

MFL 측정과 산업적 활용



원 순 호

(KIMM 공인시험평가부)

- '93 한양대학교 물리학과(학사)
- '95 한양대학교 물리학과(석사)
- '95 한국기계연구원 선임연구원



조 경 식

(KIMM 공인시험평가부)

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

1. 서 론

MFL(Magnetic Flux Leakage)법을 이용한 비파괴시험 기술은 석유화학 분야에서 사용되는 파이프, 튜브, 케이싱 및 와이어 등의 검사에서 약 25년 이상 폭넓게 사용되어 왔다. 이 방법은 자기장에 의해서 자화된 강자성체의 불연속부에서 정상적인 플럭스 유형으로부터 비정상적인 플럭스 유형을 검출하는 것으로, 주로 부식, 균열, 공식 및 기타의 자기적 abnormality를 검출한다.^[1-3]

MFL법의 가장 큰 장점은 경제성에 있다. 다른 비파괴시험법에 비해 속도가 빠르고 비용이 적게 드는 것이 그 이유이다. 일반적으로 표면의 불연속 검출에 있어서는 검사되는 재질 보자력의 2~3배에 해당하는 낮은 자화력으로도 가능하며, 표면하 또는 반대면의 불연속 검출이 목적이라면 검출가능한 MFL을 발생시키기 위해서 시험체를 충분히 자화시켜야 한다. 시험 대상체를 자기적으로 포화시키기 위해서는 bridge를 사용하고, 결합부로부터의 MFL을 bridge 사이에 있는 센서가 검출하게 된다. 원리적으로 자력의 세기, air gap, 자석의 크기, 자극면의 크기 등이 시험체내 플럭스 밀도와 불연속깊이에 직접적으로 연관되어 MFL에 영향을 미치기 때문에 상대적으로 안정된 신호진폭을 유지하기 위해서는 충분한 자력을 적용해야 한다. 적절한 자장의 세기, 플럭스의 거동 등 적용결과를 예측하고자 할 경우는 상용적으로 활용되는 유한요소 프로그램을 사용할 수 있다. 물론 신뢰성 있는 정보를 얻기 위해서는 많은 정보가 필요하고, 복잡한 형태의 불연

속을 가정한 경우는 실제로 해석상의 어려움이 따른다.^[4]

그러나 MFL법은 기존의 방법으로 실용화할 수 없었던 부분을 만족스럽게 해결할 수 있는 대안을 제시하였다. 특히 자동화가 가능한 방법으로 시험, 검사가 요구되는 산업현장에 설치함으로써 원가절감 및 제품의 신뢰성 향상에 기여할 수 있다. 본 고에서는 MFL법과 관련한 국내의 연구가 미진한 현실에서 연구개발에 대한 분위기를 제고하고자 관련기술에 대한 외국의 활용사례를 소개하고자 한다. 또한 MFL법의 활용이 외국에서도 제한적으로 적용되고 있고 기술적으로 해결할 부분이 많다는 점에서 국내의 연구개발 및 활용에 대한 제안이 있어야 할 것이다.

2. MFL의 해석

2.1 자기쌍극자 모델

자극 m 으로부터 거리 r 만큼 떨어진 점 P 에 있어서의 자계 H 는 다음 식 (1)로 주어진다.

$$H = \frac{m}{4\pi\mu_0} \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

따라서 흠형태의 결함은 깊이 d , 폭 $2a$ 및 길이는 표면에 수직한 방향으로 무한히 길다고 가정하면 접선성분 H_x 와 법선성분 H_z 는 다음 식 (2)로 표시된다.

$$H_x = \frac{m}{2\pi\mu_0} \left\{ \tan^{-1} \frac{d(x+a)}{(x+a)^2 + z(z+d)} - \tan^{-1} \frac{d(x-a)}{(x-a)^2 + z(z+d)} \right\}$$

$$H_z = \frac{m}{4\pi\mu_0} \ln \frac{\{(x+a)^2 + (z+d)^2\} \{(x-a)^2 + z^2\}}{\{(x+a)^2 + z^2\} \{(x-a)^2 + (z+d)^2\}} \quad (2)$$

그리고 결함의 형상, 치수에 대한 MFL의 관계는 다음과 같다.^[5]

- ① 결함깊이와 MFL : 결함깊이가 증가함에 따라 MFL이 증가한다. 이것은 MFL에 기여하

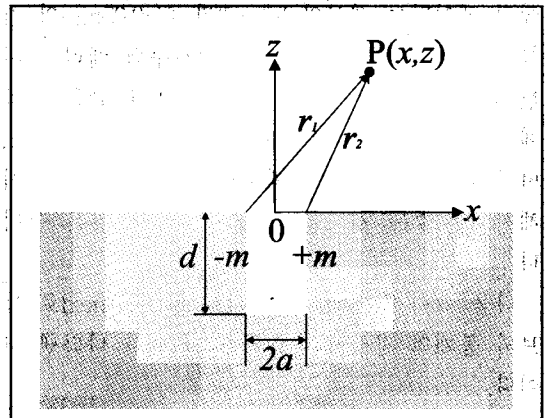


그림 1. Model of magnetic dipole

는 결함부의 자극의 깊이가 증가함에 따라 크게 되기 때문이다.

- ② 결함폭과 MFL : 결함폭이 좁은 경우의 MFL은 결함폭이 증가함에 따라 증가하지만, 결함폭이 큰 경우에 있어서는 MFL의 증가는 포화하는 경향이 있다.
- ③ 결함길이와 MFL : 결함길이가 짧은 경우에는 결함길이가 증가함에 따라 MFL이 증가하지만, 길이 $2l$ 이 결함깊이 d 의 약 10배 이상이 되면, 결함길이의 변화는 MFL에 거의 영향을 미치지 않게 된다 (이것은 센서길이가 2mm인 경우이다).
- ④ 결함의 경사각도와 MFL : 결함의 깊이방향에 대해 경사각을 x 를 일정하게 하여 경사각도를 변경한 경우로서 경사각도 θ 가 작게 됨에 따라 MFL은 작아지고, 그 변화는 $\sin \theta$ 에 거의 비례한다.

2.2 유한요소법의 활용

유한요소법을 이용한 해석에 의하면 내부 자장의 세기 증가에 따라 MFL의 크기는 증가하고, 센서의 lift-off 증가에 따라 MFL의 크기는 감소하는 관계이다. 이러한 결과는 실험적으로 증명되었고, 실제 탐상에 있어서 시험변수를 최적화하고 선택하는데 이용될 수 있다.

에러 데이터는 센서의 lift-off가 +/-0.05mm의 기복을 가질 때 발생되었고, 결과로부터 에러에 대한 데이터곡선을 구할 수 있다. 또한 같은 기복에서 lift-off의 증가에 따라 에러는 감소하였다. 따라서 시험감도가 충족된다면, lift-off를 작게 해서 더 좋은 결과를 얻을 수 있는 것이다.^[6]

다음 그림 2는 MFL법의 DC & AC field로 튜브와 봉재의 검사에 응용하는 일 예를 나타낸 것이다.

3. 산업적 활용

3.1 열교환기 검사

석유화학플랜트에 사용되는 열교환기의 재료는 stainless steel, admiralty brass, copper-nickel alloys, hastelloy, titanium, monel, nickel, alloy 2205, ferritic stainless steel, carbon steel 등 매우 다양하다. 따라서 여기에 적용할 수 있는 비파괴시험법도 여러 가지가 있고, 그 방법은 재질

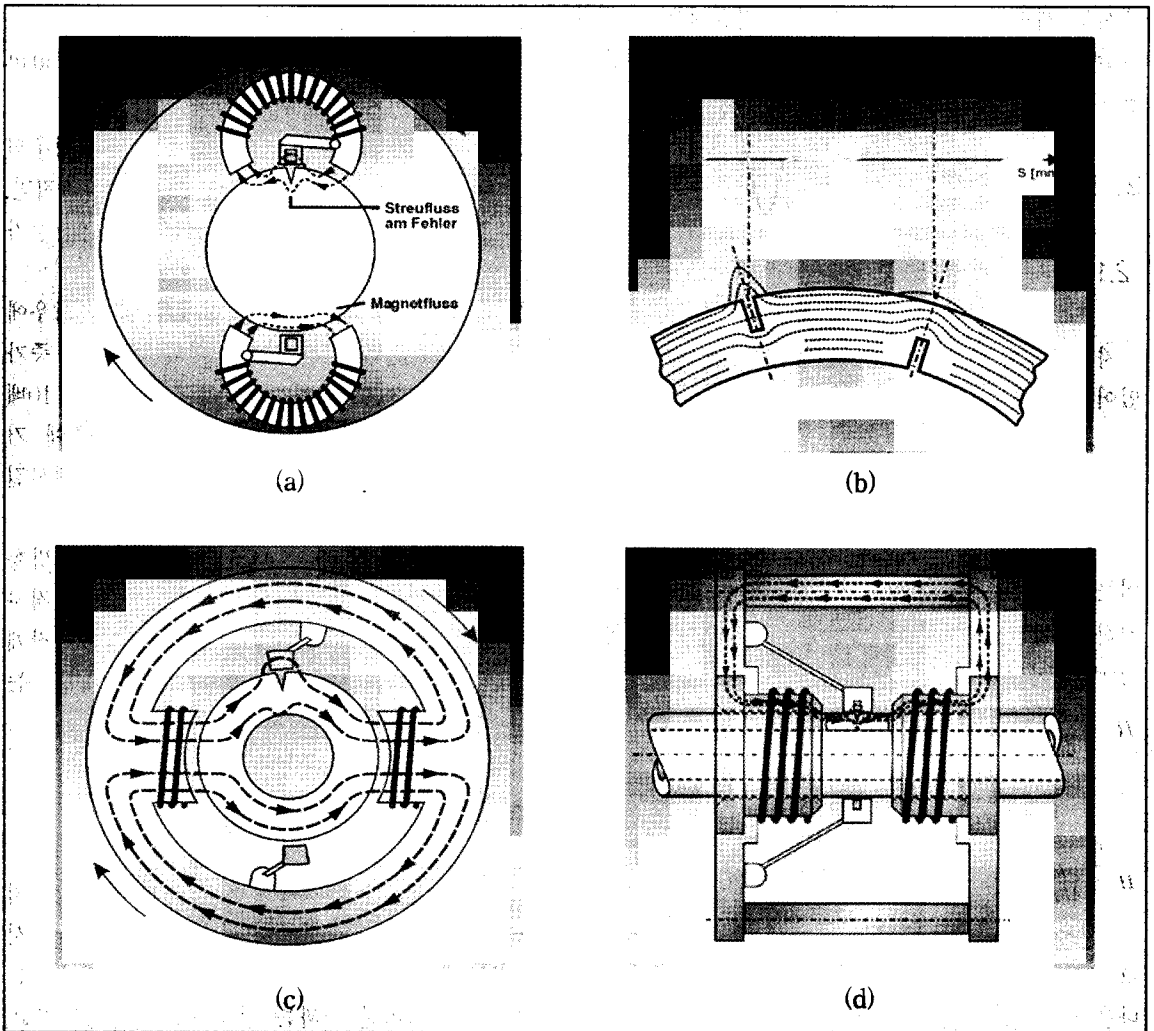


그림 2. MFL probe method

과 검출하고자 하는 결함의 유형에 따라 달라지게 된다. 고전적으로 와전류탐상시험이 가장 많이 사용되었고, 초음파 IRIS, 레이저 광학법도 부분적으로 적용되었다. 그러나 MFL법이 부식, 공식과 같은 결함을 검출할 수 있는 방법이 알려지면서 열교환기의 검사에 활용되기 시작하였다.^[7] 센서는 자석과 inductive pickup(코일형과 홀소자)으로 구성되며, 홀센서는 플럭스의 절대값을 출력하고, 코일은 플럭스의 변화율을 출력한다. 따라서 sharp한 결함의 경우 코일에 민감하고, 완만한 두께변화에서는 홀소자를 이용한 MFL의 검출이 용이하다.

와전류탐상의 경우 공식, 균열과 같은 결함에 검출능이 매우 우수한 반면 non-ferromagnetic 재질에 적용되는 제한점이 따른다. 또한 초음파 IRIS의 경우 두께측정을 위한 방법으로 최적이지만, 공식 또는 균열과 같은 작은 결함을 빠뜨릴 가능성이 있다. 레이저 광학법은 내부결함만이 대상이 되는 단점이 있다. 그림 3은 열교환기의 검사에 적용되는 대표적인 방법을 도시적으로 설명하고 있다.^[8]

3.2 파이프라인 검사

비파괴시험을 위해서 MFL법이 가장 많이 적용되는 분야 중 하나가 파이프라인으로 천연가스

수송관, 해저 원유 수송관 등 파이프라인의 검사에서 보다 향상된 MFL 검사기법이 개발, 발표되었다.^[9] 현재 적용되는 기술에는 지능형 피그, 응력해석을 위한 연산, 인공지능 해석법 등이 포함되어 있다. 그림 4에 파이프라인의 검사에 활용되는 피그의 예를 나타내었다.

3.3 보일러 Waterwall 튜브 검사

보일러 waterwall 튜브는 사용 중 발생하는 외부 침식 및 내면 공식으로 인해 사고발생 요인이 상존하는 설비이다. 근래 MFL법을 이용한 보일러 waterwall 튜브의 검사 시스템이 수년간의 연

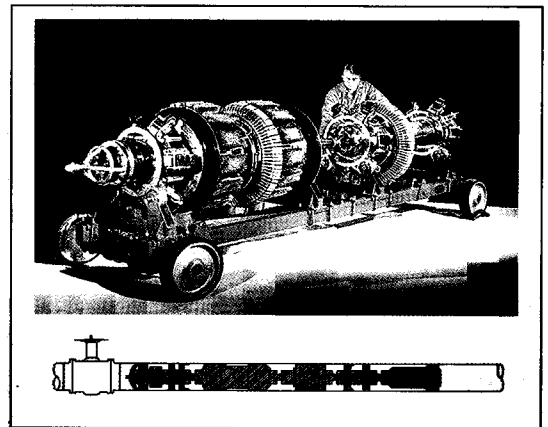


그림 4. MFL inspection tool for corrosion and metal loss surveys

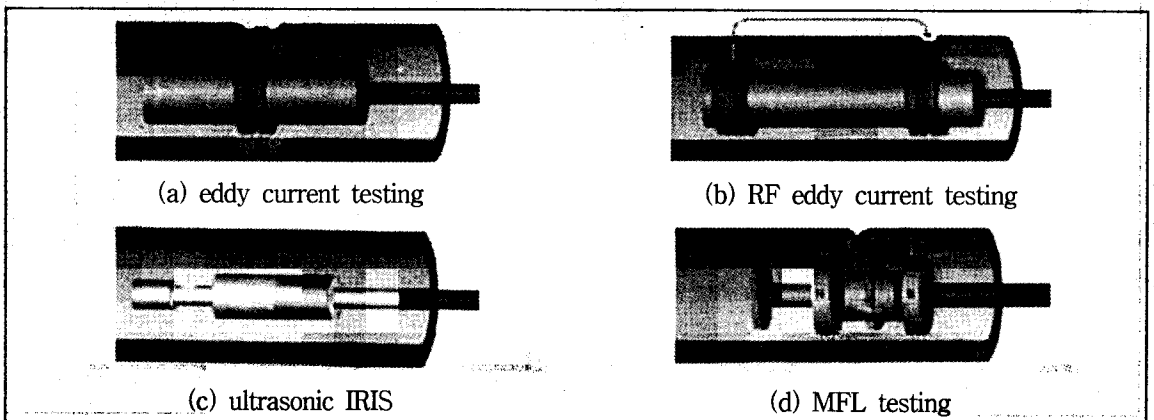


그림 3. NDT techniques for heat exchanger tubing

구를 통해 개발되어 현장에 적용되었다. 센서는 전자기 코일로 구성되어 있고, crawler가 벽면에 붙어있기 위해서 영구자석을 사용하였다. 단 구조상 화염쪽의 튜브만이 검사될 수 있고 현재는 해결해야할 문제점을 포함하고 있다.

3.4 저장탱크 바닥판 검사

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 바닥검사가 개발되었고, 이 시기에 영구자석을 이용한 시스템이 유럽에서 개발되었다.^[10-11] 어떤 회사들은 저장탱크의 부식, 구조적 안정성, 누설 등에 대하여 연간 60-70회의 검사를 수행하고 있다. 특히 지상 저장탱크의 경우 바닥부분이 접근이 곤란한 이유로 특별한 관심의 대상이 되고 있다. 현재 MFL법을 이용하여 저장탱크의 부식을 측정하는 기술 및 시스템 제작능력을 보유하고 있는 곳은 영국의 AEA, Silver Wing과 미국의 TesTex, MFE, MAC, Colonial Pipeline 등이다. 특히 저장탱크의 바닥검사를 위한 연구에 있어서는 국내에서 처음으로 본 그룹이 「과학기술부」의 지원으로 3년간 연구를 수행하여 상품화

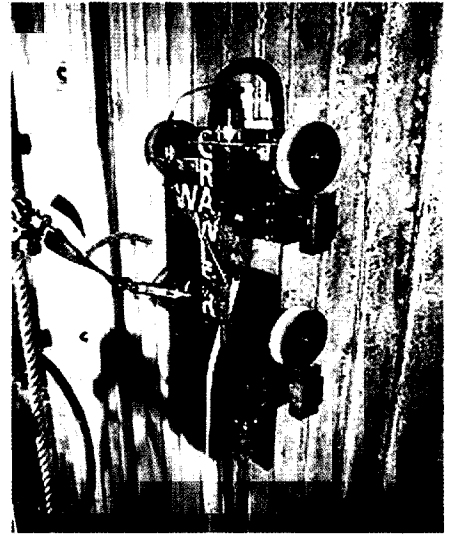


그림 5. The scanner in operation on the boiler waterwall

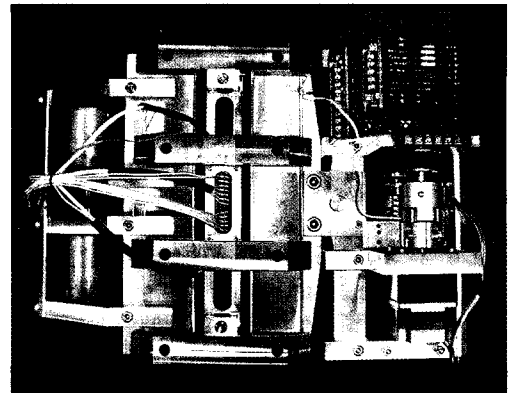


그림 6. Developed MFL system for storage tank inspection

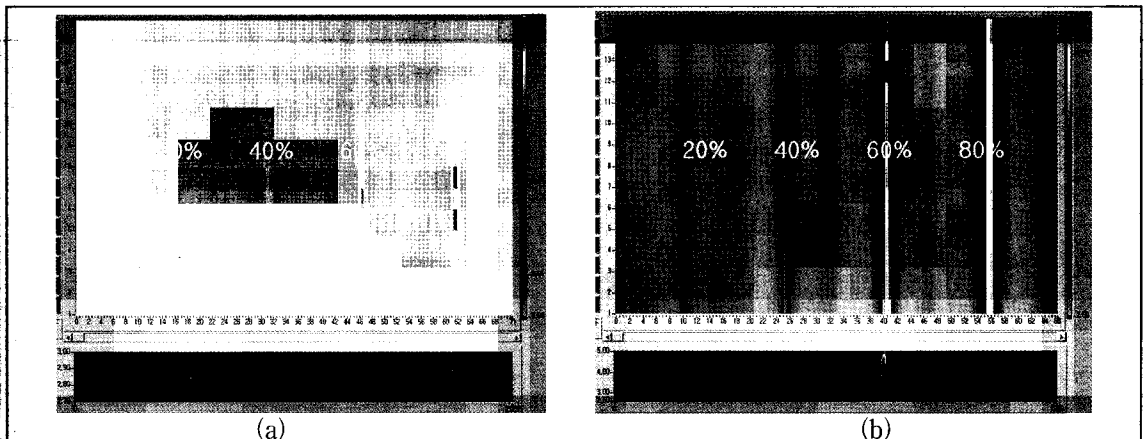


그림 7. Example of experimental result for SGV 42 plate

단계의 기술을 개발완료 하였다. 그림 6 & 7에 본 그룹에서 개발한 시스템과 실험적 결과를 나타내었다.

3.5 서스펜더 케이블 검사

미국에 설치된 교량에서는 거의 매일 사고가 발생하고 있는데 이것은 서스펜션 로프가 단선되었거나 손상된 것이 주 원인인 것으로 밝혀졌다. 선스펜션 교량에 있어서 가장 중요한 부분은 수직 서스펜션 케이블이다. 만약 케이블의 일부가 단선, 손상되면 나머지 케이블에 하중을 증가시켜 사고를 발생시키게 된다. 그러나 교량의 케이블은 항시 하중, 진동, 기후조건에 노출되어 있어 손상은 피할 수 없는 상황이다.

이러한 케이블을 검사할 수 있는 혁신적인 방법이 MFL법에 있다. MFL법을 이용하여 케이블 내, 외부의 단선, 부식, 균열 및 마모 등을 검출하여 사고를 미연에 방지할 수 있다. 기본원리는 그림 8과 같고, 그림의 각 부분은 1. 자기회로, 2. 유도코일, 3. 홀센서를 나타낸 것이다. 시험장치가 케이블을 자화시키는 동안 센서는 케이블을 따라 이동한다. 만약 단선과 같은 sharp한 결함이 있게되면 플럭스의 왜곡이 일어나고 로프 외부로 누설이 일어나게 된다. 누설된 자속은 유도코일에 검출된다. 반면에 홀센서는 마모나 부식과 같은 점진적인 두께손실을 검출하게 된다.

1999년 12월 미국 매사추세추주의 Whittier 교량을 대상으로 처음으로 검사가 수행되었다. 검사결과 육안으로는 발견할 수 없었던 내부 단선이 발견되었고, 상부와 하부의 연결부에 부식에 의한 내부 두께감육이 발견되었다.

3.6 클래드 두께측정

석유화학 플랜트나 원자력발전소에서 사용되는 압력용기는 보통 스테인리스강으로 클래드한 후 판의 탄소강이 사용된다. 이때 클래드재의 목적

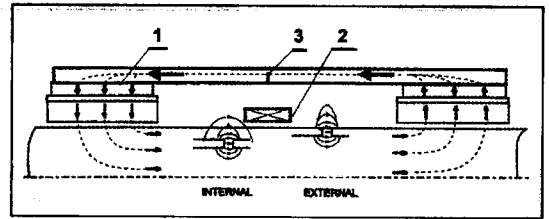


그림 8. The principle of MFL inspection of wire rope

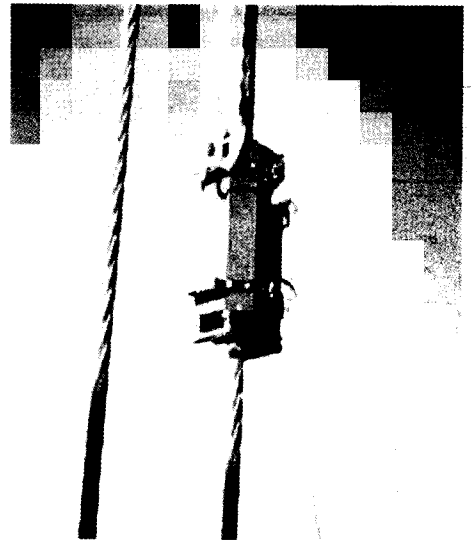


그림 9. Test instrument installed on suspender rope

은 부식이나 침식으로부터 모재인 탄소강을 보호하는 것으로 스트립형의 클래드재를 자동용접하여 제작하는 방식을 이용한다. 그러나 사용중에 발생한 피로균열이나 제작시 존재한 표면결함 등에 의해 클래드가 손상되면, 공정물에 의해 모재인 탄소강의 부식은 급속도로 진전하며 매우 짧은 시간내에 사고가 발생하게 된다. 따라서 클래드 압력용기의 상태를 검사할 때 점검해야할 가장 중요한 항목은 부식의 발생, 공식이나 균열의 발생여부로 개방검사시 클래드의 잔존두께를 측정하는 것이 필요하다.^[12] 현재 두께측정 방법으로는 초음파법이 가장 신뢰성 있게 활용되고 있지만, 상술한 클래드재의 음향임피던스가 모재인 탄소강과 유사하기 때문에 초음파법으로는 두께 측정이 불가능하다.

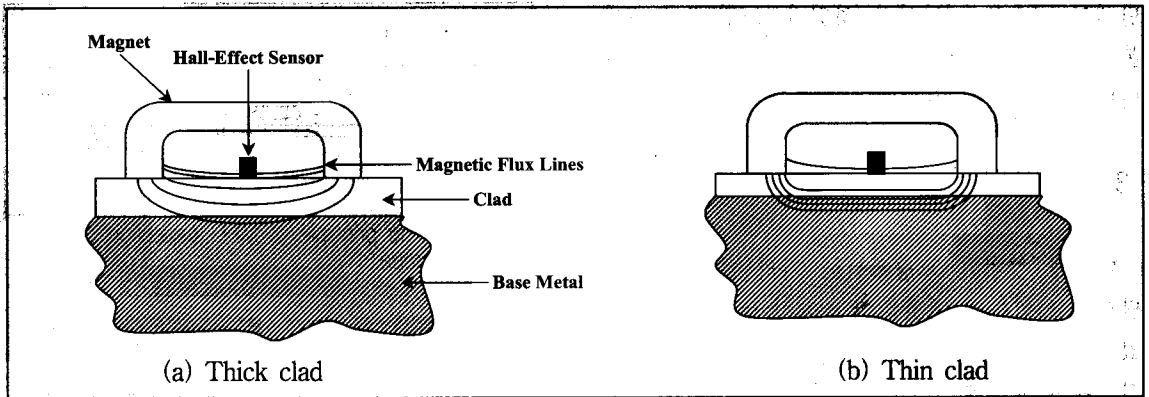


그림 10. Basic principle of clad thickness measurement

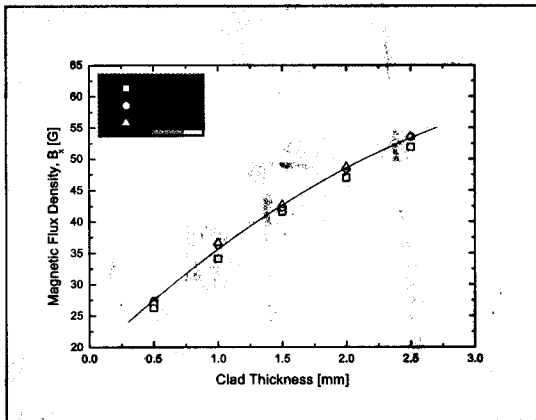


그림 11. Example of experimental result for SUS 316L clad

클래드 압력용기의 클래드 두께측정을 위해서 그림 10과 같은 조건을 설정하면, 클래드의 두께 변화는 자석주위에서의 자속밀도를 변화시키게 된다. 즉, (a)와 같이 air gap이 큰 경우 대부분의 자속이 air gap에 남게 되지만, (b)와 같이 air gap이 작은 경우 대부분의 자속이 강재로 들어가게 된다. 따라서 센서에서 읽혀지는 자속밀도는 클래드의 두께에 따라 변하게 되고, 클래드의 잔존두께를 측정할 수 있게 된다.

3.7 스테인리스 강관의 침탄도 평가

신재인 오스테나이트 스테인리스 강관은 강자성체가 아니므로 자력이 없다. 그러나 침탄에 의

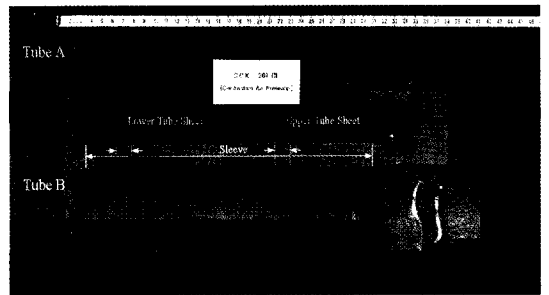


그림 12. Tube specimen for combustion air preheater

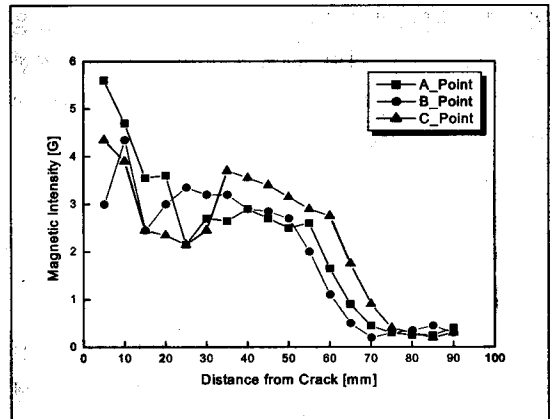


Fig. 13. Magnetic intensity measurements of carburized tube specimen

해 강자성체가 되면 자력을 발생시키기 때문에 침탄의 우려가 있는 경우 어떤 방법으로 자기모멘트를 측정할 수 있다면 사고발생을 조기에 방지할 수 있다. 이러한 목적으로 가우스미터를 이용하여 튜브의 외면에서 MFL을 연속적으로 탐

상함으로써 튜브의 침탄정도를 정성적으로 측정할 수 있다. 그림 12 & 13은 combustion air preheater에 사용된 오스테나이트 스테인리스강 309S 튜브가 침탄에 의해 파열된 결과와 상술한 방법으로 가우스미터를 이용해 침탄도를 측정된 결과이다.

4. 결 론

비파괴시험 방법으로 MFL법은 많은 유용성을 가지고 있다. 외국의 경우 본문에서 언급한 분야를 비롯하여 많은 연구가 진행중에 있다. 그러나 그 활용 가능성에 비해 외국에서도 제한적으로 활용되고 있고, 특히 국내의 경우 관련연구가 거의 없는 실정이다. 물론 다른 비파괴시험방법과 마찬가지로 MFL법도 주어진 환경에서 항상 기대되는 결과를 주는 것은 아니다. 검사환경에 따른 환경적, 물리적 제약조건이 고려되어야 하고, 센서의 선택에 있어서도 단지 감도만을 우선시할 수 없는 상황이 발생하곤 한다. 또한 MFL법의 원리상 정량적인 결과를 얻기 힘들다는 사실로부터 초음파법과 같은 정량적 방법이 동반되어야 함을 알 수 있다. 그러나 MFL법은 기존의 방법으로 실용화할 수 없는 제약을 해결하고, 필수 요건인 경제성을 충족시킴으로써 산업현장에 쉽게 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 관련기술이 아직 산업현장에서 애로기술로 남아 있는 부분으로 국내의 연구개발도 조속히 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. Bauer and R. Brooks, New Flux Leakage System for Inspecting Tank Bottoms for Potential Leakers, ICPIIT II, pp. 48-52, June 1991.
- [2] C. Edwards and S. B. Palmer, The Magnetic Leakage Field of Surface-Breaking Cracks, J. Phys. D: Appl. Phys, Vol.19, pp. 657-673, 1986.
- [3] D. E. Bray and D. McBride, Nondestructive Testing Technique, pp. 421-447, Johniley & Sons Inc., 1992.
- [4] B. W. Maxfield, P. C. Fitzgerald, A Quantitative Magnetic Flux Leakage Instrument and Its Application to Tank Bottom Corrosion Assessment, ICPIIT IV, pp. 237-241, June 1995.
- [5] 이의중, 자분탐상시험, 도서출판 골드, pp. 283-302, 1995.
- [6] L. Z. Jiajun, L. S. Xiaoyan, Using Finite Element Method to Optimize Magnetic Flux Leakage Testing, Proceedings of the 14th WCNDT '96, pp. 1589-1592, Dec. 1996.
- [7] M. J. Bergander, Magnetic Flux Leakage Examination of Petro/Chemical Heat Exchanger Tubing, ICPIIT III, pp. 95-102, June 1993.
- [8] A. S. Birring, Selection of NDT Techniques for Inspection of Heat Exchanger Tubing, Materials Evaluation, pp. 382-391, March 2001.
- [9] 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, paper IV-5, June 1991.
- [10] Z. You and D. Bauer, Combining Eddy Current and Magnetic Flux Leakage for Tank Floor Inspection, Materials Evaluation, Vol. 52, No. 7, pp. 816-818, July 1994.
- [11] Mk2 Floorscanner Manual, AEA Technology plc., 1997.
- [12] API RP 572, Inspection of Pressure Vessels, 1st ed., pp. 24-32, 1992.