2003 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 143~148
선문대학교 아산캠퍼스, 2003. 12. 5~6

오리피스 유량계에서 게이지라인 누설에 의한 계량오차

이철구* · 하영철 · 허재영

The Measurement Error owing to Leakage of Gaugeline in Orifice Flowmeter

Cheol-gu Lee, Young-chul Ha, Jae-young Her

Key Words: Measurement error(측정오차), Gaugeline leakage(게이지라인 누설), Orifice flowmeter(오리피스 유량계)

ABSTRACT

This study was experimentally performed in order to estimate the errors due to the leakage of transmitter gaugelines in the orifice flow meter for natural gas. It would be a serious problem in safety if a large quantity of leak was occurred at the tubes or fittings like valve. But in most cases the safety problems might be rarely happened because the gas leak detectors could be operated in advance and the various kinds of inspection would be also fulfilled periodically. If the leakage was occurred continuously with an undetectable amount at the gaugelines for measuring the pressure or the differential pressure(DP), the amount of leakage might be an error or an unaccounted flow(UAF). In addition if the measuring value of pressure or DP were affected by the leakage, it might also be a measurement error. The experiments were performed to estimate the amount of leakage and to check the DP changes if it exited. First, through the measurement of the air pressure changes in the airtight container connected to a transmitter with gaugelines as the time passed, the amount of leakage causing from the fittings of gaugelines was roughly estimated.

As changing the leak position of the gaugeline, the leak was intentionally made to break out. The variance of DP was checked as controlling the extent of leakage and compared to no leak conditions. Consequently, under the normal maintenance conditions, the result represented that the amount of leakage causing from the gaugelines was insignificant and also the DP changes on leakage conditions were too small to cause the errors of measurements.

1. 서 론

고압 천연가스 공급시스템에서 유량측정에 사용되는 유량계는 주로 오리피스유량계와 터빈유량계이다. 도시가스에 공급되는 계량배관은 약 8.5 bar의 압력으로, 발전소에는 약 25 bar의 압력으로 공급되고 있다. 계량배관에는 각종 물리량을 측정하기 위한 계측기들이 설치되어 있다. 오리피스 유량계에서 게이지라인은 압력계, 차압계, 밀도계 및 가스분석기와 같은 계측기들과 배관의 추출부위를 연결하기 위해 설치되어있으며 터빈유량계의 경우에는 압력계와 몸체사이에 설치되어 있다.

게이지라인의 피팅들 사이의 연결부위에는 많건 적건 누설(leakage)의 가능성이 항상 존재한다. 누설은 자칫 커다란 안전사고로 확대 될 수 있기 때문에 현장 근무자나 정비 직원들은 누설이 일어나지 않도록 항상 주의를 기울이고 있으며 누설이 발생했을 때에는 적절한 조치를 취하고 있다. 그러나 계량배관에서는 각종 설비 보수작업이 연중 실시되고 있어서 작업 부주의나 기타 다른 여러 이유로 완벽하게 누설을 방지하는 일은 현실적으로 불가능하다. 따라서 게이지라인에서의 누설로 인한 미계량 물량 발생 가능성이 계속 제기되어 왔다. 물론 게이지라인에서 뿐만 아니라 배관에서의 누설 또한 미계량 물량일 것이나 본 연구에서는 배

* 한국가스공사 연구개발원
E.mail : cglee@kogas.re.kr

관에서의 누설은 논외로 하고 단지 게이지라인에서의 누설량 추정을 목적으로 하였다. 또한 게이지라인의 누설에 의해 대기로 방출되는 물량을 추정하는 것 뿐만 아니라 게이지라인의 누설에 의해 다른 이차요소들, 특히 가장 민감하게 변화될 수 있는 차압 측정값의 변화를 확인하여 이것이 계량오차에 미치는 영향을 파악하는 것도 주요 목적으로 하였다.

따라서 본 연구는 게이지라인에서 발생하는 누설의 정도와 양을 추정하고 게이지라인 누설이 압력이나 차압 측정에 어떠한 영향을 미치는지 실험을 통해 확인하여 미계량 정도나 계량오차를 구체화하기 위한 목적으로 수행되었다.

2. 피팅과 누설

2.1 피팅 구성과 작동원리

게이지라인은 튜브와 피팅류로 구성되어 있는데 피팅류는 몸체, 너트, 패럴 등으로 구성되며(Fig. 1 참조) 재질은 주로 스텐이리스 스틸(stainless steel)이고 튜브의 외경은 압력 및 차압 측정시 공칭 1/2"(15mm), 밀도계나 가스분석기용이 공칭 1/4"(10mm)가 사용되고 있다. 이외의 튜브의 재질 및 규격 사항 등은 ASTM A 269등의 해당 튜브의 규격을 참고하고 여기서는 생략하도록 하겠다.

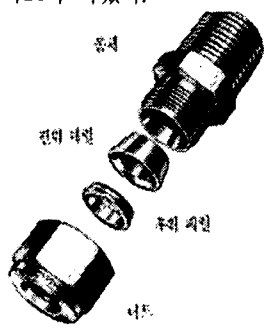


Fig. 1 Components of fittings

게이지라인 튜브 연결부위는 확관 없이 일련의 조작을 통해 밀폐, 조임 작용을 하게 된다. 이때 밀폐 조임의 작동원리는 다음과 같다.

가. 튜빙이 튜브 피팅의 턱부분에 밀착될 때까지 튜빙을 튜브 피팅에 완전히 삽입한다.

나. 너트를 손으로 조인 후 1과 1/4 회전만큼 더 조인다. 조이는 동안 튜브 내에서는 다음과 같은 일련의 작용이 일어난다.

a. 너트가 나사를 따라 앞으로 이동하면서 후위패럴을 앞으로 민다.

b. 후위패럴이 전위패럴을 앞으로 민다.

c. 전위패럴이 피팅 몸체의 안쪽 방향으로 조여진다.

d. 전위 패럴이 패럴의 내경과 튜빙의 외경 사이의 틈을 제거한다.

e. 전위패럴이 앞쪽과 안쪽으로 움직임에 따라 전위패럴의 끝부분이 후위패럴에 의해 들려지면서 몸체의 경사면과 밀폐된다.

f. 튜빙이 점점 변형되고 몸체 경사면의 많은 면적이 전위패럴과 접촉되어 저항이 점점 커짐에 따라 후위패럴은 안쪽으로 이동하여 튜빙을 조임으로써 2차 밀폐, 조임이 이루어진다.

g. 렌치로 1과 1/4 회전시키는 동안 너트는 1/16인치 앞으로 움직인다. 이러한 1/16 인치 움직임 동안 밀폐와 조임이 이루어진다.

h. 이 같은 설계의 특징 중 하나는 튜빙의 재질, 두께, 정도에 관계없이 밀폐와 조임이 이루어진다는 것이다. 후위패럴의 조임의 크기는 전위패럴의 작용에 대한 튜빙의 저항에 의해 결정되기 때문에 두꺼운 튜빙의 경우가 조임이 더 크게 된다. 두꺼운 튜빙이 고압이나 극심한 진동, 맥동 및 충격등과 같은 위험 여건에서 사용되기 때문에 이러한 특징은 매우 중요하다.

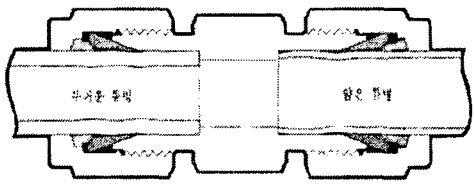


Fig. 2 Connection of tubing and fittings

2.2 누설

누설(leak or leakage)이란 유체시스템에서 원하지 않은 유체의 유출이나 유입을 말하며 누설량은 단위시간당의 부피(ml/min)로 표시한다. 누설의 원인으로는 금속과 금속과의 불완전한 밀폐, 부적절하거나 부주의한 튜브피팅 혹은 결함이 있는 튜브 및 피팅류의 선정 등이 있을 수 있다. 세계적인 튜브 피팅류 회사인 swagelok에서는 자체연구를 통하여 튜브피팅에서의 다음 식(1)과 같은 누설 공식을 제안하고 누설에 대한 다음과 같은 다섯 가지 요소와 관련되어 있음을 발표하였다. Fig. 3을 보면서 아래의 다섯 가지 누설 요인을 살펴보도록 하겠다.

$$Q = \frac{\Delta P \times H^3 \times W}{96 \times \mu \times L} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, Q = 누설량(ft^3/sec), ΔP = 압력차이(psi), H = 밀폐면사이의 간격(inch), W = 밀폐부위의 넓이, μ = 절대점도(sec/ft^2), L = 밀폐부위의 길이(inch) 이다.

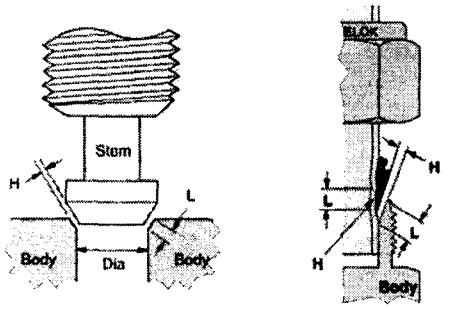


Fig. 3 Connection diagram of fittings

① ΔP (압력차이)는 튜빙내의 압력과 외부와의 압력차이를 말하며 일반적으로 약 70 bar의 유체시스템은 7 bar에 비해 약 10 배의 누설량 증가를 보인다.
② H는 밀폐면 사이의 간격으로 표면처리의 정도에 따라 향상될 수 있는 부분이다.
③ W는 밀폐부위의 넓이로 주로 원형의 튜브이므로 π D에 해당함.
④ μ는 절대점도로 유체의 점도가 높을수록 누설은 작아짐.
⑤ L은 밀폐부위의 길이로 밀폐부위의 접촉면이 길면 길수록 누설이 적게 일어남.

위의 누설 공식에 따르면 인위적으로 통제가 가능한 것은 H와 L이다. 따라서 누설을 줄이기 위해서는 튜빙 표면과 접촉면의 상태를 최적의 상태로 유지시켜야한다.

3. 누설실험

3.1 누설정도의 구분

게이지라인 누설 실험은 두 가지의 목적으로 수행되었다. 하나는 누설 발생량을 추정하기 위한 것이고, 하나는 누설과 차압 변화와의 상관성을 검증하기 위한 것으로 각각 두 번의 실험을 실시하였다.

게이지라인의 누설 실험을 위해 인위적으로 누설을 발생시키고 비누거품으로 그 정도를 확인하였다. 누설의 정도를 구분하기 위해 다음 Table 1 에서와 같이 5 단계로 나누었다.

3.2 누설량 추정 실험절차

① 아래 Fig 4와 같은 실험장치에서 버퍼용기(약 24 L)를 일정압력으로 채운다.
② 일정압력에 도달하면 피팅류의 미세누설을 발생시킨다.
③ bomb와 연결된 밸브를 잠궈 밀폐계를 만들고 외부에서 유입되는 압력이 없도록 한다.
④ 시간경과에 따른 압력변화를 측정한다.

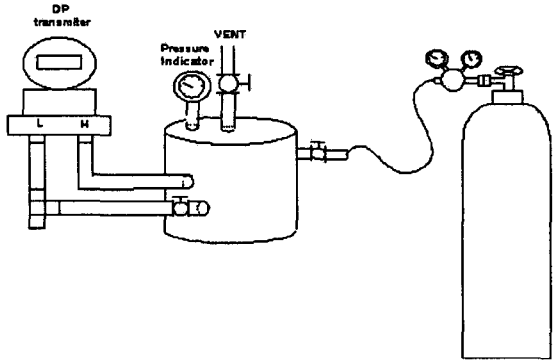


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

3.3 차압 영향 실험

누설에 의한 차압영향 측정 실험장치의 개략도도 Fig. 4와 동일하며 실험조건은 아래 Table 2와 같이 2차에 나누어 실험을 실시하였다. 아래 Table 2에서는 1차 실험에서는 차압전송기의 스팬이 너무 낮은 쪽에 치우쳐 있어 불확도 요인이 커진다고 보고, 2차의 실험에서는 차압전송기의 스팬을 조정하여 전체 스팬의

Table 1 Classification of the amount of leakage

구분	누설의 정도
미세 누설	육안으로 확인이 힘들 정도로 아주 미세한 누설. 누설량 추정실험
소량 누설	비누방울이 작게 형성되며 조밀하다.
중간 누설	비누방울이 크게 형성되며 각각의 크기도 크다.
다량 누설	누설부위에서 소리가 난다. 비누방울 크기는 중간 누설과 비슷하거나 조금 더 크다.
심한 누설	누설부위에서 심한 소리가 난다. 비누 거품은 오히려 누출되는 바람에 밀려 크게 형성되지 않는다.

중간범위에서 측정이 이루어지도록 하였으며, 게이지라인 길이도 길게 변화시켜 2차 실험을 실시하였다.

차압변화 실험 절차는 다음과 같다.

① Fig. 4 와 같이 실험 장치를 구성하였다.

② 압력조절기를 이용하여 실험압력으로 버퍼용기의 압을 채운다. 이때에는 모든 피팅에서 누설이 일어나지 않게 하였다.

③ 압력이 실험압력으로 올랐을 때 차압전송기의 차압값(영점)과 스팬을 확인한다. 차압전송기는 데이터 저장을 위하여 IEEE488통신을 지원하는 데이터 수집장치에 연결하고 전송값을 수집하는 프로그램을 구동하였다.

④ 전송기와 버퍼용기 사이에는 3곳의 피팅 연결 부위가 있어 이 세 군데에서 누설실험을 실시하였다. (차압전송기는 게이지라인이 두 개가 필요하므로 모두 6곳의 피팅 연결 부위가 있음.)

⑤ 6곳의 피팅 연결부위 중 전송기의 low 측에서 가까운 피팅류부터 인위적인 누설을 발생시킨다. 누설의 정도를 약 4단계로 구분하여 증가시켰고 이를 확인하기위해 비누방울을 발생시키고 이를 사진으로 찍어 구분하였다.

⑥ 누설의 발생되기 전과 누설이 발생하고 다시 누설이 멈출때 까지 차압의 변화를 데이터로거를 통해 수집하였다.

⑦ 위의 실험을 위치를 바꿔가며 실시하였다.

Table 2 Experimental conditions for the effects of DP

구분	실험압력 (게이지압)	버퍼용기 용량	차압전송기 범위	게이지라인 길이
1차	약 0.85 MPa	약 0.024 m^3	0 - 621 Pa (Min. span)	약 1m
2차	약 0.73 MPa	약 0.024 m^3	-1,000~ 1,000 Pa	약 8m

4. 실험결과

4.1 누설량 추정

미세누설 발생시의 밀폐된 압력용기의 압력변화 정도를 Table 3. 과 Fig. 5에 나타내었다.

Table 3. The pressure decreasing trend due to an undetectable amount of leakage (unit : MPa)

	0시간	18시간	24시간	48시간	66시간	90시간	114시간
1차 실험	0.80	-	0.70	0.65	-	-	-
2차 실험	0.93	0.83	-	-	0.68	0.64	0.60

미세누설에 대하여, 누설량(Q)는 식(1)과 같이 압력차이와 H^3에 비례하고 L에 반비례한다. 하지만 실험적으로 H와 L을 측정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 압력차이 ΔP 와 시간과의 관계를 간단하게 1차의 관계식으로 가정하여 식(2)를 사용하여 누설량을 추정하고 그 결과를 다음 Table 4 에 나타내었다.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \ (T = const) \qquad (2)$$

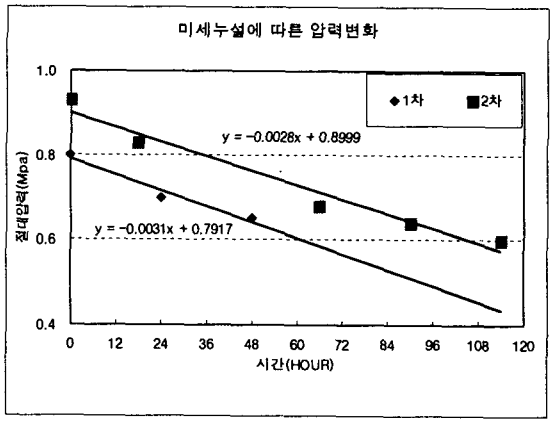


Fig. 5 The graph of pressure decrease trends due to an undetectable amount of leakage

Table 4 The estimation of the total amount of the leakage in gaugelines

구분	용기의 부피	시간당 압력변화율	추정누설률	월간 누설량	년간 누설량
단위	m^3	P_1/P_2	m^3/h	m^3	m^3
1차	0.024	1.003121	약 0.0006741	약 0.49	약 5.9
2차	0.024	1.003931	약 0.0007466	약 0.54	약 6.5

Table 4 에서는 시간당 압력변화율을 통해 식(2)에 따라 시간당 부피변화율을 구하고 이를 이용해 대기압 상태에서의 추정 누설률을 구하였다. Table 4 에서와 같이 비누거품법으로해서는 발견되기 어려운 미세한 누설의 경우 한 라인에서 발생되는 누설량이 년간 약 6 ~ 7 m^3 정도로 추정된다. 이정도의 누설은 발견되기도 매우 어렵고 항상 일어날 수 있기 때문에 한국가스공사의 천연가스 전체 계량배관에서 비슷한 정도의 누설이 항시 발생된다고 가정했을 경우 전국적으로 약 공급관리소가 약 70여 곳이고 330개의 계량배관이 있으므로 각 계량배관에 게이지라인이 3개가 있다고 하

면, 년간 약 7,000 m^3의 미계량 물량이 추정되며 이를 대충 어림하여 10,000 m^3의 물량이라고 가정해도 천연가스의 밀도를 0.81 kg/m^3(0℃ 기준)이라 하면, 대략 8.1 ton 정도로 계산된다. 참고적으로 한국가스공사의 년간 천연가스 공급물량이 2002년도 기준 대략 1,750만ton 규모이므로 계량오차로 따지면 매우 미미한 수준이다.

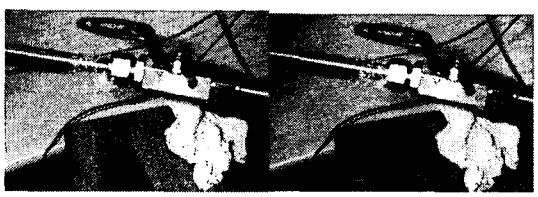
4.2 차압영향 실험결과

게이지라인 누설의 정도와 발생 위치에 따라 차압 측정값에 어떠한 차이가 있는지를 확인하였다. 아래에는 누설의 정도에 따른 차압 영향과 누설위치에 따른 차압 변화정도를 정리하여보았다.

4.2.1 누설정도에 따른 차압변화

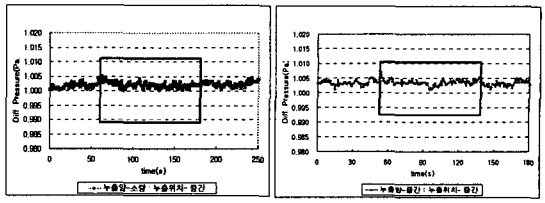
Fig. 4 의 게이지라인 중간에 위치한 피팅 연결부위에서 인위적인 누설을 발생시켰다. Table 1 에서와 같이 소량누설에서부터 심한 누설까지 점차적으로 누설량을 증가시키면서 차압의 변화를 측정하였다. Fig. 6은 누설발생의 실제 사진이고 Fig. 7은 누설 정도에 따른 차압의 변화 추이를 나타낸다. 이때 누설이 발생되었던 시점의 차압은 그래프 내에 있는 사각형 내부에 위치한 값이다.
실험결과 누설 발생시점에 미미한 차압 변화가 감지되었으나 그 이후에는 차압의 변동은 거의 없는 것으로 나타났다.

a) small　　b) middle

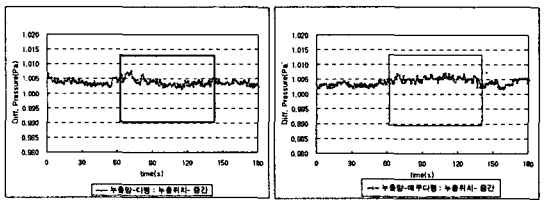


c) large　　d) very large

Fig. 6 The classification of the amount of leakage



a) small　　b) middle

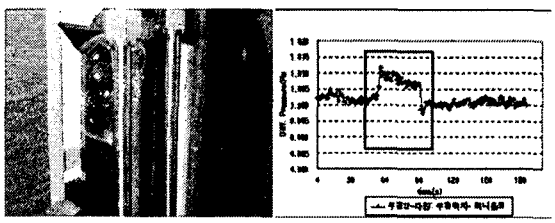


c) large　　d) very large

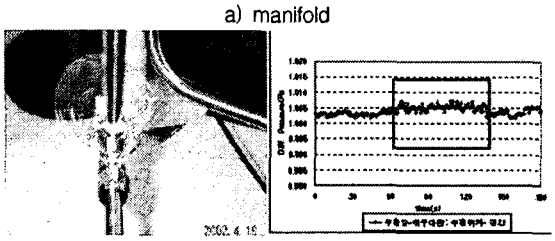
Fig. 7 The results of DP measurement value due to the amount of leakage.

4.2.2 누설 발생위치에 따른 차압변화

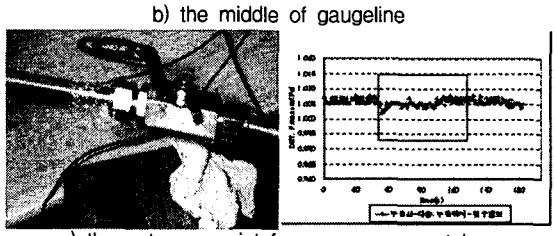
Fig 4의 차압전송기의 low측 게이지라인에 인위적인 심한 누설을 발생시키고 차압에 어떠한 영향이 있는지 측정하였다. Fig. 8 은 누설부의의 사진이과 그때의 차압의 변화를 보여준다. Fig. 8, 9에서 a), b), c)는



a) manifold



b) the middle of gaugeline



c) the entrance point from pressure container

Fig 8 The results of DP measurement according to the leak position.

차압전송기로부터 가까운 위치에서부터 점차 멀어지는 위치이다.

Fig 8에서 보면 차압전송기에서 가장 가까운 위치에 있는 메니폴드 하단부 피팅에서 인위적인 다량 누설을 발생시켰을 때 약 0.05 Pa 정도의 차압변화를 감지할 수 있었다(Fig. 8 a)참조). 또한 b), c)에서와 같이 게이지라인 중간부위나 압력 용기쪽 피팅에서의 누설은 거의 아무런 차압변화를 보이지 않는다. Fig 8 a)의 경우처럼 0.05 Pa의 차압이 발생된다고 하여도 이로 인한 차압차이는 약 0.0004 % 이고(실제 사용되는 차압전송기중 Full Scale이 가장 작은 것이 12 kPa 정도임) 이로 인한 계량오차는 0.0004 % 보다 작으므로 게이지라인의 누설에 의한 차압변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

5. 결론

게이지라인에서의 발생되는 누설은 설비와 인명의 안전을 위해 철저히 방지되어야 한다. 그러나 완벽하게 누설을 방지한다는 것은 사실상 어려운 일이다. 본 연구에서는 한국가스공사의 천연가스 공급시스템에서 상대적으로 많은 게이지라인
이 있는 오리피스 유량계에서의 게이지라인 누설이 계량오차에 어떠한 영향을 미치는 지를 두 가지 관점으로 확인하였다. 첫 번째는 게이지라인의 누설량에 대한 추정이고 두 번째는 게이지라인의 누설이 차압에 미치는 영향에 대한 실험이다.

먼저 게이지라인 누설량은 게이지라인에 미세한 누설을 발생시켜 실제 발생되는 누설량을 압력변화를 측정하여 추정하였는데 실험결과 미세한 누설의 경우 한 라인에서 년간 약 7 m^3 정도의 누설이 발생하였다. 이를 근거로 전체 공급라인의 누설량을 추정하면 년간 약 10,000 m^3, 약 8 ton 정도의 미계량 물량이 발생하는데 전체 공급량과 비교하여 이에 대한 미계량 정도를 수치화 한다는 것은 별 의미가 없는 것으로 보인다. 따라서 게이지라인의 누설은 통상적인 관리 수준에서 계량오차에 미치는 영향은 거의 없다고 해도 무방하다. 하지만 누설양은 누설 정도에 따라 수 배에서 수십 배까지 차이가 날 수 있으므로 지나친 누설은 분명 문제가 될 것이며 이를 방지하기 위한 점검은 자주 실시되어야 한다.

두 번째 실험은 게이지라인의 누설에 의해 게이지라인과 연결된 계측기의 측정값이 어떠한 영향을 받는지 알아보는 실험이었는데, 실험결과 실제로 일어나기 힘든 심한누설이 발생하더라도 측정되는 차압에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

결론적으로 게이지라인의 누설은 누설되는 양 자체는 미계량 물량이지만 현실적으로 매우 적은 양이고 누설에 의해 차압이나 압력이 거의 영향을 받지 않기 때문에 게이지라인 누설에 의한 계량오차는 무시할 만한 수준으로 판단된다.

6. 참고 문헌

(1) "튜브피팅 설비안내서 Swagelok", 크로포드피팅 컴퍼니, 프란시스 제이 칼라한, 1996.
(2) Rosemount 전송기 제품 카다로그
(3) ISO 2186 (1973) "Fluid flow in closed conduits - Connections for pressure signal transmissions between primary and secondary elements"