



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 8월
석사학위논문

유한요소법을 이용한
Deep Hole Drilling 해석모델
개발

조선대학교 대학원
토목공학과
문민주

유한요소법을 이용한
Deep Hole Drilling 해석모델
개발

Deep Hole Drilling analysis model developed
using Finite element method

2016 년 8 월 25 일

조선대학교 대학원
토목공학과
문민주

유한요소법을 이용한
Deep Hole Drilling 해석모델
개발

지도교수 박 정 응

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2016 년 04 월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

문 민 주

문민주의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김운중 (인)

위원 조선대학교 교수 김대현 (인)

위원 조선대학교 교수 박정웅 (인)

2016년 5 월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 동향	3
제2장 이론적 배경	6
2.1 잔류응력특성	6
2.1.1 잔류응력의 생성	6
2.1.2 잔류응력이 구조물에 미치는 영향	7
2.2 잔류응력 측정방법의 종류	11
2.2.1 중성자 회절법	12
2.2.2 등고선 법	14
2.2.3 고유변형도법	15
2.2.4 홀드릴링법	17
2.3 딥홀드릴링법(Deep Hole Drilling Method)	22
2.3.1 DHD법의 원리	22
2.3.2 iDHD법의 원리	25
2.3.3 재료의 이완 상수 값의 정의	26

제3장 유한요소법에 의한 해석	27
3.1 FEM 해석조건	27
3.1.1 초기응력조건	28
3.1.2 해석 모델	29
3.1.3 측정각도	30
3.1.4 경계조건	31
3.1.5 스텝조건	35
3.2 Parametric 조건	37
3.3 DHD와 iDHD를 이용한 FEM	38
3.2.1 균일인장 응력에 대한 해석	38
3.2.2 굽힘 응력에 대한 해석	42
3.2.3 2차곡선 응력에 대한 해석	46
제4장 결 론	50
참 고 문 헌	51

그림 목 차

그림 2.1	거시적 잔류응력과 미시적 잔류응력	7
그림 2.2	용접잔류응력의 영향	8
그림 2.3	균열 부근의 용접 잔류응력 분포	9
그림 2.4	파괴역학 파라미터	10
그림 2.5	두께에 따른 잔류응력 측정방법	11
그림 2.6	중성자회절법의 원리	12
그림 2.7	중첩의 원리에 의한 등고선법	14
그림 2.8	고유변형도법의 원리	16
그림 2.9	구멍 뚫린 평판의 게이지 부착	17
그림 2.10	응력의 방향에 따른 게이지 위치	18
그림 2.11	(a),(b)축에 따른 원주방향 거리에서의 변화량, (c) $K(\alpha)$ 에 비례하는 직각좌표	19
그림 2.12	DHD법의 원리	22
그림 2.13	Drilling과 Trepanning 과정	23
그림 2.14	Trepanning 측정시 직경의 변화량	25
그림 2.15	타원체의 직경 d_a, d_b	26
그림 3.1	일정한 형태의 응력 조건	28
그림 3.2	굽힘 형태의 응력조건	28
그림 3.3	2차 곡선 형태의 응력조건	28
그림 3.4	두께 20mm 모델의 형상	29
그림 3.5	모델의 노드 측정 위치	30

그림 3.6 두께 20mm 시험편의 경계 조건	31
그림 3.7 코어시편의 경계조건	31
그림 3.8 코어시편의 직접적인 구속	32
그림 3.9 직접 구속 시 코어시편의 응력분포도	32
그림 3.10 직접 구속 시 코어시편의 길이에 따른 응력변화	33
그림 3.11 코어시편의 스프링 구속	33
그림 3.12 스프링 구속 시 코어시편의 응력분포도	34
그림 3.13 스프링 구속 시 코어 시편의 길이에 따른 응력변화	34
그림 3.14 스텝 1 경우의 응력분포도	35
그림 3.15 스텝 1 경우의 응력변화	35
그림 3.16 스텝 10 경우의 응력분포도	36
그림 3.17 스텝 10 경우의 응력변화	36
그림 3.18 균일인장 응력 조건의 Drilling 응력분포도	38
그림 3.19 균일인장 응력 조건의 Trepanning 응력분포도	38
그림 3.20 균일인장 응력 조건의 직경의 변화량	39
그림 3.21 균일인장 응력 조건의 응력계산결과	40
그림 3.22 균일인장 응력 조건의 오차결과	41
그림 3.23 굽힘 응력 조건의 Drilling 응력분포도	42
그림 3.24 굽힘 응력 조건의 Trepanning	42
그림 3.25 굽힘 응력 조건의 직경의 변화량	43
그림 3.26 굽힘 응력 조건의 응력 계산결과	44

그림 3.27 굽힘 응력 조건의 오차결과 45
 그림 3.28 2차곡선 응력 조건의 Drilling 응력분포도 46
 그림 3.29 2차곡선 응력 조건의 Trepanning 46
 그림 3.30 2차곡선 응력 조건의 직경의 변화량 47
 그림 3.31 2차곡선 응력 조건의 응력 계산결과 48
 그림 3.32 2차곡선 응력 조건의 오차결과 49

표 목 차

표 3.1 시험편의 물성치 30
 표 3.2 DHD와 Drill과 EDM 조건 37
 표 3.3 iDHD의 Drill과 EDM 조건 37

ABSTRACT

Deep Hole Drilling analysis model developed using Finite element method

Moon, Min Ju

Advisor : Prof. Park, Jeong Ung, Ph.D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Cracks in a structure take place due to long use and excessive load. These cracks affect the safety of a structure. Korea started concentrating on bridge construction from 1970s when industrial development was on a right track. Those bridges built then have aged to 10 to 20 years and they take 70% of the total bridges in Korea. Therefore, these old bridges have been a serious social problem. As steel materials are more used for a bridge and those bridges age, their safety is getting more important. particularly, old bridges are very vulnerable to cracking. In general, residual stress relaxes and is redistributed due to the amount of applied load, repetition and crack progress. For safety assessment on cracks detected in safety inspection or when designing allowable crack length, it is very necessary to know the distribution of residual stress in welding spot. To estimate the stability and remaining life year of a structure more accurately, it is necessary to evaluate residual stress more precisely.

Therefore, this study is aimed to develop Deep Hole Drilling Analysis Model, which is one of the methods by which residual stress can be measured in the through-thickness direction. To achieve the goal, this study attempts to analyze the impact of the boundary conditions of core, the diametrical relation of Drill and EDM, and Step conditions on analytical accuracy, using finite element analysis (FEA).

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

구조물의 균열은 장기간 공용 또는 과도하중에 의해 발생된다. 이러한 균열은 구조물의 안전성에 영향을 미치게 된다. 우리나라는 산업화 시점인 70년대부터 교량의 건설이 본격적으로 시작되었다. 그 당시에 건설되었던 교량들의 경우는 10-20년이 경과한 노후 교량이 되었고, 이러한 노후 교량들은 전체 교량의 70%(국토교통부, 2015)를 차지하고 있으며 이는 점점 심각한 사회문제가 되고 있는 실정이다. 국토교통부의 조서에 따르면 우리나라 교량은 04년도와 14년도를 비교했을 때 교량설치 개소는 36%가 증가하였고, 연장은 57%가 증가하고 있어 교량은 지속적으로 증가하고 있는 추세에 있다. 우리나라 인프라 시설은 30년 이상 경과하여 10년 후에는 27.7%, 20년 후에는 66.7%으로 노후화가 급증할 것으로 예상된다.

장재의 사용량과 노후화의 증가로 인하여 안정성이 중요시 되고 있다. 특히 노후화된 교량들의 경우는 균열에 취약하다. 균열이 진전 될 때 잔류응력은 일반적으로 작용하중의 크기와 반복 수 그리고 균열 진전 등으로 인하여 이완되고 재분포 되기 때문이다(Lee. Y.B 등, 1997). 또한 구조물의 균열은 피로에 의해서 일어나는 경우도 있다. 용접부는 구조상 불연속면으로서 응력집중이 발생하여 공칭응력보다 더 큰 응력이 생겨 소성변형을 일으킨다. 이러한 변형이 축적되면서 균열이 발생하게 된다. 금속적인 부분에서는 용접에 의하여 가열 또는 냉각되는 용접부는 금속부분이 과대해지거나 가공경화가 발생하여 작은 하중에 의해서 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 안전진단에 의해 발견된 균열이나 허용균열길이를 설계할 때 구조물의 안전성 평가를 위해서는 용접부의 잔류응력분포를 아는 것이 필수적이다(Kim S.C 등, 1987). 구조물의 안정성과 잔존 수명을 보다 정확히 예측하기 위해서는 잔류응력을 보다 정확하게 평가하여야 한다.

잔류응력은 구조물이나 재료의 잔존수명에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 이러한 중요 인자인 잔류응력을 정확하게 측정하기 위한 연구가 진행되어오고 있다. 잔류응력을 측정 및 예측하는 방법으로는 크게 해석적인 방법과 실험적인 방법 두 가지로 분류할 수 있다. 해석적인 방법은 FEM, 즉 유한요소법을 이용한 방법이다. 실험적인 방법으로는 구조물의 파괴정도에 따라 비파괴, 세미파괴, 완전파괴 방법으로 분류할 수 있다. 먼저 비파괴적인 방법으로서 X-ray Method, Neutron Diffraction Method, Magnetic Method가 있으며, 세미파괴 방법으로는 Hole Drilling Method, Ring Core Method, 완전파괴방법으로는 DHD법(Deep Hole Drilling Method), Contour Method, Inherent Strain Method 등이 있다. 이 중에서도 DHD법(Deep Hole Drilling Method)은 영국에서 개발되었으며, 일본에서도 개발 완료 단계에 있다. 우리나라도 완전파괴방법 중 하나인 DHD법을 해석적으로 연구하고 장비를 구축한다면 원자력 연구소에서 가지고 있는 중성자 회절법과 같이 세계적으로 인정받는 구조물의 안전성평가 기술력을 보유 할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 두께방향으로 잔류응력을 측정할 수 있는 방법 중 하나인 Deep Hole Drilling 해석모델을 개발하고자 한다. 이를 위해 필요한 코어의 경계조건, Drill과 EDM의 직경의 관계, Step 조건들이 해석정밀도에 미치는 영향을 유한요소해석을 이용하여 밝히고자한다.

1.2 연구 동향

잔류응력을 측정하는 방법에는 해석적 방법과 실험적 방법으로 분류된다. 해석적인 방법으로는 수치해석적인 방법이 있다. 하지만 이 자체만으로는 신뢰성을 확인하기가 어렵기 때문에 실험적인 방법과 함께 비교하여 연구가 수행되고 있다. 해석적인 방법으로는 ERPI에서 용접현상을 정량화 하려는 연구를 수행했으며, IIW(국제용접연구회), PVRC와 EU의 국제 공동연구가 이루어졌다. Murakawa 등(1996), Ueda 등(1975) 등이 유한요소법을 이용한 용접부의 열 탄소성해석을 통하여 잔류응력을 계산하였다. 또한 박정웅 등(2009)은 두께에 따른 용접잔류응력의 영향을 연구하는 등 유한요소법을 통한 해석적인 연구를 하는 등 많은 연구들이 진행 중에 있다.

실험적인 방법으로는 대표적인 방법으로 중성자회절법(Neutron Diffraction Method), 등고선법(Contour Method), 고유변형도법(Inherent Strain Method), 홀드릴링법(Hole Drilling Method), 딥홀드릴링(Deep Hole Drilling Method) 등이 있다. 중성자회절법(Neutron Diffraction Method)은 브래그의 법칙에 의한 중성자 회절을 이용하여 잔류응력을 측정하는 방법으로서 최근에는 70mm 두께 용접 시험편을 구부린 단결정 단색기를 이용하고 중성자 빔의 충돌 가능성을 보여주는 중성자 감쇄능이 최소화된 과장용 선택하는 핵심기술2가지를 이용하여 투과 및 잔류응력을 측정하는데 성공하여 연구(우완측 등, 2015)가 진행 되는 등 연구가 진행되고 있다. 등고선법(Contour Method)은 브루크너의 원리에 의해 2000년도에 개발된 잔류응력 측정방법중 하나이다. 이 방법은 시편을 커팅한 후에 그 커팅면의 변형을 측정하여 FEM 탄성해석 식에 대입하면 시편에 존재하는 잔류응력을 구할 수 있다. 고유변형도법(Inherent Strain Method)은 시편에 Strain Gage를 부착하여 절단함으로써 게이지의 변형량을 측정하여 잔류응력을 측정하는 방법이다. 최근에 25mm 맞대기 용접부 두께방향의 잔류응력을 측정하는 연구(박정웅 등, 2013)가 진행되었다. 홀드릴링법은 세미과피 잔류응력 측정방법으로써 시편에 Strain Gage를 붙이고 구멍을 뚫으면 응력이 재분포 되어 구멍 주위에 변화가 생기게 된다. 이때 생긴 변화량을 토대로 표면의 잔류응력을 측정하는 방법이다. 최초 연구는 1930년 J. Mathar에 의해서 연구가 진행되었다.

딥홀드릴링법(Deep Hole Drilling Method)의 기원은 암석역학에 있다(E.R. Lee, 1964). 암석에 시추를 하여 주위의 변형을 토대로 암석의 응력을 측정하였다. 암석의 응력을 측정하는 방법은 Borehole 후 over-coring을 하여 그 변형을 토대로 응력을 측정하는 것이다(C.D. Martin 등 1991). Borehole과 over-coring방법이 개발되면서 교량이나 콘크리트 구조물 등과 같은 토목구조물에도 사용이 되었고, 암석역학과 대형구조물에 광범위 하게 적용이 되었다. 이 방법은 장점은 구조물에서 표면으로부터 두께 방향으로 측정범위가 광대하지만, 용접이나 금속, 압력배관에서 응력을 측정하기는 어려웠다. 그 후 연구의 발달로 DHD법(Deep Hole Drilling method)을 인용하여 여러 방면에서 연구가 진행되었다. 용접에서의 잔류응력측정(D.A. Ferrill, 등 1966)과 내부에서의 잔류응력측정(E.M. Beany 등 1978) 등의 연구가 진행되었다. 이 후 잔류응력평가를 위한 DHD법을 사용하여 구멍의 굴곡을 측정하는 연구(A.A. Gracia Granada 등, 1998)가 이루어 졌으며, 2005년에는 외경이 412mm이고 두께가 19.6mm인 용접된 파이프의 잔류응력을 측정하였다. 재료는 AISI Type 316H를 사용하였고, 용접은 Girth, WR 방법을 사용하였다. 그 결과를 중성자법과 비교하였다. 2006년에는 DHD법을 통하여 항공우주 부품에 사용되는 알루미늄합금의 잔류응력을 측정하는 연구가 이루어졌다(X. Ficquet 등, 2006). 2007년과 2008년에는 측정법의 정확성을 높이기 위한 새로운 방안들이 제시되었다. 2007년에는 유한요소법을 사용하여 Increment를 이용한 새로운 방법을 제시하였다(A.H.Mahmoudi 등, 2007). 이 때, Increment에 따라 Trepanning을 하여 생긴 직경의 변화량을 이용하여 변형률을 다르게 정의하였다. 코어의 크기는 5.75mm, 스텝은 25을 적용했다. 2008년에도 유한요소해석프로그램 abaqus를 이용하여 새로운 DHD법을 제시하였다(A.H.Mahmoudi 등, 2008). 이 때, 방법은 2007년과 동일하게 Increment를 이용하여 새로운 DHD법을 사용하였으며, Hole직경이 3mm, 코어가 10mm 인 316L Steel를 적용하여 잔류응력을 측정하였고, 그 결과를 중성자법으로 측정한 결과와 비교하였다. 2011년에는 DHD법에서 소성효과를 고려하여 축대칭 잔류응력에 관한 연구를 진행하였다(A.H. Mahmoudi, 등 2011). 소성효과를 줄이기 위해 깊이와 코어 직경의 크기를 고려하여 Increment법을 적용 후 응력 오차율을 계산하였다. 이에 더불어 2012년에는 코어의 기울기와 Drilling과 Trepanning으로 인한 소성의 영향을 고려한 새로운 방안을 제시하는 연구가 진행되었으며(Houichi Kitano 등, 2012),

이 때 새롭게 제시된 방안은 소성영역에서의 변화량과 응력의 변화량을 고려한 공식을 제시하였다. 또한, DHD법을 유한요소해석프로그램인 abaqus를 이용하여 세 가지 모델 Rectangular beam, Hollow cylinder, Solid cylinder-to-cylinder를 316L stainless steel의 물성치를 적용하여 잔류응력이 크게 존재하는 영역은 기존의 DHD법보다는 iDHD법을 사용하는 것을 권장하였다(D.J. Smith 등 2012). 2015년에는 두께가 18mm인 AS4/8552 복합플레이트 재료를 사용하여 잔류응력을 측정하였다. 이 때 Lamiate재료를 DHD법을 사용하여 잔류응력을 측정한 경우에는 코어의 층간 전단응력을 잔류시키는 효과를 줄이기 위해서는 drill의 직경과 Trepan의 직경이 층의 두께보다 작아야 됨을 확인하였다(C. Garza 등, 2015).

제2장 이론적 배경

2.1 잔류응력의 특성

잔류응력은 재료나 구조물에 외부적인 힘이 가해지지 않았을 때 잠재되어 있는 응력을 말한다. 잔류응력은 인장과 압축으로 이루어져 있으며 힘과 모멘트는 0으로써 평형을 이루고 있다. 또한 재료 또는 구조물의 취성, 파괴 강도, 좌굴 강도, 부식에 저항성 등에 영향을 주는 중요한 요인이 되기도 한다.

2.1.1 잔류응력의 생성

잔류응력들은 생산된 재료나 구조물의 사용수명에 영향을 미칠 수가 있다. 예를 들어, 이러한 응력들은 일정하지 않는 소성 변형 때문에 요소 내에서 양립하지 않는 국부변형률에 대한 탄성반응을 일으키게 된다. 재료 주변은 차원을 보존하기 위하여 탄성 적으로 변형을 하게 돼서 잔류응력을 만들게 된다. 위의 예와 같이 일정하지 않은 소성변형, 재료표면의 변형, 열구배의 존재에서 재료의 상 또는 밀도의 변화로 인하여 잔류응력 생성되게 된다. 잔류응력은 두 가지로 나누어 질수가 있는데, 거시적 잔류응력(Macro-residual stress), 미시적 잔류응력(Mirco-residual stress)으로 나뉘어진다. 거시적 잔류응력은 균일하지 못한 소성가공, 용접에 의한 팽창 및 수축, 굽힘 등에 의해 발생할 수 있으며, 미시적 잔류응력은 금속소재의 경우는 마르텐사이트 변태에 의해 발생할 수 있고, 열에 의한 응력, 하중에 의한 응력으로 인해서 발생 할 수가 있다. 그림 2.1은 잔류응력을 몇 가지 예로써 그림으로 나타낸 것이다. 왼쪽은 거시적 잔류응력 오른쪽은 미시적 잔류응력을 나타내고 있는 그림이다.

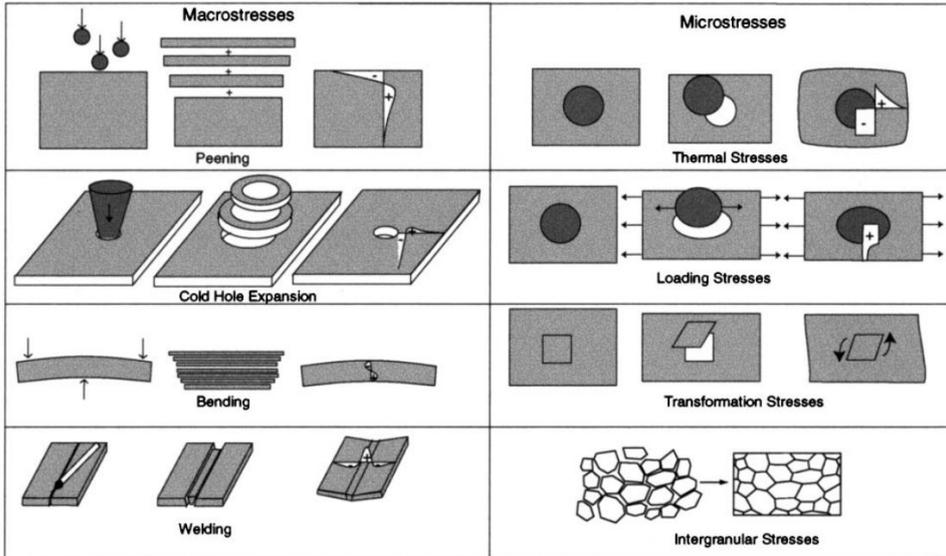


그림 2.1 거시적 잔류응력과 미시적 잔류응력(P.J. Wither 등 2001)

2.1.2 잔류응력이 구조물에 미치는 영향

잔류응력은 스스로가 평형을 이루고 있다. 이렇게 평형을 이루고 있기 때문에 잔류응력의 존재는 확실하지 않을 수가 있어 설계를 할 때에 무시되며 간과될 수가 있다. 그러나 잔류응력은 외적하중을 고려 할 때처럼 같은 방법으로 고려되어야 한다. 재료강도의 시점에서, 잔류응력의 주요 영향은 추가응력이 더해진 것과 같다. 잔류응력은 재료나 구조물에 있어서 해가 되며, 재료의 강도를 저하시키고 초기균열을 일으킨다. 다음은 잔류응력의 피해사례를 예로 들었다. 첫째로 보잉737은 리벳 구멍의 인장 잔류응력에 의해 강화피로 균열이 커져 동체의 위쪽 절반이 떨어져 떨어져 승객과 승무원이 부상을 당했다. 두 번째로 원자로 열 교환 튜브의 응력 부식 균열은 전력 생산의 손실을 야기한다. 이러한 사례들은 잔류응력이 해가 된 것을 알려 주는 좋은 예이다. 다음은 재료의 피로, 취성과파괴, 균열에 대해 설명하고자 한다.

가. 피로강도

강구조물에 외력이 반복 하여 작용하게 되면 응력의 집중부 또는 용접의 형상이나 결합 등에 기인하는 응력집중부에서 균열이 발생하여 최종적으로 부재가 파단에 도달하게 된다. 이는 손상이 지속적으로 쌓이게 되어 균열이 발생하는 현상을 피로라고 한다. 피로는 일반적으로 인장응력으로 인한 반복 작용에 의하여 발생하게 되지만, 압축응력만이 작용하는 범위에서도 잔류응력이 존재한다면 피로로 인한 균열이 발생 할 수도 있다.

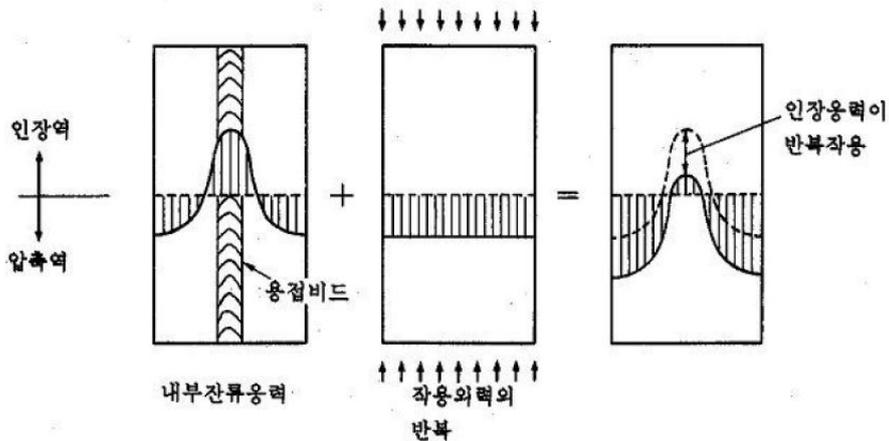


그림 2.2 용접잔류응력의 영향(박정웅 등, 2014)

그림 2.2은 용접잔류응력의 분포도를 나타낸 모식도이다. 용접 할 시에는 용접비드를 따라 주위에 항복점에 도달하는 인장응력이 내부응력으로서 잔류하게 된다. 이러한 용접부에 압축응력이 작용하면 용접부의 내부응력과 중첩된 인장응력이 반복적으로 작용하게 된다.

나. 균열

균열이 있는 판을 용접하면 균열 부근의 과도적 열응력과 잔류응력은 균열이 없는 판과 다르게 나타나게 된다. 용접에 의한 인장잔류응력 실온부근의 온도에서 균열이 발생하게 되면, 균열 면에 작용한 인장잔류응력이 해방되어 균열 부근에서 잔류응력의 재분포가 일어나게 된다. 그 결과 균열의 선단부분에서 재료의 항복강도를 넘는 인장응력이 발생하여 선단 부분에 소성변형을 일으키게 된다.

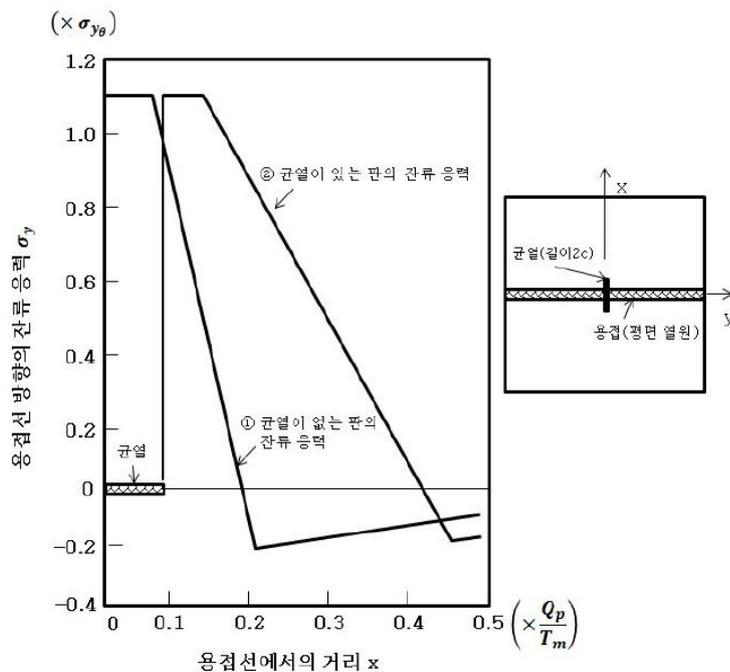


그림 2.3 균열 부근의 용접 잔류응력 분포(엄기원, 2010)

그림 2.3은 균열이 있는 판과 균열이 없는 판의 잔류응력분포를 비교한 것이다. 균열이 있는 판을 용접하게 되면 높은 인장잔류응력이 균열 선단부분에 생겨 잔류응력의 범위가 넓혀지게 된다.

다. 취성 파괴

균열이 존재하는 구조물에서 잔류응력은 용접구조물의 정적 및 동적파괴를 용이하
 도록 돕는다. 잔류응력의 존재는 결함변수의 작용응력 항에 중첩되어 구조물이 취성
 파괴조건에 쉽게 도달하도록 만든다. 취성파괴는 예측할 수 없게 만들며, 이는 균열이
 발생하고 급격히 전단면에 전파해서 파괴에 이르는 것이다. 취성파괴는 저온 등 특수
 한 환경에서 발생할 수도 있다. 그림 2.4는 재료의 파괴인성과 온도의 관계를 그래프로
 나타는 것으로서 Phase 1은 취성영역, Phase 2는 천이온도영역이며, Phase 3는 파괴의
 형태가 대규모항복상태 하에서 연성파괴가 되는 부분을 나타내고 있다.

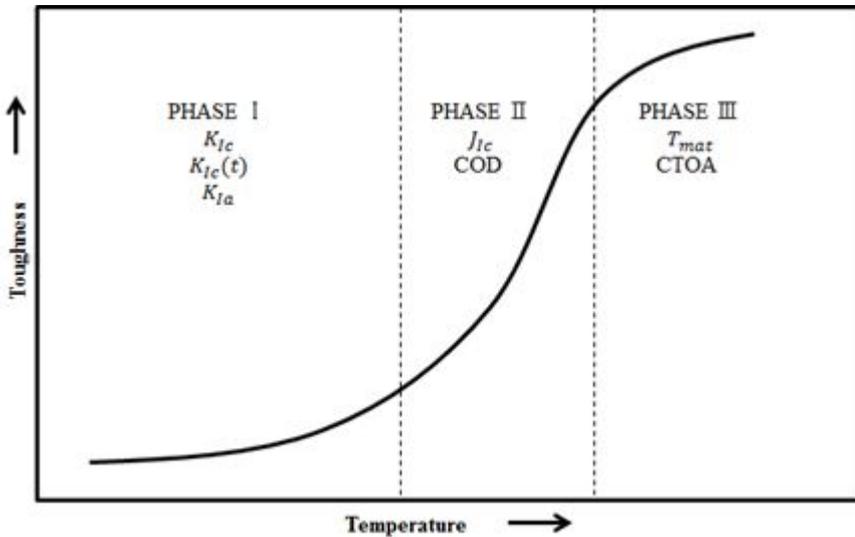


그림 2.4 파괴역학 파라미터

2.2 잔류응력측정방법의 종류

다음은 잔류응력측정방법의 종류에 관해 설명하고자 한다. 그림 2.5 은 두께에 따른 잔류응력 측정방법의 종류를 나타내고 있는 그림이다.

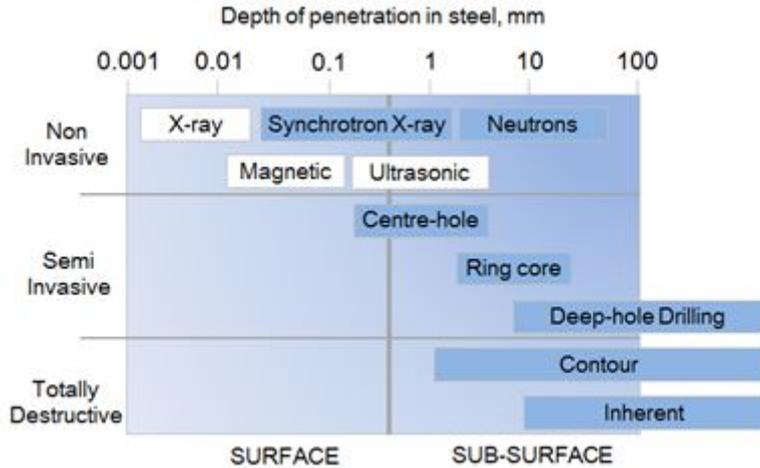


그림 2.5 두께에 따른 잔류응력측정방법

두께에 따른 비파괴적인 방법은 중성자법, X-ray 등이 있으며, X-ray는 표면을 측정하는 반면 중성자법은 두께가 두꺼운 시편의 잔류응력측정도 가능하다. 세미파괴 방법은 센트럴 홀, 링 코어, 딥홀 드릴링이 있다. 딥홀 드릴링 또한 두께가 100t 이상인 시편의 잔류응력측정도 가능하다. 완전파괴적인 방법으로는 윤곽법, 고유변형도법이 있다.

2.2.1 중성자 회절법(Neutron Diffraction Method)

중성자 회절법은 브래그의 법칙으로 성립된다. 브래그의 법칙은 1912년 로런스 브래그에 의해 처음 발견되었다. 브래그의 법칙은 빛의 회절과 반사에 대한 물리법칙이다. 결정과 같은 주기적인 구조를 지닌 물질에 어떤 파장의 빛을 여러 각도에서 쬐면 어떠한 각도에서는 빛의 반사가 강하게 일어나며, 다른 각도에서는 반사가 거의 일어나지 않는 현상을 관측할 수 있다. 이것은 물질을 구성하는 원자에 의해 산란된 빛이, 반복적인 결정구조로 인한 보강, 상쇄간섭을 일으키기 때문이다. 브래그의 법칙은 파장과 결정구조의 폭, 반사면과 광선의 각도 사이의 관계를 설명한다. 그림 2.6은 중성자 회절법의 원리를 도식으로 나타낸 것이다.

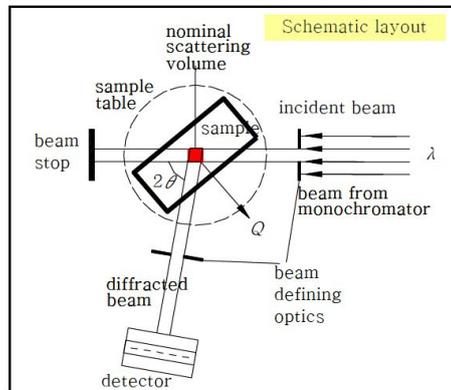


그림 2.6 중성자회절법의 원리

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.1)$$

다음과 같이 식(2.1)을 브래그의 조건이라고 부른다. 여기서, d 는 주기폭, θ 는 결정면과 광선 사이의 각도, λ 는 빛의 파장, n 은 정수이다. 이 조건을 만족했을 때 빛은 회절한다. 중성자 회절법에서 변형의 요소는 두 가지의 결정학적인 면에서 측정된다. 응력을 받은 물체의 격자거리 d , 물체의 같은 재료의 응력을 받지 않는 상태의 격자거리 d_0

라하면 격자거리 변화량 Δd 는 브래그의 반사각도 θ 위치에서 $\Delta\theta$ 를 나타내게 된다. 격자 변형 ε 은 식(2.2)와 같다.

$$\varepsilon = \frac{(d - d_0)}{d_0} = \frac{\Delta d}{d} = -\cot(\theta)(\theta - \theta_0) \quad (2.2)$$

식(2.2)을 이용하여 구한 변형률과 물체의 회절탄성계수값(E)와 포아송비를 후크의 법칙에 식(2.3)과 같이 적용시키면 그 지점에 분포하는 잔류응력을 측정할 수가 있다.

$$\sigma = \frac{E}{1 + \nu} \left[\varepsilon + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \right] \quad (2.3)$$

2.2.2 등고선법(Contour Method)

등고선법은 시험편을 커팅 한 후에 그 변형을 확인함으로써 잔류응력을 측정하는 방법이다. 등고선법은 브루크너의 원리에 기초를 두었다. 브루크너의 원리는 1954년 오스트리아 K.A. 브루크너가 이론을 전개하였고, 그 이후 H.A베테, J.골드스톤 등이 이를 더욱 발전시켰다. 이 원리는 두 입자 사이의 상관관계를 고려한 다체문제의 근사방법이다.

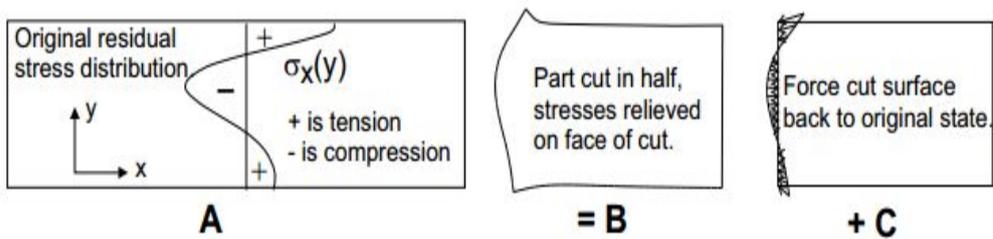


그림 2.7 중첩의 원리에 의한 등고선법(Micahael 등, 2000)

그림 2.7은 등고선법의 원리를 나타내는 그림이다. 먼저 A의 경우이다. A의 경우에는 초기잔류응력의 분포도를 나타내어주고 있다. 여기서 +는 인장을 나타내고, -는 압축을 나타내고 있다. 다음은 B의 경우이다. B의 경우는 절단했을 때의 경우이다. 시험편을 절반으로 커팅으로 하였을 경우에 응력이 풀리는 것을 나타낸 것이다. C의 경우는 응력이 없는 상태로서 커팅에 의해 변형된 표면이 평면의 형태로 되돌아가게 되는 것을 나타낸다. B의 응력상태에 C의 상태의 변형을 적용시키게 되면 다음과 같은 식 (2.4)으로 잔류응력을 구할 수 있다.

$$\sigma^A(x, y, z) = \sigma^B(x, y, z) + \sigma^C(x, y, z) \quad (2.4)$$

σ^A 는 초기의 잔류응력, σ^B 는 커팅 후의 잔류응력, σ^C 는 이완된 단면의 잔류응력을 나타내고 있다.

2.2.3 고유변형도법(Inherent Method)

고유변형은 용접에 의해서 발생되며 그 범위는 용접열에 의해서 열탄소성 이력을 받는 영역에서 발생된다. 고유변형은 잔류응력을 만들 수 있기도 하며, 만들지 않을 수도 있다. 이처럼 잔류응력을 만드는 고유변형을 유효고유변형이라 한다. 시편의 임의 점에서 발생하는 고유변형(ϵ^*)과 탄성변형(ϵ), 응력(σ) 사이에는 각각 탄성응답매트릭스(H^*), 탄성응력-변형매트릭스(D) 사이에 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\epsilon = [H^*] \cdot \epsilon^* \quad (2.5)$$

$$\sigma = [D] \cdot \epsilon = [D] \cdot [H^*] \cdot \epsilon^* \quad (2.6)$$

고유변형이 분포하는 범위는 절단 등에 의해 새로운 소성변형이 발생하지 않으면 절단을 해도 변하지 않는다. 따라서 고유변형은 시편으로부터 측정된 탄성 변형량으로부터 다음과 같이 계산 될 수 있다. 스트레인게이지로 측정된 탄성변형을 m^ϵ 이라 한다면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다. 여기서, ($\epsilon^{\circ*}$)는 고유변형의 최확치, (V)는 오차이다.

$$m^\epsilon - [H^*][\epsilon^{\circ*}] = V \quad (2.7)$$

고유변형의 최확치는 최소자승법으로부터 식(2.8)과 같은 식을 유도할 수 있다. 전에 구한 식을 이용하여 식(2.6)에 대입하면 잔류응력의 최확치(σ°)을 식(2.9)와 같은 탄성 해석으로 구할 수 있다.

$$\epsilon^{\circ*} = ([H^*]^T [H^*])^{-1} \cdot [H^*]^T \cdot m^\epsilon \quad (2.8)$$

$$\sigma^\circ = [D] \cdot \epsilon = [D] \cdot [H^*] \cdot \epsilon^{\circ*} \quad (2.9)$$

다음 그림 2.8은 고유변형도법의 원리를 설명해주고 있다. 시험방법은 다음과 같다. 먼저 시편에 측정하고자 하는 방향으로 Strain Gage를 붙인 다음 데이터로그를 이용하여 초기 변형률을 측정한다. 그런 다음 Wire 절단기를 이용하여 측정하고자 하는 위치에서 절단을 하고 다시 데이터로그를 이용하여 측정하여 변형률을 구한다. 나온 변형률에 시편의 탄성계수를 곱하면 응력이 나오는데 이 응력과 기존의 응력의 차이가 잔류응력이 되는 것이다. Wire 절단기를 이용하는 것은 절단을 할 경우 시편에 열이 발생하여 소성변형이 발생하는 것을 최소화 하고자 함이다.

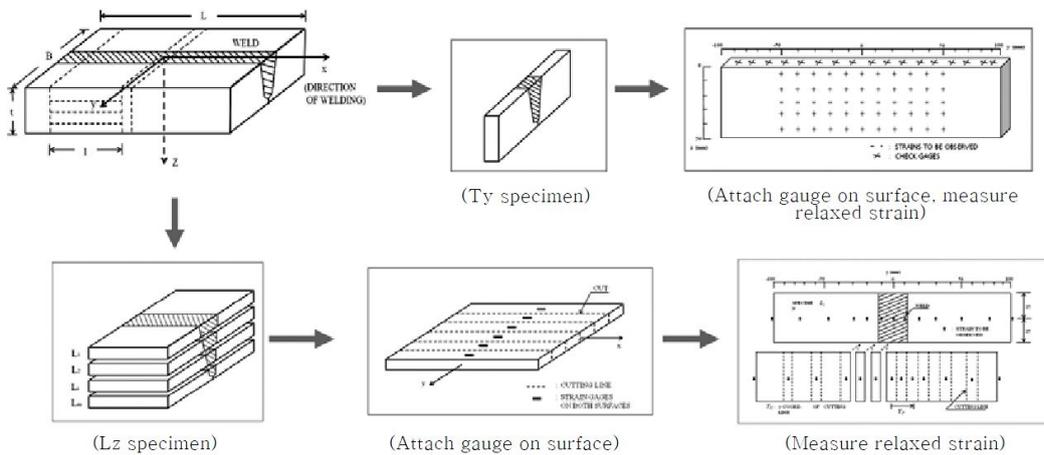


그림 2.8 고유변형도법의 원리(박정웅 등, 2013)

2.2.4 홀드릴링법(Hole Drilling Method)

홀드릴링법은 시편에 Drilling을 함으로써 그 주위의 변화량을 토대로 표면의 잔류응력을 계산하는 방법이다. 시편에 서로 다른 위치에서 로켓 스트레인 게이지를 부착 후 Drilling을 하여 부착 시킨 스트레인 게이지의 변화량을 토대로 잔류응력을 측정하게 된다. 잔류응력을 가지고 있는 재료에서 Drilling 구멍은 구멍을 둘러싼 표면 영역의 변형을 바꾼다. 이 때 주어진 지름의 구멍으로부터 일정한 거리에 원주 방향과 단축응력영역의 방향에서의 변형을 고려해 주어야 한다.

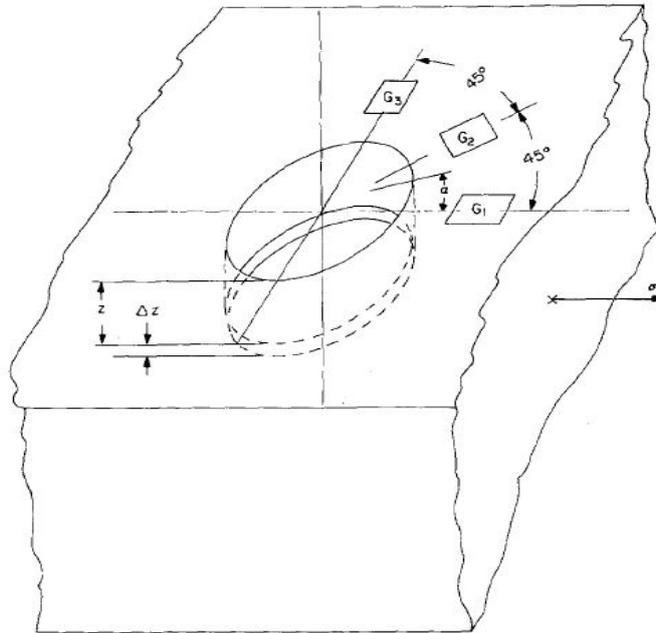


그림 2.9 구멍 뚫린 평판의 게이지 부착(Rendler 등, 1966)

그림 2.9은 평판에 게이지를 부착 후 구멍을 뚫은 모식도이다. 평판에 응력이 존재하고, G_1, G_2, G_3 는 게이지를 나타내며 Z 는 평판의 두께, ΔZ 는 구멍을 뚫었을 때 두께의 변화량이다. 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\epsilon_z(\alpha) = K_z(\alpha)\sigma_z\Delta_z \quad (2.10)$$

여기서, σ_z 는 깊이에 따른 응력, α 는 그림 2.9에서의 응력의 축과 구멍으로부터의 원심방향사이의 각도를 나타내며 $\Delta\epsilon_z(\alpha)$ 는 Drilling을 함으로써 원심방향거리에서의 변형, $K_z(\alpha)$ 는 $Z, \Delta Z$ 와 α 의 값에 결정되는 파라미터이다. 이 파라미터는 실험에 의해서만 결정되어진다.

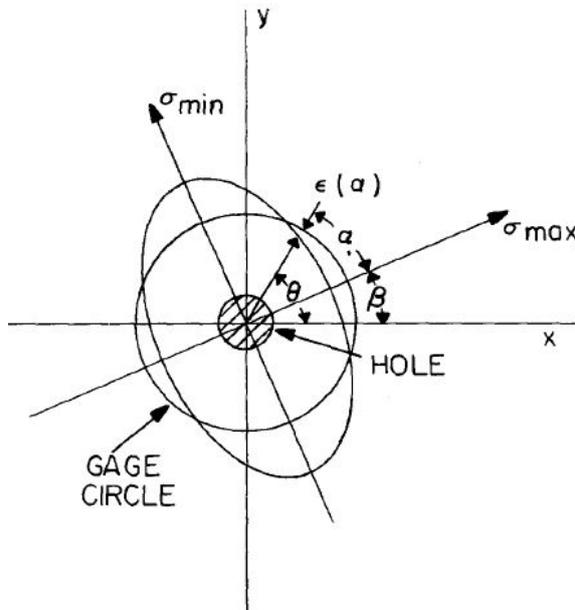


그림 2.10 응력의 방향에 따른 게이지 위치(Rendler 등, 1966)

그림 2.10은 응력의 방향에 따른 게이지 위치를 나타낸 것이다. 간단하게 설명하자면 총 깊이가 Z 일 때 식을 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\epsilon(\alpha) = K(\alpha)\sigma \quad (2.11)$$

여기서, $\epsilon(\alpha)$ 는 직경과 깊이를 Drilling을 함으로써 각도 α 와 원심방향 위치에서의 나타나는 변형이다.

$$\epsilon(\alpha) = K(\alpha)\sigma_{\max} + K(\alpha + 90^\circ)\sigma_{\min} \quad (2.12)$$

식(2.12)에서 α 는 최대응력의 방향으로 측정되어진다. 일반적으로 주응력 축의 방향은 알려져 있지 않다. 그림 2.9에서 β 는 임의의 각으로서 X 축과 σ_{\max} 사이의 각이다. 변형은 θ 의 다양한 값에서 변형 원을 따라 측정되어진다. β 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \theta - \beta \quad (2.13)$$

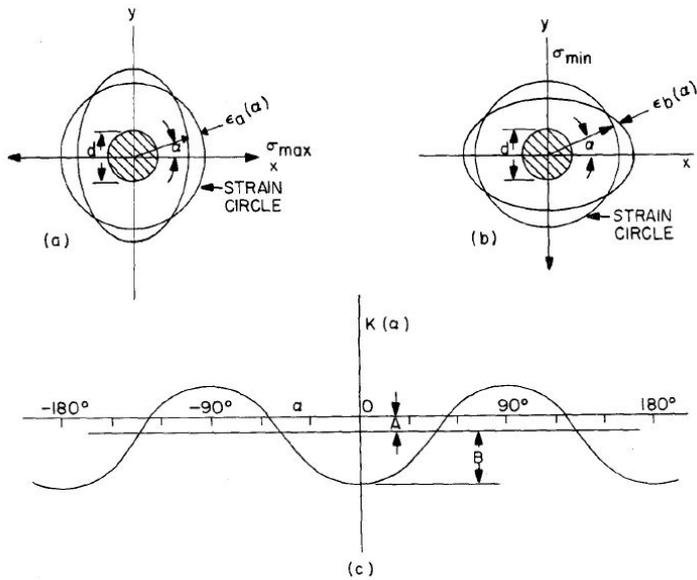


그림 2.11 (a), (b)축에 따른 원주방향 거리에서의 변화량, (c) $K(\alpha)$ 에 비례하는 직각좌표(Rendler 등, 1966)

그림 2.11의 ©에서 (a)와 (b)에 해당하는 $K(\alpha)$ 를 수식으로 나타내자면 식(2.13)과 같으며, 이를 간단히 나타내면 식(2.14)과 같다.

$$K(\alpha) = \sum_n A_n \cos 2n\alpha, \text{ where } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.13)$$

$$K(\alpha) = A + B \cos 2\alpha \quad (2.14)$$

식(2.13)과 식(2.14)를 이용하여 식(2.12)에 대입하면 식(2.15)과 같은 식이 나오게 된다.

$$\epsilon(\alpha) = [A + B \cos 2(\theta - \beta)]\sigma_{\max} + [A + B \cos 2(\theta - \beta + 90^\circ)]\sigma_{\min} \quad (2.15)$$

세 개의 서로 다른 위치에서 변형을 측정하게 되는데, 이는 식(2.15)을 간편하게 만들기 위해 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 이 $\theta = 0, 45, 90^\circ$ 와 일치하게 변형계이치를 배치하는 것이 좋다. 더욱이 식을 간편하게 만들기 위해 $-2\beta = \gamma$ 로 치환하였다. 치환하여 얻어진 방정식으로 $\theta = 0, 45, 90^\circ$ 일 때 세 개의 연립방정식은 상수 A, B, 측정된 변형, 또한 주응력을 얻기 위해 식(2.16), 식(2.17), 식(2.18)처럼 표현될 수 있다.

$$\sigma_{\max} = \frac{\epsilon_1(A + B \sin \gamma) - \epsilon_2(A - B \cos \gamma)}{2AB(\sin \gamma + \cos \gamma)} \quad (2.16)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\epsilon_2(A + B \cos \gamma) - \epsilon_1(A - B \sin \gamma)}{2AB(\sin \gamma + \cos \gamma)} \quad (2.17)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left[\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \right] \quad (2.18)$$

응력과 변형의 관계는 차이가 있다. 그 이유는 상수 A와 B 때문이다. 상수 A와 B는 물질의 탄성계수와 포아송비랑 관련이 있다. 주응력과 재료의 상수 A와 B, 탄성계수 그리고 포아송비로 다시 나타낼 수가 있다.

$$\epsilon_{\max} = \frac{k_1}{E}\sigma_{\max} - \frac{\mu k_2}{E}\sigma_{\min} \quad (2.19)$$

$$\epsilon_{\min} = \frac{k_1}{E}\sigma_{\min} - \frac{\mu k_2}{E}\sigma_{\max} \quad (2.20)$$

최대응력이 x축으로 놓여있을 경우에 β 는 0이 되고 이러한 경우 $\epsilon_{\max} = \epsilon_1, \epsilon_{\min} = \epsilon_3$ 의 조건을 만족하게 된다. 이는 재료의 상수는 위 식들에 의거 하여 탄성계수와 포아송비로 나타낼 수가 있다.

$$\epsilon_{\max} = (A+B)\sigma_{\max} + (A-B)\sigma_{\min} \quad (2.21)$$

$$\epsilon_{\min} = (A+B)\sigma_{\min} + (A-B)\sigma_{\max} \quad (2.22)$$

$$A = \frac{1}{2E}(k_1 - \mu k_2) \quad (2.23)$$

$$B = \frac{1}{2E}(k_1 + \mu k_2) \quad (2.24)$$

2.3 딥홀드릴링법(Deep Hole Drilling Method)

2.3.1 DHD법(Deep Hole Drilling Method)의 원리

DHD법은 두께방향의 잔류응력 측정방법중의 하나로 분류하자면 파괴방법으로 분류되어진다. DHD법은 홀드릴링법과 마찬가지로 Drilling을 함으로써 주위에 변형을 토대로 잔류응력을 측정하는 방법이며, 다른 점이 있다면 여기서 더 나아가 두께가 두꺼운 시편을 가공이 가능하며 Trepanning을 함으로써 잔류응력을 측정한다. 시험 방법은 다음과 같다.

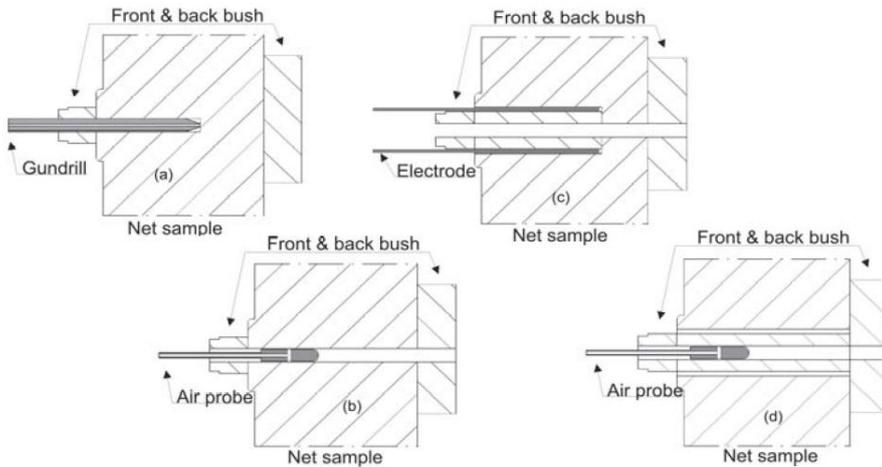


그림 2.12 DHD법의 원리(Mahamoudi 등, 2007)

그림 2.12에서 (a)는 드릴로 Drilling을 한 다음 (b)에서 Air Probe로 내경을 측정한다. 그다음 (c)에서 EDM으로 Trepanning을 한 후에 (d)에서 다시 Air Probe로 내경을 측정한다. 이렇게 측정된 변형률을 계산하여 잔류응력을 계산한다.

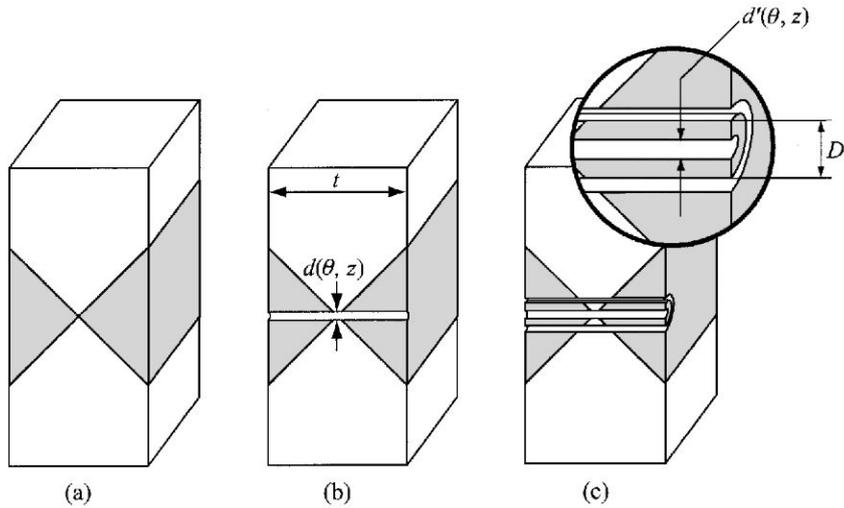


그림 2.13 Drilling과 Trepanning 과정(Dewald 등, 2003)

시편의 두께를 t , Drilling 후의 내경직경을 d 라 하고, Trepanning 완료 후의 내경 직경을 d' 라 하자. 이 내경직경의 차이는 식(2.25)처럼 나타낼 수 있다.

$$\Delta d(\theta, z) = d - d' \quad (2.25)$$

여기서, 구해진 Δd 를 이용하여 변형률을 산정할 수 있다.

$$\epsilon(\theta, z) = \frac{\Delta d(\theta, z)}{d} \quad (2.26)$$

변형률은 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ 각 축 방향에 응력에 따라서 탄성계수와 같이 다른 방법으로 접근을 할 수가 있다. A와 B는 재료의 이완 상수이다.

$$\epsilon(\theta, z) = \frac{f(\theta, z)\sigma_{xx} + g(\theta, z)\sigma_{yy} + h(\theta, z)\sigma_{xy}}{E} \quad (2.27)$$

$$f(\theta, z) = A(z)[1 + B(z)2\cos(2\theta)]$$

$$g(\theta, z) = A(z)[1 - B(z)2\cos(2\theta)]$$

$$h(\theta, z) = 4A(z)B(z)\sin(2\theta)$$

$$\epsilon(\theta, z) = \frac{\Delta d(\theta, z)}{d} = \frac{f(\theta, z)\sigma_{xx} + g(\theta, z)\sigma_{yy} + h(\theta, z)\sigma_{xy}}{E} \quad (2.28)$$

여기서 깊이 z 에 따라 변형률 식(2.28)은 행렬로 나타낼 수 있다. 행렬로 나타낸 식은 잔류응력을 구하기 위해 이항시켜 방정식을 해를 가지면 잔류응력을 구할 수 있다.

$$\epsilon(\theta, z) = \frac{1}{E} \cdot M \cdot \sigma \quad (2.29)$$

$$\epsilon(\theta, z) = \begin{bmatrix} \epsilon(\theta_1, z_1) \\ \epsilon(\theta_2, z_2) \\ \vdots \\ \epsilon(\theta_n, z_n) \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} f(\theta_1, z_1) & g(\theta_1, z_1) & h(\theta_1, z_1) \\ f(\theta_2, z_2) & g(\theta_1, z_1) & h(\theta_1, z_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f(\theta_n, z_n) & g(\theta_n, z_n) & h(\theta_n, z_n) \end{bmatrix}, \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon(\theta, z) \cdot M^{-1} \quad (2.30)$$

2.3.2 iDHD법(Incremental Deep Hole Drilling Method)의 원리

iDHD법은 DHD법과 비교하면 $\epsilon(\theta, z)$ 를 다르게 정의한다. DHD법은 Drilling을 한 후에 측정된 다음 Trepanning을 완전히 끝낸 후 내경직경 측정을 하지만 iDHD법은 Drilling을 하고 측정을 한 후 Trepanning을 두께방향으로 단계적으로 해내가면서 내경직경을 측정을 한다. 시편을 측정하게 되면 그림 2.14와 같은 형태의 그래프가 나온다. 여기서, DHD법은 변형률을 식(2.26)과 같이 정의 하였지만, iDHD법에서 다음과 같이 정의한다.

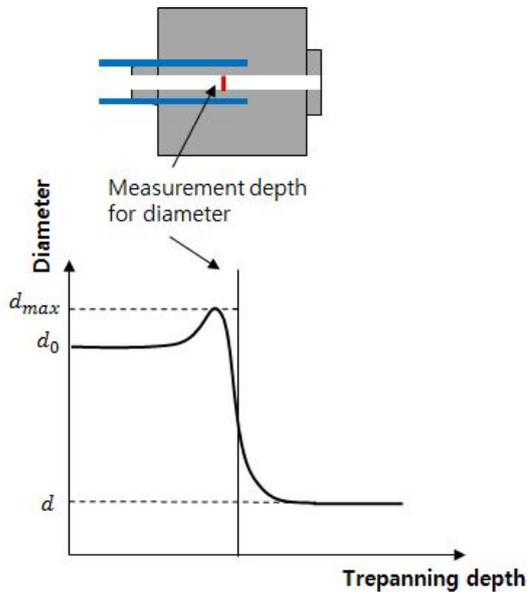


그림 2.14 Trepanning 측정시 직경의 변화량

$$\Delta d(\theta, z) = d_{\max} - d' \quad (2.31)$$

$$\epsilon(\theta, z) = \frac{\Delta d(\theta, z)}{d_{\max}} \quad (2.32)$$

2.3.3 재료의 이완 상수 값의 정의

재료의 이완 상수 $A[z]$ 와 $B[z]$ 는 재료마다 다르다. 이는 재료마다 물리적 특성이 다르기 때문이다. A 와 B 가 필요한 이유는 Drilling을 했을 시 재료의 표면부분에서 굴곡이 발생하기 때문인데 이는 잔류응력을 측정했을 때 오차를 발생시키므로 이완상수 $A[z]$, $B[z]$ 로 보정을 하고자 함이다.

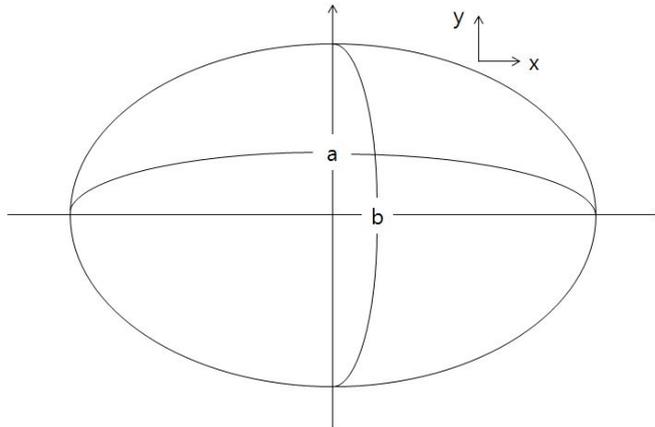


그림 2.15 타원체의 직경 da, db

$$A[z] = \frac{da[z] + db[z]}{d} \quad (2.33)$$

$$B[z] = \frac{da[z] - db[z]}{2(da[z] + db[z])} \quad (2.34)$$

위 식에서 da, db 는 Drilling을 했을 경우 생긴 구멍이 타원체로 봤을 때 타원체의 긴 직경과 짧은 직경을 의미한다. 참고한 논문에 의하면 유한요소해석결과 $A[z]$ 는 보통 1을 사용하며 $B[z]$ 는 두께가 20mm 일 때 0.86-0.98, 100mm일 때는 0.85-0.94를 쓴다.

제3장 유한요소법에 의한 해석

본 장에서는 앞에 이론을 바탕으로 두께가 20mm이고 가로, 세로가 40mm 인 시험편에 대하여 초기잔류응력을 유한요소프로그램 Msc. Marc를 이용하여 그 결과를 Deep Hole Drilling법을 적용하여 비교하여 검증하고자 한다. 먼저, 해석에 앞서 해석의 조건들을 설명하고자 한다. 그 다음 초기조건인 Uniform, Bending, Quadric 형태의 초기잔류응력의 조건을 주었을 시 DHD법과 iDHD법을 검증하고자 한다.

3.1 FEM 해석조건

유한요소프로그램인 MSC. Marc를 이용할 때 사용한 해석조건들을 설명하고자 한다. DHD법과 iDHD법을 적용시켜 유한요소프로그램을 통하여 잔류응력을 계산할 때는 적용되는 경계조건과 해석시간의 스텝 수 모델의 치수에 따라 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 Drill의 직경이 1.5mm, 2mm, EDM 내부직경이 3mm, 5mm이고 두께가 0.5mm 일 때의 조건을 가지고 초기응력이 3가지인 경우에 대해 해석을 진행하였다.

3.1.1 초기응력조건

초기응력 조건은 세 가지로 분류하였다. 균일인장 형태의 응력, 굽힘 형태의 응력, 2차 곡선 형태의 응력으로 나눌 수 있으며 400Mpa를 기준으로 초기응력조건을 주었다. 초기 응력 조건을 잔류응력과 동일하게 보고 해석을 실시하였다.

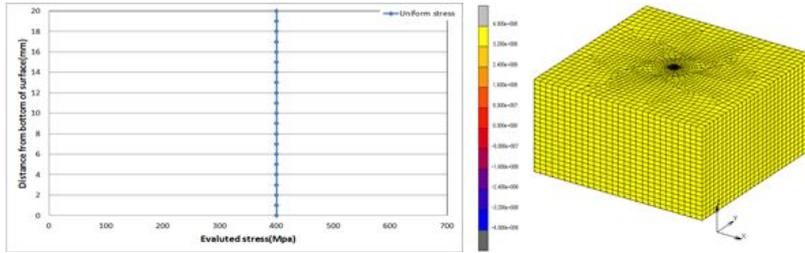


그림 3.1 일정한 형태의 응력 조건

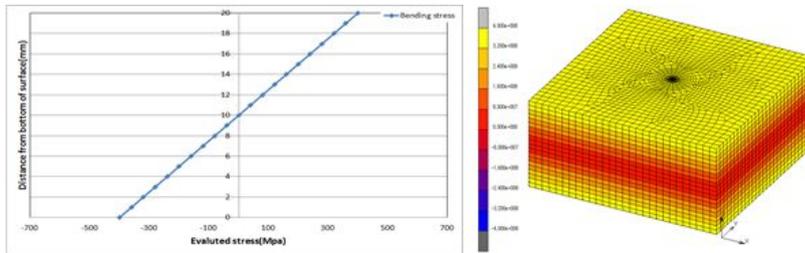


그림 3.2 굽힘 형태의 응력조건

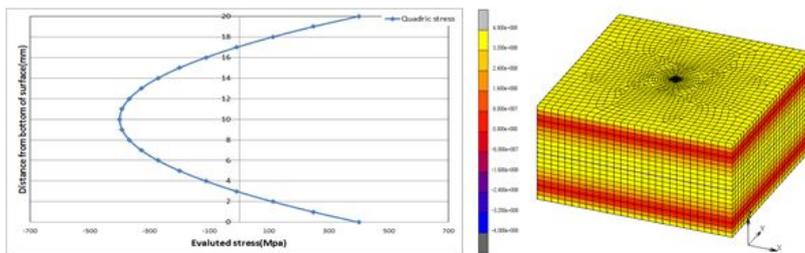


그림 3.3 2차 곡선 형태의 응력조건

3.1.2 해석 모델

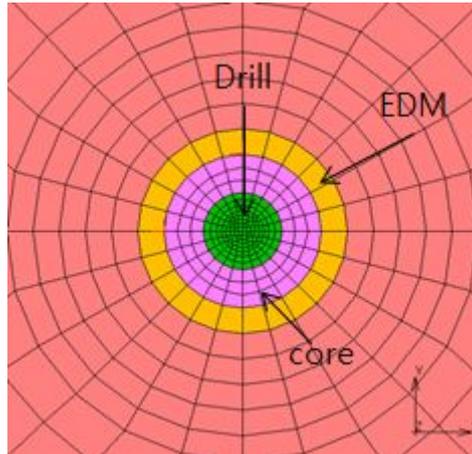
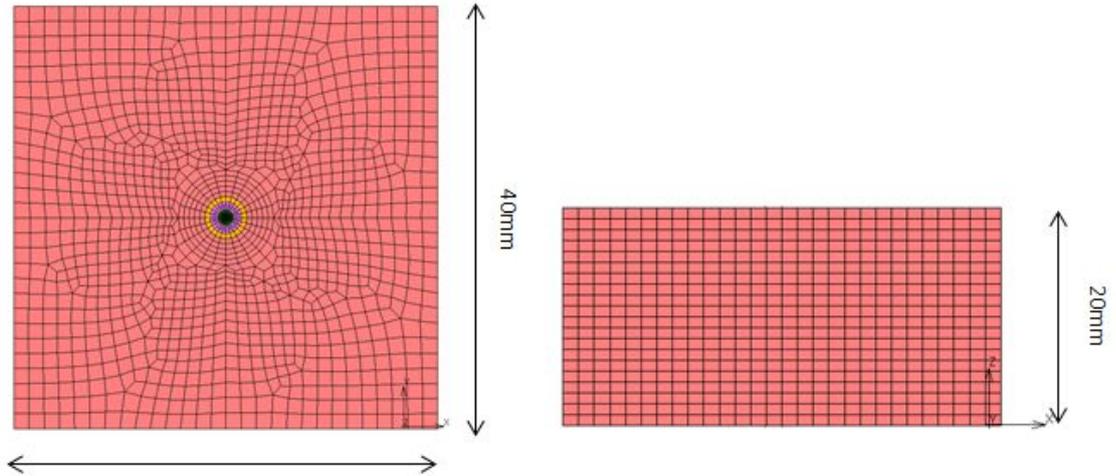


그림 3.4 두께 20mm 모델의 형상

그림 3.4은 해석 시 사용한 모델의 형상이다. (a)는 모델의 폭과 너비의 치수 및 형상을 나타내고 있으며 (b)는 모델의 두께를 나타내고 있다. 그림 3.5는 Drilling과 Trepanning을 할 범위를 나타낸 것이다. 이 범위는 각도에 따른 거리를 구하기 위하여 원과 같이 대칭적으로 모델링을 하였다. Drilling 및 Trepanning 방향을 Z방향으로 기준을 잡았다. 해석 시 사용된 물성치의 조건은 다음 표 3.1과 같다.

표 3.1 시험편의 물성치

Material	Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio	Yield Stress[MPa]
Steel	20000	0.3	500

3.1.3 측정각도

측정위치는 다음과 같다. 0°, 15°, 30°, 45°, 90° 도에서 측정을 하였으며, 두 노드 점의 거리를 구하였다. 그림 3.5는 모델의 노드 측정각도를 나타내고 있다. (a)는 실제 모델 (b)의 모식도이며 각 각도 0°, 15°, 30°, 45°, 90°에서 측정을 실시하였다.

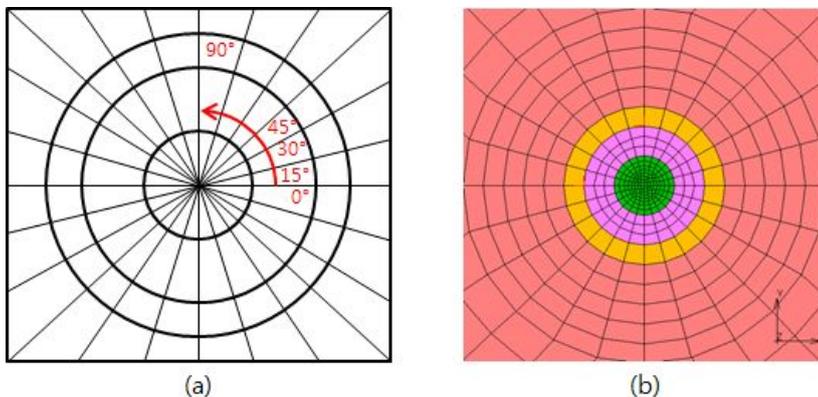


그림 3.5 모델의 노드 측정위치

3.1.4 경계조건

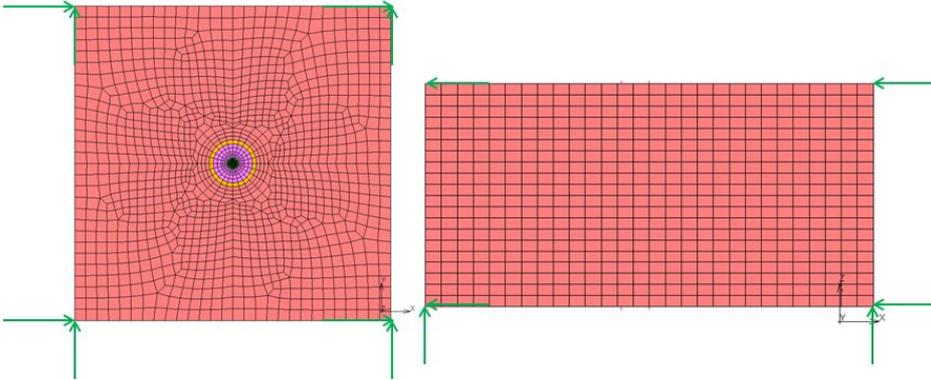


그림 3.6 두께 20mm 모델의 경계 조건

그림 3.6는 경계조건을 나타내고 있다. 경계조건은 X, Y, Z를 모두 구속하여 초기 잔류응력을 주었다. Drilling을 하고 Trepanning을 한 후 남은 코어 시편의 경계조건은 그림 3.3과 같다. 직접구속하지 않고 스프링을 이용한 경계조건으로서 작업 완료시에 코어 시편에 최대한 영향이 없게끔 하기 위해서 이와 같은 경계조건을 적용시켰다.

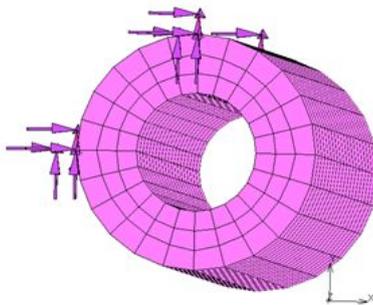


그림 3.7 코어시편의 경계조건

다음은 코어시편을 직접적인 구속을 했을 때와 스프링구속을 했을 시 응력의 차이를 나타내어 그 결과를 비교해보았다.

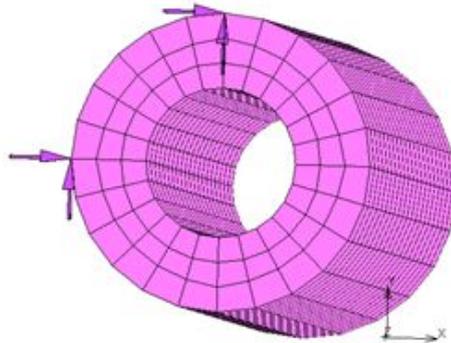


그림 3.8 코어시편의 직접적인 구속

그 결과 직접적인 구속을 할 경우에는 응력의 구속을 한 노드점의 응력집중이 생겨 응력이 풀려야 할 부분에서 응력들이 풀리지 않는 현상이 나타났다.

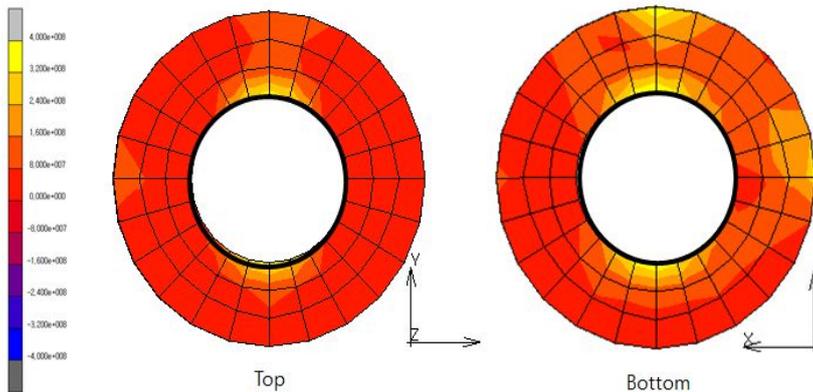


그림 3.9 직접 구속 시 코어시편의 응력분포도

그림 3.9은 위의 형상을 길이에 따른 평균응력으로 나타낸 것으로 응력이 많은 차이가 난다는 것을 확인할 수 있다.

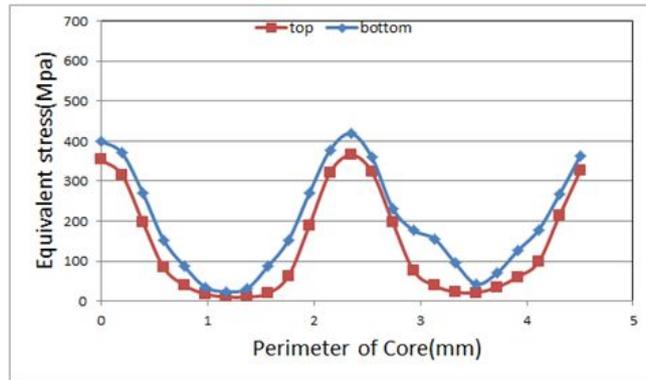


그림 3.10 직접 구속 시 코어시편의 길이에 따른 응력변화

이를 방지하고자 직접적인 구속이 아닌 스프링으로 간접구속을 적용하였다. 이는 탄성계수가 낮은 스프링으로 각 노드점을 연결하여 최대한 자유롭게 변형이 일어날 수 있도록 하는 경계조건 방법이다.

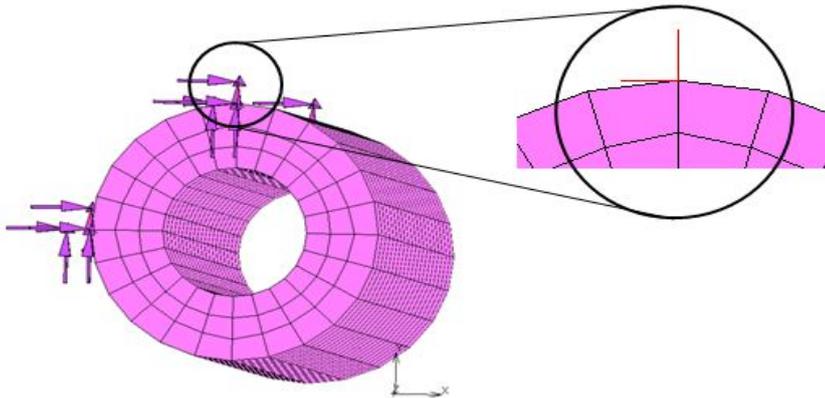


그림 3.11 코어시편의 스프링 구속

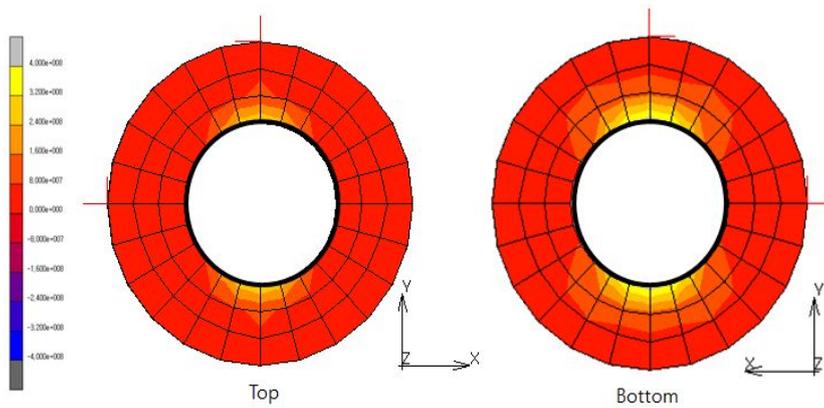


그림 3.12 스프링 구속 시 코어시편의 응력분포도

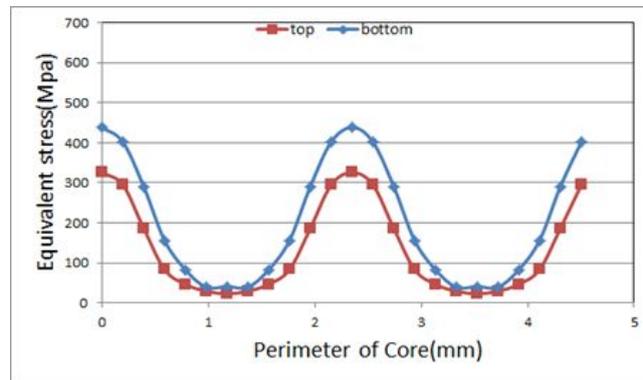


그림 3.13 스프링 구속 시 코어시편의 길이에 따른 응력변화

직접 구속과 스프링 구속 시 길이에 따른 응력변화를 보면 스프링 구속을 할 경우에 응력의 분포도가 더 좋은 것을 확인 할 수가 있다.

3.1.5 스텝조건

다음은 스텝의 조건이다. 스텝에 따라서도 응력의 변화 및 변위의 영향을 미치게 된다. 먼저 스텝을 1로 했을 때는 그림 3.14와 그림 3.15과 같이 나타나게 된다.

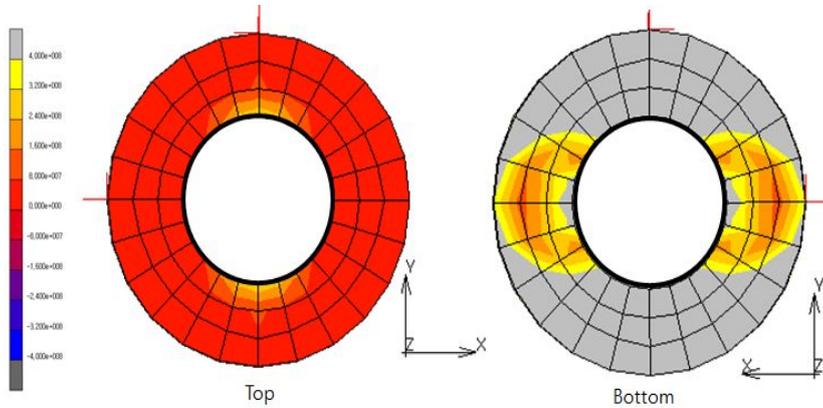


그림 3.14 스텝 1 경우의 응력분포도

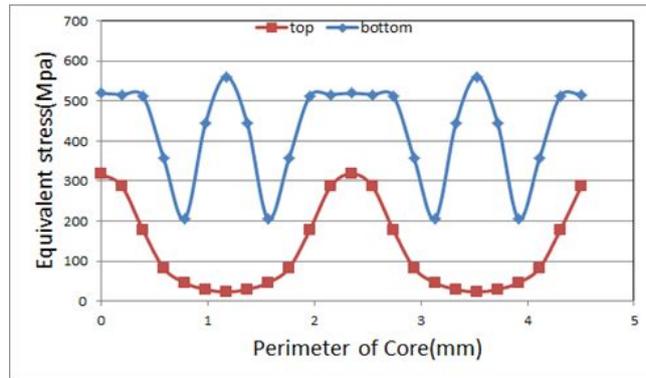


그림 3.15 스텝 1 경우의 응력변화

다음은 스텝 10인 경우는 그림 3.16와 그림 3.17에 나타냈다.

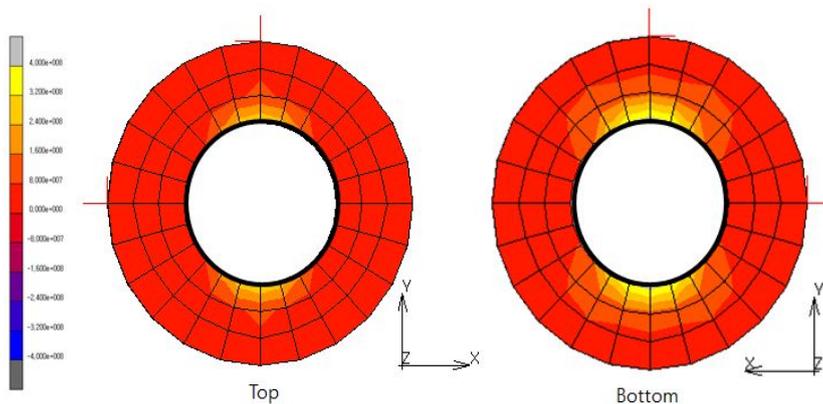


그림 3.16 스텝 10 경우의 응력분포도

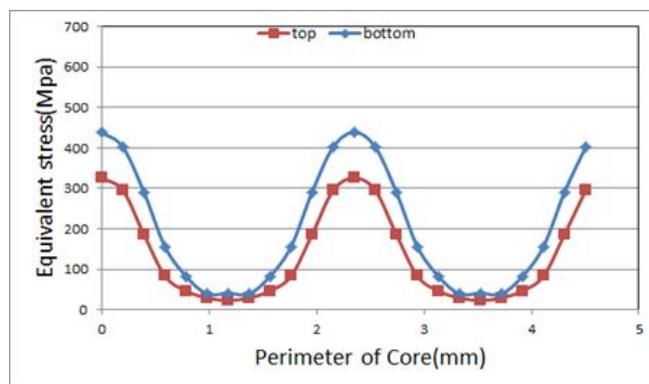


그림 3.17 스텝 10 경우의 응력변화

스텝을 10인 조건이 1인 조건보다 코어시편의 응력분포도가 안정적인 것을 확인할 수가 있었다.

3.2 Parametric 조건

앞에서 언급한 경계조건과 스텝조건을 이용하여 다음과 같은 파라메트릭 조건들을 표로 작성하였다. 이는 DHD와 iDHD를 이용할 때 Drill의 직경과 EDM의 직경이 얼마나 적절한지 그 영향을 얼마나 받는지 알아보기 위함이다.

표 3.2 DHD의 Drill과 EDM 조건

Method	Drill[mm]	EDM[mm]	Time[s]	Step
DHD	1.5	3	40	10
	1.5	5		
	2	3		
	2	5		

표 3.3 iDHD의 Drill과 EDM 조건

Method	Drill[mm]	EDM[mm]	Time[s]	Step
iDHD	1.5	3	40	10
	1.5	5		
	2	3		
	2	5		

3.3 DHD와 iDHD을 이용한 FEM

3.2.1 균일인장 응력에 대한 해석

먼저 균일인장 응력일 때 Drilling과 Trepanning을 했을 때의 응력분포도를 나타내었다. 초기조건을 넣고 그 이후에 Drilling과 Trepanning을 한 경우에 코어 시편에 응력이 낮아지는 것을 확인할 수가 있다.

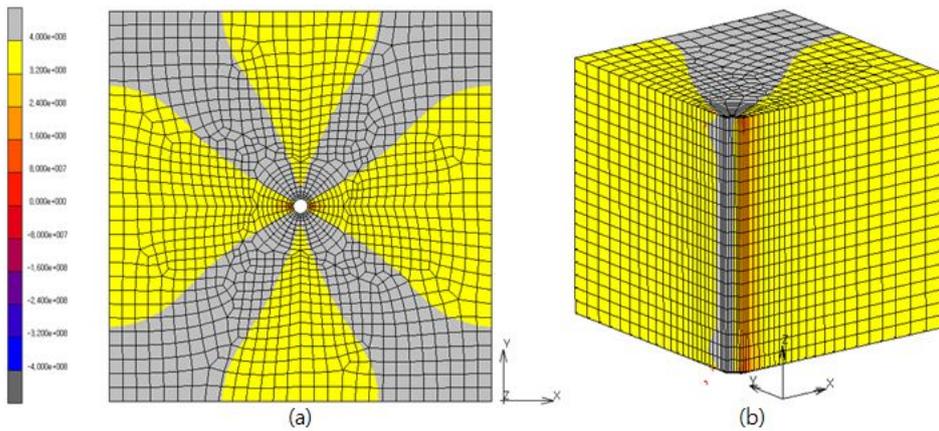


그림 3.18 균일인장 응력 조건의 Drilling 응력분포도

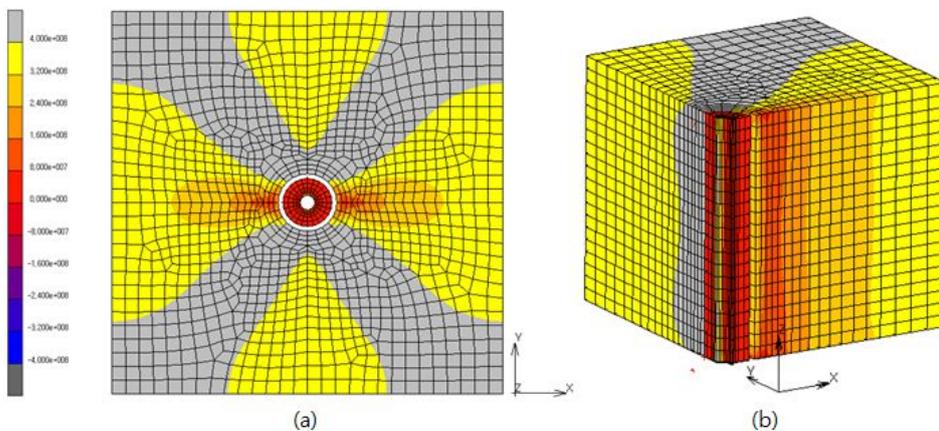
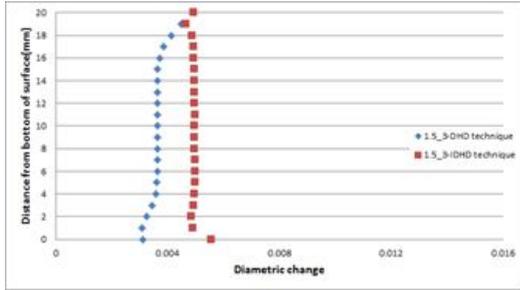


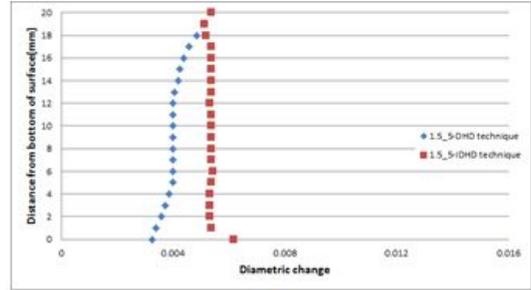
그림 3.19 균일인장 응력 조건의 Trepanning 응력분포도

다음은 4가지 조건에 대한 값들의 직경의 변화량을 나타내었다. 각 위치에서의 직경의 변화량은 0°일 때만 나타내었다.



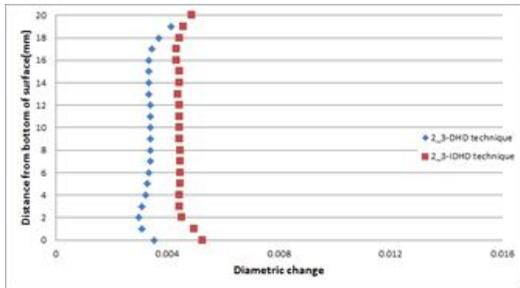
(a)

(a) Drill 1.5mm EDM 3mm



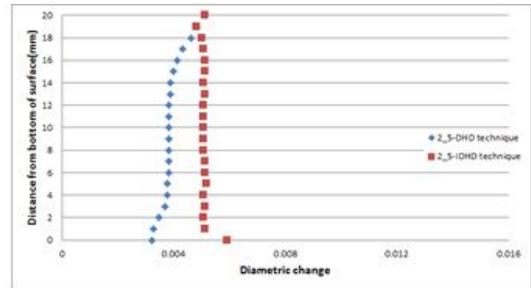
(b)

(b) Drill 1.5mm EDM 5mm



(c)

(c) Drill 2mm EDM 3mm

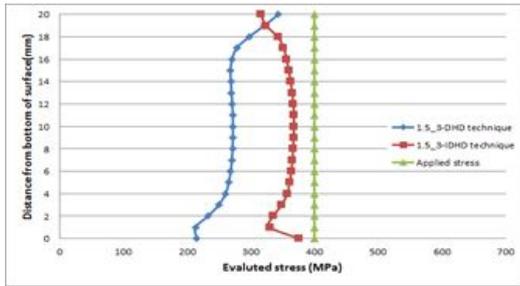


(d)

(d) Drill 2mm EDM 5mm

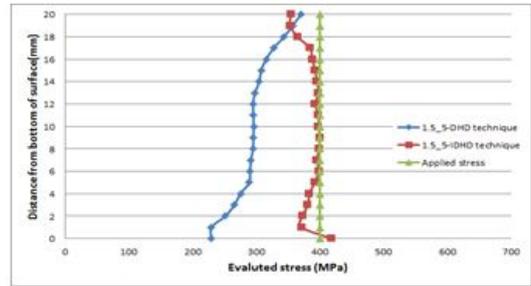
그림 3.20 균일인장 응력 조건의 직경의 변화량

각 위치 0°에서의 직경의 변화량은 계산된 잔류응력의 결과 값과 유사하게 나오게 된다. 이는 즉 직경의 변화량이 잔류응력과 관련이 있음을 알 수가 있다. 응력은 다음과 같이 나타났다.



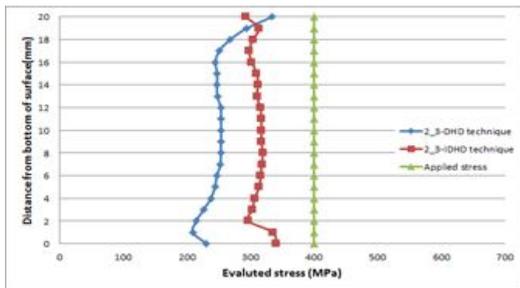
(a)

(a) Drill 1.5mm EDM 3mm



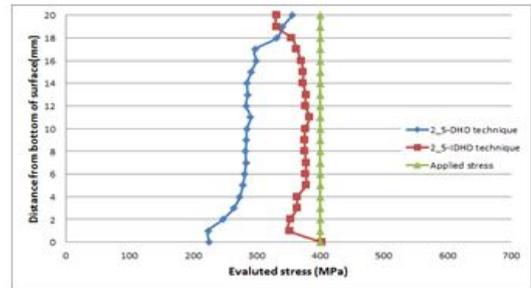
(b)

(b) Drill 1.5mm EDM 5mm



(c)

(c) Drill 2mm EDM 3mm

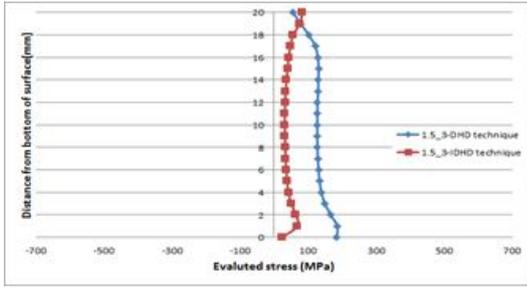


(d)

(d) Drill 2mm EDM 5mm

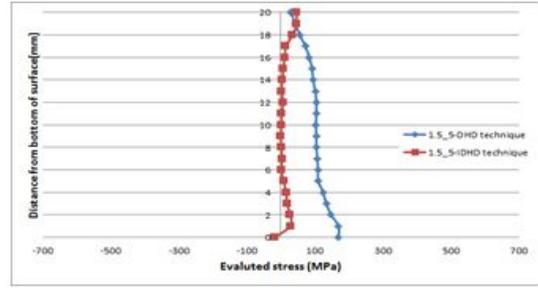
그림 3.21 균일인장 응력 조건의 응력계산결과

균일인장 응력일 때 잔류응력의 계산결과는 그림 3.21에 나타내었다. 가장 유사한 형상을 띄는 부분은 Drill이 1.5mm이고, EDM이 5mm 일 때 iDHD법으로 계산했을 시에 나타난다. 공통적인 부분으로서는 두께 중앙부가 아닌 모델 표면 쪽에서의 응력이 차이가 많이 난다는 것을 알 수가 있다.



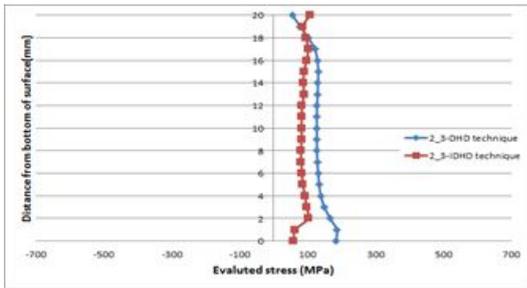
(a)

(a) Drill 1.5mm EDM 3mm



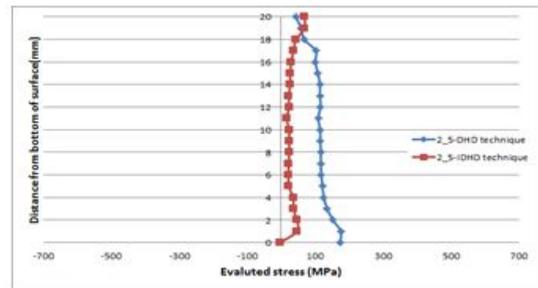
(b)

(b) Drill 1.5mm EDM 5mm



(c)

(c) Drill 2mm EDM 3mm



(d)

(d) Drill 2mm EDM 5mm

그림 3.22 균일인장 응력 조건의 오차결과

그림 3.22 (a)의 평균오차율은 DHD가 33%, iDHD가 11%로 나타났고, (b)의 경우는 DHD가 26%, iDHD가 4%로 나타났다. 또한, (c)의 평균오차율은 DHD가 33%, iDHD가 22% (d)의 경우는 DHD가 29%, iDHD가 8%가 나타났다.

3.2.2 굽힘 응력에 대한 해석

다음은 굽힘 응력에 대한 응력분포도를 그림 3.23와 그림 3.24 에 나타냈다.

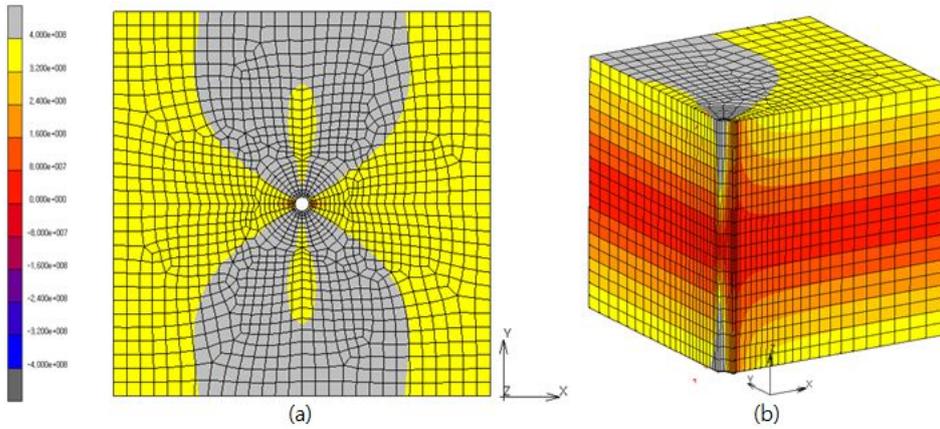


그림 3.23 굽힘 응력 조건의 Drilling 응력분포도

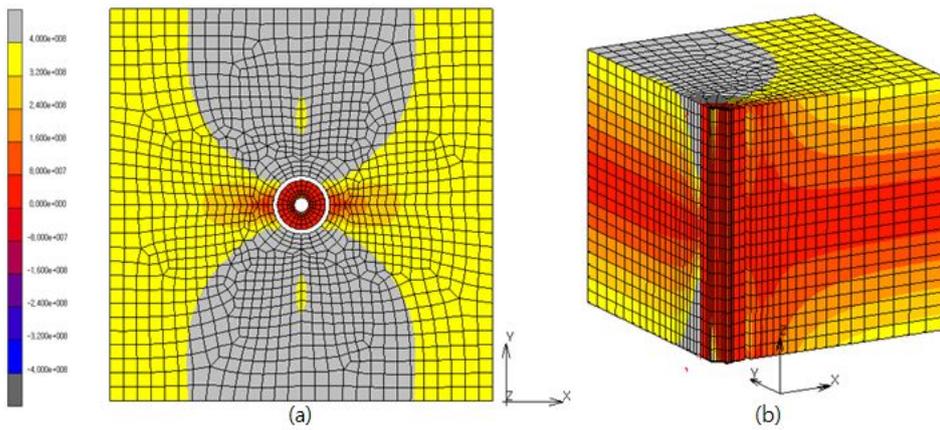
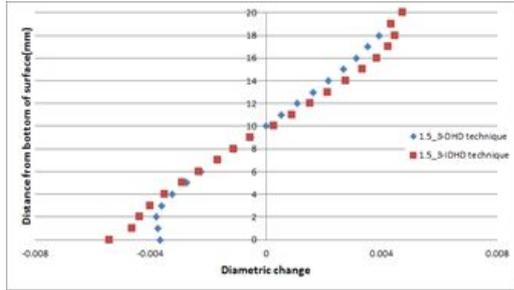


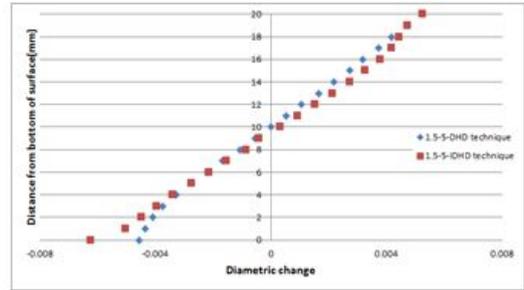
그림 3.24 굽힘 응력 조건의 Trepanning 응력분포도

다음은 앞과 같이 직경의 변화량을 그림 3.25, 응력 계산결과를 그림 3.26 그리고 오차율 그림 3.27에 나타냈다.



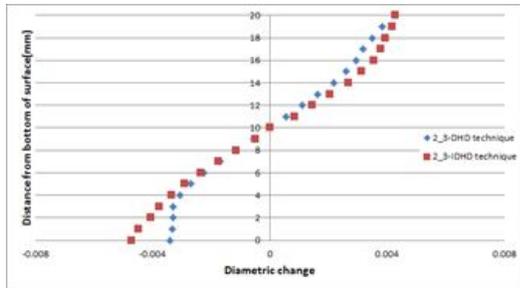
(a)

(a) Drill 1.5mm EDM 3mm



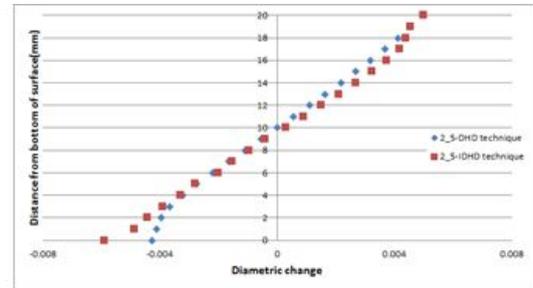
(b)

(b) Drill 1.5mm EDM 5mm



(c)

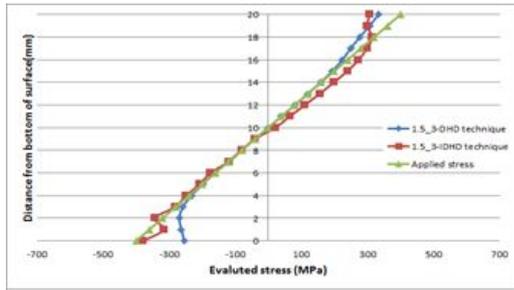
(c) Drill 2mm EDM 3mm



(d)

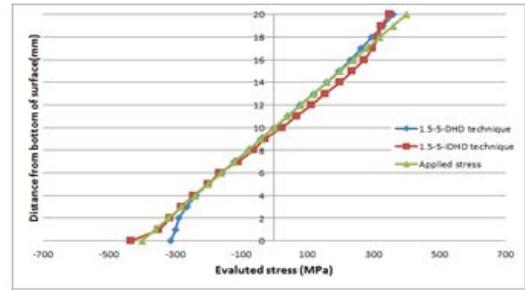
(d) Drill 2mm EDM 5mm

그림 3.25 굽힘 응력 조건의 직경의 변화량



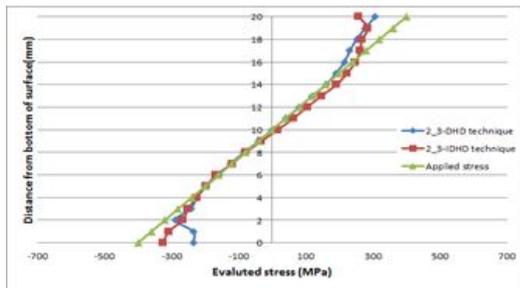
(a)

(a) Drill 1.5mm EDM 3mm



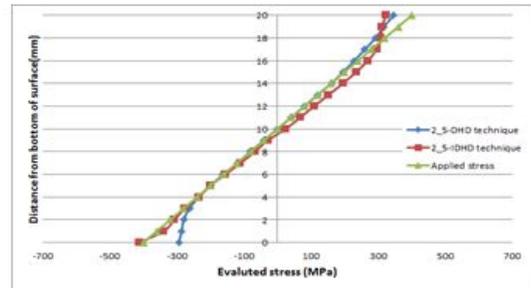
(b)

(b) Drill 1.5mm EDM 5mm



(c)

(c) Drill 2mm EDM 3mm

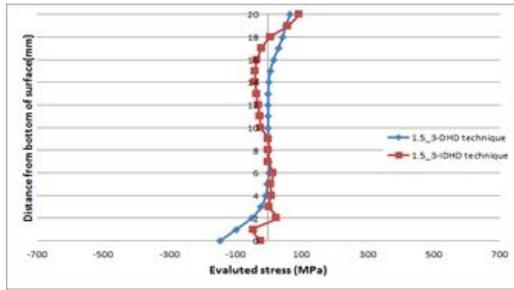


(d)

(d) Drill 2mm EDM 5mm

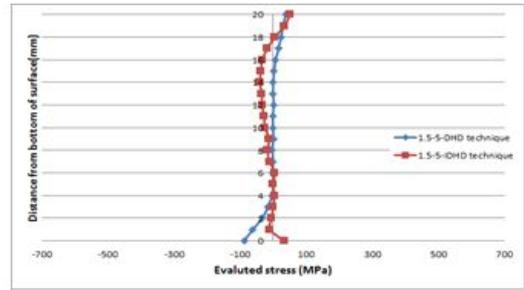
그림 3.26 굽힘 응력 조건의 응력 계산결과

응력계산 결과 굽힘 응력의 경우는 DHD와 IDHD 둘 다 표면에서는 응력의 계산결과 값이 차이가 나지만 중앙부에서는 차이가 나지 않는 것을 확인 할 수 있다.



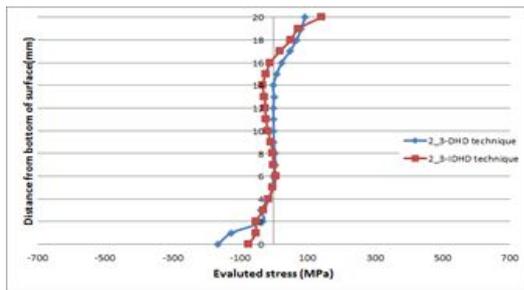
(a)

(a) Drill 1.5mm EDM 3mm



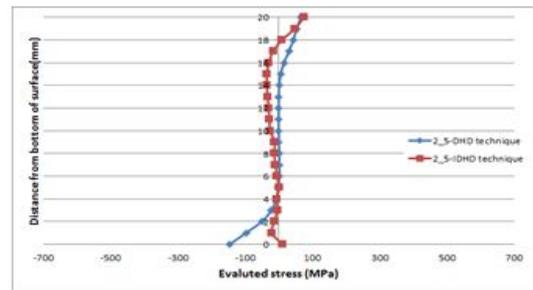
(b)

(b) Drill 1.5mm EDM 5mm



(c)

(c) Drill 2mm EDM 3mm



(d)

(d) Drill 2mm EDM 5mm

그림 3.27 굽힘 응력 조건의 오차결과

평균오차율은 그림3.27 (a)는 DHD가 -2% iDHD가 10%, (b)의 경우는 DHD가 -1% iDHD가 7%가 평균오차율로 나타났다. (c)는 DHD가 -1%, iDHD가 6%. (d)의 경우는 DHD -2%, iDHD가 8%로 나타났다.

3.2.3 2차곡선 응력에 대한 해석

앞과 동일하게 그림 3.28와 그림 3.29에 2차곡선 응력에 대한 응력분포도를 나타냈다. 코어시편의 응력이 점차 풀리는 것을 확인 할 수 있다.

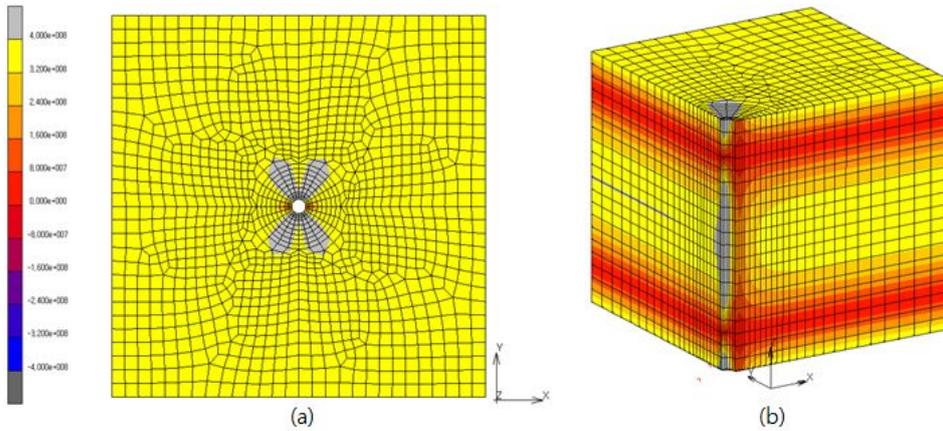


그림 3.28 2차곡선 응력 조건의 Drilling 응력분포도

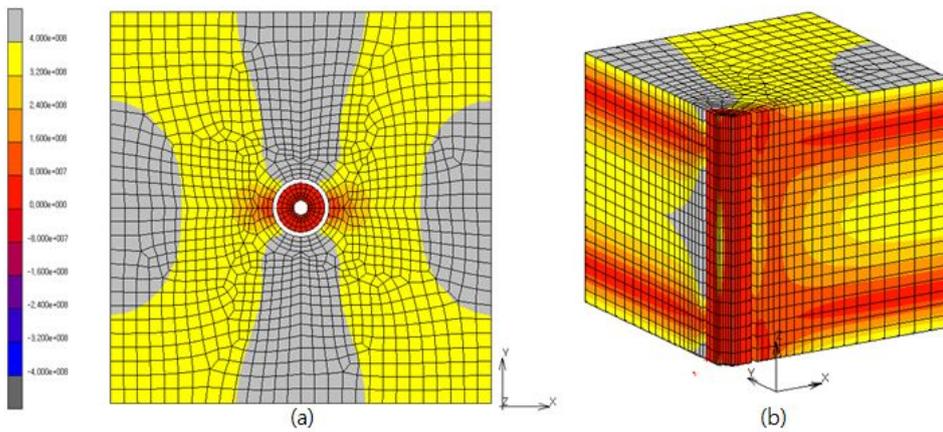
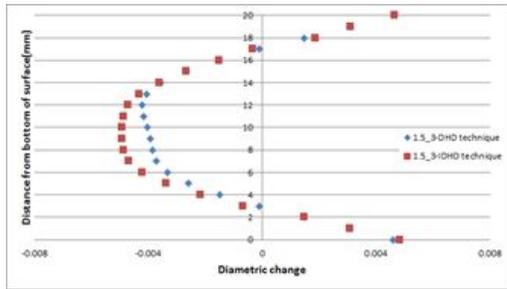


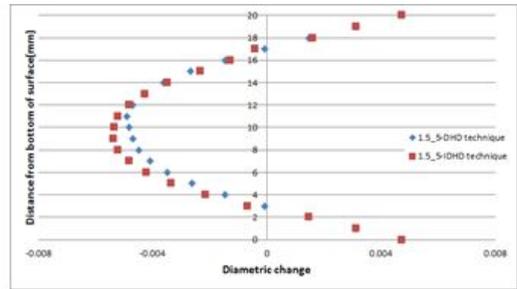
그림 3.29 2차곡선 응력 조건의 Trepanning 응력분포도

2차 곡선 응력에 대한 직경의 변화량을 그림 3.30, 응력계산결과는 그림 3.31에 나타냈다.



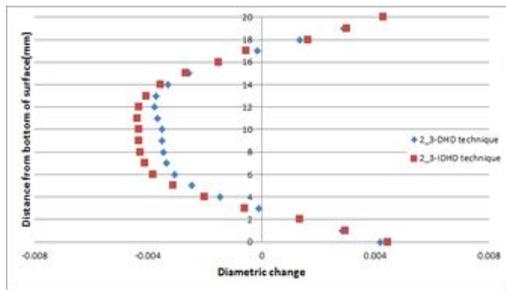
(a)

(a) Drill 1.5mm EDM 3mm



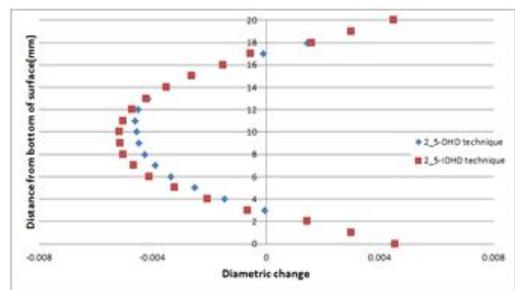
(b)

(b) Drill 1.5mm EDM 5mm



(c)

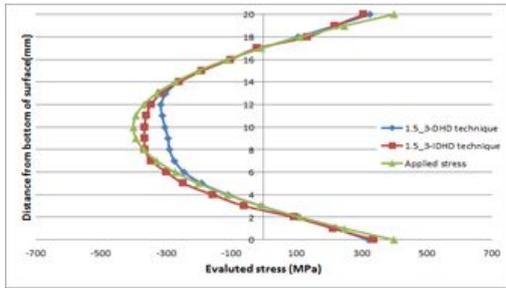
(c) Drill 2mm EDM 3mm



(d)

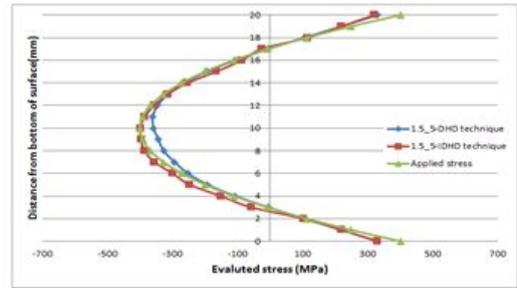
(d) Drill 2mm EDM 5mm

그림 3.30 2차곡선 응력 조건의 직경의 변화량



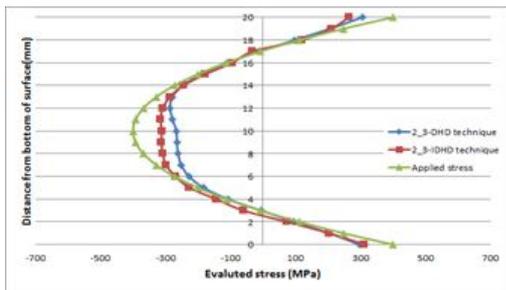
(a)

(a) Drill 1.5mm EDM 3mm



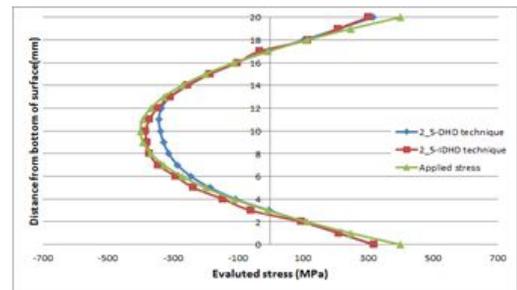
(b)

(b) Drill 1.5mm EDM 5mm



(c)

(c) Drill 2mm EDM 3mm

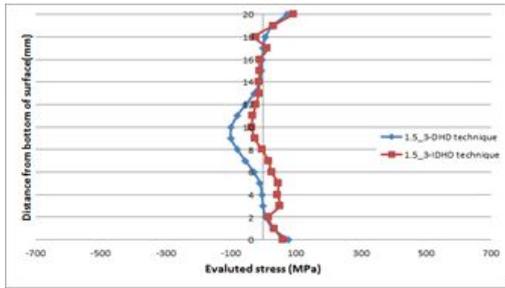


(d)

(d) Drill 2mm EDM 5mm

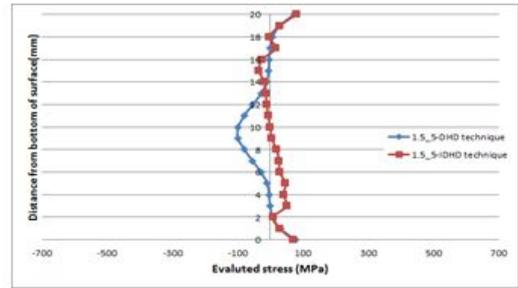
그림 3.31 2차곡선 응력 조건의 응력 계산결과

2차 곡선 형태 응력의 경우는 굽힘응력의 경우와 달리 중앙부에서 결과 값의 차이가 많이 나는 것을 확인할 수가 있다.



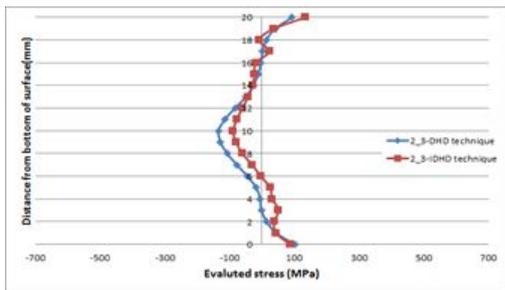
(a)

(a) Drill 1.5mm EDM 3mm



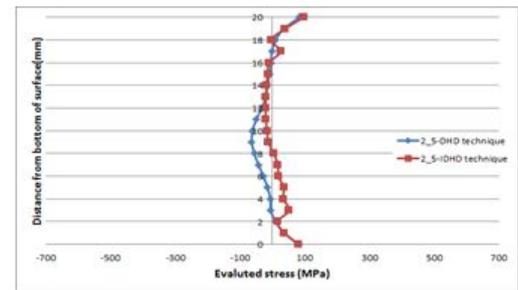
(b)

(b) Drill 1.5mm EDM 5mm



(c)

(c) Drill 2mm EDM 3mm



(d)

(d) Drill 2mm EDM 5mm

그림 3.32 2차곡선 응력 조건의 오차결과

그림 3.32의 (a)의 평균오차율은 DHD -5%, iDHD -2% (b)의 경우 DHD -5%, iDHD -4%의 오차율이 생겼으며 (c)는 DHD -8%, iDHD -4%, (d)는 DHD -5% iDHD는 -1%의 오차율이 생겼다.

제4장 결 론

잔류응력은 구조물이나 재료의 잔존수명에 영향을 미치게 된다. 또한 구조물과 재료의 용접부에서 발생하는 잔류응력은 부재의 피로강도, 좌굴강도 등에 큰 영향을 준다. 따라서 안전진단에 의해 발견된 균열이나 허용균열길이를 설계할 때 구조물의 안전성 평가를 위해서는 용접부의 잔류응력분포를 아는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 두께방향으로 잔류응력을 측정할 수 있는 방법 중 하나인 Deep Hole Drilling 해석모델을 개발하고자 한다. 이를 위해 필요한 코어의 경계조건, Drill과 EDM의 직경의 관계, Step 조건들에 따라 해석정밀도에 미치는 영향을 유한요소해석을 이용하여 밝히고자한다.

1) Drill과 EDM의 직경을 변화시켜 해석한 결과, Drill의 크기가 1.5mm이고 EDM의 크기가 5mm일 때가 Drill의 크기가 2mm이고 EDM의 크기가 3mm 일 때 보다 평균오차를 최대 17%가 작았다.

2) DHD해석 시 모델에 Drilling을 한 후 Trepanning을 하여 생성된 무구속의 상태 코어 시편의 경계조건은 직접적인 구속보다는 스프링요소를 사용하는 것이 보다 좋은 해석 결과를 가져올 수 있었다.

3) 세 가지 응력조건에서의 평균오차율은 균일인장일 경우에는 DHD가 최소 26%, 최대 33%, IDHD 최소4%, 최대 11%의 평균오차율이 발생하였다. 굽힘 응력의 경우는 DHD가 최소 -1%, 최대 -2%, IDHD 최소6%, 최대 10% 평균오차율이 발생하였고, 2차 곡선의 경우는 DHD가 최소 -5% 최대 -8%의 평균오차율이 발생하였고, IDHD는 최소 -1%, 최대 -2%의 오차율이 발생하였다. 결과적으로 볼 때 DHD보다 IDHD를 쓰는 경우가 오차율이 작게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 오차를 줄이기 위해서는 Drilling과 Trepanning 과정에서 생기는 소성변형의 영향을 고려하고, 생성된 코어의 기울기를 고려한다면 정확한 결과 값을 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) “(http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1213)“ 국토교통부 홈페이지
- 2) 허승민, 강재의 초기잔류응력과 상변태를 고려한 용접 잔류응력 해석에 관한 연구, 2014
- 3) 엄기원, “최신 용접공학”, 동명사(2010), pp272-357
- 4) Mahmoudi AH, Pavier MJ, Truman CE, Smith DJ (2007) “Accurate measurement of highly triaxial residual stresses”. Proceedings of the Society for Experimental Mechanics (SEM) Conference, Springfield, Massachusetts, USA, CD.
- 5) C.Garza, D.J. Smith, A.Shterenilkht and M.J. Pavier, “Advances in deep-hole drilling technique for the residual stress measurement in composite laminates”, V Ecomas thematic conference on the mechanical response of composites (2015)
- 6) Ueda Y., Fukuda K., Nakacho K. and Endo S., “A new measuring method of residual stresses with the aid of finite element method and reliability of estimated values”, Trans. JWRI (1975), 52(4), pp19-27
- 7) A.H. Mahmoudi., C.E. Hossain, D.J. Truman, M.J. Smith, Pavier “A New Procedure to Measure Near yield Residual stresses Using the Deep Hole Drilling Technique” Experimental Mechanics(2009)49:595-604
- 8) Houichi Kitano, Shigetaka Okano and Masahito Mochizuki, “A study for high accuracy measurement of residual stress by deep hole drilling technique”, Journal of Phsyscis: Conference series 379(2012)

- 9) Lee Y.B., Chung C.S., Kim H.K., Cho N. Park S.H., “A study on Fatigue Behavior considering Effects of Redistributing Compressive Residual stress and Crack Closure in ss330 Weldment”, Journal of KSMTE, 6-2(1997), pp26-33
- 10) A.A.Garcia Granada, D. George and D.J.Smith “Assessment of Distortion in the Deep Hole Technique for Measuring Residual stresses” In Proceedings of the 11th Conference on Experimental Mechanics, Oxford, 1998, pp.1301-1306.
- 11) Jin H.K, Lee D.J and Shin S.B “Effect of Distance and Restraint Degree between Fillet and Butt Weldment on Residual Stress Redistribution at each Weldment” Journal of the KWJS (2010), 28(3), pp59-64
- 12) A.H. Mahmoudi, C.E. Truman, D.J. Smith and M.J. Pavier, “The effect of plasticity on the ability of the deep hole drilling technique to measure axisymmetric residual stress”, International Journal of Mechanical sciences, 53(2011), pp978-988
- 13) S. Hossain, C.E Truman, D.J. Smith, “Finite element validation of the deep hole drilling method for measuring residual stresses”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 93-94(2012), pp29-41
- 14) N.J Rendler and I.Vigness, “Hole-drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses(1966)”, Experimental Mechanics, pp577-586
- 15) A.T. DeWald and M.R. Hil, “Improved data reduction for the deep-hole method of residual stress measurement”, J strain(2003), 38(1),pp65-77
- 16) X. Ficquet, C.E. Truman, E. Kingston, D.J. Smith, “Measurement of residual stresses in aluminium alloy aerospace components”, 25th International congress of the aeronautical sciences, 2006
- 17) Okido S., Hayashi M., Tanaka K., Akinawa Y., Minakawa N., Mori Y., “Measurement of residual stress in textured AL alloy by neutron diffraction method”, 7th international conference on nuclear engineering (ICONE),

- Tokyo, Japan, (1999), pp19-23
- 18) Park J.U, An G.B, Woo W.C and Heo S.M “Measurement of Welding Residual Stress in a 25-mm Thick Butt Joint using Inherent Strain Method” Journal of KWJS(2013), 31(4), pp67-72
 - 18) Ueda Y., Takahashi E., Fukuda K., Sakamoto K., Nakacho K., “Multi pass welding stresses in very thick plates and their reduction from stress relief annealing”, Trans JWRI(1976), 5(2), pp179-189
 - 19) R.P. Martukanitz and P.R. Howell. “Neutron Diffraction Studies of Welds of Aerospace Aluminum Alloys, in Nondestructive Evaluation and Material Properties III” M.E. Hilley, ed., The Minerals, Metals and Materials Society, pp89-95
 - 20) Allen A.J., Hutchings M.T., Windsor C.G., Andreanic., “Neutron Diffraction methods for the study of residual stress fields, Advances in Physics (1985)”, 34(4), pp445-473
 - 21) C.D. Martin, R.C. Christiansson, “Overcoring in Highly Stressed Granite : Comparison of USBM and Modified CSIR Devices”, Rock Mechanics and Rock Engineering 24(1991), pp207-235
 - 22) Park M.J, Jang D.Y and Choi H.d “Residual Stress Measurement on Welded Specimen by Neutron Diffraction” Journal of KWJS (2002), 20(2), pp50-58
 - 23) Woo. W., Kim D.K. and An G.B., “Residual stress measurements using neutron diffraction, Journal of WJ(2015)”, 33(1), pp30-34
 - 24) P.J. Withers, H.K. Bhadeshia, “Residual Stress, Part 1 : Measurement Techniques.”, Materials Science and Technology, 17(4)(2001), pp355-365
 - 25) Kim J.S, Park J.S and Jin T,E, “Review on the International Joint Researches for Evaluation of Welding Residual Stresses” Journal of the KWJS (2005), 23(6), pp8-17
 - 26) G.S. Schajer and L.Yang, “Residual-stress Measurement in Orthotropic materials Using the Hole-drilling Method(1994)”, Experimental Mechanics,

pp324-333

- 27) Wang R., Zhang J., Serizawa H., Murakawa H., “Study of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method. *Material & Design* (2009)”, 30, pp3474-3481
- 28) Micahael. B.Prime and Antonio R.Gonzales, “The Contour Method:Simple 2-D Mapping of Residual Stresses, Sixth International Conference on Residual Stresses(2000)”, pp617-624
- 29) Kim. S.C and Lee. Y. B. “The application crack propagation in welding residual stress region”, *J. of Korean welding society*, vol. 5. No.1 pp42-56 1987
- 30) A.H. Mahmoudi, C.E. Truman, D.J. Smith, M.J. Pavier, “The effect of plasticity on the ability of the deep hole drilling technique to measure axisymmetric residual stress”, *International Journal of Mechanical Science* 53(2011), pp978-988
- 31) R.H. Merrill, “Three-Component Borehole Deformation Gage for Determining the stress in Rock”, U.S. Bureau of Mines, 7015(1967), p38
- 32) R.H. Leggatt, D.J. Smith, S.D. Smith, F. Faure, “Development and Experimental Validation of the Deep Hole Method for Residual stress Measurement.”, *Journal of Strain Analysis* 31(3), pp177-186
- 33) Woo. W., An G.B., Kingston E.J., De Wald A.T., Smith D.J., Hill M.R., “Through-thickness distributions of residual stresses in two extreme heat-input thick welds: A neutron diffraction”, *Acta Materialia* (2013), 61, pp3564-3574
- 34) Ueda Y., Murakawa H., Ma N., “Welding deformation and residual stress prevention, Butterworth-Heinemann”, ISBN (2012),978-0-12-394804-5