

충격하중에 의한 산소절단부 잔류응력 재분포에 관한 연구
A Study on the Residual Stress Redistribution in Oxygen Cutting Zone
by Impact Loading

이천수*, 양영수**, 손광재***

* 국방품질관리소 광주2분실 **전남대학교 기계공학과 ***전남대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

용접구조물은 용접중의 국부적인 가열에 의해 불균일한 온도분포를 갖게되며, 이러한 불균일한 온도분포로 인하여 모재에 열 응력이 발생한다. 모재가 열을 받으면 항복응력이 저하하기 때문에 발생한 열응력은 항복응력을 초과하여 소성변형을 일으키고 냉각, 수축후 최후에 재료내부에 잔류응력을 생성시킴으로써 구조물의 피로강도 저하등 많은 문제점을 야기시킨다. 이와 같은 현상은 용접공정에서 일반적으로 나타나는 현상으로서 많은 연구가 되어 왔다.

숫피닝에 대한 연구는 1940년대에 자동차 및 항공기 분야에서 시작되어 실용화되기 시작하였으며, 최근에는 피로강도의 최적화라는 관점에서 재료에 가장 적합한 숫피닝 조건을 선택하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉 재료내부에 생성된 잔류응력과 피로수명과의 관계는 중요한 과제로서 이종규등⁽¹⁾은 피로 수명에 영향을 미치는 잔류응력에 대한 연구를 통하여 다양한 숫피닝의 실시조건과 부재의 기계적 특성에 의하여 잔류응력 분포형태가 변화되므로 기계구조물의 설계능력 및 내구성 향상에 있어서 대단히 중요한 요인임을 보여 주었다.

Kobayashi등⁽²⁾은 숫피닝에 의한 잔류응력 생성 메카니즘에 대한 연구를 통하여 숫피닝시 생성된 압축잔류응력은 숫 주위에 생성된 잔류응력의 중첩의 결과로 나타남을 보여주었으며, Al-Obaid 와 Al-Bassani^(3,4)는 단일 숫이 멤버에 접촉시 숫에 의한 소성영역의 깊이와 압입깊이 사이의 관계식을 이론적으로 제시하였다.

본 논문에서는 차량에서 가장 적은 비용으로 최대의 효과를 가져올 수 있는 방법인 해머피닝을 적용하여 잔류응력의 이완과정을 실험 및 수치해석을 통하여 비교분석 하였다.

2. 유한요소해석

2.1 온도분포 해석의 유한요소 수식화

Fig. 1과 같이 열원이 평판위에 일정속도로 이동할 때, 준정상상태로 가정하면 해석영역내의 임의 점과 시간에서 온도는 다음과 같이 표현된다.

$$T(x,y,z,t)=T(x-vt,y,z) \tag{1}$$

식(1)을 주어진 한 단면(z=0인 x-y평면)에 대한 천이과정 온도식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T(x,y,z,t)=T(x,y,0,t-z/v) \tag{2}$$

식(2)는 z=0인 단면에 대해 2차원(x-y) 비정상상태를 나타낸다. 즉 3차원 비정상상태의 문제를 준정상상태로 가정하여 2차원 비정상상태로 변환하였다. 준정상상태에 의한 온도계산은 3차원 요소분할이 필요하기 때문에 다른방법의 2차원 해법으로, 두께가 얇을 때 평면응력상태로 가정하여 z 방향 열확산 속도를 무시하고 x-y 단면을 택하여 시간변화에 따라 해석한다. 본 연구에서는 후자의 방법을 택하여 z=0인 x-y 단면을 시간변화에 따라 해석 하였으며, 해석시 사용된 경계조건은 Fig. 2와 같다. 즉 공작물에 가해진 열량은 전도에 의해 재료내부로 전달된다. 이때 x-y 단면에서 열전달 지배방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

식(3)의 해를 구하기 위해서는 해석영역 내부의 초기조건과 모든 경계에서 경계조건을 필요로 한다. 초기조건은 시작시간에서 온도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x,y,0) = T_0(x,y) \quad (4)$$

경계조건은 $y=0$ 인 표면에서 열이 flux로 유입되고, $z=0$ 인 면에서는 x 축에 대해 대칭이므로 단열조건이며, 다른 표면에서는 대류에 의해 대기로 열전달이 이루어진다.

산소 절단시 발생하는 열은 flux 형태로 모재로 유입된다. 이때 모재 표면에서 열의 강도(heat intensity) 분포는 정규분포(Gaussian distribution)로 다음과 같이 표현된다.

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi r^2} \text{Exp} \left[-3 \left(\frac{r^2}{r^2} \right) \right] \quad (5)$$

2.2 열응력 해석

열전달 해석에 의해 온도분포를 구한 후 이 데이터를 이용하여 열응력을 시간 변화에 따라 시편이 상온으로 냉각시까지 계산하여 최후의 응력값을 계산하였다.

응력해석시에 필요한 기계적 성질에 대한 물성치로는 탄성계수, 항복응력, 인장강도등이 있으며, 각 물성치들은 온도가 올라감에 따라 그 값들이 떨어지는데 온도가 더욱 올라가서 용융온도에 가까워지면 거의 0에 접근하게 된다. 또한 재료의 포아송비는 재료의 온도변화를 고려하여 조정하였다.⁽⁵⁾ 열응력 계산을 위한 경계조건은 Fig.3과 같이 절단 반대편 모서리에 x,y 방향으로 구속하였다.

3. 실험

3.1 시편의 제작

본 실험에서 사용된 시편은 Modified SAE 1025이며 시편에 대한 기계적성질 및 화학성분은 Table 1과 같고, 산소를 이용하여 절단 시편을 제작하였으며, 사용된 조건은 Table 2에 나타나 있다.

3.2 실험장치

차량용 프레임의 산소절단부에 발생된 인장잔류응력을 압축잔류응력으로 효과적으로 재분포시킴으로서 차량의 피로강도 향상을 가져올 수 있도록 하기 위하여 차량상태에서 직접적으로 손쉽게 적용 가능한 방법인 해머피닝 장치를 고안하였으며, 해머피닝시의 속도를 측정하기 위하여 압전형 가속도계를 사용하였다. 즉 시중에서 시판되는 해머의 운동은 압축공기의 힘을 구동력으로 기동하였다가 장착된 스프링의 반발력 때문에 원위치로 돌아온다. 본 실험에서는 스프링의 영향에 의한 속도의 감쇠 효과를 방지하기 위하여 스프링과 해머가 접촉하지 않은 거리(5mm)에서 해머링이 실시되었고, 해머가 돌아오는 복원력은 해머와 시편의 충돌에 의한 반발력이 이용되었다. 속도 측정에 사용된 공기압은 $1.4 \sim 2.2 \text{kg/cm}^2$ 까지 0.2씩 5가지 조건에서 측정되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 잔류응력 해석

산소절단부를 중심으로 형성되고 있는 잔류응력 크기 및 분포형태를 관찰하는 것은 상당히 중요한 일이다. 왜냐하면 피로반복하중을 받고있는 구조물인 경우에 최후에 존재하는 잔류응력으로 말미암아 구조물의 수명에 지대한 영향을 준다는 것은 이미 알려진 사실이기 때문이다. 따라서 본 논문에서도 산소절단부를 중심으로 형성되어 있는 잔류응력의 크기 및 분포를 파악하였다. 즉 절단이 시작된 후 냉각과정을 거친 부분에서는 주위의 구속으로 말미암아 최종적으로 인장응력으로 잔류응력

이 재분포되고 있음을 알 수 있었다. 이와같은 용접부에서의 잔류응력의 크기는 최종적으로 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 재료의 항복응력의 크기만큼 인장잔류이 절단표면에 형성된 후 그 크기가 점차적으로 감소하면서 인장영역의 범위가 7mm 정도로 나타나고 있으며, 그 이후로는 에너지 평형의 원리에 의해 다시 압축응력으로 변화하였으며, 절단 반대편인 끝부분에서는 원래의 모재 상태인 응력으로 접근하고 있음을 알 수 있었다.

4.2 충격하중에 의한 잔류응력 해석

산소절단부에 형성된 인장잔류응력을 재분포시킴으로서 구조물의 파괴강도를 향상시키고자 실시하였던 해머피닝과 수치해석을 통하여 나온 결과와 상호 비교하여 수치해석 모델을 제시하고자 하였다. Fig. 5는 피닝속도가 각각 180mm/s, 380mm/s, 535mm/s, 및 750mm/s 상태에서 충격하중에 의한 수치해석 모델링에 의하여 계산되어 나타내어진 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 피닝의 속도가 증가할수록 잔류응력의 크기 및 범위가 커지고 있음을 알 수 있으며, 이는 Fig. 6에 실시한 실험결과와 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 즉 실험에 의한 압축응력분포와 수치해석에 의한 압축응력분포를 상호 비교하여 보면 크기가 클수록 압축영역의 범위는 넓어지고 있으며, 반면에 인장응력의 최대크기는 실험값과 비교하여 작은 값을 유지하고 있는데 이는 에너지 평형의 원리에 기인한 것으로 판단된다. 또한 압축응력의 크기가 속도증가에 비해 다소 주춤함을 보여주고 있다. 이는 피닝의 함수중 본 논문에서 변수로 채택한 속도를 한없이 증가시켜야만 좋은 경우가 아니며, 어느 임계값을 가지고 있음을 알 수 있었다. 즉 본 논문에서는 재료의 외관을 크게 손상시키지 않으면서 피로강도를 향상시킬 수 있는 임계값을 750mm/s로 선정하였다.

5. 결론

용접구조물은 용접중에 국부적인 곳에 집중적으로 열이 가해짐으로서 불균일한 온도분포를 갖게되며 이로 인하여 열 응력이 발생하게 된다. 따라서 피로 반복하중을 받고 있는 용접구조물에 대하여 강도증가 및 안전성 확보를 위하여 여러 가지 방법을 통한 후열 처리를 실시하는데 본 논문에서는 작업현장에서 실제적으로 이용가능한 방법인 해머피닝을 실시하여 잔류응력 재분포에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산소절단부를 중심으로 형성된 인장잔류응력의 크기는 최고 21kgf/mm² 으로서 재료의 항복응력값에 해당하며, 열영향부의 크기는 약 1.1mm 정도이고 인장 영역은 약 9mm 영역까지 존재함을 알 수 있었다.
2. 산소절단부에 대한 수치해석 결과 인장응력의 크기는 실험값과 거의 일치하며, 인장영역은 약 7mm 정도로서 해석모델에 대한 신뢰성은 타당함을 알 수 있었다.
3. 잔류응력 재분포를 위하여 해머피닝을 실시한 결과 절단부로부터 약 최소 0.5mm에서 최대 1.8mm 정도 까지 압축 잔류응력으로 재분포됨을 알 수 있었으며, 최대 크기는 16kgf/mm² 정도 이며, 이때의 속도는 750mm/s이다.
4. 각각의 조건에 대하여 해머피닝을 실시한 결과 어느 속도 이상에서는 그 잔류 응력 재분포에 대한 변화량이 미세함을 알 수 있었는데 그러한 임계속도를 750mm/s로 판단하였다.

참고문헌

1. 이종규, 김정규, "피로강도 및 수명에 미치는 shot peening에 의한 잔류응력의 영향", 대한기계학회 논문집, 제21권, 제9호, pp1498~1506, 1997.
2. M.kobayashi, T.Matsui and Y.Murakami, "Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening", Int. J. Fatigue Vol. 20, No.5, 1998, pp.351-357.
3. Y.F.Al-Obaid, "A Rudimentary analysis of improving fatigue life of metal by shot-peening, Journal of applied mechanics, ASME Trans., June 1990, Vol.57, pp.307~312
4. Al-Hassani, S.T.S., "The shot peening of metals-mechanics and structures, SAE821452, Soc. Automotive Engineering, PA, USA, 1982, 4513-4525.

5. Metal Handbook, ASM, vol 1, 1990, pp195-199

Table 1. Chemical composition of SAE 1025

Chemical Composition	C	Mn	P	S
Value	0.22-0.28	0.30-0.60	0.02 ↓	0.015 ↓

Table 2. Condition of Oxygen Cutting

Oxygen Pressure (kg/cm ²)	Preheating gas pressure (kg/cm ²)	Cutting speed (mm/s)	Tip diameter (mm)	note
2.1	0.21	5.5	1.3	Preheating gas:Propane

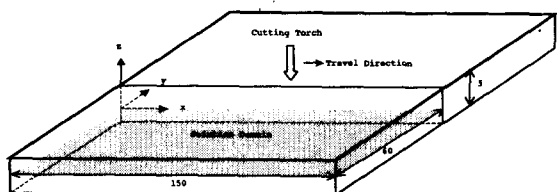


Fig.1. Schematic of Oxygen Cutting Surface

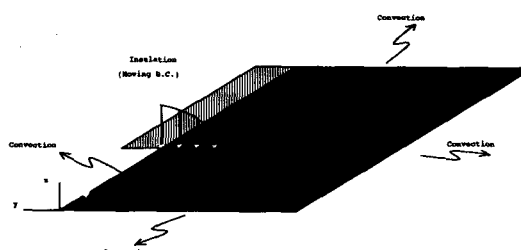


Fig. 2. Boundary Condition of Heat Transfer

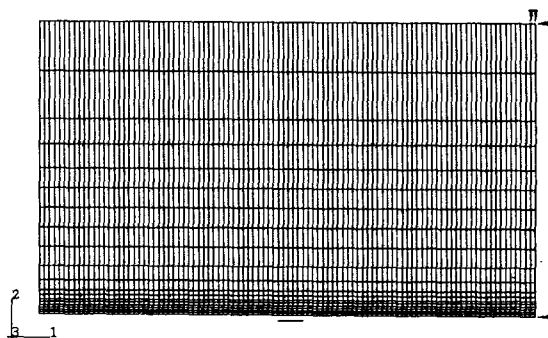


Fig. 3. Boundary Condition of Stress Analysis Model

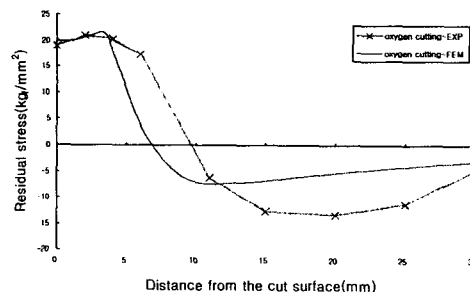


Fig. 4. Residual Stress Distribution from the Cutting Surface

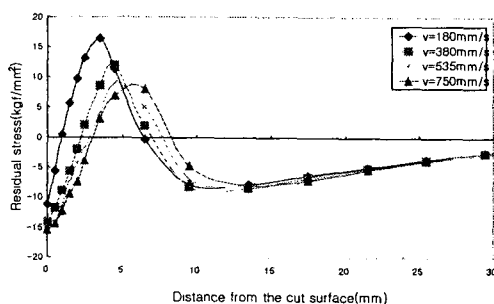


Fig. 5. Residual Stress Distributions of FEM after Hammer Peening at v=180, 380, 535, 750 mm/s, σ_{11}

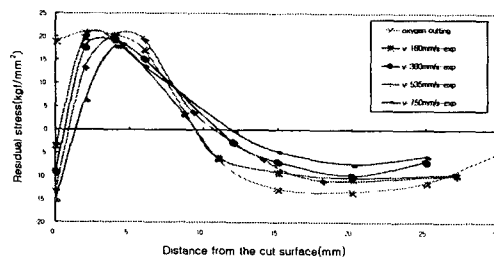


Fig. 6. Residual Stress Distributions of Experiment after Hammer Peening at v=180, 380, 535, 750mm/s, σ_{11}