

# 재료 및 파괴부문

전 부문위원장 : 김 정 규(한양대학교, 교수)

2001년도 재료 및 파괴부문의 연구는 2000년에 비해 논문발표가 94편이 증편되는 매우 왕성한 연구활동을 보였다. 1, 2차 부문 학술대회에 각각 52편, 72편의 논문이 발표되었고, 춘계 및 추계 학술대회에 92편 및 51편의 논문이 발표되었으며, 대한기계학회논문집 A에는 총 90편의 논문이 게재되었다.

부문 학술대회에서는 효율적인 학술 토의 및 아이디어 교환을 위해 기획세션을 구성하여 대회를 운영하였다. 이 기획세션 등을 고려하여 논문을 분류하면 다음과 같이 분류해 볼 수 있으며, 분야별 연감 작성에 참여한 회원은 다음과 같다. CAE/피로설계(이영신, MSC Korea), S/W 개발분야(최병익, KIMM), 피로거동 및 구조물의 손상평가, 열화특성평가(홍준화, CAERI), 용접/접합/계면강도평가(임재규, 전북대),

NDT기법 응용/평가(장경영, 한양대), 크리프-피로평가(이형연, CAERI), 계산역학(박재학, 충북대), 발전소요소 진단 및 평가(박운원, 원자력안전기술원 및 하정수, 전력연구원), 미세손상평가, 신소재 및 복합재료(최낙삼, 한양대), 그 외에 일반 및 기타(신형섭, 안동대) 등이다. 본 연감에서는 위에 언급한 주제별로 나누어 활동 사항을 요약하였다. 일부 논문은 분야가 중복되기도 하지

만 본 연감에서는 주요 세션에 대해서만 언급하였으며, 지면 관계상 많은 우수한 연구 활동에 대해 적절히 언급되지 못한 면도 있다. 표 1은 분야별 논문 편수를 개략적으로 요약한 것이다.[윤기봉, 중앙대학교]

## 컴퓨터 응용/피로설계 분야

기계구조물의 피로내구 신뢰성 검토에 기본이 되는 피로특성에

표 1 2001년도 재료 및 파괴부문 발표 논문의 분야별 요약

| 분 야                     | 기계학회<br>논문집 | 춘계학술<br>대회 | 추계학술<br>대회 | 1차부문<br>학술대회 | 2차부문<br>학술대회 | 총계  |
|-------------------------|-------------|------------|------------|--------------|--------------|-----|
| 컴퓨터응용 및 S/W 개발          | 4           | 4          | 2          | 5            | 2            | 17  |
| 피로거동 및 구조물의 손상평가        | 11          | 9          | 4          | 3            | 5            | 32  |
| 열화특성평가                  | 4           | 5          | 3          | 4            | 3            | 19  |
| 용접/접합/계면강도              | 6           | 6          | 3          | 2            | 7            | 24  |
| NDT기법 및 응용              | 6           | 15         | 6          | 4            | 13           | 44  |
| 크리프-피로평가                | 2           | 4          | 2          | 7            | 2            | 17  |
| 계산역학/해석적 접근             | 15          | 3          | 4          | 7            | 5            | 34  |
| 발전소요소진단 및 평가            | 13          | 17         | 7          | 1            | 11           | 49  |
| 미세손상평가                  | 6           | 5          | 3          | 6            | 10           | 30  |
| 신소재 및 복합재료              | 12          | 8          | 10         | 11           | 5            | 46  |
| 일반 및 기타<br>(동적거동, Zr합금) | 11          | 16         | 7          | 2            | 9            | 45  |
| 계                       | 90          | 92         | 51         | 52           | 72           | 357 |

대한 해석적 연구가 지난 2001년에도 지속적으로 이루어졌다. 특징적인 것은 산업체 독자적인 연구에서 학교와 연관된 연구로 확장된 것이며, 이는 연구대상이 종래의 하중이력 작용에 따른 구조물의 취약부위 예측 등에서 표면 처리 등의 환경변화에 따른 피로 특성의 민감도까지로 확대되는 경향을 의미하기에 고무적이라 판단된다.

또한 2001년도에 발표된 CAE/피로설계 분야는 기존의 차량구조물 중심에서 일반 산업 기계분야 및 항공분야에 확대되어, 이 분야의 산업체 적용범위가 점차 확대되어 가고 있음을 알 수 있었다(그림 1). 발표된 논문 수는 많지 않지만, 기구동역학을 접목시킨 해석분야에 대한 연구도 꾸준히 진행되고 있으며, 효율적인 구조물 개발을 위하여 설계 초기단계에서 내구성을 평가하려는 동시 공학적 설계개념이 시도되고 있는 추세를 나타내고 있었다. 구조물의 피로강도 평가, 연결구조물에 대한 내구성 평가, 합금 소재에 대한 균열진전 해석, 취약부위에서의 피로수명 예측

등에 대한 연구가 있었고, 대변형 비선형 재료에 대한 피로특성 연구도 부분적으로 이루어졌다. 향후에는 경량화 및 복합재의 폭넓은 활용에 따른 연구 등에 대한 세분화된 연구결과가 보고될 것으로 기대된다.[이영신, 한국엠에스씨]

### 소프트웨어 개발

IT(Information Technology) 산업의 발달과 함께 컴퓨터를 응용한 해석 및 설계 기술은 눈부신 속도로 발전하고 있다. 이러한 경향은 실험에 대한 시간과 경비가 큰 부담이 되는 피로/파괴 분야에서도 잘 나타나고 있다.

금년도의 소프트웨어 개발 분야의 논문을 세부 분야별로 구분해 보면 범용 피로해석 소프트웨어 분야, 전용 소프트웨어 분야, 소재 DB 분야로 나눌 수 있다. 주요 내용들을 요약하면 다음과 같다.

범용 피로해석 소프트웨어 분야에는 박준협, 송지호가 단축하중 하에서 피로균열 발생수명과 진전수명을 예측할 수 있으며, 소재의 피

로 특성을 추정하고 피로균열 발생수명을 예측할 때 전문가 시스템을 도입하여 전문지식이 없이 사용할 수 있는 피로강도 평가를 위한 전산 시스템 개발에 대한 연구를 수행하였다. 최병익, 이학주 등은 단축 및 다축하중 하에서 피로균열 발생수명 예측이 가능하며, 취약부위를 추정하여 효율적으로 해석을 수행할 수 있는 피로해석 시스템을 개발하였다.

전용 프로그램 분야에 대해서는 전현규, 허남수 등이 소재 물성 DB, 탄·소성 파괴역학, 한계 하중 모듈을 수록한 파괴역학 평가 모듈 및 LBB(Leak Before Break)평가 모듈로 구성되어 있으며, 소재 물성이 없는 경우 지식베이스에서 추정하는 원자력배관 건전성평가 전문가 시스템을 개발하여 사례해석을 수행하였다. 백승세, 나성훈 등은 고온, 고압하에서 사용되는 화학 발전 및 석유화학 설비 등의 내열 구조 부재들에 대해 비파괴 평가법인 입계부식법에 대한 국내 시험 결과들을 DB로 구축하고 열화도를 평가하는 프로그램을 개발하였다.

소재 DB 분야에서는 전우수,

송지호가 인장강도나 경도를 알고 있는 경우 변형률-피로수명 곡선을 전문가 시스템을 이용하여 추정하는 연구를 수행하였다. 이완규, 백운봉 등은 소재의 인장강도, 경도, 피로물성, 크리프 물성, 파괴인성 등을 DB로 구축하여 인터

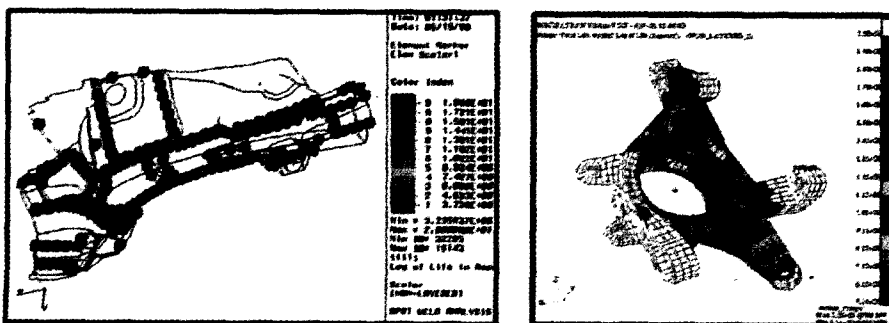


그림 1 피로내구 해석 예

넷을 통하여 유사재료 검색, 재료 물성, 그래픽 출력 등을 제공하는 Web 기반 재료 물성 데이터베이스 시스템을 개발하고 있다.(그림 2)

기계 구조물이나 부품의 안전성 및 신뢰성 확보와 경량화를 위한 설계가 중요해짐에 따라 피로강도 평가는 설계기술의 핵심이 되고 있다. 그러나 피로해석을 수행하기 위해서는 많은 피로 물성 데이터와 전문지식이 필요하므로 일반 설계자가 신뢰성 있는 피로 평가를 수행하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서, 현장에서 작업자가 쉽게 활용하기 위한 기술 개발의 필요성이 널리 인식되고 있다.

소프트웨어 개발 분야의 연구도 이러한 요구에 부응하는 방향성이 뚜렷하여, 소재 물성 DB 구축, 전문가 시스템 도입, 소프트웨어 전용화 등의 특징이 두드러진다. 특히 금년도의 전체 9편의

논문 중 7편이 소재 물성 DB를 포함하고 있으며, 5편의 논문이 전문가 시스템을 도입하여 전문가가 아닌 사용자에 대해서도 피로강도를 평가할 수 있도록 개발하고 있다.[최병익, 한국기계연구원]

### 열화특성 평가

발전 또는 산업 설비 등은 대부분 고온, 고압 및 부식 또는 방사능 환경 등에서 장기간 운용되므로 설비 구성재료의 성질이 저하되는 정도인 열화(degradation) 특성 평가자료는 설비의 안전 및 효율 면에서 매우 중요한 역할을 한다. 2001년도 열화특성평가 분야의 발표논문은 총 19편으로, 전체적인 내용은 표준시편과 미소 소형시편 등 비표준시편을 이용한 파괴적 열화평가와 다양한 비파괴적 열화평가에 관한 최신 기술 및 특성자료 해석에 관한 것

이 대부분이었다. 설비별로는 압력용기, 배관 및 터빈 로터가 주를 이루고, 재질별로는 압력용기용 저합금강, 고온/고압용 Cr-Mo-(V)강, 스테인리스강 위주에 Al합금 및 Co기 초내열합금도 포함되어 있다. 특성/요인별로는 기계적 성질, 충격인성, 파괴인성 열화가 주이며, 부식 및 프레팅 피로 열화도 취급되었다.

발표내용 중 주요사항을 요약하면 다음과 같다. 남승훈, 김상태 등은 Cr-Mo-(V)강에서의 천이온도, 파괴응력 열화평가가 결과 및 응력시효 평가결과를 소개하였고, 오용준, 홍준화, 오동준 등은 원자로 압력용기강에서의 소형편치 시험에 의한 파괴강도해석과 조사열화평가결과 및 연성 파괴특성평가 연구결과를 발표하였다. 석창성, 권숙인, 이종민, 유효선 등은 초음파법, 전기비저항법, 바크하우젠노이즈 등 미소자성법, 전기화학기법 등 다양한 비파괴적 열화도 평가기술에 대해, 권재도 등은 재질열화와 프레팅 피로거동 연계성 및 피로열화표면 AFM 관찰결과를 발표하였다. 또한 진태은, 이정권 등은 주조 스테인리스강에서의 열취화와 미세해석에 의한 손상고체의 강성 영향평가 결과를 소개하였다.

전반적으로 열화평가분야에서는 현장 적용성이 높은 연구결과가 주로 발표되었으며, 다양한 주제의 요소기술 개발내용도 다수 포함되었다. 연구결과가 실제 부품·설비의 재료열화 문제를 대처하는 데 크게 기여하고 있음

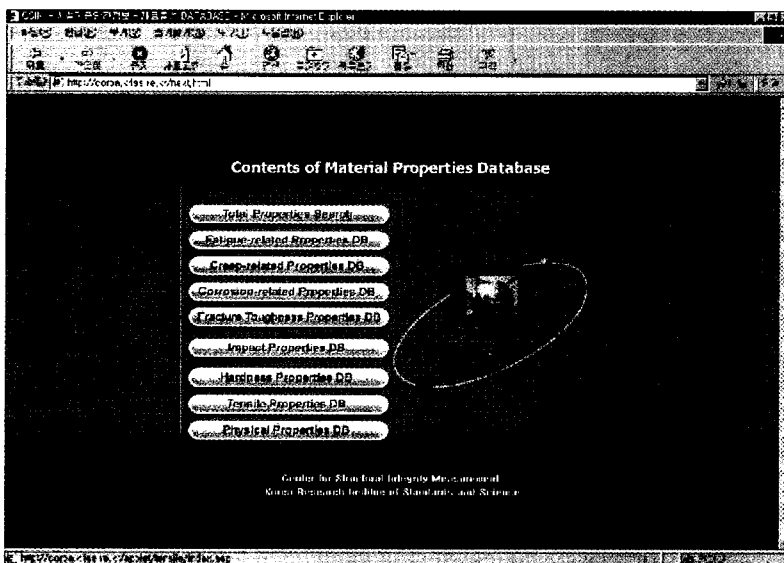


그림 2 Web 기반 재료 물성 데이터베이스 시스템

을 확인할 수 있었다.[홍준화, 한국 원자력연구소]

### 용접/접합/계면강도

2001년 한 해 동안 발표된 용접/접합/계면강도 분야의 논문은 총 26편으로 저항용접 중 점용접 분야가 5편, 잔류응력에 관한 측정 및 해석에 관한 논문이 7편, 용접부의 파괴 및 피로평가가 8편, 용접아금 분야가 2편, 계면강도 분야가 1편, 브레이징 분야가 1편 등으로 분류할 수 있다. 이중에 점용접에 대한 관심이 증가하고 있는 것은 최근에 자동차산업의 급부상으로 산학연구의 증가의 결과를 엿볼 수 있다. 또한 용접부의 강도에 영향을 주는 잔류응력과 변형해석 및 잔류응력 완화 모델 연구 등이 증가 추세이다. 그래도 아직까지 용접부의 연구 분야 주종을 이루는 것은 용접의 내구성을 평가하기 위한 피로 파괴 연구이다. 이것은 용접기술의 향상이 구조물의 안전강도를 좌우하기 때문에, 용접부의 미시적 평가와 용접성의 연구가 요구된다. 또한 점점 용접으로 제작된 기계 및 구조물의 활용환경이 고온 다습한 극한 환경으로 변화고 있으며, 이러한 야금학적으로 복잡한 용접 조직과 잔류응력이 환경강도에 크게 영향을 주고 있으므로 이 분야의 연구가 점점 증가하고 있는 것이다. 연구그룹별로 용접 및 접합 분야의 연구결과를 보면 다음과 같다.

양인영 등은 모자형 단면 부재의 폭비와 플랜지 용접간격에 따

른 압계특성을 연구하였으며, 유효선 등은 국부변형 근사법을 이용한 차체 점용접부의 피로수명 예측에 대한 연구 결과를 내놓았다. 배동호 등은 다층용접배관 용접부의 균열 탈형현상을 고려한 피로균열 특성을 평가하였으며, 양영수 등은 점용접부의 피로 강도에 미치는 잔류응력의 영향에 대하여 연구하였다. 배성인 송정일 등은 후판의 부분용입 다층용접에 대한 잔류응력 및 변형을 해석하였다. 김종성 등은 원자로 압력용기 용접열영향부의 미세조직 및 재료물성을 예측하였으며, 주석재 등은 다점용접이음의 피로 시험을 실시하였다. 윤한기 이상필 등은 TIG 용접한 페라이트강의 고온강도 및 피로수명 특성을 연구하였으며, 한승호 등은 피로 하중하에서 용접잔류응력 완화에 대하여 실험적으로 연구하였다. 김종성 진태은 등도 원자로 압력용기 용접부의 잔류응력을 해석하는 연구를 수행하였다. 양원호 류명해 등은 End Mismatch를 갖는 접착이음의 강도를 평가하는 연구결과를 발표하고 있다. 김철만 김우식 등은 배관모재 및 용접부의 피로특성을 실험적으로 연구하고 있으며, 이형노 등은 3차원 용접잔류응력을 평가하기 위하여 비드플러시법을 개발하였다. 임재규 등은 점용접시 간극과 굽힘모멘트가 용접성에 미치는 영향을 특수용접 지그를 고안하여 정량적으로 평가하고 있다. 이보영 김문생 신형섭 등은 강재의 모재 및 용접부의 조직거동에 따른 고온강도에 대하여 실험적으

로 연구하였으며, 조상봉 등은 이방성 이종재 접합계면 균열의 에너지 해방률에 대하여 연구하였다. 권숙인 등은 가스터빈용 초내열 합금의 고온 브레이징에 대하여 연구하였으며, 이탁기 등은 잔류응력을 고려하여 용접부의 피로강도 평가모델을 제안하였다. 임채환 등과 한승호 등은 각각 용접부 잔류응력의 추정기법을 개발하고 피로하중 하에서 용접잔류응력 완화모델을 제안하여 용접부의 강도 향상에 기여하고 있다.[임재규, 전북대학교]

### 비파괴 기법 및 응용

2001년에도 비파괴기법 및 응용분야에서는 새로운 기법의 개발과 다양한 응용에 관한 연구논문이 발표되었으며, 최근 관심을 끌고 있는 신뢰성분석 및 평가에의 활용도 적극적으로 이루어졌다. 기법측면에서는 특히 초음파, 광학적 기법을 이용한 연구가 많았으며, 음향방출, 방사선, 전자기 등을 이용한 연구결과가 발표되었다. 초음파를 이용한 경우에는 기존 초음파 기법과 함께 비선형 초음파 기법이 다루어졌으며, 웨이블렛 해석을 비롯한 시간-주파수 해석 및 디컨볼루션 등 새로운 신호처리기법의 적용연구가 있었고, 초음파기법 시뮬레이션과 기법 검증이 수행되었다. 광학적 기법에서는 전자스펙클간섭계(ESPI), 광섬유센서를 이용한 기법에 대한 연구가 많았으며, 그 외에도 영상처리, 광탄성, 모아레 기법, 전단간섭계(sherography)

등이 연구되었다. 또한 초음파와 광학을 접목한 레이저 초음파에 대한 연구가 새로운 형태의 비접촉식 초음파 기술로 관심을 끌었다. 전자기 기법에서는 직류전위차, 교류전류, 자기장 응용 등 새로운 형태의 기법연구가 이루어졌으며, 방사선 기법에서는 주로 X선 회절을 이용한 것으로 나타났다.

적용대상으로는 피로 및 열화의 평가, 균열 검사, 변형거동 평가, 복합재 적용 등이 주종을 이루었으며, 피로 및 열화 평가에는 주로 초음파와 방사선 기법이 적용되었고, 열적, 기계적 변형거동분석에는 주로 광학적 기법과 전자기 기법이 적용되었다. 계면균열, 표면균열, 내부크랙 등 균열 검사에는 초음파, 광학식, 음향방출, 전자기 기법 등 대부분의 기법이 적용되었고, 복합재료에는 광학적, 전자기 기법이 적용되었다. 이 외에도 인공지능 기법이나 접합부 결함, 접합강도 평가, 배관위치 탐지, 전자부품 신뢰성분석 등에 대한 연구가 발표되었다.

이와 같은 연구경향은 Bar-Cohen Yoseph이 Materials Evaluation 2000년 2월호에서 피력한 비파괴기술의 발전방향, 즉 다양한 기법의 융합(fusion)을 통한 신뢰도 향상, 현장 적용성 증대를 위한 기법의 자동화, 영상화와 함께 마이크로시스템화, 정보화 등과 부분적으로 부합하고 있으며 세계적인 추세를 따르고 있다고 할 수 있다. 따라서 향후 전통적인 비파괴 기법의 교

차적용과 이들의 융합, 기존 기법의 단점을 극복하는 새로운 기능개발과 신기술 개발, 새로운 재료에의 적용 등에 대한 지속적인 연구가 진행될 것으로 전망된다.[장경영, 한양대학교]

### 크리프-피로평가

고온 재료 및 구조물에 대한 크리프-피로 평가분야에서는 크리프 손상, 크리프-피로 손상 및 크리프 파괴분야에서 2001년도에 총 17편의 연구논문이 발표 또는 게재되었다. 특히 별도의 크리프-피로 특성평가 세션이 있었던 1차

재료 및 파괴부문 학술대회에서는 7편의 논문발표가 있었다.

크리프 손상부문에서는 6편의 논문이 발표되었는데 이중 고온 재료로 많이 사용하고 있는 오스테나이트계 스테인리스강에 대한 논문이 5편으로 주종을 이루었다. K-R 손상이론에 의한 316LN 스테인리스강의 크리프 설계 논문, 기존의 K-R 크리프 손상 모델을 참조 응력식으로 수정한 참조응력개념에 의한 316LN강의 크리프 해석 논문 및 가동시간에 따른 Zr-2.5Nb 압력관의 크리프 속도에 대한 논문 등이 발표되었다.

크리프-피로 손상부문에서는 3편의 논문 발표가 있었다.

316LN 스테인리스강의 크리프-피로 수명평가 연구에서는 질소 첨가량이 수명에 미치는 영향을 분석했고, 액체금속로 칼리머의 고온배관 논문에서는 미국과 프랑스의 설계지침에 따른 크리프-피로 손상평가를 수행하였다.

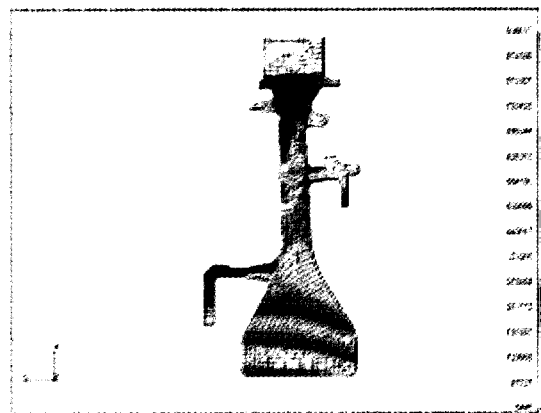


그림 3 항공기 가스터빈 디스크의 유효응력 분포

크리프 파괴부문에서는 8편의 논문이 발표되는 등 예년에 비해 연구가 더욱 활성화된 모습을 보여주었다. 발표논문들의 주요 연구분야는 크리프-피로 하중 하에서 항공기 엔진 재료인 Waspaloy에 대한 항공기 가스터빈 디스크의 균열성장 평가연구(그림 3)와 고온 저합금강인 1Cr-0.5Mo강 용접부 균열의 크리프-피로 균열성장 수명 평가연구, 크리프 하중 하에서 C\* 적분 예측식에 최적 참조응력법의 적용연구, 중화학 설비 배관재료인 HK40강의 C\* 적분에 기초한 3차원 고온균열 수명평가연구, 화력 저압 로터강인 3.5NiCrMoV강의 일정하중, 일정 Ct에서 로

터강의 크리프 균열전파 연구 및 순동의 크리프 균열성장 특성 연구 등이었다.

전체적으로 2001년도의 크리프-피로 평가 분야에서는 다양한 주제에 이론적, 해석적 및 시험적 평가기술이 한 단계 올라선 한 해였던 것으로 평가된다.[이형연, KAERI]

### 개념역학

설비에서 발견되는 균열 중 많은 경우가 삼차원 균열이므로 응용상의 중요성으로 인하여 삼차원 균열에 대한 탄성해를 정확히 얻으려는 시도는 꾸준히 행해지고 있다. 2001년에도 가중함수법, 가상균열담합법 또는 대칭 Galerkin법을 이용하여 해석한 삼차원 균열의 탄성해가 발표되었는데, 대상 균열 형태는 구멍에 존재하는 타원호형 관통균열 및 타원형 모서리 균열, 비평면 삼차원 균열 등이다. 삼차원 균열의 탄소성 해와 관련된 논문도 발표되었는데, 인장 또는 복합하중이 작용하는 평판에 존재하는 반타원 표면균열의 J-적분 계산식, J-T에 의한 3차원 반타원 계면균열 선단 응력장의 기술 등이다.

2차원 균열에 대한 연구로는 이방성 재료내의 직선 혹은 곡선 균열을 유한요소법이나 유한요소 교호법을 이용하여 해석한 연구와 경계요소법을 이용한 반도체 패키지의 균열진전경로 예측 등이 발표되었다. 2차원 균열의 경우 구멍으로부터 성장하는 균열이 많으므로 이에 대한 연구로

확장에 따른 잔류응력의 균열성장에 미치는 영향을 유한요소법으로 살펴본 연구와, 구멍에서 파생한 균열의 응력강도계수를 신경회로망과 경계요소법을 이용하여 해석한 연구, 이종 접합체의 원공에서 파생하는 균열에 대한 혼합모드 파괴기준의 설정에 대한 연구 등이 발표되었다. 또한 계면균열에 대해서는 완전 소성 하 변형경화 이종접합체의 계면 균열선단 구속상태 및 J-적분에 대한 연구가 있다.

균열이 존재하는 배관의 해석 문제도 원자력 설비나 화학 설비의 안전성 평가에서 중요한 문제로 대두되어 관련 논문이 많이 발표되었는데, 참조응력법으로 배관 내에 존재하는 균열에 대한 J-적분 및 COD 계산을 쉽게 할 수 있게 하고, 이를 파단 전 누설 등의 배관 해석에 이용하려는 시도가 있었다. 원주방향 관통균열의 J-적분 및 COD 계산, 내압에 의한 원주응력이 관통균열 배관의 J-적분 및 COD 계산에 미치는 영향, 원주방향 관통균열 배관의 균열 열림 평가에 미치는 압력유기 굽힘의 구속효과 등에 대한 연구가 이에 해당된다. 배관에 존재하는 복합균열도 관심의 대상이 되었는데, 참조응력법을 이용한 복합균열이 존재하는 배관의 균열개구변위를 해석한 연구가 있었다. 또한 T-형 및 L-형 배관 내 반타원 표면균열에서의 구속상태에 대한 연구가 있었고, 매설 배관에 대해서는 매설배관의 경계조건이 파손확률에 미치는 영향에 대한 연구가 발표되었다.

원자력설비에 관련된 연구로는 가압 열충격 사고시 결합 이상화 방법이 구조물 건전성 평가에 미치는 영향, 원통형용기에 대한 축방향 표면결합의 응력확대계수, 구속효과를 고려한 원자로 압력용기 균열선단에서의 응력분포 예측 등의 연구가 있었다.

그밖의 연구로 경계 요소법을 이용한 미끄럼 접촉을 받고 있는 코팅층의 응력분포에 관한 연구, 열 및 응력 해석용 3차원 적층 유한요소의 개발, 무요소법의 가중함수 개량 및 절점적분법 개발, 경사균열을 갖는 skin/stiffener 구조물의 보수에 의한 균열의 파괴역학적 거동, 유한요소법을 이용한 무부하시 선단이 닫힌 균열의 개구 거동, 물체가 기울어진 상태로 접촉하는 경우를 고려한 부분 미끄럼 문제의 수치해석 등의 논문이 발표되었다.[박재학, 충북대학교]

### 발전소 요소진단 및 평가 (원자력발전)

발전소 요소진단 및 평가 분야의 전체적인 내용은 피로, 재료열화 측정, 파괴거동평가, 건전성 평가 등이 주된 주제가 되었으며, 참여도로 보면, 학계보다는 산업계와 연구소에서 더 적극적으로 참여하고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 분야에 대해서는 산업계의 관심과 수요가 그만큼 많이 있다는 것을 알 수 있었다.

발표된 내용 중 중요한 것을 요약해보면 다음과 같다. 발전설비 손상의 주요기구인 피로현상에

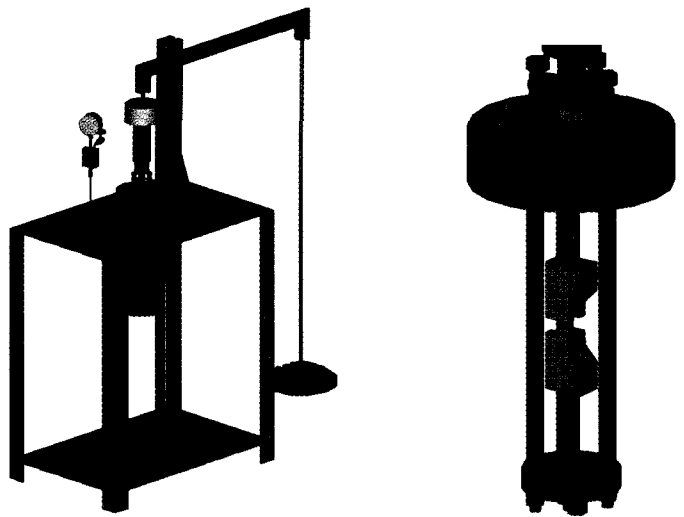


그림 4 (a) Assembly, (b) Jig and grip

대해, 피로하중이 가해진 배관에  
서의 피로균열성장거동 예측, 알  
미늄 합금피로파면에 대한 초정  
밀 관찰 등 피로에 대한 연구가  
있었다. 주조 스테인리스강 재료  
의 열취화로 인한 재료물성치의  
저하평가 및 예측에 대한 발표가  
있었고, 원전에만 사용되고 있는  
특수재료인 지르코늄과 나이오비  
움 합금인 Zr-2.5Nb 재료가 수소  
를 흡수하여 발생하는 블리스터  
형성기구 및 잔류응력측정, 수소  
화합물이 파괴되면서 균열로 성  
장되는 지연수소균열의 성장속도  
에 대한 연구가 있었다(그림 4).  
이 특수재료에 대한 연구는 그동  
안 캐나다에서 거의 독점적으로  
수행하여 왔는데 우리도 이제는  
캐나다의 수준을 넘어서는 좋은  
연구결과를 생산해 내기 시작하  
였다고 생각된다. 발전설비의 노  
후화가 진행됨에 따라 설비의 수  
명평가가 중요한 현안인데, 재료

를 교체하지 않는 이상 실제 환경  
에서 노후화된 재료의 물성치를  
측정하는 것은 거의 불가능하다.  
이러한 관점에서 몇 년 전부터 우  
리나라에서 소형펀치를 이용한  
재료물성치 측정에 대한 연구와  
실제 측정설비의 제작 등에 대한  
연구가 서울대 및 원자력연구소

등에서 활발히 진행되고 있으며,  
금년에는 이러한 성과가 현실적  
용 가능한 수준으로 발표되었  
다.[박윤원, 원자력안전기술원]

**발전소 요소 진단 및 평가  
(화력 발전)**

화력발전소는 35,000여 설비  
가 각각 다양한 환경 하에서 운  
전되고 있는 특성이 있는데  
2001년도에는 핵심 설비에 대한  
파손기구와 그에 따른 요소 진단  
기술과 평가에 관련한 논문이 주  
로 발표되었다. 고온/고압의 특  
수한 환경은 물론 해수 부식 등  
다양하고도 가혹한 조건에서 운  
용되는 특성으로 인하여 “화력발  
전 설비에 대한 논문은 열화된 재  
질의 평가를 위한 요소기술로부  
터 실제 적용한 사례까지 다양하  
게 발표되었다(그림 5). 설비별  
로는 터빈의 경우에는 케이싱, 블  
레이드, 볼트 등에 사용하는



그림 5 발전설비 수명 진단 기술

12Cr강 등에 대하여 활발한 연구 결과가 소개되었다. 보일러의 경우에는 헤더, 튜브 및 배관/압력 용기 등의 설비를 중심으로 연구가 진행되었다. 위와 같은 설비들은 주로 고온에서 장시간 운전되고 있으므로 고온의 기계적 물성과 경년 열화거동에 관한 논문이 주로 발표되었다. 재질별로는 고온 및 고압에서 주로 사용되는 Cr-Mo강의 저합금강은 물론 12Cr 이상의 고Cr강과 스텐인리스강에 대한 논문이 주종을 이루고 있다. 요소기술별로는 부식 환경 하에서의 피로 수명, 용접부의 크리프 수명, 인성열화도, 균열진전 및 건전성, 응력부식 균열, 확률론적 해석, 전기화학법, AFM과 FEM을 이용한 전산역학에 의한 응력해석법 등에 대하여 이론적 접근이 심도있게 이루어져 학술적 성과가 높게 나타났다. 아울러 현장에서 주로 발생하는 터빈 블레이드, 케이싱, 볼트, 보일러의 튜브, 에어 덕트, 헤더, 주증기관 등의 발전설비에서의 파손 사례에 대한 적용 기술논문도 발표되어 산학연의 연구가 균형 있게 발표되어 이상적이었다고 평가할 수 있다. [하정수, 전력연구원]

### 신소재 및 복합재료

신소재 및 복합재료 분야는 기계시스템의 안전성과 신뢰성 확보를 위해 필수적인 기초분야로서 미래적 산업기술 개발의 선구적인 역할을 한다. 금년도에도 신

소재 및 복합재료의 해석, 제작 및 시험, 평가뿐만 아니라 기계재료의 설계와 관련한 우수한 연구 결과가 활발히 발표되었다.

재료의 균열해석에 대해서는, 기계적 체결홀에 존재하는 타원호형 관통균열해석, 비축대칭 하중하의 3차원 압전 세라믹 스트립 내의 동전형 균열의 세기계수 해석, 반타원 표면균열의 형상측정을 위한 유한요소 전기장 해석, 혼합모드(I/II)하중하의 균열진전각도의 영향, 2축하중을 받는 이방성복합재료 내의 균열진전거동, 계면균열에 미치는 접착층 내 결합 효과가 이론적 실험적인 연구결과로서 발표되었다. 응력 및 강도해석에 대해서도, 반 무한 복합재료의 레일리 표면파에 대한 이방성비 효과, 의사동방성 복합재료 적층판의 정 강도해석, 복합재료 원통구조물의 점탄성적 잔류응력해석이 연구되었다.

고분자재료 및 고분자기 복합재료에 대해서는, 적층패널의 좌굴 및 좌굴후 거동의 형상 최적설계, 복합재료의 피로특성에 미치는 에폭시수지·경화제·경화촉진제 혼합비, 강화고무의 인장특성에 미치는 단섬유 끝 형상, 고무의 동탄성 특성 측정법, 고무보강 폴리머재료의 파괴인자, 천연고무의 피로수명에 미치는 카본블랙, 고강도 복합재료의 변형과 강도, 고상성형된 열가소성복합재료의 성형변형률, 고속 압밀된 열가소성 복합재료의 성형조건, 충격특성에 미치는 적층구조, PMMA의 동적인장거동, 저온환경하에서의 핀 연결부의 베어링강도,

Glass/Phenol복합재료의 저속충격 특성, 터빈엔진 파편 방벽설계를 위한 고강도섬유의 평가, FRP박육부재의 압축특성, 와이어 방전 가공기에 복합재료 외팔보의 적용과 성능평가 등이 다양한 관점에서 세부적으로 연구되었다.

금속재료 및 금속기 복합재료에 대해서는,  $9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_4/AC4CH$ 재료의 피로특성, 일방향 섬유금속 복합재료의 손상거동, 바인더 첨가에 따른 강도개선, 섬유적층각도와 압입손상거동, 항공기용 합금의 초소성거동 해석, Nb/MoSi<sub>2</sub>의 파괴특성, 초소성 Ti-6Al-4V합금의 불균일 변형거동이 높은 수준의 이론적 실험적 연구로서 발표되었다. 또한 SiC/SiC복합재료의 반응소결 제조법이 세라믹기 복합재료의 제조를 위해 연구되었다.

지능형 복합재료에 대해서는, 능동화이버 복합재료의 모델링 및 적용, 탄소입자 분산 복합재료에 있어서의 전기저항변화와 기계적물성의 상관성, 초음파 트랜듀서의 적용, 고온에서의 형상기억복합재료의 비파괴평가 결과가 돋보인다.

이종재료간 접합재료에 대해서는, 복합재료 하니컴 샌드위치 패널의 접합강도 특성 및 손상수리 기술, 반복굽힘 모멘트의 진폭에 따른 Al5052/AFRP 적층재료의 층간분리와 피로균열진전 거동, Al/CFRP복합재료의 접합강도에 미치는 Al판의 플라즈마 표면처리효과, CFRP표면처리와 T-peel 강도, 단일 겹치기 접착 조인트의 열적 특성에 대한 충전재의



효과, 직교 이방성 탄성체에 접합된 안전재료의 균열전파 거동, 폴리우레탄 폼 샌드위치 구조의 접합특성에 미치는 표면처리 효과, Al/AFRP적층재의 층간분리에 미치는 노치형상의 효과가 돋보이는 이론적 실험적 연구결과로서 보고되었다.[최낙삼, 한양대학교]

### 일반(동적거동)

2001년도에 수행된 재료의 동적거동에 관한 연구는, 크게 세라믹 등 취성재료에서 충격손상 거동, 금속재료의 동적 변형거동, 그리고 적층재 등에서 계면균열의 고속진전거동과 관련된 연구로 나눌 수 있다. 다른 분야에 비하여 많지 않지만 다양하고 활발한 연구가 수행되어 오고 있다.

먼저 유리와 세라믹 등 취성재에서 입자 충격 손상거동에 관한 연구를 살펴보면 입자의 충격속도에 따른 내부손상으로서 콘크리트 형상의 거동, 입자의 경사 충격시 충격점 부근의 응력장 해석과 손상형상의 관계를 규명하고자 하였다. 유리층에 코팅처리시의 초기결함의 잔류강도에의 영향, 신뢰성 확보 측면에서 잔류강도의 평가시 부가 굽힘응력 조건에 관한 연구가 눈에 띈다. 특히 최근에는 계장화 충격장치를 사용한 세라믹에서 손상거동의 정량적 평가와 이를 통한 세라믹과 유리판의 편칭가공 관련분야에 충격파괴를 응용하려는 시도가 행해져 오고 있다.

고속충격에 대한 방탄특성 확

립과 관련하여, PVD코팅에 의해 경화처리한 티탄합금과 알루미늄합금판에 대한 관통거동과 세라믹판에 대한 충격거동에 미치는 구조의 영향에 대한 연구가 보고되었다.

재료의 동적거동에 관한 연구로는, 변형률속도 의존성을 파악하기 위하여 SHPB를 이용한 10<sup>3</sup>/s의 변형률속도 범위에서 구조용 알루미늄합금(A6061과 A6063)과 Fe-6.5wt%Si합금, 그리고 PMMA에서의 동적거동의 특성시험에 관한 연구가 수행되었다. 또한 자동차 설계 기술개발과 관련하여, 최적충격 특성을 갖는 차체구조용 점용접 박육 단면부재의 충격에너지 흡수 능력의 해석 결과도 보고되었다.

최근 산업의 다양한 분야에서 이종적층재가 널리 적용되면서 계면을 전파하는 균열의 동적응력확대계수의 계산과 관련한 연구가 활발하여 진행되어오고 있다. 등방성/직교이방성 이종재료용 동적 광탄성 하이브리드법의 개발을 통하여 동적응력확대계수를 구하고자 하였다. FGM에서 동적으로 전파하는 균열에 대한 모드 III하에서 응력확대계수 및 에너지 해방률에 대하여 해석적 연구, 압전 세라믹 재료에서 생성되는 균열문제 해석 등과 관련 직교이방성재료의 면외 방향 등속 계면균열 문제의 해석도 행해졌다. 한편 적층 복합재에서 충격손상을 받은 후 피로실험을 통해 적층재의 피로수명에 미치는 충격손상의 영향과 잔류피로수명의 변동성에 대한 확률론적 해석도

수행되었다.[신형섭, 안동대학교]

### 피로거동 및 구조물의 손상평가

동 분야와 관련된 논문은 2001년도 재료 및 파괴부문에 많은 부분을 차지하고 있으며, 매우 활발한 연구가 수행되었다. 연구분야를 살펴보면 우선 구조용 재료의 피로특성 분야가 주류를 이루고 있으며, 변동하중 및 균열진전 분야 그리고 혼합모드하 균열진전 특성 분야에 대한 연구가 그 뒤를 따른다.

구조용 강재의 피로특성 분야에서 남기운 등은 철골구조물에 사용되는 내화강의 피로균열전파 특성에 대한 연구를 수행하였고, 서창민 등은 현수교 또는 크레인 등의 지지와 송전선의 강심재료로 사용되는 고강도 강선의 인장 및 회전굽힘 피로특성을 평가한 바 있다. 김상태 등은 구상흑연주철의 고주기 피로수명 예측을 위하여 잔류강도 저하모델의 파라미터 결정법을 적용하였고, 이에 대한 통계적 해석절차를 수행하였다. 김형석 등은 한국가스공사 인천생산기지 13, 14호에 적용된 IHI 멤브레인용으로 사용된 국산 304 스테인리스 강의 상온 및 저온(-162°C)에서의 기계적 성질 및 피로수명을 평가하여, LNG저장탱크 설계수명 측면에서 본 강재의 적합성 여부를 평가하였다. 그리고 백태현 등은 ASTM A723 압력용기 강에 대하여 제강 및 열처리 조건이 피로 및 파괴특성에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 이억섭 및 김우식

은 발전소에 설치, 운용되고 있는 배관의 열화에 의한 결함과 이를 기점으로 발생하는 피로손상에 대한 연구를 수행하였다. 구조용 강재에 대한 피로거동 평가에 대한 연구가 많은 것은 생산현장에서 운용 중인 구조물 중 설계수명에 달한 기계요소 및 부품 등이 상당 부분을 차지하기 때문으로 생각되며, 향후 이러한 구조물의 잔류수명평가에 많은 관심이 기울일 것으로 예상된다. 기계요소의 방진, 제진 부품으로 널리 사용되는 고무의 피로특성 평가에 대한 연구도 진행되고 있다. 그 중 김완두 등은 차량 엔진 마운트에 적용되는 경도가 서로 다른 고무부품에 대하여 유한요소해석과 소재의 피로시험 결과를 이용하여 피로수명을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 방법을 제안하였고, 현재 고무부품의 피로특성에 대한 DB를 구축 중에 있다. 나노 분야에 대한 연구도 진행된 바 있는데, 특히 권재도 등은 나노 수준의 측정과 특성평가를 위한 대표적인 장비인 AFM을 이용하여 2017-T351 알루미늄 합금의 피

로 균열진전에 대한 Nano-Fractography를 수행하였고, 이를 통해 파괴역학적 파라미터와 스트라이에이션 형상간의 관계를 검토하였다. 향후 나노계측장비를 활용한 피로, 파괴기구 규명에 대한 연구가 활발해 질 것으로 기대된다.

변동하중 및 이에 의한 균열지연 연구 분야에서, 김정규 등은 60kg급 레일강에 대하여 실동하중을 고려한 변동응력 하 피로특성을 균열발생과 진전으로 나누어 평가하였고, 또한 확률론적 기법을 활용하여 피로수명특성을 평가하였다. 안석환 등은 일반 구조용강재인 S45C에 대한 소수회 연속반복 다중 과대하중이 피로 균열전파 거동에 미치는 영향인자를 평가하였는데, 균열선단의 응력상태를 일정하게 제어하는  $\Delta K$ -제어 피로시험기법을 응용하였다. 그리고 송지호 등은 굽힘하중 하에서 표면균열 단함에 대한 연구를 수행하여, 이 분야의 연구깊이를 심화시켰다.

혼합모드하 균열진전 특성 분야에서, 양원호 등은 항공기 구조

용 재료인 6061-T6 알루미늄 합금으로 제작한 균열을 갖고 있는 평판에 HT145/RS1222 섬유강화복합재료로 제작된 보강판을 적용한 경우, 균열 경사각에 따른 수명변화를 관찰한 바 있다. 송삼홍 등은 혼합모드 하중에 따른 균열선단의 모드 I, II의 응력확대계수를 응력비에 따라 각각 구하였으며, 응력비의 증가에 따른 피로 수명변화를 고찰하였다. 그리고 김정규 등은 레일강에 대한 혼합모드 하 균열진전 양상을 Richard가 제안한 KV로서 평가하는 것이 가장 타당하다는 실험적인 결론을 유도한 바 있고, 신병천 등은 혼합모드하 균열진전 경로 예측을 위한 다양한 모델에 대한 비교, 검토를 수행하였고, 이중 elastic T-term이 응력구배가 심한 경우 균열진전경로 예측에 적용성이 매우 높음을 보여주었다. [신병천, 한국기계연구원]

이 외에도 미세손상평가분야, Zr 합금 분야 등에서도 활발한 연구가 수행되었다.

기계응용어 해설

▶ 논리적 분해(Logical Decomposition)

구조설계 문제를 비연성 또는 준비연성 설계 문제로 만들어 설계를 수행하기 위한 과정을 의미한다. 논리적 분해는 적절한 설계창(design window)을 찾아 각 설계목적에 영향을 많이 주는 설계변수를 정의하여 설계방정식을 구성하는 과정이다.

▶ 부상(Take Off)

HDD에서 디스크가 회전하면 디스크 표면에 공압이 형성되면서 헤드 슬라이더가 디스크와 수십 nm 정도의 간격을 두고 뜨게 된다. 이러한 현상을 부상이라 한다. 실험적으로는 디스크가 회전하면서 나타났던 friction이나 AE신호가 '0'으로 되는 시점을 부상의 시작으로 판단한다.