

Geometry pig용 주행거리계의 오차 보상에 관한 연구

박승수* · 김동규* · 유휘룡* · 조성호* · 박대진* · 구성자* · 노용우*
한국가스공사 연구개발원

An Error Compensation Study for Odometer System of Geometry pig

S.S. Park, D.K. Kim, H.R. Yoo, S.H. Cho, D.J. Park, S.J. Koo and
Y.W. Rho
R&D DIVISION, KOGAS

1. 서 론

배관(pipeline)에 집어넣어 배관내 매질을 이용하여 진행되어지는 잘 알려진 장치인 PIG (Pipeline Inspection Gauge)가 언제 시행되었는지는 문헌에 없으나 수도배관업체에서 처음 사용하였다고 주장하기도 하지만 미국에서 원유 배관 시공 초창기가 아닌지 추측하고 있다. 처음 피그는 냉마 뭉치로 사용하였으나 후에는 밀봉에 용이한 가죽 뭉치를 사용하는 배관내 청소용이었다.

오늘날에는 약 350개 이상의 피그가 있고 많은 특이한 용역을 수행하며 관련된 수많은 제품이 있다. 국가적이나 국제적으로 공인된 것은 없으나 많고 긴 경험에 의하여 상업적인 표준형태는 각 업체마다 가지고 있다. 이러한 피그는 배관의 적정 건설과 그 기능을 유지하도록 도와주는 역할을 수행한다.⁽¹⁾

PIG의 기능에 따라, 배관의 내부에 남아있을 수 있는 파편 및 이물질등을 제거하는데 이용되는 Utility PIG와 내부에 장애물 유무를 점검하여 장애물이 있으면 이를 측정하고 기록하는 기능을 갖는 Inspection PIG, Intelligent PIG 또는 In-Line Inspection Tool이라고도 부른다. Geometry PIG, MFL(Magnetic Flux Leakage) PIG, Ultrasonic PIG 등이 이에 속한다.

인텔리전트 피그는 데이터 저장 및 처리 시스템, 결함 검사를 위한 센싱부, 배터리 및 전원시스템, 주행거리계 등으로 구성되며, 데이터의 3차원 공간 맵핑을 위해 관성항법장치(Inertial Navigation System)와 GPS(Global Positioning System)이 탑재되기도 한다. 이러한 피그는 배관을 따라 이동하면서 배관에서 발생하는 결함(dent, wrinkle, buckle, cracks)의 유무를 검사하고 그 위치를 정확하게 파악하여 배관의 건전성 확보를 위한 정보를 제공하게 된다. 따라서 배관에 피깅을 수행할 경우 결함의 위치정보와 관련된 관성항법장치, GPS 및 주행거리계의 성능이 매우 중요하게 고려된다.

일반적인 자율이동 시스템에서는 관성센서와 비관성 센서인 주행거리계 및 GPS가 이용되지만 피그의 경우에는 대부분의 배관이 땅속에 매설되어 있고,

GPS 포인트를 무한히 짧게 설정할 수 없는 실정이며, 특별한 경우에는 관성항법 시스템을 제외한 주행거리계만으로 결함의 위치정보를 얻게된다. 따라서 피그 운영시 누적되는 항법오차를 보정하고 정확한 위치정보를 얻기 위해 주행거리계의 신뢰성이 확보되어야 한다.

현재 피그 산업에 적용되는 주행거리계의 허용오차는 0.05%이며, 배관 검사시 발생할 수 있는 주행거리계 바퀴의 미끄럼(slip)과 마모(wear)는 엄밀히 고려되지 않는다. 또한 현장에 적용되는 피그도 배관벽에 주행거리계 바퀴가 밀착되어 회전하게하는 스프링의 장력이 다르도록 몇 개의 주행거리계를 설치하고, 단순히 그 값이 가장 많은 것을 취하고 있다.

본 연구에서는 주행거리계의 오차 모델을 설정하고, 미끄럼 현상에 대한 동역학적 해석에 기초하여, 거리오차를 보정하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 주행거리계 오차 모델의 신뢰성을 검증하였다.

2. 주행거리계 측정오차 모델

주행거리계는 배관의 벽면에 밀착하여 주행하게 된다. 이때, 배관내의 용접부위와 결함, 주행거리계 바퀴의 원주 측정 오차에 의한 주행거리 측정 오차는 누적된다.

실제로 주행한 거리 d 는 식 (1)과 같이 표현되고,

$$d = \frac{l_o n_o}{c_o} + m_o, \quad |m_o| < \frac{l_o}{c_o} \quad (1)$$

오차가 누적된 주행거리는 주행거리계 바퀴의 측정 오차 δl_o 와 외란에 의한 톱니 계수 오차 δn_o 를 고려함에 의해 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\hat{d} = \frac{\hat{l}_o \hat{n}_o}{c_o} = \frac{1}{c_o} (l_o + \delta l_o)(n_o + \delta n_o) \quad (2)$$

주행거리 측정 오차 δd 는 (2)과 (1)의 차로 정의되며, 그 관계에 의해서 식 (3)과 같다.

$$\delta d = \frac{1}{c_o} (l_o \delta n_o + \delta l_o n_o + \delta l_o \delta n_o) - m_o \quad (3)$$

오차는 주행거리계의 내부오차와 주행환경에 의한 외부오차로 구분할 수 있으며, 내부오차는 바퀴의 원주 측정 오차와 주행거리계 톱니의 분해능에 의해 발생하며, 외부오차는 피그 주행시 용접부위나 결함등의 외란에 의해 누적된다.⁽²⁾

3. 외부오차의 동역학적 해석⁽³⁾

주행거리계가 배관을 따라 주행할 때, 용접부위나 배관의 결함에 의해 주행거리계와 배관의 내벽 사이에 미끄럼이 발생하게 된다. 특히 배관내의 용접부위는 12m 마다 존재하므로, 주행거리계의 오차 보정시 반드시 고려되어야 한다.

Fig. 1은 용접 비드 근처에서 주행거리계의 거동을 나타내고 있으며, Fig. 1과 같이 A, B, C 구간으로 구분하고, 각 구간에 대해서 동역학적인 해석에 기초하여 미끄럼에 의한 오차를 계산한다.

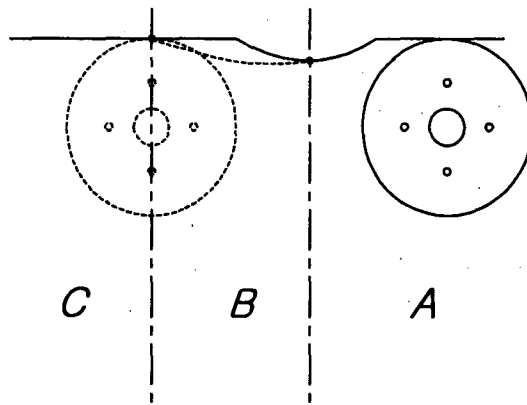


Fig. 1 Behavior of the odometer at the welding point

3.1 B구간 해석

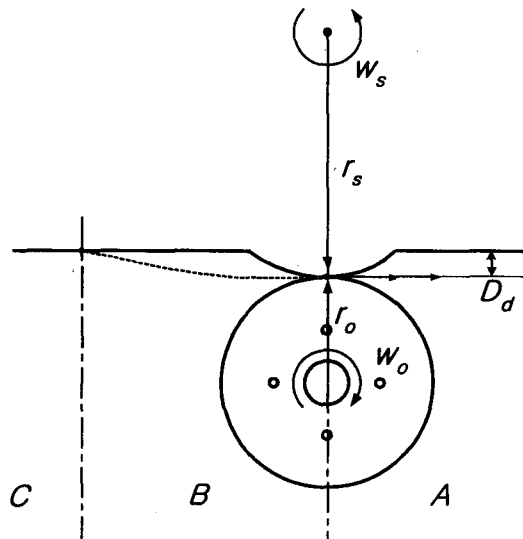


Fig. 2 Behavior of the odometer in interval

Fig. 2에서 B구간은 용접 비드의 정점에서부터 주행거리계의 바퀴가 배관의 내벽과 접촉하는 부분까지이다. 이 구간에서는 바퀴는 배관과 접촉하지 않은 상태로 주행하게 되며, 바퀴의 속도가 주행거리계를 지지하고 있는 암(Arm)의 마찰력에 의해 감속된다. 따라서 실제의 주행거리와 바퀴의 주행거리 사이에 오차가 발생하게 되고 수학적으로 발생 오차를 구할수 있다.

우선 시뮬레이터 반경 r_s 가 용접 비드의 크기 D_d 보다 무한히 크다고 가정하여 A구간에 대한 고려를 무시한다.

$$r_s \gg D_d \quad (4)$$

B구간에서의 주행거리계의 각가속도를 $\alpha_{oB} [rad/s^2]$ 라고 하면, 주행거리계와 시뮬레이터의 선속도는 식 (6)과 같다.

$$v_{oB} = r_o w_{oB}, \quad v_{sB} = r_s w_{sB} \quad (6)$$

여기서, B구간에서 주행거리계의 각가속도를 상수라고 가정하면, 각속도 w_{oB} 는 식 (7)과 같이 표현된다. (단, 시간 $t=0$ 일 때 각속도를 $a [rad/s]$ 라고 가정한다)

$$w_{oB} = \alpha_{oB} t + a \quad (7)$$

B구간 동안 이동한 거리의 차이를 구하기 위하여 배관의 내벽과 주행거리계 바퀴의 선속도 차이를 구해서 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int \{r_s w_s - r_o (\alpha_{oB} t + a)\} \\ &= -r_o \alpha_{oB} \cdot \frac{1}{2} t^2 + (r_s w_s - r_o a) t \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 B구간 동안의 이동거리 $x_B(t)$ 는 식 (9)의 함수로 주어진다.

$$x_B(t) = -r_o \alpha_{oB} \cdot \frac{1}{2} t^2 + (r_s w_s - r_o a) t \quad (9)$$

3.2 C구간 해석

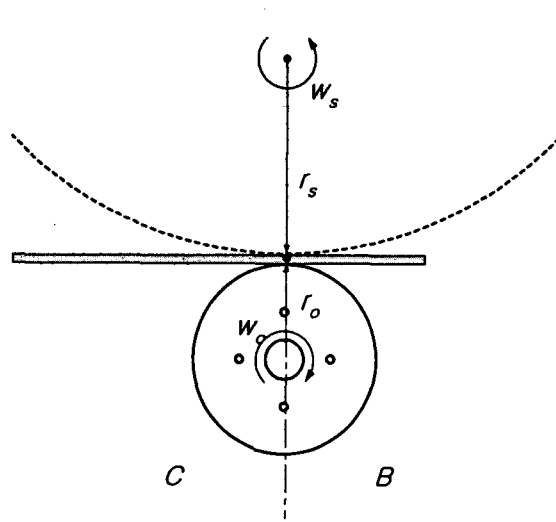


Fig. 3 Behavior of the odometer in interval

Fig. 3에 보이듯이 C구간에서는 주행거리계의 바퀴가 배관 내벽에 착지한 순간부터 배관과 접촉된 부분의 선속도가 동일할때까지 미끄럼이 발생한다. 따라서 미끄럼이 발생하는 시간동안에 존재하게 되는 배관과 주행거리계와의 이동거리의 차이를 구한다.

C구간은 주행거리계 바퀴의 각가속도를 $\alpha_{oC} [rad/s^2]$ 라고 하면 선속도는 식 (10)으로 표현된다.

$$v_{oc} = r_o w_{oc}, v_{sc} = r_s w_{sc} \quad (10)$$

여기서, C구간에서 주행거리계의 각가속도를 상수로 가정하면, 각속도 w_{oc} 는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$w_{oc} = \alpha_{oc} t + C_1 \quad (11)$$

C구간에서의 시간 t 가 zero일때의 각속도는 w_{oB} 와 동일하게 되고, 앞의 B구간 해석으로부터 적분상수 C_1 을 구할 수 있다. 따라서, 주행거리계의 각속도는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$w_{oc} = \alpha_{oC} t_c + \alpha_{oB} t_B + a \quad (12)$$

배관의 내벽과 주행거리계 바퀴의 선속도가 일치할때까지의 시간 t_c 는 식 (13)으로부터 식 (14)와 같이 얻을 수 있다.

$$r_s \cdot w_s = r_o \cdot (\alpha_{oC} t_C + \alpha_{oB} t_B + a) \quad (13)$$

$$t_C = \frac{1}{\alpha_{oC}} \left[\frac{r_s}{r_o} \cdot w_s - (\alpha_{oB} t_B + a) \right] \quad (14)$$

즉, 시간 t_C 이후에 미끌림이 발생되지 않고 주행한다. 그리고, $(\alpha_{oB} t_B + a)$ 를 ζ 라 변환하고, 주행거리계의 각속도 w_{oC} 를 적분하여 C구간 동안의 주행거리계의 이동거리를 구하면 식(15) 와 같다.

$$\theta_{oC} = \alpha_{oC} \cdot \frac{1}{2} t^2 + \zeta \cdot t \quad (15)$$

식 (14)를 식 (15)에 대입하여 θ_{oC} 를 계산하고, 시간 t_C 동안의 배관벽의 이동거리 θ_{sC} 는 식 (16)으로 얻어진다.

$$\theta_{sC} = w_s \cdot t_C \quad (16)$$

따라서 C구간에서의 거리오차는 아래와 같이 표현되고, BC구간에서의 거리오차는 식 (18)과 같다.

$$x_C(t) = w_s \cdot t_C \cdot r_s - \frac{1}{2} (\alpha_{oC} \cdot t_C^2 + \zeta \cdot t_C) \cdot r_o \quad (17)$$

$$x_{BC}(t) = x_B(t) + x_C \quad (18)$$

4. 실험 및 고찰

본 연구에서는 알루미늄과 우레탄 재질로 주행거리계의 바퀴를 제작하였고, 바퀴의 옆면에 저탄소강으로 제작된 치차를 부착하였다. 치차는 치차간격, 깊이, 깊이폭 2mm이상, 치차폭은 3mm이상, 재질은 저탄소강 등의 조건들이 만족하도록 원주둘레에 50개를 가공하였다. 즉, 바퀴 1회전시 50개의 펄스가 발생하게 되고, 발생하는 신호를 감지하기 위해서 Hall-effect를 이용한 Allegro사의 Gear-Tooth Sensor를 사용하였다. 또한 스프링의 힘에 의해 바퀴가 배관벽에 밀착하여 주행할 수 있도록 설계되었으며, Fig. 4는 실제로 제작된 주행거리계를 나타내고 있다. 그리고 제작된 주행거리계의 결함 및 속도에 대한 영향 및 재연성에 대한 성능실험을 위하여 바퀴에 용접비드를 가진 시뮬레이터를 제작하였다.

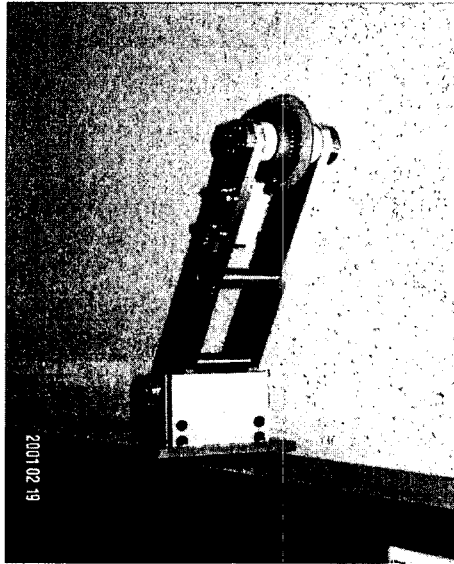


Fig. 4 Developed odometer system f
PIG

Fig.6, 7은 x축 $3.5\mu\text{m}$, y축 $3.5\mu\text{m}$, z축 $2.8\mu\text{m}$ 정밀도를 지닌 3-D 측정기에 의해 주행거리계 및 시뮬레이터 바퀴의 지름을 측정하는 것을 보이고 있다. 측정된 주행거리계와 시뮬레이터 바퀴의 지름은 각각 $159.5681[\text{mm}]$ 과 $759.0001[\text{mm}]$ 이다.

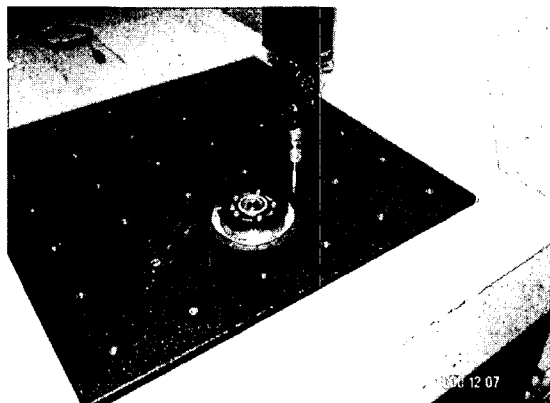


Fig. 5 3-D circumference measurement of t
odometer wheel

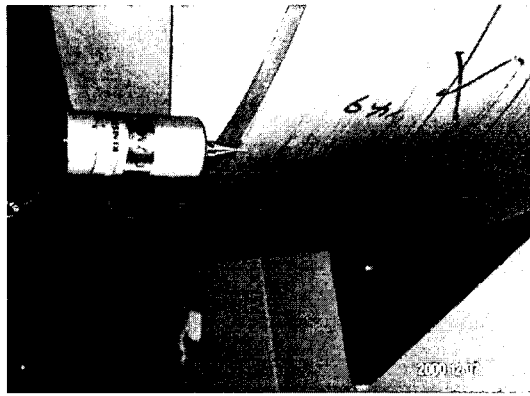


Fig. 6 3-D circumference measurement of simulator wheel

주행거리계는 성능평가를 위한 시뮬레이터와 접촉하여 회전하면서 구형과 신호를 발생하게 되고, 발생된 신호는 PC에 장착된 카운트보드에 의해 계수된다. Fig. 7은 실험을 위해 구성된 시스템을 보이고 있다.

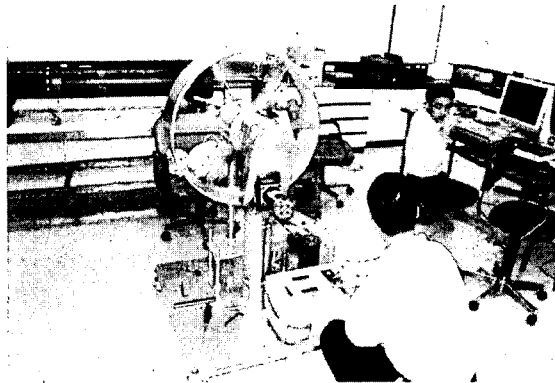


Fig. 7 An experiment performance of the odometer

실험은 용접 비드의 유무 및 용접 비드가 있을 경우 시뮬레이터 바퀴의 선속도에 따른 거리 오차에 대한 영향을 분석할 수 있도록 수행되었다. 또한 2장과 3장에서 제시한 오차모델의 동역학적 해석에 대한 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 실험치와 비교 검토하였다.

Fig. 8은 시뮬레이터의 바퀴에 용접비드가 없는 경우 재현성 및 주행거리계의 측정 오차를 보이고 있다. 실선으로 표현된 실험 데이터와 점선으로 나타낸 시뮬레이션 데이터가 유사하고, 또한 피그를 위해 제시된 주행거리계의 측정오차인

1:2000 범위를 만족함을 확인할 수 있다.

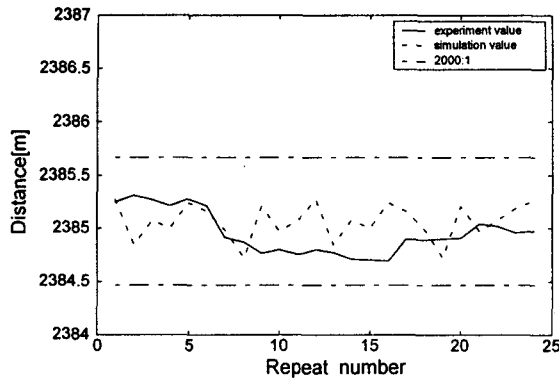


Fig. 8 Distance measurement of the odometer without welding point

Fig. 9는 주행거리계의 바퀴에 용접 비드가 존재하는 조건하에서 시뮬레이터의 회전속도에 따른 실험결과를 나타내며, 동시에 $x_{BC}(t)$ 를 보정한 결과를 보이고 있다. 각 점선들로 표시된 실험결과 값들이 1:2000의 범위를 벗어나고 있으며, 실선으로 나타낸 보정된 값들이 서로 상이한 속도의 영향하에서도 안정된 범위내로 접근함을 확인하였고, 그 유용성을 확인하였다. 물론 이동거리의 오차를 보정함에 있어서 B 구간의 시간 t_B 의 고려가 중요하게 된다. t_B 는 시뮬레이터 바퀴의 속도, 주행거리계 Arm의 스프링에 의한 장력, 용접비드의 크기와 밀접하게 관련된다. 하지만 본 연구에서는 오차 보정시 속도에 대한 영향만을 고려하였으며, Fig. 10에 나타난 t_B 와 v_s 의 관계하에 실험치와 시뮬레이션의 결과치가 유사하였다.

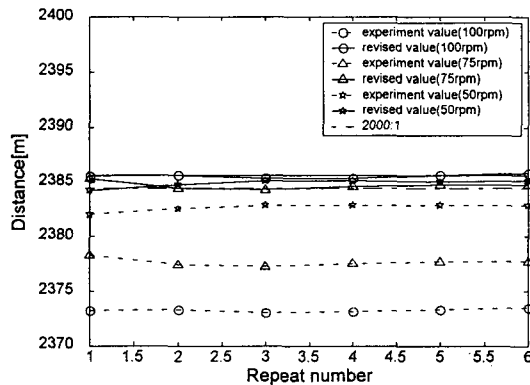


Fig. 9 Distance measurement of the odometer according to the wheel velocity

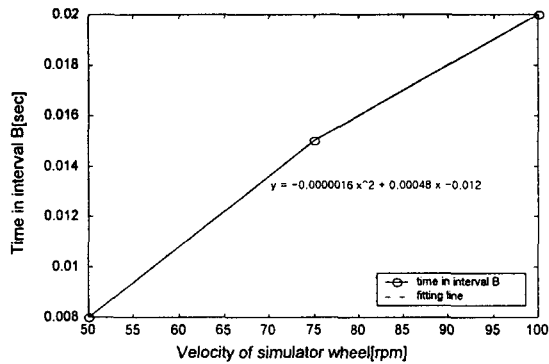


Fig. 10 Relations between time in interval B and velocity of the odometer wheel

5. 결론

매설 배관에 적용되는 인텔리전트 피그를 위한 주행거리계는 매설배관의 12[m] 마다 존재하는 Girth 용접부분과 배관의 결함 또는 구조에 의한 주행거리 오차를 반드시 고려하여야 한다. 본 연구에서는 실제로 피그에 부착되는 주행거리계를 제작하였으며, 배관내에 상대적으로 많이 존재하는 용접비드 주위에 대한 주행거리계의 거동을 해석하여 주행거리오차를 보정하였다. 주행속도에 따른 오차가 거의 인정된 성능 범위내로 보정됨을 확인하였고, 그 유용성을 검증하였다. 차후에는 주행속도 뿐만 아니라 용접비드의 크기, 주행거리계 Arm의 스프링에 의한 장력의 영향을 고려하여 더욱 정확하게 보정할 필요가 있으며, 용접부분 외의 배관의 다른 내부환경에 대한 거동을 해석하여야 한다.

참고문헌

- (1) Jim Cordell, C.Eng, M.I.Mech.E, F.Inst.Pet. & Hershel Vanzant, Consultant, 1996, "All About Pigging", On-Stream Systems Limited and Hershel Vanzant & Associates. pp.1-1~pp.3-15
- (2) Crouch A. E., 1993, "In-Line Inspection of Natural Gas Pipelines", Gas Research Institute Topical Report GRI -91/0365, pp.75-85
- (3) William F. Riley and Leroy D. Sturges, 1996, "Engineering Mechanics: Dynamics", John Wiley & Sons, Inc.