

# 일본의 용접연구의 발자취와 전망

김 유 철\* · 우 인 수\*\*

\*오사카대학 접합과학연구소

\*\*포스코 기술연구소

## Review of Welding Research in Japan

Youchul Kim\* and Insu Woo\*\*

\*Joining and Welding Research Institute, Osaka 567-0047, Japan

\*\*Technical Research Laboratories, POSCO, Pohang 790-785, Korea

### 1. 서 론

대한용접학회 설립 25주년을 기념하여 편집위원회로부터 「일본의 용접연구의 경과 및 전망」이란 제목으로 집필의뢰가 있었다. 집필 구성에 관해서 검토한 결과, 저자들은 일본 용접학회가 창립 70주년 및 75주년을 기념해서 발간한 특집호<sup>1,2)</sup> 「21세기에 향한 용접연구」를 소개하는 것이 가장 적절한 것으로 판단되었다.

일본 용접학회의 조직 및 그 주요활동 분야를 요약해서 그림 1 및 2에 각각 나타낸다<sup>3)</sup>. 본 고에서는 흔히

용접의 3주체로 여겨지는 프로세스, 야금 및 역학에 관한 연구의 추이, 연구의 현상과 전망에 대하여 기술하고자 한다.

### 2. 용접 프로세스

용접 프로세스에 관한 연구는 1960년 특수용접 연구위원회의 설치로부터 시작, 1965년에 현재의 용접법 연구위원회로 개명, 현재에서도 용접 프로세스 연구의 주된 역할을 하고 있다. 여기서는 용접 프로세스 별로

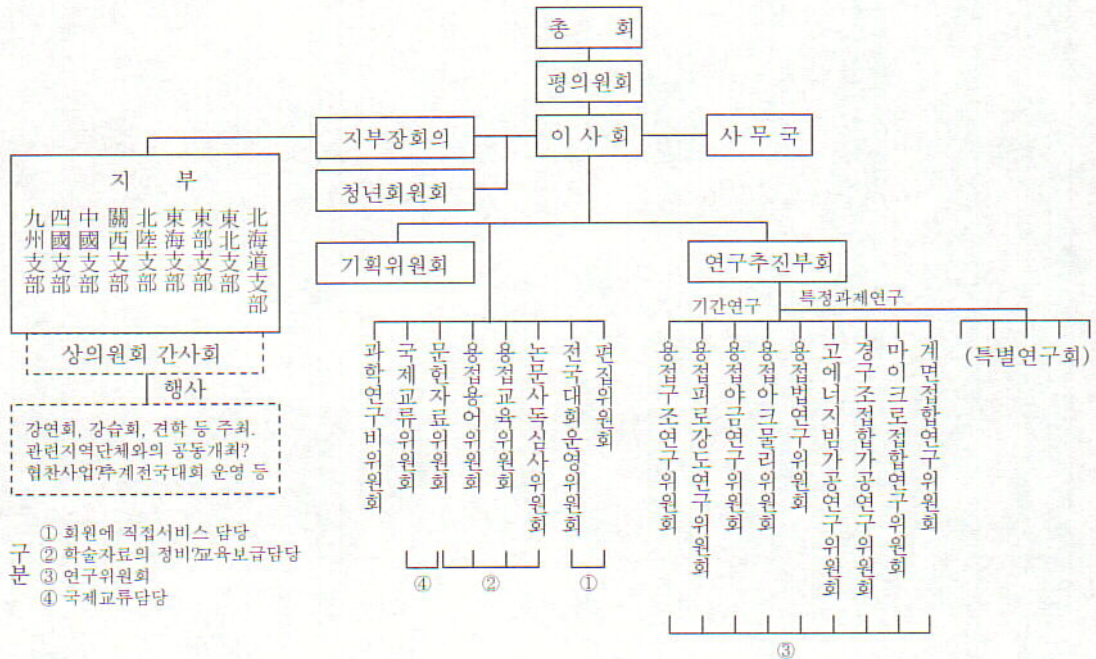


Fig. 1 용접학회 조직의 개략

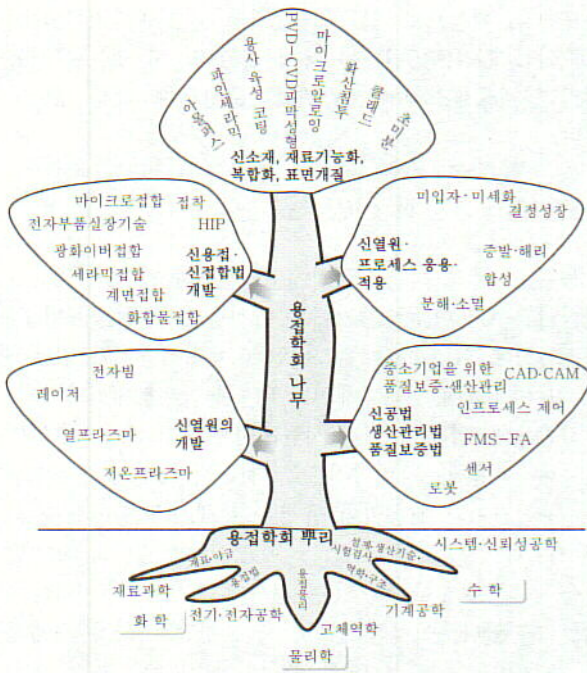


Fig. 2 일본 용접학회의 활동분야

연구의 변천을 소개한다<sup>4)</sup>.

### 2.1 연구의 변천

#### 2.2.1 탄산가스 아크 용접법

용접 프로세스에 관한 최초의 연구보고는 탄산가스 아크용접법에 (CO<sub>2</sub>용접) 관한 내용 이다 (1960년). 그 이후로 수건의 실행보고가 있었다. 또한, CO<sub>2</sub>용접에 있어서 단락이행 아크현상, MIG-용접에서 자기제어 작용 등이 1965년 및 1966년에 각각 보고되었다. 1970년에는 주행대차와 요동장치를 장착한 CO<sub>2</sub>편면 용접기의 개발에 의해 기계화가 시작되었다. 더욱이, Ar-CO<sub>2</sub>혼합가스를 이용, 스프레이 아크와 쇼트 아크를 교반하는 저주파펄스 MAG용접기 등, 많은 성력화 용접기가 개발, 실용화되었다 (1972년). CO<sub>2</sub>용접용 프릭스 와이어 (1977년) 및 스위치 트랜지스터식 펄스 MAG용접전원의 개발에 (1979년) 의한 GMAW의 보급이 촉진되었다. 1984년 및 1992년에는, 인버터식 GMA용접전원 및 파디제어 용접전원이 각각 개발되어 용접현상의 미세한 부분까지 제어가 가능하게 되어 스패터가 감소되고 로봇화가 촉진되었다. 또한, 다원계 가스 (1988년), 고전류용 프릭스 와이어 (1991년) 등에 의한 GMAW의 고능률화가 진행되었다.

#### 2.1.2 다전극 서브머지 아크 용접법

1964년에 2~3전극 편면 서브머지 아크용접(SAW)가 개발되어, 그 후 10년 사이에 일본의 많은 조선소에

보급되어 조선의 대표적 기술로서 확립되었다. 그 후, 대경관 3전극 고속SAW (1974년), 4전극 고속SAW (1982년), 협그루브 SAW (1979년), 극후판 철골의 대입열 일층SAW (1989년), 조선의 4전극 고속 편면 SAW(1993년) 등이 개발되었다. 이러한 다전극 SAW의 실용화를 위한 연구로는 이면 비드의 이음부 용량 (1968년), 편면SAW 핫답법(1970년), SAW용접현상의 X선관찰(1972년), 용융효율의 연구(1972년), 편면 SAW 중단균열의 연구(1976년), 결선방식과 전자력 (1978년), 반도체 스위치에 의한 교류안정화 전원의 개발(1978년) 등에 관한 많은 보고가 있었다.

#### 2.1.3 협개선 용접법

압력용기등 극후물재의 고능률용접법으로서 MAG, TIG, SAW에 의한 각종의 협개선 용접법이 1975년 전후의 수년간에 걸쳐서 개발, 실용화되었다. MAG-용접에서는 요동 와이어법(1974년), 트위스트 와이어법 (1978년), 굴곡 와이어법(1981년), 고속회전 아크법 (1982년) 등이 다수 보고되었다. 이러한 기술들은 일본의 대표적인 용접기술로 되고 있다.

#### 2.1.4 센서와 자동제어기술

센서와 자동제어기술은 아크용접 프로세스의 자동화, 로봇화를 추진하는 중요한 기술이며, 용접 프로세스 분야의 중요 연구과제로 되어 있다.

1970년, 전기접점식 플루프 접촉센서가 개발되어 그루브 제어의 실용화가 시작되었다. 전극 접촉식 센서가 1979년에 개발되고, 이후 아크용접 로봇의 센서로서 정착했다. 비접촉 센서로는 광전소자에 의해 그루브내의 아크광을 검출하는 그루브 제어의 연구(1970년)가 이루어 졌다. 전기센서에 의한 그루브 습득장치가 개발되어 직류형 아크용접 로봇에 적용되었다. 더욱이, 아크센서의 최초 연구로서 요동아크의 용접전류를 감지하고, 용접속도제어를 행하는 입향 완전자동 용접장치가 1976년에 보고되었다.

그 이후, 아크센서에 의한 그루브 습득에 관한 연구는 본격화하여, 파형의 제어처리법에 의해, 적분치비교법과 요동반전법(1980년), 단부치비교법(1982년), 주파수성분법(1986년), 파디제어법(1988년), 패턴인식법(1990년)이, 또는 와이어를 50Hz에서 회전하는 고속회전아크법(1982년) 등이 계속해서 개발되어, 아크센서에 의한 그루브 습득기술은 각종의 자동기, 로봇에 폭 넓게 적용되었다.

그루브폭의 변동에 대응하고, 아크센서에 의해 용접 토치 요동폭과 용착량을 제어하는 적응제어법이 1995년에 실용화되었다. 더욱이, 1985년에는 편면용접의

용융지 현상을 검출하여 비드형상을 적음 제어하는 연구가 이루어 졌다. 아크센서 현상의 동특성 해석이 1990~1994년에 이루어 졌다.

광학식센서에 의한 그루브 습득 제어법으로는 ITV등에서 관찰한 아크부를 포함하는 개선상의 화상처리법(1978년), 레이저에 의한 광절단법(1981년), PSD식 레이저센서(1985년) 등이 개발되었다.

광학식센서에 의한 적응제어법으로는 편면SAW의 비드형상 제어법(1979, 1982년), 아크장과 토치높이의 샘플치제어(1983년), 용입비드 높이의 동시제어(1987년), 용융지의 화상처리제어(1988년) 등이, 또는 용융지의 모델링과 온도센서에 의한 용융지 제어의 연구(1991년)가 진행되었다.

### 2.1.5 용접시공의 로봇화 및 시스템화

용접시공의 자동화는 치구화, 기계화로부터 시작하여, 센서와 컴퓨터를 구비한 지능화, 로봇화, 또한 다수의 로봇과 주변의 생산 프로세스를 통합적으로 관리할 수 있는 시스템화로 옮겨지고 있다.

생산가공에의 컴퓨터이용은 조선에 적용된 NC절단기가 최초의 보고이었다(1974년). 아크용접 로봇에 관해서는 1975년에 조선의 변목유육 용접로봇, 본격적인 아크용접 로봇으로서 미스타알로스가 1976년에 개발되었다. 이때부터 로봇 원년으로 불려지고 있는 1980년까지, 현재의 아크용접 로봇업체로부터 다관절 로봇이 출하되었다. 그 이후, 로봇의 CP터칭(1979년), 가반식 5축 다관절 로봇(1985년), 가반식 다층용접 로봇(1983년) 등이 다수 개발되었다. 또한, 가반 자주식의 변목용접 로봇(1984년), 외부 축과 협조할 수 있는 싱크로묘션 용접로봇(1991년), 복수핸더를 가지는 조립 용접로봇(1992년)이 개발되었다.

용접로봇의 오프라인 터칭시스템(1982년)이 고안되어, 시무스테이션의 개발(1987년), 알루미늄합금 용기의 용접 절단(1980년), 다관절 로봇에 의한 철골조립 용접시스템(1987년), 2토치 문형로봇에 의한 교량판넬의 용접자동화(1988년), 3D오프라인 터칭에 의한 교량판넬의 용접로봇 시스템(1992년) 등이 개발되었다.

CAD/CAM시스템에 의한 로봇용접은, NC제어의 다전극 전용 용접로봇(1985년), 판골용접의 CAD/CAM 시스템(1986년)의 연구에 의해서 시작되었으며, 조선분야의 조립판넬에 적용된 용접로봇 시스템(1986년), 14대의 다관절 아크용접 로봇군을 통합 제어하는 교량 용접로봇 시스템(1995년)이 보고되었다.

생산관리 시스템에 관해서는, 조선CIM을 위한 설계 생산 정보획득 지원 시스템이 1990년에 구축되었다. 또한, 최신의 조선CIM기술로서, CAD와 링크해서 제

품모델을 핵심으로 하는 생산관리 시스템(1995년)이 보고되었다. 1985년에는 용접시공관리 시스템, 용접품질의 인프로세스 보증시스템이 1991년에 각각 개발되었다.

## 2.2 연구동향과 전망

용접은 국가기간 산업임에도 불구하고, 3K(3D)로 인식되고 있으며, 21세기에는 이것을 탈피할 필요가 있다. 동시에 산업현장에는, 숙련된 용접기술자가 감소하고 있는 추세에 있다. 해결방책은 용접프로세스의 계산기지원용에 의한 모델링(시물레이션) 및 용접 로봇의 기능화, 지능화를 비약적으로 진전시킬 필요가 있다. 즉, 용접기기와 관계없이 용접 프로세스에 관해서 정확한 시물레이션을 할 수 있는 프로그램의 개발과 용접현상을 직접 관찰할 수 있는 센서의 개발이 시급하다고 말할 수 있다. 이러한 경향은 일본뿐만 아니라 세계적인 추세이며, 이것을 해결하는 자가 세계의 용접 프로세스를 이끌어 나갈 것으로 생각된다<sup>5)</sup>.

한편, 현재까지 많은 용접, 접합프로세스가 개발되어 왔지만 작금의 일본 용접학회에 발표건수를 보면 레이저 용접 및 영국 TWI에서 개발된 마찰교반접합에 관한 연구가 주종을 이루고 있다.

## 2.3 요약

21세기 연구동향으로서, 용접 프로세스 분야에는 모델링(시물레이션)에 관한 연구의 중요성을 지적했다. 모델링에는 많은 물성치가 필요하게 된다. 물성치의 측정은 막대한 경제적 부담과 시간, 더욱이 끈기가 요구되지만 정확한 모델링을 위해서는 이 분야에 대한 보다 많은 관심이 필요할 것으로 생각된다. 이것과 함께, 모델링에서 얻어진 결과의 타당성을 검증할 실험실측, 또한 중요한 과제이다. 이 두 가지 요소를 병행하지 않고서는 용접프로세스의 정량적 연구는 기대하기 어려울 것으로 생각된다.

## 3. 용접 야금 재료

용접야금 분야는 용접·접합부의 현상을 재료학적 관점으로부터 연구하는 것을 말한다. 이하에서는, 용접학회 야금 연구위원회에서 발표된 주요 연구과제의 변천에 대해서 기술하기로 한다.

### 3.1 연구의 변천

표 1은 1975년 이후, 개최된 용접야금 위원회에서 발표된 연구보고 총건수, 특별강연 건수 및 연구보고의

표 1 일본 용접학회 용접구조 연구위원회의 주요연구과제의 추이

	WD분과회 설립(1969)	1975	1980	1985	1990	1995	2000
구속도와 전온균열	편면 자동용접 중단균열 구속도, 균열방지에열은도 균열감수성지수 $P_{CM}$ , $P_C$ , $P_{H2}$ 인프리트 시험등장 균열시험의 상관 1.	다층용접 마이크로 균열 $H_{v,max} \leftrightarrow C_{eq} \sqrt{J/T_{R/5}}$ 변위제어 인프리트 시험 균열시험의 표준화 FEM해석의 도입	균열감수성 파라메타 PHA, CEN 특이 용력장 파라메타의 적용				
용접변형 잔류응력	횡수축·횡굽힘변형 각변형 구속도의 영향 파라메타 $Q/h^2$ , $Q/h$ FEM해석의 도입	회전변형 상변태 선상가열 고유변형이론 잔류응력측정법	협개선 용접의 변형 원동·구실의 변형, $\sigma_r$ , 피닝제의 $\sigma_r$ 간이 평가식 3차원 $\sigma_r$ 측정법			용접변형 시뮬레이션 고도공작 정도관리	
이음부강도 구조성능	연질 이음부		토우용력집중 불균질재의 크리프	저YR강과 구조성능		건축 철골 이음부	
취성파괴 인성평가	파괴역학		결함평가 불균질재의 파괴역학 정하중 시험 9%Ni강 균열 전파	Pop-in 확률론 토크 어프로치 LBZ문제	국부적 불균질 강도 불일치 소성 구속 예변형 열화 동적파괴문제	강도 불일치 소성 구속 예변형 열화 동적파괴문제	강도 불일치 소성 구속 예변형 열화 동적파괴문제
피로			변동하중	균열 개폐구 잔류용력장의 균열전파	발생 전과 통일평가 균열전과	통일평가 균열형성기구	
환경강도				용력부식균열	부식피로 내식성평가		
구조제작			하중작용하의 보수 本四連絡橋 대형펜스트록	시설자동화 시스템화 朝石大橋	시설 자동화 시스템화 대지진피해 고강도강 이용기술 차량경량화 및 소중력하의 시공	시설 자동화 시스템화 대지진피해 고강도강 이용기술 차량경량화 및 소중력하의 시공	
신뢰성		비파괴시험의 신뢰성		파괴이론	예측수명평가 열화진단		
이종재료 접합				금속/세라믹 열용력 응력특이성 계면 강도	피막, 박막 경사 기능계 강도평가시험	전차 디바이스 이종재료 이음부 이용 박리강도 계면 신뢰성	
복합재료					FRP FRM 스마트재료 신뢰성평가 시뮬레이션	나노 프로젝트 이전 파인 세라믹	

주제를 연차 순으로 정리한 결과이다<sup>6)</sup>. 연구위원회는 년 4회 개최되고 있으며, 연구보고 건수는 변동이 있지만, 연간 30~40건 정도 발표되고 있는 것을 알 수 있다. 연구보고의 주제는, 년도 첫 회의 위원회에서 결정되기 때문에 그 년도에서 주목되는 연구테마의 키워드를 나타낸다.

한편, 연구주제에 관해서 보고된 연구과제의 추이는 이하와 같은 산업계의 배경을 반영하고 있다.

1975년-1980년: (1) 용접화학야금, (2) 용접물리야금, (3) 비철재료의 용접성

1975년대는 제1차 및 제2차 오일쇼크에 기인한 조선 및 중공업관련의 불황이 일본의 산업에 큰 영향을 미쳤으며, 그 영향이 연구과제에서 극단적으로 나타나고 있다. 즉, 1975년-77년에는 고부가가치화를 목적으로 한 기술개발이 진행되어, 신 강종인 초고장력강, 고순도 스테인리스강, 신이상 스테인리스강 등이 출현됨과 동시에 프라즈마 용사, 전자빔 용접(EBW) 등과 같은 신 용접법의 실용화에 많은 연구가 진행되었다. 고순도 스테인리스강의 용접에 따른 인성 및 내식성의

취화, 또는 이상 스테인리스강의 용접에 따른 용접 열 영향부의 페라이트 및 오스테나이트상의 상용변화, 질화물의 석출등에 의한 용접부의 강도, 인성, 내식성의 변화에 관해서 많은 연구가 이루어 졌다.

1981년-1985년: (1) 스테인리스강, 고합금강 및 특수재료의 용접성, (2) 이종재료의 용접, (3) TMCP 강 용접성

1980년대에서는 용접구조물의 경년 열화에 관한 화제의 하나로서 철강에 육성한 오스테나이트계 스테인리스강의 본드부에서 발생하는 균열이 문제가 되었다. 이 현상의 원인은 육성 용접부와 모재의 수소 고용도 차이에 의해 본드부에 수소가 집적하는 것이 주원인인 것으로 밝혀졌으며, 이것에 대한 개선방법이 제안되었다.

한편, 용접야금현상에 관한 기초적인 해석에 관한 연구는 스테인리스강을 대상으로 해서 상변태, 석출현상에 관해서 이론 모델을 이용한 정량적인 해석이 행하여졌다. 또한, 강 용접부의 조직에 관한 용어가 정리되어, 호칭의 통일이 도모되었다.

1986년-1990년: (1) 복합화의 용접야금 특성,

(2) 고능률 용접부의 용접야금, (3) 표면개질, (4) 고도표면 기능화, (5) 신재료, 특수재료의 접합

1985년 이후, 고장력강의 TMCP화가 본격적으로 진행되고, 그의 용접에 관한 보고가 일순간 증가하였다. TMCP강의 용접에서는 열영향에 의한 성능의 열화, 균열, 변형 등이 문제가 되었지만, 적정조건으로 용접하는 것에 의해, 이러한 문제를 극복할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 또한, 전후의 경제 부흥기 이후에 건설된 구조물의 노화에 따른 용접구조물의 경년 열화 및 수명평가, 보수용접에 관한 보고가 증가하고 있는 것이 주목된다.

1991년-1995년: (1) 선단 재료의 접합, (2) 용접야금 현상의 정량적 검토, (3) 고합금 재료의 용접성, (5) 표면개질

1989년에 접어 들면서, 연구보고의 내용이 큰 폭으로 변화하였다. 즉, 종래의 용접에 관련된 과제 이외에 계면접합, 표면개질 등에 관한 보고가 큰 폭으로 증가하였다. 이에 반해서, 균열 등의 용접결함에 관한 발표가 급격하게 감소하였다. 표면개질 분야는 CVD, PVD 등의 박막에 의한 개질처리에 관한 보고가 많은 것이 주목된다. 또한, 계면접합은 금속의 접합 이외에 세라믹/세라믹, 세라믹/금속의 접합에 관한 연구보고가 많았다. 즉, 연구대상이 용접으로부터 접합 및 표면개질 등, 그 밖의 가공분야로 확대되고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 용접·접합부에 있어서 조직해석, 용접결함의 발생기구의 해명과 그의 방지에 관한 연구는 이와 같은 정세의 변화에 관계없이 일정 건수가 발표되었다.

1996년-1999년: (1) 보수용접 수명예측, (2) 레이저 용접, (3) 용접결함, (4) 고합금 재료의 용접성, (5) 표면개질

최근에는 종래의 없는 획기적인 접합법인 마찰교반용접(Friction Stir Welding)의 개발, 레이저용접의 보급과 함께, 이러한 용접야금 현상을 재료학적 관점에서부터 해석하는 연구가 이루어 지고 있다. 또한, 한편으로는 용접야금 현상의 모델링과 시뮬레이션에 관한 연구가 진행되고, 용접야금현상을 정량적으로 검토, 신뢰성이 높은 용접·접합 이음부를 제작하기 위한 가공정보의 도입이 검토되고 있다.

### 3.2 연구동향과 전망

정보기술의 발달에 의한 글로벌화의 진행에서 일본의 산업구조 또한 변화를 요구하게 되며, 제조업의 생산거점이 해외이전, 지식집약형 생산형태로의 이행, 숙련작업자 및 고도 기술자의 감소 등, 용접·접합기술의 전승 또한 충분히 행하여지지 않을 만큼 빠른 속도로

세상이 변화하고 있다. 이와 같은 사회적 배경하에서 금후의 연구 활동으로는, 이하와 같은 일이 중요할 것으로 생각된다.

- (1) 과거의 학술정보, 기술 및 경험의 데이터 베이스화, 또한 이것을 기반으로 해서 가공정보, 재료정보를 효율 높은 용접시공 등에 적용한다. 이것을 위해서는 종래의 경험에 기초한 현상해석을 어떠한 방법을 이용해서 보다 정량적인 해석으로 이행시킬 수 있는가? 가 중요한 포인트이며, 그 하나의 방법으로서 용접·접합현상의 모델링과 시뮬레이션의 도입이 필요하다고 말할 수 있다.
- (2) 레이저 용접 및 마찰교반 용접과 같은 신 용접법에 있어서 용접야금현상의 해명

### 3.3 요약

일부에서는 용접기술 분야를 이미 성숙한 기술영역으로 평가하고 있는 경향이 있다. 그러나, 용접과 관련된 문제는 현재에도 끊임없이 발생하고 있으며, 그 원인 또한 명확히 밝혀지지 않는 경우가 많다. 더욱이, 21세기 산업분야의 생존이 걸려있는 신기술개발에 관해서는, 신재료의 개발 및 제품성능에 대한 요구의 고도화와 함께, 용접야금 분야에 요구되는 문제 또한 복잡, 다양화되는 것은 상상하기 어렵지 않다. 즉, 금후에도 지속적으로 개발 예상되는 신재료에 대해서도 그의 용접·접합에 대한 문제점 파악 및 해결에 대한 지속적인 노력이 필요할 것으로 생각되어 진다.

## 4. 용접역학

용접구조체의 설계, 가공, 재료를 포함, 구조체의 사용 안전성을 보증하는 일을 목적으로, 「개개의 요소를 어떻게 조립, 평가할 것인가」가 이 분야의 연구 과제이다. 용접을 이용한 제품생산에 있어서 비교적 설계에 가까운 분야와 조립된 구조체의 강도, 파괴 등의 안전성을 고려하는 분야이다. 시대에 대응하여, 용접기술과 제조되는 구조, 제품에 대응해서 연구과제가 취급되고 있다. 이하 연구과제의 변천을 열거한다.

### 4.1 연구의 추이

일본용접학회 용접구조연구위원회에서 발표, 토의된 화제의 추이를 년도별로 기술한다. 또한, 그와 관련된 내용을 정리하여 Fig. 3 및 표 2에 나타낸다<sup>7)</sup>.

설립-1970년: (1) 저온균열과 구속응력, (2) 용접 변형, (3) 용접잔류응력, (3) 이음부의 정적강도 평가

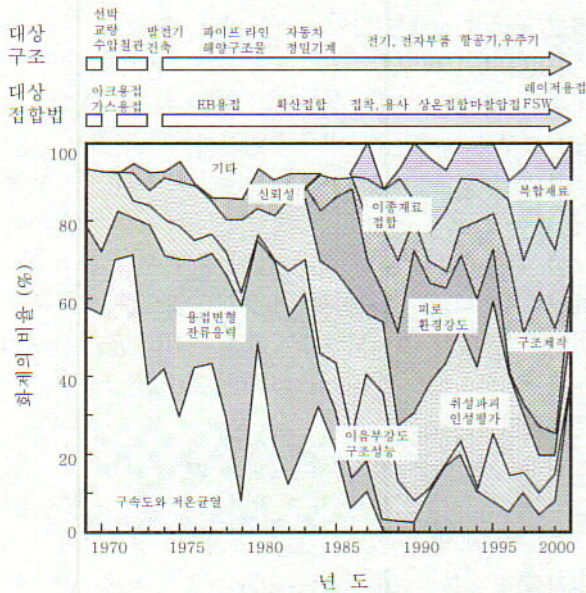


Fig. 3 일본 용접학회 용접구조 연구위원회에서 토론된 주요연구과제의 추이

저온균열의 발생 방지, 용접변형 잔류응력, 이음부의 정적강도 평가가 이 시기의 3대 테마이었다. 이중에서도, 저온균열에 관한 연구가 많았으며, 역학적 지표로서 이음부의 구속도, 각종 균열 시험편(TRC, RRC 및 슬릿형 등)의 구속도, 구속도 냉각시간과 저온균열의 관계, 강재의 균열감수성 지수, 균열방지 예열온도 등이 활발하게 토론되었다.

용접변형, 잔류응력문제로서는 횡수축·횡변형, 구속과 변형의 관계 등이 취급되었다. 이음부 정적강도 평가에서는 연질 용접이음부의 강도특성이 화제로 되었으며, 연화부의 상대두께가 작으면 이음부 강도에 특히 문제가 없는 것으로 밝혀졌다. 이 결과는 80kg급 고장력강의 용접시공에 있어서 균열방지 예열온도의 저하로 이어졌다.

1971년-1975년: (1) 용접잔류응력·변형의 일반 평가, (2) 저온균열, (3) 연질 용접이음부, (4) 취성파괴

표 2 일본 용접학회 용접야금 연구위원회에 발표된 연구보고 총건수, 특별강연건수 및 의 연구보고의 주제

년 도	연구보고 총 건수	특별강연 건수	주 제
1975	29	3	용접화학야금, 이종금속의 용접야금, 용접물리야금, 플럭스 와이어에 의한 용접, 용접부의 야금적 재 성질
1976	29	0	용접물리야금, 용접부 재 성질에 미치는 개재물의 영향, 용접화학야금, AI 및 AI합금의 용접야금
1977	35	1	용접화학야금과 인성, 용접물리야금, 철강재료의 용접성, 비철재료의 용접성
1978	30	0	용접화학야금, 용접물리야금, 철강재료의 용접성, 비철재료의 용접성
1979	34	0	용접화학야금, 용접물리야금, 용접이음부의 기계적 성질과 금속조직, 조성과의 관계, 각종 금속재료의 용접성
1980	36	0	용접화학야금, 용접물리야금, 내열·내식재료의 용접성, 비철재료의 용접성
1981	55	0	조직과 인성, 고온균열(SR균열 포함), 철강재료의 용접성, 스테인리스강·내열강의 용접(육성용접 포함), 고합금강의 용접야금
1982	40	0	파괴조직 심포지움, 용접야금 일반, 스테인리스강 및 이종재료 용접부의 야금 특성, 저온강의 용접야금, 금속·비금속의 접합부의 제성질
1983	46	0	강용접부의 환경에 의한 열화, 특수재료와 그의 접합, 이종재료·특수재료의 용접야금
1984	39	1	철강의 용접야금, 심포지움: 용접부의 조직·합금재료의 용접야금, 고능률화 용접법에 있어서 용접야금, 특수신재료·이종재료의 용접야금
1985	37	1	TMCP강의 용접야금, 사용성능·이음부 특성의 개선, 미량·특수원소의 효과, 신재료·이종재료의 용접야금
1986	37	1	PWHT심포지움, 신성능 특성·표면개질, 마이크로 조직, 용접성, 인성의 개량과 그의 지표, 신재료, 특수재료, 이종재료
1987	27	0	복합화의 용접야금 특성, 극한사용재료의 용접, 미량·특수원소의 유효효과, 고능률·고속 용접부의 용접야금(EBW, LBW포함)
1988	37	1	스테인리스강의 용접, 분체가공, 내열재료의 용접, 표면개질
1989	39	1	건축 및 토목관련 분야의 접합, 표면개질 및 용사, 용접부의 신평가법, 신재료·특수재료의 접합
1990	34	1	일·미 심포지움「용접야금의 진보에 대하여」, 고도표면 기능화의 재료과학, 철계 신소재의 접합, 재료복합가공
1991	42	2	철강 신재료, 금속간 화합물, 스테인리스강, 분체가공
1992	40	1	고합금강 재료(육성 포함), AI합금의 용접야금, 철강재료(용접재료 포함), 표면의 기능화
1993	29	0	철강재료, 용접·접합 국제 세미나「선단재료의 용접·접합」, 내열·내식재료, 분체관련
1994	30	5	철강재료, 실용신소재, 용접야금현상의 정량적 취급, 레이저를 이용한 표면개질 프로세스
1995	31	2	고합금 재료, 토목 및 건축에 있어서 용접, 철강재료, 재료표면의 기능화
1996	33	2	고합금 재료, 보수용접·예수명 예측, 철강재료, 레이저용접·가공
1997	33	0	고합금 재료, 시공 및 사용시의 용접결함, 철강재료, 표면개질
1998	30	2	고합금 재료, 용접결함, 철강재료, 표면개질
1999	30	1	철강재료, 용접결함, 고합금 재료, 표면개질

프랑스에서 제안된 외적구속 균열시험(인프란트 시험)이 소개되어 TRC, RRC시험과의 상관관계가 토론되었다. 이음부 형상 루트의 폭과 구속도의 관계, 구조물의 구속도 등이 검토되었다. 한편 자동용접에서 발생하는 종단균열에 대한 문제가 활발히 토론되었으며, 종단균열 문제에 관한 유한 요소법(FEM)의 해석이 행하여졌다. 용접변형·잔류응력에 대해서는 변형량과 잔류응력분포의 지배인자에 관한 이론적 고찰에 의해, 파라메타인 입열량  $Q$ 와 판재의 두께  $h$ 에 의존하지 않고, 파라메타  $Q/h^2$ ,  $Q/h$ 에 의해 변형량 및 잔류응력이 평가될 수 있는 것이 보고되었다. 또한, FEM 열탄소성 해석이 행하여졌으며, 다층 용접이음부의 잔류응력 및 선상가열에 의한 각변형 문제, 응력제거 소둔문제 등이 연구되었다.

한편, 용접이음부의 취성파괴 특성의 연구가 이 시기에 등장하였다. 균열선단 개구변위 CTOD 및 J적분에 의한 탄소성 파괴인성 평가, 용접결함과 파괴연성 등이 검토되었다. 또한, 선상가열 및 용접열 변형에 의한 재질열화가 주목되어, AWN 시험편(용접 전에 가공)과 BWN 시험편(용접 후에 가공)을 이용한 취화기구에 관한 고찰이 이루어졌다.

**1976년-1980년:** (1) 저온균열의 역학적 지표, (2) 파괴역학, (3) 인성평가, (4) 결함평가, (5) 비파괴검사의 신뢰성

저온균열 연구의 성숙기이며, 1)국부응력, 2) 확산성 수소량, 3) 강재의 균열감수성 지수의 3요소로부터 본 저온균열 방지법이 연구되었다. 균열한계응력은 최고경도  $H_v, \max$ 에 관련되고,  $H_v, \max$ 는 강재의 탄소 등량  $C_{eq}$ 와  $800 \sim 500^\circ\text{C}$ 의 냉각시간  $\Delta t_{800/500}$ 에서 결정되는 것이 밝혀졌다. 또한, 균열시험법의 표준화에 관한 검토, 변위제어형 인프란트시험과 RRC시험과의 대응성에 관한 고찰, 특이응력장 파라메타에 의한 균열한계의 통일적 평가 등이 이루어졌다. 라메라테에 문제도 이시기에 검토되었다.

용접변형 문제는, 박판, 원통·구각 등 각종 형상부재의 변형특성, 회전변형과 용접조건과의 관계가 검토되었다. 잔류응력 측정에는, 변형계이저를 이용한 해방법, 소절편에 의한 3차원 잔류응력 측정법, X선에 의한 비파괴 계측법이 적용되었다. 또한, 고유변형을 매개로 하는 잔류응력 측정법이 새롭게 제안되었다.

파괴역학 분야는 전반적인 변형에 의한 파괴성능평가, J적분에 의한 연성파괴평가, CTOD설계곡선의 적용성 등이 검토되었다. 또한, 구조신뢰성 평가에 관한 연구가 행하여졌으며, 비파괴 시험의 신뢰성을 고려한 허용한계 결함의 평가, 강도·하중의 통계적변동을 고

려한 구조강도 해석 등이 실시되었다.

**1981년-1985년:** (1) 불균질재와 파괴, (2) 강용접부의 인성평가, (3) 열변형 취화, (4) 저항복비강, (5) 정하중 파괴, (6) 비파괴 검사와 구조신뢰성

저온균열의 문제에서는 균열감수성의 지표 파라메타에 관한 보고가 많았고, 종래의  $C_{eq}$ 와 PCM에 비교하여 광범위의 탄소량 ( $C < 0.3\%$ )에 적용 가능한 파라메타 CEN과, 수소확산과 이음부 구속도를 고려한 평가 파라메타가 제안되었다. 또한, 각종 균열시험법의 상관관계와 소형 시험편에 의한 수소농도 측정법 등이 검토되었다.

이시기에 각종 구조요소의 용접변형·잔류응력 해석이 성황을 이루었고, 원기둥 압력용기 노즐부등을 대상으로 한 해석결과로부터, 용접변형·잔류응력의 간이 평가식이 고안되었다. 또한, 고유변형 이론을 구사해서 박판 시험편 만을 이용한 용접부의 3차원 잔류응력분포를 정밀하게 측정하는 방법이 제안되었다. 시공관련에는 후판 용접부의 변형문제가 대두되었다. 이음부 강도 평가에는, 강도적 불균일에 관련된 연구가 진행되었다. 60kg급강 연결이음부의 강도평가, 불균일을 고려한 용접부의 크리프 성능평가 등이 있다.

파괴역학분야에서는 용접부의 재질균열에 주목한 연구가 전개되었다. 저인성부를 포함하는 용접부의 파괴인성평가, pop-in파괴의 안전성 평가, 급히한계 CTOD와 인장한계 CTOD의 대응, 강도 불균질재의 충격흡수 에너지의 의미, 균열주변의 응력 변형특성과 강도적 불균질 등이 대두되었다.

실 시공관련에서는 교량의 용접에 의한 보수·보강문제, 혼슈시코쿠 연결교의 용접시공이 화재로 올랐다. 이 시기로부터, 피로강도 문제도 적극적으로 취급되기 시작했다. 잔류응력의 재분배를 고려한 피로균열전파 해석, 변형·하중하에서의 과적피로손상·피로강도에 미치는 스파이크 하중의 영향 등이 보고되었다.

**1986년-1990년:** (1) 불균질재의 파괴역학, (2) 강용접부의 인성과 국부적 취화부(LBZ), (3) 확률론적 평가, (4) 복합재료, (5) 이종재료 접합체의 열응력

다층용접부의 파괴특성, 저항복비강과 구조성능, 이종재료 접합체의 응력·계면강도 등이 이 시기의 중요한 테마였다. 고강도강으로서 용접성이 뛰어난 TMCP강이 개발되어, 해양구조물등에 본격적으로 적용될 때에, 다층 용접열영향부에서의 국부적 인성취화부(LBZ)의 존재가 화재로 되었다. LBZ문제와 관련해서 파괴발생의 지배조직, 파괴한계 CTOD와 LBZ치수 시험편·판두께의 관계, 균열도입위치의 영향, LBZ프리 기술 등이 연구되었다. 또한, TMCP강의 대입열 용접시의

HAZ연화가 화제로 되어 시공성이 검토되었다. 피로관련으로는 변동하중에서의 균열발생과 전파, 잔류 응력장에서의 균열전파, 균열개폐구를 고려한 전파특성평가 등이 토론되었다. 또한, 용접부의 부식피로, 응력부식균열, 수소침식 등, 환경강도평가에 관한 보고가 많았다.

한편, 재료의 고기능화, 세라믹/금속접합과 같은 이종재료로서 기능을 적극적으로 활용하는 움직임이 많았고, 접합계면 근방의 열응력·잔류응력특성에 있어서 응력 특이성의 유무, 계면강도와 그의 평가법등이 연구되었다.

1991년-1995년: (1) 계면역학, (2) 파괴인성 시험법, (3) 국부적 불균일재, (4) 박막·피막과 계면강도, (5) 용접역학의 시스템화

강도·인성의 불균질에 착안한 용접부 파괴연구, 계면역학, 용접역학의 시스템화 등이 이 시기의 중심 과제로 되었다. 강도적 불균질과 파괴특성, 저인성부를 포함하는 재료의 파괴인성평가 등, 강도 인성의 불균질을 취급하는 파괴연구가 세계적으로 유행을 하였고, 「Mismatch」을 키워드로 하는 연구분야가 탄생하였다. 또한, 와이블 응력을 파괴 구동력으로 하는 로컬어프roach가 도입되어 파괴시험의 transferability의 연구가 시작되었다. 피로분야에는 균열발생과 전파에 기여하는 유효부하지표가 토론되어 발생·전파의 통일적 평가가 시도되었다.

계면역학 분야에는 이종재료의 이음부와 피막 박막의 계면강도, 밀착강도의 평가시험법, 접착이음부의 강도, 경사기능재의 열응력특성 등이 연구되었다. 또한, 섬유강화 복합재를 시작으로 하는 복합재료의 역학특성과 이용기술에의 관심이 높았다.

용접변형·잔류응력에 관해서는 용접변형 시뮬레이션 기술이 발전하였으며, 조선·교량·건축분야에서 용접시공의 자동화·시스템화의 움직임과, 실용화의 기대가 높아졌다. 또한, 고유변형이론에 의한 3차원 잔류응력 분포의 측정과 그의 간이화에 관한 연구가 전개되었다.

구조제작에서는 아카시 대교의 건설, 예열 저감형 80kg급 고장력강이 화제로 되었다. 또한 구조물 기기의 경련 열화진단과 수명평가의 연구가 중요성을 증가시키는 한편, 용접·접합기술의 전문문제가 부각되었다. 이 시기에 지구환경문제와 같은 새로운 연구테마도 등장하였다.

1996년-2000년: (1) 용접변형의 제어, (2) 이종접합계면의 역학과 재료설계, (3) 불균일재의 파괴역학과 합리적인 파괴인성요구, (4) 계산기활용 용접역학, (5) 용접현상의 시뮬레이션과 용접부 역학특성의 예측 방법, (6) 대규모 용접역학평가 시스템의 구축

불균일역학·계면역학을 구사한 고기능화·다기능화, 메조·나노 메카닉스를 도입한 재료접합과학, 계산기지원용에 의한 설계·시공지원 시스템, 제품제작의 시뮬레이션, 생산기술에의 부가가치개념의 도입 등, 21세기를 향한 용접역학 연구의 발전방향의 다양한 가능성이 검토되었다. 특히, 차세대 구조화기술에 관해, 고강도강의 특성을 활용하는 구조화를 위한 재료·역학연구의 방향, 숙련기술자의 감소에 따른 공작정밀도 기술의 관리에 대한 토론이 활발하게 이루어 졌다.

주된 연구과제로서는 효고현 남부지진에서의 피해사례를 교훈으로 취성과파괴 연구가 있었고, 대지진시의 대변형과 동적부하의 영향을 고려한 파괴평가, 교량 용접부와 구조변형과의 관계 등이 긴급과제로서 떠올랐다.

## 4.2 연구동향과 전망

용접역학연구는 가공 프로세스에 주어지는 용접 아크열과 그것이 따른 역학현상을 해명하는 일을 주제로 하고 있다. 상술의 용접학회 용접구조연구위원회가 취급한 연구발표의 내용을 기본으로 하면, 용접시공과 그것에 의해 발생하는 용접변형·잔류응력, 저온균열등의 발생·방지조건의 선정, 용접 이음부 강도와 파괴의 문제가 주된 과제이다.

연구내용의 특징을 개관하면, 실험방법에서는 실 구조물에서 발생하는 각종 역학현상을, 역학조건을 일정하게 유지하면서 소형시험편에 두는 것이 주제였다. 해석방법에서는 미분방정식을 기본으로 한 해석방법으로부터 변분 원리에 기초를 둔 근사해법, 즉 유한요소법과 경계요소법에 대표되는 해석법을 구사하여 많은 결과를 얻었으며, 역학현상의 이해가 비약적으로 진보했다.

용접구조물을 대상으로 한 시공과 성능을 취급한 연구는 기본적인 이론 해석으로부터 실용기술로 이어지고, 실시공과 구조강도평가에 활용되어 왔지만, 대상구조 재료의 다양화와 정밀도의 요구 등 때문에 용접부 특유의 불균질에 주목한 연구가 많아진 것 같다. 더욱이 용사등에 의한 재료의 표면개질을 연구대상으로 하는 등, 이종재료접합에 따른 역학적 특성을 취급하는 연구가 크게 흘러오고 있다. 또한, 용접역학을 기본으로 해서 설계와 시공 프로세스, 재료 등을 종합적으로 검토하는 필요성으로부터 다른 연구분야와의 공동연구도 중요하게 되었다.

한편, 연구분야가 세분화되어 종래로부터 전해져 왔던 지식의 확산과 계산기를 이용한 데이터 베이스화에도전하고 있다.

상술의 연구추이를 반복하여, 용접 접합분야에 있어서 급후에 요구되는 화제로서 다음과 같은 것이 열거할



수 있다<sup>8)</sup>.

1. 정보산업기술에 대응
2. 리사이클성에 대응: 접합과 절단의 기술적 결합
3. 고부가가치화에 대응: 접합에 의한 제품 또는 생산 기술에의 부가가치의 도입
4. 생산기술 체계화에 대응: 고정밀화에 대응기술의 개발
5. 신재료 기술전개에 대응: 접합으로 말해지는 본래의 계면제어 기술의 재료구조화 등

용접역학분야의 연구도 이러한 흐름을 완성 또는 보강하는 형태로 연구가 전개될 것으로 생각되어 진다. 금후 필요한 연구는 용접 접합을 출발점으로 하는 역학분야에서의 신과학을 창조하는 연구가 중요함과 동시에 기술적으로는 통합적인 생산시스템 가운데 활용되는 실물해석 평가시스템을 완성하는 노력이 필요하다.

### 4.3 요약

일본에 있어서 용접역학분야의 연구추이, 연구동향, 전망 등의 문헌을 충실히 소개했다. 연구추이로부터 추측하면, 역학현상의 해명뿐만 아니라 용접에 관련한 연구전체에 있어서 계산기의 지원은 현 연구수단의 주류로부터 옮겨져 왔으며, 이러한 경향은 더욱더 증가할 것으로 예상된다. 이 분야는 저자의 전문분야로서 일본, 세계에 있어서 용접관련학회등에 참가한 경험을 기초로 정리한 것이다.

용접역학 중에서도 용접변형·잔류응력을 대상으로 하는 분야에서는 범용프로그램이 시판되고 있으며, 이러한 것은 데이터 작성으로부터 결과의 표시까지 간단히 얻어낼 수 있다. 이와 같은 장점을 보유하고 있기 때문에 일반적으로 널리 이용되고 있지만, 큰 결점 또한 갖고 있는 것을 말하고 싶다. 즉, 범용프로그램에서도 결과의 정당성을 평가하는 기능은 없으며, 결과의 평가는 해석자 자신에 맡겨지는 것이 사실이다. 이것을

충분히 인식할 필요가 있다. 이와 관련해서 실험을 행하고, 해석해를 도출하고, 이러한 결과와 범용프로그램에서 얻어진 결과와 비교 검토하는 등, 반드시 프로그램을 바르게 사용하는 있는 일의 인식을 행하는 일을 강조하고 싶다. 특히, 모델링, 시뮬레이션에 종사하는 연구자 기술자는 실험을 행하고 거기서 일어나는 어떤 사실을 감지하는 일을 권하고 싶다

### 5. 맺 음 말

본 원고에서는 일본의 용접연구에 대해서 용접의 3주체인 프로세스, 야금 재료 및 용접역학에 관해 연구의 변천, 연구의 현상과 전망에 대해서 일본용접학회가 발간한 창립 70주년 및 75주년을 기념한 21세기를 향한 연구의 기념특집호를 소개했다. 상술한 내용에서 볼 수 있듯이 계산기 지원에 의한 모델링(시뮬레이션)이 중요하다는 것을 예측할 수 있다. 일본에서는 이미 이와 관련한 국가 프로젝트가 진행되고 있다<sup>9)</sup>.

끝으로, 이 원고가 한국의 용접연구 및 기술향상에 일조할 수 있는 것이 저자의 작은 소망이다.

### 참 고 문 헌

1. 日本溶接學會, 創立70周年—21世紀に向けて溶接接合の學術・技術的展開, 日本溶接學會誌, 65-1(1996)
2. 日本溶接學會, 新世紀を迎えて/溶接學會75周年史, 日本溶接學會誌, 70-1(2001)
3. 立木敬二: 日本溶接學會誌, 65-1(1996), 14-15
4. 牛尾誠夫, 杉谷祐司: 日本溶接學會誌, 65-1(1996), 78-79
5. 日本溶接學會, 新世紀を迎えての溶接・接合技術, 日本溶接學會誌, 70-3(2001) 6-18
6. 西本和俊: 日本溶接學會誌, 70-1(2001), 135-138
7. 南二三吉: 日本溶接學會誌, 70-1(2001), 123-130
8. 豊田政男: 日本溶接學會誌, 65-1(1996), 75-77
9. 野城清他: 日本溶接學會誌, 70-2(2001), 42-61