

이종금속 접합을 위한 자기 펄스용접의 수치해석모델 개발에 관한 연구

A Study on Development of Numerical Analysis Model for Dissimilar Material in Electromagnetic Impulse Welding

김학형*, Yu Xue*, 김일수**, 박창언**, 강봉용***

* 목포대학교 대학원 기계공학과

** 목포대학교 기계·선박해양공학부

*** 한국생산기술연구원 정밀접합·용접팀

1. 서 론

자기 펄스용접(Electromagnetic Impulse Welding, EIW)은 접합하고자 하는 두 재료 사이에 고속의 충격에너지를 일으키는 자기 펄스(magnetic pulse)에 의한 냉간 금속접합을 의미한다. 이러한 자기 펄스용접은 지난 40년간 연구되어져 왔지만 현재는 단지 일부 선진국들에서만 산업분야에 응용되어지고 있다. 자기 펄스용접기술은 맨 처음 구 소련에서 수년간 군사적인 목적으로 사용되어져 왔으며 현재는 핵연료봉의 용접 및 튜브의 밀봉에 적용되고 있다¹⁻³⁾.

EIW 공정은 고상 접합기법으로 매우 실용적이고 비용절감 효과로 인하여 여러 분야에서 사용되어지고 있으며 특히 관형부품의 접합에 많이 이용되고 있다. 두 개의 관형부품의 용접에서는 코일의 외부에 튜브로 감싸 자기력을 인가하여 고에너지의 전자기적 압력을 유발하여 접합을 수행하고 있지만 국내의 경우 이러한 접합기법을 산업현장에 적용한 예는 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 두 개의 다른 재질을 가진 금속을 이용한 자기 펄스용접의 접합특성을 분석하기 위하여 FEM을 이용한 수치해석용 시스템을 개발하여 이를 통해 최적의 접합 공정변수를 선정하고자 한다. 자기 펄스용접 기법에 대한 이론 정립이 부족한 관계로 고속의 충격 에너지를 일으켜 접합을 이루어내는 폭발용접(explosive welding) 기법을 기초로 해석을 수행하였다⁴⁻⁷⁾.

2. 장 수치해석 모델 개발

2.1 지배방정식

Fig. 1은 해석에 사용된 이종 관의 해석모델을 나타낸 것으로 2차원 축대칭 모델을 구성하여 해석을 단순화시켰다. 해석에 사용된 지배방정식을 아래와 같이 연속 방정식, 운동량 방정식과 에너지 방정식으로 구성하였다.

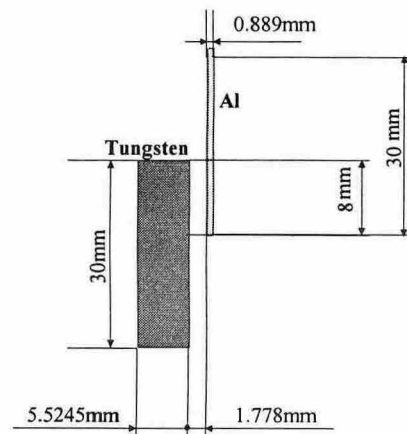


Fig. 1 Analysis model setup for Electromagnetic Impulse welding.

$$\frac{V_D}{v_0} = \frac{V_D - u_1}{v_1} \quad (1)$$

$$\frac{V_D^2}{v_0} + P_0 = \frac{(V_D - u_1)^2}{v_1} \quad (2)$$

$$E_0 + \frac{1}{2} V_D^2 + \rho_0 v_0 = E_1 + \frac{1}{2} (V_D - u_1)^2 + \rho_1 v_1 \quad (3)$$

여기서, $v_0, v_1, \rho_0, \rho_1, E_0, E_1, u_0, u_1, P_0, P_1$ 은 각각 모재와의 충돌점 이전 및 이후의 비체적, 밀도, 내부에너지, 충돌속도와 충돌압력을 나타낸다.

Table 1은 해석에 사용된 모재(Tungsten K1700) 및 접합재(Aluminum 6061)의 재질을 나타낸다.

Table 1 Material properties for analysis

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg · °C)	Electro resistance (10 ⁻⁶ Ω · m)	Poisson's ratio
Aluminum	2700	896	430	0.33
Tungsten	17090	1340	56	0.28

2.2 경계조건

자기 펄스 발생기구로부터 인가되는 자력 F 는 다음과 같이 표현된다.

$$F = \mu_0 K^2 n^2 U^2 C \frac{\sin^2(wte(-Rt/L))}{2LI^2} \quad (4)$$

여기서, $\mu_0, K, n, U, w, C, R, L, I, t$ 는 각각 투자율(magnetic permeability), 작동 코일의 물리적 계수, 작동코일의 권선수, 전압강하, 전류진폭의 주기, 캐퍼시턴스, 전회로 저항, 전회로 인덕턴스, 작동 코일 길이, 시간을 나타낸다.

코일과 접합재 사이에서 발생하는 자기장에 의한 접합재의 충돌압 P 은 다음과 같다.

$$P = \frac{1}{2} Z_{eq} u_0 \cos \beta \quad (5)$$

여기서, β 는 충돌각, u_0 는 충돌속도, Z_{eq} 는 접합재의 등가 음향 임피던스(equivalent acoustic impedance)를 의미한다.

본 해석에서 사용된 모델에서는 초기각 $\alpha = 0$ 이므로 초기 충돌속도는 아래의 식을 사용하였다.

$$V_0 = V_1 = V_D = \frac{V_0}{2 \sin \frac{\beta}{2}} \quad (7)$$

2.3 해석 방법 및 절차

자기 펄스용접에 대한 접합 특성을 분석하기 위하여 본 연구에서는 Lagrangian 유한 차분 코드를 사용하는 2차원 동적운동해석용 소프트웨어인 DYNA-2D를 이용하였다.

본 해석에서는 1점 적분방식을 사용하여 실제 에너지가 소비되지 않는 변형모드가 고려될 수 있으나 hour glass 기법으로 이 현상을 방지토록 하였고, penalty method를 사용하여 두 용접재 간의 접촉에서 한 절점이 타 재료 내부로의 침투를 방지하기 위해 가상의 스프링에 의한 힘을 이용하였다. 또한, 마찰은 Coulomb 법칙을 사용하였고 두 부재가 접촉시 운동량은 보존되도록 하였다⁸⁾.

3. 해석 결과 및 고찰

본 연구를 통해 개발된 시스템을 이용하여 최적의 접합 공정변수 예측을 위하여 접합재에 인가되는 자력을 입력조건으로 압력 및 속도 변화와 같은 동적변형을 응답특성을 분석하기 위하여 Table 2와 같은 입력조건으로 수치해석을 수행하였다.

Table 2 Input conditions employed in simulation for EIW

Case	Input Force(kN)	Gap(mm)
I	28	1.778
II	32	1.5

Fig. 2는 각각의 다른 자력을 접합재에 인가하였을 때 시간에 따른 접합재의 변형 진행 양상을 나타낸 것이다. case I의 경우 모재부와 접합재와의 충돌은 약 8.4 μ s에 일어났으며 반면에 case II의 경우에는 약 8.0 μ s에 충돌이 발생하였다. 이는 Case II의 경우가 접합재에 보다 높은 자력이 인가되었으며 이로 인해 자력에 의해 발생된 충격파에 의한 접합재의 충돌속도가 달라짐을 나타낸다. 또한, 접합재의 소성변형 및 모재부의 표면변형을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 Al tube의 끝단에서 0.8mm 지점부터 4.0mm까지 0.8mm 간격으로의 다른 자력을 인가하였을 때의 x축의 변위를 나타낸 것이다. 접합재로 사용된 Al tube의 낮은 경도값으로 인해 자력인 인가된 부분에서의 접합면이 모재부에

충돌한 후 소성변형을 일으켜 모재부에 접합되는 양상을 보이고 있으며 자력조건이 바뀌어도 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

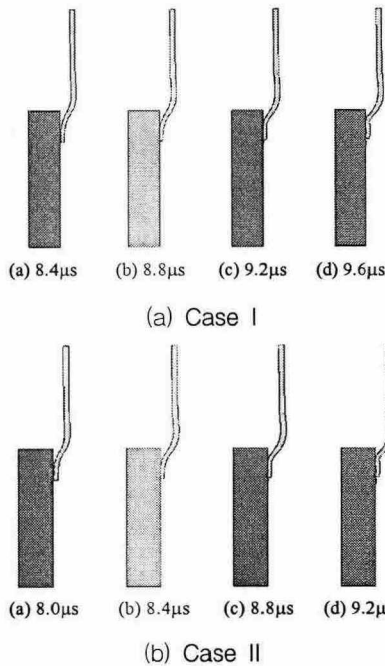


Fig. 2 Deformation profile at different cases

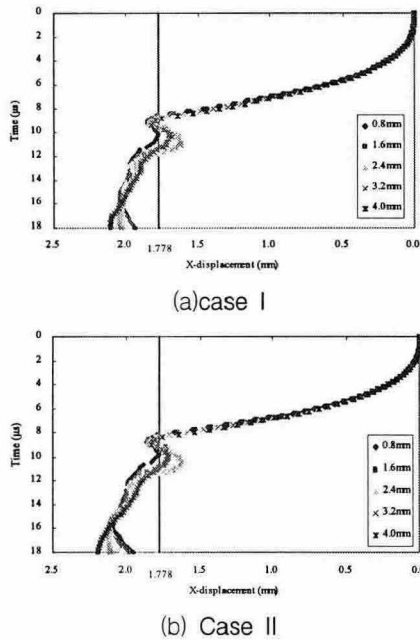


Fig. 3 X-displacement profile at each distance from Al tube

4. 결 론

본 연구에서는 EIW의 접합특성을 분석하기 위하여 고속의 충격 에너지를 일으켜 접합을 이

루어내는 폭발용접 기법을 바탕으로 FEM을 이용한 수치해석모델을 개발하였다. 개발된 모델을 수치해석한 결과 입력조건으로 사용된 자력이 충격과 생성으로 인한 부재속도 및 변형 양상을 확인할 수 있었고 이를 통해 이중금속재료의 접합에 있어서 자기 펄스에 의한 충격파를 이용하여 전혀 다른 물성치를 가진 재료끼리의 조합이 가능함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. M. Kojima, K. Tamaki, and T. Furuta : Effect of collision angle on the result of electromagnetic welding of Aluminum, Transaction of the Japan welding society, 20 (1989), 36-42
2. H. G. Powers : Bonding of Aluminum by the capacitor discharge magnetic forming processes, Welding Journal, 46 (1967), 507-510
3. M. Kojima and K. Tamaki : Electromagnetic welding of tube, The 5th Int. Symposium of the Japan Welding Society, Tokyo, (1990), 201-206
4. A. Oberg, J. Schweitz and H. Olfsson : Computer modelling of the explosive welding process, Proceedings of the International Conference on High Energy Rate Fabrication, 1984.
5. Akihisa ABE : Numerical study of the mechanism of a wavy interface generation in explosive welding, JSME Int J Series B, 40-3 (1997), 395-401
6. A. Mousavi : The mechanics of explosive welding, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical, Aerospace and Manufacturing Engineering, UMIST, Manchester, 2001
7. G. R. Johnson and W. H. Cook : A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, Netherlands, (1983), 19-21
8. L. G. Lazari and A. L. Hassani : Solid mechanics approach explosive welding composite, In. Proceedings of the International Conference on High Energy Rate Fabrication, (1984)