

소듐냉각고속로를 위한 온도 영향 보정형 압력전송기 개념 개발

김병연* · 이제환* · 조영일* · 어재혁* · 김형모**†

Development of Pressure Transmitter Compensating Temperature Effect for Sodium-cooled Fast Reactor

Byeong-Yeon Kim*, Jewhan Lee*, Youngil Cho*, Jaehyuk Eoh*, Hyungmo Kim**†

Key Words : Liquid metal(액체금속), High temperature(고온), Temperature effect compensation(온도 영향 보정), Pressure transfer material(압력전달 물질), Diaphragm(다이하프램)

ABSTRACT

The sodium maintains the liquid phase in wide range of temperature and its heat transfer characteristics are excellent. It can be used as a coolant for heat transport system such as sodium-cooled fast reactors. However, the operating temperature is high and it must be isolated to prevent chemical reaction due to its high reactivity. The pressure is one of the key I&C factors to monitor and control the thermal-fluidic system and so the sensing technology for liquid sodium is very important. For the pressure sensor for liquid sodium, NaK-filled type pressure transmitter which uses NaK as a pressure transfer material has been developed and generally used. For the NaK-filled type, effect of temperature is required to be minimized and compensated since thermal expansion of inner pressure transfer material affects output signal at high temperature. In this study, a novel concept of diaphragm type pressure transmitter is proposed for compensating temperature effect. A temperature compensated concept for pressure transmitter is verified by experiments using a set-up which enables temperature and pressure control of a chamber.

1. 서 론

소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)는 높은 사고저항성과 안전성, 우수한 우라늄 자원 활용성을 가지고 있는 제4세대 원자력 발전 시스템 중에서도 가장 기술적 성숙도가 높은 시스템으로 평가받고 있다^(1,2). 이러한 SFR은 소듐(Na)의 높은 비등점으로 인해 거의 상압에서 운전이 가능하며, 냉각재인 소듐은 타 냉각재 대비 매우 큰 열 마진 및 매우 낮은 구조재 부식률 등 뚜렷한 장점을 가진다. 그러나 동시에 소듐의 높은 화학적 반응성으로 인해 반드시 격리되어 운용되어야 한다. 이러한 상황에서 소듐의 압력을 측정하는 것은 시스템을 감시 및 운전하는 데에 있어 핵심적인 기술 중의 하나라고 할 수 있다.

액체소듐과 같이 상온에서 고화(solidification)가 우려되

는 압력계는 흔히 다이하프램(diaphragm)이 적용되어 도압관 내에 시스템 유체가 유입되는 것을 막아준다. 즉, 시스템 유체인 소듐은 다이하프램에 의해 격리되고, 압력은 다이하프램을 거쳐 도압관 내부를 채우고 있는 별도의 압력전달 물질에 의해 압력 센서로 전달된다. SFR의 경우에는 압력전달 물질로는 상온에서도 액체 상태로 유지되는 소듐-포타슘(NaK)을 사용한 NaK 봉입식 압력계가 주로 개발되어 사용되어 왔다⁽³⁻⁹⁾.

그러나 SFR의 경우와 같이 액체 금속을 사용하는 열유체 시스템은 일반적으로 고온에서 운전된다. 열유체 시스템의 온도가 상승하게 되면, NaK와 같은 압력전달 물질은 도압관 내에서 열팽창을 일으키며, 한정된 공간 안에서 비압축성 유체의 열팽창은 그대로 압력 센서에 압력 증가 신호를 인가하게 된다. 다시 말해, 기존에 주로 사용되던 압력전달 물질이

* 한국원자력연구원 다목적원자로기술개발부 (Versatile Reactor Technology Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute)

** 경상국립대학교 기계공학부 (School of Mechanical engineering, Gyeongsang National University)

† 교신저자, E-mail : hyungmo@gnu.ac.kr

도입된 다이어프램 방식의 압력전송기는 시스템의 온도 변화에 따라 압력전달 물질의 부피가 변하게 되고, 이것이 압력 계측값을 왜곡하게 되는 것이다.

이러한 단점을 극복하기 위해, 기존에는 온도에 의한 영향을 없애지 못하고 최소화하는 방안을 채택해왔다. 압력전달 물질을 열팽창계수가 최대한 낮은 물질을 사용하거나, 모세관 적용을 통해 도압관 내 압력전달 물질의 부피를 최소화하는 것이 대표적이다. 또한, 일부 제품에서는 압력전달 물질이 봉입된 부분의 온도를 측정하여 압력 신호를 보정하여 사용하거나, 압력전달 물질 봉입 부분의 온도를 일정하게 유지시키기 위해 별도의 쿨링 시스템을 구성하는 등의 시도가 있어 왔다⁽¹⁰⁾.

그러나 이러한 방법은 근본적인 해결책이 되지 못하여, 상용 압력전송기를 정확하게 사용하기 위해서는 ‘압력이 걸리지 않은 상태의 사용하고자 하는 온도 조건에서 영(zero)점을 세팅하고 사용’해야 하는 등 불편함을 안고 있다. 특히, 고온에서 운전하는 액체 금속 기반 시스템이 주로 상압 혹은 저압 시스템이라는 점을 고려하면 온도 영향으로 인한 압력 신호의 왜곡은, 측정된 압력 신호의 신뢰성을 훼손하는 매우 중요한 문제로 반드시 해결되어야 한다. 이에 본 연구에서는 기존의 다이어프램 방식의 압력전송기의 기술적 단점을 해결하기 위해 새로운 개념을 개발하고 이를 실험적으로 검증해 보았다.

2. 개념 및 방법

2.1 온도 영향 보정 개념

본 연구에서 제안하는 개념은 기존 압력전달 물질 봉입식 다이어프램 압력전송기의 구조를 개선하여, 트압력전달 물질의 온도 변화에 따른 부피변화가 압력 측정에 미치는 영향을 스스로 배제할 수 있도록 개발되었다. 이를 위해 제안된 압력전송기는 Fig. 1과 같이 동일한 규격으로 제작된 두 개

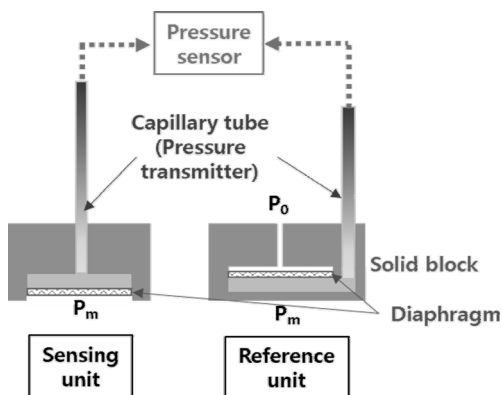


Fig. 1 Conceptual drawing of pressure transmitter compensating temperature effect

의 다이어프램과 그에 연결된 도압관을 가지는 두 개의 유닛, 즉 측정 유닛(Sensing unit)과 기준 유닛(Reference unit)으로 구성된다.

측정부의 온도가 올라가게 되면, 기존의 다이어프램을 포함한 압력전송기와 동일한 구조를 가지는 Sensing unit에서는 도압관 내의 압력전달 물질이 팽창하게 되고, 이는 실제 측정하고자 하는 압력값(P_m)보다 큰 압력신호가 압력센서(Pressure sensor)로 전달되는 상황을 야기한다. 따라서 Sensing unit에서 측정되는 압력(P_{sen})은 식 (1)과 같이 “측정하고자 하는 시스템 압력(P_m) + 온도 영향으로 왜곡되는 압력(P_{add})”이 동시에 측정된다. 반면, Reference unit은 Sensing unit과 동일한 규격의 다이어프램과 도압관을 가지지만, 다이어프램이 노출되는 압력경계가 측정부의 압력(P_m)이 아니라, 대기압(P_0)이 된다. 즉, Reference unit이 압력센서로 전달하는 신호(P_{ref})는 측정하고자 하는 P_m 과 무관하게 열팽창에 의해 추가적으로 인가되는 압력값이라고 볼 수 있고, 만약 두 유닛의 구조와 압력전달 물질이 노출되는 온도 조건이 거의 유사하다고 가정하면, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 식 (3)과 같이 두 유닛간의 신호를 빼 주게 되면, 시스템의 온도가 상승 또는 하강함에 따라 압력센서에 인가되는 압력신호가 왜곡되는 영향을 배제하여 보다 정확한 압력 측정이 가능해진다.

$$P_{sen} = P_m + P_{add} \quad (1)$$

$$P_{ref} \approx P_{add} \quad (2)$$

$$P_m = P_{sen} - P_{add} \approx P_{sen} - P_{ref} \quad (3)$$

2.2 개념 검증 시험 준비

해당 개념이 실제로 타당한지를 판단하기 위해 실험적으로 검증하기 위해, Fig. 2와 같이 각각의 유닛의 특성을 반영한 시작품을 제작하였다.

앞에서 설명한 바와 같이 Sensing unit은 일반적인 다이어프램 압력계와 동일한 구조를 가지지만, Reference unit의 경우는 다이어프램을 측면으로 분기된 채널의 끝에 설치하여 대기압에 노출시켰고, 실제 시스템에 연결되는 부분은 solid plate로 막아 압력 전달을 막았다. 개념 검증을 위한 시작품의 압력전달 물질로는 300℃까지 버틸 수 있는 실리콘 오일을 삽입하였고, 저압에서도 민감하게 신호를 확인할 수 있도록 다이어프램의 직경은 약 30 mm 정도로 상용 압력계의 다이어프램보다 크게 제작하였다. Reference unit의 solid plate 부분은 압력에 의해 변형이 일어나지 않도록 충분한 두께로 제작하고, 사전 가압 실험을 통해 시스템 압력이 전달되지 않음을 확인하였다.

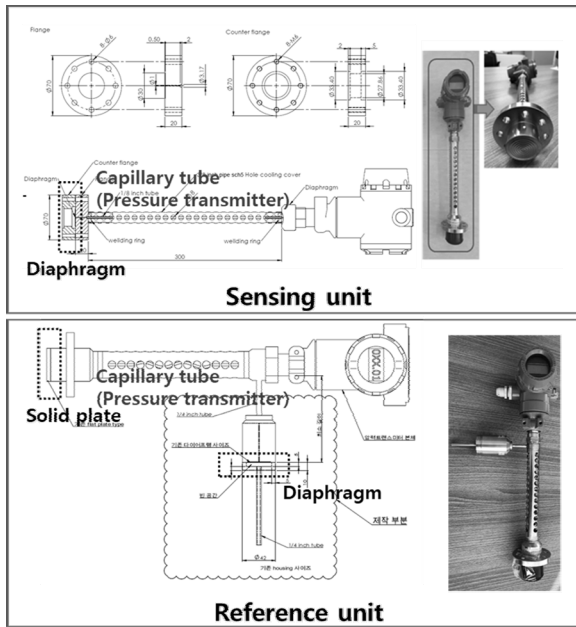


Fig. 2 Prototype of PT for concept verification

검증에는 온도를 가변하면서 압력을 조절할 수 있는 Fig. 3의 실험 장치를 사용하였다. 단열재로 감싸진 압력 챔버의 외곽에는 세라믹 몰드 히터(13 kW)가 설치되어 있고, 챔버에는 신호 비교를 위해 상용 NaK filled 압력계를 포함한 여러 압력계가 동시에 설치될 수 있도록 제작하였다. 챔버 내부의 압력은 별도의 설치된 Ar 보무를 통해 가압할 수 있고, 필요시 venting line을 통해 감압할 수 있다. 온도 유지를 위해 히터는 PID 제어로 출력을 조절하며, 압력 신호는 1 Hz 주기로 DAQ를 통해 취득하였다.

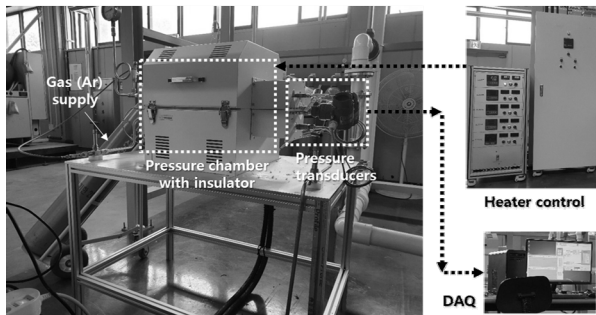


Fig. 3 Experimental set-up

Table 1 Test matrix (pressure and temperature conditions)

Temp.(°C) \ Press.(kPa)	0	25	50	75	100
130	○	○	○	○	○
180	○	○	○	○	○
230	○	○	○	○	○
270	○	○	○	○	○

시험 방법은 먼저 Ar 가스를 먼저 충전한 후에 원하는 온도와 압력 조건을 형성, 이후 정상상태를 유지하는 것을 확인 후 측정 및 데이터 저장을 수행하였다. Table 1은 실제 시험을 수행한 목표 압력과 온도 조건으로, 총 20 cases이다.

3. 검증 실험 결과

3.1 실험 결과

Table 2는 전체 개념 검증 실험 결과를 나타낸다. P_m은 온도 영향을 받지 않도록 충분히 챔버에서 이격된 Ar 공급라인에서 측정된 실제 압력값을 의미하고, P_{ref}는 Reference unit의 압력신호, P_{sen}은 Sensing unit의 압력신호를 나타낸다. 모든 측정값은 정상상태 도달 후 10분 동안의 평균값을 취해 사용하였으며, 온도의 경우에는 10분 동안 측정된 온도의 평균값이 목표 온도와 1.0°C 이내의 차이를 보이는 구간을 선정하였고, 0 kPa의 P_{ref} 신호를 토대로 분석해 보면 이는 최대 0.05 kPa 미만의 영향(가장 온도에 대한 압력 변화 영향이 큰 230~270°C 실험 기준)으로 나타났다.

Table 2 Test result of measuring pressure

Test ID (Temp.)	PT Tag	Measured Pressure (kPa)				
		0	25	50	75	100
TEST-PT-01 (130°C)	P _m	-0.01	21.970	50.116	77.221	101.42
	P _{ref}	3.2767	3.3216	3.2513	3.1840	3.1390
	P _{sen}	4.4411	26.474	54.508	81.549	105.75
	P [*]	1.1644	23.152	51.257	78.365	102.61
	Diff ^{**}	-1.17	-1.18	-1.14	-1.14	-1.19
TEST-PT-02 (180°C)	P _m	-0.01	24.028	51.562	76.675	99.794
	P _{ref}	4.6904	4.6764	4.5644	4.4920	4.4189
	P _{sen}	7.4511	31.362	58.652	83.726	106.77
	P [*]	2.7606	26.685	54.088	79.234	102.35
	Diff ^{**}	-2.77	-2.66	-2.53	-2.56	-2.56
TEST-PT-03 (230°C)	P _m	-0.01	24.125	49.318	75.875	100.12
	P _{ref}	6.4493	6.4205	6.3730	6.3154	6.2146
	P _{sen}	11.844	35.848	60.948	87.413	111.46
	P [*]	5.3950	29.427	54.575	81.098	105.25
	Diff ^{**}	-5.41	-5.30	-5.26	-5.22	-5.13
TEST-PT-04 (270°C)	P _m	-0.01	25.246	50.186	76.260	101.11
	P _{ref}	8.4720	8.4388	8.3870	8.3239	8.2418
	P _{sen}	15.862	40.943	65.802	91.808	116.54
	P [*]	7.3904	32.505	57.415	83.484	108.30
	Diff ^{**}	-7.40	-7.26	-7.23	-7.22	-7.18

*P' = P_{sen} - P_{add}

**Diff = P' - P_m

측정된 신호를 살펴보면, 먼저 P_ref는 시스템의 압력이 증가해도 거의 변하지 않는 반면, P_sen은 같은 압력에서 온도만 증가해도 꾸준히 증가하는 신호를 출력하고, 결과적으로 온도 영향이 배제된 참값이라고 볼 수 있는 P_m과의 이격이 점차 커지는 것을 확인할 수 있다. 해당 개념에서 제안하고 있는 온도 영향이 보정된 압력 신호는 P_sen과 P_ref의 차이에 해당하는 값으로, P_m과의 차이가 상대적으로 높은 온도 조건에서 다소 증가하기는 하지만, 기존 압력계의 신호라고 볼 수 있는 P_sen 신호값을 그대로 사용하는 것보다 훨씬 온도 변화에 의한 압력 신호 왜곡 영향을 잘 상쇄하고 있음을 알 수 있다.

3.2 성능 지표 평가

보다 정량적으로 해당 개념 검증 시험 결과를 평가하고자, 직선성(Linearity)과 정확도(Accuracy)에 대해 정량적인 분석을 수행하였다. 먼저 직선성은 계측기의 정특성 평가항목 중 하나이며, 이상적인 계측기의 출력은 입력에 대하여 선형 관계를 가진다. 실제 계측기의 특성 곡선과 이상적인 특성곡

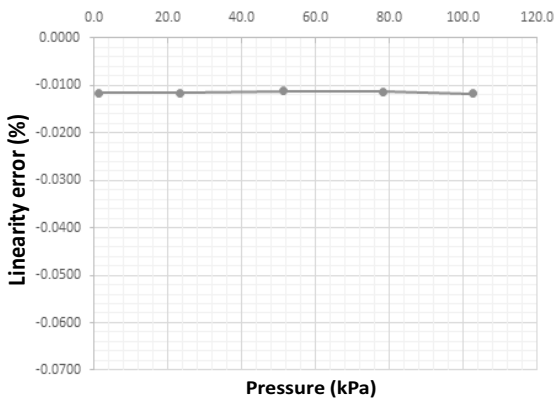
선의 차이를 나타내는 직선성 오차는 식 (4)에 의해 정의되었다. 이 때 X는 온도 보정 개념이 적용된 측정값[kPa], W는 선형회귀직선에서 X에 대한 해당 값, Y는 온도 보정형 압력신호의 0kPa 측정값[kPa], 그리고 Z는 온도 보정형 압력계 100kPa에서의 측정값[kPa]을 나타낸다.

$$\epsilon(\%) = \left(\frac{X - W}{Z - Y} \right) \times 100 \quad (4)$$

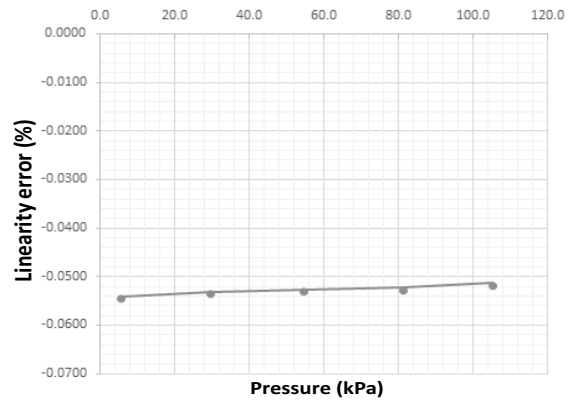
Table 3은 온도 보정 개념이 적용된 압력 신호의 직선성 평가결과를 나타내고, Fig. 4는 130℃, 180℃, 230℃, 270℃

Table 3 Linearity evaluation result

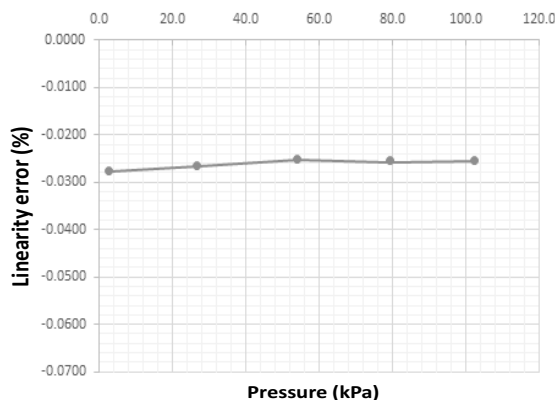
Temp. (°C)	Linearity	Pressure condition (kPa)				
		0	25	50	75	100
130	Error (%)	-0.0116	-0.0117	-0.0112	-0.0113	-0.0117
180	Error (%)	-0.0278	-0.0267	-0.0254	-0.0257	-0.0257
230	Error (%)	-0.0541	-0.0531	-0.0526	-0.0523	-0.0514
270	Error (%)	-0.0733	-0.0719	-0.0716	-0.0716	-0.0712



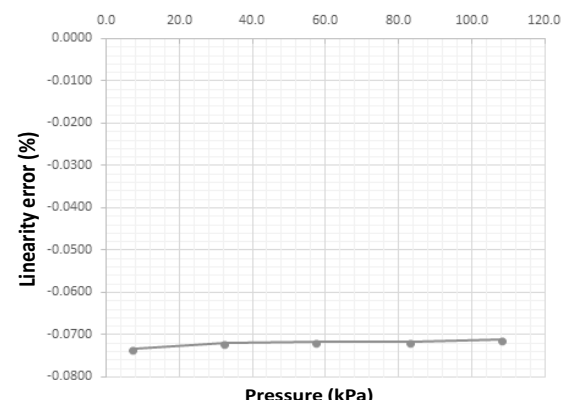
(a) 130℃



(c) 230℃



(b) 180℃



(d) 270℃

Fig. 4

의 각각의 온도 조건에서 개별 직선성 평가 결과를 보여주고 있다. 온도 보정 개념을 적용한 평가 결과에서 직선성의 최대 오차는 -0.0733%FS(온도 270°C)로 기존 압력계 대비 충분히 작아, 실용성을 갖추고 있다고 판단된다.

두 번째 평가 지표인 정확도는 식 (5)의 정의를 통해 산출하였다. 이 때 X는 온도 보정 개념이 적용된 측정값[kPa], S는 표준압력계의 측정값[kPa], 그리고 F는 Full scale range [kPa]를 의미한다.

$$\theta(\%FS) = \left(\frac{X - S}{F} \right) \times 100 \quad (5)$$

Table 4는 온도 보정 개념을 적용한 측정신호의 정확도 평가 결과를 나타내고, Fig. 5는 각각 온도가 130°C, 180°C, 230°C, 270°C일 때의 정확도 평가 결과를 나타낸 것이다. 그 결과, 온도 보정 개념이 적용된 신호의 정확도는 온도 130~270°C에서 최대 3.9681%FS 이하였다.

마지막으로 Fig. 6은 온도 보정 개념을 적용한 각 온도조

Table 4 Accuracy evaluation result

Temp. (°C)	Accuracy	Pressure condition (kPa)				
		0	25	50	75	100
130	Error (%FS)	0.6299	0.6338	0.6116	0.6130	0.6385
180	Error (%FS)	1.4857	1.4250	1.3540	1.3725	1.3703
230	Error (%FS)	2.8981	2.8431	2.8184	2.8007	2.7494
270	Error (%FS)	3.9681	3.8919	3.8760	3.8737	3.8504

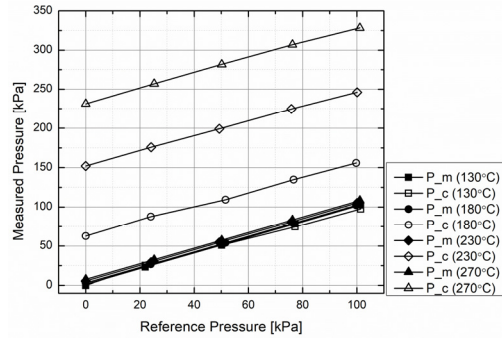
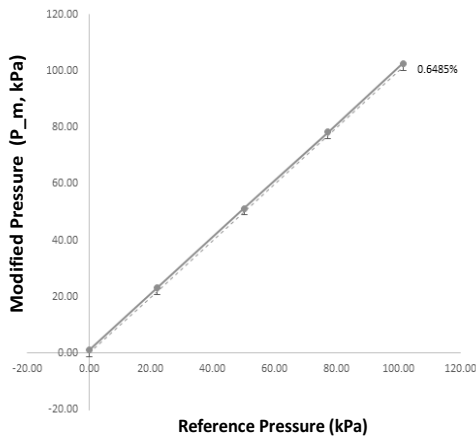
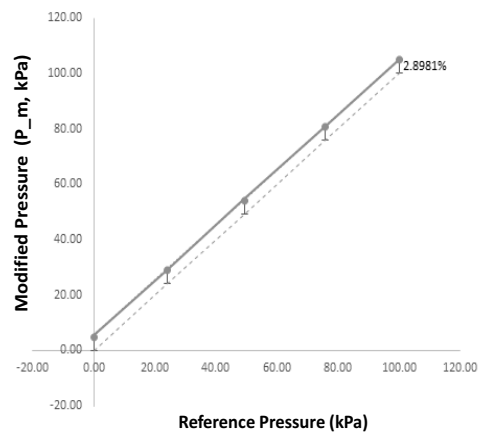


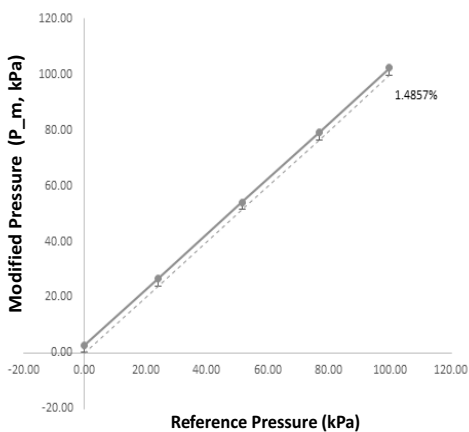
Fig. 6 Comparison result with a commercial NaK filled PT



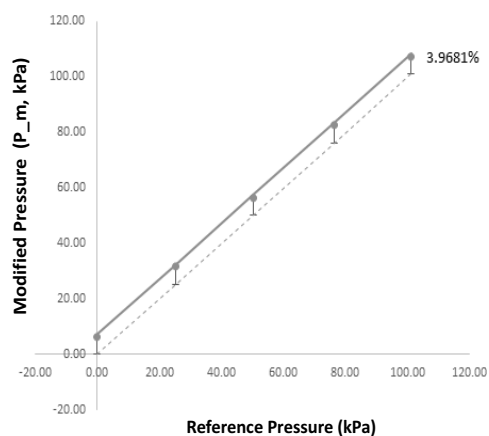
(a) 130°C



(c) 230°C



(b) 180°C



(d) 270°C

Fig. 5 Accuracy evaluation results

건 별 압력신호값과 상용 NaK filled 압력계의 신호(P_c)를 비교한 것이다. P_m 은 온도 보정 개념이 적용되어, 온도가 다른 조건에서도 어느 정도 믿을 수 있는 압력값을 지시하는 것에 반해 P_c 는 압력 측정 범위를 0~100 kPa로 유지하였음에도 불구하고 온도가 올라감에 따라 그 신호값이 극심하게 shift 됨을 알 수 있다.

이러한 결과는 상용 압력계가 고압용으로 설계되어 저압 조건 실험에서 영향이 과하게 나타나는 점도 있지만, 이는 온도 변화에 의한 압력 신호 왜곡 영향으로 인해 현재 제품으로는 저압 영역에서 신뢰성을 확보하기 어렵다는 현실을 나타낸다고 볼 수 있다.

4. 결 론

압력은 모든 열유동 시스템에서 가장 기본적으로 측정되어야 할 물리량 중 하나로, 시스템의 설계, 연구 개발, 상용화 단계에서 광범위하게 사용된다. 본 연구에서는 소듐과 같이 도압관 내 유체의 고화 우려로 인해 별도의 압력전달물질을 사용하는 다이아프램 방식의 압력전송기에 적용할 수 있는, 온도의 영향을 근본적으로 배제하고 정확한 압력값을 측정할 수 있는 개념을 개발하였다. 온도 영향에 의한 압력 왜곡 효과는 시스템의 측정 압력에 비례하지 않기 때문에, 저압 영역에서 그 영향이 더 크게 나타나기에, 온도와 압력을 조절할 수 있는 장치를 이용해 저압 실험을 수행하고, 개발한 개념이 타당함을 실험적으로 입증하였다. 개념을 검증하기 위한 압력계 시작품을 제작하고, 총 20 cases의 시험을 통해 제작된 온도보정 개념의 압력계 시작품에 대한 성능시험 결과를 제시하였다. 온도보정형 압력계의 정확도는 온도 130~270°C에서 3.9681% of F.S. 이하로 나타났으며, 넓은 온도 범위에서 개발된 온도보정형 압력전송기의 온도 보정 개념이 유의미함을 검증하였다.

다만, 본 연구에서 개념검증에 사용한 Sensing unit과 Reference unit은 동일한 규격의 다이아프램을 사용했을 뿐, 다이아프램이 노출되는 온도 조건이 서로 달라, Sensing unit에서의 온도 상승에 따른 실리콘 오일 팽창량이 더 컸을 것으로 예상할 수 있다. 이로 인해 P' 과 P_m 의 차이가 높은 온도 조건에서 보다 증가한 것으로 볼 수 있다. 또한, 제작 시 압력 전달물질 주입 조건에 따라 두 유닛 간에 생기는 초기 offset 차이가 여전히 존재할 수 있고, 앞으로 실용화를 위해서는 이 외에도 두 개의 정압계 사용으로 인한 측정 오차의 누적, 두 유닛의 설치를 위한 공간 문제 등도 극복해야 한다. 따라서 후속 연구에서는 하나의 하우징을 가지는 유닛에 두 개의 다이아프램과 도압관, 그리고 단일 차압계를 도입한 설계안을

도출하고, 실험적인 검증을 수행할 예정이다.

본 연구를 통해 기존에 온도 영향으로 인한 압력 신호의 왜곡 때문에 정확한 측정이 불가능했던 소듐냉각고속로와 같은 고온 열유체 시스템에 새로운 방안을 제시할 수 있게 되었고, 추후 새로운 기기나 시스템의 연구 개발 단계에서부터 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 해당 개념은 상온에서 고체인 용융금속 외에도 증기(steam)와 같이 외부 환경에 따라 도압관 내에서 고화(solidification) 우려가 있는 시스템에서도 유용한 기술로, 시스템의 온도 변화에 의한 영향을 배제한 상태로 정확한 압력 측정을 가능하게 하므로, 향후 금속제련, 화학공정, 열에너지 이용 분야 등 다양한 산업 분야에서 활용이 기대된다.

후 기

This work was supported by NST grant (CAP200032-100) and NRF grant (NRF-2021M2E2A2081063) funded by the Korea government (MSIT).

References

- (1) IAEA, Vienna, 2012, "Liquid Metal Coolants for Fast Reactors Cooled by Sodium, Lead, and Lead-Bismuth Eutectic", IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.6.
- (2) IAEA, Vienna, 2012, "Status of Fast Reactor Research and Technology Development", IAEA-TECDOC-1691.
- (3) D. Patranabis, 2001, Principles of Industrial Instrumentation 2E, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- (4) Jackson, C. B., Mausteller, J.W., 1962, "Liquid Metals-Their Properties, Handling, and Applications", Modern Materials, Vol. 3, pp. 401-452.
- (5) W. R. Miller, 1958, "High Temperature Pressure Transmitter Evaluation", ORNL-2483.
- (6) Foust, O. J., 1979, Sodium-NaK Engineering Handbook, Volume III, Gordon and Breach, Science Publishers, Inc.
- (7) Bialous, A. J., Eugene, R. A., 1954, US patent No. 2,883,995.
- (8) Clifford, K. D., 1975, "FFTF Core and Primary Sodium Circuit Instrumentation", HEDL-SA-1082.
- (9) Crocker, T. J., 1968, "FFTF Sodium Service Pressure Measurement: State-of-the-Art Report", BNWL-882.
- (10) Jo, Y., Kim, J., Kim, H., Lee, J., Jeong, J.-Y., 2012, "A State-of-the-Art Report on a Pressure Sensor for Liquid Sodium", KAERI/AR-1180/2018, Technical Report, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon.