2000 추계학술발표회
한국원자력학회

증기발생기 전열관 자연결함시편을 이용한 와전류탐상 특성평가

Evaluation of ECT Characteristics using Natural Flaw Specimen of Steam Generator Tube

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

요 약

원전 증기발생기 전열관에 대한 가동중 와전류 검사의 신뢰성을 높이기 위해서는 전열관에서 발생하는 실제와 동일한 부식결함을 제작한 다음 모의과정을 통하여 얻어지는 신호를 해석, 평가하여 장비 및 검사자의 기량을 검증하고 향상시킬 수 있는 기술개발이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 Alloy 600 증기발생기 전열관 내면의 PWSCC와 외면의 IGA를 모의하는 두 종류의 자연결함을 제작하고 이들 자연결함에 대한 와전류탐상을 실시하여 이의 결과와 파괴검사 결과를 비교평가 하므로서 와전류탐상 특성을 평가하였다.

Abstract

The development of the integrated technology including fabrication of corrosion defect specimens and their practical use is needed to enhance the reliability of eddy current test for nuclear steam generator tubing. In this paper, ECT characteristics are evaluated comparing with destructive examination for two kinds of natural flaw specimens simulating PWSCC and IGA of Alloy 600 steam generator tube.

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기 전열관은 가동중에 1차측 응력부식균열(primary water stress corrosion cracking, PWSCC), 2차측 응력부식균열(outer diameter stress corrosion cracking, ODSCC), 입계부식(intergranular attack, IGA), 핏팅(pitting), 덴팅(denting), 두께감소, 마모 등의 매우 다양한 부식 및 기계적 손상을 겪고 있다. 이러한 손상은 1차측 냉각재가 2차측으로 누설되어 계통을 오염시키는 사고의 원인이 되며, 심한 경우 전열관 파열사고[1]를 유발하게 된다. 이는 곧 발전소의 불시정지 또는 1차측 냉각재의 급격한 손실에 의한 core melting 사고로 이어질 수 있기 때문에 발전소의 가동 안전성을 크게 위협하는 인자로 작용하고 있다. 따라서 각 발전소에서는 매 주기마다 ECT 검사를 실시하고 있으며, 이 자료를 근거로 손상된 전열관을 sleeving 하여 보수하거나 plugging 하여 가동에서 제외시키고 있다. 일정 기준의 관막음률을 초과할 경우에는 증기발생기 자체를 교체하고 있으므로 막대한 경제적 손실을 초래하고 있다.

증기발생기의 가동중 검사의 신뢰성은 전열관의 결함을 탐지하고 그 크기를 정확히 측정하는데 달려 있으며, 이는 곧 결함의 길이 및 깊이 제한치 등의 보수기준과 직결되기 때문에 가동 안전성을 좌우하는 핵심 사안임을 알 수 있다. 즉, 결함의 크기를 실제보다 과소평가할 경우 관막음 기준을 넘는 균열이 발생된 전열관이 가동중에 있게 되므로 다량의 1차 냉각재 누설 사고나 가동중 전열관 파열사고의 위험이 우려된다. 또한 결함의 크기를 실제보다 과대평가할 경우 더 가동해도 무방한 전열관을 관막음해야 하기 때문에 가동율 저하에 의한 경제적 손실을 야기하게 된다.

본 연구에서는 국내 원전 증기발생기 가동중에 발생되는 확관부위에서 1차측 응력부식균열(PWSCC)과 2차측에서 발생되는 입계부식(IGA)를 모의하는 두 종류의 자연결함을 제작하여 이들 자연결함에 대한 와전류탐상을 실시하여 이의 결과와 파괴검사 결과를 비교평가 하므로서 와전류탐상 특성을 평가하였다.

2. 실 험

실험에 사용된 재료는 한국형 표준원전 증기발생기에 사용되고 있는 외경 19.05mm 두께 1.07mm의 Alloy 600 전열관이며 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of Alloy 600

C	Si	Mn	Ni	Cr	P	S	Co	Al	Ti	N	Cu	Fe	B
0.025	0.16	0.23	75.14	15.46	0.008	0.001	0.31	0.21	0.29	0.0042	0.011	8.42	0.0039

2.1 내면 축방향 결함제작

전열관 내면의 축방향 피로균열은 CEA의 Lemaignan[2]이 보고한 실험방법을 참고하여 제작한 치구를 이용하여 2.5ton 용량의 유압식 피로시험기를 사용하여 압축 하중비 0.1, 주파수 10Hz의 하중제어 조건에서 형성시켰다. 피로균열의 길이/깊이의 비율 및 절대 길이는 각각 하중판의 두께 및 최대 압축하중시 변위 변화값을 달리하여 제어하였다. 전열관 내면에 생성된 결함은 MRPC로 ECT 검사 후 파괴검사하여 두 결과를 상호 비교하였다.

2.2 입계부식 시편 제작 및 검사

전열관을 예민화 처리한 다음 40℃의 0.1 M sodium tetrathionate 용액에서 침지하여 입계부식을 형성시켰다. 이 때 결함의 형태는 전열관 외경면에서의 직경이 2~6 mm가 되도록 조절하였다. 시험후 결함을 관두께 방향으로 절단하여 단면에서의 결함 형태를 관찰하고 최대깊이를 측정하였다.

입계부식 결함에 대한 ECT 검사는 bobbin 탐촉자를 이용하였으며, 주파수 100, 300, 550 kHz에 대하여 각각 평가하였다. 이 때 깊이에 대한 정량적 평가를 위하여 사용한 표준시편은 ASME 기준으로서 20% drill hole의 신호를 550 kHz에서 5 volt로 setting하였

으며 다른 주파수에서는 이 값에 대한 상대적 진폭을 갖도록 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 축방향 내면 균열의 길이/깊이 비율 제어와 검출한계

소성변형에 의해 전열관 내면에 dent가 형성되는 경우 ECT 신호가 왜곡되기 때문에 이를 최대한 억제하기 위하여 내면의 최대 인장응력값이 항복응력을 10% 이상 초과하지 않는 피로하중 조건하에서 실험하였으며 이때 피로균열의 생성까지는 최소한 200,000싸이클 이상이 소요되었다. 또한 균열의 깊이는 길이와 비례하며 국내 원전 증기발생기 전열관(두께 1.27mm)의 경우, 약 6-7mm 이상의 길이방향 균열이 발견된 경우 누설이 시작된 것을 고려하여 약 6 정도의 길이/깊이 비율(aspect ratio)을 갖는 균열이 형성되는 조건을 하중판 두께를 변화시켜 설정하였다.

하나의 전열관에 원주방향으로 45° 의 간격으로(약 5mm거리) 길이 약 2mm의 균열 1개와 1mm 내외의 균열 2개 등 총 3개의 축방향 피로균열을 형성시킨 시편에 대한 ECT 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Pancake coil과 plus point coil 모두 1개의 결함신호만 나타났으며 각각 80% 및 27%의 결함깊이를 갖는 것으로 평가되어 탐촉자에 따른 결함평가가 크게 달라짐을 알 수 있다. 이 결함에 대한 파괴검사 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 파괴검사 결과 길이 약 2.7mm, 결함깊이 약 0.4mm(37%)로 밝혀졌다. 따라서 검출능과 S/N 비 등의 결함평가면에서 plus point coil이 훨씬 우수함을 알 수 있으며 pancake coil의 경우는 noise 신호가 커서 결함깊이를 과대평가한 것으로 보인다. Fig. 3는 비파괴검사로 검출되지 않은 나머지 두 결함의 파괴검사 사진으로 1mm 이내의 결함길이를 보이고 있다.

결함의 검출한계와 관련해서는 더 많은 결함에 대한 평가연구가 진행될 예정이지만 본 실험결과에 의하면 pancake coil과 plus point coil을 사용한 비파괴 검사에서 축방향 결함의 검출 한계는 길이 약 2mm이상의 30%이상 깊이를 갖는 결함이며 plus point coil의 신호가 검출능, 깊이평가 그리고 S/N 비 면에서 pancake coil 신호보다 훨씬 우수한 것으로 나타났다.

3.2 축방향 내면 다중결함의 평가

축방향 다중결함은 누설방지와 관련한 건전성 평가의 중요 인자로서 비파괴 방법에 의한 다중결함의 검출한계를 조사하였다. 약 2-3mm 길이의 축방향 결함을 형성시키는 조건으로 하나의 전열관 시편에 원주방향으로 2, 3, 4mm의 간격으로 갖는 4개의 축방향 피로결함을 형성시켰다. 이 시편에 대한 비파괴 검사 결과는 Fig. 4와 같으며 pan cake coil의 경우는 2개의 분리된 결함신호를, plus point coil의 경우는 결함간 간섭의 영향으로 분리되지 않은 1개의 결함신호를 보였다. Fig. 5는 이 결함의 파괴검사 사진으로 약 2-3mm 길이를 갖는 결함 4개가 2.3mm, 2.8mm, 4.2mm의 간격을 갖고 있었다. 따라서 다중 결함의 근접도 분리 한계는 pancake coil의 경우 약 4mm, plus point coil의 경우는 4mm 이상이며 축방향 다중결함의 분리 한계면에서는 pancake coil 신호가 더 우수함을 보였으나 S/N 비 는 plus point coil이 더 큼을 알 수 있었다.

3.3 입계부식 평가

생성된 입계부식에 대한 전열관 표면 및 단면방향에서의 양상을 Fig. 6에 나타내었다. 노출된 표면의 모든 결정립계에서 부식이 발생한다는 점에서 발전소에서 발견되는 결함 형태와 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나 입계부식 선단의 깊이는 위치에 따라서 다소 차이를 나타내었으므로 최대깊이를 결함의 깊이로 규정하여 평가하였다.

Fig. 7은 결함깊이와 진폭변화를 각 주파수별로 표시한 것이다. 주파수가 550, 100, 300 kHz의 순서로 결함에 대한 진폭값이 크게 나타났다. 이는 입계부식에 대한 검출능이 300 kHz에서 가장 우수함을 의미한다.

각 결함의 위상각으로부터 평가한 깊이와 실제 결함 깊이와의 관계는 Fig. 8과 같이 나타났다. 깊이가 40% 이하인 결함의 경우 ECT 예측 결과가 매우 분산되어 나타났다. 40% 이상의 깊이를 갖는 결함에 대하여는 그 숫자가 3개에 불과하나 매우 과소평가되는 것으로 볼 수 있다. 특히 실제깊이가 50~60%인 경우에 ECT로 20% 미만으로 평가되었다. 관막음 기준이 40%이므로 40% 이상의 깊이를 갖는 결함을 추가로 제작하여 이에 대한 보다 분명한 결론을 도출할 필요가 있다. 현재 이를 위한 실험이 진행중에 있다. 이상의 결과로부터 ECT에 의한 입계부식의 깊이에 대한 정량적 평가는 매우 어려움을 알 수 있다. 따라서 입계부식 결함에 대하여는 검출능에 그 의미를 부여하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

한편 주목할 점의 하나는 결함신호가 뚜렷하게 검출은 되지만 깊이는 0%로 평가된 경우가 많았다는 것이다. 이는 ASME의 20% drill hole을 표준시편으로 사용함에 따른 결과로 해석할 수 있다. 즉 입계부식은 결정립계만 부식 되고 나머지 결정립 내부는 전혀 부식되지 않고 그대로 남아 있으므로 drill hole과는 전혀 다른 물리적 특성을 나타낼 것이다. 그러므로 표준으로 사용한 20% drill hole의 위상이 20% 깊이의 입계부식 결함에서 나오는 위상과는 다를 것으로 추정된다.

4. 결 론

1) 축방향 결함의 검출 한계는 길이 약 2mm이상의 30%이상 깊이를 갖는 결함이며 plus point coil의 신호가 검출능, 깊이평가 그리고 S/N 비 면에서 pancake coil 신호보다 훨씬 우수한 것으로 나타났다.
2) 다중 결함의 근접도 분리 한계는 pancake coil의 경우 약 4mm, plus point coil의 경우는 4mm 이상이며 축방향 다중결함의 분리 한계면에서는 pancake coil 신호가 더 우수함을 보였으나 S/N 비 는 plus point coil이 더 큼을 알 수 있었다.
3) 입계부식에 대한 검출능은 주파수 550, 100, 300 kHz의 순으로 향상되었으며, 300 kHz의 경우 550 kHz에 비하여 약 2배 이상 우수하였다.
4) 입계부식의 깊이에 대한 정량적인 ECT 평가는 신뢰도가 매우 낮았다. 따라서 검출여부가 더 중요한 의미를 갖는 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 한국원자력연구소의 자체연구개발사업비의 지원으로 수행된 것입니다.

참고문헌

[1] P.E. MacDonald, V.N. Shah, L.W. Ward, P.G. Ellison, Steam Generator Tube Failures, NUREG/CR-6365 (1996)

[2] C. Lemaignan, "Controlled Cracking of Tubes," Int. J. Pres. Ves. & Piping, 15, (1984), 241

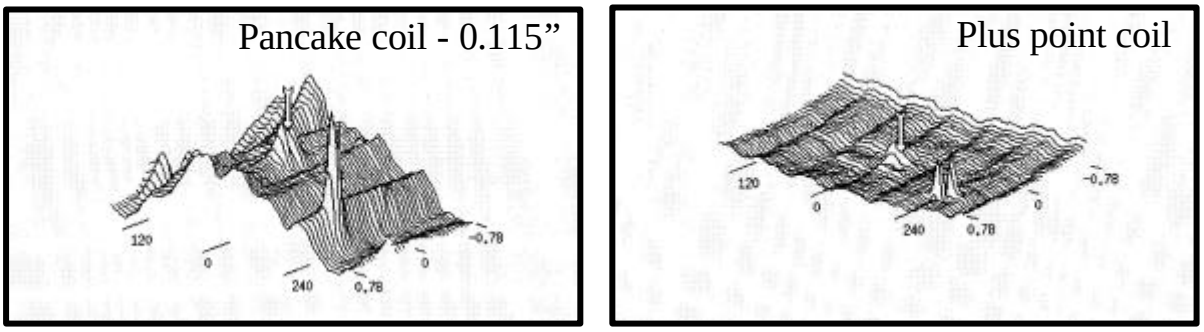
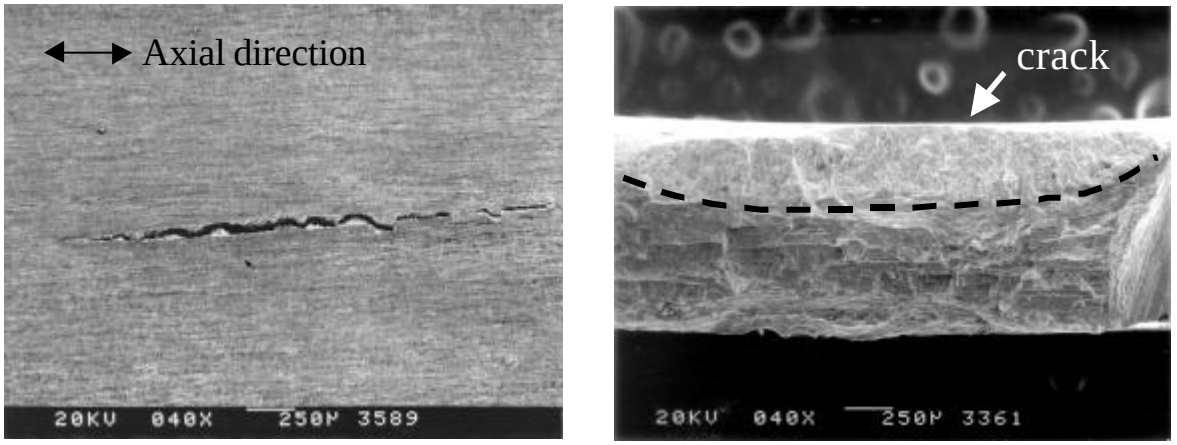


Fig. 1 MRPC C-Scan of axial cracked tube



Aspect ratio : 2.7 mm/ 0.4 mm = 6.75

Fig. 2 Cut and flattend view of axial crack

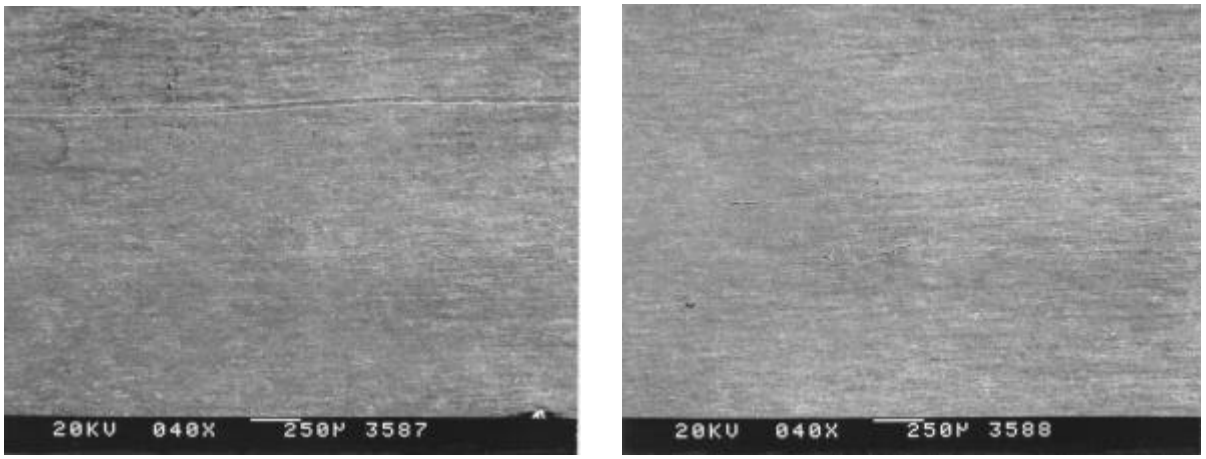


Fig. 3 Cut and flattened view of axial small cracks

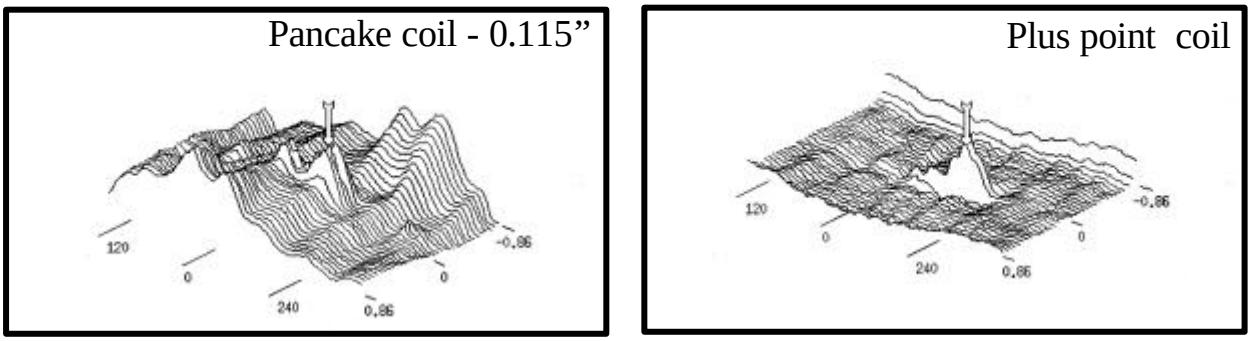


Fig. 4 MRPC C-scan of multiple axial cracked tube

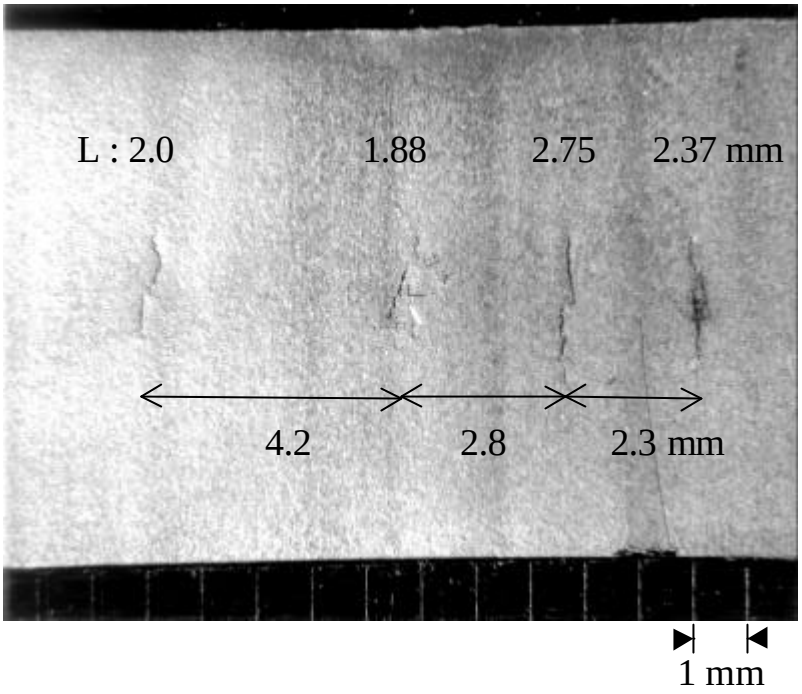


Fig. 5 Cut and flattened view of multiple axial cracks

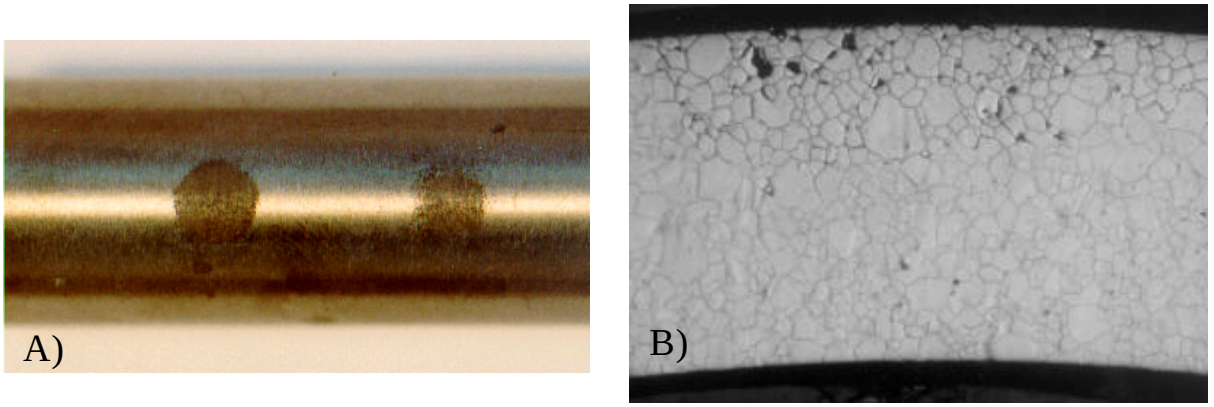


Fig. 6 IGA morphology - a) surface, b) cross section

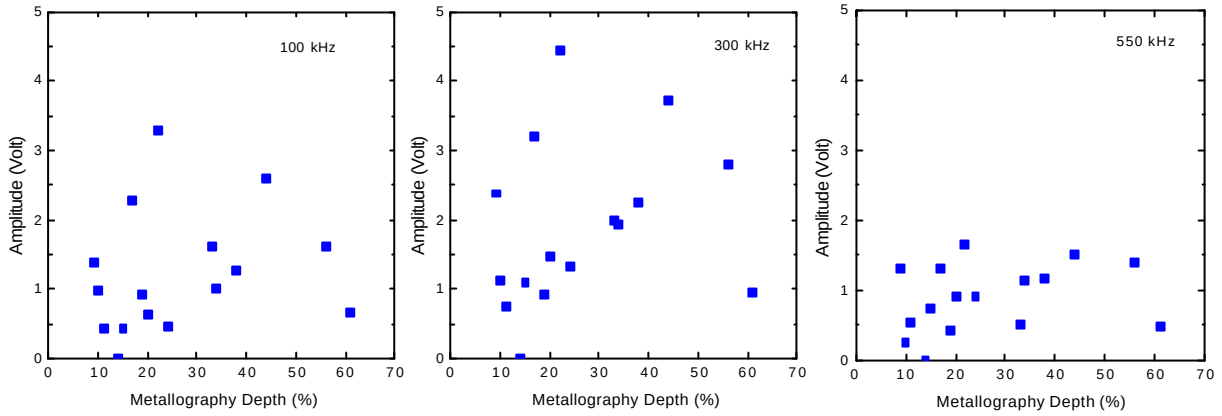


Fig. 7 Amplitude vs. metallography depth of IGA

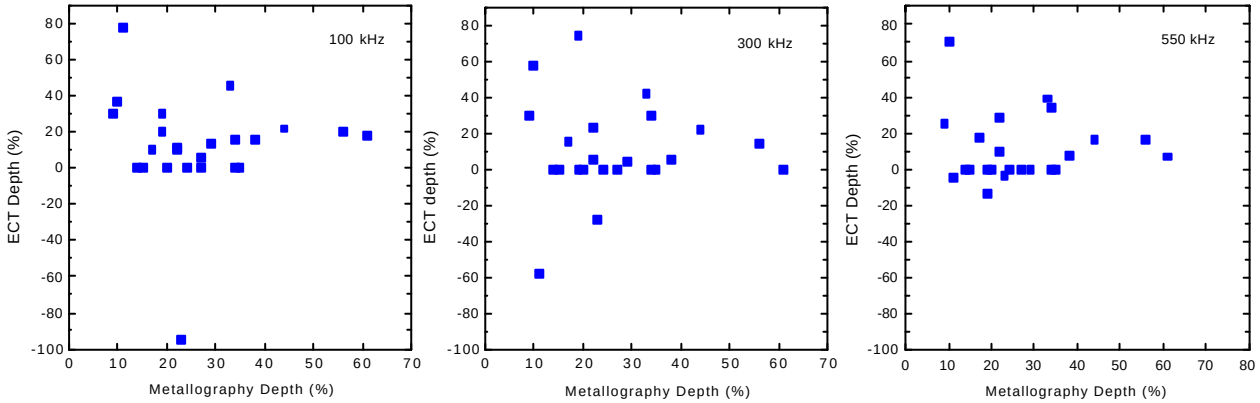


Fig. 8 ECT Depth vs. metallography depth of IGA