

LNG 저장탱크용 재료의 극저온 충격특성과 파면해석

신 주영*, 신 형섭*, 박 종서**, 이 해무**

*안동대 기계공학과, **표준연 방재기술연구센터

Impact Properties and Fractography of Structural Materials for LNG Tank at Cryogenic Temperatures

Ju-Young Shin*, Hyung-Seop Shin*, Jong-Seo Park** and Hae-Moo Lee**

* Andong Nat'l Univ., ** Failure Prevention Research Center, KRISS

1. 서 론

최근 환경오염 문제와 관련하여 청정연료로 수요가 증가하고 있는 액화천연가스(LNG)의 저장탱크 및 운반선 등 연료 저장용 설비, 초전도이용 관련 기기, 항공우주용 로켓용 액체연료 저장용기와 같은 저온용 설비 및 기기가 증가하고 있고 대형화의 추세를 보이고 있다. 특히 우리 나라에서는 액화천연가스(LNG)의 수요급증에 따라 이의 운송 및 저장에 필요한 재료의 수요가 증가하면서 극저온 재료에 대한 관심이 높아지고 있다. LNG저장조의 대형화에 따라, 설계강도상의 검토는 물론, 사용재료의 특성, 가공성 및 용접 등의 시공법을 비롯하여 품질관리 면까지 충분한 검토가 필요하다. 특히 LNG를 저장하는 내조재료에 대하여는 모재 및 용접부의 제반 특성을 파악하여 저온에서 취성파괴에 대한 안전성을 확인해 둘 필요가 있다⁽¹⁾.

한편 최근에는 초전도응용기술의 개발과 더불어 핵융합로용 대형 초전도 마그넷과 초전도 발전기의 개발을 비롯한 대형 극저온 기기의 설계를 위한 초전도기술과 주변기술이 비약적으로 진보를 하고 있고, 우리 나라도 2001년까지 핵융합실증로의 개발을 목표로 연구가 시작된 상태이다. 따라서 극저온에서 사용이 예정되어 있는 구조재료에 관하여는 강도설계를 위한 데이터베이스 구축뿐만 아니라 그 시험평가방법의 표준화 등이 시급한 과제로 생각되어진다^(2,3,4).

그 동안 국내에서도 극저온재료의 역학적 특성평가에 관한 연구가 실시되어 왔지만⁽⁵⁾ 외국에 비하여 초보 단계에 머무르는 수준이었으나 LNG 수요가 급증함에 따라 극저온 관련 연구도 점차 활발해지고 있다. LNG 저장탱크용 저온재료의 개발 및 저장탱크의 설계/제작 시에는 LNG 온도(111 K)에서 얻은 역학적 특성을 활용하는 것이 바람직하지만 시험시 111K를 생성·유지시키는 것이 쉽지

않아 이보다 낮은 온도인 액체질소온도(77 K)에서 평가한 역학적 특성치(항복강도, 인장강도, 파괴인성치 등)를 사용하기도 한다. 재료의 기계적 성질중 인성은 극저온 구조물에서 취성파괴가 일어나지 않는다는 조건에 관한 중요한 물성치이다. 따라서 저온용 구조재료는 충분한 파괴인성을 가져야하고 파괴역학을 사용한 취성파괴에 대한 안정성 평가가 이루어져야 한다.

본 연구는, LNG 저장 탱크의 안전성 평가시 필요한 재료물성 데이터 중 파괴인성의 측정 기반 기술을 확보하고, 현재 국내에서 사용되고 있는 LNG 저장탱크용 재질(SUS304L강, Al합금 및 9% Ni강)에 대하여 극저온(173K 및 77K)에서 계장화 샐피충격시험을 실시하여 온도에 따른 충격파괴특성 및 파면해석을 실시하여, 안전성 평가에 필요한 기초 자료를 확보하는 것을 주목적으로 한다.

2. 실험방법

2. 1 시험편

시험재료는 현재 국내 LNG 저장탱크에 사용되고 있는 시판의 오스테나이트계 스테인레스강(SUS304L, t=28mm), Al합금(A5083, t=30mm) 및 QT처리한 9%Ni강(t=25mm) 등 3종류를 사용하였다. 시험편의 채취는 압연방향을 고려하였고, 압연방향에 평행하게 채취한 시험편을 L방향재, 직각되게 채취한 시험편을 T방향재라고 부른다. 또한 두께방향으로 시험편 채취시는 충격시험편의 중심이 제공된 시험재료 두께의 1/2t 및 1/4t에 각각 위치하도록 하였다. 시험편의 형상은 ASTM E23-96에 따라 □10mm x 55mm의 중앙부에 깊이 2mm, 45°의 V-notch를 도입한 시험편을 사용하였다⁽⁶⁾. 각 실험조건에서 3개의 시험편을 사용하여 충격시험을 실시하였다. 시험에 사용한 재료의 화학적 조성 및 실온에서 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

2. 2 충격시험 및 파면관찰

충격시험은 ASTM E23-96(Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials)의 시험법⁽⁶⁾에 따라서 Charpy 충격시험기(Tenius

Table 1 Chemical composition of cryogenic materials.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mg
<i>Austenite steel</i>									
SUS 304L	0.014	0.42	1.19	0.031	0.002	-	9.15	18.22	-
<i>Aluminum alloy</i>									
A5083	-	0.16	0.68	-	-	0.04	-	0.12	4.5
<i>Nickel steel</i>									
9Ni steel	0.06	0.23	0.59	0.004	0.001	-	9.04	-	-

Table 2 Mechanical properties of cryogenic materials at room temperature.

	Tensile strength (MPa)	0.2%Proof strength (MPa)	Elongation (%)
<i>Austenite steel</i>			
SUS 304L	571	257	60
<i>Aluminum alloy</i>			
A5083	309	157	22
<i>Nickel steel</i>			
9Ni steel	713	620	32

Olsen사, 용량: 36.5kg-m)를 사용하여 실시하였다. 시험온도를 293K, 173K 및 77K로 하여 샤피충격 흡수에너지를 측정하였다. 저온실험의 경우, 173K에서는 아이소펜탄(CH₃CH(CH₃)CH₂CH₃)에 액체질소를 적당량 혼합하면서 온도를 저하시켜 173K에 도달하면 시험편을 냉매에 넣고 30분간 유지한 후 충격시험을 하였다. 77K의 경우는 액체질소(LN₂)에 시험편을 침적시킨 후 30분간 유지한 후 시험에 사용하였다. 냉매를 사용한 시험의 경우, 냉매에서 시험편을 대기 중에 노출시킨 후 5초 이내에 충격시험이 완료되도록 하였다⁽⁶⁾. 한편 시험온도 및 압연 방향 등에 따른 동적하중-변위거동을 살펴보기 위하여 계장화 샤피충격시험을 실시하여 파괴개시 및 균열진전거동을 조사하였다.

충격시험후, 시험편의 횡방향 팽출량(lateral expansion, $b_{max}-b_0$)을 측정하였다. 이것은 파단된 양 시험편의 노치부 반대편에서 측정된 변형량이 큰 값들의 합으로 구하였다. 온도에 따른 파괴양상의 변화를 관찰하기 위하여 SEM을 사용한 파면관찰을 실시하였고, 전단파면율(shear fracture percentage)의 측정은, 파면 사진촬영상으로부터 벽개파단부의 길이와 폭을 측정하여 평가하였다. 이것을 연성파면율로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 오스테나이트 스텐레스강의 충격특성

SUS304L의 경우, 실온에서는 300J급 샤피충격시험기로 파단되지 않아서 173K와 77K의 온도에서만 샤피충격시험을 실시하였다. Fig. 1은 온도저하에 따른 샤피충격 흡수에너지와 횡방향 팽출량의 변화를 나타내고 있다.

SUS304L의 충격 흡수에너지는 77K에서도 170J이상으로 비교적 높은 인성을 나타내고 있지만, 온도가 173K에서 77K까지 저하함에 따라서, 흡수에너지는 250J에서 180J로 70J, 횡방향 팽출량은 2.15mm에서 1.65mm로 0.5mm 각각 저하하였다. 한편 시험편의 방향성에 따른 영향은 거의 나타나지 않았고, 77K의 경우 1/2t 위치에서 채취한 T방향재만이 다소 낮은 값을 나타내었다.

Fig. 2는 SUS304L재(1/2t)의 샤피충격후 파단면의 모양을 나타내고 있다. 저온에서 파면양상의 차이는 크지 않고, 온도가 저하함에 따라 밝게 빛나는 취성파면

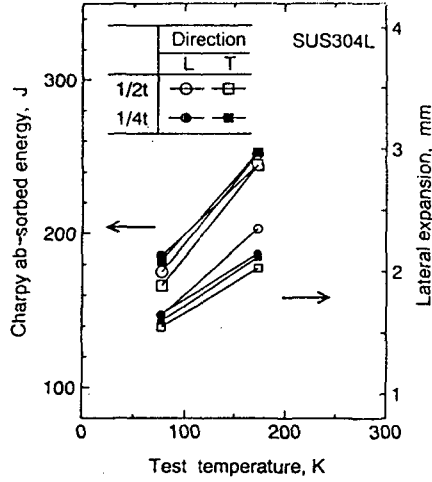


Fig. 1 Change of Charpy absorbed impact energy and lateral expansion with temperature in SUS304L material.

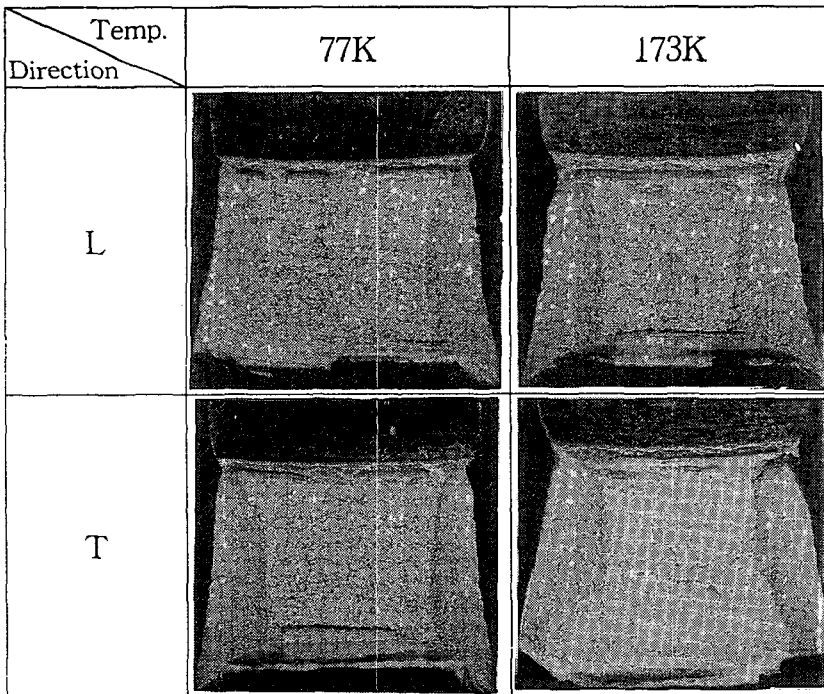


Fig. 2 Appearance of fracture surfaces in SUS304L material after Charpy impact tests (1/2t).

이 증대하는 것을 볼 수 있다. 한편 균열개시후의 파면은 비교적 평탄한 파면을 나타내, 균열진전에 따른 저항이 낮다는 것을 알 수 있다. 이것은 제장화 샤피충격시험에 의해 얻어진 하중-처짐 선도로부터도 확인할 수 있었다. 파괴형태의 천이를 전단파괴의 비율로 나타내는 연성파면율은, SUS304L재의 경우 173K에서는 시험편의 방향성에 관계없이 약 70%를 차지하였고, 77K에서는 약 60%로 저하하는 것을 볼 수 있다. 이러한 온도저하에 따른 파면형태의 천이는 충격흡수에너지의 저하거동과 유사하였다. 이상으로부터 SUS304L 시험편의 연성취성파괴 천이온도는 77K보다 낮은 온도역에 위치해 있는 것을 알 수 있다. 한편 Ogata 등⁽⁷⁾의 4K에서 충격시험결과에 따르면, 극저온에서도 더 이상의 흡수에너지의 저하는 일어나지 않는다는 것이 알려져 있다.

3. 2 Al합금의 충격특성

A5083의 경우는 실온에서부터 77K까지 샤피충격시험을 실시하였다. Fig. 3은 온도에 따른 샤피충격 흡수에너지와 횡방향 팽출량의 변화를 나타내고 있다. 구조용 합금강과는 달리 압연방향에 따라 차를 보이면서 실온에서도 19-29J로 비교적 낮은 충격 흡수에너지 값을 나타낸다. 173K까지 거의 실온의 충격 흡수에너지 값을 유지하였고, 온도가 더욱 저하하여 77K에 달하면 흡수에너지는 15-22J로 다소 저하를 나타내었다. 온도저하에 따라 횡방향 팽출량도 흡수에너지와 거의 유사한 저하거동을 나타내고 있다. 한편 A5083시험편에서 방향성의 영향을 살펴보면, 압연방향에 따라서는 다소 큰 차를 나타내, 시험 온도범위에 걸쳐서 L방향재의 경우가 T방향재의 경우보다 10J정도 큰 값을 나타내었다. 그러나 두께방향의 시험편 위치에 따른 차는 나타나지 않았다.

그림 Fig. 4는 A5083시험편의 파단면 모양을 나타내고 있다. 실온의 경우도 취

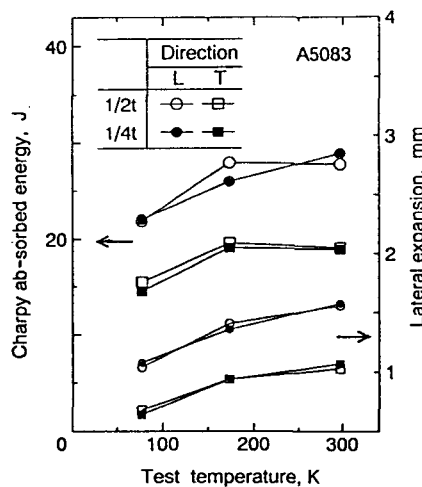


Fig. 3 Change of Charpy absorbed impact energy and lateral expansion with temperature in A5083 material

성파면이 비교적 큰 면적을 차지해 파면의 양단 근처에만 약간의 shear lip이 존재하였고, 비교적 평탄한(planar) 취성파면을 나타내고 있다. 또한 압연방향에 따른 파면양상에는 다소의 차를 볼 수가 있다. 온도가 저하함에 따라서 파면에서 벽개파면이 차지하는 비율은 증가하였고, 77K의 경우는 파괴의 진전에 따라 저온 특유의 균열진행방향으로 갈라짐 현상이 일어나는 것을 볼 수 있다.

실온에서 연성파면율은 L방향재의 경우 약 50%, T방향재는 38%로 비교적 낮은 값으로 또한 방향의존성을 나타내지만, 77K에서 방향의존성은 거의 나타나지 않고 26%정도까지 저하를 나타내었다.

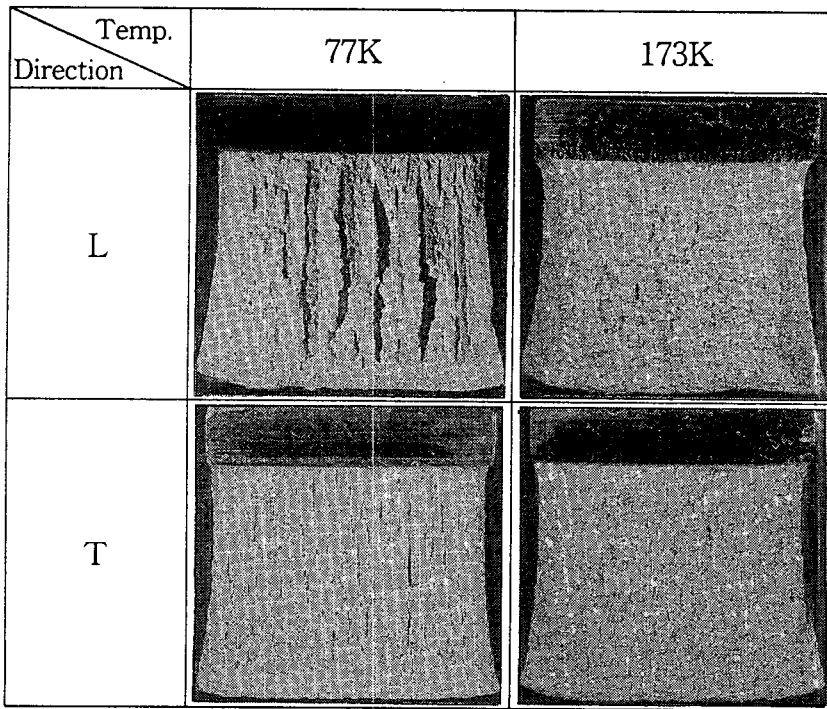


Fig. 4 Appearance of fracture surfaces in A5083 material after Charpy impact tests (1/2t).

3. 3 9%Ni강의 충격특성

9%Ni강의 경우도 실온에서는 300J급 샤피충격시험기로 원만한 파단이 일어나지 않아서 173K와 77K의 극저온에서만 충격시험을 실시하였다. Fig. 5는 온도의 저하에 따른 샤피충격 흡수에너지와 횡방향 팽출량의 변화를 나타내고 있다. 9%Ni강은 77K까지도 충격 흡수에너지가 210J 이상으로 비교적 높은 저온 인성 값을 나타내고 있다. 시험온도가 173K에서 77K로 저하하여도 흡수에너지는 약 60J, 횡방향 팽출량은 0.3mm밖에 저하하지 않아서, 앞서 SUS304L의 경우보다 저하 정도가 적어, 저온에서도 우수한 파괴저항을 나타내는 것을 알 수 있다. 한

편 충격 흡수에너지에 미치는 방향성의 영향을 보면, 앞서의 오스테나이트 스텐레스강보다는 다소 큰 차를 나타내, 1/2t 위치에서 채취한 L방향재의 경우는 T방

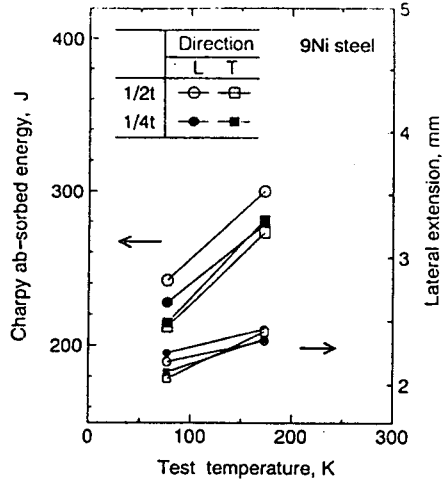


Fig. 5 Change of Charpy absorbed impact energy and lateral expansion with temperature in 9% Ni steel material

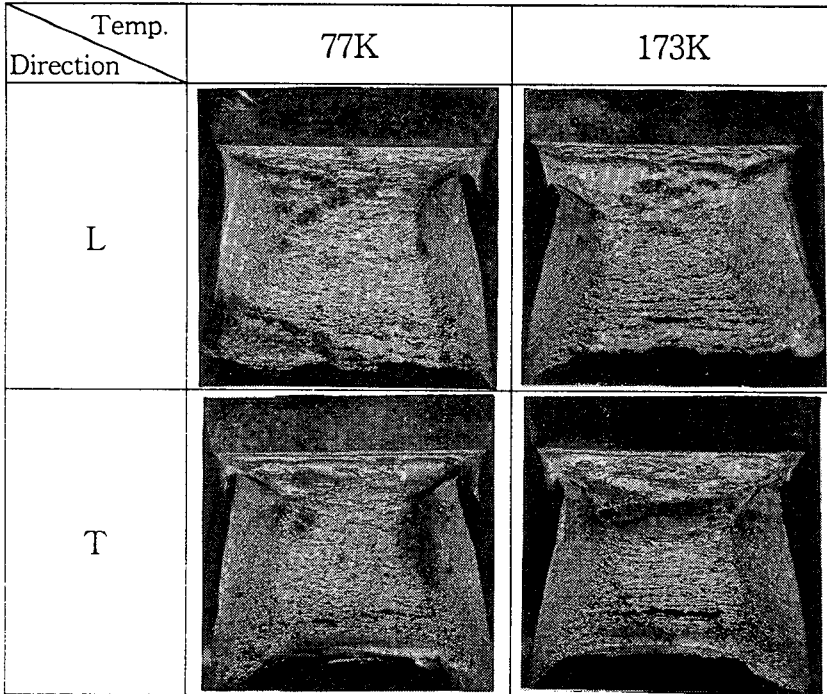


Fig. 6 Appearance of fracture surfaces in 9% Ni steel after Charpy impact tests (1/2t).

향재보다 약30J 정도 큰 값을 나타내었고, 시험편의 두께방향 위치에 따른 차는 L방향재의 경우에만 나타나, 1/2t에 위치한 시험편이 1/4t 시험편보다 약 15J 높은 값을 나타내었다.

Fig. 6은 9%Ni강의 샐피충격후 파단면의 모양을 나타내고 있다. 파면양상에는 거의 차이가 없고, 온도가 저하함에 따라 밝게 빛나는 취성파면은 증대하였다. 한편 파면에는 충격에 의한 균열개시 후에 상당하는 파면부에도 SEM관찰결과 Fig. 7과 같이 연성파괴를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 9%Ni강의 연성파면율은 173K에서는 시험편 방향성에 관계없이 약 72%를 차지하지만 77K에서는 64-68%로 약6%의 저하가 일어났다. 이것은 충격흡수에너지의 저하거동과 유사하여 저온인성의 저하가 크지 않았다는 것을 나타낸다.

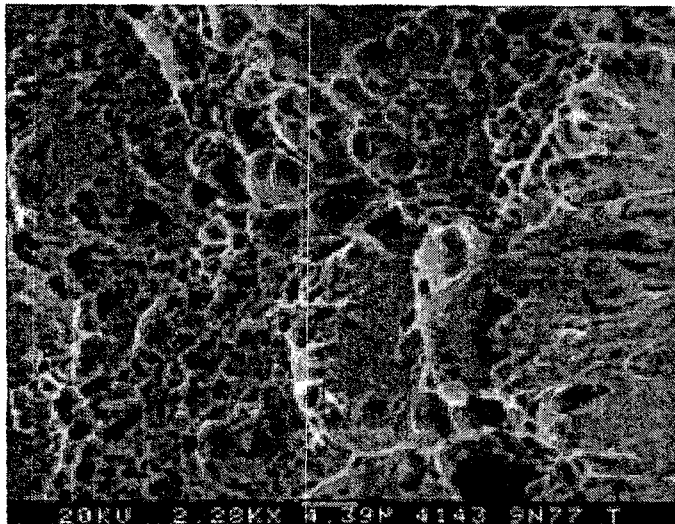


Fig. 7 SEM micrograph of fracture surface in 9% Ni steel(at 77K).

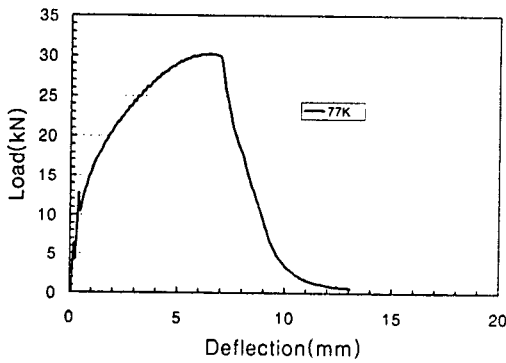
3.4 동적 하중-변위곡선

계장화 샐피충격시험결과 얻어진 각각의 시험재료에 대한 하중-처짐 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 먼저 (a) 77K에서 SUS304L재의 경우, 하중이 균열개시점에 해당하는 최대점에 도달한 후 급속한 저하를 나타내 충격흡수에너지의 대부분이 균열개시까지에 쓰여지고 균열진전에 따른 저항에너지(E_p)는 거의 나타나지 않는 경우를 들 수가 있다. 이것은 Fig. 2에 보인 파면 양상과도 잘 일치하고

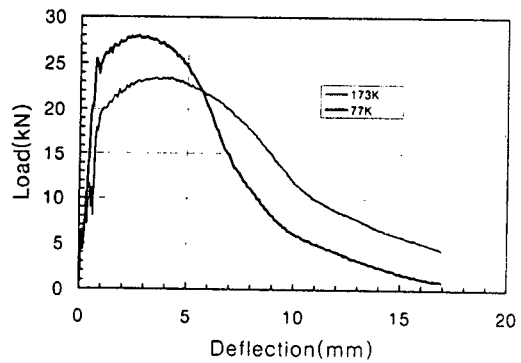
있다. Fig. 8 (b), (c)는 9%Ni 강과 A5083재의 경우를 나타내고 있다. 전체적인 하중-처짐 곡선을 살펴보면, (b) 9%Ni 강 경우는 SUS304L재와는 달리 동적하중이 급격히 증대하여 최대점을 지난 후도 높은 하중값을 유지하면서 큰 변형을 수반하는 것을 보여주고 있다. 그리하여 균열개시 에너지(E_{in})보다 균열진전에너지(E_p)가 보다 큰 부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 또한 온도가 177K에서 77K

로 저하함에 따라 하중-변형곡선은 변화를 나타내, 최대하중값은 항복응력이 증가하는 관계로 보다 급속히 증가하여 173K의 경우보다 큰 값을 가지나 변형이 적은 관계로 파괴개시점까지 에너지는 오히려 약 30J정도 저하하였고 균열진전 에너지에는 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 이것은 앞서의 Fig. 6의 파면관찰 결과와도 잘 일치하고 있다. 한편 (c) A5083재의 경우, 강재에 비하여 훨씬 낮은 하중 및 변형을 나타내었고, 흡수에너지에서 균열개시에너지 및 균열진전에너지가 차지하는 비율이 같은 정도를 나타내었고, 온도저하에 따라서는 양측 모두 저하하였다.

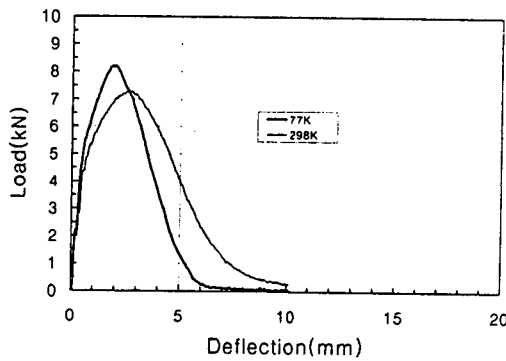
이상으로부터 계장화 샐피충격시험에 의한 충격특성평가는 LNG탱크와 같은 극저온 관련설비의 안전진단 및 수명예측을 위한 진단기법의 개발에 유효하다고 생각된다.



(a) in SUS304L



(b) in 9% Ni steel



(c) in A5083 alloy

Fig. 8 Load-deflection diagrams after instrumented Charpy impact test.

5. 결 론

1) SUS304L재의 경우, 온도가 저하함에 충격 흡수에너지는 약 70J, 횡방향 팽출량은 약 0.5mm 저하하였다. 방향성의 영향은 거의 나타나지 않았고, 파면양상의 천이거동은 충격흡수에너지의 저하거동과 잘 대응하였다. 하중-처짐 곡선상에서 균열개시까지의 충격흡수에너지가 대부분을 차지하였고 균열진전에 따른 흡수에너지는 거의 나타나지 않아 파면 양상과도 잘 일치하였다.

2) A5083합금의 경우는 합금강재에 비하는 낮은 충격흡수에너지를 나타내었지만, 173K까지는 실온의 흡수에너지값을 유지하였고, 77K로 저하하면 보다 현저한 충격흡수에너지 저하를 초래하였다. 압연방향에 따른 차가 나타나, L방향재가 T방향재보다 10J 정도 높은 값을 나타내었다. 온도에 따른 파면양상의 천이는 명확하게 관찰 할 수가 있었고, 77K에서는 전형적인 취성파면을 나타내었다.

3) 9%Ni강의 경우는, 시험온도범위에서 전체적으로 높은 충격흡수에너지를 나타내었고, 온도가 173K에서 77K로 저하함에 60J 정도 흡수에너지의 저하를 가져와 우수한 파괴저항을 나타내었다. 압연방향에 따른 영향은 L방향재의 경우만 다소 나타났고, 이때 두께방향 위치에도 다소 의존하였다. 파면양상의 천이는 충격흡수에너지의 저하거동과 잘 대응하였다. 177K에서 77K로 저하함에 따라 하중-변형곡선은 변화를 나타내, 최대하중값은 173K의 경우보다 큰 값을 가지나 변형이 적은 관계로 파괴개시점까지 에너지는 오히려 약 30J정도 저하하였고 균열진전에너지에는 큰 변화가 없었다.

참고문헌

(1) Fulford, N. J. and Slatter, M. D., Development in the safe design of LNG tanks, Cryogenics, Vol. 28, pp. 810-817 (1988).

(2) 西村 新, 極低溫構造材料とそれらの溶接, 接合, 日本接學會誌, Vol. 58, pp. 24-28 (1989).

(3) Reed, R. P. and Clark, A. F., Materials at low temperatures, ASM (1983) p. 571.

(4) 1994年度日本通商産業省工業技術院委託「石油代替電源用新素材の試験・評價方法の標準化に関する調査研究」報告書 (1995)

(5) Lee, H. M., Reed, R. P. and Han, J. K., Controlled tensile tests of austenitic steels at 4K, Advances in Cryogenics(Materials), Vol. 36, pp.1273-1282 (1990).

(6) ASTM E23-96, Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, ASTM Committee E-28 (1996).

(7) Ogata T., Ishikawa K., et al, Strength and toughness of austenitic stainless steels, Proc. of Int. Conf. on Stainless Steels, Chiba, ISIJ, (1991).