

R e p o r t		



목 차

계장화압입시험법을 이용한 잔류응력 측정법의 개요

기술적 측면

산업 · 경제적 측면

계장화압입시험법을 이용한 잔류응력 측정법의 학문적 배경

잔류 응력에 의한 압입 하중 압입 깊이 곡선의 변화

철강 용접부의 잔류 응력 측정

압입 하중 압입 깊이 곡선의 측정

용접부의 무응력 상태 곡선의 유도

잔류 응력 상태에서의 용접부의 경도 및 접촉면적 결정

비등방성 축 잔류응력 측정

신기술 개발 장비 현황

개요

구조 및 작동원리

하드웨어의 상세 구조 설명

소프트웨어의 상세 구조 설명

계장화압입시험법과 기존시험법과의 비교

계장화 압입시험에 의한 잔류응력 측정법 잔류응력측정시험기

국내 외 관련 기존시험법 측정기술 과의 현황

동종업체와의 기술비교

기술 개발 시 예상되는 파급효과와 활용방안

기술적 측면

산업·경제적 측면

활용방안

구조 및 성능 요약서

비파괴적인 계장화압입시험법을 이용한 잔류응력 측정법의 개요

기술적 측면

화력 발전소의 주요설비 중 보일러는 수많은 배관들로 용접시공 되어 설치되어 있는데 이들 배관들은 고온의 화염 증기들과 접촉되어 운전되고 있다 보일러 배관의 주요 손상원인은 고온에 의한 재료의 열화에 따른 손상과 취약부인 용접손상이 주류를 이루고 있어 발전소 유지보수업무 중에서 주요관심분야이다 특히 용접 시의 열적 처리과정을 통해 발생하는 용접 잔류응력은 설비 구조물의 파괴를 유발할 수 있는 중요한 영향인자이므로 설비 건설 시 및 운용 중 정량적인 평가를 통한 관리가 필수적이다 또한 용착금속 열영향부 모재 각 영역의 미세조직 차이 및 이로 인한 강도적 불균질 효과 역시 용접부의 건전성 모니터링을 위한 중요한 평가 인자이다

산업·경제적 측면

화력발전설비는 고온과 고압의 환경에서 운전됨으로 결함 발생 가능성이 높으며 이에 따른 사고 발생시에는 국내 산업 전반에 미치는 파급 여파가 크고 많은 경제적 손실도 뒤따르게 된다 따라서 사용 중인 설비의 신뢰성 평가는 그 중요성이 더해지고 있으며 이를 통해 얻을 수 있는 경제적 효과도 크게 증가하고 있다 그리고 산업설비의 안전한 사용을 위한 재료의 신뢰성 유지 문제 즉 재료의 열화도에 대한 정확한 평가는 설비 가동의 효율성을 매우 증대시키므로 경제에 미치는 긍정적 영향이 매우 크다고 할 수 있다 특히 기존의 역학시험법들을 이용할 경우에는 적합한 형태의 시편을 채취하기가 곤란하고 시험방법이 파괴적이므로 시험에 소요되는 시간과 비용이 많이 들어간다는 단점을 가지고 있다 이에 반해 계장화 압입시험법은 특성상 용접부 등의 시편수급이 곤란한 국부 영역의 기계적 성질 파괴인성 및 잔류응력의 평가에 유리하고 가혹한 환경 하에서의 사용시간 증가로 인한 재료열화에 따른 재료물성치의 변화를 연속적으로 측정하기에 매우 적합하다 또한 긴 시험시간이 필요하지 않으므로 기존의 시험법들에 비해 시간 및 비용의 절감을 꾀할 수 있다 또한 재료 및 산업구조물에 대한 잔류응력의 분포 및 변화 양상에 대해 데이터베이스를 구축하는데 있어서 자동화 압입시험법은 매우 유용하게 이용될 수 있다 이러한 데이터베이스의 구축은 사용 중인 재료의 신뢰성에 대한 기준을 제공하고 수리·교환시기의 적절한 선택을 가능하게 하여 엄청난 물적·인적 피해를 일으키는 재료의 손상 또는 파괴를 미연에 방지하는데 큰 도움을 준다

계장화압입시험법을 이용한 잔류응력 측정법의 학문적 배경

잔류 응력에 의한 압입 하중 압입 깊이 곡선의 변화

압입 시험에서 시험편에 인장 및 압축 잔류 응력이 존재하면 그림 σ_{rs} σ_{rs} 과 같이 잔류 응력이 존재하지 않는 상태인 무응력에서 얻어진 압입 하중 압입

깊이 곡선에 비해 기울기가 변화한다. 동일한 압입 깊이에 도달하기 위해서는 인장 잔류 응력을 갖는 시험편은 무응력 상태에 비해 낮은 압입 하중이 필요하고 반대로 압축 잔류 응력을 갖는 시험편은 높은 압입 하중이 필요하다. 잔류 응력에 의해 변화된 압입 하중을 측정함으로써 잔류 응력을 측정한다. 측정하고자 하는 잔류 응력 성분을 이라 정의하면 는 잔류 응력에 의한 하중 변화 정도와 일정한 비례관계를 갖고 있음이 알려져 있다. 이때 인장 잔류 응력은 식 압축 잔류 응력은 식 로 측정할 수 있다.

그림 잔류 응력에 의해 변화된 압입 하중 압입 깊이 곡선

$$\sigma_{res} = \eta \frac{(F_0 - F_T)}{A_s}$$

$$\sigma_{res} = \eta \frac{(F_0 - F_C)}{A_s}$$

σ_{res} ρ_{res} L 철강 용접부와 같이 비등방성 축 잔류 응력이 인가될 때에는 한 축의 잔류응력이라 하면 이에 수직인 방향의 잔류응력을 는 실수 라 할 수 있다. 재료 표면에 수직인 방향 압입 시험 방향 으로의 잔류응력이 없다고 가정하면 압입 시험 방향의 소성변형을 일으키는 편차 응력은 식 과 같이 나타나며 하중 변화량을 접촉 면적으로 나누어준 값과 일치한다. 그리고 일반적으로 금속 재료에서 는 이다.

$$\sigma_{sd} = \frac{(1+\rho)}{3} \sigma_{res} = \frac{1}{\Psi} \frac{(F_0 - F_T)}{A_s} \quad \text{or} \quad = \frac{1}{\Psi} \frac{(F_0 - F_C)}{A_s}$$

σ_{res} ρ_{res} 따라서 식 과 식 는 각각 식 와 식 로 나타낼 수 있으며 최종적으로 사용자가 원하는 방향의 잔류응력은 로 그 축에 수직된 축의 잔류응력은 로 결정된다.

$$\sigma_{res} = \frac{1}{\Psi} \frac{3}{(1+\rho)} \frac{(F_0 - F_T)}{A_s}$$

$$\sigma_{rs} = \frac{1}{\Psi} \frac{3}{(1+p)} \frac{(F_0 - F_C)}{A_s}$$

철강 용접부의 잔류 응력 측정

의 내용을 바탕으로 철강 용접부의 잔류 응력을 측정하기 위해서는 용접부의 잔류 응력이 인가된 상태에서의 압입 하중 압입 깊이 곡선과 무응력 상태에서의 압입 하중 압입 깊이 곡선이 필요하다 무응력 상태에서의 압입 하중 압입 깊이 곡선을 유도하여 잔류 응력을 측정하는 과정은 다음을 따른다

압입 하중 압입 깊이 곡선의 측정

잔류응력을 측정하고자 하는 용접부와 무응력 상태라 판단되는 모재부에 대해 비커스 누르개와 구형 누르개를 사용하여 각각에 대한 계장화 압입 시험을 수행하여 압입 하중 압입 깊이 곡선을 측정한다 비커스 누르개로 측정된 압입 하중 압입 깊이 곡선은 식 와 식 에서의 하중 변화량 및 접촉 면적 결정에 사용되며 구형 누르개로 측정된 압입 하중 압입 깊이 곡선은

에 따라 압입 인장 물성을 결정하는데 사용된다

용접부의 무응력 상태 곡선의 유도

모재 무응력 상태 에서 비커스 누르개로 얻어진 압입 하중 압입 깊이 곡선의 하중 인가 곡선은 식 과 같이 나타낼 수 있다

$$F = k_0^b (h + \Delta h_s)^2$$

Δh_s 여기서 는 하중 인가 곡선의 초기 부분을 보정하기 위한 압입 깊이 항을 의미한다 용접부 무응력 상태 의 비커스 누르개의 압입 하중 압입 깊이 곡선의 하중 인가 곡선도 식 과 같이 나타낼 수 있으나 실제 사용 중인 용접부의 무응력 상태의 압입 하중 압입 깊이 곡선의 측정이 기술적으로 매우 어려우므로 압입 인장 물성을 사용하여 얻는다

$$F = k_0^w (h + \Delta h_s)^2$$

여기서 아래 첨자 w 과 b 는 각각 무응력 상태와 잔류 응력이 인가된 상태를 의미하며 윗첨자 w 와 b 는 각각 모재와 용접부를 의미한다

$\sigma_{IT,r}^w, \sigma_{IT,r}^b, k_0^w$ 에 따라 구형 누르개로 얻어진 압입 하중 F 압입 깊이 곡선으로부터 용접부와 모재의 압입 인장 물성 $\sigma_{IT,r}^w, \sigma_{IT,r}^b$ 을 각각 구한다. 압입 인장 물성은 잔류 응력 인가 여부에 무관하므로 $\sigma_{IT,r}^w, \sigma_{IT,r}^b$ 두 압입 인장 물성의 비를 이용하여 식 (1) 과 같이 k_0^w 를 구할 수 있으며 식 (2) 을 통해 용접부 무응력 상태의 비커스 누르개에 의한 압입 하중 F 압입 깊이 곡선을 유도할 수 있다

$$k_0^w = k_0^b \frac{\sigma_{IT,r}^w}{\sigma_{IT,r}^b}$$

$\sigma_{IT,r}$ 수식 (1) 에서 지칭한 H_c 는 계장화압입시험법을 통해 얻어진 압입 유도 곡선에서 변형률 ϵ_c 에 해당하는 압입 강도를 의미한다

잔류 응력 상태에서의 용접부의 경도 및 접촉면적 결정

모재부 무응력 상태에 비커스 누르개로 얻은 압입 하중 F 압입 깊이 곡선에서 재료와 누르개 간의 실제 접촉 깊이는 식 (3) 과 같이 평가되며 이를 통해 식 (4) 과 같이 압입 경도를 유도할 수 있다

$$h_c = 1.04(h_{max} + \Delta h_s)$$

$$H_{IT,0}^b = \frac{F_s}{24.5H_c^2}$$

두 재료의 압입 경도비와 변형률 ϵ_c 에 해당하는 강도비가 서로 같으므로 용접부 무응력 상태의 경도는 다음과 같이 나타난다

$$H_{IT,0}^w = H_{IT,0}^b \frac{\sigma_{IT,r}^w}{\sigma_{IT,r}^b}$$

소성 축적 현상을 고려하여 얻어진 고유 경도는 잔류 응력 인가 여부에 무관하게 일정하므로 용접부 무응력 상태에서의 압입 경도와 용접부 잔류 응력

상태에서의 압입 경도가 같다 이를 통해 용접부 잔류 응력 상태에서의 접촉 면적을 얻을 수 있다

$$H_{IT,s}^w = H_{IT,0}^w$$

$$A_s^w = \frac{F_s^w}{H_{IT,0}^w}$$

비등방성 축 잔류응력 측정

용접부 잔류 응력 상태의 비커스 누르개의 압입 하중 압입 깊이 곡선은 을 통해 얻으며 용접부 무응력 상태의 비커스 누르개의 압입 하중 압입 깊이 곡선은 식 과 식 을 통해 얻게 되어 잔류 응력 측정에 필요한 두 곡선의 하중 차이를 구할 수 있다 또한 용접부 잔류 응력 상태에서의 누르개와 재료의 접촉 면적을 식 을 통해 얻을 수 있으므로 최종적으로 다음의 식을 통해 용접부의 잔류 응력을 측정한다



일반적으로 철강 용접부에서는 는 으로 가정하는 것을 권장한다 그리고 측정된 잔류 응력의 수직된 방향의 잔류 응력은 DG_{res} 에 따라 로 결정된다

신기술 개발 장비 현황

개요

은 비파괴적인 방법으로

잔류응력을 측정하는 압입형 잔류응력 측정 장비이다

잔류응력의 유무에 따른 압입하중 변위곡선의 차이를 비교함으로써 재료 내 잔류응력을 정량적으로 결정하는 측정원리에 기반을 두어 기존의 다른 방식에 비해 재현성 있고 보다 정확한 값의 측정이 가능하며 단지 μm 미만의

깊이를 압입하기 때문에 시험 재료에 손상을 가하지 않고 잔류응력을 측정할 수 있다

구조 및 작동원리

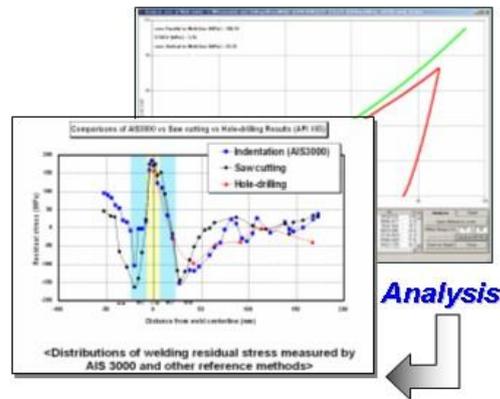


은 크게 본체 소프트웨어가 탑재된 컴퓨터시스템으로 구성되어 있으며 분석 프로그램을 탑재한 노트북 컴퓨터를 통해 실험과 분석 모두를 제어 가능하게 설계를 하였다 또한 산업 현장 적용을 목적으로 설계되었기 때문에 가볍고 운반하기 편리하게 제작

되었으며 측정의 정밀성도 함께 갖춘 제품이다

그림 이동식 잔류응력 시험기

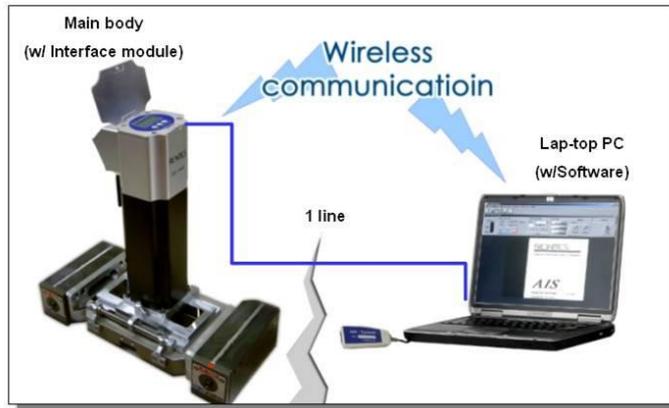
은 연속압입시험법을 압입 측정시험기와 같이 연속적으로 가해지는 하중에 대한 변위값을 실시간으로 읽어 들이고 이로부터 생성된 압입하중 변위곡선으로부터 잔류응력을



정량적으로 평가할 수 있습니다 또한 용착금속 열영향부 모재 각 영역의 미세조직 차이 및 이로 인한 잔류응력의 변화양상을 확인할 수 있으며 잔류응력의 방향과 크기를 통해 용접부의 건전성을 모니터링 할 수 있다는 효율성을 가지고 있다 또한 하중 변위곡선의 중첩 기능을 통하여 열화소재의 물성 변화 또한 즉석에서 비교할 수 있도록 프로그램을 제작하였다

하드웨어의 상세 구조 설명

◇ 의 장비 구성 및 사양



장비 구성	
↕	

모델	장비 사양
크기 중량	
하중부가장치	
하중측정장치	
변위측정장치	
최대하중	
분해능 하중 변위	
최대이송거리	±
	0.1~30 mm/min

모델	장비 사양
통신방법	무선 모듈
데이터처리속도	
전원	

분석 장비		
압입자		구형 압입자
부착도구		다중 곡률 자석 평판 자석 경량화 체인 확장형

◇ 하드웨어의 특징

I 안정적이며 소형화된 시험기

√ 높이 중량 의 소형화된

시험기

√ 휴대용 노트북을 이용한 실시간

측정 및 분석

√ 경량 도금을 통한 중량 및 외관 보호

√ 방수 방진 추경에 강한 케이스 채용

√ 과 하중에 대비한 비상차단 모듈탑재

II 사용자 편의성 증대

√ 무선 통신 모듈과 통신 시스템을 통한 실험 제어 가능

√ 를 통한 시스템 연결

√ 원거리 실험을 위한 제어 기능 탑재

√ 본체 상단의 를 통한 실시간 실험 상황 확인 및 직접 제어 가능

√ 휴대용 배터리 를 통한 전원 공급이 어려운 위치에서도 실험가능



- √ 윈도우 기반으로 제작하여 누구나 쉽게 동작하고 분석 가능
- √ 압입하중 변위곡선의 실시간 측정
- √ 현장 실험실에서 압입 실험 후 즉시 잔류응력 분석 가능

II 실험조건 설정의 편리성

- √ 하중제어방식과 변위제어방식으로 선택 가능
- √ 자주 사용하는 실험조건의 저장 가능
- √ 실험조건의 변경이 간단하다
- √ 목적에 따른 실험조건의 적합화가 가능

III 정확하고 쉽고 빠른 데이터 분석

- √ 계장화 압입기술을 토대로 한 정확한 잔류응력 분석
- √ 기계적 측정 방법으로 인한 재현성 있는 잔류응력 측정가능

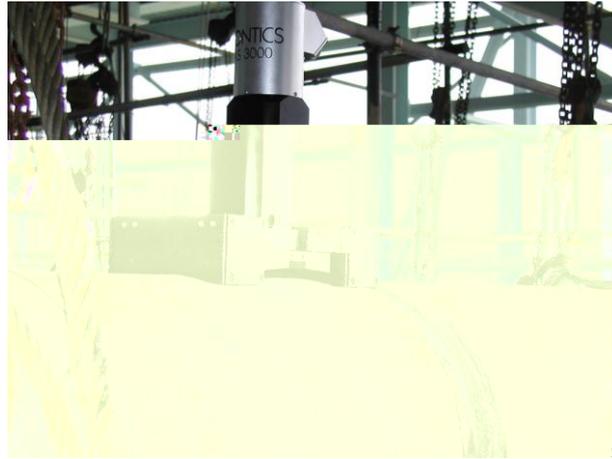
- √ 비전문가를 위한 쉬운 실험 분석 절차

IV 곡선 중첩 및 편의 기능

- √ 위치에 따른 응력 곡선 비교를 중첩기능
- √ 실험곡선의 그림파일 저장
- √ 실험 결과를 파일로 추출가능
- √ 다양한 편집도구 기능 추가

계장화압입시험법과 기존시험법과의 비교

4.1



.3

$$\sigma_{res} = \frac{1}{\Psi} \frac{3}{(1+p)} \frac{(F_0 - F_T)}{A_s}$$

4.2 , ()

X-ray diffraction, Barkhausen noise, ultrasonic wave

hole-drilling, saw-cutting

(1) .

X-ray

diffraction, hole-drilling, Saw-cutting

1. ()

	비파괴적 시험법	파괴적 시험법
--	----------	---------

종 류	극률법 중성자 회절법 초음파법	절단법 천공법
측정방법		
장 점	현장 적용에 가능하다	정량적이고 정확한 응력분석 가능 시편이 필요 없다
단 점	환경적 요인에 민감하다 정량적인 평가 불가 의 정의가 어렵다	현장적용이 불가하다 사용 운용 중 설비에 적용 불가
대 안	신속하고 정확한 현장 적용을 위한 비파괴적인 잔류응력측정시험법의 요구 정확도 및 경제성 확보	

X-

barkhausen

saw-

cutting

.2

()

X-		20MPa			ASTM E1426-98
		20MPa			KSB0951 ISO/TR29381 KEPIC MDF A370
Hole drilling		20MPa			ASTM E837-01

		10MPa			
--	--	-------	--	--	--

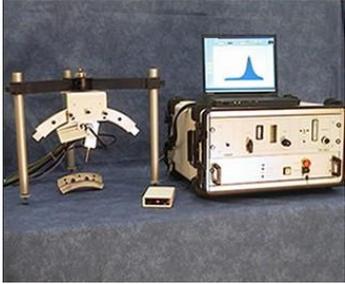
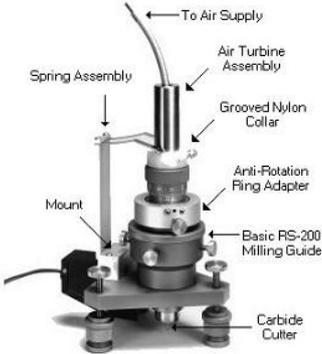
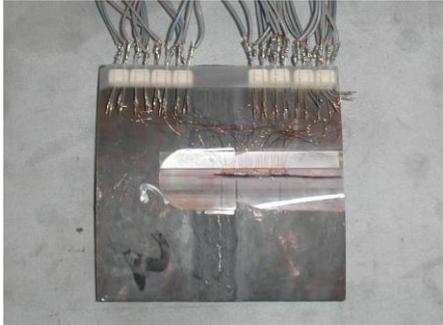
:

◇ 현 기술상태의 취약성

잔류응력을 측정하는 기존의 기법 표 들은 크게 비파괴적인 방법과 파괴적인 방법으로 나눌 수 있다 우선 비파괴적인 방법들로는 선 및 중성자 회절 자기적인 방법과 초음파 속도 측정법 등이 있다 우선 선 회절 법은 잔류응력에 의한 격자상수의 변화로 나타나는 회절피크의 폭과 발생 위치의 천이 정도로부터 잔류 변형률을 평가하는 방법이다 그러나 충분한 침투깊이를 가지는 선원과 정확한 잔류응력의 평가를 위해서 탄성계수 포아슨 비 및 무응력 상태의 면간거리에 대한 정보가 필요하며 배향성과 같은 미세조직적 인자에 의해서도 측정결과가 영향을 받는다는 문제점이 있다 이에 따라 최근 중성자 회절법 이 개발되었으나 산란강도가 적고 중성자 선원을 손쉽게 구하기 힘들다는 문제점이 존재하였다 자기적인 를 이용하여 소재의 잔류응력을 측정하는 방법은 외부 자장에 의한 소재의 자화거동이 잔류응력에 따라 달라지는 정도를 표준 시편에 대하여 측정하여 마스터 곡선을 형성한 뒤 각각의 측정하고자 하는 부위에서 얻어진 신호와 비교함으로써 잔류응력을 평가하는 방법이다

표 대표적인 잔류응력 측정 시험기

AIS 3000 (Frontics, Inc.)	X-선 회절 장비
----------------------------------	------------------

	
<p style="text-align: center;">Hole drilling</p>	<p style="text-align: center;">(Saw-cutting)</p>
	

그러나 이 방법도 강자성 소재 에 만 적용될 수 있다는
 한계점과 함께 미세조직에 크게 영향을 받기 때문에 용접부와 같이 조직이
 복잡한 영역에서는 정확한 마스터 곡선을 얻을 수 없다는 문제점이 있다 기존
 연구에 따르면 초음파 속도가 잔류응력에 따라 선형적으로 변화하는 것으로 보고
 되고 있으며 무응력 기준상태에 대응하는 초음파의 초기 속도와 음향탄성
 상수 라는 기울기계수가 알려질 경우에 잔류응력의
 평가가 가능하다 그러나 측정되는 응력은 초음파가 진행한 매질 전체의 평균
 잔류응력이기 때문에 국소 영역의 잔류응력 분포를 확인할 수 없고 초음파
 속도가 미세조직적 영향이나 측정온도에도 민감하게 변화하는 문제점이 있다 그
 와 다르게 파괴적인 방법들은 응력을 유발하는 구속부위를 절단 및 제거할 때
 완화되는 변형률을 스트레인 게이지를 이용하여 측정하는 기법으로 홀 드릴링과
 절단법 등이 있다 이들 방법의 경우에는 파괴적인 특징을 갖는 단점과 소재
 제거 시 추가적인 응력 유발의 가능성이 있다는 문제점이 있다 이처럼 현재까지

개발된 잔류응력 측정법들은 전반적으로 실험실 수준에 머물고 있으며 개별적인 적용조건이나 장단점에 맞추어 평가하고자 하는 부분에 최적화 시킬 때만 합리적인 잔류응력을 평가할 수 있게 된다 그러나 아직까지 실제 현장 구조물이나 생산된 소자의 잔류응력을 직접 평가하는 기법에 대한 연구는 미미한 상황으로 표 와 같은 이동식 선 회절장치나 이 때때로 사용되기도 한다

다시 말해 용접부 및 사용 중 산업설비들의 취약부의 경우 앞서 언급한 바와 같이 현장에서의 비파괴적으로 대상구조물의 잔류응력을 평가하는 방법이 없었기 때문에 조건에 맞게 기존의 파괴적인 시험법이나 비파괴적인 방법들을 사용했지만 효율적이며 정량적인 데이터 취득에는 어려움이 있는 실정이었다

4.3

	(KSB0951)	

#

KS B0951

파괴적인 방법 및 과의 검증 실험 결과는 에 포함되어 있음

기술 개발 시 예상되는 파급효과와 활용방안

기술적 측면

◇ 압입시험기법을 통한 용접부 및 사용 중 산업구조물에 대한 잔류응력 평가 기법으로 대체 가능

I 간편한 시험과정 및 용접부의 부위별 정확하고 신속한 시험결과 해석 가능

II 용접부를 포함하고 있는 운용 중 산업설비의 비파괴적 시험 수행으로 시편 채취 및 준비 단계 생략가능

III 시편준비 과정에서 발생하는 응력 및 변형률의 영향 없는 직접적인 잔류응력 측정 가능

◇ 새로운 비파괴 측정 평가기법의 제시

I 초음파 자기적인 방법을 통한 물리적인 측정기법과는 달리 직접적으로 기계적인 측정기법을 이용한 비파괴 시험법으로 정착 가능

II 새로운 비파괴 손상진단 방법의 제시 및 손상 진단의 정확도 증대가능

III 기존 비파괴 시험법에 비해 간단하며 물성 평가가 용이하고 용접부와 같은 국소 취약 부위의 손상진단 가능

◇ 압입이론에 대한 분석과 응용 능력 향상 및 관련연구의 확장

I 압입응력장의 확대를 통해 접촉구동중인 다양한 구조물의 잔류응력 효과를 고려한 응력상태 및 변형과 파괴의 예측 가능

산업·경제적 측면

◇ 비파괴적 분석을 통한 산업시설물의 안전진단 및 잔여수명 예측으로 산업 재해 및 손실 예방

I 용접부와 같이 미세조직의 변화가 급격한 국소취약부분의 잔류응력 양상 및 측정 가능

II 시편채취가 곤란한 부분에 거의 비파괴적인 압흔 형성만으로 잔류 응력 양상 및 측정 가능

◇ 압입시험의 현장 적용으로 시험비용 및 시간의 절약

I 수차례 압입시험과 동시에 기계적 물성 모델링에 기초한 잔류응력 측정 가능

II 수백 마이크론 정도의 압흔만을 형성하므로 최종 제품의 경우에도 적용 가능

III 복잡한 시험편 준비과정의 생략으로 인한 비용절감 효과 증대 및 신속한 경과 도출 가능

활용방안

- ◇ 압입시험기법을 통한 시스템 상의 보완과 함께 다종 재료의 열화에 따른 포괄적인 잔류응력측정 데이터의 구축
- ◇ 압입시험기법을 생산현장에서 적용시킴으로써 완제품의 잔류응력측정 생산 장비의 잔류응력 측정 등에 이용
- ◇ 잔류응력의 평가를 통한 구조물 제작 및 용접시공 조건에 대한 향후 방향 제시 가능
- ◇ 용접부의 잔류응력 평가를 위한 제공