

한국가스공사에서의 인텔리전트 피그 기술개발 현황

노용우, 유휘룡, 박대진,
구성자, 박승수, 조성호, 김동규
한국가스공사 연구개발원

1. 서론

인텔리전트 피그란 배관내의 유체(가스, 오일, 물 등)의 흐름을 이용하여 피그를 진행시켜 배관의 상태를 파악하는 장비로, 현재 모든 배관 운영회사에서 널리 사용하는 기술이다. 원래 피그는 배관 내부의 청소, 배관 내용물의 분리 등의 목적으로 오래전부터 사용되어왔던 것이 최근에는 비파괴 검사장비 및 컴퓨터의 발달 등으로 이의 기술을 피그에 탑재하여 배관의 모든 상태를 파악할 수 있는 인텔리전트 피그로 발달하였다.

인텔리전트 피그는 기능적으로 배관의 용접부위, 벤드, dent, ovality 등 배관의 형상과 배관의 위치를 파악할 수 있도록 수치 지도화(digital mapping)를 수행하는 지오메트리(geometry) 피그와 부식, 외부 손상 등으로 야기된 배관 두께의 손실(metal-loss)을 알아내는 자기누설(magnetic flux leakage) 피그로 분류되어 질 수 있다. 또한 매질이 석유나 물처럼 액

체인 경우는 배관의 두께 손실을 파악하기 위하여 자기누설 피그 대신 초음파 기술을 이용한 초음파(ultrasonic) 피그를 사용하기도 한다.

우리공사에서도 인텔리전트 피그 기술의 효용성을 인정하여 1995년도부터 우리공사 배관에 해외 선지 피깅 회사로부터 인텔리전트 피그 기술을 적용하여왔다. 특히 최근에 와서 인텔리전트 피그 기술의 효용성이 입증되어 미국과 같은 선진국의 경우는 정기적으로 모든 배관에 인텔리전트 피그 기술을 적용하도록 법제화 되어 인텔리전트 피그 기술의 중요성은 날로 증대되고 있다.

지하매설 배관은 시간에 따라 부식, 타공사 등에 의하여 계속적인 손상이 진행되므로, 인텔리전트 피깅은 일회성 검사로 완료되는 것이 아니라, 주기적인 검사가 필요하다. 우리공사 연구개발원에서는 인텔리전트 피그를 개발하기로 결정하여 2000년 5월부터 개발을 시작하여 지오메트리 피그는 상용화에 성공하였으며, 자기누설피그

는 시제품 개발을 완료하여 우리공사 배관에서
의 실증실험을 남겨놓고 있다. 본고에
서는 연구개발원에서 개발하고 있는 지오
메트리 피그와 자기누설피그의 개발 현황
을 기술하고자 한다.

2. 지오메트리 피그 개발

2-1. 지오메트리 피그 기술분석

지오메트리 피그는 배관의 형상과 기형
여부를 알아내는 피그로써 배관내의 dent,
ovality, buckle 등의 이상유무와 이의 위치
를 정확히 파악하고 더 나아가 배관의
(x,y,z)의 수치 좌표를 표시할 수 있는 수치
지도화(digital mapping) 기능을 가진 피그
이다.

지오메트리 피그는 Fig. 1에서 볼수 있듯
이 여러 가지 기술이 복합적으로 연계된 기
술적 총합체이며, 적용된 기술을 크게 분석
하여 보면 다음과 같다.

- 지오메트리 피그의 설계 및 제작
- Caliper system
- Odometer System
- INS/GPS integration system
- Data acquisition and data analysis
- Pig tracking modul

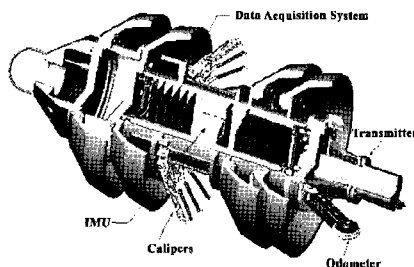


Fig. 1 지오메트리 피그의 개략도

우리공사에서 개발한 지오메트리 피그
(KogasCalGeo™)의 사양을 Tabel 1에 나
타내었다.

Table 1. 지오메트리 피그(KogasCalGeo™)사양

Specification	KogasCalGeo™	Specification	KogasCalGeo™
Mission length	500 km	Survey accuracy	1:2000(x,y,z)
Maximum operating speed	6 m/s	Dent & feature size dept	±2.5 mm
Optimum operating speed	1 ~ 4 m/s	Dent & feature orientation	±3 deg. arc
Minimum passable bend radius	1.5D	Ovality	±2.5 mm
Operating temperature	0 ~ 60	Operating pressure	1 ~ 100 bar

2-2. 지오메트리 피그 (KogasCalGeo) 개발

2-2-1. 지오메트리 피그 설계 및 제작

피그의 설계는 배관의 크기에 맞게 그리고 제작된 피그가 기존의 매설된 배관에 잘 통과하도록 설계하여야 한다. 본 피그는 1.5D bend에서도 통과가 가능하도록 그리고 배관의 관경이 약 30%정도 감소하여도 통과가 가능하도록 설계하여야 한다. 개발된 피그가 1.5D bend를 잘 통과 하는지 여부를 Fig. 2에 나타내었다.

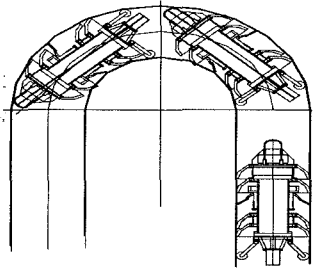


Fig.2 KogasCalGeo의 1.5D bend 통과 그림

2-2-2. Caliper system

캘리퍼 시스템은 배관의 내부 벽을 접촉하여 지나감으로써 배관의 형상 모양을 감지하는 장치이다. KogasCalGeo™에 사용한 캘리퍼 시스템은 이방성 자석을 이용하여 비 접촉이면서 구동드라이버의 제작이 쉽고 정밀도가 높고 부착이 쉬운 mechanical finger 시스템을 개발하였고 유한요소법에 의해서 이방성 자석 및 홀센서가 결합된 회전각 측정 시스템의 자기장을 분석하여 최적의 시스템을 개발하였다.

Fig. 3은 개발된 mechanical finger의

구성을 보여주고 있다. 그림과 같이 피그가 진행함에 따라 mechanical finger의 wheel은 배관 벽을 따라 회전하면서 이동한다. 이때 그림과 같은 dent를 지나면 finger arm에는 각변위가 발생하고 이 회전각 변위를 센싱 모듈에서 측정하여 dent의 크기와 길이를 측정할 수 있게 된다.

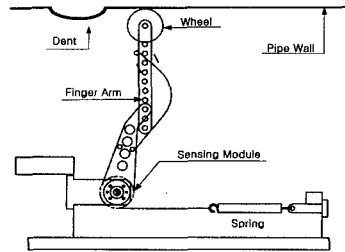


Fig.3 Schematic diagram of the mechanical finger

2-2-3. Odometer system

Odometer system은 피그의 주행거리를 측정하는 장치이다. 이는 항법시스템 구성에 있어서 관성센서의 오차에 의한 항법 오차의 발산을 억제하는데 쓰이게 된다. 주행거리계는 홀센서를 이용하여 바퀴의 회전량을 측정하고 이를 일정시간으로 나누어 속도 정보를 제공하는 기본 구조로 되어 있다. 이의 그림을 Fig. 4에 나타내었다.

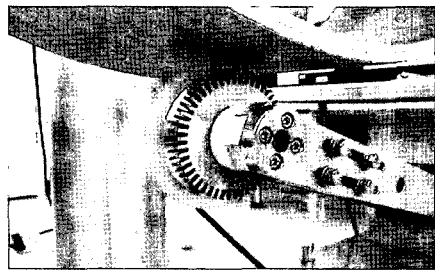


Fig.4 Odometer 시험 모습

2-2-4. INS/GPS integration system

피그 항법 시스템은 피그가 주행했던 가스 배관의 위치를 정확하게 파악하기 위한 시스템으로 배관의 유지 보수에 필수적인 요소라 할 수 있다. 피그 항법 시스템은 관성항법 시스템(INS: Inertial Navigation System)을 이용하였다.

관성항법시스템은 관성공간에서 항체의 움직임을 감지하는 가속도계(accelerometer)와 자이로스코프(gyroscope)같은 관성 센서의 출력을 이용하여 외부의 도움 없이 항체의 위치, 속도 및 자세에 대한 정보를 제공하는 시스템으로 기계적인 안정대(stabilized platform)구조의 유무에 따라 김블드 관성항법시스템(GINS: Gimbaled INS)과 스트랩다운 관성항법시스템(SDINS: StrapDown INS)으로 분류된다. GINS에 비해 소형, 저가, 저중량, 저전력 소비, 고신뢰성, 정비 및 설계 용이 등의 장점을 갖춘 SDINS는 1970년대 이후 응용분야가 점점 확대되는 추세에 있으며, 피그항법시스템에서도 스트랩다운 관성항법시스템을 적용하였다.

그러나, 관성센서만을 이용하여 항법 해를 구하게 되면 항법 오차는 시간에 따라 증가하여 발산하게 된다. 이러한 단점을 개선하기 위한 방법으로 위치 또는 속도 정보를 제공하는 비관성 보조센서의 도움을 받아 항법오차를 줄일 수 있는 보조항법(aided navigation)이 있다. 피그 항법 시스템에서도 보조센서를 사용한 보조항법 방식을 사용하고 있으며, 피그 보조센서로

주행거리계와 위치 기준점에서의 GPS 신호를 사용하였다.

피그 항법 소프트웨어의 기능은 피그의 주행 중에 얻을 수 있는 각종 센서 출력을 사용하여 피그가 주행했던 가스 배관의 위치 정보를 추정하는 것이며, 이러한 과정은 후 처리(off-line) 방식으로 진행된다. 추정된 배관 위치 정보는 mechanical finger 센서 출력과 함께 사용되어 배관의 손상부위를 알아낼 수 있다. 또한, 추정된 배관 위치는 처음 배관을 건설할 시점과 비교하여 현재 배관이 어느 정도 벗어나 있는지 여부도 알 수 있을 것이다. 따라서 이러한 데이터를 계속 축적하게 되면, 시간이 흐르면서 배관 위치가 어떻게 바뀌는지에 대한 정보를 얻을 수 있기 때문에 배관을 운용하는 관점에서 많은 도움이 될 것이다.

2-2-5. Data acquisition and data analysis

Data acquisition system은 배관 감시를 위한 지오메트리 피그용 data 저장장치로써, 우리 자체 모델인 KogasCalGeo을 위해 특별히 제작된 제품이다. Data acquisition system은 크게 전원관리부, 데이터 처리부, 데이터 저장부로 나눌 수 있다. 이 중 데이터 변환부는 항법 기능을 수행하기 위해 항법 센서 및 항법 보조 센서의 데이터를 처리하는 항법 데이터 처리부, 배관의 이상 유무, 특히 배관의 굴절 유무를 감지하는 지오메트리용 mechanical finger 센서들을 최소 24채널 이상 32 채널까지 처리할 수 있는 지오메트리 센서 처

리부 및 기타 보조 센서인 온도 센서, 압력 센서 등 환경 센서를 처리할 수 있는 보조 센서 처리부로 나눌 수 있다.

이 중, 항법을 위한 항법 데이터 처리부와 지오메트리 센서 처리부는 이 시스템에서 가장 중요한 부분으로, 대용량 신호를 400hz 이상의 빠른 속도로 동시에, 즉 시각 동기를 항법 센서와 정확하게 수행하며 처리하게 된다.

Data acquisition system의 기본적인 특성은 다음과 같다.

- IMU interface(ARMRAM format)
- 32 channel 이상의 아날로그 입력
- Channel당 400Hz 이상 샘플링
- 각 샘플 당 샘플링 지연 1 sec 미만
- 1, 2차 전지의 효율적 사용을 위한 저전력 구동
- IMU 데이터와 완벽한 시각 동기
- 충격 및 진동에 강인한 제이타 저장구조
- 각 channel 별 과전류 보호회로 내장
- 기본적인 FDI 구현
- 시스템 상태 저장 및 모니터링 기능

Data acquisition system으로부터 수집된 원시 데이터 즉 INS 데이터, finger 데이터, Odometer 데이터를 분석하여 배관의 정보를 분석할 수 있는 분석 프로그램을 개발하였다.

2-2-6. 피그 tracking system

피그의 위치 파악은 피그 운용중이나 이후의 결과 판독작업에 있어 매우 중요한 부

분이다. 피그를 운용할 때 발사 트랩을 떠났는지의 여부와 리시버 트랩에 도착했는지의 여부를 아는 것과 작업 중 어떤 위치에 있는지를 아는 것이 매우 중요하다. 그리고 인텔리전트 피깅 시행 후 배관의 손상 부위가 나타났을 때 이 부위를 보수하기 위해서는 정확한 위치를 알아야 한다. 이를 위해 피그에 신호를 발신하는 장치(transmitter)를 장착하여 배관 직상부에 신호를 수신하는 장치를 일정 간격으로 설치하여 피그가 지나가는 시간을 측정하여 분석하게 된다.

2-3. 지오메트리 피그 적용

개발된 KogasCalGeoTM를 지금까지 우리공사 배관에 시범적용을 실시하였다. 시범적용 피깅 구간으로는 인천-남동(12km), 정읍-월출(56km), 평택-유성(120km), 대전-해미(51km)구간 등 총 500km 정도를 시범 적용하였다.

Fig. 5에는 정읍-월출구간 지오메트리 피그 적용 그림이며 Fig. 6은 지오메트리 피그로 찾아낸 dent의 그림을 보여주고 있다.

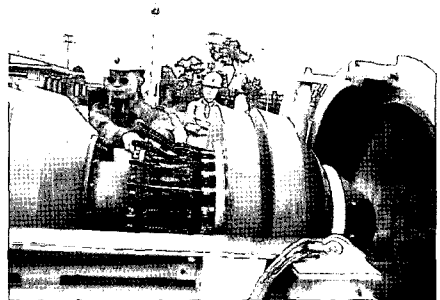


Fig.5 연구개발원에서 개발한 지오메트리 피그의 정읍-월출구간 적용



Fig. 6 정음-월출 구간에서 찾아낸 배관 dent의 사진

피킹 예로써 정음-월출 구간의 피킹 데이터를 보면 처음 피킹 출발시의 분석 화면을 Fig. 7에 나타내었으며, dent분석 그림을 Fig. 8에, dent 부위의 주어진 finger data로부터 3차원으로 배관을 표현할 수 있으며 이의 예를 Fig. 9에 나타내었다. 또한 항법 데이터의 분석으로 plan view와 profile view를 Fig 10에 나타내었다.

지오메트리 피킹의 경우 데이터의 신뢰성 및 피그의 내구성을 확인하고 2004년부터는 우리공사 배관에 상업적용을 시작으로 사업화를 모색하고자 한다.

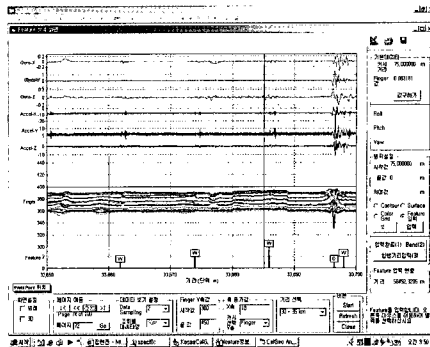


Fig. 8 Dent 부위 Finger 데이터

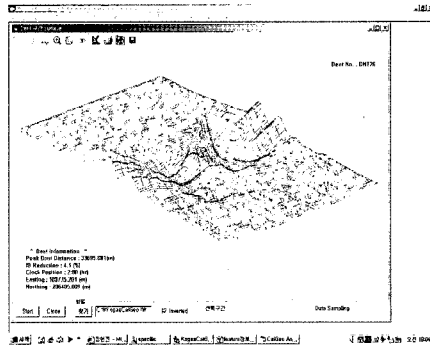


Fig. 9 Dent 부위 Surface 화면

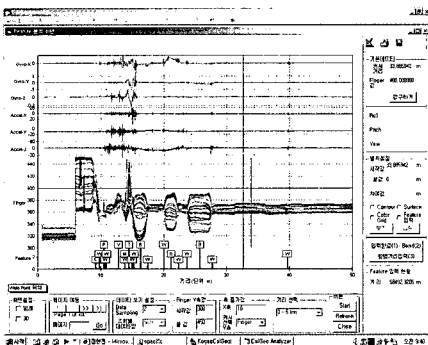


Fig. 7 Finger와 INS 데이터 분석 화면

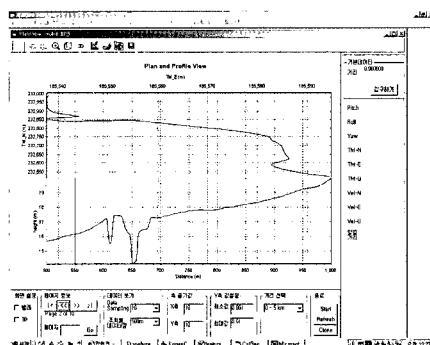


Fig. 10 Plan과 Profile 데이터 화면

3. 자기누설(Magnetic Flux Leakage) 피그 개발

3-1. 자기누설 피그 기술분석

자기누설 피그는 부식 또는 제3자에 의한 배관의 두께 손실을 알아내는 피그로써 지오메트리 피그와 같이 여러 가지 기술이 복합된 것으로 기술 분류를 하여보면 다음과 같다.

- 자기누설 피그의 설계 및 제작
- Magnetization system
- Weld detecting system
- Odometer System
- INS/GPS integration system
- Data aquisition and data analysis
- Pig tracking module

우리공사에서 개발한 자기누설 피그(KogasMFLTM)의 사양을 Tabel 2에 나타내었다.

3-2. 자기누설 피그(KogasMFL) 개발

자기누설 피그의 경우 magnetization system을 제외하고 지오메트리 피그와 같은 기술을 사용한다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 자기누설 피그는 자화(magnetization) 시스템을 이용하는 것이 핵심 기술이다. 자기누설피그는 자석의 두 극 사이에서 배관이 자화되며, 배관의 손상 부위에서 자속(flux line)이 변화하여 이러한 자속 변화를 센서를 이용 검출, 이를 전기적 신호로 바꾸어 주어 데이터 저장장치에 저장한 후 추 후 컴퓨터를 통하여 분석하여 배관의 이상부위를 검출할 수 있다.

Table 1. 지오메트리 피그(KogasCalGeoTM)사양

specification	KogasMFL		
Mission Length	300 km		
Maximum Operating Speed	6 m/s		
Optimum Operating Speed	1 ~ 4 m/s		
Minimum Passable Bend Radius	3 D		
Maximum Operating Pressure	100 barg		
Operating Temperating	0 ~ 60		
Data memory	12 to 24 Gigabyte		
Pit Corrosion Smaller than 3t 3t	size	dept	accuracy
	t×t	0.4t	0.2t
	2t×2t	0.3t	0.15t
	3t×3t	0.2t	0.1t
General Corrosion Lager than 3t 3t	3t×3t	0.2t	0.1t

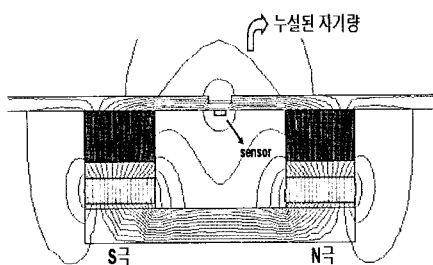


Fig.11 자기누설(magnetic flux leakage) 피그의 원리

자기누설 시스템은 측정하고자 하는 가스관과 영구자석, 요크, 브리쉬 등으로 구성된 자기시스템이며 가스관의 누설 자속을 검출하여 가스관의 결함여부를 알 수 있다.

이러한 자기누설 시그널 해석 시 고려되어야 할 사항은 첫째, 가스관의 포화정도이다. 가스관을 적게 포화시키면 defect가 있는 경우라도 누설자속이 발생하지 않게 되며, 만약에 과 포화시키면 결함이 없는 경우에도 많은 누설자속이 발생하여 신호 검출에 어려움이 발생한다. 가스관을 적당하게 포화시켜 결함이 있는 부분에서 많은 누설자속이 나오도록 설계되어야한다. 둘째로는 브리쉬의 투자율 문제이다. 브리쉬는 빗살구조로써 각각 가는 선을 모아서 다발형태로 되어있다. 이러한 브리쉬의 적정 투자율은 산정하는 것이 중요하다고 하겠다. 셋째로는 측정부분의 자기장의 크기이다. 자기장에 비해 너무 큰 홀센서를 사용할 경우 defect여부를 판정할 수 없고, 자기장에 비해 너무 작은 홀센서를 사용하게 되면 defect의 깊이 등을 해석할 수 없다. 따라

서 검출하고자 하는 defect에 해당하는 적절한 홀센서의 범위와 감도를 설정하는 것이 핵심기술이다.

본 개발에서는 우리공사 배관에 적용하기 위하여 30인치용 자기누설 피그를 설계 제작하였다. 완성된 자기누설 피그를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 전체적으로 두개의 몸체로 구성되어 있다. 앞의 것은 magnetization system을 뒤의 것은 데이터 저장장치와 battery를 담고 있다. data 저장장치의 경우 지오메트리 피그와 같은 개념으로 설계되었으며 다만 많은 양의 data를 처리하도록 되어 있다.

Fig. 13은 magnetization system의 사진으로 브리쉬 사이에 있는 것이 센서 모듈이며 Fig. 14는 센서 모듈을 확대한 것이다. 한 개의 센서 모듈 안에는 radial 방향, axial 방향, circumferential 방향 각각 3개씩 9개의 홀센서와 한 개의 와전류 센서가 들어있다. 피그는 전체 64개의 센서 모듈로 구성되어 있다. 각 방향 당 192개의 홀센서와 64개의 와전류 센서로 구성되어 있으며 각각의 신호들이 2진 형태로 저장되게 된다.

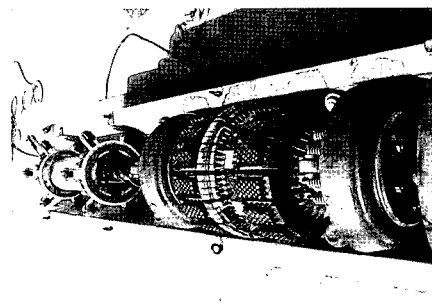


Fig.12 제작된 자기누설 피그 그림

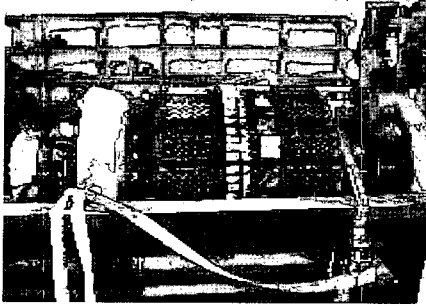


Fig.13 30인치용 magnetization system 사진

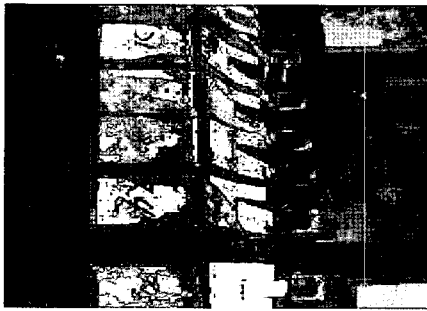


Fig.14 홀센서 모듈

3-3. 자기누설 피그 적용

현재 우리원에서는 자기누설 피그 시제품 제작을 완료한 상태이며, 제작된 시제품으로 pull-rig 설비를 이용 실험을 수행하였다. Fig. 15는 제작된 자기누설 피그의 pull-rig 실험 장면을 나타내었다.

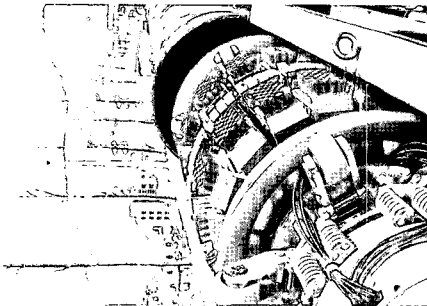


Fig.15 자기누설 피그의 pull-rig 실험 장면

금번 실험을 위하여 특별히 결함이 있는 배관을 제작 설치하였으며 아래 배관의 음영된 부분에 총 12개의 결함을 만들어 사용하였다.

입구									출구
6m	6m	2m	2m	2m	2m	2m	2m	6m	6m
17.5t	17.5t	17.5t				11.1t		17.5t	17.5t

결함이 있는 배관의 그림을 Fig. 16에 나타내었으며, 그 중 자세한 결함 중의 하나를 Fig. 17에 나타내었다. 이와 같은 결함을 가스관 표면에 12개 제작하여 직접 실험하였다. 그리고 그의 위치와 크기를 Table 3에 나타내었다.

Pull-rig 실험 결과 axial signal을 Fig. 18에 radial signal을 Fig. 19에 나타내었다.

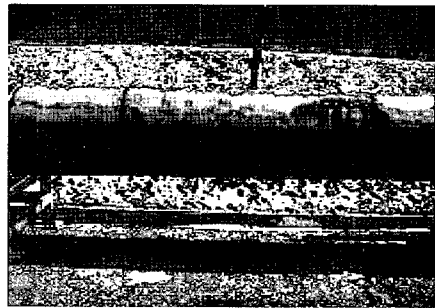


Fig.16 결함이 있는 배관



Fig.17 3t*3t*0.2t 결함

Table 3. Pull-rig용 배관부위(음영된 부분)의 결합

	10		3	8	
4		2			12
	9		5	7	
11		1			6

- ① 1t * 1t * 0.4t ② 2t * 2t * 0.3t
- ③ 3t * 3t * 0.2t
- ④ 1t * 1t * 0.4t(내부결합)
- ⑤ 1t * 1t * 0.6t ⑥ 1t * 1t * 0.2t
- ⑦ 0.5t * 0.5t * 0.4t
- ⑧ 0.5t * 0.5t * 관통
- ⑨ 1t * 2t * 0.4t ⑩ 2t * 1t * 0.4t
- ⑪ 1t * 3t * 0.4t ⑫ 1t * 1t * 0.4t

4. 결론

한국가스공사 연구개발원에서 개발 중인 인텔리전트 피그 중 지오메트리 피그는 개발을 완료하여, 우리공사 배관을 이용, 약 500km 정도의 실증 실험을 통하여 피그의 신뢰성 및 내구성을 검증하였다. 따라서 지오메트리 피그의 경우 2004년도부터 우리공사 배관에 상업적용을 시작할 예정이며, 이를 바탕으로 국내 및 해외 사업 등 사업화를 수행하고자 한다.

자기누설 피그는 현재 시작품을 개발 완료한 상태이며, 2004년도에는 우리공사 배관을 통한 실증 실험을 완료한 후 상업적용을 하고자 한다.

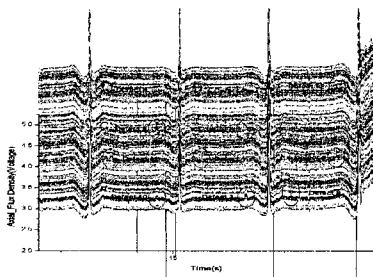


Fig.18 Pull-rig 배관 통과 axial signal

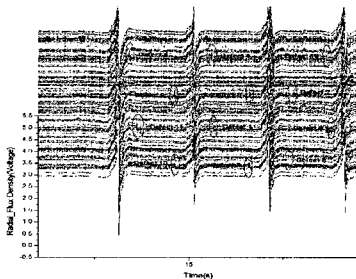


Fig.19 pull-rig 배관 통과 radial signal