

음향 방출에 의한 인코넬 600 합금의 응력 부식 균열 거동 평가

성계용*, 김인섭**, 윤용구**

* 한국원자력안전기술원 계통성능그룹

** 한국과학기술원 원자력공학과

요 약 본 연구에서는 인코넬600 합금을 열처리 상태 및 변형속도 등이 서로 다른 SCC 발생 조건하에서 정변형 속도 시험법으로 인장시켜 그때 발생하는 AE신호와 균열 거동을 비교하므로써 SCC 발생 및 진전을 AE로서 적절히 탐지할 수 있는가를 연구하였고, AE로 탐지 가능한 초기의 최소 균열 크기를 측정하므로써 비파괴시험법으로서의 적용성을 평가하고자 하였다. 실험 결과, IGSCC에서 발생하는 AE amplitude 준위는 연성과파 및 기계적인 변형에서 발생하는 것들보다 큰 것으로 나타났으며, 이것은 AE amplitude 준위가 AE발생원을 식별할 수 있는 중요한 변수가 될 수 있음을 의미한다. IGSCC 미소균열의 성장 및 주균열의 형성으로부터 주균열의 성장으로 전환되는 시점을 AE로 적절히 감시할 수 있음을 보였으며, AE로 탐지 가능한 최소 균열 크기는 길이 200~400 μ m, 깊이 100 μ m 이하의 균열인 것으로 나타났다. 결론적으로 AE기술은 입계 응력 부식 균열의 진전을 조기 탐지할 수 있는 유용한 방법으로 평가되며 비파괴시험법으로서의 실제 적용 가능성도 높을 것으로 판단된다.

1. 서 론

음향방출(acoustic emission : AE)은 균열 진전과 같은 고체 내부의 국부적 응력 변화에 의해 순간적으로 방출, 전파되는 탄성 응력과 혹은 이러한 현상을 일컫는 것으로서, AE측정을 통하여 구조물의 결함을 가동중에 조기에 발견할 수 있다는 이점이 있다. 따라서 금속 재료뿐만 아니라 복합 재료에 대해서도 균열 진전 거동과 AE와의 특성이 많이 연구되었으나, 이는 주로 실험이 용이한 공기 중에서 수행된 것이다. 응력 부식 균열(stress corrosion cracking : SCC)혹은 부식 피로와 같은 부식 환경에서의 균열 진전에 대하여 AE가 수행되어 AE 측정 변수, 즉 AE event, amplitude, AE count 그리고 AE energy 등의 거동은 응력 부식 균열의 진전 거동과

매우 밀접한 상관 관계가 있음이 보고되었고,^{1)~6)} AE가 부식 환경하에서 SCC의 진과 거동을 평가할 수 있는 매우 유용한 시험 방법임을 제시하였다.

인코넬 600은 니켈 기지 합금으로 내 부식성, 고강도, 고 열전도도의 특성이 있어 원자력발전소의 증기발생기 전열관, 제어봉 동작 계통의 노즐, 일차 계통의 관통 슬리브 등에 많이 사용된다. 그러나 인코넬 600은 특정 운전 조건에서 입계 근방에 크롬 고갈 현상이 나타나 입계 응력 부식 균열이 많이 나타나고 최근 원전 구조물에서도 이에 따른 손상이 많이 보고 되고 있다.^{7), 8)} 따라서 인코넬600 구조물에 대한 SCC의 조기 탐지는 매우 중요한 일이며, SCC 방지를 위한 발생 기구에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 인코넬 600 합금을 열처리 및 변형

속도 등의 서로 다른 SCC발생 조건하에서 일정변형 속도 시험법(constant extension rate test: CERT)으로 인장시켜 그때 발생하는 AE신호와 SCC 거동과의 관계를 분석하여 SCC 발생 및 진전을 AE로 적절히 탐지할 수 있는가를 연구하였고, 아울러 AE로 탐지 가능한 초기의 최소 균열 크기를 측정하므로써 비파괴방법으로서의 유용성을 평가하고자 하였다.

2. 실험

열처리, 부식액의 농도 및 인장률이 인코넬600 합금의 응력 부식 균열에 미치는 영향은 Was 등⁹⁾에 의하여 연구되었다. 본 연구에서는 Was의 실험 결과를 SCC발생 조건으로 이용하였다. 인코넬600 합금의 열처리는 1100°C에서 1시간 동안 용체화 처리한 후에 각각 600°C에서 30시간, 650°C에서 6시간, 700°C에서 1시간 동안 열처리하여 입계 부근의 예민화도 (degree of sensitization)를 다르게 하였다. SCC실험은 이러한 시편들을 정변형 속도 시험 장치를 이용하여 상온의 부식 용액내에서 3가지의 변형 속도, 즉 1.25×10^{-4} , 2.5×10^{-5} 및 5.0×10^{-6} (mm/s) 조건에서 인장시험을 수행하였다. 이렇게 다른 열처리 조건 및 변형 속도를 적용한 것은 시편의 예민화도 및 부식침투 정도에 따라 SCC발생 및 진전 형태가 달라지기 때문에, 그때 발생하는 AE신호의 특성을 비교하기 위해서이다. 응력 부식 실험은 자연 통기되는 부식 셀에서 정변형 속도 시험(CERT)장치를 이용하여 수행하였다. 실험에 사용된 부식 용액은 0.01M의 sodium tetrathionate($Na_2S_4O_6$)이고, 인장 시편을 부식 셀에 실리콘 실란트로 고정, 밀봉시켜 부식 용액이 새는 것을 방지하였다. 부식 장치는 Fig.1과 같고 전기 화학적 전위는 포텐시오스타트(potentiostat)로서 조절하였으며 포화 칼로멜 전극(saturated calomel electrode: SCE)을 표준 전극, 백금을 대전극(counter electrode), 시편을 작용 전극(working electrode)으로 하여 실험을 수행하였다. 전기 화학적 전위차는 정전위 200mV를 사용하였으며 이 값을 선택한 이유는 이 전위차 부근에서 부동태가 형성되고, IGSCC가 잘 유발되는 영역이기 때문이다.

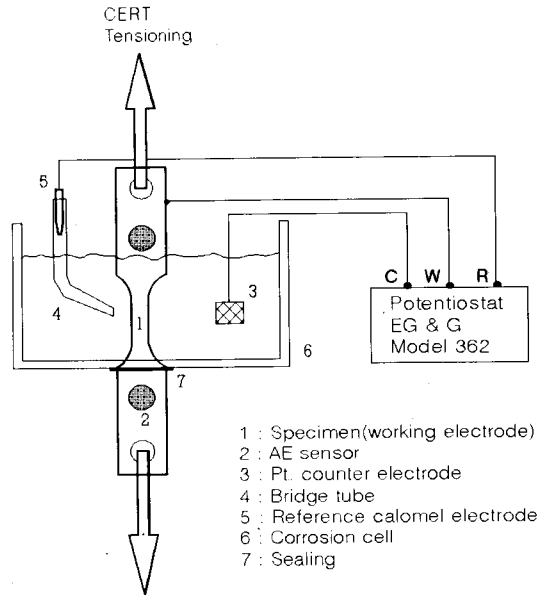


Fig. 1. Schematic diagram of the corrosion cell arrangement showing specimen, electrode and AE sensors.

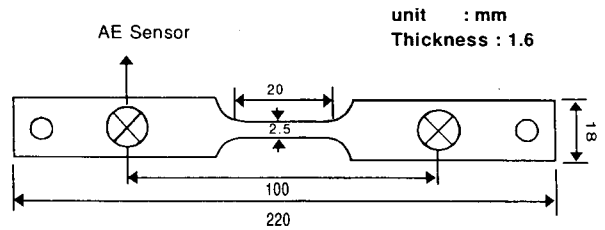


Fig. 2. Geometry of plate tensioning specimen.

실험에 사용된 시편의 형태 및 크기는 Fig.2와 같고 시편 중심부로부터 50mm 떨어진 곳에 양쪽으로 AE탐촉자를 부착하였다. AE탐촉자는 300kHz에서 공진 주파수를 갖는 압전형이고 AE신호 감시, 취득 및 분석은 PAC(Physical Acoustic Corp.)의 LOCAN320 장비를 이용하였다. 실험에 이용한 전치 증폭기는 이득(gain)이 60dB이고 200~400kHz의 대역통과 필터링 기능도 겸하고 있다. 주변 잡음의 진폭이 38~39dB인 점을 고려하여 AE신호 탐지 문턱 값을 40dB(탐촉자에서 0.1mV)로 설정하였고 이외에

count 5개이상, rise time 5 μ s 이상, duration time 20 μ s 이상의 AE신호만 탐지되도록 잡음 필터를 설정하였다. 인장시험기의 고정부에서 발생하는 불필요한 신호를 식별하기 위하여 양 탐촉자사이의 신호도달시간차가 10 μ s 이하인 것만 유효한 AE신호로 간주하였다. 또한 카이저 효과⁴⁾ 원리를 이용하여 SCC시험전에 시편을 항복응력의 1.1배(~0.7kN)까지 미리 인장시켜 탄성변형에서 발생하는 AE신호를 제거하므로서 SCC 균열에 의한 AE만 발생하도록 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

실험 내용은 첫째로 SCC 조건하에서 CERT로 인장시켜 초기 균열로부터 완전 파단까지 발생하는 AE신호를 분석하여 SCC 거동과의 관계를 조사하였고, 둘째로 초기에 발생하는 AE신호를 탐지하여 그때의 균열 크기를 측정하므로서 AE로 탐지 가능한 최소 균열 크기를 측정하였고, 셋째로 균열중 발생하는 부식 전류를 측정, AE신호와 비교하므로서 균열진전 탐지에 있어서 AE기술의 유용성을 확인하고자 하였다. 실험 조건 및 결과는 Table 1에 요약되어 있다. 실험 1, 2 및 3은 동일한 인장 속도에 열처리 조건을 달리하여 실험하였고, 실험 1, 4 및 5는 동일하게 열처리한 시편에 대해 인장 속도를 달리하여 실험하였다. 실험 6은 부식 조건이 아닌 공기중에서 인장하였을 때의 결과를 나타내고 있으며 실험 7과 8은 초기 균열 크기를 측정하기 위한 실험으로 최초 몇 개의 AE신호 발생 이후 시편을 부

식 셀에서 제거하여 그 때 생성된 균열 길이를 측정하였다. Table 1에 나타난 연신율(elongation), 최대 인장력(maximum force), 파단면에서의 입계 응력 부식 균열 백분율(percentage of IGSCC) 등 기계적인 변수에 대한 실험 결과는 Was의 결과⁹⁾와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었고, 본 연구에서는 이러한 실험 결과들을 AE관점에서 분석, 평가하였다.

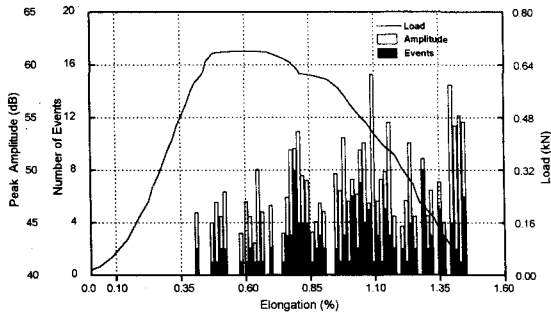
3.1. SCC시 AE 거동

실험 1은 600 $^{\circ}$ C에서 30시간 열처리한 시편을 부식 용액내에서 2.5 $\times 10^{-5}$ (mm/s) 변형 속도로 인장하였다. 실험중 발생한 AE신호의 event수, amplitude 및 인장력 등이 Fig. 3(a)에 나타나 있다. Fig. 3(a)에 나타난 event수 및 amplitude값은 연신율에 관계없이 X축을 100등분하여 도시한 것으로서, 각 구역에서의 event수와 amplitude는 각각 그 구역에서 발생한 AE의 합산값과 평균값을 의미한다. 실험 1에서의 AE신호는 탄성 혹은 소성변형이 아닌 대부분 IGSCC진전시 발생한 것으로 추정되며 그 이유는 최대 인장력이 1.1배의 항복 응력 이하이고 최대 인장력의 80%가 될 때까지 AE신호가 전혀 발생하지 않았다는 점이다. 실제로 응력 부식 시험전 1.1배의 항복 응력까지 사전 응력시 탄성 변형 부위에서는 약 300~700개 정도의 AE가 발생되고 있으며 실험 1중에는 이러한 신호들이 카이저 효과에 의해 모두 제거되었음이 확인되었다. 아울러 실험 6의 결과로 확인한 바에

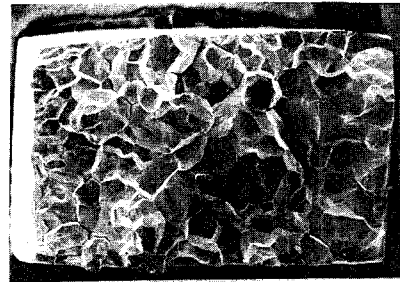
Table 1. Summary of SCC test conditions and results

No. of test	Test conditions		Elongation (%)	Max. force (kN)	1) Sig _{SCC}	% of IGSCC	No. of AE events	No. of cracks	Test variables
	Extension rate (mm/s)	Heat treatment (°C : Hrs)							
1	2.5 $\times 10^{-5}$	600 : 30	1.47	0.69	0.95	100	142	Failure	HT ²⁾ , ER ³⁾
2	2.5 $\times 10^{-5}$	650 : 6	1.71	0.76	0.94	100	307	Failure	HT
3	2.5 $\times 10^{-5}$	700 : 1	13.4	1.54	0.53	70	1301	Failure	HT
4	5 $\times 10^{-6}$	600 : 30	0.68	0.21	0.98	100	98	Failure	ER
5	1.25 $\times 10^{-4}$	600 : 30	9.21	1.07	0.68	80	604	Failure	ER
6 ⁵⁾	1.25 $\times 10^{-4}$	600 : 30	28.8	2.10	0.0	0	3010	Failure	-
7	2.5 $\times 10^{-5}$	600 : 30	0.34	-	-	-	2	5	CI ⁴⁾
8	2.5 $\times 10^{-5}$	600 : 30	0.39	-	-	-	2	numerous	CI

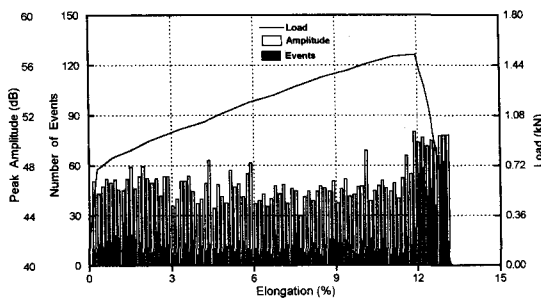
1) The susceptibility of IGSCC (Sig_{SCC}) is based on the maximum elongation of the test 6
 2) HT : Heat Treatment 3) ER : Extension Rate 4) CI : Crack Initiation 5) CERT in Air



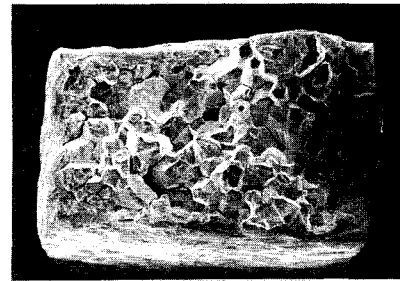
(a) Test 1 : 2.5×10^{-5} mm/s, 600°C : 30 hrs



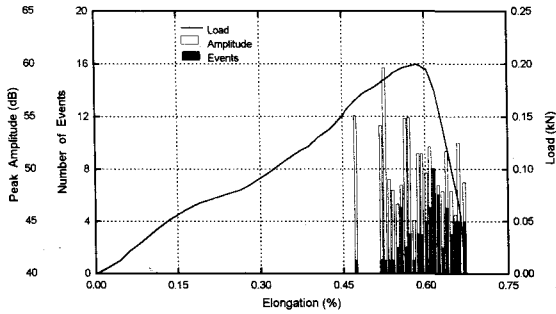
(a)



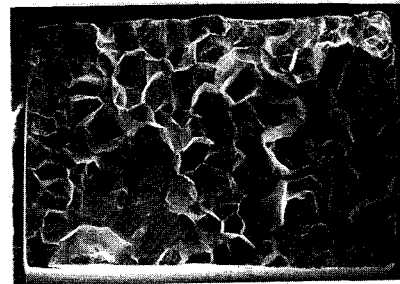
(b) Test 3 : 2.5×10^{-5} mm/s, 700°C : 1 hr



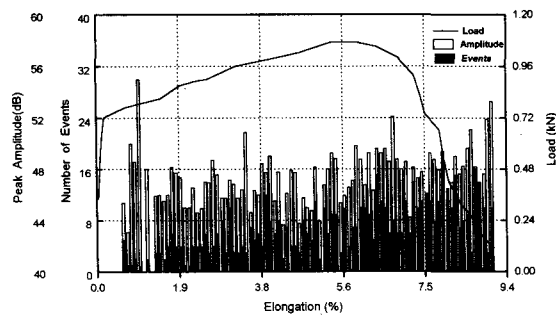
(b)



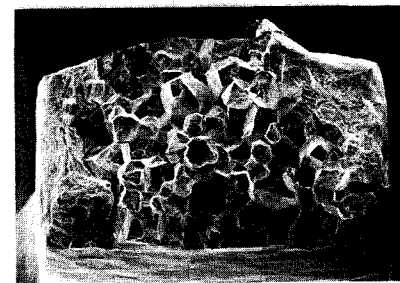
(c) Test 4 : 5.0×10^{-6} mm/s, 600°C : 30 hrs



(c)



(d) Test 5 : 1.25×10^{-4} mm/s, 600°C : 30 hrs



(d)

Fig. 3. Number of event, amplitude, and load vs. elongation for the test 1, 3, 4 and 5.

Fig. 4. SEM micrographs of the fractured surface for the test 1, 3, 4 and 5.

의하면 탄소성 변형시에 발생하는 AE amplitude는 48dB 이하인 것에 반하여 실험 1에서는 인장력이 감소하기 전의 몇 개의 AE신호를 제외하고는 대부분 48dB이상의 높은 amplitude값을 가지고 있으므로 이것들은 균열 진전에서 발생된 것으로 추정할 수 있다. 또한 파단 부분을 주사 전자 현미경(SEM)으로 촬영한 결과가 Fig. 4(a)에서와 같이 100% IGSCC를 나타내고 있음이 또 하나의 증거가 될 수 있다.

실험 2은 실험 1과는 달리 650°C에서 6시간 열처리한 시편을 사용하였고 이 외의 조건은 실험 1과 같다. 최초의 AE event는 최대 인장력의 90% 정도에서 발생하였으며 총 AE event수는 실험 1의 2배 정도가 되는 것을 알 수 있다. 이는 관찰 결과 시편 인장 부위에 파단을 유발한 균열외에 다른 1개의 큰 IGSCC가 존재함을 알 수 있었고 주로 그것에 기인한 것으로 판단된다. 초기 AE신호들은 대략 48dB값을 가지나 인장력이 거의 일정하게 서서히 증가하기 시작한 시점부터는 높은 amplitude값을 보이고 있고, 또한 파단 부분 SEM 결과가 100% IGSCC를 나타내고 있으므로 발생한 AE신호는 실험 1과 같이 대부분 IGSCC진전에 기인하는 것으로 판단된다. Was의 결과⁹⁾에 의하면 600°C, 30시간 열처리한 시편(실험 1)이 650°C, 6시간 열처리한 시편(실험 2)보다 입계 크롬이 더 고갈되어 파단면의 IGSCC분율이 각각 100%, 75%로 큰 차이를 보이고 있으나 본 실험에서는 Table 1에서와 같이 기계적인 측정값에서 약간 차이를 보이고 있을 뿐 파단면의 IGSCC 분율을 모두 100%를 보여 실험 1과 2의 시편에서 큰 차이를 발견할 수 없었다.

실험 3은 실험 1, 2와는 달리 700°C에서 1시간 열처리한 시편을 사용하였고 이외의 조건은 실험 1, 2와 같다. Was의 결과⁹⁾에 따르면 600°C, 30시간 열처리한 시편(실험 1)과 700°C, 0.33시간 열처리한 시편(실험 3과 유사)의 입계 크롬 농도가 각각 4.9 및 7.8 w/o이고 파단면의 IGSCC분율이 각각 100 및 50%인 점을 감안할 때 실험 3의 시편의 IGSCC뿐 아니라 연성파괴(ductile fracture)와 같은 다른 기구가 파괴에 영향을 미쳤으리라 예상된다. 실험 3에서는 Table 1 및 Fig. 3(b)와 같이 연신율, 최대 인장력이 실험 1보다 매우 높고 파단면의 IGSCC분율은 실험 1의 결과에 비하여 낮은 것으로 보아 Was의 결과와 유사함을 알 수 있다. AE event수는 실험 1에 비하여 약 9배가 증가하였고 이것은 IGSCC뿐 아니라 인장부위의 기계적 변형 및 연성파괴와 같은 다른 AE발생

원이 있음을 나타내는 것이다. Fig 3(b)에서와 같이 AE event수 및 amplitude값은 인장력이 떨어지는 시점부터 급격히 증가하고 있으며 최대 인장력 이전의 amplitude값이 대개 48dB 이하인 점을 고려할 때 최대 인장력 이전의 AE발생원은 주로 소성변형과 같은 기계적인 변형이고, 그 이후에는 IGSCC와 연성 파괴에 의한 것으로 추정할 수 있다. 이것은 파단 부분 SEM 결과가 Fig 4(b)에서와 같이 70% IGSCC를 보이는 것으로 확인할 수 있다. 또한 기계적인 변형에 의한 AE amplitude값은 대략 44~48dB(탐촉자에서 0.16~0.25mv)이고, IGSCC와 연성파괴에 의한 것은 48dB 이상인 것을 본 실험에서 알 수 있다. 이 사실은 AE발생원을 밝히는 인자로 amplitude값이 활용될 수 있음을 나타내고 있다.

실험 4는 실험 1 시편의 열처리 조건에서 CERT 변형 속도를 2.5×10^{-5} 에서 5.0×10^{-6} (mm/s)로 5배 줄여 시험하였다. Table 1에서와 같이 연신율, 최대 인장력이 실험 1보다 매우 낮고 IGSCC 민감도는 더 높게 나타났으며 이는 변형 속도가 낮아지면 IGSCC 민감도가 증가한다는 Was결과와 일치하는 것이다. 실험 1보다 IGSCC에 더 민감한 이유는 변형속도가 낮으면 IGSCC를 유발할 수 있는 최소 힘이 가해지기 전에 부식 용액이 입계를 충분히 부식시켜 상대적으로 낮은 인장력에서도 쉽게 균열이 진전하기 때문으로 생각된다. Fig. 3(c)와 같이 최초의 AE신호는 최대 인장력의 80% 근방에서 탐지되었으며 총 AE event수는 실험 1의 $\frac{2}{3}$ 정도이다. Amplitude값은 50dB이상으로 대부분의 AE신호가 IGSCC에 의한 것으로 판단되며 Fig. 4(c)와 같이 파단면 IGSCC분율이 100%인 것이 이를 뒷받침하고 있다.

실험 5는 실험 4와는 반대로 실험 1보다 5배 증가한 변형 속도 1.25×10^{-4} (mm/s)를 적용하여 실험하였다. 따라서 실험 4와는 반대의 결과를 예상할 수 있다. Table 1에서와 같이 연신율, 최대 인장력이 실험 1보다 비교적 높고 파단면의 IGSCC분율 및 IGSCC 민감도가 실험 1의 결과에 비하여 낮지만 실험 3의 결과보다는 더 IGSCC에 민감함을 알 수 있다. AE event수도 실험 1과 3의 중간값 정도가 발생하였고, AE발생원은 실험 3과 같이 IGSCC 뿐만이 아니고 인장부위의 소성 변형 및 연성 파괴 등이 포함된 것으로 판단된다. 그러나 실험 3의 결과와 다른점은 실험 3의 경우 최대 인장력 이전의 AE발생원은 주로 주로 소성 변형과 같은 기계적인 변형에 기인한 것이나 실험 5의 경우에는 소성변형에 의한 것 뿐만 아니라 IGSCC에 의한 AE event도 포함되었다는 점이다. 이

는 Fig. 3(d)에서 보여 주듯이 최대 인장력 이전에 48dB이상의 amplitude값을 가진 많은 AE신호가 발생되었다는 사실로 설명될 수 있으며 이 차이는 실험 5의 시편이 실험 3의 시편보다 열처리영향으로 더 IGSCC에 민감하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4(d)와 같이 파단면 IGSCC분율이 80%로서 70%인 실험 3의 결과보다 약간 더 IGSCC에 민감함을 보여 주고 있다. 아울러 최대 인장력 이후에는 IGSCC와 연성 파괴가 AE의 주발생원으로 추정할 수 있다.

실험 6은 열처리된 시편을 공기중에 인장하여 SCC없이 연성 파괴를 유발한 실험으로 인장력이 감소하기 전까지 발생한 AE신호는 통계적으로 amplitude값이 48dB에 주로 분포되어 있어 이는 대부분 탄,소성 변형에 의한 것으로 판단되며, 그후에는 연성 파괴 및 소성 변형이 혼합된 양상의 amplitude값을 보이고 있다. 파단면 IGSCC분율은 0%를 보이고 있다.

3.2. AE Amplitude와 AE발생원 및 SCC 민감도와 관계

Fig. 3으로부터 알 수 있듯이 본 연구에서 기계적 인 변형에 의한 AE amplitude값은 대략 44~48dB이고, IGSCC와 연성 파괴에 의한 것은 49~70dB에 주로 분포됨을 알 수 있었고 이것은 AE amplitude값이 AE발생원과 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것이다. 이러한 면에서 누적 진폭 분포(cumulative amplitude distribution : CAD)분석은 AE발생원을 식별하는데 유용한 방법으로 알려져 왔고 그중에서도 Power Law Model^{11), 12)}이 널리 활용되고 있다. 이것은 수학적으로 $F(V) = (V/V_t)^{-b}$ 으로 표현되며 여기서 F(V)는 어떤 AE신호의 amplitude가 V를 초과할 확률을 나타내주는 누적분포 함수이다. 예를들어 만약 V_t 가 이 모델에서 고려된 가장 낮은값의 amplitude 값이라면 $F(V_t)=1$ 이 성립할 것이다. 또한 b값은 CAD의 기울기를 나타내는데 이것은 Fig. 5와 같이 b값이 작을수록 통계적으로 높은 준위의 AE amplitude가 많이 존재함을 의미한다. Pollock¹²⁾에 의하면 고강도 취성 금속(brittle high-strength metal)의 균열 진전에 의하여 발생하는 AE amplitude 분포가 소성영역(plastic zone)에서의 균열진전에 의한 분포보다 상대적으로 b값이 낮은 것으로 나타났다.

본 연구에서 각 실험에 대한 b값 분석 결과는 Table 2와 같고 여기에서 Non-SCC의 의미는 기계적 변형이 지배하는 영역. 즉 실험 3의 경우에는 시작부터 최대 인장력까지(연신율 11.7%)로 정의하였

고 그 이후의 영역은 SCC영역으로 구분하였다.

Table 2에서 알 수 있듯이 명확한 IGSCC에 대한 b

Table 2. The b-Value for each test case

No. of test	b-Value			SigSCC
	Total	Non-SCC	SCC	
1	1.65	-	-	0.95
2	1.76	-	-	0.94
3	2.20	3.43	2.03	0.53
4	1.63	-	-	0.98
5	2.03	3.07	1.97	0.68
6	3.40	-	-	0.0

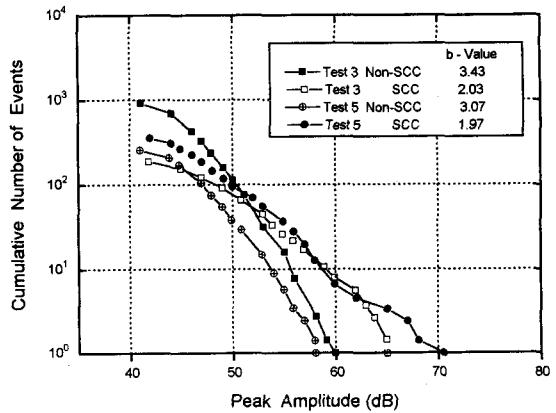


Fig. 5. Cumulative amplitude distribution of SCC and non-SCC region for the test 3 and 5

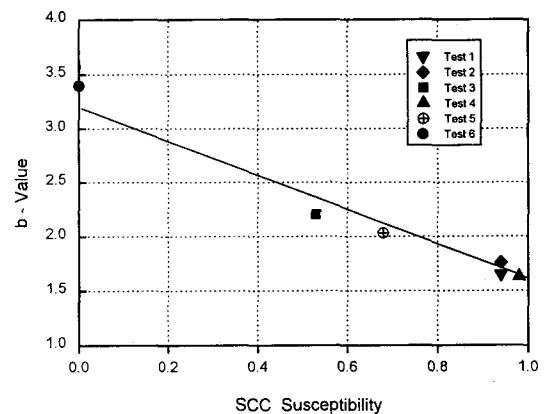


Fig. 6 SCC susceptibility vs. b-values for each test

값은 1.6~1.8이고, 반면에 기계적 변형을 주로 포함하는 Non-SCC 영역에서는 3.0~3.4이며, 연성 파괴와 IGSCC가 혼재된 SCC 영역에서는 1.9~2.0인 것으로 나타났다. 결론적으로 AE amplitude값의 준위는 상대적으로 IGSCC, 연성 파괴, 기계적인 변형 등의 순서로 작아지는 것을 알 수 있으며 이상의 결과는 Pollock의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 아울러 b값과 IGSCC의 민감도와 관계는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 b값이 클수록 IGSCC 민감도가 작아지는 선형적인 관계가 있음을 알 수가 있다.

3.3. AE에 의한 균열 진전 감시

균열 진전의 탐지뿐 아니고 균열 진전의 상대적 인 속도증가를 판단할 수 있는 방법을 찾는 것도 AE기술의 중요한 연구 과제가 되었고 그 방법으로 event rate, amplitude, count 및 AE energy 등의 AE변수들이 이용되었다. 본 연구에서는 균열 진전 속도에 대한 정량적인 측정을 수행하지 않았지만 인장력 및 AE변수를 이용하여 입계 응력 부식 균열의 진전 거동을 분석하고자 하였다. 100% IGSCC를 나타낸 실험 1의 결과를 전형적인 IGSCC 진전 양상으로 간주하여 전체적인 거동을 Fig. 7에서와 같이 인장력 및 AE count, energy를 고려한 3단계로 구분할 수 있다. 첫번째 단계(연신율 0.0~0.48%)는 시편 표면에 다수의 미소균열이 생성되는 과정이고, 두번째 단계(0.48~0.70%)는 미소균열의 성장 및 주균열이 형성되는 과정이며, 세번째 단계(0.70~1.47%)는 주균열이 성장 및 파단 과정으로 가정할 수 있다.

첫번째 단계는 적절한 부식 조건 및 인장력에 의

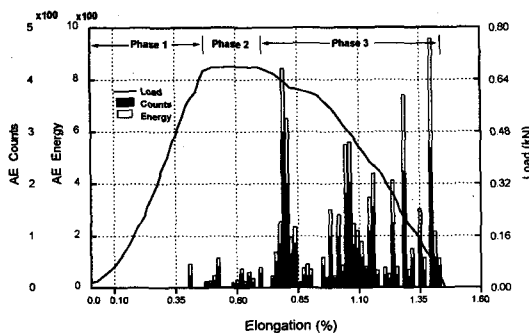


Fig. 7. AE energy, count and load vs. elongation for the test 1.

하여 시편 표면의 입계에 400 μm이하의 초기 IGSCC가 형성되는 단계로 낮은 준위의 AE event rate, amplitude, count 및 AE energy가 관찰된다. 이 과정은 실험 7 및 8에서 광학현미경을 통하여 미소균열의 존재가 확인되었다. 또 초기 균열이 존재함에도 불구하고 인장력이 계속 증가함은 crack opening rate가 인장 부위의 연신율을 상쇄할만큼 충분히 크지 않기 때문일 것이다. 두번째 단계에서 인장력이 항복 응력에 도달하지 않았음에도 더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 유지하는 것은 미소균열이 주균열을 형성하여 crack opening rate가 연신율의 증가를 상쇄할만큼 크기 때문일 것이다. Fig. 3(a)와 같이 AE event rate 및 amplitude는 첫번째 단계에 비하여 약간 증가하였으나 count 및 AE energy에는 큰 변화가 나타나지 않았다. 세번째 단계에서 파단까지 계속 인장력이 감소하는 것은 주균열의 빠른 진전에 따라 crack opening rate가 연신율의 증가를 초과하기 때문일 것이다. 세번째 단계가 시작되는 부근에서 AE event rate, amplitude, count 및 AE energy가 모두 증가하며 특히 count 및 AE energy는 급격히 증가함을 보이고 있다. 이 결과로 미소균열의 성장 및 주균열의 형성단계로부터 주균열의 성장으로 변환되는 시점을 AE event rate, amplitude, count 및 AE energy 등과 같은 AE변수의 종합적인 관찰을 통하여 감시가 가능할 것이다.

3.4. AE발생과 부식 전류와의 상관 관계

니켈 기지 합금에서 IGSCC 발생 및 진전 기구는 부동태 피막(passive film)의 형성 및 파괴와 깊은 관련이 있는 것으로 알려져 왔다.^{7), 13)} 슬립(slip) 등에 의해 시편 표면에 형성된 부동태 피막이 깨지게 되면 금속용해가 국부적으로 일어나고 예민화된 입계에서는 IGSCC로 발전하게 된다. IGSCC에 이의 새 금속 표면이 노출되면 다시 부동태화되려는 성질 때문에 양극 용해(anodic dissolution) 과정에서 전기 화학적 전류가 발생하게 된다. Stewart 등¹⁴⁾은 예민화된 304스테인레스 스틸에서 작은 균열의 진전을 감시하기 위하여 전류 변동이 이용될 수 있음을 제시하였고 Jones 등⁶⁾은 Stewart의 결과와 AE 시험 결과를 간접적으로 비교하여 균열 진전 감시에 있어서 두 시험 방법간의 양호한 대응성을 제시하였다. 본 연구에서는 IGSCC실험중 전류 신호를

측정하여 전류변동과 AE거동과의 관계를 직접적으로 비교하였다. Fig. 8은 실험 3중 일부를 확대하여 AE event (amplitude)와 발생 전류의 거동, 인장력 등을 함께 도시한 것으로서 amplitude 48dB이상의 AE발생 시점과 전류 증가 시점과의 상관 관계가 높음을 알 수 있다. 즉 균열이 진전하면 AE신호가 발생되고 새 표면이 노출되면서 부동태화되는 과정에서 전류가 증가되는 것으로 설명될 수 있을 것이다. 따라서 측정된 AE신호는 균열 진전시 발생된 것임이 입증되었고, AE가 균열 진전 감시에 적절한 방법임이 다시 한번 확인되었다. 또한 전류 증가를 감시하는 것보다 AE방법이 균열 진전 시점을 적시에 조속히 판단할 수 있도록 해 줄 수 있는 유용한 방법이라는 것을 이 사실로 알 수 있다.

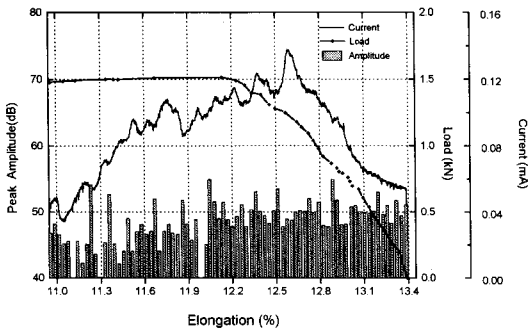


Fig. 8. Comparison of electrochemical current with AE amplitude at the latter part of the test 3.

3.5. AE로 탐지 가능한 최소 균열 크기

실험 7 및 8은 AE로 탐지 가능한 최소 균열 크기를 측정하므로 AE의 균열 탐지능을 알아보고자 하는 실험이다. 실험 조건은 실험 1과 똑같고, 방법은 몇 개의 AE신호가 처음 탐지된 후 시편을 부식 셀에서 제거하여 현미경 관찰로 균열의 크기를 측정하였다. Fig. 9는 초기 AE신호 탐지 시점을 나타내는 것으로 실험 7의 경우 처음 4개의 신호는 AE event 허용 기준(양 탐촉자 사이의 신호 도달 시간차가 10 μ s 이하)을 초과하는 신호들이었기 때문에 이후 유효한 2개의 신호가 추가로 탐지된 후 시편을 조사하였다. 그 결과 시편 표면에 길이 200 μ m이하의 균열이 3개, 200~400 μ m 사이의 균열이 2개가 발견되었고 Fig. 10에 대표적인 사진을 볼 수 있다. 균열이 발견된 시점의

인장력과 연신율은 각각 0.60kN 및 0.34%로서 실험 1의 초기 신호와 비슷한 시점에 발견되었음을 알 수 있다. 실험 8은 인장력 0.68kN, 연신율 0.39%군방에서 신뢰성있는 AE신호가 발견되었고, 현미경 관찰 결과 200 μ m이하의 균열이 5개, 200~600 μ m 사이의 균열이 상당수 존재함을 발견하였다.

이렇게 실험 7에 비해 큰 균열이 많이 생성된 것은 실험 7보다 인장력 및 연신율이 더 큰 시점에 AE신호가 탐지되었기 때문으로 판단된다. 가장 긴 균열의 깊이를 측정된 결과 Fig. 11과 같이 한 개의 결정 두께 정도인 약100 μ m이하가 되는 것으로 나타났다. 이상의 실험 결과로 알 수 있는 것은 AE로 탐지 가능한 최소 균열 크기는 길이 200~400 μ m, 깊이 100 μ m 이하의 균열인 것으로 판단되며 이러한 크기의 미소 균열들이 구조물의 파단을 초래할 수 있는

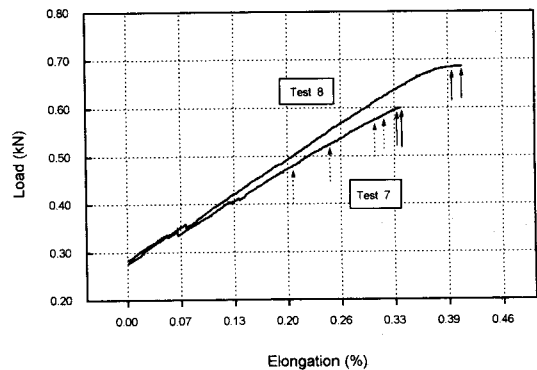


Fig. 9. Initial AE events for the test 7 and 8

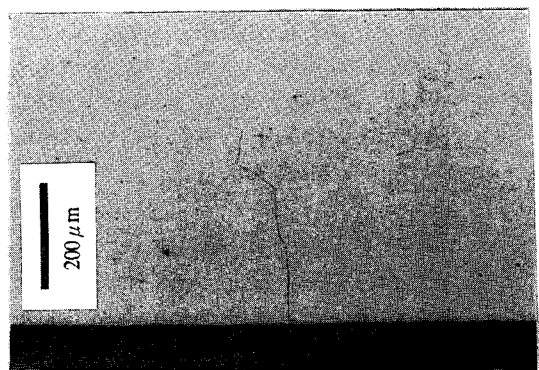


Fig. 10. Optical micrograph showing initial IGSCC after two AE events in the test 7

주균열로 성장하기 전에 AE로서 탐지가 가능함을 보여주고 있다. Jones 등⁶⁾은 304스테인리스 재질의 직경 3mm, 길이 1.25cm의 원통형 시편으로 유사한 시험을 수행한 결과, 길이 200~300 μ m, 깊이 50~100 μ m의 균열을 AE로서 측정할 수 있음을 제시한 바 있다. 인코넬600 합금에 대한 본 연구 결과는 Jones의 결과와 유사한 것을 알 수 있었다.

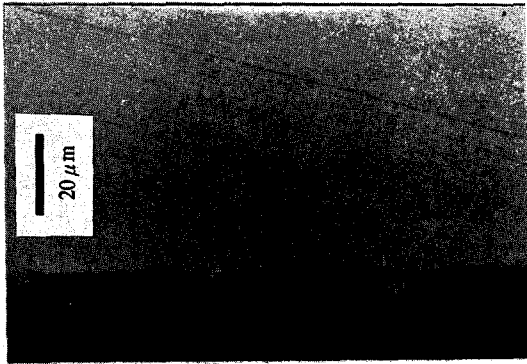


Fig. 11 Optical micrograph of the cross-section showing crack depth in the test 8

4. 결 론

열처리 및 변형 속도 등의 서로 다른 실험 조건을 가진 인코넬 600합금의 입계 응력 부식 균열중 발생하는 음향 방출 신호의 특성을 연구한 결과

가. AE amplitude 준위는 AE발생원을 식별할 수 있는 중요한 변수가 되며, IGSCC, 연성 파괴, 소성 변형 등의 순서로 상대적으로 작은 amplitude 값을 나타내었다. 아울러 IGSCC의 민감도가 클수록 누적 진폭 분포 함수에 대한 기울기값(b-value)이 선형적으로 작아지는 관계가 있음을 알 수 있었다.

나. AE로 탐지 가능한 IGSCC 최소 균열 크기는 길이 200~400 μ m, 깊이 100 μ m 이하의 균열인 것으로 나타났으며, AE event rate, amplitude, count 및 energy 등 AE변수의 종합적인 거동 분석을 통하여 미소 균열들이 주균열로 성장하는 시점 및 균열 진전속도 증가에 대한 감시가 가능할 것이다. 따라서 AE는

IGSCC 진전을 조기 탐지할 수 있는 유용한 방법으로 평가되며 비파괴방법으로서의 실제 적용성도 높을 것으로 판단된다.

다. IGSCC실험중 발생한 전기 화학적 전류 변동과 AE event 발생 시점이 일치함을 확인할 수 있었으며 이는 AE가 IGSCC 발생 및 진전 감시에 적절한 수단임을 보여주는 것이다. 아울러 AE는 응력 부식 균열 발생 및 진전 기구를 연구하는데 있어서도 유용한 수단이 될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) N. J. Magnani, Experimental Mechanics, (1973), pp. 526-530
- 2) S. Yuyama, ASTM STP 908 (1986), pp. 43-74
- 3) A. Pollock, ASTM STP 908 (1986), pp. 30-41
- 4) S. Yuyama, et al., J. Materials for Energy Systems, Vol. 5, No 4 (1984), pp. 212-221
- 5) R. H. Jones, et al., Meta, Trans. A, Vol. 20A (1989), pp. 637-648
- 6) R. H. Jones, et al., Corrosion, Vol. 47, No. 2 (1991), pp. 105-115
- 7) W. W. Park, et al., "Evaluation of Integrity of Penetration in Reactor and Primary Coolant System", KINS/AR-183, Korea Institute of Nuclear Safety, (1993)
- 8) Shah, et al, "Assessment of Pressurized Water Reactor Control Rod Drive Mechanism Nozzle Cracking", NUREG/CR-6245, U.S. Nuclear Regulatory Commission, (1994)
- 9) G. S. Was and V. B. Rajan, Meta. Trans. A, Vol. 18A (1987), pp. 1313-1323
- 10) Nondestructive Handbook Vol. 5, ASNT, (1987)
- 11) D. Dilipkumar, Experimental Mechanics, (1979), pp. 438-443
- 12) A. Pollock, Int'l Advances in Non-destructive Testing, Vol. 7 (1981), pp. 215-239
- 13) J. H. Lee, et al., "A Study of Safety Evaluation Techniques of Nuclear Power Plant Materials", KINS/GR-063, Ministry of Science and Technology, (1993)
- 14) J. Stewart, et al., CORROSION/88, Paper No. 285, Houston, TX: NACE, (1988)

Evaluation of the Stress Corrosion Cracking Behavior of Inconel 600 Alloy by Acoustic Emission

Key-Yong Sung*, In-Sup Kim**, Young-Ku Yoon**

* Sytem Performance Group, Korea Institute of Nuclear Safety

** Department of Nuclear Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract. Acoustic emission(AE) response during stress corrosion cracking(SCC) of Inconel 600 alloy has been monitored to study the AE detectability of crack generation and growth by comparing the crack behavior with AE parameters processed, and to evaluate the applicability as a nondestructive evaluation(NDE) by measuring the minimum crack size detectable with AE. Variously heat-treated specimens were tensioned by constant extension rate test(CERT) in various extension rate to give rise to the different SCC behavior of specimens. The AE amplitude level generated from intergranular stress-corrosion cracking(IGSCC) is higher than those from ductile fracture and mechanical deformation, which means the AE amplitude can be a significant parameter for distinguishing the AE source. AE can also provide the effective means to identify the transition from the small crack initiation and formation of dominant cracks to the dominant crack growth. Minimum crack size detectable with AE is supposed to be approximately 200 to 400 μm in length and below 100 μm in depth. The test results show that AE technique has a capability for detecting the early stage of IGSCC growth and the potential for practical application as a NDE.

(Received: September 4, 1994)