

원자로 압력용기강의 천이영역 파괴인성에 미치는
결정립크기의 영향

The Effect of the Austenite Grain Sizes on the Transition Fracture
Toughness of Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels

양원준, 이봉상*, 김민철*, 허무영, 홍준화*
고려대학교, 한국원자력연구소*

요 약

서로 다른 결정립크기를 가지는 원자로 압력용기강의 파괴인성특성을 천이영역에서 평가하였다. 파괴인성특성평가는 확률/통계적인 해석방식에 기초한 ASTM E 1921 방법을 사용하였다. 인장특성은 결정립크기에 따라 Hall-Petch 관계식을 만족하였다. 천이영역 파괴인성값은 결정립크기에 비교적 무관하였으며 전형적인 통계현상은 취성파괴가 발생하는 벽개개시 위치와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 따라서 벽개개시가 주도하는 천이영역에서는 결정립크기보다는 탄화물의 크기 및 분포특성이 파괴인성을 결정하는 주도적 역할을 하는 것으로 판단된다.

Abstract

The effect of the prior austenite grain size on the fracture toughness was investigated in the transition region of nuclear reactor pressure vessel steels. Fracture toughness behaviors were evaluated by ASTM E 1921 based on the weakest link theory and Weibull statistical approach. Tensile property satisfied the Hall-Petch relationship, but fracture toughness in the transition region showed a similar behaviors regardless of the austenite grain size. Fractured surfaces showed that cleavage initiation distance(CID) did not show the dependence on, while the facet size was strongly dependent on it. In viewpoint of the weakest link theory, particle distribution in front of the crack tip was more important than the grain size in the transition temperature range where fracture was controlled by cleavage crack initiation.

1. 서론

원자로 압력용기는 노심영역에 핵연료 집합체가 장착되고 제어봉이 상부에서 구동되는 원자력 발전소의 핵심부품이다. 또한 고온과 고압뿐만 아니라 중성자가 조사되는 극심한 환경에서 40년 이상 장시간 사용되므로, 이 용기로 사용되는 재료는 수명기간동안 건전성을 유지하기 위해서 운전중 우수한 파괴인성을 유지하여야 한다. 원자로 압력용기로 널리 쓰이는 Mn-Mo-Ni 저합금강은 대표적인 tempered bainite 조직을 가지며 오스테나이트 결정립크기, 석출물의 크기 및 형상, 패킷(packet) 크기등 매우 복잡한 미세조직적인 특성을 갖는다. 일반적으로 이러한 미세조직적 특성은 재료의 파괴인성에 많은 영향을 준다고 알려져 있으며[1-4] 파괴특성에 대한 미세조직적 연구는 매우 중요하다.

Ritchie, Knott and Rice(이하 RKR)[5]은 균열선단 미세조직적 특성거리에서 주응력이 재료의 임계파괴응력이상이면 벽개취성파괴가 발생한다는 파괴응력모델에서 미세조직적 특성거리가 결정립의 크기와 관계가 있다고 설명하였다. 그리고 Curry[6]는 국부파괴응력 모델에서 중요한 재료의 파괴응력이 결정립의 크기와 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 또한 Van Stone등은[7] 결정립계가 균열진전에 대한 억제효과가 크다고 보고하였으며 Kim등은[8] 취성균열전파가 결정립계의 특성에 의해 결정된다고 하였다. 그리고 Nayor등은[9] 재료의 파괴특성에 있어서 패킷의 크기가 가장 밀접한 관계가 있다고 보고하였는데, 패킷의 크기는 오스테나이트 결정립내에서 서로 다른 특정한 방위관계를 갖고 성장하기 때문에 오스테나이트 결정립의 크기에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 이와 같이 결정립과 관련하여 재료의 파괴특성 연관성에 대한 연구는 다양한 형태로 이루어져 왔다.

원자로 압력용기강과 같은 BCC구조를 가지는 재료의 경우 천이영역에서 파괴인성값이 동일조건에서도 상당한 편차를 보이며 온도 증가와 더불어 급격히 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 천이특성을 정량적으로 평가하기 위해 기존의 파괴인성기준이 되는 K_{IC} (평면변형 파괴인성)나 J_{IC} 가 아닌 벽개파괴가 발생할때까지의 J-적분값을 K_{JC} 으로 환산한 K_{JC} 값으로 구하게 된다. 그리고 동일조건에서 편차를 보이는 K_{JC} 값을 통계처리하여 하나의 확률적 평균값인 $K_{JC(med)}$ 으로 나타내며 이러한 방법을 이용한 천이영역 파괴인성 평가가 널리 이용되고 있다[10].

본 연구에서는 원자로 압력용기강을 열처리조건만을 달리하여 서로 다른 결정립을 얻은 후 천이온도영역에서 파괴인성값을 나타내는 확률적 평균값인 $K_{JC(med)}$ 과의 연관성을 알아보았다. 또한 EBSD(Electron Back-Scattered Diffraction) 분석을 통한 패킷크기의 유효결정립과의 관계 해석이 수행되었으며 실제 파면에서 관찰되는 벽개파괴 개시점(CID, Cleavage Initiation Distance) 및 facet 크기와의 연계성도 함께 고찰되었다.

2. 실험방법 및 절차

1) 재료 및 시편준비

본 연구에 사용된 재료는 원자로 압력용기용으로 널리 사용되는 SA 508 Gr. 3 단조재이다. 천이영역 파괴인성에 영향을 미치는 결정립 크기의 영향을 알아보기 위해 현재 상업용 원자로 압력용기에 적용되는 열처리 조건중 결정립 크기에 영향을 주는 오스테나이트(austenitizing)온도만을 달리하고 템퍼링(tempering)조건은 동일하게 처리하여 비슷한 크기의 탄화물 분포를 가지면서 결정립크기만을 다르게 그림 1에서처럼 3가지 조건에 따라 열처리를 수행하였다.

2) 인장시험 및 천이영역 파괴인성시험

해당온도에서 0.0005/s의 변형률속도로 인장시험을 수행하였으며 PCVN(Precracked Charpy V-Notch) 시편의 3점굽힘 파괴인성시험(TPB, Three Point Bending)은 ASTM E1921-97[11]에 따라 3조건 모두 벽개파괴가 발생하는 동일온도에서 수행하였다. 통계처리를 통한 확률적 평균값 $K_{JC(med)}$ 을 구하기 위해 반복실험을 수행하였다. 시험온도는 Isopentane을 냉매액으로 하는 저온조에서 액체질소를 사용하여 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이내의 정밀한 온도조절을 실시하였다. 각 시편마다 열전대를 부착하여 실제 시험온도를 정확히 측정하였다. 시험은 0.5mm/min의 하중선 변위속도로 수행하여 불안정 취성파괴가 발생할때까지 시편에 가해진 J-integral 값 (J_C)을 결정한 후 다음의 식을 이용하여 탄소성 벽개파괴인성값(K_{JC})으로 환산하였다.

$$K_{JC} = \sqrt{E \cdot J_C} \quad (1)$$

여기서 온도에 따른 탄성계수 E 값은 다음의 실험식으로부터 얻었다.

$$E = 207200 - 57.09 \cdot T \quad (\text{MPa}, ^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

3) 미세조직 및 파면관찰

열처리 조건에 따른 미세조직의 변화는 3% nital 용액과 LePera 용액(1% Sodium Metabisulfate 수용액 + 4% Picral)을 사용하여 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 및 광학현미경(Optical Microscope)을 이용하여 관찰하였다. 규정에 따라 오스테나이트 결정립의 크기를 결정하였다. 또한 EBSD(Electron Back Scattered Diffraction)분석을 이용하여 패킷크기의 유효 결정립크기를 결정하였다. 파괴인성시험후 파단된 면을 통해 facet 크기를 결정하였으며 벽개파괴 개시점(CID, Cleavage Initiation Distance)을 정확히 측정하였다. 또한 SEM과 상분석기(Image Analyzer)를 이용하여 탄화물 정량화를 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

1) 미세조직 특성

그림 2에 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰된 대표적인 미세조직을 나타내었다. 미세조직은 전형적인 템퍼드 베이나이트이며 prior austenite 결정립의 크기는 열처리 조건에 따라 각각 25 μm , 60 μm 및 100 μm 였다. 그리고 그림 3에 상분석기를 이용하여 결정된 탄화물 정량화 결과를 나타내었다. 그림에서처럼 비교적 비슷한 탄화물 분포를 가지면서 결정립의 크기는 다른 조직을 얻을 수 있었다. EBSD결과에서의 유효결정립의 크기와의 관계를 나타내었다. 그림 4에서 오스테나이트 결정립의 크기가 클수록 EBSD 결과에서의 결정방위를 고려한 결정립의 크기 또한 증가하였으며 크기는 대략 2-3배 정도로 하나의 오스테나이트 결정립내에 2-3개 정도의 패킷이 존재하는 것으로 나타났다.

2) 인장시험 결과

그림 5에 인장시험결과를 나타내었다. 항복강도의 경우 일반적으로 알려져 있듯이 결정립의 크기가 작아질수록 크게 나타났으며 결정립크기와 항복강도의 관계를 모사한 Hall-Petch 관계식(3)을 만족함을 알 수 있었다.

$$\sigma_0 = \sigma_i + kd^{-1/2} \quad (3)$$

σ_0 는 항복강도, d 는 결정립크기(μm) 이며 σ_i 와 k 는 상수이다

3) 파괴인성시험결과

각 재료별 PCVN 시험편을 이용하여 -80 $^{\circ}\text{C}$ 에서의 파괴인성시험 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 알 수 있듯이 천이영역에서는 동일 조건에서도 각 시험편 사이에 편차를 보이는 전형적인 천이온도 영역에서의 특성을 보였다. 인장성질이 결정립 크기의 영향을 많이 받은 것과는 달리 천이영역에서의 파괴인성값을 나타내는 $K_{JC(\text{med})}$ 값은 결정립의 크기와 관계없이 비슷한 값을 보여주었다. 따라서 결정립의 크기가 천이영역 파괴인성에는 거의 영향을 미치지 않았다.

4) 벽개파괴 개시점까지의 거리(CID, X_f) 및 facet 크기

그림 7에 각 시험편에 대해 피로 균열선단으로부터 벽개파괴 개시점까지의 거리(CID)와 결정립과의 관계를 나타내었다. RKR등은 앞 절에서 언급했듯이 임계파괴응력모델에서 결정립의 크기와 관련한 미세조직적 특성거리(characteristic distance)에서 벽개파괴가 발생하며 이러한 모델을 이용하여 평면변형 파괴인성(plane strain fracture toughness, K_{IC})

의 온도의존성을 비교적 정확히 예측하였으며 결정립의 크기가 파괴인성과 밀접한 관련이 있다고 보았다. 하지만 천이영역에서 실제 파괴가 발생하는 위치는 결정립의 크기와는 무관하게 나타났으며 어느 정도의 편차를 보이는 통계현상을 보였다. 이는 천이영역에서 원자로 압력용기강과 같은 BCC구조의 철강재료에 있어 전형적으로 나타나는 천이특성과 관련이 있을 것이다. 천이영역에서의 파괴인성평가와 관련한 일련의 방법들은 균열선단에서의 취약한 탄화물이 벽개파괴 개시점으로 작용하여 파괴에 이르는 벽개개시주도(cleavage-initiation controlled)의 파괴로 보기 때문에 천이영역에서 미세조직적 특성거리는 결정립의 크기보다는 재료내의 취약한 탄화물의 분포와 관련이 있을 것이다. 따라서 시험재료의 경우 탄화물의 크기 및 분포가 비슷하기 때문에 CID의 분포도 비슷하게 나타나는 것으로 판단된다. 하지만 벽개파괴면에서의 facet 크기는 그림 8에서처럼 결정립의 크기와 매우 밀접한 관계가 있었다. 벽개개시에 이어 균열이 전파될 때는 탄화물의 분포형태 보다는 패킷 혹은 오스테나이트 결정립에 의해 방해받기 때문에 이와 같은 결과를 보인 것으로 보이며 균열전파의 형태는 실질적으로 천이영역 파괴인성값 $K_{JC(\text{med})}$ 값과는 크게 관련이 없어 보인다. 결국 결정립의 크기 보다는 weakest-link-theory에 근거한 탄화물의 크기 및 분포특성이 천이영역 파괴인성값에 결정적인 역할을 하는 것으로 판단된다.

4. 결론

상용 원자로 압력용기강의 결정립크기만을 변화시켜 천이온도영역에서 파괴인성 시험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 결정립 크기가 작을수록 재료의 항복강도는 높게 나타났으나 천이영역 파괴인성값은 결정립의 크기와 무관하게 서로 비슷한 값을 보였다.
2. 벽개파괴가 시작하는 위치까지의 거리(CID)는 다소 편차를 보였으며 이러한 편차는 전형적으로 나타나는 천이특성과 관련이 있을 것으로 판단된다.
3. 천이영역 파괴인성평가와 관련한 weakest-link theory 관점에서의 벽개개시 주도 파괴 시에는 결정립의 크기가 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며. 결국 결정립의 크기 보다는 weakest-link-theory에 근거한 탄화물의 크기 및 분포특성이 천이영역 파괴인성값에 결정적인 역할을 하는 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업중 파괴특성평가 및 향상기술개발과제의

일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. D. A. Curry and J. F. Knott: Met. Sci., **12** (1978) 511
- 2 R. O. Ritchie, W. L. server and R. A. Wullaert : Metall. Trans., **10A** (1979) 15
- 3 K. Wallin, T. Saario, K. Torronen : Met. Sci., **18** (1984) 13
- 4 G. Z. Wang and J. H. Chen : Metall. and Mat. Trans., **27A** (1996) 1909
5. R. O. Ritchie, J. F. Knott, and J. R. Rice, J : Mech. Phys. Solids., **21** (1973) 395
6. D. A Curry : Met. Sci., **14** (1980) 319
7. R. H. Van Stone, T. B. Cox, J. R. Low and J. A. Psioda : Inter. Met. Review, **30** (1985) 157
8. M. C. Kim, Y. J. Oh and J. H. Hong : J. Kor. Inst. Met. & Mater. **38** (2000) 647
9. J. P. Naylor and M. Guttman : Met. Sci., A, **15** (1981) 433
10. B. S. Lee, J. H. Hong, T. S. Byun, J. H. Kim and W. J. Yang : KAERI/TR-1167 (1998)
11. ASTM Standard E1921-97 (1997)

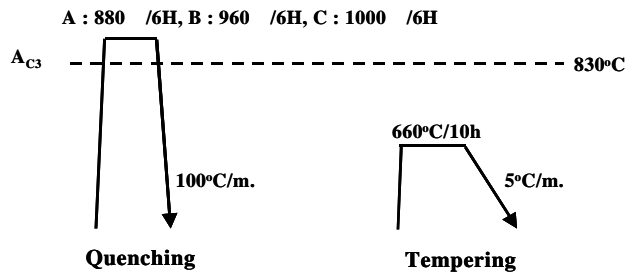


Fig. 1. Schematic sketch of three heat treatments conditions.

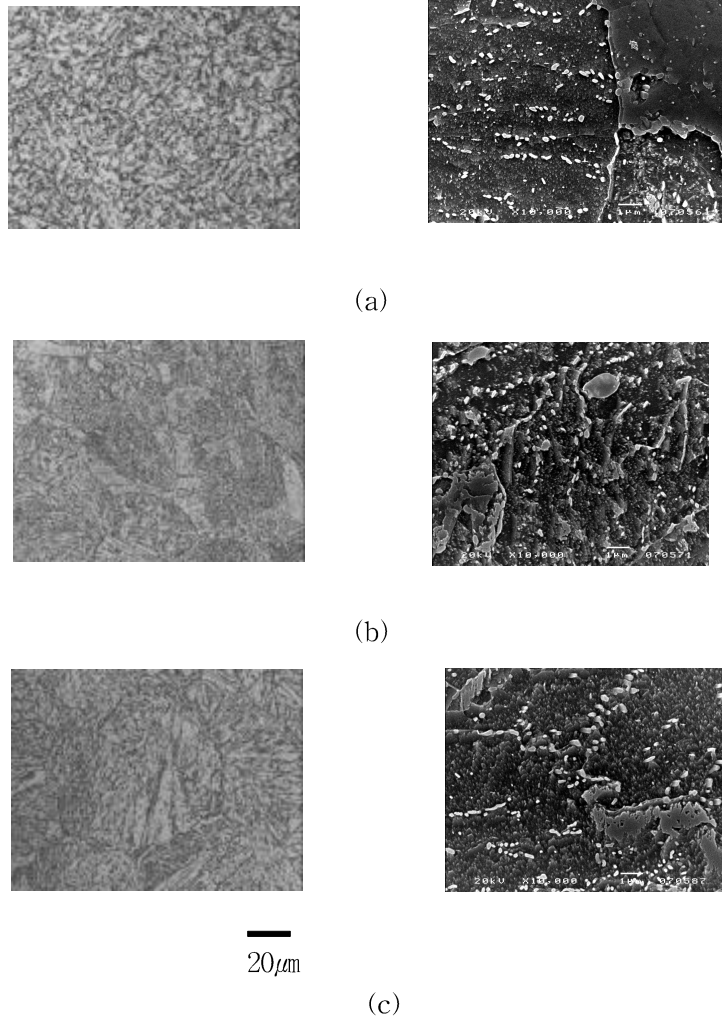


Fig. 2. Microstructures of the tested materials, (a) : A, (b) : B and (c) : C.

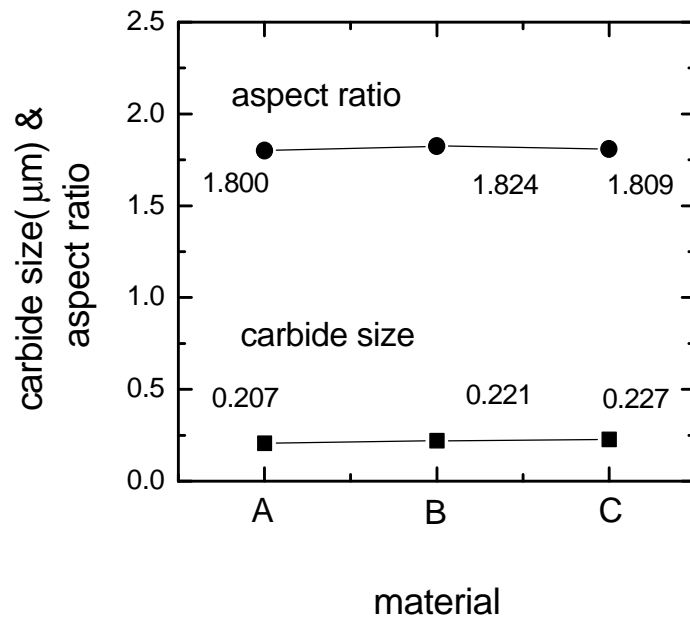


Fig. 3 Carbide size and aspect ratio of the tested materials.

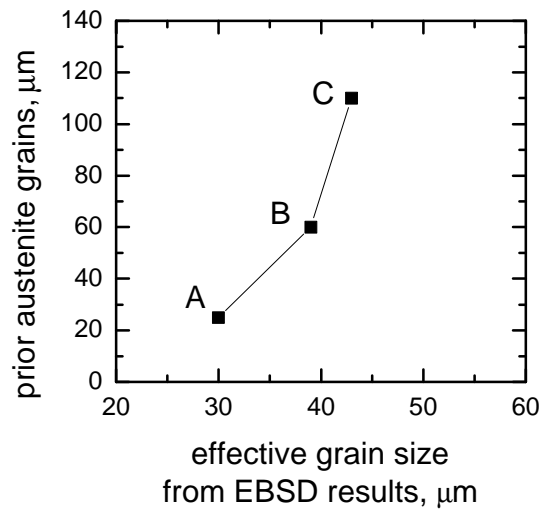


Fig. 4 Variation of grain size with the effective grain size measured by EBSD technique.

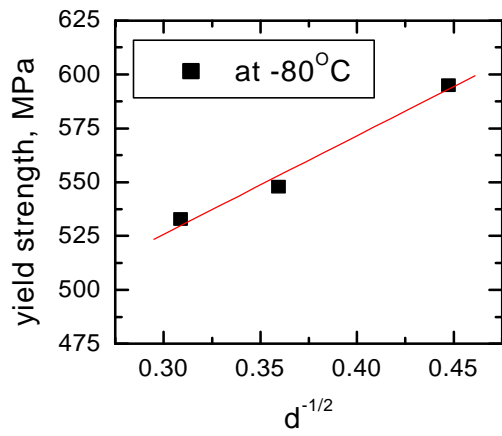


Fig. 5 Relationship between austenite grain size and yield strength.

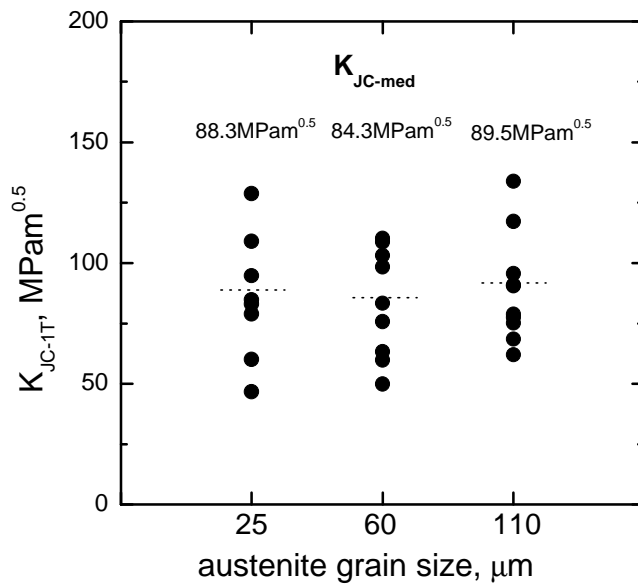


Fig. 6 Fracture toughness results of the tested materials.

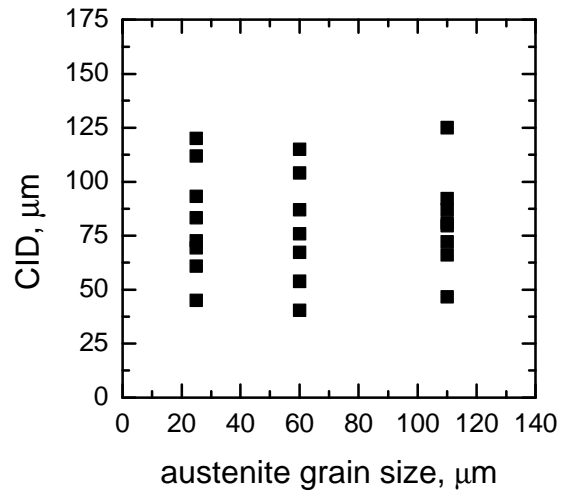


Fig. 7 Relationship between austenite grain size and cleavage initiation distance(CID).

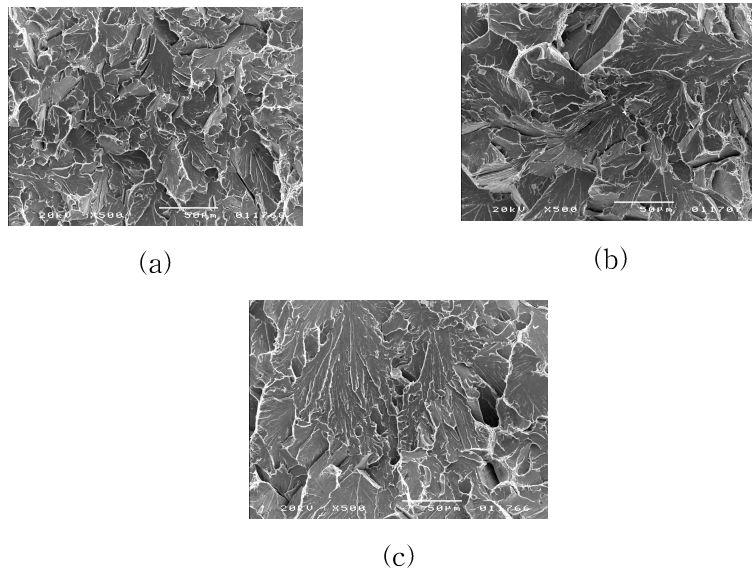


Fig. 8 SEM images showing the facet size : (a) A, (b) B and (c) C materials.