

피로균열진전에 따른 304 강의 음향방출 거동

오광환[†], 정창규^{*}, 양유창^{*}, 한경섭^{*}

Acoustic emission behavior during fatigue crack propagation in 304 Stainless steel

Kwang Hwan Oh, Chang Kyu Jung, Yoo Chang Yang and Kyung Seop Han

Key Words : Stress Intensity Factor(응력확대계수), Counts Rate(음향방출율), Single Overload(단일과대하중), Variable Amplitude Loading(가변진폭하중)

Abstract

Acoustic emission behavior during fatigue crack growth test was investigated under various loading condition. To describe the acoustic emission activity, counts rate (dh/dn) was related with SIFR (stress intensity factor range, DK). Results indicated that SIFR could be divided into two parts according to its relationship with counts rate. For $DK < 25 \text{ MPa}\sqrt{m}$, counts rate was increased as the SIFR increased. However, for values greater than $25 \text{ MPa}\sqrt{m}$, decreasing behavior was shown. This behavior of counts rate corresponding SIFR was keeping the same trend regardless of load range or crack length. Acoustic emission response to the single overload was sudden drop and slow recovery in counts rate like crack growth retardation. Under variable loading condition, counts rate of each loading block was same as that of constant amplitude loading. Overall experimental data was somewhat scattered since sensitive characteristics of acoustic emission method. However, these empirical relations indicated that counts rate was uniquely correlate with single parameter, SIFR.

1. 서론

피로하중에 의한 균열진전은 기기나 구조물의 실제 하중지지능력이 점차 상실되어 가는 과정으로, 균열이 위험한 수준에 이르러 파괴가 일어나기 전에 교체나 보수에 대한 의사결정이 이루어져야 한다. 이때, 과학적인 안전성 평가나 수명평가를 위해서 파괴역학의 이론과 더불어 균열을 감지할 수 있는 비파괴 검사법들이 사용되고있다. 여러 비파괴 검사 방법들이 균열이나 결함과 같은 형상의 불연속을 검출하기 위해 쓰이는 것과 달리, 음향방출법은 하중을 받는 재료내부로부터 이들의 활동이나 변형으로 인한 응력파가 검사의 주요 정보가 되기 때문에 가동중인 기기나 구조물의 연속적인 감시를 통해 균열의 발생이나 진전상황을 평

가하기에 유용한 검사 방법 중에 하나라 할 수 있다.

이와 같은 배경으로 인해, 피로균열진전 시험과 동시에 음향방출 신호를 받아들여, 이를 통해 균열진전의 상황을 평가하고자 하는 연구가 꾸준히 진행되어왔다. Sinclair 등⁽²⁾은 균열이 진전함에 따라 균열전단의 소성영역 확대에 의해 음향방출이 발생한다고 제안하였으며, 이강용 등⁽³⁾은 소성영역의 확대 뿐만 아니라 탄성영역에서도 음향방출이 발생할 수 있음을 지적하여 이를 고려하였다. Lindley 등⁽⁴⁾은 균열이 진전되는 궁극적인 기구(mechanism)인 미소파괴(micro-fracture)에 의해 음향방출수가 결정된다고 제안하였다. 또한, 어느 하나의 기구에 의해서 음향방출이 결정되지 아니하고 여러 기구가 같이 음향방출에 기여할 수 있음을 Hamel 등⁽⁵⁾이 언급하였다. 이들의 연구는 파괴역학의 매개 변수인 응력확대계수범위(DK)와 음향방출율(dh/dn)을 연관시켜 균열진전에 따른 음향방출의 거동을 평가하고자 한 것이었고, 응력확대계수범위가 증가함에 따라 음향방출율도 증가하는

[†] 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : khoh@postech.ac.kr

TEL : (054) 279-5893 FAX : (054) 279-5899

^{*} 포항공과대학교 기계공학과

실험결과를 제시하였다.

한편, Moothy 등⁽⁵⁾은 316 스테인레스 강의 시험에서 음향방출율이 초기에 증가한 다음, 응력확대계수범위가 $30 MPa\sqrt{m}$ 이후부터 감소하는 실험결과를 제시하고, 안정적으로 균열이 진전하는 Paris regime 을 다시 두 부분으로 나눌 수 있음을 들어, 각 부분에 대한 균열진전의 메커니즘과 이에 따른 음향방출율 거동의 차이를 설명하였다.

대부분 일정진폭 하중조건에서 시험한 위의 연구 결과들은 하중과 시험편의 형상에 따라 응력확대계수를 계산하고 이를 음향방출율과 연관시켰다. 응력확대계수는 균열전단의 상태를 나타내는 파괴역학의 매개변수로서 하중과 균열길이에 관계없이 응력확대계수범위에 의해 균열진전율이 유일하게 결정되지만, 음향방출율과의 상관관계는 검토되지 않은 부분이다. 본 연구에서는 304 강에 대해 응력확대계수(DK)와 음향방출율(dh/dn)의 상관관계를 검토하였으며, 또한 실제 가동 중에 발생할 수 있는 과대하중이나 가변진폭하중에 따른 음향방출 거동을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시험방법과 시험재료

시험에 사용된 재료는 내식성과 내열성이 우수한 304 스테인레스 강으로써 열 교환기나 화학설비의 구조용으로 다양하게 쓰이는 재료이다. 시험은 인장시험과 피로균열진전 시험을 실시하였으며, 시험과 동시에 시편에 부착된 AE 센서를 통해 신호를 받아들여 저장하였다. 인장시험은 음향방출의 기본적인 기구(mechanism)를 알아보기 위해 행하여졌으며, 센서부착이 용이하도록 ASTM E8 에 의거하여 두께 2mm 의 판상 형태(plate type)를 사용하였다. 시험을 통해 구한 304 강의 기본적인 물성과 경도 값을 Table 1 에 간략하게 나타내었다. 피로균열진전 시험에서는 B=8mm, W=50.8mm 의 표준 CT 시편을 사용하였다. 각각의 시편에 가해진 하중(DP)과 이때의 균열길이(a), 그리고 이 두 인자의 조합으로 계산되는 응력확대계수범위(DK)를 Table 2 에 정리하여 나타내었다. 시험에서 얻고자 했던 결과는 크게 세 가지로써, (1)하중범위에 따른 음향방출 거동의 관찰을 위해 #1~4 를 일정진폭하중으로 시험하였고, (2)과대하중에 대한 음향방출율의 거동을 알아보기 위해 #5 를 시험하여 #2 와 비교하였으며, (3)가변하중과 균열길이의 변화에 따른 영향을 보고자 #6 을 시험하여 #2 와 비교하였다. 시험은 MTS-810 유압시험기를 이용하여 상온에서 행하여졌으며 응력비(stress ratio, R)는 과대하중을 제외하고 모두 0.1 로, 주파수는 10Hz 의 사인파(sine wave)로 동일하게 적용시켰다. 균열의

길이는 10 배율 이동식 현미경을 통해 측정하고 ASTM E647 의 시컨트(secant) 방법에 의해 균열진전율을 계산하였다.

2.2 음향방출신호 취득

음향방출신호는 인장시험과 피로균열진전 시험에 대해 동일하게 PAC 사의 150kHz R-15 공진형 센서와 SPARTAN-AT 시스템을 사용하여 취득하였다. 센서로부터 검출되는 신호는 매우 미약하기 때문에 예비증폭기(pre-amplifier)에서 1 차적으로 40 dB 를 증폭시킨 다음 100~300 kHz 주파수 대역의 신호만 필터를 통해 받아들여서, SPARTAN-AT 내의 주 증폭기(main amplifier)를 통해 2 차적으로 다시 20dB 를 증폭시켰다. 최종적으로 문턱 값(threshold)을 45dB 로 고정하여 피로시험의 전 과정에 대한 음향방출 신호를 모두 컴퓨터에 저장하도록 설정하였고, 균열길이를 측정함과 동시에 저장되는 데이터를 구분하여 지정하였다. 외부로부터의 잡음을 제거하기 위해 하중을 가하는 핀(pin)을 테프론(teflon)으로 처리하였으며, 센서의 부착은 시편표면과 센서 사이의 공기 층을 없애기 위해 그리세린(glycerin)을 얇게 바른 다음, 테프론으로 압착하여 시편에 고정시켰다. 각각의 시편에 대해 그 시험에 앞서, 예비균열이 존재하지 않는 시편에 피로하중을 가하여 균열이 아닌 기계적인 잡음에 의한 음향방출이 없음을 확인한 다음 예비균열이 도입된 시편으로 시험을 실시하였다.

Table 1 Mechanical property of 304 Stainless steel

Yield Strength	Ultimate Strength	Elongation	Hardness
320 MPa	645 MPa	36.53 %	92.9 HRB

Table 2 Details of fatigue load

#	Amplitude	Load Range ΔP [kN]	Crack Length a [mm]	SIFR ΔK [$MPa\sqrt{m}$]
1	Constant	6~0.6	17.53~31.86	18.9~45.7
2	Constant	8~0.8	12.18~28.85	19.1~48.3
3	Constant	10~1.0	11.27~27.80	22.7~56.2
4	Constant	12~1.2	12.33~28.88	28.9~72.7
5	Single overload (Constant)	8~0.8	11.84~16.47	18.7~24.0
		16~0.8	16.47	S.O.L
		8~0.8	16.47~29.65	24.0~51.1
6	Variable	8~0.8	11.52~15.77	18.4~23.1
		6~0.6	15.77~18.93	17.3~21.3
		10~1.0	18.93~24.22	35.3~45.0
		8~0.8	24.22~30.37	37.3~53.1

3. 일정진폭하중에서의 균열진전율과 음향방출 거동

3.1 인장시험에서의 음향방출

Fig.1 은 304 강의 인장시험에 따른 응력-변형률 곡선과 이와 동시에 획득한 음향방출수(acoustic emission counts)를 변형률에 따라 나타낸 것이다. 음향방출수는 변형률의 전체적인 구간에서 항복이 시작되는 점과 그 직후에 집중되어 있으며, 시편이 파단되는 시점에서는 거의 발생 되지 않음을 보여주고 있다. 그러므로, 음향방출은 응력에 비해 하는 물리량이 아니라 변형과 관계되는 특정한 기구(mechanism)에 의해 발생됨을 알 수 있다. 금속이 항복을 일으킬 때는 슬립(slip)이라는 현상을 통해 원자결합의 뒤틀림과 재편성이 일어나며, 이 과정에서 재료내부로부터 급격한 에너지 방출이 있음을 알 수 있다. 이러한 인장시험의 결과로 미루어 볼 때, 피로균열진전에서도 재료의 항복이 음향방출의 지배적인 원인이 됨을 짐작할 수 있으며, Sinclair 등⁽²⁾이 제안한 균열선단의 소성영역 확대가 304 강의 균열진전에 따른 음향방출 원인으로 가장 타당하다고 볼 수 있다.

3.2 일정진폭하중에서의 음향방출 거동

Fig.2 는 일정진폭하중에서의 피로균열진전시험에 대한 결과로써, 응력확대계수범위에 따른 균열진전율과 음향방출율의 관계를 각각 나타내고 있다. 응력확대계수범위(DK)와 균열진전율(dh/dn)의 관계는 식(1)과 같이 로그좌표에서 선형으로 나타나며 Paris regime 의 II 단계에 해당한다.

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

균열측정과 동시에 검출된 음향방출율은 동일한 응력확대계수범위에서 균열진전율과 다른 거동을 보이고 있다. 음향방출율이 증가하는 부분과 감소하는 부분으로 크게 나누어 볼 때, 그 경계에 해당하는 응력확대계수범위는 약 $25 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 정도이다. $25 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 의 앞 부분은 비교적 많은 음향방출수를 나타내면서 증가하는 경향을 나타내며 균열진전율과 비슷하게 선형으로 나타나지만, 그 이후부터는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 음향방출율의 거동은 316 강을 사용한 Moorthy 의 실험결과와 대체로 일치하는 경향을 나타내고 있다. Moorthy 는 음향방출율의 변화를 앞서 연구된 여러 문헌을 인용하여 체계적으로 설명하였으며, 그 주된 이유가 균열이 진전됨에 따라 소성영역과 슬립의 양상이 달라지기 때문이라고 기술하였다. 이와 관련된 사항들을 Table 3 에 정리하였다.

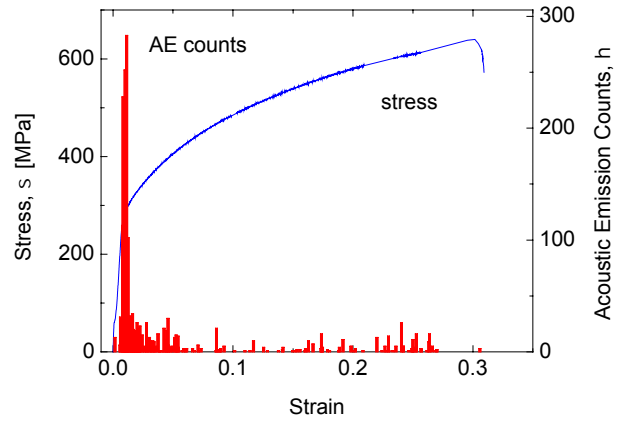


Fig. 1 Crack growth rate and counts rate behavior under constant amplitude loading (specimen #2)

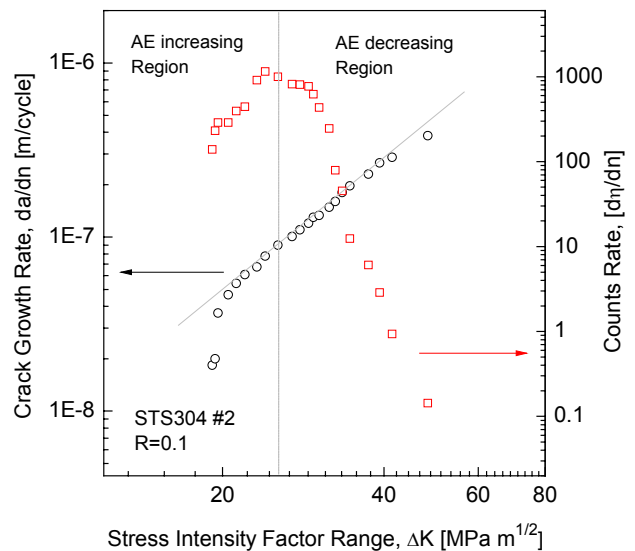
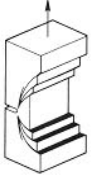
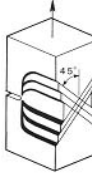


Fig. 2 Crack growth rate and counts rate behavior under constant amplitude loading (specimen #2)

Table 3 Comparison of increasing and decreasing region of counts rate (6, 8, 9)

응력확대계수	$25 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이전	$25 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이후
음향방출율	증가	감소
소성영역	증가	감소
스트라이에이션	사이클 수보다 적음	사이클 수와 일치
균열선단의 상태	평면변형율 상태가 지배적	평면응력 상태가 지배적
슬립형태		

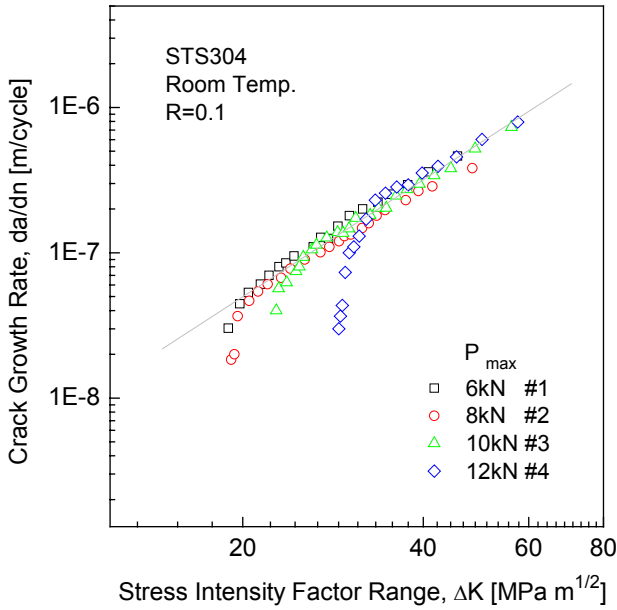


Fig. 3 Fatigue crack growth rate behavior under different load range (specimen #1~4)

3.3 하중진폭에 따른 음향방출거동

응력확대계수(K)는 하중과 균열길이에 무관하게 균열선단의 상태를 유일하게 나타낼 수 있는 파괴역학의 매개변수이다. 따라서 피로하중의 진폭이 달라도, 응력확대계수범위(DK)에 의해 균열진전율(da/dn)이 재료의 물성으로 결정이 된다. Fig.3 은 하중진폭(DP)을 다르게 적용하였을 때의 균열진전율을 보여주고 있다. 예비균열(pre-crack) 도입의 영향으로 인하여 각 실험결과의 시작부분에서 균열지연(crack retardation)이 나타나지만, 전체적으로 볼 때 균열진전율은 하중에 관계없이 응력집중계수에 의해 유일하게 연관이 되며 그 관계가 식(1)과 같이 로그좌표에서 선형(linear)임을 확인할 수 있다.

피로균열진전에 따른 음향방출율이 응력확대계수범위(DK)와의 관계에서 증가하는 부분과 감소하는 부분으로 나뉘어지는 기본적인 거동을 나타낼 때, 하중과 균열길이에 따라 음향방출율의 변화가 생길 수 있다. Fig.4 는 Fig.3 에 대응하는 음향방출의 실험결과로서, 음향방출율을 응력확대계수와 함께 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 25 MPa√m 이하의 응력확대계수범위에서 증가하고, 그 이상의 범위에서 감소하는 경향을 하중진폭(DP)에 관계없이 유지하고 있으며, 응력확대계수 범위에 의존적인 거동을 보이고 있다. 시편 #4 는 12~1.2kN 의 하중범위를 적용한 경우로 응력확대계수범위(DK)가 28.9 MPa√m 부터 시작하게 된다. 이 부분은 음향방출율이 감소하는 범위에 해당하므로 다른 실험결과와 다르게 증가하는 경향이 없이 감소하는 거동만을 보이면서 응력확대계수범위에

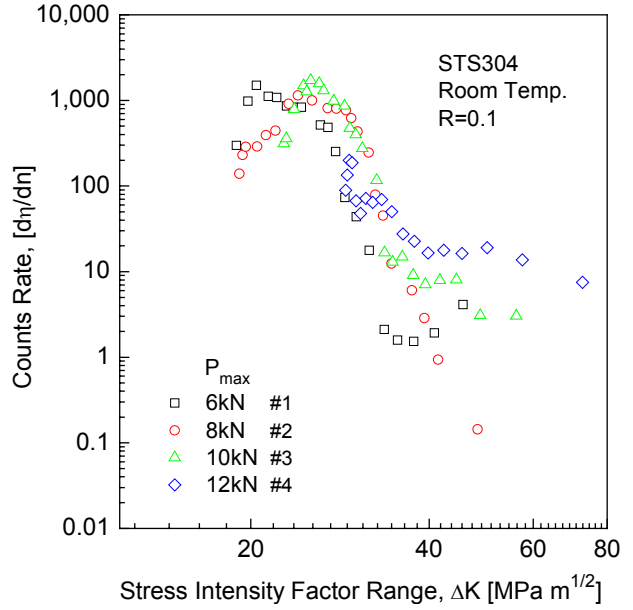


Fig. 4 Counts rate behavior under different load range (specimen #1~4)

해당하는 음향방출율을 바로 나타내고 있다. 각각의 실험 결과들은 그래프에서 서로 겹쳐지는 경향이 강하므로, 음향방출율이 응력확대계수범위에 유일하게 상관되는 경향을 보이고 있다. 하지만, Fig.3 의 균열진전율과 비교해 볼 때, 음향방출율은 그 분산정도가 큰 편이라 할 수 있다. 이러한 결과는 재료의 미소한 변형에 대해 민감하게 반응하는 음향방출법의 특성 때문으로 균열의 진전과정에서 나타나는 항복의 영향이 음향 방출로 나타날 때 큰 폭으로 표현되는 것임을 알 수 있다.

Fig.4 에서 응력확대계수범위가 40 MPa√m 이상인 영역에서는 하중진폭이 높을수록 음향방출율의 분산정도가 더욱 커짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 하중진폭이 높을 때, 피로균열진전실험의 요구 조건인 미소항복조건(small scale yielding condition)을 빨리 벗어나기 때문이다. 선형탄성파괴역학에서는 미소항복조건을 만족시킬 때 응력확대계수(K)를 적용시킬 수 있다는 제한조건을 두고 있다.

$$(w-a) > \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2)$$

미소항복조건이란 하중의 크기에 관계없이 식(2)와 같이 균열이 진전되지 않은 리거먼트(uncracked ligament, w-a) 조건으로, 형상과 관련되는 요구 조건이다. 따라서, 동일한 크기의 시편을 사용한 본 실험에서 하중진폭이 높을수록, 균열선단에 손상이 집중되지 않고, 균열이 진전되지 않은 리거먼트(uncracked ligament, w-a) 부분까지 손상이 있음을 짐작할 수 있다.

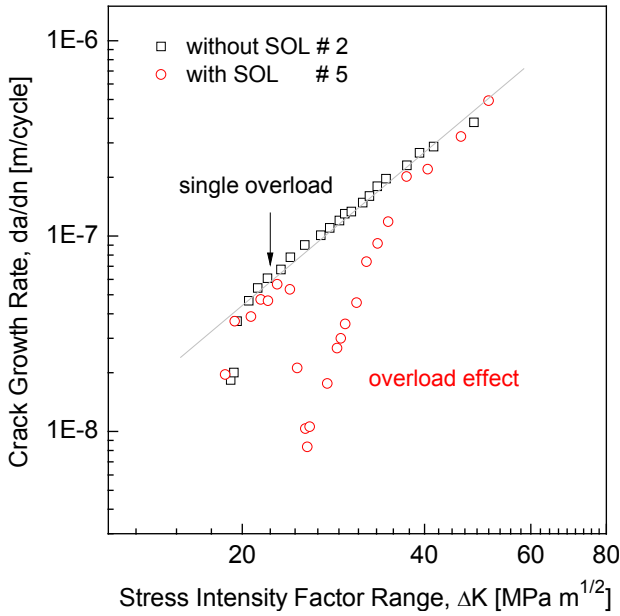


Fig. 5 Comparison of crack growth rate behavior with and without overload (specimen #2, 5)

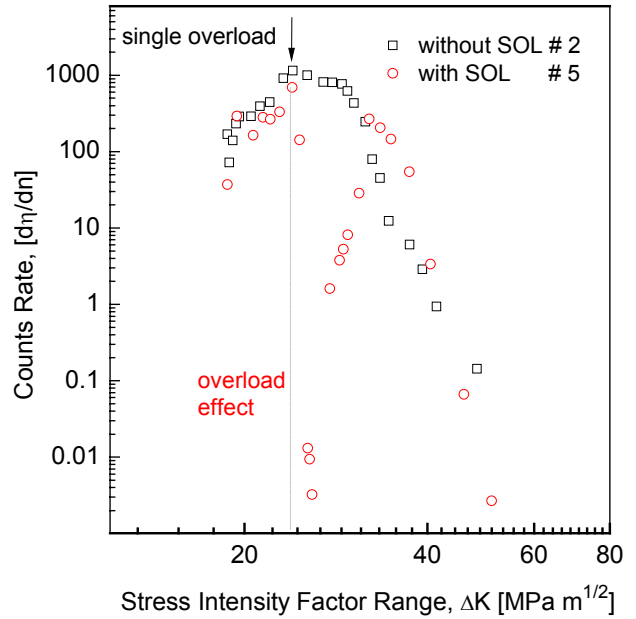


Fig. 6 Comparison of counts rate behavior with and without overload (specimen #2,5)

4. 가변진폭하중에서의 음향방출 거동

4.1 과대하중에서의 음향방출

Fig.5 는 일정진폭하중에 의한 균열진전을 과대하중이 있는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하여 나타낸 것이다. 단일과대하중(single overload)은 Table 2 에 나타낸 바와 같이 천이가 일어나는 $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 응력확대계수범위에서 2.0의 과대하중비(overload ratio)로 적용된 것이다. 단일과대하중이 적용된 후에는 균열지연(crack retardation)이 생김을 알 수 있는데, Fig.7 에서 보는 바와 같이 균열선단에서 소성영역이 크게 형성되어 압축잔류응력이 작용하기 때문이다. 압축잔류응력이 있을 경우에는 동일한 진폭으로 하중을 가하더라도 압축잔류응력이 없을 때 보다 균열이 적게 열리기 때문에 균열의 진전속도가 낮아지게 된다. 하지만, 균열이 진전함에 따라 과대하중으로 인한 소성영역을 서서히 벗어나면서, 과대하중이 없을 때의 응력확대계수에 해당하는 진전을 회복해 간다. Fig.5 에서 이러한 균열진전에 대한 거동을 전체적으로 확인해 볼 수 있다.

Fig.7 은 이에 대응하는 응력확대계수와 음향방출율의 관계를 보여주고 있다. 과대하중이 적용된 지점에서 음향방출율은 균열진전의 거동과 유사하게 급격한 감소를 보인 다음, 과대하중이 적용되지 않았을 때의 음향방출율을 서서히 회복해 감을 알 수 있다. 이러한 음향방출법의 거동은 균열이 지연되는 원인과 동일하게 소성영역의 과대한 형성 때문이다. 그러나, 균열지연의 궁극적인 기구(mechanism)는 압축잔류응력에 의한 것이지만, 음

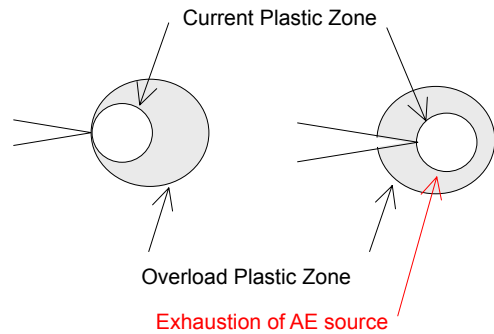


Fig. 7 Exhaustion of acoustic emission source due to overload

향방출율의 저하는 소성영역 확대 그 자체에 있다고 할 수 있다.

Fig.8 에서 과대하중으로 인한 소성영역과 진행 중인 사이클에 의한 소성영역을 비교해 볼 수 있다. 진행 중인 소성영역이 과대하중으로 인한 소성영역 구간을 완전히 벗어날 때 까지 음향방출율은 증가하는 경향을 나타낼 수 밖에 없음을 알 수 있으며, 균열진전이 완전히 회복될 때 음향방출율도 원래의 경향을 따라감을 알 수 있다. Fig.6 에서 과대하중에 의한 음향방출율 변화가 나타나는 구간은 $25\sim35 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 부분이며, 이 구간은 $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이상에 해당하므로 응력확대계수범위(DP)가 증가할 때 음향방출율이 감소되는 구간이다. 따라서 과대하중으로 인해 음향방출율이 증가하는 거동을 뚜렷하게 확인해 볼 수 있다. 과대하중이 $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이하에서 적용되었다면 음향방출율이 증가하는 경향은 동일할 것이나, 음향방출율의 기수가 달라질 것이므로 과대하중의 영향을 짐작해

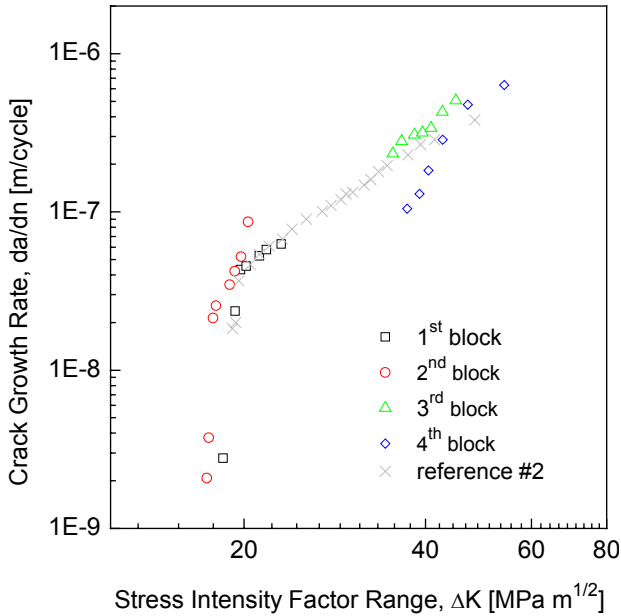


Fig. 8 Crack growth rate behavior under four loading block (specimen #2, 6)

볼 수 있을 것이다. 과대하중으로 인한 음향방출율과 균열진전율의 거동은 각기 다른 기구에 의해 균열선단의 소성영역 변화를 반영하는 결과이지만, 두 인자(parameter)의 거동에 있어 유사성을 확인해 볼 수 있는 결과로써, 실제 구조물에 있어서 과대하중으로 인한 균열단힘을 감지하는 정보가 될 수 있을 것이다.

4.2 다중진폭하중에서의 음향방출

일정진폭의 하중블럭/loading block)으로 이루어지는 가변진폭하중의 경우, 응력확대계수범위는 일정진폭하중의 경우와 동일하게 식(3)~(5)에 의해 계산될 수 있다.

$$\Delta K = \Delta P \times f(\alpha) \tag{3}$$

$$f(\alpha) = \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \tag{4}$$

$$\alpha = a / W \tag{5}$$

이때, 블럭간의 하중진폭과 그때의 균열길이에 따라 응력확대계수범위의 변화가 생긴다. Table 2에 나타난 바와 같이 시편 #6의 시험은 4개의 하중블럭을 거치면서 첫째와 둘째 하중블럭과, 셋째와 넷째 하중블럭의 응력확대계수범위가 비슷한 범위에 나타나도록 조합되었다. 이러한 경우에는 하중과 균열길이가 모두 다른 경우에서 음향방출

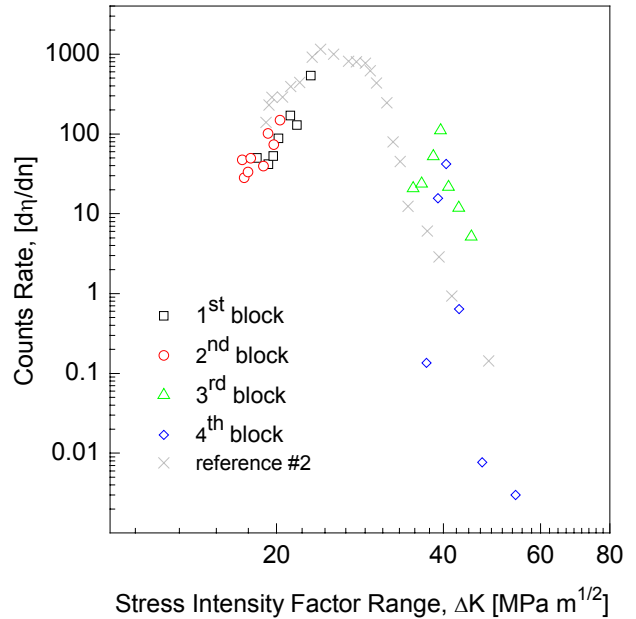


Fig. 9 Count rate behavior under four loading block (specimen #2, 6)

율과 응력확대계수범위의 상관관계를 확인할 수 있다.

Fig.8 은 이러한 가변진폭하중조건에 대한 균열진전율을 보여주고 있다. 시편 #2의 결과를 참조하여 각 하중블럭에 의한 응력확대계수범위와 균열진전율을 확인해 볼 수 있다. 균열진전율은 블럭간의 하중진폭 차이로 인해 과대하중(overload)과 과소하중(underload)의 영향이 나타나지만, 가변진폭하중인 경우에도 응력확대계수에 해당하는 균열진전율을 잘 나타내고 있다.

Fig.9 는 음향방출율의 거동을 나타내고 있다. 25 MPa√m 이하의 음향방출율이 증가하는 구간에서는 첫째와 둘째블럭이 동일하게 증가하는 경향을 보이고 있으며, 25 MPa√m 이상의 구간에서도 일정진폭의 경우처럼 감소하는 경향을 보이고 있다. 응력확대계수와 음향방출율간의 상관관계는 18~21 MPa√m 에 해당하는 첫째와 둘째블럭이 35~50 MPa√m 범위의 블럭보다 더 좋은 결과를 보이는데, 앞서 언급한 바와 같이 35~50 MPa√m 범위가 미소항복조건에 가깝게 하중이 작용하기 때문이다.

5. 고찰

균열진전이란 탄성상태에 있던 재료가 소성상태로 변하고 소성상태에서 미소한 파괴가 일어나는 일련의 과정이라 할 수 있다. 304 강의 경우, 음향방출은 탄성에서 소성상태로 변하는 항복점 부

근에서 대부분이 발생함을 인장시험을 통하여 확인하였으므로 균열진전의 한 단계인 탄성에서 소성으로 변하는 항복과정에서 음향방출이 관련됨을 알 수 있다. 피로균열진전에서는 미소항복조건이 유지될 경우, 파괴역학의 매개변수인 응력확대계수를 적용하여 균열진전율을 나타낸다. 응력확대계수는 균열선단의 상태를 독립적으로 표현할 수 있는 매개변수이기 때문에 응력확대계수에 의해 균열이 진전되는 율(rate)이 그 재료의 기계적 성질로 유일하게 결정이 된다. 그러므로, 응력확대계수와 균열진전율의 관계와 유사하게 응력확대계수와 균열진전율의 상관관계를 생각해 볼 수 있다. 일정진폭하중에서 이들의 상관관계는 균열진전율과 응력확대계수의 관계처럼 직선으로 나타나지 않고 증가 후 감소하는 경향을 보였다. 이러한 이유는 재료의 변형 즉, 슬립에 대한 양상이 균열이 진전됨에 따라 달라지기 때문이다. 이 같은 경향에 대해 균열길이와 하중을 달리한 실험결과에서 전체적으로 응력확대계수에 의해 음향방출율이 비교적 잘 상관하는 결과를 보였다. 하지만 균열진전율보다 음향방출율이 데이터의 분산정도가 크게 나타났는데, 미세한 변형에 민감한 음향방출법의 특성 때문이라 생각된다. 이와 같은 상관관계는 304 강의 음향방출이 항복을 일으킬 때 집중되어 발생하는 특징 때문인 것으로, 균열이 진전할 때 균열선단의 슬립의 상태를 잘 반영하고 있기 때문이다. 만약 시험재료가 달라질 경우, 음향방출에 대한 기본적인 기구가 달라져서 균열진전에 여러 기구가 복합적으로 작용할 수 있으므로, 이러한 경향은 달라질 수 있으며 그 상관관계가 이와 같지 않을 수도 있을 것이라 생각된다.

6. 결론

여러 하중조건에서 피로균열진전시험을 행하고, 이와 동시에 받아들인 음향방출 신호를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 304 강의 피로균열진전에 따른 음향방출은 균열선단에서 항복을 일으킬 때 일어나는 슬립에 의한 기구가 지배적이며, $25 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 을 기준으로 응력확대계수가 증가함에 따라 음향방출율이 증가하는 구간과 감소하는 구간으로 크게 나눌 수가 있다.

(2) 단일과대하중이 가해질 경우, 소성영역 확대로 인해 음향방출율은 급격히 감소한 다음 과대하중이 적용되지 않았을 때의 음향방출율을 서서히 회복하는 거동을 보였다.

(3) 일정진폭의 하중블럭으로 이루어진 가변진폭하중에서 음향방출은 각각의 블럭에서 응력확대

계수에 해당하는 음향방출율을 그대로 상관하는 경향을 보였다.

(4) 미소항복조건이 유지되는 경우, 하중과 균열길이에 관계없이 응력확대계수범위에 의해 음향방출율이 연관되었다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) D.O. Harris and H.L. Dunegan, 1974 "Continuous Monitoring of Fatigue-Crack Growth by Acoustic-Emission Techniques," *Experimental Mechanics*, Vol.14, pp. 71-81
- (2) A.C.E. Sinclair and D.C. Connors, 1977, "Acoustic Emission Analysis during Fatigue Crack Growth in Steel," *Materials Science and Engineering*, Vol.28, pp.263~273
- (3) Kang Yong Lee and Hyun Kyu Kim, 1986, "Relationship between Fatigue Crack Growth Rate and Total Acoustic Emission Counts per Cycle," *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol.23, No.3, pp.17~26
- (4) T.C. Lindley, I.G. Palmer and C.E. Richards, 1978, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Growth," *Materials Science and Engineering*, Vol.32, pp.1~15
- (5) F. Hamel, J.P. Bailon and M.N. Bassim, 1981, "Acoustic Emission Mechanisms During High-cycle Fatigue," *Engineering Fracture Mechanic*, Vol.14, pp.853-860
- (6) Moorthy V., Jayakumar T. and Raj Baldev, 1996, "Influence of microstructure on acoustic emission behavior during stage 2 fatigue crack growth in solution annealed, thermally aged and weld specimens of AISI type 316 stainless steel," *Material Science and Engineering A*, Vol.212, pp.273~280
- (7) P. Paris and F. Erdogan, 1963 "A Critical Analysis of Crack Propagation Law," *Journal of Basic Engineering*, Vol.85, pp. 528~534
- (8) N.M. Grinberg, "Stage II fatigue crack growth," 1984, *International Journal of Fatigue*, 1984, Vol.6, No.4, pp.229-242
- (9) Masuda, A. Ohta, S. Nishijima and E. Sasaki, 1980, "Fatigue striation in a wide range of crack propagation rates up to $70 \mu\text{m}/\text{cycle}$ in a ductile structural steel," *Journal of Material Science*, Vol.15, pp.1663-1670