

증기발생기 전열관의 형상변화 측정기술 개발

Development of a Unique Technique Measuring the Shape Transition of Steam Generator Tubes

최명식, 허도행, 이덕현, 한정호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

원자력발전소 증기발생기 전열관, 복수기 전열관, 화력발전소 전열관 등 열교환기 전열관의 내외면에는 함몰(dent), 돌출(bulge), 편심(eccentricity), 편향(deflection) 등의 형상 변화가 존재한다. 종래의 와전류 검사방법은 균열, 마모, 핏팅, 입계부식 등의 결함을 검출하는 방법이므로, 형상 변화에 대한 탐지와 정량화가 불가능할 뿐만 아니라, 형상변화 측정용 와전류 탐촉자는 개발되어 있지 않다. 본 연구에서는 형상 변화의 3차원적인 크기를 정량적으로 측정할 수 있는 탐촉자를 개발하였으며, 기존 탐촉자와 비교하여 신호 특성을 기술하였다. 이러한 형상 변화는 전열관에 결함을 유발하는 구조적인 인자로 작용하기 때문에, 개발된 탐촉자를 이용할 경우 확관 조건 최적화, 미세 형상 변화를 갖는 전열관의 선별 및 관리를 통하여 전열관의 건전성 향상에 기여할 것으로 판단된다.

Abstract

Heat exchanger tubes for nuclear steam generator and condenser contain the shape transitions on their inner or outer surfaces such as dent, bulge, eccentricity, deflection, etc. The shape transitions can not be detected and sized using the traditional eddy current probes which are currently applied during the in-service inspection. In this paper, a new eddy current probe is developed to measure a three-dimensional size of the shape transition and the signal characteristics of several shape transitions between

the new developed probe and the traditional ones are compared. It is expected that the advanced probe and its technique can be effectively used for an optimization of the tube expansion process and detection and management of shape-deformed tubes.

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기 전열관, 복수기 전열관, 화력발전소 전열관 등 열교환기용 전열관의 내외면에는 균열, 마모, 핏팅, 입계부식 등의 결함이 존재할 수 있으며, 이의 검출을 위한 비파괴적 방법의 하나로써 와전류 검사법이 이용되고 있다[1,2]. 또한 이들 전열관 내외면에는 여러 유형의 국부적인 형상 변화가 존재할 수 있다. 즉, 전열관의 내경방향으로 찌그러져 들어오는 함몰 (dent), 외경방향으로 부풀어 나오는 돌출 (bulge), 전열관 중심축이 급격히 이격되는 편심 (eccentricity), 전열관 중심축을 유지하되 구부러지는 편향 (deflection) 등이 이에 해당한다.

종래의 와전류 검사방법은 근본적으로 전열관의 균열, 마모, 핏팅, 입계부식과 같은 결함을 검출하는 방법이므로, 상기한 여러 유형의 형상 변화에 대한 탐지와 그 크기에 대한 정량화가 불가능할 뿐만 아니라, 형상변화 측정용 탐촉자는 개발되어 있지 않다. 다만 종래의 와전류 탐상용 탐촉자의 하나인 실패형 탐촉자 (bobbin probe)를 이용할 경우, 비록 신뢰성이 낮다하더라도 돌출과 함몰이 전열관의 길이 방향으로 어느 위치에 존재하는지는 검출할 수 있다. 그러나 돌출과 함몰이 전열관의 원주 방향으로 분포하는 각도의 크기와, 직경방향으로의 크기가 얼마인지에 대해서는 전혀 정보를 얻을 수가 없다. 즉, 1차원적인 위치 정보만을 줄 수 있으며, 3차원적인 입체적 형상 정보를 얻을 수가 없다. 또한 전열관의 편심이나 편향의 유무 및 그 크기에 대하여는 어떠한 정보도 얻을 수가 없는 상태이다.

이러한 형상 변화는 전열관에 국부적인 응력을 야기하여 결함, 특히 균열성 결함을 유발하는 구조적인 인자로 작용하기 때문에, 형상 변화를 갖는 전열관을 사전에 선별하고, 형상 변화의 3차원적인 크기를 정량적으로 측정할 수 있는 탐촉자의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 열교환기 전열관의 내외면에 존재할 수 있는 함몰, 돌출, 편심, 편향 등 형상변화의 존재 유무와 이들의 전열관 길이방향 위치는 물론 원주방향상의 분포와 직경방향으로의 크기를 3차원으로 측정할 수 있는 와전류 탐촉자를 개발하였으며, 여러 형상변화에 대한 신호특성을 기존 탐촉자와 비교하여 기술하고자 한다.

2. 탐촉자의 제작

형상변화를 측정하기 위해서는 와전류 코일에 의하여 유도되는 신호진폭의 크기가 피 검사체와의 거리와 상호 연관되어야 한다. 또한 형상변화는 부피를 갖기 때문에 코일의 방향성에 의하여 와전류 신호가 상쇄되지 않아야 한다. 본 연구에서 개발한 탐촉자는 이러한 두 가지 원리에 근거하여 제작하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 개발한 탐촉자의 기본 모형을 도시한 것이다. 본 탐촉자는 맴돌이 형태로 와전류 코일을 권선하여 원통형의 코일 지지몸체에 삽입 장착하되, 와전류 코일과 코일 지지몸체는 피검사체인 전열관의 내면과 접촉함이 없이 항상 일정 이격 간격을 유지하도록 설치하였다. 코일 지지몸체는 상부 지지몸체와 하부 지지몸체에 고정되고, 상하부 지지몸체들은 전열관 내부에 삽입되었을 때 몸체가 전열관 내면과 접촉함이 없이 일정한 이격 간격을 유지하면서 중심을 유지할 수 있도록 몸체의 선단과 후단에는 전열관 내면과 탄성을 갖고 접촉하는 중심 유지용 지지발에 의하여 지지되도록 한다. 탐촉자의 회전과 직선 이동시 지지몸체들은 회전과 직선 이동하되, 중심 유지용 지지발은 회전 없이 직선이동만 이뤄지도록 베어링을 설치하였다. 물론 원통형의 지지몸체들의 내부공간에는 교류 송신 및 와전류신호 수신용 코일 도선이 커넥터 소켓으로 연결되며, 커넥터 고정 너트를 이용하여 모터 유닛과 연결되도록 하였다. 이와 같은 기본 모형 이외에 본 탐촉자는 와전류 코일과 전열관 내면과의 이격 거리 및 탐촉자 길이를 임의로 조절할 수 있는 형태로 변형하여 제작이 가능하도록 설계하였다.

3. 신호특성 비교

Fig. 2는 전열관의 길이방향으로 임의의 위치(z_1)에 1개의 함몰 형상을 형성시킨 다음 (Fig. 2-a), 실패형 와전류 탐촉자로 취득한 와전류 신호(Fig. 2-b)와 본 연구에서 개발된 와전류 탐촉자로 취득한 신호(Fig. 2-d)를 비교한 것이다. 전열관의 길이방향을 z , 원주방향을 θ , 전열관의 두께방향을 r 로 정의할 때, 특히 θ 는 기준점으로부터 0에서 360도의 범위를 갖는다. Fig. 2-b의 실패형 탐촉자에서 나타난 와전류 신호는 진폭의 변화가 나타나는 곳이 함몰이 존재하는 위치를 나타내 주고 있는데, 이는 곧 함몰이 존재하는 전열관의 길이방향 위치는 z_1 임을 표시한다. 그러나 전열관의 원주방향 위치에 대한 정보는 근본적으로 제공하지 못함을 알 수 있다. 반면에 본 연구에 의한 와전류 탐촉자가 보여주는 신호는 Fig. 2-c에서 산봉우리처럼 나타난 부분이 함몰이 존재하는 부분으로서, 함몰 위치에서 와전류 코일과의 거리가 가까워지므로 진폭이 증가하여 이와 같은 진폭변화 형상을 나타내게 된다. 이 경우 전열관의 기준점으로부터 함몰이 존재하는 길이방향으로의 위치

는 z_1 , 원주방향으로의 위치는 180 ± 10 도 범위를 각도로서 분명히 보여주고 있다. 또한 형상변화가 없는 부분은 편평한 모양을 나타내지만, 함몰의 형상변화에 의한 와전류 신호 진폭의 크기가 커지는 부분은 산봉우리의 형태로 나타나게 되는데, 산봉우리의 높낮이가 곧 전열관의 두께방향, r 방향으로의 찌그러져 들어온 정도를 나타낸다. 즉, 산봉우리의 높이가 클수록 전열관의 내경방향으로 함몰되어 들어온 정도가 크다는 것을 의미한다. 따라서 산봉우리를 형성하는 각각의 (z, θ) 좌표에서 와전류 신호진폭의 크기를 측정하여 다음 표준시편의 신호진폭과 비교하면 직경방향으로의 크기(r)를 환산할 수 있으므로 함몰의 형상에 대한 3차원적인 크기를 정량화할 수 있게 된다.

Fig. 3은 전열관의 동일한 길이방향 위치(z_2)에 원주 방향으로 140도의 간격을 갖는 두 개의 함몰을 형성시킨 다음(Fig. 3-a), 실패형 와전류 탐촉자로 취득한 와전류 신호(Fig. 3-b)와 본 연구에서 개발된 와전류 탐촉자로 취득한 와전류 신호(Fig. 3-c)를 비교한 것이다. Fig. 3-b에 알 수 있듯이 두 개의 함몰이 존재함에도 불구하고 실패형 신호진폭의 변화가 하나의 위치 z_2 에서만 나타나고 있다. 결국 함몰이 하나만 존재한다는 잘못된 진단을 내리게 하는 결과를 초래한다. 이는 Fig. 2에서 기술한 바와 같이 실패형 탐촉자는 근본적으로 원주방향 위치에 대한 정보를 제공할 수 없는 단점을 가지고 있기 때문이다. 그러나 본 연구에 의한 와전류 탐촉자가 보여주는 신호는 Fig. 3-c에서 볼 수 있는 바와 같이, 동일한 길이방향 위치인 z_2 에서 두 개의 산봉우리가 θ 방향으로 각각 110 ± 10 도와 250 ± 10 도 위치에서 선명하게 나타나고 있으므로 두 개의 함몰이 존재함을 명확히 보여준다. 또한 Fig. 2-c에서 기술한 바와 같이 산봉우리를 형성하는 각각의 (z, θ) 좌표에서 와전류 신호진폭의 크기를 측정하여 다음 표준시편의 신호진폭과 비교하면 직경방향으로의 크기(r)를 환산할 수 있으므로 함몰의 형상에 대한 3차원적인 크기를 정량화할 수 있게 된다.

Fig. 4는 전열관의 길이방향으로 임의의 위치(z_3)에 1개의 돌출 형상을 형성시킨 다음(Fig. 4-a), 실패형 와전류 탐촉자로 취득한 와전류 신호(Fig. 4-b)와 본 연구에서 개발된 와전류 탐촉자로 취득한 와전류 신호(Fig. 4-c)를 비교한 것이다. 여기서 돌출이라함은 함몰과 반대되는 개념으로서 전열관의 외경방향으로 튀어나간 형상을 의미한다. Fig. 4-b의 실패형 탐촉자에서 나타난 와전류 신호는 진폭의 변화가 나타나는 곳이 돌출이 존재하는 위치를 나타내 주고 있는데, 이는 곧 돌출이 존재하는 전열관의 길이방향 위치는 z_3 임을 표시한다. 그러나 실패형 탐촉자는 근본적으로 원주방향 위치에 대한 정보를 제공할 수 없는 단점을 가지고 있기 때문에 돌출이 원주방향상으로 어느 각도에 존재하는가는 알 수 없음을 알 수 있다. 반면에 본 연구에 의한 와전류 탐촉자가 보여주는 신호는 도 Fig.

4-c에서 움덩이처럼 나타난 부분이 돌출이 존재하는 위치로서, 전열관의 기준점으로부터 돌출이 존재하는 길이방향으로의 위치는 z_3 , 원주방향으로의 위치는 170 ± 10 도 범위임을 각도로서 분명히 보여주고 있다. 함몰과 돌출은 전열관 두께방향으로 서로 반대의 방향을 갖는다. 즉 함몰은 $+r$ 의 방향을, 돌출은 $-r$ 의 방향을 갖는다. 따라서 함몰은 산봉우리처럼 나타나 돌출은 움덩이처럼 나타난다. 그러므로 움덩이의 깊이가 곧 전열관의 외경방향, $-r$ 방향으로의 튀어나온 정도를 나타낸다. 즉, 움덩이의 깊이가 깊을수록 전열관의 외경방향으로 돌출되어 나온 정도가 크다는 것을 의미한다. 따라서 움덩이를 형성하는 각각의 (z, θ) 좌표에서 와전류 신호진폭의 크기를 측정하여 다음 표준시편의 신호진폭과 비교하면 직경방향으로의 크기(r)를 환산할 수 있으므로 돌출의 형상에 대한 3차원적인 크기를 정량화할 수 있게 된다.

Fig. 5는 전열관이 전열관판(tube sheet)에 확관되어 고정될 때, 전열관판 내부의 확관부와 전열관 상부의 비확관부가 서로 동심(concentricity)을 이루고 있는 확관형상(Fig. 5-a)과 편심(eccentricity)을 이루고 있는 확관형상(Fig. 5-b)으로서, 실패형 와전류 탐촉자로 취득한 와전류 신호(Fig. 5-c, d)와 본 연구에서 개발된 와전류 탐촉자로 취득한 와전류 신호(Fig. 4-e, f)를 비교한 것이다. 여기서 동심이란 Fig. 5-a에 도시한 바와 같이 확관 천이부 영역에서 전열관판 내부의 확관부 전열관의 중심축이 전열관 상부의 비확관부 중심축과 일치선을 유지하는 것을 말한다. 또한 편심이란 Fig. 5-b에 도시한 바와 같이 확관 천이부 영역에서 전열관 지지판 내부의 확관부 전열관의 중심축과 전열관 상부 비확관부 중심축이 서로 일치하지 않고 급격히 이격된 상태를 뜻한다. 기존 실패형 와전류 탐촉자를 이용하여 동심 확관형상을 검사한 와전류 신호를 Fig. 5-c에, 편심 확관형상을 검사한 와전류 신호를 Fig. 5-d에 나타내었다. 동심과 편심확관의 형상이 명백히 다름에도 불구하고 실패형 탐촉자의 신호들은 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 종래의 탐촉자로는 편심 형상은 물론 확관 천이부의 불균일성을 측정하는 것이 불가능함을 보여준다. 한편 본 발명에 의한 와전류 탐촉자를 이용하여 동심 확관형상을 검사한 와전류 신호를 Fig 5-e에, 편심 확관형상을 검사한 와전류 신호를 Fig 5-f에 나타내었다. 동심 확관형상은 와전류 진폭신호가 편평하게 나타나나(Fig 5-e), 편심 확관형상은 두 개의 산과 골짜기 형상의 진폭신호 변화를 나타냄으로써 명백히 구별된다(Fig 5-f). 따라서 편심 형상변화는 물론 확관 천이부의 불균일성을 측정할 수 있음을 알 수 있다. 또한 Fig 5-f에서 세로축은 전열관 길이방향인 z 좌표, 가로축은 전열관 원주방향인 θ 좌표에 해당하므로 편심의 위치와 원주상의 방향을 측정할 수 있고, 산과 골짜기의 진폭신호의 크기를 측정함으로써 전열관 내경 및 외경방향(r)으로의 중심축의 이격 거리, 즉 편심의 크기를 정량화 할 수

있으므로 결국 3차원적인 크기 정량화가 가능하다.

Fig. 6은 편향된 형상을 갖는 전열관에 대한 종래의 실패형 와전류 탐촉자의 신호와 본 발명에 의한 와전류 탐촉자의 신호를 비교한 것이다. 여기서 편향이란 Fig. 6-a에 도시한 바와 같이 전열관의 길이방향으로 특정한 위치를 기준으로 전열관이 구부러지되, 전열관 상부의 중심축과 하부의 중심축이 이격되지 않은 상태를 의미한다. 이에 대한 종래의 실패형 와전류 탐촉자의 신호는 Fig. 6-b에 나타난 바와 같이 편향의 경계인 z_4 를 기준으로 와전류 신호의 변화가 전혀 탐지되지 않는다. 그러나 본 발명에 의한 와전류 탐촉자의 신호는 Fig. 6-c에 나타난 바와 같이 분명한 신호의 변화를 보여줌으로써 편향 전열관을 탐지할 수 있음을 알 수 있다.

4. 활용방안 및 결론

이상에서 새로 개발된 와전류 탐촉자는 열교환기 전열관의 내외면에 존재할 수 있는 함몰, 돌출, 편심, 편향 등 형상변화의 존재 유무와 이들의 전열관 길이방향 위치는 물론 원주방향상의 분포와 직경방향으로의 크기를 3차원적으로 측정할 수 있음을 밝혔다.

전열관의 형상변화에 의한 소성변형은 전열관에 응력을 부가하므로써 균열성 결함의 생성 및 성장을 용이하게 한다. 특히 전열관판, 전열관 지지판, 반진동 구조물 등 전열관이 지지되고 있는 부위에서의 형상변화는 구조물과의 접촉 형상을 변화시켜 부식환경을 조장할 수 있다. 따라서 본 탐촉자와 기술은 형상변화가 없는 열교환기의 제작을 위하여 최적의 전열관 확관공정을 수립하는 단계 및 제작단계에서 전열관의 형상변화 유무와 그 정도를 측정하는데 활용될 수 있다. 또한 가동중인 전열관에 대하여 적용할 경우 결함 발생 원인 규명 및 형상변화 전열관의 관리에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력연구개발 중장기 사업으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- [1] J. Siegel, Detecting SG tube cracks in difficult places, Nuclear Engineering International, 41, p.18 (1996).
- [2] NDE/ISI Issue Resolution Group, PWR Steam Generator Examination Guidelines, Rev.5, Vol. 1: Requirements, EPRI TR-107569-V1R5, EPRI, (1997).

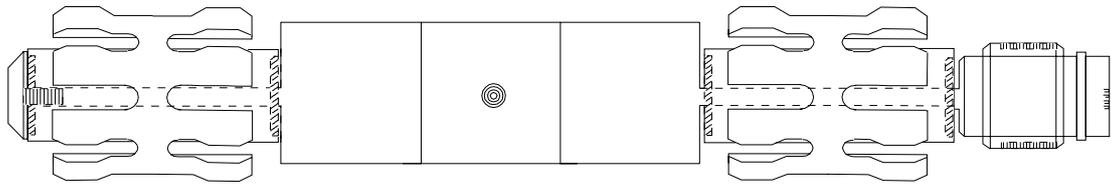


Fig. 1 Schematic of a new eddy current probe for measuring the shape transition of heat exchange tube.

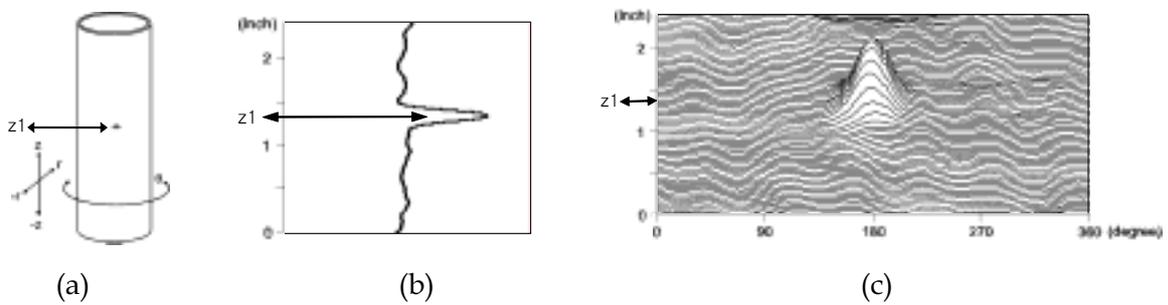


Fig. 2 Eddy current signals of a dented tube: (a) tube with a dent, (b) signal from the bobbin probe and (c) signal from the new probe.

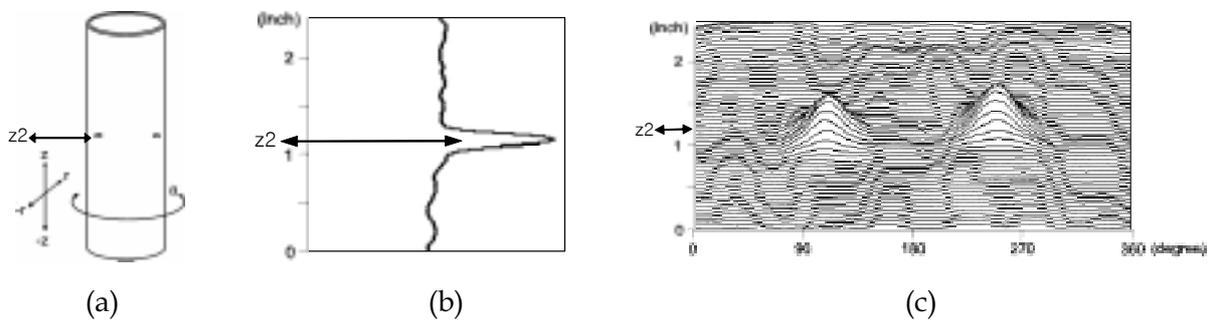


Fig. 3 Eddy current signals of a dented tube: (a) tube with two dents, (b) signal from the bobbin probe and (c) signal from the new probe.

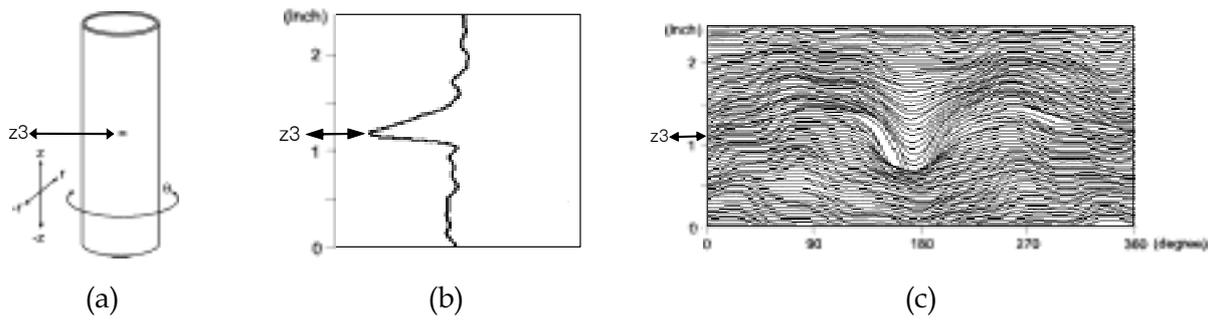


Fig. 4 Eddy current signals of a bulged tube: (a) tube with a bulge, (b) signal from the bobbin probe and (c) signal from the new probe.

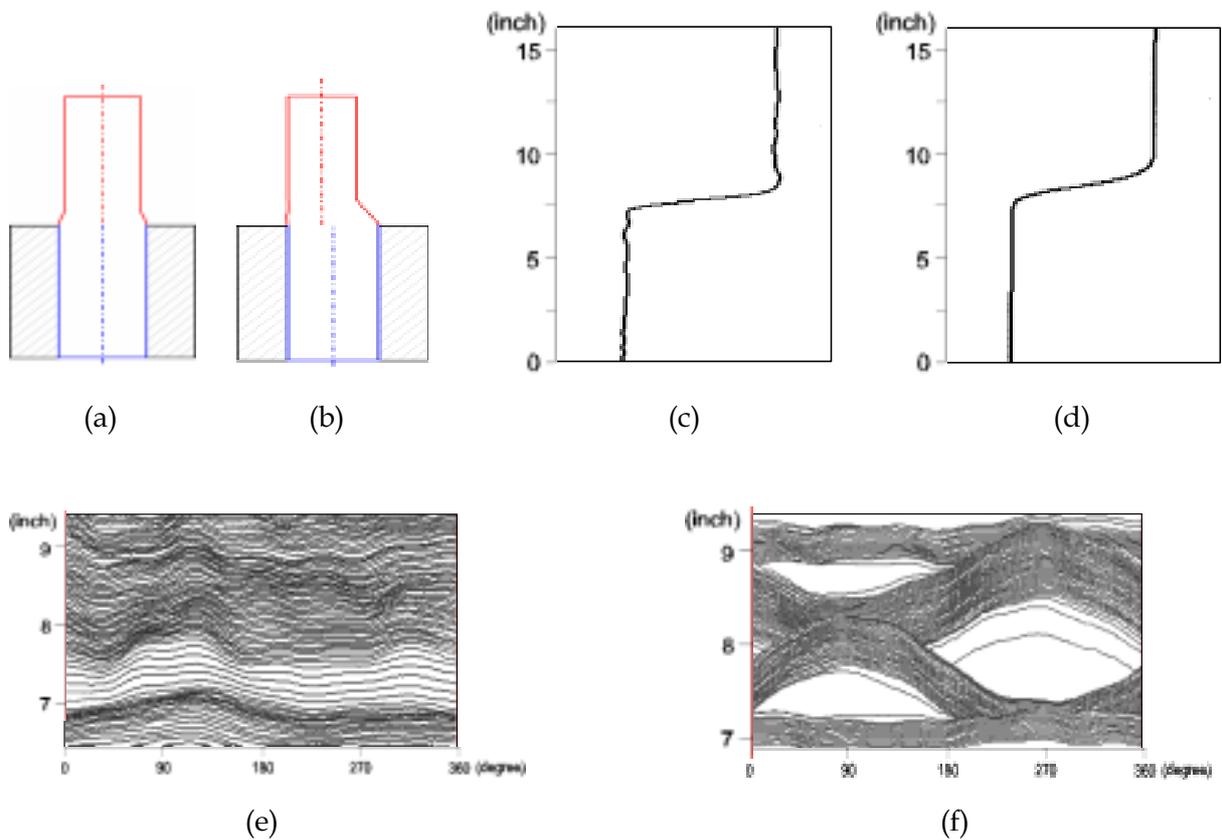


Fig. 5 Eddy current signals of the expanded tubes: (a) tube with a concentric expansion shape, (b) tube with an eccentric expansion shape, (c) bobbin signal from the concentric expansion shaped tube, (d) bobbin signal from the eccentric expansion shaped tube, (e) new probe signal from the concentric expansion shaped tube and (f) new probe signal from the eccentric expansion shaped tube.

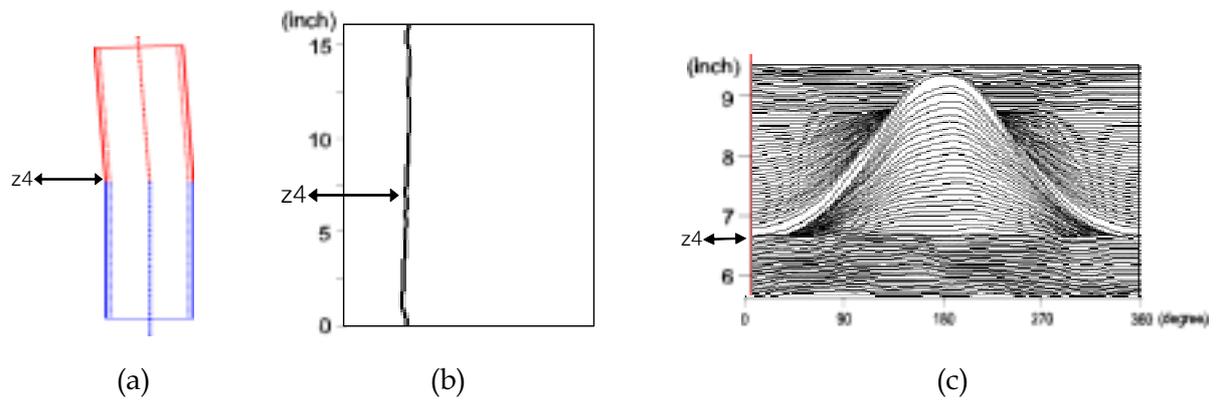


Fig. 6 Eddy current signals of a deflected tube: (a) tube with a deflection, (b) signal from the bobbin probe and (c) signal from the new probe.