

## 2010년 용접강도위원회 심포지엄 소개

신 상 범 · 안 규 백

### Introduction of 2010 Symposium of Commission of Design, Analyses and Structural Strength of Welded Structure in KWJS

Sang-Beom Shin and Gyu-Baek An

#### 1. 서 론

최근 용접 구조물의 사용 조건의 가혹화 및 대형화로 인하여 설계 응력이 증가함에 따라 용접부의 구조 안전성에 대한 관심이 급격히 증가하고 있으며, 보다 정량적인 평가를 위하여 다양한 노력이 전개되고 있다. 현재 거의 모든 용접 구조물의 설계 기법은 기존의 결정론적인 피로 파괴 설계 (deterministic fatigue and fracture design) 개념에서 사용자 적합성 (fitness for service) 기반을 둔 신뢰성 (reliability) 기반의 피로 파괴 설계로 변경되었다. 그러나, 용접 구조물의 피로 파괴와 관련된 여러 문제가 아직 지속적으로 보고되고 있다는 점은 현재 적용되고 있는 신뢰성 기반의 평가 방법에서도 개선해야 될 다양한 문제가 있음을 의미한다. 이에 국내외 여러 연구기관에서는 보다 정량적으로 용접부의 피로 파괴 특성을 평가할 수 있는 기법의 개발과 함께 기존 평가 방법이 갖고 있는 설계 하중, 구조 모델링 그리고 강도 등에 대한 불확실성과 관련된 문제를 최소화하기 위한 다양한 노력을 경주하고 있다.

국제용접학회인 IIW의 Commission X, XIII 그리고 XV는 다양한 연구 기관들이 참여하는 Round Robin Test를 거쳐 용접부의 Hot Spot Stress 및 용접 잔류응력 평가를 위한 규약(protocol)을 제정하기 위해 working group을 결성하고 다양한 활동을 수행하고 있으며, 최근 개정된 용접부의 설계 코드에서는 용접부의 품질에 대한 관리 기준을 강화하고 있다. 한편 대한용접접합학회(이하, KWJS)의 용접강도위원회에서도 지난 2003년부터 국내외의 대학 및 산업체 그리고 연구 기관들이 참여하는 Round Robin Test를 거쳐 용접부의 Hot Spot Stress 및 용접 잔류응력 평가를 위한 온도 분포 해석을 위한 규약을 제정한 바 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 용접부의 피로 파괴 특성 평가

및 설계를 위한 일의적인 방법에 대한 표준화는 아직 마련되지 못하고 있다. 이에 KWJS의 강도위원회에서는 여러 산업 분야에서 용접부의 피로 및 파괴 관련 기술의 현황 및 수요 그리고 향후 개발 방향에 대한 이해를 증진하고, 관련 산업 분야의 기술을 융합하기 위한 장을 마련하고자 “용접 구조물의 피로 파괴 성능 향상 기술”을 주제로 2010년 11월 25일 심포지엄을 개최하였다. 본 고에서는 2010 KWJS의 강도위원회 심포지엄에서 발표된 논문을 소개하고자 하였다.

#### 2. 2010 용접강도위원회 심포지엄 개요

2010 KWJS 용접강도위원회 심포지엄에서는 Table 1과 같이 일본 Osaka 대학의 Mitru Ohata 교수의 “Application of Effective Damage Concept to Evaluation of Ductile Cracking of Steel Structures Under Large-Scale Cyclic Loading”와 미국 바텔 연구소의 홍정균 박사의 “Fatigue Evaluation of Welded Structure Using Battelle Structural Stress Method”를 비롯하여 총 8편의 논문이 발표되었다. 논문 발표는 용접부의 피로 파괴의 평가 방법, 잔류응력 평가 방법 그리고, 용접 구조물의 수명 향상 및 유지 보수 방안 등 용접부의 피로 파괴 및 성능 향상 기술과 관련된 거의 전 분야에서 이루어 졌다.

#### 3. 발표 논문 요약

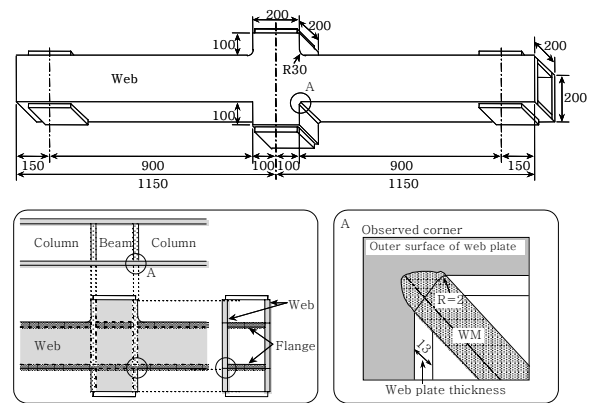
##### 3.1 Application of Effective Damage Concept to Evaluation of Ductile Cracking of Steel Structures under Large-Scale Cyclic Loading

강 구조물의 대형화, 설계 및 사용 조건이 가혹화됨에 따라 극후 용접 구조물이 증가하고 있다. 이러한 관점에서 극한 하중 조건하에서 용접 구조물의 연성 및

**Table 1** Papers of 2010 symposium

Title	Speaker (Affiliation)
Application of Effective Damage Concept to Evaluation of Ductile Cracking of Steel Structures Under Large-Scale Cyclic Loading	Mituru Ohata (Osaka Univ.)
Residual Stress Measurements Using Neutron Diffraction Method	Wan-chuck Woo (KAERI)
Improvement of Fatigue of Cruciform Welded Joints for Offshore Structure Steel Application	Jae-Yik Lee (RIST)
Crack Growth Analysis of a Three Dimensional Crack Using SGBEM-FEM Alternating Method	Jai-Hak Park (Chungbuk Univ.)
Fatigue Evaluation of Welded Structures using Battelle Structures Stress Method	Jeong-Kyun Hong (Battelles, USA)
Fatigue Evaluation of Pressure Vessels for Nuclear Power Plant	Oak-Sug Kim (DHIC)
Maintenance and Repair Techniques for Small-Bore Pipe Socket Welds in Nuclear Power Plants	Dong-Min Lee, (KEPCO KPS)
Weld Fatigue Assessment Procedure According to ASME Code, Sec. VIII, Division 2	Sung-Bong Han (GNEC Inc.)

취성 모드의 불 안정 파괴(unstable fracture) 방지를 위한 설계 및 평가 방법의 정립은 무엇보다도 중요하다. 특히, 지진 하중과 같은 대규모 하중이 반복적으로 작용하는 경우 용접부의 응력 집중부에서 발생하는 국부적인 큰 변형률은 용접 구조물의 연성(ductility) 및 파괴 인성(fracture toughness) 저하를 유발함으로써 중국에서는 불안정 파괴를 유발한다. 따라서 균열발생의 관점에서 연성균열의 발생 한계조건을 규명하는 것은 중요하다고 할 수 있다. 이러한 평가 방법은 용접 강 구조물이 단순한 하중을 받는 경우 또는 반복하중을 받는 경우에 대한 평가를 함으로 구조물의 안전성 확보가 가능하다. 본 논문에서는 연성 균열 발생 관점에서 구조 건전성 평가와 동시에 지진에 의하여 유발되는 반복하중에 대한 구조물의 성능 향상을 위한 재료 및 구조 설계를 위한 방안으로 “Effective Damage Concept”을 제안하였다. “Effective Damage Concept”은 microvoids nucleation을 위한 재료 손상과 macro-scale의 역학적 변수들의 상관 관계에 기반을 둔 “Material Damage Concept”에 바우싱거 (Bauschinger) 효과의 두 가지 측면 즉, 응력-변형률 거동과 변형에 영향을 주는 기계적인 측면과 전위(dislocation) 이동에 따른 재료 손상 측면을 고려하여 제안된 방법이다. 이러한 개념이 tow-parameter criterion(응력-변형률 거동)에 적용된다면 용접 강 구조물에 대한 연성균열 발생 거동에 대하여 보다 정확한 평가가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 건축 강 구조물의 용접부인 column과 beam에서 파괴에 취약한 부분이 지진과 같은 반복하중을 받는 경우에 대한 연성균열 발생 한계 조건을 규명하기 위한 실험을 실시 하였다.

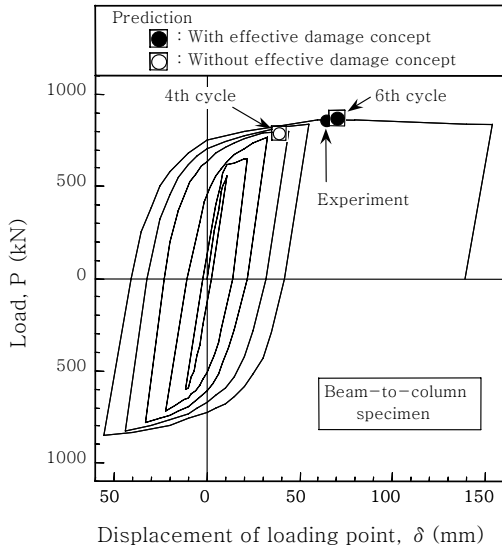


**Fig. 1** Configuration of specimen modeled beam-to-column connection of steel pier

Fig. 2는 연성균열 발생에 대한 실험과 예측 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Material Damage Concept을 고려해서 Tow-parameter Criterion에 의해서 예측한 결과와 실험이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 Material Damage Concept을 고려한 tow-parameter criterion은 기존의 구조물 건전성을 평가하기 위한 방법에 비하여 구조물의 한계 상황을 평가하는데 매우 유용한 방법으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

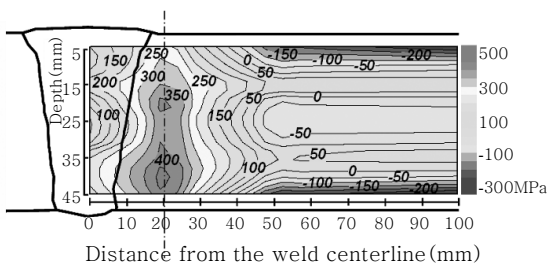
### 3.2 Residual Stress Measurements Using Neutron Diffraction Method

용접 구조물의 제작시 발생하는 잔류응력은 용접 변형과 함께 용접 구조물의 초기 부정(initial imperfection)으로 작용함으로써 구조물의 건전성에 많은 영향을 미친다. 따라서, 현재 용접 구조물의 피로 파괴 안전성



**Fig. 2** Comparison between critical values for ductile cracking predicted based on the advanced two-parameter criterion and experimental result for cyclic loaded beam-to-column specimen

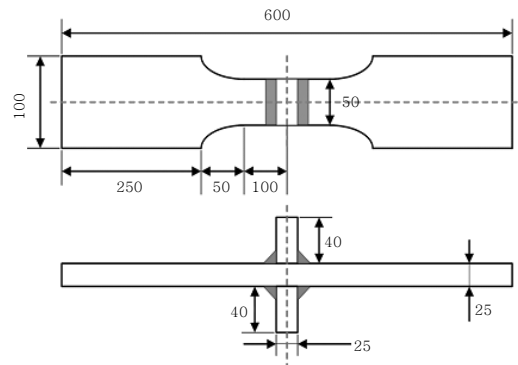
평가를 위한 다양한 설계 코드에서는 이러한 잔류응력을 고려하기 위한 다양한 방안을 제시하고 있다. 그러나, 용접 구조물이 가지는 다양성 즉, 사용되는 용접재료, 모재, 용접 기법 그리고 제작 순서등에 기인하여 매우 보수적인 기준이 적용되고 있다. 따라서 최근 실용용접 구조물의 잔류 응력 수준을 보다 정량적으로 평가하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 비파괴 잔류응력 측정 방법중의 하나인 중성자 회절법의 적용 사례를 소개하고 있다. 중성자 회절법의 측정 방법의 가장 큰 장점은 Fig. 3과 같이 두께 방향의 잔류응력 분포를 계측할 수 있다는 것이다. 특히 최근 극후 용접부의 경우 두께 방향의 각 위치에서 용접선과 용접선에 수직한 방향의 잔류응력의 분포와 균열 성장에 따른 잔류응력의 재 분포 특성에 대한 이해를 통한 정량적인 피로 파괴 건전성 평가가 필요하다는 점에서 주목할 필요가 있을 것으로 판단된다.



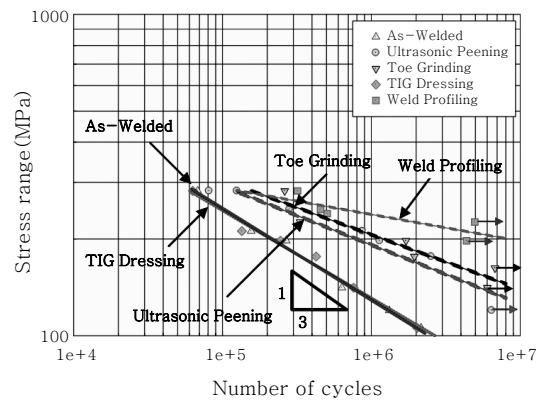
**Fig. 3** Distribution of longitudinal residual stress at weldment of 50mm thick obtained by neutron diffraction method

### 3.3 Improvement of Fatigue of Cruciform Welded Joints for Offshore Structure Steel Application

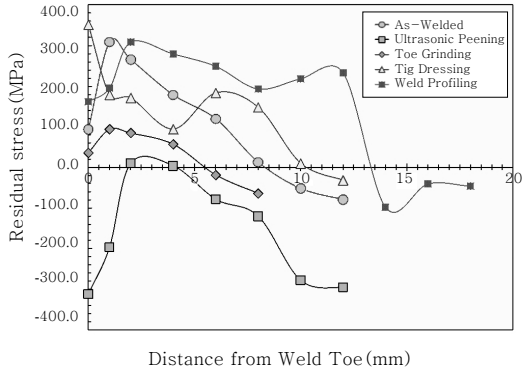
강 구조물의 설계시 설계자가 주목해야 할 사실은 용접부의 피로 강도가 모재와는 달리 용접부의 정적 강도와는 무관하다는 사실이다. 즉, 용접 구조물의 설계시 구조물의 경량화 및 파괴 안전성을 확보하고자 고 강도 강재의 적용은 설계 응력의 증가로 인하여 피로 손상에 의한 문제를 야기한다. 따라서 용접 구조물의 피로 수명 향상을 위한 방안으로 다양한 후처리 방법에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 본 연구에서는 toe grinding (TG), weld profiling (WP), TIG dressing (TD) 그리고 ultrasonic impact treatment (UIT or UP)와 같은 후처리 방법들이 해양 구조용 강재의 용접부의 피로 강도에 미치는 효과를 평가하였다. Fig. 5는 Fig. 4의 십자형 필릿 용접부에서 후처리 방법의 적용 유무에 따른 피로 시험 결과를 도시한 것이다. Fig. 5와 같이 TD를 제외한 나머지 후처리 방법을 적용한 용접부의 피로 강도 및 수명이 급격히 향상되고 있음을 알 수 있다. 이는 용접부의 형상 제어를 통한 국부적인 응력 집중원의 제거와 Fig. 6과 같이 용접 잔



**Fig. 4** Configuration of test specimen



**Fig. 5** Fatigue test results with post treatments

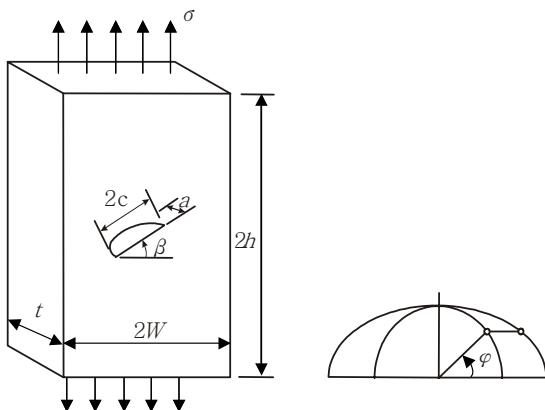


**Fig. 6** Distributions of residual stress in way of weld toe with post treatment

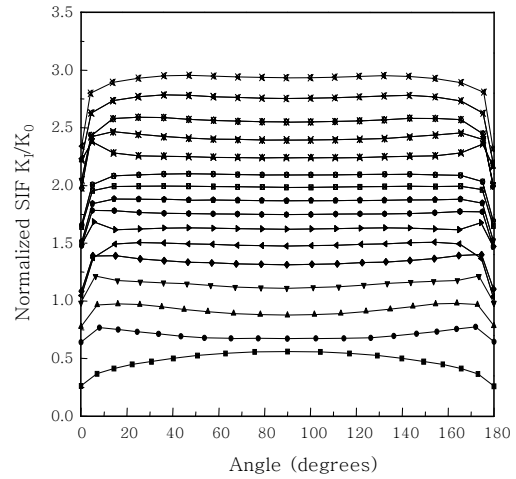
류 응력의 제어 효과에 기인한 것으로 보고하고 있다.

### 3.4 Crack Growth Analysis of a Three Dimensional Crack Using SGBEM-FEM Alternating Method

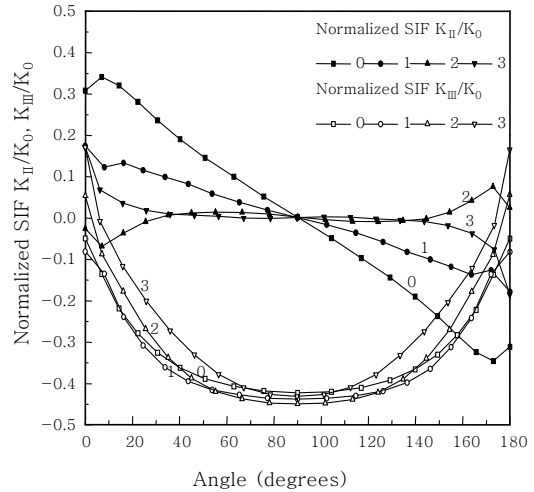
본 논문에서는 용접부의 피로 균열 성장 및 취성 파괴 평가를 위한 파괴 설계 변수인 응력 확대계수(stress intensity factor)의 평가를 현재 보편적으로 적용되고 있는 유한요소법의 대안으로 제안된 Nikishkov와 Park 그리고 Alturi의 SGBEM-FEM 교호법을 균열 성장 해석에 적용하고 이의 적합성을 평가하였다. 여기서, SGBEM-FEM 교호법은 균열이 없는 유한요소해석 모델에 독립적인 균열 격자를 삽입하여 균열 선단에서 응력확대계수와 같은 파괴 설계 변수를 평가하는 방법이다. 본 연구에서 사용한 해석 모델은 균열 선단에서 균열 성장에 따른 모드 I, II 그리고 III의 응력확대계수의 거동을 평가하기 위하여 Fig. 7과 같이 경사진 표면



**Fig. 7** Inclined semi-elliptical surface crack in a plate subjected to a uniform tensile stress. Location of points on the crack front is characterized by elliptical angle  $\phi$



**Fig. 8** Normalized Mode I SIF distributions during the crack growth for an initial crack with  $b=45^\circ$



**Fig. 9** Normalized Mode II and III SIF distributions during the crack growth for an initial crack with  $b=45^\circ$

균열이 사각 기둥 형상의 해석 모델 중앙 표면에 존재하는 것으로 가정하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 SGBEM-FEM 교호법을 이용하여 균열 성장에 따른 각 균열 선단에서 각 파괴 모드에 대한 응력확대계수의 분포와 변화를 도시한 것이다. Fig. 8과 Fig. 9와 같이 균열 선단에서 응력확대계수의 분포와 균열 성장에 따른 거동은 기존의 연구 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 SGBEM-FEM 교호법의 경우 FEM만을 이용한 파괴 설계 변수 평가 방법에 비하여 매우 복잡한 구조물의 용접부에서 균열 성장 예측 및 파괴 변수 거동 특성 평가시 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.5 Fatigue Evaluation of Welded Structures using Battelle Structures Stress Method

실 용접 구조물의 피로 수명은 용접부에서 공칭 응력 수준을 정의하기 어렵기 때문에 용접부 토우에서의 구조 응력중의 하나인 Hot Spot Stress Range를 이용하여 평가하는 것이 보편적이다. 그러나, 기존의 연구 결과에 따르면, 유한요소해석을 이용하여 정의되는 Hot Spot Stress의 경우 Fig. 10과 같이 요소(element)에 대한 민감도가 매우 높은 문제를 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 유한요소해석을 이용한 용접부 토우에서 구조 응력의 평가시 요소에 둔감하도록 개발된 Battelle 구조 응력을 소개하였다. 본 논문에서 따르면 Battelle의 구조 응력은 Hot Spot Stress와는 달리 절점에서 절점력과 절점 모멘트를 사용하여 정의하고, 역학적 평형 상태를 고려하기 때문에 용접부 토우와 같은 노치부에서도 요소의 크기에 둔감하다. 그리고 파괴역학적 개념을 도입하여 다양한 이음 형태로 인한 응력 집중, 하중 모드와 판 두께의 변화를 고려한 피로매개변수(등가 구조응력)를 제안하고 신뢰할 만한 피로 데이터에 적용하여 Fig. 11과 같이 하나의 통합된 마스터 S-N 피로 선도를 개발하였다. 따라서 Battelle의 구조응력을 적용하는 경우 CAE와 FE 모델링 시간을 줄이고 피로 시험을 최소화할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 기존의 Hot Spot Stress와 달리 사용 요소에 둔감하기 때문에 해석과 관련된 불확실성을 최소화함으로써 과도한 보수 설계를 방지할 수 있는 것으로 보고하고 있다. 그리고 본 논문에서 Battelle 구조 응력법을 이

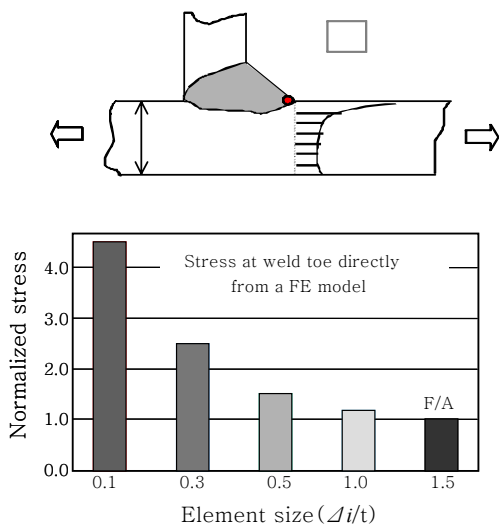


Fig. 10 Mesh-sensitivity of stresses at weld toe in FE analysis

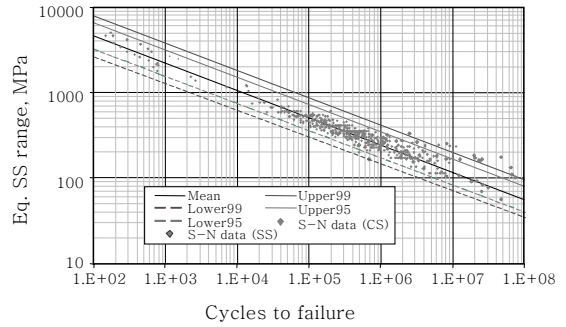


Fig. 11 Master S-N curve developed based on over 1000 weldment fatigue test data including full scale tubular joints and laboratory plate joints. The standard deviation  $\sigma = 0.247$

용한 용접 루트부에서 피로 파괴 특성 평가 및 잔존 수명 평가에 적용 가능함을 소개함으로 향후 Battelle 구조 응력의 적용 범위가 확대될 것으로 보고하고 있다. 참고로 본 논문의 저자에 따르면, 현재 Battelle 구조 응력은 ASME의 B&PV Sec. VIII의 Div. 2의 용접 피로 설계 선도와 API 570-1의 Fitness-For-Service Standard로 채택되었으며, 선급 기관에서도 이의 적용에 대한 검토가 착수 중 이다.

### 3.6 Fatigue Evaluation of Pressure Vessels for Nuclear Power Plant

최근 전 세계적으로 화석 에너지의 대체 방안으로 원전에 대한 관심이 점점 증가함에 따라 각종 원전 기기에 대한 건전성 확보 문제에 대한 관심 또한 증가하고 있다. 국내의 원전 설비의 건전성은 미국 ASME 코드를 참조하여 국내 실정에 맞게 작성된 전력산업기술기준으로 1995년에 발행된 KEPIC 코드에 따라 평가되도록 규정되어 있다. 본 논문에서는 KEPIC code에서 규정한 피로 해석 평가 절차 및 이의 적용 사례를 소개하고 있다. 본 논문에서 언급된 것처럼 최근 원전기에 관한 소재 및 구조 안전성 평가 관련 기술과 함께 최근 ASME에서도 설계 관련 보수성을 완화하는 방향으로 코드 해설이나 기술 기준이 제정되고 있다는 점은 주목할 필요가 있다. 그러나 KEPIC 코드의 경우 환경 피로에 대한 기술 기준이 아직 정립되지 않았다는 점과 현재 ASME에서 진행중인 환경 피로에 대한 방법을 적용하는 경우 현재의 설계로는 이를 만족하기 어렵다는 점에서 피로감시시스템과 같은 다양한 분야에서의 융합된 기술 개발도 함께 고려되어야 한다는 점은 주목할 필요가 있다.

### 3.7 Maintenance and Repair Techniques for Small-Bore Pipe Socket Welds in Nuclear Power Plants

원자력 발전소 운전 중 차단이 불가능한 고온 고압 배관 용접부에서 손상은 발전소의 안전성과 경제성에 큰 영향을 미친다. 이에 해외 원전에서는 지난 1990년대부터 소켓 용접부의 손상을 방지하기 위한 대책을 수립하고 있다. Table 2는 최근 소구경 배관의 주요 손상 사례를 나타낸 것이다. 이에 국내 원전의 경우도 운전 시간이 증가함에 따라 소켓 용접부에서 피로 손상이 증가함에 따라 이에 대한 대책이 시급하다. 이에 본 논문에서는 원전의 정상 운전 중 차단이 불가능한 소구경 배관 소켓 용접부에 대한 체계적인 관리 방안을 제안하고, 용접부의 피로 수명 향상을 위한 용접부의 보수 방안을 다루고 있다. 이를 위하여 먼저 각 소켓 용접부의 용접부의 중요도를 고려하여 관리 대상 목록을 선별하고, 이들 용접부에 대한 진동 측정 및 평가를 통해 운전 위험도를 평가하고, 설치된 용접부의 배관 중요도를 고려하여 용접부 관리 기준을 설정하였다. 그리고 수립된 관리 기준에 대하여 영역별 중요도를 고려하여 비파괴 검사 방법 및 주기를 설정하였다. 보수 용접시 피로 향상 방안으로 1:1 용접부 형상을 2:1로 제어한 경우와 용접부 토우에 추가적으로 1 pass의 용접을 수행한 경우 (Last Pass)에 대하여 Fig. 12와 Fig. 13과 같

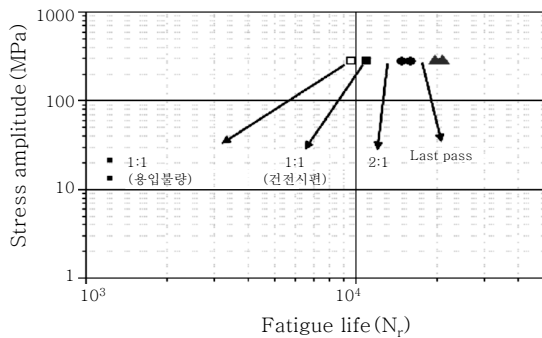


Fig. 12 Fatigue life of socket weldment with the configuration of weld profile

Table 2 Failure cases at the pipes in power plants

Year	Power plant	Unit No.	Defect type	Consequence	Cause
07.08	St. Lucie	2	Leak	Trip	HCF* <sup>1</sup>
07.03	Southern nuclear operating company	2	Failure		HCF* <sup>1</sup>
02.12	Dresden nuclear power station	3	Leak		RS* <sup>2</sup> /Vibration
02.10	Dresden nuclear power station	3	Leak	O/H	HCF* <sup>1</sup>
02.08	Millstone power station	2	Leak	Trip	HCF* <sup>1</sup>

Note) \*<sup>1</sup> High cycle fatigue, \*<sup>2</sup> Residual stress

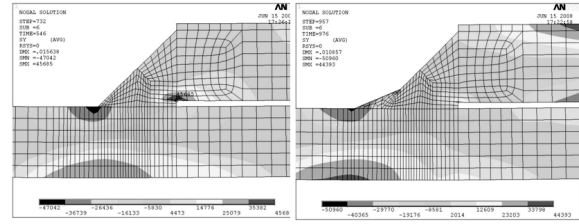


Fig. 13 Variation of residual stress before and after last pass

이 피로 시험 및 잔류 응력 해석 결과를 토대로 적정 보수 용접 방안을 제안하였다.

### 3.8 Weld Fatigue Assessment Procedure According to ASME Code, Sec. VIII, Division 2

본 논문에서는 각종 배관이나 압력 용기의 피로 설계를 위하여 적용되고 있는 ASME Code Section VIII Div. 2 의 2007년 개정 전후 피로 평가 절차의 변화에 대하여 소개하고 있다. 본 논문에 따르면, 재료의 파손 이론으로 적용되어 왔던 최대 전단 응력 이론이 변형에너지 이론으로 변경되었으며, 응력 주기 계산을 위한 상세 절차가 추가되었다. 그리고 용접부에 대하여 등가 구조응력 범위를 응력 변수로 하는 평가 절차가 별도로 추가되었다. 또한 개정판에서는 일반 설계 피로 곡선과 용접부의 피로 설계 곡선이 분리되었으며, 보수성이 완료된 페널티(penalty) 계수가 포함되었다. 이러한 변화는 본 강도 심포지엄의 타 발표 논문에서 소개되었던 것처럼 ASME에서 보수성을 완화하기 위한 노력의 결과로 이해할 수 있다.

## 4. 결 론

KWJS 용접강도위원회는 국내 중공업과 원자력 산업의 관심 기술 중 하나인 “용접 구조물의 피로/파괴 및 성능 향상 기술”이라는 주제로 현재 기술 현황을 분석하고 단계적 현안 해결의 접근 방안을 논하고자 2010 심포지엄을 개최하였다. 실제 용접 구조물의 피로/파괴

에 관한 문제는 용접 구조물의 구조 안전성 확보라는 차원에서 반드시 해결해야 할 문제이므로 이를 위해 국내외 여러 연구기관에서 지난 수 십 년 동안 지속적인 연구를 수행하여 왔다. 그러나 용접 구조물의 강도 및 설계 하중 측면에서 가지는 여러 불확실성에 기인하여 아직 일의적인 해결 방안이 제시되지 못하고 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 이번 용접강도위원회에서 주관한 심포지엄 또한 전술한 문제의 해결 방안을 제시할 수는 없지만 주요 국내외 기관들이 수행하고 있는 연구 현황을 이해하고, 상호간에 기술 교류의 활성화라는 차원에서 보다 활성화될 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Gordon, R. : IIW X/XV JWG RSDP round-robin Phase 1 : Revised Protocol, Nov., 1999
2. Dong, P. and Janosch, J.-J. : Residual Stress Compendium Compilation : Draft Protocol and Call for Participation, IIW Doc. IIW-X-XII-XV-RSDP- 43-02, 2002
3. Commission of Design, Analysis and Structural Strength of Welded Structures : Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA, Journal of KWJS, **23-6**(2005), 1-7, (in Korean)
4. K. Masubuchi: Analysis of Welded Structure, New York, Pergamin, 1980



- 신상범
- 1969년생
- 현대중공업 수석연구원
- 용접변형, 강도
- e-mail : str@hhi.co.kr



- 안규백
- 1970년생
- POSCO 기술연구소
- 용접 파괴 및 구조
- e-mail : gyubaekan@posco.com