

선급 극후물 강재 용접부 취성균열 정지특성

박준식 · 정보영 · 안규백 · 이종봉

Crack Arrest Toughness of Thick Steel Plate Welds for Ship Building

Joon Sik Park, Bo Young Jung, Gyu Baek An and Jong Bong Lee

1. 서 론

최근 조선산업에서는 수송효율의 향상을 위해 선박의 전용선화 및 대형화가 이루어지고 있다. 이에 따라 컨테이너선의 대형화도 급속히 진행되어 1995년경에는 6000~7000 TEU급의 컨테이너선들이 주력을 이루었으나, 2007년부터는 10,000 TEU급 이상의 초대형 컨테이너선이 건조될 예정이다¹⁾. 컨테이너선의 대형화에 따라 적용되는 강재의 강도와 두께도 증가하고 있으며, 8000 TEU급 이상의 컨테이너선에는 355MPa 이상의 항복강도, 70mmt 이상의 두께를 가지는 극후물 강재가 선체 Hatch-coaming 부에 적용되고 있다¹⁾.

선박의 고강도화 및 극후물화가 진행됨에 따라 선체 구조물의 파괴 특성에 대한 관심이 높아지고 있는데, 파괴 특성은 크게 균열생성의 관점(crack initiation fracture toughness)과 균열정지의 관점(crack arrest fracture toughness)으로 구분될 수 있다. 지금까지 선체 설계에서의 파괴 특성은 주로 균열생성의 측면에 초점을 맞추어 검토되어 왔으나, 최근 일본 연구자들을 중심으로 균열정지의 관점에서 취성균열 정지특성(Crack arrest toughness or Crack arrestability)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 이러한 연구들은 주로 대형파괴시험을 통하여 극후물 용접부의 취성균열 정지특성을 평가하는 방향으로 진행되었으며, 65mmt 이상 극후물재에 대해서는 용접부는 물론 모재에서도 취성균열의 정지가 어렵다는 연구결과를 제시하고 있다. 이는 최근 조선산업에서의 주요 관심분야 중 하나인 초대형 컨테이너선의 건조와 관련된 문제로, 선체 구조의 안정성과 관련하여 체계적인 검토가 필수적이라고 할 수 있다.

이에 본 논문에서는 극후물 용접부의 취성균열 정지특성에 대한 기존 연구동향을 소개하고 주요 연구결과들에서 나타나고 있는 시사점과 문제점을 정리하고자 한다.

2. 취성균열 정지특성의 개념 및 평가방법

취성파괴 현상은 크게 취성균열 발생과 취성균열 전파의 두 단계로 나누어 볼 수 있다. 기존의 선체에 대한 파괴 설계는 취성균열 발생의 억제에 초점이 맞추어져 왔으며 이에 따라 균열생성 파괴인성(Crack initiation fracture toughness, K_{IC}), 샤르피 충격에너지, CTOD 등의 특성을 측정하여 사용 강재의 파괴인성을 $vudrk$ 하고 선체 설계에 적용해왔다⁴⁾.

취성균열 정지는 응력이 집중된 부분이나 결함, 또는 국부적인 취화영역에서 취성균열이 발생한 경우, 균열이 일정 길이 이상으로 전파하여 구조물 전체의 안정성에 영향을 끼치기 전에 정지시키는 개념으로 취성균열 정지특성이 우수한 소재가 균열 발생부 주변을 둘러싸고 있어야 한다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 이러한 취성균열의 정지는 균열이 전파하면서 균열첨단에서 방출되는 탄성에너지와 균열첨단에서 일어나는 소성변형에 흡수되는 에너지가 평형상태를 이룰 때 일어나게 되며, 균열정지 파괴인성 (Crack arrest toughness, K_{ca}) 또는 균열정지온도 (Crack arrest temperature, CAT) 등의 값으로 평가된다⁵⁾. 취성균열 정지에 대한 연구는 1953년 Robertson⁶⁾이 균열정지온도의 개념을 제안하면서부터 시작되었으며, 1970년대에 이르러 높은 안정성이 요구되는 압력용기, 액화가스 저장탱크, 강관 및 해양구조물의 설계에 이용되기 시작하였다⁵⁾. 1980년대 이후에는 주로 일본 연구자들을 중심으로 철강소재의 개발과 관련하여 취성균열 정지특성의 연구가 이루어져 왔고^{7,8)}, 최근에 들어서는 선급용 극후물 강재의 용접부가 가지는 취성균열 정지특성에 대한 연구가 활발하게 진행 중에 있다¹⁻³⁾.

취성균열 정지특성의 평가방법은 크게 대형시험법과 소형시험법의 두 가지로 분류되는데, 대형시험법으로는 Robertson test, ESSO test, Double tension test 등이 있으며, 소형시험법으로는 샤르피 충격시험, Drop-

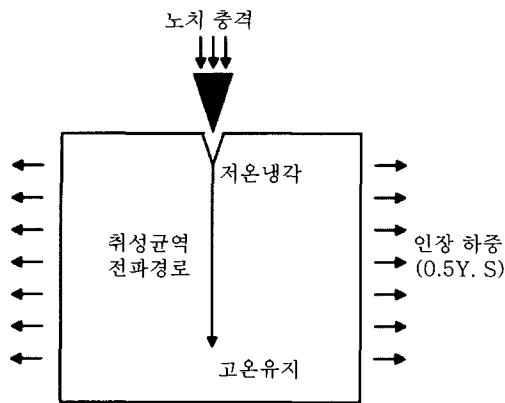


Fig. 1 Schematic diagram for temperature gradient ESSO test

weight(Pellini) test, Drop weight tear test, Compact crack arrest(CCA) test 등이 있다⁵⁾. 소형시험법은 주로 대형시험법을 모사하기 위해 고안되었으며, 소형시험에서 얻어진 결과값을 통해 대형시험에서의 측정값을 유추하는 데 활용되었다. 최근 이루어지고 있는 선급용 극후물 강재의 취성균열 정지특성에 관한 연구에서는 대부분 온도구배 ESSO 시험을 채택하고 있으므로¹⁻³⁾ 이에 대하여 자세히 다루고자 한다.

그림 1은 온도구배 ESSO 시험법의 개략도를 보여주고 있다. 우선 시편 한쪽 면에 노치를 가공한 후 대형인장시험기에 장착을 한다. 냉각 챔버를 설치하여 노치 부근은 저온으로 냉각하여 균열 생성 및 전파를 용이하게 하고, 균열 전파 방향을 따라 온도를 상승시켜 균열 정지가 발생하도록 한다. 온도구배는 통상 $2.5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 이하가 되도록 제어를 한다. 온도구배의 조정이 마쳐진 후 시편에 인장하중을 가하고, 목표 시험하중에 도달하면 노치에 충격하중을 가하여 균열을 생성, 전파시키고 균열이 정지한 부분의 균열길이를 측정하여 Kca값을 계산한다. 시편의 파단없이 시편내에서 균열을 정지시키기 위해서는 온도구배, 인장하중 및 시편 크기의 적절한 조합을 이루어야 한다. 통상적으로 선박의 최저운항온도(국제선급협회, IACS 기준)인 -10°C 에서의 Kca값을 기준으로 하여 소재의 균열정지특성을 비교하는데, 이를 얻기 위해서는 2, 3회 온도구배 ESSO 시험을 실시하여 외삽법을 통해 -10°C 에서의 Kca값을 계산한다.

3. 선급 극후물 강재 용접부의 취성균열 정지특성에 관한 연구 동향

선급용 강재의 취성균열 정지특성에 관한 연구는 1980년대 이후 주로 일본 연구자들에 의해 진행되어

왔으며⁷⁻⁸⁾ 최근 선급 극후물 용접부의 취성균열 정지특성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다¹⁻³⁾. 특히 선급 극후물 용접부의 취성균열 정지특성에 대한 연구는 일본 연구자들에 의해 수행된 결과를 제외하고는 발표된 문헌 자료가 전무한 실정이므로 다음에서는 이 연구 결과들에 대해서 자세히 설명하고자 한다.

일본조선연구협회 제 147 연구위원회에서는 1980년대에 선급용 강재 용접부의 취성균열 정지특성에 관한 연구를 실시하였는데, 용접부에서 발생한 균열은 용접선을 따라 전파하는 도중 모재쪽으로 방향을 전환하여 전파한 후 모재가 가지는 높은 취성균열 정지특성 때문에 정지하게 된다는 결론을 제시하였다⁹⁾. 그러나 Inoue 등은 이 연구결과들은 주로 40mm이하의 두께를 가지는 강재에 대해서 얻어진 결과이며 대부분의 시험이 25mm의 두께를 가지는 강재를 이용하여 평가하였다는 점을 강조하며 65mm 이상인 극후물에서는 모재로 방향을 전환하지 않고 용접부를 따라 직진 전파를 일으켜 용접부 파단을 야기시킨다고 언급하였다²⁾. 이들은 이를 검증하기 위해 65~70mm의 두께를 가지는 선급용 강재를 이용하여 ESSO 시험을 실시하였다. 2000×2000 mm 정사각형 형태의 시편을 사용하였으며, 온도조건은 온도구배 또는 균일온도 조건을 이용하였고, 시편에 가해진 인장하중은 $185 \sim 353\text{MPa}$ 의 다양한 범위의 값을 적용하였다. 용접부는 EGW 프로세스를 이용하여 입열량 $42.6\text{kJ}/\text{mm}$ 을 적용하였으며 용접선을 따라 균열 전파를 막기 위해 stiffener 형태의 보강재를 부착하였다. 총 5회의 시험을 실시하였으며 보강재로는 시험 2~3은 일반 선급용강을 시험 4~5는 표층초세립강(SUF강)을 이용하였다.

표 1은 5회의 ESSO 시험에 대한 시험 조건 및 시험 결과를 간략히 나타내고 있다. 시험 1의 경우 가해진 응력은 선급용 EH36강의 최소요구 항복강도였으며, 이 경우 균열 정지를 위해 노치 반대편의 온도를 60°C 까지 상승시켰으나 그림 2(a)에서와 같이 균열을 정지시키지 못하고 시편이 파단되었다. 시험 2, 3의 경우에는 일반 선급용강으로 보강재를 부착하고, 응력을 277(EH36강 최소요구 항복강도의 80%), 230MPa(EH36강의 최저 설계응력)로 낮추었음에도 불구하고 균열을 정지시키지 못하고 전파하였다(그림 2(b), (c)). 그러나 시험 2, 3의 경우 시험온도를 국제선급(IACS)에서 제시하는 최저 설계 온도인 -10°C 로 균일하게 유지했다는 점이 주목할 만하다. 시험 4에서는 일반 선급용강 대신 표층초세립강으로 보강재를 부착한 후 ESSO 시험을 실시한 결과 그림 2(d)에서처럼 보

Table 1 Results of ESSO test for thick steel plate welds by Inoue et al in 2006²⁾

| Test | Test region | Temperature | Stress (MPa) | Results | Remarks |
|------|-------------|-------------|--------------|------------------|---------|
| 1 | Weld | -40~60℃ | 353 | Go | |
| 2 | Weld | -10℃ flat | 277 | Go | |
| 3 | Weld | -10℃ flat | 239 | Go | |
| 4 | Weld | -10℃ flat | 185 | Double stiffener | |
| 5 | BM | -10℃ flat | 252 | Go | Branch |

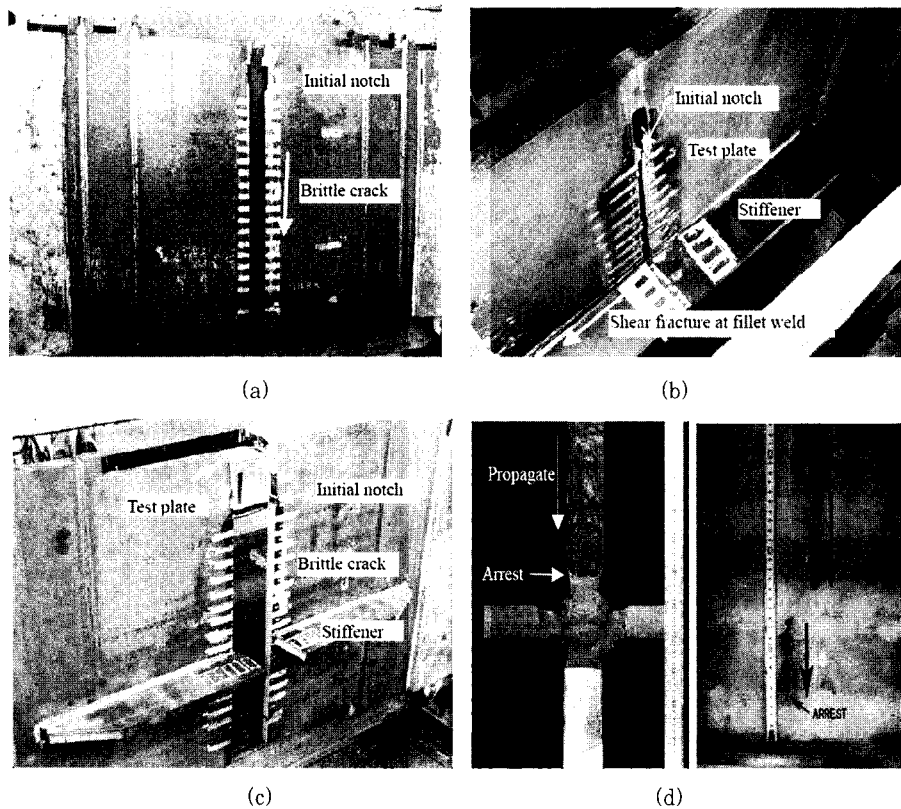


Fig. 2 Crack propagation path in ESSO specimen for (a) test 1, (b) test 2, (c) test 3 and (d) test 4

강재에서 균열이 정지하는 결과를 얻었다고 보고하고 있으나, 시험 응력이 185MPa로 매우 낮은 하중이었다는 점이 특징적이다. 시험 5는 모재의 취성균열 정지특성을 EH36강의 최대 설계응력인 252MPa 조건하에서 평가한 결과로서 -10℃의 균일온도 조건에서 시험한 결과 완전 파단이 발생하였다.

일본조선연구협회 제 193 연구위원회에서는 취성균열을 정지시키기 위해 선급용 강재가 가져야 하는 균열 정지 파괴인성값(Kca)은 통상운항시 3900N/mm^{1.5}, 좌초와 같은 비상시에는 5900N/mm^{1.5} 이상이 되어야 한다고 보고하고 있는데, 이 연구에서 사용된 강재는 모재의 Kca값이 2800N/mm^{1.5}로 요구치에 미달하는

것으로 나타나 완전 파단이 발생한 것으로 설명하고 있다¹⁰⁾.

결론적으로 이 연구에서는 기존의 EH급 선급용 강재로는 65mmt 이상의 후물재의 경우 모재에서조차 취성균열의 정지여부가 불분명하다는 점을 강조하고 있다. 이 후 Inoue 등은 2회의 추가 시험을 통해 용접부 취성균열을 정지시키는 방안을 모색하였고, 이를 다음과 같이 정리하였다³⁾. 앞서 수행한 5회의 ESSO 시험²⁾에 추가하여 보강재의 종류를 변형시킨 시편과 용접이음부 형상을 변형시킨 시편을 이용하여 취성균열 정지특성을 평가하였다. 용접부는 EGW 프로세스를 이용하여 입열량 42.6kJ/mm을 적용하였으며, 사용된 시험응력은

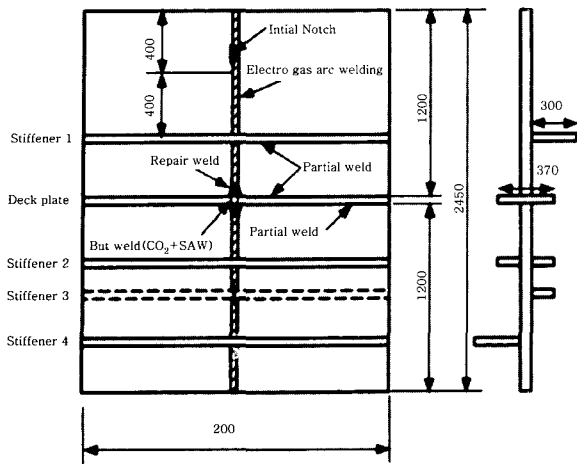


Fig. 3 Schematic diagram of ESSO specimen for test 6

230MPa이었고 시험온도는 -10°C 의 균일온도 조건으로 유지되었다. 앞서 수행한 5회의 시험에서는 stiffener 형태의 보강재를 사용한 반면, 이번에는 그림 3에서와 같이 stiffener 형태의 보강재 이외에 deck plate를 삽입하여 시편을 제작하였다. Deck plate는 표층초세립강을 이용하여 제작되었으며 용접부의 균열이 전파하다가 deck plate의 모재로 전이하여 들어갈 수 있도록 3.5wt% Ni의 용접재료를 이용하여 보수용접을 실시하였다. 표 2는 추가로 수행된 2회의 ESSO 시험에 대한 시험 조건 및 시험 결과를 간략히 나타내고 있다.

시험 6의 경우 표층초세립을 이용한 deck plate에서 취성균열이 정지했으며, 보수용접부를 우회하여 deck plate의 모재쪽으로 균열이 전파해 들어갔음을 그림 4에서 관찰할 수 있다. 시험 7의 경우에는 용접선을 전파해나갔던 균열이 취성균열 정지특성이 우수한 모재와 만나도록 용접이음부를 제작하였으며 용접선을 따라 직진 전파하던 취성균열이 모재 내부에서 정지한 결과를

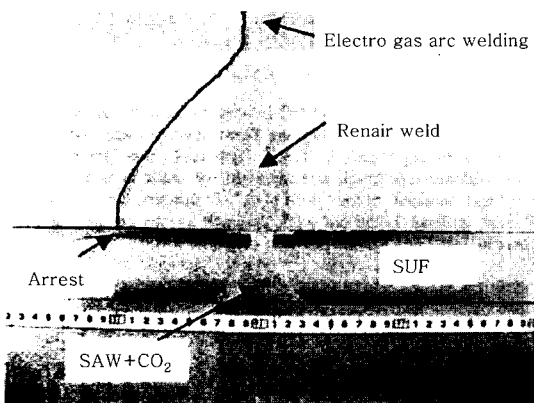


Fig. 4 Macro section of test 6 specimen showing the arrested crack at deck plate

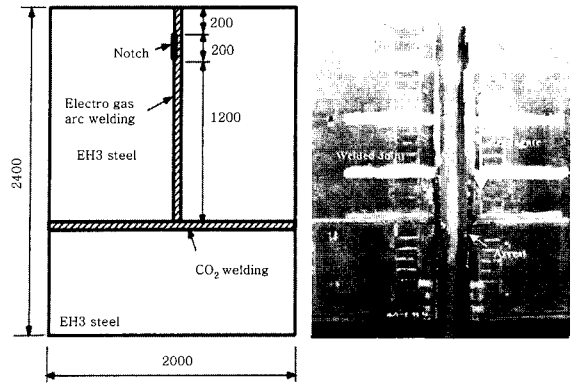


Fig. 5 Brittle crack arrest by the base metal with high crack arrest toughness

보여주고 있다(그림 5). 이 때 사용된 모재는 두께 50mm의 EH47급 선급용 강재로 $5900\text{N}/\text{mm}^{1.5}$ 이상의 Kca 값을 가지는 것으로 기술하고 있다. 즉 본 연구에서는 보수용접과 취성균열 정지특성이 우수한 보강재의 조합 내지는 취성균열 정지특성이 우수한 모재를 활용하여 극후물 용접부의 취성균열을 정지시킬 수 있는 방안을 제시하고 있다.

4. 선급 극후물 강재 용접부의 취성균열 정지특성에 대한 연구 전망

앞서 언급한 바와 같이 선급용 강재의 취성균열 정지특성에 관한 연구는 1980년대 이후 주로 일본 연구자들에 의해 진행되어 왔으며^{7,8)} 최근 대형 파괴시험기를 이용한 선급 극후물 용접부의 취성균열 정지특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻³⁾. 본 연구는 초대형 컨테이너선의 안정성을 확보하기 위해 반드시 해결되어야 하는 과제이지만, 현 단계에서는 일본 연구자들이 이루어낸 성과가 유일한 연구 결과인 실정이며 다양한 관점에서의 폭넓고 깊이 있는 연구가 필요한 초기 단계의 연구분야라고 할 수 있다. 이에 따라 기존 연구결과에 대한 체계적인 분석과 검토를 통해 향후 연구 진행 방향에 대한 기초를 마련하는 것이 필수적이라 하겠다. 우선 일본조선연구협회 제 193 연구위원회의 연구결과를 살펴보면 취성균열을 정지시키기 위해 선급용 강재가 가져야 하는 균열정지 파괴인성값(Kca)은 통상운항시 $3900\text{N}/\text{mm}^{1.5}$, 좌초와 같은 비상시에는 $5900\text{N}/\text{mm}^{1.5}$ 이상이 되어야 한다고 보고하고 있는데, 이 결과들은 대부분 두께 40mm 이하의 강재를 사용하여 얻은 데이터로서, 실제 두께 65mm 이상 선급용 강재에 대해서도 적용이 가능한지 여부는 추가적인 검토가 필요하다고 판단된다.

또한 기존의 연구^{2,3)}에서는 극후물 용접부의 취성균열 정지특성 저하가 문제가 된다는 점을 언급하면서도 용접부의 균열정지 파괴인성 값을 평가한 결과는 제시하지 않고 있으며 용접부를 전파해나간 취성균열이 모재에서 정지할 수 있는지 여부 또는 모재의 균열정지 파괴인성 값을 평가하는데 주력하고 있다. 극후물 용접부의 취성균열 정지특성 저하에 대한 근본적인 파괴기구 및 해결책을 도출하기 위해서는 우선 용접부 자체의 균열정지 파괴인성의 평가가 이루어져야 한다고 여겨진다.

용접부 취성균열 전파경로와 관련하여 일본조선연구협회 제 147 연구위원회에서는 용접부에서 발생한 균열은 용접선을 따라 전파하는 도중 모재쪽으로 방향을 전환하여 전파한 후 모재가 가지는 높은 취성균열 정지특성 때문에 정지하게 된다는 결론을 제시하였으나⁹⁾, Inoue 등은 65mmt 이상의 극후물에서는 모재로 방향을 전환하지 않고 용접부를 따라 직진 전파를 일으켜 용접부 파단을 야기시킨다고 주장하였다²⁾. 일반적으로 선급용 강재의 두께가 증가함에 따라 용접 입열량의 증가는 필수적으로 동반된다. 용접 입열량의 증가는 용접부 잔류응력 분포의 변화를 가져오게 되는데 이러한 잔류응력 분포의 변화는 용접부 취성균열의 전파경로에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다¹¹⁾. 이런 현상은 특히 용접부에 가해진 응력이 잔류응력의 크기와 큰 차이를 보이지 않을 경우 두드러지게 나타나며, 취성균열 전파경로에 인장 잔류응력이 주도적으로 작용하는 경우 취성균열은 용접선을 따라 직선으로 전파하는 것으로 알려져 있다. 또한 취성균열의 전파경로를 바꾸기 위해서는 균열 전파경로에 압축 잔류응력을 형성시키는 것이 효과적이라고 보고되고 있다¹¹⁾. 따라서 극후물 용접부에서 취성균열이 직선으로 전파하는 현상은 단지 강제 두께의 증가에서 나타나는 것으로 결론내리기 어려우며 용접부의 잔류응력 및 이에 미치는 용접 입열량의 영향을 복합적으로 고려하는 것이 필요하다고 하겠다.

마지막으로 극후물재 취성균열 정지특성의 평가방법에 관한 연구가 요구된다. 기존의 극후물재 취성균열 정지특성의 평가는 온도구배 또는 균일온도 ESSO 시험을 통해 이루어졌는데, 이는 가로 1000mm \diamond 세로 1000mm 시편을 기준으로 약 3000톤 이상 용량을 가지는 대형인장시험기와 별도의 노치 충격장비가 요구된다. 극후물재 취성균열 정지특성 연구의 활성화를 위해서는 소형 시험편을 이용한 평가방법의 개발 및 대형 파괴시험 결과와의 상호 비교를 통한 검증에 관한 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 요약

선박의 고강도화 및 극후물화가 진행됨에 따라 선체 구조물의 파괴 특성에 대한 관심이 높아지고 있으며, 최근 균열정지의 관점에서 취성균열 정지특성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 기존의 연구결과에 따르면 65mmt 이상의 극후물 용접부에 대해서 취성균열 정지특성의 저하가 발생할 가능성이 있다고 보고되고 있으며, 취성균열 정지특성이 우수한 강재의 개발 이외에 용접부 보강재의 부착, 보수 용접 실시 등 개선 방안을 마련하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그러나 극후물 용접부 취성균열 전파기구에 관한 규명은 현재 전무한 실정이며, 강제 두께의 영향 이외에 용접 입열량, 용접부 잔류응력 등의 효과가 복합적으로 검토되어야 한다. 아울러 극후물 용접부 균열정지 파괴인성의 평가, 대형파괴시험을 대체할 소형시험법의 개발 및 검증 등에 관한 연구가 요구된다.

참고 문헌

1. 일본조선해양공학회지 3 (2005), 70-76
2. Takehiro Inoue, Tadashi Ishikawa, Shiro Imai, Tadashi Koseki, Kazuhiro Hirota, Masuo Tada, Hiroshige Kitada, Yoshiya Yamaguchi and Hiroshi Yajima: Long crack arrestability of heavy-thick shipbuilding steels, Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference (2006), 132
3. Takehiro Inoue, Tadashi Ishikawa, Shiro Imai, Tadashi Koseki, Kazuhiro Hirota, Masuo Tada, Yoshiya Yamaguchi Toshiyuki Matsumoto and Hiroshi Yajima: Long crack arrest concept in heavy-thick shipbuilding steels, Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference (2007), 3322
4. L. Malik, R. Yee, B. Graville and A. Dinovitzer: Optimized Design Parameters for Welded TMCP Steels, Ship Structure Committee Report 396(1997), 24
5. C. S. Wiesner and B. Hayes: A review of crack arrest tests, models and applications, TWI report (1995)
6. T. S. Robertson: Propagation of brittle fracture in steel, FISI, 175 (1953), 361-374
7. Y. Nakano and M. Tanaka: Crack arrest toughness of structural steels evaluated by compact test, Trans. ISIJ, 22 (1982), 147-153
8. Y. Kawaguchi and A. A. Willoughby: Crack arrest tests and their use for evaluating material properties, Proceedings of 'Fatigue Safe Design for Large Storage Tanks' conference, (1986), 179-194
9. The 147th Research Committee: Evaluation of brittle fracture toughness of welded joints of ship under

high welding heat input, Report No. 87, The Shipbuilding Research Association of Japan, (1978)

10. The 193th Research Committee: Application of 50kgf/mm² class high strength steel plates made of new steel manufacturing process, Report No. 100,

The Shipbuilding Research Association of Japan, (1985)

11. Y. Sumi: Computational crack path prediction for brittle fracture in welding residual stress fields, International Journal of Fracture, **44** (1990), 189-207



- 박준식
- 1974년생
- POSCO 기술연구소 접합연구그룹
- 철강용접
- e-mail : poolside@posco.com



- 안규백(安圭栢)
- 1970년생
- 포스코 기술연구소 접합연구그룹
- 용접 파괴 및 구조
- e-mail : gyubaekan@posco.com



- 정보영
- 1968년생
- POSCO 기술연구소 접합연구그룹
- 철강용접
- e-mail : jbyoung@posco.com



- 이종봉(李種鳳)
- 1953년생
- POSCO 기술연구소 접합연구그룹
- 철강용접
- e-mail : jongblee@posco.co.kr