용접열영향부 충격시험편 노치 위치에 따른 파괴거동

장윤찬† · 홍재근** · 박지홍** · 김동욱* · 이영석*

Failure Behaviors Depending on the Notch Location of the Impact Test Specimens on the HAZ

Yunchan Jang, Jaekeun Hong, Jihong Park, Dongwook Kim, & Youngseog Lee

Key Words : Notch Location(노치 위치), failure simulation(파괴 모사), HAZ (용접열영향부) Charpy V-notch test(샤르피 V-노치 시험)

Abstract

Numerical studies were performed to examine the effects of notch location of impact specimens on the failure behavior of HAZ (heat affected zone) when Charpy V-notch impact test were made at a low temperature (1℃). Carbon steel plate (SA-516 Gr. 70) with thickness of 25mm for pressure vessel was welded by SMAW (shielded metal-arc welding) and specimens were fabricated from the welded plate. Charpy tests were then performed with specimens having different notch positions of specimens varying from the fusion line through HAZ to base metal. A series of finite element analysis which simulates the Charpy test and crack propagation initiating at the tip of V-notch was carried out as well. The finite element analysis takes into account the irregular fusion line and non-homogenous material properties due to the notch location of the specimen in HAZ. Results reveals that the energies absorbed during impact test depend significantly on the notch location and direction of specimen. Finite element analysis also demonstrates that the notch location of specimens, to a great extent, influences the reliability and consistency of the test.

기호설명

V : 해머 속도 (m/s)
Y : 소재의 항복 강도 (MPa)
Hv : 소재의 경도 (psi x 10^3)
R_h : 해머의 반경 (mm)
R_a : 지지대의 반경 (mm)
W : 용접금속(Weld metal) 의 폭 (mm)
C_L : 용접용융선으로부터 노치까지 거리 (mm)
L : 시편의 길이 (mm)

1. 서 론

† 회원, 중앙대학교 대학원
* 회원, 중앙대학교 기계공학부
** 비회원, 한국기계연구원
E-mail : ysl@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5256 FAX : (02)814-9476

샤르피 V-노치시험(Charpy V-notch test) 은 금속 소재가 어떤 하중을 받을 때 주위온도변화에 따라 취성파괴(brittle failure)에서 연성파괴(ductile failure)로 변화하는 동안의 변형에너지의 흡수량을 측정할 수 있는 표준화된 시험방법이다. 또한, 샤르피 시험은 용접된 구조물의 변형 및 파괴과정을 이해하는데 사용되고 측정된 인성(toughness)을 기준으로 용접 구조물의 안전성 및 신뢰성을 평가할 수 있다.

재료의 충격값에 미치는 요소들은 재료의 종류(미세조직), 시험온도, 미세조직의 이방성, 충격속도 및 시험편 형상이다. 샤르피 시험용 시편의 중간 부분에는 노치(Notch)가 있는데 시편의 파괴는 항상 노치에서 시작된다. 충격시험편의 채취시에 등방성 재료의 경우 노치의 위치(시험편의 채취위치)에 따른 충격치의 영향은 매우 적지만 이방성 재료 또는 용접부의 경우에는 노치의 위치가 소재의 인성평가에 많은 영향을 미친다. 또한, 용접부위가 포함된 시편에서는 모재, 용접

부 그리고 용접열영향부의 기계적인 물성치가 다르다. 따라서, 용접열영향부의 충격시험편을 채취할 때 노치 위치가 샤르피 시험에 있어서 중요한 인자가 된다. 용접열영향부는 영역이 좁고, 다양한 미세조직으로 구성 되어있다. 따라서 용접열영향부를 하나의 물성치로 가정하는 것은 샤르피 시험결과 해석시 필연적으로 많은 오차를 가지고 올 수 있다.

용접열영향부의 충격특성에 대한 연구는 많이 수행되었다. Kim and Yoon [1] 은 원자로 용기강의 노치인성과 미세조직변화를 용접열영향부내 전체 영역을 대상으로 단위 열영향부 (unit HAZ) 개념을 설정하고 체계적인 평가를 하였다. 이를 통해 최저인성영역을 제시하고 Gleeble 장비를 사용하여 고온/냉각 물성실험을 통해 인성저하의 원인을 찾았다. 용접열영향부의 인성평가에서 용접용융선(Fusion Line)에 1mm 위치의 인성이 가장 높게 나온다고 발표하였다 [2],[3]. 즉, 모재에 가까워 질수록 인성이 낮아진다는 보고 하였다. Hong et. al [4] 은 노치 위치에 따른 실제 샤르피 시험을 통해 노치 위치가 모재에 가까워짐에 따라서 흡수에너지가 줄어든다고 보고하였다 .

샤르피 충격시험은 시험기계마다 또한 실험기관마다 결과값의 편차가 심하여 재현성이 부족하다. 따라서, 이 문제를 극복하기 위한 유한요소법을 사용하여 용접부(weld) 및 용접열영향부(HAZ)가 시편의 변형 및 파괴과정에 미치는 연구를 수행하게 되었다. Tvergaard and Needleman [5] 는 취성파괴(brittle failure)에서 연성파괴(ductile failure)로의 전이(transition) 를 조사하기 위해 다른 용접이음에 대해서 평면변형률 유한요소해석을 수행하였다. 그들은 시편노치의 위치를 용접금속(Weld metal) 부위 안에서 이동시키면서 모재(HY100 steel), 용접부위 및 용접열영향부의 파괴거동을 연구하였다. 시편의 파괴에 필요한 에너지는 용접금속 부위 안에서 노치의 위치에 매우 민감하고 노치의 위치가 HAZ 에 접근할 때 취성거동이 가장 높다고 보고했다. Tvergaard and Needleman [6] 는 또한 3 차원 유한요소법을 사용하여 용접부위와 노치의 상대적인 방향에 따른 모재, 용접부위 및 용접열영향부의 파괴거동을 연구하였고 3 차원 변형해석 결과가 취성-연성파괴 전이에 많은 영향이 있음을 보여주었다.

하지만 노치의 위치가 용접열영향부 영역에서 변화할 때 3 차원 유한요소해석 결과가 아직 없다. 따라서 본 연구에서는 A-516 Gr.70 탄소강의 용접열영향부가 포함된 시편의 샤르피 시험과정을 3 차원 유한요소모사를 통해서 정량적으로 수행 하고 실험결과와 비교하였다. 용접열영향부의 기계적인 물성치는 경도시험을 통해 도출하고 유한요소계산에 반영하였다. 용접열영향부위내에서 시편 노치(notch of specimen) 위치가 어디에 있느냐에 따라 파괴거동이 다르다. 따라서 시편의 중심선 즉 노치위치를 용접용융선에서 부터의 거리에 따라 3 가지 경우로 설정하고 각 경우에 대한 모사를 하고 실험결과와 비교하였다.

2. 샤르피 시험

2.1 샤르피 시험

본 연구에서는 SA-370 규정을 따라서 샤르피 시험을 수행 하였다. 그림 1 에 샤르피 시험의 도식도가 나타나 있다.

2.1.1 시편 제작

본 연구에 사용된 재료는 압력용기에 사용되는 A-516 Gr.70 탄소강이다. 재료의 화학적 조성은 표 2 과 같다. 기계적 물성치는 표 3 와 같다. 용접은 표 4 과 같은 조건으로 시행 하였다. 본 연구에서 이용한 실드아크용접(SMAW: shielded metal-arc welding) 은 아크 및 용접금속의 보호매질로서 대기를 차단하면서 하는 아크 용접 방법이다. 그림 3 와 같이 두께가 25mm 인 평판 중간을 실드 아크 용접을 하였다. 용접열영향부(HAZ) 는 그림 4 (a) 와 같이 표면의 1/4 t 인 위치에서 만든다. 그리고 그림 4(a), 4(b), 4(c) 와 같이 용접용융선에서 부터 0.5㎜, 1.0㎜, 1.5㎜ 에 노치를 위치 시켜서 시편을 제작하였다.

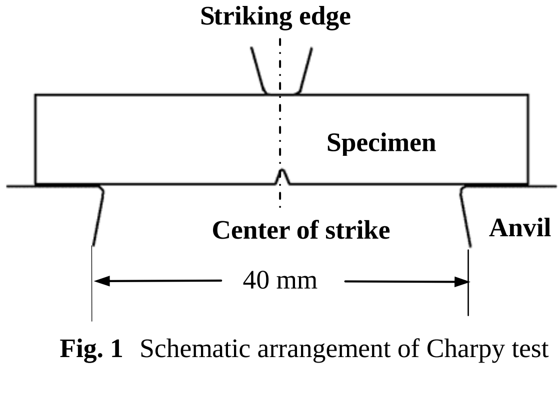


Fig. 1 Schematic arrangement of Charpy test

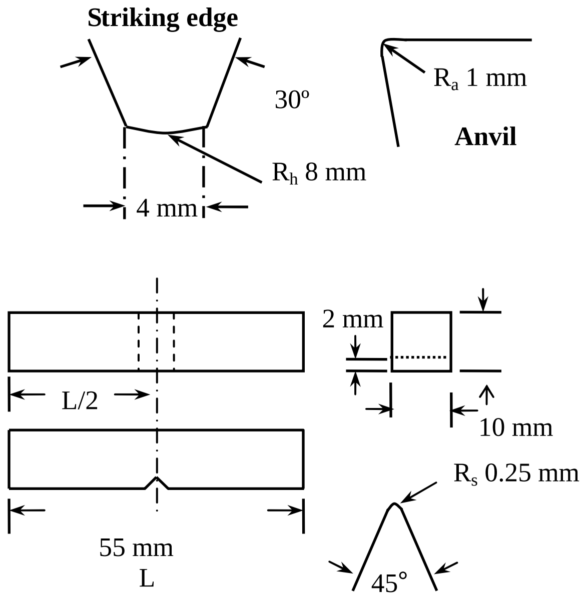


Fig. 2 Dimensions of test specimen, striking, edge and anvil

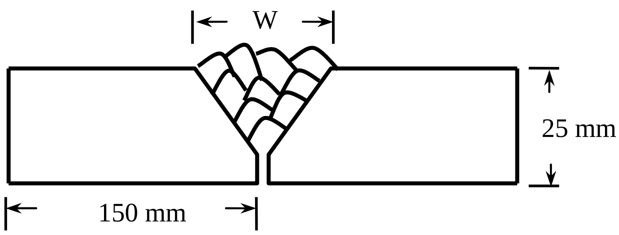
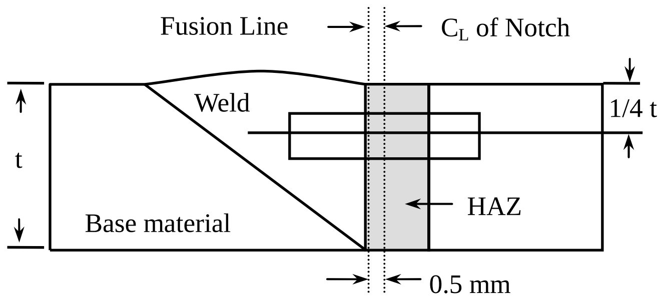
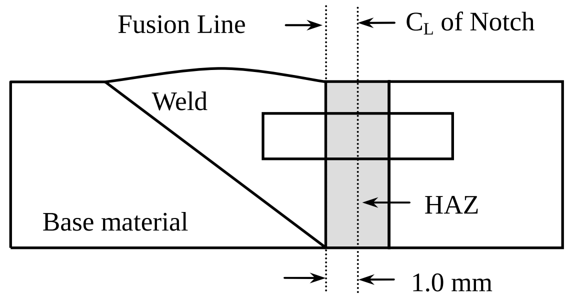


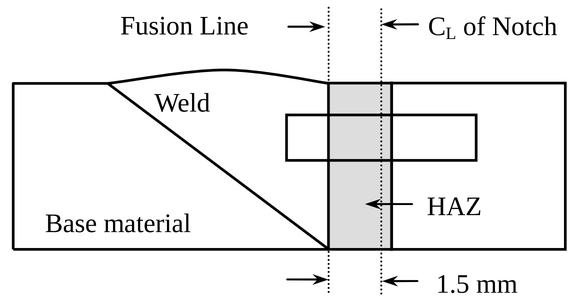
Fig. 3 Schematic illustration of welding specimen



(a) Specimen having 0.5mm distance between fusion line and C_L of notch



(b) Specimen having 1mm distance between fusion line and C_L of notch



(c) Specimen having 1.5mm distance between fusion line and C_L of notch

Fig. 4 Notch location of test specimen

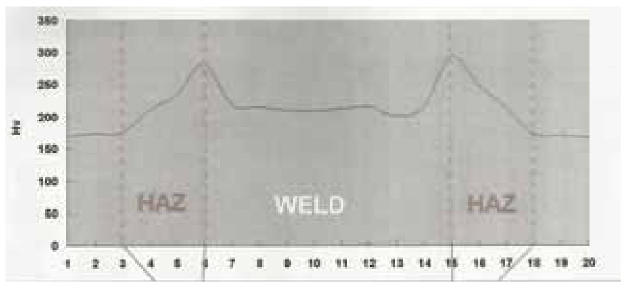


Fig. 5 Hardness of impact test specimen

3. 모사

3.1 모사

본 연구에서는 샤르피 충격 시험과정을 상용유한요소프로그램 ABAQUS 6.6 를 사용하여 모사를 하였다. 용접열영향부(HAZ: Heat Affected Zone) 는 용접용윤선에서 거리가 멀어짐에 따라서 조직의 크기도 변화고 기계적인 성질도 변한다. 용접열영향부는 일반으로 크기가 작기 때문에 그 부분만 따로 분리해서 인장시험을 해서 기계적인 물성치를 얻을 수 가 없다. 용접열영향부는 또한 하나

의 물성치를 가지고 있는 것이 아니고 용접용융선 (fusion line) 으로부터 멀어짐에 따라서 미세조직이 변하기 때문에 기계적인 물성치도 다르다. 따라서 경도시험을 통해서 기계적인 물성치를 측정한다. 그림 5 에 용접열영향부, 모재 그리고 용접금속 (Weld metal) 부위에서 측정된 비커스 경도값이 나타나 있다. 측정된 경도값을 식 (1)에 대입하여 항복강도를 계산한다.

$$\text{Hardness} = cY \tag{1}$$

여기서 c 는 비례상수 이다. 탄소강에서는 비례상수는 3 이다.

외연적 시간 적분법(Explicit) 으로 충격해석을 모사하였다. 8 절점 3-D 요소를 사용하였고, 전이요소(Transition mesh) 기법과 시편의 기하학적 대칭 조건으로 요소의 숫자를 대폭적으로 축소했다. 요소제거(Element removing) 기법을 사용하여서 파괴를 모사 하였다. 해머속도는 v= 6 m/s, 충돌시간 0.32 밀리세컨드 (millisecond) 로 두고 해석을 수행 하였다.

그림 6 과 같이 3 차원 요소를 생성하였고, 요소는 35000 개 이다. 균열형상을 예측하기 위해서는 파괴가 일어나는 노치 근처는 요소의 크기를 작게 해주어야 한다. 그래서 노치와 균열이 진행할 거라고 예측 되는 부분은 요소크기를 250㎛ 로 생성 하였고, 나머지 부분은 2000 ㎛ 의 크기로 요소를 생성 하였다. 온도변화는 없으며 모사시 설정된 온도는 1^0℃ 이다.

4. 결 과 및 고찰

4.1 결과

그림 4 에서 (a)의 시편을 HAZ-1, (b)의 시편을 HAZ-2, (c)의 시편을 HAZ-3 이라고 명명한다. 표 1 에 실험 과 유한요소해석의 흡수에너지를 비교하여 정리 하였다. 모재와 HAZ-1, HAZ-2 는 실험값과 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 하지만 HAZ-3 은 유한요소해석이 실험 값 보다 흡수에너지가 30 Joule 정도 차이가 나는 것을 알 수 있다. HAZ-3 은 노치의 위치가 모재 쪽으로 위치하고 있다. 즉 모재쪽의 열영향부의 물성치가 계산된 값보다 적다는 것을 알 수 있다.

Table 1 **Comparison between experiment and FE-analysis**

Absorbed [J]	Base metal	HAZ-1	HAZ-2	HAZ-3
Experiment	179	238	216	160
FE-analysis	178	240	220	190

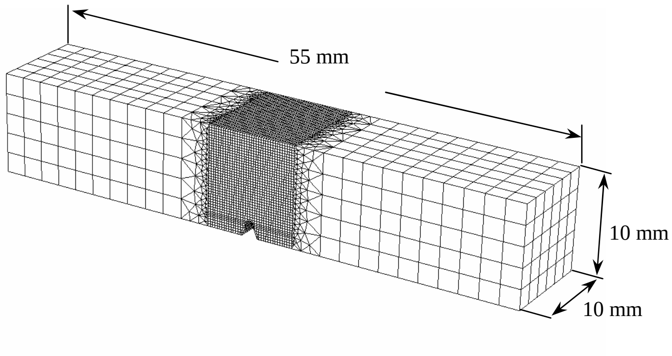


Fig. 6 Finite element mesh

그림 7 은 시편의 흡수에너지를 유한요소해석으로 계산된 결과이다. 노치의 위치가 용접용융선으로부터 모재쪽으로 위치 할수록 흡수에너지는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 모재(Base metal)쪽 용접열영향부에 노치가 위치한 HAZ-3 는 용접금속(Weld metal) 쪽 용접열영향부에 노치가 위치한 HAZ-1 보다 흡수에너지가 낮게 계산 되었다. 파괴의 시작이 노치에서 시작 되는 것을 고려하면 모재쪽 용접열영향부의 인성이 적다는 것을 알 수 있다.

그림 8 ~ 11 은 파괴의 형상과 기준을 보여준다. 소재가 극한응력(Ultimate stress)에 도달했을 때의 변형률(Strain)을 파괴변형률(Failure strain) 이라고 한다. 연성파괴기준(Ductile damage criterion)은 소재가 변형이 되다가 소재의 변형률이 파괴변형률에 도달했을 때를 말한다. 연성파괴 기준에 도달하면 손상(Damage) 값이 1 을 가르킨다. 그림 8 은 모재의 해석 값을 보여준다. 등방성 재료인 모재는 좌우 대칭으로 연성파괴기준이 노치 선단으로 균일하게 분포하는 것을 알 수 있다. 그림 9 는 HAZ-1 의 연성파괴기준을 보여준다.

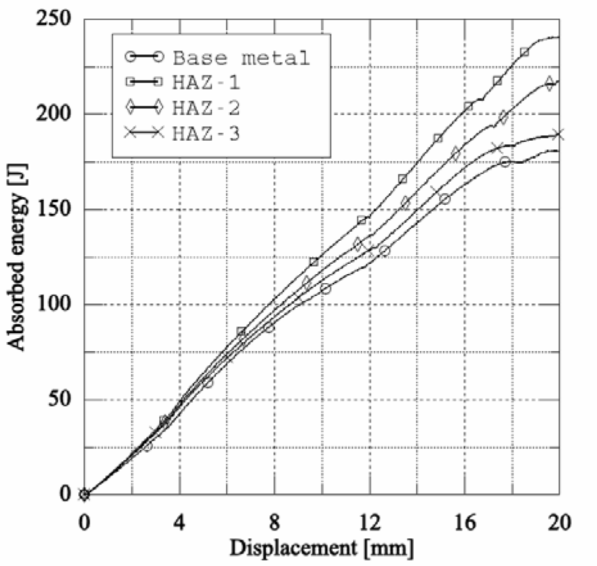


Fig. 7 Absorbed energy of base metal, HAZ-1, HAZ-2, HAZ-3 (see Fig. 4)

Table 2 **Chemical composition of SA 516 Gr. 70 steel**

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb
Wt. %	0.18	0.30	1.15	0.014	0.003	0.17	0.31	0.02	0.098	0.026	0.016

Table 3 **Mechanical property of SA 516 Gr.70 steel**

Yield strength [MPa]	Tensile strengh [MPa]	Elongation [%]	Abs. energy [J]	Lateral expans. [mils,]	Shear fracture [%]
400	560	22	93	54	33

Table 4 **Welding conditions of SA 516 Gr. 70 steel**

Process	Current [A]	Voltage [V]	Travel speed [cm / min]	Interpass temp. [℃]
SMAW	110 ~ 170	30 ~ 35	12 ~ 15	54

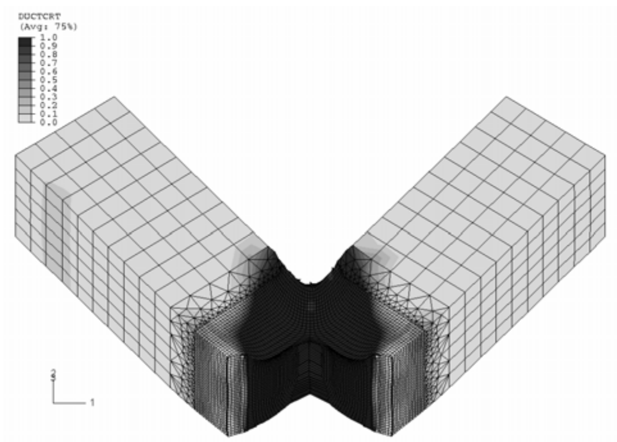


Fig. 8 Damage criterion contour of Base Metal

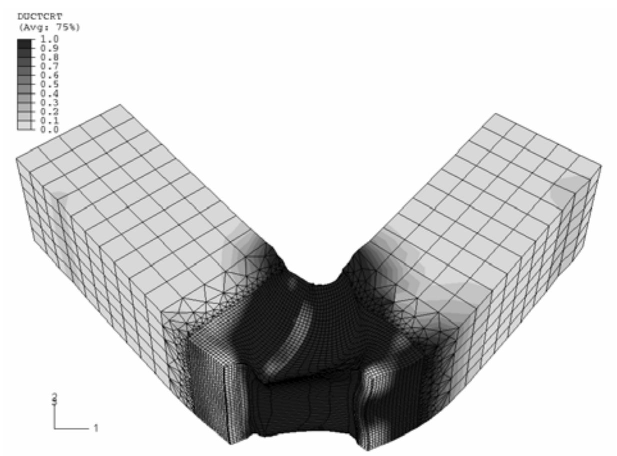


Fig. 9 Damage criterion contour of HAZ-1

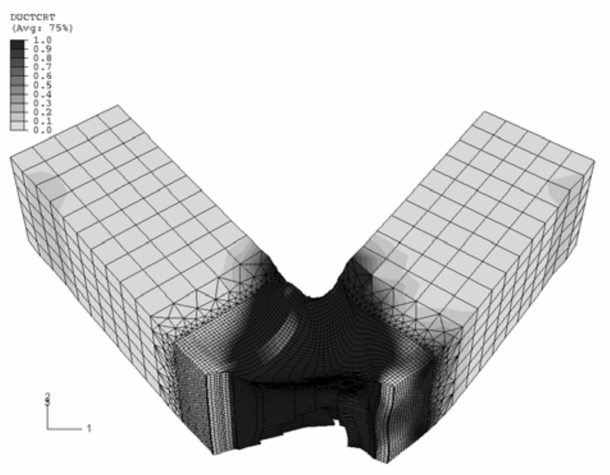


Fig. 10 Damage criterion contour of HAZ-2

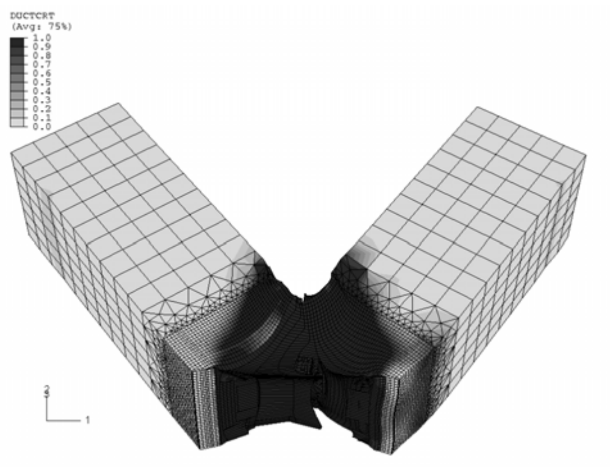


Fig. 11 Damage criterion contour of HAZ-3

노치 선단부터 연성파괴기준에 도달 했지만 용접금속쪽 용접열영향부는 아직 연성파괴기준에 도달하지 않은 것을 볼 수 있다. 그림 9 ~ 11 역시 용접금속쪽 용접열영향부는 파괴기준에 도달 하진 않은 것을 알 수 있다. HAZ-2, HAZ-3 은 용접금속쪽 용접열영향부가 연성파괴기준에 도달하지 않았지만 균열이 모재쪽으로 성장한 것을 볼 수 있다.

표 1 에서 HAZ-3 의 실험 값과 유한요소해석 값의 차이는 균열이 어느 쪽으로 성장하는지에 따라서 결과 값이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 용접금속쪽 용접열영향부가 노치 중앙에 위치 했을 때는 균열이 용접금속쪽 용접열영향부로 성장 한다. 균열성장에 미치는 재료는 용접금속쪽 용접열영향부라고 할 수 있다. 즉, HAZ-1,2 에서는 모재쪽 용접열영향부가 균열성장에 영향을 많이 주지 않는다. 그렇기 때문에 실험 값과 유한요소해석 값의 차이가 거의 나지 않는다. 하지만 HAZ-3 에서는 모재쪽 용접열영향부가 균열성장에 영향을 준다. 모재쪽 용접열영향부의 기계적인 물성치가 본 연구에서 정의 했던 물성치 보다 적다는 것을 알 수 있다. 용접열영향부를 좀더 세분화 하면 기계적인 물성치를 예측 할 수 있을 것 이다.

4.2 고찰

용접열영향부의 샤르피 시험편은 노치의 위치에 따라서 흡수에너지와 균열 방향이 다르다는 것을 모사를 통해서 알 수 있었다. 용접열영향부의 평가를 할 때 용접용융선에서 근처에 노치를 위치시킨 시편으로 샤르피 시험을 할 경우 모재 보다 흡수에너지가 높기 때문에 압력용기의 시험 기준에 만족할 수도 있으나 노치 위치가 모재 쪽으로 위치한다면 흡수에너지는 시험 기준 보다 작을 것이다. 용접열영향부의 시험 기준을 만들기 위해서는 용접열영향부를 좀더 세밀하게 영역을 나누어주고 다양한 시험조건에 대해서 연구해야 될 것이다.

후 기

본 연구는 2 단계 두뇌한국사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Kim, J. H., Yoon, E. P., 1998, "Notch position in the HAZ specimen of reactor pressure vessel steel," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 257, No. 3, pp. 303~308.

(2) Kim, Joo. Hag., and Yoon, Eui. Pak., 1998, "Notch Toughness and Microstructural Alterations in the Unit Heat-Affected Zone of SA 508 CI. 3 Reactor Pressure Vessel Steel," *J. Kor. Inst. Met. & Mater*, Vol. 36, No. 8, pp. 1329~1337.

(3) Shin, Hak. Soo., Kim, Joo. Hak., Hong, Jun. Hwa., Moon, Jong. Gul., and Chun, In. Sang., 1999, "Transition Region Fracture Toughness and Microstructural Alterations in the Weld HAZ of RPV Steel," *J. Kor. Inst. Met. & Mater*, Vol. 37, No. 10, pp. 1260~1266.

(4) Hong, Jaekeun., Son, Youngho., Park, Jihong., Lee, Byunghoon., Yoon, Seogchan., and Kang, Chungyun., 2007, *Proceeding of 15th International Conference on Nuclear Engineering*, Japan, (to be published)

(5) Tvergaard, V., and Needleman, A., 1988, " Analysis of the Charpy V-notch test for welds," *Engineering Fracture Mechnics*, Vol. 65, No. 6, pp. 627~643.

(6) Tvergaard, V., Needleman, A., 2004, "3D analyses of the effect of weld orientation in Charpy specimens," *Engineering Fracture Mechnics*, Vol. 71, No. 15, pp. 2179~2195.