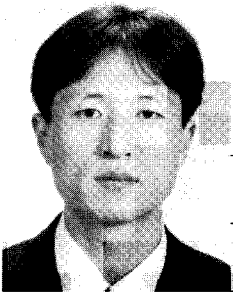


누설자속법을 이용한 대형 저장탱크의 부식측정 기술



원 순 호

(KIMM 공인시험평가부)

- '93 한양대학교 물리학과(학사)
- '95 한양대학교 물리학과(석사)
- '95. 3 - 현재 한국기계연구원 연구원



조 경 식

(KIMM 공인시험평가부)

- '78. 2 서울공대 공업교육과(학사)
- '93. 2 창원대학교 기계공학과(석사)
- '99. 2 부경대학교 기계공학과(박사)
- '87. 8 비파괴검사 기술사
- '77. 12 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

국내의 석유화학 플랜트의 상당수는 건설한지 20~30년이 경과한 관계로 노후화된 설비가 대부분이기 때문에 압력용기를 비롯한 주요 장치나 설비들에 대해서는 법적인 규정에 의하거나 또는 소유기관이 자발적으로 정기적인 검사를 수행하여 오고 있다. 그러나 지하 또는 대형 지상 저장탱크들은 용기의 특성상 별도의 탱크를 제작하여 내용물을 옮기기 전에는 개방하기 어렵기 때문에 보통 15~20년 이상 사용기간이 경과한 탱크가 단 한번도 검사되지 않은 경우도 있으며, 경제성 및 전반적인 검사기술의 부재로 검사의 중요성이 인정되어 왔지만 실제적인 검사는 만족하게 수행되지 못하고 있는 실정이다. 또한 산업 시설물과 공공구조물의 재해는 단위 사업장, 특정지역 등 개별적인 사고 개념에서 취급되어 왔기 때문에 지금까지는 국가 전체적인 엄청난 경제적 손실은 간과되어 왔다. 저장탱크의 경우 사고발생에 의한 저장물의 유출은 생산 중단에 따르는 경제적 손실과 대기 및 지하수, 토양 등에 대한 환경오염 외에도 누출된 저장물에 의한 화재나 폭발로 인해 막대한 인명피해를 초래할 수 있다.

일반적으로 지상에 있는 저장탱크는 shell이나 roof 내·외면의 접근이 가능하나 지면과 접촉하고 있는 탱크바닥이나 지하 저장탱크는 토양과 접촉하고 있는 외부의 전체면에 대한 접근이 불가능하기 때문에 부식에 의한 손상이 발견되지

않아 저장물의 누설로 인하여 환경오염이나 화재, 폭발과 같은 사고가 발생하는 경우가 많다. 탱크 내면도 마찬가지지만 특히 탱크 외면의 요인들은 전기·화학적인 요인에 의해 예측할 수 없도록 계속 변화하는 경우가 많기 때문에 부식 부위는 탱크의 외면에 예기치 못하는 상태로 흩어져 있고, 이런 경우 저장탱크의 몇 개소를 선택적으로 검사하여 탱크 전체의 상태를 결정하는 것은 적합하지 않다. 따라서 접근할 수 있는 내면 자체는 물론이고 접근이 불가능한 외면에 대한 부식상태를 전면적으로 동시에 검사할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

현재 활용되고 있는 초음파 두께측정 방식은 표면에 금속 이외의 코팅재가 붙어 있거나, 표면에 제거가 어려운 이물질이 고착 또는 검사면이 매우 거친 경우, 검사가 곤란하고 물이나 기름 같은 초음파 접촉매질이 필요하기 때문에 검사 속도가 매우 늦어지고 번잡해진다. 따라서 저장용기의 특성을 고려할 때 속도가 빠른 검사방법에 의해서 확인된 부식을 정밀검사를 수행할 경우를 제외한 전체적인 부식의 상태를 평가하는데는 기술적, 경제적, 시간적 한계가 따른다. 또한 음향방출시험의 경우, 탱크가 가동중이라도 적용할 수 있는 반면 이미 누출이 있는 후에 알아내는 방법으로 누출의 가능성이 있는 부식을 찾아내지는 못한다.

따라서 이러한 요구조건을 충족시키고 탱크의 잔여수명, 교체시기를 추정하기 위해서는 기존의 초음파탐상시험이나 음향방출시험의 단점을 극복할 수 있는 신속하고, 경제성 있는 적절한 기술이 개발되어야 할 것이다.^[1-4] 누설자속법(Magnetic Flux Leakage Technique : MFL Technique)은 석유화학 분야에서 사용되는 파이프, 튜브, 케이싱 등의 검사에서 약 25년 이상 폭넓게 사용되어 왔고, 저장탱크의 바닥면에 대한 부식을 검출할 수 있다는 것이 증명된 1980년대 후반기부터 저장용 탱크의 부식검사에 이용되어 왔다. 본 고에서는 MFL법을 이용한 대

형 저장탱크의 부식측정 기술과 시스템 개발을 위하여 MFL법의 비파괴 시험기술 개발 및 측정 기술에 대하여 논하고자 한다.

2. 기술개발 현황

2.1 국 외

탱크 바닥검사에 대한 MFL법의 응용은 1980년대 후반 미국과 유럽에서 개발되었다. 합동연구 결과 1989년 MFL 탱크 바닥검사 시스템의 원형인 전자석을 이용한 장비가 개발되었다. 그 후 상업적인 목적으로 MFL법을 이용한 탱크 바닥검사기가 개발되었다. 이 시기에 영구자석을 이용한 시스템이 유럽에서 개발되었다.

MFL법은 자장에 의해서 자화된 강자성 물질의 불연속부에서 정상적인 플럭스 유형으로부터 비정상적인 플럭스 유형을 검출하는 시험법으로 튜브와 와이어 검사에 오랫동안 사용되어 왔다.^[5-7] 예를 들어 검사되는 재질의 보자력(coercivity)의 2~3배에 해당하는 낮은 자화력으로는 검사표면의 부식을 검출하기에 충분하며, 표면하 또는 반대면의 부식을 검출하기 위해서는 검사재질을 자기적으로 완전히 포화시켜야 한다. 즉 바닥 양면을 검사하기 위해서는 포화자장 근처까지 자장을 걸어주어야 하며, 이때 부식 부로부터 발생되는 MFL을 검출하는 것이다. 현재 MFL법을 이용하여 저장탱크의 부식을 측정하는 기술 및 시스템 제작능력을 보유하고 있는 곳은 다음과 같다.

- Magnetic Analysis Corp. : 미국
- AEA Technology Plc. : 영국
- MFE Enterprises Inc. : 미국
- Colonial Pipeline Company : 미국

미국의 Magnetic Analysis Corp.^[8]의 경우 MFL법을 이용한 철판의 비파괴적 검사에 관해

이미 1931년에 특허를 받은바 있고, 1956년에 와이어로프의 단선을 검사하기 위한 장비를 처음으로 개발했다. 그 후 ROTOFLEX로 명명된 파이프 검사장비를 개발하였고, 이 시스템에 이어서 25ft/min의 검사속도를 갖는 탱크 바닥검사 장비를 개발하였다.

AEA Technology Plc.는 1990년 이래 MFL법을 이용한 탱크 바닥검사 장비를 30대 이상 제작하였다. 현재 검사가능 면적을 최대화하기 위해 탐상 헤드부의 개선, 몸체의 경량화, 장비 조작을 간편화한 터치스크린의 채용 등 사양이 향상된 장비를 개발하여 유류 저장탱크의 검사에 사용하고 있다.

MFE Enterprises^[9-10]는 MFL법을 이용한 비파괴검사를 주업무로 영구자석과 코일센서를 이용한 탱크 바닥검사 장비를 개발하고, 최종 사용자에게 대한 교육 및 훈련을 수행하고 있다. MFL 비파괴시험의 실무에서 15년 이상의 경험으로 용역업무를 수행하고 있고, 실제조건에서 발생하는 문제점을 보완하여 연구개발에 수용하고 있다.

Colonial 파이프라인 회사^[11]는 5,200 마일의 파이프라인과 300개의 지상 저장탱크를 가지고 있다. 이 회사는 API 653^[12]에 따른 검사를 수행하기 위한 효율적이고 정확한 시스템을 개발하여 년당 60~70개의 탱크에 대하여 검사를 수행하고 있다. 그림 1은 현재 저장용 탱크의 바닥검사

를 위해서 상품화된 시스템을 보여주고 있다.

2.2 국 내

최근 신 비파괴기술의 개발을 위한 많은 연구가 관련분야에서 활발히 진행되고 있다. MFL법에 관련한 연구가 그 일 예로 산·학 공동연구에 의한 실험실적 연구가 발표되고 있고,^[13] 또한 상품화에 근접한 기술이 출품되고 있다.^[14-15] 그러나 MFL법을 이용한 새로운 비파괴시험의 실용화 연구중에서 컴퓨터 내장형 시스템을 적용하여 부식을 측정하는 기술의 연구사례는 없다. 한국기계연구원 비파괴평가그룹에서는 1997년과 1999년 영국의 AEA Technology Plc.와 합작으로 여수 화학공단내의 암모니아 저장탱크 누설 검사를 성공적으로 완수한바 있으며,^[16] 현재 국내 자체 기술보유 및 시스템 개발을 목표로 연구가 수행중에 있다. 그림 2는 금년 검사가 수행된 저장탱크의 바닥면을 도시한 것으로 전형적인 저장용 탱크의 모습을 보여주고 있다. 각 플레이트의 수치는 5개소를 임의 선택하여 측정된 초음파 두께측정의 평균치를 나타낸 것으로, 모두 공칭두께를 상회하고 있다. 그러나 이미 서술한 바와 같이 국부적인 초음파 두께측정이 전체적인 탱크의 건전성을 대표하지 못한다는 사실을 인식해야 한다.

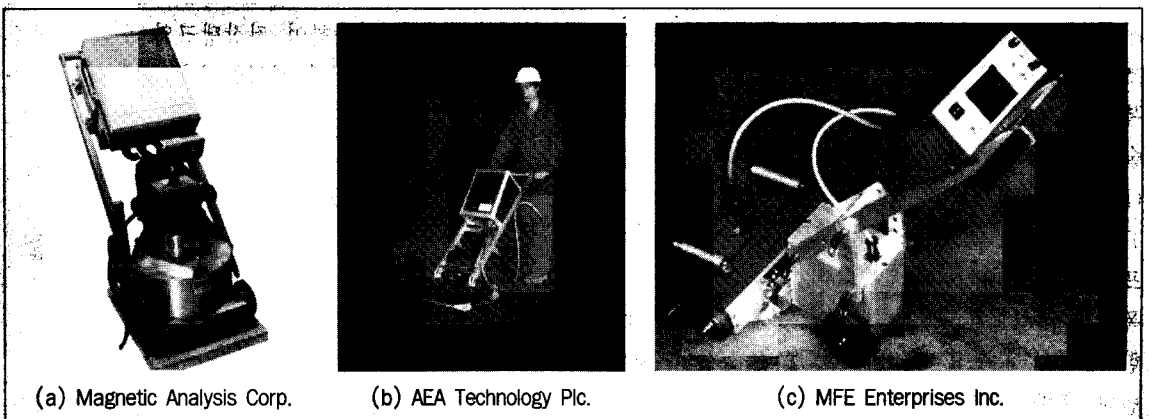


그림 1. Tank bottom tester using MFL Technique

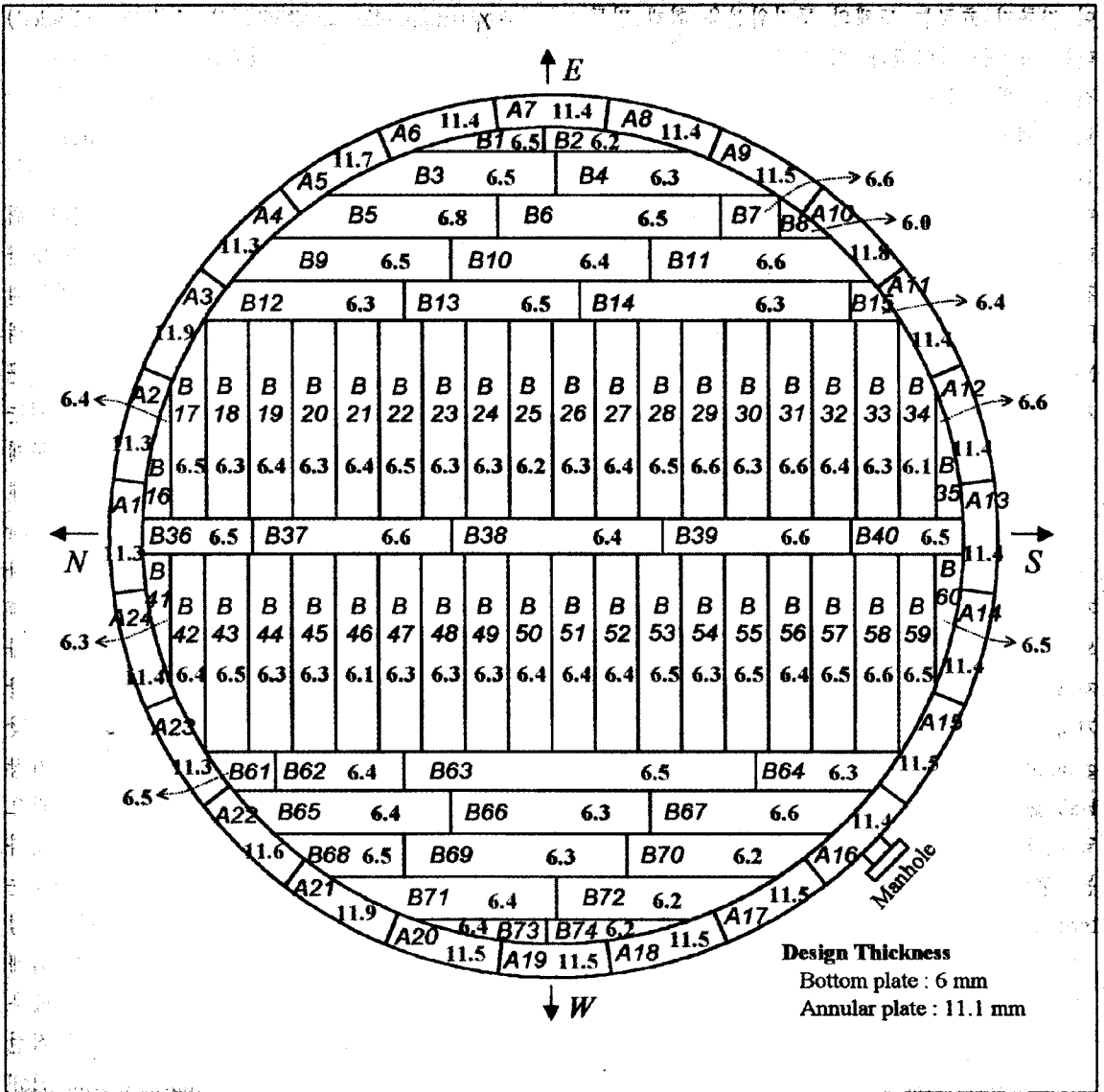


그림 2. Result of ultrasonic thickness measurement for tank bottom plate

3. MFL 측정기술

3.1 Hall 효과

그리스의 테살리아 지방에서 천연자석 (Lodestone)이 발견된 이래 자석에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 1825년 전자석이 최초로 제작되었고, 이로부터 20년 후에 자석의 성질에

관한 과학적 논문이 출판되었다. 이때부터 전자석과 영구자석이 이론과 실용에 응용되기 시작하였다.

1879년 Edwin Herbert Hall은 그의 박사학위를 위한 논문 연구 중에 "Hall Effect"를 발견하였다. Dr. Hall은 자석주위에서 전류가 흐르는 코일이 영향을 받는지에 대하여 의문을 가지고 있었고 수 많은 실험과 실패를 거듭한 끝에, 자장

이 전류가 흐르는 도체의 등전위선을 휘게 만든다는 사실을 알아냈다. 이 효과는 도체에 흐르는 전류의 방향에 수직한 전압(Hall Voltage, V_H)으로 관찰되었다. Hall은 유리판위에 금박을 놓고 실험을 수행하였고, 다양한 물질을 가지고 실험한 결과, 1880년 이러한 현상에 대한 상세한 실험을 가지고 그의 박사학위 논문을 완성했다. 그 결과를 American Journal of Science와 Philosophical Magazine에 발표했고 그 성과는 Michael Faraday 이후 가장 큰 연구업적으로 평가받았다.

3.2 Hall Generator

Hall 전압이 매우 낮기 때문에 금세기 후반까지 Hall 효과는 실험실에서 많은 연구의 대상이 되었다. 반도체 기술의 개발로 초기에 사용되던 재질을 이용하여 보다 높은 전압을 얻는 것이 가능하게 되었다. 따라서 반도체 기술은 Hall generator의 실용화와 생산을 추진하게 하였다. Hall generator^[17]는 입력전류, I_c 와 자기 플럭스 밀도, B , B 와 Hall generator 면의 $\sin\theta$ 에 비례하는 출력전압, V_H 을 발생시킬 수 있는 four-terminal solid-state device이다.

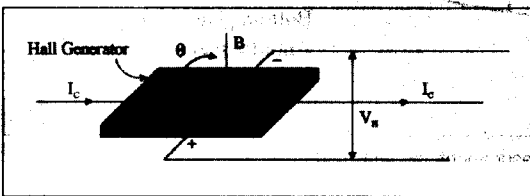


그림 3. Schematic representation illustrating Hall generator

$$V_H = K_{HOC} I_c B \sin\theta \text{ or } \sin\theta = 1 (\text{i.e., } \theta = 90^\circ)$$

$$V_H = K_{HOC} I_c B \text{ or } V_H = \gamma_B B$$

where,

V_H = Hall output voltage, mV

$K_{HOC} = \gamma_{IB}$ (open circuit product sensitivity constant), mV/mA kG

γ_B = magnetic sensitivity (loaded or unloaded)

at a specified control current, mV/kG

I_c = control current, mA (ac or dc)

B = magnetic flux density, kG (ac or dc)

Hall generator로부터 고전압의 출력을 얻기 위해서는 높은 Hall 계수, R_H 를 가져야 한다. 또한 출력이 Hall generator element를 지나는 전류밀도에 비례하기 때문에 저항도 과도한 가열을 피하기 위해서 가능한 낮아야 한다. 잡음출력은 근본적으로 열이기 때문에 낮은 신호가 사용되는 디바이스에서는 낮은 저항이 매우 중요한 문제로, Hall generator로 사용되는 반도체 일부의 재질은 InSb, InAs, GaAs 등이다. GaAs generator는 고출력과 고저항을 갖고 출력전압의 잡음과 온도계수는 $-0.1\%/^{\circ}\text{C}$ 보다 작다. InSb는 고출력과 낮은 저항을 갖지만 출력전압의 온도계수가 약 $-1\%/^{\circ}\text{C}$ 이다. InAs는 InSb보다는 출력이 작지만 온도계수가 $-0.1\%/^{\circ}\text{C}$ 이하이고, 저항도 낮다. 따라서 InAs가 대부분의 응용에 있어서 가장 적당한 재질로 사용된다. InAs는 칩전된 박막으로도 만들어지며, bulk-material로 만들어진 것과 똑같이 낮은 저항과 높은 활동성을 보여주지는 않지만, 많은 응용분야에서 사용될 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점 중에는 출력전압에 비해 낮은 전류가 요구되는 것과 가격이 매우 낮다는 점을 포함하고 있다. 그러나 우수한 직선성과 안정성이 요구된다면 bulk-material Hall generator를 사용하는 것이 좋다. Hall element의 재질로서 초기에는 bismuth와 germanium이 사용되었으나, 온도에 대해서 불안정한 특성 때문에 사용이 제한되어졌다. 과거 10년동안 반도체 재질에 대한 연구결과 InAs가 Hall generator로 우수하다는 것이 증명되었다.

현재 Hall generator에 적용되는 전류는 20~200mA 정도이다. 일반적으로 element의 자체가 열에 기인된 측정오차를 최소화하기 위하여 150mA 이하의 전류를 유지하는 것이 바람직하며

전형적인 Hall element는 100mA의 전류가 적용될 때 10kG 장에서 100mV의 Hall 전압을 가질 수 있다. Hall generator의 감지면적은 $1 \times 10^{-5} \text{m}^2$ 또는 그 이하로 응용 예는 다음과 같다.^[18]

- Magnetic Card Readers
- Proximity Sensors
- Rotary Speed Sensors
- Watt Measurement
- Multipliers
- Magnetic Field Measurements
- Electrical Power Measurements
- Current Sensors
- Brushless dc Motors
- Compasses
- Gaussmeters
- Watt-hour Meters
- Permanent Magnet Measurements
- Air Gap Measurements
- Magnetic Circuit Design
- Flux Leakage Measurements
- Nondestructive Memory Readers
- Linear/Angular Transducers
- Magnetic Tape Heads
- Guidance Systems
- Ignition Systems

Hall generator는 수 많은 응용에 적절하게 모양과 크기에 있어서 다양성을 가지고 있다. 두 개의 기본적인 형태는 transverse 형과 axial 형으로 transverse 형은 자장이 좁은 공간에서 측정되어야 할 때 사용되고, axial 형은 튜브를 전파하는 파나 솔레노이드와 같이 자장이 축에 평행할 때 사용된다. 표준 transverse probe는 두께가 0.006 인치, axial probe는 지름이 0.063 인치가 이용되며, 정확하게 플럭스 밀도를 측정하기 위해서 Hall plate의 면적은 측정되는 자장의 단면보다 작아야 한다. 출력전압은 플럭스 밀도

에 비례하지만, Hall plate는 전 면적에 대해서 동일한 감도를 갖는 것이 아니기 때문에 고분해능이 요구되는 경우, Hall plate는 가능한 작은 것이 좋다. 실제적으로 면적 0.010 인치 정도가 실용되고 있다. 다소 큰 Hall plate는 만들기 쉽기 때문에 가격이 싸며, 더 많은 출력전압을 발생시킬 수 있다. 상업화된 Hall generator의 유형 및 사양을 그림 4와 표 1에 각각 나타내었다.

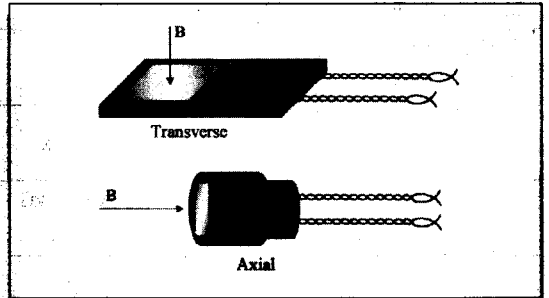


그림 4. The two basic types of Hall generators

3.3 MFL 측정원리 및 시스템

시험대상체를 자기적으로 포화시키기 위해서 브리지(bridge)가 필요하다. 따라서 브리지를 이용해서 시험대상체를 자화시킬 경우 두께의 감소는 MFL을 발생시키게 되고, 센서는 그림 5와 같이 브리지 사이에서 MFL을 검출한다. MFL 측정을 위한 실용적 시스템의 기본개념은 그림 6과 같다. 시스템은 저장용 탱크의 맨홀(~18 인치)로 들어갈 수 있는 크기로 제작되어야 하며, 무게 및 강도를 고려하여 알루미늄을, 부식방지를 위해서는 스테인리스강이 사용될 수 있다. 기본적인 구성은 다음과 같다.^[19]

- Handle Assembly - 인터페이스, 데이터 인식, 신호처리, 결과표시를 제어하는 부분이다.
- Scan Bar Assembly - 두 줄로 배열된 영구 자석 또는 전자석과 그 사이에 위치한 센서로 구성된다. 일부 센서는 gap field 및 온도 센서, 멀티플렉스 회로, LED 표시등이다.
- Body Assembly - 검사에 있어서 용이성과

표 1. Example of electrical specifications for Hall generator in general purpose

Models	BH-200	BH-201	BH-202	BH-203	BH-204
Rated control current, I_c	150mA	100mA	100mA	100mA	100mA
Maximum continuous control current, I_{cmax} (in 25°C static air)	250mA	150mA	150mA	250mA	150mA
Open circuit magnetic sensitivity, γ_B (at rated I_c , $B=1.0kG$)	15mV/kG $\pm 25\%$	12mV/kG $\pm 25\%$	10mV/kG $\pm 25\%$	10mV/kG $\pm 25\%$	11mV/kG $\pm 25\%$
Misalignment voltage, V_M ($B=0$, $I_c=100mA$)	100 μ Vmax	250 μ Vmax	100 μ Vmax	100 μ Vmax	200 μ Vmax
Inductive null constant, A (see note)	.003 cm ²	.01 cm ²	.002 cm ²	.003 cm ²	.002 cm ²
Hall output load resistance, R_{in} (for optimum linearity 0 to 10kG)	15 Ω^*	15 Ω^*	15 Ω^*	15 Ω^*	15 Ω^*
Linearity error with R_{in} termination (0 to 10kG)	1% max	1.5% max	1% max	1% max	1.5% max
Product sensitivity, γ_B ($B=10kG$)	0.10V/A · kG $\pm 25\%$	0.12V/A · kG $\pm 25\%$	0.10V/A · kG $\pm 25\%$	0.10V/A · kG $\pm 25\%$	0.11V/A · kG $\pm 25\%$
Input resistance, R_{in} (including leads)	2.0 Ω^*	2.3 Ω^*	2.6 Ω^*	1.9 Ω^*	2.7 Ω^*
Output resistance, R_{out} (including leads)	1.7 Ω^*	1.8 Ω^*	1.8 Ω^*	1.3 Ω^*	1.9 Ω^*
Mean temperature coefficient of V_{HOC}^{**} (-10°C to +80°C)	-0.08%/°C*	-0.08%/°C*	-0.08%/°C*	-0.08%/°C*	-0.08%/°C*
Mean temperature coefficient of resistance (-10°C to +80°C)	0.15%/°C*	0.15%/°C*	0.15%/°C*	0.15%/°C*	0.15%/°C*
Reversibility error of V_{HOC} (0 to 10kG)	1% max	3% max	1% max	1% max	1% max
Mean temperature coefficient of misalignment voltage, ($I_c=100mA$), D_T	1 μ V/°Cmax	1 μ V/°Cmax	1 μ V/°Cmax	1 μ V/°Cmax	1 μ V/°Cmax
Storage temperature range	-40°C to +105°C	0.0°C to +50°C	-40°C to +105°C	-40°C to +105°C	-40°C to +105°C
Operating temperature range (at rated I_c)	-40°C to +100°C	0.0°C to +50°C	-40°C to +100°C	-40°C to +100°C	-40°C to +100°C

* Approximate

V_{ind} =volts, A=cm², B=gauss, t=sec

안전성을 위한 부분이다. 탐상에 필요한 전기모터와 압축공기 등을 부착시킬 수 있다.

그러나 가장 중요한 것은 MFL 시험장비가 현장에서 발생하는 환경적, 실제적인 문제들을 고려하여 사용되도록 개발되는 것이다. 실험실적으로 개발된 장비는 현장조건에서는 중요한 제약에 부딪치게 되며, 현장조건에 적용하기 위해서

는 브리지와 센서의 선택에 있어서 다음과 같은 문제가 고려되어야 한다.^[20]

① 브리지(영구자석과 전자석)

강력한 영구자석이 현재 사용되고 있고, 또한 현장적용으로 매우 적절하다. 영구자석은 시험체를 자화시키는데 있어서 요구되는 자속을 훨씬

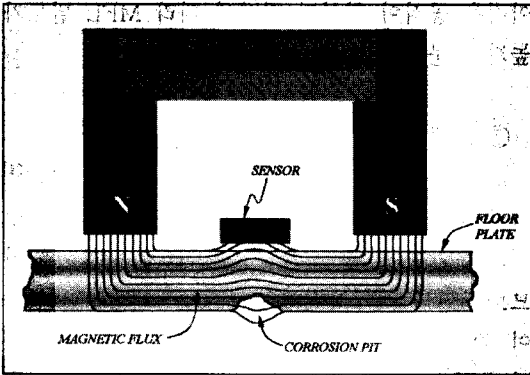


그림 5. Magnetic flux leakage

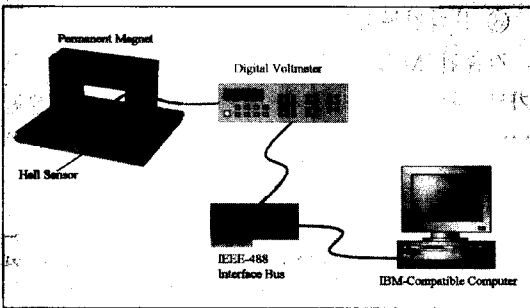


그림 6. Basic configuration of magnetic flux leakage measurement system

잘 발생시킬 수 있다. 전자석은 자속을 쉽게 조절할 수 있고, 필요에 따라 자속을 제거할 수 있다는 장점이 있으나 부피가 너무 크며 무거운 단점이 있다. 영구자석의 경우 주기적으로 청소를 해주어야 감도를 유지할 수 있다.

② 센서의 형태

센서는 코일과 Hall 센서가 있으며 자속에 반응하고 응답하는 방식에 있어서 기본적인 차이가 있다. 코일은 자장이 존재할 때 Faraday's Law에 따르는 수동적인 기구이다. 코일이 자장을 지나가면 전압이 코일에 발생되며 전압의 발생정도는 감긴 코일수와 MFL의 변화량에 의존한다. 따라서 코일에 의해 얻어진 신호는 검사속도에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. Hall 센서는 자장을 지나갈 때 Hall 센서 회로의 전압이 자속밀도의 절대값에 따라 변한다. Hall 센서가

코일에 비해 감도가 훨씬 높다는 것은 당연하나 표면조건이 좋지 않을 때, 안정성과 신뢰성면에서 코일이 현장조건에 훨씬 더 적절하다.

3.4 MFL 측정의 제약요소들

임의의 주어진 판두께에서 플럭스 밀도나 포화정도는 전체 코일의 암페어-감긴회수, 자극과 검사바닥과의 거리, 자석의 크기, 자극면의 크기 등 수 많은 요소에 관계된다. Lift-off나 판두께가 증가함에 따라 플럭스 밀도는 감소할 것이다. 이것은 MFL에 영향을 미치고 판재의 플럭스양과 불연속 깊이에 직접적으로 관계된다(불연속의 폭과 지름이 MFL의 진폭에 미치는 영향은 불연속의 깊이가 MFL의 진폭에 미치는 영향에 비해 작다). 적절히 포화자화된 판재에서 불연속이 깊을수록 결합신호는 더 커진다. 그러나 적절한 포화는 강판 및 코팅두께에 의해 영향을 받는다. 강판과 코팅두께의 변화에도 불구하고 상대적으로 안정된 신호진폭을 유지하기 위해서는 강판을 포화자장 근처에 유지시킬 수 있는 충분한 자력의 사용이 요구된다. 일반적으로 MFL 측정에 있어서 제약요소는 다음과 같다.^[21]

① 장비의 자화능

검사가 수행되기 위해서는 검사대상체를 자기적으로 포화시켜야 하며 필요한 포화자기량은 시험체의 두께와 코팅두께에 의해서 결정된다. 만약 장비가 포화자장을 발생시킬 능력이 없으면 MFL이 발생되지 못하고 결과적으로 결합의 검출은 불가능하다.

② 표면조건

표면조건은 검사의 감도에 지대한 영향을 미친다. 표면이 거칠고 청결하지 못하면 잡음신호의 발생이 심하고 결과적으로 감도는 떨어지게 된다. 따라서 실신호는 잡음신호에 의해서 검출능이 떨어지게 된다.

③ 곡률

대부분 바닥면은 평평하지 않다. 바닥면의 곡률 정도는 검사의 신뢰성에 매우 큰 영향을 미친다. 바닥면이 곡률은 브리지와 센서의 lift-off를 증가시키게 되고 감도는 상대적으로 떨어지게 된다. 이때 탐상방향을 바꾸거나 작은 헤드들 사용하여 어느 정도 개선할 수 있다.

④ 재질의 성질

재질자체가 검사에 영향을 미칠 수 있다. 대부분의 바닥판재가 MFL법을 적용하는데 매우 좋은 저탄소강으로 제작되었지만 고강도 강재의 경우, 더 높은 포화자장이 필요하다. 이것은 검사로 인해서 재질이 열화되는 원인이 될 수 있다. 재질이 수소취성을 받은 경우, 잡음신호를 발생시키게 되고 요구되는 감도를 얻기 위해서 포화자장을 얻는 것이 불가능하다. 그리고 압연 방향이 같은 크기의 부식부에서 발생하는 진폭에 영향을 미칠 수 있다. 결론적으로 잡음 발생 정도가 재질의 성질이나 제조방법에 따라서 변할 수 있다는 것을 주목할 필요가 있다.

⑤ 접근성

실제로 MFL법을 이용하여 바닥면 전체를 검사할 수는 없다. 대부분의 저장탱크는 다른 구조물이 부착되어 있고 겹쳐진 부분을 포함하고 있다. 또한 shell 곡률 부분의 접근은 불가능하기 때문에 검사를 100% 하는것은 불가능한 일이다. 작은 탐상 헤드를 사용하여 어느 정도 검사를 수행할 수는 있어도 보편적인 탐상기를 이용하여 접근할 수 없는 많은 부분이 있다.

⑥ 바닥면 상·하부 결함 분류

MFL 자체만 가지고는 검사면 상·하부의 부식을 구분할 수 없다. 그러나 육안상으로 검증이 가능하기 때문에 큰 문제가 되지는 않는다. 일반적으로 같은 크기의 공식에서 발생된 신호일 때 상부의 신호는 하부의 신호에 비해 상당히 작다.

이것은 공식이 형성된 깊이에 따라 MFL 밀도가 높기 때문이다.^[22-23]

⑦ 코팅두께

코팅두께는 감도에 밀접한 영향을 미친다.^[24] 따라서 같은 두께의 철판에서 코팅된 철판은 코팅되지 않은 철판에 비해 감도가 떨어진다. 그러므로 검사를 수행할 때는 동일한 시편을 제작하여 검출감도를 측정하기 위한 실험을 수행하는 것이 좋다.

⑧ 문턱진폭값의 설정

검출된 MFL값은 결함크기에 대한 정량적 크기로 판단할 수는 없다. 부식부에 의해서 발생된 MFL은 단순히 잔존두께에 대한 함수가 아니라 전체적인 체적손실에 대한 함수이다. 이것은 단순히 결함크기가 크게 다를 때 조차도 체적손실에 따라서 신호의 진폭이 같게 될 수 있다는 것이다. 따라서 일반적으로 문턱값을 적용하는 장비의 결과값은 잔존두께에 대한 신뢰성 있는 정보가 아니다. 따라서 문턱값을 설정해서 출력된 결함부위는 부가적인 정보를 위한 검사로 검증되어야 한다.

⑨ MFL의 부식매핑

벽두께의 측정을 위해서 시장에서 판매되는 오늘날의 대부분의 장비들은 출력된 결과를 컴퓨터를 이용하여 매핑하는 방식을 취하고 있다. 그러나 MFL법에 있어서는 이러한 매핑은 부적합한 방식이다. 그 이유는 첫째, MFL 물리적 특성 자체가 잔존두께에 대한 정량화가 불가능한 방법이고, 둘째 부식부로부터의 신호와 다른 자기적 결함에 의한 신호를 구분할 수 없다는 것이다. 따라서 MFL에 의한 신호의 진폭을 이용하여 매핑을 하는 방법은 실제의 결과와는 차이가 있을 수 있다.

⑩ 검사자의 자격

현재 ASNT에는 「MFL 기술에 관한 자격 인 증과정」이 개설되어 있지 않다. 그러나 검사자는 최소한의 장비운용 능력과 MFL 기술을 이해할 수 있는 능력을 보유하고 있어야 한다. 장비의 성능이 아무리 좋다고 하더라도 검사자의 능력이 배양되어 있지 않으면 검사결과에 대한 신뢰성을 보장할 수 없다.

① 시험, 검사비의 적합성

검사가 요구되는 탱크는 상태에 따라서 검사 조건이 완전히 다르다. 바닥이 평평하고 깨끗한 경우와, 전반적으로 부식이 진행되고 있어서 표면이 거칠 경우의 검사는 검사에 요구되는 시간이나 검사결과 해석에 있어서 매우 큰 차이가 있다. 그러므로 검사조건이 매우 열악한 경우의 시험, 검사비는 일반적으로 더 비쌀 수 있으나 실제 이러한 결과를 시험, 검사비로 정량화 하기는 힘들다. 따라서 검사 의뢰자측이 이러한 상황을 이해하지 못할 경우 수탁계약자에게 부가적인 압박을 주게 되며, 추가적인 검증실험 등이 배제되게 된다. 이것은 결국 중요한 결함을 검출할 가능성을 떨어뜨리고 탱크가 누설되는 상황을 발생시키게 된다.

4. 결 론

석유화학 플랜트에는 수 많은 대형 저장탱크 설비가 부식환경에 노출되어 있고, 이러한 저장 탱크는 수 십년동안 방치, 사용중에 있으며 사고의 위험성이 상존하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 탱크의 안전성을 평가하는 방법으로 수백개의 저장탱크가 MFL법을 적용한 신뢰성있는 장비를 이용하여 성공적으로 검사되고 있다. 이것은 이 기술의 제약점을 이미 알고 있는 상태에서 측정결과를 해석하기 때문이다. 결론적으로 저장 탱크의 바닥검사를 위한 기술로 MFL법이 신뢰성과 경제성면에서 새로운 대안을 제시하고 있으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 주어진 환경에서 MFL법이 항상 기대되는 결과를 주는 것은 아니다.
- (2) 장비의 개발에 있어서 환경적, 물리적 제약조건이 고려되어야 한다.
- (3) MFL법은 저장 탱크의 바닥평가에 있어서 신뢰성과 경제성을 충족시킨다.
- (4) MFL법에 의해 부식이 검출된 부분은 초음파를 적용하여 정확성을 기할 수 있다.
- (5) MFL 신호의 진폭은 잔존두께에 대한 신뢰성있는 정보가 아니다.
- (6) 저장탱크의 검사에 있어서 검사자의 훈련과 자격요건이 반드시 제고되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] M. J. Bales, Corrosion/Erosion Detection in Steel Storage Vessels using Pulsed Infrared Imaging, ASNT's International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology (ICPIIT) IV Topical Conference, June 19-22, 1995, pp. 242-244.
- [2] T. Somers and K. F. Schmidt, Onstream Inspection of Above Ground Storage Tanks, ASNT's International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology (ICPIIT) IV Topical Conference, June 19-22, 1995, pp. 245-248.
- [3] J. E. Rusing, Improved Inspection Technology for Above Ground Storage Tank Bottoms, ASNT's International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology (ICPIIT) III Topical Conference, June 14-16, 1993, p 140.
- [4] H. Salzburger and G. Hüschen, Detection of Corrosion in Bottom Plates of Gas and Oil Tanks using Guided Ultrasonic Waves and Electromagnetic Ultrasonic(EMAT) Transducers, QNet Internet Home

- Page(URL : www.ndt.net/article/qnet/qnet.htm), July 1998.
- [5] M. J. Bergander, Magnetic Flux Leakage Examination of Petro/Chemical Heat Exchanger Tubing, ASNT's International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology (ICPIIT) III Topical Conference, June 14-16, 1993, pp. 95-102.
- [6] R. K. Stanley, An Overview of the Nondestructive Inspection Technique for Coiled Tubing and Pipe, Materials Evaluation, Nov. 1996.
- [7] J. B. Nestleroth, T. A. Bubenik and G. L. Ridderbusch, A Review of Magnetic Flux Leakage Technology for the In-Line Inspection of Gas Transmission Lines, Proceeding International Conference on Pipeline Inspection, June 1991, paper IV-5.
- [8] David Bauer and Robert Brooks, New Flux Leakage System for Inspecting Tank Bottoms for Potential Leakers, International Petroleum Industry Inspection Technology II Topical Conference Paper Summaries, June 1991, pp. 48-52.
- [9] Magnetic Flux Leakage Equipment : The MFE 2412 Tank Floor Scanning System, MFE Enterprises Inc. Internet Home Page(URL : www.mfescan.com/mfe2412.htm), 1999.
- [10] A Guide to the Preparation of User Specific Procedures, MFE Enterprises Inc. Internet Home Page(URL : www.mfescan.com/procedure.htm), 1999.
- [11] Dennis Johnston, Aboveground Storage Tank Floor Inspection Using Magnetic Flux Leakage, Materials Performance, Oct. 1992, pp. 36-39.
- [12] Tank Inspection, Repair, Alternation, and Reconstruction, API Standard 653, American Petroleum Institute, 1992.
- [13] 주광태 외, 선형 자장내 홀센서에 의한 누설자속 측정, 한국비파괴검사학회 춘계 학술 발표회, 1998, pp. 373-381.
- [14] 임중수, 김구화, 이성익, 누설자속법을 이용한 박강판의 비금속개재물탐상기 개발, RIST J. R&D, Vol. 9, No. 2, 1995.
- [15] G. H. Kim and Z. S. Lim, Magnetic Flux Leakage Inspection of Moving Thin Steel Sheet, Fourth Far East Conference on NDT (FENDT '97), Oct. 1997, pp. 387-395.
- [16] 조경식 외, 암모니아 저장탱크 TK-502의 노후도 진단, 한국기계연구원 보고서 : BSIC62-2369·C, 1999.
- [17] Hall Generators, F. W. Bell Technologies Inc., 1999, pp. 1-9.
- [18] D. E. Bray and D. McBride, Nondestructive Testing Technique, John Wiley & Sons Inc., 1992, pp. 421-447.
- [19] B. W. Maxfield, P. C. Fitzgerald, A Quantitative Magnetic Flux Leakage Instrument and Its Application to Tank Bottom Corrosion Assessment, ASNT's International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology (ICPIIT) IV Topical Conference, June 19-22, 1995, pp. 237-241.
- [20] D. M. Amos, The Truth about Magnetic Flux Leakage as Applied to Tank Floor Inspections, ASNT's International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology (ICPIIT) IV Topical Conference, June 19-22, 1995, pp. 232-236.
- [21] D. M. Amos, Factors affecting the reliability of Magnetic Flux Leakage Surveys of Above Ground Storage Tank Floors, MFE Enterprises Inc. Internet

Home Page(URL : www.mfescan.com/limits.htm), 1999.

- [22] Zhongqing You and David Bauer, Combining Eddy Current and Magnetic Flux Leakage for Tank Floor Inspection, *Materials Evaluation*, Vol. 52, No. 7, July 1994, pp. 816-818.
- [23] Zhongqing You and David Bauer, A New Technique for Inspection Top and Bottom Sides of Tank Floors, *ASNT's International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology (ICPIIT) IV Topical Conference*, June 19-22, 1995, pp. 227-231.
- [24] J. L. Mackin, The Effect of Coating Thickness on Magnetic Particle Inspection, *ASNT's International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology (ICPIIT) III Topical Conference*, June 14-16, 1993, pp. 141-145.