

자기 누설 신호와 SQI를 이용한 배관 결함 검출

Pipeline Defects Detection Using MFL Signals and Self Quotient Image

김민호*, 노용우**, 최두현***†

Min-Ho Kim*, Yong-Woo Rho** and Doo-Hyun Choi***†

초 록 본 논문에서는 비파괴검사법 중 하나인 자기누설탐상검사법을 이용하여 지하에 매설된 가스 배관의 결함 위치를 검출하는 방법을 제안한다. 자기 누설 탐상 시스템을 통해 얻은 자기 누설 신호는 일반적으로 비선형성을 띄며 다양한 외부 요인으로 인한 신호의 왜곡이 심하다. 본 논문에서는 신호의 비선형성과 신호의 왜곡을 보정하는 신호 처리 기법 중 SQI(self quotient image)를 이용하여 배관 결함의 위치를 검출하였다. 실제로 제작된 모의시험 배관에 제작된 다양한 인공 결함에 대해 알고리즘을 적용한 결과 기존 DCT(discrete cosine transform) 계수 기반 방법에 비해 결함 검출 성능이 크게 향상됨을 확인하였다.

주요용어: 자기누설탐상법, 배관 결함, 결함 위치 검출, SQI, FIG, 부식

Abstract Defects positioning of underground gas pipelines using MFL(magnetic flux leakage) inspection which is one of non-destructive evaluation techniques is proposed in this paper. MFL signals acquired from MFL FIG(pipeline inspection gauge) have nonlinearity and distortion caused by various external disturbances. SQI(self quotient image), a compensation technique for nonlinearity and distortion of MFL signal, is used to correct positioning of pipeline defects. Through the experiments using artificial defects carved in the KOGAS pipeline simulation facility, it is found that the performance of proposed defect detection is greatly improved compared to that of the conventional DCT(discrete cosine transform) coefficients based detection.

Keywords: MFL, Pipeline Defects, Defect Detection, SQI, FIG, Corrosion

1. 서론

현재 우리나라는 전체 소비 에너지의 약 60%가 가스와 석유로 공급되고 있다. 가스와 석유는 지하에 매설된 배관을 통해 각 가정과 공장 등 에너지를 필요로 하는 곳에 공급된다. 국내에 매설된 가스 및 석유 주(主) 배관은 각각 약 2800 km, 1100 km에 달하며, 대부분의 가스 배관들은 매설된 지 평균 15년 이상의 노후배관이다. 부식 및 균열과 같은 배관 결함이 통상 4 ~ 10년 안에 발생하므로 이미 교체와 수리의 단계에 있다[1,2]. 그러나

매설된 전체 배관을 주기적으로 교체하는 것은 비용 및 인력 측면에서 사실상 불가능하다. 따라서 지하 매설 배관 검사를 통해서 결함이 발생한 배관 부분만을 수리하거나 교체하는 방식으로 배관의 관리가 이루어지고 있다. 가스 배관은 운송하는 원료인 가스의 특성상 지속적인 가스공급을 유지하면서 비파괴검사를 통해 배관의 건전성에 대한 검사가 진행된다. 비파괴검사 중 투과탐상검사와 와전류 탐상검사는 배관의 내부 검사만 가능하고, 방사선 투과검사는 일정한 배관두께만 검사가 가능하며 초음파탐상검사는 수분에 약한 단점이 있다. 그래서

[접수일: 2010. 5. 13, 수정일: 2010. 8. 2, 게재확정일: 2010. 8. 6] *경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부, **한국가스공사 연구개발원 IP연구개발, ***경북대학교 전자공학부, †Corresponding Author: School of Electronics Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea, (E-mail:dhc@ee.knu.ac.kr)

가스배관의 검사에는 배관의 내외부 결함 검출이 가능하고 외부 환경의 영향을 적게 받는 자기누설 탐상검사가 많이 사용된다[3,4].

자기 누설 탐상 검사는 PIG(pipeline inspection gauge)라는 장치를 이용한 자기 누설 탐상 시스템을 이용하여 영구 자석이 배관 내부를 이동하면서 생기는 누설 자속의 변화를 바탕으로 결함을 검출하는 방법이다. 지하 매설 배관 결함의 검출 요구 성능은 POF(pipeline operators forum)와 NACE(national association of corrosion engineers)에서 국제 규격으로 정하고 있으며, 배관 두께 t 를 기준으로 길이 $3t(\text{mm}) \times$ 폭 $3t(\text{mm}) \times$ 깊이 10% 이상의 결함을 깊이 오차 $\pm 10\%$ 에서 반드시 검출하도록 되어 있다[5]. 자기 누설 PIG를 통해 얻은 자기 누설 신호는 비선형성을 가지고 있고, 지하 매설 및 PIG 주행 속도 불균일 등의 영향으로 신호에 다양한 왜곡이 발생한다. 본 논문에서는 결함 검출의 정확성을 높이기 위해 자기 누설 신호에 SQI(self quotient image) 기법을 적용하여 신호를 보정하여, 결함의 검출 성능을 향상시키고자 한다. 제안된 결함 검출 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 모의시험 배관에 설치된 다양한 인공 결함에 대해 실험하였으며, 기존의 DCT(discrete cosine transform) 계수 기반 결함 검출 방법과 성능을 비교하였다.

2. 자기누설탐상 시스템의 구조와 원리

자기 누설 탐상 시스템의 기본 구조는 Fig. 1과 같다. 자기 누설 탐상 시스템은 배관 내부를 지나가면서 시스템 내부의 영구 자석을 이용해 배관을 착자(magnetization)시킨다. 착자된 배관은 배관의 두께와 재질에 따라 일정량의 자속을 누설하는데 이를 누설 자속이라고 한다[4,5]. 배관에 결함이 생기면 배관의 유효 두께가 감소된다. 배관의 두께가 감소되면 누설되는 자속의 양은 증가하고 자기 누설 탐상 시스템의 홀 센서로부터 계속되는 자기 누설 신호의 크기는 커진다. 이와 같이 계속된 자기 누설 신호로부터 배관의 결함 유무를 판단하는 것을 자기누설탐상법이라고 한다.

본 논문의 실험 장치로 사용된 자기 누설 탐상 시스템은 한국가스공사에서 제작한 30인치 PIG로, 배관 혹은 PIG 진행 방향을 기준으로 축(axial) 방향, 반경(radial) 방향, 원주(circumferential) 방향으로 각각 192개씩 총 576개의 홀 센서를 장착하고

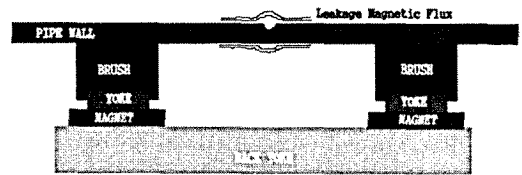


Fig. 1 Magnetic flux leakage due to metal loss[4,5]

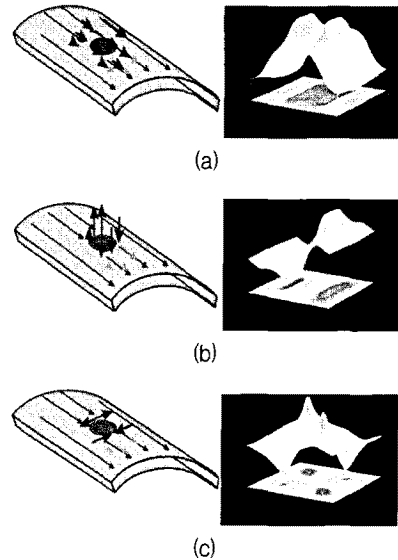


Fig. 2 Leakage signal pattern for each direction [5,6], (a) Axial direction, (b) Radial direction, (c) Circumferential direction

있으며, 무게는 1톤(ton)이 넘는다[2]. 홀 센서로부터 자기 누설 신호는 매 5.23 mm 마다 576개의 데이터가 획득된다. Fig. 2는 이상적인 경우의 결함 영역에서의 3방향 자기 누설 신호 패턴이다. 본 논문에서는 결함의 위치를 검출하는 것이 목적이므로, 세 신호 중 상대적으로 신호의 크기가 크고 잡음이 적은 축방향 신호를 이용하였다[6].

3. 제안한 SQI 기반 결함 검출 방법

PIG가 검사 대상 배관에 삽입된 이후에는 외부로부터의 제어는 힘들며 오로지 가스 압력에 의해서만 배관 내부를 주행하게 된다. 검사 전 모든 센서에 대해 교정(calibration)이 되더라도 내부 주행 중 변동이 발생하고, 유체인 가스의 압력 조정 실패나 통과 구간의 지형적인 형상에 따라 속도 및 홀센서와 배관의 밀접도의 변화는 불가피하다. 이

는 자기 누설 신호에 영향을 주어 점진적인 기준 누설 자속 신호의 세기도 달라지게 되는 형태로 계속되는데, 정확한 검사를 위해서는 이러한 영향을 최소화해야 한다. 본 논문에서는 점진적인 누설 자속 신호의 변화나 고주파 잡음의 제거를 위한 방법으로 SQI를 이용하였다.

SQI는 원 신호를 저주파 통과 필터를 거친 신호로 나누어서 획득되는 신호로, 점진적으로 변하는 저주파 성분을 제거하고 고주파는 유지시키는 특성이 있다[7]. 또한, 신호에서 저주파 영역의 신호를 제거함으로써 점진적으로 변하는 기준 신호 레벨의 영향 및 센서간의 기준 레벨의 차이를 제거하는 역할도 한다. SQI Q는 식(1)과 같이 표현된다. 식(1)에서 F는 Gaussian 커널 G에 가중치 W를 적용한 일종의 저주파 통과 필터이다.

$$Q = \frac{1}{I} = \frac{1}{F * I} \tag{1}$$

$$F(i, j) = W(i, j) \cdot G(i, j) \tag{1}$$

$$\text{where, } G(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(i^2 + j^2)}{2\sigma^2}},$$

σ : standard deviation

여기서, 가중치 W는 식(2)와 같다.

$$W(i, j) = \begin{cases} 0, & I(i, j) < \text{Mean}(I_\Omega) \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

여기서 Ω 는 커널 크기이고, I_Ω 는 커널 크기만큼의 원 신호를 의미한다. $\text{Mean}(I_\Omega)$ 는 I_Ω 의 평균 신호 크기를 의미한다. $\text{Mean}(I_\Omega)$ 보다 큰 값을 가지는 신호를 M_1 이라하고 작은 값을 가지는 신호를 M_2 라 할 때, M_1 의 개수가 커널 크기의 절반보다 작다면 가중치를 식(3)과 같이 바꾼다.

$$W(i, j) = \begin{cases} \sim W(i, j), & M_1 < \frac{\Omega}{2} \\ W(i, j), & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

위의 과정을 거쳐서 구해진 필터 F는 저주파 통과 필터가 되고, 식(1)과 같이 원 신호를 저주파 통과 필터를 거친 신호로 나눔으로써 SQI를 얻을 수 있다.

SQI의 점진적인 기준 신호 변동에 대한 대응 능력 및 원 신호에 적응적인 고주파 강조 특성은 MFL 신호를 이용한 결함 검출에 유용하게 사용될

수 있다. Fig. 3의 자기 누설 신호는 한국가스공사의 모의시험 배관에 존재하는 인공결함에서 실제로 FIG를 사용해서 얻은 신호이다. Fig. 3(a)는 Bend 부분에서 속도의 변화나 센서와 배관의 간격 변화로 인해 발생한 자기 누설 신호이다. Fig. 3(a)는 한 홀센서의 축방향 자기 누설 신호를 나타낸 것

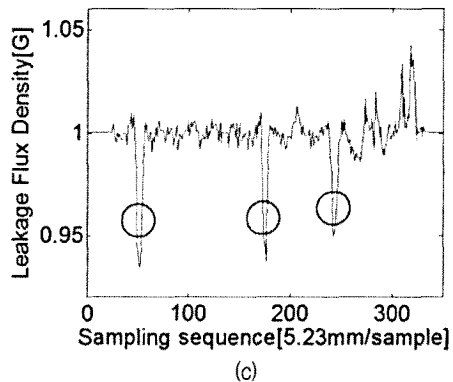
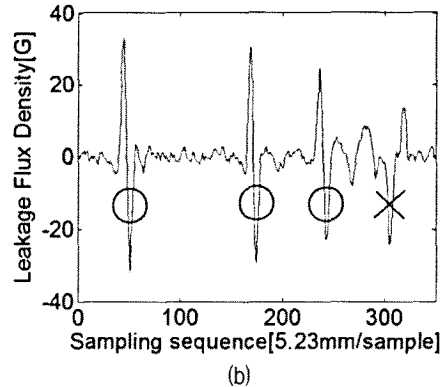
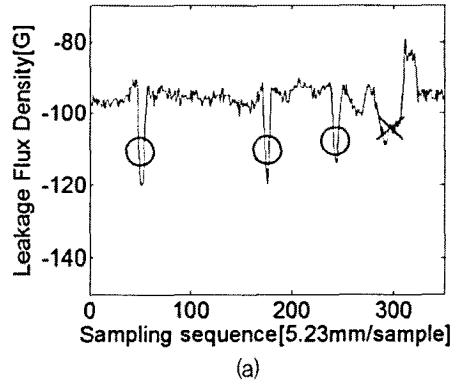


Fig. 3 Comparison of signals processed by DCT and SQI for artificial defects on KPSF pipeline, (a) Original MFL signal, (b) 2nd coefficients of DCT, (c) SQI

로 검은색 원으로 표시한 부분이 실제 결함이 존재하는 부분이다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a) 신호에 대해 DCT(discrete cosine transform) 한 후 2번째 계수를 그린 결과이다[8]. Fig. 3(c)는 원 신호에 SQI를 적용한 결과로, 신호가 평활화되고 기준선이 고정된 것을 볼 수 있으며 신호의 고주파 특성은 원 신호와 비교할 때 여전히 존재함을 알 수 있다. 원 신호의 300-320 샘플 근처는 PIG의 갑작스러운 속도변화로 인해 생긴 신호의 휨 현상이다. 원 신호의 휨 현상은 250 샘플 근처 영역의 결함과 비슷한 크기의 왜곡신호로 나타나며, SQI 적용 결과 보정되었음을 볼 수 있다. 원 신호와 SQI 신호 모두 일정 누설자속 값을 기준으로 결함을 검출할 수 있으나 SQI 신호가 보다 쉽게 검출할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 실험 결과

제안된 알고리즘의 성능을 객관적으로 평가하기 위해 식(4)에 나타낸 정상검출률(hit rate) 과 오검출률(false discovery rate)을 사용하였다[10]. 정상검출률은 검출 정확도가 높을수록 높아지고, 오검출률은 잘못된 검출량이 많을수록 높아진다. 이상적인 알고리즘일수록 정상 검출률은 높고 오검출률은 낮다.

$$Hit\ rate = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$False\ discovery\ rate = \frac{FP}{TP + FP}$$

Where,

TP=true positive=number of correctly detection

FP=false positive=number of false detection

FN=false negative=number of miss detection

본 논문에서 제안한 지하 매설 가스 배관 결함 검출 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 200 m 길이의 모의시험 배관에 길이 범위 8.8 mm - 152.7 mm, 폭 범위 35 mm-152.7 mm, 깊이 범위 5%-80%의 다양한 인공 결함들을 설치하였다. Fig. 4는 한국가스공사에서 제작한 모의시험 배관의 실제 모습이다[8]. 결함 검출 기준이 되는 SQI 임계치는 깊이 5% 결함 기준으로 실험적으로 0.96으로 결정하였다. 국제 규격에서는 길이 3t(mm) x 폭 3t(mm) x 깊이 10%이상의 결함을 오차 ±10%에서

검출하도록 되어 있지만 안전을 위해서 5% 깊이의 결함도 검출하도록 설정하였다. 결함 검출을 위한 SQI 필터의 커널 크기는 24로, 표준 편차는 8로 설정하였는데, 이는 실제 배관에 형성되는 결함 및 MFL 검사 대상 결함의 크기와 관계가 있다. 일반적으로 실제 배관에는 8 mm-110 mm 크기의 결함이 주로 발생되고 본 논문에서 사용한 PIG의 축방향 홀 센서 신호획득 간격이 5.23 mm임을 고려하여 최대 크기의 결함에 대해서 왜곡없이 신호를 보정할 수 있도록 커널의 구조를 설정한 것이다.

제안한 결함 검출 알고리즘의 성능을 기존 검출 알고리즘인 DCT 기반의 결함 검출 알고리즘과 비교하였다[9]. Fig. 5(a)는 모의시험 배관 150-165 m 구간에 DCT 계수를 기반으로 한 결함 검출 알고리즘을 적용한 결과이고, Fig. 5(b)는 본 논문에서

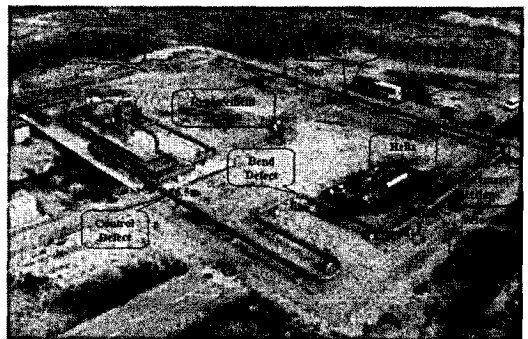


Fig. 4 KOGAS pipeline simulation facility(KPSF) [8]

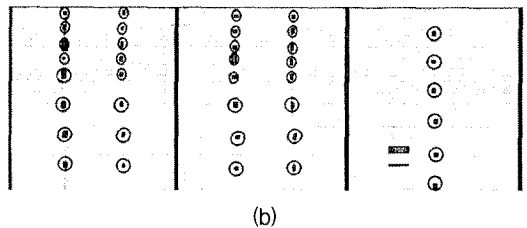
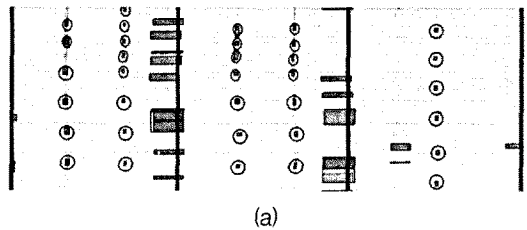


Fig. 5 Result of defect detection based on DCT and SQI, (a) Result of defect detection based on DCT coefficients, (b) Result of defect detection based on SQI

Table 1 Comparison of defect detection results based on DCT & SQI

Region		Bend	Velocity Gradient	Correlation	Detection Threshold	Replacement	Other	Whole (1-200m)
# of defect		20	25	32	6	74	0	157
DCT	# of correct detection	15	25	28	6	74	0	148
	# of false detection	13	18	20	3	14	217	285
SQI	# of correct detection	15	25	32	6	74	0	152
	# of false detection	0	3	0	2	2	72	79

제안한 SQI 기반의 결함 자동 검출 알고리즘을 적용하여 결함을 검출한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안한 SQI 기반 알고리즘은 모든 결함을 검출하였으나 DCT 기반 알고리즘은 4개의 결함을 미검출(miss detection)하였고, 오검출(false detection) 부분에서도 SQI 기반 알고리즘에 비해 DCT 기반 알고리즘은 다수의 오검출이 발생하였다.

Table 1은 DCT 계수 기반 및 본 논문에서 제안한 SQI 기반의 결함 검출 알고리즘을 모의시험 배관 구간간의 데이터에 적용한 결과를 요약한 것이고, Table 2는 이를 정리하여 정상검출률과 오검출률을 나타낸 것이다. SQI기반 알고리즘과 DCT기반 알고리즘의 정상검출률은 각각 96.8%과 94.3%로 두 알고리즘 모두 상당히 높은 정확도를 보여준다. 오검출률은 SQI 기반 알고리즘이 34.2%로 DCT 계수 기반 알고리즘의 65.8%에 비해 훨씬 낮게 나타났다. SQI 기반 알고리즘이 DCT 계수 기반의 알고리즘보다 오검출률이 낮은 것은 SQI 기반 알고리즘이 잡음 신호와 결함 신호를 상대적으로 뚜렷이 구분할 수 있음을 의미하며, 이를 통해 SQI가 유용한 결함 위치 검출 기법이 될 수 있음을 확인할 수 있다. 두 알고리즘 모두에서 미검출된 결함은 bend 구간간의 결함으로, 이는 bend 구간에서 1톤 무게의 PIG가 굽은 구간을 통과하면서 한쪽으로 쏠려서 생긴 센서와 배관 사이의 간격 변화로 인해 홀 센서 신호의 크기가 줄어든 때문으로 추정된다.

Table 2 Summarized results of defect detection based on DCT & SQI

Method	Hit rate	False discovery rate
DCT	94.3%	65.8%
SQI	96.8%	34.2%

5. 결론

본 논문에서는 자기 누설 신호에 SQI 알고리즘을 적용하여 결함의 검출 성능을 향상시키는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은 자기 누설 탐상 시스템의 불안정성으로 인한 신호의 기준 레벨 변화 현상을 줄이고 속도나 내부 압력 변화와 같은 영향을 최소화하면서 배관 결함 신호를 부각시켜 배관 결함을 검출한다. 본 논문에서 제안한 결함 검출 방법의 성능을 평가하기 위해 모의시험 배관에 인공 결함을 생성시켜 사용하였고, DCT 계수 기반의 기존 방법과 결함 검출 성능을 비교 평가하였다. 결함 검출 결과 정상검출률은 약 96.8%로 기존의 94.3%보다 향상되었으며, 오검출률도 34.2%로 기존의 65.8%보다 크게 줄었다. 제안한 알고리즘은 하드웨어로도 쉽게 구현이 가능하므로 피깅(pigging) 후의 신호 해석이 아니라 피깅과 동시에 결함의 검출도 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 백중현, "덴트결합을 갖는 저합금 탄소강 천연 가스 배관의 건전성 평가에 관한 연구", 성균관대학교 대학원 박사학위 논문 (2009)
- [2] 노용우, 유휘룡, 박대진, 구성자, 박승수, 조성호, 김동규, "한국가스공사에서의 인텔리전트 PIG 기술개발 현황", 한국가스학회지, Vol. 6, No. 1, pp. 16-25 (2003)
- [3] 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)
- [4] J. Sutherland and S. Clouston, "Advances in magnetic flux leakage measurement and inspection for metal loss in pipelines," The 3rd International Conference on Pipe Rehabilitation and Maintenance, Abu Dhabi, UAE (1999)
- [5] 서강, "자계해석기법을 이용한 자기 누설 비파괴검사 시스템의 성능 향상에 관한 연구," 부산대학교 대학원 박사학위 논문, (2007)
- [6] 김민호, "자기 누설 신호와 SQI를 이용한 가스 배관 결함 자동 검출 및 결함 깊이 모델링", 경북대학교 대학원 석사학위 논문 (2008)
- [7] 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, pp. 819-824 (2004)
- [8] 김태욱, 노용우, 최두현, "자기 누설 신호를 이용한 배관 결함의 길이 추정 성능 비교", 비파괴검사학회지, Vol. 29, No. 2, pp. 108-113 (2009)
- [9] 한병길, 박관수, 유휘룡, 노용우, 최두현, "DCT 기반의 자기 누설 신호 분석을 통한 가스 배관에서의 결함 신호 특징 추출", 대한전자공학회 하계종합학술대회, Vol. 29, No. 1, pp. 359-360 (2006)
- [10] Altman DG, Bland JM, Diagnostic Tests. 1 : Sensitivity and Specificity, British Medical Journal 308(6943) : 1552 (1994)