

유체 유동을 고려한 유동부를 갖는 용접부 형상의 마찰용접 해석

염성호* · 김범년** · 홍성인***

Friction Welding Analysis of Welding Part Shape with Flow Gallery Considered Fluid Flow

Sungho Yeom* · Bumnyun Kim** · Sungin Hong***

ABSTRACT

Friction welding is a welding method to use frictional heat of a couple of materials. In this paper object is that design the welding part shape with the flow gallery part which there is no effect in flow. Decided the welding part design parameter and doing the friction welding analysis used the rigid-plastic FEM program DEFORM-2D. To do friction welding analysis must input necessary flow stress data, friction coefficient by temperature change, upset pressure and Revolution per minute etc. According to analysis result, it decided the optimal shape of welding part with no effect in flow.

초 록

마찰용접은 소재를 서로 마찰시켜 마찰열에 의해 용접하는 방법이다. 본 연구는 내부에 유동부를 갖는 부분을 마찰용접을 이용하여 용접했을 때 유체의 유동에 영향이 없는 유동부를 설계하는데 목적을 두고 있다. 용접부의 설계 변수를 결정하고 이에 대하여 마찰용접 해석을 DEFORM-2D를 이용하여 해석을 수행하였다. 마찰용접 해석을 수행하기 위해 온도변화에 따른 마찰계수와 업셋 압력, 소재의 분당 회전수, 그리고 유동응력을 입력해 주었다. 해석결과에 따라서 유동에 영향이 없는 용접부의 최적형상을 결정하였다.

Key Words: Friction Welding(마찰용접), Frictional Heat(마찰열), Flash(플래시), Friction Coefficient(마찰계수), Upset Pressure(가압)

1. 서 론

구조물의 경량화를 요하는 항공우주분야에 중량을 감소시키기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[1, 2]. 마찰용접 또한 구조물의 결합에 필요

† 2007년 5월 17일 접수 ~ 2007년 6월 18일 심사완료

* 학생회원, 충남대 기계공학과

** 정회원, 한전 전력연구원

*** 정회원, 충남대 기계공학과, 충남대학교 BK21

메카트로닉스사업단

연락처, E-mail: hsi@cnu.ac.kr

한 부품을 감소시켜 구조물 전체의 중량을 줄일 수 있는 결합 기술이다. 마찰용접[3]이란 재료를 맞대어 가압한 상태에서 상대 회전운동을 시켜 접촉부에서 발생하는 열을 이용하여 압접하는 용접방법이다. 마찰용접의 장점은 높은 에너지 효율을 가지며 용접변수의 제어가 용이하고 이종재료의 용접이 가능하다는 점을 들 수 있다. 그리고 단점으로는 용접소재의 한쪽은 축대칭이어야 하고 축을 중심으로 회전하여 마찰운동이 가능하여야 하는 형상적인 제한이 있으며, 용접 후 잘라버려야 하는 플래시가 생성되고, 용접부의 충격인성이 작아지는 단점을 가지고 있다.

마찰용접은 대부분 형상이 단순한 원형의 소재에 대한 동일재료 및 이종재료접합[4]에 사용되고 있다. 최근에는 마찰용접 기술의 발전으로 용접부의 형상이 복잡한 제품의 성능향상을 위해 마찰용접이 적용되고 있다. 마찰용접은 용접 과정에서 용접기계의 용접변수에 많이 의존하기 때문에 용접부의 형상설계는 현장실무경험자의 경험에 대부분 의존하고 있다. 최근에는 해석기술의 발전으로 인해 마찰용접의 해석을 이용한 설계와 용접변수의 제어가 용이해 졌다. 마찰용접 해석에 관련된 연구는 유한 요소법의 발전과 함께 많은 진전이 있었다. 특히, 마찰용접 해석 초기의 연구는 단일 재료에 대한 연구를 통하여 기계적 열적 영향을 고려한 유한요소 해석 연구가 수행 되었다[5]. 이후 이종 재료의 마찰용접 연구가 계속 수행 되고 있다[6, 7].

본 연구는 유한요소 프로그램을 이용하여 마찰용접 해석을 수행하기 위한 해석조건을 결정하고, 마찰용접 시 내부에 유체 유동부를 갖는 용접부 형상에 대해 유체 유동에 영향을 주지 않은 용접부의 형상을 설계 하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 이론 및 해석 조건

2.1 이론적 배경

마찰용접해석에 사용된 프로그램인 DEFORM - 2D 의 지배방정식에는 3가지의 주요 식이 적

용되고 있다. 대 변형 해석에는 Eq. 1의 강-소성 식[8, 9]이 사용 된다. Eq. 1은 재료가 변형되는 동안 고온과 높은 변형률을 가지는 모델에 사용 된다. 열 전달해석에는 Eq. 2, 접촉면의 관계는 Eq. 3의 쿨롱 마찰모델식이 사용 된다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} dV + K \int_V \bar{\epsilon}_v \dot{\bar{\epsilon}}_v dV - \int_S F_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$: Effective stress, $\dot{\bar{\epsilon}}$: Effective strain rate, $\bar{\epsilon}_v$: Volume strain rate, F : Surface traction, u : Velocity, K : Penalty constant.

$$\int_V k T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_S q_n \delta T dS - k \left(\int_V \sigma_{ij} \epsilon_{ij} \delta T dV + \int_S (f_s)_i (u_s)_i \delta T dS \right) = 0 \quad (2)$$

여기서, k : Thermal conductivity, q_n : Heat flux across the boundary surface, ρc : Heat capacity, f_s : Traction vector, u_s : Sliding velocity vector for friction work, κ : Number to convert the mechanical work into heat.

$$f_s = -\mu p \frac{u_s}{|u_s|} \cong -\mu p \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[\frac{u_s}{u_0} \right] \right) \quad (3)$$

여기서, μ : Friction coefficient, p : Normal pressure, u_s : Sliding velocity.

2.2 마찰용접 해석 조건

마찰용접의 주요 변수[10]는 Fig. 1과 같이 소재를 마찰온도까지 높이기 위해 소재의 회전속도, 소재에 가하는 마찰압력과 업셋압력으로 이루어지며 변수값은 주로 소재의 종류와 크기에 따라서 결정된다. 용접 후 생성되는 플래시의 크기와 형상은 업셋 압력에 의해 결정되기 때문에 설계된 용접부의 업셋 길이에 맞도록 업셋 압력을 결정해 주어야 하며, 해석에도 실제 마찰용접 변수와 동일한 변수를 결정해주어야 한다.

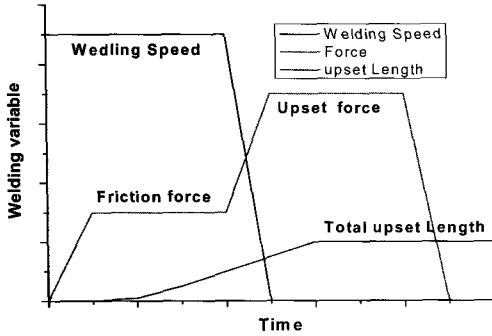


Fig. 1 Welding variable of brake type welding machine

마찰용접 해석 시 소재의 상승 온도가 국부적으로 2000 ~ 3500 °C 까지 상승하게 된다. 이에 합당한 재료의 응력-변형률 선도를 입력하지 않을 경우 수렴을 하지 못하기 때문에 해석이 불가능하게 된다. 해석에 사용된 DEFORM-2D는 1200 °C 까지의 응력 변형률 선도만이 제공되기 때문에 그 이상의 온도 데이터는 사용자가 결정해주어야 한다. 시험에 의해 측정된 데이터를 입력하는 것이 해석에 대한 신뢰성을 높이는 방법이지만 용융점 이상의 응력-변형률 선도를 측정하는 것이 거의 불가능하기 때문에 기존의 물성 데이터를 이용하여 수치해석방법인 외삽법[11]을 사용하여 용융점 이상의 데이터를 결정하였다. 그리고 마찰계수는 마찰열 상승의 주요 요인으로 온도 변화에 따른 마찰계수를 입력해 주어야 한다. 일반 철 소재의 온도변화(20~1200 °C)에 따른 마찰계수를 실험에 의해 측정된 A. Sluzalec[5]의 Eq. 4를 사용하여 온도변화에 따른 마찰계수를 얻었다. Eq. 4에 의해 얻어진 마찰계수는 Fig. 2와 같다. Fig. 2는 상온에서의 0.4인 마찰계수가 온도가 상승하면서 약 300 °C 일 때 최대치를 나타내고 그 이후부터 작아지는 특징을 가지고 있다. 온도분포에 따른 마찰계수는 재료에 따라 달라 질 수 있지만 본 연구에 사용된 재료와 SCM440 재료와 실험에 사용된 일반 스틸의 온도 분포에 따른 유동응력의 경향이 유사하기 때문에 재질의 특성이 유사하다고 판단하여 같은 마찰계수 값을 사용하였다[9].

$$\mu(t) = A \cdot T^B \cdot e^{-C/T} \quad (4)$$

여기서, where T : Temperature, A, B, C : Constants optimized by experimental.

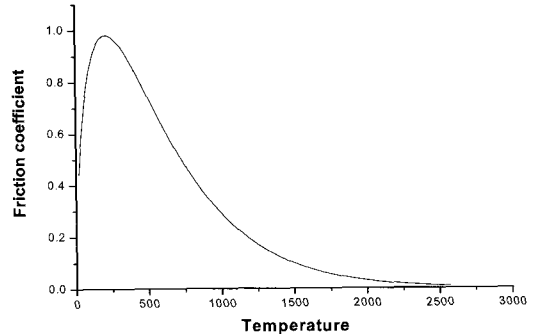


Fig. 2 Friction coefficient by Temperature change

3. 유동부의 마찰용접 해석

3.1 마찰용접 해석

Figure 3은 반지름이 50 mm 인 원형의 쿨링 젤러러부에 마찰용접에 의해 반지름이 10 mm 유동부를 갖는 형상을 나타내었다. 마찰용접에 의해 유동부를 갖는 형상은 유동부 내부에 생기는 플래시를 제거 할 수 없기 때문에 마찰용접 후 생긴 플래시가 유동부 유동에 영향이 가장 적게 미치는 형상으로 마찰용접부의 형상을 설계하여야 한다. 용접부에서 발생하는 플래시는 용접부의 부피에서 발생하기 때문에 용접부의 부피변화를 고려한 형상 변수를 설정하였다.

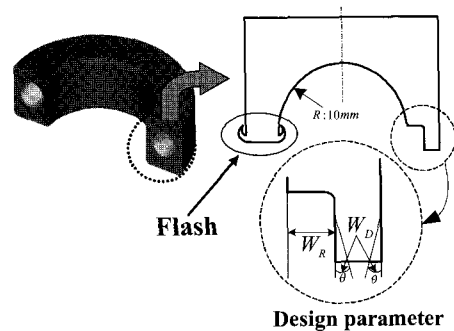


Fig. 3 Welding part model with flow gallery and Design parameter welding part

설계변수 Fig. 3과 같이 w_r 을 2.5, 2, 1.5 mm

로 하고 w_0 를 0, 5, 10도로 설계하여 각각에 대하여 해석을 수행하였다. 그리고 해석결과 유동부에서 생성된 플래시의 형상을 확인 하였다. 업셋에 의한 가압압력으로 인해 소재의 용접부 부근에서 받는 응력이 국부적으로 항복점 이상의 응력을 받을 수 있기 때문에 해석결과에서 최대 응력값을 확인 하였다. 마찰용접은 형상의 크기와 마찰 면적에 의해 온도상승 속도가 다르기 때문에 각각의 형상에 동일한 압력을 가할 경우 압력이 가해진 소재의 업셋 이동속도가 달라지는 현상이 발생한다. 이동속도의 증가에 따라 플래시의 형상이 차이를 보이기 때문에 해석결과 플래시의 형상을 확인 하였다.

3.2 해석조건

해석모델은 Fig. 4 와 같이 축대칭 모델을 사용하였다. 그림에서 1,2번의 소재는 SCM440 재료로 외삽법에 의해 결정된 물성을 입력하고 소재 사이의 접촉부에는 Eq. 4에 의해 결정된 온도변화에 따른 마찰계수를 입력하였다. 1번 소재가 1000 RPM으로 회전하며 2번 소재는 온도상승을 위한 마찰압력 값과 가압을 위한 업셋 압력 값을 입력하여 해석프로그램을 실행 시킨다. 해석은 모델을 Table 1 에 9가지 형상으로 설계하여 해석을 수행 하였다.

Table 1. Analysis condition

Material property		SCM440	
Welding Condition	Welding Speed	1000 RPM	
	Friction Force	4.9KN	
	Upset Force	50KN	
	Upset Length	2.5mm	
Model Parameter	w_s (mm)	w_0 (deg)	Model
	2.5	0	Model 1-1
		5	Model 1-2
		10	Model 1-3
	2	0	Model 2-1
		5	Model 2-2
		10	Model 2-3
	1.5	0	Model 3-1
		5	Model 3-2
10		Model 3-3	

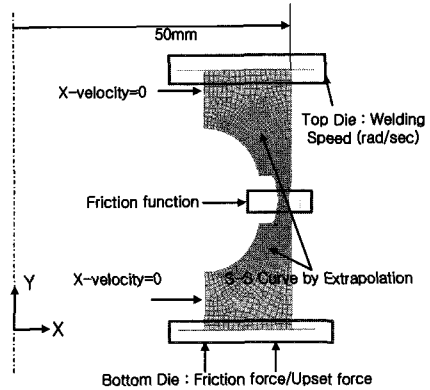


Fig. 4 FE Model of friction welding

3.3 해석결과 및 고찰

용융온도까지 상승한 용접부에서는 업셋 압력으로 인해 소재가 외부로 밀려나와 플래시가 생성된다. 나머지 힘은 소재에 작용하기 때문에 너무 과도한 하중을 받을 경우 Fig. 5에서 보여진 것처럼 최대응력이 나타나는 부분에서 응력이 항복응력값을 넘기는 경우가 발생하게 된다. 소재가 항복응력값을 넘겨 변형 할 경우에는 플래시와 같이 소재의 변형된 부분도 잘라 내야 하기 때문에 초기에 설계된 업셋 길이 2.5 mm가 모두 플래시로 생성되도록 가압하여야 한다.

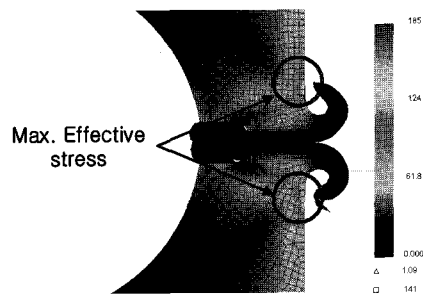


Fig. 5 Max. effective stress of welding part model with flow gallery by upset force

Figure 6(a)는 설계변수 w_0 의 변화에 따른 용접부 부근에서 나타나는 최대 응력값의 변화를 나타내었다. w_0 이 2.5 mm인 형상의 모든 각 w_0 에서 응력이 작아지는 것을 확인 할 수 있으며, 특히 w_0 가 5도 일 때 모든 단면형상에서 가장 작

은 응력값을 나타내었다.

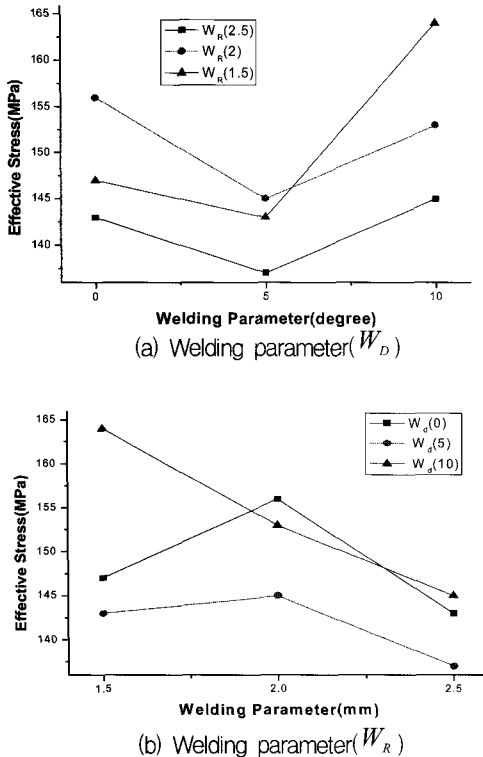


Fig. 6 Relative of welding parameter and effective stress

Figure 6(b)는 설계변수 W_R 의 변화에 따른 응력의 변화를 나타내었다. W_D 가 5도일 때 모든 W_R 의 단면형상에서 가장 작은 응력값을 나타내었다. 그리고 W_R 이 2.5 mm일 때의 모든 W_D 단면형상에서 가장 작은 응력값을 나타내고 있다. 본 연구의 대상인 형상에서 W_D 가 5도일 때 W_R 이 2.5 mm 일 때 업셋 압력에 의해 소재에 가해지는 응력이 가장 적게 나타난다. 소재에 업셋 압력을 가압 할 경우에 각 형상에서 소재가 가압되는 시점을 알 수 있는데 Fig. 7은 업셋 압력을 가한 후 소재가 가압되는 속력을 데이터화한것으로. 소재의 형상 W_R 2.5 mm, W_D 10도인 Model (1-3)에서 가장 먼저 가압되고 있으며 W_R 1.5 mm, W_D 0도인 Model (3-1)에서 가장 늦게 가압되고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 소재의 용융온도 상승 시점이 마찰용접부 면적에 비례

하여 나타나고 있기 때문이다. 그리고 W_R 이 같은 형상에서 W_D 가 0도 일 때 가장 큰 속도를 나타내고 있다. W_R 이 2.5 mm 경우 약 1.5 mm/s, 2 mm에서 1.3 mm/s, 1.5 mm에서 0.8 mm/s의 속도차를 보였다. 이는 가압되는 시점 온도 상승 속도는 느리지만 용접부의 부피가 상대적으로 많고 열의 발생량이 많기 때문에 최고 속도를 나타남을 예상할 수 있다.

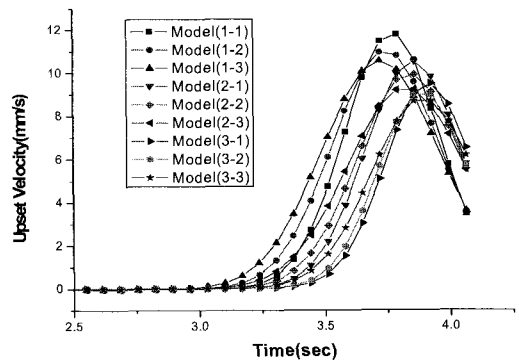


Fig. 7 Upset velocity at design parameter welding part

마찰용접 후 내부 유동부에는 제거 할 수 없는 플래시가 생성된다. 플래시에 의한 내부유동에 영향이 없어야 하기 때문에 해석결과 각각의 형상에 따른 플래시의 형태를 확인 하였다. Fig. 8은 해석결과 나타난 플래시의 형태를 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 W_R 이 2 mm W_D 가 5도 일 때 그리고 Fig. 6(b)는 W_R 이 1 mm W_D 가 10도 일 때의 플래시의 형태를 나타낸다. (a)의 경우 유동부 내부로 플래시 다소 많이 밀려 나온 것을 볼 수 있으며, (b)의 경우 W_R 의 폭이 작기 때문에 플래시가 과다하게 유동부로 밀려 나온 것을 볼 수 있다. 이런 플래시 형상은 유동에 많은 영향을 미치기 때문에 적절한 형상 설계값이라 볼 수 없다. Fig. 8(c)는 W_R 이 2.5 mm W_D 가 5도 일 때 그리고 Fig. 8(d)는 W_R 이 2.5 mm W_D 가 10도 일 때의 플래시 형태를 나타낸다. (c),(d) 모두 내부유동에 영향이 미치지 않는 플래시가 생성 되었다. 그리고 업셋 압력에 의한 용접부 주변의 응력은 소재의 항복점에 미치지 않았다. 결

과적으로 해석에 의해 생성된 플래시는 Fig. 8에서와 같이 Model(1-2),(1-3)의 경우가 내부유동에 영향이 없는 플래시를 생성하였기 때문에 용접부 형상으로 적절하였다.

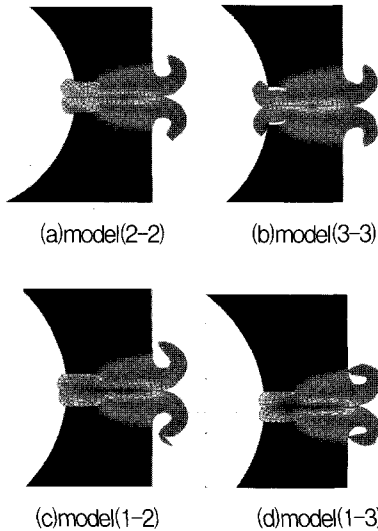


Fig. 8 Friction welding analysis result of welding part with flow gallery

4. 결 론

내부에 유동부를 갖는 형상에 대한 마찰용접 해석을 수행하여 내부의 유동에 영향이 미치지 않는 형상의 결정에 관한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 마찰용접에 대한 유한요소해석을 수행하기 위해 응력-변형을 곡선을 수치해석방법인 외삽법을 이용하여 구하였고, 온도 변화에 따른 마찰계수는 실험식으로 구하여 마찰용접의 유한요소해석 방법을 정립할 수 있었다.
- (2) 유체의 유동에 영향을 미치지 않는 용접부의 플래시는 용접부의 형상변수 W_R 이 작아 질수록 플래시의 길이가 작아지는 경향을 보였으며 W_D 의 각의 변화에 따라 플래시에 미치는 영향은 큰 차이를 보이지 않았다.
- (3) 마찰용접 해석은 구조적인 특징으로 기계적인 결합이 어려운 분야의 연구에 많은 도움

이 되리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 여운기, 김희송, 공창덕, 정종철, "카본/에폭시 복합재로 제작된 수송기계용 추진축의 진동특성에 관한 연구", 한국추진공학회지, 제5권 4호, 2001, pp.31-39
2. 류시웅, 김건희, 공창덕, 오경원, "유동유체가 흐르는 파이프에 의한 유연 구조물의 진동 제어", 한국추진공학회지, 제8권 2호, 2004, pp.25-31
3. H.S. Jeong, T. Shinoda, "Fundamentals and Basic Application of Friction Welding", 대한용접학회지, 제15호 6권, 1997, pp.1-12
4. 오정국, 차용훈, 성백섭, 박창언, 김하식, 김충환, "STS304와 S15C 이종마찰압접부의 접합계면 응력해석", 한국공작기계학회논문집, 제11호 4권, 2002, pp.65-71
5. A. Sluzalec, "Thermal Effect in Friction Welding", Int. J. Mech. Sci, Vol. 32, No. 6, 1990, pp.467-478
6. L. Fu, L. Duan, "The coupled deformation and heat flow analysis by finite element method during friction welding", Weld. Res. Suppl, 1998, pp.202-207
7. L. D'Alvise, E. Massoni, S.J. Walløe, "Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials", Int. J. Material Processing Technology, 2002, pp.387-391
8. Kobayashi, S. Oh, S, & Altan T., Metal Forming and Finite-Element Method. New York; Oxford University Press, 1989
9. DEFORM-2D Ver.8.1 Manual
10. 강성보, "W-30Cu 합금과 Cu의 마찰용접 특성 및 혼합층에 관한 연구", 충남대학교 박사학위 논문, 2000
11. M. J. Maron, R. J. Lopez, Numerical Analysis A Practical Approach, WADSWORTH, 1990