

고강도 극후판 EH36-TMCP강 EGW용접부의 역학적 거동 및 파괴인성 K_{IC} 에 관한 해석

Analysis of Mechanical Behavior and Fracture Toughness K_{IC} on EGW Welded Joints for High Strength EH36-TMCP Ultra Thick Plate

방 희 선* 방 한 서† 주 성 민**
Bang, Hee-Seon Bang, Han-Sur Joo, Sung-Min
(논문접수일 : 2009년 9월 22일 ; 심사종료일 : 2009년 11월 26일)

요 지

본 연구에서는 EGW공정 적용에 따른 고강도 극후판 EH36-TMCP강 용접부의 역학적 거동 및 파괴인성 K_{IC} 특성을 고찰하기 위해 먼저 자체 개발한 열분포, 열탄소성 프로그램을 이용한 유한요소해석을 통하여 용접부의 역학적 거동(용접잔류응력, 소성변형을 등의 크기, 분포, 발생기구)을 규명하였다. 그리고 이때 얻어진 잔류응력을 초기응력으로 하여 상용프로그램 ANSYS에서 노치가공으로 인한 응력 재분포 특성 및 잔류응력과 외력의 복합하중에 대한 파괴인성 K_{IC} 를 계산하였다. 균열이 존재하는 EGW용접부의 파괴기준 K_{IC} 를 살펴보면, 중첩된 경우가 순수 외부하중(굽힘하중)만 작용하는 경우보다 파괴 인성치가 다소 감소하는 경향을 보였다. a/W 가 작을 경우 중첩의 경우가 순수 외부하중(굽힘하중)만의 경우보다 파괴인성치 차이가 크나, a/W 가 증가함에 따라 그 차이가 점차 없어지는 것으로 나타났다.

핵심용어 : EGW공정, 고강도 극후판, EH36-TMCP강, 용접잔류응력, 파괴인성 K_{IC} , 열탄소성 해석, 파괴해석

Abstract

This work intends to establish the reliability and fracture toughness K_{IC} criterion of welded joints by EGW for high strength EH36-TMCP ultra thick plate. For this, firstly thermo elasto-plastic analysis has been carried out on two pass X-groove butt joint model to clarify the thermal and mechanical behaviour(residual stress, plastic strain, magnitude of stress and their distribution and production mechanism). Moreover, to establish fracture criterion, analysis of fracture toughness K_{IC} has been performed under the notch machined and residual stress with the load condition on EGW welded joints. A quantitative fracture criterion for EGW welded joints is suggested by using K_{IC}

Keywords : EGW(Electro Gas Welding), high strength ultra thick plate, EH36-TMCP steel, welding residual stress, fracture toughness K_{IC} , thermal elasto-plastic analysis, fracture analysis

1. 서 론

최근 조선산업에서는 선박의 전용선화 및 대형화에 따라 고강도 극후물재의 적용이 증대되고 있다. 특히 8000TEU급 이상의 컨테이너선의 경우 종강도를 만족하기 위해서 상부구조 및 해치코밍 부위에는 355MPa이상, 70mm이상의 선급용 고장력강 EH36/EH40 강재가 적용되고 있다. 이러한 극

후판의 적용은 용접 공수가 증가되므로 용접 생산성 향상을 위하여 기존의 다층용접 FCAW 대신, 강제 두께 55mm이하에서는 1Pole EGW공정을 적용하고, 55mm이상은 1Pole EGW공정과 FCAW공정의 혼용 적용 또는 2Pole EGW공정 고능률 대입열 용접 공정이 적용되고 있다. 이와 같이 고강도 극후물재 사용 및 대입열 용접공정 적용에 따른 용접이음부 파괴인성저하 및 피로파괴수명 감소로 최근 일부 국외

† 책임저자, 정회원 · 조선대학교 선박해양공학과 교수
Tel: 062-230-7134 ; Fax: 062-223-5648
E-mail: hsbang@chosun.ac.kr

* 조선대학교 선박해양공학과 교수

** 포항산업과학연구원 용접센터 연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

선급(NK, GL)에서는 사용강재 두께(65mm이상)의 제한 및 엄격한 파괴설계기준을 요구하고 있다. 특히, 용접구조물은 용접열원에 의한 국부적인 가열, 냉각 및 구속 등으로 인해 용접잔류응력이 필연적으로 발생하는데, 이는(용접중심부의 인장잔류응력) 균열 전파력을 증가시켜 피로강도를 감소시키며 취성파괴에 대한 구조물의 저항력을 감소시켜 구조물의 강도적 신뢰성을 저하시킨다(Lee 등, 2008; Kulkarni 등, 2002). 그러므로 건전한 구조물을 설계하고 제작 및 확보하기 위해서는 용접부에 대한 역학적 특성을 명확히 파악하고 아울러, 용접구조물의 역학적인 지표로서 잔류응력을 고려한 파괴역학적 해석이 필요하다.

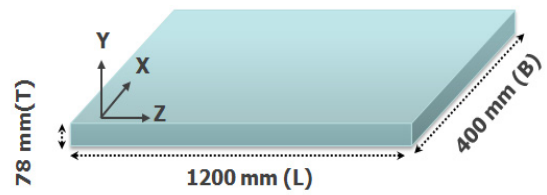
따라서 본 연구에서는 EGW공정 적용에 따른 고강도 극후판 EH36-TMCP강 용접부의 역학적 거동 및 파괴인성 K_{IC} 을 규명하기 위해, 먼저 자체 개발된 열분포, 평면변형 열탄소성 수치해석용 프로그램(Bang 등, 1991; Bang, 1992)을 사용하여 용접부의 역학적 거동(용접잔류응력, 소성변형을 등의 크기, 분포, 발생기구)을 규명하였다. 그리고 이때 얻어진 잔류응력을 초기응력으로 상용프로그램 ANSYS에서 노치공공 효과 해석 및 잔류응력과 굽힘하중의 복합하중에 대한 파괴인성 K_{IC} 를 해석하였다.

2. 수치해석방법

2.1 해석모델 및 용접조건

사용한 강재는 조선용 강재 EH36 grade TMCP강이며, 판두께 78mm에 대하여 대입열 용접 EGW(Electro Gas Welding)을 사용하여 시험편을 제작하였다. 모재 및 용접부의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 시험편의 제원은 선급의 WPQT 및 BS7448에 의거하여 길이(L)=1200mm, 폭(B)=400mm, 판두께(t)=78mm로 선정하였으며, x는 판의 폭방향, y는 두께방향, z는 용접선 방향을 나타낸다. 개선형상은 1:1 양면(X)개선, 개선각은 30도, 루트갭은 현장여건을 감안하여 8mm로 선정하였다. 제작된 용접시험편의 이음부 형상, 용접적층 상태 및 용접 조건은 Fig. 1 및 Table 3, Table 4에 각각 나타내었다.

수치해석 모델 및 요소분할은 시험시편의 개선형상, 개선각, 루트갭 및 응력변화 특성을 반영하여 Fig. 2와 같이 모델을 생성하고, 4절점 아이소파라메트릭요소를 도입하여 총절점수 3,556개, 총요소수 3,433개로 분할하여 해석을 실시하였다. 또한, 파괴인성 평가를 위하여 최저인성부라고 평가되는 Fusion line 근처의 열영향부의 결정립 조대부위(CGHAZ)에 노치를 BS 7448에 의거하여 반영하였다.



(a) Welded specimen and coordinate



(b) Cross section of EGW welded specimen

Fig. 1 Configuration of welded specimen

Table 1 The chemical composition in EH36-TMCP and wire(wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Ti
EH36-TMCP	0.18	0.1 ~0.5	0.9 ~1.6	0.035	0.035	0.4	0.35	0.02
Wire	0.05	0.25	1.6	0.009	0.007	1.4	-	0.05

Table 2 The mechanical property in EH36-TMCP and wire

Material	Y.S(N/mm ²)	T.S(N/mm ²)	E.I.(%)
EH36-TMCP	355	490~620	21
Wire	500	615	25

Table 3 Welding condition of specimen for EGW

Number of Pass (Total/2Pass)	Current (A)	Voltage (V)	Arc Time (S)	Speed (cm/min)	Interpass Temp (°C)
Top(1Pass)	400	42	1589	4.5	116
Bottom(1Pass)	430	44	1310	5.5	162

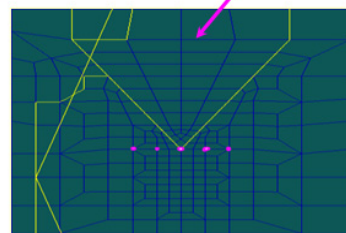
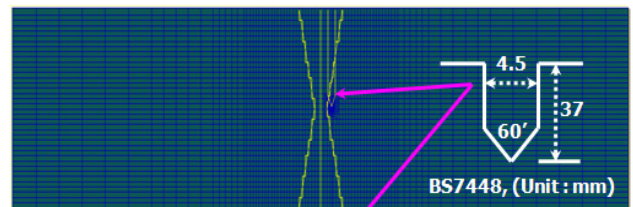


Fig. 2 FE model for numerical analysis

2.2 해석방법

본 연구에서는 EGW용접부에서의 역학적 특성 및 파괴인성 K_{IC} 를 규명하기 위해, Fig. 3에 도시한바와 같이 해석모델의 모델링 및 이에 따른 요소형상 관련 데이터 작성은 MSC사의 PATRAN을 이용하여 작성하고, 다음의 세 단계를 통하여 (1) 용접열전도 (2) 잔류응력 (3) 파괴해석 순으로 유한요소해석을 수행하였다.

- (1) 열전도 해석 : 용접열원에 의한 온도분포의 시간에 대한 변화의 해석
- (2) 잔류응력 해석 : 온도분포 결과를 이용한 열응력, 잔류응력 및 변형의 해석
- (3) 파괴해석 : 잔류응력과 외부하중(굽힘하중)의 복합하중이 주어지는 용접부에 대한 평면변형 파괴해석(Bang 등, 1991)

해석모델에 대한 용접입열(Q)의 계산은 식 (1)에 의거하여 산정하였으며,

$$Q = \eta_a \frac{EI}{V} \tag{1}$$

여기서, Q : 용접아크의 유효 입열량(J/cm), η_a : 아크효율, E : 아크전압(V), I : 아크전류(A), V : 용접속도(cm/sec)

용착금속의 각 요소에 대한 입열 (q)는 식 (1)을 칼로리로 환산 한 식 (2)을 이용하였다.

$$q = \frac{Q \times l}{4.19 \times A \times l \times t} \tag{2}$$

여기서, q : 열유속(cal/cm².sec), l : 용접선길이(cm), t : 용접시간(sec.), A : 입열요소면적(cm²)

● Fracture toughness K_{ic} analysis considering welding residual stress

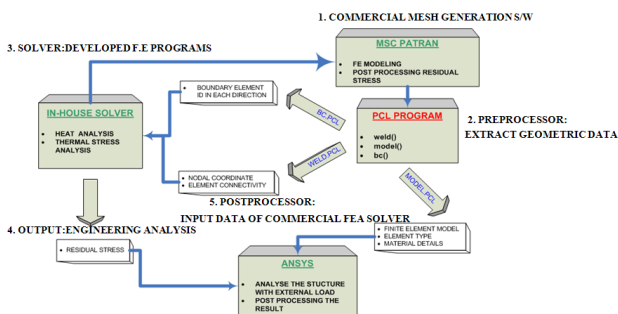


Fig. 3 Typical architecture of the data transferring

용접부의 평면변형을 파괴인성 K_{IC} 해석시, 용접부의 실제 시험편의 준비과정과 동일하게 용접부에 기계노치를 생성시켜 노치 가공효과 및 예비균열을 고려하여, 굽힘하중 작용시 파괴가 시작하는 점(임계하중)에서의 응력확대계수(Stress intensity factor)를 계산하였다.

먼저 임계하중 P_Q 를 결정하기 위해 하중증분의 원리를 이용하여 3점굽힘에 대한 하중·클립게이지 변위선도를 구하여 하중·클립게이지 변위선도에서 선형역의 구배보다 5% 낮은 구배의 직선과 하중 클립게이지선도의 교점에 해당하는 하중 P_S 를 임계하중 P_Q 로 간주하였다. 따라서 이 때 얻어진 임계하중 P_Q 에 대한 응력확대계수(K_Q)를 수치해석을 통하여 구하고 식 (3)에 의거하여 유효성을 평가하여 K_Q 를 평면변형 파괴인성 K_{IC} 로 간주하였다.

$$B, a \geq 2.5(K_Q/\sigma_Y)^2 \tag{3}$$

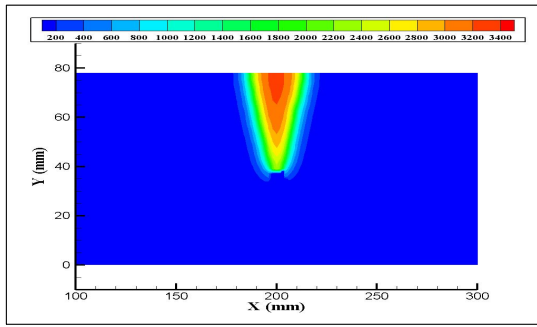
여기서, B : 시험편의 폭(mm), a : 크랙길이(mm), σ_Y : 항복응력(Mpa)

3. 결과 및 고찰

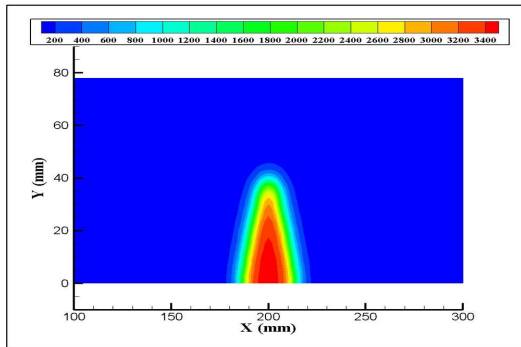
3.1 극후판 EGW 용접부의 열적 특성

본 절에서는 극후판 EGW 용접부의 열거동에 대해 고찰해 보았다. 해석은 다층-다패스(Multi-layer, Multi-pass)를 고려하여 수치해석을 수행하였으며, 공정의 용접조건(패스수, 입열량 등)에 따라 시간별, 위치별 열적 특성을 고찰하였다. Fig. 4 (a), (b)의 그림은 해석시험편 단면의 각 패스별 최고온도가 나타나는 시점의 온도분포이다. (a)는 전면용접부의 용접 1pass 개시 후 2초일 때, (b)는 후면용접부의 용접 2pass 개시 후 2초일 때의 온도 분포도이다. 온도분포 특성을 살펴보면, 입열량이 클수록 상대적으로 용착금속부 및 고온 분포역이 크게 나타나고 있다. 그리고 후행 용접된 후면용접부의 온도분포가 선행 용접된 전면용접부의 온도영향으로 다소 상승함을 보이고 있다.

Fig. 5는 해석시험편의 균열선단부의 시간에 따른 온도이력을 나타낸 것이다. (a)는 전면용접부의 용접 1Pass시 시간에 따른 온도이력이고, (b)는 후면용접부의 용접 2Pass시 시간에 따른 온도이력 곡선이다. 균열선단은 용접부 Fusion line 근처의 열영향부 결정립 조대부위(CGHAZ)의 온도영역에 해당되는 온도 1,300℃ 영역을 겪고 패스가 증가함에 따라 온도구배가 다소 완만해지는 열싸이클 영향을 받고 있음을 알 수 있다.



(a) 1Pass



(b) 2pass

Fig. 4 Temperature fields in the xy plane in heating stage

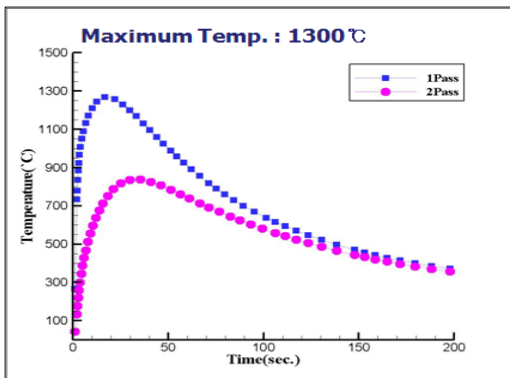
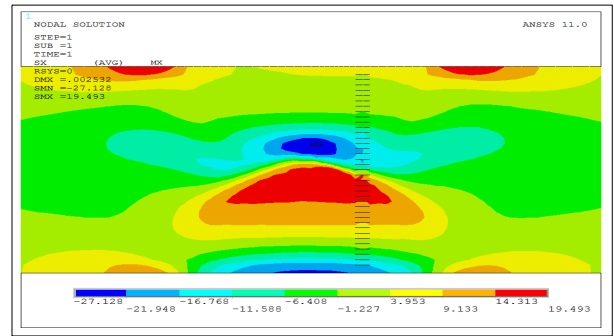


Fig. 5 Temperature history of crack tip

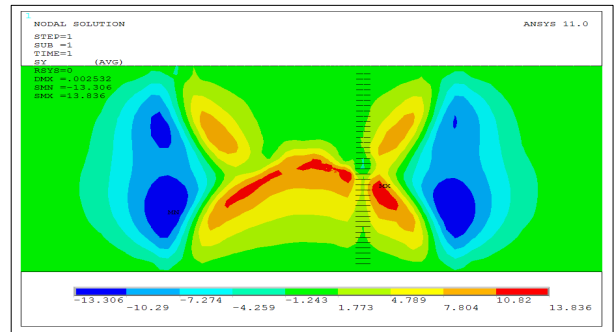
3.2 극후판 EGW 용접부의 역학적 특성

전 3.1절에서 수행한 연구결과 즉, 용접열원의 크기 및 분포를 열하중으로 용접체에 발생하는 역학적 메카니즘 및 용접 제현상(용접잔류응력 및 소성변형율의 분포 및 발생기구)을 규명하고자 하였다.

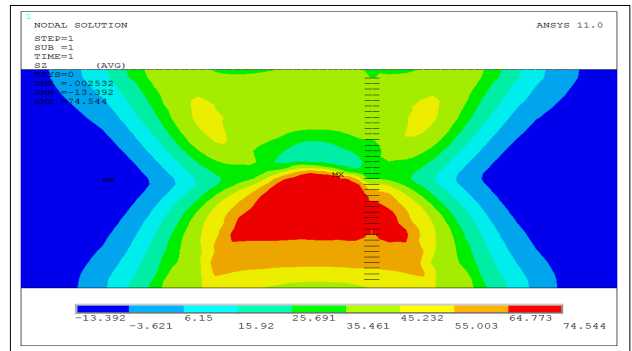
Fig. 6 (a)~(c)는 용접부 해석시험편 전 영역에 대한 용접잔류응력 해석결과로, ANSYS에서 초기응력으로 읽어들이 나타낸 것이다. (a)는 용접선 폭 방향 용접 잔류응력성분 (σ_x), (b)는 판 두께방향 용접 잔류응력성분(σ_y), (c)는 용접선 길이 방향 용접 잔류응력성분(σ_z)의 분포도이다. 용접



(a) σ_x



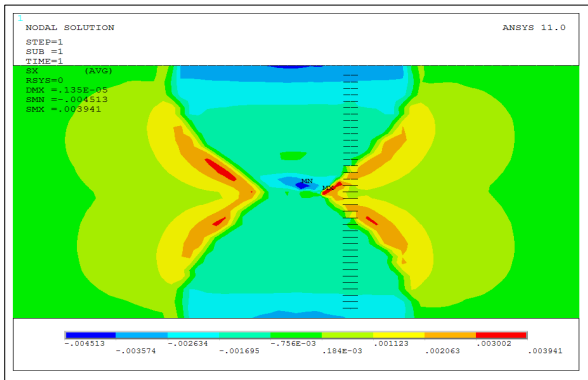
(b) σ_y



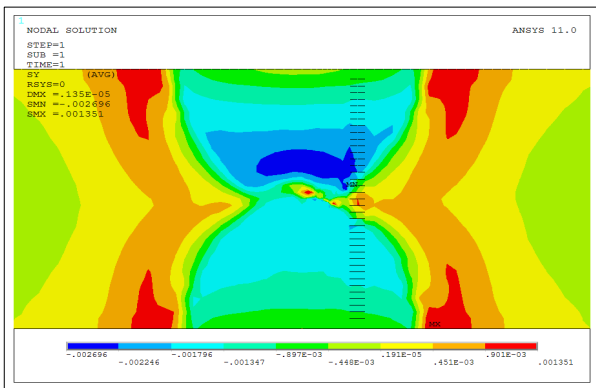
(c) σ_z

Fig. 6 Residual stress distribution of EGW welded specimen

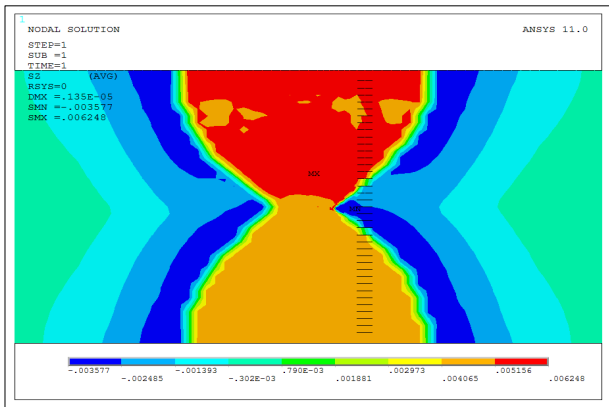
잔류응력 각 성분의 크기를 비교해 보면 해석시험편의 역학적 구속력의 크기순으로 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 순으로 나타났다. 그리고 전면 용접부의 경우 용접선 길이방향 용접잔류응력(σ_z)은 인장성분을 나타내고 판의 두께 방향(σ_y) 및 용접선 폭 방향(σ_x)의 경우 압축 성분을 나타내고 있다. 특히, 용접선 폭 방향(σ_x)의 경우 시험편의 중앙부 영역에 압축성분이 다소 크게 분포함을 보이고 있다. 후면 용접부의 경우 응력 성분 모두 주로 인장성분을 보이고 있으며, 특히 시험편의 중앙부영역에 인장성분이 다소 크게 분포함을 보이고 있다. 그리고 용접잔류응력 성분 중 용접 잔류응력 성분을 주도하는 용접선 길이방향(σ_z)가 전면 용접부에 비해 응력이 크게 발



(a) ϵ_x^p



(b) ϵ_y^p



(c) ϵ_z^p

Fig. 7 Plastic strain distribution of EGW welded specimen

생되고 있음을 보이고 있다. 이러한 분포양상은 선행 용접된 전면용접부가 후행 용접부, 즉 후면용접부를 구속함에 기인한 것이라 사료된다. 또한 시험편의 중앙부에서 최대응력이 발생하는데, 이는 용접시 대입열로 인하여 시험편 중앙부영역으로 열집중 분포 양상이 나타나, 이로 인해 주위에서 강한 구속력이 작용함에 기인한 것이라 사료된다.

Fig. 7은 시험편 전 영역에 걸쳐 발생하는 소성 변형률 성분

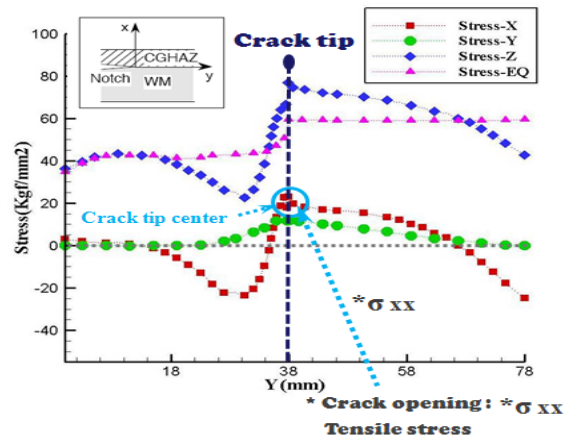


Fig. 8 Stress field near surface crack tip of EGW welded specimen

(ϵ_x^p , ϵ_y^p , ϵ_z^p)을 도시한 것이다. (a)는 용접선 폭 방향 소성 변형률 성분(ϵ_x^p), (b)는 판 두께 방향 소성 변형률 성분(ϵ_y^p), (c)는 용접선 길이 방향 소성 변형률 성분(ϵ_z^p)의 분포도이다.

각 성분별 특징을 비교해 보면, 용접선 길이방향 소성 변형률 성분(ϵ_z^p)는 용착금속 및 열영향부에서 인장성분을 나타내지만 열영향부에 인접한 모재에서는 압축 성분으로 변화하고 있으며, 특히 전면용접부에 크게 인장성분이 발생하고 있다. 그리고 용접선 폭방향 소성 변형률 성분(ϵ_x^p)는 용착금속 및 열영향부 전체영역에서 압축성분이 나타나는데, 그 중에서도 전면용접부의 중앙부영역에서 최대치가 발생하고 있으며 열영향부에 인접한 모재에서는 인장을 나타내고 있다. 판 두께 방향성분(ϵ_y^p)은 용착금속 및 열영향부에서 커다란 압축 성분을 보이고 있으며, 전면용접부의 중앙부 영역에서 인장 성분이 크게 나타나고 있다. 이상의 특징은 역학적으로 구속이 가장 z방향(용접선 길이방향)에 커다란 인장의 소성 변형이 발생되며 소성 변형이 비압축성 즉, 체적불변의 조건을 만족하여 역학적 구속의 가장 약한 y방향(판두께 방향)에 커다란 압축의 소성 변형이 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 8는 균열선단의 용접잔류응력 분포도이다. EGW 용접부의 파괴거동에 미치는 잔류응력의 효과를 규명하기 위해 균열선단의 용접 잔류응력 분포특성을 고찰하였다. 용접잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련있는 용접선 폭 방향 응력 성분(σ_x)을 주목하여 보면, 그림에 도시한 바와 같이 균열 선단부에 인장잔류응력 성분(Crack opening stress)을 나타내고 있다. 이러한 EGW 용접부의 균열선단 주위의 인장 잔류응력(Crack opening stress)은 무부하 상태에서도 균열면이 열리게 되어 균열진전에 크게 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다.

3.3 노치가공에 의한 극후판 EGW 용접부의 잔류응력 재분포 특성

해석시험편에 실제 3점 굽힘시험과 동일하게 최저 인성부라고 평가되는 용접부 Fusion line 근처의 열영향부 결정립 조대부위(CGHAZ)에 노치형상 반영시 용접부의 응력분포 재분포 특성을 고찰하였다.

Fig. 9는 EGW 용접 시험편의 노치선단부의 각 위치에서의 노치가공 후의 각 응력 성분을 도시한 것이다. (a)는 용접선 폭 방향 성분(σ_x), (b)는 용접선 판 두께 방향 성분

(σ_y), (c)는 용접선 길이 방향 성분(σ_z)의 분포도이다. 그림에서 나타난 응력성분 σ_x , σ_y , σ_z 의 양상을 보면, 노치선단근방의 응력분포는 노치가공전 노치선단 연장선 각 위치에서 인장성분을 보였으나, 노치가공후 모든 응력성분이 압축 성분으로 변화하며, 노치선단 연장선으로부터 멀어질수록 압축 성분 값이 점차 감소하여 원래의 용접잔류응력인 인장성분값을 나타내고 있다. 특히 균열개폐거동과 관련있는 응력성분(σ_x)을 주목하여 보면, 노치가공 전 용접잔류응력 성분이 크랙개구진전을 촉진하는 인장성분을 나타내지만, 노치가공후 크랙진전을 지연시키는 압축성분 값으로 응력분포가 재분포되고 있다.

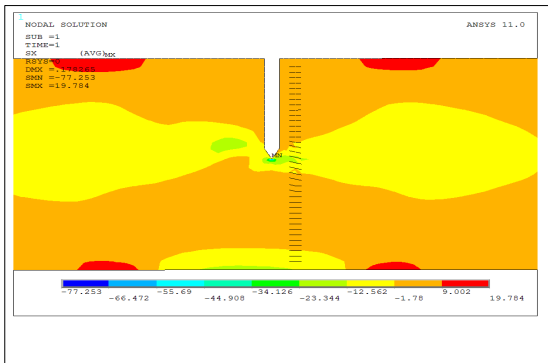
3.4 극후판 EGW 용접부의 평면변형 파괴인성 KIC 예측

EGW 용접부의 파괴인성을 예측하기 위해 a/W의 변화에 따른 순수굽힘하중 및 잔류응력과 굽힘하중의 복합하중 각각에 대한 파괴인성 K_{Ic} 특성을 고찰하였다. Fig. 10은 용접부의 파괴시작점 하중 P_Q 을 구하기 위해 시편에 순수 굽힘하중만 작용할 때(용접잔류응력을 고려하지 않은 경우)와 용접 잔류응력과 굽힘하중 복합하중을 고려한 경우의 3점 굽힘에 대한 수치해석을 수행하여 얻은 하중·클립게이지의 변위선도이다. (a)는 시편에 굽힘 하중만 작용 할 때, (b)는 용접 잔류응력과 굽힘하중 복합하중을 고려한 경우에 대한 하중·클립게이지 변위선도이다.

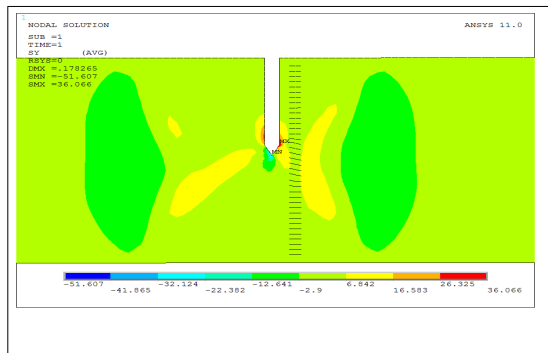
파괴의 시작점의 하중 P_Q 는 각각에 대하여 초기단계에서 선형역의 구배(직선 OA의 구배)보다 5% 낮은 구배의 직선 OA'와 하중 클립게이지선도의 교점 P_S 를 P_Q 로 간주하였다. EGW용접부의 순수 굽힘하중만 작용시 파괴 시작점의 하중 P_Q 는 13,700Kgf이고, 용접잔류응력과 굽힘하중 복합하중을 고려한 경우 파괴의 시작점의 하중 P_Q 는 12,500Kgf에 해당된다.

파괴시작점의 하중이 잔류응력과 굽힘하중의 복합하중작용시 순수 굽힘하중이 작용하는 경우보다 작아짐을 알 수 있다. 이는 노치가공의 영향으로 인하여 노치선단부 및 노치선단 근처의 연장선에서 압축성분(σ_x) 값을 나타내나 인장성분의 잔류응력으로 인하여 나타내었다.

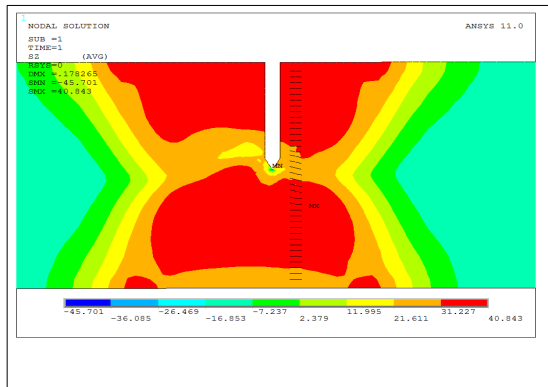
Fig. 11은 균열이 존재하는 용접부의 초기 허용균열범위 a/w에 대한 파괴기준을 나타내는 그림이다. 균열길이가 작은 범위에서는 중첩된 경우가 순수 외부하중만 작용할 경우보다 파괴 인성치는 다소 감소하나 균열길이가 증가할수록 잔류응력의 영향은 소멸되는 것으로 나타났다. 임의의 균열 길이를 갖고 있는 용접부에 실제하중이 가해질 경우 그때 구



(a) σ_x

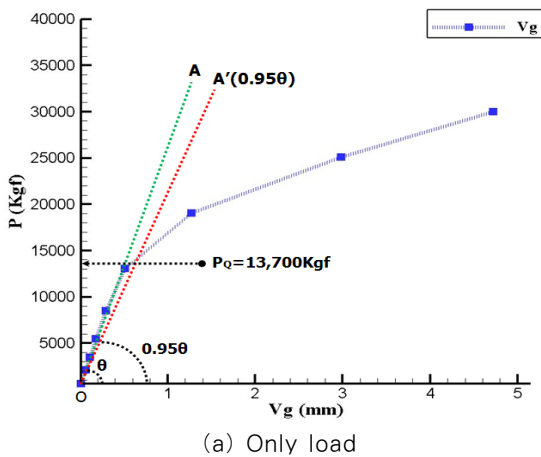


(b) σ_y

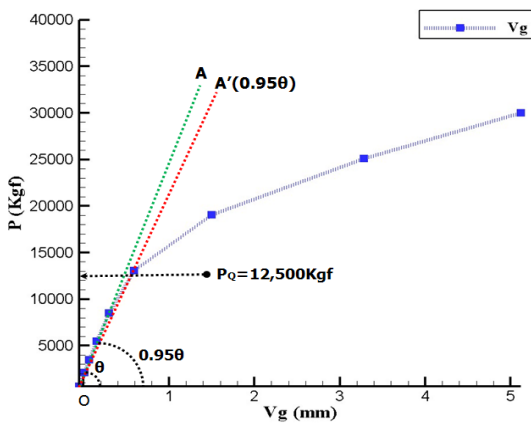


(c) σ_z

Fig. 9 Stress distributions ahead notch tip of EGW welded specimen before and after notch machined



(a) Only load



(b) Superposition

Fig. 10 Load-Clip gauge displacement curves for EGW welded specimen considering only bending load and superposition cases

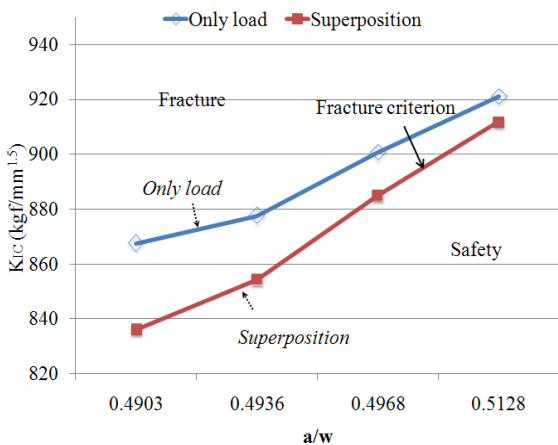


Fig. 11 KIC for EGW welded specimens with various initial crack length to width ratios

한 파괴 인성치 값이 파괴기준선 아래에 위치할 경우 안전하지만, 파괴기준선 위에 위치하면 균열 길이는 진전하면서 파괴된다. 특히 주목할 점은, 도시한바와 같이 용접공정별 파괴기준을 살펴보면 중첩된 경우가 순수 굽힘하중만 작용할 경

우에 비해 K_{IC} 값이 낮기 때문에 균열의 성장이 다소 용이하게 나타날 것으로 사료되나, 그 값이 다소 미소하게 나타났다.

4. 결 론

- (1) 입열량이 클에 따라 상대적으로 용착금속부 및 고온 분포역이 크게 나타나고, 후행 용접된 후면용접부의 온도분포가 선행 용접된 전면용접부의 온도영향으로 다소 상승함을 보였다.
- (2) 용접부의 각 성분별 응력크기는 역학적 크기가 큰 방향의 응력값이 두드러지게 크게 발생하였으며, 각 성분의 크기는 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 순으로 나타났다. 용접잔류응력 성분 중 용접 잔류응력 성분을 주도하는 용접선 길이방향 응력성분(σ_z)가 후면용접부에서 전면용접부에 비해 응력이 크게 발생되었고, 시험편의 중앙부에서 최대응력이 발생하였다.
- (3) 노치선단근방의 응력분포는 노치가공전 노치선단 연장선 각 위치에서 크랙개구진전을 촉진하는 인장성분을 보였으나, 노치가공후 모든 응력성분이 압축 성분으로 변화하였다. 그리고 노치선단 연장선으로부터 멀어질수록 압축성분 값이 점차 감소하였다.
- (4) 노치가공후 균열선단전방의 압축잔류응력의 분포가 굽힘하중에 의하여 인장잔류응력 분포로 재분포되었으며, 균열길이가 클수록 균열선단전방의 응력이 더욱 커지고 분포양상은 거의 동일하게 나타났다.
- (5) 균열이 존재하는 EGW용접부의 파괴기준 K_{IC} 을 살펴보면, 중첩된 경우가 순수 굽힘하중만 작용하는 경우보다 파괴 인성치가 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. a/W 가 작을 경우 중첩의 경우가 굽힘만의 경우보다 파괴인성치 차이가 크나, a/W 가 증가함에 따라 그 차이가 점차 없어지는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다(This study was supported by research funds from Chosun University, 2009).

참 고 문 헌

배원호 (2004) 혼합모드 균열의 응력확대계수 해석과 정도 개선에 대한 고찰 Mindlin 평판유한요소의 개선, 한국산업응력학회논문집, 7(4), pp.355~361.

- Bang, H.S.** (1992) Study on The Mechanical Behaviour of Welded Part in Thick Plate by Three-Dimensional Thermal Elasto-Plastic Analysis Based on Finite Element Method, *Journal of the Korean Welding Society*, 10(2), pp.37-43.
- Bang, H.S., Kim, Y.C.** (1991) Analysis on the Three-Dimensional Unstationary Heat Conduction on the Welding of Thick Plates by F.E.M., *Journal of the Korean Welding Society*, 9(4), pp.37-43
- Kulkarni, D.M., Kumar, A.N.** (2002) Experimental and Finite Element Analysis of Fracture Criterion in General Yielding Fracture Mechanics, *Journal of Sadhana*, 27(6), pp.631~642.
- Lee, D.J., Kim, G.G.** (2008) A Predictive Method for transverse Residual Stress Distribution at a Thick EH40 Weldment, Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.312~316.