

## 배관 진단 시스템을 위한 항법 시스템 개발과 성능 분석

†진 용\* · 박 찬 국\* · 노 용 우\*\*

\*광운대학교 제어계측공학과, \*\*한국가스공사 연구개발원  
(2002년 2월 21일 접수, 2002년 3월 18일 채택)

### Performance Analysis and Development of the Navigation System for Pipeline Inspection Gauge

Yong Jin\*, Chan Gook Park\* and Rho Yong Woo\*\*

\*Dept. of Control and Instrumentation Eng., Kwangwoon University, Seoul, Korea

\*\*Korea Gas Corporation R&D Center, Ansan, Korea

(Received 21 February 2002 ; Accepted 18 March 2002)

#### 요 약

가스 배관 진단 시스템은 배관 내부에 투입되어 배관 내부의 여러 정보를 수집한다. 배관 진단을 위한 센서로는 배관 내부의 상태를 측정하는 캘리퍼(caliper) 센서와 온도, 압력 센서가 있다. 그리고 정확한 위치 정보를 제공할 수 있는 IMU(Inertial Measurement Unit)와 주행 거리계를 사용하는 결합 항법 시스템도 필요하다. 본 논문에서는 가스 배관 진단 시스템을 위한 항법 데이터 저장 시스템을 개발한다. 항법 데이터 저장 시스템은 실시간 동작을 위하여 마스터/슬레이브 구조를 가진다. 마스터 시스템은 항법 데이터를 저장하거나 통신하는데 사용하며 슬레이브 시스템은 센서 데이터를 처리한다. 개발된 항법 데이터 저장 시스템의 성능은 Pull Rig 실험을 통하여 검증한다.

**Abstract** - The PIG(Pipeline Inspection Gauge) is inserted in the pipeline and stores data of pipeline. In order to investigate the status of pipeline, a lot of sensors such as caliper, pressure, IMU and odometer are used. In this paper, the navigation storage data system for PIG is developed. It has master/slave structure for a real time operation. The master system stores data, while the slave system acquire the data from sensors. The performance of the developed system is verified by pull rig test.

**Key words** : PIG, Navigation System, IMU, GPS

#### 1. 서 론

배관 진단 시스템(Pipeline Inspection Gauge : PIG)은 배관 내에 투입되어 가스의 압력에 의하여 추진되는 장치로, 처음에는 매체의 흐름을 방해하는 퇴적물 등을 제거하기 위해서 사용되었으나 오늘날에는 배관의 건

설, 유지, 보수, 해체 등의 배관 운용을 위한 모든 작업에 사용되고 있다.

PIG는 사용 용도에 따라 다양한 종류가 있는데 진단용 PIG(Inspection PIG)는 배관의 유지, 보수 등을 위해서 사용하며 배관 내부의 상태를 센서로 측정 후 데이터를 저장한다. 진단용 PIG에서도 Geometry PIG나

Ultrasonic PIG는 배관의 찌그러짐 등을 측정하는 시스템이고 MFL PIG는 부식과 같은 외형상으로 구분할 수 없는 배관 자체의 손상을 측정하는 시스템이다.

배관의 유지, 보수 작업이 원활하게 이루어지기 위해서는 진단용 PIG가 배관 내에서 진행하면서 배관의 손상 정도와 손상된 위치를 정확히 기록해야 한다. 이를 위해서 INS(Inertial Navigation System)와 같은 외부의 도움없이 독립적인 항법 정보를 제공할 수 있는 항법장치를 PIG에 장착하여 보다 정확한 위치 정보를 제공하는 진단용 PIG가 개발되어야 한다[1-2].

본 논문에서는 Geometry PIG를 위한 항법 데이터 저장 시스템을 연구, 개발하고 그 성능을 분석한다. 개발된 시스템은 항법 센서로 Litton사의 LN-200 IMU(Inertial Measurement Unit)와 3축의 주행 거리계를 사용하며, 배관의 상태 측정을 위해서 캘리퍼(caliper) 센서를 사용한다. 개발된 시스템은 배관 내의 상황을 고려하여 진동이나 충격에도 안정적으로 데이터를 저장할 수 있도록 설계 제작되었다. 이를 위하여 주 데이터 저장장치는 진동에 강한 테이프 저장 장치인 DAT를 사용한다. 개발된 시스템은 모의 배관 실험인 Pull Rig 실험으로 성능을 확인함으로써 실제 배관 시험에도 적용 가능하도록 하였다.

본 논문의 결과는 PIG 외에도 항공기나 차량 등의 블랙박스나 무인 잠수정 등의 데이터 저장 시스템을 개발하는데도 사용할 수 있다.

## II. 데이터 저장 시스템

### 2.1. PIG의 기본 구조

PIG는 실제 운용 시에 50~400km 정도의 거리를 운행하며 운행 속도는 평균 3m/s, 최대 8m/s로 배관에 주입되는 가스의 양으로 조정된다. 따라서 실제 동작 시간은 PIG 운용이나 배관의 상태에 따라 달라지는데 현재 설계된 시스템은 최소 24시간 이상 운용하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서 개발된 항법 데이터 저장 시스템이 적용될 Geometry PIG는 그림 1과 같은 형태를 가지며, 크게 외부에는 구동톱, 캘리퍼 센서, 주행거리계(odometer)와 위치 추적 모듈(tracking module)이 있고, 내부에는 배터리, IMU 그리

고 항법 데이터 저장 시스템을 탑재하게 된다. 그림 1에서 구동톱은 실제 배관 내벽과 접촉되며 배관에 가스가 주입되면 구동톱에 가해지는 가스의 압력으로 PIG가 이동하게 된다.

PIG 시스템을 위한 항법 센서는 기본적으로 IMU와 주행 거리계이며 보조 정보로 GPS의 시각 정보와 동기된 위치 추적 모듈을 사용한다. 이는 후처리 작업에 의하여 보다 정확한 항법해의 계산을 가능하게 한다.

### 2.2. 센서

항법 연산에 사용되는 대표적인 센서인 IMU는 3축의 자이로와 가속도계로 구성되며 400Hz 주기로 항체의 각속도와 가속도 정보를 제공한다. PIG에서 요구하는 항법 성능을 만족하기 위해서는 중급 이상의 IMU를 사용하여야 한다. 이를 위하여 동작 범위가 넓고 충격에 강한 FOG(Fiber Optic Gyro)와 MEMS 가속도계로 구성되어 있는 Litton사의 LN-200 IMU를 사용한다. LN-200은 RS-422, SDLC 동기 통신 규약에 따라 데이터를 출력하며 통신 클럭은 1MHz이다. 주요한 오차 사양은 표 1과 같다.

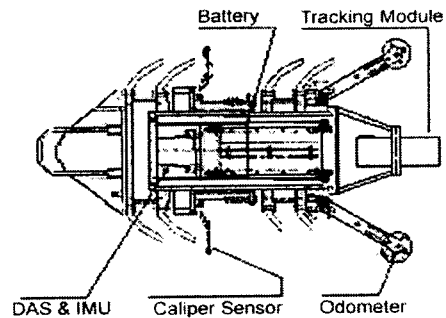


Fig 1. Basic Structure of Geometry PIG.

Table 1. Specification of LN-200 IMU.

	Gyro	Accel
Constant Bias	3deg/hr	1.5mG
Random Walk	$0.15 \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$	
Scale Factor	100 PPM	1000 PPM
Misalignment	0.3mrad	0.3mrad

관성 항법 장치의 특성상 초기 자세 오차와 센서 오차 등에 의하여 시간이 경과함에 따라 오차가 발산하므로 이를 보정하기 위하여 주행 거리계를 사용한다. PIG는 1cm의 분해능을 가지며 바퀴 1회전당 50개의 펄스를 출력하는 주행거리계를 사용한다. 주행 거리계는 PIG의 뒤쪽에 약 120도의 간격으로 3개가 장착된다. 이는 T자형 배관을 통과하는 경우에도 최소 하나의 주행거리계는 배관 내벽에 지지되어 정상동작하기 위해서이다.

배관의 상태를 측정하는 캘리퍼 센서는 모두 24개로 구성되어 있으며 30인치 배관의 경우 15도 간격으로 배관을 검사하도록 되어 있다. 캘리퍼 센서의 동작 원리는 그림 2와 같으며 스프링에 의하여 배관 내벽에 밀착된 회전바퀴(wheel)가 PIG가 진행함에 따라 회전하게 되고 만약 배관내의 찌그러짐(dent) 등을 만나게 되면 finger arm에 각변위가 생기게 된다. 이 각변위를 측정하면 배관의 찌그러짐의 크기와 길이 정도를 계산할 수 있다. 한국가스공사 연구개발원에서 개발한 이방성 자석을 이용한 각변위 측정은 신호의 증폭 없이도 90도의 각 변위를 5V 크기로 측정할 수 있도록 되어 있으며 12bit 고속 A/D 변환기를 이용해서 데이터를 처리한다[3].

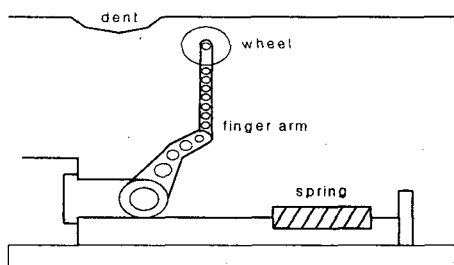


Fig. 2. Principle of Caliper Sensor.

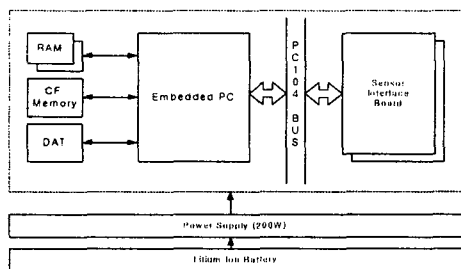


Fig. 3. Block Diagram of Navigation Data Storage System.

### 2.3. 항법 데이터 저장 시스템

본 연구에서 개발된 항법 데이터 저장 시스템은 마스터/슬레이브 구조로 되어 있으며 마스터와 슬레이브 사이의 데이터 공유는 하드웨어 FIFO 메모리를 이용한다. 전체 구조는 그림 3과 같다.

데이터 공유를 위해 하드웨어 FIFO 메모리를 사용하면 1개의 I/O 공간만을 할당하여 데이터를 전송할 수 있기 때문에 메모리 맵 구성이 간단하다. 또한 임베디드 리눅스(Embedded Linux)와 같은 운영 체제에서 가상 메모리 공간으로 맵핑되는 메모리 공간을 재할당받지 않으므로 디바이스 드라이버의 설계가 간단해지며 두개의 어드레스 포인터로 데이터가 저장되므로 동시에 데이터의 읽기 쓰기 기능이 가능하다. 이는 대용량의 데이터를 전달할 때 보다 효율적이다.

그림 3에서 마스터 시스템은 임베디드 리눅스를 운영 체제로 사용하는 임베디드 PC(Embedded PC)가 사용된다. 주로 데이터 저장 및 시스템 결함 판별, 초기화나 데이터 백업 그리고 외부와의 데이터 교환 등을 담당한다. 마스터 시스템의 저장 장치는 크게 운영체제를 저장하고 있는 CF(Compact Flash) 메모리와 실험 중의 센서 데이터를 저장하는 DAT로 구분된다. DAT는 총 12Gbyte(DDS-3 타입의 경우)의 저장 공간을 제공하는 테입 저장 장치로 24시간 이상의 데이터 저장을 가능하게 하며 진동이나 충격에도 안정적으로 데이터를 저장한다.

실제 PIG에 필요한 데이터 저장량을 계산해 보면 표 2와 같다. 표 2로부터 저장해야 할 총 데이터량을 계산하면 약 2.3Gbyte이다. 이는 운용 방식에 따라 증가할 수도 있다.

슬레이브 시스템은 센서 데이터의 처리를 담당하는데 16bit 마이크로 프로세서 2개를 사용한다. IMU와의 SDLC 통신을 위하여

Table 2. Data Size

센서	데이터 크기 (400Hz)	총 데이터량 (24시간)
IMU	14byte	약 462Mbyte
Caliper Sensor	48byte	약 1583Mbyte
압력센서	4byte	약 132Mbyte
주행거리계	6byte	약 198Mbyte

80C196KC와 Am85C30을 사용하며 캘리퍼 센서와 주행 거리계 등의 데이터 처리를 위하여 80C296SA를 사용한다. 모든 센서 데이터의 처리는 IMU 데이터의 수신 완료 시점에 놓기되어 처리된다. 1 샘플의 IMU 데이터가 수신되면 80C196KC는 데이터를 하드웨어 FIFO 메모리로 복사하고 80C295SA에 인터럽트를 요청하여 다른 센서 데이터를 처리하도록 한다. 캘리퍼 센서와 압력 센서의 데이터 처리를 위하여 500ksps의 12bit급 A/D 변환기 2개와 16채널 아날로그 MUX 2개를 사용한다. 주행 거리계는 80C296SA에 내장된 EPA를 이용하여 펄스 출력을 계수한다. 그림 4는 슬레이브 시스템의 기본 구성도이다. 그림 5는 실제 제작된 Geometry PIG의 항법 데이터 저장 시스템으로 오른쪽은 리튬 이온 배터리며 중간에 전원부와 IMU가 배치된다. 왼쪽은 개발된 항법 데이터 저장 시스템이다[3-5].

2.4. 소프트웨어

마스터 시스템의 주 운영체제는 임베디드 리눅스를 사용한다. 임베디드 리눅스는 안정성이 검증되어 있고 기존에 리눅스에서 구현

된 많은 디바이스 드라이버와 유틸리티의 사용이 쉽다는 장점을 가진다. 반면에 상용의 실시간 운영체제에 비하여 크기가 크고 실시간성 보장이 어렵다는 단점이 있다. 또한 리눅스 시스템에서 주로 사용하고 있는 ext2 파일 시스템의 경우에 파일 시스템을 해제(unmount)하지 않고 시스템이 비정상적으로 종료되는 경우에 swap 공간에 있는 데이터가 손실되어 파일 시스템이 파손될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 빠른 처리가 필요한 부분은 슬레이브 시스템에서 독립적으로 동작하며 모든 처리가 끝나면 FIFO 메모리로 전달하도록 되어 있어 임베디드 리눅스에의 실시간성 문제를 해결한다. ext2 파일 시스템이 손상되는 문제점은 CF 메모리에 커널 및 어플리케이션 이미지를 저장하고 부트 과정에서 램 디스크를 생성하여 커널 이미지 등을 복사한 후 임베디드 리눅스가 동작하도록 하여 해결한다. 이는 시스템이 비정상적으로 종료되어도 램 디스크의 파일 시스템이 손상되므로 CF 메모리의 운영체제는 안전하게 보존된다.

임베디드 리눅스에서 동작하는 PIG 운용 프로그램은 크게 시스템 초기화, 센서 보정, 센서 데이터 확인, 저장, 추출을 위한 프로그램과 센서 인터페이스 보드로부터 데이터를 가져오는 디바이스 드라이버로 구분된다. 센서 데이터를 가져오기 위한 디바이스 드라이버는 60초 단위로 데이터를 저장하며 데이터 손실을 막기 위하여 2중 버퍼 구조로 되어 있다. PIG 운용 과정은 그림 6과 같다.

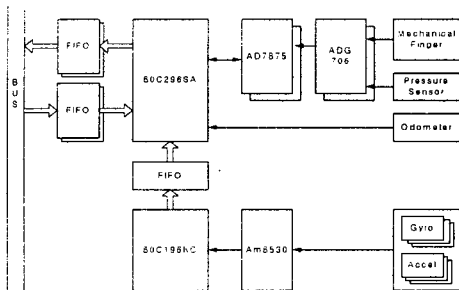


Fig. 4. Structure of Slave System.

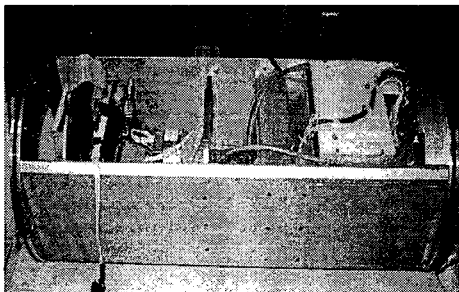


Fig. 5. Navigation Data Storage System.

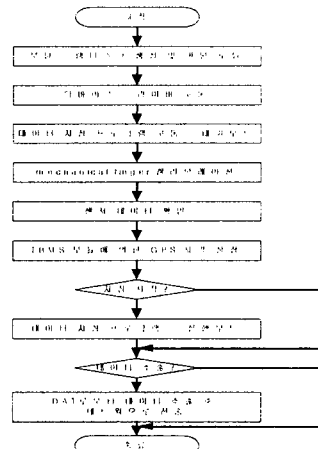


Fig. 6. Flowchart of PIG Operation.

### III. 성능 분석

모의 배관에 제작된 PIG를 투입하여 센서들의 동작 및 성능을 확인하는 Pull Rig 실험을 수행하고 그 성능을 분석하였다.

#### 3.1. Pull Rig 시험 환경

PIG의 성능을 테스트하는 Pull Rig 테스트에 사용할 모의 배관은 그림 7과 같이 구성된다. 배관은 크게 4개로 분리되며 각 배관의 지름과 길이는 표 4와 같다. 5번에 해당하는 배관은 원래 원형을 유지해야 하나 배관 전체가 타원형으로 찌그러져(ovality)져 있는 관으로 캘리퍼 센서의 동작 여부를 쉽게 확인 가능하다. 배관에서 3, 4, 8, 9번 영역은 찌그러짐을 만들어서 캘리퍼 센서가 찌그러짐 유무를 검출할 수 있는지 체크할 수 있도록 되어 있다.

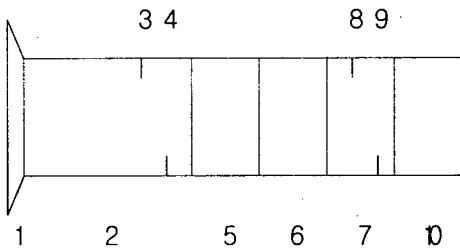


Fig. 7. Test Pipeline.

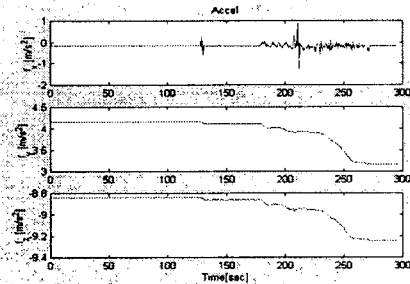
Table 4. Specification of Test Pipeline.

	설명	시작	길이
1	1.02m, 14.3t 배관	0m	1.02m
2	12m, 17.5t 배관	1.02m	12m
3	dent(8.9m 지점)		
4	dent(10.9m 지점)		
5	ovality(12.9m - 19.03m)		
6	6m, 11.1t 배관	19.02m	6m
7	6m, 14.3t 배관	25.02m	6m
8	원형dent(26.87m 지점)		
9	원형dent(28.87m 지점)		
10	6m, 11.1t 배관	31.02m	6m

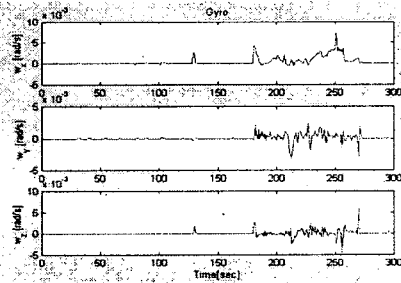
#### 3.2. Pull Rig 데이터 분석

본 논문에서 분석된 Pull Rig 실험은 약 5분간의 실험 결과이며 이 중 2분은 배관 진입 전이고 배관 진입 후에 1분 정도 정지 상태를 유지하며 다시 1분 30초 동안 약 36m의 모의 배관을 주행한다. 그림 8, 9는 저장된 IMU와 주행거리계의 데이터이다.

그림 8에서 약 125초 이후에 PIG가 모의 배관에 진입했다는 것을 가속도계의 X축 출력력이나 자이로의 출력으로 확인할 수 있다. 그림 8에서 180초에서 260초 사이에 모의 배관을 주행하였다는 것을 알 수 있다.



(a) 가속도계



(b) 자이로

Fig. 8. IMU Data.

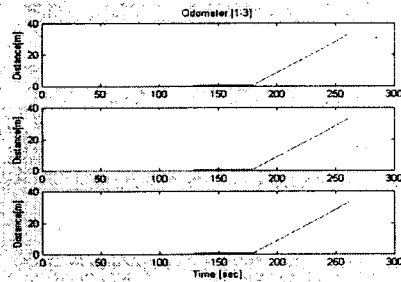
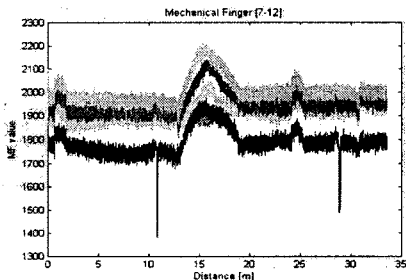


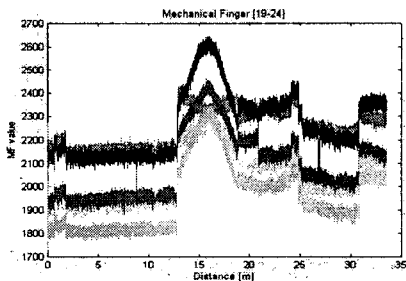
Fig. 9. Odometer Data.

그림 9의 주행거리계의 출력과 비교하면 두 센서의 동작 시점이 일치한다는 것을 확인할 수 있다. 그림 8에서 가속도계의 X축은 실제 주행 시에 들어온 힘을 나타내며 Y축과 Z축은 주행 중에 발생한 롤각 변화에 따라 지구 중력 가속도 성분이 분배되어 들어옴을 나타낸다. 그림 9에서 3개의 주행거리계의 누적된 거리가 모두 37m를 나타내며 이는 표 4의 모의 배관의 특징과 동일하다는 것을 알 수 있다.

그림 10은 주행 거리에 따른 캘리퍼 센서의 정보를 표시한 것이다. 약 1m 진행 후 각 채널의 출력이 감소하는 것은 1번째 배관에서 2번째 배관으로 진입할 때 직경이 변하는 것을 감지한 결과이다. 이후 약 13m 지점에서 각 채널의 데이터가 큰 폭으로 변하는 것은 배관이 타원형으로 찌그러진 구간이 존재하기 때문이며 출력되는 데이터가 일부는 증가하고 일부는 감소함을 확인할 수 있다. 찌그러짐이 있는 구간은 표 4를 참조하면 약 6m 정도인데 실제 출력되는 데이터도 이와 유사함을 알 수 있다. 또한 25m에서 31m 정도의 구간에서 전체 출력되는 값이 변경된 이유는 시험에 사용된 배관의 직경이 바뀌기 때문이다. 따라서 캘리퍼 센서가 정확하게 배관의 상황을 반영함을 실험 데이터로 확인할 수 있다.

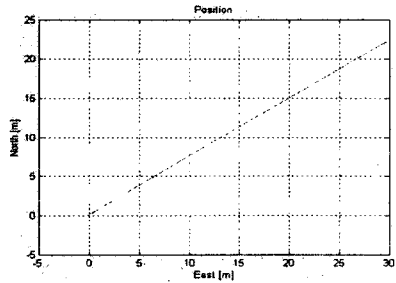


(a) 7-12채널

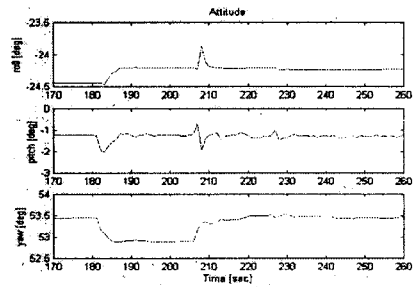


(b) 19-24채널

Fig. 10. Caliper Sensor Data.



(a) 위치



(b) 자세

Fig. 11. Results of Navigation.

그림 11은 IMU 출력과 주행 거리계 출력을 이용하여 항법 알고리즘을 수행한 결과이다. 자세, 속도, 위치 계산은 모두 400Hz 주기로 계산하며 오차 보정을 위하여 속도 보조 정보를 이용한 12차 칼만필터를 사용한다. 그림 11(a)의 위치는 시작 위치에서 최종 위치까지의 거리가 36.7367m로 표 4에서 1번째를 제외한 36m 배관 길이와 거의 동일하다. 그림 11(b)에서 자세 정보는 롤각, 피치, 요각이 비교적 일정하게 나옴을 확인할 수 있다. 롤각의 경우 초기 구동하면 일정 속도 회전함을 알 수 있다. 피치각의 경우 180초, 205초, 228초 부분에서 다소 변화가 생기는 데 그림 10의 시간에 따른 주행거리계의 거리 정보와 표 4의 실험 배관의 정보를 비교하면 이 부분이 서로 다른 배관의 접합 부분임을 확인할 수 있다. 요각 정보도 2번째 배관이 1번째 배관과 3번째 배관 연결할 때 0.5도 정도로 오차를 가지고 용접되어 있음을 나타낸다.

Pull Rig 실험 결과로 개발된 항법 데이터 저장 시스템이 정상적으로 동작함을 확인하였으며 실제 항법을 수행한 결과를 모의 배관 정보와 비교한 결과 서로 일치함을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 Geometry PIG를 위한 항법 데이터 저장 시스템을 개발하고 그 성능을 분석하였다.

전체 데이터 저장 시스템은 데이터 저장 및 전체 시스템 운용을 위한 마스터 시스템과 데이터 획득 및 처리를 위한 슬레이브 시스템으로 분리되며 FIFO 메모리를 사용하여 데이터가 공유되도록 구성하였다.

개발된 데이터 저장 시스템의 동작은 한국 가스공사에서 제작된 Geometry PIG의 1차 시제품에 탑재한 후, 시험실 및 압력실에서 정적 상태에서의 12시간 이상 데이터를 저장하는 시험을 진행하여 전체 시스템의 안정성을 검증하였으며, 다시 약 37m의 모의 배관 테스트를 진행하여 실제 시스템이 정상 동작하였음을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 내용은 PIG와 같은 가스 배관 진단 시스템 외에도 항법 데이터와 여러개의 진단 센서들을 가진 무인 시스템 또는 차량, 항공기 등의 사고 기록 장치 등에도 적용 될 수 있다.

#### 후 기

본 논문은 한국가스공사 연구개발원과 서울대학교 자동제어특화연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어졌습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. B. Nestleroth, T. A. Bubenik 외, GRI Pipeline Simulation Facility Magnetic Leakage Test Bed Vehicle - Final Report, Gas Research Institute, 1996
- [2] R. L. Wade, J. R. Adams, An Integrated Approach For Pipeline Fitness for Purpose Determination using Corrosion and Geometry Pipeline Pig Inspection Systems, Pipe Tech, 1995
- [3] 진 용, 박찬국, 박태웅, 노용우, "가스 배관 진단 시스템을 위한 항법 데이터 저장 시스템 개발," 2001 대한전기학회 하계학술대회, 2001. 7. 18 ~ 20
- [4] 박찬국, 진 용, "스트랩다운 관성항법장치의 정렬 알고리즘 시험을 위한 시험용 항법보드 개발," 한국항공우주학회지, 제26권, 제7호, 1998
- [5] 박찬국, 진 용, "INS/GPS 결합 항법 시스템," 제어 자동화 시스템공학회지, Vol. 5, No. 6, 1999. 11