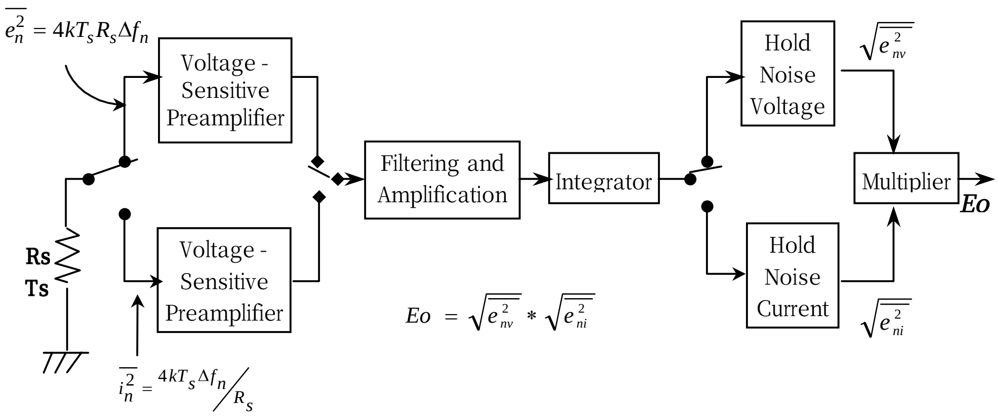

그림 4. Johnson Noise Power Thermometer(JNPT) 구성도

그림 4 는 단일 센서를 사용하면서 절환 스위치를 사용하여 전류와 전압신호를 측정하는 구성도이다. 절환 스위치를 구현하는 것 대신에 동일한 한 쌍의 센서를 사용하여 하나는 전압신호를 검출하는데 사용하고 나머지 하나는 전류신호를 도출하는데 전용하는 시스템으로 구성할 수도 있다[6].

3.4. Dummy 센서 용법

이 방법은 Decreton[3]에 의해서 제안된 방법으로 센서를 저항체를 사용하는 존슨 노이즈 측정용 소자와 무저항체(short circuit or dummy)를 사용하는 잡음 측정용 소자를 함께 결합하여 구성한다. 측정지점에 Zero 저항값을 가지는 소자의 측정 채널은 존슨 노이즈와는 관계없이 선로와 증폭기의 잡음에 의한 오차신호만 발생하고 저항체와 연결되는 측정채널은 존슨 노이즈와 선로 및 증폭회로의 잡음신호가 합하여져서 출력으로 나타난다. 따라서 존슨 노이즈와 선로 잡음이 섞여 있는 저항소자의 전력량에서 선로잡음만을 나타내는 무저항소자의 Dummy 선로의 잡음의 전력량을 빼면 순수한 존슨 노이즈의 전력량만 계산된다(그림 5).

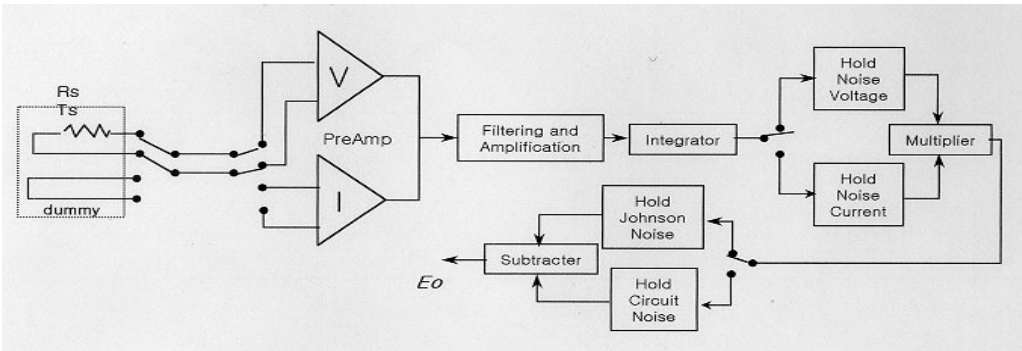

그림 5. Dummy 센서 이용법

3.5. 공진회로(Tuned-Circuit)이용법

ORNL 은 입력회로에 RLC 동조회로를 사용하여 캐패시터에서 측정되는 신호의 크기가 센서의 저항값에 독립적으로 절대온도에만 비례하도록 회로를 구성하였다. 그림 6 에서 캐패시터에 걸리는 잡음전압의 크기는 식(7)과 같다[6]. 이것의 단점은 전치증폭기의 수신 대역폭에 비해 동조회로의 대역폭이 매우 좁으므로 넓은 대역의 신호를 모두 수신하지 못하는 관계로 증폭기 이후의 회로에서 신호 대 잡음비가 작아진다.

$$\overline{v^2} = \frac{kT}{C} \quad (7)$$

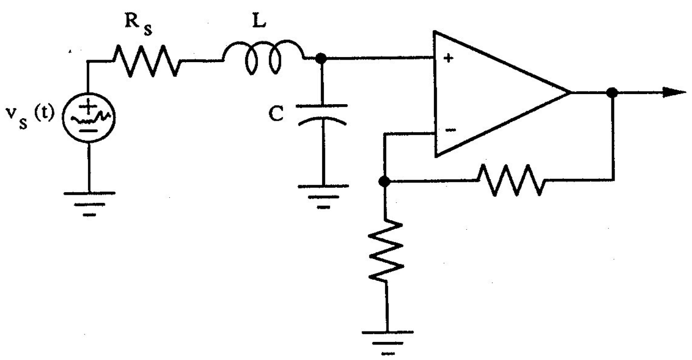

그림 6. 동조회로를 이용하는 존슨 노이즈 온도계

4. 평가 분석

존슨 노이즈를 이용하는 온도 측정장치는 이론상 절대온도를 측정할 수 있는 방법이지만 신호의 크기가 미세하여 산업현장 및 원자력 발전소등에는 사용되지 못하였다. 지금까지 제시된 여러 가지 방법들은 각기 장점과 단점이 있으므로 절대적으로 성능을 판단하기는 어렵다. 발전소 등에 이용하기 위해서는 내환경 전치증폭기를 센서 가까이에 설치하여 센서와 증폭기사이의 연결선로에서 유입되는 잡음을 줄이고 증폭기 이후의 신호경로에서 발생되는 잡음은 두 개의 선로를 이용하는 Correlation 기법과 대역필터 등을 사용하여 제거하는 것이 바람직하다. 센서와 전치증폭기의 사이가 길 때는 dummy 센서를 이용하여 선로에서 생기는 외부간섭신호를 제거하도록 측정회로를 설계하는 것이 타당하다. 최근의 마이크로 프로세서 기술을 이용하여 Correlation 계산이나, 측정신호의 주파수 스펙트럼상에서 잡음제거, 그리고 측정치를 온도변수로 환산하는 알고리즘 등을 처리하는 방법이 하나의 새로운 방법이 될 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업 일환으로 수행되었음.

참고문헌

[1] Hashemian H et al, "Aging of Nuclear Plant Resistance Temperature Detectors," Analysis and Measurement Services Corporation, NUREG/CR-5560, June 1990.

[2] Robert Michael J., et al, "Application of Johnson Noise Thermometry to Space Nuclear Reactors,"

Proceedings of the 6th Symposium on Space Nuclear Power Systems, Albuquerque, NM, Jan. 8-12, 1989. Vol. 1

[3] Oakes L.C. and Shepard R.L., "Johnson Noise Thermometer for High-radiation and High Temperature Environments," Manuscript for 5th Symposium on Space Nuclear Power Systems, Albuquerque, NM, Jan. 11-14, 1988.

[4] Decreton Marc C., "High Temperature Measurement by Noise Thermometry," IAEA International Working Group on Gas Cooled Reactors Specialists' Meeting on Gas Cooled Reactor Core and High Temperature Instrumentation, Windermere, England, June 14-17, 1882.

[5] Blalock T.V. and Shepard R.L., "A Decade of Progress in High-Temperature Johnson Noise Thermometry," Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol.5, Part2, American Institute of Physics, Washington, D.C., pp. 1219-1237, 1982.

[6] Shepard R.L. and Weiss, J.M., "Use of Sp-100 Thermometry Technology to Improve Operation of Electric Power Plants," IECTEC 96, Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washongton, D.C. pp114-118, 1996

[7] Borkowski C.J. and Blalock T.V., "A New Method of Johnson Noise Thermometry," Rev. Sci., Instrum., 45(2), 151, 1974.