

충격하중에 의한 피로파괴 해석 기법 (Fatigue Analysis Technique Under Impact Load)



이 준 현*

1. 서 론

최근 자동차, 철도, 선박 등의 수송기관을 비롯한 기계의 고속화 및 구조물의 대형화가 진행됨에 따라 이들 기계, 구조물들에 작용하는 하중 형태도 더욱더 복잡, 다양해지고 있으며 특히 외부로부터 이들 구조물들이 충격하중(impact load)을 받는 기회가 점차적으로 증가하고 있다. 따라서 이와 같은 구조물의 안전성 확보를 위하여는 무엇보다 충격하중 특성을 고려한 설계 기술의 개발이 필연적인 과제로 대두되고 있다. 일반적으로 기계 또는 구조물에 충격하중이 작용하게 되면 이들 구성부재에 응력파(stress wave)가 발생하게 되며, 이때 부재 내에 발생된 응력파는 빠른 속도로 부재 내를 전파하게 된다. 특히 기계 또는 구조물을 구성하는 부재의 경우 일정길이를 가지는 유한 부재이기 때문에 이 경우에 있어서 충격하중에 의해 발생, 전파된 응력파는 부재의 경계면에서 반사, 중첩되어 실제 부재 내에 작용

하는 실응력의 크기는 초기 구조물 부재에 가해진 응력크기보다 훨씬 높은 응력을 부재에 부여하게 된다.

따라서 충격하중에 대한 부재내의 이와 같은 응력과 상승작용은 결국 기계 및 구조물의 안전성에 큰 영향을 미칠뿐 아니라 정하중 하에서 예상하기 어려운 파괴양상을 보이게 된다.

한편, 단발 충격하중에 의한 기계 및 구조물의 파손과 관련하여서는 최근 파괴역학의 급속한 발전에 의해 비교적 많은 연구가 미국, 일본 등의 선진 외국에서 수행^{1,2)}되어져왔고 특히 단일펄스(pulse) 또는 스텝(step)상의 응력을 받고 있는 균열부재의 파괴 조건은 동적응력확대계수치 $K(t)$ 와 동적파괴인성치 K_{Ic} 에 의해 평가되어 지고 있다. 그러나 실제 기계 및 구조물의 사용조건하에 있어서의 하중조건 및 경계조건은 위의 해석과정에서 가정한 조건들과 일치하지 않는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 이와 같은 경계조건을 불일치로 인하여 기계 및 구조물 내에 충격

* 부산대학교 기계공학부, 교수

하중이 작용하는 경우 초기 부재 내에 발생된 응력파의 파두(wave front)가 비교적 적은 경우에 있어서도 이들 응력파의 다중반사 및 중첩(superposition)효과에 의해 부재 내에 과대 응력펄스를 형성할 수 있기 때문에 기계 및 구조물의 안전성 및 신뢰성 확보를 위하여는 필히 이 부분에 대한 체계적인 연구가 수행되어야 한다.

특히 이와 같이 충격하중이 일정시간 반복적으로 구조물에 작용함에 따라 발생하는 충격피로(impact fatigue)현상은 앞의 단발충격하중에서 언급한 응력파의 반사 및 중첩에 의한 응력상승 효과가 단발충격하중 하에서 보다 현저하게 나타날 뿐 아니라 일반 피로손상거동과는 상이한 손상거동을 보이기 때문에 기계 및 구조물에 주는 파손 위험성은 더욱 더 높다.

따라서 여기서는 일반피로 문제와 달리 국내에서 비교적 초기단계수준에 머물러 있는 충격피로 파괴문제의 주요 특성 및 그 해석 기법에 대하여 소개하고자 한다.

2. 충격하중에 의한 피로파괴특성

앞에서 언급한 바와 같이 최근 발생되고 있는 기계, 구조물 파손사고의 약 80%는 주로 피로파괴에 의한 것이며, 특히 이중에서 상당부분이 충격피로 하중에 의한 것으로 보고되어지고 있다⁸⁾. 그러나 충격피로의 경우 일반피로 손상기구 측면에서 해석이 곤란한 여러 문제들이 제기되고 있기 때문에 충격하중하에서 발생하는 피로현상의 특성을 명확히 이해하는 것이 실제 실하중에 대한 내충격피로 설계기법을 확립하기 위하여 꼭 필요한 부분이다.

2.1 충격피로 시험기의 설계, 제작 및 그 주요 특성

일반적으로 충격피로시험의 경우 통상적으로 수행되고 있는 일반피로시험과는 달리 표준적인 피로시험기가 현재 없을 뿐 아니라 단발 충격하중에 대한 충격강도 평가기법도 아직 완전히 확립되어져 있지 않기 때문에 연구 수행상 어려움이 수반된다. 특히 충격피로시험의 경우 충격하중발생 메카니즘상 반복하중속도를 일반피로시

험과 같이 높일 수 없기 때문에 피로시험의 수행에 장시간을 요하며, 또 실험중 소음을 발생하는 관계로 실험환경이 제약받는 어려움이 있다.

한편 충격피로문제와 관련된 연구수행을 위한 충격피로시험기의 형태는 충격하중 발생기구 및 시험편에 작용하는 충격하중 전파시스템이 달라지면 그에 따른 하중 파형이 달라지기 때문에 연구 목적에 따라 충격피로시험기를 자체적으로 설계, 제작하여 사용하는 경우가 일반적이다. 현재까지 이용되고 있는 충격피로 시험기의 경우 목적상 다음과 같이 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 충격파손자체만의 손상기구를 연구하기 위하여는 그림 1과 같은 간단한 Hopkinson bar 방식의 원통강관(cylindrical tube) 낙하식 충격피로시험기가 이용되고 있다. 즉 모터에 의해 가이드 환봉(4)의 외벽을 타고 상승한 충격원통(3)이 낙하하면서 시험편 한쪽 끝에 고정된 원판(2)에 가하게 되면 시험편에는 충격인장하중이 작용하게 되며 1차원 탄성과 전파이론에 근거하여 그림 1(b)와 같은 형태의 충격응력파형이 발생하게 된다.

일반적으로 이와 같은 낙하식 충격피로시험기의 경우 시험편에 가해지는 하중 반복속도도 약 10Hz 이하로 비교적 낮기 때문에 반복응력사이클의 범위도 10^4 사이클 정도로 한정되어 진다. 한편 10^7 사이클 또는 그 이상의 고 사이클 범위에 있어서의 충격 피로 특성 데이터를 얻어 통상의 일반 피로 특성 데이터와 비교함으로써 충격 피로 특성을 검토하고자 하는 경우, 이에 따른 시험기의 고속운전 중에 특별한 공리가 필요하며 이 경우 일반적으로 저속 충격 피로 사이클과 비교해 얻을 수 있는 충격하중 파형의 형태는 다소 명확성이 떨어지게 된다.

그림 2는 충격하중에 따른 피로균열의 발생 및 전파특성을 규명하기 위하여 많이 사용된 충격인장 및 충격 비틀림 피로시험기의 각각의 예¹⁾를 나타내었다.

먼저 그림 2(a)의 충격인장 피로시험기의 경우 그림에서 보여주는 바와 같이 압축편(compression piece)이 회전원판의 원주상에 부착된 캠(cam)에 의해 구동되어져 충격스프링을 압축한다. 이때 압축편이 캠의 최대 압축점(stroke)

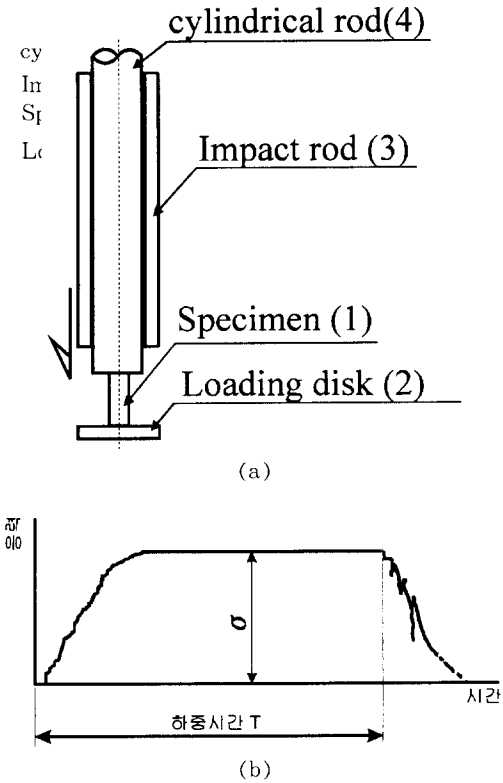
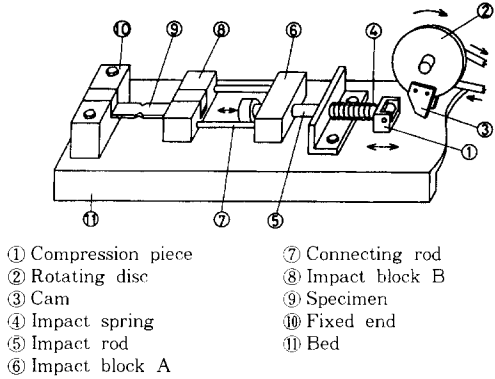


그림 1 Hopkinson bar 방식에 의한 충격피로시험기의 원리 및 충격응력파형

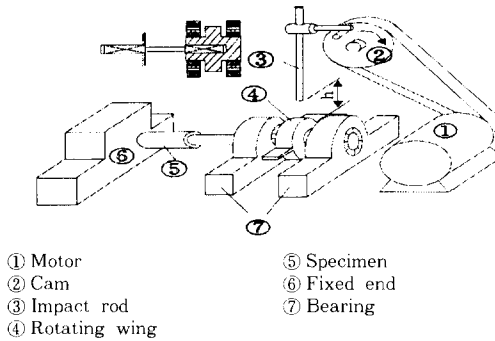
을 통과하면 압축편은 해방되어져 스프링 복원력에 의해 충격부의 한쪽이 충격블록(impact block)에 충돌하게 되고 이때 발생하는 충격력이 연결봉(connecting rod)을 통해 시험편의 한쪽에 부착된 충격 블록에 전달되어져 충격하중이 시험편에 가해지도록 설계되어져 있다.

한편 그림 2(b)의 충격비틀림 피로시험기의 경우 모터에 의해 구동되어진 캠(cam)에 의해 충격봉이 일정높이까지 상승한 후 자유낙하에 의해 회전날개(rotating wing)에 충돌하게되며 이때 회전날개에 접속되어진 시험편의 한 단에 충격토크(torque)가 가해지게 함으로써 시험편에 충격 비틀림 하중을 작용시킬 수 있도록 설계되어 있다.

2.2 충격하중에 의한 응력의 중첩, 상승효과
일반적으로 유한한 길이를 가지는 구조물의 부



(a)



(b)

그림 2 (a)충격인상 피로시험기 (b)충격비틀림 피로시험기

재에 있어서 충격하중이 작용하는 경우 충격응력의 최대치가 시험편 길이의 영향을 받게된다. 특히 강재(steel)의 경우 탄성응력파는 빠른 속도로 부재 내를 전파, 반사함에 따라 응력파형도 다소 복잡한 양상을 보이게 된다. 그림 3은 한쪽 끝단에 고정된 봉(길이 L, 단위단면적)에 질량 M의 강체가 속도 V로 충돌하는 경우의 동적응력을 이론적으로 계산하기 위한 이론모델을 나타낸 것이다. 이때 충격단의 운동방정식은 다음 식 (1)과 같이 나타나진다⁹⁾.

$$\frac{M}{\sqrt{\rho E}} \frac{da}{dt} + \sigma = 0 \tag{1}$$

여기서 σ, ρ, E 는 각각 충격단에서의 충격응력, 봉의 밀도, Young률을 나타낸다.

하면 시간 $t < 2L/C_l$ 에 있어서의 위의 식(1)의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-t\sqrt{\rho E}/M) \quad (2)$$

여기서 σ_0 는 초기입사응력으로 초기속도를 V_0 라고 하면 $\sigma_0 = V_0\sqrt{\rho E}$ 로 나타내진다.

또 $C_l (= \sqrt{E/\rho})$ 는 1차원 탄성파(종파)의 전파속도를 나타낸다.

하면 봉의 한쪽 끝단이 강벽에 고정되어져 있기 때문에 시간 $t > 2L/C_l$ 에 있어서의 응력은 n 회까지의 파의 중첩에 의해 나타낼 수 있으며 n 회까지의 응력파의 반사에 의해 발생하는 응력은 간단한 형태로 나타낼 수는 없지만 $nT < t < (n+1)T$, $T = 2L/C_l$ 에 있어서 다음(3), (4)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = P_n(t) + P_{n-1}(t-T) \quad (3)$$

$$P_n(t) = P_{n-1}(t) + \sigma_0 \sum_{r=0}^n \frac{nCr}{r!} \left\{ 4\alpha \left(n - \frac{t}{T} \right) \right\}^r \exp \left\{ -2\alpha \left(\frac{t}{T} - n \right) \right\} \quad (4)$$

여기서 $nCr = \frac{n!}{\{r!(n-r)!\}}$, $\alpha = \rho L/M$ 을 나타내며 식(4)의 $P_n(t)$ 는 충격단으로부터 고정단으로 향하는 응력파의 중첩을 나타내며, 이 식으로부터 응력은 봉의 길이에 의존하는 것을 알 수 있다.

그림 4는 위 모델에 근거하여 동적응력의 부재 크기효과(size effect)를 PMMA 시험편에 대하여 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 부재의 길이에 따라 동적응력의 최대치가 변화하고 있음을 보여주고 있으며, 부재길이가 짧을 경우 응력 최대치가 상승하고 있음을 보여주고 있다. 따

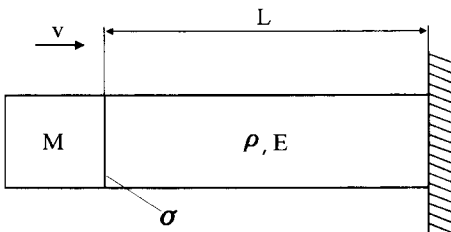


그림 3 동적 응력 계산 모델

라서 충격피로하중의 경우 일반 피로하중 문제와 달리 이와 같은 반복적인 응력파의 다중반사에 의한 중첩효과를 고려하여야 할 필요가 있다.

2.3 충격피로 거동특성에 대한 시험편의 size effect

앞의 2.2에서 언급한 바와 같이 충격하중의 경우 시험편 내에 발생한 응력파의 전파 및 다중반사에 의한 응력상승효과가 일어나기 때문에 이에 따른 충격피로거동에 있어서도 기계 및 구조물의 크기효과(size effect)가 나타나게 된다. 그림 5는 충격인장 피로하중 하에서 양단노치(notch)를 가지는 탄소강(S45C)시험편에서 스트레인게이지를 이용하여 실제적으로 측정된 스트레인 파형의 예를 나타낸 것으로 측정결과에서 보여주는 바와 같이 측정 스트레인은 시험편의 길이에 따라 스트레인의 최대치가 변화하고 있음을 보여주고 있다.

즉, $l = 50\text{mm}$ 시험편에 있어서 측정된 스트레인의 최대치는 $l = 150\text{mm}$ 시험편에 있어서 측정된 결과보다 그 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 응력파의 다중반사에 의한 응력상승효과에 기인하는 것으로 같은 크기의 충격피로하중에 있어서도 시험편의 길이가 짧은 $l = 50\text{mm}$ 의 경우 응력상승효과가 높게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

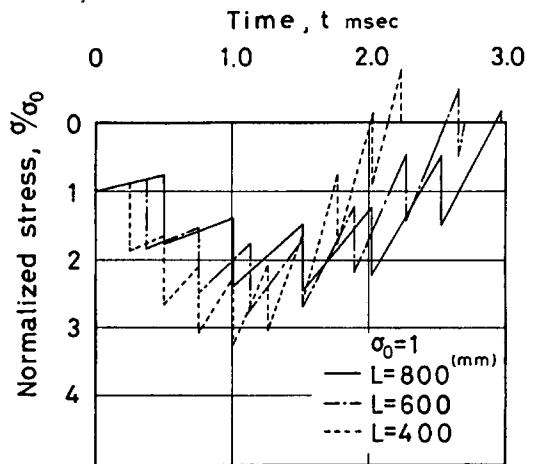


그림 4 이론 응력 파형(PMMA 시험편)

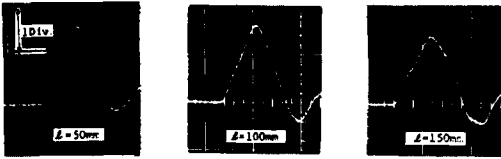
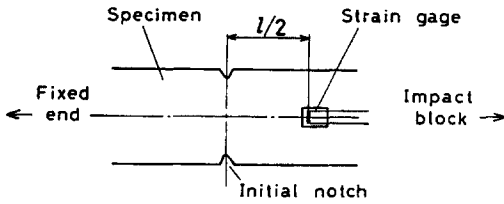


그림 5 강재에 대하여 측정된 응력파형의 예

그림 6은 앞의 그림 2(a)에서 보여준 충격인장 피로시험기를 이용하여 탄소강(S45C)의 피로균열 성장거동을 관찰한 결과를 나타내고 있다.

그림 내에서 A재는 열처리를 하지 않은 모재의 경우 또 B재는 열처리를 행한 경우의 각각에 대한 균열길이 a와 충격피로하중의 반복 사이클 N과의 관계를 나타내고 있다. 결과에서 보여주는 바와 같이 A, B재 모두 짧은 길이의 시험편이 긴 길이의 시험편에 비해 균열발생 수명 및 파단수명이 짧아지고 있음을 알 수 있고, 이와 같은 피로수명의 시험편길이 의존성은 충격피로에 대한 주요 특성으로 통상의 일반피로에 있어서 관찰되는 시험편 크기 의존성과는 본질적으로 다른 특성을 지닌다. 또 열처리를 행한 B재, 특히 길이가 긴 BL시험편의 피로수명이 증가하고 있

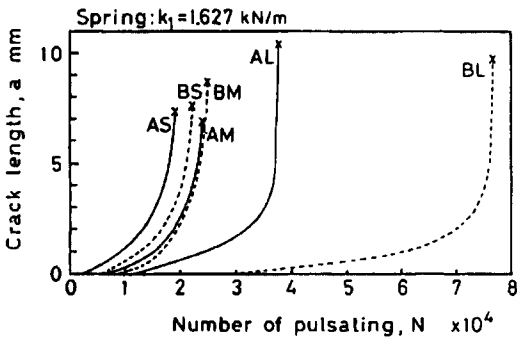


그림 6 충격인장 피로하중에 대한 균열 성장곡선

는 것으로부터 열처리에 의한 연성의 향상은 내충격피로 특성의 개선에 효과적임을 보여주고 있다.

그림 7은 앞의 그림 2(b)에서 보여준 충격비틀림 피로시험기로부터 측정된 일반구조용 압연강재(SS41)의 피로특성을 하중 반복수 N과 충격봉의 상승높이 h와의 관계를 나타내었다. 본 결과에서 보여주는 바와 같이 충격비틀림 피로시험기의 경우도 앞의 그림 5에서 보여준 충격인장 피로시험에서 관찰되는 피로수명의 시험편길이 의존효과가 관찰되고 있으며 특히 시험편의 작은 직경부분 L'이 짧아질수록 피로수명도 단축되고 있음을 알 수 있으며 하중단보다 고정단의 직경이 작아질수록 피로수명이 감소하고 있음을 보여주고 있다.

2.4 충격 하중 하에서 피로강도 및 피로균열 진전특성

앞에서 언급한 바와 같이 충격하중 하에서의 피로특성의 주요 메카니즘은 일반 피로하중과 본질적으로 상이하며 특히 충격피로의 경우 응력파의 다중 반사에 의한 응력 상승작용으로 동일 피로하중하에서도 충격피로강도의 저하가 일반피로강도에 비교해 현저하게 나타난다.

그림 8은 구조용 탄소강에 대한 충격 피로강도 특성을 S-N 곡선으로 나타낸 것으로 그림 8(a)는 S45C의 경우, 또 그림 8(b)는 S50C에 대한 결과를 나타낸 것이다. 그림 8(a), (b) 모두에서 관찰되어지는 바와 같이 피로강도 특성은 정현파

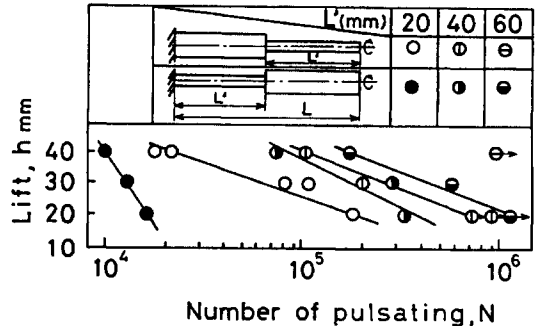


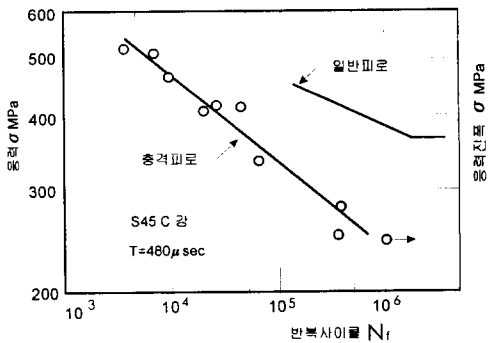
그림 7 충격비틀림 피로하중에 대한 피로강도 특성 (l=80mm)

하중에 의한 일반 피로에 비하여 충격 피로의 강도 감소가 현저하게 관찰됨을 알 수 있다. 따라서 이는 종래 파괴역학적 관점에서 체계적인 연구를 활발하게 수행해 온 일반 피로 파괴 특성과는 달리 충격 피로의 경우 피로 손상의 발생, 전파 메커니즘이 상이함을 보여주고 있다.

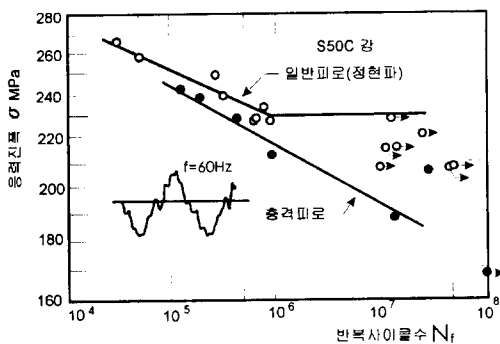
그림 9는 충격하중에 대한 피로 균열 진전 거동을 일반 피로 하중의 결과와 비교하여 나타낸 것으로 그림 9(a)는 응력비 R=-0.4의 경우의 알루미늄 합금강에 대한 결과이며 그림 9(b)는 응력비 R=0 에서의 고장력 합금강에 대한 특성을 나타내고 있다.

결과에서 보여주는 바와 같이 충격 피로 하중 하에서의 균열 성장속도 da/dN 은 두 재료 모두 일반 피로 하중 하에서보다 급격히 빠른 성장 속도를 보여주고 있으며, 특히 알루미늄 합금강의

경우 그 경향이 현저함을 보여주고 있다. 이와 같은 충격 피로 하중 하에서의 균열 성장 속도의 증가는 피로하중에 대한 균열 선단의 균열 열림 효과(crack opening effect)에 의한 것으로 일

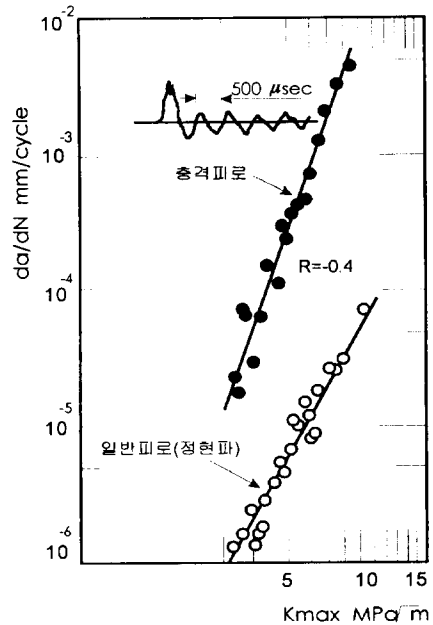


(a)S45C 강

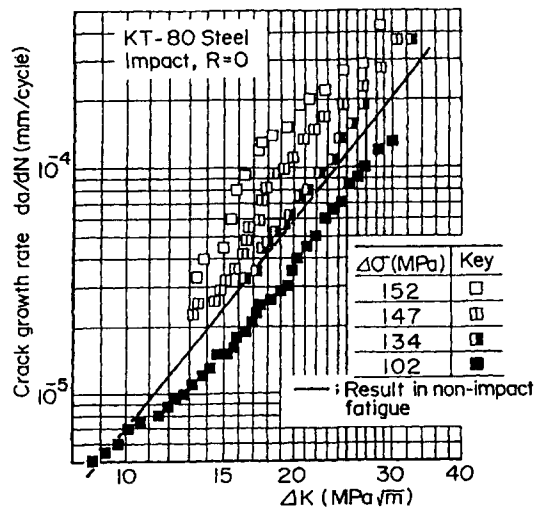


(b)S50C 강

그림 8 충격피로와 일반피로의 피로강도 특성 비교



(a)알루미늄 합금강(ZK141F)



(b)고장력 합금강(KT-80)

그림 9 충격하중에 대한 피로균열 진전거동

반 피로 하중 하에서보다 균열 닫힘 현상이 증가하는 것에 따른 것으로 생각되어진다.

그림 10은 일반 피로와 충격 피로 하중 하에서의 피로 균열 열림비(crack opening ratio), U와 응력세기 계수폭, ΔK 의 관계를 나타내고 있다. 정현파 하중에서 보여주는 일반피로의 경우 ΔK 의 증가와 더불어 U의 값은 하중 증가 초기에 급속하게 상승한 후 점차적으로 어떤 일정치로 포화 되어가고 있음을 알 수 있다.


반면 충격 하중 하에서의 U값은 ΔK 에 대하여 거의 직선적으로 변화하는 양상을 보여주고 있으며 또 $\Delta\sigma$ 값이 증가할수록 U값이 커지고 있음을 나타내고 있다.

3. 결 론

앞에서 언급한 바와 같이 최근 우리 주변에는 기계, 구조물의 고속화 및 대형화에 따른 충격하중의 발생 빈도가 급격하게 증가하고 있다. 따라서 이와 같은 충격하중을 받는 기계 및 구조물의 안정성 및 신뢰성 확보를 위하여는 먼저 충격하중 특성을 고려한 내충격 설계기법의 확립이 필요하다. 특히 충격하중의 경우 종래의 파괴역학적 관점에서 주로 다루어 왔던 정적하중 및 피로 하중 하에서의 재료거동 특성과 달리 응력파의 전파특성이 재료의 충격강도 및 균열발생, 전파특성에 큰 영향을 미치기 때문에 이를 고려한 역학적 검토가 필요하다. 한편 이와 같은 충격하중이 반복적으로 작용하는 충격 피로의 경우 지금까지 많은 연구로 내피로 설계기법이 확립된 일

반 피로 특성과 달리 아직 그 주요 메카니즘이 규명되지 않은 부분이 많아 이 부분에 대한 체계적인 연구가 국내에서도 요구된다.

참 고 문 헌

1. I. Maekawa, "Characteristic Properties of Impact Strength of Materials and the New Evaluating Method", Proc. of Int. Symposium on Impact Engineering, Vol. II, pp.587-594, 1992.
2. J. Duffy et al., "A Method of Dynamic Fracture Initiation Testing of Ceramics, J. of Eng. Met. Tech., ASME, Vol.110, pp.325-331, 1988.
3. Joon-Hyun Lee et al., "Investigation of the Dynamic Fracture Toughness for Aluminum Whisker Metal Matrix Composites", Prof of Int. Sympo. on Impact Engineering, Vol. II, pp.552-556, 1992.
4. J. D. Achenbach, "Wave Propagation in Elastic Solids", North-Holland American Elsevier, 1975.
5. M. F. Kanninen et al., "Dynamic Fracture Mechanics", in Advanced Fracture Mechanics, Oxford Univ. Press. pp.192-280, 1985.
6. J. Kalthoff et al., "Fracture Energy of Ceramics Measured at Different Loading Rates in Instrumented Tests", Proc. 3rd. Int. Conf. on Mechanical and Physical Behavior of Materials Under Dynamic Loading, Strasbourg, France, pp. 693-699, 1991.
7. J. Knauss, "Dynamic Fracture Toughness of Polymeric Materials", Advances in Fracture Research, p 2401, 1989.
8. 기계, 구조물의 파손사례와 해석기술, 일본기계학회, 1990.
9. S. Timoshenko and J. N. Goodier, "Theory of Elasticity", 3rd Ed., McGraw-Hill., New York, 1951. 

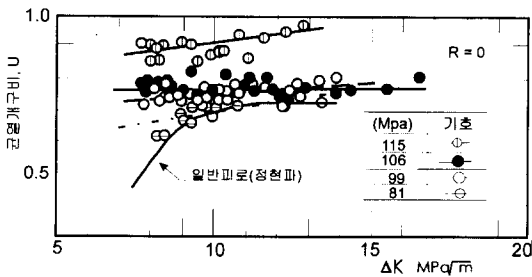


그림 10 충격피로하중에서의 피로균열선단의 균열열림 현상(알루미늄합금강)