

대한용접·접합학회 학술지 내 강도 분야의 지난 10년 간 연구 동향

김혁주·김명현

Overview of Research works regarding Strength field of the Journal of KWJS for Last 10 Years

Hyok-Ju Kim and Myung-Hyun Kim

1. 서 론

우리나라 산업 발전에 있어서 용접 및 접합 분야가 기여하고 있는 바는 대단히 지대하다. 자동차, 조선 및 해양, 건설 및 플랜트, 전자 등 산업계 전반에 걸쳐 용접과 접합 기술이 없이는 제품 생산이 순조롭지 못할 정도로 다양한 분야에서 응용 및 적용되어 기업 및 국가 발전에 많은 기여를 하고 있다. 비교적 일반인들의 시각에서는 두드러져 보이지 않으나 산업계 전반의 발전을 위해 용접 및 접합 분야의 많은 연구자들의 노력이 있어 왔고 이를 통해 산업 중추의 기반을 만들었다고 자평한다. 국가 산업 발전을 위한 기술적 지원과 용접 및 접합 분야의 학문적 발전을 동시에 이룩하기 위한 역할과 소임에 충실하고자 본 학회는 다양한 노력을 해왔고, 많은 연구 성과들이 발표 및 소개되어 산업 기술 발전과 연구의 연속성을 지속적으로 이어가고 있다. 본 논문은 이 같은 위치에 이른 대한용접·접합학회에서 발간하는 학회지에 게재된 많은 수의 논문들 중에서 최근 10년 동안의 용접 관련 강도 분야의 논문을 발췌하고 내용을 파악하여 그 동안의 연구 동향을 간략히 정리하였으며, 이를 통해 향후 산업체 적용 기술과 발전적인 연구 방향 등을 파악할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다. 대한용접·접합학회지는 2개월을 주기로 발행되며 평균 10~15건의 논문들이 게재되고 있다¹⁾. 이 중에서 지난 10년 간(2001년 2월~2010년 10월)의 용접 강도 분야에 관련된 논문을 총 107건 정도 추려서 정리하였다. 이 수치는 과거 10년 간 대한용접·접합학회지에 게재된 전체 논문의 대략 12% 정도를 차지한다. 본 학회의 주요 연구 분야인 용접공정, 용접시공, 용접야금 분야 등과 주제가 중복되고 일부 내용 만 용접강도 분야에 초점을 둔 논문들과 년 2회 개최하는 학술발표대회에 발표된 용접강도 분야의 논문들은 논의 대상에서 포함하지 않았다. 학술발표대

회에서 발표된 논문은 게재 수준까지 심화 연구가 행해지지 않는 경우가 많고, 연구가 중간에 여러 가지 사유에 의해 중지되는 경우 등으로 인하여 고찰 대상에서 제외되었다. 또한, 학술대회에서 발표된 우수한 연구 성과들은 본 학회지에 대부분 게재되므로 본 논문에서는 중복 및 허수 논문이 될 소지가 많은 학술대회 논문은 고려 대상에서 논외로 하게 된 이유이다. 후술할 본론에서는 용접강도 분야의 연구 동향을 형성하는 주요 주제로 몇 가지를 선정 및 분류하여 아래와 같이 나타내었다.

- (a) 강도 분야(잔류응력 관련 연구)
- (b) 강도 분야(피로 관련 연구)
- (c) 강도 분야(일반 연구)
- (d) 파괴인성 분야
- (e) 변형해석 분야
- (f) 크리프 분야

이와 관련된 주요 게재 논문의 수와 비율을 아래 Fig. 1에 나타내었다. 분석 결과를 간단히 살펴보면 용접강도 평가 분야에 전체 논문의 약 83%가 집중되어 현재까지도 가장 많은 연구 분야로 자리매김하고 있다.

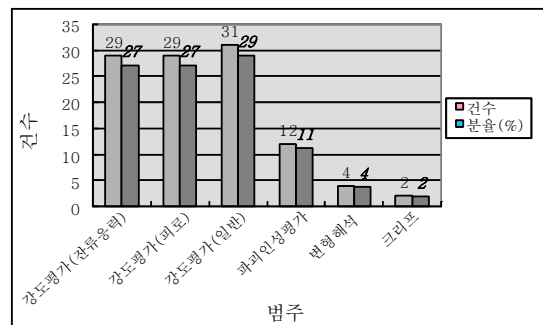


Fig. 1 Statistical result of welding strength research field

여기에는 잔류응력 관련 연구, 피로 관련 연구와 일반적인 용접에 의한 강도 평가 분야를 포함한다. 그 외 파괴인성과 변형해석 분야의 연구 순으로 정리되며, 원자력 분야 등에 국한된 고온 물성치인 크리프 거동에 대한 연구 결과가 소수 보고되었다.

2. 본론(주요 연구 분야)

2.1 강도 분야(잔류응력 관련 연구)

용접잔류응력에 관한 주제의 논문은 약 27 % 정도의 비율을 차지하였다. 용접 잔류응력의 메커니즘은 이미 오래 전부터 규명되었으나 용접공법을 적용한 구조물에서의 정확한 예측은 매우 어려운 과제이다. 따라서 많은 연구자들이 실구조물에서의 잔류응력을 비파괴적 방법인 유한요소해석을 통한 시뮬레이션과 실험적 연구를 통하여 예측하고자 노력하여 왔다. 2005년 이전에는 실제 측정값과 시뮬레이션을 병행하여 결과를 비교하는 위주의 연구가 주로 이루어졌으며, 2006년 이후에서는 시뮬레이션 기법의 편이성과 우수한 신뢰성이 검증되어 많은 연구자들이 시간적, 경제적 측면에서 어려움이 많은 실험에 기반을 둔 논문들이 다소 줄어드는 추세를 보였다. 주목할 사항은 용접 시 발생하는 잔류응력의 재분포에 많은 연구자들이 관심을 가지고 연구를 수행하고 있다는 것이다. 잔류응력의 기초적인 측정에서 피로 건전성, 균열저항성에의 영향 등 광범위한 분야로 확대하여 연구를 수행하였다. 최근에는 조선 및 해양 산업 등과 같은 중공업 분야에서 FCA(Flux cored arc)용접 기법을 적용한 구조물에서의 잔류응력을 해석하기 위한 논문들이 다수 발표되었다. 이는 잔류응력의 정확한 분포 양상과 그로 인한 구조물의 영향 등을 명확히 평가하기 위해 많은 어려움이 있으나 구조물의 건전성 문제와 직결되므로 다양한 연구를 통하여 이를 해결하고자 하는 연구자들의 노력이 반영된 것으로 판단된다. 잔류응력 문제는 특별한 강재를 대상으로 국한하지 않고 용접이 수반되는 전 재료에 걸쳐 다양하게 다루고 있는 것으로 나타났다. 이 같은 사실로 미루어 볼 때 향후에는 피로강도와 파괴인성에 있어서 잔류응력이 미치는 영향을 평가하는 방향으로 연구가 꾸준히 확대될 것으로 판단된다. 이에 대한 명확한 해를 얻기 위하여 필수적인 실험적 연구와 시뮬레이션 결과를 적절히 조합하여 최적화하는 연구가 활발해 질 것으로 기대한다. 수행된 연구 중 한 가지를 예를 들면, 아래 Fig. 2에는 유한요소법을 통한 파괴인성(CTOD) 시험편의 잔류응력 재분포를 시뮬레이션 기법을 통하여 응력해석한 결과를 나타내고 있다²⁾.

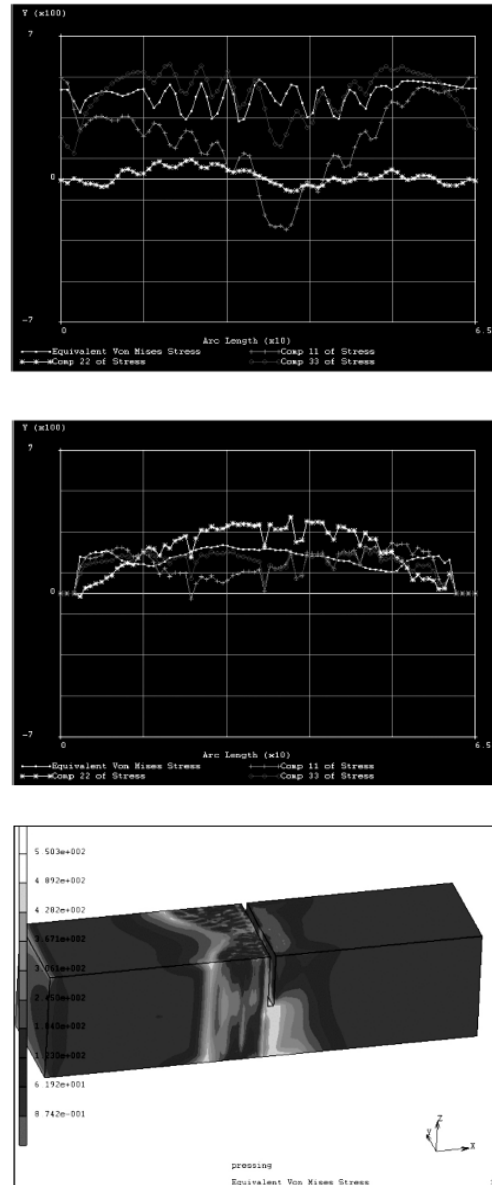


Fig. 2 Example of Redistributed residual stress in CTOD specimen

2.2 강도 분야(피로강도 관련 연구)

피로 관련한 연구 논문 비율은 전체의 약 27 % 정도로 잔류응력 분야 연구와 동등한 위치를 차지하였다. 먼저 개략적인 연구 동향을 살펴보면, 과거에는 주로 실험적 연구 위주로 용접부에 대한 피로거동을 평가하고 야금학적 관련성을 규명하는 방향으로 연구가 이루어져 왔으나 최근에는 컴퓨터의 역할이 더욱 중요해지고 처리 속도가 빨라짐에 따라 수치해석을 주로 활용하는 연속체 역학 또는 손상역학을 이용하여 피로강도를 평가하는 방향으로 연구 영역이 확대되고 있다. 또한 피로수명과 잔류응력과의 연관성을 규명하는 연구는 꾸준히

준히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 기존의 피로수명 평가에서 한발 더 나아가 피로수명 연장을 위한 다양한 연구가 이루어졌다. 예를 들면 토우 그라인딩과 용접 후처리 등을 통한 피로강도 향상을 연구하였다. 피로강도와 관련된 분야의 연구 내용을 몇 가지 살펴보면, 용접잔류 응력장을 전파하는 피로균열의 개구거동을 유한요소법으로 시뮬레이션 하여 재현 타당성과 잔류응력이 균열개구 거동에 미치는 영향 등을 평가하여 피로강도 해석의 영역을 확대한 연구가 있었으며, Fig. 3에 나타난 결과는 점용접부에 대한 피로강도를 예측하기 위하여 직류전위차법(DCPDM)의 활용가능성을 평가한 연구이다³⁾.

또한, 손상역학에 기반을 두어 인장 물성치를 이용해 비교적 정확히 용접·접합부 및 모재의 피로수명을 예측하는 연구도 수행되었다. 이를 통해 시간적, 경제적 부담이 큰 실험 피로시험을 통한 결과 도출을 간단한 인장시험을 수행한 결과만을 이용하여 실제 피로시험 결과와 정도가 우수한 수준의 성과물을 얻을 수 있는 가능성을 보여주었다. Fig. 4에는 STS304 스테인리스강재의 실험적 피로수명 평가와 손상역학 기반의 시뮬레이션 결과를 상호 비교하고 있다⁴⁾.

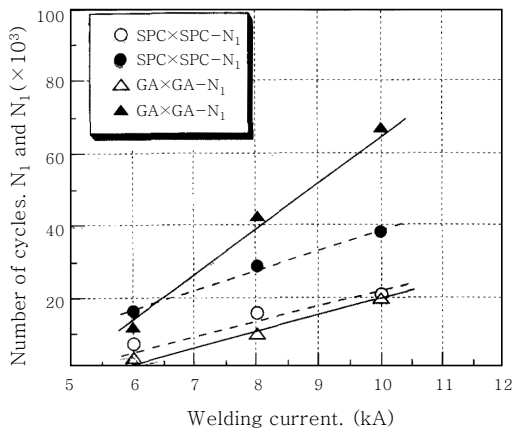
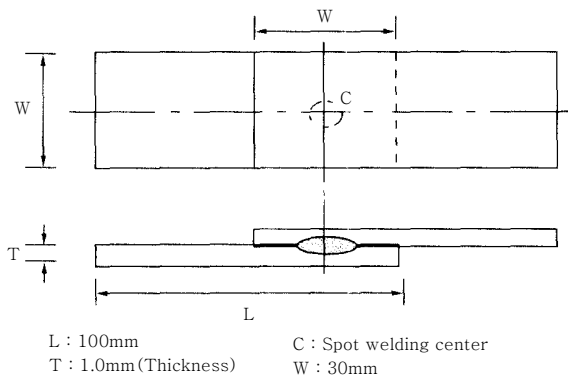


Fig. 3 Relationship of fatigue life in spot weldment depend on welding current

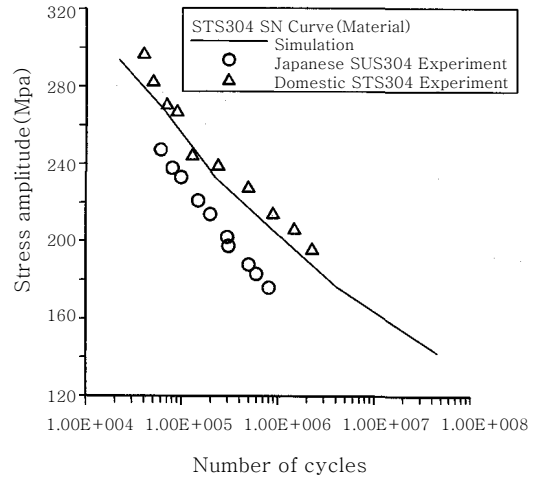


Fig. 4 Comparison of S-N relationship between numerical simulation and experiments in STS304

2.3 강도 분야(일반 연구)

가장 고전적인 분야라 할 수 있는 일반적인 응력해석과 정적 강도 평가 등의 분야에 대한 연구는 전체의 약 29% 수준으로 가장 높은 비율을 나타내었다. 이는 연구 대상 재료의 발달과 그를 위한 용접·접합재 그리고 이음시공 기법을 최적화하기 위한 검증 수단으로써 응력상태와 강도 수준을 규명하는 것이 가장 핵심적인 사항이기 때문으로 판단된다. 이 같은 흐름은 용접 및 접합 품질을 향상시키기 위한 많은 연구자들의 자연스러운 의지로 이해할 수 있으며 향후에도 같은 방향으로 연구 수준이 꾸준히 유지 될 것으로 예측된다. 이와 같은 일반적 강도 평가를 위해서 현재까지 개발된 여러 기법 중 가장 간편하고 보편화된 유한요소법을 대부분 사용하고 있으며, 비교적 최신 용접 기법인 초음파 용접, 레이저 용접, 마찰용접(FSW)에 관한 다수의 연구 논문도 발표되었다. FSW에 관해서는, 연구 당시(2001년)에 가장 최신 용접기법 중 하나였으며 이 기법에 의한 여러 가지 현상을 이해하기 위하여 접합부에 대한 열분포와 잔류응력 및 변형 특성에 대한 연구를 수행하였다⁵⁾. 현재 FSW는 각 분야에 상당히 보급이 진행되어 왔으며 알루미늄과 같은 비철 접합부 형성에 용이하며 안정화된 기법으로 인식되어 대형 기업체에서도 본격적으로 도입하려는 움직임을 나타내고 있다. 향후에는 광범위한 산업분야에서 FSW 접합이 필요할 것으로 판단되며 접합부에 대한 정적 강도 측면의 연구에서 피로와 같은 동적 특성 연구로 활발히 발전 및 전개될 것으로 기대한다. Fig. 5에는 FSW를 적용한 판재 용접 이음부에서의 잔류응력 분포 예를 나타내고 있다.

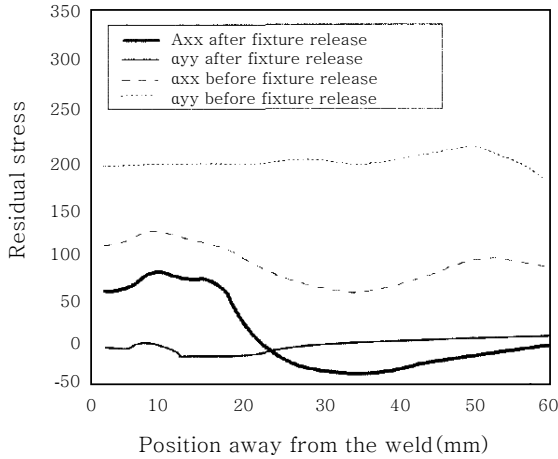


Fig. 5 Example of Residual stress in the FSW plate

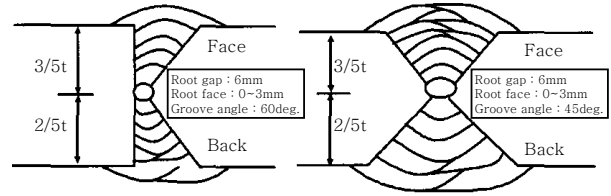
2.4 파괴인성 분야

파괴인성분야에서는 개략적으로 가장 간단하며 일반화된 충격흡수에너지(CVN, 샤르피 V-notch 충격시험 결과)와 최근에 조선 및 해양 구조물 공사에 많이 요구되는 균열선단개구변위(CTOD)에 대한 연구가 다수 이루어졌다. 파괴인성 관련 연구는 비교적 낮은 비율인 전체의 약 9 % 정도로 확인되었다. 파괴인성 분야에 관한 연구가 비교적 적은 이유는 파괴역학 학문 자체가 역학 분야에서는 가장 후발이라고 할 수 있는 1960년대 이후에 비약적 발전을 이루었고, 대부분 CVN으로 대표되는 파라미터를 연구자들은 중요한 연구 결과로 채택하기를 선호하기 때문으로 판단된다. 그러나 조선 및 해양 분야에 관련된 기업체에서는 이미 10여년 이전부터 CTOD에 관련한 기초연구를 시작하였으며, 최근에는 CTOD 파라미터는 용접 품질을 확인할 수 있는 필수적인 항목으로 인식되고 있다. 이 같은 사실에 비추어 과거 10년 간 본 학회에서의 파괴인성에 관한 연구는 수량적으로 다소 주류에서 벗어나 있다는 판단을 할 수 있다. 수행된 연구 내용 몇 가지를 살펴보면, 해양 공사 분야에 플릭스 코어드 아크용접(FCAW)이음부 대한 CTOD 특성을 규명하고 이를 금속 미세조직학적 고찰을 한 연구 결과를 Fig. 6에 나타내었다⁶⁾.

한 가지 예를 더 들면, CrMoV강에 대한 ASP(Advanced small punch)시험과 CVN시험 결과의 상관관계를 도출하는 연구도 행해졌으며 두 시험 사이에는 선형적인 상관관계가 존재하며 그 관계식을 Fig. 7에 나타내었다⁷⁾.

2.5 기타 분야(변형해석 및 크리프)

변형해석과 크리프 분야에 관한 연구 논문 건수는 전



(a) Double-bevel-groove (b) Double-V-groove

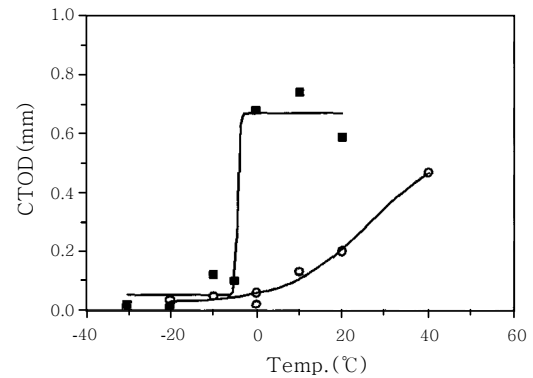
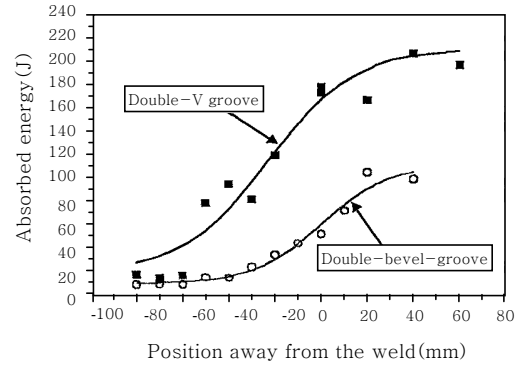
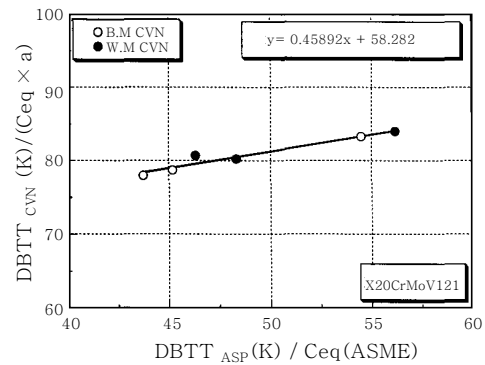


Fig. 6 Example of CVN value and CTOD characteristics with FCAW in API 2W Gr.50B steel



$$DBTT_{CVN}(K) = 0.459 \cdot DBTT_{ASP}(K) \cdot \alpha + 58.252 \cdot (Ceq \cdot \alpha)$$

Fig. 7 Example of the correlation and equation between DBTT_(CVN) and DBTT_(ASP)

체의 약 6 % 미만의 소수를 차지하였다. 많은 연구자들이 유한요소법을 이용하여 주로 응력해석에 관한 연구를 주로 수행하여 왔으나 그 사용 영역을 확대하여

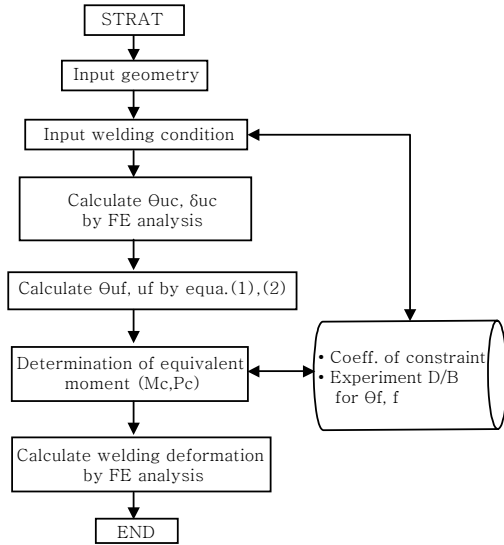


Fig. 8 Flow chart of Welding deformation analysis using with Equivalent load method

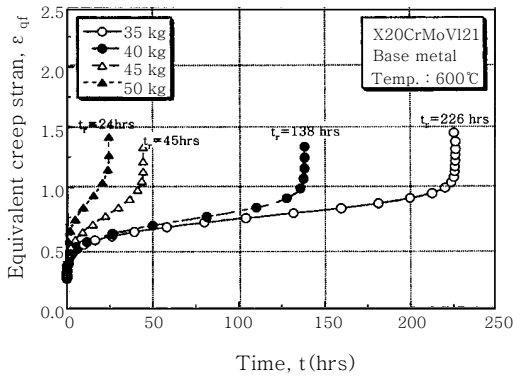


Fig. 9 Example of creep curve about heat resistant steel(X20CrMoV121) weldment

용접·접합 시 발생하는 변형량의 예측을 통한 구조물 조립 시의 정도 관리에 대해서도 우수한 해결책으로 제시하고 있다. Fig. 8에는 유한요소법을 통해 구한 응력으로 변형을 유발하는 등가하중을 추정하고 이를 통해 역으로 변형량을 예측할 수 있는 등가하중법을 설명하는 순서도를 나타내고 있다⁸⁾. 한편, 원자력 산업 등에 국한되어 사용되는 고온 물성 파라미터인 크리프 특성에 관한 연구는 2건 행하여 졌다. 모두 내열강에 대한 미세조직별 고온 크리프 특성 규명에 관한 연구이며 Fig. 9에 그 결과로서 시간별 크리프 곡선의 예를 나타내었다⁹⁾.

3. 맺 음 말

대한용접·접합학회에서 발행하는 학회지에서 강도분야에 국한한 지난 10년간의 연구 결과물에 대한 개략

적인 흐름과 주목할 연구 등을 몇 가지 살펴보았다. 아직까지는 강도 분야에서 주도적인 연구 주제는 용접 및 접합 공정상에서 유발되는 잔류응력 분포 및 구조물 건전성에 미치는 영향 최소화화 피로강도 및 이음부의 최종 물성치에 초점이 맞추어져 있다. 이를 규명하는 수단으로 고전적 실험 결과 도출을 최소화하고 컴퓨터를 이용하여 실험보다 훨씬 간편하게 유한요소 해석기법을 이용하여 결과를 추정하는 방향으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 특히, 용접을 기반으로 하는 산업체에서 사용하는 재료가 시간이 갈수록 고강도 및 고인성으로 급변하고 있으므로 이를 충분한 강도와 건전성을 가지게끔 접합하기 위한 시공법의 개발이 병행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 아직은 연구 저변 확대가 미약한 파괴인성과 크리프 등에 관한 연구가 보다 많이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 특히 신공법, 신재료 사용에 따른 적정 수준 이상의 강도 확보를 위해 관련 연구자들의 신속하고 지속적이며 심도 있는 연구 활동을 기대한다.

참 고 문 헌

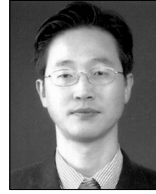
1. Byung-Hyun Shin and Yeong-Do Park: Research Activities of the KWJS for Last 20 Years, Journal of KWS, **27-1**. February. 2009
2. Sung-Min Joo, Byung-Hyun Yoon, Woong-Seong Chang, Han-Sur Bang, Hee-Seon Bang, and Chan-Seung Ro: Redistributions of Welding Residual Stress for CTOD Specimen by Local Compression, Journal of KWS, **21-6**. October. 2003
3. Hyo-Sun Yu, Song-In Lee, Il-Hyun Kwon and Byung-Guk Ahn: Fatigue Life Evaluation of Spot Weldment Using DCPDM, Journal of KWS, **19-1**. February. 2001
4. Chi-Seung Lee, Young-Hwan Kim, Tae-Woo Kim and Jae-Myung Lee: Numerical Fatigue Test Method Based on Continuum Damage Mechanics, Journal of KWJS, **25-1**. February. 2007
5. Han Sur Bang, Heung Ju Kim, Young Pyo Kim and Woong Seong Chang: Research Trends on the Numerical Simulation of FSW, Journal of KWS, **19-6**. December. 2001
6. Sung-Won Kang, Myung-Hyun Kim, Yong-Bin Kim, Yong-Taek Shin, Hae-Woo Lee: A Study on the Fracture Toughness Characteristics of FCAW Weldment of Steel for Offshore Structures, Journal of KWS, **22-6**. December. 2004
7. Dong-Hwan Lee, Hyoung-Sup Kim: A Study on the Correlation between Advanced Small Punch Test and Charpy V-notch Test on X20CrMoV121 and 2.25Cr1Mo steels Weldment, Journal of KWJS, **26-3**. June. 2008

8. Jeong-Ung Park, Jae-Won Lee, Hae-Woo Lee: Analysis of Welding Deformation by Equivalent Load Method on Steel Structures, Journal of KWS, **20-3**. June. 2002

9. Hyo-Sun Yu, Seung-Se Baek, Il-Hyun Kwon Song-In Lee: A Study on New Technique Development for Creep Evaluation of Heat Resistant Steel Weldment (I), Journal of KWS, **20-6**. December. 2002



- 김혁주
- 1972년생
- 삼성중공업(주) 책임연구원
- 피로 및 파괴
- e-mail: hyokju.kim@samsung.com



- 김명현
- 1968년생
- 부산대학교 조선해양공학과
- 구조해석, 피로파괴
- e-mail : kimm@pusan.co.kr