

가스관의 자속누설탐사에서 잔류자화의 영향에 관한 연구

장평우*

청주대학교 이공대학 응용과학부
충북 청주시 상당구 내덕동 36, 360-764

(2004년 6월 18일 받음, 2004년 8월 15일 최종수정본 받음)

가스관의 비파괴검사로 가장 널리 사용되고 있는 자속누설탐사에서 가스배관의 잔류자화(residual magnetization, M_{res})와 탐사횟수가 누설자속에 미치는 영향을 정량적으로 간편하게 실험실에서 해석할 수 있도록 배관대신에 소형의 모의장치를 제작하여 조사하였다. 제작된 장치는 나사에 의한 결합까지도 측정할 수 있고 또 원형 링을 완벽히 탈차시킬 수 있어 탐사가 진행됨에 따라 잔류자화의 영향, 배관의 자화상태변화와 누설자속 등을 효과적으로 모사할 수 있었다. 탐사횟수가 증가할수록 잔류자화, 최대자속밀도 그리고 검출전압은 감소하다가 일정해지지만 초기잔류자화(initial M_{res})가 커지면 최종잔류자화(final M_{res})도 커졌다. 탐사조건이 일정할 경우 검출전압은 배관의 최대자속밀도보다는 직전의 잔류자화의 크기에 직선적으로 비례하였으며 이것은 탄소강으로 만들어진 원형 링의 자기이력현상, 즉 자구구조의 변화때문에 생기는 것으로 정확한 탐사신호를 해석하기 위해서는 이력현상을 고찰할 필요가 있다. 또 잔류자화가 크면 첫 번째 탐사에서 높은 검출전압을 얻을 수 있다는 것을 착안하여 두 번째 탐사에서는 착자기의 자화방향을 바꾸면 높은 검출을 얻을 수 있음을 제안하였다.

주제어 : 자속누설탐사, 잔류자화, MFL pig, 가스관, 비파괴검사

I. 서 론

천연가스(natural gas)는 원유와 함께 현대사회생활의 필수 에너지원으로, 특히 천연가스는 채취, 운반, 보관기술이 발전하면서 그 사용량이 점차 증가하고 있다. 현재 우리나라에서 천연가스는 외국에서 전부 도입되고 있으며 전용선으로 운반된 가스는 지하에 매설된 가스관을 통해 각 수요처로 공급되고 있다. 가스관 내벽은 천연가스로 항상 채워져 있으므로 제조상의 결함을 제외하고는 내부부식에 의한 결함이 거의 없으나 가스관 외벽은 부식의 가능성 때문에 플라스틱 코팅을 하여 부식을 차단하고 있다. 그러나 매설과정에서의 부주의, 또는 피할 수 없는 공정 때문에 코팅층이 파괴될 가능성이 있고 또 코팅층이 있다하더라도 코팅층이 지하의 수분에 장시간 노출될 경우 코팅층이 박리될 수 있기 때문에 항상 부식될 가능성이 있다.

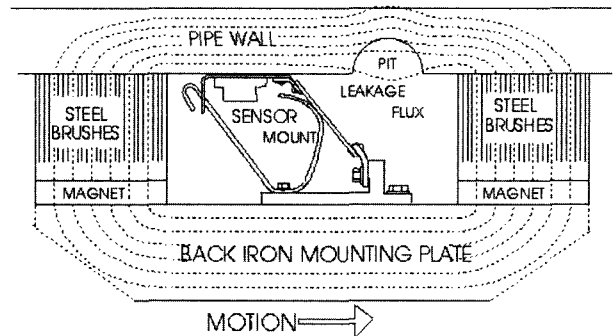
현재 우리나라에서는 이러한 부식의 정도를 주기적으로 측정하도록 법으로 정하고 있으나, 경제적 또는 사회적 이유로 매설된 가스관을 파내어 주기적으로 검사하는 것은 불가능하므로 가스관내부에 검사장치를 투입하여 이를 조사하는 기술이 불가피하다. 이러한 방법들 중 널리 사용되는 것이 자기현상을 이용한 자속누설탐사법(Magnetic Flux Leakage (MFL) Inspection)으로 이러한 장치를 MFL pig라고 하며, 개략적인 모양은 Fig. 1과 같다[1-2].

MFL 방법으로 가스관의 결함을 측정하는 원리는 Fig. 1

에서와 같이 가스배관의 길이방향으로 떨어져 있는 두 개의 영구자석에서 자장을 인가하고 영구자석 사이에서 자장의 세기를 센서로 측정하는 것이다. 이때 자속이 흐르는 가스관 중간에 결함이 있을 경우 단면적이 감소하므로 자속의 누설이 있어 결함이 없는 경우에 비해 결함부근의 자장의 세기가 변하게 된다.

가스관을 검사하고 난 뒤 다시 검사할 경우 잔류자화(residual magnetization, M_{res})가 남게 되어 여러 가지의 문제를 일으킨다. 잔류자화가 일으키는 첫 번째 문제는 이후의 탐사에서 누설자장의 크기를 줄인다는 것이고 두 번째는 가스관교체 시에 가스관사이에 작용하는 인력 또는 척력으로 작업을 어렵게 한다는 것이다.

본 연구에서는 잔류자화의 문제를 정량화시키기 위해 철로 된 원형 링에 결함을 새긴 장치(이하 turn-pig)를 제작하



Schematic of magnetic flux leakage inspection detector

Fig. 1. Schematic diagram of MFL pig. (After Atherton [2])

*Tel: (043) 229-8553, E-mail: pwjang@cju.ac.kr

여 원형 링의 잔류자화와 검사횟수 등이 누설자장에 미치는 영향을 정량적으로 조사한 뒤, 잔류자화를 이용한 효과적인 탐사방법을 제시하였다. 그리고 본 논문에서 용어의 혼동을 피하기 위해 강자성재료를 포화시킨 후의 잔류자화는 M_r (remanence)로, pig가 지나가고 배관에 남은 잔류자화는 M_{res} (residual magnetization)로 표시하였다.

II. 실험방법

내경 90 cm, 외경 100 cm, 높이 1.7 cm인 저탄소강의 원형 링이 무한히 긴 가스관의 역할을 하도록 모의장치를 제작하였다. 이 원형 링에 직경 30 mm, 길이 5.1 mm인 30% 결함을 위와 아래면에 각각 1 개씩 180° 간격으로 가공한 후 두께 20 mm의 알루미늄합금 원판에 고정시켰다. 이 원형 링을 자화시키기 위해 40×40×30 mm의 영구자석을 40×150×40 mm의 연자성 back yoke 끝에 둔 착자기를 제작하였다. 사용한 영구자석은 중국산으로 잔류자화(remanence)는 12.1~12.5 kG, 보자력은 BH_c 11.3 kOe, 최대 에너지적은 36~39 MGOe 정도이다. 원형 링에 충분한 자속밀도(flux density 또는 induction)가 생기도록 하기 위해 back yoke의 두께를 삼차원 유한요소법으로 수치모사한 결과 20 mm 이상에서 원형 링에 16 kG 이상의 자속밀도를 나타내고 있어 back yoke의 두께를 25 mm로 결정하였다.

실험에 사용한 누설자장검출용 소자는 Allegro 사의 3507 linear Hall센서로 ±1000 Oe까지 2.41 mV/Oe의 선형성을 나타내나 offset 전압과 포화자장이 개별 소자들마다 차이가 있으므로 미리 보정을 하였다. 실험에서는 원형 링에 대해 원주방향의 누설자장(실제 MFL 탐사에서 가스관 축방향(axial direction)과 링의 수직방향 자장(실제 탐사에서는 가스관 반경방향(radial direction)을 측정하였다. 원형 링의 자속밀도는 검출코일을 감아서 적분계로 측정하였으며 탐사를 하기 전에는 영구자석의 반대편에 두었다.

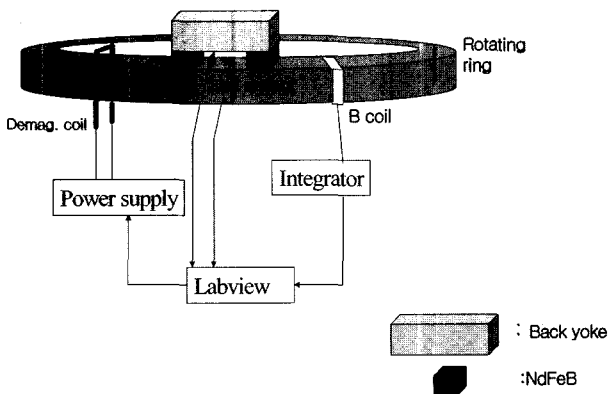


Fig. 2. Schematic diagram of the turn-pig used in this study.

원형 링의 자속밀도를 측정하기위해 적분기를 사용할 경우 초기 자속밀도를 정확히 알지 못하면 자속밀도와 잔류자화를 측정하지 못하므로, 전선을 원형 링 주위에 토로이드형태로 감아 탈자를 한 뒤 누설자장을 검출하기 전에는 이 전선을 모두 제거하였다. 실험에 사용한 전원장치는 Techron 3620이고, 적분기는 Walker사의 MF-3A이었으며 측정은 National Instrument사의 Labview와 12 bit Data acquisition card를 사용하여 데이터를 수집하였다. Fig. 2는 이러한 개략도를 나타낸 것이다.

III. 실험결과 및 고찰

자속누설탐사에서 잔류자화의 영향을 고찰하기 위해서는 잔류자화의 크기를 정확히 알아야 하는데, 통상의 자속누설탐사와 같은 방법으로 탐사를 반복할 경우 반대방향 음의 잔류자화가 남을 뿐 아니라 그 크기를 임의로 조절하거나 정확히 아는 것이 매우 어렵다. 이것은 자속밀도를 측정할 때 사용하는 적분기의 특성상 일어나는 문제로 적분기는 Faraday의 유도법칙에서 유도된 전압을 적분하여 자속의 절대량이 아니고 변화량을 측정하는 장비이기 때문이다. 즉 초기의 절대량을 알아야만 자속의 절대값을 구할 수 있다. 이러한 문제는 원형 링을 완전히 탈자(demagnetization)하면 가능하므로 먼저 여러 번의 탐사에 의해 자화가 남아 있는 원형 링이 탈자가 되는지를 확인하고자 하였다.

Fig. 3(a)는 원형 링을 토로이드식으로 감싼 전선에 진폭이 감소하는 교류전류(최대 진폭 15 A)를 흘려 탈자하는 과정을 나타낸 것으로 원형 링이 완전히 탈자되고 있음을 보여주고 있다. 이 교류전류에 직류전류를 중첩시키면 잔류자화를 정확히 조절할 수 있다. Fig. 3(b)는 완전히 탈자된 원형 링에 1 A의 직류전류를 중첩시키면 4.1 kG의 자화가 남는 것을 보여주고 있다.

Fig. 4는 초기 잔류자화의 세기를 달리 하며 원판을 5회 회전시키면서 측정한 원형 링의 자속밀도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 횡축은 측정시간을 나타내었는데 실험특성상 그리고 링의 관성모멘트가 매우 커 모터를 사용할 수 없어 수동으로 원판을 회전시켰기 때문이다. 그림에서 탈자된 원형 링의 초기의 자화가 0 kG에서 벗어나 있는 것은 탈자하는 동안 멀리 떨어져 있던 Fig. 2의 착자기가 원형 링에 자장을 가하기 위해 가까이 옴으로 인해 생긴 것이다. 그림에서 검출코일은 처음에 착자기의 반대편에 있어 자속밀도가 낮으나 링이 회전하면 자속밀도는 음의 방향으로 증가한다. 원형 링이 더 회전하여 검출코일이 첫 번째 영구자석을 지나면 자화 방향과 크기가 급격히 변하게 된다. 즉 검출코일이 착자기 사이를 지날 때 최대자속밀도(maximum magnetic flux density)

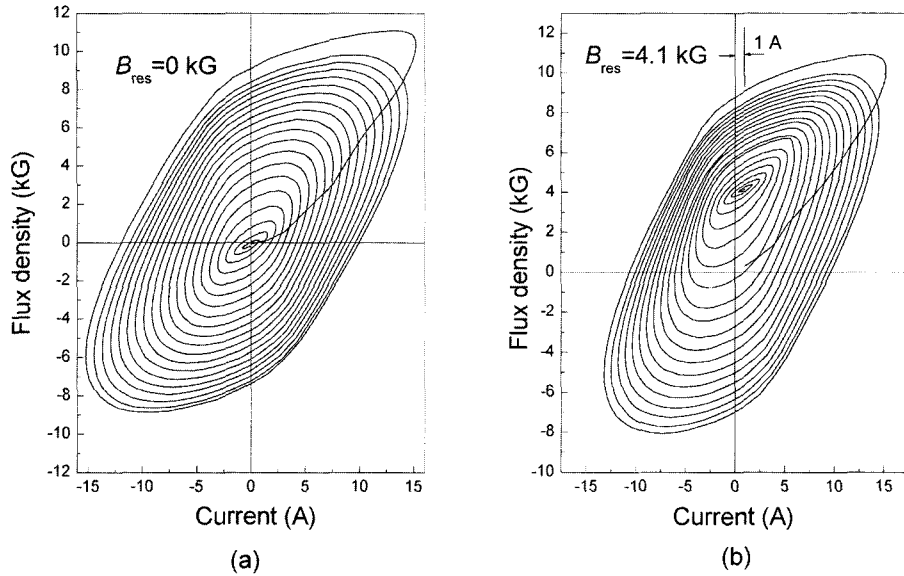


Fig. 3. Magnetization and demagnetization process of ironring of the turn-pig.

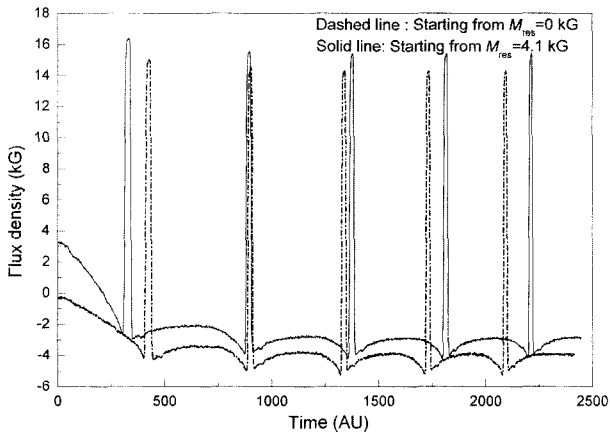


Fig. 4. Variation of flux density of iron ring with number of inspection. (solid line: $M_{res} = 4.1$ kG, dashed line: $M_{res} = 0$ kG).

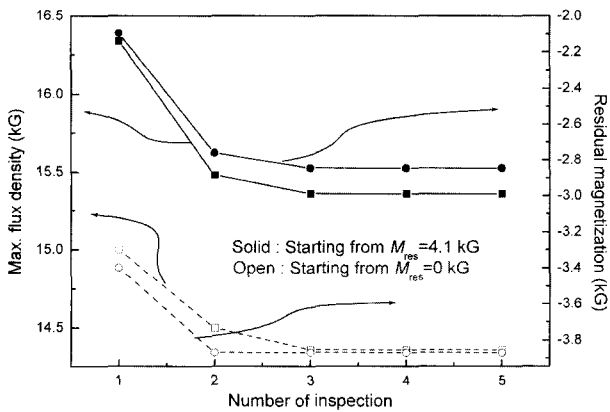


Fig. 5. Variation of residual magnetization and maximum flux density of iron ring with number of inspection.

를 검지하게 되어 피크를 나타낸다. 링이 더 회전을 하여 검출코일이 착자기를 빠져 나오면 급격히 자화는 감소하게 되면서 자화의 방향이 다시 바뀌게 된다. 링이 계속해서 회전하면 검출코일은 초기 위치인 착자기의 반대편에 있게 되고 링이 계속 회전함에 따라 이와 같은 자기이력이 반복되게 된다.

그러나 Fig. 5에서 원판의 회전회수가 증가함에 최대자속밀도가 감소하며 특히 탈자된 상태에서 한 번 자화가 되면 음(negative)의 자화가 남게 됨을 알 수 있다.

그리고 첫 회전 시에는 최대자속밀도가 16.34 kG이었으나 두 번째 회전 시에는 15.48 kG로 감소하고, 세 번째 이후로는 15.36 kG로 거의 일정한 값을 가진다. 잔류자화는 반대로 증가하는데 첫 번째 회전에서는 -2.1 kG, 두 번째 회전에서는 -2.76 kG, 세 번째 이후에는 -2.84 kG로 거의 일정한 값을 가진다. 초기의 잔류자화가 4.1 kG인 경우도 탈자된 상태와 비슷한 자기이력을 경험하게 되며 첫 회전 시에는 최대자속밀도가 15 kG, 두 번째 회전 시에는 14.5 kG로 감소하고, 세 번째 이후로는 14.36 kG로 거의 일정한 값을 가진다. +4.1 kG의 잔류자화에서 출발하였으나 착자기를 지나게 된 뒤에는 음의 잔류자화를 가지게 되며 첫 번째 회전에서는 -3.39 kG, 두 번째 회전에서는 -3.87 kG로 증가하며 세 번째 이후에는 -3.87 kG로 거의 일정한 값을 가진다.

Fig. 4는 초기 잔류자화의 세기를 달리 하며 원판을 5회 회전시키면서 측정된 원형 링의 자속밀도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 횡축은 측정시간을 나타내었는데 실험특성상 그리고 링의 관성모멘트가 매우 커 모터를 사용할 수 없어 수동으로 원판을 회전시켰기 때문이다. 그림에서 탈자된 원형

링의 초기의 자화가 0 kG에서 벗어나 있는 것은 탈자하는 동안 멀리 떨어져 있던 Fig. 2의 착자기가 원형 링에 자장을 가하기 위해 가까이 옴으로 인해 생긴 것이다. 그림에서 검출코일은 처음에 착자기의 반대편에 있어 자속밀도가 낮으나 링이 회전하면 자속밀도는 음의 방향으로 증가한다. 원형 링이 더 회전하여 검출코일이 첫 번째 영구자석을 지나면 자화 방향과 크기가 급격히 변하게 된다. 즉 검출코일이 착자기 사이를 지날 때 최대자속밀도(maximum magnetic flux density)를 검지하게 되어 피크를 나타낸다. 링이 더 회전을 하여 검출코일이 착자기를 빠져 나오면 급격히 자화는 감소하게 되면서 자화의 방향이 다시 바뀌게 된다. 링이 계속해서 회전하면 검출코일은 초기 위치인 착자기의 반대편에 있게 되고 링이 계속 회전함에 따라 이와 같은 자기이력이 반복되게 된다. 그러나 Fig. 5에서 원판의 회전회수가 증가함에 따라 최대자속밀도가 감소하며 특히 탈자된 상태에서 한 번 자화가 되면 음(negative)의 자화가 남게 됨을 알 수 있다. 그리고 첫 회전 시에는 최대자속밀도가 16.34 kG이었으나 두 번째 회전 시에는 15.48 kG로 감소하고, 세 번째 이후로는 15.36 kG로 거의 일정한 값을 가진다. 잔류자화는 반대로 증가하는데 첫 번째 회전에서는 -2.1 kG, 두 번째 회전에서는 -2.76 kG, 세 번째 이후로는 -2.84 kG로 거의 일정한 값을 가진다. 초기의 잔류자화가 4.1 kG인 경우도 탈자된 상태와 비슷한 자기이력을 경험하게 되며 첫 회전 시에는 최대자속밀도가 15 kG, 두 번째 회전 시에는 14.5 kG로 감소하고, 세 번째 이후로는 14.36 kG로 거의 일정한 값을 가진다. +4.1 kG의 잔류자화에서 출발하였으나 착자기를 지나게 된 뒤에는 음의 잔류자화를 가지게 되며 첫 번째 회전에서는 -3.39 kG, 두 번째 회전에서는 -3.87 kG로 증가하며 세 번째 이후로는 -3.87 kG로 거의 일정한 값을 가진다.

Fig. 6은 원판을 회전시키면서 측정된 축 방향(본 실험에서는 원주방향)의 검출전압을 나타낸 것으로 큰 피크들 사이의 작은 피크들은 원판이 회전할 때 밖으로 튀어져 나가는 것을 방지하기 위해 원판에 암나사를 내고 수나사로 고정하였기 때문에 검지되는 전압이다. 원형 링의 아래, 위로 두 개의 결함이 있기 때문에 360° 회전함에 따라 두 개의 결함신호를 검지하게 되는데, 그림에서 신호가 큰 것이 위에 있는 결함이고 그 뒤에 약간 작은 신호가 아래에 있는 결함에 의한 신호이다. MFL 탐사에서 축방향의 신호는 누설자장의 부호가 바뀌지 않으므로 펄스형의 전압이 검출된다. 이와는 달리 반지름방향의 신호는 결함이 시작되는 곳과 끝나는 곳에서 자장의 부호가 바뀌므로 Fig. 7에서와 같이 가우스함수를 미분한 신호와 같이 나타난다. 그리고 Fig. 6에 피크가 나타나기 전에 전압이 전반적으로 줄어드는 것은 원판이 아주 편평하게 회전하지 않아 lift-off가 약간씩 변하기 때문에 생기는

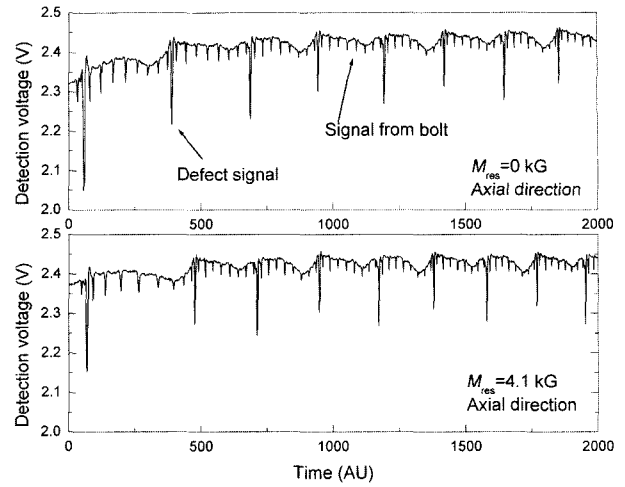


Fig. 6. Variation of detection voltage measured in the axial direction with number of inspection.

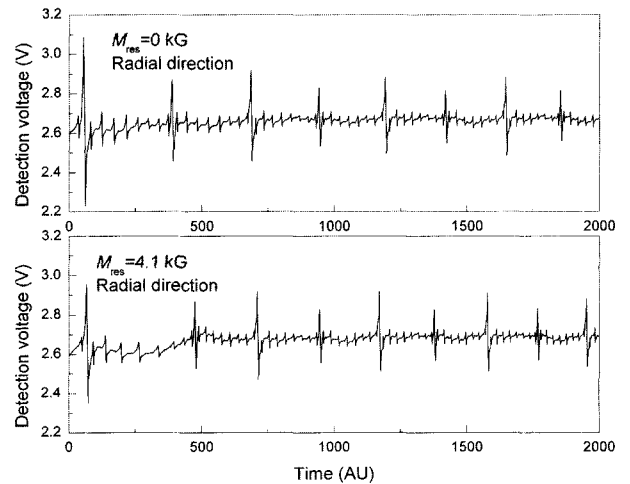


Fig. 7. Variation of detection voltage measured in the radial direction with number of inspection.

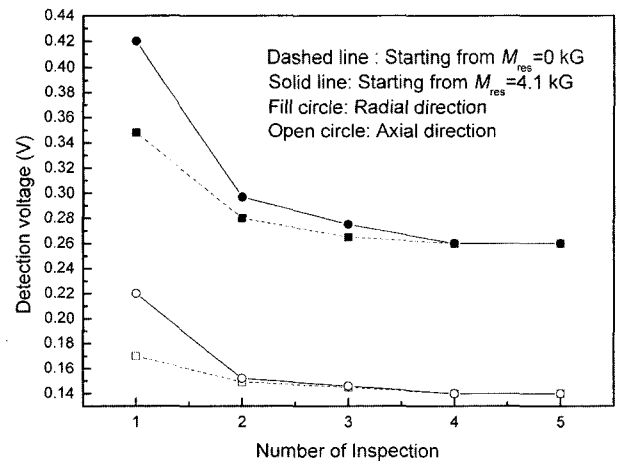


Fig. 8. Effects of inspection number and initial B_{res} on leakage flux from the iron ring.

것이다.

Fig. 8은 Fig. 6, 7에서 탐사횟수에 따른 검출전압의 변화를 나타낸 것으로, 검출전압은 자속밀도와는 다른 거동을 한다. 그림 5에서 탐사횟수가 증가함에 따라 최종잔류자화는 감소하나 초기잔류자화가 크면 최종의 잔류자화도 커지게 된다. 그러나 탐사 횟수가 증가함에 따라 Hall 소자의 검출전압이 감소하나 최종의 검출전압은 초기의 잔류자화의 정도에 관계없이 같아진다. 즉 첫 번째 회전에서 반지름방향으로의 전압은 초기 잔류자화가 4.1, 0 kG일 경우 각각 0.42, 0.35 V이지만, 두 번째 회전에서는 0.3, 0.28 V로 그 차이가 줄어들고 4번째 회전에서는 0.26 V로 차이가 없게 된다. 회전방향(가스관의 경우 축 방향)으로의 경향도 비슷해 두 번째 회전부터 0.15 V로 거의 같은 전압을 나타낸다.

Fig. 8에서 탐사횟수에 따라 검출전압이 감소하는 것은 그림 5에서와 같이 탐사횟수가 증가함에 따라 최대자속밀도가 감소하기 때문인데 탐사를 할 때 원형 링의 최대자속밀도는 초기잔류자화의 영향을 받는다. Fig. 9는 매회 탐사하기 직전의 잔류자화의 변화에 따른 원형 링의 최대자속밀도변화를 나타낸 것으로 음의 방향으로 잔류자화가 클수록 자속밀도는 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 같은 잔류자화에서 초기 잔류자화가 다름에 따라 최대자속밀도가 다른 것은 자기이력 때문이며 자기이력현상이 없으면 잔류자화가 없다.

Fig. 10은 최대자속밀도가 누설자장의 크기에 미치는 영향을 나타낸 것으로 누설자장의 크기가 같더라도 최대자속밀도가 상당히 달라질 수 있음을 나타내고 있다. 이것은 전자석을 이용해 철판에 자장을 인가할 때 먼저 철판을 탈자시킨 상태에서 전류를 흘려 일정한 자속밀도를 유지할 경우의 누설자장은 철판을 거의 포화시킨 후 전류를 줄여 같은 자속밀도를 유지한 경우에 비해 누설자장이 훨씬 작았다. 그림 10에서 초

기잔류자화가 같은 경우 일정한 범위 내에서 누설자장은 자속밀도에 비례해서 증가하고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 검출전압의 변화는 탐사조건이 일정할 경우 자속밀도보다 탐사 직전의 잔류자화의 크기에 더 의존하는 것으로 나타났다. Fig. 11은 매 회전 탐사직전의 잔류자화의 변화에 따른 검출전압의 변화를 나타낸 것으로 그림 10과는 달리 초기의 잔류자화에 관계없이 직전의 잔류자화가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

자기누설탐사에서 누설자장은 배관의 자속밀도, 잔류자화 등이 증가하면 증가하는 것으로 알려져 있으나, Fig. 10에서 자속밀도가 크에도 불구하고 검출전압은 변하지 않았으며, 더구나 누설자장은 원형 링의 자속밀도보다는 잔류자화에 직선적으로 의존하는 것으로 나타났다. 잔류자화는 자구로 설명되는 자성재료의 이력현상 때문에 생기므로 Fig. 10의 결과는 원형 링 내부의 자구구조와 관계가 있는 것으로 생각된다. 따

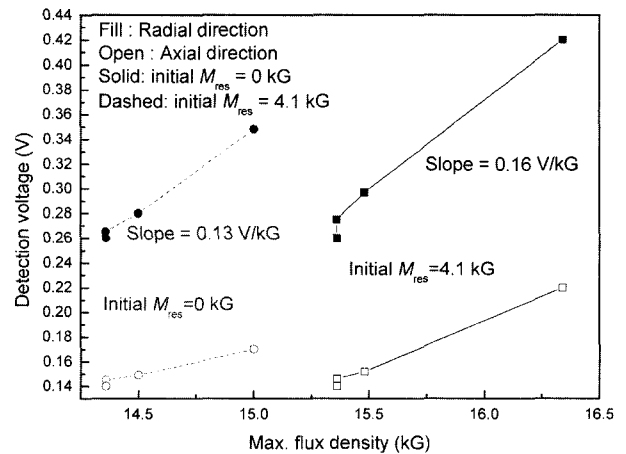


Fig. 10. Effects of maximum flux density of the iron ring on the detection voltage (solid line : initial $M_{res} = 0$ kG, dashed line: initial $M_{res} = 4.1$ kG).

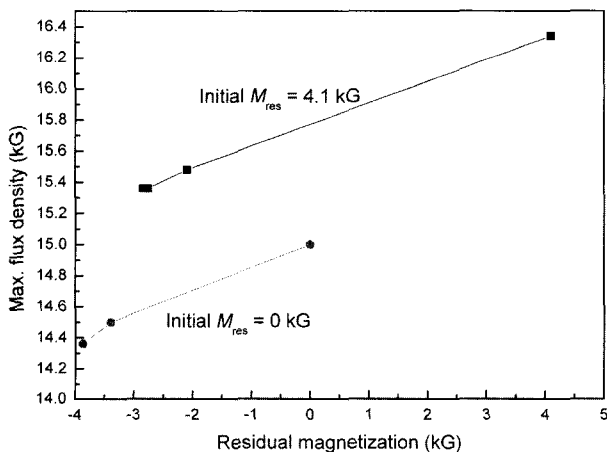


Fig. 9. Variation of maximum flux density of ring with residual magnetization.

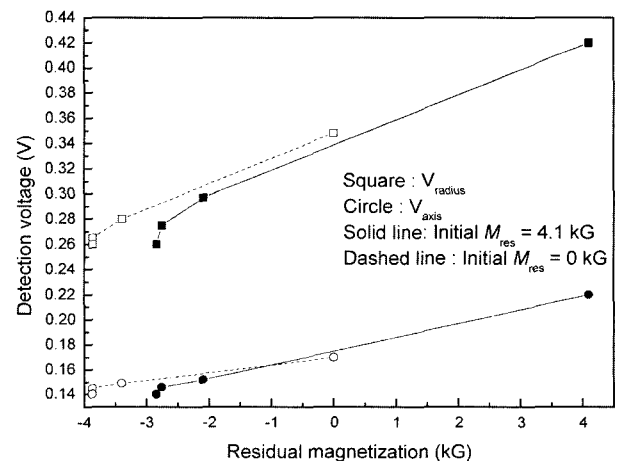


Fig. 11. Variation of detection voltage with residual magnetization.

라서 MFL pig의 검출전압을 정확히 해석하기 위해서는 이력 현상을 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.

이상의 결과에서 잔류자화는 음의 방향으로 남기 때문에 센서의 검출전압을 감소시키는 악영향을 가진다고 생각하기 쉽지만 이를 잘 이용하면 오히려 배관의 자속밀도를 높여 더 높은 검출을 얻을 수 있다. 즉 배관을 탐사할 때 자장의 방향을 잘 기록해 두고 다음에 피그를 조립할 때는 그 자석의 위치를 서로 바꾸면 음의 잔류자화가 양의 잔류자화로 바뀌게 되므로 배관의 자속밀도를 증가시키는 효과를 가져 올 수 있다. 특히 매우 높은 자속밀도로 운전되는 피그에서는 잔류자화 또한 크게 남을 것이기 때문에 그 효과는 클 것으로 예상된다.

IV. 결 론

자속누설탐사법에서 가스배관의 잔류자화와 탐사횟수가 누설자속 및 검출전압에 미치는 영향을 원형 링을 자화시키면서 조사하였다. 제작된 장치는 나사에 의한 결함까지도 측정할 수 있어 탐사가 진행됨에 따라 배관의 자화상태변화와 누설자장 등을 효과적으로 측정할 수 있었다.

탐사횟수가 증가할수록 잔류자화는 감소하다가 일정해지며 초기잔류자화가 커지면 최종 잔류자화도 커진다. 원형 링의 자속밀도 역시 잔류자화와 비슷한 거동을 하였다. 탐사횟수가 증가할수록 누설자장도 감소하였으며 이것은 원형 링의 자속밀도의 감소에 기인하는 것으로 자속밀도 역시 이전의 잔류자화가 감소하면 감소하기 때문이다. 그러나 실제 검출전압은 탐사조건이 일정할 경우 이전의 잔류자화에 직선적으로 변화하였다.

또 잔류자화가 크면 첫 번째 탐사에서 높은 검출전압을 얻을 수 있다는 것을 착안하여 두 번째 탐사에서는 착자기의 자화방향을 바꾸면 더 높은 검출을 얻을 수 있음을 제안할 수 있었고 정확한 해석을 위해서는 자기이력현상과 지구구조의 해석이 필요하다.

참 고 문 헌

1. R. W. E. Shannon and L. Jackson, *Materials Evaluation*, **46**, 1516 (1988).
2. D. L. Atherton, *Oil & gas, J.*, **87**(32), 52(1989).

Effects of Residual Magnetization on MFL Non-destructive Inspection of Gas Pipeline

Pyungwoo Jang

Division of Applied Science, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

(Received 18 June 2004, in final form 15 August 2004)

Effects of residual flux density M_{res} and number of inspection on the detection voltage and flux density B of the gas pipeline were investigated in MFL inspection, which is widely used for the non-destructive inspection in a gas pipeline. A simulation equipment composed of the magnetizer and iron ring attached on an aluminum disc was constructed instead of a huge gas pipeline facility. With this system, the iron ring could be perfectly demagnetized and signals from the bolt screw stuck on the disc could be clearly detected so that the effects of M_{res} and the inspection number on the detection voltage and B of iron ring were effectively investigated. With increasing the number of inspection, M_{res} , B of the iron ring and the detection voltage decreased and then kept at constant values while final M_{res} increased with increasing initial M_{res} . If inspection condition were kept unchanged, the detection voltage was proportional to the last M_{res} of the iron ring instead of B. This was probably due to magnetic hysteresis of the iron ring inherited from magnetic domain so that consideration on the magnetic hysteresis was inevitable in the analysis of MFL signal from defects of a gas pipeline. A new inspection scheme using the magnetizer with reversed magnetization in the subsequent inspection was proposed from the result that a high detection voltage could be obtained in the first inspection of gas pipeline with positive M_{res} .

Key words : magnetic flux leakage inspection, residual magnetization, MFL pig, gas pipeline, non-destructive inspection