

## 배관의 진단(II)

김영환

대한검사기술주식회사, 부설연연구소장

### Inspection of Pipeline(II)

Young H. Kim

R. & D Center, Korea Inspection & Engineering Co., Ltd., Seoul 137-060

#### 5. 피그(Pig) 시스템

피그(pig)는 장거리 배관 및 배관라인 내부를 움직이면서 그 기능을 수행하는 장치이다<sup>15-17</sup>. 대개의 피그는 자체적인 추진력이 없고 배관 내부를 흐르는 유체의 압력에 의해 이동된다. 이들은 세척, 유체의 분리와 같은 단순한 임무를 수행하는 표준 피

그와 지능적인 임무를 수행하는 지능형(intellegent) 피그로 나눌 수 있다. 지능형 피그를 사용하여 배관의 상태를 파악할 수 있는데 이러한 기술을 확보하고 있는 회사로는 전세계적으로 독일의 Pipetronix, 미국의 Tuboscope, 영국의 British Gas, 일본의 NKK 등의 몇 개의 회사로 국한된다. 피그는 배관의 직경에 맞게 제작되어야 하는데, 배관의 직경이

Table 4. 배관라인 검사에 사용하는 피그

절차	피그의 종류	동작원리	검사결과
세척	폼 피그(Form pig)	플라스틱 몸체	피그 가능성 조사
	쌍방 피그 (BiDi pig)	폴리우레탄 디스크	침전물 제거
	특수 세척 피그	폴리우레탄 디스크 및 브러쉬	부식 부위의 침전물 제거
형상검사	Gauging plates	알루미늄 판	통과여유
	CalScan	기계적 검출기	직경감소
측량	ScoutScan	자이로스코프	배관도
감육	MageScan	누출자속	두께 10%이상 내외부 부식
	UltraScan WT	초음파	내외부 부식
균열검출	EddyScan CD	펄스 와전류	내부균열
	UltraScan CD	초음파	내외부 종방향 균열
누출탐지	LeakScan	압력차	누출부위 탐지
	LeakScan(Maihak)	음향방출	누출부위 탐지
육안검사	PipeScan	비디오 시스템	1.5km 이내의 거리 검사

다양하여 각각의 직경에 따라서 여러 모델의 지능형 피그를 도입하는데에는 경제성이 낮기 때문이다.

배관을 검사하는데 많이 사용되는 피그는 Table 4에 나타내었다. 또한, 대개의 지능형 피그들은 자체에 메모리와 배터리를 지니고 있어서 피그를 주행시킨 후에 내부의 메모리에 저장된 데이터를 분석하여 배관의 상태를 진단한다. 메모리와 배터리는 보통 400km 정도의 장거리 배관을 한 번에 검사가 가능한 정도의 용량을 지닌다.

5.1. 표준 피그

표준형 피그는 cleaning, sealing, batch용 등이 있다. 배관의 건설공사가 종료되는 시점에서 배관 내부의 청소는 필수적이다. 건설공사중에 배관내에 들어간 흙이나 자갈은 물론이고, 용접봉이나 유실된 공구들이 배관내에 있을 수 있다. 시간이 지남에 따라서 배관 내부에는 불순물이나 침전물이 부착될 수 있다. 이러한 부착물을 제거함으로써 취급되는 유체의 품질을 향상시키는 것은 물론이고, 이들을 흐르게 하는데 소요되는 압력을 낮출 수 있어서 에너지 절감의 효과도 거둘 수 있다.

또한, 지능형 피그를 사용하기 전에는 미리 배관의 내부를 청소해야 올바른 측정 결과를 얻을 수 있음은 물론이고 피그가 배관내에서 정지되는 사고를 방지할 수 있다. 세척용 피그는 배관 내부를 청소하는데 사용되는데, 재질과 형상이 다양하여 그 목적에 적합한 피그를 사용한다 (Fig. 8 참조). 때로는, 자석이 부착된 피그를 사용하여 철조각과 같은 불순물을 제거하는데 사용한다.

배관 내부의 세척은 대개의 경우 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 여러 종류의 피그를 사용하여 단계적으로 배관 내부를 청소한다. 처음에는 스폰지와 같은 물렁물렁한 피그(LD)를 사용하여 통과된 피그의 형태를 관찰한다. 회수된 피그의 손상도가 배관 내부의 상태를 개략적으로 판단할 수 있게 하는데, 그 다음 단계로는 좀 단단한 피그(AB)를 사용한다. 짧은 철술이 부착된 피그(ACC)와 LD를 반복적으로 사용하면서 부착물을 긁어내어 점차 그 직경을 넓혀간다. 각각의 단계에서 씻겨 나오는 내용물을 보고 다음 단계로 넘어갈 것인지 아니면 현 단계를 반복할 것인지를 판단한다. 관의 부착물이 어느정도 제거가 되었으면 폴리우레탄 디스크로 만들어진 BiDi를 사

용하여 세척을 한다. 다양한 기능의 세척용 피그의 규격의 예를 Table 5에 나타내었다.

세척용 피그외에도 batch용 피그는 유체와 유체를 분리하는데 사용된다. 예로서, 송유관은 휘발유, 등유, 경유 등을 한 배관을 사용하여 수송하는데, 각각의 유체 사이에는 분리용 피그를 사용하면 유체들이 섞이지 않고 한 배관을 사용할 수 있다.

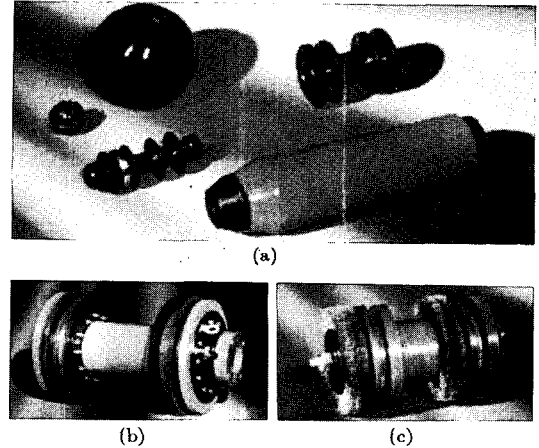


Fig 8. 형적인 세척용 피그 (a) 다양한 형태의 피그 형상. 사용 목적에 적합한 재질과 형상을 사용한다. (b) 양방향 피그 (c) 솔이 달린 양방향 피그

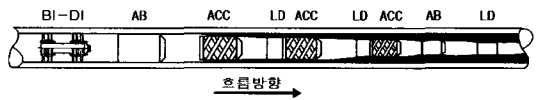


Fig 9. 여러 종류의 세척용 피그를 사용하여 단계적으로 배관 내부를 청소한다.

5.2. 형상(Geometry) 검사

배관의 청소가 끝나면, 배관의 내부를 지능형 피그가 통과할 수 있는지 조사하기 위해서 내경의 95%에 해당하는 직경의 알루미늄 판(gauging plate)을 통과시킨다. 알루미늄 판이 변형없이 무사히 나오면 배관 내경의 변화가 크지 않으므로 다음 단계를 진행하지만, 손상을 입었을 경우에는 CalScan(caliper scan)을 사용하여 배관의 내경의 변화를 측정한다. 전형적인 CalScan의 모습은 Fig. 10과 같다. 검 슬리브가 배관벽에 밀착되어 있어서 유체의

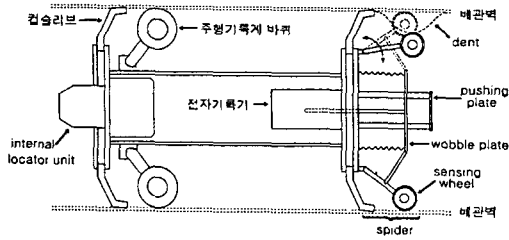


Fig. 10. 전형적인 CalScan의 구성도.

흐름이 CalScan을 앞으로 나가게 한다. 바퀴형 주행 기록계(odometer)가 피그의 주행거리를 측정하며 피그 탐사장치(locator)로 지상에 설치된 발신기에서 보내는 신호(marker)를 수신하여 피그의 정확한 위치를 파악하여 주행기록계의 오차를 보정한다. 감지용 바퀴는 배관의 내벽에 밀착하여 진행하면서 찍힘이나 흠 등으로 내경의 변화가 있으면 이 바퀴가 움

직여 요동판(wobble plate)을 움직여 주고 이 움직임이 반도체 메모리에 저장된다 (Fig. 11 참조). 90° 굽은 부분에서도 굽은 반경이 파이프 직경의 1.5배 이상이면 통과가 가능하며 0.1-3m/s 속도까지 주행이 가능하다.

대표적인 검사 결과의 예가 Fig. 12와 같다. CalScan을 사용하여 얻을 수 있는 정보는 찌그러진 부위(ovality), 찍힌 부위(dent)들의 위치는 물론이고 파이프의 이음매(girth welds), 밸브의 위치 파악도 가능하며 주행속도의 정보도 알 수 있다. 또한, 이음매 사이의 거리로부터 파이프 하나의 길이도 알 수 있으며 이러한 정보를 취합하면 파이프 라인 전반의 정보를 알 수 있어 소위 pipebook이라는 자료를 만들 수 있다. Ovality나 dent가 심하면 그 부위를 보수한 후에 다음 검사를 진행한다. CalScan의 규격은 Table 6과 같다.

Table 5. 다양한 세척용 피그의 규격예

PIG TYPE	STYLE	SIZES	DENSITY	FUNCTION
LD (low density)		2" - 48"	LOW 35kg/m <sup>3</sup>	Pipeline Drying
AB (Apua Bare)		2" - 60"	MEDIUM Approximately 80kg/m <sup>3</sup>	Regular Drying Up to 10MI
ACC (Apua Criss Cross)				Longer Wiping Up to 25MI
ACC-WB (Apua Criss Cross Wire Brush)				Longer Wiping Up to 25MI
ACC-SC (Apua Criss Cross Silicon Carbide)				Longer Wiping Up to 25MI
SBD (Scalet Bare Durafoam)		2" - 60"	HEAVY Approximately 128 kg/m <sup>3</sup>	Heavy Drying Up to 200MI
SCC (Scalet Criss Cross)				Heaviest Wiping Up to 300MI
SCC-WB (Scalet Criss Cross Wire Brush)				Heaviest Scraping Up to 300MI
SCC-SC (Scalet Criss Cross Silicon Carbide)				Heaviest Scraping Up to 300MI
SPECIAL APPLICATIONS				
UNICAST		2" - 60"	320kg/m <sup>3</sup>	Long Range Cleaning Up to 2000MI
GRAY HARD SCALE		2" - 60"	HEAVY Approximately 128kg/m <sup>3</sup>	Industrial Scraping Up to 300MI
MAXI-BRUSH (Light Wire)				Maximum Scraping Up to 300MI
MAXI-BRUSH (Heavy Wire)				Maximum Scraping Up to 300MI

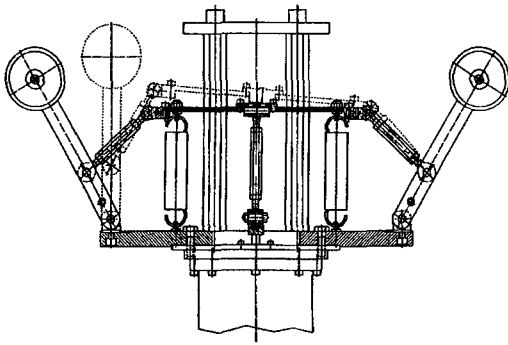


Fig. 11. CalScan의 wheel과 센서부분의 움직임

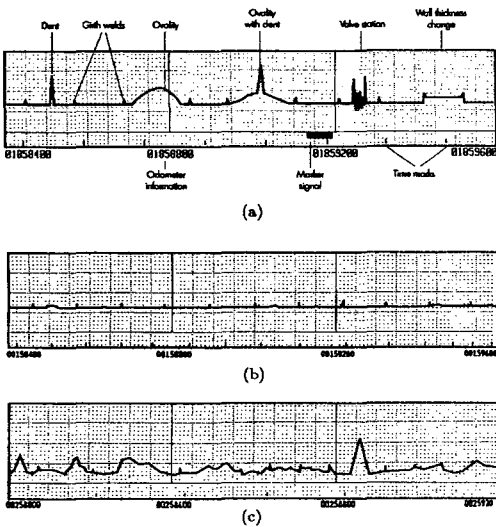


Fig. 12. (a) 전형적인 CalScan 검사결과. (b) 가하학적 변형이 없는 경우와 (c) 심한 기하학적 변형이 있는 경우의 검사 결과

Table 6. 개략적인 CalScan의 규격

크기	6" - 60"
최소 통과직경	공칭직경의 75%
최소 곡률반경	공칭직경의 3배 (1.5배도 가능)
검출 감도	dent: 0.6%/2mm, girth weld : 0.3%/2mm
주행기록계	2개의 주행기록 바퀴
추가적인 위치정보	지상 마커 시스템
주행기록계 정밀도	girth weld를 기준으로 ±1m
최대 거리	600km (킵 리브 마모에 따라 다름)
전지 수명	500 시간 (1000 시간도 가능)
최대사용압력	100 bar
운송매질	모든 액체 및 기체

5.3. 감옥(Metal Loss) 검사

도양이나 주위 환경의 영향으로 배관의 외벽에 부식이 발생할 수 있으며, 배관의 내부에 흐르는 부식성 유체에 의해 내부에 부식이나 침식이 발생할 가능성이 있다. 이러한 부식이나 침식을 감옥(metal loss)라 하며 이로 인해서 배관이 파손될 수 있다. 이를 검출하는 대표적인 지능형 피그는 MagneScan과 UltraScan WT가 있다<sup>(8)</sup>. MagneScan은 자기장을 이용하므로 사용 유체의 종류에 무관하게 검사를 할 수 있으나 배관의 재질이 강자성체이어야 한다. 반면에 UltraScan은 초음파를 이용하므로 배관의 재질에는 무관하지만 액체를 접촉 매질로 사용해야 하므로 가스관에는 직접 적용하기는 곤란하다.

5.3.1. MagneScan

이는 결함이 있는 부위에서 누출자속(magnetic flux leakage: MFL)이 생기는 현상을 이용하는 것으로 자분탐상시험과 원리적으로 동일하다. 다만, 자분탐상에서는 누출자속을 검출하기 위해서 자분을 사용하지만 MagneScan에서는 누출자속을 센서로 검출하여 메모리에 저장한다. Fig. 13에 MagneScan의 원리를 나타내었다. 배관을 자화하기 위해서는 영구자석을 이용하는데, 쇠로된 브러시를 사용하여 배관에 접촉함으로써 말굽자석과 같은 배치를 한다. 내부 결함이나 외부 결함이 있게 되면 누출자속이 발생된다. 이 누출자속을 측정하는 센서는 표준형(pick-up coil)과 홀 프루브(Hall probe)가 사용되고, 센서의 갯수에 따라서 표준형(standard), 고분해능형(HR) 및 초고분해능형(XHR)으로 나누어진다. 누출자속은 내부 또는 외부 부식에 대해서 모두 검출되는데, 결함이 존재하는 위치가 내부인지 외부인지를 판단하

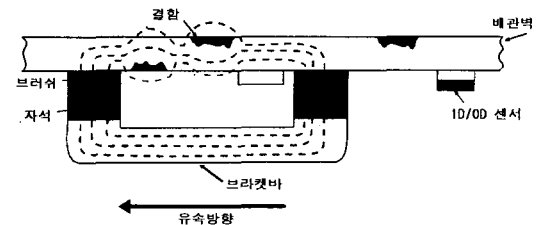


Fig. 13. MagneScan의 동작원리. 내부 및 외부 부식이 있는 부위에서 자속이 누출되고 이 자속을 검출한다.

기 위해서는 별도의 ID/OD 센서를 사용하여 결정한다. Fig. 14에 나타낸 바와 같이 ID/OD 센서는 영구 자석과 홀 프루브로 구성되어 있고, 내부 부식에 대해서 자기장의 모양이 변하므로 이 변화를 이용하여 부식 부위를 알 수 있다. 한편, 파이프의 벽 두께가 너무 두꺼운 경우에는 배관의 외벽에 존재하는 부식에 의해 내부에 생기는 누출자속은 미미하여 검출하기가 곤란하다. 직경이나 튜의 종류에 따라서 달라지나 대개의 경우 1" 이상 두께의 파이프에서는 외부 결함을 검출하기는 어렵다. MagneScan을 이용하면 정상적인 부식의 깊이 측정이 어렵지만, 간접적인 방법에 의해서 교정을 통하여 부식의 깊이를 측정할 수 있다.

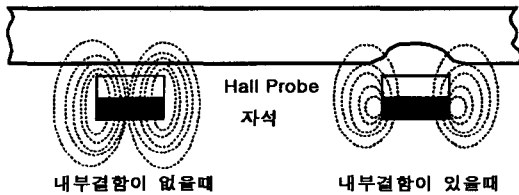


Fig. 14. ID/OD 센서의 동작원리. 내부 부식이 있을 경우에는 자기장의 모습이 달라진다.

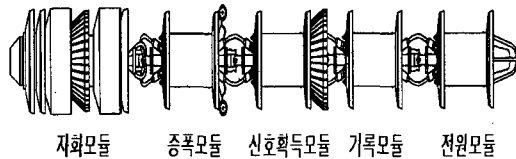


Fig. 15. 직경이 12인치인 배관 검사용 MagneScan의 구성도.

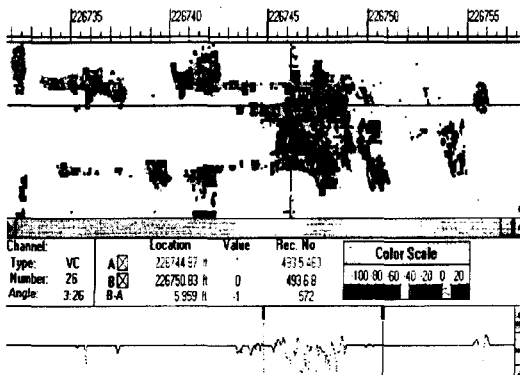


Fig. 16. MagneScan HR을 이용한 검사의 예

MagneScan은 영구자석을 이용한 자화부 및 누출자속을 측정하는 센서부, 검출된 누출자속 신호를 증폭시키는 증폭부, 신호 획득부, 저장부 및 전원부로 구성된다. 검사 대상 파이프의 직경에 따라서 3-5개의 모듈로 구성되는데 한 예로서 12인치용 MagneScan의 구성도를 Fig. 15에 나타내었다. 이 장치의 경우에는 3GB 용량의 DAT driver 2개를 내장하고 있으며 배터리의 수명은 약 30시간 정도이다.

MagneScan HR을 사용하여 얻어진 대표적인 검사의 결과를 Fig. 16과 17에 나타내었다. 여기에 나타낸 결함은 거스 용접부 근처에 발생한 부식부로 Fig. 16은 MagneScan 검사 결과이고 Fig. 17은 이를 근거로 산출된 결함의 모양과 실제 결함의 모습이다.

MagneScan으로 검출할 수 있는 결함의 크기는 파이프의 직경, 센서의 수에 의해 좌우된다. 기본형 MagneScan은 직경이 12"-20"의 경우 12개의 센서

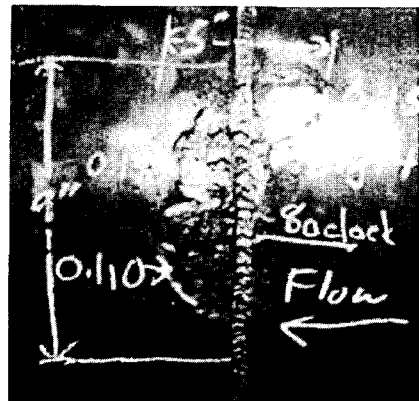
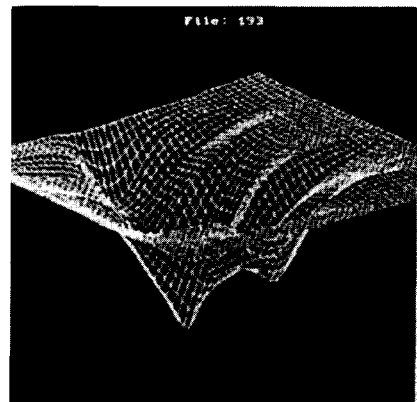


Fig. 17. MagneScan 검사 결과로부터 산출된 결함의 형상(위쪽)과 실제 결함의 모습(아래쪽)

가 있고 22"이상인 경우에는 24개의 센서가 있다. 따라서 12"인 경우에 센서의 크기는 80mm 정도이고 40"인 경우에 약 133mm 정도로 분해능이 매우 낮으며, 부식 유무의 개략적인 신호의 크기만 판단이 가능하다. MagneScan HR의 경우에는 센서가 보다 많은데 6"-56"까지 사용범위에서 28개에서 108개의 센서가 있어서 위치 분해능이 높고, 결함의 형상을 파악할 수 있다. 개략적인 MagneScan HR의 규격을 Table 7에 나타내었다.

Table 7. 개략적인 MagneScan HR의 규격

크기	6" - 56"
센서의 갯수	28-108개
온도범위	4-45℃
최대 벽두께	25mm(тол의 크기에 따라 다름)
주행속도	0.3-1.8m/s(피그에 따라서 0.7-4m/s도 가능)
전지 수명	100시간 (тол의 크기에 따라 다름)
최소 곡률반경	공칭직경의 3배 (1.5배도 가능)
최대사용압력	100bar
최소 검출 결함 깊이	벽 두께의 10%
최소 검출 결함 크기	벽두께의 2배
결함 깊이 정밀도	벽두께의 10%
결함 위치 정밀도	girth weld를 기준으로 ±0.5m
운송매질	모든 액체 및 기체

5.3.2. UltraScan WT

초음파를 이용한 지능형 피그에는 두께 측정용과 균열 검출용이 있는데, 두께 측정용을 UltraScan WT(wall-thickness)라고 부른다. 이 방법은 Fig. 18에 나타난 수침형 초음파 펄스-에코 시험법과 동일한 원리를 이용한다. 초음파 탐촉자에 가해진 펄스(initial pulse: IP)는 유체를 지나서 유체와 배관벽의 경계에서 반사되는 파(interfacial echo: IE)와 배관벽 사이를 왕복하면서 반사되는 파(back-wall echo: BWE)들이 있다. 이때 각각의 파가 도달한 시간들로부터 배관의 내벽까지의 거리(stand-off)와 배관의 두께(wall thickness)를 각각 결정할 수 있다. 즉,

$$SO = C_F \times (T_{IE} - T_{IP})$$

$$WT = C_P \times (T_{BWE} - IE)$$

와 같이 주어진다. 여기서 SO와 WT는 각각 stand-off 거리와 배관의 두께를 나타내며, C<sub>F</sub> C<sub>P</sub>는 각각 유체와 관벽에서의 음속이며, T<sub>IP</sub>, T<sub>IE</sub> 및 T<sub>BWE</sub>는 각각 초기 펄스, 경계반사파 및 저면반사파가 도달하는 시간이다.

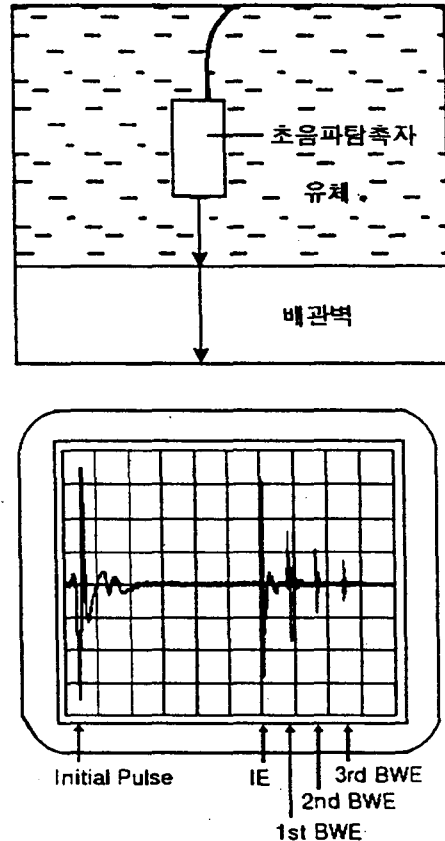


Fig. 18. 수침형 초음파 펄스-에코 시험에서 반사파형(A-scan)

Fig. 19에는 이들로부터 부식 여부 및 내부 또는 외부 결함을 판정하는 원리를 나타내었다. 초음파 B-scan을 이용한 이 방법은 관벽의 두께를 나타내는 WT의 값이 작아졌으면 결함이 있는 부위이며, 외부 결함이면 초음파 탐촉자에서 관벽까지의 거리가 변하지 않으므로 SO가 변하지 않고, 내부 결함이면 탐촉자로부터 관벽까지의 거리가 늘어서 SO가 커진다. 관벽의 두께를 측정하는 방법이 MagneScan은 간접적인 반면에 UltraScan은 직접적인 측정이 가능하다.

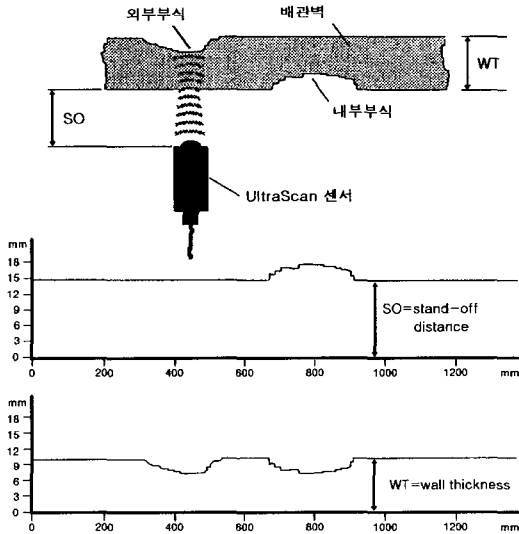


Fig. 19. UltraScan WT에서 stand-off와 wall-thickness의 B-scan을 이용하여 내부 및 외부 부식을 평가하는 방법

UltraScan은 Fig. 20에 나타난 바와 같이 센서 캐리어, 초음파 P/R 모듈, 데이터 모듈, 전원부로 구성된다. 초음파 탐촉자의 직경이 작아서 배관의 전체를 검사하기 위해서 직경에 따라 달라지지만 수백개의 초음파 탐촉자가 배치된다. 이들이 원주방향으로 서로 겹쳐지게 하기 위해서 센서 캐리어에 비스듬하게 앞뒤로 배치한다. UltraScan을 사용하여 검사한 대표적인 결과를 Fig. 21에 나타내었다. UltraScan으로 얻은 화면의 대표적인 예로서 stand-off와 thickness 각각에 대하여 C-scan과 B-scan 정보를 나타내 준다. C-scan 결과로부터 결함의 형상을 알 수 있으며 B-scan 결과로부터 결함의 깊이를 알 수 있다. Fig. 22는 파이프 내벽에 실제로 존재하는 부식 결함의 모습과 그에 대한 UltraScan을 사용하여 검사한 결과로서 결함의 형태를 잘 나타내 주고 있음을 알 수 있다.

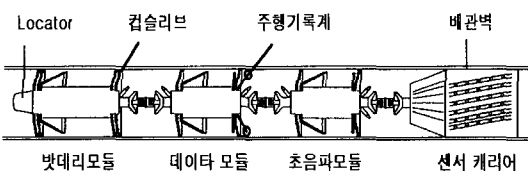


Fig. 20. 전형적인 UltraScan의 구성도

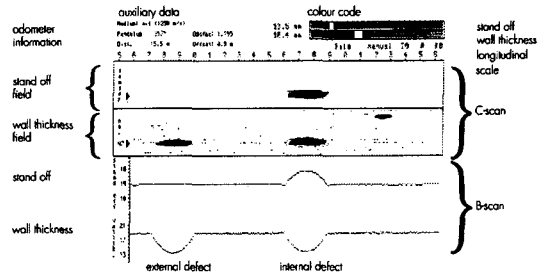


Fig. 21. UltraScan을 사용하여 얻은 대표적인 검사 예. Stand-off 및 wall-thickness의 C-scan, B-scan 정보가 결함의 크기 및 형상에 관한 정보를 제공한다.



Fig. 22. 파이프 내부 부식의 모양과 그 검사 결과 spiral weld 근처에 발생한 결함이 잘 나타나 있다.

초음파를 사용하므로 가스관에는 직접 사용이 곤란하지만, Fig. 23과 같이 sealing pig를 사용하여 관의 일부를 액체로 채운 후에 이 부분 전체를 움직이도록 하는 batch process를 이용하면 검사가 가능하다. 관에 들어가는 액체의 양은 중간 중간에 T-piece가 얼마나 있는가에 좌우된다. 또한, 배관이 급경사를 이루고 있는 경우에는 보다 세심한 주의가 요구된다. 이 방법은 단순한 MagneScan이나 일반적인 UltraScan 보다 절차가 복잡하여 적용하기가 까다롭지만, 배관에 대한 정보를 보다 정확히 알기 위해서 가스 배관에도 UltraScan을 적용하는 추세이다. UltraScan의 개략적인 규격은 Table 8과 같다.

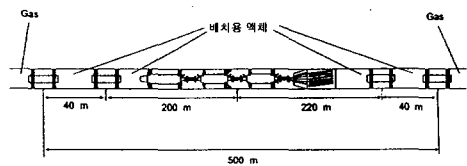


Fig. 23. 길이 10km의 가스관에 대하여 UltraScan을 사용하기 위한 batch process

Table 8. 개략적인 UltraScan의 규격

초음파 주파수	5MHz
펄스 반복주파수	300Hz
주행거리	100km
주행속도	0.2 - 1.0m/s
온도범위	4 - 45°C
최소 곡률반경	공칭직경의 3배(1.5배도 가능)
벽두께 측정정밀도	±0.2mm
부식깊이 평가정밀도	±0.5mm
원주방향 분해능	8mm
길이방향 분해능	3.3mm (주행속도=1m/s, 펄스반복주파수=300Hz)
최소 검출결함 크기	벽두께의 2배
결함 위치 정밀도	girth weld를 기준으로 ±0.2m
최대압력	120bar
운송매질	원칙적으로 액체

5.4. 균열검출

배관에서 균열검출을 위해서 EddyScan CD<sup>19)</sup>와 UltraScan CD<sup>20,21)</sup>와 같은 지능형 피그를 사용하는데, 이들은 각각 펄스 와전류 및 경사각 초음파를 이용한다. 균열 검출을 위한 지능형 피그들은 개발 단계에 있는데, 와전류를 사용할 경우에는 배관 재질이 대개의 경우에 강자성체이므로 검사 결과를 해석하는데 어려움이 있으며 경사각 초음파를 이용한 균열 탐지법에 대한 연구가 많이 되고 있다. EddyScan CD의 경우 균열 검출도는 깊이가 2mm 이상이고 모재에서는 길이 30mm, 종방향 용접부에서는 길이 40mm, 거스 및 나선형 용접부에서는 길이 60mm 이상의 균열을 탐지할 수 있다. UltraScan CD는 모재나 종방향 용접부 모두 깊이 2mm, 길이 30mm 이상의 균열을 검출할 수 있다. Fig. 24에 UltraScan CD의 동작원리를 나타내었다. 균열을 검출하기 위해서는 45° 경사각의 초음파 횡파를 사용하는데, 도달 시간에 따라서 균열이 내부에 발생했는지 또는 외부에 발생했는지 알 수 있다. 이는 UltraScan WT와 초음파적 특징이 매우 유사하나 다만 경사각을 사용하는 점이 다르며, 검사 데이터를 저장하는데 있어서 WT는 SO와 WT 정보만 기록하지만, CD는 문턱전압(threshold voltage)을 넘는

파형의 도달시간, 진폭을 모두 기록하여 A-scan에 유사한 데이터를 저장한다.

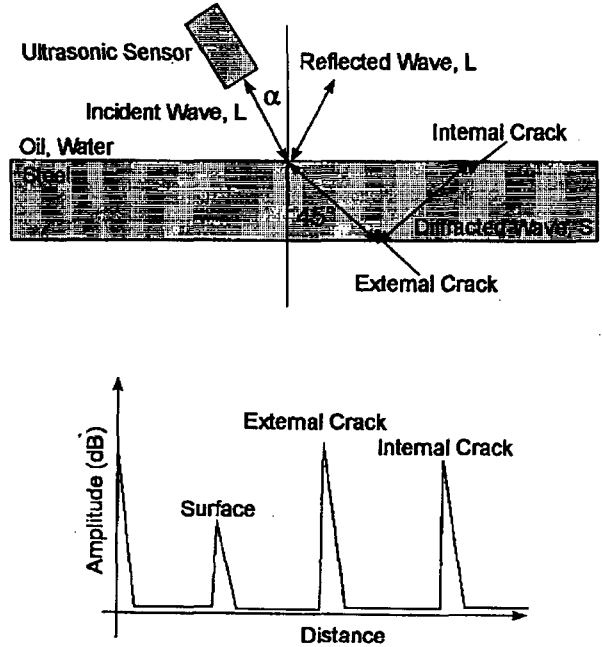


Fig. 24. UltraScan CD (균열검출용 초음파 피그)의 동작원리

5.5. 누출탐지

누출탐지용 피그는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 그중 하나는 피그의 앞 뒤 부분의 압력을 측정하여 누출이 있을 때에 누출로 인한 압력 차를 검출하여 누출부위를 찾아낸다. 누출 부위가 아주 작거나 시간당 0.1리터 정도의 미세한 누출도 검출이 가능하다. Fig. 25에 나타낸 바와 같이 누출 부위를 찾기 위해서 피그를 삽입하여 단계적으로 앞으로 전진

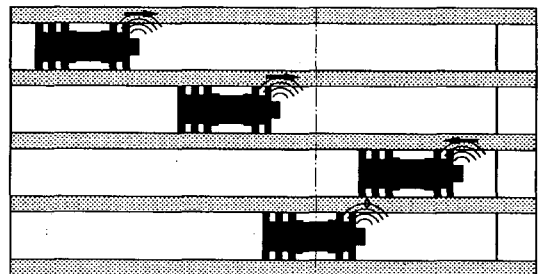


Fig. 25. 압력차를 이용한 누출 검사법



시킨다. 압력차 측정은 누출 부위를 지나쳤는지를 나타내 주고 누출 검출용 피그를 후진시켜서 누출을 검출할 수 있다. 모든 데이터는 전파를 사용하여 최대 3m 두께의 지층을 뚫고 지상으로 전달한다. 누출 부위가 정확히 알려지면 땅을 파고 보수한다.

다른 하나는 누출시 발생하는 음향 방출 신호를 검출하여 누출 부위를 결정한다. 시간당 5리터이상의 누출이 일어날 경우에는 20-40kHz 영역의 누출음을 발생한다. 하드로폰에서 수신된 누출음은 전자 회로를 사용한 신호처리후에 주행 시간과 함께 메모리에 기록된다. 피그가 회수된 후에 메모리에 저장된 데이터를 분석하여 누출 부위를 찾아낼 수 있다. 누출 위치를 보다 정확하게 알기 위해서 35kHz를 72Hz로 진폭 변조한 신호를 발생시키는 marker를 배관의 여러군데에 부착한다. 이 marker를 사용하면 누출 부위를 수m 이내의 정밀도로 찾아낼 수 있다. 이러한 장치의 구성도를 Fig. 26에 나타내었다.

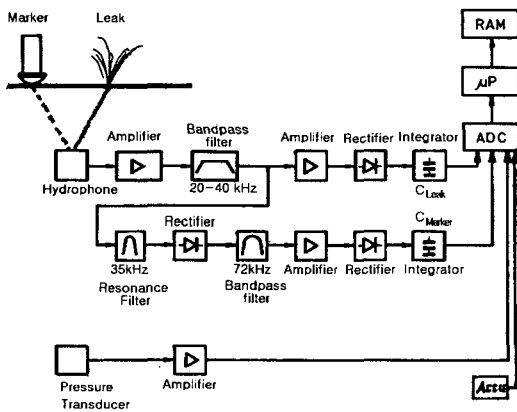


Fig. 26. 음향방출을 이용한 누출 탐지용 피그 구성도.

5.6. 특수기능

특수한 목적의 지능형 피그로는 ScoutScan과 Pipe-Scan이 있다. ScoutScan은 내부에 자이로스코프를 내장하고 있어서 피그가 주행한 x, y, z 좌표에 대한 정보를 메모리에 저장한다. 매설된 파이프의 경로나 깊이에 대한 정보를 파악하는데 유용하다.

PipeScan은 칼라 CCD 카메라와 초음파 두께 측정기가 결합된 피그로 전선을 연결해야 하며 외부의

공기압에 의해 구동된다. 이 시스템은 구동부로 크롤러, 연결줄, 제어부로 구성된다. 크롤러는 두 개의 고정단과 두 개의 운송단으로 구성된다. 크롤러 크기는 직경이 4"-6", 6"-10", 10"-16", 16"-24"용으로 네가지가 있으며 공압에 의해 구동되며 무한궤도차와 같은 형태로 움직인다. 첫 번째 모듈에는 카메라가 장착되는데 제어 캐비닛에서 초점, 경사, 회전 등을 원격 제어가 가능하다. 카메라의 경사 각도는 90°까지 조절이 가능하고 360°회전이 가능하다. 최대 8개의 초음파 탐촉자가 45°간격으로 부착되어 있고 이들은 적당한 방향으로 회전이 가능하다. 최대로 시간당 120m를 검사할 수 있지만 실제 경험에 의하면 시간당 80m 정도이다. 연결줄은 압축공기, 전원, 신호선 및 카메라와 초음파 장비를 위한 공축케이블들이 집결되어 있다. 이 연결줄의 표준 길이는 500m이지만 1.5km까지 연장이 가능하다. 수심 100m, 즉 10 bar에서 사용이 가능하다. 길이방향 위치 즉 크롤러 위치는 0.2-0.5m의 정밀도를 지니며 측정된 부식 깊이는 ± 0.1mm의 정밀도를 지닌다. 최대 4bar까지 가압된 배관을 검사할 수 있다. PipeScan의 장치도를 Fig. 27에 나타내었다.

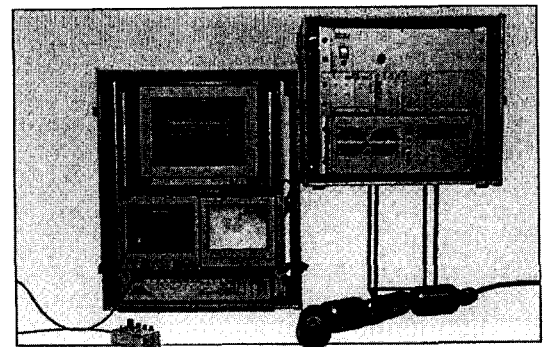


Fig. 27. PipeScan 구성도.

지능형 피그는 배관내를 움직이면서 주행기록기를 이용하여 피그의 현재 위치에 대한 정보를 기록한다. 또한, MagneScan이나 UltraScan 피그의 경우에 결함을 발견한 경우에 그 결함이 있는 방향에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해서 피그가 배관 내부에서 회전하더라도 내부에 있는 진자를 이용하여 피그의 방향을 결정할 수 있다. 또한, 피그가 현재 어디쯤을 지나고 있는지 외부에서 알아야 할 필요가 있는데, 피그 탐사기(pig locator)는 피그가 어디에

있는지 그 위치를 찾는데 사용된다. 이 피그 탐사기는 피그의 앞부분에 장착되어 신호를 내보내는 발신기와 외부에 설치되는 수신기로 구성된다. 수신기는 안테나와 수신신호 검출기로 구성되며, 사용되는 신호들이 금속성 배관을 통과해야 하므로 매우 낮은 주파수의 신호를 이용하고, 흡을 통과하므로 그 위치의 정밀도는 약 0.5m 정도이다. Fig. 28에 피그 위치 탐사기의 사진을 나타내었다.

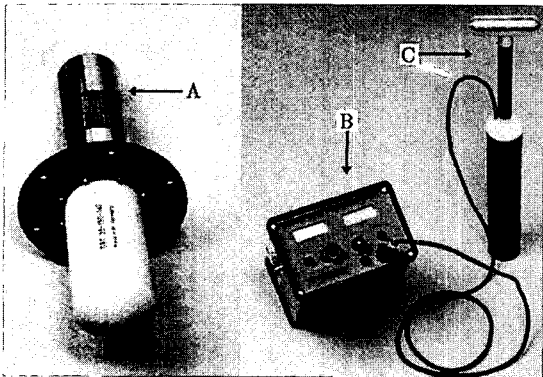


Fig. 28. 피그 탐사기의 사진. A: 발신기, B: 수신기 및 C: 수신용 안테나

5.7. 피그의 발진 및 회수

피그는 배관라인의 기능을 중지하지 않고 가동중에 적용할 수 있도록 Fig. 29에서 31까지에 나타낸 바와 같이 발진부(launcher)와 회수부(receiver)를 설치하도록 설계된다. 여기서 지능형 피그는 UltraScan으로 가정하였다. 전형적인 발진 절차는 다음과 같다.

1. 초기 상태: V1 밸브만 열고 나머지(V2, V3, V4, T1, T2, T3)는 잠겨있는 상태에서 피그를 발진부안에 넣고 단지 하나의 컵 슬리브만 배관의 좁은 부분에 밀어 넣는다.
2. 첫 번째 피그 탐사기의 수신기(PL 1)를 발진부 바로 다음에 놓고 두 번째 것(PL 2)는 발진부로부터 20 - 50m 떨어진 곳에 놓는다.
3. T1과 T2를 연다.
4. T1과 T2로부터 유체가 조금 흘러 나올 때까지 V3와 V4를 통하여 유체를 천천히 채운다.
5. T1과 T2를 잠그고 V3와 V4를 연다.
6. T1과 T2를 작동하여 유체 내부에 있는 기체가 완전히 나오도록 한다. 더 이상의 기포가 나오지 않을 때까지 반복한다.

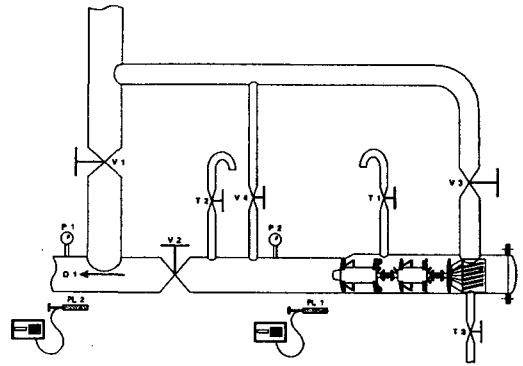


Fig. 29. 지능형 피그를 발진시키기 위한 발진부의 모습

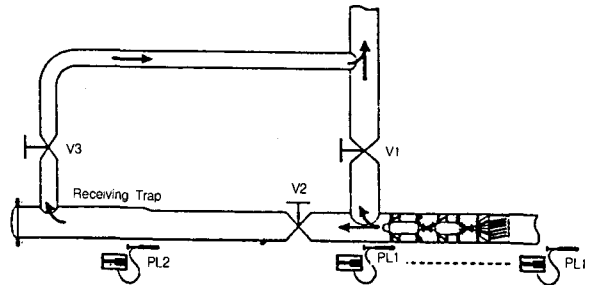


Fig. 30. 피그를 회수하는 모습 - 1단계

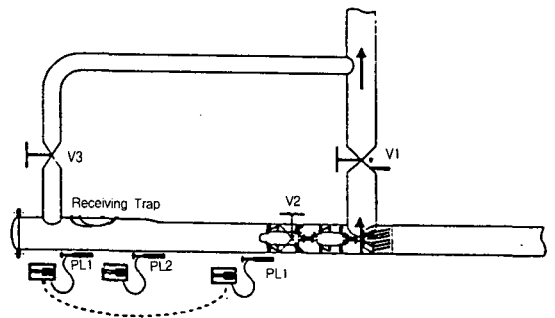


Fig. 31. 피그를 회수하는 모습 - 2단계

7. V3와 V4를 잠근다.
8. 주배관내의 매질의 흐름 Q1이 적절한 속도 (보통은 1m/s)로 맞추어 놓고 압력 및 유속이 안정될 때까지 기다린다.
9. 주배관내의 압력 P1과 발진부내의 압력 P2 사이의 압력차를 없애기 위해서 V3를 사용하고 그 다음에는 잠근다.

10. V3와 V4를 잠근 채로 V2를 연다.
11. V3를 천천히 연다.
12. V1을 천천히 잠가서 발전부내의 피그가 움직이기 시작하도록 한다. PL 1으로 피그가 지나간 것이 확인되면 V1을 잠그는 것을 멈춘다.
13. PL 2로 피그가 완전히 배관내로 들어간 것이 확인되면 V1을 최대로 연다.
14. 피그가 지났는지 확실치 않으면 모든 유체가 발전부를 통해서 흐르도록 짧은 시간동안 V1을 완전히 잠근다.
15. V2, V3, V4를 잠가서 발전부를 격리시킨다. 피그를 회수할 때에 피그가 회수부나 부분적으로 닫힌 V2 밸브로 돌진하여 피그의 머리부분이 손상을 입을 가능성이 있다. 피그를 안전하게 회수하기 위해서는 다음과 같은 절차를 따라야 한다.
  1. 초기 상태에서 V1은 열려있고 V2와 V3는 닫혀있다.
  2. 피그가 도착하리라 예상되기 30분전부터 0.5m/s의 낮은 유속을 유지한다. 이 시간은 대략 1.5km 정도 떨어진 곳에 있는 피그 탐사기에 의해 알 수 있다. V2와 V3를 완전히 연다.
  3. PL1을 첫 번 T부위로부터 20m 정도 떨어진 곳에 놓는다. 다른 하나는 회수부의 taper진 곳에 놓는다.
  4. PL 1에 피그가 도착했는가 관측한다.
  5. 피그는 마지막 컵 슬리브가 T-piece를 통과할 때까지 계속해서 회수부로 진행해 나갈 것이다. 피그는 이곳에서 더 이상 앞으로 밀어주는 압력차가 없어서 정지할 것이다.
  6. 피그가 회수부 내부에서 더 이상의 움직임이 없는지 PL 1을 이용하여 추적한다.
  7. 이 상황에서는 유체의 흐름으로 센서 캐리어가 손상을 입을 수 있다. 따라서 신속히 다음 단계를 대처해야 한다.
  8. 피그가 회수부 안으로 천천히 움직이도록 V1을 아주 조금만 닫는다. PL 1을 사용하여 피그의 움직임을 잘 감시해야 한다.
  9. PL 2는 회수부의 taper진 부분에 계속 놓아둔다. 이 부분은 회수부의 증앙으로 주의해야 하는 부분이다. PL 1을 회수부 문으로부터 1m 떨어진 곳에 놓는다.
  10. 피그가 PL 2를 지나 PL 1에 도착할 때까지 V1은 그대로 유지한다. 피그가 PL 1에 도착

하자마자 즉시 V1을 연다.

11. 피그 전부가 V2를 지났는가를 알기 위해서 최대한 정밀하게(±20cm) 피그의 위치를 결정한다.
12. 피그가 V2를 완전히 지났으면 V2와 V3를 차례로 잠근다.

5.8. MAOP 분석

지능형 피그를 사용하여 배관에서 부식 부위를 발견하면 그 결함의 안전성을 평가해야 한다. 부식 등으로 인하여 감육이 생기면 배관에 가할 수 있는 최대 압력이 줄어들고, 과도한 압력이 가해지면 파손이 일어난다. 결함을 평가하는 방법의 하나로 가능한 최대 동작압력(maximum allowable operating pressure)를 계산하는 것이다. ASME B31G는 지능형 피그를 사용하여 발견된 감육에 의한 파손의 심각성을 평가하는법을 기술한다. 이 방법은 개략적인 것임에도 불구하고 감육의 심각성을 어렵잡는데 매우 유용하다. 일차적으로 이 방법에 의해 개략적인 심각성이 파악되면 각각의 검사 결과의 중요성에 대한 최종 평가를 위해 보다 나은 평가법을 사용하여 정밀한 분석을 할 수 있다.

ASME B31G에 벽두께 t가 나오는데 이 값은 대개의 경우 공칭 두께를 많이 사용한다. 그렇지만 공칭 두께와는 다른 값을 지니는 연결부위에서는 이 가정은 너무나 낙관적이거나 비관적일 수 있다. 그러나 UltraScan을 사용할 경우에는 각각의 파이프 연결 부위에 대해서 정확환 벽 두께를 알 수 있고, 이 값은 보다 정확한 사용압력을 추정할 수 있다. Fig. 32는 MAOP를 계산하기 위한 감육부의 Fig.을 나타내었다.

ASME B31G가 제시한 MAOP계산식은

$$P_{rd} = 1.1 \times P_{ld} \times \left[ \frac{1 - \frac{2}{3} \frac{Dpth}{t}}{1 - \frac{2}{3} \frac{Dpth}{t\sqrt{G^2+1}}} \right] \quad (G \leq 4.0)$$

$$= 1.1 \times P_{ld} \times \left[ 1 - \frac{Dpth}{t} \right] \quad (G > 4.0)$$

여기서  $G = 0.893 \times \left( \frac{Lngth}{\sqrt{Dt}} \right)$  로 주어진다.

와 같다. 여기서 사용된 변수들은

- P<sub>rd</sub>(bar): 낮추어진 압력, 사용가능한 최대압력
- Dpth(mm): 결함의 깊이
- Lngth(mm): 결함의 길이
- D(mm): 공칭 외경

t(mm): 의뢰인이 제시한 공칭 벽두께  
 또는, 파이프 연결부에서 측정된 기준 벽  
 두께 또는, 지능형 피그로 측정된 파이프  
 연결부에서의 기준 벽 두께

P<sub>ld</sub>(bar): 의뢰인이 제시한 부위별 설계압력  
 또는, 측정된 파이프 연결부의 두께로부터 계산된  
 부위별 설계압력과 같다.

또한, 감압비율은

$$C_{pr} = \frac{P}{P_{rd}}$$

로 주어진다. 여기서

P(bar): 의뢰인에 의해 정해진 최대사용압력

P<sub>rd</sub>(bar): ASME B31G에 의해 계산된 감소 압력  
 이다. 외경이 28인치인 배관에서 발견된 feature에  
 대하여 MAOP 분석 결과의 한 예를 Fig. 33에 나타  
 내었다. 실제로 검출된 결함에 대해서 일부의 결함은  
 이 분석에 의해 주의를 요하는 것으로 판독된다.

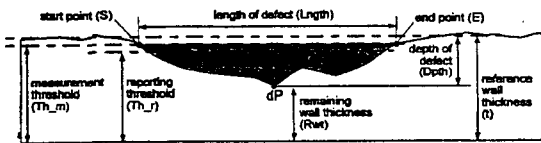


Fig. 32. MAOP 계산을 위한 감육부의 형상 및 사용 변수

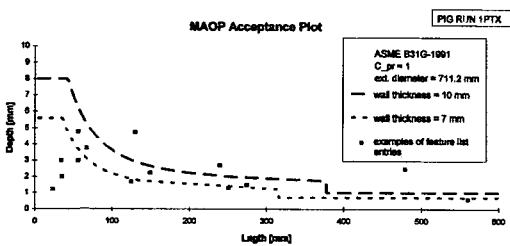


Fig. 33. 외경이 28인치인 배관에서 발견된 결함들에 대한 MAOP 분석결과표

### 6. 결론

최근 몇년 사이에 일어난 일련의 대형사고들로  
 인하여 기존의 배관 및 배관라인이나 현재 건설중인  
 또는 향후 건설 예정인 배관 및 배관라인에 대하여  
 안전성 확보를 위하여 비파괴검사가 더욱 강화되어  
 가고 있다. 그러나 고질적인 문제점으로 지적되고

있는 저가 수주 및 짧은 공기에 의한 부실공사 등의  
 부작용은 아직도 도처에서 목격되며 이러한 관행이  
 근본적으로 변화되지 않는 한 또다른 대형사고에 대  
 한 우려를 배제할 수 없다.

따라서 현재 국내에서의 배관 및 배관라인에 대  
 한 안정성 확보를 위하여 비파괴검사의 실태와 현황  
 고찰 및 성찰 그리고 발전된 외국의 배관 검사에 대  
 한 여러 가지 방법 및 시스템을 살펴봄으로서 향후  
 우리나라의 배관 및 배관라인에 대한 총체적인 비파  
 괴 검사의 기술 수준 향상과 나아갈 길을 제시하고  
 자 하였다.

### 참고 문헌

- 15) "An Introduction to Pipeline Pigging," Pigging Products & Service Association, Pipes and Pipelines International, Beaconsfield, UK, (1995)
- 16) M. Beller and W. Garrow, "Integrity assessment of Offshore Pipelines by Use of Intelligent Inspection Tools," Proc. 12th Int'l Conf. Offshore Mech. Arctic Eng., (1993) pp. 289-293
- 17) M. Beller and H. Schoenmarker, "Pipeline Inspection: A Turnkey Approach," 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회, 광주, (1996)
- 18) A. Crouch, R. Anglisano and M. Jaarah, "Quantitative Field Evaluation of Magnetic-Flux Leakage and Ultrasonic In-Line Inspection," Proc. of the 1996 Pipeline pigging Conference, Feb. 14-16, Huston, TX, USA (1996)
- 19) G. Bach, J. Voigtländer and B. Wunderlich, "Crack and Pitting Detection on the Inside of Buried Pipelines with an Impulse Eddy Current Technique," 6th European Conference on Nondestructive Testing, pp. 873-877
- 20) H. Willems, O. A. Barbian, H. Stripf and H. Gemmeke, "UltraScan CD-A New Tool for Crack Detection in Pipelines," 7th International Pipeline Monitoring & Rehabilitation Seminar, Feb. 6-9, (1995), Huston, TX, USA
- 21) "Crack Detection in Pipelines: Survey Experience Obtained with the UltraScan CD tool," Proc. of the 1996 Pipeline Pigging Conference, Feb. 14-16, Huston, TX, USA (1996)