

케미컬 밀링을 이용한 실린더 설계

이종웅[†]·유준태*·장영순*·이영무*·조광래*

Design of cylinder using chemical milling

Jong-Woong Lee, Joon-Tae Yoo, Young-Soon Jang,
Yeong-Moo Yi and Gwang-Rae Cho

Key Words: Chemical Milling(화학연마), Maskant(피복제), Etchant(부식액), Pattern(무늬)

Abstract

Chemical machining(CHM) is a special process which material removed by contact of strong etchant. The application as industrial process was started from aircraft industry after 2nd world war. Chemical milling, one of the CHM process, initially became commercial bussiness and it was called chem-mill. Even today, this process widely used to remove the material from aircraft wings and fuselage panel in aircraft industry. In this study, it is attempted to design the cylinder pattern which minimize the weight within the allowable stress using chemical milling.

기호설명

F_e	: 부식계수
u	: 언더컷
d	: 절삭 깊이
T_a	: 소재두께
T_c	: 화학연마 후 소재두께
T_{hr}	: 수평방향 리브두께
T_{vr}	: 수직방향 리브두께
w	: 수평방향 길이
h	: 수직방향 길이

1. 서론

Chemical machining은 강한 부식액과의 접촉에

의해 재료가 제거되도록 하는 특수가공 공정이며, 산업공정으로서의 응용은 2차 세계대전 직후 항공기 산업에서 시작되었다. chemical milling은 CHM 공정 중에서 처음으로 상용화되었고 Chem-mill이라고 불리운다. 오늘날에도 이 공정은 항공 산업에서 무게를 줄이기 위해서 항공기의 날개와 항공기 동체 판넬에서 재료를 제거하는데 폭 넓게 사용되고 있다. 이 공정은 상당히 많은 양의 금속을 제거해야 하는 대형 부품에도 적용할 수 있다. 여기에서는 케미컬 밀링을 이용한 실린더 제작공정 및 우주발사체의 한부분인 탱크부의 실린더를 모노코크 구조로 설계시 용접부의 용접효율을 고려하여 실린더 두께를 산출하게 되는데 이는 과도한 무게증가의 원인이 된다. 따라서, 용접부의 효율을 고려한 허용응력을 만족하는 범위에서 불필요한 재료를 최대한 제거할 수 있는 실린더 내부 패턴을 설계하고자 한다.

2. 제작 공정

2.1 화학연마

일반적인 화학연마의 공정은 Fig. 1의 총 5단계

[†] 한국항공우주연구원

E-mail : jwlee@kari.re.kr

TEL : (042)860-2587 FAX : (042)860-2233

* 한국항공우주연구원

의 공정으로 나뉜다.⁽¹⁾

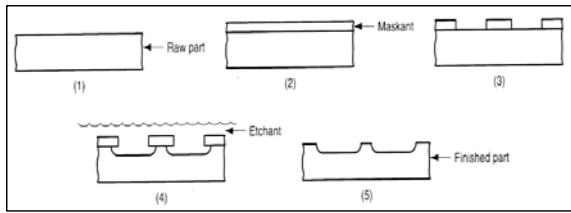


Fig. 1 CHM process

- (1) 세척 - 재료가 부식 면으로부터 균일하게 제거하기 위한 세척과정
- (2,3) 마스크 - 피복제라고 불리는 보호막을 부식되지 말아야하는 부품표면에 분포시켜 화학적으로 저항성을 갖게 하는 과정.
- (4) 부식 - 재료제거 단계로서 공작물을 부식액에 담가서 부품표면 중 마스크가 형성되지 않은 영역을 화학적으로 제거하고 원하는 양의 재료가 제거되면 부품을 꺼내 공정이 정지하도록 세척하는 과정.
- (5) 마스크제거 - 피복제를 부품으로부터 제거하는 과정

Fig. 2는 화학연마에 의한 언더컷 형상이다. 화학연마시 공작물 내부로 부식이 침투함에 따라 마스크의 아래 옆쪽으로 부식이 이루어지는데, 이를 언더컷이라고 한다. 재료제거속도는 부식액에 의한 공작물 재료에 대한 화학적 공격의 속도가 표면방향으로 이루어지므로 침투속도를 mm/min으로 표시하며, 표면적에 영향을 받지 않는 특징을 갖고 있다. 설계하고자 하는 치수에 합당한 절삭결과를 보장하기 위해서는 마스크의 설계에서 언더컷을 고려하여야 한다. 이때 사용되는 비례상수를 부식계수라 한다.

$$F_e = u/d \tag{1}$$

재료에 따라 서로 다른 부식 계수를 갖는다. 부식계수는 피복제의 절단영역의 치수를 결정하는데 사용되며, 부품에 부식할 영역의 특정치수를 얻을 수 있도록 한다.

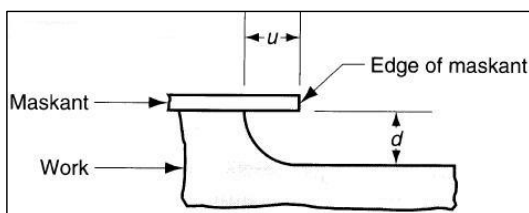


Fig. 2 Undercut of chemical milling

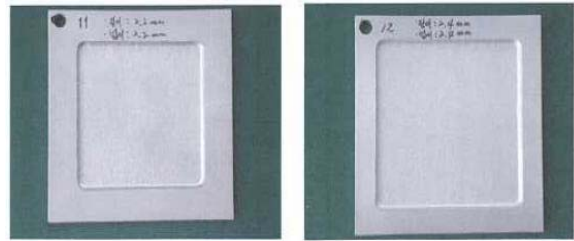


Fig. 3 Specimen which applied caustic soda

2.2 시편에 대한 화학연마

알루미늄 실린더에 화학연마를 적용하기에 앞서 알루미늄 시편에 적용하였다. 전처리 단계로 유기용제 탈지, 알카리탈지, 수세, DE, SMUT, 수세 그리고 건조의 단계를 거친 후 액상의 마스크제를 붓으로 2회를 바른 후 24시간 건조하였다. 화학연마는 3가지 방법을 사용하였는데, 방법 1은 가성소다 고온법으로 농도는 NaOH 15%, 온도는 50 °C, 1시간이 소요되었다. 고온으로 인하여 마스크가 박리되었다. 방법 2는 염산법으로 농도는 HCl 15%, 온도는 실온, 1시간이 소요되었다. 이 또한, 마스크가 박리되었고, 표면이 균일하지 않았다. 방법 3은 가성소다 상온법으로 농도는 NaOH 15%, 온도는 27 °C, 28 °C, 30시간이 소요되었다. 결과로서 마스크는 이상 없으며, 표면이 균일하게 연마가 이루어졌다. 온도 27 °C에서는 깊이 2.2 mm, 넓이 2.2mm가 연마되었고, 온도 28 °C에서는 깊이 2.4 mm, 넓이 2.4 mm가 연마되었다. 화학연마는 염산법 보다는 가성소다법이 균일성등이 우수하였으며, 고온보다는 저온에서 균일성 및 마스크성에서 안정성이 크다. Fig. 3은 방법 3을 적용한 시편의 형상이다.

2.3 실린더에 대한 화학연마

시편에 대한 적용에서 확인된 가성소다 상온법을 이용하여 실린더에 적용하였다. Fig. 4는 실린더의 화학연마 과정이다. 실린더의 연마량을 쉽게 확인하기 위하여 치수 측정용 시편을 사용하였다. 화학연마면 및 경계면은 양호하며 시편에 대한 연마량도 균일하다. 연마량의 목표는 2.4±0.1 mm이며, 추정연마량은 2.424 - 2.445 mm이다. 제품의 마스크 부위가 넓어 부분적으로 마스크가 약한 부위로 액이 침투하여 부분적으로



Fig. 4 Chemical milling process of cylinder

부식이 발생하였다. 부분적 마스크킹 미비로 인한 부식은 테입형 마스크킹 및 액상형 마스크킹을 적절히 사용하여 작업하면 해결될 것으로 판단된다.

3. 실린더 내부 패턴 설계

3.1 유한요소해석

탱크부의 실린더를 모노코크 구조로 설계할 때 용접효율을 고려하여 실린더의 두께를 설계하면 용접부이외의 부분에서는 필요 없는 재료가 존재하게 된다. 용접부의 효율을 고려한 허용응력을 만족하는 범위에서 화학연마과정을 통해 필요 없는 재료를 최대한 제거할 수 있는 실린더 패턴을 설계하고자 한다. 알루미늄의 허용응력은 359 MPa이며, 용접부에서의 효율을 60%로 하였을 때 약 220 MPa의 허용응력을 만족해야 한다.

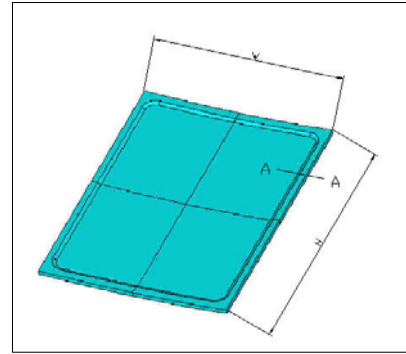


Fig. 5 Figure of pattern

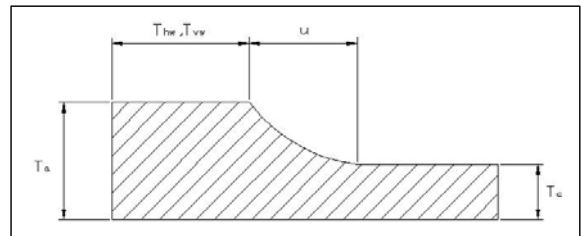


Fig. 6 A-A section

Fig. 5는 실린더 내부 패턴의 한 부분을 3차원으로 나타낸 그림이다. Fig. 6은 3차원 형상 중 A-A 단면을 2차원으로 나타낸 그림이다. 변수로는 원주방향의 길이 w , 수직방향 길이 h , 소재의 전체 두께 T_a , 제거 후 남는 소재의 두께 T_c , 언더컷 길이 u , 수평방향 리브두께 T_{hw} , 수직방향 리브두께 T_{vw} 로 나뉜다. Table 1은 패턴의 초기 치수 및 상·하한치를 나타낸다.

Table 1 Dimension of Initial pattern

Variables	Lower	Initial	Upper
w (mm)	20	100	500
h (mm)	20	100	200
T_a (mm)	3		
T_c (mm)	1.8	1.8	2.5
T_{hw} (mm)	5	5	40
T_{vw} (mm)	5	5	40
u (mm)	1	3	10

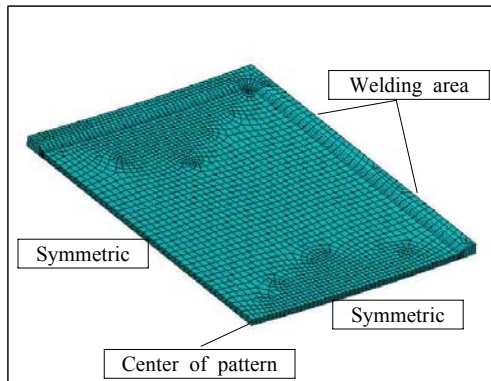


Fig. 7 Boundary conditions

해석은 Ansys를 이용하였고, 해석에 사용된 요소는 3차원 구조요소인 Solid45이다. Fig. 7은 경계조건 및 메쉬 형상을 나타낸다. 대칭조건을 사용하여 1/4모델링 하였고, 실린더의 지름은 1.8 m, 내압은 0.693 MPa이 작용한다.

3.2 변수 고찰

Fig. 8은 원주방향의 길이에 따른 응력의 변화를 나타낸다. 20 mm에서 100 mm까지는 용접부에서 최대응력이 발생하며 원주방향의 길이가 길어질수록 최대응력은 10 MPa씩 증가하고, 100 mm에서 400 mm까지는 최대응력은 감소하였다. 용접부에서 최대응력이 발생하며 원주방향의 길이가 길어질수록 최대응력의 발생위치가 패턴의 중심부 쪽으로 이동하였다. 400 mm정도에서 가장 낮은 최대응력이 용접부에서 발생하였으며, 패턴의 중심부와 용접부의 응력수준은 비슷하다. 500 mm이상에서는 패턴의 중앙에서 최대응력이 발생하였다. 따라서 패턴의 폭을 400 mm로 하였을 때 가장 낮은 응력이 발생하였으며, 각도로 환산하면 40도이다.

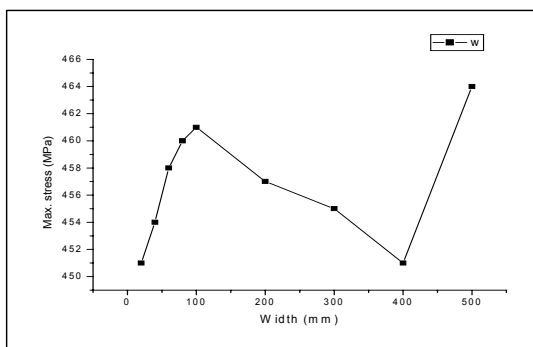


Fig. 8 Max. stress variation at various width

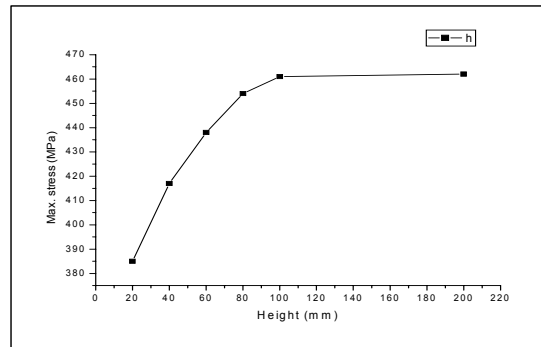


Fig. 9 Max. stress variation at various height

Fig. 9는 높이에 따른 응력의 변화를 나타낸다. 높이가 20 mm에서는 용접부와 패턴중심에서의 응력수준이 비슷하며 가장 낮은 응력이 발생하였다. 패턴의 높이가 높아질수록 최대응력은 증가하며 100 mm에서는 용접부에서 최대응력이 발생하였고, 100 mm이상에서는 응력이 증가하지만 증가 양은 매우적다. 20 mm와 100 mm의 응력차이는 약 60 MPa이다. 패턴의 높이가 낮을수록 응력은 감소하지만, 가장 낮은 응력일 때의 높이인 20 mm를 선정시 수평 리브의 두께를 설계할 때 어려움이 있기 때문에 40 mm가 적당할 것이다.

Fig. 10은 수평 리브두께에 따른 응력의 변화를 나타낸다. 수평 리브의 두께를 증가시키면 용접부에서 최대응력이 발생하며 두께가 두꺼울수록 용접부에서 발생하는 최대응력은 감소한다. 하지만, 수평 리브의 두께를 증가시키면 제거할 수 있는 재료의 양이 줄어들고 두께에 따른 응력의 차이가 크지 않기 때문에 응력관점보다는 무게감소의 관점에서 두께가 작은 것을 선택하는 것이 바람직할 것이다.

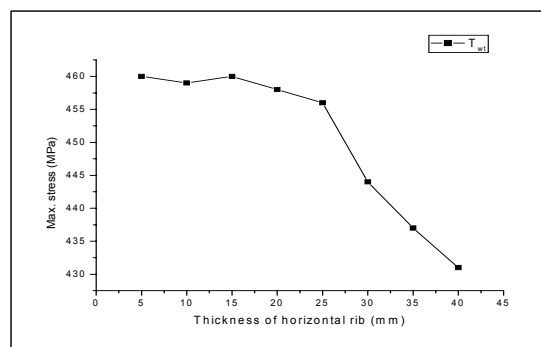


Fig. 10 Max. stress variation at various thickness of horizontal rib

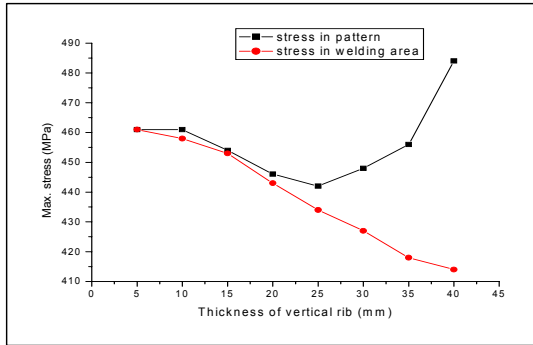


Fig. 11 Max. stress variation at various thickness of vertical rib

Fig. 11은 수직 리브 두께에 따른 응력의 변화를 나타낸다. 5 mm에서 25 mm까지는 패턴의 전체 응력 및 용접부의 응력은 감소하지만, 수직 리브 두께가 25 mm 이상에서는 최대응력 발생 위치는 용접부에서 패턴의 각인 부분으로 이동하고 용접부의 응력은 수직 리브 두께가 두꺼워질수록 감소하였다. 용접부에서는 용접효율을 고려하고 전체적으로는 허용응력을 만족하는 두께는 약 35 mm이다. Fig. 12는 화학연마 후 남은 소재의 두께에 따른 응력의 변화를 나타낸다. 여러 변수들 중 최대응력의 변화에 가장 민감하게 작용하며, 두께가 0.1 mm 증가시 응력은 약 21 MPa 감소한다. 그리고, 최대응력은 용접부에서 발생한다.

Fig. 13은 언더컷의 두께에 따른 응력의 변화를 나타낸다. 용접부에서 최대응력이 발생하며, 언더컷의 두께가 두꺼워질수록 응력은 감소한다. 하지만, 언더컷의 두께변화에 따른 응력의 감소량이 작고 최대응력에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 제작 여건에 따라 결정된 치수를 선택하는 것이 좋을 것이다.

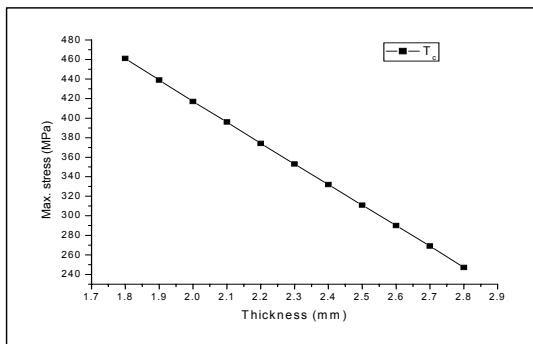


Fig. 12 Max. stress variation at various thickness

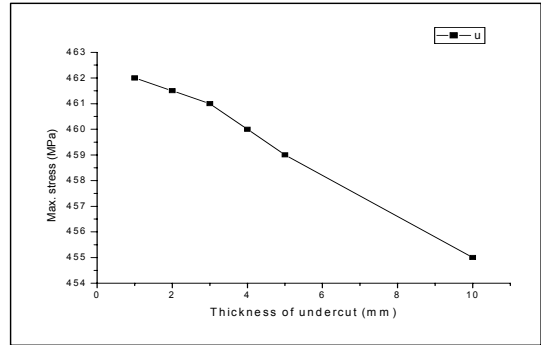


Fig. 13 Max. stress variation at various thickness of undercut

3.3 해석결과

Fig. 14는 초기 패턴의 응력분포이고, 약 460 MPa의 최대응력이 용접부에서 발생하였다. Fig. 15는 위의 해석 결과를 바탕으로 용접부에서 발생하는 응력을 감소시킨 패턴의 응력분포이다. 전체적인 응력은 약 250 MPa이며, 용접부에서 발생한 응력은 약 220 MPa이다. 패턴의 변수에 대한 수치는 Table 2에 정리되어 있다.

패턴의 간격을 40도씩으로 하였을 때 전체적으로 9개의 패턴이 나오며 3조각으로 나누어 용접을 할 경우에 용접부와 맞닿은 패턴을 제외한 패턴은 용접효율을 고려하지 않아도 되기 때문에 화학연마 후 남은 두께를 2.1 mm, 패턴의 수직방향 길이는 160 mm, 나머지 패턴의 변수는 동일하게 설계할 수 있다. 이 때의 최대응력은 336 MPa이 발생하였다.

Table 2 Dimension of optimized pattern

Variables	Optimal value
w (mm)	400
h (mm)	40
T _a (mm)	3
T _c (mm)	2.6
T _{hw} (mm)	5
T _{vw} (mm)	35
u (mm)	3

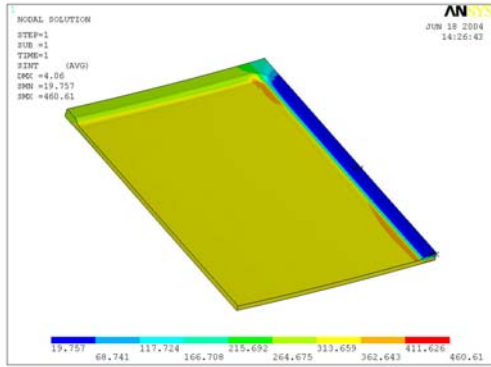


Fig. 14 Stress distribution of initial pattern

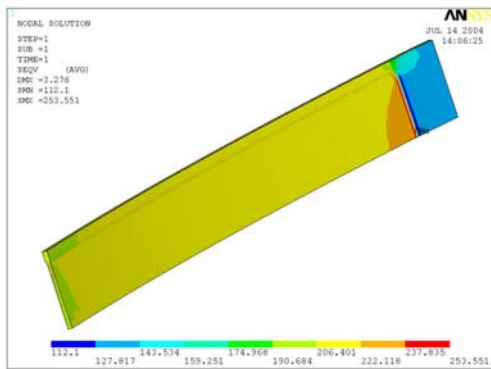


Fig. 15 Stress distribution of optimized pattern

4. 결론

(1) 화학연마는 염산법 보다는 가성소다법이 경계면의 균일성 및 연마량이 우수하였으며, 고온 보다는 저온에서 균일성 및 마스크킹성의 안정성이 큰 것을 확인하였다.

(2) 패턴의 변수 중 최대응력에 가장 민감한 변수는 화학연마 후 남는 소재의 두께이며 허용응력을 만족하는 범위에서 화학연마의 양을 정해야 할 것이다.

(3) 패턴의 변수 중 원주방향의 길이는 길고, 수직방향 길이는 짧을수록 용접부에서 받는 최대응력은 감소한다.

(4) 원주방향의 길이가 임계길이 이상이 되면 최대응력은 증가하며, 발생위치는 용접부에서 패턴의 중앙부분으로 이동한다. 그리고 일정한 패턴으로 제작하기 위해서는 제작성을 고려한 등간격 치수도 고려해야한다.

(5) 수직 리브의 두께가 두꺼워질수록 최대응력의 위치는 용접부에서 패턴의 각인 부분으로 이동한다. 따라서 용접부에서의 최대응력은 감소하지만, 전체적인 패턴의 최대응력은 증가한다.

참고문헌

- (1) Lee J. N., 1979, "Chemical milling", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 4, pp. 273 - 278
- (2) Fadaei Tehrani A. and Imanian E., 2004, "A new etchant for the chemical machining of St304", Journal of Maerials Processing Technology, Vol. 149, Issues 1-3, pp. 404 - 408
- (3) Chen J. Z. and Wu S. k., 1999, "Chemical machined thin fiols of TiNi shape memory alloy", Materials Chemistry and Physics, Vol. 58, pp. 162 - 165.