



## SQI를 이용한 지하 매설 가스 배관 결함 길이 추정

†김민호 · 최두현

†경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부, 경북대학교 전자공학부  
(2010년 7월 24일 접수, 2011년 3월 15일 수정, 2011년 3월 15일 채택)

### Defect Length Estimation Using SQI for Underground Gas Pipelines

†Min-Ho Kim · Doo-Hyun Choi

†Graduate School of Electrical Engineering and Computer Science,  
Kyungpook National University, Daegu 702-701, South Korea  
School of Electronics Engineering, Kyungpook National University,  
Daegu 702-701, South Korea

(Received July 24, 2010; Revised March 15, 2011; Accepted March 15, 2011)

#### 요 약

본 논문에서는 자기 누설 탐상법을 이용하여 획득한 자기 누설 신호에 SQI(self quotient image)를 적용하여 지하에 매설된 가스 배관에 발생한 결함의 길이를 추정하는 방법을 소개한다. 자기 누설 탐상 시스템(MFL)이 지나간 가스 배관은 탐상 시스템의 영구 자석에 의해 착자(magnetization) 된다. 착자된 가스 배관에 결함이나 부식 등의 손상이 있을 경우 손상 부위에서는 누설 자속이 증가한다. 본 논문에서는 자기 누설 탐상 시스템의 홀센서를 이용하여 누설 자속을 계측한 후 SQI를 적용하여 결함의 길이를 추정한다. 한국가스공사(KOGAS)의 모의 시험 배관(KPSF)에 설치된 74개의 인공결함에 대해 제안한 알고리즘과 기존의 결함 길이 추정 알고리즘들의 성능을 비교하였다.

**Abstract** - In this paper a new defect length estimation algorithm using SQI(self quotient image) is presented for the MFL(magnetic flux leakage) inspection of underground gas pipelines. Gas pipelines are magnetized by the permanent magnets of the MFL PIG(pipeline inspection gauge) when the PIG runs through pipelines. If defects or corrosions exist in the pipeline, magnetic leakage flux is increased. The MFL signals measured by hall sensors are analyzed to estimate defect length using SQI. For 74 real defects carved in KOGAS pipeline simulation facility(KPSF) the accuracy of defect length estimation of the proposed algorithm was compared with that of conventional methods.

**Key words** : MFL, gas pipeline, pipeline defect, defect length estimation, SQI

#### 1. 서 론

천연 가스는 지하에 매설된 금속 재질의 배관 네트워크를 통해 가정과 공장 등으로 공급된다. 국내에는 1983년 이후로 2,800km가 넘는 철 재질의 배관이 지하에 매설되어 사용되고 있다[1]. 일반적으로

철 재질의 가스배관은 약 2~10년 안에 부식, 균열, 소규모피로파괴, 대규모피로파괴 등의 결함이 발생하는데 현재 국내의 지하 매설 가스배관의 평균 노후도(deterioration)는 약 15년이다. 고압 가스 안전관리법 시행규칙 제 34조 2항에 의하면 고압가스제조시설에 대하여 최초의 완성검사를 받은 날부터 15년이 경과한 연도 및 그 이후 최근 정기검사를 받은 날부터 2년이 경과하는 날이 속하는 연도가 정기보수기

†주저자:birdnamu1@ee.knu.ac.kr

간이므로 대부분의 배관이 수리 및 교체 단계에 있다[2]. 철과 같은 강자성체로 만들어진 배관은 주기적으로 부식과 균열이 생기는데 배관 검사에 쓰이는 비파괴 검사 방법은 육안 검사, 침투탐상검사(penetration inspection), 온도그래프 검사, 자기 누설 탐상법과 전자기 초음파 변환기 검사(EMAT: electromagnetic-acoustic transducer)등의 방법이 있다. 현재 국내의 가스 배관은 가정으로 바로 공급하는 소형 배관을 제외한 대부분이 지하에 매설되어 있다. 지하에 매설된 배관에 대해 육안 검사, 온도그래프 검사는 불가능하고 침투탐상검사 또한 표면으로 나타난 결함만 검출할 수 있어 지하에 매설된 배관의 내외부를 모두 검사하기는 쉽지 않다. 일반적으로 많이 사용하는 지하 매설 가스 배관 검사방법으로는 자기 누설 탐상법과 EMAT이 있다. 자기 누설 탐상법은 금속 재질의 대상 물체에 자기장을 인가하고 표면에 누설되는 자속을 홀 센서를 이용하여 계측하는 접촉식 검사 기술이며, EMAT은 대상 물체를 따라 초음파 탐촉자가 표면에 접촉하지 않고 표면을 검사하는 비접촉식 방법이다. 지하라는 배관의 위치를 고려할 때 가스배관의 검사에는 EMAT보다는 자기누설탐상법이 적합하다[3,4]. 국내의 가스 배관을 총괄하는 한국 가스공사에서는 설계압력이 2.2MPa 이상으로 운영되는 직경 18inch 이상의 천연가스 배관은 11.1mm, 14.3mm, 17.5mm 및 20.6mm 두께를 사용하고 있다. 본 논문에서 사용된 자기 누설 피그(MFL PIG)는 3차원 방향으로 576개의 홀 센서와 64개의 와전류 센서가 부착되어 있고 5.23mm/s마다 자기 누설 신호 데이터를 저장한다[5]. 배관에 형성된 부식과 균열 등의 결함은 자기 홀 센서로부터 계측되는 자기 누설 신호를 분석하여 길이, 폭, 깊이 등과 같은 결함의 형태를 판별한다[6,7].

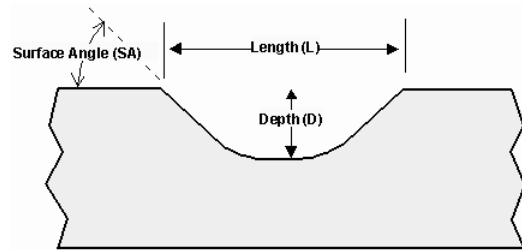
본 논문에서는 홀 센서로 측정된 자기 누설 신호에 대해 SQI를 적용하여 결함의 길이를 추정하는 방법을 제시한다. 실제 배관에 인공적으로 만든 결함에 대해 제안한 결함 길이 추정 알고리즘과 기존 결함 길이 추정 방법들의 성능을 비교 분석하였다.

## II. 자기 누설 신호와 SQI 전처리

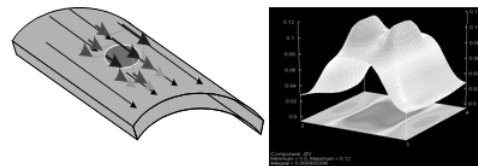
자기 누설 탐상법은 자기 누설 피그의 영구자석에 의해 자화된 금속 재질 배관의 누설 자속을 홀 센서를 이용해 계측하여 배관의 결함에 대해 분석하는 비파괴검사기법이다. 누설 자속은 여러 가지 요인에 의해 변화하지만 기본적으로 배관의 두께가 얇을수록 크다. 배관에 형성되는 결함으로 인해 통상 배관 두께가 감소하고 이로 인해 누설 자속은 증가하게 된다.

본 논문에서 사용한 자기 누설 피그의 홀 센서는 결합의 길이 방향, 폭 방향, 깊이 방향으로 설치되어 있고 센서가 설치된 방향으로 각각 축 방향 신호(axial signal), 원주 방향 신호(circumferential signal), 반경 방향 신호(radial signal)를 획득한다. 본 논문에서는 자기 누설 피그의 홀 센서 설치방향과 결합의 생성 방향을 고려하여 축 방향 신호를 사용하여 결함 길이를 추정하였다. Fig. 1(a)는 2차원 결함의 형상이고, Fig. 1(b)는 축 방향 홀 센서에 대한 누설 자기장의 분포이다[6].

자기 누설 신호 획득에 사용되는 자기 누설 피그의 무게는 500kg에서 2ton에 달하며 본 논문에서 사용한 피그는 무게가 1ton정도이다[7]. 피그 주행을 위해서 피그를 발사대(launcher)에 삽입할 때 홀 센서는 피그 무게로 인한 충격 등으로 교정성(calibration)을 잃게 된다. 일단 배관에 삽입한 피그는 유체인 가스의 압력으로 이동하며 도달점(destination)에 도착할 때까지 속도 제어가 불가능하다. 피그의 속도는 배관 통과 구간의 형상과 배관 내부 압력에 따라 변하는데 이로 인해 검사 전에 모든 센서에 대해 교정(calibration)을 하더라도 자기 누설 신호에는 왜곡이 발생하고 노이즈가 포함된다. 따라서 자기 누설 신호를 이용하여 결함의 길이를 추정하기 위해서는 각 센서에서 획득된 자기 누설 신호의 기본 수준을 맞추고 노이즈를 제거하는 전처리가 필요하다. 가스 배관으로부터 얻은 자기 누설 신호는 크게 배



(a) A defect and terms



(b) An axial MFL signal

Fig. 1. 2D defect form and MFL signal pattern for axial direction[6].

## SQI를 이용한 지하 매설 가스 배관 결함 길이 추정 방법

관 기준 신호, 결함 신호, 잡음 신호로 구분할 수 있다. 주파수 영역에서 3가지 신호를 분석해보면 배관 기준 신호는 점진적으로 변하는 저주파 신호, 결함 신호는 저주파와 고주파의 혼합신호, 잡음 신호는 고주파 신호로 분류할 수 있다. 그러므로 주파수 통과 필터를 사용하여 점진적으로 변하는 저주파 영역의 배관 기준 신호와 고주파 영역의 잡음 신호를 분리하면 결함 신호를 추출할 수 있다.

SQI (self quotient image)는 원 신호만을 이용하여 저주파 영역의 신호를 분리하는 일종의 고주파 통과 필터(HPF : high pass filter)이다[8]. SQI는 원 신호의 데이터를 이용하여 차단주파수를 구하므로 별도의 보조적인 정보가 불필요하고 배관 재질이 바뀌거나

두께가 바뀌었을 때도 신호처리에 활용할 수 있다. 또한 SQI를 통해 각 센서의 자기 누설 신호의 기준선을 일치시켜 피그 삽입 때 잃었던 센서간의 신호 기준선을 추가로 조정할 필요가 없다. 저주파와 고주파의 혼합신호인 결함 신호는 고주파 통과 필터 통과 시 저주파 신호를 일부 잃어 약간의 왜곡이 발생하지만 각 센서의 기준 수준을 자동으로 맞춰주므로 SQI로 처리한 후의 신호를 사용하면 결함 길이 추정이 용이해진다. Fig. 2(a)는 결함 구간을 지나간 축방향 센서들 중 하나의 자기 누설 신호이고, Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의 자기 누설 신호에 SQI를 적용한 결과이다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에서 확인할 수 있듯이 점진적으로 변하는 저주파 성분과 결함영역의 신호 향상으로, 결함의 검출과 길이 추정 성능의 향상을 기대할 수 있다. Fig. 2(a)와 2(b)의 기준 leakage flux density가 다른 것은 SQI 알고리즘을 적용하면 신호가 1을 기준으로 평활화된 고주파 신호로 바뀌기 때문이다.

본 논문에서는 결함의 길이 추정을 위해 결함 영역의 축방향 신호에 SQI를 적용한 신호를 이용하였다. 자기 누설 신호의 축방향 신호에 SQI를 적용한 신호를 SQI-Axial 신호로 표현한다. SQI-Axial 신호로부터 결함의 길이를 추정하는 방법을 다음 장에서 소개한다.

### III. 결함 길이 추정 방법

배관에 결함이 발생하게 되면 누설 자속은 결함이 시작되기 직전에 기준 누설 자속보다 감소하다가 결함의 영역에 다가갈수록 증가하여 결함의 최고 깊이 부분에서 최고조에 달한다. 이후 누설 자속은 다시 감소하다가 결함 영역을 벗어난 후 기준 누설 자속으로 돌아온다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 배관에 형성된 결함의 길이가  $4t$ ( $t$ : 배관두께단위)일 경우 배관의 결함 형태에 맞추어 자기 누설 신호와 SQI-Axial 신호를 보였다. SQI-Axial 신호는 기준 누설 자속 값을 기준으로 배관의 외벽과 평행선을 그리면 결함의 길이에 해당되는 부분과 만나는 두 점이 생긴다. 철두 값을 기준으로 왼쪽의 점을  $P_s$ , 오른쪽의 점을  $P_e$ 라 할 때 식 (1)과 같이 결함의 길이를 추정할 수 있다. 상수 5.23은 홀 센서의 샘플링 주기[mm/sample]이다.

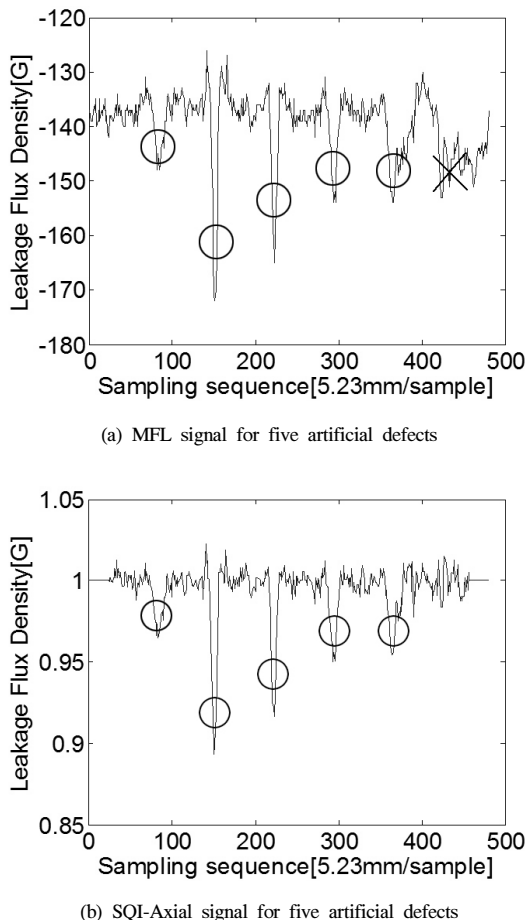
$$\ell = 5.23 \times \delta \quad (1)$$

where

$$\ell: \text{'defect length[mm]}$$

$$\delta = P_e - P_s$$

누설 자속의 크기는 Fig. 4와 같이 폭과 깊이가 일정할 때 결함의 길이에 반비례한다. 따라서 결함의



**Fig. 2.** MFL signal and SQI signal for five artificial defects.

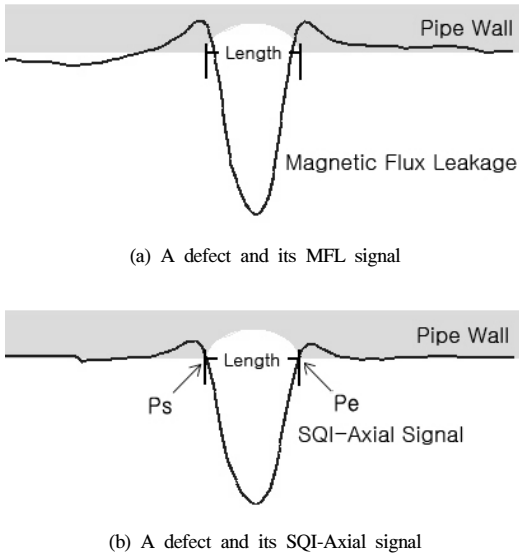


Fig. 3. MFL signal & SQI-Axial signal.

길이 4t보다 작을 경우와 클 경우에는 보상 상수가 필요하다. 누설 자속과 결함 길이의 관계를 고려하여 식 (1)을 식 (2)로 보완하였다. 상수  $\alpha, \beta, \gamma$ 의 값은 결함 길이 추정을 위해 사전에 제작한 인공결함 30개의 자기 누설 신호 데이터를 바탕으로 선형회귀법을 통해 계산되었다. 준비된 인공결함들은 길이 2t, 3t, 4t, 6t에 다양한 폭과 깊이를 가진다.

$$\ell = 5.23 \times (\alpha \times \delta^2 + \beta \times \delta + \gamma) \quad (2)$$

where  $\alpha = 0.0933, \beta = 3.4473, \gamma = -8.6053$

본 논문에서 제안한 SQI를 이용한 결함 길이 추정 방법의 성능을 분석하기 위해 기존의 축 방향 신호에 침투값 임계치를 적용하여 길이를 추정하는 방법과 반경 방향 신호에 침투값 임계치를 적용하여 길이를 추정하는 방법 등과 비교하였다[6].

#### IV. 실험 결과

실제 지하 매설 가스 배관에 생기는 결함 형태에 따른 자기 누설 신호를 분석하기 위해서 한국 가스 공사의 두께 17.5mm의 모의 시험 배관 중 한 구간에 74개의 인공 결함을 설치하였다[6]. 설치된 인공 결함의 길이와 폭은 35mm(2t), 52.5mm(3t), 70mm(4t) 및 105mm(6t)이고 깊이는 10%(0.1t)~80%(0.8t)로 다양하게 구성되어 있다. Fig. 5(a)에 기존의 길이 추정

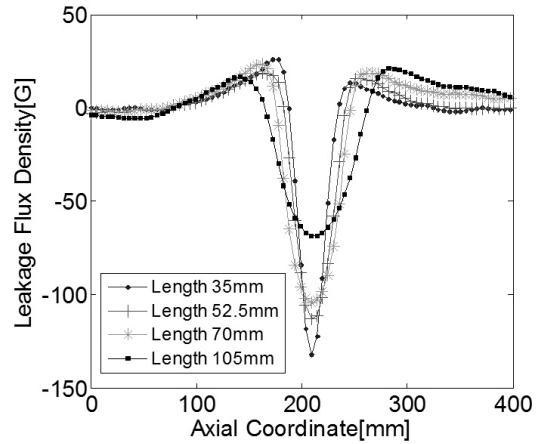


Fig. 4. The pattern of leakage flux according to defect length[7]

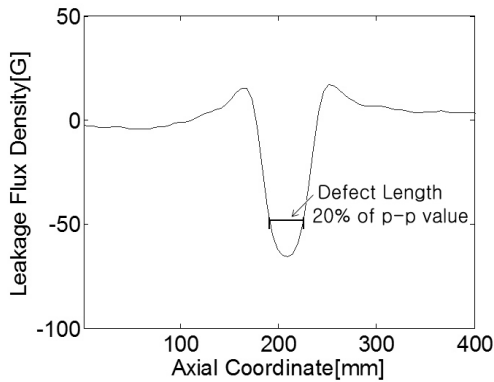
Table 1. Performance comparison of length estimation using MFL signals

Signal type	Axial MFL signal	Radial MFL signal	SQI-Axial signal
Threshold level	20% of p-p value	90% of p-p value	Baseline of signal
Ave. error	6.44mm	6.73mm	<b>5.6mm</b>
Std. dev	4.68mm	4.62mm	<b>4.51mm</b>

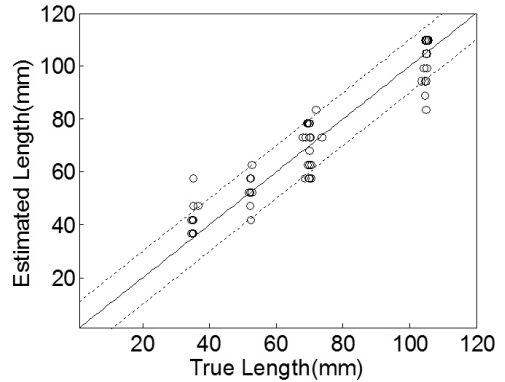
방식인 축 방향 신호 크기의 20% 임계치를 갖는 두 점의 거리로 길이를 추정하는 방법을 나타내었다. Fig. 5(b)는 추정 결과이다. 그림에 대각선으로 표시된 실선은 오차가 0인 경우를 표시하고 점선은 오차가  $\pm 10\text{mm}$ 인 경우를 표시한다. Fig. 6(a)는 반경 방향 신호의 크기의 90% 임계치를 갖는 두 점의 거리로 길이를 추정하는 방법을 나타내고, Fig. 6(b)는 추정 결과를 나타낸다. Fig. 7(a)는 본 논문에서 제안한 길이 추정 방법이고, Fig. 7(b)는 본 논문의 추정 결과를 나타낸다. Fig. 5(a), Fig. 6(a), Fig. 7(a)를 나타내기 위해 사용한 결함은 길이 70mm, 폭 34mm, 깊이 50.1%의 값을 가진다.

Table 1은 74개의 인공 결함에 대한 기존 방법들과 제안한 방법의 결함 길이 추정 평균 오차와 표준편차를 보여준다. 축 방향 신호의 임계치를 이용하는 방법은 6.44mm의 평균 오차와 4.68mm의 표준편차를 가지고, 반경 방향 신호의 임계치를 이용하는 방법은 6.73mm의 평균 오차와 4.62mm의 표준편차를

SQI를 이용한 지하 매설 가스 배관 결함 길이 추정 방법

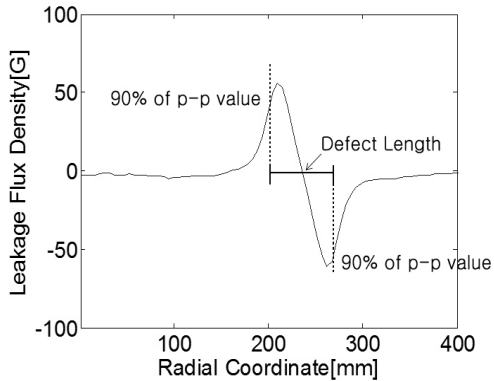


(a) Length estimation using axial signal threshold

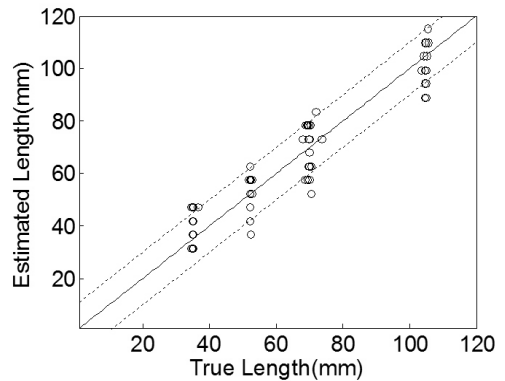


(b) Results of length estimation using axial signal threshold

**Fig. 5.** Length estimation using axial signal threshold.

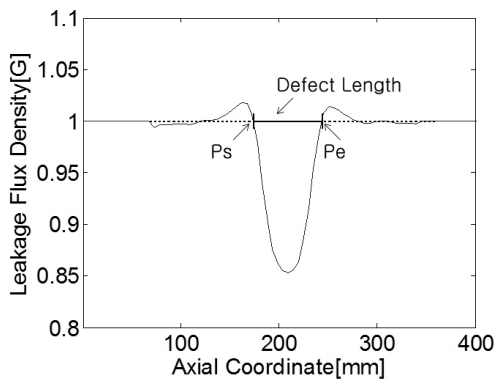


(a) Length estimation using radial signal threshold

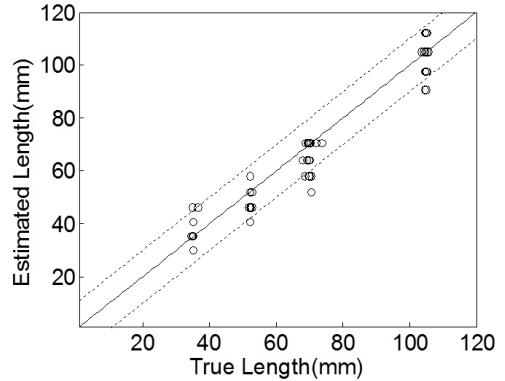


(b) Results of length estimation using radial signal threshold

**Fig. 6.** Length estimation using radial signal threshold.



(a) Length estimation using proposed algorithm



(b) Results of length estimation using proposed algorithm

**Fig. 7.** Length estimation using proposed algorithm.

가지며, 본 논문에서 제안한 방법은 5.6mm의 평균 오차와 4.51mm의 표준편차를 가진다.

## V. 결 론

본 논문에서는 자기 누설 신호의 축 방향 신호에 SQI를 적용한 신호를 이용하여 결함의 길이를 검출하는 방법을 제안하였다. 자기 누설 탐상 시스템으로 획득된 자기 누설 신호에는 많은 잡음과 속도나 착자의 영향 등으로 다양한 신호 왜곡이 발생한다. SQI를 적용하여 이러한 신호 왜곡을 효과적으로 보정하고 결함의 길이 검출에 유용하게 활용될 수 있음을 보였다. 기존의 방법들은 피그의 주행 속도나 배관의 착자 정도에 따라 왜곡이 발생하고 크기가 달라지는 자기 누설 신호의 침투값을 이용하여 결함의 길이를 추정하지만, 제안된 결함 길이 추정방법은 결함 발생 전 배관의 평균 누설 자속을 기준으로 임계치를 설정하므로 기존의 방법보다 잡음이나 외부 요인에 대해 상대적으로 강건한 결함 길이 추정이 가능하다. 제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 모의 시험 배관에 설치된 74개의 인공결함에 대해 자기 누설 신호를 획득하였다. 기존의 방법과 제안한 방법의 결함 길이 추정 성능을 비교 분석한 결과, 제안한 결함 길이 추정 방법의 성능이 기존의 방법보다 향상됨을 확인하였다.

## 참고문헌

[1] 백중현, "덴트결함을 갖는 저합금 탄소강 천연 가스 배관의 건전성 평가에 관한 연구", 성균관

- 대학교 대학원 박사학위 논문, (2009)
- [2] 지식경제부령, "고압가스 안전관리법 시행규칙", 지식경제부(에너지안전과), 제169호, 2011년 1월.
- [3] J. Sutherland and S. Clouston, "Advances in magnetic flux leakage measurement and inspection for metal loss in pipelines", 3rd International Conference on Pipe Rehabilitation and Maintenance, Abu Dhabi, UAE, (1999)
- [4] Shujuan Wang, Lei Kang, Penghao Xin and Guofu Zhai, "Characteristic research and analysis of EMAT's transduction efficiency for surface detection of aluminum plate", ICEMI International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 949-955, (2009)
- [5] Gwan Soo Park and Eun Sik Park, "Improvement of the sensor system in magnetic flux leakage-type nondestructive testing(NDT)", *IEEE Transactions on Magnetics*, **38**(2), 1277-1280, (2002)
- [6] 김태욱, 노용우, 최두현, "자기 누설 신호를 이용한 배관 결함의 길이 추정 성능 비교", *비파괴검사학회지*, **29**(2), 108-113, (2009)
- [7] 김민호, "자기 누설 신호와 SQI를 이용한 가스 배관 결함 자동 검출 및 결함 깊이 모델링", 경북대학교 대학원 석사학위 논문, (2008)
- [8] Haitao Wang, Stan Z Li and Yangsheng Wang, "Face Recognition under Varying Lighting Conditions Using Self Quotient Image", Proc. IEEE International Conference on automatic Face and Gesture Recognition, 819-824, (2004)