

석유화학 설비의 열화도 진단 기술



장도연

(KIMM 표면기술연구부)

- '76 한양대학교 재료공학과(학사)
- '78 한양대학교 재료공학과(석사)
- '00 한양대학교 재료공학과(박사)
- '81 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

이재도

(KIMM 공인시험평가부)



- '75 서울대학교 금속공학과(학사)
- '82 한국과학기술원 재료공과(석사)
- '90 EURACA 경영경제(박사)
- '86 기계/금속기술사 SFI/EWE
- '78 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

조경식

(KIMM 공인시험평가부)



- '78 서울공대 공업교육과(학사)
- '93 창원대학교 기계공학과(석사)
- '99 부경대학교 기계공학과(박사)
- '87 비파괴검사 기술사
- '77 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

이종훈

(KIMM 재료기술연구부)



- '78 고려대학교 금속공학(학사)
- '87 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '98 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- '87 금속재료 기술사
- '83 한국과학기술연구원 정밀기계기술센터 연구원
- '83 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서론

지난 30여 년 동안 우리나라는 비약적인 경제 성장과 국력의 신장으로 각 분야의 기술력이 상당한 수준에 이르렀으며, 일부 산업기술에 있어서는 세계적인 수준으로 올라선 분야도 있다. 그러나 외형적인 성장 위주의 산업정책으로 복잡 다양화되어 가는 사회간접자본에 대한 엔지니어링 기술은 선진국에 비하여 후진성을 벗어나고 있지 못한 실정으로 아직도 해외기술에 크게 의존하는 부문이다. 특히 시험평가기술 부문은 각종 플랜트, 공공구조물이나 생산 시설물 등 사회간접자본을 대상으로 하고, 여러 전문기술분야의 공동참여가 필요한 공공복합기술이므로, 기업, 사회공공단체, 특정 국가기관 등에서 단독투자로 수행될 수 있는 연구 성격이 아니면서 국가 전체가 공동으로 필요로 하는 공공기술 및 공통애로기술이다. 그럼에도 불구하고 지금까지 국가 과제로 상정되지 못하여 체계적인 연구가 전무할 뿐만 아니라 국가의 연구개발 형태가 첨단기술개발 위주의 선진국 연구행보에 맞추어 수행됐던 결과로 대접을 받지 못하다가 근래 빈번히 발생하는 산업시설물과 공공구조물의 대형사고 후여야 그 중요성이 부각되고 있다.

우리나라의 석유화학산업은 72년 울산 석유화학단지를 필두로, 79년의 여천 제2석유화학단지 건설, 91년 하반기 대신 제3석유화학단지가 가동됨에 따라 세계 5위의 생산능력과 연간 50억\$를 수출하는 주요 기간산업으로 자리잡고 있다. 현재 전국에서 운영되고 있는 석유화학업체 및 플랜트 현황을 살펴보면 다음 표1과 같다. 이들

설비들의 상당부분은 수명상의 한 주기가 넘게 됨으로써 노후화된 상태로 설비의 폐기, 보수, 또는 대체를 결정할 시기이거나, 소재 및 설계기술이 축적되지 못한 상태에서 국내기술로 제작 설치된 상태이므로 그 동안 파손원인분석, 열화도 진단, 수명예측 관련 안전진단을 통하여 경험한 바로서는 국산소재의 신뢰성, 설계, 시공, 설치, 운전조건의 불안정 요인이 상존하고 있어 가동전/가동중(PSI/ISI) 검사 및 후속 data의 관리로 경년열화 현상과 수명예측법의 확립이 절실히 요청되는 시기이다.

표 1. 석유화학 업체 및 플랜트 현황

지 역	울산	여천	대산	기타	계
업 체 수	27	27	6	15	75
플랜트 수	121	112	52	43	328

본 고에서는 석유화학 설비의 열화도진단 기술과 관련하여 본 연구원에서 수행중인 과제를 중심으로 몇 가지 기술에 대해 소개하고자 한다.

2. 석유화학 설비의 열화도 진단 기술

2.1 열교환기의 부식과 스케일 온라인 모니터링 기술

냉각수를 사용하는 열교환기는 석유화학 플랜트의 공통적인 설비이고 숫자도 매우 많다. 대부분의 공장에서는 많은 비용을 들여서 화학적 처리 약품을 이용하여 방식 처리와 스케일 방지 처리를 하고 있는데 불구하고 각종 사고가 빈발하고 있고 이에 따라 공정의 운전에 많은 지장을 초래하고 있다. 따라서 사용중인 냉각수 처리의 유효성을 직접 온라인으로 판정할 수 있는 모니터링 기술에 의하여 부식과 스케일 속도를 허용치 이하로 유지시킬 수 있고 예기치 않은 커다란 사고로 발전하기 이전에 적절한 조치를 취할 수 있도록 하는 기술이 요구되고 있다. 부식모니터링은 부식과정 이해에 도움을 주고 부

식조절과 이것의 시퀀스에 사용하기 위해 얻어지는 정보로 설비 장치의 경년열화나 부식의 체계적인 측정을 하는 것으로 정의할 수 있다. 부식손상은 시간의존 현상으로 특정기간동안에 유체에 노출된 시편이나 장치 등이 화학적인 산화에 의해서 부식이 된다.

석유화학 설비 및 장치의 부식 온라인 모니터링과 감시 시스템은 수년동안 넓은 범위의 수명예측과 조절 기능의 장점을 가진 전기 화학적 방법을 이용하여 사용되고 있다. 부식을 온라인 모니터링 하는 전기 화학적 모니터링 장치는 즉각적인 부식율을 측정하는 직선분극저항법(Linear Polarization Resistance), 평균부식율과 일치하는 누적금속손실을 측정하는 전기저항법(Electrical Resistance), 그리고 상이한 두 전극간의 전류흐름을 측정하여 부식속도를 측정하는 Zero-Resistance Ammeter 등이 있다.^[1-4]

2.1.1 기술동향

지금까지의 부식 모니터링 방법은 주로 부식 쿠폰을 공정액 속에 넣었다가 일정 기간이 지난 다음에 꺼내어 무게 감량을 측정하여 부식 속도를 측정하거나, 와이어의 두께가 부식에 의하여 감소함에 따라 전기저항이 증가하는 것을 측정하거나, 전기화학적인 분극저항법에 의한 부식속도 측정법 등을 사용하였는데 각각의 기술마다 한계점이 많아서 실제의 현상과는 동떨어진 결과를 보이는 수가 많아서 현장에서 인정을 받지 못하고 있다. 국내의 경우 전적으로 외국의 제품에 의존하고 있으므로 국내의 기술 수준의 비교는 의미가 없다. 외국의 3 내지 4개의 해당 기업체들에서는 부식 이론에 의거한 근본적인 접근 방법으로 원천적인 모니터링 기술의 신뢰성 향상보다는 최근의 퍼스널 컴퓨터 사용에 의한 데이터 처리 방법의 개선에만 집중한 나머지 아직까지 신뢰성 있는 제품을 내놓지 못하고 있다.

최근의 기술 개발 동향은 새로운 이론의 정립보다는 장치의 간편성, 장착의 용이함, 소형화 추

세로 가는 경향이 있다. 전자기술의 발달에 따른 초소형 박판 센서를 이용하여 분극저항, 전기저항법, 갈바닉 전류 등을 측정하는 방법, 대기중 부식을 측정하기 위한 분극저항법의 새로운 적용, 틈부식을 측정하기 위한 여러 개의 전극을 이용한 갈바닉 전류, 전기화학적 노이즈의 측정, 순환 냉각수계의 부식 및 부식부산물을 측정하기 위한 원자흡수법, 원자형광분석법, 등의 분광학적 기술의 접목 등의 연구가 진행되고 있다.^[5-7]

2.1.2 기술개요

냉각수를 사용하는 열교환기의 부식과 스케일링 상태를 운전 중에 온라인으로 지속적으로 모니터링 함으로써 적절한 방식 처리가 되고 있음을 확인할 수 있고, 예기치 않은 사고 시에는 즉시 관리자에게 경고 신호를 보내어 적절한 조치를 취할 수 있도록 하는 기술과 이에 필요한 측정 기기, 센서 및 소프트웨어의 개발 중에 있다.

2.1.2.1 부식모니터링 장치의 개발

부식억제제 첨가 및 각종 수처리 인자의 열교환기 배관의 부식에 미치는 영향을 각종 모

니터링 기술을 사용하여 비교 평가 및 분석하고 기존의 모니터링 기술의 문제점을 개선할 수 있는 센서와 측정 기기 및 데이터 프로세싱을 위한 알고리즘과 소프트웨어의 개발을 위하여 simulation test system인 CMTU(Corrosion Monitoring Test Unit)를 제작하였다. CMTU의 개략도와 구성품은 그림 1과 표 2에 기록하였다.

2.1.2.2 부식과 스케일 모니터링

Fouling의 확산과 비울측정은 단위면적에 가열되는 열량에 의해 fouling이 되면 표면에 열전달을 방해하여 열전달이 감소하고 열전달계수는 증가한다는 원리를 이용하여 측정하였다. 냉각수의 오염도는 HTR, fouling factor, cleanliness 등으로 표시할 수 있다. 냉각수의 총열전달계수의 영향은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + R_i + R_w \quad (1)$$

U : 총열전달계수, h : 대류열전달계수, A : 전

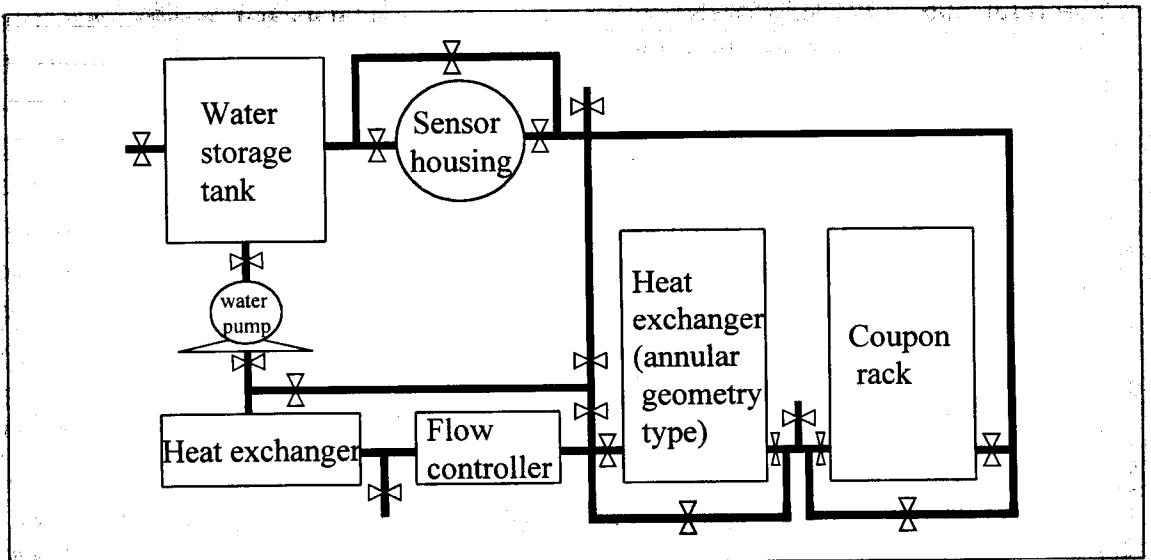


그림1. 부식과 스케일 모니터링을 위해 가속실험장치인 CMTU의 주요장치와 배관의 개략도

표 2. 부식모니터링 시험 장치의 주요 장치의 구성 및 기능

장 비 명	규 격	비 고
CorrDATS	Max. heat flux : 50,000Btu/hr · ft ² Max. fluid temp. : 180 °F Flow speed range : 1~10ft/sec corrosion rate : 1~1000 mpy imbalance : 0~1000 pitting units	Rohrback Cosasco Systems
AquaCorr	10 channel input pH : 0~14 corrosion rate : 1~1000 mpy imbalance : 0~1000 pitting units	Rohrback Cosasco Systems
Corrosometer Transmitter	Output : 4~20mA Corrosometer probe의 출력장치	Rohrback Cosasco Systems
Corrosometer probe	Sewage fitting mounting Wire lope element(10 mil)	Rohrback Cosasco Systems
Corrater	Two-electrode 형태 Electrode : low carbon steel	Rohrback Cosasco Systems
Coupon	low carbon steel	자체제작
Water storage tank	Capacity : 160L 재질 : SUS304(보온 및 단열)	자체제작
Coupon rack	재질 : PVC	자체제작
Visual Inspection 장치	Heat flux : Max. 1 kW X 3 Pipe : low carbon steel 온도 측정 : thermocouple X 4 유량 : 20gallon/min	자체제작
pH meter	Range : 0~14	삼산코리아
DO meter	Range : 0~20 ppm	삼산코리아
EC meter	전도도 측정범위 : 0~1000 μ s/cm	삼산코리아
디지털온도조절계	Range : 0~199°C	(주)한영전자
Magnetic pump	용량 : 50L/min	Pan world

열면적, R : 열전달계수,

(첨자) o : 외표면, i : 내표면, w : 전열금속

대류 열전달계수와 금속 열전달계수 계산방법은 잘 알려져 있고 비교적 잘 측정할 수 있으나 시간에 따른 오염현상이 정상상태 기준을 적용할 수 없고 다양한 부착물에 의한 열전도 변화가 오염도계수에 영향을 준다. 오염도계수 예측을 위해 Kern-Seaton, HTR 모델에 수학적인 접

근이 최근에 이루어지고 있다. 부착물 발생속도는 오염물 발생기구, 표면온도, 유속 및 수질에 의해 영향을 받으며 부착물 탈락속도는 결정구조, 경도 및 유체 흐름에 의한 전단응력의 크기에 영향을 받는다.^[8]

CMTU를 이용하여 측정된 부식 온라인 모니터링 결과(a)와 각각의 부식속도를 측정법간 상호 비교한 데이터(b)를 그림 2에 나타냈다. 온라인 부식모니터링의 기술의 정확성과 재현성 평

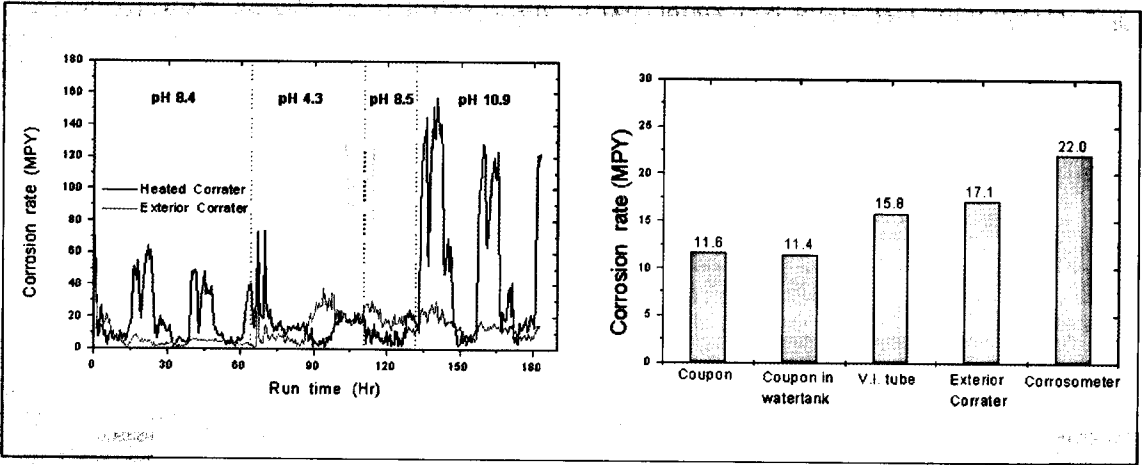


그림 2. 분극저항법에 의한 부식속도 측정, 부식 측정방법간의 상호 비교

가를 위한 오프라인 모니터링 기술과의 비교 연구를 통하여 부식억제제와 스케일 방지제 효과를 측정하고 수처리 프로그램의 적절성 평가 및 부식제어 기능을 확인 할 수 있었다.

2.1.3 기대효과

아무리 완벽한 방식 기술을 동원한다고 하여도 예기치 않은 사고로 인한 부식까지 완전히 배제할 수는 없으므로 항상 설비의 상태를 점검하여 부식이 제어 가능한 상태에 있도록 관리하는 것이 매우 중요하다. 이에 따라 부식 on-line monitoring에 의한 감시 장치 기술을 이용하여 부식을 항상 감시하고 예측을 하여 적절한 방식 대책을 적기에 수립할 수 있도록 하고 보수 시기를 놓치지 않도록 하는 것이 대단히 중요하다. 실제의 냉각수 시스템에 “냉각수 종합 자동 관리 장치”를 이용하여 열전달이 이루어지는 금속의 표면에서 이루어지는 부식과 스케일을 동시에 모니터링하고 이 데이터를 수처리 시스템에 피드백시켜 자동적으로 냉각수가 안전하게 방식 및 스케일 방지 처리되도록 하는 장치의 개발은 비전문가에 의해서도 안전하게 설비나 장치를 운전 가능하게 할 것이다.

2.2 전기화학적 재료열화 계측·평가 기술

고온에서 장시간 사용중인 설비는 연화(softening), 탄화물 유기취화(carbide-induced embrittlement), Creep, 뜨임취화(temper embrittlement) 등과 같은 재질열화(material degradation) 현상이 일어난다. 따라서, 고온에서 사용중인 노후화 된 설비의 안전성과 효율적인 운전 및 취성파괴 방지를 위하여 사용중 재료의 열화도를 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요하다.

이러한 재질열화 현상 중 연화는 고온에서 장시간 사용함으로써 고용강화원소의 감소, 탄화물의 석출 및 조대화, 전위의 회복 등에 의해 생기며, 뜨임취화는 350℃~550℃의 온도범위에서 조직의 결정입계에 불순물 원소(P, Sn, Sb 등)의 편석과 탄화물의 석출에 의하여 발생한다. 탄화물 유기취화 현상은 뜨임취화와는 다르게 500℃ 이상의 온도에서 조직변화에 의하여 나타나는 비가역적 취화현상으로 고온에 장시간 노출(Fire exposed)되는 보일러, furnace, heater류의 강관 등 내열재료에서 주로 나타난다.

한편, 재질열화는 미세 조직의 변화로부터 유래한다는 것과 재료의 전기 화학적 거동은 미세

조직 변화에 아주 민감하다는 점을 이용한 비파괴적인 평가법이 제안되고 있으며, 이 방법은 전기 화학적 계측량의 물리적 내용을 명확히 하면서, 동일한 방법으로 다양한 손상형태에 대응할 수 있는 새로운 기술로 재료의 열화도 평가 부분에서 관심을 끌고 있다.

2.2.1 기술동향

이중에서 전기 화학적 분석특성을 이용한 EMAC(Electrochemical Materials Characterization) 방법이 최근 일본의 동북대에서 turbine rotor나 boiler tube 등 주로 발전설비 부품을 대상으로 쓰임취화, 연화현상에 대하여 data의 계통적인 축적과 활용을 목적으로 database를 구축하고 있고, 이들 database를 중심으로 고온손상 비파괴평가 시스템 MADLES(Materials Degradation and Life Evaluation System)을 구축하여 현장 적용을 위한 연구를 계속하고 있다.

현재까지 진행되고 있는 대상 설비 및 적용범위는 표 3과 같으며, 대상설비 및 강종의 구분과 적용범위의 확대 가능성 등이 관심을 끌고 있으며, 현장적용을 위한 측정장치 및 software의 유

용성과 기존의 계측방법들과 겸용하여 신뢰도를 높이기 위한 보완 연구들이 활발히 진행될 필요가 있다.

예로서 Cr-Mo 저합금강은 고온 기계적 성질이 우수하기 때문에 고온재료로 흔히 쓰는 재료로 탄화물의 석출과 조대화가 creep, 고온 인장강도, 인성 등 기계적 성질 열화의 주 요인이 되는 것이 알려져 있으며, creep 수명의 말기 단계 까지도 void 형성이 잘 되지 않아 기존의 방법인 A-parameter, 전기저항법, UT, Replica 등과 같은 creep 손상을 void 형성 과정을 근거로 평가하는 방법의 적용은 어렵기 때문에 EMAC 적용으로 상호 보완이 가능해 진다.

쓰임취화의 평가에는 지금까지 입계의 부식특성 혹은 전기 화학적 특성 등 편석에 기인된 입계성상의 변화에 착안하여 Picrin산계 용액을 이용한 전기 화학적 방법, etching법, 와전류법 등이 취화 검출법 혹은 평가법으로서 제안되고 있으나 감도 및 정량성에 있어서 충분치는 않은 상태이다.

Boiler, header, furnace, heater 등의 재료로 가장 널리 사용되는 Cr-Mo 저합금강(1.25Cr-

표 3. 전기화학적 열화도 평가 대상설비 및 개발 동향

Components	Materials	Softening Carbide Coarsen	Carbides embrittlement (Precipitates)	Creep	Temper Embrittlement
Turbine Rotor	Cr-Mo-V (Forging)	◎	△	◎	●
Turbine Casing	Cr-Mo-V (Casting)	◎	△	◎	●
Turbine Blade	12 Cr	●	△	◇	●
Boiler Tube(S/H)	304, 316, 321	△	●	◎	△
Boiler Tube(S/H)	2.25Cr-1Mo(F+P)	●	●	◎	△
Boiler Tube(R/H)	2.25Cr-1Mo(F+P)	●	●	◎	△
Boiler Header	2.25Cr-1Mo(F+P)	●	○	○	△
Vessel, Reactor	2.25Cr-1Mo(Bainit)	○	○	○	◎
Boiler/Heater Tube	1,25Cr-0.5Mo(F+P)	◇	◇	◇	◇
Heater Tube	9Cr-1Mo (F+P)	◇	◇	◇	◇
High Temp. Piping	Ni-Fe-Cr (Alloy800)	○	○	○	○
Reformer Tube	HK,HP,HP-Mod.	△	○	○	△

● Developed ◎ Under Development ○ Not Examined ◇ Not Analyzed △ 2nd Priority

0.5Mo/2.25Cr-1Mo강) Cr-Mo 고합금강(9Cr-1Mo 강), Austenite강, Stainless 310, Incoloy 800 등이 손상평가의 필요성이 높은 부위의 강종이지만 손상기구 혹은 열화기구에 따라 적용방법을 선정하여야 한다.

2.2.2 기술개요

Boiler tube, Furnace, heater 용 강관과 같이 화염에 직접 노출되는 고온 고압부에 가장 대표적으로 사용되는 재료인 2.25Cr-1Mo annealed강은 사용 중 pearlite의 분해와 탄화물의 응집 조대화에 의하여 미세조직이 변화함에 따라 열화되는 것으로 알려져 있으며, 사용기간(열 이력)에 따른 분극시험 결과 그림 3과 같이 재료의 열화도가 클수록 ΔI_p (전류밀도차)가 증가함을 알 수 있다. 이것은 2.25Cr-1Mo annealed 강이 열화되면서 형성된, 탄화물(M_6C 형 탄화물)의 선택적 용출에 의한 ΔI_p 의 변화로 볼 수 있다. 즉, 재질열화는 미세 조직의 변화에 의한 것이며, 전기화학적 분극특성을 이용하여 재료의 열화정도를 정량적으로 측정 가능함을 알 수 있다.

또한, 그림 4와 같이 재료의 열화도가 증가할수록 $\Delta FATT$ 가 증가하며, ΔI_p (전류밀도차)도 역시 함께 증가함을 알 수 있다. 그리고, 그림 5에서 보는 바와 같이 ΔI_p 를 측정함으로써 aging parameter인 LMP값을 추정할 수 있으므로 장시

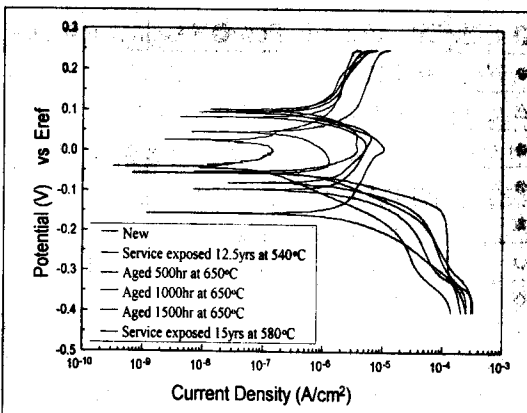


그림 3. 2.25Cr-1Mo annealed 강의 분극시험 결과

간이 소요되는 Creep 시험을 대체할 수 있는 비 파괴적인 방법으로 수명예측 역시 가능하다.

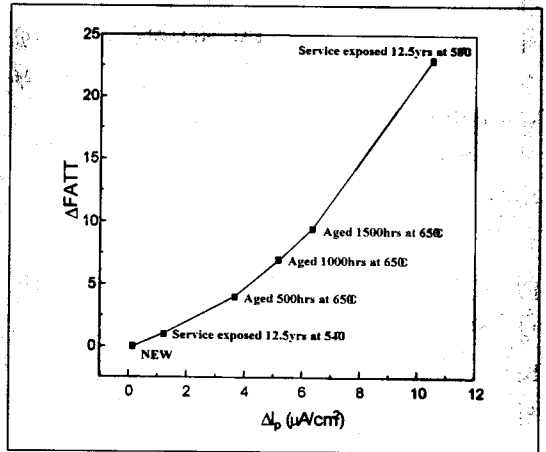


그림 4. 2.25Cr-1Mo annealed 강의 $\Delta FATT$ 와 ΔI_p 와의 상관관계

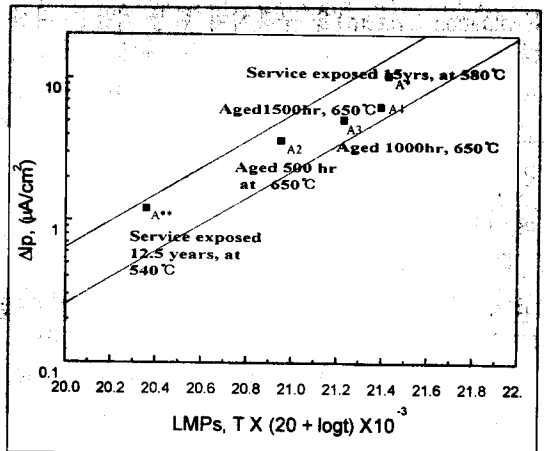


그림 5. 2.25Cr-1Mo annealed 강의 ΔI_p 와 Larson-Miller parameter의 상관관계

2.2.3 기대효과

석유화학 플랜트에 가장 흔히 사용되면서 손상사례가 많은 boiler tube, furnace, heater, 반응용기 등에 가장 널리 사용되는 Cr-Mo 저합금강(1.25Cr-0.5Mo/2.25Cr-1Mo강) Cr-Mo 고합금강(9Cr-1Mo강), Austenite강, Stainless 310, Incoloy 800 등 손상평가의 필요성이 높은 부위의 강종 등에 대하여 고온 aging에 따른 미세조직과 기

계적성질의 변화를 비파괴적 방법인 전기화학적 분극법에 의하여 열화도를 정량화하므로써 기존의 재질적 열화도를 평가하는 파괴/비파괴법의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

또한, 현장적용을 위한 분극전위 측정장치 및 probe cell을 제작하고, 측정조건을 표준화하여 실제 장치에 적용 실증시험을 거쳐 개발이 완료 되면 석유화학 설비의 boiler tube, furnace, 압력 용기, heater 등에 직접 적용될 수 있어 기술 수요자들인 석유화학 장치 운용자들의 공통 애로 기술 분야 해소 및 기술이전 전파에 기여할 수 있을 것이다.

2.3 보온재 부착 파이프라인의 부식두께 측정기술

사용중인 파이프라인의 건전성 평가는 발전설비, 석유화학설비 등 여러 산업의 설비 유지관리에 있어서 매우 중요한 문제의 하나이다. 가스 또는 유류 이송용 파이프라인은 내부에서 유체를 따라 이동하는 피그(pig)를 이용하여 검사해 왔으나, 대부분의 파이프라인에서는 이 방법을 적용할 수 없다. 따라서 파이프라인의 대부분은 파이프 벽면의 내, 외부의 상태를 모두 모니터링할 수 있는 방법으로 외부에서 접근하여 검사되어야 한다. 최근 산업설비에서 주로 사용되는 방법은 방사선 및 초음파를 이용하는 방법으로, 이 방법들은 샘플링 검사시에는 적절하다. 그러나 최근에는 산업설비의 안전에 대한 신뢰성의 확보 차원에서 저비용으로 파이프 시스템의 전체에 대한 정보를 제공할 수 있는 효과적인 방법을 필요로 한다.

또한 파이프라인의 외면은 보온재로 싸여 있는 경우가 대부분이기 때문에 검사를 위해서는 우선 보온재를 제거해야 하며, 검사 후에는 다시 보온재를 설치하여야 한다. 이러한 작업을 수행하는 데는 막대한 비용과 시간이 소요된다. 따라서 석유화학공장에서는 파이프라인의 사고위험

성이 상존하는 줄 알면서도 점검을 쉽게 시도하지 못하고 있으며 장기간 사용했거나 상태가 나쁘다고 판단되는 부분은 검사없이 전면 교체하는 사례가 많다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 보온재를 제거하지 않고 파이프라인을 정도 높게 검사할 수 있는 기술도 필요로 한다.

2.3.1 기술동향

보온재로 싸여 있고 측정부위의 온도가 매우 높은 등의 제약조건이 있는 경우, 방사선투과검사법을 이용하여 필름에 맺힌 상의 농도를 측정하여 두께를 계산하는 방법과 두께측정용 대비 시험편을 이용하여 잔존두께를 측정하는 방법이 사용되고 있으며, 방사성동위원소를 이용하여 국부적인 부식을 측정하는 장비가 개발되어 시판되고 있다.^[19-20]

한국기계연구원에서는 방사선의 두께측정과 동일한 원리를 이용하여 분말야금 제품의 밀도를 측정하는 기술을 개발하여 밀도측정에 활용하고 있다. 최근에는 미국의 SwRI(Southwest Research Institute)에서 보온재를 제거하지 않은 상태에서 Ultrasonic Guided Wave를 이용하여 배관의 국부부식 및 원주방향 균열 등을 검사하는 기술이 개발되어 실용화 연구가 진행 중이며, 펄스 와전류를 이용하여 보온재를 제거하지 않고도 두께를 측정할 수 있는 장비도 개발되어 시판되고 있다.^[21-22]

한편, EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 방사성 동위원소와 검출기를 사용하여 수평으로 설치된 파이프라인의 특정 면에 대해 연속적으로 두께를 측정하는 방법을 개발하여, 1995년 WEPCO(Wisconsin Electric and Power Company) Pleasant Prairie plant에서 첫 시험 적용된 이래 계속 연구되어 왔으며, 현재에도 실용화 연구 중에 있다.^[23-26]

이 시스템의 핵심 기술이라 할 수 있는 감마선 검출 기술은 방사선의 조사로 결정이 이온화되면서 섬광이 발생한다는 원리가 발견되면서부

터 상당한 발전을 가져왔다. 특히 감마선 에너지에 따라 선평량이 비례하고 선평량의 붕괴시간이 상당히 짧다는 특성이 알려지면서 감마선의 넓은 에너지 영역 대까지 측정 가능하게 되었다. 뿐만 아니라 선평량을 표시하기 위한 전기적 신호 처리 기술 즉 광전자 증배관 및 증폭 회로들의 발달로 인해 적은 량의 방사선도 측정 가능하게 되었다.

현대에 와서는 적은 량의 방사선 측정 기술을 이용하여 용접부위에 대한 정확한 접합성 여부, 교각의 균열 여부 등 비파괴검사분야에 감마선이 많이 이용되고 있다. 이는 다른 방사선에 비해 감마선이 투과성이 높으며, 그 투과율이 매질의 물질 량과 직접적인 상관 관계를 갖기 때문이다.

하지만 기존의 측정시스템 즉 선평체, 광전자 증배관, 전치증폭기 및 주증폭기로 이어지는 시스템은 공간을 많이 차지하기 때문에 여러 가지로 제약을 받아왔다. 하지만 수 십 cm의 광전자 증배관과 비슷한 특성을 갖는 수 십 mm의 광다이오드로 대신하면 공간에 의한 영향을 최소화할 수 있다는 이점이 있다. 또한 광전자 증배관에서는 광전자 증배관의 cathode 물질의 일함수보다 작은 에너지를 갖는 빛에 대해서는 광전자가 발생하지 않지만, 광다이오드의 경우에는 광전류를 발생하게 하는 파장 영역이 넓으므로 그 효과를 상당히 줄일 수 있어 효율 면에서도 많은 개선을 할 수 있을 뿐 아니라, 외부 자기장에 의한 영향도 적게 받는다. 감마선을 비파괴 평가에 이용하기 위해서 그 검출 시스템이 소형화되어, 현장에서 적용하기 쉬워야하고, 또한 좋은 검출 효율을 가져야 한다는 점에서 이 기술은 최근에 이용범위가 늘어나고 있다.^[27-28]

2.3.2 기술개요

선원으로부터 방출된 감마선의 물질과의 상호 작용을 통하여 감마선의 세기는 처음보다 감소할 수 있다. 즉 산란 단면적이 큰 물질일수록 방

사선의 세기는 더 많이 감소할 수 있는데, 단위 길이 당 반응할 확률을 선형감쇠계수라 하고 방사선의 세기를 이용하여 표시하면 다음 식(2)와 같다.

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (2)$$

여기서, I_0 는 처음 방사선의 세기, μ 는 선형감쇠계수, x 는 물질의 두께를 말한다.

여기에 파이프라인의 두께를 측정할 수 있는 원리가 있다. 즉 파이프라인 재질의 물질에 대한 각 두께별 투과계수를 자료로 가지면, 측정하고자 하는 파이프라인의 투과세기를 측정함으로써 역으로 그 두께를 산출할 수 있게 된다. 뿐만 아니라 파이프라인의 여러 부분을 서로 비교함으로써 파이프라인의 두께변화에 대한 정보도 얻을 수 있다.

감마선 검출 기술의 최근 동향은 Online Real-time Radiography의 실용화에 있다. 이 시스템은 컴퓨터로 제어되는 Robotic Crawler에 부착된 Ir-192 감마선 선원과 고상의 선형 어레이 검출기를 파이프라인의 두께 측정에 사용한다. 그림 6과 같이 Ir-192 감마선 선원이 파이프의 한쪽 면에 위치하고, 어레이 검출기가 반대쪽에 위치한다. 어레이 검출기의 각각의 센서들은 파이프의 내부 유체, 파이프 벽면, 보온재를 통과한 후의

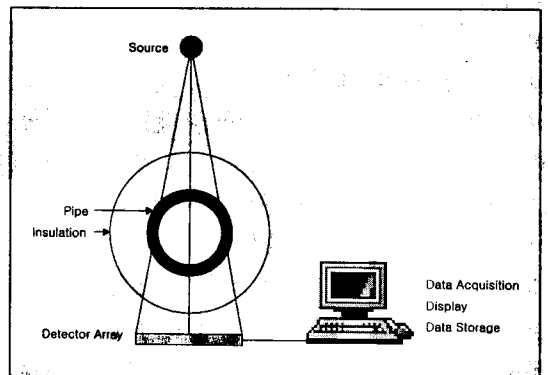


그림 6. 측정 시스템의 구성 개략도

감마선의 강도를 측정한다. 어레이 검출기의 출력신호는 케이블을 통해 컴퓨터로 연결되며, 컴퓨터 시스템은 Crawler가 파이프라인을 따라 이동하는 동시에 어레이 검출기로부터 데이터를 수집 및 분석한다.

어레이 검출기 모듈에는 모든 검출기 채널의 출력을 한 쌍의 도체로 보내기 위하여 검출기 신호를 증폭, 조합 및 분배하는 전기장치를 포함하고 있다. 어레이 검출기로부터의 분배되어진 신호는 컴퓨터로 보내어지며, 이는 12 또는 16 bit ADC(analog-to-digital converter) 보드를 포함하고 있다. 어레이 검출기는 수백 feet의 케이블을 통해 컴퓨터와 연결된다. 이 케이블은 검출기 신호를 컴퓨터에 있는 ADC 보드로 이송하며, 전력 및 제어 신호를 어레이 검출기에 제공한다.

어레이 검출기의 길이(어레이 검출기에서의 검출기의 수)는 검사할 파이프라인의 단면(직경)에 따라 결정된다. 64채널 어레이 검출기는 약 200 mm(8 in), 128채널 어레이 검출기는 400 mm(16 in) 직경의 파이프라인을 한 번에 검사할 수 있다. 어레이 검출기는 파이프라인에서 약 0.5 mm(0.020 in)의 폭을 갖는 원주형의 일 부분에 대한 데이터를 한 번에 수집한다. 파이프라인을 따라 축방향으로 이동하는 동안 어레이 검출기는 인접한 원주형 부분의 두께를 계속해서 측정한다. 두께에 대해 수집된 2차원 데이터는 파이프라인 두께의 영상 이미지를 형성한다.

2.3.3 연구수행 내용

본 연구원에서는 1998년에 감마선 검출기를 이용한 파이프라인의 부식두께 측정 시스템의 개발에 착수하여 어레이 검출기 제작을 위한 섬광체 및 광다이오드의 특성과 광다이오드 검출기의 신호 및 검출특성을 조사하였다. 그림 7은 시험용으로 제작된 검출기의 신호 모양을 보여주고 있다. 그리고 보온재 및 파이프라인용 강재의 흡수계수 database를 구축하였다.

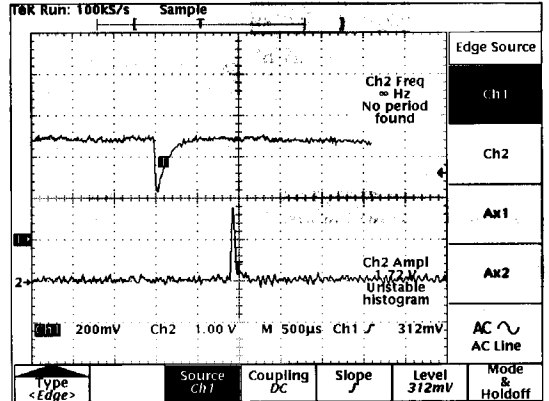


그림 7. 검출기의 신호 모양

현재 어레이 검출기 개발과 두께측정 및 분석 시스템, 그리고 자동 이송 시스템 개발을 수행하고 있으며, 앞으로 이 시스템을 완성시키고 플랜트에서의 현장 적용시험 등을 통해 나타나는 문제점을 계속 보완함으로써 완전한 상품화의 개발을 목표로 연구할 계획이다.

2.3.4 기대효과

석유화학플랜트 및 발전소(화력 및 원자력) 내에는 수 10km의 배관이 설치되어 있고 그 대부분은 보온재로 싸여 있으며 지상의 운송용 파이프라인도 대부분 보온재 또는 방식용으로 두꺼운 코팅이 되어 있다. 따라서 본 기술이 개발되면 앞에서 언급한 모든 시설에 대해 적용이 가능하므로 장치산업 및 기간산업설비의 유지·관리를 위한 공통에로기술을 해결하여 사고의 사전방지 및 안전성을 확보하게 됨은 물론이고, 검사시간, 인력 및 검사비용의 획기적인 절감, 파이프라인의 조기교체 방지에 따르는 자재비의 절감 등 경제성 향상과 그에 따른 부수적인 효과 등의 성과를 얻을 것으로 기대된다.

2.4 미세조직 정량화에 따른 잔존 수명 평가 기술

미세조직 정량화에 따른 잔존수명 평가 분야

는 소재 특성에 미치는 여러 요인(factors)중에서 특히 시간(장시간 사용 및 파손 현상)이 가장 중요한 요인이므로 연구소나 대학에서 실험실 규모로 취급될 수 있는 연구 분야가 아니다. 본 기술이 실용화되기 위해서는 관련 기업(석유화학 Plant 업체, 발전시설 업체, 기타 에너지, 식품등 대단위 장치 산업 관련 업체)의 적극적인 참여와 협조 하에서 유기적인 협력체계를 유지하면서 연구 개발되어야 하고 특히 풍부한 현장경험을 바탕으로 한 강력한 기술 요구에 부합되어 연구 개발되어야 한다.

본 기술의 특성은 공통 애로 기술의 성격으로 어느 특정 업체가 Know-How를 보유하는 것보다 전체적인 기간 산업 특성을 갖는 장치산업 업체가 공유하는 것이 보다 효율적인 특성이 있다. 또한 본 연구의 주체는 국가 산업 발전의 성격이 강하므로 기업이나 대학보다는 공공성이 강한 국가 출연 연구소가 중심이 되어 국가 경제 살림에 크게 기여하고 있는 석유화학 Plant 산업 관련 업체를 지원할 필요가 있다.

2.4.1 기술동향

해외에서 수행되고 있는 개발분야는 후에 기술되는 일본에서의 연구사례에서 알 수 있듯이 석유화학 설비나 발전설비의 고온 고압 부품에서 미세 조직의 정량화에 따른 잔존수명예측기법에 대하여 대기업, 국가 연구소 그리고 대학 등에서 협동 연구에 의하여 새롭게 활발히 연구가 수행되고 있다. 즉 이와 같은 평가기법이 새롭게 연구가 시작되는 이유는 미세 조직 관찰법이 현장에서 Replica에 의하여 쉽게 적용하기가 간단하고 전반적인 소재의 손상정도를 심각한 오차 없이 검증이 가능하기 때문이다. 현재 수행되고 있는 내용은 장치별로 또한 분석을 통하여 체계적인 Data Base가 구축되고 있는 상황이다.

실제 사용조건에서 크리프 손상을 입는 부품의 수명을 예측하기 위한 시도는 지금까지 많이 이루어져 왔다. Replica를 이용한 부품의 미세조

직 검사 및 균열 검사법, Larson-Miller plot을 이용한 수명예측, θ -projection법, Ω 법 등 실험적인 방법이나 수학적 해석을 통해 소재의 크리프 수명을 예측하기 위한 시도들이 이에 속한다.

현재 세계 각국에서 관심을 가지고 미세조직 관찰법에 의한 잔존수명 평가법을 연구하고 있으며 미세조직의 변화와 잔존수명과의 관계를 규명하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

2.4.2 기술개요

2.4.2.1 미세조직 평가법

미세조직 평가법중 탄화물 사이의 간격이나 Cavitation 발생 정도를 측정하여 잔존수명을 예측하는 수식으로 Lonsdale and Flewitt method는 2.25Cr-1Mo steel의 경우 838~923K에서 50~76MPa Creep 손상을 받는 경우 N(단위면적당 (mm²) Cavity의 수)와 ϵ (최소 Creep 속도 (secondary creep)) 및 t(최소 Creep 시간 (secondary creep)) 사이에 식(3)과 같은 관계가 있음을 보였다.

$$N = (3.3 \times 10^5 \epsilon t)^{1/\lambda} = (3.3 \times 10^3) \quad (3)$$

위와 같은 식(3)을 통해 실제 측정을 통하여 N값이 결정되면 Creep 속도를 얻을 수 있다. 한편 또 한가지 방법으로 Cane et al method가 있는데 다음과 같은 식(4)를 통해 n과 λ' 가 결정되면 A와 t/tr과의 관계그래프를 결정할 수 있다. 식(4)를 이용하여 탄소강에 있어서 Cavitation 손상과 잔존수명비의 관계를 그림 8과 같이 나타내었다. Creep 시험 및 미세조직 관찰을 통해 잔존수명을 예측할 수 있는 것이다. 이때 A는 the number fraction of cavitated boundaries, t/tr은 Creep life fraction, n은 Stress exponent, λ' 는 ϵ_r/ϵ_s (ϵ_r : Strain at rupture ϵ_s : Secondary creep strain)이다.

$$A = 1 - (1 - \frac{t}{t_r})^{\frac{(\lambda' - 1)}{n\lambda'}} \quad (4)$$

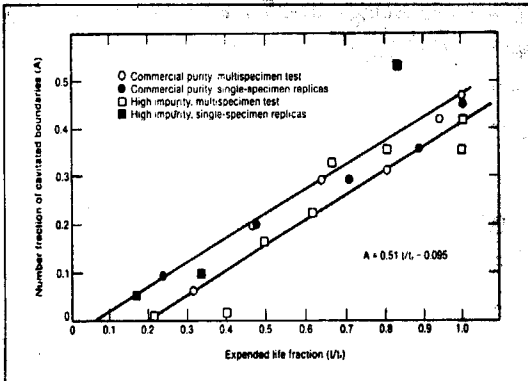


그림 8. 탄소강에 있어서 Cavitation 손상과 잔존수 명비의 관계

2.4.2.2 Q Method에 의한 잔존수명 평가법

Q법에서는 소재가 크리프 환경에 노출되었을 때, 크리프 변형량(creep strain)이 증가함에 따라 응력에 저항하는 소재의 능력이 감소한다는 사실에 착안하여 소재의 저항 능력이 퇴화되는 속도를 나타내는 매개변수 Q를 도입하였다. 일반적으로 잘 알려진 크리프 곡선으로부터 진변형률(true strain)과 변형률 속도(creep strain rate)의 관계를 $\epsilon - \log \dot{\epsilon}$ 그래프로 나타내면 그림 9와 같이 나타난다. 그림 9에서 strain에 따른 strain rate의 변화 양상은 크게 2개의 영역으로 구분할 수 있다. 변형률(strain)이 증가함에 따라 strain rate가 감소하는 영역 I은 primary creep region으로서 응력이 크고 온도가 높을수록 넓은 영역을 차지한다. 반면에 strain에 따라 strain rate가 증가하는 영역 II는 secondary 또는 tertiary creep region에 해당하는 영역으로서, 크리프 손상이 진행됨에 따라 응력에 저항하는 소재의 능력이 퇴화되는 영역이며 크리프 손상의 대부분을 차지한다. 실제 사용조건에 가까운 조건, 즉 응력이 작은 영역에서는 II 영역이 크리프 손상의 대부분을 차지하며 경우에 따라 primary creep region인 I 영역이 나타나지 않는다. Q법에서 영역 II는 식(5)와 같이 표현된다.

$$\ln \dot{\epsilon}_0 = \ln \dot{\epsilon}_s + Q\epsilon \quad (5)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_0$ 는 imaginary initial strain rate로서 primary creep region이 작을 경우 minimum creep rate과 거의 같은 값을 갖는다. 식(5)를 이용하여 크리프 파단 시간 관계식을 구하면 식(6)과 같은 형태로 나타낼 수 있다. 이때 크리프 파단과 같이 ($Q\epsilon$) 값이 충분히 커서 $e^{-Q\epsilon}$ 값이 무시될 수 있는 경우 크리프 파단 시간은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\dot{\epsilon}_0 Q} (1 - e^{-Q\epsilon}) = t \quad (6)$$

$$t_r \approx \frac{1}{\dot{\epsilon}_0 Q} \quad (7)$$

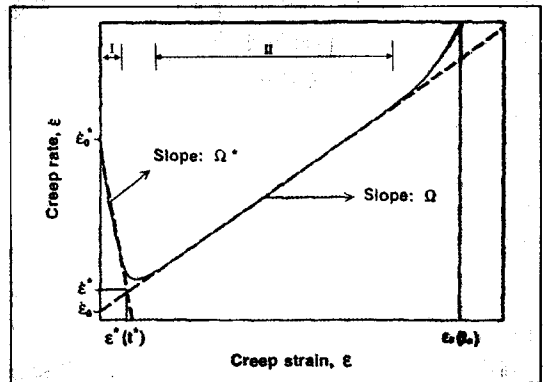


그림 9. $\epsilon - \log \dot{\epsilon}$ 관계 그래프

일정기간 실제 사용조건에서 사용된 부품의 경우 일반적으로 primary creep 영역을 보이지 않으며 특히 실제 사용조건과 같이 응력이 낮은 경우 primary creep 영역의 효과가 매우 작기 때문에 Q법을 이용함으로써 일정기간 사용된 부품의 잔존 수명을 효율적으로 예측할 수 있다. Q법에서는 다음과 같은 방법으로 부품의 잔존수명을 예측하게 된다. 사용된 시간, 변형률, 부품 사용조건에서의 이상적인 초기 변형속도를 각각 t_s , ϵ_s , $\dot{\epsilon}_{0s}$ 라고 하면, 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_s = \frac{1}{\dot{\epsilon}_{0s} Q} (1 - e^{-Q\epsilon_s}) \quad (8)$$

식(8)로부터 부품이 사용되는 조건에서 파단 시간은 식(9)와 같이 나타낼 수 있으며 따라서 부품이 소비한 소재의 수명분을 t_s/t_r 은 식(10)과 같다.

$$t_r \approx \frac{1}{\dot{\epsilon}_{os} Q} \quad (9)$$

$$\frac{t_s}{t_r} \approx (1 - e^{-\theta \epsilon_s}) \quad (10)$$

식(5)로부터 $e^{-\theta \epsilon_s} = \frac{\dot{\epsilon}_{os}}{\dot{\epsilon}_s}$ 이므로 $\dot{\epsilon}_{os} = \frac{\dot{\epsilon}_s}{t_s Q \dot{\epsilon}_s + 1}$

이고 식(9)로부터 부품이 소비한 소재의 수명분율, t_s/t_r 은 식(11)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{t_s}{t_r} = \frac{\dot{\epsilon}_s t_s Q}{\dot{\epsilon}_s t_s Q + 1} \quad (11)$$

이상의 식들을 이용하여 소재의 크리프 잔존 수명을 예측하게 된다. Q 값, 부품 소재의 현재의 변형률 속도(current creep strain rate) 및 부품의 사용시간 등 이때 필요한 소재의 매개변수들은 사용된 부품에서 시편을 채취한 후 부품의 실제 사용조건에서 크리프 시험을 수행함으로써 얻게 된다. 실제적으로 Q 법을 적용하는 측면에서 볼 때, 사용된 부품으로부터 단 하나의 시편만을 채취하여 크리프 시험을 수행함으로써 Q 및 strain rate 등을 얻을 수 있다는 장점 또한 가지고 있다.

2.4.3 연구수행 내용

지금까지 본 연구원에서 수행한 내용은 Reformer Tube의 사용 조건에 따른 미세조직 정량화, 기계적 특성 변화 및 Stress-rupture에 의한 잔존 수명 평가와 더불어 잔존 수명과 미세조직 변화 관계 규명하고자 하였다. 현재 계속하여 Boiler Tube나 열교환기 Tube 중에서 가장

보편적인 저탄소 저합금강을 중심으로 상기 세 부 기술에 준하여 연구를 수행하고 있고, 차후로는 스테인리스강이나 Inconel 합금 등 고온용 소재에 대하여서도 연구개발을 수행할 예정이다.

2.4.4 기대효과

국가 기간 산업 성격의 석유화학 산업의 국제 경쟁력을 높이기 위해서는 주요 고온 고압 설비의 안전성 평가와 이에 따른 현장 기술 중심의 수명 평가 기술이 무엇보다도 시급한 상태이다. 지금까지의 현장 경험과 현장 사용 Data를 중점적으로 수집하여 이에 관한 Data Base와 잔존 수명 예측 기술을 정립하여 국내 장치산업체에 기술 이전 계획 수립이 시급한 실정이다. 따라서 Replica법에 의한 미세 조직의 정량화에 따른 잔존수명예측기법은 현장 중심으로 개발이 될 경우 손쉽게 현장에 적용하여 팔목할 만한 성과를 얻을 것으로 기대된다.

3. 결 론

지금까지 석유화학 설비의 열화도 진단과 관련하여 본 연구원에서 수행중인 과제를 중심으로 열교환기의 부식과 스케일 온라인 모니터링 기술, 전기화학적 재료열화 계측·평가 기술, 보온재 부착 파이프라인의 부식두께 측정기술, 미세조직 정량화에 따른 잔존 수명 평가기술 등을 소개하였다.

석유화학 플랜트의 장기적인 안전 운용을 위해서는 경년열화를 적절히 감지, 예측하여 이들을 정량 평가함으로써 위험요소를 제거하고 잔존수명을 예측하는 것이 필요하며, 이를 실현하기 위해서 열화도 진단기술을 계속 연구하고 기술 정보화 시대에 대응하여 계측기술, 데이터베이스 및 소프트웨어 분야의 기술 개발을 병행하여 기기의 열화도 진단을 위한 종합적인 시스템을 개발해 나가야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, Prentice Hall, 1996.
- [2] On-Line Monitoring of Corrosion in Plant Equipment, ASTM G98-90.
- [3] F. Mansfeld, Advances in Corrosion Science and Technology, Plenum Press, 1976.
- [4] A. N. Rothwell, Corrosion Control Strategies Using Integrated Corrosion Monitoring Systems, Proceedings of International Symposium on Plant Aging, 1995.
- [5] G. Rocchini, Use of Computerized Techniques in Corrosion, Corrosion Reviews, Vol. XV, 1997.
- [6] A. F. Denzine, An Improved Rapid Corrosion Rate Measurement Technique for All Process Environments, Corrosion/97, Paper No. 287.
- [7] Corrosion and corrosivity sensors, Corrosion/94 symposium, NACE
- [8] J. G. Knudsen, Fouling : The major unsolved problem in heat transfer, Chemical Engineering Progress, Vol. 68, No. 2.
- [9] 火力・原子力および化学プラント機器・構造部材の経年劣化と寿命予測: Realize Inc.
- [10] Materials selection for Refineries and associated facilities : NACE 1991.
- [11] Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures : NACE 1995.
- [12] VGB-Konferenz Restlebensdauer 1992 Bd. 1,2 : VGB 1992.
- [13] Plantの損傷事例と経年劣化・寿命予測法 : 総合技術center 1984.
- [14] Report for academic years 1989-1996 : Tohoku University
- [15] Y. Watanabe, T. Shoji, FFS and Decision for Petrochemical Equipment : ASME 1995, p.397-405.
- [16] Nondestructive Evaluation ; NDE Planning and Application: ASME 1989
- [17] Y. Watanabe, T. Shoji Metallurgical Transaction A Vol.22 Sep. 1991, p.2097-2102.
- [18] 日本機械學會 論文集 57(1990), 63(1995).
- [19] J. Rheinlander 외 1인, Using film density variations for determination of pipe thickness variation in γ -ray radiography, INSIGHT Vol.37 No.9 September 1995, p.691-694.
- [20] LIXI Inc. Homepage (<http://www.lixi.com/>)
- [21] 조경식 외 3인, 감마선을 이용한 소결 전 Fe/Ni 분말야금 판재의 밀도측정에 관한 연구, J. of KSNT Vol.12 No.3 1992, p.7-11.
- [22] H. Kwun 외 1인, Magnetostrictive sensor technology and its applications, Ultrasonics 36 1998, p.171-178.
- [23] Nand K. Gupta 외 1인, Real Time In-Service Inspection of Bare Insulated Above-Ground Pipelines, Materials Evaluation November 1997, p.1219-1225.
- [24] Omega International Technology, Inc. Homepage (<http://user.mc.net/omegait/>)
- [25] Andreas Hecht 외 3인, On-Line Radiographic Wallthickness-Measurement of Insulated Piping in the Chemical and Petrochemical Industry, 7th European Conference on Non-destructive, MAY 1998.
- [26] J. M. Galbraith 외 3인, Real-time radioscopic inspection of insulated piping

systems, INSIGHT Vol.37 No.6 June 1995, p.417-420.

[27] D. E. Groom, Nucl. Inst. and Meth. in Physics Research 219 1984, p.141-148.

[28] S. E. Derenzo, Nucl. Inst. and Meth. in Physics Research 219 1984, p.117-122.

[29] B. Neubauer and U. Wedel, Restlife Estimation of Creeping Components by Means of Replicas, Advances in Life Prediction Methods, D. A. Woodford and J. R. Whitehead, Eds., ASME, NY, 1983, p.307-314.

[30] G. E. Dieter, Applications to Materials Testing, Mechanical Metallurgy 3rd Ed, McGraw-Hill, NY, 1986, p.432-470.

[31] F. R. N. Nabarro and H. L. de Villers, The Phenomenology of Creep, The Physics of Creep-Creep and Creep-Resistant Alloys, Taylor and Francis,

London, 1995, p.15-45.

[32] R. W. Evans, J. D. Parker and B. Wilshire, An Extrapolative Procedure for Long Term Creep Strain and Creep-Life Prediction, Recent Advances in Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, Pineridge Press, Swansea, 1982, p.135-184.

[33] M. Prager, Development of the MPC Omega Method for Life Assessment in the Creep Range, Collected Studies in the Development and Application of the MPC Omega Method for Elevated Temperature Life Assessment, MPC, NY, May 1994, p.1-21.

[34] R. Viswanathan, Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components, ASM International, 1989, p.183-260.