2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

소형펀치시험법을 이용한 원자로압력용기강의 중성자 조사취화 연성-취성 천이거동 평가

Evaluation of Ductile-Brittle Transition Behavior with Neutron Irradiation in Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels Using Small Punch Test

김민철, 이봉상
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

오용준
한밭대학교
대전광역시 유성구 덕명동 산 16-1

요 약

서로 다른 제조공정의 원자로압력용기를 이용하여 중성자 조사 전, 후의 연성취성 천이온도의 변화를 소형펀치 시험법을 이용하여 평가하였다. 이를 통해 얻은 결과는 기존의 충격시험과 ASTM standard E1921 에 따른 Master curve 파괴인성 평가법으로부터 얻은 결과와 비교하였다. 시험편은 압력용기 두께의 1/4t 지점에서 채취하였으며, 10x10x0.5mm 규격의 소형펀치 시험편으로 가공하였다. 중성자 조사는 한국원자력연구소내의 연구용 원자로 하나로와 체코 NRI 에서 다양한 조사조건으로 약 290 ºC 에서 수행되었다. 소형펀치 시험은 상온에서 -196ºC 까지 다양한 온도에서 직경 2.4mm 강구를 이용하여 수행하였다. 조사전,후의 SP 천이온도(T_{SP})는 온도에 따른 SP 에너지 천이곡선상의 최대지점과 최저지점의 중간지점에서의 온도로 결정하였으며 이렇게 결정된 SP 천이온도는 충격시험에서 결정된 Charpy index temperature, T_{41J} 과 선형적인 관계가 있음을 확인하였다. 조사재로부터 얻은 Tsp 또한 비조사재에서 구한 관계식을 잘 만족하였다. 또한 T_{SP} 는 master curve 법을 통하여 구한 reference temperature (T_0)와도 선형적인 관계를 보였다.

Abstract

A small punch (SP) test was performed to evaluate the ductile-brittle transition temperature before and after neutron irradiation in reactor pressure vessel (RPV) steels produced by different manufacturing (refining) processes. The results were compared to the standard transition temperature shifts from the Charpy test and Master Curve fracture toughness test in accordance with the ASTM standard E1921. The samples were taken from 1/4t location of the vessel thickness and machined into a 10x10x0.5mm dimension. Irradiation of the samples was carried out in the research reactor at KAERI (HANARO) at about 290 oC of the different fluence levels respectively. SP tests were performed in the temperature range of RT to -196oC using a 2.4mm diameter ball. For the materials before and after irradiation, SP transition temperatures (TSP), which are determined at the middle of the upper and lower SP energies, showed a linear correlation with the Charpy index temperature, T41J. Tsp from the irradiated samples was increased as the fluence level increased and was well within the deviation range of the unirradiated data. The TSP had a correlation with the reference temperature (T0) from the master curve method using a pre-cracked Charpy V-notched (PCVN) specimen

1. 서 론

중성자 조사에 따른 원자로압력용기의 천이온도 상승은 원자로 안전성 관점에서 가장 중요한 관심의 대상이며, 이를 위해 지속적인 감시시험을 실시하여 재료의 파괴인성을 평가하고 있다. 이러한 천이온도의 상승을 평가하기 위해 표준시험법인 샤피 충격시험법이 이용되고 있으며, 시험을 통해 결정된 Charpy index temperature 를 이용하여 기존의 ASME K_{IC} 곡선을 천이온도 변화량 만큼 이동시켜 중성자 조사에 따른 원자로 가동조건을 설정하였다. 최근에는 파괴인성을 평가하기 위한 직접적인 방법으로서 ASTM standard E1921 에 따른 Master curve 법이 널리 이용되고 있다[1-3]. 이 방법은 온도에 따른 파괴인성(K_{JC})을 하나의 곡선형태를 갖는 master curve 로 표현하고, K_{JC}=100MPa$\sqrt{m}$ 에서 결정된 온도를 reference temperature, T_0 라고 정의한다. 이 T_0 값을 이용하여 K_{IC} curve 의 위치를 결정하고 있다. 이러한 표준시험법들은 상당한 크기의 시험편을 다량으로 필요로 한다. 그러나 조사재의 경우, 가동중인 원자로로부터의 감시시험용 재료의 확보가 제한되어 있으며 또한 연구로를 이용한 조사시편 제작시에도 시편장입을 위한 공간이 제한되어 있기 때문에 시험편의 크기는 매우 중요한 문제이다. 또한 이러한 시험편 크기의 제한은 특정위치에서의 물성평가에도 상당한 제한요소가 되고 있다.

이러한 관점에서 소형펀치 시험법은 시험편 크기의 제한을 극복할 수 있는 유망한 시험법이라 할 수 있다. 소형펀치 시험법을 통하여 얻어지는 응력-변위 곡선으로부터 인장특성, 파괴인성, 연성취성 천이온도 등 표준시험법으로부터 얻을 수 있는 다양하고 유용한 정보를 손쉽게 얻을 수 있다. 초기 연구에서는 SP 시험법을 통하여 얻어지는 천이온도와 충격시험으로부터 얻어지는 fracture appearance transition temperature (FATT) 또는 ductile-brittle transition temperature (DBTT)와의 실험적인 관계를 구하는데 초점을 맞추었었다 [4-9]. 그러나 최근 Foulds 등은 SP 시험편내의 국부변형에너지를 계산하여 직접 파괴인성을 구하고자 하는 해석적인 방법도 제시하였다[10]. 그러나 이러한 재료의 기계적 특성을 예측하기 위한 실험적 혹은 해석적인 접근들은 주로 비조사재에 대해서만 진행되어왔으며, 조사재의 경우 이러한 접근법들의 적용을 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 서로 다른 제조공정의 원자로압력용기를 이용하여 중성자 조사 전, 후의 연성취성 천이온도의 변화를 소형펀치 시험법을 이용하여 평가하였다. 이를 통해 얻은 결과는 기존의 충격시험과 ASTM standard E1921 에 따른 Master curve 파괴인성 평가법으로부터 얻은 결과와 비교하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 서로 다른 제조공정을 갖는 4 가지 종류의 SA508 Cl.3 소재와 1 가지 강종의 SA508 Cl.2 소재 및 Linde 80 flux 를 이용한 이 소재의 용접부, 그리고 SA533B Cl. 1(JRQ) 소재를 이용하였다. 소형펀치시험편은 용기강 두께의 1/4t 지점에서 채취하여, 10x10x0.5mm 규격으로 가공하였다. 표 1 에 본 연구에 사용된 재료의 대표적인 조성과 표준시험법을 통하여 구한 파괴특성치를 함께 나타내었다. 중성자 조사는 연구용 원자로인 하나로 및 체코 NRI 에서 1.7×10^{19} 에서 $5.0 \times 10^{19} n/cm^2$ 의 조사량 범위로 약 290°C 에서 실시하였다.

그림 1 은 본 연구에서 사용된 소형펀치 시험용 홀더를 나타낸 것이다. 정확한 온도조절을 위하여 두개의 열전대가 삽입하였으며, LVDT 를 사용하여 변위를 측정하였다. 소형펀치시험은 1mm/min 의 속도로 액체질소를 직접 분사하여 온도를 조절하는 온도조절용 챔버안에서 실시하였다. SP 에너지 천이곡선을 구하기 위해 각 온도에서 시험후 하중-변위곡선 아래의 영역을 계산하여 SP 에너지를 구하였다. 각 온도에서 각각 6 개의 시험편을 평가하였으며 SP 에너지의 평균값을 구하기 위하여 Weibull 통계처리를 실시하였다[8].

3. 실험결과 및 고찰

1. 비조사재의 소형펀치 시험결과

그림 2 는 SP 시험을 통하여 얻은 비조사재의 SP 에너지 천이곡선을 나타낸 것이다. SP 에너지 천이곡선상에 나타나는 최대에너지와 최저에너지의 중간값에서의 온도를 SP 천이온도(TSP)로 정의하고 각각의 SP 천이온도를 구하였다. 그림 3 은 이렇게 구한 SP 천이온도와 충격시험으로부터 구한 Charpy index temperature(T_{41J}, T_{68J})와 비교한 것이다. 기존 연구들에 의하면, SP 천이온도와 충격시험으로부터 구한 연성-취성 천이온도 (DBTT)는 다음과 같은 관계를 갖은 것으로 알려져 있다

$$T_{CVN} (K) = \quad T_{SP} (K),$$

이때 α는 mechanical correlation factor 이다. 다른 재료와 시험조건에 따라 다른 α을 얻게 된다 그러나 아직까지 압력용기용 Mn-Mo-Ni 저합금강의 α값은 알려지지 않았다. 그림 3 의 결과를 보면 α=2.43 의 값을 갖는 것으로 나타났다. α=2.3~2.73 의 범위에서 좋은 선형적인 관계를 나타내었다. 그러나 최대에너지(Upper shelf energy) 수준은 충격시험결과와 다소 차이가 나타나며 이들 사이의 관계를 찾아보기 어려웠다. 특히 충격시험결과에서 아주 낮은 최대에너지 수준을 보였던 Linde 80 weld flux 도 SP 에너지

천이곡선에서는 다른 강종과 크게 차이가 나타나지 않았다. 즉, 충격시험과 SP 시험결과의 최대에너지 수준에 대한 실험적인 비교는 불가능하였다.

앞서 서술한 것과 같이, 시험결과의 신뢰성 향상을 위하여 천이영역의 각 온도별로 6 번의 시험을 실시하였으며 Weibull 분포를 적용한 통계처리를 통하여 각 온도에서의 평균 SP 에너지를 구하였다. 그러나 조사재의 경우, 사용할 수 있는 시험편 수량에 제한이 있고 취급에서도 매우 어렵기 때문에, 천이온도 결정에 영향을 미치지 않는 최소 수량을 아는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 각 온도에서의 시험편 수량(n)을 변화시키며, 이 때 결정되는 SP 천이온도의 변화를 확인하였다. 그림 5 는 시험편 수량의 변화에 따른 T_{SP} 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 n=4 이상이 되면 T_{SP} 값의 변화가 없는 것으로 확인되었다. 따라서 조사재에 대한 SP 시험에서는 각 온도별로 4 번의 시험을 수행하였다.

2. 조사재의 소형펀치 시험결과

그림 6 은 천이영역인 -150°C 와 -180°C 에서의 KFY4 소재의 중성자 조사량의 변화에 따른 SP 하중-변위 곡선의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 조사량이 증가할수록 하중-변위곡선의 기울기는 증가하나, 파단시의 하중과 변위는 감소하는 것을 확인하였다. 그림 7 은 4 개 강종에 대한 조사량의 변화에 따른 SP 에너지 천이곡선의 변화를 나타낸 것이다. 변화의 정도는 강종에 따라 다르지만, 전체적으로 조사량이 증가함에 따라 천이곡선이 고온쪽으로 이동하는 것을 확인 할 수 있었다.

그림은 8 은 조사재로부터 결정된 SP 천이온도를 앞서 설명한 비조사재의 결과에 함께 도시하였다. 조사재의 경우, KFY5 소재를 제외한 나머지 소재에서는 SP 시험결과와 동일한 조사량을 갖는 충격시험결과의 확보에 어려움이 있었다. 따라서 이 경우에는 그림에서와 같이 충격시험결과의 조사량 전, 후의 SP 시험결과를 이용하여 구간으로 표시하였다. 직접적인 비교는 어려우나 비조사재에서 구한 관계식을 잘 만족하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

$$T_{41J}\ (K) = 2.43\ T_{SP}\ (K)$$

그림 9 는 조사재와 비조사재에 대한 SP 천이온도와 Master curve 법에 의해 결정된 reference temperature, T_0 를 비교한 결과이다. 아직 정확한 결론을 내리기에는 확보된 실험결과가 미흡하나 이 둘 사이에서도 선형적인 관계를 갖는 것으로 생각된다. 이러한 결과는 비록 시험방법은 다르지만 두 시험에서의 파괴기구가 유사함을 의미하는 유용한 결과이다. 즉, 취성파괴시에는 국부벽개파괴응력(local cleavage fracture stress)이 파괴를 결정짓는 주요한 인자라고 알려져 있다[11-13]. 따라서 SP 시험법과 Master curve

시험법에서 얻어지는 국부벽개파괴응력의 비교함으로서 두 시험법 사이의 관계를 더욱 명확하게 할 수 있을 것이라 판단되며 현재 이를 위한 연구가 진행되고 있다.

결론

본 연구에서는 중성자 조사량에 따른 원자로 압력용기강의 천이온도 변화를 평가하기 위하여 현재 많은 관심을 받고 있는 소형펀치시험법을 적용하였다.

비조사재뿐 만 아니라 조사재의 경우에서도 SP 에너지 천이곡선의 최대값과 최소값의 중간에서의 온도로 정의된 SP 천이온도(TSP)는 충격시험으로부터 구한 Charpy index temperature T_{41J} 과 다음과 같은 선형적인 관계를 나타내었다.

$$T_{41J}\ (K) = 2.43\ T_{SP}\ (K)$$

또한 SP 천이온도는 ASTM standard E1921 에 따라 구한 reference temperature, T_0 와도 의미있는 관계를 보였다.

중성자 조사량이 증가할수록 SP 곡선의 기울기는 증가하며, 파단시까지의 변위는 감소하였다. SP 에너지 천이곡선도 조사량의 증가에 따라 고온쪽으로 이동하여 SP 천이온도가 증가하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발사업중 파괴특성평가 및 향상기술개발 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Wallin, K., Fracture of Engineering Materials & Structure, 1991, pp.83-88.
2. STM E 1921-97, "Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T0, for Ferritic Steels in the Transition Range," ASTM, 1998.
3. ASME Code Case N-629, "Use of Fracture Toughness Data to Establish Reference Temperature for Pressure Retaining Materials for Section XI".
4. Bulloch, J.H., "Toughness losses in low alloy steels at high temperatures : an appraisal of certain factors concerning the small punch test", *Intl. J. Pressure Vessels and Piping*, Vol.75, 1998, pp.791-804
5. Baik, J.-M., Kameda, J. and Buck, O., "Small punch test of intergranular embrittlement of an alloy steel", *Scripta Metall.*, Vol.17, 1983, pp.1443-47.

6. McNaney, J., Lucas, G.E. and Odette, G.R., "Application of ball punch tests to evaluating fracture mode transition in ferritic steels", *J. Nucl. Mater.*, 179-181, 1991, pp. 429-433.
7. Misawa, T., Adachi, T., Saito, M. and Hamaguchi, Y., "Small punch tests for evaluating ductile-brittle transition behavior of irradiated ferritic steels", *J. Nucl. Mater.*, 150, 1987, pp. 194-202
8. Joo, Y.-H., Hashida, T. and Takahashi, H., "Determination of ductile-brittle transition temperature (DBTT) in dynamic small punch test", *J. Testing and Evaluation*, 20, 1992, pp. 6-14
9. Saucedo-Munoz, M.L., Matsushita, T., Hashisa, T., Shoji, T. and Takahashi, H., "Development of a Multiple Linear Regression Model to Estimate the Ductile-Brittle Transition Temperature of Ferritic Low-Alloy Steels Based on the Relationship Between Small Punch and Charpy V-Notch Tests", *J. Testing and Evaluation*, 28, 2000, pp. 352-358.
10. Foulds, J.R., Woytowitz, J.R., Parnell, T.K. and Jewett, C.W., "Fracture toughness by small punch testing", *J. Testing and Evaluation*, 23, 1995, pp. 3-10.
11. Chen, J.H. andWang, G.Z., "Study of mechanism of cleavage fracture at low temperature", *Metall. Trans.*, 23A, 1992, pp. 509-517.
12. Chen, J.H., Wang, G.Z., Zhu, L. and Gao, Y.Y., "Further study on the scattering of the local fracture stress and allied toughness value", *Metall. Trans.*, 22A, 1991, pp. 2287-2296.
13. Yang, W.J., Huh, M.Y., Roh, S.J., Lee, B.S., Oh, Y.J. and Hong, J.H., "Mechanical Behavior : The Effects of the Local Fracture Stress and Carbides on the Cleavage Fracture Characteristics of Mn-Mo-Ni Low Alloy Steels in the Transition Region", *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 38, 2000, pp. 675-680.

Table. 1 The chemical compositions and the standard fracture properties for the RPV steels studied in the present work.

Types	ID	Chemistry (wt%)				USE (J)	T_{68J} (^oC)	T_{41J} (^oC)
		Ni	Cu	P	C			
SA508Cl.3	KFY3	0.78	0.06	0.008	0.18	239	7.2	-3.3
	KFY4	0.78	0.06	0.007	0.19	281	-9.4	-21.5
	KFU4	0.86	0.03	0.006	0.18	282	-28.5	-24.6
	KFY5	0.92	0.03	0.007	0.21	267	-34.0	-44.7
	U4W	0.13	0.03	0.011	0.08	300	-9.4	-24.6
SA533B1	JRQ	0.84	0.14	0.017	0.18	207	-5.9	-19.6
SA508Cl.2	K1	0.73	0.07	0.010	0.22	238	-28.1	-38.0
Linde 80 flux weld	K1W	0.61	0.23	0.012	0.10	91	28.9	-14.6

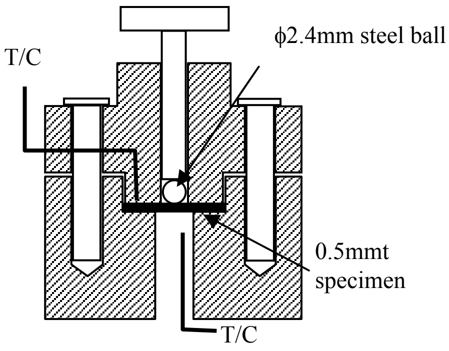

Fig. 1. The schematic illustration of the small punch test jig.

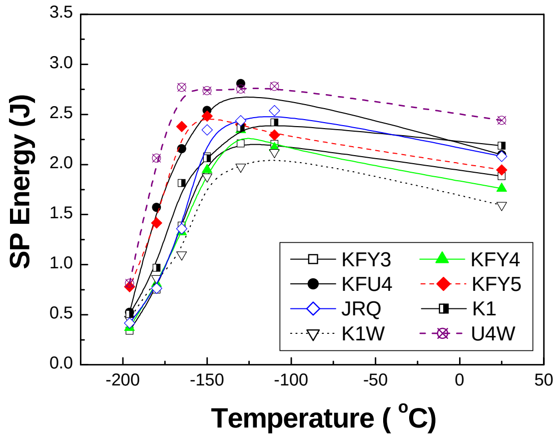

Fig. 2. Comparison of SP energy curves for the RPV steels.

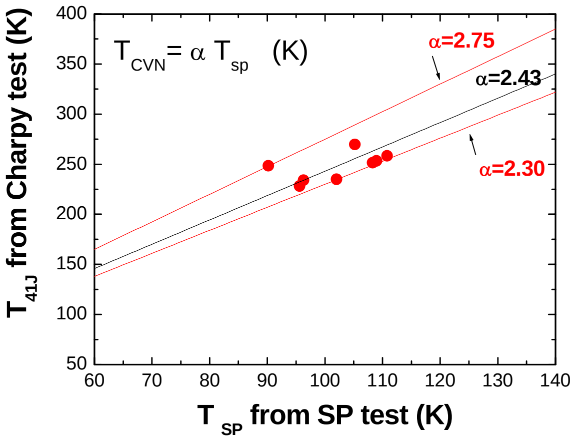

Fig. 3. Charpy index temperatures vs. T_{SP}.

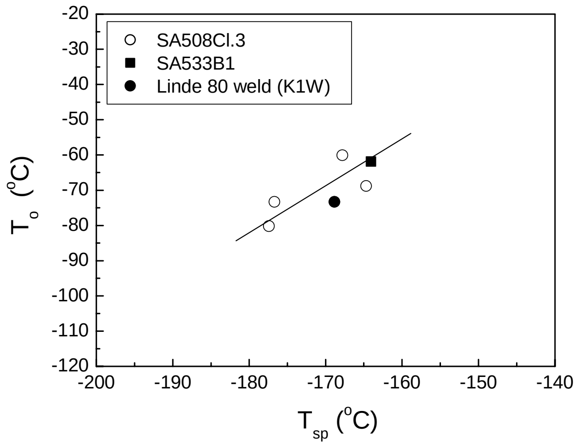

Fig. 4. Master curve transition temperature (T_0) vs. T_{SP}.

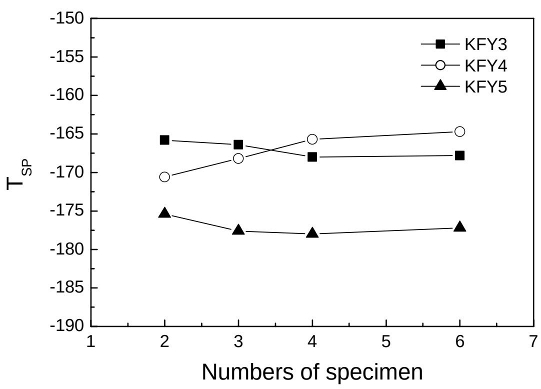

Fig. 5. The change of T_{SP} as a function of the specimen quantity.

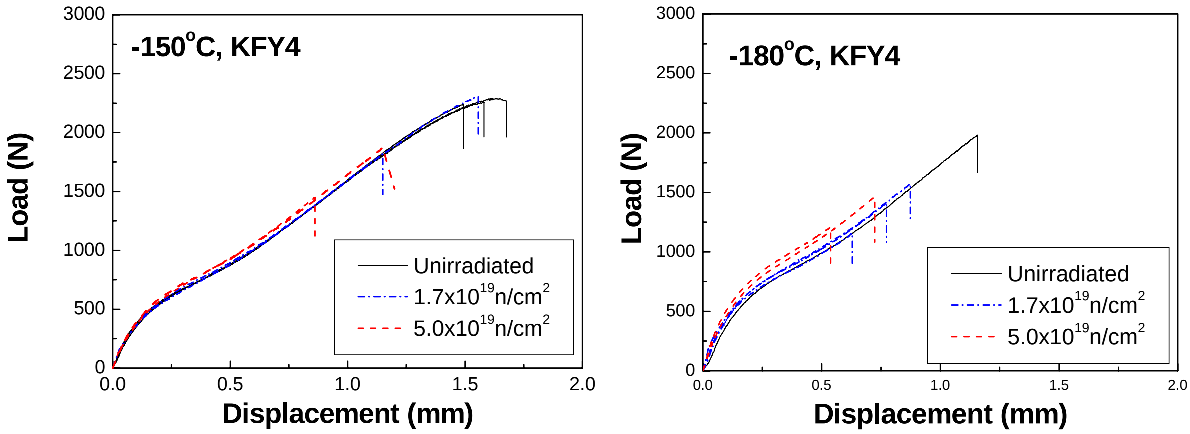

Fig. 6. SP load-displacement curves for KFY4 steels before and after irradiation.

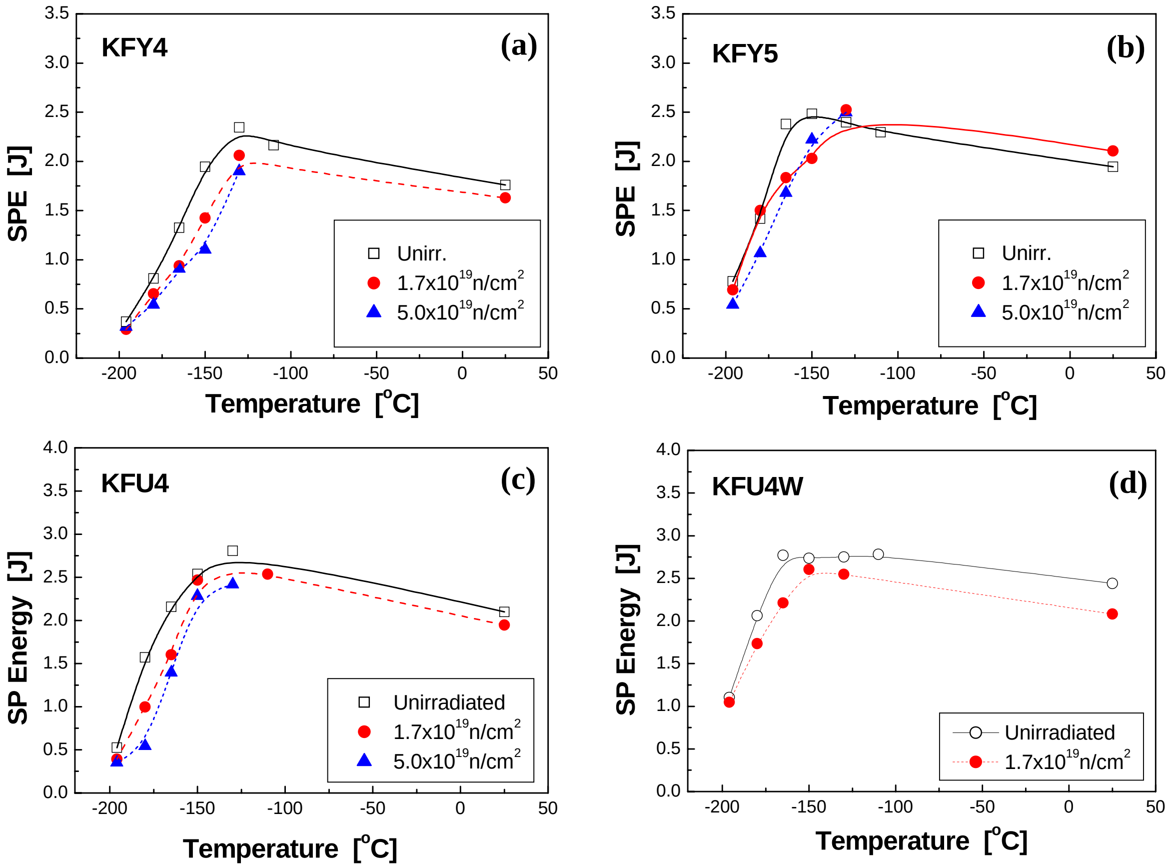

Fig. 7. The SP energy changes as a function of the testing temperature for the three materials before and after irradiation (E>1MeV): (a) KFY4, (b) KFU4, (c) KFY5, (d) KFU4W

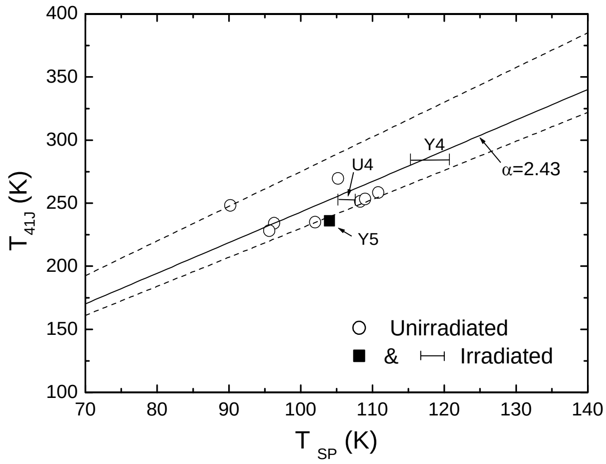

Fig. 8. The correlation between the T_{SP} and Charpy T_{41J} for the materials before and after irradiation.

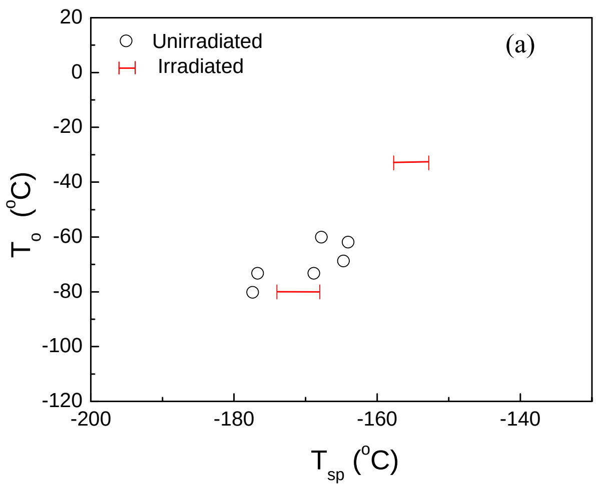

Fig. 9. T_{SP}-T_0 correlation