

## MFL을 이용한 천연가스 배관용 비파괴 검사장비 개발에 관한 연구

† 조성호 · 김동규 · 박대진 · 박승수 · 유휘룡 · 구성자 · 노용우 · 고영태  
한국가스공사 연구개발원  
(2001년 12월 21일 접수, 2002년 2월 8일 채택)

### Study for Development of Nondestructive Inspection Device in Natural Gas Pipeline Using MFL Technology

S.H. Cho · D.K. Kim · D.J. Park · S.S. Park · H.R. Yoo · S.J. Koo ·  
Y.W. Rho and Y.T. Kho

*R&D Division, Korea Gas Corporation,  
Ansan 425-150, Kyunggi-Do, Korea*

*(Received 21 December 2001 ; Accepted 8 February 2002)*

#### 요 약

본 논문에서는 자기해석을 기초로 배관의 결함을 검사할 수 있는 자기인가장치를 개발하였다. 자기인가장치는 영구자석(Nd-Fe-B계열) 및 Linear Hall Effect 센서를 이용하여 배관을 충분히 자화시킬 수 있도록 설계되었으며, 센서 어레이는 8인치 크기로 설계, 제작하였다. 제작된 자기인가장치는 5개의 yoke와 45개의 Linear Hall Effect 센서로 구성된다. 자기회로법을 이용하여 설계된 자기장 인가장치가 배관을 포화시킬 수 있는가를 확인하였고, 또한 8인치 탄소강관(두께 : 5.85mm)에 인공 결함을 제작하여 누설 자속을 측정하였다. 시험 배관에 만들어진 두께 10%~80%의 결함은 제작된 MFL 모듈을 이용하여 모두 검출하였으며 결함의 깊이가 가장 얇은 0.5mm까지 검출이 가능함을 확인하였다.

**Abstract** - This paper introduces developed prototype intelligent pig which detects corrosion on pipeline by using Magnetic Flux Leakage technology. The 8 inch developed MFL(Magnetic Flux Leakage) pig is composed of 5 yokes which magnetize pipeline wall and 45 Hall sensors which detect MFL signal. The designed MFL modules are analyzed by using magnetic circuit method in order to confirm whether pipeline wall is fully saturated. A variety of artificial defects are manufactured on 8 inch diameter steel pipeline in order to acquire MFL signals. So leakage flux of the axial, radial and circumferential component was acquired as defects. The results of this paper show that design technique for 8 inch MFL pig can be applied to large diameter MFL pig and 0.5mm defect depth can be detected.

**Key words** : MFL(Magnetic Flux Leakage), intelligent PIG, magnetic circuit

## 1. 서론

한국가스공사는 현재 약 2000km의 배관을 매설하여 가스를 공급하고 있다. 가스를 안정적으로 공급하기 위하여 매설되어 있는 배관의 부식을 방지하기 위하여 주기적인 방식전위 측정과 피복손상 탐측을 수행하고 있다. 그러나 위의 방법만으로는 완전한 배관의 손상예방 및 검사가 이루어 질수 없다. 따라서 현재까지 개발된 기술 중에서 배관의 모재 손상을 탐지하는 유일한 기술은 인텔리전트 피깅 기술뿐이며 한국가스공사에서도 해외 업체의 용역으로 인텔리전트 피깅이 진행중에 있다<sup>(1)</sup>.

인텔리전트 피그는 배관의 형상 및 곡률등을 측정하는 지오메트리(Geometry)피그(Pig)와 배관의 부식, 모재손상을 측정하는 피그로 나눌수 있다.

배관의 부식, 모재손상을 측정하는 피그는 배관에 자기장을 인가하여 누설자기를 측정하는 MFL(Magnetic Flux leakage)피그와 초음파를 배관에 가하여 배관의 두께를 측정하는 초음파(ultrasonic)피그로 나눌 수 있다. 초음파 피그는 두께를 측정하기 위하여 매체를 별도로 필요로 하기 때문에 가스배관에서는 MFL 피그가 주로 사용된다.

MFL 피그는 배관에 자기장을 인가하고 누출되는 자기를 측정하는 모듈(module)과 측정된 신호를 저장하는 데이터 저장 모듈로 크게 나눌 수 있다. MFL 피그 기술의 핵심은 요크와 자석으로 이루어져 자기장을 인가하는 장치를 배관이 충분히 포화되도록 설계 및 제작하는 것과 결합부위에서의 누설 자속을 정확히 측정하는데 있다. 따라서 본 연구에서는 자기장을 인가하여 결합부위에서의 누설 자속을 측정하는 모듈을 8인치 규모로 설계 및 제작하였으며 자기회로법을 이용하여 설계된 자기장 인가 장치가 배관을 포화시킬 수 있는가를 확인하였다. 또한 8인치 탄소강관(두께 : 5.85mm)에 인공 결함을 제작하여 누설 자속을 측정하였다.

## II. MFL의 측정원리 및 시스템 구성

### 2.1. MFL 측정원리

자기적 방법으로 가스관의 결함을 측정하는 원리는 Fig.1과 같이 가스배관의 길이방향 또는 원주방향으로 2개의 영구자석을 이용해 자

장을 인가하고 결합 부근의 자장의 세기를 센서로 측정하는 것이다.

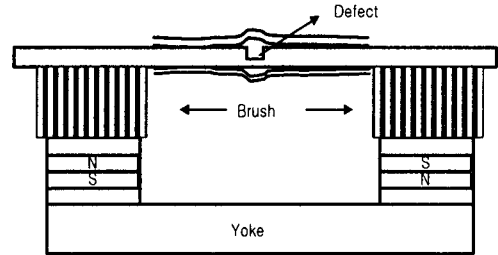


Fig. 1. Principle of Magnetic Flux Leakage.

이 방법은 가스관이 철강으로 제작되어 있어 연자기 특성을 나타내고 있기 때문이다. 영구자석으로 자기장을 인가할 경우 영구자석에서 나온 자기장이 가스배관을 따라 흘러 반대방향의 영구자석으로 들어간다. 이때 자장이 흐르는 가스관 중간에 결함이 있을 경우 자기 누설이 생기게 된다. 이것은 가스관의 포화자화가 존재하고 또 이것 때문에 자장에 따라 가스관의 투자율이 달라지기 때문이다. 물질의 투자율은 인가한 자장에 대한 물질내부에 존재하는 전체 자기장의 비로 정의된다. 자장이 인가될 때 물질에서 생성되는 자화는 자장에 따라 증가하나 어떤 자장이상에서는 포화되고 이것을 포화자화라고 부른다. 자화는 단위면적당 자속의 비로 정의하며 단위면적당 지날 수 있는 자속의 양은 일정함을 의미한다. 따라서 가스관에 결함이 존재하면 결함에서의 단면적이 줄어 지날 수 있는 자속의 양이 줄게되고 이 자속은 가스관외부로 누설되게 되며 이 누설된 자속을 자기검출센서로 검출하는 것이다.

### 2.2. 시스템 구성

본 연구에서는 8인치 탄소강관 배관의 인공 결함을 검사하기 위하여 MFL 모듈을 설계, 제작 하였다. 제작된 MFL 피그는 가스관의 길이방향으로 영구자석을 이용해 자장을 인가하게 되어 있고 자기검출센서로는 Hall 센서를 사용 하였다. 배관의 내경변화에 따라 검출센서는 반지름방향으로 내경에 맞추어 움직일 수 있게 되어 있고 60° 도 간격으로 5개의 자장인가장치가 설치되어 있고 각 인가장치마다 3개의 센서들이 붙어 있다. 이 센서들에는 가스관 축

방향, 반지름방향, 원주방향으로 누설되는 자장을 검출할 수 있는 3개의 Hall 센서가 부착되어 있어 총 45개의 센서가 피그에 부착되어 있다<sup>(3)</sup>. Fig.2는 8인치 MFL 피그 설계도면을 나타내고 있다.

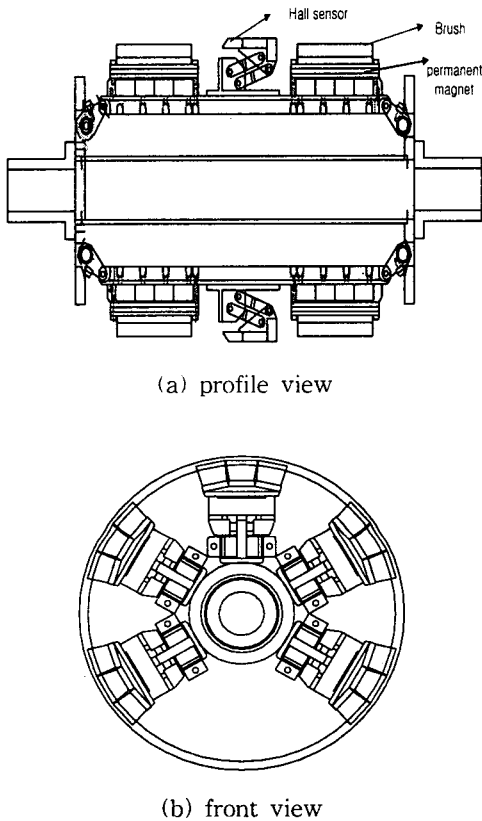


Fig. 2. Design of 8 inch MFL FIG.

### III. 자기회로법에 의한 자기인가장치 해석

설계된 자기인가장치가 배관을 충분히 포화시킬 수 있는가를 확인하기 위하여 자기회로법을 이용하여 해석하였다. Fig. 3은 자기회로법으로 해석하기 위한 모델을 나타내고 있다. 영구자석의 자속밀도( $B_m$ )와 자장세기( $H_m$ )는 Fig. 4 영구자석의 B-H 특성 곡선으로 구할 수 있다.

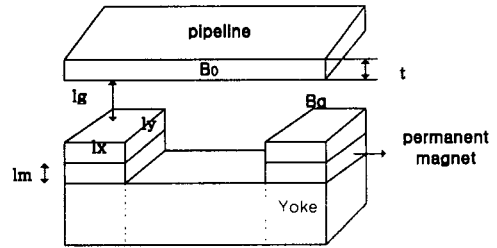


Fig. 3. Model to use magnetic circuits method.

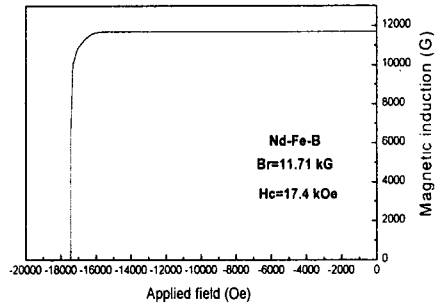


Fig. 4. B-H curve (NdFeB magnet).

Fig. 3의 모델을 자기회로법으로 식(1)을 유도하였다.

$$lm = \frac{q B_g^2}{\mu_o B_m H_m} lg \quad (1)$$

영구자석의  $B_m$  과  $H_m$  는 1.17T, 1384 kA/m 이므로, 누설상수 q를 가장 열악한 값인 4로 계산하였다.

$$\begin{aligned} B_g &= \sqrt{\frac{l_m \mu_o B_m H_m}{q l_g}} \\ &= \sqrt{\frac{12 \times 10^{-3} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \cdot 1.17 \times 1384 \times 10^3}{4 \times 20 \times 10^{-3}}} \\ &= 0.552 [T] \end{aligned}$$

공극에서의 자속밀도( $B_g$ )는 식(2)와 같다.

$$B_{\mu} = \frac{t}{l_x} B_0 \quad (2)$$

$$B_0 = \frac{l_x}{t} B_{\mu} = \frac{80}{5.8} \times 0.552 = 7.6[T]$$

따라서 배관의 자속밀도(B<sub>0</sub>) 값 7.6[T]을 구하였다. 그러나 이것은 선형특성만 고려하였으며 실제 보통 재료들은 1[T]를 넘으면 포화가 되기 시작한다. 따라서 설계된 자기인가 장치가 배관을 충분히 포화시킬수 있음을 확인하였다.

#### IV. 실험방법 및 결과

##### 4.1. 가스관 결함 제작

8인치 탄소강 배관(두께 5.85mm)에 여러 형태의 결함을 제작하였다. 결함은 가스관의 축방향으로 A, B, C, D, E, F, G, H, I 조로 나누었고 각각 30° 각도씩 기울어져 있다. Fig. 5는 배관의 결함의 위치 및 형상을 2차원 평면으로 나타내고 있다. Table.1은 각 결함들의 길이, 폭, 깊이의 치수를 나타내고 있다.

I H G F E D C B A

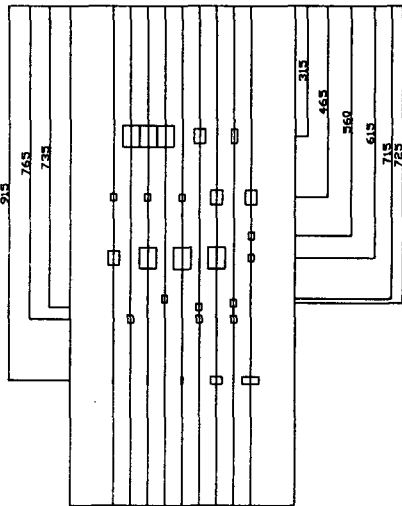


Fig. 5. Defects shape and location on pipeline.

Table 1. Defects size and location  
[단위 : mm]

		A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	길이	35	35	35	35	17	52	52	52	18
	폭	35	17	35	35	17	52	52	52	18
	깊이	3.4	2	2	0.5	1.8	1.3	0.5	0.6	0.7
	위치	465	315	465	315	465	315	315	315	465
2	길이	17	17	53	17	54	17	18	18	34
	폭	17	17	53	17	54	17	18	18	34
	깊이	2	2.5	5	1.8	3.2	4.8	1.6	2.9	4.6
	위치	560	725	615	735	615	715	465	765	615
3	길이	17	17	17	17	17		52		18
	폭	17	17	35	17	5.7		52		1.8
	깊이	2.3	2.5	1.7	2	2		1.8		1.7
	위치	615	765	915	765	915		615		915
4	길이	17						18		
	폭	52						2.5		
	깊이	2						1.8		
	위치	915						915		

##### 4.2. 실험 방법

Fig. 6은 제작된 8인치 규모의 MFL 피그를 나타내고 있다. 이 피그를 Fig. 7의 결함을 만든 8인치 배관에 넣고 수동 풀리를 이용해 축방향으로 움직이게 하였고 원주방향의 회전을 없애기 위해 피그의 중심에 가스관의 축방향으로 2개의 지지대를 삽입하였다. 또한 센서들의 위치를 가변저항으로 측정하였다. 45개의 센서를 Fig.8에 보는 바와 같이 배열하여 16, 13, 28, 10, 37번 센서들이 결함의 중앙을 통과하도록 실험을 수행하였다.

이와 같이 센서에서 나오는 신호를 National Instrument사의 A/D & D/A 변환기의 일종인 PCI-6024E를 사용해서 수집하였다. 이 board의 channel수는 16개이며 sampling rate는 200ks/s이다. 각 요크에는 3 개의 센서들이 있고 각 센서들에서는 x, y, z방향으로의 3개의 신호가 나오므로 총 9개의 센서신호가 있다. 따라서 한 개의 요크에는 5V의 입력전압 1개 그리고 1 개의 접지에 사용하므로 총 11개의 channel이 필요하고 센서의 위치를 측정하기 위한 가변저항에서의 전압을 고려하면 한 개의 요크당 총 12개의 channel이 필요하다. 따라서 실험에 사용된 A/D & D/A 변환기에는 15개의 channel이 있으므로 데이터 수집은 한개의 요크마다 각각 행하였다.

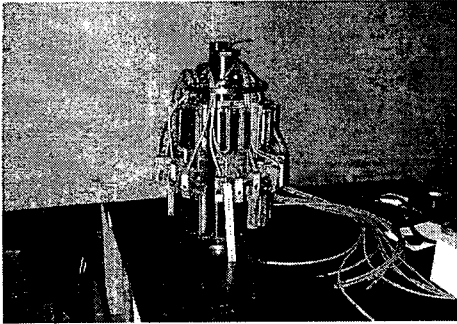


Fig. 6. Developed MFL pig body.

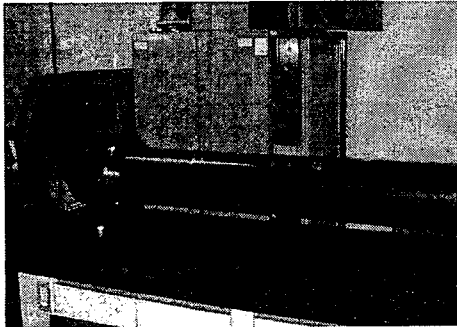


Fig. 7. 8" diameter pipeline with defects.

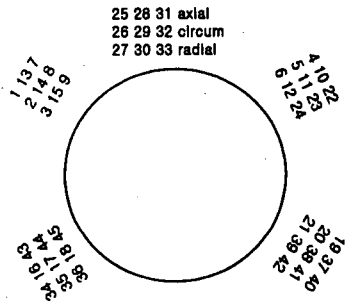


Fig. 8. Position of sensors.

#### 4.3. 실험 결과

Fig.9는 결함A조를 따라 측정된 축방향 자장변화를 나타내고 있다. 34번이 결함의 왼쪽 부위를 통과하는 센서이고 16번이 중심을 그리고 43번이 오른쪽을 통과하는 센서이다. 중심을 통과하는 16번을 보면 A1, A2, A3, A4 결

함을 정확히 감지할 뿐 아니라 B조의 결함인 31cm 부근의 B1, B2, B3결함을 감지하고 있다. 결함B조에 더 가까운 43번을 보면 이것은 더욱 확실해지는데 70cm 근방의 B2, B3 결함을 정확히 감지하고 있다. Fig.10은 결함A조를 따라 측정된 반지름 방향의 자장변화를 Fig.11는 원주방향의 자장변화를 나타내고 있다.

매우 작은 결함인 D1과 I3도 검출할 수 있다. 결함 D1은 매우 깊이가 얇은 0.5mm이고 I3은 폭이 1.8mm이다. Fig.12은 결함 D조를 따라 측정된 축방향 자장변화를 나타내고 있다. 31cm 근방의 D1을 분명히 감지하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 13 I조 결함을 따라 측정된 축방향 자장변화를 나타내는 그림이다. I3 결함을 검출하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 45개의 센서에서 검출한 자장변화를 2차원적으로 나타내고 있다. Fig. 5의 결함과 자장변화가 일치함을 알 수 있다.

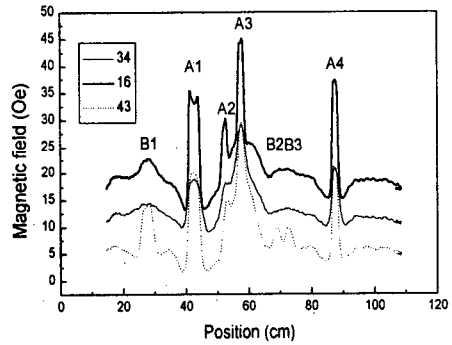


Fig. 9. Detected leakage flux of the axial component.

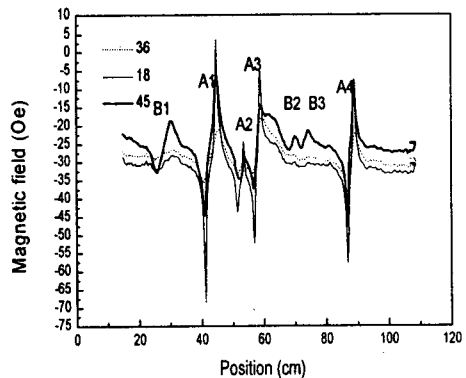


Fig. 10. Detected leakage flux of the radial component.

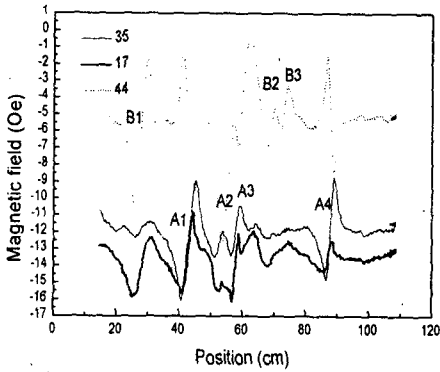


Fig. 11. Detected leakage flux of the circumferential component.

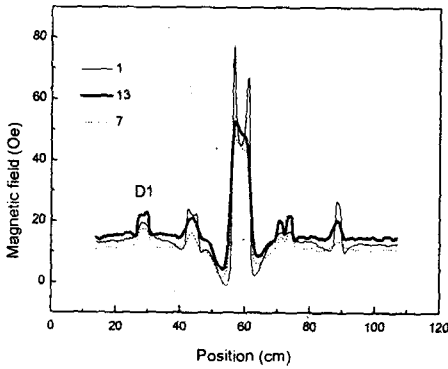


Fig. 12. Detected leakage flux of the axial component(D group).

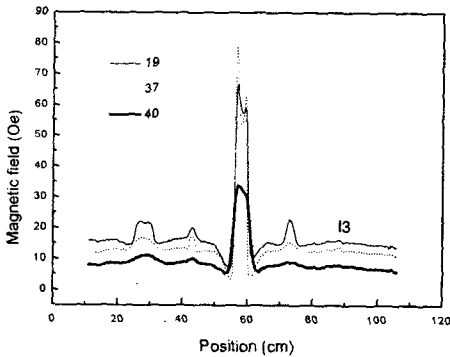
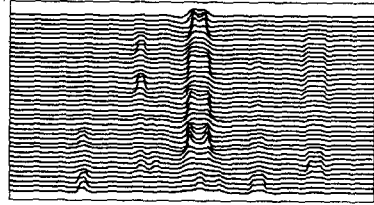
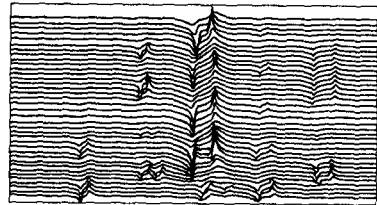


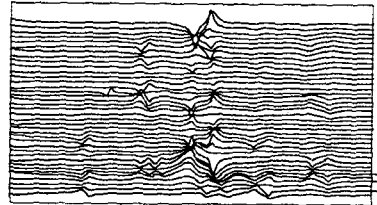
Fig. 13. Detected leakage flux of the axial component(I group).



(A) magnetic field in the axial direction



(B) magnetic field in the radial direction



(C) magnetic field in the circumferential direction

Fig. 14. Magnetic Field Variation of 8" pipeline.

### V. 결론

본 논문에서는 영구자석(Nd-Fe-B계열) 및 Hall 센서를 이용하여 배관을 충분히 자화시킬 수 있는 자기인가장치 및 센서 어레이를 8인치 규모로 설계, 제작하였다. 이러한 설계 기술은 대구경 MFL 피그를 제작할 경우에도 충분히 활용될 수 있는 기술이 될 것이다. 시험 배관에 만들어진 두께 10%~80%의 결함은 제작된 MFL 모듈을 이용하여 모두 검출하였으며 결함의 깊이가 가장 얇은 0.5mm까지 검출이 가능함을 확인하였다.

### 사용기호

$B_0$  : 배관내 자속밀도 [Wb/m<sup>2</sup>]

$B_g$ : 공극내 자속밀도	[Wb/m <sup>2</sup> ]
$B_m$ : 자석의 자속밀도	[Wb/m <sup>2</sup> ]
$H_m$ : 자석의 자기세기	[A/m]
$l_g$ : 공극 길이	[mm]
$l_x$ : 요크의 x방향 길이	[mm]
$l_y$ : 요크의 y방향 길이	[mm]
$l_m$ : 자석 두께	[mm]
$t$ : 배관 두께	[mm]
$T$ : 자속밀도 단위	[Tesla]

[2] T.Bubenik, J.Nestleroth, R.Eiber, and B.Saffell, 1992, "Magnetic Flux Leakage Technology for Natural Gas Pipeline Inspection", Gas Research Institute Topical Report GRI 91-0367, pp.14~37.

[3] J.B.Nestleroth, T.A.Bubenik, and A.Teitsma, 1996, " GRI Pipeline Simulation Facility Magnetic Flux Leakage Test Bed Vehicle", Gas Research Institute Final Report GRI 96-0207, pp. 3~12.

### 참 고 문 헌

[1] 노용우, 고영태외 3인, 2000, "저압용 인텔리전트 피그 개발 1단계 사업", 한국가스공사 연구개발원 최종보고서, pp. 1~3.