

SPH 해석기법을 이용한 Cu와 CP-Ti 고속 충돌 접합 단면의
형상학적 평가박기환¹ · 강범수¹ · 김정^{1,†}¹부산대학교 항공우주공학과Evaluation of high-velocity impact welding's interfacial morphology between
Cu and CP-Ti using SPH numerical analysis methodKi Hwan Park¹, Beom Soo Kang¹ and Jeong Kim^{1,†}¹Department of Aerospace Engineering, Pusan Nat'l University

Abstract

The existence of different thermodynamic properties results in various undesirable effects, such as thermal deformation and residual stress, in heat-welding processes. The solid-state junction, by using explosive or electromagnetic forces, i.e., high-velocity impact welding without employing heat is advantageous in joining materials with different thermodynamic properties. In the solid-state junction, the joining is performed within a short time, a high velocity and large deformations are accompanied by interfacial surfaces. The numerical analysis models play an important role in the understanding of the mechanism of high-velocity impact welding. However, in the analysis of high velocity and large deformations, the conventional Lagrangian method has low reliability due to the occurrence of entanglements. In this study, high-velocity impact welding between Cu and CP-Ti with different thermodynamic properties was performed using a un-gridded numerical method, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), and interfacial morphology occurred. As a result of the analysis, the interfacial morphology was confirmed and the compared degree of shape (straight, vortex), period, length, and so on appeared differently depending on the relationship between the parameters (impact angle and speed).

초 록

열을 이용한 접합은 소재 간 열역학적 차이에 의한 열 변형 및 잔류응력 등 원하지 않은 결과를 야기한다. 폭발력 또는 전자기력을 이용한 고상 접합은 열이 사용되지 않아 열역학적 차이가 있는 소재 접합에 이점이 있다. 이때, 해당 접합은 짧은 시간 내(μs) 이루어지며, 접합면에서 고속 및 대 변형이 동반된다. 수치해석 모델은 고속 충돌 접합 메커니즘을 이해하는 데 중요한 역할을 수행한다. 하지만 고속 및 대 변형이 나타나는 해석에서 전통적인 라그랑지안 기법은 격자 얽힘이 발생해 결과의 신뢰성이 낮다. 본 연구는 무격자 수치해석 방식의 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)를 이용하여 열역학적 차이가 있는 Cu와 CP-Ti의 고속 충돌 접합을 수행하였고 경계면 결합 형상이 발생함을 확인하였다. 해석의 결과로 경계면 결합 형상이 매개변수(충돌 속도, 충돌 각도)의 관계에 따라 형상의 정도(직선, 소용돌이), 주기, 길이 등이 다르게 나타나는 것을 확인 및 비교하였다.

Key Words : High-velocity impact welding(고속 충돌 접합), SPH(Smoothed particle hydrodynamics) method, Interfacial morphology(경계면 결합 형상)

1. 서 론

최근 자동차 및 항공 산업의 엄격한 환경 규제에 따라 연비개선 및 배출가스 저감을 위한 경량화 연구의 중요성이 증가하고 있으며[1, 2], 이종 소재 접합기술을 통한 경량화 연구도 활발히 진행되고 있다[3]. 우수한 열전도성과 전기전도성을 가지고 있는 Cu와 항공기의 추진기관에 사용이 가능할 정도로 내열성, 내식성이 우수하며, 강도가 높고 가벼워 비강도가 큰 Ti의 접합은 두 금속의 장점을 활용할 수 있어 항공우주 분야 외 다양한 산업 분야에 폭넓게 적용할 수 있다. 그러나 두 금속은 녹는점(Cu-1,085°C / CP-Ti-1,668°C)과 같은 열역학적 특성 차이가 존재한다. 특히, 열을 사용하는 접합에서 두 금속의 상대적 열팽창, 특정 조건에서의 접합 불가, 균열 및 열에 의한 잔류응력 등 의도하지 않은 현상의 발생 가능성이 있다[4].

열을 사용하지 않는 고상 접합 방식 중 하나인 충돌

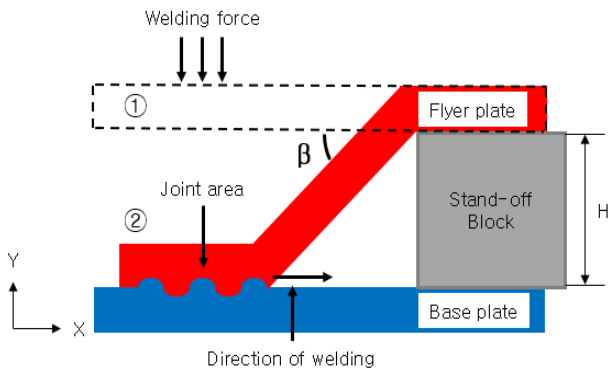


Fig. 1 High-velocity impact welding experimental setup with stand-off block

접합(impact welding)은 용가재와 같은 첨가물이 필요하지 않고, 외부로부터 열에너지가 가해지지 않아 접합부의 열역학적 변형을 일으키지 않기 때문에 녹는점이 낮고 소성변형을 일으키기 쉬운 Al, Cu 등이 접합에 주로 사용된다. 폭발 접합(explosive welding), 전자기 접합(electro-magnetic welding) 등은 접합이 짧은 시간(μs) 내에 이루어지는데, 이러한 접합은 고속 충돌 접합의 대표적인 방식이다. Fig. 1에서 고속 충돌 접합이 진행되는 과정을 확인할 수 있으며, 모재(base plate)와 접합재(flyer plate)가 β 각도(impact angle)를 이루며 고속으로 접합이 진행되도록 블록(stand-off block)이 삽입된다. ①번 상태의 접합재에 접합력이 가해지면 접합재는 ②번 상태와 같이 β 각도를 이루며 모재와 접촉하게 되며, 접합력이 작용하는 동안 $+x$ 방향으로 접합이 진행된다. 이때, 두 금속의 경계면에서는 재료적 특성 및 충돌 조건(충돌 각도 및 속도) 등에 따라 충돌 접합 이후 모재와 접합재의 경계면에서 직선(straight), 물결(waves) 또는 소용돌이(vortex) 형태의 경계면 결합 형상이 나타나며 Fig. 2에서 확인할 수 있다[5]. 이러한 형상은 직선보다 소용돌이 형태일수록 결합 단면적이 증가하게 되어, 결합의 정도가 완고해지며, 최적의 강도를 나타내는 형상이다[6].

두 금속의 고속 충돌 시 표면에서 산화 피막층 박리 현상(jet phenomenon)이 나타나며 금속 표면층의 상호 침투 과정이 수반된다. 피막층이 제거된 각 금속 표면의 청정면이 고압, 고속으로 침투 및 접합되어 Fig. 2에서 보이는 유형의 경계면 결합 형상이 나타난다[7].

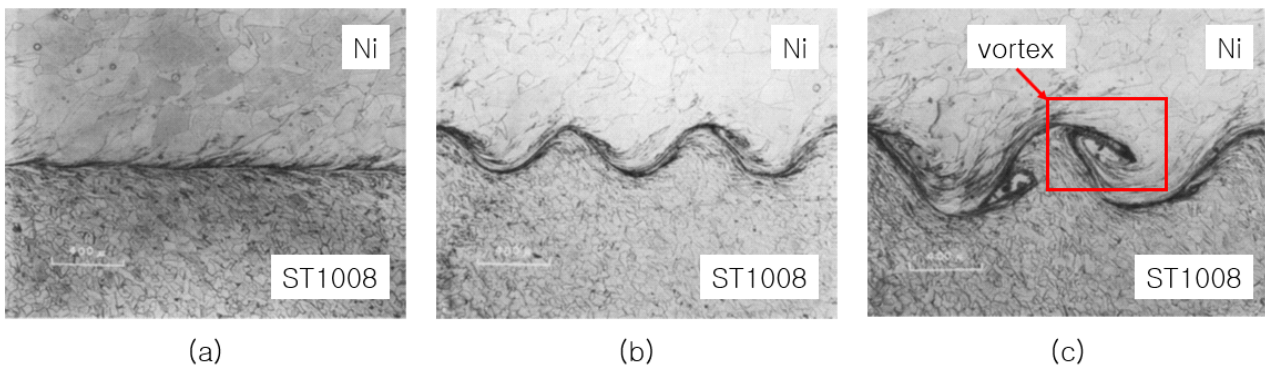


Fig. 2 Types of interfacial morphology in impact welding, between nickel and steel(grade 1008), (a) a straight interfacial morphology, (b) wave interfacial morphology, (c) wave with vortices interfacial morphology

8]. 이러한 경계면 결합 형상의 생성에 관련하여 많은 견해가 존재하는데, 금속 표면에서 국부적인 용융 및 응고와 표면의 얇은 층을 제거하는 박리현상이 경계면 결합 형상 생성의 에너지원임을 주장하는 의견과, 고속 충돌 접합 시 가열의 정도는 미미하며, 박리현상으로 인해 깨끗해진 표면에서 고 변형률 속도에 의해 경계면 결합 형상의 출현을 주장하는 의견 등이 있다[9, 10]. 두 가지 주장에서 열역학적 현상 유무의 차이가 존재하지만, 충돌 시 생성되는 박리현상이 경계면 결합 형상을 생성하는 원인을 확인할 수 있다. 이처럼 경계면 결합 형상의 출현 및 야금학적 결합 프로세스에 대해 금속 및 기계학 등에서 포괄적인 연구주제로 다루고 있지만, 이 현상을 설명하는 근본적인 물리적 이론은 아직 널리 받아들여지지 않고 있다[11].

본 연구에서는 LS-DYNA 상용 프로그램을 사용하여 SPH 해석기법을 통해 Cu와 CP-Ti의 고속 충돌 접합 시 두 금속의 접합부위에 생성되는 경계면 결합 형상을 확인하였다. 이때 매개변수(충돌 속도, 충돌 각도)에 따른 경계면 결합 형상 및 형상학적 체결정도를 수치해석 결과를 통해 분석하였다. 해석 결과로 얻은 경계면 결합 형상의 주기, 높이, 길이 등은 두 소재의 접합 정도를 측정하는 지표로 사용한다.

2. 유한요소 해석기법

2.1 SPH 해석기법

고속 충돌 접합의 경계면 결합 형상의 유형을 이해하고, 예측하는 데 있어 수치적 해석기법은 중요한 역할을 수행한다. 전통적인 라그랑지안 해석기법은 대상 물체에 고정된 격자(mesh)를 가지고 있어 고속충돌에 의한 압축 및 파단과 같은 큰 변형을 수반하는 해석 시 격자의 얽힘, 변형의 왜곡 등으로 인해 얻고자 하는 결과에 대한 신뢰성이 떨어진다. 반면, SPH 해석기법은 해석 대상 물체를 수치적 격자 대신 입자(particle)의 연속적인 집합 즉, 무격자 방식의 해석기법이며, 격자 기반의 모델링된 물체의 각 요소(node)에 초점을 맞추어 시간에 따른 물리량을 나타내는 라그랑지안 해석기법에 근거를 두고 있다[12]. 격자 기반 모델링된 각 입자는 정보(질량, 부피, 속도, 밀도 등)를 가지며, 입자장(Ω) 내 임의의 입자에 대한 정보

는 보간법에 기초한 식 (1)(kernel approximation)을 이용하여 얻을 수 있다.

$$f(x) \approx \int_{\Omega} f(x') W(|(x-x')|, h) dx' \quad (1)$$

식 (1)을 입자장 내 임의의 지점에 위치하는 기준 입자 i 에 대한 식 (2)(particle approximation)로 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

$$f(x_i) = \sum_j^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x_i - x_j, h) \quad (2)$$

이때, j 는 입자장 내 기준 입자와 이웃한 임의의 입자를 나타낸다. 함수 f 는 기준 입자가 기술된 입자장(Ω)에서 정의된 함수이며, m 은 질량, ρ 는 밀도, N 은 입자장 내에 속하며 입자 i 에게 영향을 미치는 입자의 수, kernel function이라고 불리는 W 는 smoothing length(h)에 의해 폭이 결정되는 함수를 의미한다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석 조건

본 연구에서는 고속 충돌 접합된 경계면 결합 형상에 영향을 줄 수 있는 요소인 충돌 속도와 충돌 각도에 따라 생성되는 형상의 유형을 확인하고, 각 경우에서 얻은 경계면 결합 형상의 파라미터들을 측정하여 형상적으로 접합의 정도를 비교 분석하였다. 첫 번째 입력 변수인 속도는 200m/s, 400m/s, 600m/s를 각각

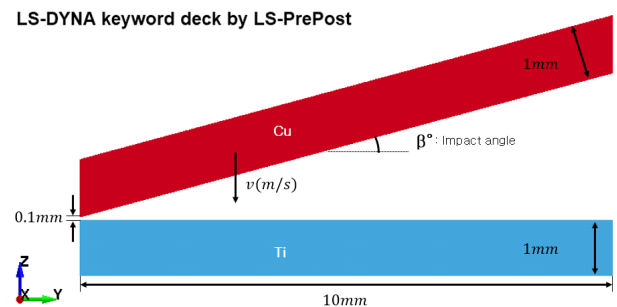


Fig. 3 Numerical analysis 2D-model with flyer and base plates.

사용하였고 각 속도마다 충돌 각도 β 를 10° , 15° , 20° 로 입력하여 총 9가지의 해석을 수행하였다. 각 해석마다 충돌 속도 및 충돌 각도가 서로 다르므로 9가지 해석 모두 동일 시점에서 경계면 결합 형상을 확인한다면 일부 해석의 경우 충분히 접합되지 못한 결과를 얻게 된다. 따라서 해석별 경계면 결합 형상이 충분히 나타날 수 있도록 해석시간을 다르게 설정하였다. 유한요소 해석 모델은 Fig. 3과 같이 2-D 모델의 접합재와 모재로 구성되어 있으며 1mm의 두께와 10mm의 길이를 가진다. 접합재와 모재를 이루고 있는 연속적인 입자의 수는 각 길이별로 0.01의 간격으로 배치(가로 1,000 X 세로 100)되어 있다. 충돌의 구현은 접합재가 v 의 충돌 속도를 갖고 $-z$ 방향으로 이동하여 모재와 충돌 각도 β 를 이루며 충돌할 수 있도록 모델링하였다. 경계조건으로는 모재의 바닥 부분은 rigid wall 접촉에 의한 $-z$ 방향의 변형을 구속, 접합재와 모

재는 x 방향으로 무한히 긴 금속판으로 가정하여 x 방향의 변형을 구속하였다. 이때, 충돌 전 초기 상태는 접합재와 모재의 끝 부분이 0.1mm 만큼 떨어져 있으며, 속도 v 와 충돌 각도 β 는 해석상 입력변수에 해당된다. 고속 충돌 접합에서의 소성 변형과 고 변형률 속도를 고려하기 위해 접합재와 모재는 식 (3)과 같이 Johnson-Cook 구성 방정식을 사용하여 물성을 부여하였다.

$$\sigma = (A + B \varepsilon_{eff}^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}) \left(1 - \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right) \quad (3)$$

식 (3)의 A, B, n 은 소재의 변형률 경화 계수, C는 변형률 속도 민감도 계수, T_{room} 은 293K 마지막으로 $\dot{\varepsilon}$ 는 변형률 속도를 나타낸다. 또한, 본 연구에서는 충

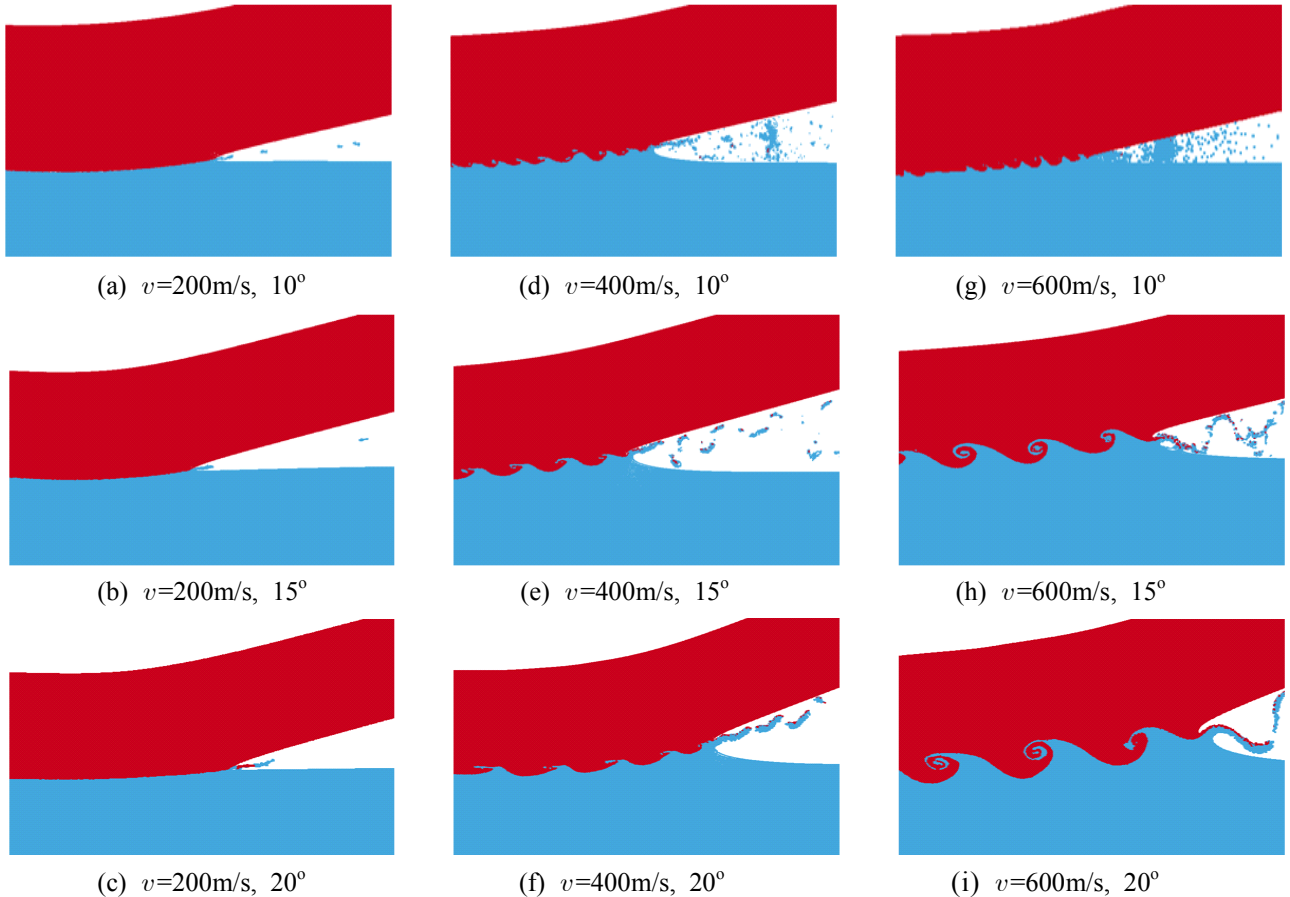


Fig. 4 Interfacial morphology between flyer and base plate. (a) ~ (c) is results from impact velocity $v=200\text{m/s}$ and impact angle $\beta=10^\circ$, 15° , 20° , (d) ~ (f) is results from impact velocity $v=400\text{m/s}$ and impact angle $\beta=10^\circ$, 15° , 20° , (g) ~ (i) is results from impact velocity $v=600\text{m/s}$ and impact angle $\beta=10^\circ$, 15° , 20° .

Table. 1 Material properties used in numerical simulation by SPH analysis[2, 11]

Materials	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson ratio	Shear modulus (GPa)	Thermal conductivity (w/mk)	Specific heat (J/kgK)
Cu	117	8960	0.33	44	390	385
CP-Ti	45	4510	0.37	45	16.4	523
Materials	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	T _{melt} (K)
Cu	90	292	0.31	0.025	1.09	1356
CP-Ti	359	668	0.49	0.0194	0.58	1938

돌하는 각 소재들의 열역학적인 반응에 대한 해석은 고려대상이 아니므로 별도의 열역학적 상태방정식 도입 없이 해석을 수행하였다. Table. 1에서 해석에 사용된 접합재 Cu와 모재 CP-Ti의 물성 및 Johnson-Cook 구성 방정식에 사용된 파라미터들을 확인할 수 있다.

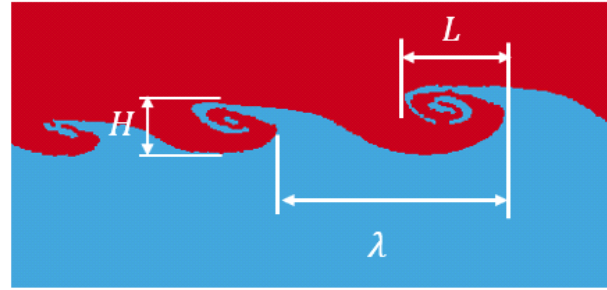
3.2 유한요소해석 결과

Fig. 4의 해석결과 (a), (b), (c) 모두 충돌 속도가 200m/s이고 충돌 각도가 각각 10°, 15°, 20°에서의 경계면 결합 형상이다. 3가지 해석 모두 금속 표면의 산화 피막층의 박리현상의 발생 확인이 가능하며, 경계면 결합 형상은 모두 직선이다.

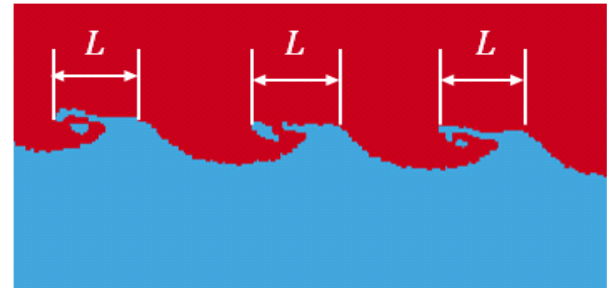
Fig. 4의 해석결과 (d), (e), (f) 모두 충돌 속도가 400m/s이고 충돌 각도가 각각 10°, 15°, 20°에서의 경계면 결합 형상이다. 200m/s의 결과와 달리 물결 모양의 끝 부분 일부가 길게 늘어난 소용돌이 유형의 경계면 결합 형상으로 나타나고 있다. 또한, 두 금속으로부터 나오는 산화 피막층의 박리현상이 각도가 커질수록 산개적인 흐름에서 연속적인 흐름이 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 4의 해석결과 (g), (h), (i) 모두 충돌 속도가 600m/s이고 충돌 각도가 각각 10°, 15°, 20°에서의 경계면 결합 형상이다. 400m/s에서의 결과에서 나타나는 경계면 결합 형상과 달리 동심원의 소용돌이 형상이 관측된다. 즉, 400m/s의 결과는 물결 형상의 끝 부분이 늘어나는 형상이지만, 600m/s의 결과에서는 형상이 회전하며, 충돌 각도가 증가할수록 소용돌이 회전의 정도가 증가함을 확인할 수 있다.

3.3 경계면 결합 형상 평가



(a)



(b)

Fig. 5 Measurements of interfacial morphology include wave-height(H), period(λ), and length(L).

Fig. 5에서 접합재(Cu)와 모재(CP-Ti)의 고속 충돌 접합에서 생성된 경계면 결합 형상의 측정 지표를 확인할 수 있다. 수치해석 결과로 얻은 형상적 접합의 정도를 비교 분석하기 위해 측정된 지표는 경계면 결합 형상의 주기(wave-period(λ)), 형상의 침투 높이(wave-height(H)), 형상의 결합 길이(wave-length(L))이다. 경계면 결합 형상 중 불연속적인 부분이 확인되지만, 생성된 형상의 분포는 접합이 이루어지면서 표면의 산화 피막층 박리현상이 접합재로 침투한 전체 길이로 볼 수 있다. 따라서 불연속적인 결합 길이 L 을 Fig. 5 (b)에서 표기한 대로 형상의 끝에서 뿌리 부분까지의 길이로 측정하였다.

측정한 각 경계면 결합 형상 파라미터들의 결과를 정리하면 Table. 2, 3, 4와 같다. 이때, 200m/s의 해석결과에서는 직선 형태의 경계면 결합 형상이 나타나므로 해당 조건에서는 파라미터들을 측정할 수 없다. Table. 2를 참고하여 경계면 결합 형상의 주기를 살펴보면 동일 속도에서 각도가 작을수록 주기가 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 동일 각도에서 속도가 다른 경우를 비교했을 때 600m/s의 20°에서는 접합이 진행될수록 소용돌이 경계면 결합 형상의 성장으로 인해 생성주기가 400m/s의 20° 해석 결과보다 증가함을

Table. 2 Results of wave-period(λ) from analysis except 200m/s cases.

Wave-period(λ)					
Velocity (m/s)	Angle (°)	Min. (mm)	Max. (mm)	AVG. (mm)	Std. Dev.
400	10	0.247	0.374	0.311	0.045
	15	0.382	0.575	0.480	0.056
	20	0.506	0.718	0.627	0.070
600	10	0.181	0.230	0.211	0.017
	15	0.245	0.629	0.428	0.137
	20	0.406	0.967	0.698	0.213

Table. 3 Results of wave-height(H) from analysis except 200m/s cases.

Wave-height(H)					
Velocity (m/s)	Angle (°)	Min. (mm)	Max. (mm)	AVG. (mm)	Std. Dev.
400	10	0.041	0.087	0.058	0.014
	15	0.048	0.089	0.066	0.013
	20	0.067	0.133	0.090	0.023
600	10	0.052	0.093	0.073	0.014
	15	0.045	0.243	0.140	0.070
	20	0.078	0.367	0.218	0.106

Table. 4 Results of wave-length(L) from analysis except 200m/s cases.

Wave-length(L)					
Velocity (m/s)	Angle (°)	Min. (mm)	Max. (mm)	AVG. (mm)	Std. Dev.
400	10	0.097	0.187	0.145	0.023
	15	0.171	0.277	0.249	0.027
	20	0.195	0.332	0.271	0.047
600	10	0.123	0.207	0.158	0.026
	15	0.169	0.439	0.306	0.086
	20	0.318	0.656	0.513	0.124

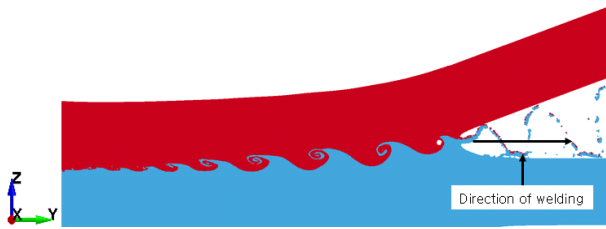
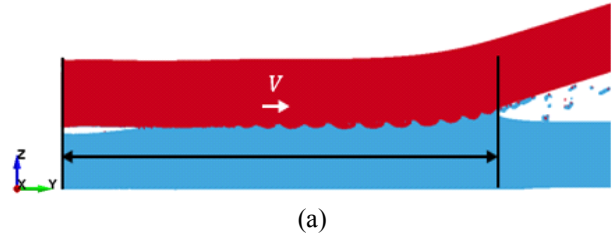
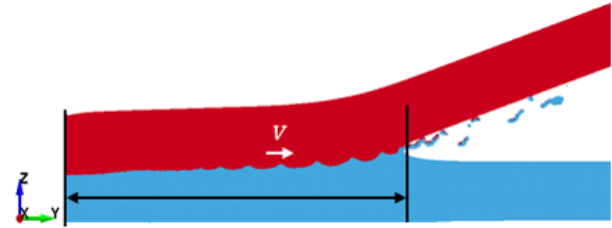


Fig. 6 Interfacial morphology increasing its size according to y direction results from impact velocity 600m/s and impact angle 20°

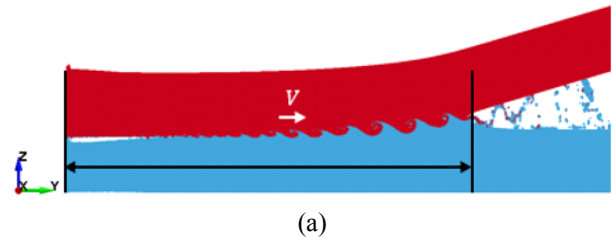


(a)

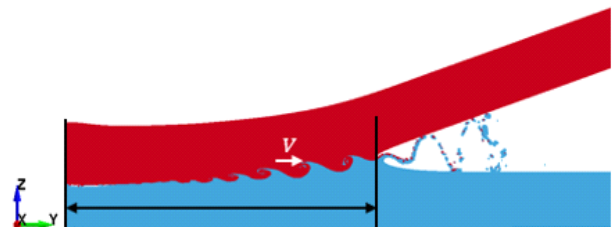


(b)

Fig. 7 At time 5 μ s, (a) is result from impact velocity 400m/s, avg. welding velocity V is 1.6km/s, and impact angle 15°. (b) is result from impact velocity 400m/s, avg. welding velocity V is 1.2km/s, and impact angle 20°.



(a)



(b)

Fig. 8 At time 3 μ s, (a) is result from impact velocity 600m/s, avg. welding velocity V is 2.5km/s, and impact angle 15°. (b) is result from impact velocity 600m/s, avg. welding velocity V is 1.9km/s, and impact angle 20°.

알 수 있고, 접합이 진행됨에 따라 경계면 결함 형상이 커지는 것을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 형상의 성장이 없다면 400m/s의 10°, 15°와 600m/s의 10°, 15° 해석 결과로부터 동일각도에서 속도가 빠를수록 주기는 짧아지는 것을 확인 할 수 있다. 생성 주기가

짧을수록 단위 길이 당 형상의 개수가 증가하고, 결합된 형상의 표면적이 더 증가하게 되므로 형상적으로 더 강한 결합을 나타낸다. 다음으로 Table. 3의 경계면 결합 형상의 침투 높이 결과를 살펴보면 속도 또는 각도가 증가할수록 더 큰 값을 가지는 경향이 있다. Fig. 4의 (d)~(f), (g)~(i)에서 속도가 같을 때, 각도가 증가할수록 박리현상이 산개적인 흐름에서 연속적인 흐름을 보이며, 연속 흐름은 산개 흐름보다 더 깊숙이 침투된다. Table. 4의 경계면 결합 형상의 결합 길이 역시 속도 또는 각도가 증가할수록 더 큰 값을 가진다.

충돌속도가 400m/s이고 충돌 각도가 각각 15°, 20°의 동일 시간 5 μ s에서의 결과를 보이는 Fig. 7과 충돌속도가 600m/s이고 충돌 각도가 각각 15°, 20°의 동일 시간 3 μ s에서의 결과를 보이는 Fig. 8을 참고하면, 각 속도별 동일 시간에서 접합재와 모재의 접합이 이루어진 정도를 확인할 수 있다. 이때, Fig. 7, 8의 속도 V 는 접합이 이루어지는 방향(+ y)으로 두 금속의 평균 접합속도(avg. welding velocity)를 의미한다. Fig. 7의 해석 모델 (a)의 경우 (b)보다 초기 충돌 각도가 작으므로 평균 접합속도 V 는 (a)에서 더 크다. 즉, (a)는 접합재와 모재가 충돌하는 동일 시간 동안 더 넓은 면적이 접합된다. 따라서 경계면 결합 형상을 생성시키는 원인인 산화 피막층 박리현상이 (a)의 경우 (b)보다 접합재 쪽으로 더 빨리 침투할 수 있게 되어 경계면 결합 형상의 생성주기가 단축된다. Fig. 7과 8을 비교해보았을 때 400m/s의 충돌 속도보다 600m/s에서의 충돌 속도로 접합이 진행될 때, 평균 접합속도 V 가 더 크기 때문에 경계면 결합 형상의 성장이 없다면 생성 주기가 짧아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에서 충돌 속도 600m/s의 10°, 15°, 20° 해석에서 산화 피막층 박리현상의 y , z 방향의 합속도를 확인할 수 있다. 충돌 속도가 600m/s로 동일하므로 접합재의 초기 운동에너지는 3가지 해석 모두 동일하다. Fig. 9에서 접합되는 부분(welding point)의 합속도를 살펴보면, 충돌 각도가 10°일 경우 약 3.6km/s로 가장 크고, 20°인 경우 약 1.8km/s로 가장 작으며 각도가 20°인 경우 박리현상의 운동에너지가 10°의 경우보다 약 4배 정도 작음을 알 수 있다. 즉, 600m/s의 충돌 속도에서 충돌 각도가 클수록 산화 피막층 박리현상은

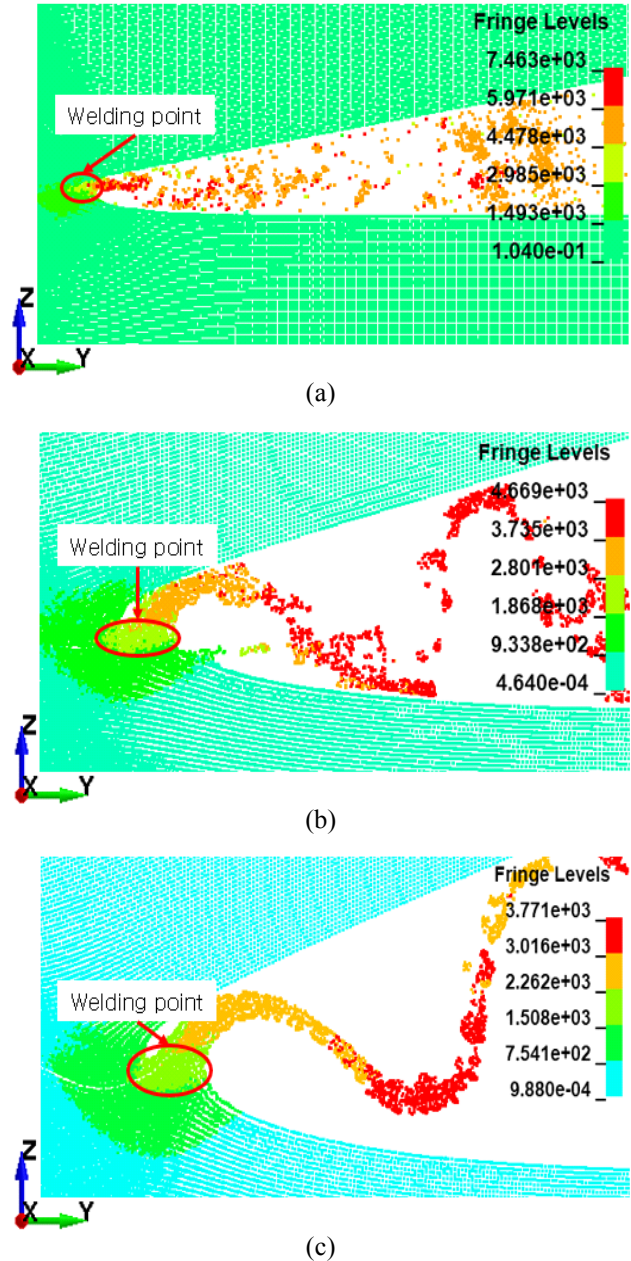


Fig. 9 Resultant velocity of jet phenomenon ((a) is 10°, (b) is 15°, (c) is 20°).

산개적 흐름에서 연속적 흐름으로 나타나며 속도 및 운동에너지는 작아진다. 이는 접합재로부터 산화 피막층 박리현상으로 운동에너지가 전달될 때 충돌 각도가 커질수록 연속적 흐름의 박리현상의 에너지가 경계면 결합 형상의 길이와 높이를 키우는 데 더 많이 사용되기 때문이다. 경계면 결합 형상을 만드는데 에너지가 많이 사용될수록 형상의 정도가 완고해지며, 접합강도가 높아질 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

Cu와 CP-Ti의 고속 충돌 접합을 SPH 해석기법을 통해 모사하였고, 매개변수(충돌 속도와 충돌 각도)에 따라 생성되는 경계면 결합 형상을 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 충돌 속도가 증가 할수록 형상은 직선에서 소용돌이 형태가 나타나며, 회전도의 정도가 강해진다.

(2) 충돌 속도와 각도가 증가 할수록 경계면 결합 형상의 침투 높이와 결합 길이는 증가한다.

(3) 충돌 각도가 작고 속도가 빠를수록 평균 접합속도(V)가 빨라져 박리현상이 접합재에 대한 침투가 빨라 형상의 주기는 단축된다.

(4) 동일 충돌 속도에서 각도가 클수록 산화 피막층 박리현상은 연속적인 흐름을 가지며, 접합재의 운동에너지를 산화 피막층 박리현상으로 전달되기보다 경계면 결합 형상의 정도를 완고하게 만드는데 더 많이 사용된다.

SPH 해석기법으로 얻은 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 매개변수별 경계면 접합 형상의 출현에 대한 실험적 검증이 필요하다. 또한, 접합재가 모재로 충돌 접합될 때 발생하는 산화 피막층 박리현상의 산개 및 연속적인 흐름의 출현에 대한 메커니즘 분석이 필요하다. 마지막으로 형상적 결합정도 평가 외 경계면 결합 형상, 침투 높이, 결합 길이, 생성주기에 따른 접합 강도 평가 및 강도를 높일 수 있는 조건 확인이 필요하다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음(This work was supported by a 2-year Research Grant of Pusan National University)

References

[1] S. J. Kim, S. W. Park and T. U. Kim “Study for Determining Design Allowable Values of Light

Weight Composite Unmanned Aircraft Structures,” *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 1-7, Aug. 2017

[2] D. W. Kim, G. Jeong, J. H. Lim, J. W. Lim, B. M. Yu and K. S. Lee, “A Lightweight Design of the Spar cap of Wind Turbine Blades with Carbon Fiber Composite and Ply Reduction Ratio,” *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 66-75, Apr. 2018

[3] H. J. Cho and J. S. Koo, “A Method to estimate the Weight-reduction of Hybrid Bodysells by Material Substitution,” *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 9, no. 6, pp. 635-643, Dec. 2006

[4] S. zhang and B. Kinsey, “Interfacial Morphology prediction of Impact Welding by Eulerian Method,” 8th International Conference on High Speed Forming, 2018

[5] P.V. Vaidyanathan, A.R. Ramanathan, “Design for quality explosive welding,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 32, no.1-2, pp. 439-448, Jul. 1992

[6] H.K. Balakrishna, V.C. Venkatesh, P.K. Philip, “Influence of Collision Parameters on the Morphology of Interface in Aluminum-Steel Explosion Welds. Shock Waves and High-strain-rate Phenomena in Metals,” *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*,

[7] G. R. COWAN, O. R. BERGMANN, and A. H. HOLTZMAN, “Mechanism of Bond Zone Wave Formation in Explosion-Clad Metals,” *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 2, no. 11, pp. 3145-3155, Nov. 1971

[8] Shribman V., “Magnetic pulse welding for dissimilar and similar materials,” *Proceedings of the 3rd International Conference on High Speed Forming*, pp. 13-22, 2008

[9] A. Ben-Artzy, A. Stern, N. Frage, V. Shribman, “Interface Phenomena in Aluminium-Magnesium Magnetic Pulse Welding,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 4, pp. 402-408,

Dec. 2013

- [10]Y. Zhang, S.S. Babu, P. Zhang, E.A. Kenik, G.S. Daehn, "Microstructure Characterisation of Magnetic Pulse Welded AA6061-T6 by Electron Backscattered Diffraction," Science and Technology of Welding and Joining, vol.13, no. 5, pp. 467-471, Dec. 2013
- [11]Ali Nassiri, Anupam Vivek, Tim Abke, Bert Liu, Taeseon Lee, and Glenn Daehn, "Depiction of interfacial morphology in impact welded Ti/Cu bimetallic systems using smoothed particle hydrodynamics," Applied Physics Letters, vol. 110, no. 23, Jun. 2017
- [12]Vignjevic, Rade, and James Campbell. "Review of development of the smooth particle hydrodynamics (SPH) method," Predictive modeling of dynamic processes, Boston, MA, 2009. 367-396.
- [13]Marc A. Meyers, Umberto R. Andrade and Atul H. Chokshi, "The effect of grain size on the high-strain, high-strain-rate behavior of copper," Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 26, no. 11, pp. 2881-2893, Nov. 1995