

## 잔류응력의 응용

## Practical Applications of Favorable Residual Stresses



신 상 현

S. H. Shin

- 56년 7월 31일생
- 목포해양대학교 기관공학부



김 정 일

J. I. Kim

- 44년 7월 28일생
- 목포해양대학교 기관공학부
- 본 학회 부회장

## 1. 머리말

잔류응력이란 중력을 제외한 외부의 작용력이 없는 상태에서 자체 평형을 이루며 물체 내부에 존재하는 응력을 말하는 것으로 물체의 불 균일한 소성변형에 기인한다. 이러한 소성변형은 기계적 변형(bending, twisting, rolling, forging, extruding, drawing 등)에 의한 것 또는 열적 원인에 의한 것일 수 있다. 잔류응력은 사실상 모든 제조 부품에 존재한다고 보아야 하며, 이는 부품의 성능에 큰 영향을 끼친다. 이러한 잔류응력은 polycrystalline grain내 또는 grain과 grain사이에 존재하는 microstress와, 수십 또는 수백 개의 grain의 범위에서 통계적 평균으로 나타낸 macrostress로 분류되어지는데, 본 해설에서 논의되어지는 잔류응력은 주로 macro-scale상의 응력을 말한다.

기계부품의 성능에 영향을 미치는 잔류응력은 외

력에 의한 부품내의 응력의 분포형태와 그 부품에 내재하는 잔류응력의 분포형태에 따라 부품의 성능을 개선시키는 것 (beneficial residual stress)과 성능에 악영향을 미치는 것(detrimental residual stress)으로 분류될 수 있다. 예를 들면, 응력집중이 발생하는 어떤 곳에 외력에 의한 응력과 그곳의 잔류응력이 모두 인장응력이라면 응력집중을 더욱 증가시키게 되어, 이때의 잔류응력은 부품의 성능에 악영향을 끼치게 되고, 외력에 의한 응력과 잔류응력이 각각 인장과 압축응력이라면 이는 응력집중도를 감소시키는 효과가 있게 되고 이러한 응력집중 감소는 부품의 부하하중의 증가, 피로한도의 증가 및 크랙 발생의 저지 등의 효과를 가져오게 되어 이때의 잔류응력은 부품의 성능을 개선시키게 된다.

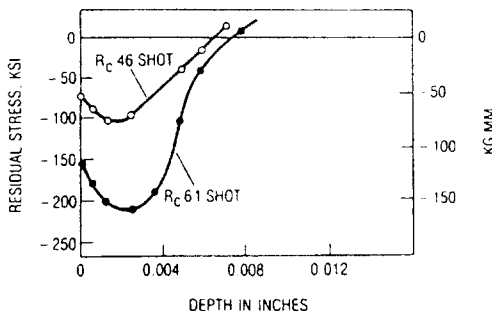
잔류응력을 측정하는 방법에는 파괴 및 비파괴 방법의 두 가지가 있는데 파괴 방법에는 layer removal, hole drilling, Sachs boring-out, Bauer-Heyn 및

sectioning method 등등이 있고, 비파괴 방법으로는 X-ray 및 neutron diffraction, ultrasonic, Barkhausen noise 그리고 magnetic method 등이 있다. X-ray diffraction 방법이 가장 널리 사용되고 있으나 X-ray의 침투깊이가 낮아서 주로 표면 층의 잔류응력 측정에 한정되어지므로 물체 내부 전체의 측정을 위해서는 ECM(Electro-Chemical Machining) 또는 EDM(Electrical Discharge Machining)등을 이용한 표면층 제거가 뒤따라야 한다. 최근의 neutron diffraction 방법은 이러한 번거로움을 없앨 수 있는 방법으로 neutron의 침투깊이가 대부분의 물질에 있어서 X-ray에 비하여 1000배 가까이 되므로(보통의 diffraction wave length 경우에 있어서) 대단히 효과적이지만 neutron을 이용한 잔류응력 측정장치가 고價인 것이 흠이다.

## 2. 잔류응력의 응용

### 1) Shot Peening

Shot peening은 표면에 소성변형을 일으키고 그 결과 표면층(대략 0.13 - 0.25 mm 범위의 깊이)에 압축 잔류응력을 형성시킨다. 이러한 잔류응력은 피로강도를 향상시키며 stress-corrosion cracking등을 저지시키는 효과를 가져온다. 일반적으로 peening의 정도가 크면(즉, harder shot, more exposure time 등) 압축 잔류응력의 크기가 증가한다. 하지만, peening의 정도가 너무 크면 microcrack의 발생을 초래하여 오히려 피로강도가 떨어진다. 그림(1)은 shot peening에 의한 전형적인 잔류응력의 분포를



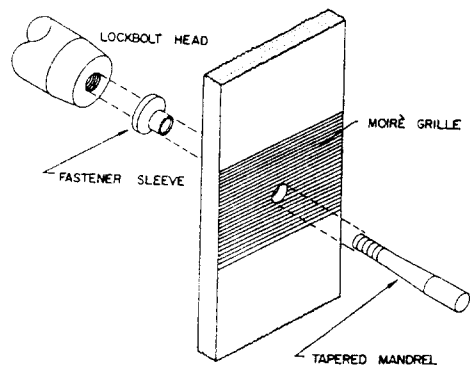
그림(1) Typical residual stress distribution in shot peened steel(HRC 62).

보여준다.

Shot peening은 특히 항공기 제조업 분야에서 항공기 골조부품, 착륙기어, 엔진부품, 터보 프로펠러의 샤프트 및 헬리콥터의 트랜스미션 등에 이용되고 있으며, 또한 원자력 증기 발생기의 inconel tube의 stress corrosion cracking과 선박 프로펠러에서의 부식피로와 캐비테이션에 의한 침식을 저지하기 위해 응용되기도 한다. 이 외에도 스프링 코일 등 shot peening의 응용 분야는 아주 다양하다.

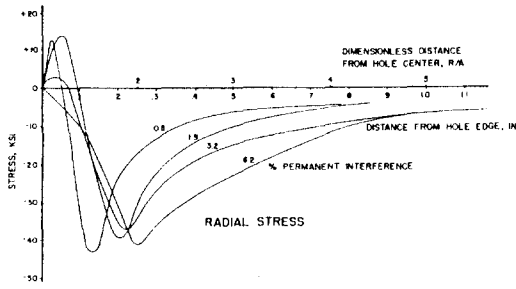
### 2) 판재의 접합홀 주위의 피로성능 개선

항공기 동체를 비롯한 각종 공업 구조물에서 흔히 볼 수 있는 접합홀(fastener hole)주위에는 응력이 집중되고, 응력집중은 부재의 피로수명을 현저히 감소시킨다. 접합 홀의 피로성능의 개선과 크랙 진전의 저지를 위해 많이 이용하는 방법으로 접합 홀을 냉간 확장시켜 홀 주위를 소성변형시키고, 그러한 소성변형에 의해 원주방향의 압축 잔류응력을 형성시키는 방법이 있다. 전형적인 확장 방법에서는 그림(2)에 보이는 것과 같이 췌기꼴의 oversized mandrel을 hydraulic ram을 이용하여 홀을 통과시킨다.

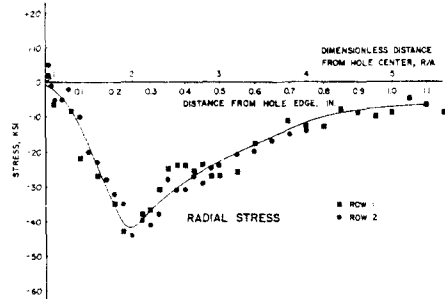


그림(2) Schematic of cold-expansion process.

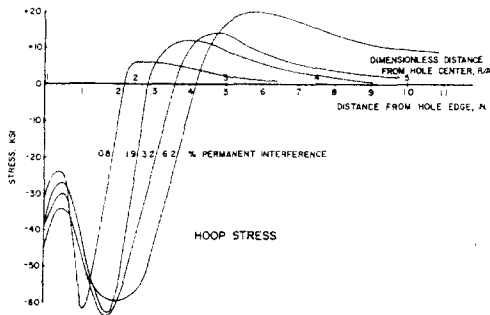
접합 홀 주위에 냉간 확장에 의해 생성된 반경 잔류응력(radial residual stress)과 원주 잔류응력(hoop residual stress)의 분포형태는 그림(3)과 (4)에서 보여주는 것과 같으나 이는 냉간 확장의 정도, 판재의 재질 등에 따라 다른 형태로 나타날 수



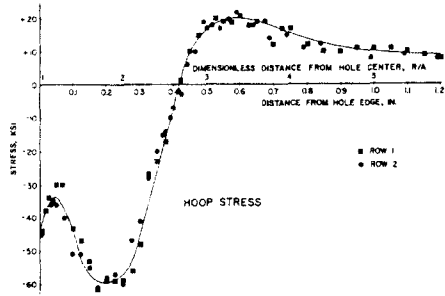
그림(3) Radial residual stress distribution at cold-expanded holes with various permanent interferences.



그림(5) Radial residual stress distribution at cold-expanded holes with 6.2% permanent interference.



그림(4) Tangential residual stress distribution at cold-expanded holes with various permanent interferences.



그림(6) Tangential residual stress distribution at cold-expanded holes with 6.2% permanent interference.

있다. 그림(3)과 (4)는 두께 0.25 인치, 가로, 세로 3 인치의 탄소강판(항복강도 717 Mpa, Rockwell - c 경도 25) 중앙에 각각 직경 0.458, 0.471, 0.479와 0.486 인치의 홀을 뚫은후 0.495 인치의 mandrel 로써 냉간 확장시켰을때의 잔류응력 분포를 나타 낸 것이다 (permanent interference는 각각 6.2%, 3.2%, 1.9%와 0.8%). Permanent interference는 직경의 증가분을 원래의 직경으로 나눈 값을 말한다. 그림 (5)와 (6)은 직경 0.458 인치 홀의 경우에 생성된 잔류응력을 X - ray diffraction technique 을 이용하여 서로 정반대되는 반경 방향에 따라 (Row 1과 Row 2) 측정된 결과를 나타낸 것이다.

접합 홀의 냉간 확장에 대해서는 그 방법, 그리고 확장정도와 잔류응력 분포와의 관계 등에 대한 많은 이론적 및 실험적 연구가 발표되고 있으며, 유한요소법에 의한 시뮬레이션과 그에 따른 잔류 응력의 분포에 대해서도 연구되고 있다. 냉간 확장

된 홀에 다시 링을 압입하여 잔류응력의 분포를 좀 더 개선시키는 방법도 소개되었으나 이의 실제 응용 사례는 별로 많지 않다. 피로성능의 개선과 크랙 진전의 저지를 위한 냉간 확장 및 압입등의 방법은 내연기관의 실린더 라이너 등에도 응용될 수 있다. 예를 들어, 압축강도는 매우 크고 인장강도는 작은 세라믹 재료를 이용한 세라믹 라이너에 금속 슬리브의 가열 끼워 맞춤 방식도 연구 응용되고 있다.

### 3) Multilayer wrapped pressure vessel

두꺼운 단층의 원통형 압력용기에 비해 얇은 여러 겹의 층으로 구성된 압력용기를 제조하는 방법에는 몇 가지가 있으나 그중 가장 많이 쓰이는 방법은 1932년에 A. O. Smith 회사에서 개발한 것으로 주로 고압의 압력용기의 제조에 응용된다. 이

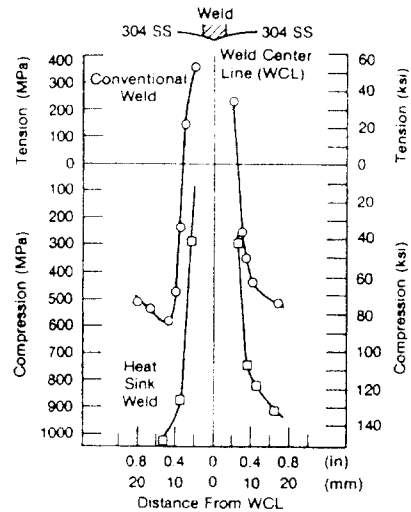
제조 방법은 inner core cylinder의 외면에 얇은 철판을 두르고 축 방향의 seam을 용접하는 과정을 적당한 두께까지 여러 차례 반복하는 방법이다. 이렇게 여러 층에 걸쳐 일어난 용접후의 수축으로 인하여 내면 층에는 압축 후프응력이, 그리고 반경 방향에 따라 점차 인장 후프응력으로 변하는 형태의 잔류응력 분포가 형성된다. 압력용기의 내부 압력에 의한 인장 후프응력은 용기의 내면에서 가장 크고 외면으로 갈수록 급격히 감소하는데 용기내의 압력에 의한 응력분포와 위에서 언급한 압축 잔류응력과의 중첩으로 압력용기 두께 방향의 실제 응력의 분포는 잔류응력이 존재하지 않을 때에 비해 훨씬 균일한 분포 형태가 된다. 즉, 내부 압력에 의한 압력용기 내면의 최고 인장응력이 의도적으로 생성시킨 잔류응력으로 인해 월등히 감소되어 같은 두께의 단층 압력용기에 비해 사용압력을 훨씬 높일 수 있다. 이외에도 multilayer wrapped pressure vessel의 장점으로는 용기내 매체와의 접촉이 이루어지는 것은 inner core shell이기 때문에 inner shell 만이 내식, 내열, 내압등의 재료로써 제조될 필요가 있기때문에 재료비가 절감될 수 있다는 점이다.

4) 파이프의 거스용접(girth welding)에 의한 잔류응력

파이프에 거스용접을 행하면 일반적으로 열 영향부(heat affected zones)에서 파이프의 내면과 외면쪽에 축 방향의 인장응력을 초래하게 된다. 이러한 파이프 내면의 인장 잔류응력은 stress corrosion cracking등에 의한 원주 방향의 크랙 발생을 돕게 되고, 결국 크랙 전파에 의한 파이프내 매체의 누설을 초래한다. 특히 핵발전에서 쓰이는 파이프의 경우 방사능 누출 사고의 원인이 될 수 있어 매우 위험하다. 열 영향부에서의 크랙 발생 및 전파에 대한 축 방향 인장 잔류응력의 악영향을 개선시키기 위해 여러 가지 방법이 오래 전부터 연구되어져 왔으며, 그 방법들에는 Heat Sink Welding, Induction Heating Stress Improvement, Last Pass Heat Sink Welding 그리고 Mechanical Stress Improvement Process 등이 있는데 이들은 모두 파이프 내면 쪽에 압축 잔류응력을 유도시켜

크랙 발생 및 전파를 저지하기 위함이다.

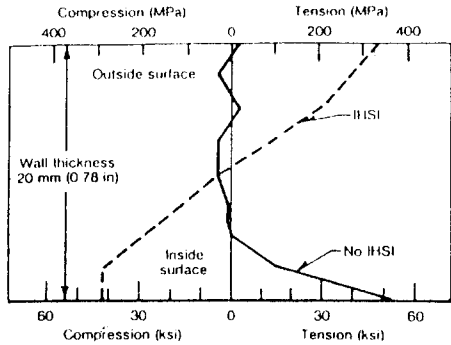
Heat Sink Welding(HSW) : 제일 먼저 개발된 방법으로 파이프를 지지할 수 있을 정도로 가볍게 용접을 하고 그 뒤부터는 파이프 내에 물을 흐르게 하면서 나머지 용접을 완성시키므로써 파이프 내면으로부터 두께의 일부분에 걸쳐 축 방향 압축 잔류응력(axial compressive residual stress) 형성시킨다. 그림(7)은 HSW에 의해 생성된 내경 10인치 파이프(AISI Type 304 Stainless Steel) 내면의 축 방향 잔류응력 분포와 재래식 용접시의 분포와의 대조를 보여준다.



그림(7) Axial internal surface residual stresses for 304 SS 10 in. pipe welded conventionally and by HSW.

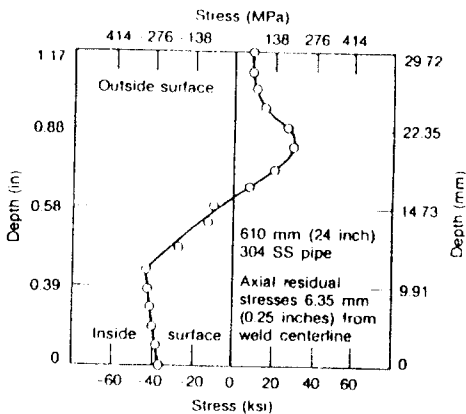
Induction Heating Stress Improvement (IHSI) : 일본에서 개발되어 널리 사용되어지고 있는 방법으로 용접부위의 파이프 내면은 100 °C 의 온도로 유지하면서 (물을 흐르게 하여) 외면을 500 - 550 °C까지로 가열하는 방법으로, 용접으로 인한 기존의 잔류응력 분포를 열변형(파이프 내면과 외면의 온도차이에 의해 야기된)으로써 재 분포시키는 것이다. 그림(8)은 내경 16인치 304 SS 파이프에서의 IHSI에 의해 변화된 전형적인 축 방향 압축 잔류응력의 분포를 나타낸다.

Last Pass Heat Sink Welding(LPHSW) :



그림(8) Axial residual stresses in 304 SS 16 in. pipe welded with and without IHSI.

HSW를 약간 변화시킨 것으로 마지막 과정(last pass)전까지는 파이프내의 물의 흐름이 없이 용접을 수행하고 용접의 마지막 과정 중에만 파이프내에 물을 흐르게 하는 방법으로, 마지막 과정중에 일어나는 파이프 내면과 외면의 온도차이를 이용하는 것으로 IHSI의 방법으로 얻어지는 잔류응력 분포와 유사한 분포를 얻을 수 있다. 그림(9)는 LPHSW에 의해 내경 24인치 304 SS 파이프에 유



그림(9) Axial residual stresses in 304 SS 24 in. pipe welded by LPHSW.

도된 잔류응력 분포를 보여준다.

Mechanical Stress Improvement Process (MSIP): 가장 최근에 소개된 것으로 용접 자체로 인한 잔류응력의 분포를 기계적 방법으로 재 분포시키는 방법이다. 용접 부위에 죄임쇄(clamp)를

채우고 유압장치로써 힘을 가하여 용접 부위에 소성변형을 일으킨다. 이러한 소성변형으로 인하여 파이프 내경은 감소되나, 파이프 내면에 stress corrosion cracking 저지에 효과적인 압축 잔류응력이 생성된다. 소성변형의 정도를 정밀하게 조절할 수 있으며, 파이프내에 매체가 흐르고 있는 상태에서도 행할 수 있다는 점에서 MSIP는 매우 유용한 방법이라 할 수 있다.

### 5) 기 타

자동차의 크랭크샤프트에 잔류응력을 이용하여 샤프트의 피로강도를 증가시켜 (약 30%) 회전중량의 감소효과를 가져오게 되어 크랭크샤프트의 재료나 규격을 바꾸지 않고도 출력을 높일 수 있는 방법이 연구되어져 왔으며, 또한 공기 압축기 등의 reed valve에도 잔류응력이 이용되어 얇은 reed valve의 수명을 약 10배까지 연장시키기도 한다. 이외에도 각종 저장탱크의 용접부위, 내연기관의 흡기및 배기밸브등 잔류응력의 응용분야는 아주 다양하다.

## 3. 결 론

잔류응력이 부품의 성능에 미치는 영향에 대해 많은 연구가 되어져왔고, 이를 성능개선에 효과적으로 응용하는 많은 방법들이 소개되었다. 또한, 부품의 가공성, 변형 등에 대한 잔류응력의 영향을 정량적 또는 정성적으로 해석하는 연구가 지속되어져 왔을 뿐 아니라, 복합재료 내에서의 잔류응력과 그의 영향에 대해서도 활발한 연구가 계속되고 있다. 이처럼 잔류응력의 분야는 그의 측정, 응용 및 구조물내의 역할 등에 대한 연구의 잠재성이 큰 분야이다.

잔류응력이 부품의 성능에 미치는 영향에 대한 정확한 예측과 효율적 응용을 위해서는 잔류응력을 비파괴적으로, 정량적으로 정확히 그리고 부품 전체에 걸쳐 현장에서 신속히 측정할 수 있는 방법이 절실히 요구되어지고 있지만 아직 이러한 방법은 존재하지 않는다. 여기에 대한 연구가 이루어지고 방법이 개발되어질 수 있다면 이는 대단히 획기적인 연구가 될 것이다. Neutron diffraction tech-

nique이 이에 가장 근접한 방법이 되겠으나 현장에서 신속한 측정에는 아직 매우 미흡하다.

### 참고문헌

1. Macherauch, E. and Hauk, V., Residual Stresses, Informationsgesellschaft, Verlag, Berlin, 1986.
2. Baldwin, W. M. Jr., "Residual Stresses in Metals," Marburg Lecture, Proceedings, ASTM, vol. 49, 1949.
3. Chandawanich, N. and Sharpe, W. N. Jr., "An Experimental Study of Fatigue Crack Initiation and Growth from Coldworked Holes," Engineering Fracture Mechanics, vol. 11, pp. 609-620, 1979.
4. Dietrich, G. and Potter, J. M., "Stress Measurements on Cold worked Fastener Holes," Advances in X-ray Analysis, vol. 20, pp. 321-328, 1977.
5. R. M Chrenko, Residual Stress Measurements on Type 304 Stainless Steel Welded Pipes. EPRI WS-79-174, vol. 1, 1980.
6. Danko, J. C., "Effect of Residual Stresses on the Stress-Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steel Pipe Weldments," Practical Applications of Residual Stress Technology, Proceedings of the 3rd International Conference, pp. 27-37, 1991.