X65 및 X70강 가스배관의 DWTT 및 파괴인성평가

조예원 · 송영호 · 김정민 · 김우식* · †박준식

한밭대학교 신소재공학부, *한국가스공사

(2012년 3월 28일 투고, 2012년 6월 27일 수정, 2012년 6월 27일 채택)

Estimation of fracture toughness of X65 and X70 steels by DWTT

Ye-Won Cho · Young-ho Song · Jeong-Min Kim · Woo-Sik Kim* · †Joon-Sik Park

Division. of Advanced Materials Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

**Korea Gas Corporation, Gyeonggi-do, 163-754, Korea*

(Received March 28, 2012; Revised June 27, 2012; Accepted June 27, 2012)

요약

실 배관을 평가하는 DWTT (Drop Weight Tearing Test)의 파괴인성 값은 실 배관의 파괴인성 값 및 연성취성전이 온도를 예측할 수 있는 실험방법이므로, 최근 DWTT의 값에 대한 중요성이 증가되고 있다. 본 연구에서는 API X70과 API X65 라인파이프강의 DWTT 후의 온도에 따른 연성파면율, 역파면율, 흡수에너지와 온도 (-60℃ ~ 상온)와의 관계를 비교분석하고자 하였다. X65와 X70의 값에서 마찬가지로 연성파면율 및 흡수에너지는 온도가 낮아질수록 함께 낮아지는 경향을 보였으며, X70의 경우에는 -40℃ 까지 연성파괴를 보이는 반면, X65는 -30℃ 까지 연성파괴를 보였다.

Abstract - DWTT (Drop Weight Tearing Test) is one critical method that can exhibit the fracture properties of line pipe steel, since it estimates the properties with real pipe steel. In this study, the ductile portion, inverse fracture ratio and absorbed energy of API X65 and X70 line pipe steels were estimated with temperature variation. Both steels showed that the ratio of ductile area and absorbed energy were decreased with respect to decreasing the test temperature. However, while the ductile fracture behavior exhibited until -40℃ for the X70 steel, but it showed until -30℃ for the X65 steel. The fracture properties were discussed with respect to test temperatures.

Key words : linepipe steel, DWTT, absorbed energy

1. 서론

최근 천연자원이 개발되면서, 실생활에 밀접하게 영향을 주는 원유와 천연가스의 생산지로부터 소비지로의 수송이 중요하게 대두되고 있다[1-8]. 현재는 많은 양의 원유와 천연가스 (특히 천연가스는 LNG로 액화시켜 공급)가 선박 수송 및 라인파이프강(line

pipesteels) 을 통해 공급되고 있다. 하지만, 천연자원의 매장량의 일부는 극지방과 같은 한랭지, 심해저 등에 매장되어 있기 때문에, 이러한 지역의 자원들은 선박으로 수송하는 것은 한계가 있다[1,7,9]. 그러므로 라인파이프강을 통한 공급 개발이 증가하고 있다. 그에 따라서, 원유와 천연가스의 수송효율을 높이기 위해, 고압에서도 잘 견디는 높은 강도의 라인파이프강을 요구하고 있고, 많은 양의 원유와 천연가스를 수송하기 위해 배관의 크기는 점점 커지고 있다.

†교신저자:jsphb@hanbat.ac.kr

따라서, 가스배관의 건전성 평가와 파괴거동 평가에 필요한 파괴인성을 배관의 실물크기로 평가하는 시험법인 DWTT (Drop Weight Tearing Test)가 사용되어 진다. 이 시험법은 Battelle 기념연구소가 라인 파이프강에서 주로 발생하는 불안정 연성파괴저항성을 조사하기 위해 개발한 시험법 이다[10]. 특히, DWTT는 한랭지, 심해저 등의 일반적인 배관환경의 특성과 다르므로, 변형기반설계에 필요한 인자를 도출하고 실제배관의 파괴인성을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 실 배관 크기로 API X65와 X70 라인파이프강을 기준 으로 하여, DWTT 시험편을 T-L (transverse - longitudinal)방향으로 제조해서, 각 다른 온도 조건 $-60^{\circ}\text{C} \sim +25^{\circ}\text{C}$ (20°C 간격)의 범위에서 실시하였다. 그 후, 각각 다른 온도 변수로 준 시험 후, 시험편의 파면을 주사전자현미경으로 관찰 하여 분석하였다. 또 API X65와 X70의 미세조직을 광학 현미경으로 관찰하였다.

또한, DWTT와 CNT (Charpy Notch Test)의 연관성과 관계를 분석해 보기 위해서 DWTT와 같은 조건인 $-60^{\circ}\text{C} \sim +25^{\circ}\text{C}$ (20°C 간격)의 범위에서 미소시험편을 사용하는 CNT를 실시 해 결과를 분석하였다. 그 후, DWTT와 CNT의 연관성과 관계를 비교분석 하였다.

II. 실험방법

가스배관 API X65와 X70 강의 DWTT시험편은 실 배관을 절취한 후 냉간가공에 의하여 평면으로 가공하고, T-L (transverse - longitudinal)방향으로 API RP 5L3 시험편 [1,3-6,11] 규정에 맞게 시험편의 폭은 76.2 mm 길이는 305 mm 그리고 두께는 15.9 mm ($76.2 \times 305 \times 15.9$)로 가공 후 PN (pressed notch)를 삽입하여 시험편을 제조 하였다. Fig. 1은 DWTT 시험편의 모식도이고, Fig. 3은 실제 실험에 사용된 시험편이다. DWTT 최대 낙하 에너지는 (10,000 J) 를 사용하였고, 실험은 T-L방향 각각 $-60^{\circ}\text{C} \sim +25^{\circ}\text{C}$ (20°C 간격)의 온도범위에서 실시하였다. 그 후 각 시험편의 실험에 의해 생성된 파면을 주사전자현미경 (field emission scanning electron microscope Model: JSM-6300)로 관찰 하여, 시험편이 어떤 파면을 가지는지와 어떤 형태를 보이는지를 분석하였고, API X65 라인파이프의 DWTT결과와 API X70 라인파이프강의 DWTT결과를 비교 분석 하였다. 그리고 API X70과 X65 시험편을 연마하고, 나이트 용액으로 에칭한 후 광학현미경(optical microscope)으로 미세조직을 관찰 하였다.

또 DWTT와 CNT의 연관성과 관계를 분석하기

위하여 CNT를 실시하였다. CNT는 DWTT와 같은 T-L 방향의 미소시험편을 이용하여, $-60^{\circ}\text{C} \sim +25^{\circ}\text{C}$ (20°C 간격)의 온도 범위에서 파괴인성을 평가하였다. 그리고 DWTT (실제배관을 이용한 실험) 와 CNT (미소시험편)의 연관성과 관계를 비교 분석하였다. Fig. 2는 CNT 시험편의 도면이고, Fig. 4는 실제 CNT 에 사용된 시험편이다.

Fig. 1. Dimension of DWTT specimen.

Fig. 2. Dimension of DWTT specimen.

Fig. 3. Outlook of the DWTT specimen.

Fig. 4. Outlook of CNT specimen.

III. 실험결과

3.1. X70 배관재료 DWTT 파단면

-60℃ ~ +25℃ (20℃ 간격)의 온도범위에서 실시한 DWTT결과 시험편 파면은 shear lip, Inverse Fracture, Shear Fracture, Separation, Normal Cleavage Fracture가 관찰된다. Fig. 5는, DWTT 시험편 파면부의 파면의 모식도이다[1].

Normal Cleavage Fracture는 노치 부 근처에서 생성되며 관찰되어진다. 형태는 삼각형을 이루고 있으며, 노치부로부터 반대로 진행되고, Separation은, 해머가 타격되면서, 파면에 생기는 균열 부분인데 파면부의 1/2 부분에 일직선으로 생성된다. Shear Fracture는 시험편의 전체적인 부분에 생성되며, Normal Cleavage Fracture의 생성과는 거의 반비례의 관계로 생성되어진다. Inverse Fracture은, Normal Cleavage Fracture와는 반대로 해머 타격부로부터 시작되어 생성되는 파면이다. Shear lip은 해머타격부 부근에서 생성되어진다[1].

Fig. 6은, X70 라인파이프의 DWTT을 마친 시험편의 파면부이다. 60℃ ~ +25℃ (20℃ 간격)의 온도범위에서 T-L 방향의 시험편으로 시험을 하였다.

상온에서 실시한 시험편의 파면을 관찰 하면, L

Fig. 5. Schematic figure of fractured specimen.

Fig. 6. Outlook of the DWTT specimen after fracture.

방향 시험편의 파면은 대부분 Shear Fracture 으로 이루어져있다. 그리고 노치부에서는 Shear Fracture에 비해 적은 양의 Normal Cleavage Fracture가 생성되었으며, Separation는 관찰되지 않는다. T방향 시험편의 파면도 L방향 시험편과 마찬가지로, 전체적으로 Shear Fracture 으로 이루어져있다. 0℃에서 실시한 시험편에서는, L방향과 T방향 모두 Separation는 관찰되지 않으며, 해머 타격부의 Shear lip이 매우 넓게 나타난다. 그리고 대부분 Shear Fracture 으로 이루어져 있다. -20℃에서 실시한 시험편의 L방향 파면은

시험편 중앙부에 작은 크기의 Separation가 관찰된다. 그리고, 적은 부분의 간헐파괴가 생성되었으며, 연성파면율도 조금 감소하였다. T방향의 파면은 해머 타격부 쪽에 작은 부분이지만 역파면이 관찰되었고, 간헐파괴가 나타났다. 마찬가지로 연성파면도 넓게 나타났다. -40°C 에서 실시한 시험편의 L방향 파면에서는 역파면이 생성되었고, 간헐파괴가 나타났으며, 연성파면율은 조금 감소되었다. T방향 파면도 마찬가지로 역파면 면적이 크게 증가하였다. 그리고 연성파면율은 큰 폭으로 감소되었다. 실험 온도 중 가장 낮은 온도인 -60°C 에서 실시한 시험편의 L방향 파면에서는, 벽개파면의 면적이 큰 폭으로 증가하였다. 따라서 연성파면율은 큰 폭으로 감소하였고, 역파면은 온도가 더 감소함에 따라서 더 이상 관찰되지 않았다. 그리고 T방향 파면도 마찬가지로 벽개파면의 면적이 큰 폭으로 증가하였고, 연성파면율은 큰 폭으로 감소하였다. 그리고 역파면도 온도가 더 감소함에 따라서 더 이상 관찰되지 않았다.

3.2. X70 DWTT 파단인성 분석

Fig. 7은 X70 라인파이프의 DWTT 시험편의 온도에 따른, 연성파면율 관계를 모식도로 나타내었다. L 방향에서의 연성파면율은, 상온에서 제일 높게 나타나며 온도가 낮아질수록 취성파괴가 일어나기 쉽기 때문에 연성파면율이 감소하는 경향을 보인다. 마찬가지로,

Fig. 7. Relation between DWTT ductile fracture area ratio and temperature for X70 steel.

T 방향에서도 연성파면율은 상온에서 제일 높게 나타나며, 온도가 낮아질수록 감소하는 경향을 보인다. L 방향에서는 상온 ~ -40°C 까지의 연성파면율은 100%에 가까운 비율을 나타내지만, -40°C 이후로는 급격하게 감소하며 가장 낮은 온도인 -60°C 에서는 거의 0%에 가까운 연성파면율을 보인다. 그리고 T 방향에서는 상온 ~ 0°C 의 범위에서는 100%에 가까운 연성파면율을 나타내지만 0°C 이후로는 연성파면율이 급격하게 감소하면서, -60°C 의 온도에서는 거의 0%에 가까운 연성파면율을 나타낸다.

X70 라인파이프 강을 기준으로 한 DWTT 시험편에 대해 시험온도에 따른 벽개파면율을 Fig. 8에 나타내었다. 벽개파면율은 온도가 감소할수록 증가하고, 특히 시험 온도중 가장 낮은 온도인 -60°C 부근에서는 거의 100%에 가까운 벽개파면율을 보인다. 이는 온도가 낮아질수록 쉽게 깨지는 성질을 가진, 취성파괴가 증가 하기 때문이다. L방향은 -40°C 이후 벽개파면율이 급격하게 증가한다. 그리고 T 방향은 -20°C 이후부터 벽개파면율이 급격하게 증가한다. 대체적으로, 상온에서 -20°C 사이의 온도에서는 거의 100%에 달하는 연성파면을 가지고 있기 때문에 벽개파면율은 0%에 가깝다. 또 온도가 감소할수록, 연성파면율은 0%에 가까워지고 벽개파면율은 100%에 가까워진다.

Fig. 9는 해머타격부로부터 생성되는 shear lip부

Fig. 8. Relation between DWTT brittle fractured ratio and temperature for X70 steel.

Fig. 9. Relation between DWTT inverse fracture ratio and temperature for X70 steel.

Fig. 10. Relation between DWTT absorbed energy and temperature for X70 steel.

아래 생성되는 역파면율과 온도간의 관계를 모식도로 낸 것이다. 그래프를 살펴보면, L방향과 T 방향 모두 비슷한 양상을 나타낸다. 상온 ~ -20°C까지는 0%의 역파면율을 보인다. 하지만 -20°C ~ -40°C에서 역파

Fig. 11. (a) Relation between DWTT absorbed energy and ductile fracture ratio for X70 steel (longitudinal direction).

(b) Relation between DWTT absorbed energy and ductile fracture ratio for X70 steel (transverse direction).

면율이 급격하게 증가한다. 이는 온도 감소시 -40°C까지는 벽개파괴가 일어나기 쉬운 조건이기 때문에, 역파면율이 증가한다. 또 시험 온도가 낮아질수록, 해머타격부의 가공경화가 커지며 인성이 저하되어 역파면이 크게 형성되기에 역파면율이 증가한다[5]. 하지만 -40°C ~ -60°C의 온도 조건에서는 온도가 더 감소했기 때문에 즉, 시험전체에서 벽개파괴가 일어나기

때문에, 그에 따라 Notch 부로부터 생성되는 정파면 생성이 빠르게 진행되므로, 상대적으로 역파면이 생성될 시간이 감소한다. 그러므로 역파면율이 감소한다[1], 또, 매우 낮은 저온에서는 DWTT 시편이 급격하게 파괴됨으로써 해머 타격부에서의 가공경화가 크게 감소하기 때문에 역파면율이 감소한다[5].

Fig. 10에서는, DWTT에 따른 흡수에너지 (Absorbed Energy) 값과 온도 사이의 관계를 모식도로 나타내었다. 그래프를 보면, 흡수에너지값은 L방향과 T 방향 둘 다 비슷한 형태를 나타낸다. L방향으로의 흡수에너지값은, 상온 ~ 0°C 사이에서는 증가하는 경향을 보인다. 0°C 이후부터는 감소하는 경향을 나타낸다. 특히 -40°C ~ -60°C에서 급격하게 감소한다. 이는 온도가 감소할수록 취성파괴가 주를 이루는데, 이 때 적은 힘에도 쉽게 깨지는 취성이 크게 작용한다. 그러므로 -40°C ~ -60°C 온도에서는 이 성질로 인하여, 낮은 에너지임에도 쉽게 파괴된다. T 방향으로의 흡수에너지값도 이와 비슷한 경향을 보이는데 T 방향에서는 -20°C ~ -40°C에서 에너지값은 급격하게 감소하며, -60°C에서는 L방향과 마찬가지로 매우 낮은 에너지값을 가진다. 대체적으로 온도가 낮아질수록 흡수에너지값은 감소하는 경향을 가진다.

전체적으로, 흡수에너지값은 온도가 낮아질수록 감소하는 경향을 가졌다. 이는 온도가 낮아질수록 취성파괴가 주를 이루었기 때문이라고 사료된다.

그리고 다른 관점으로, 흡수에너지값과 연성파면율 사이의 관계를 나타내어 보았다(Fig. 11). 가로축은 연성파면율을 나타내었고, 세로축은 흡수에너지값을 나타내었다. (a),(b) 두 그래프 다 흡수에너지값이 높을수록 연성파면율은 100%에 가까워진다. 왜냐하면 취성파괴가 주를 이루는 것보다 연성파괴가 주를 이룰 때, 더 많은 에너지를 필요로 하기 때문이다.

3.3. X65 DWTT 파괴인성 분석

X65 라인파이프강을 기준으로 한 DWTT 결과를 모식도로 나타내어 보았다. X70 라인파이프강을 기준으로 한 그래프와 같이 연성파면율과 온도사이의 관계, 그리고 흡수에너지값과 온도와의 관계를 나타내었다.

Fig. 12는 연성파면율과 온도사이의 관계를 나타낸 그래프이다. L방향으로의 파면은 상온 ~ -20°C까지는 거의 100%에 가까운 연성파면율을 보이다가, -20°C 이후는 급격히 감소한다. -60°C 부근에서는 0%에 가까운 연성파면율을 보인다. T 방향으로의 파면도 마찬가지로이다. 즉 온도가 감소할수록 연성파면율도 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 12. Relation between DWTT ductile fracture ratio and temperature.

Fig. 13. Relation between absorbed energy and temperature for X65 steel.

X65 라인파이프강을 기준으로 한 DWTT 흡수에너지값과 온도사이의 관계를 Fig. 13으로 나타내었다. 그래프를 보면 L방향으로의 파면은 상온 ~ 0℃에서는 에너지값이 증가하고, 0℃ 이후로는 감소하는 경향을 보인다. 이는 온도가 감소할수록 취성과 파괴가 주를 이루는데, 이 때 적은 힘에도 쉽게 깨지는 취성이 크게 작용해서 온도가 감소할수록 낮은 에너지에도 쉽게 파괴되기 때문이다.

3.4. X65와 X70 DWTT 결과 비교

X65 라인파이프의 DWTT 결과와, X70 라인파이프강을 기준으로 한 DWTT 결과를 비교, 분석 하였다

다. 우선 X65와 X70의 연성과면율에 대해 비교 분석하였다. Fig. 14의 (a)는 X65 라인파이프강의 연성과면율과 온도의 관계를 L방향과 T방향으로 나누어 비교한 그래프이고, (b)는 X70 라인파이프강의 연성과면율과 온도의 관계를 L방향과 T방향으로 나누어 비교한 그래프이다. 전체적으로, 연성과면율은 온도가 낮아질수록 함께 낮아지는 경향을 보인다. 상온 ~ -20℃ 부근에서는 거의 100%에 가까운 연성과면율을 보이다가, -60℃ 부근에서는 거의 0%의 연성과면율을 보인다. 이것은 온도가 낮아질수록 적은 에너지에도 금방 파괴되어 버리는 취성이 증가하기 때문이다. 그리고, Fig. 15의 (a)는 X65 라인파이프강의 흡수

Fig. 14. Relation between DWTT ductile fracture ratio and temperature (a) for X65 steel and (b) X70 steel.

Fig. 15. Relation between DWTT Absorbed Energy and temperature (a) for X65 steel and (b) X70 steel

에너지와 온도관계를 L방향과 T방향으로 나누어 비교한 그래프이고, (b)는 X70 라인파이프강의 흡수에너지와 온도관계를 L방향과 T방향으로 나누어 비교한 그래프이다. 전체적으로 온도가 낮아질수록 두 그래프 모두 흡수에너지가 낮아지는 경향을 보인다. 이는 연성파면율과 온도의 관계와 마찬가지로, 온도가 낮아질수록 적은 에너지에도 금방 파괴되어 버리는 취성파괴가 증가해서 연성파면율이 주를 이루는 상온 ~ -20℃ 부근보다, -60℃와 같은 낮은 온도 부근에서 적은 에너지를 가지기 때문이다.

3.5. X65와 X70 미세조직 조직관찰

다음 그림은 X65와 X70에 대해 미세조직을 관찰한 것이다. Fig. 16은 X65의 미세조직 관찰부이고, Fig. 17은 X70의 미세조직 관찰부이다. X65와 X70의 미세조직을 비교했을 때, X65보다 X70의 grain이 더 조밀한 것을 알 수 있다[1,3-6,11]. 이를 보면, X65보다 X70의 강도가 더 높을 것으로 예상된다.

3.5. CNT

DWTT와 CNT (Charpy Notch Test)의 연관성과 관계를 분석해 보기 위해서 같은 조건인 -60℃ ~ +25℃ (20℃ 간격)의 범위에서 미소시험편을 사용하여 L방향과 T방향으로 나누어 CNT를 실시 해 결과를 분석해

Fig. 16. Microstructures for X65 steel.

Fig. 17. Microstructures for X70 steel.

보았다. Fig. 18은 시험을 마친 시험편이다.

CNT를 통해서 DWTT의 흡수에너지값과의 연관성을 비교해 볼 수 있었다. Fig. 19은 CNT의 흡수에너지값을 나타낸 그래프이다. L방향으로의 CNT 결과, 전체적으로 에너지값은 온도가 감소할수록 감소하는 경향을 나타낸다. DWTT 결과와 마찬가지로, 상온 ~ 0℃에서는 조금 증가 한다. 하지만 0℃ 이후로는 에너지값이 감소함을 알 수 있다. T방향으로의 CNT 결과도 마찬가지로 온도가 감소할수록 에너지값도 감소함을 알 수 있다. 이는 온도 감소시 취성과 파괴가 주를 이루기 때문에, 낮은 에너지로도 쉽게 파괴되기 때문이다.

Fig. 18. Outlook of fractured specimen after CNT.

Fig. 19. Relation between CNT absorbed energy and temperature for X70 steel.

3.6. CNT 와 DWTT 연관성

본 실험 결과를 살펴보면 DWTT 에서의 흡수에너지 값은 온도가 낮아질수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 온도가 낮아질수록 시험편에는 적은 에너지에도 쉽게 파괴되어 버리는 취성이 증가하였기 때문이다. 마찬가지로, CNT 결과도 온도가 낮아질수록 흡수

Fig. 20. (a) Relation between CNT absorbed energy and temperature for X70 steel (b) Relation between DWTT absorbed energy and temperature for X70 steel.

에너지가 감소하는 경향이 나타났다. Fig. 20의 (a)는 CNT 흡수에너지와 온도사이의 관계를 나타내었고, (b)는 DWTT 흡수에너지와 온도사이의 관계를 나타내었다. (a), (b) 두 그래프 모두 전체적으로 온도가 낮아질수록 흡수에너지가 감소하였다. 그리고 특히 -60°C에서 가장 낮은 에너지 값을 나타내었다. Fig. 21은 DWTT 흡수에너지와 CNT 흡수에너지와의 관계를 나타낸 그래프이다. (a)의 그래프는 L방향에서의 관계, (b)의 그래프는 T방향

Fig. 21. (a) Relation between DWTT and CNT absorbed energy for X70 steel (a) L-direction, and (b) T-direction.

에서의 관계를 나타내었다. L방향 T방향 모두 전체적으로, CNT 흡수에너지가 증가 할수록, DWTT 흡수에너지가 증가함을 보이고 있다. 즉 CNT와 DWTT는 흡수에너지 면에서 서로 비슷한 양상을 나타내는 것을 알 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 API X70 라인파이프강의 DWTT 후의 연성파면율, 벽개파면율, 역파면율, 흡수에너지와

온도와의 관계, 그리고 연성파면율과 흡수에너지와의 관계를 분석하였고, API X65의 DWTT 결과와 X70의 결과를 비교 분석 하여 다음과 같은 결론을 얻었으며, CNT를 실시하여, DWTT와 CNT의 연관성과 관계를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 연성파면율과 온도와의 관계는, 온도가 낮아질수록 취성파괴가 일어나기 쉬우므로 연성파면율이 감소하는 경향을 보이고, 벽개파면율과 온도와의 관계에서는 온도가 낮아질수록 증가하는 경향을 보인다.

(2) 역파면율과 온도와의 관계는, 온도가 낮아지면 증가하는 경향을 가지다가, 더 낮아지면 다시 감소하는 경향을 보였으며 -40℃ 부근 까지 온도가 낮아질 때, 해머타격부의 가공경화가 커지며 인성이 저하되어 역파면이 크게 형성되기에 역파면율이 증가하지만, -60℃ 이하로 온도가 더 낮아지게 되면, 시험편이 급격하게 파괴됨으로써 역파면율이 감소함을 알 수 있었다.

(3) 흡수에너지와 온도와의 관계는, 대체적으로 온도가 낮아질수록 흡수에너지는 감소하는 경향을 가진다. 특히 -20℃ ~ -40℃ 구간에서 에너지가 급격히 감소하여 취성파괴가 나타났다.

(4) 취성파괴가 주를 이루는 것보다 연성파괴가 주를 이룰 때 더 많은 에너지를 필요로 하기 때문에 흡수에너지와 연성파면율과의 관계는 비례하였다.

(5) API X65 와 X70 라인파이프강의 DWTT 후, 연성파면율과 온도와의 관계와 흡수에너지와 온도와의 관계를 비교 분석 한 결과, X65과 X70의 값에서 연성파면율은 온도가 낮아질수록 함께 낮아지는 경향을 보이며, 마찬가지로 흡수에너지도 온도가 낮아질수록 함께 낮아지는 경향을 보였다.

(6) API X65와 X70 라인파이프강의 미세조직 관찰 결과, X65보다 X70의 결정립이 더 조밀함을 알 수 있었다.

(7) CNT와 DWTT의 온도와 흡수에너지사이의 관계를 비교 분석 한 결과 온도가 낮아질수록 감소하는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구는 2011년 한국가스공사의 대학협력과제 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] 홍석민, 신상용, 이성학, 김낙준. "API X70 및 X80

라인파이프강의 DWTT 시편 파괴 형태에 미치는 시편 두께와 노치 형태의 영향", Kor. J. Met. Mater., 48(8), 705~716, (2010)

- [2] T.HARA, Y.SHINOHARA, Y.TERADA, and Hito-shi ASAH. "DWTT properties for high strength line pipe steels", International Offshore and Polar Engineering Conference., (2008)
- [3] B. Hwang, S. Lee, Y.M. Kim, Nack J. Kim, "Analysis of Inverse Fracture Occurring in Hammer -impacted Region during Drop-weight Tear Test of a High-Toughness Linepipe Steel", International Offshore and Polar Engineering Conference., (2003)
- [4] B. Hwang, S. Lee, Y.M. Kim, Nack J. Kim, J.Y. Yoo, C.S. Woo, "Analysis of abnormal fracture occurring during drop-2eight tear test of high-toughness line-pipe steel", Materials Science and Engineering., (2004)
- [5] B. Hwang, S.Y. Shin, S. Lee, Nack J. Kim and S.S. Ahn, "Analysis of Toughness and Transition Temperature of High-Toughness Pipeline Steels II. DWTT properties and Inverse Fracture Phenomenon", J. Kor. Inst. Net & Mater., (2004)
- [6] B. Hwang, Y.G. Kim, S. Lee, Nack J. Kim, J.Y. Yoo, "Effect of Microstructure on Inverse Fracture Occurring during Drop-Weight Tear Testing of High-Toughness X70 Pipeline Steels",
- [7] 포스코, "API<미국석유협회> 강재 가공연구센터 준공 의미 - 고강도 · 고기능 파이프라인 소재기술 선도 시장 요구에 대응, 고급 API 강재 개발 가속화 포스코 에너지사 강관사 상호 윈윈체제 구축". (2005)
- [8] T. HARA, T. Fujishiro, "Effect of Separation on Ductile Crack Propagation Behavior During Drop Weight Tear Test".International Pipeline Conference (2010)
- [9] H.-G. Hillenbrand, A. Liessem, C. Kalwa, M. Erdelen-Peppler, C. Stallybrass, "Technological Solutions for High Strength Gas Pipelines",
- [10] K.O. Halssen. D.N. Veritas "Drop Weight Tear Testing of High Toughness Pipeline Material". International Pipeline Conference. (2004)
- [11] API. "Recommended Practice for Conducting Drop-Weight Tear Tests on Line Pipe". (1996)