

연속된 배관의 결함 검출을 위한 개폐식 와전류 탐촉자 개발

Development of Open-Connect Type Eddy Current Transducers for the Detection of Surface Flaws in Continuous Pipeline

김영주*[†], 안봉영*, 이승석*

Young-Joo Kim*[†], Bongyoung Ahn* and Seung Seok Lee*

초 록 서로 연결되어있는 강관의 결함을 검사할 수 있도록 하기 위한 개폐식 탐촉자를 제작하였다. 본 탐촉자는 기존의 외삽형 와전류 탐촉자로서는 탐상이 불가능한 설치 가동중인 튜브류의 검사를 위한 것이다. 리본 케이블과 커넥터로 구성된 여기 코일은 접합/단락이 가능하게 하였으며 감지 코일은 튜브 외벽 근처에 원주 방향으로 어레이 형태로 배치하였는데 여기 코일로부터 튜브 직경의 약 1.5배정도 떨어진 위치이다. 제작된 탐촉자를 강관에 적용한 결과, 감도나 결함 크기 구분 등의 성능은 자기 포화형 탐촉자에 미치지 못하나 비교적 큰 결함의 발견이나 위치 파악 등에는 적용 가능한 것으로 나타났다. 크랙 형태의 표면 결함의 경우 두께의 19% 이상의 결함을 찾을 수 있었다.

주요용어 : 개폐형 와전류 탐촉자, 강관 검사, 원격장 와전류

Abstract The open-connect type eddy current transducer for the flaw detection in continuously connected pipelines was developed. This eddy current transducer is for the on-line inspection of the tubes in industries, to which commercial encircling probes are not applicable. The excitation coil that consists of a ribbon type cable and a flat connector can be opened and closed on purpose. The sensing coils of this transducer are circumferentially arrayed near the outside of the tube wall but axially displaced from the exciter by about one and half tube diameter. In application to steel tubes, and the performance of this transducer was evaluated as a little behind those of magnetic saturation type in signal to noise ratio and flaw size decision, but usable to detect or to locate large size flaws in steel tubes. Surface cracks deeper than 19% of the tube thickness could be detected with good signal to noise ratio.

Keywords: open-connect type transducer, steel tube inspection, remote field eddy current

1. 서 론

0배관은 거의 모든 산업계에서 사용되는 것으로 산업체의 혈관이라 할 수 있다. 액체나 기체의 수송 통로인 배관은 세월이 지남에 따라 부식되거나 균열이 발생하여 기체나 액체의 누출이 일어날 수 있기 때문에 비파괴검사를 통하여 사전의 이물 결함을 검출하는 것은 매우 중

요하다. 배관결함의 검출에는 지속누설 탐상법, 와전류 탐상법 그리고 초음파법 등이 이용되고 있는데, 소구경 배관에 대해서는 와전류 탐상법이 가장 널리 이용되고 있다.

와전류 탐상은 배관의 형태나 구조에 따라 각기 다른 형태의 코일이 이용되고 있는데, 배관의 내부 검사를 위해서는 내삽형(inside 형), 그리고 배관의 외부 검사를 위

해서는 관통형(encircling형) 그리고 판재의 검사를 위해서는 probe형의 코일이 주로 이용된다. 이중 소구경 배관의 검사에 가장 많이 사용되고 있는 내삽형은 열교환기나 발전소 내의 증기발생기 등에 주로 적용되는데 공장의 정기보수 기간 중에 열교환기 등을 해체하고 배관 내부에 탐촉자를 삽입한 후 인출하면서 결함을 검출한다. 한편 관통형은 주로 배관 생산라인에서 이용되는 것으로 배관이 탐촉자 코일의 내부를 통과하면서 검사가 이루어지므로 연속적으로 체결된 배관의 적용에는 한계가 있다. Probe형 코일은 주로 판재의 탐상에 적용되지만 배관의 탐상에 적용되는 경우도 있다. 이때에는 한 개의 코일을 나선형으로 scan하면서 전 배관 부위를 검사하기도 하고, 여러 개의 코일을 배열한 어레이 코일을 이용하여 검사 시간을 줄이기도 한다.

와전류 탐상법은 실제 공장에 설치되어 사용중인 배관류의 검사에는 한계가 있다. 즉, 연속적으로 체결되어 기체나 액체가 흐르고 있는 튜브에는 내삽형 탐촉자를 삽입할 수 없고 관통형 탐촉자를 사용할 수도 없다는 것이다. 튜브 내부에 가스, 액체 상태의 물질이 지나고 있는 가동 상태 여부에 상관없이 검사를 하기 위해서는 외부에서 접근이 가능할 경우, probe형을 이용할 수도 있지만 다중 채널이 필요할 뿐 만 아니라 강관에 대해서는 잡음 신호 발생이 심하여 결함 판별이 용이하지 않다.

본 연구에서는 연속적으로 체결되어 있는 배관의 임의의 위치에서도 결함 검출이 가능한 와전류 탐촉자를 개발하고자 하였다. 배관의 외부에서 빠른 시간에 탐촉자 코일의 접근이 가능해야 하므로 리본형의 코일을 사용하여 개폐가 가능하도록 설계하였으며, 결함 신호의 검출에는 권수가 많은 코일이 필요하므로 probe형의 코일을 원주방향으로 배열하여 역시 개폐가 가능하도록 제작하였다.

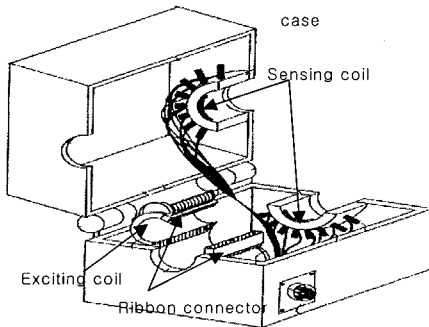


Fig. 1 Structure of the open-connect type eddy current test coil

2. 탐촉자 제작

본 연구에서 제작한 탐촉자는 Fig. 1의 구조를 가지며 열렸을 때의 상태는 Fig. 2, 닫혀진 상태는 Fig. 3과 같다.

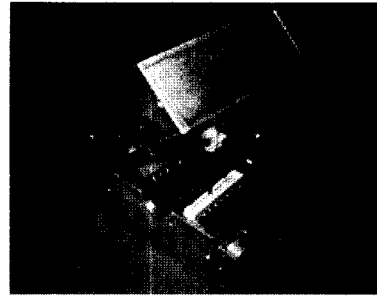


Fig. 2 Opened shape of the eddy current test coil

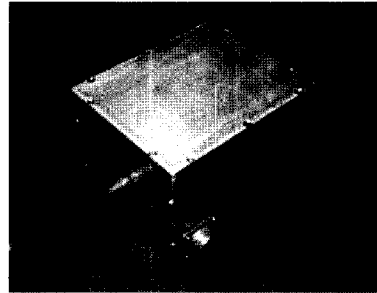


Fig. 3 Closed shape of the eddy current test coil

이 탐촉자는 그림에서와 같이 열었다 닫히는 구조로 설계하여 연속된 배관의 중간 부분에서도 배관이 삽입될 수 있게 한 것이 특징이다. 코일은 두 종류로 구별되는데 하나는 여기 코일로서 탐촉자가 열린 상태에서는 각 도선들이 단락 되어 전류가 흐르지 못하나 튜브 외부에 탐촉자를 장착하고 탐촉자를 닫은 후에는 각 도선들이 connector의 체결과 동시에 연결되어 전류가 흐를 수 있게 된다. 이런 구조로 제작하기 위해서는 코일을 이루는 선들이 항상 평행한 상태를 유지하여야 하므로 magnet wire(통칭 에나멜선) 대신 connector 접합의 편리성이 우수한 리본형 cable을 선택하여 코일을 제작하였다. 리본 케이블을 이용한 코일은 전자기장을 이용하여 초음파를 발생시키는 자왜형 센서(MsS)[1]에서도 활용되어지고 있으나 와전류 탐촉자에는 적용된 바가 없다. 제작된 여기 코일은 내경이 약 30mm로서 40회 정도의 turn수를 지니며 100Hz에서 인덕턴스는 $30\mu\text{H}$ 이다.

감지 코일의 감도를 향상시키기 위해서는 코일의 턴수가 커야하는 반면 분해능의 향상을 위해서는 코일의 폭은 좁아야 한다. 고감도와 고 분해능을 동시에 만족시키기 위해서는 여기 코일과 같이 open/connect 형태의 구조로는 제작이 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 ferrite core에 magnet wire를 감아 제작한 probe형의 코일을 원주 방향으로 배열하여 제작하였다. 제작된 감지 코일 한 개는 자름이 약 5mm로서 1mH의 인덕턴스를 지닌다. 이렇게 제작된 감지 코일은 여기 코일과 마찬가지로 개폐가 가능하다.

일반적으로 관통형 와전류 탐촉자 내부의 감지 코일은 여기 코일 바로 아래에 놓이는 데 반하여 여기서 제작된 개폐형 탐촉자는 여기 코일과 감지 코일이 일정거리 떨어져 위치하고 있다. 이러한 구조는 내삽형 탐촉자인 RFEC (remote field eddy current) probe와 유사하지만^[2], 내삽형 탐촉자와는 달리 관통형 탐촉자에서는 원거리장 효과를 이용할 수 없다. 신영길 등^[3]은 상자성체의 경우 외부의 관통형 코일에 의해서도 원거리장 효과가 나타난다는 수치 해석 결과를 발표하였지만 강자성체의 경우는 상자성체와는 달리 RFEC 현상을 외부에서 측정하거나 이를 이용하여 결함 탐지에 응용하는 것은 거의 불가능하다고 판단된다. 그 이유는 강관의 경우 관의 벽 자체가 자기 회로의 매개체로 작용하여 여기 코일에서 발생된 자장을 아주 멀리까지도 유도하기 때문이다. 본 연구에서 실험한 바로는 거의 2m 정도 떨어진 거리에서도 관의 내부에서 측정되는 자기장의 수 천 배 이상의 강한 field가 전달되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 관 벽을 뚫고 내부로 들어갔다 다시 외부로 나온 미약한 원거리장을 강력한 direct field와 구별하는 것은 매우 어려운 것이다.

그러나 비록 RFEC가 아니더라도 본 연구에서 RFEC 탐촉자와 유사하게 제작한 이유는 여기 코일과 감지 코일의 거리에 따라 결함 신호의 형태가 다르기 때문이다. 본 연구에서는 거리에 따른 결함 신호변화를 조사한 결과 큰 차이는 아니지만 감지 코일이 여기코일 바로 옆의 위치하는 것 보다 튜브 직경의 1~2 배 거리에서 s/n 비가 약간 향상되는 것을 발견하였으며 그 결과 여기 코일로부터 약 4cm 정도 거리에 감지 코일을 위치하였다.

그 이유는 아직 추정에 의할 수밖에 없어 확인할 수 없으나 magnetic field의 분포는 여기 코일과의 상대적인 거리에 따라 달라지기 마련인데, 4cm 정도 떨어진 거리에서의 자장의 방향이 축방향으로 더 기울어지는 것으로 추정한다. 이러한 조건에서 결함이 존재하면 자장에 의한 와전류의 섭동과 함께 자장의 누설 현상도 동시에 발생

하므로 결함이 검출되는 것으로 추정한다.

3. 시험편 제작

제작된 탐촉자의 시험을 위해 내경 22mm, 외경 27.3mm, 두께 2.65mm의 seamed 튜브를 사용하여 제작하였다. 가공된 결함은 매우 다양하나 본 논문에서는 Fig. 4의 형상을 지니고 Table 1에 나타낸 깊이를 지닌 결함을 이용하였다.

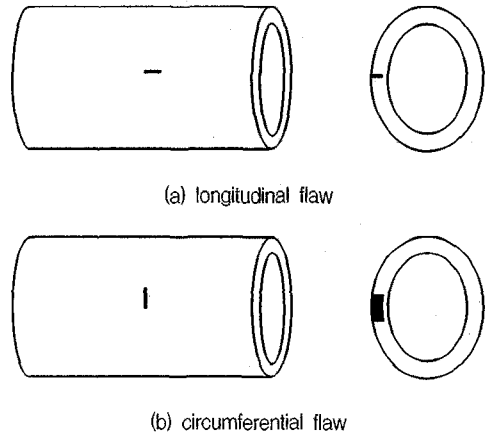


Fig. 4 Shape of the fabricated flaws in a steel tube specimen

Table 1 Dimensions of the fabricated artificial flaws

결함 위치 및 형태	가로×세로	깊이 mm
외면 축방향	5mm×0.3mm	외부 표면으로부터 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 관통(2.65)
외면 원주방향	0.3mm×5mm	외부 표면으로부터 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 관통(2.65)

4. 시 험

제작된 탐촉자를 이용하여 시험을 하기 위해서 Fig. 5의 장치를 구성하였다. 사용한 와전류 탐상 장비는 Dr. Foester 사의 2.825 F이고 기타 시험 장치는 실험의 재현성과 수작업에 의한 에러를 줄이기 위한 자동화 장치이다. 모터를 구동되는 스캐너를 사용하게되면 모터 진동에 의한

잡음 신호가 와전류 신호에 더해지는 단점이 있다. 그러나 수작업으로 시험 할 경우에는 불 균일한 탐상 속도와 손 떨림 등에 의해 역시 잡음 신호가 더해지므로 고도로 숙련된 기술자가 아니고는 더욱 결함 탐지가 어렵게 된다.

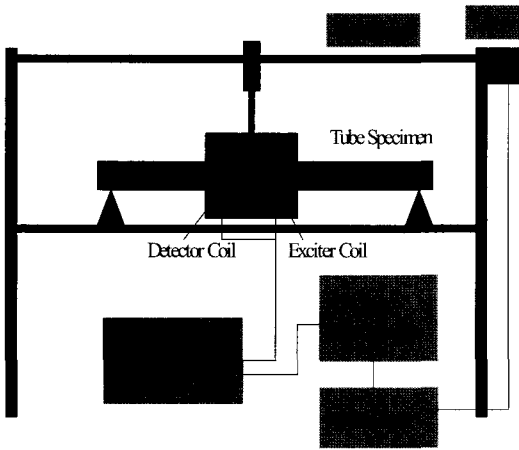


Fig. 5 Experiment system for eddy current test with the open-connect type probe

한편 상자성체는 자기 투자율이 일정한 반면 강자성체인 강관은 국부적으로 자기투자율이 다르고 와전류에 의해 자벽(magnetic domain wall)이 움직이기 때문에[4] 결함이 없을 때도 많은 잡음 신호가 발생한다. 이런 이유 때문에 강자성체는 와전류 탐상법의 적용이 매우 어려운 것으로 알려져 있으며, 이의 해결을 위해 자기 포화 등 부가적인 방법들이 사용되어 왔다[5,6]. 그러나 각종 산업 시설물에 연속적으로 설치된 배관의 경우 자기 포화 장치를 사용하기에는 주변 공간과 강관의 배치 형태 등의 문제로 자기 포화 장치를 사용할 수 없을 경우가 많으므로 본 연구에서는 자기 포화 방법을 사용하지 않고 탐촉자와 탐상기만을 사용하여 강관 검사를 수행하였다. 자기 포화를 시키지 않고 와전류 탐상할 경우에도 결함에 의한 신호는 발생한다. 다만 비교적 작은 결함 신호가 자성 변화에 의한 잡음 신호에 묻혀 구분할 수 없다는 데에 문제가 있다. 본 연구에서 제작한 탐촉자는 감지 코일의 위치에 변화를 주어 상용 탐촉자에 비하여 결함에 의한 신호를 크게 한 것이다. 그러나 여전히 자성 변화에 의한 신호 변화가 크기 때문에 결함 신호와 자성 변화에 의한 신호의 주파수 대역 차이에 의한 필터링이 이루어져야 한다. 대부분의 와전류 탐상기에는 오토 밸런스기능이 있는데 이는 band

pass filter의 일종이다. 이 기능은 저주파수의 신호는 제거하여 신호가 영점에 머무르게 하나 중간 주파수 신호는 통과 시켜 신호가 영점에서 이탈한다. 이 기능을 사용하게 되면 투자를 변화에 의한 저주파수 영역의 잡음을 제거할 수 있는데 강관의 경우 자성 변화에 의한 신호는 결함 신호보다 저주파 영역에 있다. 이 기능을 사용함에 따른 본래 결함 신호의 손실은 감수하여야 한다.

탐상 주파수의 선정도 매우 중요한 인자인데 강자성체의 경우 투자율이 높아 skin depth가 매우 낮다. 상자성체인 경우 전기전도도를 이용하여 skin depth를 쉽게 계산하여 주파수 선정을 할 수 있으나 강자성체인 경우 투자율은 주파수 및 자화력의 진폭에 따라 달라지고 투자를 측정할 위한 sample 가공 시에도 역시 자성이 변화하므로 정확한 값의 측정이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 전기전도도 및 투자율의 추정치를 사용한 skin depth의 산정 대신 대비 시험편을 이용한 결함 신호 결과의 분석을 통하여 주파수를 선정하였다. 시험은 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1k, 2k, 4k, 8k, 16kHz의 주파수에서 결함 신호를 측정하였는데 100Hz와 200Hz를 제외한 주파수에서는 표면 거칠기 등의 잡음으로 인해 결함 탐지가 잘 안되었다.

따라서 본 연구에 나타난 결함 신호는 100Hz에서 측정된 결과이며 이는 자기 포화를 하지 않은 상태로 본 연구에서 사용한 강자성 튜브의 검사 주파수로서 가장 적당한 것이다. 한편 탐상 시험 시 튜브의 진동 등에 의한 잡음 신호는 와전류 탐상 장비 모니터 상에서 수평 방향으로 나타나게 하여 수직 방향(Y축 방향)으로의 신호 발생을 제한하도록 위상을 조절하였다. 이러한 작업은 와전류 탐상시 기본적으로 이루어지는 것으로 결함과 잡음 신호를 구별하기 위한 것이다.

제작된 탐촉자와 장비를 이용하여 결함에 대하여 시험한 결과를 Fig. 6~Fig. 9에 나타내었다. Fig. 6, Fig. 7에서는 와전류 신호가 임피던스 평면에서 2차원으로 나타나므로 X축, Y축 그리고 전압의 진폭을 별도로 나타내었으며 위상의 변화를 관찰하기 위해 X-Y 모드에서의 그래프를 Fig. 8, Fig. 9에 별도로 표시하였다.

Fig. 6은 강관 외벽에 축 방향으로 가공한 시험편을 검사한 것이며 Fig. 7은 외벽에 원주 방향으로 가공한 결함에 대한 결과이다. 시험 결과 제작된 탐촉자로 외부의 축 방향 결함이나 원주 방향 결함의 탐지능은 강관 결함 탐지에 충분히 사용될 수 있는 것으로 판단된다. 잡음 신호를 수평으로 맞추었을 때 발생하는 결함 신호의 Y축 성분은

그림에서 나타나 있듯이 기타 잡음에 비해 뚜렷이 구분이 가능하다. 축 방향, 원주 방향 공허 깊이 0.5 mm~관통 결함에 대한 신호를 Fig. 6, Fig. 7의 Y축 성분 그래프에서 찾을 수 있다. 그러나 결함 크기에 따른 신호의 크기가 반드시 일치하지는 않았는데 그것은 국부적인 재료 성질의 차이와 코일과 결함사이의 간격이 스캔하는

동안 조금씩 차이가 나는 이유로 판단된다. 결함 깊이 증가에 따른 위상의 변화는 Fig. 8과 Fig. 9에서 보듯이, 신호의 폭이 오토 밸런스 기능을 사용치 않고 상자성체를 시험할 때와는 달리, 좁고 미끈하지 않아 뚜렷이 구분할 수는 없었으나 결함 깊이 증가에 따라 신호가 수직 방향으로 일어서는 경향을 볼 수 있었다.

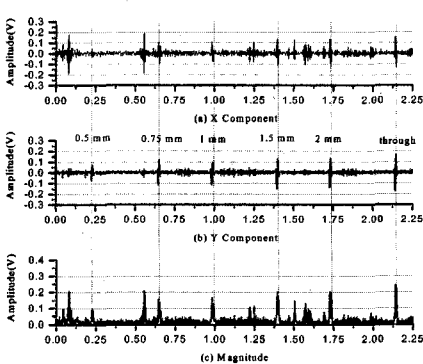


Fig. 6 Eddy current signal from longitudinal flaws in the steel tube

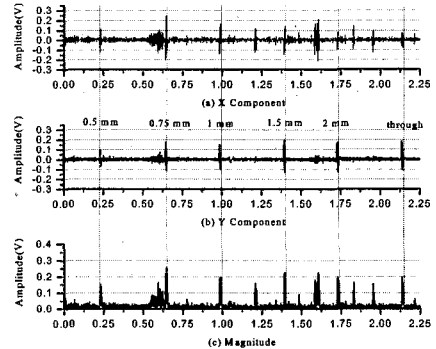


Fig. 7 Eddy current signal from circumferential flaws in the steel tube

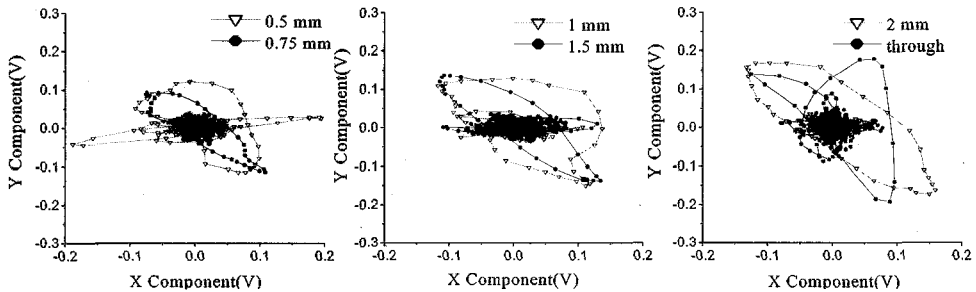


Fig. 8 Display of the signal shown in Fig. 6 in impedance plane

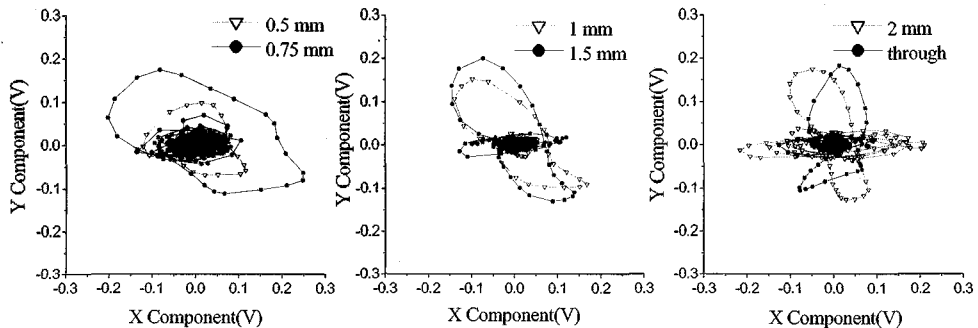


Fig. 9 Display of the signal shown in Fig. 7 in impedance plane

특히 상자성체의 경우 축방향의 결함이 원주 방향의 결함에 비하여 큰 신호를 발생시키는데 반하여 강자성체에서는 방향에 따른 신호 세기의 변화가 뚜렷하지 않았다. 그 이유로서는 강자성체에서 발생하는 신호 발생이 자기장과 와전류의 두 가지 종류의 신호원에서 비롯하기 때문으로 판단된다. 즉 축 방향 결함의 경우 와전류의 변화가 큰 반면 자기장의 변화가 작고 원주 방향 결함의 경우 와전류 변화가 작은 대신 자기장 변화가 크게 발생하는 것이다[7].

본 연구에서 개발된 탐촉자와 일반 probe형 탐촉자를 사용한 결과를 비교하기 위해서 모든 조건을 동일하게 설정하고 축 방향 결함 중에서 가장 깊은 깊이 2mm, 관통 결함에 대해서 시험한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 일반 관통형 코일 대신 probe형과 비교한 이유는 연속된 튜브의 경우 probe형만이 적용될 수 있기 때문이다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 결함 부위에서 신호는 분명히 발생하였으나 진동 등으로 인해 결함이 없는 부위에서 발생하는 잡음 신호와 구별이 잘 안되었다. 따라서 결함 탐지능에 있어 본 연구에서 개발된 open-connect형의 탐촉자는 단순히 probe형의 탐촉자를 사용하는 것 보다 우월하다고 할 수 있다.

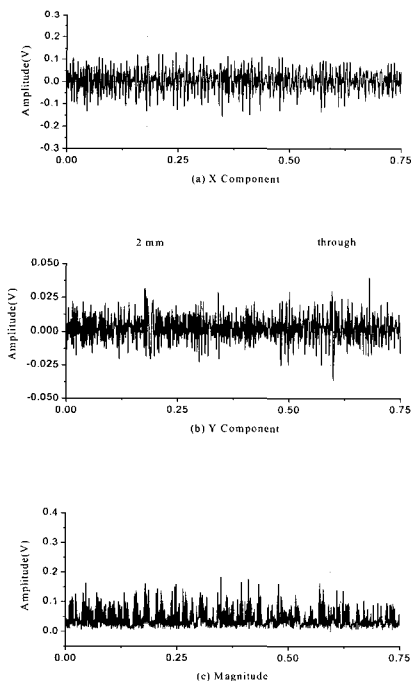


Fig. 10 Eddy current signal from longitudinal surface flaws using a commercial surface probe

5. 결 론

개폐가 가능한 탐촉자를 개발함으로써 그 동안 와전류 탐상이 곤란했던 연속된 튜브류에도 와전류 탐상법의 적용이 가능하도록 하였다. 본 연구에서 제작한 탐촉자가 검출한 표면 결함의 최소 깊이는 외부 크랙 형태의 결함에 대하여 두께의 약 19% (0.5mm/ 2.65mm) 정도이다. 이러한 성능을 고려할 때, 미지의 크랙 형태의 결함도 충분히 탐지가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 탐촉자를 이용하여 결함의 깊이나 결함의 방향 등에 대한 정량적 해석은 아직 이루어지지 못하였으나 지속 누설 탐상법 등도 역시 정량적 해석이 곤란하나 나름대로 널리 사용되고 있는 점을 고려할 때, 개발된 개폐식 탐촉자의 이용가치는 충분히 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] H. Kwun and K. A. Bartels, "Magnetostrictive sensor technology and its applications," *Ultrasonics* Vol. 36, pp. 171-178 (1998)
- [2] D. L. Atherton, W. M. Czura and D. D. Mackintosh, "Remote field eddy current defect interaction: effects on the external field," *Mat. Eval. Nov.* (1994)
- [3] Young-Kil Shin, "원격장와전류 효과를 이용한 관외부에서의 탐상 방법에 관한 수치해석 연구", KSNT/FC0006 한국비파괴검사학회 추계학술발표회, 서울교육문화회관 (2001)
- [4] C. Kittle "Introduction to solid state physics," 5th edition, pp. 484 (1984)
- [5] Young-Joo Kim, Jae-yel Yi, and Sekyung Lee, "Eddy current test of steel tube employing electromagnet technique for DC magnetization," *J. Appl. Phys.* 60(9), Nov. (1986)
- [6] V. S. Cecco, "Design and specifications of a high saturation absolute eddy current probe with internal reference," *Mat. Eval.* 37, 51 (1984)
- [7] 이세경 외, "와전류 탐사용 탐촉자 개발 2차년도," pp. 96 (1988)