

## 자기 누설 신호를 이용한 배관 결함의 길이 추정 성능 비교

### Performance Comparison of Pipeline Defects' Length Estimation Using MFL Signals

김태욱\*, 노용우\*\*, 최두현\*†

Tae-Wook Kim\*, Yong-Woo Rho\*\* and Doo-Hyun Choi\*†

**초 록** 자기 누설 탐상 검사법은 지하에 매설된 가스 배관을 검사하기 위해 가장 널리 사용되고 있는 비파괴검사 방법 중의 하나이다. 자기 누설 탐상 시스템이 지하에 매설된 배관을 통과하게 되면 배관은 영구자석에 의해 착자된다. 배관의 부식이나 결함이 있는 경우 배관의 단면적이 변화하기 때문에 이 부분에서 누설자속이 변화한다. 홀 센서에 의해 검출되는 누설자속 신호로부터 결함의 길이, 폭, 깊이 등과 같은 결함의 형상을 판별하게 된다. 본 논문에서는 홀 센서를 통해 검출된 축 방향과 반경 방향 신호를 이용하여 결함의 길이를 추정하는 여러 알고리즘을 제시하고, KOGAS 모의 시험배관에 만든 실제 결함에 대해 결함의 길이 추정 성능을 비교 분석하였다. 실제 데이터에 대한 추정 성능 비교를 위해 한국가스공사의 모의시험배관에 인공결함을 제작하여 사용하였다. 축 방향 및 반경 방향 신호에 대해 각각 최소값 혹은 첨두값의 80%와 90%를 기준으로 길이를 추정하였을 경우 가장 좋은 성능을 보임을 확인하였다.

**주요용어:** 자기 누설 탐상, 배관 결함, 길이추정 성능 비교

**Abstract** MFL(magnetic flux leakage) inspection is a general method of non-destructive evaluation(NDE) of underground gas pipelines. Pipelines are magnetized by permanent magnets when MFL PIG(pipeline inspection gauge) gets through them. If defects or corrossions exist in pipelines, effective thickness is changed and thus variation of leakage flux occurs. The leakage flux signals detected by hall-sensors are analyzed to characterize defect's geometries such as length, width, depth, and so on. This paper presents several methods for estimating defect's length using MFL signals and their performances are compared for real defects carved in KOGAS pipeline simulation facility. It is found that 80% and 90% of minimum values for axial and peak values for radial signals respectively show the best performance in the point of length estimation error.

**Keywords:** MFL, Pipeline Defect, Length Estimation

#### 1. 서 론

오늘날 전 세계적으로 수백만 킬로미터가 넘는 에너지 수송용 배관이 사용되고 있는데, 안정적인 에너지 공급을 위해서 매설되어 있는 배관의 관리가 무엇보다 중요하다. 지하에 매설되어 있는 배관의 노후 상태나 손상 여부를 파악하는 것은 어려운

일이지만, 자기 누설 피그(MFL PIG)를 이용한 비파괴 검사가 오늘날 널리 사용되고 있다. 자기 누설 신호를 획득하기 위해 개발된 피그는 수백 개의 홀 센서가 장착되어 데이터가 매 샘플링 순간마다 계측되며, 배관의 상태 또는 구조물에 따라 다른 전압 값이 홀 센서로부터 기록된다. 일반적으로 한 번의 주행에 수십에서 수백 킬로미터를 진행하기

때문에 분석 전문가가 수작업으로 데이터를 분석하기에는 엄청난 시간이 소요된다. 따라서 취득된 데이터로부터 결함을 자동으로 검출하여 실제 결함의 크기를 추정하는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-6]. 영국의 BJ, 미국의 PII사가 이에 대한 연구 및 상용 서비스를 제공하고 있으며, 연구기관으로는 미국의 Gas Research Institute(GRI)가 있다. 국내에서는 한국가스공사가 이에 대한 연구를 진행하고 있다. 일반적인 결함의 형태는 길이, 폭, 깊이, 표면 각도 및 표면 곡률로 표현되며, 결함의 형태에 따라 자기누설 신호의 패턴이 달라지게 된다. 본 논문에서는 홀 센서로부터 획득한 신호에서 결함의 실제 길이를 추정하는 여러 방법들을 제시하고, 각 기준에 대해 그 성능을 비교분석하고자 한다.

## 2. 자기 누설 탐상법 기본 원리

자기 누설 탐상법은 금속 재질의 대상 물체에 자기장을 인가하고, 표면에 누설되는 자속을 센서를 이용하여 측정하는 검사기술이다. 대상물에 결함이 있을 경우 자기 선속 밀도가 달라지고 누설되는 양이 증가하게 된다. 이러한 누설 자속은 홀 센서를 이용하여 측정한다. 측정된 센서 신호를 분석하여 결함의 길이, 폭 그리고 깊이 등의 특징정보를 추정하게 된다. Fig. 1에 결함 부위에서의 각 방향에 대한 누설 자속의 패턴을 나타내었다[7]. 일반적으로 배관에 결함이 있을 경우 배관의 두께가 줄어들기 때문에 누설 자속량이 증가하게 된다.

실험에 사용된 자기 누설 피그는 한국가스공사에서 제작한 30인치 피그로, 한국가스공사의 모의시험배관에 맞도록 제작되었다. 축(axial) 방향, 반경(radial) 방향, 원주(circumferential)방향으로 각각 192개의 홀 센서가 장착되어있어서, 매 샘플링 마다 576개의 홀 센서 데이터를 획득한다. Fig. 2는 결함이 있는 영역의 각 방향 센서의 전형적인 신호 패턴을 보여주고 있다[8]. 축 방향 신호는 결함의 모양과 유사한 형태를 나타내기 때문에 축 방향 신호에서 결함의 형태를 알 수 있다. 반경 방향 신호는 피그의 진행방향으로 결함의 시작과 끝에서 양방향으로 두드러진 크기를 갖는다. 따라서 반경 방향 신호를 이용하여 결함의 길이 추정이 가능하다. 원주 방향 신호는 반경방향 신호와 같이 결함의 시작과 끝에서 양방향 특성이 나타나기 때문에 결함

의 길이와 폭에 대한 정보를 갖고 있다. 하지만 원주 방향의 신호는 그 크기가 다른 두 신호에 비해 훨씬 작은 값을 가지고 있기 때문에 누설되는 자속량이 작을 경우에는 결함의 추정이 어렵다[6].

## 3. 결함 길이 추정 방법

본 논문에서는 길이 추정을 위해 축 방향과 반경 방향의 자기 누설 신호를 이용하였다. Fig. 3은 결함 영역의 축 방향 신호와 반경 방향 신호를 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 축 방향 신호를 2차원으로 본 것이며, Fig. 3(b)는 반경 방향 신호를 2차원으로 본 것이다. Fig. 3(c)는 결함의 중심점을 지나서 축 방향 센서 신호를 나타내며, Fig. 3(d)는 반경

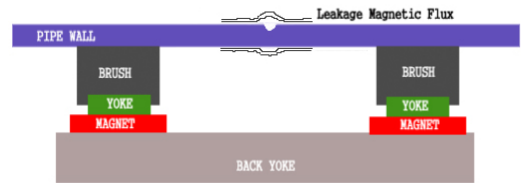


Fig. 1 Magnetic flux leakage pattern due to metal loss [7]

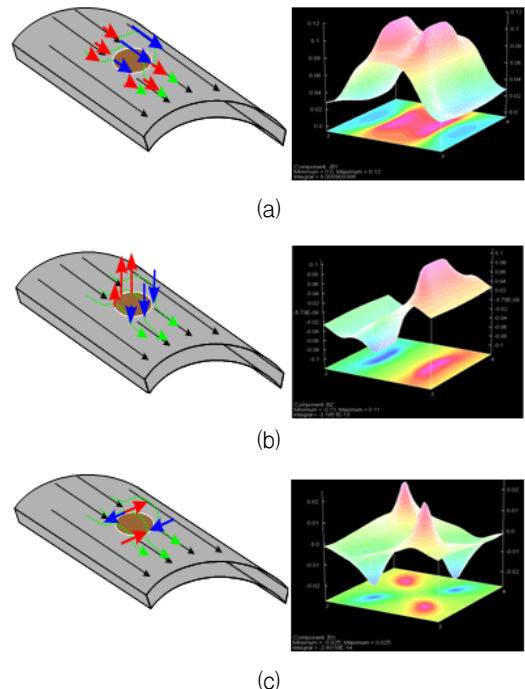


Fig. 2 Signal patterns for each direction, (a) axial sensor signal, (b) radial sensor signal, (c) circumferential sensor signal [8]

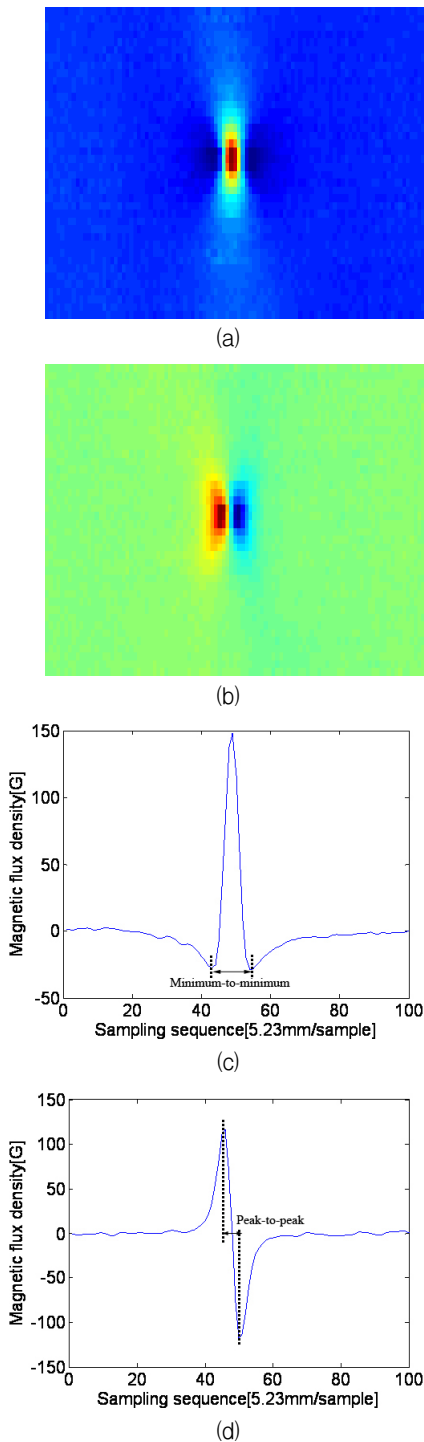


Fig. 3 MFL signals for an artificial defect(length x width x depth = 35 mm x 52.5 mm x 50%), (a) Pseudo-colored 2D axial signals, (b) Pseudo-colored 2D radial signals, (c) an axial leakage signal, (d) A radial leakage signal

방향 신호를 나타내고 있다. Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이, 결함이 발생하게 되면 결함의 근접 영역에서는 순간적으로 누설 자속량이 줄어들게 되고 결함 영역을 지나면서 다시 누설 자속량이 증가하게 된다. 본 논문에서는 축 방향 누설 신호의 크기가 가장 작은 두 점 사이의 거리와 이 두 점이 갖는 값에서 특정한 임계치를 적용하여 길이를 추정하였다. 반경 방향의 누설 신호는 Fig. 3(d)처럼 결함의 시작과 끝에서 누설 자속의 변화가 발생하기 때문에 누설 자속 신호의 첨두값을 갖는 두 점간의 거리로 길이 추정이 가능하다[9]. 모의 시험 배관에 제작된 인공 결함에서 얻은 신호의 분석 결과 [9]와는 달리 첨두값 사이의 길이를 추정하였을 경우 그 값이 실제 결함의 길이보다 작게 추정되었다. 본 논문에서는 축 방향과 반경 방향의 신호 각각에 대해 첨두값을 갖는 두 점간의 거리와 특정한 임계치를 갖는 두 점간의 거리를 사용하여 결함의 길이를 추정할 경우, 각 기준에 따른 성능을 비교 분석하여 최적의 길이 추정을 위한 기준을 도출하고자 한다.

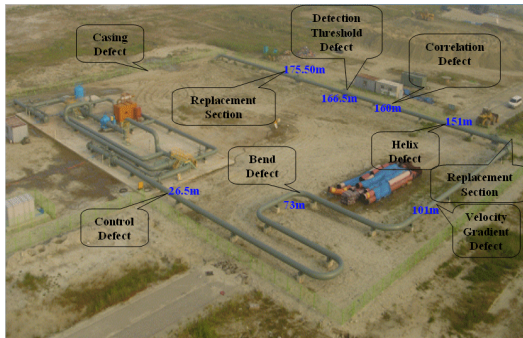
#### 4. 실험 결과

한국 가스공사는 다양한 결함 형태에 따른 신호를 분석하기 위해서 모의 시험 배관(KOGAS pipeline simulation facility)에 인공 결함을 제작하였다. Fig. 4는 한국 가스공사에서 제작한 약 300미터 길이의 모의시험 배관과 실제 배관에 가공된 몇 가지의 인공결함들을 보여준다.

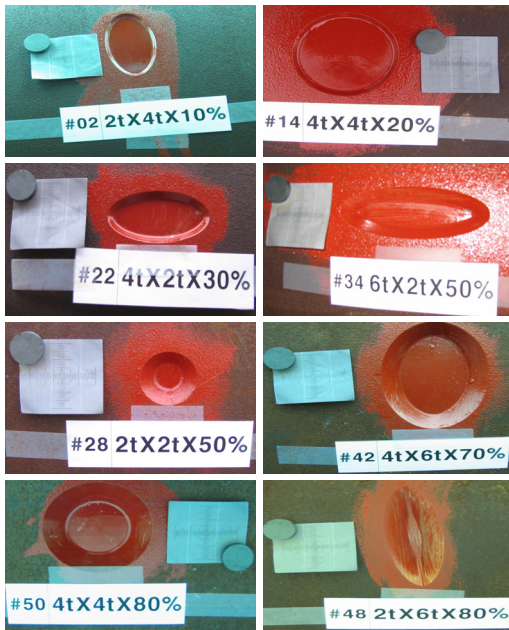
본 논문에서는 모의시험 배관의 결함 중 replacement 구간에 제작된 74개의 결함들에 대해 각각의 길이 추정방법들의 성능을 비교 분석하였다. 모의 실험 배관의 두께는 17.5 mm이며 직경은 30인치이다. 제작된 표준 결함은 Table 1과 같다. 표준 결함의 길이와 폭은 각각 35 mm~105 mm의 다양한 크기를 갖고 있으며 배관 두께의 10%~80%의 깊이를 갖고 있다. Fig. 5는 축 방향 신호를 이용한 길이 추정의 결과를 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 축 방향 신호의 두 최소값 간의 거리로 길이를 추정했을 때의 결과이다. Fig. 5(b)와 (c)는 각각 신호의 크기가 가장 작은 두 점에서 90%, 80%에 해당하는 임계치를 갖는 두 점의 거리로 길이를 추정했을 때의 결과를 보여준다. Fig. 5의 실선은 오차가 0인 경우를 표시한 것이며, 실선 위쪽과 아래쪽의 점선

은 오차가 10 mm인 영역을 표시하기 위해 그린 것이다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 축 방향 누설 신호의 두 최소값은 결함의 시작과 끝을 나타내는 정보를 갖고 있지만 실제 결함의 길이보다 크게 나타남을 알 수 있다. 축 방향 신호의 최소값의 80%를 갖는 두 점의 거리로 길이를 추정했을 경우 총 74개의 결함 대다수가  $\pm 10$  mm이내의 오차 범위를 갖는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 반경 방향의 신호를 이용한 길이 추정의 결과를 보여준다. Fig. 6(a)는 반경 방향 신호의 최대값과 최소값을 갖는 두 점의 거리로 길이를 추정했을 때의 결과이다. Fig. 6(b)와 (c)는 최대값과 최소값의 각각 90%, 80%에 해당하는 값을 갖는 두



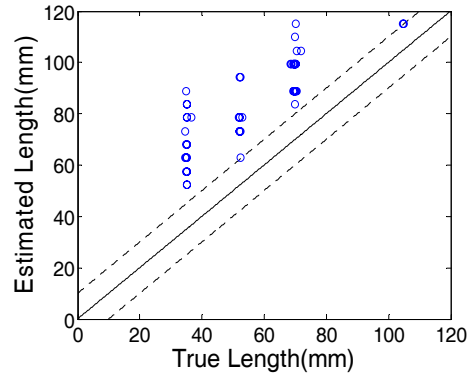
(a)



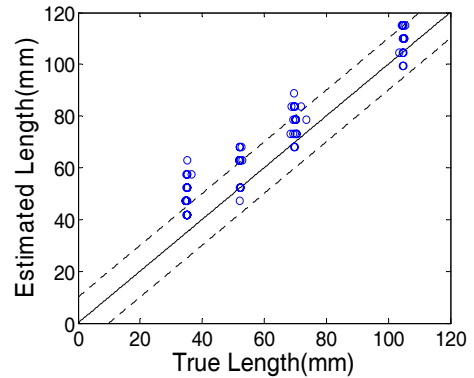
(b)

Fig. 4 KOGAS pipeline simulation facility and artificial defects, (a) KOGAS pipeline simulation facility, (b) artificial defects

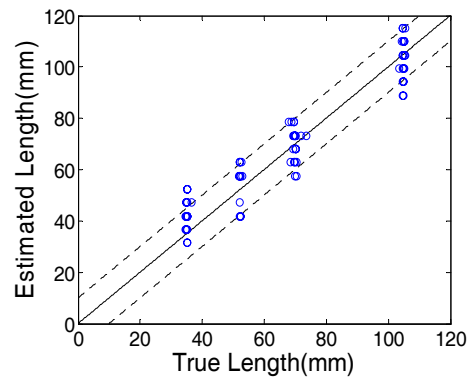
점의 거리로 길이를 추정했을 때의 결과를 보여준다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 최대값과 최소값을 갖는 두 점의 거리로 길이를 추정했을 경우 대부분의 추정 값이 실제 결함의 길이보다 작음을 확



(a)



(b)



(c)

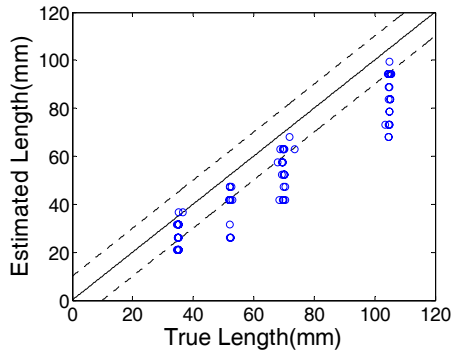
Fig. 5 Length estimation for each threshold using MFL axial signal, (a) minimum-to-minimum distance, (b) 90% of minimum-to-minimum distance, (c) 80% of minimum-to-minimum distance

Table 1 Replacement defects in KOGAS pipeline simulation facility

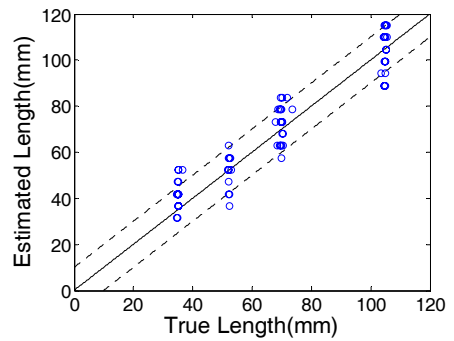
		Defect width											
		35mm			52.5mm			70mm			105mm		
Defect length	35 mm	20%	30%	10%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%		
		50%			50%		50%		50%		50%		
		70%	80%		80%		70%	80%		70%	80%		
	52.5 mm			30%		30%			30%			30%	
		50%			50%		50%		50%		50%		
		80%			80%		80%		70%	80%			
	70 mm	10%	20%	30%		30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	
			50%			50%		50%			50%		
		70%	80%			80%		70%	80%		70%	80%	
	105 mm	10%	20%	30%		30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	
			50%			50%		50%			50%		
		70%	80%			80%		70%	80%		70%	80%	

Table 2 Performance comparison of length estimation using MFL signals

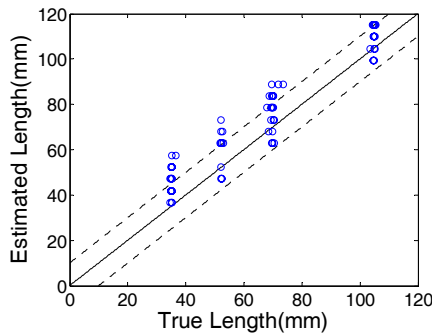
Signal type	Axial MFL signal			Radial MFL signal		
	Min-to-min (m-m) value	90% of m-m value	80% of m-m value	Peak-to-peak (p-p) value	90% of p-p value	80% of p-p value
Ave. error	28.78	11.65	<b>6.93</b>	14.73	<b>7.14</b>	9.46
Variance	121.23	83.75	<b>18.84</b>	82.58	<b>21.70</b>	30.96
Std. dev	11.01	9.15	<b>4.34</b>	9.09	<b>4.66</b>	5.56



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Length estimation for each threshold using MFL radial signal, (a) peak-to-peak distance, (b) 90% of peak-to-peak distance, (c) 80% of peak-to-peak distance

인할 수 있다. 반경 방향 신호의 경우 90%의 임계치를 적용하여 길이를 추정할 때 가장 우수한 성능을 보여주었다. Table 2은 74개의 결함에 대한 각 길이 추정 결과의 평균 오차와 표준 편차를 나타낸다.

## 5. 결론

본 논문은 자기 누설 신호를 이용하여 결함의 길이 추정 방법들을 비교 평가하였다. 축 방향과 반경 방향의 자기 누설 신호 각각에 대해 결함의 길이를 추정하기 위한 여러 기준들에 대해 성능을 측정하고 그 결과를 제시하였다. 성능을 비교하기 위해 모의 시험 배관에 총 74개의 인공결함을 제작하여 신호를 획득한 후, 특정한 임계치를 적용하여 자동으로 길이를 추정하였다. 길이 추정 결과 축 방향 신호의 경우 최소값의 80%의 임계 값을 이용한 추정이 정확한 결과를 보여주었으며, 반경 방향 신호를 이용할 경우 침두값의 90%의 임계 값을 이용한 추정이 정확한 결과를 보여주었다. 하지만, 자기 누설 신호는 피그의 주행속도, 착자 횟수 등과 같은 외부 변수에 따라 그 크기나 패턴이 왜곡될 수도 있으며[5,6], 심할 경우 침두값을 찾는 것이 불가능할 수 있다. 따라서 향후 이에 대한 연구가 필요하며 외부 변수에 따른 왜곡 정도를 보상할 수 있는 방안이 제시되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Gwan Soo Park and Eun Sik Park, "Improvement of the sensor system in magnetic flux leakage-type nondestructive testing(NDT)," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 1277-1280, (2002)
- [2] J. Sutherland and S. Clouston, "Advances in magnetic flux leakage measurement and inspection for metal loss in pipelines," 3<sup>rd</sup> International Conference on Pipe Rehabilitation and Maintenance, Abu Dhabi, UAE, (1999)
- [3] 노용우, 유휘룡, 박대진, 구성자, 박승수, 조성호, 김동규, "한국가스공사에서의 인텔리전트 피그 기술개발 현황", 한국가스학회, Vol. 6, No. 1, pp. 16-25, (2003)
- [4] Wenhua Han and Peiwen Que, "Defect reconstruction of submarine oil pipeline from MFL signals using genetic simulated annealing algorithm," Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol. 49, No. 3, pp. 145-150, (2006)
- [5] A. E. Crouch, "In-line inspection of natural gas pipelines," Gas Research Institute Topical Report GRI-91/0365, (1993)
- [6] T. A. Bubenik, J. B. Nestleroth, R. J. Eiber, and B. F. Saffell, "Magnetic flux leakage technology for natural gas pipeline inspection," Gas Research Institute Topical Report GRI-91/0367, (1992)
- [7] 김민호, "자기 누설 신호와 SQI를 이용한 가스 배관 결함 자동 검출 및 결함 깊이 모델링", 경북대학교 대학원 석사학위 논문, (2008)
- [8] 박상호, 박관수, "지하매설 가스관의 검사를 위한 누설 자속 탐상 PIG 설계에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 177-186, (2002)
- [9] 문재경, 이승현, 이인원, 박관수, 이민호, "자기 누설 신호의 측정을 이용한 배관의 결함 깊이 추정", 센서학회지, Vol. 15, No. 5, pp. 328-333, (2006)