

다이캐스트의 파괴와 피로¹⁾

金沢憲一*
千葉工業大學

Fracture and Fatigue of Die Castings

Ken-ichi Kanazawa*
Chiba Institute of Technology

번역 : 김억수²⁾

1. 서 언

최근 다이캐스트는 급속한 품질의 개선이 이루어지고 있으며, 반복 고부하를 받는 기계부품에도 응용되고 있다. 그러나 그 결과, 예상외의 파괴나 피로에 직면하고 있다. 본고에서는 알루미늄과 마그네슘합금에 한정하여 다이캐스트의 강도에 관하여 개략적으로 설명하고자 한다.

2. 인장강도와 파괴, 피로

다이캐스트의 피로에 관하여 이해하려면 다이캐스트재료의 특성뿐만 아니라 피로라는 물리현상을 이해하지 않으면 안된다. 일반적으로 금속재료의 변형이나 파괴, 피로는 주로 그 결정격자의 구조에 지배된다[1]. 다이캐스트도 그 예외는 아니며, 피로는 부하응력의 반복에 의한 균열이 진전하는 현상이다. 부하에 최대의 인장응력을 주면서 부하를 반복적으로 가하면, 미소 슬립(slip)이 표면에 집중적으로 일어나게 되어, Fig. 1과 같은 요철이 발생하게 된다. 이 현상은 일반적으로 부재를 서로 맞추기 위해 잘라낸 부분(切欠)과 같다. 응력집중에 의해 바닥부에서 균열이 발생한다. 이것이 피로에 있어 초기결함의 발생 process "Initiation"이다. 항복응력보다도 꽤 작은 부하에서도

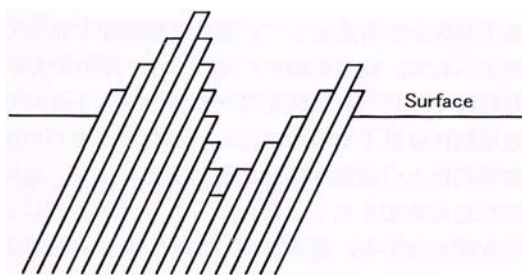


Fig. 1. 표면슬립에 의한 절흔(切欠)의 발생.

또 초기의 표면이 평활한 경우에도 이 Initiation은 일어날 수 있다. 이 process는 확률적인 현상이기도 하며, 균열이 생성하기까지의 부하 반복수에는 큰 편차가 생긴다. 일반적으로 S-N 곡선에 있어 편차는 이것이 주된 원인이다. 즉 당연한 것이 표면의 조도가 크게 되면 Initiation은 빨리 생긴다. 또 주조결함의 크기나 형상에 의한 것은 피로균열이 이미 발생하고 있는 상태가 되고, 이곳을 기점으로 하여 즉시 균열이 진전한다.

Initiation에 의해 균열이 생기면 부하의 반복은 한층더 균열

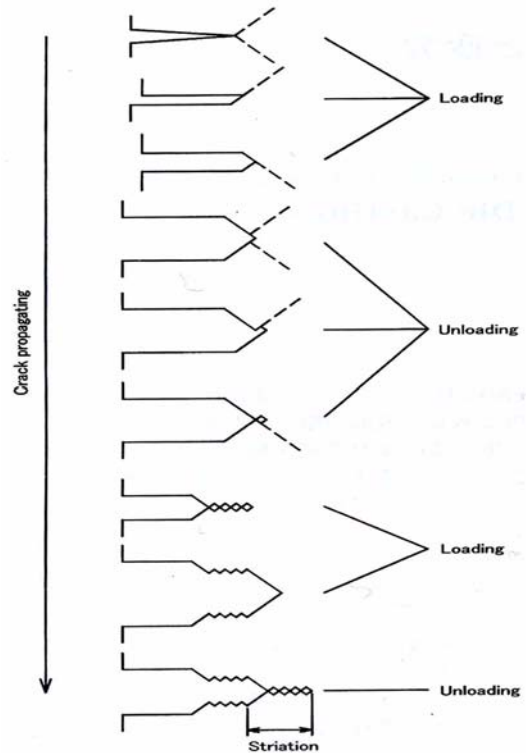


Fig. 2. 균열의 진전process.

¹⁾ 일본 주조공학회지: 鑄造工學 제 79권(2007) 제2호 page 79~82에 게재된 자료임.
²⁾ 한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)

을 서서히 진전시킨다. 이 process를 Fig. 2[1]에 나타내었다. 균열선단에 대하여 인장부하를 가하게 되면 거의 45° 방향의 2개면(최대 전단응력면)에서 슬립(slip)이 발생한다. 그 결과 균열선단은 둔화하는 것과 동시에 균열은 진전한다. 부하를 제거 시에는 새로운 생성된 면은 아니고 후방의 슬립(slip)면의 움직임에 의해 균열은 닫히게 된다. 다시 인장부하를 가하면 또 균열선단의 슬립면에 의해 균열은 진전하고, 부하를 제거하면 균열은 닫히게 되는데 이것이 균열진전의 process이다. 중요한 것은 균열에 대한 수직방향으로 인장응력이 부하되고 있는 점이다. 압축응력은 균열을 진전시키지 않는다. 즉 1회의 부하-부하제거 process에 의해 균열진전면에는 특유의 호(명주실) 모양이 생긴다. 이것이 "Striation"이다. 피로파면상의 Striation을 관찰하면 균열의 진전하는 방향이나 속도를 조사할 수 있다. 단 일반적으로 균열선단에서의 소성역이 큰 연성재에서는 Striation이 용이하게 생기지만, 다이캐스트에서는 소성역이 작기 때문에 생기기 어렵다. Fig. 3은 균열이 진전하여 갈 때의 균열선단의 소성역을 보이고 있다. Fig에서 알 수 있듯이 균열선단에는 땅콩모양과 같은 단면형상을 가진 소성역이 존재한다. Fig. 2의 process에서 균열이 진전할 때는 그 소성역을 자르지 않으면 안된다. 즉 균열은 스스로 소성역을 만들면서 그 안으로 나아가지 않으면 안 되는 까닭에, 소성역의 대소(크고 작음)가 균열진전이 쉽게 일어남과 관계가 있다. 이것은 다이캐스트의 피로를 이해하는데 가장 중요한 점의 하나이다. 상온에서 면심입방격자의 알루미늄합금은 슬립면을 많이 가지고 있기 때문에 균열선단에서의 소성역이 크고 균열진전에 대하여 저항이 크다. 즉 피로속도가 느리고, 균열로부터 파괴에 대한 안전성이 높다. 이것에 대하여 조밀육방격자인 마그네슘합금은 상온에서 슬립면의 수가 극히 적고 균열선단의 소성역이 작다. 따라서 피로균열은 진전하기 쉽다. 알루미늄합금은 철합금에 비하면 절대강도나 피로강도가 낮지만, 그 경량성을 생각하면 균형이 잡

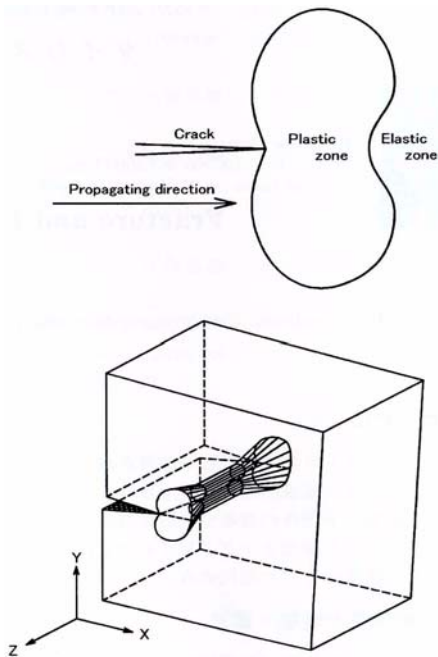


Fig. 3. 균열선단의 소성역.

힌 재료이다. 한편 마그네슘합금은 상기의 특성이 낮은 피로강도를 가져오고 있다. 균열선단의 소성역이 피로특성을 지배하고 있는 이상 이것은 피할 수 없는 것이다. 즉 한번 발생한 균열에 대하여 정적인 인장부하를 가하면 그 소성역은 Fig. 3의 아래 Fig에 보인 것처럼 표면에서 크고 내부에서 작게 된다. 표면부근에서는 표면에 따라던 2차원 응력(평면응력) 상태이며, 변형이 용이한 것에 대해서 내부에서는 두께방향의 변형이 구속된 2차원 변형(평면변형) 상태이며 변형이 제한되기 때문이다. 따라서 이 상태에서 부하를 크게 하면 소성역이 작아지고 진전저항이 작은 내부에서 균열은 진전하고 파괴에 이른다. 이때의 파괴저항이 파괴인성이라 부르는 특성치이다. 균열이 진전하는 현상으로서의 피로와 동일하기 때문에 피로강도가 작은 재료는 일반적으로 이 파괴인성도 낮다.

Fig. 4는 종축에 파괴인성(일반적으로 K_{IC} 로 표시)을 횡축에 인장강도를 양대수로 보인 것이다. 일반적으로 인장강도를 상승시키는 방법으로서 소성변형을 생기기 어렵게 하는 방법을 취한다. 결정을 미세하게 하는 방법이 그 대표적 방법이다. 그러나 전술한 것과 같이 균열선단에서의 소성역도 작아지기 때문에 파괴인성은 저하하는 것이다. 따라서 Fig에서와 같이 파괴인성과 인장강도는 역비례의 관계가 된다. 금속재료는 첨가원소를 더하거나 합금으로 하거나 열처리에 의해 조직을 변화시켜도 기본적으로 이 규칙을 피할 수는 없다. 횡축을 인장강도로 하지 않고 항복응력으로 하여도 경향은 같게 된다.

Fig. 5는 거의 동일한 합금재료에 관해서 보통재와 고강도재의 인장강도에 미치는 응력과 변형곡선을 보인 것이다. 어떤 방법, 예를 들면 상술한 것처럼 결정입경을 작게 하거나 첨가

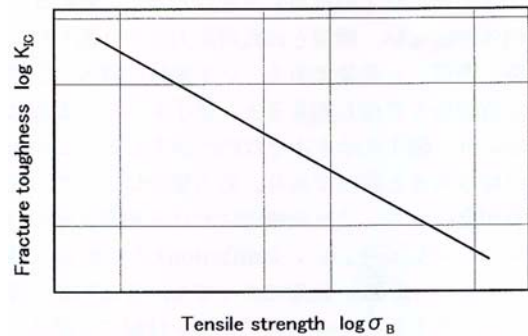


Fig. 4. 인장강도와 파괴인성.

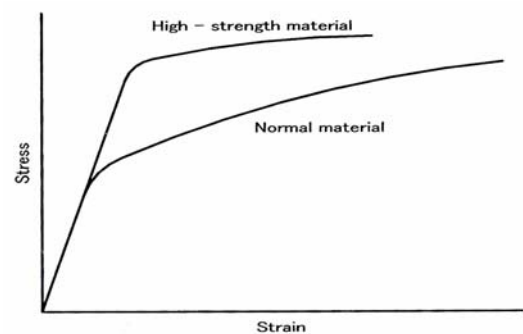


Fig. 5. 보통재와 고강도재의 응력-변형곡선.

원소에 의해 전위의 이동을 구속하거나 소성변형에 대한 저항을 크게 하는 것에 의해 항복응력을 높이는 것이 가능하다. 그 결과로서 일반적으로 항복후의 변형응력 상승은 적게 된다. 한편 보통재는 낮은 항복응력과 항복후의 큰 가공경화가 특징이다. 당연히 파괴변형은 보통재의 쪽이 크다. Fig. 3에서 술한 것처럼 피로에 관해서는 균열선단에 큰 소성역을 가능하게 하는 보통재의 쪽이 안전하다. 일반적으로 설계에서는 부재가 우선 항복하지 않는 것이 요구된다. 즉 부하응력과 항복응력의 차가 될 수 있는 한 큰 것이 좋다고 생각된다. 당연히 이것은 올바른 것이지만 하나의 관점에서 밖에 생각하지 않았다. 만약 피로가 생길 가능성이 있는 것이라면 다른 관점도 필요하다.

3. 다이캐스트의 파괴, 피로

Fig. 6은 몇 개의 대표적인 알루미늄합금 다이캐스트(백색표시)와 마그네슘합금 다이캐스트(흑색표시)에 관해서 상온에서의 인장강도에 미치는 응력-변형곡선을 보인 것이다. 알루미늄합금에서는 전신재 2017S도 추가하였다. 알루미늄합금 다이캐스트나 마그네슘합금 다이캐스트에서는 일반적으로 강종에서 볼 수 있는 항복현상이 보이지 않기 때문에 항복응력을 0.2%내력으로 평가하는 것이 많다. 마그네슘합금의 0.2%내력은 AC4CH, ADC12종, 전신재 2017S에 비하여 꽤 낮다. ADC3종과 거의 동등하다. 변형양식에 관해서도 양자는 크게 달라 알루미늄합금이 시험편 표점사이에서 거의 같은 변형을 보이는데 대해 마그네슘합금은 특정의 전단면에서의 변형이 지배적이다.

Fig. 6으로부터 얻을 수 있는 0.2%내력을 나타내면 Fig. 7과 같다. 마그네슘합금은 알루미늄합금의 거의 절반정도이다. 단 0.2%의 내력을 비중으로 나누면 Fig. 8이 되고 알루미늄합금에 가까운 값이 된다.

Fig. 9는 피로균열이 진전을 개시하여 파괴에 이를 때의 특성치, 파괴인성 K_{Ic} 이다. 알루미늄합금에 비하여 마그네슘합금의 값이 낮은 것을 알 수 있다.

각 합금마다 0.2% 내력을 횡축에 파괴인성치를 종축에 표시하면 Fig. 10이 된다. □는 각각의 특성치의 편차범위를 plot는 평균치를 나타내고 있다. ADC3종을 제외한 알루미늄합금은 양특성이 함께 높은 균형을 이룬 재료인데 반해 마그네슘합금

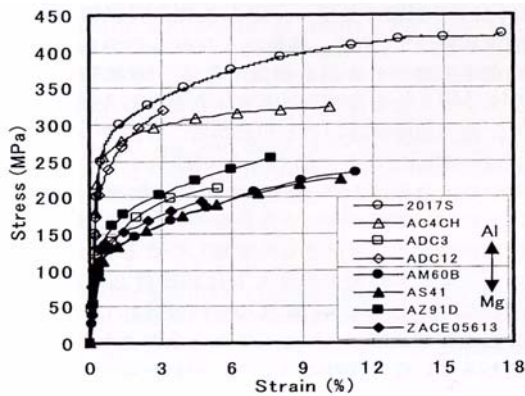


Fig. 6. 다이캐스트의 응력-변형곡선.

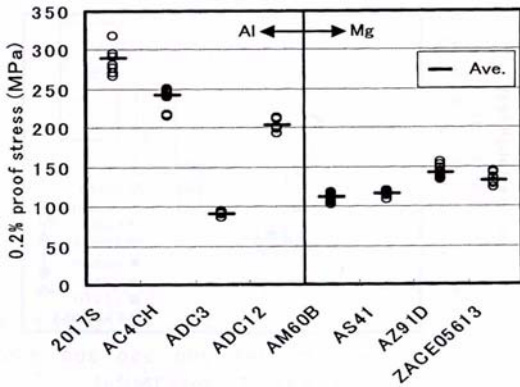


Fig. 7. 0.2% 내력.

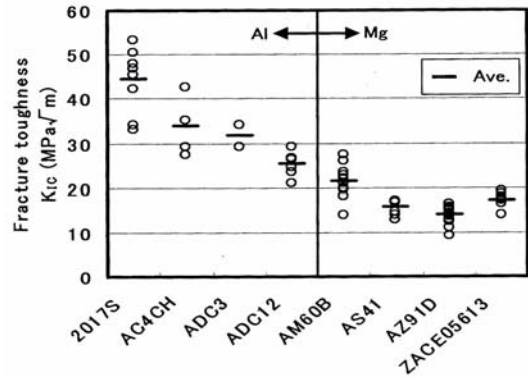


Fig. 9. 파괴인성.

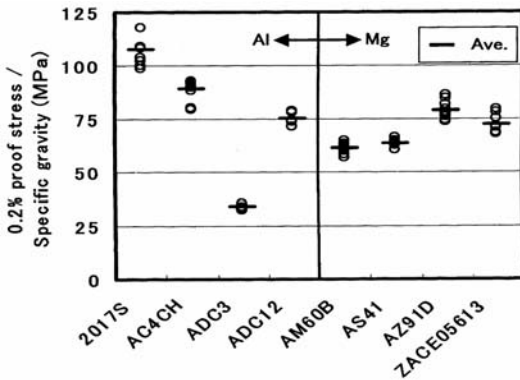


Fig. 8. 0.2% 내력/비중.

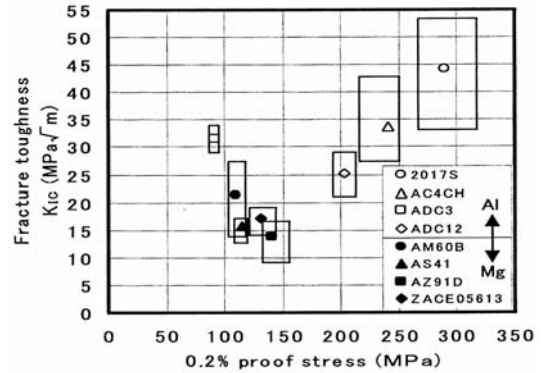


Fig. 10. 0.2% 내력과 파괴인성.

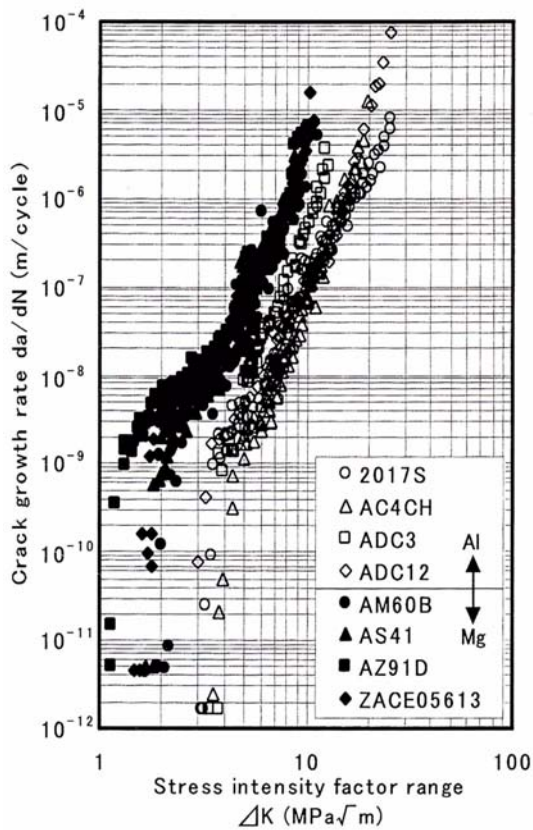


Fig. 11. 다이캐스트의 피로균열 진전 특성.

은 양특성이 함께 낮은 것을 알 수 있다. 알루미늄합금과의 차이가 크고 현재 알루미늄합금계의 부재를 마그네슘합금으로 치환하는 것이 어려움을 보여주고 있다.

Fig. 11은 CT시험편을 사용한 피로균열 진전시험에 의한 피로균열 진전특성이다. 횡축에 반복부하 ΔK , 종축이 부하 1회 당의 균열 진전량이다. 파괴인성과 동일하게 마그네슘합금은 알루미늄합금보다 좌측에 위치하고 있고, 피로속도가 빠른 것을 알 수 있다. 이 그래프 상의 기울기가 거의 일정한 중앙부(Paris측 영역이라 말할)에서는 마그네슘합금은 10~100배 더 피로속도가 빠르게 되어 있다. 따라서 마그네슘합금은 반복적으로 부하를 받는 부재에 사용하는 것이 극히 어려운 것을 알 수 있다. 즉 알루미늄합금 다이캐스트는 전신재 2017S와 비교하여도 손색이 없고, 특히 AC4CH의 특성은 매우 우수하다. 주조결함만 극복한다면 알루미늄합금 다이캐스트는 전신재와 다르지 않는 피로특성을 가짐을 알 수 있다.

4. 결 언

파괴나 피로는 복잡한 현상이다. 합금종이 동일하여도 다른 특성을 보이는 것이 드물지 않다. 따라서 시험법이나 데이터처리의 전문가가 되어선 안 된다. 본질을 분석하고 이해할 수 있는 분석가가 되지 않으면 안 된다.

참고문헌

- [1] 小林英男 : 破壊力学 (共立出版) (2004)
- [2] 北川英夫ほか : フラクトグラフィ (培風館) (1977)
- [3] ASTM Standard (ASTM) (1981)
- [4] 國尾武ほか : 破壊力学実験法 (朝倉書店) (1984)