

열 교정된 해양 구조물 TMCP 강재의 재료 특성 연구

A Study on the Material Properties of Heat-Straightened TMCP Steels for Offshore Structures

신 동진*, 윤 동렬, 박 지현, 장 태원

*삼성중공업 용접연구파트

1. 서 론

용접 또는 제작 중 발생된 변형에 대한 교정 작업은 대부분이 산소-아세틸을 이용한 가열 곡직을 이용하고 있으며 이들 열 곡직 작업은 조선 및 해양부문에서 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 해양부문은 조선과 달리 열 곡직에 대한 제한적 규정(해양공사 제작 Specifications 또는 Owner의 요구)등으로 인해 실제 생산부서에서는 다양한 Trouble이 발생되고 있다. 그 중 Owner의 입회 없이 열 곡직이 수행된 작업의 경우, 열 곡직의 적용 온도를 규정보다 초과한 경우, 1회 곡직이 수행된 동일한 위치에 다시 작업을 수행한 경우, 열 곡직 후 교정 작업을 신속히 처리하기 위해 수냉 처리를 하는 경우는 대표적인 예라 할 수 있다. 이와 같은 경우는 각각의 해양 공사 특성 및 Owner Inspector 성향 등에 따라 생산부서에서 자체적으로 처리되는 경우도 있지만, Owner의 문제 제기로 인한 제작 공정 전체에 영향을 미치는 경우도 있다.

본 연구에서는 최근 국내의 해양구조물에서 대부분을 차지하는 TMCP 강재(API 2W Gr.50)를 이용하여 열 곡직 후 모재의 재료 특성 변화를 검토하고자 하며, 이를 위해 다양한 조건을 설정하여 열 곡직 재현 시험을 수행하였다. 이후 물리적 특성 변화 및 현미경 조직 검사에 대한 분석을 수행하였으며, 이들 Data로서 향후 해양 공사 착수 전후 열 곡직 문제로 인한 Owner와의 기술적인 이견 발생 시 활용하기 위함이다.

2. 본 론

TMCP 강재의 열 곡직 후 재질 변화를 연구하기 위해서는 생산 현장에서 발생 가능한 다양한 조건을 선정하여 재현 시험 후 물리적 특성 평가 및 미세조직 변화를 파악하기 위한 현미경 조직 검사를 수행하였다.

2.1 시험 준비

2.1.1 강제 종류 및 치수 결정.

시험 강재는 앞서 제시한 해양 구조물 용도 50ksi급 TMCP 즉, API 2W Gr.50로 선정하였으며, 시험편 치수는 아래 Fig 2.1과 같다.

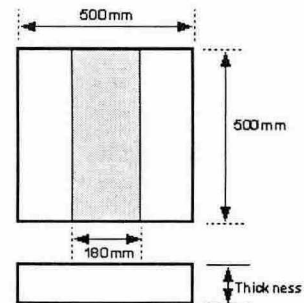


Fig 2.1 열 곡직 시험편 형상

2.1.2 열 곡직 시 온도 측정 방법 결정.

온도 측정에 사용된 장비는 Thermal crayon, 및 적외선 온도계를 동시에 사용하였으며, 전면 및 이면 열 분포 특성을 파악하기 위해 Thermocouple을 이용한 온도모니터링 장비를 함께 적용하였다.

2.2 시험 종류

2.2.1 곡직 최대 온도 결정.

현재 해양공사에서 적용 중인 TMCP 강재의 일반적인 열 곡직 최대 온도는 593°C이나 실제 현장에서는 이 이상의 온도에서도 검토가 필요하여 최대 곡직 온도를 600°C, 700°C 및 800°C로 설정하였다.

2.2.2 강재 두께.

해양 구조물 Semi-submersible RIG, TLP, FPSO T/Side 등에 많이 적용되는 강재 두께는 약 10mm에서 최대 100mm까지 있지만 일반적으로 열 곡직이 많이 필요한 12mm, 25mm 및 45mm 강재 두께로 시험 두께를 결정하였다.

2.2.3 곡직 횟수 결정.

공사별 또는 Owner의 자체 검사 기준에 따라 이미 곡직된 위치에 대한 2차 재 곡직 또는 동일 위치에서 지속적인 곡직에 대한 품질 검증 요구가 많았음. 이에 3가지 유형(1회, 2회, 연속 곡직 상태)으로 시험 항목을 아래 Fig 2.2와 같이 결정하였음.

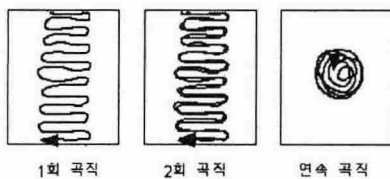


Fig 2.2 곡직 회수별 작업 Pattern

2.2.4 수냉 처리 효과 검토.

1회 곡직 후 기준 변형량을 만족하지 못했을 경우 재 곡직이 수행되어야 하지만 일부 Owner는 상온까지 냉각 후 재 곡직을 요구하고 있다. 곡직 소요 시간을 조사한 결과 300°C에서 상온까지는 상당한 시간을 필요로 하므로, 곡직 완료 후 공냉 조건과 공냉 후 약 300°C에서 수냉 처리하는 2가지 조건에 대해서 검토할 필요가 있었다.

2.2.5 현미경 조직 검사

가열된 강재 표면의 금속 조직 변화를 조사하기 위해 현미경 조직 검사를 수행하였다. 일반적으로 TMCP 강재를 600°C로 열처리할 경우는 A₁변태점 이하, 700°C로 가열 시 A₁에서 A₃, 800°C로 가열 시 A₃변태점 이상까지 가열되지만

열 곡직과 같이 순간적인 가열 상태에서의 금속 조직 상태는 각 케이스별 검토가 필요하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

인장(항복 포함), 경도, 충격치 및 금속조직 특성을 모재와 비교 검토하였다. 인장시험편의 두께는 강재 두께 전체로 제작, CVN 충격 시험편은 가급적 열 영향부를 많이 포함시키기 위해 10×5의 Sub_size를 적용했으며, 경도 시험 역시 표면에서의 변화를 파악하기 위해 5kg 하중을 이용하였으며 그 형상은 아래 Fig 3.1와 같다.

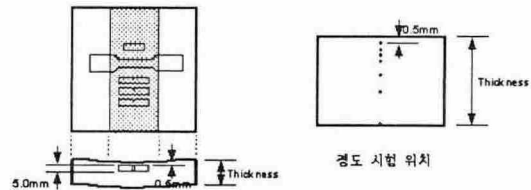


Fig 3.1 물리시험편의 가공 위치 및 형상

3.1 물리시험 결과

3.1.1 인장 시험 결과

인장시험 결과, 모재(TMCP)의 특성상 열 곡직에 의한 연화 현상 발생으로 항복 및 인장강도의 감소가 예상되었으나 25mm 이상의 두께에서는 모든 가열 조건에 관계없이 모재의 인장 및 항복 강도와 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 강재 전체 두께에 비해 열 곡직에 의한 연화부의 면적이 상대적으로 적었던 것으로 예상된다. 그러나 두께 12mm 800°C에서는 강도 감소가 다소 발생됨을 확인하였다.

3.1.2 충격 시험 결과

최근의 API 2W Gr.50급 해양 구조물 강재는 최소 -40°C에서 저온 충격치를 요구하고 있다. 본 시험에서도 열 곡직 후의 인성치 변화를 검토하기 위해 모든 조건에 대해 충격시험을 수행하였다.

시험 결과 중 주목할 점은 모든 두께에서 80°C로 가열된 시험편의 CVN 충격치는 모재 대비 10~20% 향상되었다. 이는 현미경 조직 검사에서 나타났듯이 입계 및 입내에서 재 변태된 상들이 형성되어 조직 미세화(fine) 영향으로 판단된다. 단, 두께 12mm 일부에서는 모재와 비교

시 충격인성 저하가 발생되었으며, 이는 다른 Data와 비교 분석 결과 산포가 큰 오차로 예상된다.

3.1.3 경도 시험 결과

각 조건에 대한 경도값 변화 추이 및 열 곡직에 의한 연화 영역의 크기를 검토하기 위해 아래 그림과 같이 열 곡직된 표면에서부터 반대 면까지 0.5mm 간격, 표면에서 5mm 깊이까지, 이후부터는 1~2mm 간격으로 Micro Vickers 경도 (5Hv) 시험을 수행하였다.

열 영향에 의한 연화된 영역은 강재 두께별, 최고 가열 온도에 따라 다소 편차는 있으나 전반적으로 표면에서부터 약 1.5~4.0mm 깊이까지 존재함을 확인하였다. 아래 Fig 3.2는 12mmt 600°C의 예를 나타내었다.

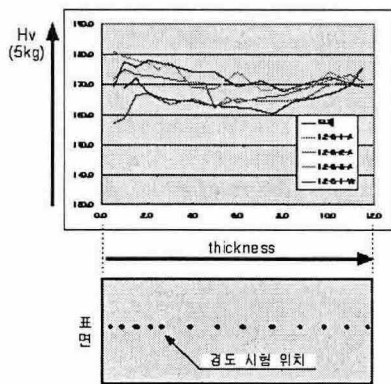


Fig 3.2 두께에 따른 경도치 분포

3.2 현미경 조직 분석 결과

600°C와 700°C 시험편에서는 상 변화가 나타나지 않았으며 단순히 Tempering 효과에 의해 펄라이트 부분이 일부 분해되었음을 확인하였다. 특히, 700°C 2회 곡직 이상의 시험편 경우 분해 정도가 큼을 알 수 있었다. 800°C는 입계, 입내 모두 재 변태된 상들이 일부 분포되어 상당한 부분이 Intercritical 영역까지 가열됨을 알 수 있었다. 특히, 1회 보다는 2회 또는 연속 곡직 상태에서 보다 많은 상 변화가 관찰되었다. 열 곡직된 표면에서부터 강재 두께 방향으로 현미경 조직 사진을 분석한 결과, 실제 펄라이트 분해 또는 재 변태된 상들의 발생은 경도 시험에서 밝혀진 연화된 영역 보다는 적은 2~3mm 정도로 파악되었으며 표면에 가까울수록 조직 변화 정도는 크게 나타났다.

4. 결 론

최근 해양부문에 많이 사용 중인 API 2W Gr.50 강재를 이용하여 다양한 온도 변화(600°C, 700°C, 800°C), 강재 두께(12mmt, 25mmt, 45mmt), 곡직 횟수(1회, 2회, 연속) 및 냉각 처리 방식(공냉, 300°C에서 수냉)에 대한 열 곡직 재현 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모든 시험 조건에서 열 곡직된 강재의 물리적 특성은 강재 규정치 (Material Spec. Requirement) 이상 및 실제 모재 물성치와 큰 차이 없이 조사되어 열 곡직의 영향은 없거나 적은 것으로 판단된다.
- 2) 현미경 조직 시험에서는 펄라이트 조직의 분해 정도와 재 변태된 상의 발생 상태를 검토하였으며, 곡직 온도의 증가 및 곡직 횟수의 증가에 따라 펄라이트 조직의 분해가 일부 발생되었으며 800°C 이상의 조건에서는 재 변태된 상도 일부 발생되었으나, 미세 조직 변화 정도 및 그 규모를 비교해 볼 때 열 곡직된 부분의 현미경 조직 변화는 작은 것으로 판단된다.
- 3) 곡직 완료 후 약 300°C에서 수냉 처리는 전체 곡직 시간을 단축시켰으며, 물리적 특성 및 현미경 조직 변화는 없었다.

참고문헌

1. Metallographic Atlas og Steel, Special Alloy Steel and Non-ferrous Metal Welds, JWS
2. Phase transformations in metals and alloys. 2nd edition.
3. Fractographic Atlas of Steel Weldments, JWS 1982
4. G.Krauss, Principles of heat treatment of steel, ASM
5. E.Bayraktar, D.Kaplan, M, Mechanical and metallurgical investigation of martensite-austenite constituents in simulated welding conditions, Journal of materials processing technology 153-154 (2004) 87-92.