

## 거시적 파면(III) : 응력상태와 파손양식

강 정 윤

### Fracture Mechanism and Macro-Practography

- Stress Distribution and Fracture Mode -

Chung-Yun Kang

#### 1 인장응력에 의한 파손

인장 파부하 모드에서는 하중이 일축으로 작용하고, 재료가 넥킹(necking)이 일어나기 전까지는 단조롭게 증가하는 것으로 가정하여도 좋다. 일반 인장시험기에서 일정한 인장속도로 시험하는 경우, 재료는 넥킹 후에 파괴에 이르기까지 하중이 저하한다.

파면의 양상을 좌우하는 것은 재료의 종류, 미세조직, 시험온도 및 스트레인속도와 같은 시험조건 등이 있다. 인장하중 하에서 재료는 파괴하기 전에 광범위하게 소성변형을 나타내는 것이 많고, 이 경우 재료는 연성이 있다고 판단한다. 만일 소성변형이 거의 일어나지 않으면, 취성파괴라고 부른다. 그러나 연성/취성을 구별하는 소성변형 량의 기준은 명확하지 않지만, 인장시험에서 파괴 시의 연신율이 5% 이하인 재료는 연성이 없다고 본다.

우선 연성재료의 인장하중 모드의 파면에 대해서 살펴보자. 이 경우 파괴 시에 하중 방향으로 길게 연신되고, 단면은 파단부 근방에서 축소된다. 원통형 시험편의 경우, 일반적으로 그림 9와 같은 파괴 양상을 나타낸다. 하중 축에 대해 수직인 중앙부는 복잡한 형상을



그림 9 전형적인 연성파면을 나타내는 컵 앤드 콘 파면

나타내고, 주변부는 중앙 파면에 대해 45° 경사진 면으로 나타나며, 이것을 시어립(Shear lip)이라고 부른다.

인장시험에서는 넥킹이 시작되면 강한 3축 응력이 최소단면(넥킹 위치)의 중심에서 전단변형을 조장한다. 따라서 파괴 직전의 시편을 응력 축 방향으로 절단한 단면을 조사하면, 그림 10과 같이 파괴가 중심에서 시작하는 것을 알 수 있다. 균열이 충분히 발달하면, 내부 균열 주변의 강력한 3축 응력에 의해서, 재료의 외부 주부에서 45°방향으로 큰 전단응력이 발달하게 된다. 따라서 주변부는 45°방향으로 파괴하여, Shear lip 영역을 형성한다.

한편 판상인 연성재료의 인장시험편에서도 동일한 파괴양상 특징을 나타낸다. 그림 11은 판상의 강재를 인장시험한 경우, 압연 온도 및 압연 방향과 인장 방향에 따른 파단 형상을 비교한 것이다. 압연 방향이 인장 방향과 평행한 시편은 넥킹 현상이 뚜렷하고, 중앙부에서 인장 방향에 수직으로 파단되지만, 압연 방향에 수직으로 인장한 시편에서는 넥킹이 다소 적게 일어나고, 중앙부에서 계단상으로 파괴되는 것이 특징이다.

이와 같이 넥킹이 일어나는 시편은 일반적으로 그림 12와 같은 파면 양상을 나타낸다. 넥킹 전까지 소성변형에 의해서 중심부를 행하는 횡방향의 응력이 발생하

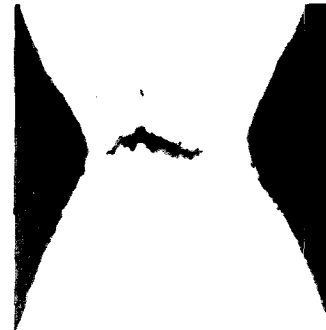


그림 10 파단 직전의 인장시험편의 단면

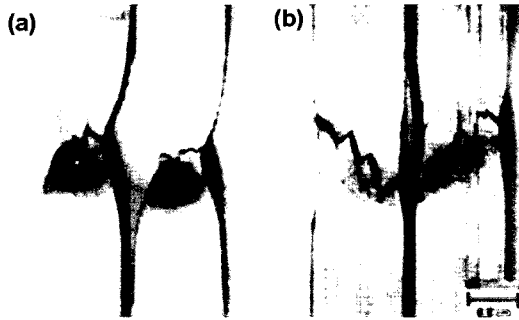


그림 11 연성재료인 판재 인장시험편의 압연방향에 따른 파단 양상 비교. (a) 평형, (b) 수직

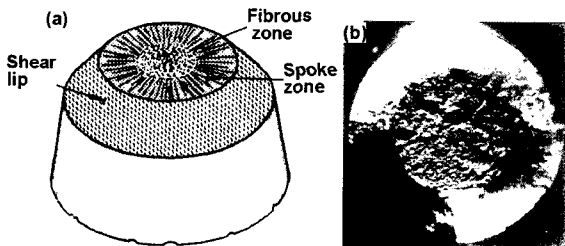


그림 12 노치 인장시험편의 전형적인 파면 양상의 모드도(a)와 실제 파면(b)

고, 이 횡방향 응력의 구속으로 인하여 중앙부에서 슬립이 저지되기 때문에, 즉 중앙부에서는 노치가 있는 것과 같이 슬립이 저지되어 인장방향에 직각으로 파단한다. 중앙부가 어느 정도 파단하여 버리면, 구속응력은 소실해버리므로, 외주부에서는 최대 전단응력에 의해서 인장축에 45°방향으로 전단 파괴한다. 결국 인장 파면은 일반적으로 3개의 부분으로 나누어진다. 즉, 중앙부에 최초의 균열이 생긴 섬유상 영역(Fibrous zone)이 형성되고, 그 주변에서 그림과 같이 방사형으로 균열이 확대되는 방사상 영역(Radial zone), 혹은 스포크 영역(spoke zone)이 형성된다. 최후에 방사상 영역 주위에서 슬립 파단하는 부분, 즉 인장축과 45° 경사진 시어립 영역(shear lip zone)이 형성된다.

인장파단에서는 재료의 성질, 열처리 조건, 노치, 표면처리 등에 따라서 파면은 3개의 영역이 점유하는 비율이 미묘하게 변화한다.

그림 13은 4340강의 인장시험편 파면이다. (a)는 페라이트+페일라이트 조직(HRC15) (b)는 템퍼 마르텐사이트 조직(HRC28)을 갖는 시험편의 파면이다. 같은 재료라도 미세조직 차이에 의해서 강도가 다르므로 파면 양상도 달라짐을 알 수 있다. 즉 강도가 높을수록 섬유상 영역의 조도가 크고, 특히 방사상 마크가 거칠다. 또한 Shear lip 영역이 좁다.

시험온도의 영향을 그림 14에 나타낸다. 온도가 높은 160°C에서 파단한 것은 시어립 영역이 넓고, 방사상

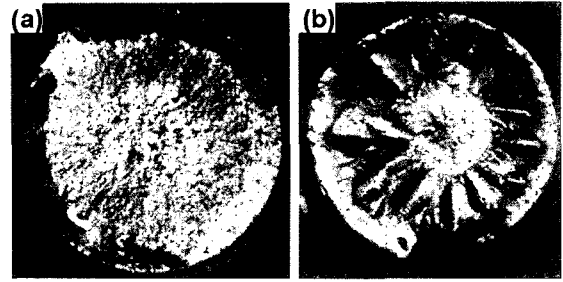


그림 13 4340강에서 경도에 따른 파면 양상 변화. (a) 페라이트+페일라이트 조직, (b) 템퍼 마르텐사이트 조직

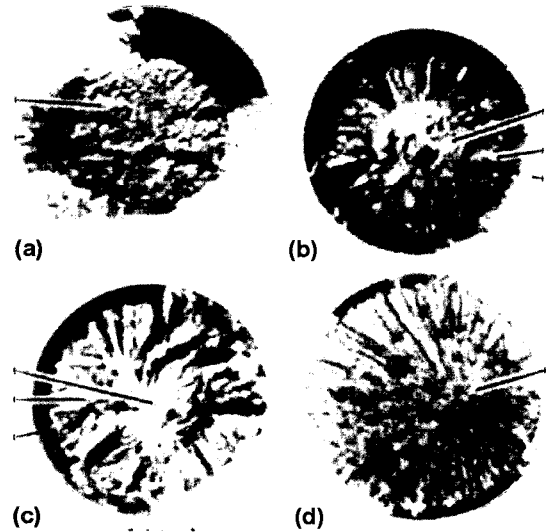


그림 14 인장시험 온도에 따른 파면 양상 변화. (a) 160°C, (b) 80°C, (c) -80°C, (d) -160°C

영역의 모양이 뚜렷하지 않다. 반면에 온도가 낮아질수록 방사상 형상이 뚜렷하고, 점유 면적이 넓어지며, 시어립 영역의 면적이 아주 감소한다. 특히 -160°C에서는 거의 방사상 영역만으로 형성되어 있다. 같은 강종이라도 시험온도가 낮을수록 넥킹 량이 감소하고, Shear lip 영역, 섬유상 영역이 감소하고 방사상 마크의 조도가 거칠어진다.

한편 판상의 인장 시험편에서도 원통상의 파면에서 나타나는 3영역으로 구분되지만, 판상 시험편의 경우는 특히 판 두께가 달라짐에 따라서 재료 내에 응력 분포

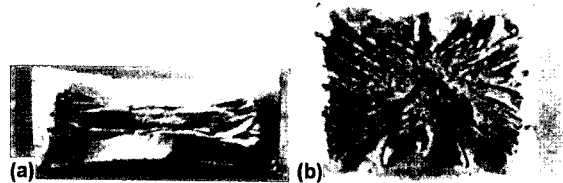


그림 15 판상 인장시험편의 판 두께에 따른 파면 양상 변화 (a) 1t (b) 2t

가 달라지므로, 거시적 파괴형태는 그림 15와 같이 파면 양상도 변화한다. 그림 15는 판 두께가 다를 경우 파면의 차이를 나타낸 것으로, 폭/두께의 비율인 어스펙트비(aspect ratio)가 작아질수록 시어립 영역이 좁아지는 것을 알 수 있다. 그림 16은 어스펙트 비에 따른 파면 형상 변화를 모식적으로 나타낸 것이다. 어스펙트 비가 커짐에 따라서 시어립 영역을 포함하는 파면의 상대적인 광도 증가한다. 특히 그 비가 아주 클 경우, 파괴 기점 이외 부분은 모두 시어립 영역이 차지한다. 어스펙트 비가 감소할수록 방사상 영역의 비가 아주 증가한다.

어떤 경우는 파괴의 기점에서 방사상 영역이 발달하여 그림 17과 같이 세브론(Chevron) 형상이라고 하는 모양으로 된다. 이와 같은 파면 양상은 파괴의 과정을 파악할 수 있고, 파괴 기점의 위치를 발견하는 데에 중요한 단서가 된다.

노치 시편을 인장하는 경우는 노치에서 응력집중 현상이 발생하므로, 파괴 양상은 크게 변화한다. 노치에서 강한 3축 응력이 작용하여, 균열이 외측에서 발생하

고, 내측으로 전파되어 파괴된다. 이와 같은 이상적인 과정을 걸쳐서 파괴된 모양의 모식도를 그림 18에 나타낸다. 이 경우, 전단에 의한 시어립 파면이 없는 것이 가장 큰 특징 이고, 섬유상 영역은 노치가 없는 것과 대조적으로 노치 근처에 있으며, 방사상 마크는 섬유상 영역의 주변으로부터 중심의 최종 파단 영역을 향하여 나타난다. 이런 방사형 마크의 외관은 노치가 없는 경우의 것과 유사하다.

또한 노치의 반경에 따라 파괴 양상이 달라진다. 그림 19의 (a)와 (b)는 각각 노치 반경을 0.1inch와 0.01inch로 하였을 때, 파면 모양을 비교한 것이다. 노치의 반경이 큰 경우(a)에는 노치에서 시어립이 나타나고, 중앙부에 섬유상 영역이 보이며, 방사상 마크는 섬유상 영역에서 시어립 쪽으로 나타난다. 반면에 반경이 작은 (b)의 파면에서는 시어립이 없고, 노치에서 바로 섬유상 조직이 보이고, 중앙에는 스포크 마크가 보인다. 이것은 노치 반경에 따라서 파괴 경로가 다른 것을 의미한다.

인장파면에 미치는 온도와 노치와의 영향을 정리하면 그림 20과 같다.

판상의 노치 인장시험편은 노치를 시편의 일부분에만 넣기 때문에, 그림 21과 같이 노치 근처에서 균열이 발생하여, 섬유상 영역이 생기고 짧은 거리로 전파하므로, 섬유상 영역이 방사상 영역으로 대체되고, 이것이 시편 외주에 도달하기 전에 전단 변형이 생기므로 시편 외주부는 시어립 파면을 나타내는 것이 특징이다. 그림 22는 양쪽에 노치를 준 인장시험편의 파면이다. 양쪽

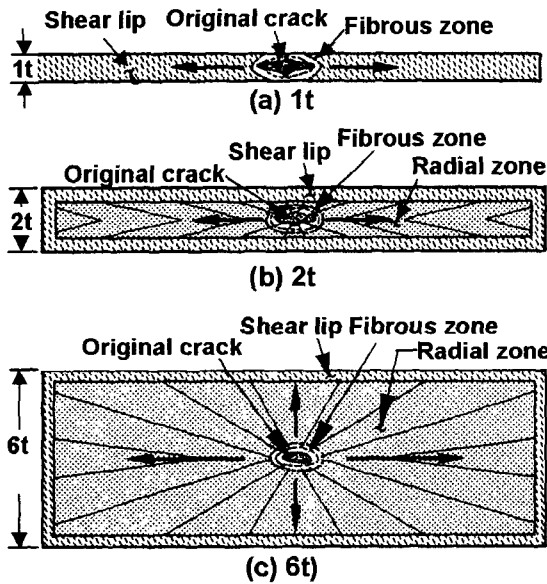


그림 16 판상 인장시험편의 판 두께에 따른 파면 양상 변화의 모식도

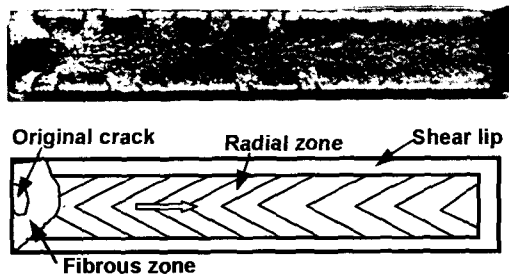


그림 17 판상 인장시험편의 세브론(chevron) 파면 모양과 그 모식도

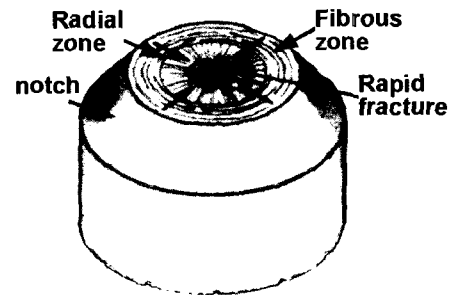


그림 18 노치 인장시험편 전형적인 파면 모식도

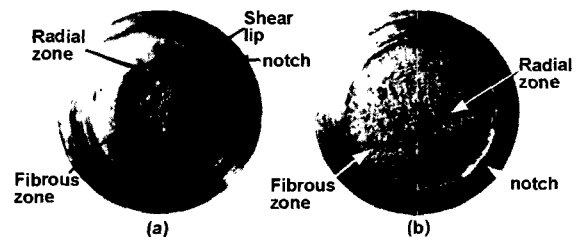


그림 19 노치 인장시험편의 노치 반경에 따른 파면 양상의 변화. (a) 0.1inch, (b) 0.01inch

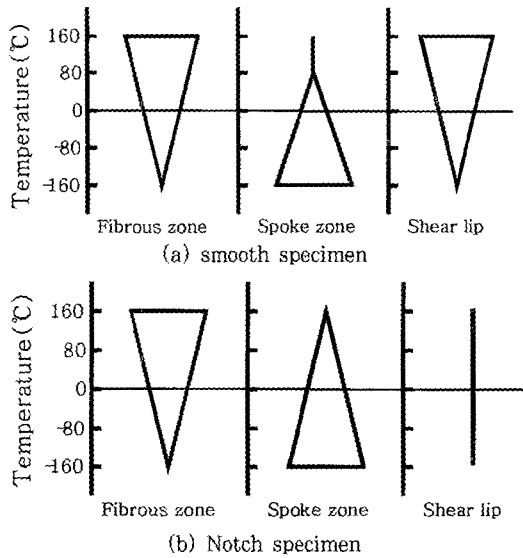


그림 20 인장시험편의 파면 형상에 미치는 노치와 시험 온도의 영향. (a) 노치 없음, (b) 노치 시험편

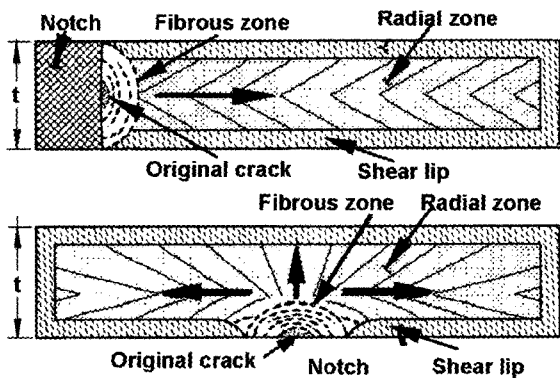


그림 21 인장시험편의 파면 형상에 미치는 노치 위치의 영향



그림 22 양쪽 인장노치 시험편의 파면 양상

노치 근처에 흰색으로 보이는 영역은 아주 미세한 섬유상 영역이고, 파괴가 시작된 곳이다. 나머지 파면은 45° 전단된 모양을 이루고 있다.

일반적으로 응집강도가 낮은 취성재료에서는 거시적인 소성변형이 없이 파괴되며, 파괴는 재료가 이방성을 가지지 않는 한, 일반적으로 인장축에 수직인 방향으로 전파되어 일어난다. 이와같이 파괴된 예를 그림 23에 나타낸다. 파면은 시어립이 적고, 섬유상 영역도 아주 적다. 방사상 영역은 가늘지만, 이 방향은 당연히 파단

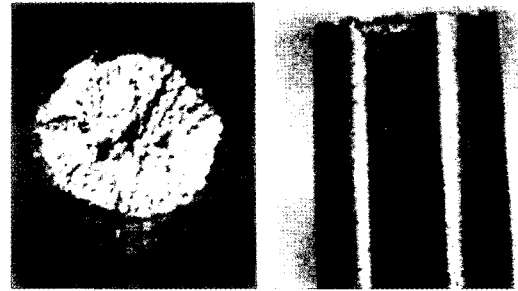


그림 23 취성파괴된 인장시험편의 형상

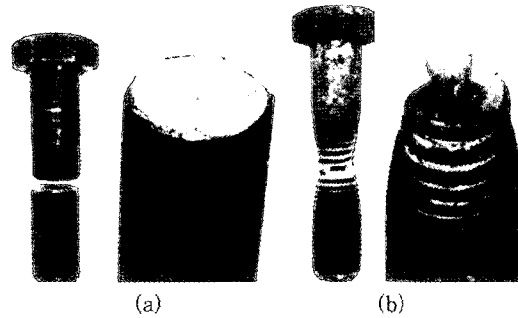


그림 24 인장하중에 의해 파괴된 강제 볼트의 파면 형상. (a) HRC 47, (b) HRC15

의 기점을 향하고 있다.

실제 부품의 인장 과부하로 파괴된 양상을 살펴보자. 그림 24는 인장 하중에 의해서 파괴된 강제 볼트의 외관이다. (a)는 염수로 켄칭한 볼트로서, 경도가 HRC47 이고, (b)는 어닐링 처리한 볼트로서 HRC 15인 볼트이다. 경도가 높은 (a)는 취성파괴 양상을 나타내고, 명료한 거시적인 치수변화가 없으며, 파면은 비교적 부드럽고, 인장축에 수직이다. 반면에 (b)는 썩 앤드 콘 파면을 가지는 연성파괴 한 것이고, 나사산의 간격은 파면과 가깝게 됨에 따라서 증가하고, 축방향의 연신이 증대하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 충격에 의한 파손

일반적인 기계부분의 충격파손은 하중이 급속하게 가해지기 때문에 과부하에 의해 파손된다고 생각하여도 좋을 것이다. 즉, 관성효과에 의한 것이므로, 스트레인 속도가 그 부품의 고유 진동수하 일치하여, 진폭이 급격히 증대함으로써 파손을 일으키는 예는 드물다. 왜냐하면 이와 같은 경우에는 재료 자체의 감쇠성에 의해서 충격이 흡수되어 버리기 때문이다.

강의 충격 파손 시험에서는 명확하게 2종류의 다른 파면, 즉 취성 파면과 연성파면이 보이지만, 더욱 상세히 검토하여 보면, 그림 25와 같이 인장파면과 동일하게 3개의 부분으로 분류된다. 즉 초기에 균열이 발생한 섬유상 부분과 급속히 균열이 확대된 스포크 형상 부

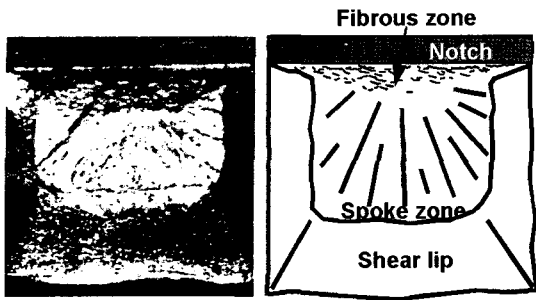


그림 25 샤르피 충격 시험편의 전형적인 단면과모식도

분, 더욱이 전단에 의해서 파손한 시어립 부분이다. 이들 3개의 부분은 시험조건이 변화하면 그 비율이 변화하여, 파단면의 외관은 다양하게 변화한다. 이러한 변화가 생기는 주요 인자로는 (1) 시험편의 형상, (2) 타격속도, (3) 시험온도 등이 있으며, 이 중에서 특히 온도가 가장 중요한 인자이다. 그림 26은 강에서 온도 변화에 따른 흡수에너지 변화를 나타낸 것이다. 어떤 일정 온도에서 충격흡수에너지는 급격히 저하가 시작된다. 흡수에너지가 급격히 떨어지는 온도를 그 재료의 천이온도(DBTT : Ductile/Brittle Transition Temperature) 라고 한다. 천이온도는 그림 26에 나

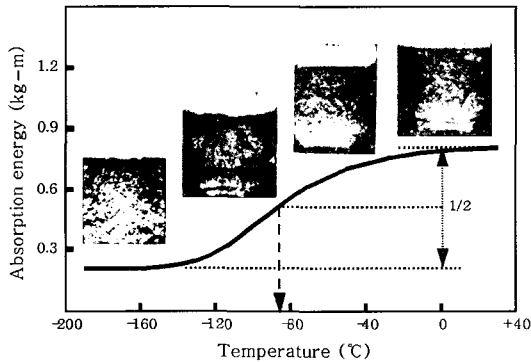


그림 26 강의 천이온도와 충격파면과의 관계

타낸 바와 같이 최대 충격치와 최소 충격치 차의 1/2 값을 갖는 온도로 정한다. 천이온도 의존성은 피로 성질에서 볼 수 없으므로, 충격 파손에서 특유의 성질이다. 그림 27은 온도 변화에 따라서 파면 내에 각 영역의 비율이 어떻게 변화하는가를 나타낸 것이다. 저온으로 갈수록 섬유상 영역이 급격히 감소한 반면에 스포크 영역은 급격히 증가한다.

부하 속도의 영향은 그림 28과 같은 관계가 구해지고 있다. 보일러의 폭발과 같이 부가속도가 빠를 경우에, 재료가 연성이 풍부한 연강이라도 파면은 최대 수직 응력에 직각이고, 소위 등골(Herringbone) 형상으로 된다. 공구강과 같이 켄칭 경화한 재료나 유리와 같은 취성재료에서는 정적인 파단면에서도 등골 형상과 유사한 파면이 나타난다.

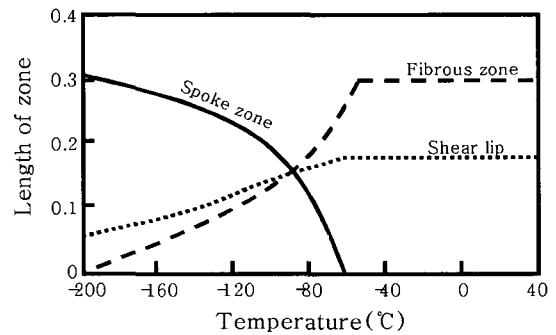


그림 27 온도에 따른 충격파면의 변화

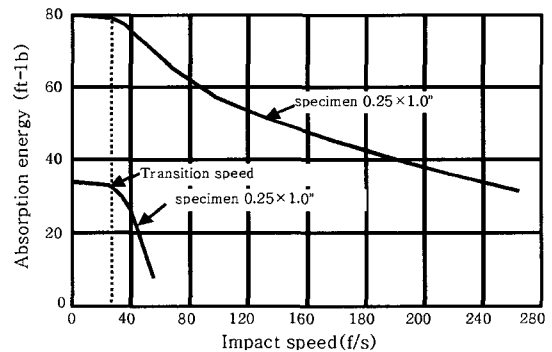


그림 28 충격속도와 흡수에너지와의 관계



- 강정윤(姜晶允)
- 1953년생
- 부산대학교 재료공학부
- 접합공학, 계면미세조직제어
- e-mail : kangcy@pusan.ac.kr