용접 홈 형상에 따른 샤르피 충격 시험 기반 마스터 선도 접근법의 검증에 관한 연구

이 진 호* · 신 용 택** · 김 명 현*,†

*부산대학교 조선해양공학과

**동아대학교 조선해양플랜트공학과

Validation of the Master Curve Approach Based on Charpy Impact Test with Groove Shapes

Jin-Ho Lee*, Young-Taek Shin** and Myung-Hyun Kim*,†

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University, Busan, 49315, Korea

†Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received November 25, 2019 ; Revised December 3, 2019 ; Accepted December 10, 2019)

Abstract

Engineering critical assessment (ECA) is used as a procedure to evaluate the integrity of an engineering structure with flaws. To this end, ECA requires reliable fracture toughness values such as J-integral and CTOD. Ideal fracture toughness data can be obtained from an engineering structure, but may be impossible depending on the operating conditions. Appendix J of the BS 7910 provides a procedure for estimating fracture toughness values from appropriate Charpy impact test data. However, the correlation between Charpy impact energy and fracture toughness is highly conservative because they are not based on a theoretical background. In this regard, the revised BS 7910:2019 provides improved fracture toughness values by applying the yield strength and the Charpy upper shelf energy.

The target of this study was to validate the master curve approach in the revised BS 7910 for groove shapes and the sample locations of impact tests. For that purpose, the master curves were compared in terms of the reference temperature obtained from Charpy impact energy data according to BS 7910:2013 and the modified BS 7910:2019. The revised master curve approach resulted in less conservative fracture toughness values. However, there were cases where BS 7910 and modified BS 7910 overestimated the fracture toughness compared to values using CTOD data. Further study of the master curve approach is needed, considering various heat inputs, groove shapes, and welding processes.

Key Words : ECA(Engineering critical assessment), Fracture toughness, Master curve, Welding condition

1. 서 론

결함이 존재하는 구조물의 건전성을 평가하는 구조 건전성 평가를 수행하기 위해서는 신뢰성 있는 파괴인성 값을 요구한다. 이상적인 데이터는 구조물의 제작 중에 생성되거나 제작 후의 구조물에서 채취하여 제작

할 수 있지만 구조물의 운용에 의해 시험 표본의 제거가 불가능한 경우가 존재한다. 이러한 상황에서 규격 요건을 만족하는 적절한 샤르피 충격 시험 결과를 이용할 수 있는 경우 샤르피 충격 에너지와 파괴인성의 상관관계를 통해 재료의 파괴인성을 평가하는 방법을 BS 7910 부록 J에서 제시하고 있다¹⁾. 하지만 샤르피 충격 시험 결과와 파괴인성의 상관관계는 파괴역학 관점

에서의 이론에 근거한 것이 아니므로 상당히 보수적으로 설계되었다. 따라서, 파괴인성과의 상관관계를 도출하는데 반영된 특정 강재들에 대한 보수적인 하한선을 제시하는 것일 뿐 다른 강재들에 대해서는 적용되지 않을 수 있다. 이를 개선하여 최소한의 개념적인 수준의 보수성을 보장하기 위해 재료의 항복 강도와 샤르피 에너지 상한 값을 마스터 선도에 적용하는 방법이 BS 7910:2019 개정판에 포함되었다²⁾.

본 연구에서는 마스터 선도 접근법의 유효성을 검증하기 위해 해양 구조물용 강재와 일반 구조물용 강재에 대해 샤르피 충격 시험편의 채취 영역과 용접 홈 형상에 따른 마스터 선도를 평가하고, CTOD 결과와 비교하였다.

2. 마스터 선도 접근법

BS 7910은 샤르피 충격 시험 결과를 통해 샤르피 천이 선도를 이용할 수 있는 경우 마스터 선도를 이용하여 적용 온도에 따른 파괴인성을 평가할 수 있는 방법을 제시하고 있다. ASTM E23³⁾에서 제시하는 샤르피 충격 시험편 규격(10mm×10mm)을 만족하는 경우 마스터 선도를 통한 하한 값과 적용 온도에서의 파괴인성을 과대평가하는 것을 방지하기 위해 제시되는 상한 값 중 낮은 값을 적용한다. 마스터 선도를 통해 파괴인성을 예측하는 식은 다음과 같다.

$$K_{mat} = 20 + \{11 + 77 \exp[0.019(T - T_0 - T_k)]\} \times (25/B)^{0.25} [\ln(1/(1 - P_f))]^{0.25} \quad (1)$$

T_k 는 보수적인 파괴인성 평가를 위해 샤르피 충격 시험 결과와 파괴인성의 상관관계에 대한 불확실성을 고려해주는 상수로 90%의 신뢰 수준에서 25℃를 적용한다. B는 파괴인성을 평가하기 위한 재료의 두께를 의미한다. 누적 확률 P_f 는 K_{mat} 이 마스터 선도를 통해 예측된 값보다 낮은 확률을 의미하며 BS7910에서는 0.05(5%)를 권장하고 있다. T_0 는 25mm 두께의 시험편에 대해 $100MPa\sqrt{m}$ 의 파괴인성을 가지는 참조 온도를 의미하고, Eq. (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$T_0 = T_{27J} - 18 \text{ or } T_{40J} - 24 \quad (2)$$

T_{27J} 과 T_{40J} 은 각각 샤르피 천이 선도에서 27J과 40J에 대응되는 온도를 의미한다. 여기서, 개정된 BS7910:2019는 기존의 마스터 선도의 보수성을 개선하기 위해 재료의 항복강도와 샤르피 충격 에너지 상한값을 적용

하여 참조 온도를 계산하는 방법을 포함하였다. 개정된 참조 온도를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$T_0 = T_{27J} - 87 + \frac{\sigma_Y}{12} + \frac{1000}{CV_{US}} \quad (3)$$

여기서, σ_Y 는 재료의 항복 강도를 의미하고, CV_{US} 는 샤르피 충격 에너지 상한값을 의미한다. 개정된 참조 온도를 적용할 경우 마스터 선도의 T_k 는 30℃로 고려된다. 앞서 서술한 BS7910 개정 전 및 후의 참조온도를 바탕으로 강재 종류, 샤르피 충격 시험편 채취 영역, 홈 형상에 따른 마스터 선도를 비교하였다.

3. 실험 방법

3.1 실험 조건

본 연구에서는 해양 구조물 제작 시 사용되는 API 2W Gr. 50과 일반 구조물 제작 시 사용되는 POSTEN 60에 대해 시험편을 제작하였다.

용접 이음재는 FCAW(Flux Cored Arc Welding)를 적용하였고, 홈 형상(X & K-Groove)에 따라 제작되었다. 플럭스코드와이어는 AWS A5.29 E80 T1-K2를 사용하였다⁴⁾. 시험편 및 플럭스코드와이어에 대한 화학성분은 Table 2에 나타내었다. 용접 후 실험까지의 시간 차이에 따른 수소의 영향을 최소화하기 위해 150℃에서 48시간 후 열처리를 수행하였다. 시험편 치수는 길이 1000mm, 폭 500mm, 두께 45mm이며 용접 이음재 형상과 인장, CTOD, 샤르피 충격 실험에 적용된 시험편 채취 위치를 Fig. 1과 2에 나타내었다.

API 2W Gr. 50과 POSTEN 60에 대해 홈 형상을 제외한 용접 조건은 모두 동일하게 적용하였으며 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Welding conditions of according to groove shape

Groove shape		X-Groove	K-Groove
Welding type		Flux cored arc welding	
Groove angle		60°	45°
Heat input	Current	320 A	
	Voltage	36 V	
	CPM	25	
	Root gap	0 ~ 3mm	6 mm
Root face		0 ~ 3mm	
Back gousing		O	

Table 2 Chemical compositions of base metals and filler metal

Unit: wt %												
Section	C	SI	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Ti	Al	Cr	Ce
API 2W Gr. 50	0.16	0.15 ~ 0.50	1.15 ~ 1.60	0.03	0.01	0.35	0.75	0.08	0.02	0.012	-	0.41
POSTEN 60	0.16	0.15 ~ 0.50	1.50	0.03	0.03	-	0.60	0.30	-	-	0.30	0.44
Filler metal	0.04	0.38	1.32	0.012	0.01	-	-	-	-	-	-	-

3.2 실험 방법 및 시험편

본 연구에서는 마스터 선도 접근법의 유효성을 평가하기 위하여 해양 구조물용 강재 API 2W Gr. 50과 일반 구조용 강재 POSTEN 60에 대해 홈 형상(X-Groove & K-Groove)에 따라 인장 시험, 충격 시험, CTOD 시험을 수행하였다.

인장 시험편은 용착 금속에서 판 두께 방향의 상단 및 하단에서 각각 1개씩 채취하여 ASTM E8에 따라 제작되었으며, 항복 강도(σ_{YS}) 및 인장 강도(σ_{TS})는 이들의 평균값으로 적용하였다⁵⁾. 또한 용착 금속의 충격 인성을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 상단 및 하단으로부터 2mm 떨어진 영역에서 용접 순서에 따라 First, Root, Second 세 영역으로 충격 시험편(10mm×10mm)을 ASTM E23에 따라 제작하여 샤르피 충격 시험을 수행하였다.

용접 금속의 파괴인성을 평가하기 위해 CTOD 시험

Fig. 1 Schematic diagram of welded panel and sample location of mechanical tests

Fig. 2 Sample locations of Charpy impact test

Fig. 3 Schematic diagram of CTOD test specimen

Table 3 Specimen size of CTOD test

Unit: mm					
Type	Groove shape	Thickness	Span length	Width	Notch length
API 2W Gr. 50	X-groove	42	336	84	37
API 2W Gr. 50	K-groove	42	336	84	38
POSTEN 60	X-groove	45	360	90	40
POSTEN 60	K-groove	45	360	90	40

편의 노치 방향은 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 용접선 방향과 동일하게 채취하여 BS 7448에 따라 제작되었다⁶⁾. 시험편의 형상과 치수를 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다.

4. 실험 결과

API 2W Gr. 50과 POSTEN 60에 대한 인장 시험 결과를 Table 4에 나타내었다. 결과를 통해 API 2W Gr. 50과 POSTEN 60 모두 K-Groove가 X-Groove보다 항복 강도 및 인장 강도가 높게 나타난 반면 탄성 계수는 낮게 나타났다.

Table 4 Tensile test results of API 2W Gr. 50 and POSTEN 60

Unit: MPa				
Type	Groove shape	σ_{YS}	σ_{TS}	E
API 2W Gr. 50	X-Groove	539	601	209179
	K-Groove	576	632	192061
POSTEN 60	X-Groove	579	619	214436
	K-Groove	593	627	193483

충격 시험편의 채취 영역(First, Root, Second)에 따른 충격 시험 결과와 CTOD 결과는 Eq. (4)와 같은 하이퍼볼릭 탄젠트를 이용하여 보간하였다. 각 강재의 채취 영역 및 홈 형상에 따른 충격 시험 결과를 Fig. 4와 5에 나타내었다.

$$Y = A + B \tanh\left(\frac{T - T_0}{C}\right) \quad (4)$$

강재의 홈 형상에 따른 CTOD 결과를 Fig. 6과 7에 나타내었다.

샤르피 충격 에너지와 CTOD의 홈 형상에 따른 전이 온도를 Table 5와 6에 나타내었다.

Table 5와 6의 결과를 통해 CTOD의 전이 선도가 샤르피 전이 선도보다 높은 온도에서 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 CTOD 및 샤르피 충격 시험에 따른 시험편 형상, 하중 속도, 노치 형상, 노치 깊이와 같은 조건의 차이로 인해 발생한다. 또한, 샤르피 충격 시험은 상대적으로 뒤편에서 시험편의 파단에 필요한 총 에너지를 측정하는 반면에 파괴 인성은 예리한 피로 균열로부터 파단을 발생시키는 조건으로 정의된

Fig. 4 Charpy transition curve of API 2W Gr.50 with sample location and groove shape

Fig. 5 Charpy transition curve of POSTEN 60 with sample location and groove shape

다. 따라서 이러한 시험 조건의 차이로 인해 단순히 샤르피 충격 시험결과를 통해 파괴 인성을 예측하는 것에 한계가 존재한다. 이를 위해 BS7910 부록 J는 적절한 샤르피 충격 시험 결과와 파괴인성의 경험적인 상관관계를 기반으로 재료의 파괴인성을 평가하는 방법을 제시하고 있다.

Fig. 6 CTOD transition curve of API 2W Gr. 50

Fig. 7 CTOD transition curve of POSTEN 60

Table 5 Ductile to brittle transition temperature of API 2W Gr.50

Unit: °C

	CVN transition temp.			CTOD transition Temp.
	First	Root	Second	
X-groove	-32.22	-33.54	-22.44	-7
K-groove	-26.08	0.2	-37.37	26

Table 6 Ductile to brittle transition temperature of POSTEN 60

Unit: °C

	CVN transition temp.			CTOD transition Temp.
	First	Root	Second	
X-groove	-28.34	-9.67	-29.07	5.54
K-groove	-32.22	-20.92	-36.27	3.17

5. 마스터 선도 접근법의 검증

5.1 채취 영역에 따른 마스터 선도의 비교

API 2W Gr.50 및 POSTEN 60에 대해 충격 시험편의 채취 영역에 따른 개정된 BS7910의 마스터 선도를 Figs. 8-11에 나타내었다. 누적 확률 P_f 는 BS7910에서 권장하는 0.05(5%)를 적용하였다.

Fig. 8 Modified master curve of API 2W Gr. 50 & X-groove with sample location (first, root, second)

Fig. 9 Modified master curve of API 2W Gr. 50 & K-groove with sample location (first, root, second)

Fig. 10 Modified master curve of POSTEN 60 & X-groove with sample location (first, root, second)

Fig. 11 Modified master curve of POSTEN 60 & K-groove with sample location (first, root, second)

결과를 통해 POSTEN 60의 경우 시험편 채취 영역에 따라 예측된 파괴인성의 경향이 홈 형상과 관계없이 동일한 반면에 API 2W Gr.50의 경우 홈 형상에 따라 다른 것을 확인할 수 있다. X-홈에서는 Second에서 가장 낮은 파괴인성을 보이는 반면에 K-홈에서는 Root가 파괴 인성에 취약한 영역으로 평가된다. 샤르피 충격 시험의 경우 ASTM E23의 시험편 규격(10mm×10mm)에 의해 Fig. 2와 같이 채취 영역이 나누어질 수 있다. 따라서 충격 시험을 기반으로 시험편 규격보다 두꺼운 용접 구조물의 파괴 인성을 평가할 경우 용접 조건에 따라 시험편의 채취 영역을 고려하는 것이 필수적이다.

5.2 BS7910:2013 및 BS7910:2019에 따른 마스터 선도 비교

개정된 BS7910은 재료의 항복 강도와 샤르피 에너지 상한값을 적용하여 개정 전의 마스터 선도보다 보수적인 파괴 인성 값을 제시한다. 이를 비교하기 위해 API 2W Gr. 50에 대해 개정 전, 후의 마스터 선도를 Fig. 12에 나타내었다. 이때, 홈 형상에 따른 채취 영

Fig. 12 Master curve of API 2W Gr. 50 according to BS 7910:2013 and newly revised BS7910:2019

역은 가장 낮은 파괴인성 값을 나타내는 위치를 반영하여 X-홈의 경우 Second, K-홈의 경우 Root를 적용하였다.

결과를 통해 개정된 마스터 선도가 홈 형상에 관계없이 개정 전의 마스터 선도보다 비보수적인 파괴 인성을 나타낸다. 또한, X-홈이 K-홈보다 개정 전, 후의 차이가 큰 것을 통해 파괴 인성이 높을수록 개정에 따른 영향이 높은 것으로 판단할 수 있다.

5.3 CTOD 결과를 통한 마스터 선도의 검증

개정된 마스터 선도의 유효성을 검증하기 위해 CTOD 결과를 BS7910에서 제시하고 있는 Eq. (5)를 통해 임계응력확대계수(K_{mat})로 변환하여 마스터 선도와 비교하였다.

$$K_{mat} = \sqrt{\frac{m\sigma_Y\delta_{mat}E}{1-\nu^2}} \quad (5)$$

여기서, E는 탄성 계수, σ_Y 은 CTOD 시험 시 적용된 온도, δ_{mat} 은 CTOD(Crack-tip opening displacement)이다. m은 강에 대해 Eq. (6)에 의해 계산되는 상수이다.

$$m = 1.517\left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_U}\right)^{-0.3188}, \quad 0.3 < \sigma_Y/\sigma_U < 0.98 \quad (6)$$

σ_Y 와 σ_U 는 각각 파괴인성 시험에 적용된 온도에서의 항복 강도와 인장 강도를 의미한다.

본 연구의 인장 시험 결과는 상온에서 수행되었으므로 BS7910에서 제시하고 있는 온도에 따른 항복 및 인장 강도 변환식 Eqs. (7)-(8)을 통해 적용 온도를 반영하였다.

$$\sigma_Y = \sigma_Y + \frac{10^5}{(491 + 1.8T)} - 189 \quad (7)$$

$$\sigma_U = \sigma_U \times (0.7857 + 0.2423\exp(-\frac{T}{170.646})) \quad (8)$$

각 식에서 T는 적용 온도, 좌항 및 우항의 항복 강도와 인장 강도는 각각 계산하고자 하는 적용 온도에서의 강도와 상온에서의 강도를 의미한다.

API 2W Gr. 50 및 POSTEN 60의 홈 형상에 따른 마스터 선도와 CTOD에 의해 계산된 임계응력확대계수를 Figs. 13-16에 나타내었다. 각 조건에 적용된 충격 시험의 채취 영역은 가장 낮은 파괴 인성을 나타내는 영역을 적용하였다.

결과를 통해 개정된 BS7910에 의한 마스터 선도가

Fig. 13 Fracture toughness of API 2W Gr. 50 & X-groove by Charpy impact energy and CTOD

Fig. 14 Fracture toughness of API 2W Gr. 50 & K-groove by Charpy impact energy and CTOD

Fig. 15 Fracture toughness of POSTEN 60 & X-groove by Charpy impact energy and CTOD

개정 전의 마스터 선도보다 비보수적으로 파괴 인성을 평가한다. 하지만 POSTEN 60의 X 홈을 제외하고 기존의 마스터 선도조차 파괴 인성보다 높게 평가하는 결과가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이는 샤르피 충격 시험 기반 마스터 선도가 상당히 보수적으로 설계됨과

Fig. 16 Fracture toughness of POSTEN 60 & K-groove by Charpy impact energy and CTOD

Fig. 17 Master curve of API 2W Gr. 50 & X-groove with modified reference temperature

누적 확률 5%가 적용되었음을 고려하면 마스터 선도의 적용에 있어서 위험한 결과임을 나타내므로 추가적인 수정이 필요하다. 이를 위한 기반으로 개정된 참조 온도의 상수인 -87을 모든 CTOD 결과를 포함할 수 있는 상수로 수정하여 마스터 선도의 변화를 비교하였다. 시험 조건은 CTOD 결과와 대비하여 가장 높게 파괴 인성을 예측한 API 2W Gr. 50의 X-groove를 적용하였다.

Fig. 17은 CTOD 결과를 모두 포함하는 개정된 참조 온도의 상수를 -65로 적용한 결과를 나타낸다. 상수를 수정함에 따라 CTOD 결과보다 낮은 파괴 인성을 예측하지만 BS7910 개정전보다 더 보수적인 결과를 도출한다. 이는 기존의 마스터 선도의 보수성을 개선하고자 하는 BS7910의 개정 목적에서 벗어난다. 결과적으로 단순히 참조 온도를 수정하는 것만으로는 흠 형상과 같은 용접 조건에 따른 파괴 인성을 모두 고려하기에는 한계가 존재한다. 따라서, 흠 형상, 입열량, 용접 방법과 같은 다양한 용접 조건들을 고려하여 마스터 선도를 적용할 수 있는 추가 연구가 필요하다.

6. 결 론

본 연구에서는 해양 구조물용 강재인 API 2W Gr. 50과 일반 구조물용 강재인 POSTEN 60에 대해 흠 형상에 따른 마스터 선도 접근법의 유효성에 대해 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개정된 마스터 선도는 기존의 마스터 선도에 비해 강재, 흠 형상, 샤르피 충격 시험편의 채취 영역에 관계없이 비보수적인 파괴 인성을 예측한다.

2) 용접 이음재에 대해 마스터 선도 접근법을 적용할 경우 샤르피 충격 시험편의 채취 영역에 따른 파괴 인성의 경향이 다르므로 시험편 규격보다 두꺼운 용접 구조물의 파괴 인성을 평가할 시 채취 영역을 반드시 고려해야 한다.

3) 강재 및 흠 형상에 따라 BS 7910 개정 전과 후의 마스터 선도 모두 CTOD에 의한 파괴인성보다 높게 예측하는 결과가 존재한다. 따라서, 흠 형상, 입열량, 용접 방법과 같은 다양한 조건들을 포함하여 파괴 인성을 평가할 수 있는 마스터 선도에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

이 논문(저서)은 2019년 교육부와 한국연구재단의 이공학 개인기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1D1A1B03035811).

ORCID: Jin-Ho Lee: <https://orcid.org/0000-0003-2233-4688>

ORCID: Young-Taek Shin: <http://orcid.org/0000-0001-5136-1824>

ORCID: Myung-Hyun Kim: <http://orcid.org/0000-0003-4428-6058>

References

- BS 7910:2013, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, *British Standards Institution (BS)* (2013).
- H. Pisarski and B. Bezensek, Estimating fracture toughness from Charpy data, *Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2019)*, Glasgow, Scotland, UK (2019).
<https://doi.org/10.1115/OMAE2019-95787>
- ASTM E23, Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, *ASTM international (ASTM)* (2002).
- S. H. Kang, M. H. Kim, Y. B. Kim, Y. T. Shin, and H. W. Lee, A study on the fracture toughness character-

istics of FCAW weldment of steel for offshore structures, *J. Weld. Join.* 22(6) (2004) 57-63.

5. ASTM E8, Standard test methods for tension testing of metallic materials, *ASTM international (ASTM)* (2003).
6. BS 7448-Part 2, Method for determination of KIC, critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials. *British Standards Institution (BS)* (1997).