



## 공학박사 학위논문

# 압입시험법을 활용한 재료의 무응력상태 유추를 통한 잔류응력 평가

Evaluation of Residual Stress through Estimation of Stress-free State Using Instrumented Indentation Test

2023년 2월

서울대학교 대학원

재료공학부

이 경 열

# 압입시험법을 활용한 재료의 무응력상태 유추를 통한 잔류응력 평가

Evaluation of Residual Stress through Estimation of Stress-free State Using Instrumented Indentation Test

지도교수 강승균

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함 2023년 2월

> 서울대학교 대학원 재료공학부 이 경 열

이경열의 공학박사사 학위논문을 인준함 2023년 1월



### 국문초록

잔류응력이란 대상 재료의 외부적인 힘의 작용이 없음에도 내 부에 존재하고 있는 응력을 의미한다. 단조, 압출 및 압연 등과 같 은 형태변형을 유발하여 소성변형 가공을 하는 과정에서 재료가 겪는 불균일한 소성변형에 의하여 잔류응력이 발생하며, 연삭 또 는 숏피닝과 같은 표면 가공 공정에서도 발생한다. 주조, 담금질 및 용접과 같이 큰 온도의 구배가 발생되는 가공 공정, 방사선 조 사에 따른 열화 및 소재 환경에 따른 부식과 같이 소재의 상. 조 직 및 밀도가 변화되는 과정에서도 잔류응력이 발생한다. 대형 구 조물에서부터 박막과 같은 나노 스케일까지 전 스케일에서 영향을 미치며, 특히, 용접부나 가공부위의 균열의 생성과 전파를 촉진시 키고 박막의 깨짐, 굽힘 및 비틀림 등 다양한 문제를 유발시키는 원인이 되고 있다. 따라서, 대상이 되는 재료에 대한 잔류응력을 정량적으로 평가하는 것이 매우 중요하며 이를 평가하기 위한 기 법에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 평가법은 크게 비파 괴적인 방식과 파괴적인 방식으로 비파괴적인 방법으로 대표적인 것은 X-ray 회절법과 중성자 회절법이 있으며, 대상 재료의 잔류

- i -

응력에 의하여 변화된 격자 간격을 측정하여 응력으로 환산하는 방식이며, 원자의 규칙성이 존재하지 않는 비정질 구조에는 활용 이 불가능 하며 접근성이 낮아 널리 활용되기에는 어려움이 있다. 파괴적인 방법으로는 측정 대상위치에 변형율 게이지를 부착 후 절단 또는 구멍을 내어 잔류응력이 완화되며 발생되는 변형율을 측정하고 그것을 잔류응력으로 환산하는 방법이 대표적이다. 파괴 적인 방법의 평가법은 평가대상을 손상시켜야 하기 때문에 가동중 의 구조물이나 환경에는 적용할 수 없다. 이에, 측정 대상의 훼손 을 줄이며 현장에도 적용가능한 접근성이 좋은 방법의 개발이 필 요하다.

계장화 압입시험법이란, 특정 기하학적 모양을 가진 압입자가 표면을 눌러 힘과 접촉된 면적을 통해 경도를 측정하는 기존 경도 시험법에서 발전된 것으로, 시험 시 가해지는 하중과 눌러들어간 깊이를 하중-변위 곡선으로 그려내어 그것을 분석하는 시험법이 다. 평가된 그래프를 통해 경도 및 탄성계수 뿐만이 아니라 잔류 응력, 인장물성, 파괴인성 및 충격인성 등을 평가하는 할 수 있다. 시험 후에 표면에는 약 100 um의 미세한 흔적이 남게 되어 비파 괴 또는 준비파괴 시험법으로 불리며, 높은 현장 적용성과 시험의 간편함으로 주목을 받는 시험법이다. 계장화 압입시험법은 평가

- ii -

대상의 잔류응력 유무에 따라 시험을 통해 얻어낸 하중-변위 곡선 에서 깊이에 따른 하중의 차이를 확인이 가능하며, 해당 차이를 통해 잔류응력을 평가하는 연구가 활발히 진행되었다. 많은 연구 자들에 의하여 등방성 압입자로 분류되는 Vickers, Conical 및 Berkovich 압입자를 활용한 재료 표면의 평균 잔류응력을 평가하 는 모델이 개발되었으며, 비등방 압입자인 Knoop, Wedge 및 modified Berkovich 압입자를 활용한 잔류응력의 방향성 및 주응 력 방향을 평가하는 모델 또한 발표되었다. 최근에는 Conical 압입 시험 수행 시 잔류응력에 따라 다르게 발생하는 표면변위를 디지 틸 이미지 상관법(Digital image correlation, DIC)을 활용하여 잔 류응력의 방향성을 평가하는 모델이 제안되었다.

계장화 압입시험법을 활용하여 잔류응력을 평가하기 위해서는 잔류응력 유무에 따른 하중-변위 곡선이 필요 하며, 무응력 상태 의 시험곡선이 없을 경우에는 평가할 수 없다. 시험편의 절단 또 는 열처리를 통하여 잔류응력의 풀림 상태를 제작할 수 있지만, 대형 구조물 및 가동 중 파이프라인 과 같이 현장에서는 적용이 불가하다. 또한, 불확실한 무응력 상태의 시편의 하중-변위 곡선을 활용하여 평가된 잔류응력은 실제 값과의 큰 오차와 대상의 신뢰 성을 평가하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는, 잔류응력의 유무에 따라 변하지 않는 재료 고 유의 탄소성 특성을 활용하여, 압입시험 시 얻어지는 하중-변위곡 선에서 하중을 가해줌으로써 발생되는 Loading 커브에서 응력이 있는 상태의 하중-변위 곡선으로 응력이 있는 상태의 Loading 커 브를 표현할 수 있도록 제시하였으며, 하중이 제거되면서 얻어지 는 Unloading 커브에서 잔류응력이 있는 상태에서 없는 상태의 곡 선을 표현할 수 있도록 제시하였다. 또한, Indentation work과 Indentation hardness 및 reduced modulus의 관계를 활용하여 앞 서 제시된 내용과 함께 무응력 상태의 시험편이 없는 상황에서도 평가 대상 소재의 잔류응력을 평가하는 모델을 제안하였다. 제안 된 모델은 유한요소 해석을 활용하여 단계별 검증이 되었으며, 최 종적으로 실제 잔류응력이 부여된 시편에 대하여 평가하여 검증하 였다.

주요어 :계장화 압입시험, 코니컬 압입시험, 잔류응력, 신뢰성, 유한 요소해석

학 번 : 2016-24225

목 차

초 록i	
목 차	V
List of Tables	Viii
List of Figures xi	
제 1 장 서 론	1
1. 1. 논문의 목적	2
1. 2. 논문의 구성	7
제 2 장 이론적 배경	8
2. 1. 잔류응력	10
2. 1. 1. 잔류응력의 원인	10
2. 1. 2. 잔류응력의 영향	11
2. 2. 잔류응력의 측정기법	13
2. 2. 1. 파괴적 기법	13
2. 2. 1. 1. 홀드릴링 기법	13
2. 2. 1. 2. 슬리팅 기법	17
2. 2. 1. 3. 절편 기법	18
2. 2. 1. 4. 등고선 기법	19
2. 2. 2 비파괴적 기법	20
2. 2. 2. 1. X-선 회절법	20
2. 2. 2. 2. 초음파 기법	21

	2. 2. 2. 3. 바크하우젠 노이즈 기법	22
•	2. 3. 계장화 압입시험법	23
	2. 3. 1. 기본적인 물성평가	24
	2. 3. 2. 고급 물성평가	27
	2. 3. 2. 1. 인장물성	27
	2. 3. 2. 2. 파괴인성	29
	2. 3. 3. 잔류응력 평가	30
	2. 3. 3. 1. 압입곡선에 대한 잔류응력 효과	30
	2. 3. 3. 2. 평균 잔류응력평가	31
	2. 3. 3. 3. 잔류응력의 방향성 평가	33
	2. 3. 4. 기존 기법의 한계	38
제	3 장 이론적 모델링	54
	3. 1. 연구 동기	55
	3.1.1 소개	55
	3.1.2 유한요소해석 접근법	57
4	3. 2. 무응력 상태 유추를 통한 잔류응력 평가	58
	3.2.1. 이론적 모델링	58
	3.2.1.1. 무응력 상태의 압입시험을 통한 총 에너지 ··	58
	3.2.1.2. 무응력 상태의 압입시험을 통한 탄성 에너지 ••	63
	3.2.1.3. 압입 에너지, 경도 및 탄성계수간 관계	72
	3.2.2. 유한요소해석 검증	76
	3.2.3. 물성 및 응력 부호에 따른 민감도 보정	77
제	4 장 실험적 모델	110

4. 2. 검증실험 결과	112
제 5 장 결론	118
고찰 및 한계점	119
결론	122
참고문헌	124
Abstract ·····	140

# 표 목 차

# 제 3 장

표 3.1 유한요소해성에 사용된 Input 물성 및 조건

표 3.2 특정 깊이에서의 하중비 및 α비

표 3.3 kw 및 비선형 관계식

표 3.4 kw 평가 회기분석에 사용된 상수 및 변수

# 제 4 장

표 4.1 검증시험에 사용된 소재 및 항복강도

## 그림목차

### 제 2 장

- 그림 2.1. 강화유리판의 외부하중 및 잔류응력의 분포개략도 [1]
- 그림 2.2. 잔류응력에 의한 영향. (a) 변형된 구조물, (b) 알루미늄의 균열
- 그림 2.3. 파괴적인 잔류응력 평가법
- 그림 2.4. 홀드릴링 기법의 교정 계수
- 그림 2.5. 순차적 절편 기법
- 그림 2.6. 등고선기법
- 그림 2.7. 계장화 압입시험법의 압입 하중-변위곡선
- 그림 2.8. 압입 접촉 깊이의 정의
- 그림 2.9. ISO/TR 29381의 인장물성 평가 흐름도
- 그림 2.10. 취성재료와 연성재료의 파괴인성 평가기술의 원리
- 그림 2.11.응력에 따른 압입 하중-변위 곡선의 변화
- 그림 2.12. 2축 잔류응력에 대한 Knoop 압입 하중-변위곡선
- 그림 2.13. 압입 깊이에 따른 변환계수비
- 그림 2.14. 원뿔형 압입에 의해 발생되는 표면변위

### 제 3 장

그림 3.1. 용접에 의한 변형률을 측정하기위한 모식도

그림 3.2. 용접에 따른 용접선과 수직한 방향의 변형량

그림 3.3. 용접에 따른 재료의 소성변형

- 그림 3.4. STS304 소재에 대한 유한요소 해석모델과 실제 실험에서의 압입 하중-변위곡선 비교
- 그림 3.5. Loading curve의 지수값 평가 결과
- 그림 3.6. 잔류응력에 유무 따른 압입 하중-변위곡선
- 그림 3.7. 유한요소해석으로 통해 확인한 잔류응력에 따른 압입 하중-변 위곡선
- 그림 3.8. 제안된 수식을 통한 B의 총 에너지 계산 및 하중-변위곡선의 Loading 곡선을 적분하여 얻은 총 에너지
- 그림 3.9. 재료 거동에 따른 Unloading 곡선 (a) 완전 탄성재료, (b) 완 전소성재료, (c) 탄소성재료
- 그림 3.10. 강성도 및 Unloadig 대변 기울기 Q
- 그림 3.11. Q의 보정이동. (a) 보정 전 Q, (b) 보정 후 Q
- 그림 3.12. 유한요소해석을 통한 Q 및 S 결과
- 그림 3.13. 평균오차가 반영된 S 및 Q
- 그림 3.14. 압입시험에서 발생되는 접촉면적의 기하학적 형상. (a) 최대

하중 시점, (b) Unloading 이후 시점

- 그림 3.15. 재료 물성에 따른 접촉깊이의 변화
- 그림 3.16. 잔류응력에 따른 접촉깊이의 변화
- 그림 3.17. 일축 잔류응력을 인가하기 위한 지그

그림 3.18. 잔류응력에 따른 계산된 접촉면적 변화

그림 3.19. 잔류응력에 따라 수식으로 계산된 물성. (a) 탄성계수 결과,

(b) 경도 결과

그림 3.20. 잔류응력에 따라 평가된 (a) 투영면적 및 접촉면적, (b) 투영

면적이 활용된 경도 및 탄성계수

- 그림 3.21. 잔류응력에 따른 Unloading 곡선
- 그림 3.22. 유한요소해석을 통한 제안식과 실제 탄성에너지 평가결과
- 그림 3.23. 제안된 탄성에너지 평가 식의 평균오차를 반영한 결과
- 그림 3.24. (a) H/E와 Y/E 의 관계, (b) 압입 에너지와 Y/E의 관계, (c)

H/E와 압입에너지의 관계

- 그림 3.25. 회기분석을 통한 평가 결과
- 그림 3.26. 유한요소해석을 활용한 모델 평가 결과

### 제 4 장

- 그림 4.1. 제작된 지그 형상 및 원리
- 그림 4.2. FRONTICS 사 AIS3000 계장화 압입시험기
- 그림 4.3. 실험검증 절차 모식도
- **그림 4.4.** 검증실험 결과 (a) STS304. (b) STS420J2, (c) Al6061. (d) C1220, (e) S45C, (f) 종합결과

# 서 론

# 목차

제	1	절	논문의	목적	 2
제	2	절	논문의	구성	 7

### 1.1. 논문의 목적

잔류응력이란 외부의 하중과 같은 영향 없이 재료에 내부에 남아 있 는 응력을 의미한다[1]. 재료에 존재하는 응력은 재료가 연속성을 유지하 기위해 자체 평형과정에서 발생되며 이것은 다양한 원인에 의해 유발된 다[2]. 잔류응력은 재료의 공정과정에서 스케일에 무관하게 불가피 발생 되며 부품, 장비 및 구조물의 파손과 수명에 영향을 미치게 된다. 따라 서, 잔류응력의 정량적인 크기와 상태는 대상이되는 소재, 부품 및 구조 물의 건전성과 신뢰성을 평가하는데 매우 주요한 요인이라 할 수 있다. 용접 공정에서 용접부와 같이 인장 잔류응력이 높게 발생되는 부위는 재 료의 파괴 인성, 피로 수명 및 응력 부식 균열 저항성 측면에서 설계 물 성과 달리 저하된 성능을 나타낸다[3-6]. 따라서, 재료의 상변환 온도를 제어하거나 숏피닝과 같은 추가 공정[9-11]을 통해 압축 잔류응력을 적 용하여 유해한 인장잔류 응력을 저감시키는 새로운 제조 공정 또는 표면 개질 공정이 연구개발되고 있다.

다양한 종류의 잔류응력 측정법은 시험편에 대한 적은 손상, 최표면 깊이의 측정, 높은 현장 적용성 및 복잡한 구조에 적용이 가능한 기법과 같이 각각의 장점과 한계점을 가지고 있다[2, 6, 12]. 잔류응력 평가기법 은 응력완화에 따른 변형율 측정법, 격자간격 측정에 따른 회절법 및 기 타 방법과 같이 크게 3 가지로 분류된다. 파괴적인 방법으로 분류되는 홀 드릴링 및 절단법 등은 재료에 작은 구멍 또는 재료를 절단함으로써 재료의 연속성을 깨뜨리고 이에 따라 발생되는 탄성 회복되는 변형률을 측정한다[12-18]. 변형률 게이지 또는 레이저 스캐너에 의해 변형률을 측정하고 탄성 기계적 특성과 결합하여 응력으로 변환한다. X-rav 및 중성자 회절법을 사용하여 재료 결정의 격자간격을 측정하는 방법이며. 잔류응력 상태에 따라 격자 간격이 변화되기 때문에 응력이 없는 상태와 의 비교분석하여 측정된다. 평가의 대상이되는 재료와 응력이 없는 상태 의 재료가 모두 존재한다면 이와같은 측정법을 활용하여 비파괴적으로 잔류응력을 평가할 수 있다. 앞선 방법과 다르게 비파괴적으로 평가할 수 있는 기법으로는 바크하우젠 노이즈법과 초음파를 이용한 측정법이 있다. 바크하우젠 노이즈법은 자성체의 자기적 모멘트 배열이 응력에 따 라 변화되게되며 이에대한 노이즈 신호를 감지하여 평가하는 기법[18]이 며 초음파 기법은 초음파속도와 응력의 함수적인 관계를 활용하여 평가 된다[19, 20]. 끝으로 계장화 압입시험법을 활용한 평가법이 있으며, 잔류 응력이 재료의 압입시험을 하면서 얻어지는 압입 하중-변위곡선을 변화 시키는 효과를 활용하여 평가된다. 해당 기법은 표면에 매우 작은 압입 흔을 남기기 때문에 준비파괴 또는 비파괴 방식으로 평가되고 있다.

계장화 압입시험법(IIT, Instrumented Intentration Test)은 초경소재 금속 또는 다이아몬드로 제작된 압입자(누름개)가 평가 대상의 국부위치 표면에 수직으로 변형을 가하는 동시에 연속적으로 재료에 가해지는 하 중과 변위를 측정하다. 많은 여구자들에 의해 시험에 의해 기록된 하중-변위 곡선을 분석하여 측정 대상의 국부 인장물성, 파괴인성 및 충격인 성을 하는 평가하는 연구가 진행되어 왔다. 또한, 압입 하중-변위 곡선 은 재료 내부의 잔류응력 상태에 따라 변화되는 것에 대하여. Tsui는 실 험적으로 인가된 응력이 재료의 강성, 탄성계수 및 경도의 평가에 활용 되는 계산된 투영 접촉면적의 변화를 미치는 것을 확인하였다[22]. Bolshakov는 유한 요소 해석을 통해 압입 하중-변위곡선과 압입자 하부 의 소성역의 변화를 확인하였다[23]. 이후 관련 연구자들에 의하여 압입 하중-변위곡선과 투영된 접촉 면적의 변화를 분석하여 잔류응력을 평가 할 수 있는 모델을 개발했습니다[24-28]. Lee와 Kwon[28-32]은 무응력 상태와 응력이 존재하는 상태에서 획든된 압입 하중-변위곡선의 최대 압입 변위에서의 하중의 차이와 투영된 접촉면적을 이용하여 이축 응력 을 평가하는 모델을 제안했다. 해당 모델은 응력을 텐서로 표기하여 표 면 잔류응력을 탄성 부피 변화와 관련된 정수압 응력과 소성변형과 연관 된 편차응력으로 분해하여 압입시험이 수행되는 방햐의 편차응력을 최대 압입 변위에서의 발생된 하중의 차이를 투영면적으로 나눈 값과 연관시 켜 잔류응력을 평가하였다.

전류응력의 발생되는 원인이 되는 요인을 확인하여 볼 때 무응력 상 태의 재료를 확보하는 것에 어려움이 있을 수 있다. 일반적으로 재료는 사용 목적에 맞게 가공되는 압출, 단조, 인발 및 압연과 같은 공정과정을

- 4 -

거치게 되며 이러한 가공 공정은 소재에 위치별 불균일한 소성변형을 주 게되며, 이러한 공정은 소성변형과 함께잔류응력을 유발 시킨다. 마찬가 지로 밀링, 연삭 및 피닝 등과 같은 표면 가공 공정도 재료 표면에 소성 변형과 함께 잔류응력을 유발한다. 또한 용접 및 담금질과 같은 큰 열적 구배가 있는 공정 또한 재료의 팽창과 수축이 동반하여 소성변형 또는 상변화 등과 함께 잔류응력을 유발시킨다. 앞서 제시된 공정들은 흔히 사용되고 있으며, 잔류응력이 유발되는 대표적인 예이다. 소성변형 또는 기타 영향들과 함께 발생된 잔류응력을 계장화 압입시험법으로 평가하기 위해서는 무응력 상태의 소재를 확보하여 평가하는 것이 주요한 이슈가 되다. 재료의 연속성을 제거해 주는 소재 절단 또는 추가적인 열처리를 통하여 무응력 상태를 제작할 수 있지만, 소재의 절단은 재료를 파괴시 키는 것으로 가동중 구조물이나 파이프라인과 같은 실 현장에서는 적용 하기에 어려움이 있다. 또한, 열처리를 통한 잔류응력 완화는 기존 설계 된 소재의 상변화를 유발 시킬 가능성이 있어, 설계 물성의 변화를 줄 수 있기 때문에 어려움이 있다.

본 연구의 목적은 잔류응력이 존재하는 평가대상의 탄소성적 정보를 기반으로 무응력 상태의 압입 하중-변위곡선의 정보를 유추하여, 무응력 상태의 시험편 제작 없이도 잔류응력을 평가하는 방법을 개발하는 것이 다. 잔류응력의 크기를 평가하는 기본 모델은 Lee 와 Kwon이 제안한 모델을 활용 한다. 동일한 압입 깊이에서 Vickers 압입자와 기하학적으

- 5 -

로 같은 접촉 면적을 갖는 축대칭 형태의 Conical 압입자를 활용하였다. 평가 모델을 제안하기 위해 유한요소해석이 활용되었으며 실험적으로 검 증되었다. 따라서, 본 논문에서 제안된 모델은 평가 위치에 1 회 압입 및 접촉면적 측정을 통하여 시험 대상의 손상이 적은 현장 적용이 가능한 잔류응력 평가법으로 제시된다.

### 1.2. 논문의 구성

이 논문은 5 장으로 구성되어 있다. 1 장에서는 이 논문의 목적과 구 성을 소개한다. 논문의 배경과 관련된 선행연구들은 2 장에서 소개된다. 잔류응력의 특성과 대표적인 측정방법을 장점과 한계 측면에서 소개한 다. 3 장에는 유한요소 해석과 잔류응력이 존재하는 평가대상의 탄소성 적 정보를 기반으로 무응력 상태의 압입 하중-변위곡선의 정보를 유추 할 수 있는 모델링이 소개된다. 4 장에서는 3 장에서 제시된 모델에 대 하여 실험적이 검증이 소개된다. 5 장은 이 논문의 결론을 요약한다.

# 이론적 배경

# 목차

2. 1. 잔류응력	10
2. 1. 1. 잔류응력의 원인	10
2. 1. 2. 잔류응력의 영향	11
2. 2. 잔류응력의 측정기법	13
2. 2. 1. 파괴적 기법	13
2. 2. 1. 1. 홀드릴링 기법	13
2. 2. 1. 2. 슬리팅 기법	17
2. 2. 1. 3. 절편 기법	18
2. 2. 1. 4. 등고선 기법	19
2. 2. 2 비파괴적 기법	20
2. 2. 2. 1. X-선 회절법	20
2. 2. 2. 2. 초음파 기법	21
2. 2. 2. 3. 바크하우젠 노이즈 기법	22
2. 3. 계장화 압입시험법	23
2. 3. 1. 기본적인 물성평가	24
2. 3. 2. 고급 물성평가	27
2. 3. 2. 1. 인장물성	27

2. 3. 2. 2. 파괴인성	29
2. 3. 3. 잔류응력 평가	30
2. 3. 3. 1. 압입곡선에 대한 잔류응력 효과…	30
2. 3. 3. 2. 평균 잔류응력평가	31
2. 3. 3. 3. 잔류응력의 방향성 평가	33
2. 3. 4. 기존 기법의 한계	

### 2. 1. 잔류응력

#### 2. 1. 1 잔류응력의 원인

잔류응력이란 외부의 하중과 같은 영향 없이 재료에 내부에 남아 있 는 응력을 의미한다[33]. 재료에 가해지는 불균일한 탄소성 변형, 노출되 는 온도, 미세조직의 변화 및 가해지는 공정 종류 및 시간 등에 의해 재 료 내의 상호 작용에 의해 잔류응력이 발생된다[34]. 이러한 영향들에 의 해 재료는 연속성 및 평형을 유지하기 위한 탄성 변형의 결과물로써[33] 그림 2.1과 같이 전체 부피에서 힘과 모멘트 평형을 만족하는 자기 평형 특성을 갖는다.

재료는 일반적으로 대부분의 제조 공정에서 구조물과 같은 대형 재료 에서부터 박막과 같은 미세소자까지 크기와 형태에 관계없이 잔류 응력 이 발생된다[33]. 압연, 압출, 인발 및 단조와 같이 재료의 형상을 변화시 키기 위한 성형 공정 및 숏피닝과 같은 표면 개질 공정은 앞서 언급한 재료 내의 불균일한 탄소성 변형이 수반되어 잔류응력을 생성하는 주요 요인이 된다. 또한, 용접, 주조 및 담금질과 같은 높은 열적 구배가 발생 하는 공정은 재료의 상과 밀도를 국부적으로 변화시켜 잔류응력을 발생 시킨다.

#### 2. 1. 2 잔류응력의 영향

잔류응력의 재료의 설계된 성능을 변화시키어 소재, 부품 및 장비의 수명평가에 있어 잔류수명 예측을 왜곡시키며, 그림 2.2와 같이 구조물의 큰 변형과 균열을 유발시킬 수 있다. 특히, 높은 수치의 인장 잔류응력은 구조의 설계에 있어서 신뢰성에 악영향을 미치기 때문에 신중하게 고려 해야 한다. 특히, 용접 잔류응력은 일반적으로 용접 및 열영향 부의 항복 강도와 유사한 수준의 인장 잔류응력까지 발생시킬 수 있으며, 압축하중 시 횡방향변형에대한 좌굴 강도의 감소, 균열 저항성 및 응력부식균열과 같은 유해한 영향을 야기시킨다[35].

일반적으로 인장 잔류응력은 반복 하중을 받는 재료의 피로수명을 단 축시킨다. 반면에, 압축 잔류응력은 재료의 수명을 증가시키는 방향으로 나타난다[36]. Li는 470 MPa의 항복강도를 갖는 고질소강에 대하여 용접 잔류응력이 미치는 피로수명에 미치는 영향을 보기위하여 S-N 곡선의 변화를 보였다[5]. 항복강도의 약 90% 인장 잔류응력이 재료내부에 존재 하여 그에대한 영향으로 피로균열의 생성과 전파가 변화되며 이에따라 200MPa의 응력을 받을 경우 50년의 이상의피로수명으로 계산됬던 재 료는 약 35일 수준으로 수명이 낮아짐을 보였다[37].

미세균열 주변 표면의 잔류응력은 균열선단 응력장을 변화시키며 응 력의 방향에 따라 균열전파를 가속 시킬 수도 있다. H.E. Coules는 인장

- 11 -

잔류응력이 균열전파 저항성에 미치는 영향을 보기위하여 인장시편에을 제작 후 인장 잔류응력을 가하여 영향을 확인 하였다[39]. 응력이 가해진 시편은 균열선단에서 균열의 개시와 전파가 가속화되었으며, 동일한 연 신을 인장 잔류응력이 가해지지 않은 시편과 비교해 볼 때 인장 잔류응 력이 존재하는 시편은 더 낮은 하중에서 보다 많은 소성 변형이 발생되 었다. 인장 잔류응력이 부식성 환경과 결합될 때 추가적인 하중으로 작 용하여 균열의 확대를 가속하는 응력 부식균열 발생의 다른 중요한 문제 이다[40]. 이에따라, 인장 잔류응력을 최소화하기 위해 핵심 파라미터를 제어하는 제조공정과 재료 표면에 압축 잔류응력을 부여하는 표면 개질 기법이 개발되고 있다[41-46].

### 2. 2. 잔류응력의 측정기법

### 2. 2. 1 파괴적 기법

#### 2. 2. 1. 1. 홀 드릴링 기법

잔류응력을 평가하는데 일반적으로 사용되는 측정 방법인 홀 드릴링 방법은 재료 표면에 변형율 게이지를 부착하고 작은 구멍을 뚫어줌으로 써 재료의 연속성을 제거하면서 완화되는 탄성변형량을 측정하여 잔류 응력을 평가한다[47-50]. 세 가지 다른 방향에 대하여 탄성적으로 회복 된 변형률은 탄성계수와 포아송비로 평면응력 텐서를 결정할 수 있다. 일반적으로 45도 간격을 갖는 세 가지의 방향으로 측정되며, Eq. (2-1) 및 Eq. (2-2)는 주응력 방향의 응력 성분을 나타낸다.

$$\sigma_{res}^{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}$$
(2-1)

$$\sigma_{res}^{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}$$
(2-2)

변형률  $\epsilon_1, \epsilon_2, 및 \epsilon_3$  은 각각 45도 간격이므로  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_3$ 의 각도는 직각

이며, A와 B는 재료의 탄성 특성으로부터 계산된 상수이다.

일반적인 홀 드릴링은 그림 2.3(a)[50]과 같이 측정을 위해 폴리머 기 판 위에 패턴화된 금속박으로 제작된 로제트형 변형률 게이지와 금속 드 릴 커터를 사용하며, 로제트와 커터의 크기로 분해능이 결정된다. 변형률 게이지에 대한 한계점을 극복하기 위해 Moir'e 간섭계[51], 홀로그래픽 간섭계[52] 또는 디지털 이미지 상관법(DIC, Digital image correlation) 을 함께 사용 하는 것이 연구되었다. 측정의 스케일을 마이크로/나노 범 위까지 확장하기 위해 최근에는 집속이온빔에 의해 연속성을 제거하고 전자주사전자 현미경을 활용하는 방법도 개발되었다[55, 56].

홀 드릴링 기법은 순차적으로 표면을 드릴링하며 이에따른 변형률 측 정 프로세스를 통해 깊이에 따른 잔류응력을 평가하는 데 활용할 수 있 다[47, 48, 50].

적분법은 증분변형율 및 평균변형률 계산법 보다 깊이별 잔류응력을 프로파일링하는데 가장 보편적으로 사용되며, 보정이 잘 되어있는 계산 법이다. 적분법은 유한요소해석을 이용하여 재료표면의 변형율과 드릴링 되는 깊이의 관계를 도출한다. 완화된 응력에 의한 표면의 변형률은 드 릴링됨에 따라 벽에 가해지는 응력과 동일한 것으로 간주될 수 있다. 그 림 2.4는 4개의 증분으로 홀을 만들었을 때 각 단위 증분에서의 응력과 완화된 변형 사이의 관계를 나타내는 보정 계수 행렬 a를 구하는 절차에

- 14 -

형률을 각각 분석하였는데, 표면에서 깎아주는 홀의 깊이가 증가함에 따 라 변형률 변화가 연속적으로 발생하기 때문이다. 예를 들어,  $\overline{a}_{43}$ 은 4 번 째 홀을 뚤었을 때 3 번째 위치에서의 발생되는 변형을 의미한다. 행렬 표기법에서, 방정식은 응력과 변형을 Eq. (2-3), Eq. (2-4), Eq. (2-5)로 연관시킨다.

$$\bar{a} P = E/(1 + \nu) p$$
 (2-3)

b P = 
$$E/(1 + \nu)$$
 q (2-4)

b T = 
$$E/(1 + \nu)$$
 t (2-5)

P, Q, T, p, q 및 t 는 아래와 같이 정의된다.

$$P = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \qquad Q = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \qquad T = \tau_{xy} \qquad (2-6)$$

$$p = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \qquad q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \qquad t = \frac{\varepsilon_3 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{2} \qquad (2-7)$$

Eq.(2-3)은 4 번째 깊이까지 홀을 드릴링 했을 때 Eq.(2-8)로 표기 된다.

$$\begin{bmatrix} \overline{a}_{11} & & & \\ \overline{a}_{21} & \overline{a}_{22} & & \\ \overline{a}_{31} & \overline{a}_{32} & \overline{a}_{33} & \\ \overline{a}_{41} & \overline{a}_{42} & \overline{a}_{43} & \overline{a}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \underbrace{E}_{1+\nu} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}$$
(2-8)

링 코어 방법과 딥 홀 드릴링은 그림 2.3(b)에 제시된 바와 같이 홀 드릴링 방법과 유사한 응력 평가기법이다. 링 코어 방식은 3축 변형률 게이지 로제트의 주변을 링의 형태로 제거하여 평가한다. 딥 홀 드릴링 방식은 재료를 완전히 관통하는 구멍을 드릴링하며, 관통된 홀의 깊이별 직경의 변화를 이용하여 깊이별 응력을 평가 한다.

### 2. 2. 1. 2. 슬리팅 기법

슬릿팅 방법은 와이어 방전가공, 톱질 또는 밀링에 의하여 긴 슬릿을 만들어 잔류응력을 측정할 수 있는 방법 중 하나이다. 응 력 완화에 의해 생성된 변형률은 그림 2.3(d)과 같이 평가될 위치 에 일축 변형률 게이지를 전면 및/또는 후면 표면에 부착하여 측 정된다. 이 방법은 홀 드릴링에 비해 시편의 전체 두께에 대한 응 릭 프로파일을 제공할 수 있다는 명확한 장점이 있지만, 평가된 응력 성분이 절단면에 수직한 응력 측정으로 제한된다. 잔류응력 평가는 홀 드릴링 방법과 동일한 방법으로 보정계수 결정을 위하 여 구성요소의 각 형상에 대해 유한요소해석에 의해 도출된 행렬 을 사용한다.

#### 2. 2. 1. 3. 절편 기법

절편법은 시편의 완전 절단에 의한 응력완화에 기초한 평가 기법이다 [57-59]. 이 방법은 일반적으로 변형률 측정을 위한 게이지 및 이미지 처리 기법과 회절 방법등과 함께 사용된다. 잔류응력은 일반적으로 응력 이 완화되는 동안 발생하는 2축 변형률 변화로부터 Eq. (2-9) 및 Eq. (2-10)로 계산할 수 있다.

$$\sigma_{res}^{x} = \frac{E}{1 - v^{2}} (\varepsilon_{x} + v\varepsilon_{y})$$
(2-8)

$$\sigma_{res}^{y} = \frac{E}{1 - \nu^{2}} (\varepsilon_{y} + \nu \varepsilon_{x})$$
(2-9)

변형률 게이지의 부착 위치와 절단면과의 거리에 따라 완화되는 변형 이 크게 달라지기 때문에 신중하게 결정되어야 한다. 그림 2.5와 같은 연 속하여 절단을 수행하면 재료의 응력 분포를 복잡한 형상에서도 잔류응 력을 프로파일링할 수 있다.

### 2. 2. 1. 4. 등고선 기법

다른 기법에 비하여 상대적으로 최근에 개발된 잔류응력 측정기법인 등고선법은 측정면을 절단하고 절단면에 대한 변위 측정 및 유한요소해 석을 활용하여 절단면에 수직한 잔류응력을 매핑하는 기법이다[60]. 이 방법은 일반적으로 방전가공이 적용될 수 있는 금속 재료를 대상으로 하 며, 응력완화를 위한 가공시 가소성을 최소화 할 수 있다. 절단시 응력 완화에 의해 단면이 변형되기 때문에 절단후 변형된 표면을 스캔하여 절 단면 양쪽을 측정한다 그림 2.6와 같이 단면의 데이터를 기반으로 표면 을 유한요소해석을 통해 평평한 표면으로 되돌리는 작업을 수행하여 단 면에 수직인 잔류응력을 분석할 수 있다.

#### 2. 2. 2 비파괴적 기법

#### 2. 2. 2. 1. X-선 회절법

X-선 회절법은 결정성 또는 다결정성 물질의 격자 간격을 측정하는 대표적인 회절법이다. 회절 피크의 각도의 측정과 Bragg's 법칙을 통해 거리를 계산할 수 있다. 잔류응력이 존재하는 상태에서 측정된 격자간격 d와 무응력 상태에서의 측정된 거리 d<sub>0</sub>를 Eq. (2-6)을 활용하여 잔류 응력에 의한 변형률을 평가할 수 있다.

$$\frac{d_{\psi,\phi} - d_0}{d_0} = \frac{1}{E} \Big[ \sigma_{\phi} \big( 1 + \nu \big) \sin^2 \psi \Big]$$
(2-6)

X-선 회절법은 비파괴적인 기법으로 시편의 채취나 가동 중 구조물
의 손상 없이 평가할 수 있다[61]. 하지만, 일반적으로 X-선의 관통 깊
이는 수십 마이크로미터까지로 제한되며, 대상 물질 및 표면 상태에 따
라 상이하다. 응력 프로파일링은 비파괴적인 기법의 이점을 보이는 X선 회절법[63] 및 과 층제거법을 함께 활용하여 가능하다. 중성자 회절
[64]은 X선 회절보다 높은 에너지 강도의 전자 또는 중성자 빔을 사용하
여 수십 밀리미터 범위 이상 깊이 침투할 수 있다.

### 2. 2. 2. 2. 초음파 기법

초음파 기법은 재료내의 잔류응력에 의하여 선형적으로 변화되는 음 파의 속도를 활용한다. 응력에 따른 초음파 속도는 Eq. (2-7)로 표현된 다.

$$\mathbf{V}_{\mathbf{T}} = \mathbf{V}_{\mathbf{T}\mathbf{0}} + \mathbf{K}_{\mathbf{a}\mathbf{e}}\mathbf{\sigma}_{\mathbf{res}} \tag{2-7}$$

K<sub>ae</sub> 는 음탄성상수이며 σ<sub>res</sub>는 잔류응력을 뜻한다. 초음파 출력 및 수신
소자의 방향은 잔류 응력의 방향만을 결정할 뿐, 측정대상의 크기 제한
과 복잡한 형상에서는 측정하기 어렵다. 또한, 평가된 응력은 초음파 경
로를 따라 평균 응력으로 계산되며, 국부 응력은 측정할 수 없다. 초음파
속도를 변화시키는 미세구조 또는 온도와 같은 물리적 요인들은 초음파
방법으로부터 결과를 왜곡시킬 수 있다.

### 2. 2. 2. 3. 바크하우젠 노이즈 기법

바크하우스 노이즈 기법은 재료의 자기방향 전환 횟수와 그 크기를 측정한다. 자성이 있는 금속과 일부 세라믹을 포함한 강자성체 물질을 교류 자기장에 노출시키는 방법으로 응력을 평가할 수 있다. 자기장 강 도에 따른 재료의 자속밀도는 비선형적으로 작은 점프 반응을 보인다. 불규칙한 점프, 소음과 같은 신호는 경험적으로 보정될 수 있는 재료의 탄성 응력 분포에 의해 변경된다. 그러나 바크하우젠 노이즈는 재료의 상과 미세구조의 영향을 많이 받기 때문에 미세구조의 그라디언트를 갖 는 재료에 대한 평가에는 다소 제한이 있다.
#### 2. 3. 계장화 압입시험법

계장화 압입시험법(IIT, Instrumented entration test)은 특정 기하학적 형상을 갖는 압입자를 재료의 표면에 눌러줌으로써 재료의 국부적인 저 항성을 연속적으로 측정하는 시험법이다. ASMT E2546-15과 같이 그림 2.7과 같이 시험편의 표면에 수직한 방향으로 압입자가 힘을 가하는 하 중단계와 힘이 제가되는 단계에서 나타나는 곡선을 측정하고, 이를 분석 하게 된다. 일반적으로 본 기법은 재료의 경도와 탄성계수를 평가하기 위해서는 주로 사용되었다. 최근의 많은 연구자들에 의하여 계장화 압입 시험법으로 시험시 나타나는 재료의 국부적인 기계적 반응을 통해 인장 특성[66-73], 파괴인성[74, 75] 및 잔류응력[76-83]을 평가하기 위하여 확 장되고 있다. 본 기법은 압입자의 기하학적 형상과 압입깊이의 조절을 통해 측정되는 깊이 및 면적을 선택적으로 결정할 수 있는 이점이 있다.

#### 2. 3. 1. 기본적인 물성평가

계장화 압입시험법은 기법은 기존의 경도 시험과 달리 광학적 관찰 없이 압입 하중-변위 곡선의 추출되는 변수를 활용하여 접촉 면적에 대 한 정보를 얻을 수 있다. 많은 연구자들에 의해 압입 하중-변위 곡선에 서부터 정확한 접촉깊이( $h_c$ )를 평가하여 접촉면적을 평가할 수 있도록 연구가 진행되어왔다. 정확한 압입 접촉깊이를 평가하기 위해 최대 하중 단계에서 압입자 주변을 둘러싼 재료의 탄성굽힘과 sink-in 및 pile-up 이 고려되었다. 그림 2.8은 평가방법에 따른  $h_c$ 의 차이를 보여준다. 접촉 깊이는 최대압입깊이( $h_{max}$ ) 상황에서 Eq. (2-7)로 표현되며 여기에서 탄 성굽힘은  $h_i$ , pile-up의 높이는  $h_{pile-up}$ 이다.

$$h_c = h_{max} - h_d + h_{pileup} \tag{2-7}$$

$$h_d = \varepsilon \frac{F_{max}}{S} \tag{2-8}$$

탄성굽힘의 계산은 Oliver와 Phar[84]가 Eq(2-8)에 나타낸 것과 같이 계산된다. 강성률 S(Stiffness)는 최대 힘 *F<sub>max</sub>*상태에서의 하중제거 곡선 의 기울기이며 Eq. (2-9)로써 계산이 가능하다. *ε*는 압입자의 기하학 적 상수 이며 구형압입자, 삼각뿌르 사각뿔의의 경우 0.75, 원뿔형 압입 자의 경우 0.72, 원통형의 경우 1이다. Oliver와 Phar가 제안한 접촉 깊 이 방정식은 pile-up 깊이를 고려하지 않았기 때문에, Eq. (2-8)와 (2-9) 를 결합하여 hnile-un을 포함하지 않는 he는 압입 하중-변위곡선에서 계산 할 수 있다. h<sub>vile-uv</sub>을 고려하기여 정확한 h<sub>c</sub>를 평가하기 위한 많은 연구 가 수행되었다[85-98]. 가공경화지수(n) 및 항복 변형률(*E<sub>v</sub>=O<sub>v</sub>/E*)과 같은 재료의 탄소성 기계적 특성은 hpile-up에 영향을 준다. a, 및 e,는 각각 항 복점에서의 응력과 변형률이며 E는 탄성계수를 뜻한다. S.H Kim은 자 기유사성을 갖는 사각뿔(비커스), 삼각뿔(베르코비치) 또는 원뿔형 압입 자와 같은 뾰족한 첨단부를 갖는 압입자는 hpile-up가 항복 변형률 &와 반비례관계관계가 있고 가공경화 지수 n의 영향은 무시될 수 있고, 구형 압입자의 경우에는 h<sub>pile-up</sub>가 n과 반비례관계가 있음을 밝혔다. 결과적으 로 파일업을 초래하는 재료의 횡방향 변위는 압입시험이 진행되면서 발 생된 경화구역이 재료의 가공경화지수가 높을때는 경화된 구역과 하부의 경화구배가 크어 쉽게 하부영역으로 눌러지어 낮은 pile-up 깊이를 갖게 된다. 반대로, 재료의 가공경화지수가 낮을때는 낮은 경화구역의 구배로 인해 높은 pile-up 높이를 갖게된다. 재료의 기계적 물성이 기반이된 hoile-up을 고려하여 hc 평가하기 위한 다양한 연구들이 발표되었다[85-87, 92, 93, 96].

구형압입자와 및 끝이 뾰족한 압입자(비커스, 베르코비치 및 원통)가 사용된 실제 접촉 면적  $A_c$ 는 Eq. (2-10) 및 (2-11)를 사용하여 압입자의 기하학적 형상으로부터 계산할 수 있다.

$$A_{c} = \pi (2Rh_{c} - {h_{c}}^{2}) \tag{2-10}$$

$$A_c = 24.5 \cdot h_c^2$$
 (2-11)

경도(H)와 탄성계수(E)는 Eq. (2-12) 및 (2-13)에서 평가한 Ac를 사용 하여 Eq. (2-12) 및 (2-13)을 사용하여 평가된다.

$$H = \frac{F_{max}}{A_c} \tag{2-12}$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \tag{2-13}$$

#### 2. 3. 2. 고급 물성평가

#### 2. 3. 2. 1. 인장물성

압입시험 시, 소재는 압입하중에 의해 압입자 하부에 소성역을 발생시 킨다. 소성역의 형태는 압입자에 따라 달라지게 되는데. 그중 원추형 압 입자나 비커스 압입자와 같이 기하학적 자기 유사성이 유지되는 경우에 는 압입 깊이가 증가함에 따라 소성영역의 크기가 커지지만 그 형태는 유지된다[a], 이러하 특징 때문에 압입 하중 증가에 상관없이 일정한 평 균접촉압력이 나타나게 된다. 이와 달리, 구형압입자를 이용하는 경우 압 입깊이가 깊어짐에 따라 평균접촉압력이 증가하여. 소성역의 크기만이 아니라 형태를 변형시키게 된다. 이러한 특성으로 구형 압입시험의 압입 하중-변위곡선으로부터 일축인장시험에서 얻어지는 유동특성을 유도할 수 있게 된다. 인장물성을 평가하는 알고리즘은 ISO/TR 29381로 등록되 어 있으며, 전체적인 알고리즘은 그림 2.9와 같다. 압입시험으로부터 일 축인장시험에 대응되는 대표변형률과 대표응력을 결정하고 발생한 변형 을 해석하기 위해서는 압입시험 과정 중에 압입자와 소재가 맞닿는 접촉 면적을 정확히 평가하는 것이 중요하다. 대표변형률과 대표응력은 아래 의 수식으로 표현되어 진다.

$$\sigma_r = \frac{P_m}{\psi} = \frac{1}{\psi} \frac{L_{max}}{A_c} \tag{2-14}$$

$$\varepsilon_r = \alpha \sin \gamma = \alpha \frac{a_c}{R}$$
 (2-15)

ψ 는 소성구속계수, Pm은 평균 압력, Lmax는 최대압입하중 이며, γ는 압 입자와 표면의 접촉각을 뜻한다. 연속압입시험에서는 연속적으로 하중과 변위를 측정하기 때문에 압입하는 순간의 접촉깊이를 바로 측정할 수 있 다고 판단하기 쉽다. 하지만 소재가 압입되는 순간 소재 주변에서 발생 하는 탄성변형과 소성변형에 의한 탄성 휨과 소성 파일업 현상이 발생하 기 때문에 탄성계수와 가공경화지수를 통해 이를 보정한다. 하중이 인가 될 때, 소재는 탄성, 탄소성, 완전 소성의 3단계를 거치게 된다. 구형 압 입자를 이용하는 경우, 초기의 탄성 혹은 탄소성 변형이 발생하는 구간이 굉장히 짧기 때문에 압입이 진행되는 전 구간을 완전소성변형 구 간으로 가정하고, 하중제거곡선을 통해 탄성 특성을 파악한다. 압입 시 발생하는 평균응력을 소재의 유동응력과 연계시키기 위해 슬립라인 이론 과 확장공극모델을 바탕으로 대표응력과 대표변형률을 결정한다 [b,c]. 대표응력-변형률을 바탕으로 인장곡선의 구성방정식을 적용하면, 인 장곡선을 모사할 수 있다. 이를 위해 인장곡선의 소성구간 묘사에 가장 일반적으로 사용되는 구성방정식에는 Hollomon식과 일차선형식을 활용 하고 있다. 0.2% 오프셋과 인장의 instability를 이용하여 항복강도와 인 장강도를 결정할 수 있다.

#### 2. 3. 2. 2. 파괴인성

파괴인성은 유효한 물성값을 얻기 위해 일정규격 및 크기의 시 험편을 필요로 하며, 그 시험법 자체가 복잡하고 까다롭다. 그래서 파괴 인성시험의 단점을 보완하기 위해 압입시험을 통해 파괴인성을 평 가하고자 하는 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 1980년대부터 진행되 어 온 대부분의 연구는 "indentation cracking method"라 명명 되며 세 라믹과 같은 취성재료에 뾰족한 압입자를 압입함으로써 발생하는 균열의 형태, 길이, 위치를 압입하중과 연관시켜 파괴인성을 예측하는 내용이었 다[a, b]. 최근에는 압입에 의해 파괴가 야기되지 않는 금속과 같은 연성 재료에 대한 파괴인성을 비파괴적으로 평가하는 기술이 개발되었다. 재 료의 파괴거동에 따라 취성재료 파괴인성 평가기술과 연성재료 파괴인성 평가기술로 분류된다. 취성재료의 파괴거동은 응력에 의해 제어되므로 임계하중에 대응되는 에너지를 정의하여 파괴인성을 평가한다. 이와 다 르게, 연성재료의 파괴거동은 변형률에 의해 제어되므로 임계변형률에 대응되는 에너지를 정의하여 파괴인성을 평가한다[65]. 그림 2.10에서 취 성재료와 연성재료의 파괴인성 평가기술의 원리를 비교하였다.

#### 2. 3. 3. 잔류응력 평가

#### 2. 3. 3. 1. 압입곡선에 대한 잔류응력 효과

압입시험을 통해 획득된 하중-변위곡선은 잔류응력의 부호와 크기에 따라 이동한다. 인장 잔류 응력은 동일한 압입깊이에서 응력이 없는 상 태의 힘에 비해 압입 하중을 감소시키며, 그림 2.11[83]와 같이 반대로 압축응력이 작용한다면 응력이 없는 상태와 동일한 깊이까지 압입을 할 때 압입 하중을 증가시킨다. Bolshakov는 유한요소해석을 활용하여 잔류 응력에 의한 압입 하중-변위곡선의 변화를 보여주었다[99]. Tui 등은 경 도, 강성 및 탄성 계수를 포함한 압입 매개변수의 변동에 대한 잔류 응 력의 영향을 실험적으로 조사했지만, 광학적으로 측정된 투영면적은 응 력에 따라서는 변하지 않음을 보였다[100].

#### 2. 3. 3. 2. 평균 잔류응력평가

Lee and Kwon은 압입 하중-변위곡선의 변화를 바탕으로 이축응력상 대에 적용 가능한 잔류응력 평가모델을 개발하였다. 이들은 동일한 압입 변위에서 응력이 없는 상태로부터의 압입하중의 차이를 잔류응력과 연관 시켰다[51]. 표면 잔류응력에서 압입되는 방향의 잔류응력은 자유표면으 로의 방향이기 때문에 0으로 가정이 가능하며, 나머지 성분들은 Eq (2-16)와 같이 정수압 응력과 편차압 응력으로 분해될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{res}^{x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{res}^{y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{hyd} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{hyd} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{hyd} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{(2\sigma_{res}^{x} - \sigma_{res}^{y})}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(-\sigma_{res}^{x} + 2\sigma_{res}^{y})}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(\sigma_{res}^{x} + \sigma_{res}^{y})}{3} \end{pmatrix}$$
(2-16)

여기서, σ<sup>x</sup><sub>res</sub>와 σ<sup>y</sup><sub>res</sub>는 서로 수직이며 시험 표면에 평행한 응력 성분이 고, σ<sub>hyd</sub>는 정수압 응력으로 (σ<sup>x</sup><sub>res</sub>+σ<sup>y</sup><sub>res</sub>)/3이다. 편차응력의 z-방향(압입방 향) 성분을 압입 하중-변위 곡선에서 나타나는 하중의 차이를 접촉면적 으로 나눠줌으로써 상관시켰으며 이를 실험적으로 검증하였다[83]. 따라 서, 잔류 응력은 Eq. (2-17) 및 (2-18)로 표현할 수 있다.

$$\sigma_{res}^{\chi} = \frac{3}{1+p} \frac{\Delta L}{A_c} \tag{2-17}$$

$$\sigma_{res}^{\mathcal{Y}} = \frac{3p}{1+p} \frac{\Delta L}{A_c} \tag{2-18}$$

평면 내 주응력은 σ<sup>x</sup><sub>res</sub>와 σ<sup>y</sup><sub>res</sub>이고, p는 응력의 비율(=σ<sup>y</sup><sub>res</sub>/σ<sup>x</sup><sub>res</sub>), ΔL은 응력이 없는 곡선과 있는 곡선 사이의 하중 차이다.

#### 2. 3. 3. 3. 잔류응력의 방향성 평가

#### 2. 3. 3. 3. 1. 누프(Knoop) 압입시험

Lee는 압입 시험에서 발생되는 pile-up 높이를 측정하여 주응력 비(*p*) 를 평가하는 방법을 제안했다[69]. Han과 Choi[102]는 응력방향성을 측 정하기 위해 대각선 길이 비율이 7.11의 비등방성 형상을 가지고 있는 누프(Knoop) 압입자를 사용하는 모델을 제안했다. 방향에 따라 응력의 크기가 다를 때 비등방 압입자를 각도에 따라 압입시험을 수행하면 압입 자의 방향에 따른 응력 민감도가 다르기 때문에 압입 하중-변위 곡선에 서 하중의 차이를 나타내게 된다. 방향별 압입 하중의 차이를 이축응력 상태에 대해 잔류응력의 크기와 상관시키기 위해 변환계수 α<sub>⊥</sub> 및 α<sub>//</sub> 를 도입했다. 그림 2.12의 응력과 하중차이 관계는 Eq. (2-19)과 (2-20) 으로 표현할 수 있다.

$$\Delta L_1 = \alpha_{//} \sigma_{res}^{\mathcal{Y}} + \alpha_\perp \sigma_{res}^{\mathcal{X}} \tag{2-19}$$

$$\Delta L_2 = \alpha_{//} \sigma_{res}^x + \alpha_\perp \sigma_{res}^y \tag{2-20}$$

변환 계수( $\frac{\alpha_{//}}{\alpha_{\perp}}$ )의 비율은 그림 2.13[102]과 같이 압입변위나 잔류응력 의 상태에 관계없이 7.11 비율의 누프 압입자에서는 0.34로 일정하다. 또한, Knoop 압입으로부터의 하중 차이 비율은 변환 계수와 방향별 응 력 성분의 비율로 나타낼 수 있습니다.

$$\frac{\Delta L_x}{\Delta L_y} = \frac{\alpha_{//} \sigma_{res}^x + \alpha_\perp \sigma_{res}^y}{\alpha_\perp \sigma_{res}^x + \alpha_{//} \sigma_{res}^y} = \frac{\frac{\alpha_{//}}{\alpha_\perp} + \frac{\sigma_{res}^y}{\sigma_{res}^x}}{1 + \frac{\alpha_{//} \sigma_{res}^y}{\alpha_\perp \sigma_{res}^x}} = \frac{\frac{\alpha_{//}}{\alpha_\perp} + p}{1 + \frac{\alpha_{//}}{\alpha_\perp} p}$$
(2-21)

따라서, 두 개의 하중 차이, 사전에 알고있는 변환계수비율 및 주응력 방향을 알고 있다면 주응력의 비율을 Eq. (2-22)으로 정의할 수 있다.

$$p = \frac{\sigma_{res}^{y}}{\sigma_{res}^{x}} = \frac{\frac{\Delta L_{x} - \alpha_{//}}{\Delta L_{y} - \alpha_{\perp}}}{1 - \frac{\alpha_{//} \Delta L_{x}}{\alpha_{\perp} \Delta L_{y}}}$$
(2-22)

Eq. (2-17), (2-18) 및 (2-22) 활용하여 σ<sub>res</sub><sup>x</sup> 와 σ<sub>res</sub><sup>y</sup> 를 평가할 수 있
다. Kim은 4개의 각도별 누프 압입 하중-변위곡선으로 잔류부터 응력의
주응력 방향(θ<sub>p</sub>)과 응력비(p)를 평가하기 위한 모델을 개발하였다[103].
각도 간격이 45도인 두 세트의 누프 압입시험으로 수행되어 얻은 파라미

터를 기반으로 Eq (2-23) 모델을 활용하여 두 개의 응력비를 평가할 수 있다.

$$p' = \frac{\sigma_{res}^{90}}{\sigma_{res}^{0}} = \frac{\frac{\Delta L_0}{\Delta L_{90}} - \frac{\alpha//}{\alpha_{\perp}}}{1 - \frac{\alpha//}{\alpha_{\perp} \Delta L_{90}}}, \quad p'' = \frac{\sigma_{res}^{135}}{\sigma_{res}^{45}} = \frac{\frac{\Delta L_{45}}{\Delta L_{135}} - \frac{\alpha//}{\alpha_{\perp}}}{1 - \frac{\alpha//}{\alpha_{\perp} \Delta L_{45}}}$$
(2-23)

Eq. (2-24) 및 (2-25)에 표시된 평면 응력 변환 방정식을 사용하여,

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{res}^{0} + \sigma_{res}^{90}}{2} + \frac{\sigma_{res}^{0} + \sigma_{res}^{90}}{2} \cos(2\theta) + \tau_{xy} \sin(2\theta)$$
(2-24)

$$\tan\left(2\theta_p\right) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{res}^0 - \sigma_{res}^{90}} \tag{2-25}$$

θ<sub>p</sub>와 p는 Eq. (2-23)에서 Eq. (2-25)까지의 수식을 사용하여 Eq
(2-26)와 (2-27)로 표현할 수 있다. 여기서 σ<sub>1</sub>과 σ<sub>2</sub>는 최대 및 최소 주응
력이다.

$$\tan\left(2\theta_p\right) = \frac{(1-p')(1+p'')}{(1-p')(1+p'')} \tag{2-26}$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{(1+p')\cos(2\theta_p) - (1-p')}{(1+p')\cos(2\theta_p) + (1-p')}$$
(2-27)

#### 2. 3. 3. 3. 2. 수정된 베르코비치(Modified Berkovich) 압입시험

Kim[104]과 Xu[105]는 삼각뿔 베르코비치 압입자를 한 방향으로 확장 하여 수정된 베르코비치 압입자로 새로 제안하였고 하였고새로운 인덴터 형상를 제안하였고, 누프압입자 제작이 어려운 나노 스케일에서 비등방 압입시험이 가능하도록 하였다[104, 105]. 수정된 베르코비치 들여쓰기는 대각선 길이 비율이 3이고 세 개의 표면을 포함하며, Knoop 들여쓰기와 달리 고유한 교차점이 있다. 이 특성은 수정된 베르코비치 압입자는 압 입자 끝단의 뭉뚝함을 제거해줌으로써 나노 스케일 압입시험에 사용하기 용이하게 한다.

#### 2. 3. 3. 3. 3. 디지털 이미지 상관법(DIC)

Kim은 그림 2.14[106]와 같이 디지털 이미지 상관법을 활용하여 잔류 응력이 존재하는 상황에서 압입시험에 의해 발생되는 방향별 압입표면 변위 분석을 통하여 잔류응력의 방향성과 주응력 방향을 평가하는 방법 을 제안하였다. 원뿔형 압입자는 잔류응력이 없는 상황에서 재료가 등방 성 재료라는 가정하에 압입시험 수행시 방향별 같은 변위를 발생시킨다. 재료 표면에 잔류응력이 존재하고 그 위치에 압입시험이 수행되면, 압입 시험에 따라 표면 변위의 크기가 변화되게 된다. 응력유무에 따른 압입 변위의 차이를 기반으로 하여 잔류응력의 주응력방향과 응력비를 방사형 변위를 분석하여 평가할 수 있는 모델을 제안하였다.

#### 2. 3. 4. 기존 기법의 한계

계장화 압입시험을 활용하여 잔류응력을 평가하기 위해서는 평가의 대상이되는(잔류응력이 존재하는) 시편 뿐만 아니라 응력이 없는 상태의 시편 또한 존재하여야 한다. 잔류응력의 발생되는 원인이 되는 요인을 확인하여 볼 때 무응력 상태의 재료를 확보하는 것에 어려움이 있을 수 있다. 일반적으로 재료는 사용 목적에 맞게 가공되는 압출, 단조, 인발 및 압연과 같은 공정과정을 거치게 되며 이러한 가공 공정은 소재에 위 치별 불균일한 소성변형을 주게되며, 이러한 공정은 소성변형과 함께잔 류응력을 유발 시킨다. 마차가지로 밀링, 연삭 및 피닝 등과 같은 표면 가공 공정도 재료 표면에 소성변형과 함께 잔류응력을 유발한다. 또한 용접 및 담금질과 같은 큰 열적구배가 있는 공정 또한 재료의 팽창과 수 축이 동반하여 소성변형 또는 상변화 등과 함께 잔류응력을 유발시킨다. 앞서 제시된 공정들은 흔히 사용되고 있으며, 잔류응력이 유발되는 대표 적인 예이다. 소성변형 또는 기타 영향들과 함께 발생된 잔류응력을 계 장화 압입시험법으로 평가하기위해서는 무응력 상태의 소재를 확보하여 평가하는 것이 주요한 이슈가 된다. 재료의 연속성을 제거해 주는 소재 절단 또는 추가적인 열처리를 통하여 무응력 상태를 제작할 수 있지만. 소재의 절단은 재료를 파괴시키는 것으로 가동중 구조물이나 파이프라인 과 같은 실 현장에서는 적용하기에 어려움이 있다. 또한, 열처리를 통한 잔류응력 완화는 기존 설계된 소재의 상변화를 유발 시킬 가능성이 있 어, 설계 물성의 변화를 줄 수 있기 때문에 어려움이 있다.

따라서, 비파괴적이며 현장성이 높은 계장화 압입시험법을 현장 시험 법으로 적용하기 위해서는 평가의 대상이되는(잔류응력이 존재하는) 소 재의 탄소성 해석을 통해 잔류응력에도 변하지 않는 고유의 값들을 활용 하여 응력이 없는상태를 유추하는 것이 필요하다.



그림 2.1. 강화유리판의 외부하중 및 잔류응력의 분포개략도 [1]



그림 2.2 잔류응력에 의한 영향. (a) 변형된 구조물, (b) 알루미늄의 균열

(b)

(a)





(b) 링코어 기법



(c) 홀관통법



(d) 슬리팅 기법

그림 2.3 파괴적인 잔류응력 평가법

a<sub>11</sub>







그림 2.4 홀드릴링 기법의 교정 계수



그림 2.5 순차적 절편 기법



그림 2.6 등고선기법



그림 2.7 계장화 압입시험법의 압입 하중-변위곡선



## 그림 2.8 압입 접촉 깊이의 정의



## 그림 2.9 ISO/TR 29381 의 인장물성 평가 흐름도

	Brittle materials	<b>Ductile materials</b>
Fracture surface	PPP	
Deformation	Relatively little or no deformation	Large plastic deformation
Criterion	Stress controlled critical fracture stress at the crack tip $(\sigma_f)$	Strain controlled critical fracture strain at the crack tip (e <sub>t</sub> )
Formation of fracture energy	When stress reached critical fracture stress	When strain reached critical fracture strain
	$\hat{\Delta}$	$\hat{\nabla}$
	<b>Brittle Fracture Model</b>	<b>Ductile Fracture Model</b>

그림 2.10 취성재료와 연성재료의 파괴인성 평가기술의 원리



그림 2.11 응력에 따른 압입 하중-변위 곡선의 변화



그림 2.12 2 축 잔류응력에 대한 Knoop 압입 하중-변위곡선



2.13 압입 깊이에 따른 변환계수비



그림 2.14 원뿔형 압입에 의해 발생되는 표면변위

# 이론적 모델링

## 목차

3. 1. 연구 동기	55
3.1.1 소개	55
3.1.2 유한요소해석 접근법	57
3. 2. 무응력 상태 유추를 통한 잔류응력 평가	13
3.2.1. 이론적 모델링	58
3.2.1.1. 무응력 상태의 압입시험을 통한 총 에너지 ··	58
3.2.1.2. 무응력 상태의 압입시험을 통한 탄성 에너지 ••	63
3.2.1.3. 압입 에너지, 경도 및 탄성계수간 관계	72
3.2.2. 유한요소해석 검증	76

## 3.1. 연구 동기

#### 3.1.1 소개

단조, 압출 및 압연 등과 같은 형태변형을 유발하여 소성변형 가공을 하는 과정에서 재료가 겪는 불균일한 소성변형에 의하여 잔류응력이 발 생하며, 연삭 또는 숏피닝과 같은 표면 가공 공정에서도 발생한다. 주조, 담금질 및 용접과 같이 큰 온도의 구배가 발생되는 가공 공정, 방사선 조사에 따른 열화 및 소재 환경에 따른 부식과 같이 소재의 상, 조직 및 밀도가 변화되는 과정에서도 잔류응력이 발생한다. 그림 3.1은 용접이 수 행되는 과정에서 재료가 받는 변형률을 측정하기 위하여 용접부의 가까 운 위치부터 순차적으로 변형률 게이지를 부착한 것이다[107]. 해당 상황 에서 용접이 수행되게 되면 용접열에 따른 소재의 팽창과 수축에 의하여 재료의 변형이 발생되게되고 그림 3.2와 같이 용접부와 가까운 위치에는 매우 과도한 변형이 발생하고 멀리 떨어진 위치일수록 변형이 적게 발생 됨을 확인할 수 있다. 이러한 변형률은 때로는 재료의 항복 변형률이상 으로 발생하여 소재를 그림 3.3과 같이 소성변형을 발생하게 된다. 과도 변형에 의한 소성변형 뿐만이 아니라 잔류응력까지 발생하게 된다. 이처 럼 재료의 공정과정에서 공정기법에 따른 불균일한 소성변형은 대부분

잔류응력을 수반하게 된다. 잔류응력을 평가하기 위해 다양한 기법이 개 발되었으며, 계장화 압입시험을 활용하여 잔류응력을 평가하기 위해서는 앞선 2 장에서 언급한 바와 같이. 잔류응력 유무의 시편에서 압입 하중-변위 곡선을 평가하여야 하기 때문에 평가의 대상소재뿐만이 아니라 대 상소재의 무응력 상태의 시험편이 필수적으로 필요하게 된다[83]. 평가 대상의 무응력 상태의 소재를 확보하기 위하여는 재료의 연속성을 제거 해 주는 소재 절단 또는 추가적인 열처리를 통하여 무응력 상태를 제작 할 수 있지만, 소재의 절단은 재료를 파괴시키는 것으로 가동중 구조물 이나 파이프라인과 같은 실 현장에서는 적용하기에 어려움이 있다. 또한, 열처리를 통한 잔류응력 완화는 기존 설계된 소재의 상변화를 유발 시킬 가능성이 있어. 설계 물성의 변화를 줄 수 있기 때문에 무응력 소재의 확보에 어려움이 있다. 따라서, 다양한 장점이 있는 계장화 압입시험법을 현장 시험법으로 적용하기 위해서는 평가의 대상이되는 소재의 탄소성 해석을 통해 잔류응력에도 변하지 않는 고유의 값들을 활용하여 응력이 없는상태를 유추하는 것이 필요하다.

## 3.1.2 유한요소해석 접근법

유한요소해석은 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 사용하여 수행되었다. 2D 축대칭 모델을 활용하였으며, 원뿔형 압입자는 완전 강체를 가정한 별개의 강체로 모델링되었다. 원뿔형 강제 압입자와 변형가능한 시편 간 의 상호작용은 "면대면 접촉"으로 모델링되었고 마찰계수를 적용하였다. 모재는 변형이 가능한 모델로써 시험부위의 최소 메시크기는 0.001로 설 정하고 13,860개의 4절점 축대칭 요소들로 구성되었다. 유한요소해석에서 압입자는 최대 0.1 (=100 µm) 만큼 압입되도록 설정되었다. 잔류응력은 모재에 압력으로 입력되어졌으며, 압력인가(=응력인가)에 따른 표면의 팽창 또한 고려되어 최대 압입깊이 0.1을 설정하였다. 유한요소해석의 모 델의 유효성을 확인하기 위하여 STS304 소재의 기계적 물성을 인장시 험을 통해 평가하여 입력하여 해석을 통해 얻어낸 압입 하중-변위곡선 과 실제 STS304 소재에 원뿔형 압입자를 활용한 압입시험을 수행하여 얻은 압입 하중-변위곡선을 비교하였다. 평가된 압입 하중-변위곡선은 그림 3.2와 같이 잘 일치함을 보였다.

본 연구에서 유한요소해석에 활용된 물성은 표 3.1 과 같이 구성되었 다. 사용된 Input 물성은 일반적인 금속의 경우를 모사하였으며 잔류응 력은 항복강도 대비 - 50 %, 0, 50 %의 경우로 하여 총 81 가지의 경우 를 해석하였다.

## 3.2. 무응력 상태 유추를 통한 잔류응력 평가

3.2.1. 이론적 모델링

## 3.2.1.1. 무응력 상태의 압입시험을 통한 총 에너지

3.2.1.1.1 응력에 따라 변하지 않는 지수 m

계장화 압입시험을 통해 얻은 압입 하중-변위곡선의 하중이 가해지는 Loading 부분은 많은 연구자들에 의해 수식으로 표현 되었다. Sneddon 은 Loading 곡선을 Eq. (3-1)과 같이 표현하였다[108].

$$L = \alpha h^m \tag{3-1}$$

L은 압입시 발생하는 하중, α와 m은 지수 및 상수를 뜻한다. 압입 Loading 곡선에서 지수 m 값은 압입자의 기하학적 형상에 의존한다 밝 혀져 있다. 원통형 압입자의 경우에는 1 값을 갖으며, 원뿔형 압입자의 경우 2, 구형 압입자의 경우에는 1.5를 갖는다. 실제 원뿔형 압입자의 경
우 가공상의 한계와 사용에서 발생하는 압입자 무뎌짐에 의해 2보다 낮 은 값으로 변화되기도 한다. 같은 압입자를 활용하여 시험이 수행되면, 지수 m 값은 동일한 상수로써 나타나기 때문에 m 값으로 두어 변하지 상수로 결정되며 재료에 따라 알파값은 변화되게 된다[22]. 수행된 유한 요소해석을 활용하여 Loading 곡선을 분석해본 결과 그림 3.5와 같이 81 개의 경우에 대하여 일정한 값을 나타내는 것을 확인하였다.

그림 3.6은 최대압입깊이를 동일하게 잔류응력에 따른 압입 하중-변 위곡선을 나타낸 것이다. 곡선 A는 잔류응력이 존재하는 경우를, 곡선 B 는 잔류응력이 존재하지 않는 경우를 표현한다. Eq. (3-1)을 활용하여 두 Loading 곡선을 Eq. (3-2)와 (3-3)으로 나타낸 후 두 식을 나누어 주 게 되면 Eq. (3-4) 로써 나타내어진다.

$$L^A = \alpha^A h^m \tag{3-2}$$

$$L^B = \alpha^B h^m \tag{3-3}$$

$$\frac{L^{B}}{L^{A}} = \frac{\alpha^{B}h^{m}}{\alpha^{A}h^{m}} = \frac{\alpha^{B}}{\alpha^{A}} = constant$$
(3-4)

여기에서 잔류응력이 없는 상태에서 얻을 수 있는 α<sup>B</sup> 는 잔류응력이 발생됨에 따라 α<sup>A</sup>로 변함을 알 수 있으며, 특정 깊이에서의 하중의 비 가 어떠한 상수임을 알 수 있다. 결과적으로 앞서 언급한 상수(α<sup>B</sup>/α<sup>A</sup>) 는 잔류응력 유무에 따른 압입 하중-변위곡선의 특정깊이에서의 하중의 비( $L^B/L^A$ ) 와 같다 할 수 있다. 수행된 유한요소해석 중 가공경화지 수 0.1, 항복강도 450 MPa, 탄성계수 200 GPa 물성에 대하여 잔류응력/ 항복강도가 - 0.5, 0 및 0.5 인 경우를 나타낸 것이다. 특정 깊이에서의 하중의 비와 응력 유무에 따른 Eq. (3-4)에서 표현된 상수( $\alpha^B/\alpha^A$ )를 비 교하였다. 유한요소해석에서의 데이터가 한 깊이에서 비교될 수 있는 지 점을 두 곳은 최대압입깊( $h_{max}$ )이 지점과 h=0.067 지점을 결정하였고 해 당 깊이에서의 응력비  $L^B/L^A$ 와  $\alpha^B/\alpha^A$ 를 비교해 볼 때 매우 유사한 값임이 확인이 가능하다.

### 3.2.1.1.2 무응력 상태의 총 에너지 평가

계장화 압입시험을 활용하여 잔류응력이 존재하는 대상에서 측정된 Loading 곡선을 기반으로 무응력 상태의 Loading 곡선을 유추하고 이를 적분하여 무응력 상태의 압입시험에서 발생된 총 에너지를 구하고자 한 다.

그림 3.6에서와 같이 무응력에서 발생된 Loading 곡선은 Eq. (3-5)와 같이 표현할 수 있으며 Eq. (3-4)를 활용하여 Eq. (3-6)과 같이 표현이 가능하다.

$$f^B(h) = \alpha^B h^m \tag{3-5}$$

$$f^{B}(h) = \alpha^{B}h^{m} = \alpha^{A}h^{m}\frac{L^{B}_{\max}}{L^{A}_{\max}} = \alpha^{A}h^{m}\frac{L^{B}_{\max}}{L^{A}_{\max}}$$
(3-6)

이를 압입깊이(h)에 대하여 0에서부터 최대압입깊이(h<sub>max</sub>)까지 적분함 으로써 Eq. (3-7) 과 같이 총 에너지가 계산된다.

$$W^{B}_{Total} = \int_{0}^{h_{\max}} f^{B}(h) dh \qquad (3-7)$$
$$= \int_{0}^{h_{\max}} \alpha^{A} h^{m} \frac{L^{B}_{\max}}{L^{A}_{\max}} dh = \frac{h_{\max} L^{B}_{\max}}{m+1}$$

제안된 수식은  $L^{B}_{max}$  를 알고 있어야  $W^{B}_{Total}$  가 평가가 가능하며, 유한요소해석 결과에서는 모든 값을 알고 있기 때문에 해석적 검증을 수 행하였다. 그림 3.8과 같이 제안된 수식을 통한 B의 총 에너지 계산 및 하중-변위곡선의 Loading 곡선을 적분하여 얻은 총 에너지값이 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

## 3.2.1.2. 무응력 상태의 압입시험을 통한 탄성 에너지

#### 3.2.1.2.1 Unloading 곡선의 변수

계장화 압입시험에서 얻을 수 있는 압입 하중-변위곡의 Unloading 곡 선은 재료의 탄성과 관련된 주요한 정보를 포함하고 있다. 재료는 고유 의 성질에 따라 3 가지의 거동을 보일 수 있다. 그림 3.9와 같이 완전 탄 성 소재와 같은 경우에는 압입시험 시 얻어지는 하중-변위 곡선에서 Unloading 곡선은 재료의 완전한 탄성 회복에 의해 Loading 곡선과 중 첩되어 나타내게 되며, 완전 소성 재료에서는 압입시험 시 눌린 면적이 소성변형이 되고 탄성회복을 하지 않기 때문에 Unloading 곡선은 최대 압입깊이지점에서 발생된 하중이 0 이 될 때 까지 눌러진 깊이가 유지된 다. 일반적 소재 거동인 탄소성 거동을 하는 재료는 그림 3.9의 (c) 와 같이 Unloading 곡선이 Loading 곡선과 유사한 형태로 나타난다[109]. Unloading 곡선의 Unloading 곡선의 초반부의 기울기를 강성도(S, Stiffness)으로 표현되며, ISO-14577-1에 두 가지의 강성도 계산법이 제 시되어 있다. 첫 번째는 Unloading 곡선의 하중을 기준으로 20 ~ 98% 데이터를 Eq. (3-8)의 형태로 나타낸 후 미분을 하여 최대압입깊이 지점 에서의 기울기로써 평가하는 방법과 하중기준 80 ~ 98%의 데이터를 직

선으로 표현하여 직선의 기울기를 강성도로 보는 방법이 있다. Unloading 곡선은 첫 번째 방법으로 평가하는 것이 수식으로 표현이 잘 되어 일반적이며, 직선 표현법은 고소성재료에 사용되는 제약사항이 있 다.

$$L = a \left( h - h_f \right)^b \tag{3-8}$$

평가된 S는 Eq. (2-8)의 접촉깊이를 평가하는데 사용되며, 이 접촉깊 이는 Eq. (2-10) 및 Eq. (2-11)의 접촉면적( $A_c$ )을 계산하는데 활용된다. 또한, 평가된 접촉면적  $A_c$ 은 강성도 S와 함께 Eq. (2-13)과 같이 환산 탄석계수  $E_r$ 을 평가하는데 사용된다.

## 3.2.1.2.2 강성도와 Unloading 곡선 기울기 Q 관계

강성도 S는 Unloading 곡선의 초반부의 정보를 대변한다. 본 연구에 서는 Unloading 곡선의 초반부가 아닌 전체적인 부분을 대변하기 위해 서 전체 영역에 대한 직선 표현값인 Q를 도입하였다. 그림 3.10과 같이 Unloading 곡선의 전체영역을 포함하여 직선함수화 했을때의 기울기 값 을 뜻한다. 직선함수화 된 Q는 그림 3.11의 (a)와 같이 최대하중과 최대 압입깊이를 지나지 않게되며, 하중이 0 일때의 깊이 값인  $h'_f$  가  $h_f$ 와도 차이가 커지게 된다. 따라서 Q를 최대하중과 최대압입깊이를 지나가도록 보정해줌으로써 h'f도 hf 값과도 유사하게 된다. 제안된 방법대로 보정 된 Q (이하 Q)가 S 와 어떠한 관계를 갖는지 수행된 유한요소해석을 통 하여 확인하고자 하였다. 결과는 그림 3.12와 같다. Q 와 S는 소재의 가 공경화 지수가 낮을수록, 항복강도가 낮을수록, 탄성계수가 높을수록 높 아지는 경향을 보였다. 그림 3.10에서와 같이 Q의 기울기보다 S의 기울 기가 가파르기 때문에 S 가 더 높을 것으로 예상이 되며 결과 또한 그 렇다. 결과 값을 분석하여볼 때 S의 값이 Q의 값보다 평균적으로 13.8% 높은 수치를 보였다. 이를, 평균오차를 반영하여 Eq. (3-9)와 같이 표현 하면 그림. 3.13과 같이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며 이때의 평균 오차는 1.11%를 보여준다.

$$Q = 0.86227 \cdot S$$
 (3-9)

#### 3.2.1.2.3 잔류응력 및 물성에 따른 압입면적과의 관계

압입시험에서 압입면적은 매우 중요한 정보로써 활용된다. 많은 연구 자들은 광확현미경 또는 전자주사현미경과 같은 광학적 측정이 없이 이 를 평가하고자 하는 연구를 수행하여 왔다. 그림 3.14의 (a)와 같이 압입 시험에서 최대하중시점에서 압입자가 소재와 맞닿아 있는 깊이( $h_c$ )를 기 반으로 기하학적 형상으로써 계산된 면적을 접촉면적이라 한다[22]. 압입 자가 하중을 재료표면에 가하게 되면 접촉면적 하부에 소성역이 확장을 하게됨과 동시에 압입자 주변부로는 pile-up 및 sink-in이 발생되게 된 다. 이러한 것들을 고려하여야 정확한 접촉깊이를 측정할 수가 있다. 일 반적으로 Oliver와 Pharr가 제안한 Eq. (3-10)을 활용하여 평가된다[84].

$$h_c = h_{\max} - \epsilon \left(\frac{L_{\max}}{S}\right) \tag{3-10}$$

하지만, pile-up 및 sink-in 거동은 그림 3.15와 같이 재료의 물성에 따라서 변하기도 하며[23] 그림 3.16과 같이 잔류응력에 의해서도 변화된 다[110]. Tsui는 그림 3.17과 같이 볼트를 조정하여 소재의 굽힘을 줄 수 있는 지그를 제작하여 탄성변형을 주어 응력을 인가하였다[22]. 빨간색으 로 표시된 소재가 늘어나는 부분은 일축인장응력이 발생하고, 파란색으 로 표시된 모여지는 부분은 일축압축응력이 발생한다. 일축응력이 발생 된 평면에 나노압입시험을 수행하여 하중-변위곡선을 획득하여 이를 분 석하였다. 그림 3.18은 압입 하중-변위 곡선으로부터 계산된 접촉면적의 결과를 보여준다. 전류응력에 따라 접촉면적의 값이 변하며, 잔류응력의 양의 값으로 커질수록 접촉면적이 크게 평가되는 것을 보였다. 이에 대 한 결과를 이용하여 탄성계수와 경도는 그림 3.19와 같이 평가된다. 재료 고유의 물성인 탄성계수와 경도가 잔류응력에 따라 평가된 값이 변화하 는 것을 확인할 수 있다[22].

연구자들은 이와같은 한계를 극복하기위해 투영면적을 활용하였다. 투 영면적이란 광확적 장비를 이용하여 압입시험이 Unloading까지 완료된 후 발생된 표면 면적을 측정하는 것이다. 이는 pile-up 또는 sink-in에 대한 반영이 되어 나타난 최종적인 면적이기 때문에 잔류응력에 따라 변 하지 않는다. 이는 그림 3.20과 같다. Tsui는 앞서 언급한 시험에서 투영 면적을 광학으로 측정하여 평가하였다[22]. 기존의 응력에따라 계산된 접 촉면적이 변화를 보였던 것과 다르게 일정한 투영면적을 보여주고 있다. 이러한 투영먼적을 통해 계산된 경도와 탄성계수는 그림 3.20 (b)에 나 타나 있다. 투영면적을 활용하면 잔류응력에의해서도 변화하지 않는 재 료고유의 물성값인 탄성계수와 경도를 평가할 수 있다.

#### 3.2.1.2.4 무응력 상태의 탄성 에너지 평가

그림 3.6에서 잔류응력 유무에 따른 압입 하중-변위곡선의 예시를 표 현하였다. 탄성영역에서 인가되어있는 잔류응력은 재료고유물성에 영향 을 주지 않기 때문에 A, B 소재에 대하여 경도(H)는 동일하며 Eq. (3-11)과 같다. 경도는 가해지는 하중을 면적으로 나눈 값으로 Eq. (3-12)로 표현되며 이를 이항시켜 Eq. (3-13)으로 표현이 가능하다. 모든 면적은 잔류응력에 변하지 않는 투영면적( $A_{opt}$ )를 사용하였다. 잔류응력 유무에 따서 평가된 하중과 투영면적은 Eq. (3-13)과 같이 면적의 비와 최대하중의 비로 표현이 가능하다.

$$H^A = H^B \tag{3-11}$$

$$\frac{L_{max}^{A}}{A_{opt}^{A}} = \frac{L_{max}^{B}}{A_{opt}^{B}}$$
(3-12)

$$\frac{A_{opt}^B}{A_{opt}^A} = \frac{L_{max}^B}{L_{max}^A} \tag{3-13}$$

탄성계수( $E_r$ ) 또한 재료의 고유의 물성이다. 잔류응력에따라 변하지 않기 때문에 경도와 마찬가지로 A, B 두 곡선을 분석한 값은 동일하여 야 한다 Eq. (3-14). 탄성계수는 Eq. (2-13) 과 같이 나타낼 수 있으므로 Eq. (3-15)와 같이 표현이 가능하다. 면적을 이항하여 다시 나타내면 Eq. (3-16)으로 표현이 된다.

$$E_r^A = E_r^B \tag{3-14}$$

$$\frac{S^{A}}{\sqrt{A_{opt}^{A}}} = \frac{S^{B}}{\sqrt{A_{opt}^{B}}}$$
(3-15)

$$S^{\rm B} = \frac{\sqrt{A_{opt}^{B}}}{\sqrt{A_{opt}^{A}}} S^{\rm A}$$
(3-16)

앞서 관계를 확인한 Eq. (3-13)과 (3-16)을 종합하여 보면 Eq. (3-17) 과 같이 표현할 수 있다.

$$S^{\mathrm{B}} = \frac{\sqrt{L_{max}^{\mathrm{B}}}}{\sqrt{L_{max}^{\mathrm{A}}}} S^{\mathrm{A}}$$
(3-16)

따라서, 앞서 언급된 B 곡선의  $Q_B$  는 Eq. (3-17)과 같이 표현이 표현 이 가능하다.

$$Q^{B} = 0.86227 \cdot S^{B} = 0.86227 \cdot \frac{\sqrt{L_{max}^{B}}}{\sqrt{L_{max}^{A}}} S^{A}$$
(3-17)

그림 3.21은 잔류응력에 따른 Unloading 곡선을 앞서 언급한 Q의 기 울기를 갖는 직선으로 가정하였다. Unloading 곡선은 Eq. (3-18)와 같이 표현하였고  $h'_f$  는 하중이 0 일 때의 깊이를 뜻한다. B 곡선에서 깊이가 최대압입깊이 인 경우 Eq. (3-19)과 같이 표현되어 정리하면  ${h'}_f^B$  를 Eq. (3-20)와 같이 표현이 가능하다.

$$g^{B}(h) = Q^{B}(h - h'_{f}^{B})$$
 (3-18)

$$g^{B}(h_{max}) = L^{B}_{max} = Q^{B}(h_{max} - h'^{B}_{f})$$
(3-19)

$$h'_f^B = h_{max} - \frac{L_{max}^B}{Q^B}$$
(3-20)

무응력 상태인 B 곡선의 Unloading 곡선을  $h'_f^B$ 에서부터  $h_{\max}$  적분하 여 탄성에너지( $W_{d.}^B$ )를 구하기 위하여 앞선 관계들을 활용하여 Eq. (3-21)과 같이 표현된다.

$$\begin{split} W_{el.}^{B} \\ &= \int_{h'_{f}}^{h_{max}} g^{B}(h) \, dh = Q^{B}(\frac{1}{2} \cdot h_{max}^{2} - h'_{f}^{B} \cdot h_{max} - \frac{1}{2} \cdot h'_{f}^{B\,2} + h'_{f}^{B\,2}) \\ &= Q^{B}(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot h_{max} - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot h'_{f}^{B})^{2} = Q^{B}(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot h_{max} - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (h_{max} - \frac{L_{max}^{B}}{Q^{B}}))^{2} \\ &= \frac{(L_{max}^{B})^{2}}{2 \cdot Q^{B}} = \frac{(L_{max}^{B})^{2}}{2 \cdot Q^{B}} = \frac{(L_{max}^{B})^{2}}{2 \cdot 0.86227 \cdot S^{A}} \cdot \frac{\sqrt{L_{max}^{A}}}{\sqrt{L_{max}^{B}}} \\ &= \frac{L_{max}^{B}\sqrt{L_{max}^{A} \cdot L_{max}^{B}}}{2 \cdot 0.86227 \cdot S^{A}} \end{split}$$
(3-21)

따라서, B 곡선의 탄성에너지는 A와 B의 최대하중과 A에서 평가된 강성도로 표현이 가능하다.

제안된 수식을 통해 계산된  $W_{d.}^{B}$ 과 실제 곡선을 적분하여 평가된 탄 성에너지를 비교하기위해 앞서 수행된 유한요소해석을 활용하여 평가하 였다. 결과는 그림 3.22 이며, 제안된 수식의 결과값이 다소 높게 평가됨 을 보인다. 이는 직선으로 가정되어 실제 곡선형태의 적분보다 더 많은 부분이 계산괸 것으로 판단된다. 평균적인 오차가 7.75 %로 일정하게 발 생하였으며, 제안식의 결과를 평균 오차만금 낮춰주어 Eq. (3-22) 와 같 이 계산하였다. 결과는 그림 3.23과 같으며 잘 일치됨을 보이고 여기서의 평균오차는 2.82 % 임을 확인하였다.

#### 3.2.1.3. 압입 에너지, 경도 및 탄성계수간 관계

압입 하중-변위곡선을 분석하여 평가할 수 있는 물성중 대표적인 것 은 경도와 탄성계수가 있다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 해당 물성을 평가하기 위해서는 압입 시 발생하는 면적에 대한 정보가 필요로 하게된 다. 추가적인 시험으로 투영면적을 활용하지 않고 압입 하중-변위곡선에 서부터 분석하여 면적에 대한 정보를 얻고자 하지만, Pile-up 또는 sink-in과 같이 물성 및 잔류응력에 따라 변동되는 사항들을 고려하여 정확한 접촉깊이를 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 이에, 많은 연구 자들은 접촉면적에 대한 정보 없이 경도와 탄성계수를 평가하고자 하였 으며, 압입 에너지가 활용된 연구를 수행하였다. Cheng[111]은 유한요소 해석을 활용하여 압입시험으로 계산된 경도와 탄성계수의 비가 항복강도 와 탄성계수의 비와의 관계(그림 3.24 (a)) 및 압입 에너지간의 비와 항 복강도와 탄성계수의 비의 관계(그림 3.24 (b)) 확인하였다. 이는 압입에 너지의 비와 경도/탄성계수의 비와 선형적인 관계가 있는 것으로 확인되 며 이를 차원해석을 통하여 풀어낸 기존 연구이다. 뒤이어 많은 연구자 들이 이 관계를 이용하여 Eq. (3-22)의 형태로 표현하였으며, 여기에서 의 상수  $k_w$  를 평가하기위한 많은 연구가 표 3.3 과 같이 수행되었다 [112-116].  $k_w^B$  값은 압입자의 형상에 지배적이며 Choi[104]의 연구에서 는 소재의 물성에도 영향을 받는다 밝혀져있다.

$$\frac{W_{\rm e}}{W_{\rm tot}} = \kappa_{\rm w} \, \frac{H}{E_{\rm r}} \tag{3-22}$$

본 연구에서는 Eq. (3-22)의 관계를 활용하여 앞절 제안된  $W^B_{d.}$ 과 $W^B_{Tat}$ 을 입력하고 B 상태의 압입 경도 ( $H^B$ )와 탄성계수 ( $E^B_r$ ) 값을 입력하여 풀어내었다. Eq. (3-22)의 좌항은 Eq. (3-7) 과 (3-21)을 활용하여 전개 되었고 이는 Eq. (3-23)과 같다.

$$\frac{W_{elastic}}{W_{Total}} = \frac{(m+1)\cdot\sqrt{L_{max}^{A}\cdot L_{max}^{B}}}{1.72454\cdot S^{A}\cdot h_{max}}$$
(3-23)

다음으로, Eq. (3-22)의 우항은 Eq. (2-11), (2-12) 및 (2-13)을 활용하 여 전개되었고 이는 Eq. (3-24)과 같다.

$$k_{w} = \cdot \frac{H_{IT}^{B}}{E_{r}^{B}} = k_{w} \cdot \frac{\frac{L_{max}^{B}}{A_{c}^{B}}}{\frac{\sqrt{\pi} \cdot S^{B}}{2 \cdot \sqrt{A_{c}^{B}}}} = k_{w} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{A_{c}^{B}} \cdot L_{max}^{B}}{\sqrt{\pi} \cdot A_{c}^{B} \cdot S^{B}}$$
$$= k_{w} \cdot \frac{2 \cdot L_{max}^{B} \cdot \sqrt{L_{max}^{A}}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{A_{c}^{B}} \cdot \sqrt{L_{max}^{B}} \cdot S^{A}}$$

$$= k_{w} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{L_{max}^{A} \cdot L_{max}^{B}}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{24.5 \cdot \left(h_{max} - \varepsilon \cdot \frac{L_{max}^{B}}{S^{B}}\right)^{2}} \cdot S^{A}}$$

$$= k_{w} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{L_{max}^{A} \cdot L_{max}^{B}}}{\sqrt{24.5} \cdot \sqrt{\pi} \cdot (h_{max} - \varepsilon \cdot \frac{L_{max}^{B} \sqrt{L_{max}^{A}}}{\sqrt{L_{max}^{B}} S^{A}}) \cdot S^{A}}$$
$$= k_{w} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{L_{max}^{A} \cdot L_{max}^{B}}}{\sqrt{24.5} \cdot \sqrt{\pi} \cdot (S^{A} \cdot h_{max} - \varepsilon \cdot \sqrt{L_{max}^{A} \cdot L_{max}^{B}})} \qquad (3-24)$$

정리된 Eq. (3-23)과 (3-24)을 좌변과 우변을 통합하여 표현하고 $L^B_{\max}$ 에 대하여 정리하면 Eq. (3-25)와 같이 최종적으로 표현이 가능하다.

$$L_{max}^{\rm B} = \frac{({\rm S}^A)^2 \cdot h_{max}^2}{\epsilon^2 \cdot L_{max}^A} \left(1 - \frac{0.695 \cdot k_w}{(m+1) \cdot \sqrt{\pi}}\right)^2 \tag{3-25}$$

 $L^B_{\max}$  은  $k^B_w$  값을 제외하고 모두 응력이 존재하는 곡선(A 곡선)에서

 추출된 변수를 활용하여 표현이 가능하다.

*k<sup>B</sup><sub>w</sub>* 값에 대하여 Eq. (3-25)를 정리하여 보면 Eq. (3-26)과 같이 정리
가 되며 수행된 유한요소해석을 활용하여 역산하여볼 때 7.0 ~ 7.5 의 값
임을 확인하였다.

$$k_w^B = \left(1 - \frac{\varepsilon \sqrt{L_{max}^A \cdot L_{max}^B}}{S^A \cdot h_{max}}\right) \cdot \frac{(m+1) \cdot \sqrt{\pi}}{0.695}$$
(3-26)

이전 연구자의 연구에서  $k_w^B$ 는 압입자의 형상과 물성에 따라 값의 변동이 있음[114]이 확인되었고, 본 연구에서는 유한요소해석을 활용하여 일반적인 금속의 물성 범위에서 활용 가능한 회귀분석을 수행해였다.

 $k_w^B (k^{-1,A}, S, h_f, W_{T,Y}, W_{el.}, h_c(from A_{opt}), L_{max}) = \exp(a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d \cdot x_4 + e \cdot x_5 + f \cdot x_6 + g \cdot x_7 + h)$ (3-27)

Eq. (3-27)과 같이 총 7 개의 변수가 사용되었으며 각각의 변수와 상 수는 표 3.5에 나타나있다. 그림 3.25와 같은 계산의 결과값을 보이며 역 산을 통해 평가한  $k_w^B$ 와 회기분석을 통해 계산된  $k_w^B$ 의 평균 오차는 -0.05% 이다.

# 3.2.2. 유한요소해석 검증

앞서 제안된 모델인 Eq. (3-25) 및 (3-27)에 대하여 유한요소해석을 통한 모델 검증을 수행하였다. 본 모델을 사용할 시 응력이 있는상태의 정보만으로 응력이 없는상태의 하중을 유추할 수 있으며 유추된 하중을 기반으로 하여 *ΔL* 을 평가하고 Eq. (2-17) 및 (2-18)의 평균인 평균잔 류응력을 평가할 수 있다. 이에 대한 결과는 그림 3.26 이며 평가된 결과 는 몇 경우를 제외하고 ±30% 이내의 정확도로 들어오는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.2.3. 물성 및 응력 부호에 따른 민감도 보정

그림 3.18 및 그림 3.19 와 같이 압입시험에 의한 경도 및 탄성계수의 평가에서 응력의 부호에 따라 평가되는 결과값의 변화 양상 차이난다는 것이 실험적으로 확인되었다[100]. 또한, 응력의 부호 뿐만이 아니라 재 료의 물성에도 감지되는 경향의 차이가 나타난다. 이와 같이 압입시험 수행 시 발생되는 응력의 부호 및 물성에 따른 민감도를 보정하기 위하 여 Lee 는 응력 부호와 재료의 물성에 따라 평가된 잔류응력을 보정할 수 있는 수식을 제안하였다[117]. 압입시험에서부터 나온 변수를 활용하 여 Eq. (3-28) 및 (3-29)에 대입하고 두 식을 연립하여 가공경화지수(n) 및 항복변형률(ε<sub>ν</sub>)를 평가하였다.

$$\varepsilon_y = \frac{\frac{h_f}{h_{max}} - (1.01338 - 0.1635 \cdot n)}{(-11.23806 - 26.08674 \cdot n)}$$
(3-28)

$$\frac{F_{m ax} \cdot h_c}{S \cdot h_{m ax}^2} = (0.000204283 + 0.42551 \cdot \varepsilon_y) + (-0.00417 + 1.37082 \cdot \varepsilon_y) \cdot n + (0.02083 - 0.49457 \cdot \varepsilon_y) \cdot n^2$$
(3-29)

이후, Eq. (3-30) 및 (3-31)을 활용하여 계산하고 본 논문에서 제안된 모델을 통해 평가된  $\Delta L$ 이 양수일 경우  $S_T$ 를,  $\Delta L$  이 음수일 경우  $S_C$ 를 평가된 잔류응력에 곱하여 보정을 수행하였다.

$$S_T = (0.023 \cdot \varepsilon_y^{-0.65}) \cdot (4.3 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon_y^{1.4}) n, \quad \sigma_{RS} = S_T \cdot \sigma_{IIT}$$
(3-30)

$$S_{c} = (0.010 \cdot \varepsilon_{y}^{-0.87}) \cdot (1.2 \cdot 10^{4} \cdot \varepsilon_{y}^{2.1})^{n}, \quad \sigma_{RS} = S_{c} \cdot \sigma_{IIT}$$
(3-31)

그림 3.27 은 위의 제시된 방법을 통해 보정 전 후의 결과를 보여주고 있다. 보정된 결과는 인가응력 대비 ±20% 수준으로 보이며 전 구간에서 개선된 결과를 확인할 수 있다.

Input Properties & Condition			
Maximum indentation Depth	100 µm		
Conical indenter	Rigid type		
Base material	Isotropic hardening		
Elastic modulus [GPa]	100 150, 200		
Poisson's ratio	0.3		
Friction coefficient	0.1		
Yield strength [MPa]	150, 300, 450		
Strain-hardening exponent	0.1, 0.2, 0.3		
Residual stress (RS/YS)	-0.5, 0, 0.5		

# 표 3.1 유한요소해성에 사용된 Input 물성 및 조건

	Compressive Stress – free	Tensile Stress – free
k ratio	1.095	0.936
Load ratio (at hmax)	1.065	0.926
Load ratio (at h= 0.067)	1.078	0.922

# 표 3.2 특정 깊이에서의 하중비 및 α비

$k_{\rm w}$ or the nonlinear relationships	Equations	Indenter and source	
$k_{\rm w} = [(1.5 \tan \theta + 0.327)(1 + 0.27)]^{-1} = 5.74 _{\theta = 70.3^{\circ}}$	(21)	Conical indenter $60^\circ \le \theta \le 80^\circ$	
$k_{\rm w} = 5.17$ for $W_{\rm e}/W_{\rm t} \ge 0.15$ ; 7.3 for $W_{\rm e}/W_{\rm t} < 0.15$	(22)	Conical indenter $\theta = 70.3^{\circ}$	
k <sub>w</sub> =4.68	(23)	Berkovich	
$k_{\rm w} = 2 \tan \theta$	(24)	Berkovich	
$k_{\rm W} \left( \frac{\eta}{2} \frac{H_{\rm TT}}{E_{\rm r}} + \frac{\beta}{\pi \tan \theta} \right)^{-1}$	(25)	Berkovich	
$\frac{W_e}{W_t} = 7\frac{H_{IT}}{E_r} - 15.5 \left(\frac{H_{IT}}{E_r}\right)^2$	(26)	Berkovich	
$rac{W_a}{W_t} = 9.39 rac{H_{IT}}{E_r} - 159.75 \Big(rac{H_{IT}}{E_r}\Big)^2 + 2410.5 \Big(rac{H_{IT}}{E_r}\Big)^3$	(27)	Berkovich	
$\frac{W_e}{W_e} = 7.27 \frac{H_{\Pi}}{F_e} \tan \theta (1 + \frac{\pi}{2e} \frac{H_{\Pi}}{F_e} \tan \theta)^{-1}$	(28)	Berkovich	
$\frac{h_p}{h_{max}} = 1 - 4.02 \frac{H_{T}}{E_r}$	(29)	Berkovich	
$\frac{h_{\rm p}}{h_{\rm max}} = 1 - \left[ 1.5 \frac{H_{\rm T}}{E_{\rm r}} \left/ \left( 1 + 2.96 \frac{H_{\rm T}}{E_{\rm r}} \right) \right] \right.$	(30)	Berkovich	
$\frac{h_{\rm p}}{h_{\rm max}} = 1 / \left( 1 + 2 \tan \theta \frac{H_{\rm H}}{E_{\rm r}} \right)$	(31)	Berkovich	

표 3.4 kw 평가 회기분석에 사용된 상수 및 변수

а	-6.65E-03	<i>x</i> <sub>1</sub>	$k^{-1, A}$
b	-4.08E-08	$x_2$	S <sup>A</sup>
С	33.36334	$\gamma_{0}$	$h_{\epsilon}^{A}$
d	-9.77E-03	<i>x</i> 3	IAZ A
е	-3.02E-03	<i>x</i> <sub>4</sub>	VV T
f	-42.9707	<i>x</i> <sub>5</sub>	W <sub>el.</sub>
g	3.49E-04	<i>x</i> <sub>6</sub>	$h_c^A$
h	3.03045	<i>x</i> <sub>7</sub>	$L_{max}^A$



그림 3.1 용접에 의한 변형률을 측정하기위한 모식도



그림 3.2 용접에 따른 용접선과 수직한 방향의 변형량



그림 3.3 용접에 따른 재료의 소성변형



그림 3.4 STS304 소재에 대한 유한요소 해석모델과 실제 실험에서의 압입 하중-변위곡선 비교



그림 3.5 Loading curve의 지수값 평가 결과



그림 3.6 잔류응력에 유무 따른 압입 하중-변위곡선



그림 3.7 유한요소해석으로 통해 확인한 잔류응력에 따른 압입 하중-변위곡선



그림 3.8. 제안된 수식을 통한 B의 총 에너지 계산 및 하중-변위곡선의 Loading 곡선을 적분하여 얻은 총 에너지



그림 3.9 재료 거동에 따른 Unloading 곡선 (a) 완전 탄성재료, (b) 완전소성재료, (c) 탄소성재료



그림 3.10 강성도 및 Unloadig 대변 기울기 Q





그림 3.12 유한요소해석을 통한 Q 및 S 결과


그림 3.13 평균오차가 반영된 S 및 Q



그림 3.14. 압입시험에서 발생되는 접촉면적의 기하학적 형상. (a) 최대하중 시점, (b) Unloading 이후 시점



그림 3.15 재료 물성에 따른 접촉깊이의 변화



그림 3.16 잔류응력에 따른 접촉깊이의 변화



그림 3.17 일축 잔류응력을 인가하기 위한 지그



그림 3.18 잔류응력에 따른 계산된 접촉면적 변화



(a)

그림 3.19 잔류응력에 따라 수식으로 계산된 물성. (a) 탄성계수 결과, (b) 경도 결과

(b)



그림 3.20 잔류응력에 따라 평가된 (a) 투영면적 및 접촉면적, (b) 투영면적이 활용된 경도 및 탄성계수



그림 3.21 잔류응력에 따른 Unloading 곡선



그림 3.22 유한요소해석을 통한 제안식과 실제 탄성에너지

평가결과



그림 3.23 제안된 탄성에너지 평가 식의 평균오차를 반영한 결과



그림 3.24 (a) H/E와 Y/E 의 관계, (b) 압입 에너지와 Y/E의 관계, (c) H/E와 압입에너지의 관계



그림 3.25 회기분석을 통한  $k^B_w$  평가 결과



그림 3.26 유한요소해석을 활용한 모델 평가 결과



그림 3.27 민감도 보정 전 후의 유한요소해석을

활용한 모델 평가 결과

# 실험적 검증

## 목차

4. 1.	검증실험	절차	108
4. 2.	검증실험	결과	109

### 4. 1. 검증실험 절차

본 연구에서 제안된 모델을 검증하기 위하여 일축인장응력을 인가할 수 있는 지그를 그림 4.1과 같이 제작하여 활용하였다. 3축 밴딩을 모사 한 것으로 지그 아래의 회전 스크류를 돌리면 중간의 축이 위로 상승하 여 시편을 밴딩시켜주게 된다. 계장화 압입시험기는 그림 4.2의 FRONTICS 사 AIS 3000이 활용되었으며 원뿔형 압입자가 사용되었다. 시편은 가로세로 20 mm 및 100 mm 이며 두께는 3 mm 이다. 소재는 범용적으로 사용되고 있는 5 가지 소재를 활용하였으며, 각각의 항복강 도는 표 4.1과 같다.

시험의 절차는 그림 4.3 과 같다. 시편에 대하여 열처리를 수행하여 가공시 잔존되어 있는 응력을 제거 하였다. 시편에 높은 변형을 주어 가 공경화와 잔류응력을 부여하고자 하였기 때문에, 항복변형률 이상으로 변형을 주고자 하였다. 사전에 각 소재에대한 인장시험을 수행하여 항복 변형률을 평가하였고, 시험대상 소재에 변형률 게이지를 부착하여 밴딩 을 가할 때 항복변형률 이상의 변형을 가하여주었다. 변형이 가해진 상 태에서 압입시험을 3 포인트 수행하여 응력이 존재하는 압입 하중-변위 곡선을 측정하였고 이를 통하여 제안된 모델을 활용하여 잔류응력을 평 가하였다. 제안된 모델과의 비교를 위해, 지그에서 시편을 회수하여 컷팅 을 통해 응력을 해소하였고 다시 압입 시험을 수행하여 무응력 상태의 압입곡선을 획득하였다. 앞서 평가된 응력상태의 곡선과 무응력 상태의 곡선을 활용하여 잔류응력을 분석하였고 이를 제안된 모델의 결과와 비 교하였다.

### 4. 2. 검증실험 결과

5 가지 소재에 대하여 제시된 모델 및 민감도 보정을 통한 결과는 그 림 4.4와 같다. 제안된 모델에은 비교시험 결과보다 다소 높은 편차를 보 이나, 평균으로 환산시 비교결과와 합리적인 수준에서 일치하는 것을 확 인할 수 있다. 각 소재의 결과에서 일부 한 결과값은 제시된 소재의 항 복강도를 넘어가는 것처럼 보이지만, 소재는 소성변형이 동반되었기 때 문에 가공경화가 일어났을 것이다. 이에 항복강도의 증가도 함께 있었을 것이므로 평가된 결과값이 항복강도 이내의 값일 것이라 추축이 된다. 특히 STS 소재군에서 비교 결과와 상대적으로 큰 차이를 보인다거나, 항복강도 대비하여 높은 수준의 잔류응력이 평가될 것이라는 예상과 다 르게 잔류응력값이 낮게 평가되었다.

Madarial	YS			
waterial	Stress [MPa]	Strain		
STS304	256	0.00339		
STS420J2	343	0.00363		
S45C	378	0.00388		
Al6061	247	0.00558		
C1220	222	0.00416		

표 4.1 검증시험에 사용된 소재 및 항복강도





## 그림 4.1 제작된 지그 형상 및 원리



## 그림 4.2 FRONTICS 사 AIS3000 계장화 압입시험기



그림 4.3 실험검증 절차 모식도



그림 4.4 검증실험 결과 (a) STS304. (b) STS420J2, (c) Al6061. (d) C1220, (e) S45C, (f) 종합결과

# 결 론

## 목차

5.	1.	고찰	및	한계점	 116
5.	2.	결론	••••		

#### 5. 1. 고찰 및 한계점

본 연구에서는 계장화 압입시험법을 활용한하여 응력이 있는 상황에 서 한 번의 압입시험과 광학측정만으로 잔류응력을 평가할 수 있는 모델 을 제안하였다. 무응력시편에 대한 제작이 어려운 상황에서 적용이 가능 하며, 무응력 시편이 없어도 평가가 가능하기 때문에 시편을 제작하였다 하더라도 해당시편의 응력이 무응력이 확실한지에 대한 이슈도 해결될 수 있다.

Unloading 곡선을 직선으로 단순화 해주며 도입된 Q와 강성도 S의 관계에서 물성에 특이 경향보이지 않았으며, 비슷한 수준으로 Q가 S값 에 비하여 작은 값을 보였다. 재료의 최대압입깊이까지 눌러진 상황에서 힘을 제거하여주며 발생되는 Unloading 곡선은 재료가 탄성회복을 하면 서 압입자를 밀어주는 힘에의해 발생된다. 초반부의 기울기와 전체를 대 변해주는 직선화된 기울기의 차이는 다음과 같이 구분할 수 있다. 회복 초반부는 압입자와 재료가 모두 접촉해있는 상황으로 높은 회복하중을 보여주게 되며, 압입자가 재료를 누르는 상황에서 중앙대비 바깥쪽은 회 복의 양이 적을것이고 Unloading 이 진행될수록 회복이 이미 끝난 부분 이 많아질 것이기 때문에 회복력이 줄어들 것다. 따라서 언로딩 커브의 초반부의 기울기와 전체 직선화 기울기는 차이를 보이게 되며 접촉되고 있는 면적과 관련이 있기 때문에 제곱미터의 함수로써 Unloading 커브 는 직선이 아닌 곡선을 보이게 되는것으로 생각된다. 따라서 해당 오차 는 압입자의 기하학적 형상과 관련이 있을것으로 판단이되며, 형상이 달 라질 경우 평균오차의 값도 변화될 것이다. 또한, Unloading 곡선을 직 선으로 가정하였는데, 멱함수의 형태로 표현이 가능하지만 공학적인 관 점에서 수식의 단순화가 필요하여 직선가정을 하였다.

본연구에서는 일반적인 금속의 물성의 범위를 포함하여 모델링하고자 하였다. 일반 범용적으로 사용되는 금속의 물성의 범위를 포함하고자 하 였다. 허나, 폴리머, 세라믹 또는 초고강도금속과 같은 소재는 제안된 모 델링의 결과값에서 큰 오차를 발생시킬 수 있다. Choi[104]는 유한요소해 석을 활용하여  $k_w$  값이 물성에 따라 두 가지 군으로 나누어 변화되며  $W_e/W_t$  값이 0.15를 기준으로하여 이상일 경우 5.17, 미만일 경우 7.3임 을 확인하였다. 하지만,  $W_e/W_t$ 이 변화되면 같은 군 안에서도 미소한 변화가 있을것으로 예상이 된다. 본 연구에서 사용된 일반적인 금속의 물성 범위를 기준으로  $k_w$ 을 평가해볼 때 7.0 ~ 7.5 까지 변동되는 것을 확인하였기 때문에 단일 값으로 사용하지 않고 회기분석을 수행되었다. 하지만, 본 연구에서 제안된  $k_w$  평가 회기분석 모델은 구성에 활용된 물성의 범위를 벗어날 경우 신뢰성을 잃을 가능성이 매우 높기 때문에 새로운 물성 범위에 대한 추가적인 후행연구가 필요하다.

실험검증 부분에있어 합리적인 수준에서 비교평가 법과 매칭이 된다 볼 수 있다. 하지만, STS 소재군에서 비교 결과와 상대적으로 큰 차이 를 보인다거나, 항복강도 대비하여 높은 수준의 잔류응력이 평가될 것이 라는 예상과 다르게 잔류응력값이 낮게 평가된 점에 대하여는 추가적인 연구가 필요하다.

#### 5. 2. 결론

본 연구에서는 계장화 압입시험법을 활용한 잔류응력 기본평가 모델 에서 필요로 하는 무응력 상태의 시편에 대한 압입 하중-변위곡선 없이 도 잔류응력을 평가할 수 있는 모델을 제안하였다. 이론적 모델링을 통 해 제안된 각각의 단계들을 유한요소해석을 통하여 검증을 수행하였다. 아래의 3 개의 과정을 통해 잔류응력이 없는 상태의 정보를 잔류응력 이 존재하는 압입 하중-변위곡선을 활용하여 수식화 하였다.

- 응력의 존재에 따라 압입 하중-변위곡선에서의 Loading 곡선의 변화를 응력에따라 변하지 않는 지수를 활용하여 표현하였고, 응 력이 존재하는 상태에서의 획득한 Loading 곡선통해 잔류응력이 존재하지 않는 Loading 곡선으로 변수를 두어 표현하였다. 표현 된 Loading 곡선을 적분을 하여 응력이 없는상태의 압입 총 에 너지를 수식화 하였다.
- 2. 잔류응력에따라 변하지않는 재료 고유의 물성인 경도와 탄성계 수를 활용하여 잔류응력이 존재하지 않는 압입곡선의 Unloading 곡선을 잔류응력이 존재하는 압입곡선에서 획득한 변수들을 통 해 표현하였다. 표현된 Unloading 곡선을 적분하여 잔류응력이 없는 상태의 압입 탄성 에너지를 수식화 하였다.

3. 압입 탄성에너지와 총에너지의 비가 압입 곡선으로부터 평가된 경도와 탄성계수의 비가 선형적 관계를 갖는 연구를 기반으로 하여 앞서 1, 2번에서 제안된 수식을 3번의 수식에 전개하였다. 전개된 수식에서 입력되는 상수를 회기분석으로 제안하였고, 잔 류응력이 없는 상태의 하중을 하나의 미지수로 두어 수식을 완 성하였다.

$$L_{max}^{B} = \frac{(S^{A})^{2} \cdot h_{max}^{2}}{\epsilon^{2} \cdot L_{max}^{A}} (1 - \frac{0.695 \cdot k_{w}}{(m+1) \cdot \sqrt{\pi}})^{2}$$

결과적으로 위와 같은 수식을 제안하였으며, 본 모델을 활용하면 잔류 응력이 있는 상태에서의 압입곡선의 정보를 기반으로 잔류응력이 없는 상태의 압입곡선의 정보를 얻는 것이 가능해지며 이를 활용하여 소재내 의 잔류응력을 평가할 수 있게 된다. 유한요소해석을 통하여 제안모델을 검증하였고 검증의 결과가 ±20% 이내로 들어오는 것을 확인할 수 있었 다. 또한, 범용적으로 사용되는 5가지 소재를 선정하여 실험을 수행하여 검증을 완료하였다. 이에, 가동중인 구조물과 같은 현장에서 계장화 압입 시험법을 적용할 때 뭉응력 시편을 제작하기 어려운 다양한 상황에서 본 모델을 적용하여 잔류응력의 평가가 용이할 것으로 기대가 된다.

### 참 고 문 헌

[1] I.C. Noyan, J.B. Cohen, Residual Stress, Springer-Verlag, New York, USA (1987).

[2] G.S. Schajer, Practical residual stress measurement methods,John Wiley & Sons2013.

[3] H.E. Coules, G.C.M. Horne, K. Abburi Venkata, T. Pirling, The effects of residual stress on elastic-plastic fracture propagation and stability, Materials & Design 143 (2018) 131–140.

[4] L. Li, X. Gu, S. Sun, W. Wang, Z. Wan, P. Qian, Effects of welding residual stresses on the vibration fatigue life of a ship's shock absorption support, Ocean Engineering 170 (2018) 237–245.

[5] W.-C. Chung, J.-Y. Huang, L.-W. Tsay, C. Chen, Stress corrosion cracking in the heat-affected zone of A508 steel welds under high-temperature water, Journal of Nuclear Materials 408(1) (2011) 125–128.

[6] P.J. Withers, Residual stress and its role in failure, Reports

on Progress in Physics 70(12) (2007) 2211-2264.

[7] C. Sungki, L. Junsang, L. Jae-Yik, K. Seung-kyun, K. Young-cheon, L. Seung-joon, K. Dongil, Effect of Low Transformation Temperature Welding Consumable on Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stress in Welded Joint of A516 Carbon Steel, 대한금속재료학회지 59(8) (2021) 524-532.

[8] Y. Mikami, Y. Morikage, M. Mochizuki, M. Toyoda, Angular distortion of fillet welded T joint using low transformation temperature welding wire, Science and Technology of Welding and Joining 14(2) (2009) 97–105.

[9] M.R. Hill, A.T. DeWald, A.G. Demma, L.A. Hackel, H.-L. Chen, C.B. Dane, R.C. Specht, F.B. Harris, Recent developments in laser peening technology, Advanced Materials and Processes (2003).

[10] A. Amanov, Y.-S. Pyun, S. Sasaki, Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy, Tribology International 72 (2014) 187–197. [11] M. Kobayashi, T. Matsui, Y. Murakami, Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening, International Journal of Fatigue 20(5) (1998) 351–357.

[12] G.S. Schajer, Relaxation methods for measuring residual stresses: techniques and opportunities, Experimental mechanics 50(8) (2010) 1117–1127.

[13] G.S. Schajer, Measurement of Non–Uniform Residual Stresses Using the Hole–Drilling Method. Part I—Stress Calculation Procedures, Journal of Engineering Materials and Technology 110(4) (1988) 338–343.

[14] G.S. Schajer, Measurement of Non–Uniform Residual Stresses Using the Hole–Drilling Method. Part II—Practical Application of the Integral Method, Journal of Engineering Materials and Technology 110(4) (1988) 344–349.

[15] M.B. Prime, M.R. Hill, Residual stress, stress relief, and inhomogeneity in aluminum plate, Scripta Materialia 46(1) (2002) 77–82.

[16] M.B. Prime, T. Gnaupel-Herold, J.A. Baumann, R.J. Lederich, D.M. Bowden, R.J. Sebring, Residual stress

measurements in a thick, dissimilar aluminum alloy friction stir weld, Acta Materialia 54(15) (2006) 4013-4021.

[17] S.R. Prime MB, Edwards JM, Baumann JA, Lederich RJ., CONTOUR-METHOD DETERMINATION OF PARENT-PART RESIDUAL STRESSES USING A PARTIALLY RELAXED FSW TEST SPECIMEN, SEM X (2004).

[18] J. Gauthier, T.W. Krause, D.L. Atherton, Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique, NDT & E International, 31, 1, (1998)

[19] H. Ilker Yelbay, Ibrahim Cam, C. Hakan Gur, Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique, NDT & E International, 43, 1, (2010)

[20] Song, W., Xu, C., Pan, Q. et al. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method. Chin. J. Mech. Eng. 29, (2016) 365–371.

[21] SASAKI Y, HASEGAWA M. Effect of anisotropy on acoustoelastic birefringence in wood[J]. Ultrasonics, (2007)[22] T.Y. Tsui, W.C. Oliver, G.M. Pharr, Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation .1. Experimental studies in an aluminum alloy, J. Mater. Res. 11(3) (1996) 752-759.

[23] A. Bolshakov, W.C. Oliver, G.M. Pharr, Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation .2. Finite element simulations, J. Mater. Res. 11(3) (1996) 760–768.

[24] S. Suresh, A.E. Giannakopoulos, A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation, Acta Materialia 46(16) (1998) 5755–5767.

[25] E. Atar, C. Sarioglu, U. Demirler, E. Kayali, H. Cimenoglu, Residual stress estimation of ceramic thin film by X-ray diffraction and indentation techniques, Scripta Materialia 48 (2003) 1331–1336.

[26] Z. Wang, L. Deng, J. Zhao, Estimation of residual stress of metal material without plastic plateau by using continuous spherical indentation, International Journal of Pressure Vessels and Piping 172 (2019) 373–378.

[27] J.I. Jang, Estimation of residual stress by instrumented

indentation: A review, Journal of Ceramic Processing Research 10(3) (2009) 391-400.

[28] Y.-H. Lee, D. Kwon, Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters, Acta Materialia 52(6) (2004) 1555–1563.

[29] Y.-H. Lee, D. Kwon, Residual stresses in DLC/Si and Au/Si systems: Application of a stress-relaxation model to the nanoindentation technique, J. Mater. Res. 17(4) (2002) 901–906.

[30] Y.-H. Lee, D. Kwon, Measurement of residual-stress effect by nanoindentation on elastically strained (100) W, Scripta Materialia 49(5) (2003) 459–465.

[31] Y.H. Lee, W.j. Ji, D. Kwon, Stress measurement of SS400steel beam using the continuous indentation technique,Experimental Mechanics 44(1) (2004) 55–61.

[32] Y.-H. Lee, K. Takashima, D. Kwon, Micromechanical analysis on residual stress-induced nanoindentation depth shifts in DLC films, Scripta Materialia 50(9) (2004) 1193–1198.

[33] G.S. Schajer, Practical residual stress measurement methods, John Wiley & Sons2013.

[34] G.E. Totten, Handbook of residual stress and deformation of steel, ASM international2002.

[35] N.S.M. Nasir, M.K.A.A. Razab, S. Mamat, M. Iqbal, Review on welding residual stress, stress 2(5) (2006) 8–10.

[36] X.P. Jiang, X.Y. Wang, J.X. Li, D.Y. Li, C.S. Man, M.J. Shepard, T. Zhai, Enhancement of fatigue and corrosion properties of pure Ti by sandblasting, Materials Science and Engineering: A 429(1) (2006) 30–35.

[37] L. Li, X. Gu, S. Sun, W. Wang, Z. Wan, P. Qian, Effects of welding residual stresses on the vibration fatigue life of a ship's shock absorption support, Ocean Engineering 170 (2018) 237–245.

[38] P.J. Withers, Residual stress and its role in failure, Reports on Progress in Physics 70(12) (2007) 2211–2264.

[39] H.E. Coules, G.C.M. Horne, K. Abburi Venkata, T. Pirling, The effects of residual elastic-plastic fracture stress on propagation stability, Materials & Design 143 (2018)and 131 - 140.

[40] W. Wang, Rupture and Fracture of Fastener by
Embrittlement-Stress Corrosion Cracking (SCC), 2020.

[41] C. Sungki, L. Junsang, L. Jae-Yik, K. Seung-kyun, K. Young-cheon, L. Seung-joon, K. Dongil, Effect of Low Transformation Temperature Welding Consumable on Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stress in Welded Joint of A516 Carbon Steel, 대한금속재료학회지 59(8) (2021) 524-532.

[42] Y. Mikami, Y. Morikage, M. Mochizuki, M. Toyoda, joint Angular distortion of fillet welded Т using low transformation temperature welding wire, Science and Technology of Welding and Joining 14(2) (2009) 97–105.

[43] M.R. Hill, A.T. DeWald, A.G. Demma, L.A. Hackel, H.-L. Chen, C.B. Dane, R.C. Specht, F.B. Harris, Recent developments in laser peening technology, Advanced Materials and Processes (2003).

[44] A. Amanov, Y.-S. Pyun, S. Sasaki, Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy, Tribology International 72 (2014) 187–197. [45] M. Kobayashi, T. Matsui, Y. Murakami, Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening, International Journal of Fatigue 20(5) (1998) 351–357.

[46] W.-C. Chung, J.-Y. Huang, L.-W. Tsay, C. Chen, Stress corrosion cracking in the heat-affected zone of A508 steel welds under high-temperature water, Journal of Nuclear Materials 408(1) (2011) 125–128.

[47] G.S. Schajer, Measurement of Non–Uniform Residual Stresses Using the Hole–Drilling Method. Part I—Stress Calculation Procedures, Journal of Engineering Materials and Technology 110(4) (1988) 338–343.

[48] G.S. Schajer, Measurement of Non–Uniform Residual Stresses Using the Hole–Drilling Method. Part II—Practical Application of the Integral Method, Journal of Engineering Materials and Technology 110(4) (1988) 344–349.

[49] G.S. Schajer, M. Steinzig, Full-field calculation of hole drilling residual stresses from electronic speckle pattern interferometry data, Experimental Mechanics 45(6) (2005) 526.
[50] A. E837−13a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, E837-20, West Conshohocken, PA, 2020.

[51] Z. Wu, J. Lu, B. Han, Study of residual stress distribution by a combined method of Moire interferometry and incremental hole drilling, Part I: Theory, (1998).

[52] D. Nelson, J. McCrickerd, Residual-stress determination through combined use of holographic interferometry and blind-hole drilling, Experimental Mechanics 26(4) (1986) 371–378.

[53] A. Baldi, Residual Stress Measurement Using Hole Drilling and Integrated Digital Image Correlation Techniques, Experimental Mechanics 54(3) (2014) 379–391.

[54] J.D. Lord, D. Penn, P. Whitehead, The Application of Digital Image Correlation for Measuring Residual Stress by Incremental Hole Drilling, Applied Mechanics and Materials 13-14 (2008) 65-73.

[55] B. Winiarski, P.J. Withers, Micron–Scale Residual Stress Measurement by Micro–Hole Drilling and Digital Image Correlation, Experimental Mechanics 52(4) (2012) 417–428. [56] B. Winiarski, P.J. Withers, Mapping residual stress profiles at the micron scale using FIB micro-hole drilling, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ, 2010, pp. 267–272.

[57] B. Young, W.-M. Lui, Behavior of Cold-Formed HighStrength Stainless Steel Sections, Journal of StructuralEngineering 131(11) (2005) 1738–1745.

[58] N. Tebedge, G. Alpsten, L. Tall, Residual-stress measurement by the sectioning method, Experimental Mechanics 13(2) (1973) 88–96.

[59] J.R. Shadley, E.F. Rybicki, W.S. Shealy, Application guidelines for the parting out step in a through thickness residual stress measurement procedure, Strain 23(4) (1987) 157–166.

[60] M.B. Prime, T. Gnaupel-Herold, J.A. Baumann, R.J. Lederich, D.M. Bowden, R.J. Sebring, Residual stress measurements in a thick, dissimilar aluminum alloy friction stir weld, Acta Materialia 54(15) (2006) 4013–4021.

[61] C.E. Murray, I. Cevdet Noyan, Applied and Residual Stress Determination Using X‐ray Diffraction, Practical Residual Stress Measurement Methods (2013) 139–161.

[62] M. Mahmoodi, M. Sedighi, D.A. Tanner, Investigation of through thickness residual stress distribution in equal channel angular rolled Al 5083 alloy by layer removal technique and X-ray diffraction, Materials & Design 40 (2012) 516–520.

[63] J.P. Oliveira, F.M.B. Fernandes, R.M. Miranda, N. Schell, J.L. Ocana, Residual stress analysis in laser welded NiTi sheets using synchrotron X-ray diffraction, Materials & Design 100 (2016) 180–187.

[64] M.L. Martinez-Perez, F.J. Mompean, J. Ruiz-Hervias, C.R. Borlado, J.M. Atienza, M. Garcia-Hernandez, M. Elices, J. Gil-Sevillano, R.L. Peng, T. Buslaps, Residual stress profiling in the ferrite and cementite phases of cold-drawn steel rods by synchrotron X-ray and neutron diffraction, Acta Materialia 52(18) (2004) 5303-5313.

[65] G. Acharya, K. Park, Adv. Drug Delivery Rev. 58 (2006)387.

[66] K.-H. Kim, Y.-C. Kim, E.-c. Jeon, D. Kwon, Evaluation of indentation tensile properties of Ti alloys by considering plastic constraint effect, Materials Science and Engineering: A 528(15) (2011) 5259–5263.

[67] D.K. Patel, S.R. Kalidindi, Correlation of spherical nanoindentation stress-strain curves to simple compression stress-strain curves for elastic-plastic isotropic materials using finite element models, Acta Mater. 112 (2016) 295–302.

[68] S.-K. Kang, J.-H. Kim, Y.-H. Lee, J.-Y. Kim, D. Kwon, Correlation between the plastic strain and the plastic pileup of the instrumented indentation by utilizing the interrupted tensile test, Materials Science and Engineering: A 535 (2012) 197–201.
[69] Y.-C. Kim, S.-K. Kang, J.-Y. Kim, D. Kwon, Contact morphology and constitutive equation in evaluating tensile properties of austenitic stainless steels through instrumented spherical indentation, Journal of Materials Science 48(1) (2013)

232-239.

[70] S. Pathak, S.R. Kalidindi, Spherical nanoindentation stress–strain curves, Materials Science and Engineering:
R: Reports 91 (2015) 1–36.

[71] B. Taljat, T. Zacharia, F. Kosel, New analytical procedure

to determine stress-strain curve from spherical indentation data, International Journal of Solids and Structures 35(33) (1998) 4411-4426.

[72] J.-Y. Kim, K.-W. Lee, J.-S. Lee, D. Kwon, Determination of tensile properties by instrumented indentation technique: Representative stress and strain approach, Surface and Coatings Technology 201(7) (2006) 4278–4283.

[73] O.M. Kwon, J. Won, J.-h. Kim, C. Cho, E.-c. Jeon, D. Kwon, Effects of the Surface Contact on the Uncertainty in Indentation Yield Strength: Surface Roughness and Angular Misalignment, Metals and Materials International 25(6) (2019) 1500–1510.

[74] S.W. Jeon, K.W. Lee, J.Y. Kim, W.J. Kim, C.P. Park, D. Kwon, Estimation of Fracture Toughness of Metallic Materials Using Instrumented Indentation: Critical Indentation Stress and Strain Model, Experimental Mechanics 57(7) (2017) 1013–1025.

[75] Y. Feng, T. Zhang, Determination of fracture toughness of brittle materials by indentation, Acta Mechanica Solida Sinica 28(3) (2015) 221–234. [76] S. Carlsson, P.L. Larsson, On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part II: experimental investigation, Acta Materialia 49(12) (2001) 2193–2203.

[77] S. Carlsson, P.L. Larsson, On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part I: theoretical and numerical analysis, Acta Materialia 49(12) (2001) 2179–2191.

[78] S. Suresh, A.E. Giannakopoulos, A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation, Acta Materialia 46(16) (1998) 5755–5767.

[79] J.G. Swadener, B. Taljat, G.M. Pharr, Measurement of residual stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters, Journal of Materials Research 16(7) (2001) 2091–2102.

[80] Q. Wang, K. Ozaki, H. Ishikawa, S. Nakano, H. Ogiso, Indentation method to measure the residual stress induced by ion implantation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 242(1) (2006) 88-92.

[81] L. Xiao, D. Ye, C. Chen, A further study on representative models for calculating the residual stress based on the instrumented indentation technique, Computational Materials Science 82 (2014) 476–482.

[82] Z. Lu, Y. Feng, G. Peng, R. Yang, Y. Huan, T. Zhang, Estimation of surface equi-biaxial residual stress by using instrumented sharp indentation, Materials Science and Engineering: A 614 (2014) 264–272.

[83] Y.-H. Lee, D. Kwon, Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters, Acta Materialia 52(6) (2004) 1555–1563.

[84] W.C. Oliver, G.M. Pharr, An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, Journal of Materials Research 7(6) (1992) 1564–1583.

[85] J. Alcala, A.C. Barone, M. Anglada, The influence of plastic hardening on surface deformation modes around Vickers and spherical indents, Acta Materialia 48(13) (2000) 3451–3464.

[86] J. Alcala, D. Esque-de los Ojos, Reassessing spherical indentation: Contact regimes and mechanical property extractions, International Journal of Solids and Structures 47(20) (2010) 2714–2732.

[87] O. Bartier, X. Hernot, G. Mauvoisin, Theoretical and experimental analysis of contact radius for spherical indentation, Mechanics of Materials 42(6) (2010) 640–656.

[88] Y. Choi, H.-S. Lee, D. Kwon, Analysis of sharp-tip-indentation load–depth curve for contact area determination taking into account pile-up and sink-in effects, J. Mater. Res. 19(11) (2004) 3307-3315.

[89] S.-K. Kang, J.-Y. Kim, C.-P. Park, H.-U. Kim, D. Kwon, Conventional Vickers and true instrumented indentation hardness determined by instrumented indentation tests, J. Mater. Res. 25(2) (2010) 337–343.

[90] S.-K. Kang, Y.-C. Kim, J.-W. Lee, D. Kwon, J.-Y. Kim, Effect of contact angle on contact morphology and Vickers hardness measurement in instrumented indentation testing, International Journal of Mechanical Sciences 85 (2014) 104–109. [91] V. Karthik, P. Visweswaran, A. Bhushan, D.N. Pawaskar, K.V. Kasiviswanathan, T. Jayakumar, B. Raj, Finite element analysis of spherical indentation to study pile-up/sink-in phenomena in steels and experimental validation, International Journal of Mechanical Sciences 54(1) (2012) 74–83.

[92] S.H. Kim, B.W. Lee, Y. Choi, D. Kwon, Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials, Materials Science and Engineering: A 415(1) (2006) 59–65.

[93] S.-H. Kim, E.-c. Jeon, D. Kwon, Determining Brinell Hardness From Analysis of Indentation Load–Depth Curve Without Optical Measurement, Journal of Engineering Materials and Technology 127(1) (2005) 154–158.

[94] S. Kucharski, Z. Mroz, Identification of plastic hardening parameters of metals from spherical indentation tests, Materials Science and Engineering: A 318(1) (2001) 65–76.

[95] J. Malzbender, G. de With, Indentation
load–displacement curve, plastic deformation, and energy,
J. Mater. Res. 17(2) (2002) 502–511.

[96] F.R.S. R. Hill, B. Storakers, A. B. Zdunek, A theoretical study of the Brinell hardness test, Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences 423(1865) (1989) 301.

[97] B. Taljat, G.M. Pharr, Development of pile-up during spherical indentation of elastic&plastic solids, International Journal of Solids and Structures 41(14) (2004) 3891–3904.

[98] M. Wang, J. Wu, Y. Hui, Z. Zhang, X. Zhan, R. Guo, Identification of elastic-plastic properties of metal materials by using the residual imprint of spherical indentation, Materials Science and Engineering: A 679 (2017) 143–154.

[99] A. Bolshakov, W.C. Oliver, G.M. Pharr, Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation .2. Finite element simulations, J. Mater. Res. 11(3) (1996) 760–768.

[100] T.Y. Tsui, W.C. Oliver, G.M. Pharr, Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation .1. Experimental studies in an aluminum alloy, J. Mater. Res. 11(3) (1996) 752–759. [101] Y.-H. Lee, K. Takashima, Y. Higo, D. Kwon, Prediction of stress directionality from pile-up morphology around remnant indentation, Scripta Materialia 51(9) (2004) 887-891.

[102] M.-J. Choi, S.-K. Kang, I. Kang, D. Kwon, Evaluation of nonequibiaxial residual stress using Knoop indenter, Journal of Materials Research 27(1) (2012) 121–125.

[103] Y.-C. Kim, M.-J. Choi, D. Kwon, J.-Y. Kim, Estimation of principal directions of Bi-axial residual stress using instrumented Knoop indentation testing, Metals and Materials International 21(5) (2015) 850–856.

[104] J.-h. Kim, H. Xu, M.-J. Choi, E. Heo, Y.-C. Kim, D. Kwon, Determination of directionality of nonequibiaxial residual stress by nanoindentation testing using a modified Berkovich indenter, J. Mater. Res. 1–8.

[105] H. Xu, Evaluation of Non-equal Biaxial Residual Stress Using Modified Berkovich Indenter in Nano Scale, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea, 2017.

[106] J.-H. Kim, Assessment of residual stress based on indentation surface displacement and evaluation of integrity for weldment considering residual stress, 서울대학교 대학원, (2019) [107] Hamid Eisazadeh, Daryush K. Aidun, Investigation of transient/residual strain and stress in dissimilar weld, Journal of Manufacturing Processes, 26, (2017)

[108] N. SneddonThe relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile Int. J. Eng. Sci., 3 (1965)

[109] M. Sakai, Energy principle of the indentation-induced inelastic surface deformation and hardness of brittle materials, Acta Metallurgica et Mater. 41, 6, (1993)

[110] Chen L, Du Q, Yu M, Guo X, Zhao W Measuring the effect of residual stress on the machined subsurface of Inconel 718 by nanoindentation. PLOS ONE, 16, 1 (2021)

[111] Y-T. Cheng and C-M. Cheng, Relationships between hardness, elastic modulus, and the work of indentation. Appl. Phys. Lett. 73, 614 (1998)

[112] Y.-T. Cheng, Z. Li, C.-M. Cheng, Scaling relationships for indentation measurements. Philos. Mag. A. 82(10), 1821 (2002)
[113] M.Y. N'Jock, F. Roudet, M. Idriss, O. Bartier, D. Chicot, Work-of-indentation coupled to contact stiffness for calculating elastic modulus by instrumented indentation. Mech. Mater. 94, 170 (2016)

[114] Υ. Choi, H.-S. Lee, D. Kwon, Analysis of sharp-tip-indentation load-depth for curve contact area determination taking into account pile-up and sink-in effects. J. Mater. Res. 19, 11, (2004)

[115] T.A. Venkatesh, K. Vliet, A.E. Giannakopoulos, S. Suresh, Determination of elasto-plastic properties by instrumented sharp indentation: guidelines for property extraction. Scr. Mater. 42(9), 833 (2000)

[116] I. Malzbender, Comment the determination of on mechanical properties from the energy dissipated during indentation. J. Mater. Res. 20(5), 1090 (2011)

[117] J. Lee, Evaluation of throughthickness distributing residual stress using instrumented indentation test, 서울대학교 대학원, (2022)

## Abstract

Kyungyul Lee

Dept. Materials Science and Engineering The Graduate School Seoul National University

Residual stress is a "locked-in" stress remaining in materials and structures even after eliminating the sources of external load or stress. Interactions among the process time, exposed temperature, non-uniform elastic-plastic deformation and microstructural transformation result in the residual stress of materials. The interactions develop elastic stress in response the to local incompatible strains to preserve dimensional continuity. The stress has self-equilibrating character to satisfy the force and moment equilibrium in whole volume of materials. Most of manufacturing processes originate the residual stresses regardless of the scale and shape of components. For example, forming process to change the shape of materials and surface modification process, involving non-uniform plastic deformation, including rolling, extruding and peening is main mechanism creating residual stress. Manufacturing process including heat treatment, such as welding, casting and induction hardening, is related to microstructural phase transformation of metals and ceramics which occurs the local changes in material density. The destructive method cannot be applied to a structure or environment in operation because it must damage the evaluation target. Accordingly, there is a need to develop a method with good accessibility that can be applied to the field while reducing damage to the measurement object.

In this study, using the unique elastic/plastic characteristics of materials that do not change depending on residual stress, it is presented to express the indentation curve in a stress-free state as the stressed state. In addition, using the relationship between Indentation work, Indentation hardness, and reduced modulus, a model was proposed to evaluate the residual stress of the material to be evaluated in the absence of a stress-free test specimen.

The proposed model was verified step by step using finite element analysis and by performing an experimental method.

keywords : Instrumented indentatio test; Conical indentation; Residual stress; Reliabilty; Finite element analysis.

Student Number: 2016-24225