

파이프의 강관 제조 프로세스에 따른 물성변화 추적

Yield Strength Tracing according to Strain History during Pipe Forming

1. 서론

파이프라인은 유정, 플랫폼, 저장소 등 사이의 수 킬로미터에서 수십 킬로미터를 잇는 연속 강관 구조물로 석유와 가스 자원을 효율적으로 이송하기 위해 사용되는 구조물이다. 동일한 재원을 갖는 강관이 길게 설치되기 때문에 작은 두께 변화가 전체 공사비에 큰 영향을 미치게 된다. 이로 인해 파이프라인 강관은 변형률 능력 기반의 설계 (strain based design)를 통해 강관의 성능을 최대한 사용하도록 설계된다. 따라서 강관의 성능을 정확히 파악하고 이를 기반으로 한 설계가 이뤄져야 한다.

파이프 구조 중 16인치 이상의 큰 직경과 두꺼운 벽면을 갖는 강관 제조에는 여러 조관 (pipe forming) 방식 중 UOE (U-forming, O-forming, Expansion) 조관이 많이 사용되며 효율적인 생산 방식으로 알려져 있다. 각 공정을 거치는 과정에서 강관의 형상이 변화하는 단계에 따라 방법론이 명명된 UOE 조관은 후판의 단계적인 성형에 의해 원통형 파이프를 구성한다. 즉, 조관 기구에 의해 단계적인 소성 가공을 거치며 강관을 원통형으로 변형시킨 후 LSAW (Longitudinal Submerged Arc Welding)를 통해 파이프를 완성한다. 과거 용접기술이 지금과 같이 발달되기 전에는 용접에 의한 열영향부에서의 (HAZ, Heat Affected Zone) 불확실성을 피하고자 인발조관으로 용접부위를 없앤 무계목강관이 (seamless pipe) 사용되었다. 그러나 무계목강관은 용접강관과 비교하여 생산 가능한 직경에 제약이 있고 제조비용이 높아 최근에는 특별히 요구되는 곳을 제외하고 대부분 용접강관이 사용되고 있다.

파이프라인에서 강관을 효율적으로 사용하기 위해서는 제조과정에서 단계적인 변형을 거치는 강관의 품질관리가 중요하며, 이 때 품질은 조관 후 강관의 재료 물성, 즉, 항복강도, 인장강도, 균일 연신율 등이 주요 변수로 작용한다. UOE 조관 과정을 거치며 강관은 휨, 인장, 압축이 강관 전체에 걸쳐 작용하는데, 이때 강관 두께 내에서는 중립축을 중심으로 압축과 인장영역이 구분되고 중립축에서 떨어진 정도에 따라서 강관 내에서 다양한 수준의 소성변형이 발생된다. 이 과정 중에 강관 두께 내에서는 다양한 변형이력이 (strain history) 나타나고, 일부 위치에서는 가공경화에 따른 항복강도 상승, 일부 위치에서는 바우싱거 효과에 (Bauschinger effect) 의한 항복강도 감소가 나타난다. 이로 인해 강관의 항복 강도와 더불어 응력-변형률 곡선의 형태 또한 변화되기 때문에 조관 후 물성을 정확히 예측하는데 어려움이 따르게 된다.



김진국

서울과학기술대학교 건설시스템공학과 조교수



강수창

(주)포스코 구조연구그룹 공학박사

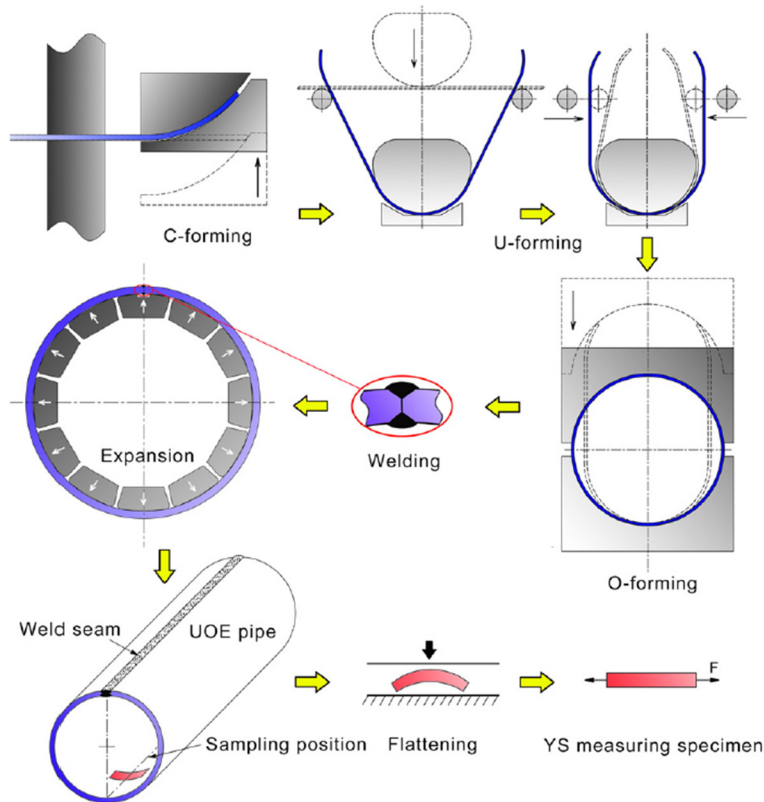


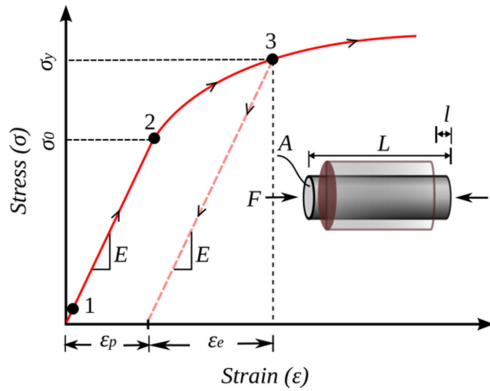
그림 1 UOE 조관 프로세스와 조관후 시편의 물성 분석을 위해 시편채취, 평평화, 인장시험 (Zou et al., 2016)

이를 극복하기 위해 단계별 조관 공정을 거치는 파이프 조관 과정의 모사와 분석에 관한 여러 연구가 수행되었다. 대부분 그림 1과 같이 강관을 조관 후 원주방향 시편을 채취하여 평평화 후 인장시험을 실시할 때 얻어지는 재료물성을 추정하는데 목적을 두고 있다. Zou 등(2016)은 각 조관 단계별 후판의 형상 변화를 모사하고자 UOE 조관의 대변형 소성 해석을 수행하여, 각 단계별 파이프의 물리적 형상과 진원도(Ovality), 강관 용접 갭 (O-forming gap) 등을 예측하는 연구를 수행하였다. Yi 등(2019)은 더 나아가 UOE 조관 시 강관의 강도 변화를 예측하는 연구를 수행하였으며, 이를 다양한 두께-직경 비(t/D ratio)의 강관에 적용하여 t/D ratio에 따른 강관의 강도 분석을 수행하였다. 하지만 t/D 에 따른 강관의 강도 추적 시뮬레이션은 강관 조관 시험 데이터를 통한 검증이 부족하며, Zou 등(2016)은 t/D ratio가 상대적으로 큰($>3\%$) Pipe 구조에 대하여 분석을 수행하였다. 이 연구들에서는 다양한 t/D 에 대해 특성을 분석하였으나 대부분 t/D 가 3% 이상인 경우에 집중하였다. Zou 등(2016)과 Chaboche 등(1983)의 모델을 기반으로 항복고원의 (yield plateau) 영향을 고려하는 개선된 변형경화 모델을 제안하였으나, 이때 항복고원

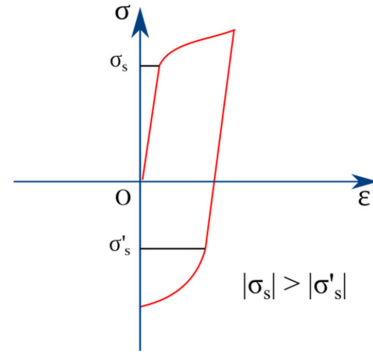
의 길이가 약 4% 내외로 과다하게 긴 응력-변형률 곡선을 기반으로 모델식을 제안하며 항복고원 구간에서 항복강도를 과도하게 낮추는 모델을 제시한 바 있다.

그러나 최근 구조물의 경량화와 비용절감을 위한 고강도 강재의 사용요구가 높아짐에 따라 기존 보다 낮은 t/D 를 갖는 강관사용이 빈번히 이뤄지고 있다. 이 경우 제조과정 중에 겪는 소성변형률이 2~3% 수준에 머무르기 때문에 Zou 등에 의한 모델식에 적용하여 항복강도 변화를 평가할 경우 실제 강도 보다 강도 감소를 다소 높게 평가하게 된다.

고강도 강재를 사용하여 강관을 조관할 경우 소성변형률이 항복고원 범위 내에서 발생하게 된다. Kim 등은 이러한 문제를 해결하기 위해 일반적인 탄소강의 항복고원인 2~3% 이내의 변형률을 경험하는 강관에 대해 제조이력에 따른 항복강도 변화를 보다 효과적으로 예측할 수 있는 식을 제안한 바 있다. 관련하여 Kim 등의 연구논문은 현재 국제저널에 투고되어 심사 중에 있다. 이 글에서는 기존 연구 내용을 종합하여 파이프의 강관 제조 프로세스에 따른 물성변화 추적 프로세스를 소개하고자 한다.



(a) 등방경화 기반 응력-변형률 곡선



(b) 바우싱거 효과에 의한 항복강도 감소

그림 2 강재의 응력-변형률 곡선 예

2. 강재의 경화와 바우싱거 효과

강재는 항복강도 보다 높은 수준으로 하중을 받으며 소성변형을 겪은 후 하중을 제거했다가 다시 하중을 도입할 경우 더 높은 수준의 응력에서 항복이 발생된다. 이와 같이 항복응력이 재료의 변형량에 따라 증가하는 현상을 경화라고 (hardening) 부른다. 그림 2(a)에서와 같이 하중이 인장 또는 압축 변형 중 한쪽으로부터 발생할 경우 소성변형을 겪더라도 강재는 경화에 의해 항복강도가 항상 증가하게 된다. 그러나 그림 2(b)와 같이 한쪽 방향으로 소성변형을 경험한 후 반대쪽으로 변형량이 증가하여 항복이 발생할 경우 이전 항복강도 보다 작은 값에서 항복이 발생하게 된다. 이러한 현상을 바우싱거 효과라고 (Bauschinger effect) 한다.

바우싱거 효과를 고려하지 않고 변형 방향이나 이력에 관계없이 소성 변형량이 누적될 때 항복곡선의 크기가 팽창하는 경화를 등방경화라고 (isotropic hardening) 한다. 한편, 항복곡면의 크기는 일정한 채 그 중심이 이동하는

경화모델을 이동경화라고 (kinematic hardening) 한다. 실제 강재는 대부분 그림 3(c)과 같이, 등방경화와 이동경화가 합쳐져 소성 변형률이 누적되면서 항복곡면의 중심이 이동하며 곡면의 크기가 팽창하는 복합경화모델을 (combined hardening) 따른다.

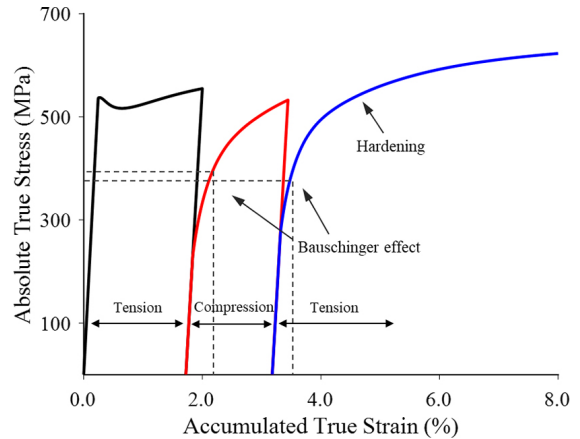
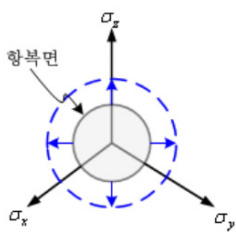
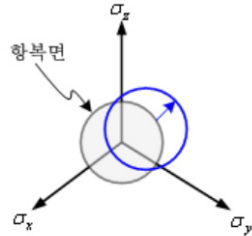


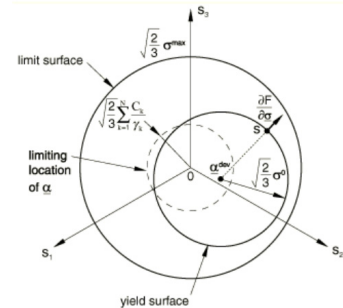
그림 4 인장-압축-인장 변형이력에 따른 응력변형률 곡선 예



(a) 등방경화
(Isotropic hardening)



(b) 이동경화
(Kinematic hardening)



(c) 복합경화
(Combined hardening)

그림 3 강재의 경화 모델 (<https://kor.midassuser.com/nfx/>, Abaqus documentation)

UOE 조관을 거치는 동안 소재는 휨, 압축, 인장 등에 의해 변형률의 부호가 바뀌는 반복 하중(cyclic loading)을 받으며 소성 변형이 발생한다. 그림 4는 일반적인 인장-압축-인장 (T-C-T) 반복 하중 하에서 누적변형률에 따른 응력 변화 곡선과 해당되는 소성 특성을 나타낸다. 반복 하중 하에서 인장을 받던 강재가 압축을 받으며 항복강도가 감소하고 이후 인장 소성 변형률이 추가적으로 증가하며 인장방향의 항복강도가 다시 증가하는 형상을 볼 수 있다.

3. 강재의 경화 모델 개선노력

강관 조관을 효과적으로 모사하기 위해서는 강재가 경험하는 높은 소성 변형률에서의 정확한 응력변형률 관계, 즉, 정확한 경화모델을 사용해야 한다. 일반적으로 사용되는 강재의 복합 경화모델은 다음의 수식으로 표현될 수 있다.

$$f(\alpha, K) = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma' - \alpha') : (\sigma' - \alpha')} - K$$

여기서 α' 은 항복면의 이동, 즉, 이동경화 항이고, K 는 항복면의 팽창, 즉, 등방경화 항을 나타낸다. 이 숫자들은 여러 변수들로 다시 표현될 수 있는데 그 값들은 실제 강재 인장시험의 반복가력 시험결과로부터 결정된다.

상대적으로 t/D 가 낮은 강관에서는 조관과정 동안 변형률의 변화가 그림 5에서의 항복고원 구간에서 대부분 발생하고, 누적 소성변형률이 작은 구간에서는 항복강도 감소가 작고 누적 소성변형률이 증가함에 따라 항복강도 감소가 크게 나타나는 특징을 갖게 된다. t/D 가 2~3% 수준인 강관을 조관할 경우 강관 단면 내에서 누적 소성변형률이 큰 표면에서조차 그 크기가 크지 않게 된다. 따라서 단면 내 대부분 위치에서의 누적 소성변형률은 항복고원을 초과하지 않으며 항복강도 감소가 Zou 등(2016)에 의한 예측결과보다 작게 나올 것으로 예상된다. 이러한 이유로 API-X65, X70 강재를 이용하여 t/D 가 상대적으로 낮은 강관을 조관할 경우 조관에 따른 항복강도 감소를 정확히 예측하기 위해 개선된 변형경화 모델의 개발이 필요하다.

변형경화 모델의 개선에 있어서 주안점은 등방경화 항에 관련된 것으로 Chaboche 등(1983)은 $K = \sigma_0 + Q(1 - e^{-bp})$ 로 표현하며 항복고원을 별도로 고려하지 않았다. 한편,

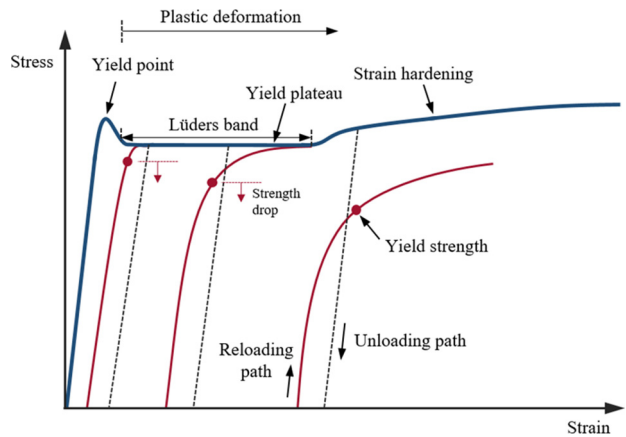


그림 5 항복고원 내에서 변형률 이력이 발생할때의 응력-변형률 곡선 예

Zou 등(2016)은 항복고원을 고려하기 위해 다음과 같이 항복고원 내외로 두 영역을 구분하여 등방경화 항을 정의하였다. 그런데 이 식에서는 항복고원의 첫 부분부터 항복강도 감소가 지수함수로 급격히 감소하도록 하고 있어 작은 소성변형률에서도 과도한 항복강도 감소를 유발하기도 한다. Kim 등은 이 부분을 일부 개선하는 모델 연구를 수행한 바 있다.

$$K = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_a)(1 - e^{-bp}) \quad \text{if } p \leq \Delta\epsilon_{pla}$$

$$K = \Psi + Q(1 - e^{-bp}) \quad \text{if } p > \Delta\epsilon_{pla}$$

4. 복합 경화모델식의 계수결정

일반적으로 강재는 서로 다른 고유 성질을 보이며, 이에 대한 정확한 물성 파악을 위한 실험이 필요하다. 하지만 시험에는 큰 비용과 시간이 요구되고, 때로는 한정된 데이터만 수집 가능하기도 한다. 이를 극복하기 위한 방법으로, 소재에 대한 대표 물성값으로부터 각 소재의 변형 성질을 파악하고 분석하는 방법이 사용된다. 그림 6과 같이 대상 강재 시험에 대해 인장-압축 반복시험을 수행하고, 응력-변형률 곡선의 대표 좌표들을 추출한 후, 이 좌표들을 기반으로 재료모델의 계수를 결정할 수 있다. 복잡한 응력-변형률 곡선을 나타내는 재료모델이기 때문에 등방경화 항과 이동경화 항 등을 이루는 계수는 보통 10개 이상이며, 평균제곱근 오차를 최소화하도록 함으로써 재료모델의 계수를 결정한다.

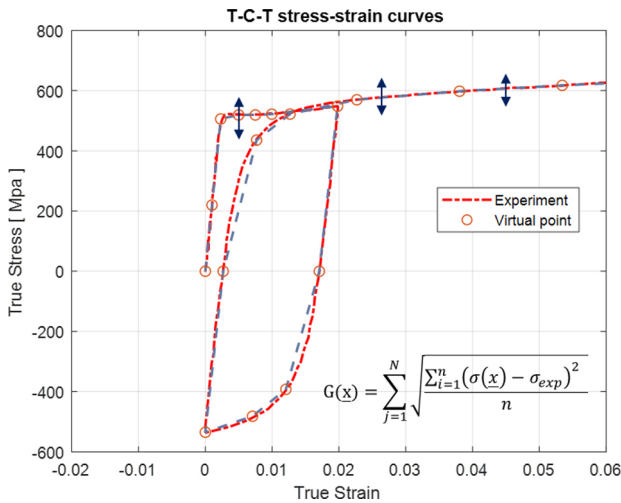


그림 6 인장시편의 인장(2%)-압축(2%)-인장 시험결과와 계수결정

5. 조관 후 물성 예측

UOE조관 과정의 단계적 모사에서 일반적인 UOE 파이프의 길이 대 직경 비는 10 이상이므로 길이 방향 변형은 무시할 수 있으며, 실제 파이프의 가공도 면내에서 주로 발생하므로 평면변형률(plane strain) 조건을 가정할 수 있다. 또한, 용접의 경우 용접에 의한 전체 형상 변화가 크게 달라지지 않을 것으로 판단하여 용접 열해석 및 별도의 상

세 모델링을 하지 않고 해당 연결부의 적합조건으로서 용접부를 고려할 수 있다.

그림 7과 같이 해석의 진행에 있어서는 실제 조관 과정과 같이 장비의 움직임을 조절하는 변위 제어 해석을 실시한다. 조관 후 인장성능 평가는 실제 조관 과정 중 가장 소성변형을 크게 경험하는 강관의 6시 방향 부분에서 시편을 채취한 후 편평화(flattening) 과정을 수행한 후 평가할 수 있다. 시뮬레이션 모델의 검증을 하고자 할 경우, 강관에 반복적인 힘을 가력한 후 편평화한 시험체(bending-flattening)에 대해 인장시험을 실시하여 그 결과를 이 모델에 기반한 시뮬레이션 결과와 비교할 수 있다.

6. 맺음말

우리 주위에서 많은 강재 부재들이 냉간 가공 절곡을 거쳐 구조부재로 사용되고 있다. 이 과정을 거치며 강재의 일부분은 강도가 저하되고 일부분은 강도가 증가하기도 한다. 강재에 대한 물성 데이터 축적과 복잡한 시뮬레이션을 위한 컴퓨터 사용환경의 발전은 이렇게 사용되는 강재의 정확한 물성측정을 가능하게 할 수 있을 것이다. 정확한 물성 예측은 재료에 대한 신뢰성을 높이게 되고 나아가 보다 합리적이고 효율적인 설계를 가능하게 할 것이다. 현재는 극한환경에서 대량으로 사용되는 파이프라인용 강관

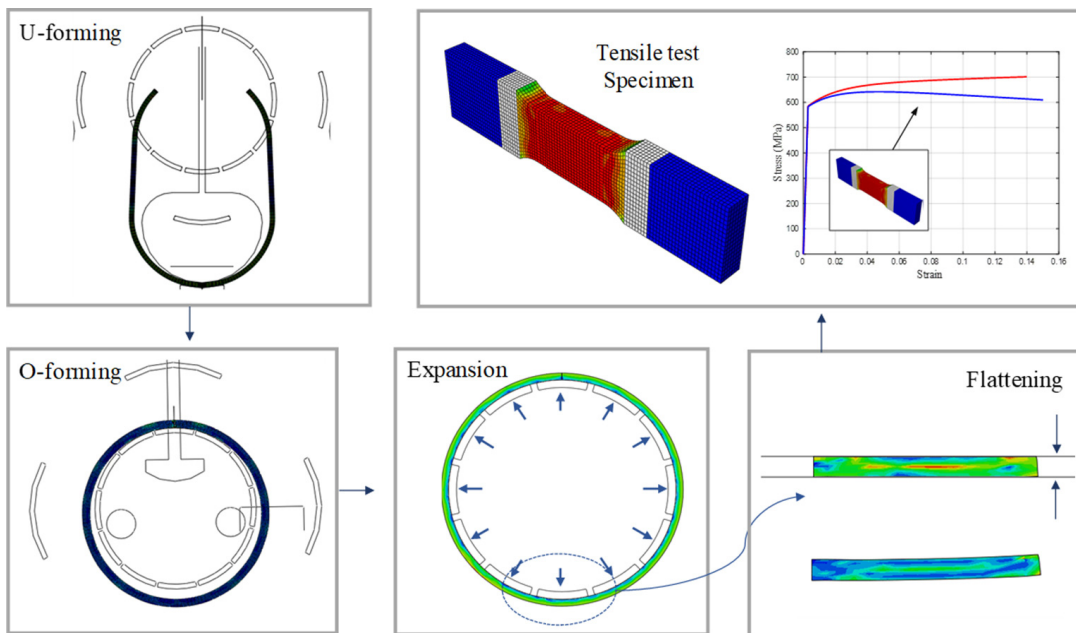


그림 7 UOE 조관과 조관후 시편의 인장 성능 평가 시뮬레이션 프로세스

을 중심으로 연구가 수행되고 실무에 적용되지만, 차후 다양한 연구를 통해 실무에서 보다 쉽게 사용할 수 있는 틀들이 개발될 경우 일반적인 구조용 강재에도 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. API (American Petroleum Institute) 5L specification for line pipe. 44th ed. Washington (DC): API Publishing Services (2007)
2. J. H. Kim, S. C. Kang, J. K. Kim, J. H. Song, Yield strength estimation of X65 and X70 steel pipe with relatively low t/D ratio, Under review
3. J. L. Chaboche, G. Rousselier, On the plastic and viscoplastic constitutive equations, Part 1: rules developed with internal variable concept. J Press Vessel Technology. 18(5-6) (1983) 153-8
4. J. Yi, S. C. Kang, H. M. Koh, J.F. Choo, Yield strength prediction of UOE Pipes: From forming to flattening, International Journal of Offshore and Polar Engineering. 28(2) (2018) 206-211
5. J. Yi, S. C. Kang, W. Park, J. F. Choo, Yield strength tracking of UOE pipe considering various thickness-to- diameter ratios, Marine Structures. 68 (2019) 102616
6. T. Zou, D. Li, G. Wu, Y. Peng, Yield strength development from high strength steel plate to UOE pipe, Materials and Design. 89 (2016) 1107-1122 