

재료 및 파괴부문

테/마/기/학

1

글 · 김 영 진 부문위원장(성균관대학교 교수)
e-mail : yjkim50@skku.edu

2002년도 재료 및 파괴부문의 연구는 예년에 비해 더욱 활성화되었다. 부문 학술대회에서 효율적인 학술토의 및 아이디어 교환을 위해 기획 세션을 구성하여 대회를 운영하였으며, 기획 세션의 종료 및 세션 조직위원으로 활동한 회원은 다음과 같다. CAE/피로설계(이영신, MSC Korea), 신소재 및 복합재료(한경섭, 포항공대), 접합부의 강도평가(남기우, 부경대), 신뢰성 평가(진태은, 한전기술), 구조물의 손상평가(신병철, KIMM), NDT 기법 응용(윤동진, 표준연), 전자패키징 신뢰성(이순복, KAIST), 계산역학(박재학, 충북대), 발전소요소 진단 및 평가(박윤원, 원자력안전기술원), RBI-FFS-IT(최재봉, 성균관대), NT 분야(박준협, 동명정보대), 에너지 및 화력발전분야(하정수, 전력연구원)이다. 본 연감의 내용도 위에 언급한 기획 세션 주제별로 나누어 활동 사항을 요약하였다. 일부 논문은 분야가 중복되기도 하지만 본 연감에서는 주요 세션에서만 언급하였으며, 지면 관계상 많은 우수한 연구 활동에 대해 적절히 언급되지 못한 면도 있음을 밝혀둔다. [석창성, 성균관대학교]

기계구조물의 피로 내구 신뢰성 검토에 기본이 되는 피로특성에 대한 해석적 연구가 지난 2002년에도 지속적으로 이루어졌다. 산학연이 공동 혹은 단독으로 연구한 비율이 고르게 나타났으며, 연구된 분야는 차량구조물이 여전히 다수를 차지하고 있으나, 일반산업기계 분야 및 항공, 생체공학 분야까지도 연구의 영역이 확장되고 있다. 기구동역학을 고려한 해석설계 분야에 대한 연구도 꾸준히 진행되었으며, 통계적인 방법에 의한 내구설계 방법도 시도되었다. 축매변환장치의 내압평가, 차체구조의 내구설계, Ventilated Disk Brake의 피로수명평가, 서브 프레임의 다축 랜덤하중 하의 피로손상평가 등 차량에 대한 해석이 있었고, 전력기구나 건설기계, 가스배관, 일반기계강과 복합재료를 대상으로 피로수명에측이 수행되었다. 생체공학 분야에서는 인공발 스프링용 유리섬유강화 적층재의 피로균열진전 특성에 대한 연구가 수행되었다. 향후 여러 공학분야에 대한 폭넓은 활용에 대한 연구가 좀더 이루어질 것으로 기대된다. [이영신, MSC Korea]

2002년의 신소재 및 복합재료 분야는 연구의 질적인 면과 소개된 논문 수에 근거하여 볼 때, 예년보다 활발히 진행되었다고 할 수 있으며 앞으로도 계속하여 높은 관심이 주목될 것으로 보인다. 이 분야에 대한 연구를 '소재 및 공정개발', '물성의 해석과 특성평가' 그리고 '설계 및 응용'으로 크게 분류하여 볼 때 물성의 해석 및 특성평가에 대한 연구가 가장 활발하여 전체 연구내용의 절반 정도를 차지하였고 소재와 공정의 개발 부분과 설계와 응용부분이 나머지 절반을 이루었다.

세부 분야별로 살펴볼 때, 소재 및 공정개발 부분에서는, 고속압밀법에 의한 유리섬유강화 PET기지 복합재료와 핫 프레스(hot press)법에 의한 TiNi/Al6061 형상기억 복합재료가 여러가지 공정변수에 따라 제조되어 그 특성이 연구되었고, 이온도움법을 적용한 CFRP/알루미늄 복합재료의 표면처리에 대한 연구도 소개되었다. 특히, 폴리이미드 필름에 나노 크기의 TiO₂를 분산 보강한 연구가 수행되어 나노 복합재료 연구로 시도되고



있는 점에 주목할 만하다. 이는 최근 나노기술의 확대라는 세계적인 추세에 맞추어 국내에서도 나노 수준의 보강재를 적용한 복합재료 제조가 시작되었음을 알 수 있는 것이었다. 또한 졸겔법(Sol-Gel)을 이용하여 적외선 감지를 위한 PZT/PT 교차박막이 제조되어 다기능(multi-functional)을 지닌 복합재료 분야의 연구가 확대되어 가고 있음을 보여주었다. 하지만 전체적으로 새로운 공정 개발에 대한 연구가 미약하였으므로, 경쟁력 있는 복합재료의 제조를 위해서 특별히 기계공학 관점의 공정에 대한 연구가 많이 필요할 것으로 보인다.

물성의 해석 및 특성평가 부분은 재료의 기계적 성질을 다루는 전통적인 분야인 만큼 연구의 많은 부분을 차지하였다. 연구 내용을 간략하게 나열하여 보면, 횡방향 등방성을 고려한 단섬유 인장 실험 모델링, 복합재 원통구조물의 열-점탄성적 잔류응력 및 열좌굴 해석, 샌드위치 보의 진동 및 동특성평가, CF/Epoxy 적층판의 충격손상, 섬유금속 적층판의 압입손상, 탄소섬유 강화 알루미늄 복합재의 전단물성 측정 등의 연구가 이루어져 복합재료의 인장, 충격, 압입, 좌굴, 마모, 진동 등의 연구가 활발히 진행되었음을 알 수 있고 이러한 논문들 중에서는 여러가지 환경요인을 고려한 내용도 발표되어 구체적이고 실제적인 접근을 보여주었다. 용탕주조법을 이용한 금속복합재료 제조공정의 열전달 해석, 탄소섬유 강화 복합재의 열전도를 평가 등의 논문에서 복합재료의 열전달 측면을 고려한 내용을 찾아 볼 수 있었고 면외 충격을 받는 3층압전 복합재료 내의 가장자리 균열, Al/Epoxy 이종 접합체에 대한 계면강도, TiNi/Al6061 형상기억 복합재료 파괴, 고무보강 폴리머 재료의 파괴인자 결정, 세라믹 재료의 콘크랙 형상변화, 고무와 섬유로 구성된 복합체 원형균열, 압자압입시험 이종재료 접합층의 계면인성 등의 논문이 발표되어 복합재료

의 계면이나 균열을 다루는 파괴역학에 대한 연구가 특별히 높은 관심을 나타내었음을 알 수 있다. 열거한 바와 같이 모재와 보강재를 달리하는 다양한 복합재료에 대해서 물성과 특성의 연구가 활발히 진행되고 있고 그 내용들도 한층 구체화된 것이 많아 복합재료의 적용 가능성을 충분히 엿볼 수 있는 점이라 할 수 있겠다.

한편, 이와 같은 전통적인 기계적 성질에 부가적으로 특수한 기능(function)을 가지는 복합재료에 대한 연구도 발표되었다. PZT 순수박막과 PZT/PT교차박막의 적외선감지, 이방성 재료에서의 초음파 전파 거동해석 등의 연구이다. 이러한 다기능(multi-functional)의 복합재료도 나노 복합재료와 함께 세계적으로 연구 및 개발이 확대되어 가고 있는 추세에 있으며, 국내에서도 이에 발맞추어 연구가 진행되고 있음을 알 수 있다.

마지막으로 복합재료의 적용 및 응용부분에서는 CNG 압력용기와 고속 회전하는 공기주축부를 위한 복합재료 추력베어링을 실제 구조물의 하중 특성과 경제성을 고려하여 설계가 이루어졌다. 또한, 내진 구조물인 탄성받침과 척추 인공추간판 보철물 등의 설계가 복합재료의 강점을 충분히 활용한 설계가 이루어짐으로써 복합재료의 응용분야가 기계뿐만이 아니라 건축, 토목분야와 의료분야로 점차 확대되어 감을 국내에서도 실감할 수 있는 성과였다.

이상의 2002년 연구를 종합하여 볼 때, 신소재 및 복합재료 부분은 새로운 분야에 대한 개척이 꾸준히 진행되고 있기도 하며 기존의 내용을 보다 심도있고 구체적으로 다루어가고 있는 추세이기도 하여 이 분야가 기계공학 발전의 핵심기술을 제공하는 동시에 기존 기반기술의 발판을 마련해 주는 역할을 할 수 있으리라는 기대를 크게 가져 볼 수 있는 한 해였다. [한경섭, 포항공과대학교]

접합부의 강도평가

접합부의 강도평가에 관한 2002년도 연구결과는 크게 파괴, 피로, 미세조직, 환경강도 및 접착제의 접합부로 나눌 수가 있다. 산업분야에는 다양한 조건의 구조물이 적용되며, 이러한 구조물에는 사용환경에 적합한 설계와 특성을 고려하여 이종재료 또는 동종재료를 접합하여 사용하고 있다. 지금까지 많은 연구결과가 도출되어 있고, 현장에 적용하고 있지만 접합부에 관한 연구는 새로운 재료가 도입됨으로써 끊임없는 연구·개발이 필요하다.

후판 용접은 다층용접을 채택하고 있으므로 용접열에 의한 잔류응력과 소성변형이 발생하므로, 이러한 영향을 고려한 후판 부분용입 다층 용접재에 J-적분을 적용하여 Root face 크기에 따른 파괴특성을 해석하였다. 그리고, 국산화 QLT-9% Ni강의 SAW 다층 용접 용접부의 CTOD시험을 수행하여 균열개시 파괴인성 변화를 관찰하였으며, LNG저장 탱크의 이중안전성 개념에 근거하여 용접열영향부 내의 compact crack arrest시험을 수행하여 균열정지 파괴인성 변화를 관찰하였다.

용접구조물의 수명평가를 정확하게 하기 위해서 사용기간 중 잔류응력의 이완 또는 재분포를 작용하중의 크기, 피로하중의 응력진폭 및 사이클 수의 영향에 따라 정량적으로 평가하는 방법이 제안되었다. 그리고 실제 구조물에서 사용되는 다점 용접부를 적용 대상으로 단점용접, 2점, 4점 다점용접에 대하여 피로시험을 수행하고, 유한요소 해석을 병행하여 다점용접에 대한 피로수명 예측 방법을 제시하였다. 또한, 에너지 환경설비용 구조재료인 STS316L 용접부의 피로균열진전거동과 열화에 따른 초음파 파라미터를 조사하여 파괴 및 초음파 파라미터의 상관관계를 정량화하여, 가동 중 시설물의 열화도 평가 및 잔여 피로수명 예측이 가능하도록 하였다. 내식성과

기계적성질이 우수한 2상 스테인리스강의 GMAW 법 용접 열영향부에 대한 균열전파특성과 균열진전시의 음향방출의 주파수특성을 규명하였다.

산업 플랜트 등 고온 배관재 강관으로 사용되는 저합금 탄소강의 용접열영향부에 대한 미세조직 조사 및 열이력 해석을 수행하여, 열영향부 내의 취약부 도출과 용접시 상변태 수반하는 열이력 계산으로 신뢰성 검증을 하였다. 그리고 압력용기용강 용접 열영향부에 대한 금속조직 및 기계적물성 평가의 효율화와 경제성 향상을 위하여 이론적 및 준경험적 금속조직 및 기계적물성 예측 절차를 개발하고 원자로 압력용기 용접부에 적용하여, 용접부의 잔류응력 해석시 신뢰성 있는 금속조직 및 재료물성 관련 입력자료를 효율적/경제적으로 도출할 수 있도록 하였다. 또한 초초임계 발전소의 고온설비 배관재인 P92강의 용접부에 대한 미세경도측정 및 피로균열성장 실험을 수행하여 미세조직의 영향을 검토하였다.

HT60강의 용접재 및 후열처리재를 사용하여 부식제어 하 저변형을 실험에 의하여 SCC실험을 실시하여, 환경파괴기구를 규명함으로써 부식환경을 고려한 고장력강 용접구조물의 설계에 기초 자료를 제공하고자 하였다. 그리고 국산 자동차에 적용된 구조용 에폭시 접착제 결합부가 수분이나 고온에 노출되었을 때 발생하는 접착제 접합 결합부의 접합강도 변화를 온도와 노출시간 변화의 영향에 대하여 비교·평가하였다. 또한 탄소강 용접부를 대상으로 원전설비 용접부에서 발생할 수 있는 수소기인균열 해석절차를 개발하였으며, 기존의 후열처리를 대신할 수 있는 전기적 방법을 이용한 새로운 개념의 완화방법을 제안하였다.

접합부 강도에서는 2액형 에폭시 접착제로 알루미논과 폴리머 시험편을 접합한 피착재 표면처리방법과 접합부 강도와의 관계를 규명하였다. 그리고 알루미논과 고무변성 에폭시수지를 이용



한 접합이음매에 계면균열을 도입하여 파괴인성치를 계산하고 균열선단의 손상역 및 손상역 내부를 관찰하여, 접합구조물 접착부의 신뢰성을 향상시키기 위한 기초자료를 제공하고 있다.

상기와 같이 접합부에 대한 다양한 분야에서 연구가 실시되어 좋은 결과가 도출되고 있으므로, 기계공학적 차원에서 용접 구조물의 안전설계와 건전성 평가에 많이 도움이 될 것이라는 기대감을 갖게 하였다. [남기우, 부경대학교]

신뢰성 평가

신뢰성 평가에는 광범위한 분야가 포함될 수 있으나, 여기서는 우선 기기, 배관, 구조물과 이들을 구성하고 있는 요소의 건전성 여부를 정량적으로 평가하여 설계나 운전차원에서 신뢰성과 안전성을 향상시키는 것을 목적으로 하는 것을 중심으로 국한하여 검토한다. 이러한 주제와 관련한 내용은 원자력분야(증기터빈 포함)가 여섯 편이었으며, 이외에도 피로균열진전을 확률적으로 예측한 분야 두 편(항공분야 포함), 신뢰성을 고려한 구조물의 최적설계방법과 관련하여 한 편이 발표되었다. 논문에서 다른 소재는 원자로 압력용기나 압력관, 증기터빈, 항공분야로서 신뢰성 평가분야는 안전을 최우선으로 하는 핵심 기기가 그 대상이다.

발표된 내용 중 중요한 것을 요약해보면 다음과 같다. KOPEC의 진태은, 정성규가 원자로압력용기의 잔류응력과 파괴인성의 영향에 따른 파손확률의 영향평가를 발표하였다. 이는 원자로 압력용기 용접부의 잔류응력 분포를 반영하고 최근 연구되는 Master 곡선 등 다양한 파괴인성의 영향을 고려한 것으로 원자로 압력용기 건전성 평가결과의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있는 국내 외에서 선도적인 연구내용을 소개한 것이다. 중수형 원전 압력관에 대해서는 성균관대의 곽상록

등이 압력관의 외경과 두께변화를 고려한 결함의 파손확률 예측에 대한 발표가 있었으며, 이는 가동기간 증가에 따른 압력관의 파손확률을 예측하여 건전성을 향상시키고자 한 것이다. 배관과 관련한 것으로는 성균관대의 이규호가 원통형 구조물에 존재하는 원주방향 균열에 대해 초기 파손확률을 예측할 수 있는 FORM 모듈을 개발한 내용을 소개하였다. 증기터빈 블레이드의 확률론적 해석이나 신뢰성 평가에 대한 논문을 한양대학교 김철수와 황진호가 각각 발표하였으며, 이들 논문은 증기터빈 최종단 블레이드 손상이 터빈손상의 대부분을 차지하고 있는 점을 고려하여 증기터빈 블레이드 최종단에서 채취된 신재 및 열화재를 대상으로 몬테칼로 시뮬레이션 기법을 이용하여 신뢰성을 평가한 내용을 소개한 것이다. 부경대의 정현철은 피로균열진전을 확률론적으로 접근하여 피로균열전파율과 균열전파수명의 확률분포를 설정하여 피로평가의 신뢰성을 향상시키기 위한 연구내용을 소개하였다. 이외에도 한양대 심동석이 비행하중 하에서 항공기 재료의 피로균열진전을 예측하기 위해 확률론적 균열진전 예측모델을 제시하여 비행하중 하에서의 균열진전거동과 피로수명의 분포를 예측하는 내용을 소개하였다.

전반적으로 2002년도에 발표된 신뢰성 평가 분야는 주로 원전의 안전관련 기기나 구조물이 연구대상이 되었으며, 이러한 연구결과는 국내 원전의 수명연장이나 주기적 안전성 평가의 주요 현안문제를 해결하는 데 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 이러한 신뢰성 평가는 주요 피동형 기기에 대해 주류를 이루어 오고 있으며, 앞으로도 지속적으로 연구하여야 할 주요 분야이다. 그러나 최근에는 원전의 주요 능동형 기기에 대한 확률론적 접근방법을 이용한 신뢰도 성능기준설정 및 성능평가를 통해 정비관리의 적절성과 정비개선 방안을 수립하여 원전의 안전성과 성능향상에

큰 기여를 할 수 있는 연구가 국내에서도 활발히 진행 중에 있다. [진태은, 한국전력기술]

구조물의 손상평가

본 분야와 관련된 논문은 2002년도 재료 및 파괴부문에 많은 부분을 차지하고 있으며, 매우 활발한 연구가 수행되었다. 연구 분야를 살펴보면 우선 구조용 재료 및 구조체 손상평가 분야가 주류를 이루고 있으며, 손상 정도를 측정하는 계측 기법 개발 그리고 다양한 소재와 구조물의 피로 특성 평가 분야에 대한 연구가 그 뒤를 따른다.

구조용 재료의 손상평가 분야에서 섬유강화 복합재료 및 발전소 설비용 소재를 대상으로 많은 연구가 진행되었다. 임광희 등은 충격하중을 받은 CF/Epoxy 적층판의 충격손상을 계면분리가 시작된 영역과 파면에서 실시한 SAM과 SEM을 이용하여 평가하였다. 한경섭 등은 A1050과 C/Epoxy Preprag으로 제작된 섬유 금속 적층판에 압입 및 충격하중을 부과한 후 섬유의 적층각도에 따른 하중-변위선도를 구하고, 또한 손상부의 파면해석을 통해 손상 거동을 평가한 바 있다. 김문생, 신형섭 등은 취성특성을 갖는 소다라임 유리의 소구충돌에 의한 손상특성을 분석하였고, 오상섭, 서창민 등과의 공동연구를 통해 다축응력 상태의 소다라임 유리의 소구충돌 후 잔류강도를 평가하였다. 발전소 설비용 소재 분야에서, 권일현 등은 발전소 터빈 캐스팅 부품 소재인 Cr-Mo-V 강에 대하여 재활성 분극시험 및 소형편치 실험을 통해 열화 손상도를 평가하였다. 또한 안상복, 김정규 등은 중성자 조사가 이루어진 중수로 압력관 재료의 조사열화에 따른 인장거동 특성을 분석한 바 있다. 실 구조물의 손상평가는 주로 발전소용 구조물에 대해 이루어졌다. 이영현, 김종범 등은 액체 금속로에 사용되는 316 스테인리스강 고온구조물에 나타나는 열 라체팅 현

상을 구성방정식을 통한 열응력해석 및 실험을 통해 규명하였다. 김진원 등은 유동가속부식에 의한 배관감육에 따른 파손거동을 이해하기 위하여 국부 배관감육이 다양한 형태로 진행된 구조 시험체에 대하여 4점 굽힘시험 및 내압실험을 수행하였다. 그리고 남기우, 김선진 등은 국부감육된 파이프 구조체에 대하여 4점 굽힘시험을 실시하고, 서로 다른 네 가지의 파손거동에 대한 체계적인 평가를 수행하였으며, 이를 통해 국부감육이 진행된 관로시스템의 허용강도를 예측하였다. 이우식 등은 보 구조물의 손상규명을 위하여 주파수응답함수에 기초한 구조손상추정법을 제시하였는데, 이 방법은 손상이 없는 경우와 손상을 갖고 있는 구조체에 대하여 계측된 고유진동수 및 모드형상 자료를 주파수응답함수로 평가하여 손상상태를 추정할 수 있다.

구조물 및 부품의 손상평가를 위한 계측기법의 개발 분야에서 장재일, 권동일 등은 연속압입시험장치를 개발하여 석유화학설비에 널리 이용되는 Cr-Ni 및 Cr-Mo 강의 경년열화 현상을 계측, 평가하였다. 이학주, 장석원 등은 비틀림 하중을 받는 복잡한 형상의 전자부품의 표면부에 작용하는 면내변위를 전자 스페클 패턴 간섭계를 이용하여 계측하는 비접촉식 기법을 제안하였다. 또한, 이진경 등은 형상기억효과를 갖는 TiNi 합금 섬유에 예변형률을 가한 Ti/Ni/A16061 복합재의 균열발생 및 진전시점을 계측하기 위하여 AE 기법을 도입하여 비교적 좋은 계측결과를 보였고, 윤한기, 이준현 등과의 공동연구를 통해 AI/CFRP 샌드위치 복합재료에 대해서도 AE 신호와 손상 정도의 관계를 고찰한 바 있다.

다양한 소재 및 구조물에 대한 피로거동 평가가 많이 이루어졌다. 송삼홍 등은 소켓 및 원공을 갖고 있는 아라미드 섬유강화 금속적층재에 대한 굽힘시험을 통해 C-스캔 이미지를 이용한 층간분리현상을 관찰하였고, 원공 주위에 발생,



진전하는 균열거동 특성을 평가하였다. 또한 혼합모드 하중하의 균열진전 거동 특성에 영향을 미치는 응력비효과를 고찰하였다. 액체 중소로용 소재인 316L 스테인리스강의 고온 저주기 피로수명식은 홍성구, 이순복 등에 의하여 개발된 바 있고, 황든영과 김정규는 2124-T851 알루미늄 합금에 대한 지연계수를 구하여, 비행하중하 피로 균열진전수명을 예측하였다. 김기전, 정석주 등은 현가장치용 코일스프링의 피로특성에 미치는 온간 쇼트피닝 가공 영향을 연구하였고, 강진식, 신용승 등은 이미 피로손상을 받은 SM45C 강에 대한 재피닝 효과를 분석하였다. 이동우, 주원식 등은 A12024-T3재에 대한 표면미소균열의 극치통계 해석을 통한 피로수명예측을 시도한 바 있고, 김철수, 김정규 등은 LP 터빈 브레이드 강재에 대하여 열화에 의한 파손확률을 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 강도-응력 간섭모델로 구하였고, 특성안전계수를 평가하였다. 한석영, 송시엽은 외팔보형 시험편에 대하여 성장변형률법을 적용한 형상최적화 기법을 적용하여 피로수명을 향상시키는 시도를 행한 바 있다. 그리고 용접구조물의 피로수명 예측 분야에서 주석재는 자동차에 적용되는 다점용접이음부에 대하여 파괴역학적인 방법이 아닌 국부응력법을 적용하여 피로수명을 예측하는 기법을 제안하였고, 한승호, 신병천 및 김재훈은 일반 용접구조물의 피로강도 및 피로수명에 큰 영향을 주는 용접잔류응력 및 기계적 하중에 의한 이완 현상을 정량적으로 평가하고, 이를 평균응력 효과로 고려한 피로수명평가 기법을 제안하였다. [신병천, 한국기계연구원]

NDT 기법 및 응용

2002년 한 해 동안 논문집에 게재된 논문 중 비파괴평가 분야에 해당되는 논문의 수는 10편 정도이며, 발표 논문으로서는 춘계학술대회 11편,

추계학술대회 다섯 편, 1차 재료 및 파괴부문 학술대회 세 편, 2차 재료 및 파괴부문 학술대회 네 편으로 조사되었다.

논문집에 게재된 논문의 내용으로서는 음향방출 기술의 응용, 레이저유도 초음파, 열화도 평가, 초음파 전파 해석에 관련된 내용이 주를 이루고 있는 것으로 나타났으며, 춘계학술대회에서는 초음파, 영상신호 해석, 음향방출, 열화도 평가 등은 물론 ESPI 및 광성유 EFPI 센서 등을 이용한 광학적인 비파괴평가 기술의 이용이 눈에 띄고 있다. 추계학술대회는 전국 기계공학 분야 연합심포지엄으로 개최되었으며 대부분 초음파, 열화도 평가 등에 관련된 논문으로 이루어져 있었다.

한편 1차 재료 및 파괴부문 학술발표에서는 세 편 모두 음향방출 기술을 응용한 연구 내용으로 음향방출 기술에 대한 기초 연구 및 응용연구가 최근 상대적으로 활발한 것으로 평가되었다. 특히 2차 부문학술대회는 한국비파괴검사학회 학술제 2분과(초음파분과)와 공동으로 “Nano-Technology(NT) 산업에서의 파괴역학 및 비파괴 기술의 적용 워크숍”이란 주제로 두 분야 모두 10편의 특별 강연과 61편의 구두 및 포스터 논문을 발표하여 성황리에 마쳤다. 이 중 비파괴학회 세션에서의 발표를 제외하고 기계학회 재료 및 파괴 부문에서 발표된 NDT 관련 논문은 네 편으로 초음파에 의한 열화 특성평가, 배관재료의 음향방출 특성, 접합계면 비파괴검사를 위한 초음파기법 개발 등이 발표되었다.

전체적으로 2002년 1년 동안 발표된 논문의 분야는 대체적으로 비슷하였으며, 앞서 언급한 초음파, 음향방출, 열화도 평가, 광학적 방법 등이 주를 이루고 있음을 볼 수 있으며, 고전적인 비파괴시험 분야에서 모니터링이나 비접촉 측정에 관련된 기술의 연구 경향이나 발전이 눈에 띄게 나타나고 있다. [윤동진, 한국표준과학연구원]

전자 패키징 신뢰성

전자 패키지는 여러 가지 전자소자, 즉 반도체 소자, 저항체, 축전체 등을 조립한 전기 하드웨어 구조물을 말하며, 전기적인 신호와 전력을 전달하고 열을 방출하며, 기계적 하우징 기능을 수행한다. 전기·전자 제품의 고집적화·경박단소화를 지향하는 최근 시장 요구에 맞춰 전자 패키지 기술도 마이크로 BGA, 웨이퍼 레벨 CSP, ACF/NCF, 그리고 MCM 등의 개발로 가속화를 늦추지 않고 있으며, 기존의 Sn-Pb 소더를 비납소더로 대체하여 환경친화적 기술 요구에 대응하고 있다. 그러나 전자 소자들이 다기능화 경박단소화됨에 따라 지금까지 크게 문제되지 않았던 신뢰성 문제들이 많이 노출되게 되었다. 패키지의 기계적 파손은 전자소자의 전기적 기능 수행에 직접적인 영향을 주게 되고 이는 ZERO DEFECT의 기술을 요구하는 반도체 및 전자부품 시장에서의 경쟁력 하락의 일차적인 원인이 된다. 이러한 기계적 파손의 유형은 패키지 열변형에 의한 접합부의 층간 분리, 접착 계면에서의 균열 발생과 진전, 소더 조인트의 피로파손 등이며, 설계단계에서의 파괴역학적 해석 및 피로강도 해석기술과 관련된 기계공학적 접근이 필수적이다.

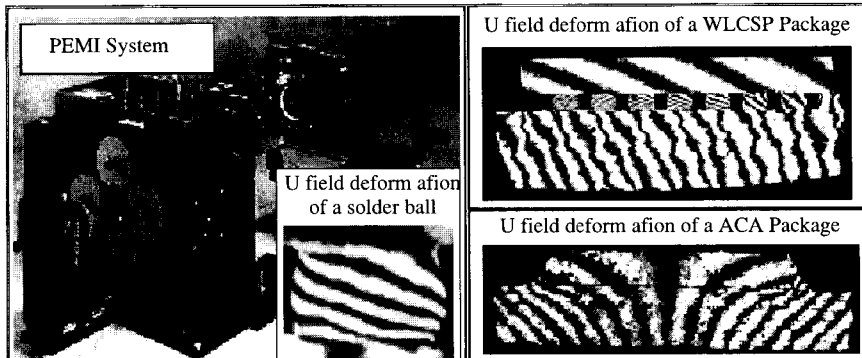
밀리미터 단위 크기인 미소 전자 패키지의 기계공학적 해석을 위해서 기존의 방법과는 차별화된 실험, 측정, 그리고 해석 기법을 이용한 연구가 활발히 진행 중이다. Sub 마이크로 영역의 미소 재료 시험기를 통해 소더 조인트 재료의 물성 측정, 피로×크리프 실험, 계면 파괴 인성 실험 등을 수행하고 있으며, ESPI, 모아레 간섭계, 고배율 광학 현미경과 같은 광측정 장비의 응용을 통해 나노미터 단위의 미소 변형 측정을 구현하고 있다. 또한, 실험 수행에 따른 고비용을 절감하고 다양한 설계 인자를 바꿔가며, 예측 신뢰성 모델링이 가능한 유한 요소 해석(finite element

analysis)을 통한 기계적 신뢰성 해석도 활발히 수행되고 있다.

최근의 주된 연구 초점은 플립 칩 소더 접합부의 신뢰성 향상이 주를 이루고 있으며, 칩 크기 패키지(CSP : Chip Size Package), 필름형 패키지(ACF/NCA, Anisotropic Conductive Film/Non Conductive Adhesive), SIP(System in Package)와 같은 차세대형 패키지의 기계적 신뢰성에 관련된 연구도 활발히 준비되고 있다. 장의구, 유정희, 김경섭 등이 플립 칩 소더 접합부의 다양한 열 사이클링 온도 조건, 기하학적 설계 조건, 소더 조성에 따른 피로 수명에 근거한 신뢰성 해석을 수행하였고, 박지은 등은 플립 칩 1차 접합부의 언더필/칩 계면에서의 응력해석을 시도하였으며, ACF/NCA와 같은 필름형 전자 패키지의 계면에서의 응력 해석이 양세영, 이순복 등에 의해 진행되었다.

그 외에도 전자 패키지의 기계적 신뢰성에 관련된 다양한 연구들이 수행되어 왔는데 Pb/Sn 소더 또는 비납소더의 피로, 파괴 거동에 대한 연구가 이순복, 강기주 등에 의해 연구되고 있고, 박막구조의 점탄성을 고려한 박막의 휨, 박막 응력(film stress), 계면 해석에 관한 연구가 엄윤용, 이상순 등에 의해, BGA 패키지의 모아레 간섭계를 이용한 열변형 해석에 관한 연구들이 주진원, 이순복 등에 의해 보고되고 있다. 그밖에, 비납소더 불의 조성 변화에 따른 전단강도, 미세조직, 그리고 공정조건 최적화에 관한 연구가 최진원, 오태성, 박종원 등에 의해, Sn/Ag/Bi 비납소더의 크리프 거동에 대한 연구가 유진, 이순복 등에 의해, 비납소더 조성의 변화에 따른 소더범프와 금속패드 사이에 형성되는 금속간화합물이 파손에 미치는 영향 분석에 대한 연구가 김영호 등에 의해 연구되고 있다.

외국의 경우, 미국 조지아 공대의 패키지 연구센터(PRC), 미국 매릴랜드 대학의 CALCE EPSC,



미소 변형 측정을 위한 모아레 간섭 시스템(PEMI)과 측정 예

싱가폴 진딕기술원 등 세계 각지에서 전자 패키지 신뢰성과 관련된 연구 개발 및 표준화 작업이 진행 중이며, ASME나 IEEE에서 주관하는 InterPACK, ECTC, EMAP 등과 같은 국제 학회를 통해 연구 성과와 비전을 활발히 공유하고 있다.

또한, 전자 패키지의 기계적 신뢰성 연구와 관련되어 KAIST CARE의 “전자 패키지 신뢰성 평가 기술” (NRL), CEPM의 4총괄 과제인 “전자 패키지의 기계적/열적 신뢰성 평가 기술 연구” (ERC) 등의 연구 과제가 수행되어 기계적 신뢰성 평가 기준 확립과 전문가 시스템 개발 등에 주력하고 있고 학술적인 가치가 있는 결과물들을 지속적으로 발표하고 웹 서비스를 통해 제공하고 있다. 그밖에도 이러한 결과물들이 산업체에 즉시 적용될 수 있도록 KAIST CARE에서 개최하는 “전자 패키지의 신뢰성 평가 기술” 단기강좌, 전자패키지 연구센터(CEPM)에서 주관하는 “CEPM 정기 세미나”, “외국인사 초청 강연” 등이 정기적으로 열려 기술이전과 기술지원을 유도하고 있으며, IMAPS-Korea에서도 주기적으로 신뢰성 관련 강좌를 개최하여 이 분야를 배우고자 하는 연구자들을 위한 교육의 장을 마련하고 있다.

전자 패키지 기계적 신뢰성 평가 기술이 광범위하게 적용될 경우 설계 단계에서의 품질 인증

작업을 통해 개발 주기가 빠른 패키지 시장에서 재설계에 따른 비용을 절감할 수 있으며, 좀더 가혹한 환경에서 사용 가능한 부품/제품의 개발, 유지를 통해 기존 시스템의 효율성이 증가됨은 물론 극한 환경 제품이라는 새로운 시장

참여할 수 있는 기회도 얻을 수 있다. 또한 국가 경쟁력 강화와 새로운 시장의 형성 및 고용효과 증대라는 파급효과로 경제산업의 발전에 크게 이바지할 것이다. [이순복, KAIST]

계산역학

계산역학의 대표적인 문제인 응력강도계수(응력확대계수)를 구하는 연구가 올해에도 활발히 진행되었는데, 등방성에 대한 문제는 많이 해결되었으므로 재료의 이방성이나, 계면, 동적 하중, 재료의 전기적 성질 등이 고려된 문제가 많았다.

우선 재료의 이방성을 고려한 문제로는 등방성/직교이방성 재료의 계면균열에 대한 정적 및 동적 해석(이광호), 비등방성/등방성 이종재료 내의 특이성을 구하는 문제(신호영, 엄윤용), 등방성/직교이방성 계면에서 균열의 초기 성장각도를 구하는 문제(황재석), J-T에 의한 3차원 반타원 계면 균열의 선단응력장을 구하는 문제(이형일) 등이 고려되었다. 또한 직교이방성체 내 경사균열의 응력장을 응력함수를 사용하여 구하고 이를 통하여 균열성장 방향을 예측하거나(임원균) 유한요소 교호법을 이용하여 직교이방성 물체 내 균열을 해석한 문제(김만원, 박재학) 등이 있었다.

동적 하중을 고려한 경우로는 x 방향으로 선형적 함수 구배를 가지는 경우 동적 응력장과 변위장을 구하는 문제(이광호, 조상봉)가 있었고, 재료의 기계적 성질과 함께 전기적 성질을 함께 고려하여 균열 문제를 해석한 경우로는 면외 충격하중을 받는 3층 압전 복합재료 내의 가장자리 균열(이강용), electrostrictive 세라믹 재료 내 균열에 기계적 및 전기적 하중이 작용하는 경우(범현규), 압전 세라믹 실린더 내의 동전형 균열에 모드 I 하중이 작용하는 경우(이강용) 등에 대한 해석이 있었다.

또한 M적분을 이용한 3차원 꼭지점에서의 특이 응력해석(임세영), 가상 균열 단형법을 이용한 타원형 아크 관통균열에서의 응력강도계수를 구한 연구(양원호)와 영향 계수를 이용하여 원통용기 내 축방향 및 원주방향 표면결함의 응력강도계수를 구한 연구(장창희), J-Q 해석법을 이용한 표면균열의 구속효과(김영진)를 살펴본 연구 등이 있었다.

연성 재료의 불안정 균열성장 해석을 위해서는 J 적분을 쉽게 구할 수 있어야 하는데 참조응력을 사용하여 J 적분을 구할 수 있음을 보인 연구가 성균관대학교 김영진, 김윤재, 최재봉 박사를 중심으로 활발히 진행되었다. 참조응력을 이용하여 배관에 존재하는 원주방향 표면균열 및 관통균열, 실린더에 존재하는 축방향 표면균열, 복합하중을 받는 반타원 표면균열에서 J 적분을 구할 수 있음을 보였다. 또한 실린더 축방향 표면균열의 J 적분을 GE/EPRI 방법으로 예측할 수 있는 식과 크리프 거동하는 구조물에서의 C* 적분을 예측하는 방법도 제안되었다.

적용 대상으로는 원자로 용기에 대한 가압열충격 해석(김영진, 강기주), 원자로 용기의 운전제한 곡선(장창희), 국부감속 배관의 불괴응력에 대한 손상기준(김진원, 박치용)과 소성불안정 해석을 통한 파열압력 해석(신규인, 박재학), 용접부에 대

한 J 적분을 이용한 해석(송정일), 이중 탄성재료를 접합하는 연정중간층 균열에 대한 소성영역 크기의 예측(강기주) 등의 연구가 있었다.

확률론적인 방법을 이용한 연구도 눈에 띄었는데 CANDU 압력관에 대한 확률적 파괴 해석(이준성, 곽상록), 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 증기터빈 블레이드의 신뢰성 평가(김정규), 부식된 파이프의 파손 확률에 미치는 경계조건의 영향(이역섭) 등의 연구이다.

잔류응력과 관련된 논문으로는 흠확장과 역지끼워맞춤 시 잔류응력 및 응력강도계수 해석(양원호), 박막의 잔류응력 해석, 자동 압입법과 유사한 요소법을 이용한 잔류응력 해석(석창성) 등이 있었다. 그밖에 경사진 균열이 있는 보강된 판을 복합재료 패치로 보수한 경우의 해석(양원호), 피로수명 향상을 위한 형상 최적화(한석영) 등의 논문이 발표되었다. [박재학, 충북대학교]

발전소요소 진단 및 평가

발전소요소 진단 및 평가 분야의 전체적인 내용은 피로, 재료열화 측정, 파괴거동평가, 건전성 평가 등이 주된 주제가 되었으며, 논문편수를 보면, 학계보다는 산업계와 연구소에서 더 적극적으로 참여하고 있음을 알 수 있었다.

발표된 내용 중 중요한 것을 요약해 보면 다음과 같다. 원자력 분야에만 사용되는 재료인 지르코늄 합금에 대하여 지연수소로 인한 균열성장속도와 파괴인성, 미세조직 및 기계적 성질을 각각 김영석, 김상재, 김선식, 부명환, 조충형 등이 발표하였고, 오동준이 피복관의 형상을 유지한 KEC 시험편을 이용한 파괴인성 시험방법을 연구하였다. 이경수, 김태룡 등은 배관의 두께를 연속적으로 측정하는 시스템을 개발하였고, 신규인과 박재학은 소성 불안정을 고려한 마멸 손상 전열관의 파열압력을 해석하였으며, 김경호는 원전 중



기 터빈재료의 화염경화공정에 따른 액적 충격특성 특성에 대하여 연구하였다.

김진원과 박치용이 내압과 굽힘하중을 받는 국부강유배관의 붕괴응력기준을 평가하였고, 김현중, 강기주 등은 원자력발전 배관재료에 대하여 비소규모 항복조건에서의 균열선단 구속정도를 파괴거동 해석에 포함시키기 위해 A2를 사용하는 두 개 매개변수법을 이용하였다. 그리고 송기남, 정연호 등은 핵연료봉의 지지스프링의 탄소성 특성을 해석하였고, 문성인, 이진호 등은 다중 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 최적 국부파손모형을 결정하였다.

전반적으로 발전소 요소진단 및 평가분야에서는 현장 적용성이 높은 연구결과가 많이 발표되었고 주제도 다양하여 연구가 실제의 문제를 해결하는 데 큰 기여를 하고 있음을 확인할 수 있었다. [박윤원, 한국원자력안전기술원]

FFS-RBI-IT

1990년대 후반을 기점으로 산업설비의 관리에 있어서 IT의 도입이 매우 활발히 이루어지고 있다. POSCO의 ERP(Enterprise Resource Planning ; 전사적자원관리시스템) 도입 이후 주요 장치산업계에서는 막대한 설비와 자산관리를 위해 IT화를 추진하고 있으며, 특히 주요설비의 관리에 IT 기반의 시스템을 적극 활용하고 있다. 2002년에 이루어진 가장 대표적인 사례는 (주)한국수력원자력의 ERP 도입이라고 할 수 있다. 이러한 IT 기반 시스템의 도입이 활성화되면서 설비의 안전성 평가나 검사주기 결정에도 소프트웨어의 활용이 확대되고 있다. 이러한 소프트웨어들은 설비 안전성평가 기술, 위험도평가기술 등 전문성이 높은 기술을 요하는 것으로 선진국을 중심으로 확산되어 왔으나, 국내 IT 인프라의 확대로 2002년도에는 FFS나 RBI와 관련 많은 국내 연구가 이루어

어진 바 있다. 학계에서는 IT기반 시스템과 FFS, RBI 등의 연계에 관한 논문 발표가 있었으며, 산업계에서는 중화학플랜트, 발전설비, 가스설비 등 주요설비별로 FFS(Fitness For Service ; 사용적합성평가)와 RBI(Risk Based Inspection ; 위험도기반검사)의 적용방안에 대한 논문이 다수 발표되었다. FFS-RBI-IT 분야의 특성은 산학연이 공동으로 통합적인 시스템의 설계와 개발에 주력한다는 점을 들 수 있다. 산업계를 보면 장치산업계를 중심으로 플랜트엔지니어링업계, 설비유지보수업계에 IT 컨설팅업계가 가세하여 공동주체로 세미나를 개최하는 경우가 많았으며, 학계에서도 설비수명평가 연구분야를 중심으로 이에 적극 참여한 바 있다. 이에 따라 2002년에는 산학연 공동 연구에 의한 연구성과가 많이 나타났다. 괄목할만한 성과로는 원전주요기기 건전성평가프로그램의 개발, 중화학플랜트 설비의 RBI 프로그램 개발, IT기반의 제철설비 안전성평가 시스템 개발, 가스배관의 부식평가를 위한 FFS 방식의 프로그램 개발 등을 들 수 있다. 이러한 프로그램들은 결정론적 파괴역학, 확률론적 파괴역학, 피로수명평가기법 등 기존의 학문적인 영역에서의 성과를 IT와 접목하여 산업체에 적용한 사례로서 해당분야의 학문발전에 기여하는 바가 크다고 할 수 있다. 산업계의 IT 기반 설비관리시스템의 적용확대는 보다 세분화된 수명평가기술의 개발을 지속적으로 자극할 것으로 보이며, FFS 및 RBI 등 관련 프로그램의 개발 및 확산 또한 적극 유도할 것으로 기대된다. [최재봉, 성균관대학교]

MEMS & NANO 선택적 분야

1990년대 초반 국내에서 연구를 시작한 MEMS는 반도체 일괄공정으로 제작된 기계/전자 요소를 하나의 칩에 집적시킨 복합융합 기술의 산물이다. 그런데 제2의 실리콘 혁명이라는 MEMS의

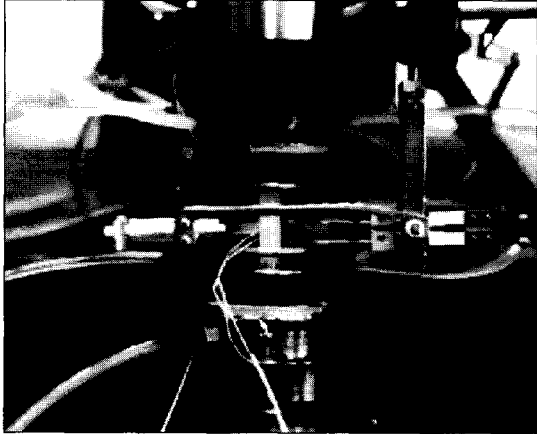
실용화를 가로막고 있는 가장 큰 요인 중의 하나가 신뢰성 기술이다. 반도체 등 전자제품에 이용되는 기술은 주로 전기공학 기술로서 평면적인 기술인데 비해서 MEMS는 전기, 기계, 광학 등 여러 가지 기술의 융합을 필요로 한다. 따라서 이미 확보된 전자제품 또는 기계 부품의 신뢰성 기술만으로는 MEMS 제품의 신뢰성을 확보할 수 없다. MEMS에서의 신뢰성 문제는 단순히 전자제품과 기계부품의 산술적인 합보다 훨씬 다양한 문제이다.

이에 따라, 국내에서도 기업체, 국가 연구소, 대학 등에서 MEMS 및 NANO의 신뢰성 분야에 대한 연구가 점점 활발해지고 있는 추세이다. 2002년도는 MEMS & NANO 신뢰성 분야 연구에 대한 저변이 확대되는 계기를 이룬 해였다. 학술대회에서는 한 세션을 만들어 연구 결과를 발표케 함으로써 연구자들의 연구 교류를 더욱 확대시키는 계기가 되었다. 이와 더불어 산학연 연구회도 만들어져 활발한 연구 활동이 전개되었다. 구체적인 발표 내용을 살펴보면, 권동일 등의 변위(응력) 측정(서울대, ESPI를 이용한 표면잔류응력장 평가)에 관한 연구 결과가 한 편 발표되었고, 기계적 물성 특성 평가에 관한 연구 결과로는 일곱 편의 논문이 발표되어 가장 높은 관심 분야임을 알 수 있었다. 이 분야에서 압입 시험을 이용한 연구 결과로는 한준희(표준과학원, Nanoindenter를 이용한 기계적 특성), 권동일(서울대, 연속압입 시험 최적화) 등의 두 편과 마이크로 인장시험기를 이용한 연구결과로는 최태훈(생산기술원, 마이크로 인장시험기 개발), 김동원(서울대, 정전기력을 이용한 특성평가), 이순복(KAIST, 인장시험기를 이용한 Ni박막 특성 시험) 등의 세 편, 공진 등 기타 방법을 이용한 연구 결과로는 강기주(전남대, 고온 박막 특성 측정), 정중현(서울대, 공진특성을 분석에 통한 기계적 특성평가) 등의 두 편이 있다. 따라서 박막의 기계적 특성 시험에 관

련된 연구자들의 관심이 점점 다양한 시험 방법 개발에 있음을 알 수 있다. 해석에 관련된 연구로는 이윤희(서울대, 나노압입곡선의 이론적 분석을 통한 잔류응력평가), 최현창(동명정보대, 다층 박막 잔류응력 분포 예측), 김상주(서울시립대, 분극역전과정예측) 등에 의해서 세 편이 발표되었다. 또한 추계 재료 및 파괴부문 학술대회에서는 Nano 및 MEMS 분야의 전문가를 초빙하여 "Nano-technology 산업에서의 파괴역학 및 파괴 기술의 적용"이라는 주제로 워크숍을 개최하여 평소 관심 있는 연구자들이 연구 방향을 설정하는데 좋은 계기가 되었다. 초빙 전문가들을 살펴보면 이재철(삼성종합기술원, 나노박막 정량분석), 고병천(삼성종합기술원, MEMS 상용화), 이광렬(KIST, DLC 박막 평가), 한준희(표준과학연구원, 나노압입시험), 신현정(국민대, 나노재료분석) 등이 발표를 하였다. 또한 "Nano 및 MEMS 신뢰성 연구회"라는 산학연 연구회가 만들어져 각 지역에서 연구회를 개최함으로써 이 분야의 연구 인력간의 정보 교류를 통한 연구 저변확대를 하는데 일조를 하였다. 이 연구회를 통하여 총 여덟 편의 외부 전문가 초빙 및 회원의 연구 성과 발표가 이루어졌다. 이와 같이 2002년도는 MEMS 및 나노 분야에서의 신뢰성 연구의 필요성이 한층 부각되어 연구 저변 확대의 계기가 이루어진 의미있는 한 해였다. [박준협, 동명정보대]

에너지 및 화력발전 분야

에너지 플랜트 및 화력발전소는 고온/고압의 특수한 환경은 물론 해수 부식 등 다양하고도 가혹한 조건에서 운용되는 특성으로 인하여 "설비 요소 진단 및 평가"에 대한 설비별/재질별/요소 기술별로 활발한 논문발표가 이루어졌다. 특별히 차세대 화력발전소는 초초임계압으로의 고압화가 최근들어 급속도로 이루어지고 있어 이에 대한



열피로 실험 장면

재질개발과 수명 및 신뢰성 평가에 대한 논문도 상당수가 발표되었다. 또한 플랜트 엔지니어링을 위한 정보화 시스템 기술에 관한 논문도 발표되어 웹기반 각종 DB 시스템에 관한 논문 등 IT 기술과의 접목을 시도하였다. 에너지 설비들은 주로 고온에서 장시간 운전되고 있으므로 고온의 기계적 물성과 경년열화 거동에 관한 논문이 주로 발표되었다. 재질별로는 고온 및 고압에서 주로 사용되는 Cr-Mo강의 저합금강은 물론 9Cr 이상의 고 Cr 강과 스텐인리스강에 대한 논문이 주종을 이루고 있다. 요소기술별로는 피로 수명, 열 기계피로 수명, 크리프 수명, 인성열화도, 균열

진전 및 건전성, 응력부식 균열, 탄소성 파괴역학, 최적 창조응력법, 응력부식균열법, 소형편치법, 전기화학분극법, 입계부식법, 연속압입법, X선 회절법, 전산역학에 의한 응력해석법 등에 대하여 이론적 접근이 심도있게 이루어져 학술적 성과가 높게 나타났다.

요소기술은 물론 공정 플랜트를 위한 RBI 기법은 물론 사용 적정성 평가 기술의 현장 적용 사례 등 산업 현장에 적용하는 기술에 관하여도 활발하게 논문이 발표되고 있어 산학연 연계가 유기적으로 이루어졌다고 평가할 수 있다. [하정수, 한전전력연구원]

기재용어해설

매니폴드 직접부착 촉매장치(Manifold Catalytic Converter)

배기 매니폴드의 각 포드가 실린더 헤드에 가까이 근접한 위치에 모여서 근접장착 촉매장치의 컬렉터를 구성하여 근접장착촉매와 체결되는 형태의 근접장착 촉매장치(close-coupled catalytic converter)를 말한다.

슬러지 제거 동력(Sludge-removal Power)

원심분리기 내의 슬러지를 제거하기 위해 필요한 동력이다. 고형물이 받는 원심력에서 고형물이 액체 속에 잠김에 따른 부력을 뺀 나머지 힘을 이기면서 원심분리기의 축방향으로 고형물을 이송시키는 데 필요한 동력이다.