

강 용접부에 대한 파괴인성 시험법의 고찰

장재일 · 이백우 · 주장복 · 권동일 · 김우식

A Review on the Fracture Toughness Testing Method for Steel Weldment

Jae-il Jang, Baik-Woo Lee, Jang-Bog Ju, Dongil Kwon and Woo-sik Kim

1. 서 론

산업규모의 증가와 사용부지의 제한으로 인하여 강 용접구조물의 대형화 추세는 증가하고 있고, 이에 따라 구조물의 안전성 평가가 재해방지와 경제성의 양 측면에서 필수적으로 요구되고 있다. 강 구조물에서 취성파괴와 같이 예상치 못한 파괴가 발생하는 원인으로서는 우선 사용재료의 기본적인 강도와 인성의 부족, 둘째로 용접부의 인성열화와 결함 및 역학적 불균질성, 셋째로 구조적 불연속부에서의 응력집중 등을 들 수 있다. 다양한 공학적 경험을 바탕으로 발전된 재료 및 건축 기술을 보유하고 있는 현재는 구조물의 설계와 재료의 기본 성질이 거의 요구환경에서 만족되고 있으므로, 역시 안전성을 위하여 가장 주의를 기울여야 하는 부위는 용접부이다. 용접부에는 각종 초기결함(피로균열, 응력부식균열 등), 용접 형상의 불연속성에 의한 국부적 응력·변형의 집중, 잔류응력, 소성구속, 용접열사이클에 의한 용접열영향부(heat-affected zone, 이하 HAZ)내의 재료적 열화 등 여러 가지 취성파괴 촉진인자가 복합적으로 존재하므로, 용접 구조물 전체의 건전성에 있어서 용접부의 인성이 가지는 의의는 대단히 크다. 현재의 세계적인 제강 기술 수준으로 보아도 모재의 파괴인성보다 용접부의 파괴인성을 합리적으로 평가하는 것이 훨씬 더 중요하다. 하지만, 강의 용접부에는 그림 1에서 나타낸 바와 같이 파괴특성에 미치는 다양한 금속학적 및 역학적 인자가 존재하므로, 기존 균질재의 파괴인성 시험법을 적용하여 인성을 평가하기에는 많은 어려움이 있다. 본고에서는 이러한 용접부 파괴인성 평가시험법에 대해 진행되었던 기존의 논의들을 정리하여 소개하였고, 그 특성과 문제점에 대하여 리뷰하였다.

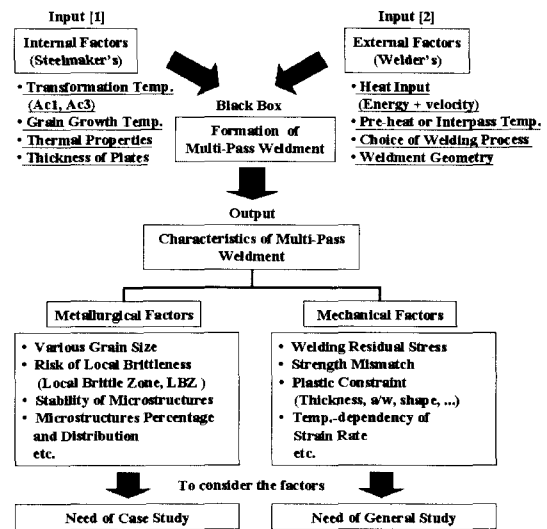


Fig. 1 Classification of various weldment characteristics affecting fracture properties of steel weldments.

2. 용접부 파괴인성 평가의 목적과 배경

강 용접부의 파괴인성 시험을 행하는 목적은 첫째, 재료·용접공정·사용환경 등이 인성에 미치는 영향 파악 및 재료개발에의 응용(재료 개발 목적), 둘째, 재료 선택의 타당성 확인을 목적으로 하는 사용 전 재질 평가(pre-qualification) 시험(재료 선정 목적), 셋째, 결함을 가진 구조물의 파괴능력 평가에의 응용 목적, 즉 사용적합성(fitness-for-purpose)에 기초한 용접결함의 한계 평가의 세 가지로 나눌 수 있다. 그러므로, 국제용접협회(IIW: International Institute of Welding)의 제 X 위원회(Session X)에서 내린 결론과 같이, 적용해야할 파괴인성 시험법도 시험목적에 크게 의존하게 된다. 철강재료의 파괴인성을 구하는 방법은 두 가지로 분류할 수 있는데, 그것은 파괴역학에 기초하지 않은 시험법과 파괴역학에 기초한 시

험법이다. 전자는 일반적으로 상기 분류의 첫째와 둘째 목적에 주로 사용되며 후자는 셋째 목적에 주로 사용되어 왔는데, 점차 첫째와 둘째에 대해서도 파괴역학적인 인성시험결과의 요구가 일반화되고 있는 추세이다.

파괴역학에 기초하지 않은 시험이란 파괴역학이 일반적으로 사용되지 않았던 시기에 재료의 파괴를 현실의 문제로 인식하지 않고 재료평가시험의 일환으로 고려함에서 나온 시험법이다. 이들은 단순히 충격에 의한 파단까지의 물리량만을 이용한 시험법으로, 가장 일반적으로 사용되어온 샤피 V-노치 충격시험(ASM E23) 외에 근래에는 중·대형 시험편의 사용에 현실적으로 접근할 수 있도록 미국 해군 연구소(NRL)에서 개발한 Drop Weight Test(ASM E208), 라인 파이프용 강재에 주로 이용되는 DWTT (Drop Weight Tear Test-ASM E436), Dynamic Tear Test (ASM E604) 등의 시험법들이 있다. 70년대 중반까지는 용접부의 인성을 평가하기 위하여 샤피 충격시험이 거의 유일하게 이용되었다. 샤피 충격시험은 시험법 자체가 단순하고, HAZ내 위치에 따른 노치의 도입 등 시험편의 제작이 용이하며 시험절차와 해석이 단순하다는 장점들로 인하여 널리 사용되고 있으나, 균열주위의 응력장 해석 등의 파괴역학적인 개념들을 무시함으로 인하여 하중을 받는 구조물의 실질적인 파괴 현상 분석에는 많은 부족함이 있다. 그러므로 이러한 샤피 충격시험에 따른 인성평가는 시험온도의 변화에 따른 천이온도의 결정이나 소재의 재료에 따른 충격흡수에너지 변화의 비교 등에 주된 관점이 있어 천이적 접근(transition approach)라 하여 파괴역학적 접근(fracture mechanical approach)과 구분하여 개념짓고 있다. 파괴역학의 개념이 발달한 현재에는 파괴역학에 기초한 인성시험의 요구가 증대되고 특히 구조물의 안전성을 합리적으로 실질적으로 평가하기 위한 사용적합성 평가에는 파괴역학적 시험자료가 필수적이다.

파괴역학은 <파괴의 조건>에 관한 분야와, 파괴발생 원인이 되는 균열 주위의 응력, 변형률 상태를 해석하는 <균열의 역학>에 관한 분야로 크게 나눌 수 있다. 그러므로 파괴역학에 기초한 파괴인성의 시험이란 시험편에 피로예비균열을 도입하고, 그 균열 주위의 응력과 변형률을 역학적으로 해석하여 균열의 성장 등을 예측하는 올바른 시험기준을 확립한 후, 그 시험을 통하여 파괴가 일어날 조건을 구하는 방법을 의미한다. 철강재료의 균열개시 파괴인성을 평가하기 위해서 실질적 규모로 가장 널리 사용되는 시험법은 콤팩트

인장시험편(compact tension specimen)을 이용한 K_{Ic} 및 J_{Ic} 시험, 3점 굽힘시험편(3-point bending specimen)을 이용한 CTOD(crack tip opening displacement)시험의 3가지이다. 이중에서도 용접부의 인성평가에 가장 널리 사용되고 있는 시험법은 3점 굽힘 CTOD 시험법이다. 이 시험법은 1979년에 BS 5762에 관련규격이 처음으로 정해진 이후에 1980년대 들어와서는, 샤피 충격시험과 더불어 용착금속과 HAZ의 인성평가에 일반적으로 이용되고 있다. 이러한 3점 굽힘 CTOD시험법은 샤피 충격시험과 같이 HAZ내 위치에 따른 기계적 결합의 도입이 쉬우면서도 탄소성 파괴역학(Elastic-Plastic Fracture Mechanics)에 기초를 두고 있는 장점이 있으며, 콤팩트 인장시험편보다 시험편의 제작이 용이하다. 이 외에 CTOD 시험의 큰 장점은 파괴역학에 기초한 다른 시험법인 K_{Ic} 나 J_{Ic} 평가법과는 달리 평면변형조건(plane strain condition)을 완화하여 실구조체와 같은 두께의 시험편을 사용한다는 점으로서, 이는 벽개 파괴에 대한 판두께 효과가 명확하지 않다는 이유에 근거한 것이다.

지금까지 용접부의 CTOD시험은 영국 규격인 BS 5762와 그 개정판인 BS 7448 및 미국의 ASTM E1290에서 나타난 시험 규격에 기초하여 진행되어 왔으나, 이러한 규격들은 균질재를 위한 것들이므로 역학적, 금속학적 변화특성을 가진 용접부에 직접적으로 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 그러므로, 용접부에 어떠한 방법에 의해 어떤 수준의 파괴역학적 인성을 요구해야 하는지도 불명확하고, 더구나 용접부의 파괴역학적 인성이 의미하는 것은 무엇인가 하는 기본적인 문제조차 여전히 통일된 견해가 없이 논의가 진행 중이다.

1980년 북해에서 발생한 해양구조물 Alexander Kielland호의 대형파괴 참사가 전기가 되어 용접부, 특히 HAZ 파괴인성 평가의 관심은 폭증하였지만 1983년에 나온 체코슬로바키아의 규격인 "CZN 05 1127 : Fracture Toughness Testing of Welded Joint at Static Loading" 등 극히 일부를 제외하고는 파괴인성 시험법 자체에 대한 체계적인 정리라는 면에서의 발전은 이루어지지 않았다. 이러한 연구가 본격적으로 활성화된 것은 1984년 보스턴에서 열린 IIW 회의에서 제 X 위원회 산하에 "Fracture Mechanics Testing of Weld Metal/HAZ"에 대한 워킹 그룹이 결성되면서부터이다. 용접부 파괴역학시험의 어려움에 대한 각국의 설문조사로부터 시작한 연구는 80년 중반부터 많은 연구결과를 배출하였고,

다양한 제안서 및 규격의 draft 형태로 용접부 파괴인성 시험의 정리된 연구결과가 나타났다. 이 중 대표적인 예가 1986년의 BS draft¹⁾, 1991년의 ASTM draft²⁾와 같은 해의 IIW Welding Guideline³⁾, 1987년에 나와서 1992년에 개정된 미국석유협회의 API RP 2Z 등이다. 이후 1997년에는 드디어 BS 7448의 Part 2 (Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials)에 처음으로 용접부 파괴인성 시험법에 대한 내용이 규격화되었다. 이러한 규격 및 draft들은 용접부 파괴인성 평가의 어려움을 극복하고 신뢰성 있는 시험결과를 얻기 위한 방안들을 제안하고 있지만 아직까지도 일반성의 부재라는 큰 문제점이 남아있는 채 논의가 진행중이다. 다음에는 이러한 관점에서 지금까지 진행되어온 논의 주제들을 구체적으로 살펴보았다.

3. 용접부 파괴인성 시험의 주요 고려사항

3.1 시험편의 채취 및 제작

용접부 파괴인성시험을 수행하기 전에 가장 선결되어야 할 점은 시험편의 크기와 균열방향의 결정이다. 우선 시험편의 두께는 전술한 바와 같이 CTOD 시험법에서는 실두께의 사용을 기본으로 하고 있고, 시험편의 폭(W)은 시험편 두께의 2배(2B) 혹은 두께와 같이(B) 할 수 있음을 기본으로 규정하고 있다. 하지만 두께가 100mm 가까운 극후판용 시험편의 경우, (1) 시험편의 중량이 1/4로 줄어드는 B×B의 정방형 시험편을 사용하거나 (2) 두께감소 시험편을 사용하여야 한다. 이중 두 번째 경우를 사용하기 위해서는 무엇보다도 시험편의 두께가 파괴인성에 미치는 영향에 대한 명확한 이해가 있어야 가능하다. 일반적으로 판두께가 증가함에 따라 인성은 감소하게 되는데, 이러한 판두께 효과는 크게 (1) 판두께가 증가할수록 판두께 방향의 소성구속이 증가하는 구속효과와 (2) 파괴인성을 결정할 저인성부가 균열선단에 존재할 확률이 증가하는, 즉 최고 취약부 모델(weakest link model)에 의한 확률론적 효과로 구분된다. 후자의 경우에 대하여 Satoh 등⁴⁾은 판두께 10mm의 시험편의 시험결과를 이용하여 최고 취약부 모델에 따른 확률론적 해석을 수행한 결과, 100mm 두께 시험편의 파괴인성에 대한 평균치를 구할 수 있었다고 보고하였다.

두께와 함께 시험 초기에 결정되어야 하는 것은 균열 도입방향이다. 일반적으로 사용되는 시험편은 실두께

에 대한 두께관통 균열 시험편이지만 최근에는 표면균열 시험편의 사용도 증대하고 있다. 이는 (1) 역학적이나 재료적 관점에서 용접부의 일반적인 파괴개시위치로 알려진 용접 toe부나 root 부에 예비균열이 위치하도록 조정하기가 용이하기 때문이고, (2) 균열선단에서의 국부적 구속효과가 파괴인성의 결정인자임이 밝혀지면서, 두께 관통균열은 이러한 국부적 구속조건에 접근하기가 어렵기 때문이다. 또한, B×2B 시험편을 사용하는 두께관통균열 시험편에 비하여 B×B 시험편을 사용하는 표면균열 시험편이 부피가 작아 제작이 용이한 것도 표면균열 시험편 사용시의 장점이다. 하지만, 표면균열 시험편으로부터 얻은 인성치는 균열선단 위치에 의해 크게 영향을 받는 반면, 균열위치의 조절이 힘들어 많은 수의 시험편을 사용하여야 하는 큰 단점이 있고, 특히 국부적 취화부가 균열선단에 존재하여 하한인성을 평가하는 경우, 표면균열과 두께 관통균열 시험편이 유사한 값을 나타낸다는 보고⁵⁾에 기초할 때, 쉽게 균열선단에 국부적 취화부가 존재할 수 있게 조절할 수 있는 두께관통균열 시험편의 사용이 하한인성 결정에는 절대적으로 유리하다.

3.2 피로예비균열의 균일한 도입

무한히 날카로운 균열의 존재를 바탕으로 하는 파괴역학의 특성상 CTOD 시험 및 K_{Ic} 나 J_{Ic} 시험 등의 파괴역학적 시험을 위해서는 기계 가공한 노치 끝에 피로예비균열을 도입하여야 하는데, 균질재를 위한 기존 규격에서는 예비균열의 직선도 유지를 엄격하게 요구하고 있다. 일반 압연강판의 경우에는 특수한 경우를 제외하고는 이러한 직선도의 요구한계치를 유지하기에 어려움이 없다. 하지만 용접부 시험편의 경우는 용접 잔류응력을 내재하고 있으므로, 예비균열의 직선도를 유지하기 어렵고 따라서 규격을 만족하기 힘들다.

용접 잔류응력은 후판의 경우, 두께에 수직인 면에 존재하는 면내응력(in-plane residual stress) 뿐만 아니라, 두께 방향의 잔류응력(σ_x)과 면내 잔류응력의 두께방향 분포($\sigma_x(Z)$, $\sigma_y(Z)$)가 함께 존재한다. 이 두께별 잔류응력 변화는 두께관통 균열 시험편의 경우 피로예비균열의 두께방향의 위치별 불균일을 야기하게 된다. 반면, 표면균열형 시험편의 경우에는 기계적 노치 주위의 면내 잔류응력이 피로예비균열형성에 영향을 미치나 그 정도는 잔류응력의 분포특성상 작게 된다.

이러한 문제점을 극복하고 직선도를 만족하는 피로예비균열을 얻기 위하여 많은 연구들이 진행되어 왔

다. 이중 가장 널리 알려진 방법은 1971년 Dawes⁶⁾가 제안한 국부 압축법(local compression method)이다. 국부 압축법은 피로예비균열을 도입할 위치의 표면에 두께의 1%만큼(양측에 0.5%씩) 소성 압축을 가하여 두께방향의 잔류응력을 균일하게 재분포시키는 방법이다. 하지만 극후판의 경우, 판두께 중앙까지 압축에 의한 소성변형이 형성되기 위해서는 대단히 큰 장비가 필요하므로 공학적인 측면에서 어려움이 존재한다. 이에, Towers와 Dawes⁷⁾는 대안적 방법으로서 시험전 역굽힘(reverse prebending method), 큰 값의 R-ratio 사용(high R ratio method) 등을 제안하였다. 시험전 역굽힘 시험법은 3점 굽힘 시험시와 반대방향으로 굽힘응력을 가함으로써, 시험전에 압축인장응력을 발생시켜 잔류응력효과를 보상하는 방법이다. 또, 큰 값의 R을 사용하는 방법은 피로예비균열 도입시 두 단계의 R값을 사용하는 방법으로, 1단계에서는 표준시험법에 규격화된 R값(0.1)을 사용하여 균열을 1mm 정도 진전시킨 후 2단계에서 훨씬 큰 R값(0.7)을 사용하여 균열을 진전시킴으로써 잔류응력효과를 극대화시키는 방법이다. 이러한 세 가지 방법(국부 압축법, 큰 R의 사용, 시험전 역굽힘)은 ASTM draft에서 인용되어 있을 뿐만 아니라 BS 7448 Part 2에서 규격화되어 있다. 그러나 0.1 이상의 R 값을 사용하는 경우에는 시험편의 ligament에 있는 잔류응력 자체를 재분포시키지 못하므로 피로예비균열의 균일화는 얻기 쉽지만 인성의 과대 및 과소평가되는 경향을 나타낼 수 있고, 일본에서 주로 사용된 시험전 역굽힘 방법의 경우는 균일한 피로예비균열을 실질적으로 얻기 어렵다는 단점이 보고되고 있다. Machida 등⁸⁾은 실험결과와의 비교분석을 통하여, 이 세 가지 방법중 균일한 피로예비균열을 얻기 위해 가장 유용한 방법은 국부 압축법이라고 보고하였고, 실제로 BS 7448에서도 국부 압축법의 사용이 어려운 경우에만 나머지 방법을 권하고 있다. 하지만 국부 압축법 역시 재질악화 가능성에 따른 파괴인성의 과소평가나 압축소성응력 인가에 따른 인성치의 과대평가 가능성 등 여러 문제점들을 안고 있다.

또 다른 대안으로서, 본고의 저자들중 일부는 피로예비균열의 불균일성에 영향을 미치는 주 인자가 두께방향 잔류응력보다는 면내 잔류응력의 두께방향 분포라 판단하고, 면내 잔류응력의 두께별 변화를 측정된 후 상대적으로 압축응력이 큰 부위에 방전가공을 통하여 국부 아크 노치(partial arc notch)를 도입함으로써 파괴인성치의 과대 혹은 과소평가 없이 균일한 피로예비균열을 얻을 수 있음을 보고한 바 있다⁹⁾.

다음으로, 균열선단에 용착금속과 HAZ가 혼재하는 X-개선 용접시험편의 피로예비균열 도입시 중요하게 고려되어야 할 점은 피로 하중의 결정이다. ASTM과 BS의 파괴인성 규격들에서는 피로예비균열을 형성시의 최대 압축 하중인 $P_{f,max}$ 를 식 (1)과 같이 결정하고 있다.

$$P_{f,max} = 0.5[B(W-a)^2\sigma_Y/S] \quad (1)$$

식에서 B와 W, S는 각각 시험편의 두께와 폭, 스패น 길이를 의미하며, a는 초기결함길이, σ_Y 는 항복강도와 인장강도 합인 1/2에 해당하는 값이다. 식에서 알 수 있듯이 최대압축하중의 결정에는 σ_Y 값을 이용하게 되어 있는데, X-개선 용접부의 용융선 부근에서는 항복강도가 서로 다른 용착금속과 HAZ 또는 모재가 같이 섞여있다. 이 경우에는 항복강도가 낮은 재료의 항복치를 이용하여 하중을 결정하여야 저강도부의 피로균열 급진전과 그에 따른 피로예비균열의 불균일성을 방지할 수 있다. 이는 단순한 원리이므로 간과하기 쉽지만 반드시 주의해야 할 사항이다.

한편, 이러한 피로예비균열의 직선성에 관한 요구치가 너무나 엄격하며, 실제로는 균열의 형상이 크게 인성에 영향을 미치지 않는다는 주장도 많이 제기되고 있고 논란은 현재까지 진행중이다.

3.3 불균질성의 영향에 대한 명확한 이해

1980년대 이후 용접부가 가진 불균질성은 용접부 파괴인성 시험 및 결과에 영향을 미치는 주요인자로 부각되었고, 인성시험 절차와 결과해석에 반영되어 오고 있다. 강 용접부의 불균질성은 급격한 미세조직 변화에 따른 인성적 불균질과 용착금속과 모재사이의 역학적 차이로 인한 강도적 불균질로 구분할 수 있다. 파괴역학에 있어서 파괴의 조건은 주어진 응력하에 놓인 균열의 변수(응력확대계수)와 파괴시 변수의 한계값(파괴인성)의 대소관계에 의해 결정되는데, 강도적 불균질은 주로 균열변수에 영향을 미치고, 인성적 불균질은 주로 파괴인성에 영향을 미치게 된다. 그러나, 이는 단지 경향일 뿐, 만일 파괴발생거동이 강도적 불균질의 영향을 크게 받는 경우라면, 인성적 불균질의 존재에도 불구하고 적절한 파괴역학 변수의 선택이 더욱 중요시될 것이고, 반대로 인성적 불균질의 정도가 매우 큰 경우에는, 강도적 불균질을 고려한 파괴역학 변수의 조절이 큰 의미를 가지지 못하게 될 것이다. 결과적으로 이러한 불균질성을 복합적으로 분석하여야

실용접부의 파괴특성분석을 체계적으로 이룰 수 있다.

3.3.1 인성적 불균질의 영향

해양구조물용 강재의 HAZ 인성에 대한 상세한 연구들이 수행된 결과, HAZ내에 존재하는 sub-mm 단위의 국부적 취화영역(local brittle zone, LBZ)의 존재가 파괴인성평가에 매우 큰 영향을 미치고, 나아가서 구조물 전체의 취성파괴강도에도 중요한 영향을 미친다는 결론을 얻을 수 있었다. 용접용융선 근처에서의 조대한 결정립을 가진 HAZ, 즉 CGHAZ(coarse-grained HAZ)는 일반적으로 결정립 조대화 효과만으로도 큰 인성저하를 나타내므로 공업적 견지에서는 CGHAZ 전체를 LBZ라고 통칭한다. 하지만, 실제 LBZ는 구조용 강의 종류와 강도수준에 크게 의존하게 되는데, 주로 CGHAZ 중에서도 IC CGHAZ(intercritically reheated CGHAZ) 영역이 가장 낮은 인성치를 나타내는 것으로 알려져 있다. 이러한 원인으로서는 조대한 결정립과 함께 해당 영역에서 상대적으로 많이 형성되는 M-A 조직(Martensite-Austenite constituent)이라고 불리는 고탄소조직에 의한 취화로 추정되어 왔다. M-A 조직에 의한 파괴기구들을 정리하면 다음의 4가지 기구로 요약할 수 있다¹⁰⁻¹⁵⁾. 첫째, M-A 조직은 매우 경하고 취약한 상이므로 전위집적과 응력집중 등에 의하여 미세균열이 쉽게 발생하고, 둘째, 도상 오스테나이트에서 M-A 조직으로의 변태시 변태유기 잔류인장응력이 M-A 조직 주위에 발생하고 이 인장응력은 벽개파괴를 도우며, 셋째, 경한 M-A 조직이 주위의 연한 기지에 응력집중 및 소성구속을 일으켜 국부응력을 급격히 상승시켜 주위 기지의 파괴를 발생시키거나, 넷째, M-A 조직과 페라이트 기지사이의 계면에서 미소균열이 형성되고, 이러한 균열이 페라이트 기지의 근원으로 작용하는 것이다.

LBZ를 포함한 HAZ 영역의 인성 평가 시 발생하는 가장 큰 문제점은 얻어지는 시험결과가 목표하는 부위의 파괴인성을 잘 나타내고 있는가를 규정하는 일이다. 인성시험으로부터 얻어지는 인성값의 의미는 시험방법과 지표가 되는 변수에 따라 다른데, 일반적으로 인성적 불균질(LBZ 효과)이 인성치에 영향을 미치는 형태는 균열주위의 가장 인성이 낮은 부분의 인성이 지배적이 되는 최고취약부 지배형태(weakest link type)와 각 미세조직이 균열선단을 점유하는 분율을 기초로 한 혼합률 지배형태(rule of mixture type)로 나눌 수 있다. 전자의 경우에는 주로 파괴역학적 인성 시험시에 적용된다고 알려져 있으며, 후자의 경우에는 샤피 충격시험에 적용된다고 보고되고 있다. 따라서

균열선단에 LBZ가 존재하는 경우에는 샤피 충격치와 한계 CTOD사이에서 일정한 상관관계가 나타나지 않는 경우가 많다. 이를 극복하려는 시도들중 하나로, 샤피 시험편에서 얻은 흡수에너지중의 최저치와 한계 CTOD사이에서 일정한 상관관계가 있음을 발견하기도 하였다¹⁶⁾. 하지만 이러한 경험적이거나 통계적인 분석을 제외하면 인성치들의 의미를 규명하기에는 아직 많은 연구가 이루어져있지 않은 상태이다.

3.3.2 강도적 불균질의 영향

강도적 불균질이 용접부에 미치는 영향에 대해서는 주로 정적강도, 취성파괴, 피로파괴, 크리프 강도 등에 관하여 실험적으로 연구되어 왔는데, 90년대 이후에는 이들 영향에 대한 보다 역학적 관점의 깊이 있는 연구가 활발히 진행되고 있다. 강 용접부에 강도적 불균질이 존재하는 가장 큰 원인은 모재보다 높은 강도레벨의 용착금속을 사용하기 때문이다. 그 외 용접열사이클에 의해 일어나는 HAZ의 경화(저강도 탄소강 등)와 연화(조질 고장력강 등), 용접성을 고려하여 모재보다 강도가 낮은 용착금속을 사용한 연질 용접 이음부(9% Ni강, 고장력강 등), 다층 용접에서의 복잡한 열사이클에 따른 HAZ내의 강도분포 등을 이유로 들 수 있다.

이러한 강도적 불균질의 존재는 다음과 같은 문제들을 야기한다. 첫째는 균열선단 부근에서의 응력과 변형률이 균질재와는 다르므로, 적절한 파괴지표변수를 설정해야하는 문제점이다¹⁷⁻¹⁹⁾. 강도비 $Sr(= \sigma_{y,WM} / \sigma_{y,BM})$ 가 1이 아닌, 즉 강도적 불균질을 가진 균열재의 기본 모델은 용접선과 균열이 평행한 L-타입과 수직인 P-타입의 2가지로 나눌 수 있는데, 용접부의 인성 평가시 균열의 도입형태는 P-타입이 대부분이므로 소성변형의 양상이 균열을 중심으로 비대칭이 되는 문제점이 발생하게 된다. 또, 샤피 충격시험치와 J적분의 경우에는 시험편 전체 변형의 적분치를 나타내는 지표로서 응력과 변형률의 분포를 가지고 있는 경우에는 사용하기 어려운 경우가 많다. 두번째 문제점은 균열선단주위의 소성구속도, 즉 응력다축도의 변화에 기인한 파괴한계에의 영향이다. 강도적 불균질은 균열선단부근의 소성구속의 정도를 변화시켜 파괴발생인성에 영향을 미친다. 특히 균열선단 부근에 고강도재가 존재하는 경우에는 고강도재에 의해 변화가 구속되어서 얻어지는 파괴인성이 그 재료의 고유의 파괴인성보다 작게 나타나게 된다. 이러한 소성구속 효과를 평가하기 위해서는 Weibull stress를 변수로 하는 Local Approach가 자주 사용되고^{20, 21)} 균열주위의 구속도에

대한 유한요소해석이 필수적으로 요구된다²²⁻²³⁾. 최근에는 이러한 강도적 불균질에 의한 구속효과를 응용한 소형시편 시험법의 개발도 행해지고 있다²⁴⁾.

3.4 파괴인성 scatter에 따른 유효시험편 개수와 대표파괴인성의 결정

용접열영향부는 그림 1에 나타낸 바와 같이 다양한 금속학적 및 역학적 인자를 가지고 있기 때문에 파괴인성 시험결과 얻어진 인성치에는 일반적으로 많은 scatter가 존재한다. 이러한 scatter는 재료등급, 시험 온도, 결함 크기 및 형상 등에 따라 더욱 극대화된다.

파괴인성 평가시 이러한 scatter가 야기하는 실질적인 문제점은 유용한 파괴인성 데이터를 확보하기 위해 유효시험편의 개수를 결정하여야 한다는 점이다. 특히 용접구조물의 사용적합성을 평가하기 위해서는 최고 취약부의 인성을 파악하여야 하므로 scatter를 조절할 수 있는 유효시험편의 개수 결정은 매우 중요하다. 이를 위하여 일반적으로 사용되고 있는 방법은 3개 혹은 5개 이상의 시험을 수행하여 최저값을 이용하는 방법이다. 하지만 이 방법은 어떠한 공학적 배경보다는 경험에 의존하고 있는 것이 사실이다. 예로 미국석유협회 규격 API 1104에서는 경험적인 방법인 3+3방법을 제안하고 있다. 즉, 3개 시험편에 대하여 실험을 행한 후 1개의 시험편이 요구치를 만족하지 못할 경우 다시 3개 시험편의 추가 실험을 행하는 방법이다.

이러한 경험적 방법을 지양하기 위하여 보다 공학적 배경을 가지고 있는 방법들이 제안되었다. Muncner²⁵⁾는 실험 결과의 scatter를 결정하기 위하여, 한계 CTOD 인성(δ_c)의 온도의존성에 대한 다음과 같이 간단한 수학적 관계를 이용하여 regression 분석을 행함으로써, 온도 T에 따라 통계적으로 처리하였다.

$$\delta_c = A + B \exp C(T+273) \quad (2)$$

이때, 시험편수는 한 온도당 3개 이상을 이용하였고, 온도의존성을 결정하기 위해서는 최소 6개 이상을 이용하였다. 하지만 이러한 모델은 파괴인성이 나타내는 scatter 범위를 평가하기에는 적당하다고 판단되지만 scatter의 조절방법을 제공하기에는 적절하지 못하다. Kaihara 등은 3+3 방법을 보다 체계적으로 보완한 방법을 제안하였다²⁶⁾. 이는 인장하중하에 놓인 실제 균질재와 3점 굽힘시험편 사이의 구속도 차이를 고려하여 요구 인성치를 보다 세분화함으로써 유효 시험편 갯수를 조절하는 방법이다.

한편, LBZ에 존재로 인한 scatter는 LBZ의 크기가

증가함에 따라 줄어들게 되는데, Toyoda는 확률론적으로 접근하여 평균 파괴인성치와 LBZ 크기의 관계를 다음 식으로 나타내었다²⁷⁾.

$$F_l(\delta_c) = 1 - [1 - F_{l_0}(\delta_c)]^{l/l_0} \quad (3)$$

식에서 l 과 l_0 는 LBZ 크기이고, 이러한 크기의 LBZ를 가진 시험편이 δ_c 에서 파괴를 일으킬 확률이 F 이다.

만일 LBZ를 포함한 영역의 CTOD값이 Weibull 분포를 따를 경우에는 임의의 cumulative frequency(x)에서의 CTOD값은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\delta_c(x)_l = \delta_c(x)_{l_0} \cdot (l_0/l)^{1/\alpha} \quad (4)$$

식에서 α 는 LBZ에 대한 Weibull 형상인자이다. 이는 최고취약부형태로 파괴가 일어날 때만 적용이 가능하므로 파괴인성치를 결정하기 위해서는 균열선단주위에 존재하는 LBZ 크기의 확인이 필수적이다. 이를 위한 방법은 3.6절에 나타내었다.

3.5 균열선단의 응력-변형을 고려한 변수결정

시험을 통하여 클립 게이지로부터 얻은 CMOD(crack mouth opening displacement)로부터 CTOD, 즉 δ 를 계산하기 위하여 기존의 ASTM과 BS 표준규격에서는 strip yield model과 hinge model을 혼합한 (5)식이 이용된다. (본고의 모든 CTOD 시험은 내부 knife edge를 가정하였다)

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_{ys}E} + \frac{r(W-a)}{a+r(W-a)} V_g \quad (5)$$

윗 식에서 K 는 시험편의 형상과 하중방식에 따른 응력확대계수를 의미하고, σ_{ys} 와 ν 는 재료의 항복강도와 포와송 비를 나타낸다. 또, r 은 회전인자, V_g 는 CMOD를 각각 의미한다.

그러나 전술한 바와 같이 강도적 불균질이 존재할 경우에는 용접부 시험편의 균열주위의 응력장은 비대칭이 되어 적절한 형태로 균열함수를 변형해 주어야 한다. 이에 대하여 Satoh 등은 Local CTOD의 개념을 도입하여 비대칭성을 극복하려고 하였다²⁸⁾.

실질적인 예로서, 균열개구 변위가 비대칭이 되어 양측의 회전인자가 다른 경우에는, 회전인자 r 을 균열개구 양측에 균일하게 사용하는 식 (5)를 사용할 수 없게 된다. 따라서 강도적 불균질을 가진 X 개선 용접부의 용융선 부근을 평가할 경우에는 균열개구의 비대칭 개념을 도입하고, 모재와 용착금속 항복강도의 혼합률

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2[\sigma_{YS,WM}X + \sigma_{YS,BM}(I-X)]E} + \left[\frac{r_1(W-a)}{a+r_1(W-a)} \frac{\alpha}{1+\alpha} + \frac{r_2(W-a)}{a+r_2(W-a)} \frac{1}{1+\alpha} \right] V_g \quad (6)$$

을 적용한 다음 식 (6)으로 합리적인 CTOD를 구할 수 있었다⁹⁾.

위의 식에서 X는 평가대상 위치에서의 용착금속 길이 분율, α는 균열개구 양측의 변위비 V₁/V₂이고, r₁과 r₂는 균열개구 양측의 서로 다른 회전인자이다. 이러한 예와 같이 실용접부 파괴인성 시험을 평가하기 위해서는 파괴 변수의 적절한 조절을 최대한 고려하여야 한다.

3.6 시험후 검사를 통한 시험결과의 유용성 확인

다중용접부에서 채취한 파괴인성시험편에는 균열선단에 LBZ를 포함한 다양한 미세조직을 포함하고 있다. 용융선 부근의 경우에는 균열선단을 점유하는 미세조직 분포, 특히 LBZ의 크기에 영향을 받으므로 시험편 채취 방법에 의해 크게 좌우된다. 채취법의 문제는 시험의 목적에 의존하므로 시험방법의 명확화가 중요한 과제이다. 통상의 시험에서는 HAZ의 하한인성(lower bound toughness)의 평가가 주요 목적일 경우가 많은데, 이러한 경우에는 저인성부가 균열선단에 어느 정도 이상 포함되어 있어야 한다. 이는 균열선단의 LBZ 크기가 작을수록 인성치는 일반적으로 크게 나오기 때문이다. 여러 가지 규격에서 이 LBZ 크기를 명시하고 있는데, API RP 2Z는 CGHAZ가 균열전선의 15%이상일 것을 요구하고 있고, IIW Welding Guideline³⁾은 주목하는 LBZ 크기가 균열전선에서 적어도 7~8mm 이상을 요구하고 있는 실정이다. 따라서 하한 인성을 평가하기 위해서는 반드시 시험후 시험편을 절단하여 LBZ 크기(주로 CGHAZ의 분율)을 확인하여야 한다.

시험후 결과의 유용성 평가를 위하여 관찰해야하는 또 다른 대상은 평가위치의 정확성이다. 이는 강도적 불균질에 따라 균열좌우의 소성변형 축적량이 비대칭을 이루게 될 경우, 최종적으로 HAZ 시험결과가 평가 대상지역의 인성치를 반영하지 않는 경우가 자주 관찰되기 때문이다. Minami 등²⁹⁾은 경질 용접부(overmatched joint)의 경우, 연한 모재쪽으로 균열의 편차가 일어남을 보고하였고, 본 저자들³⁰⁾도 연질 용접부(undermatched joint)에서 연한 용착금속쪽

으로의 균열경로 편차를 관찰한 바 있다. 강한 용착금속과 상대적으로 연한 모재에 따른 소성구속과 소성축적량의 비대칭에 의해 균열전파경로, 파괴개시점 등이 원하는 시험영역에서 편차를 나타낸다. 따라서 시험후 시험편 절단을 통하여 노치 위치, 균열전파경로, 파괴시작점이 목표하는 영역에서 일어났는가를 관찰하여야 결과의 유용성을 판단할 수 있다. 시험편 절단절차로는 API RP 2Z의 절단순서와 Minami 등²⁹⁾이 제안한 순서를 복합적으로 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

3.7 Pop-in의 평가

파괴역학적 인성시험시 관찰되는 pop-in은 (1) 평면응력으로부터 평면변형으로의 천이에 기인한 정상적인 pop-in과 (2) LBZ와 같은 미세조직의 분포에 기인한 다중 pop-in이다. 이중 첫 번째는 각종 균질재의 파괴인성 시험규격에서 허용기준을 제시하고 있는데, 이는 소량의 두께증가가 시험편의 취성파괴를 유발할 수 있기 때문이다. 두 번째 경우에 대하여는 기존 규격에서 언급하고 있지 않지만, 실질적으로는 pop-in을 원인별로 구별하기 힘들기 때문에 역시 중요하게 다루어져야 한다. 이러한 용접부의 다중 pop-in은 LBZ의 인성, 크기 및 시험편 형상에 의존한다.

초기 pop-in 연구에 대한 관심은 (1) pop-in은 매우 작은 하중에서 발생하는데, 그 값이 최소인성치로서 의미가 있는 것인가 (2) pop-in의 발생이 취성균열이 주위의 고인성영역에 의해 정지되기 때문인지, 아니면 응력 기울기 및 시험편 표면으로부터의 응력파의 반사 등의 시험변수에 의한 것인지 등의 발생원인에 관한 연구와 (3) 3점 굽힘 CTOD시험에서 발생하는 pop-in이 인장하중하에 놓인 실제 대형구조물의 pop-in 발생가능성을 대변할 수 있을 것인가 하는 의문들로 모아졌다. 초기에는 주로 9% Ni강을 대상으로 하여 pop-in의 해석에 대한 많은 연구가 수행되었고, 그 결과 pop-in이 그리 큰 위험요소가 아님이 발견되었다³¹⁾. 그 후 일단은 용접부의 pop-in에 대한 해석여부도 균질재를 위한 파괴인성시험의 규격에 따라 행하는 것이 일반적이다.

한편, 용접부의 다중 pop-in을 구별하여 허용기준을 구체적으로 제시하는 보고들이 있다. BS 7448 Part 2의 규격에서는 모재에 대한 표준시험기준(예를 들면 BS 7448의 Part 1)의 pop-in 허용기준을 만족할 것과 더불어, 두께관통균열과 표면균열 각각의 경우에 대하여 피로예비균열선단의 pop-in 발생 미세조직의 크기가 균열선단 인근에 위치한 유사한 미세조직 크

기 및 pop-in 균열길이보다 클 때만이 pop-in을 허용할 수 있다고 명시하고 있다. 이는 약간의 노치위치 변화에도 pop-in의 양이 엄청나게 증가할 수 있기 때문이다. 또, Arimochi 등³²⁾은 pop-in 균열의 평균속도와 pop-in 균열성장시 균열선단주위의 응력장의 변화에 대해 연구한 결과, CTOD시험시 pop-in 균열의 평균전파속도는 약 200m/s이고, pop-in 균열의 크기가 일정크기 이하에서는 응력상태가 변하지 않는다고 보고하였다. 그러므로, 균열정지 시간을 기준으로 응력상태의 변화점 이전에 균열이 정지하면 허용할 수 있다고 주장하였다.

하지만 정지된 취성균열로 인하여 다른 모드로 취성 파괴가 재개될 가능성은 여전히 남아있고, 표면으로부터의 응력과 반사효과에 대한 해석이 불분명하며, 실 구조물의 파괴거동과의 관계해석은 아직까지 명확히 규명되지 않았으므로 pop-in은 여전히 주의를 기울여 해석해야할 대상이다.

4. 결 언

이상에서 용접부 파괴인성 시험이 해결해야할 문제점에 대하여 리뷰하였다. 본문에서 소개한 내용 외에도 pipe나 tube로부터의 실두께 시험편의 채취법, 균열정지 파괴인성 평가, 대형 시험편과 소형 시험편사이의 구속도 차이에 대한 정의, CTOA(crack tip opening angle)와 σ_0 등 새로운 파괴인성 시험법의 유용성 검토, 용접부에 대한 J, K, CTOD 인성사이의 관계규명 등 중요한 주제들이 많이 남아있지만 지면관계로 생략하였다.

현재 용접부에 대한 파괴인성 시험법은 BS 7448을 시작으로 표준화 연구가 거의 완성단계에 이른 상태이지만, 용접부가 가진 다양한 불연속성에 기인하여 아직까지도 많은 논의가 이루어지고 있다. 국내에서도 다양한 인프라 구조물의 대형화추세에 따라 용접구조물의 사용적합성(fitness-for-purpose) 평가에 대한 요구가 커질 것으로 예상되는 만큼 이러한 논의가 활발히 진행되어 용접부 파괴인성 시험법의 국내 규격화까지 이어질길 기대한다.

참 고 문 헌

1. S.J. Squirrel, H.G. Pisarski and M.G. Dawes: BSI/SM/4/4, Working Party Report (1986)
2. ASTM E24 Committee, Draft ASTM Test Standard for Fracture Toughness Testing of Weldments, ASTM E24. 06.05.(1991)

3. M. Toyoda, IIW Doc. X-1217-91(1991)
4. 佐 那産, 豊田 政男: 溶接部の靱性要求と靱性試験法, 溶接學會誌, 55-3(1986), 144-151
5. D.P. Fairchild: Fracture Toughness Testing of Weld Heat-Affected Zones in Structural Steels, Fatigue and Fracture Testing of Weldments, ASTM STP 1058, H.I. McHenry and J.M. Potter, Eds., ASTM STP 1058, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, 117-141
6. M.G. Dawes: Metal construction and British Welding Journal, 3-2(1971), 61
7. O.L. Towers and M.G. Dawes: ASTM STP 856, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985, 23
8. S. Machida, T. Miyata, M. Toyosada and Y. Hagiwara: Study of Methods for CTOD Testing of Weldments, Fatigue and Fracture Testing of Weldments, ASTM STP 1058, H.I. McHenry and J.M. Potter, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, 142-156
9. J.-i. Jang, Y.-c. Yang, W.-s. Kim and D. Kwon: Adv. Cryo. Eng.-Mater., 44(1998), 41-48
10. T. Haze and S. Aihara: Proc. 7th Int. Conf. OMAE, 1988, 515
11. J.H. Chen, Y. Kikuta, T. Araki, M. Yoneda and Y. Matsuda: Acta. Metall., 32(1984), 1779
12. S. Lee, B.C. Kim and D. Kwon: Correlation of Microstructure and Fracture Properties in Weld Heat-Affected Zones of Thermomechanical Controlled Processed Steels, Metall. and Mater. Trans. A, 23A(1992), 2803-2816
13. H. Okada, F. Matsuda and Z. Lee: The Behavior of M-A Constituent in Simulated HAZ with Single and Multiple Thermal Cycles, Q. J. Jpn. Weld., 12-1(1994), 126-131
14. J.-i. Jang, W.-s. Kim, Y.-c. Yang and D. Kwon: Proc. 18th Int. Conf. OMAE, Newfoundland, Canada, MAT-2419 (1999) (Published on CD-ROM)
15. C.L. Davis and J.E. King: Cleavage Initiation in the Intercritically Reheated Coarse-Grained Heat-Affected Zone, Metall. and Mater. Trans. A, 25A(1994), 563-573
16. 豊田 政男: 不均質性をもつ溶接継手の破壊強度, 溶接學會誌, 59-3(1990), 166-173
17. M. Toyoda: Mechanical Modeling of HAZ Microstructure with Particular Reference to Fracture Toughness, IIW Doc. X-F-006-94(1994)
18. K.-H. Schwalbe: Int. J. Frac., 62(1993), 1
19. K. Michida, H. Hiramatsu, H. Hasegawa, H. Matsumura and M. Toyoda: Stress/Strain Behavior at Stable Crack Growth Resistance of Mis-matched Weld Joints, Q. J. Jpn. Weld. Soc., 14-2(1996), 406-413
20. F. Minami, M. Toyoda, T. Thaulow and M. Hauge:

- Effect of Strength Mismatch on Fracture Mechanical Behavior of HAZ Notched Weld Joint, IIW Doc. X-1301-94(1994)
21. F. Minami, T. Katou, T. Nakamura and K. Arimochi: Equivalent CTOD Concept for Fracture Toughness Requirement of Materials for Steel Structures, Proc. 18th Int. Conf. OMAE, Newfoundland, Canada, MAT-2130(1999) (Published on CD-ROM)
 22. M.T. Kirk and R.H. Dodds, Jr.: Int. J. Frac., 63(1993), 297
 23. Y.-J. Kim, G. Lin, A. Cornec and K.-H. Schwalbe: Fully Plastic Analyses for Extremely Mismatched Bimaterial Bending Specimens with Interfacial Cracks, IIW Doc. X-F-019-95(1995)
 24. M. El-Shennawy, F. Minami, M. Toyoda, and K. Kajimoto: Crack-tip Plastic Constraint Activators and the Application to Plane-Strain Fracture Toughness Test: Proposal on Small-Size Fracture Toughness Specimen, Eng. Frac. Mech., 63(1999), 447-479
 25. L. Muncner: IIW Doc. X-1070-84(1984)
 26. S. Kaihara, T. Murayama, T. Kohno, F. Minami, M. Toyoda and K. Satoh: Applicability of Bending Critical CODs for Assessing Fracture Strength of Low-Temperature Service Steel Weldment, Q. J. Jpn. Weld. Soc., 4-1(1986), 176-181
 27. M. Toyoda: Proc. EVALMAT89, ISIJ, 1989, 731
 28. K. Satoh, M. Toyoda, F. Minami, K. Arimochi, M. Nakanishi and S. Satoh: A Proposal of Generalized COD Criterion and Its Application to Welds, Q. J. Jpn. Weld. Soc., 2-3(1984), 447-455
 29. F. Minami, Y. Nakano, S. Suzuki, T. Shiwaku, Y. Moriya, Y. Hagiwara and M. Toyoda: Fracture Toughness Evaluation of Multipass Weld HAZ with Focus on Mechanical Mis-Matching Effect, Q. J. Jpn. Weld. Soc., 12-4(1994), 568-574
 30. J.-i. Jang, J.-B. Ju, W.-s. Kim and D. Kwon: ETCE/OMAE 2000 Joint Conference, MAT-2110(2000) (Published on CD-ROM)
 31. C. Thaulow: Proc. EVALMAT89, ISIJ, 1989, 643
 32. K. Arimochi, K. Iska and M. Nakanishi: Q. J. Jpn. Weld. Soc., 3-1(1985), 89



· 장재일(張宰濬)
· 1968년생
· (주) 프론틱스 연구개발부
· 용접부 파괴 및 건전성 평가
· e-mail : jijang@frontics.com



· 김우식(金愚植)
· 1963년생
· 한국가스공사 연구개발원
· 재료의 파괴거동 및 건전성 평가
· e-mail : wskim@kogas.re.kr



· 이백우(李柏雨)
· 1975년생
· 서울대학교 재료공학부
· 마이크로 신뢰성 평가
· e-mail : leebew@snu.ac.kr



· 주장복(朱章福)
· 1973년생
· 서울대학교 재료공학부
· 용접부 파괴 및 건전성 평가
· e-mail : jjbbb@snu.ac.kr



· 권동일(權東一)
· 1957년생
· 서울대학교 재료공학부
· 마이크로 신뢰성 및 박막역학
· e-mail : dongilk@gong.snu.ac.kr