

레이저-GMA 하이브리드 용접에서 유동에 의한 기포 및 기공 형성 해석

조원익* · 조정호** · 조민현*** · 이종봉*** · 나석주*

*KAIST 기계공학과

**Industrial, Welding and System Engineering Department, Ohio State University

***POSCO 기술연구소

Numerical Simulation of Bubble and Pore Generations by Molten Metal Flow in Laser-GMA Hybrid Welding

Won-Ik Cho*, Jung-Ho Cho**, Min-Hyun Cho***, Jong-Bong Lee*** and Suck-Joo Na*

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

**Edison Joining Technology Center, Ohio State University, 1248 Arthur E Adams Drive,
Columbus, OH 43221, USA

***Joining research group, Technical research laboratories, POSCO, Pohang 790-785, Korea

*Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received September 4, 2008 : Revised October 14, 2008 ; Accepted October 15, 2008)

Abstract

Three-dimensional transient simulation of laser-GMA hybrid welding involving multiple physical phenomena is conducted neglecting the interaction effect of laser and arc heat sources. To reproduce the bubble and pore formations in welding process, a new bubble model is suggested and added to the established laser and arc welding models comprehending VOF, Gaussian laser and arc heat source, recoil pressure, arc pressure, electromagnetic force, surface tension, multiple reflection and Fresnel reflection models. Based on the models mentioned above, simulations of laser-GMA hybrid butt welding are carried out and besides the molten pool flow, top and back bead formations could be observed. In addition, the laser induced keyhole formation and bubble generation duo to keyhole collapse are investigated. The bubbles are ejected from the molten pool through its top and bottom regions. However, some of those are entrapped by solid-liquid interface and remained as pores. Those bubbles and pores are intensively generated when the absorption of laser power is largely reduced and consequently the full penetration changes to the partial penetration.

Key Words : Laser-GMA hybrid welding, Welding simulation, Bubble, Pore

1. 서 론

레이저-아크 하이브리드 용접은 레이저와 아크 열원의 장점을 동시에 가짐으로써 용접 공정의 효율을 높이며 용접부의 품질을 향상시키기 위한 방법으로 최근 각광을 받고 있다. 레이저 용접은 적은 열영향으로 깊은

용입을 얻을 수 있는 장점이 있지만, 용접부의 갭 이음성이 떨어지는 단점이 있다. 반면, 아크 용접은 용접부의 갭에 크게 영향을 받지 않는 장점이 있지만, 열영향부가 커서 모재의 잔류응력이 커지고, 용입이 깊지 못한 단점이 있다. 하이브리드 용접은 이 두가지 열원을 함께 사용하여 두 열원의 장점을 고루 취함으로써, 조선 산업 등의 후판 용접뿐만 아니라 자동차 산업의 박판 용접에

까지 다양한 분야로의 적용이 활발히 이루어지고 있는 기술이다.

이러한 레이저-아크 하이브리드 용접에 대한 연구는 실험적인 접근과 해석적인 접근으로 나눌 수 있으며 전자의 경우 JWRI의 x-ray 투과법을 이용한 실시간 키홀 모니터링 기법¹⁾이 가장 발전된 형태로 볼 수 있다. 하지만, 장비가 고가인 점과 해상도와 프레임 속도의 제한 등 단점이 있다. 이러한 실험적인 연구의 한계와 함께 과거 용접 공정이 공정의 생산성에 관점을 맞췄다면 현재는 품질의 관점으로 옮겨가고 있어 기공 등의 용접결함의 기구를 설명하는데 해석적 연구가 유리할 것으로 판단된다. 따라서 용접 현상에 대한 해석학적 접근을 시도하여 용접부 단면 비드 형상 예측과 함께 용접결함을 예측함으로써 실험이 갖고 있는 한계를 극복하고 궁극적으로 용접부 품질 향상을 이루고자 하는 노력이 필요하다. 이에 최근 힘평²⁾, 기공³⁾ 등 용접결함 형성에 대한 해석 결과가 발표 되고 있다. 하지만 기공 형성에 관해서는 아직 실제 용접현상과는 상이한 조건에서 얻은 결과에 그치고있어 이에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 실제 용접에서의 기공 현상에 근접한 해석학적 접근을 시도하였다. 이를 위해 기존의 레이저 용접과 아크 용접 해석 모델에 기포형성 모델을 추가하여 수치해석을 수행하였다. 참고로 본 연구에서 기포(bubble)는 기포를 둘러싸고 있는 용접부가 액상선 이상으로 용융풀의 거동에 의해 영향을 받는 부분으로 정의하였고 기공(pore)는 기공주위가 고상선 이하로 더 이상 움직이지 못하고 용접부에 갇혀 최종적으로 결함으로 남는 부분으로 정의하였다.

2. 해석 모델

기본적으로 GMA-레이저 하이브리드 용접에서의 용융풀 거동을 모사하기 위해 본 3차원 과도해석에서 사용한 지배 방정식은 다음과 같은 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 방정식, 상태 방정식과 자유 표면 추적에 위한 VOF 방정식⁴⁾이다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \nabla^2 \vec{V} + \vec{f}_b \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) h = \rho \nabla \cdot (K \nabla T) \quad (3)$$

where

$$h = C_p T + fL$$

$$f(T) = \begin{cases} 0, & \text{if } T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & \text{if } T_s < T < T_l \\ 1, & \text{if } T \geq T_l \end{cases}$$

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) F = 0 \quad (4)$$

자유 표면에서의 경계조건으로 아크 열원은 다음과 같은 가우시안 함수로 가정하여 표면에 입력하였으며 아크 플라즈마에 의해 발생하는 아크 압력 역시 가우시안 함수로 가정하여 자유표면에 작용하도록 하였다.

$$\eta_A q_A(x, y) = \eta_A \frac{VI}{2\pi r_A^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r_A^2}\right) \quad (5)$$

$$P_A(x, y) \cong \frac{\mu_0 I^2}{4\pi r_A^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r_A^2}\right) \quad (6)$$

다음으로 아크 전류 흐름에 따라서 용융풀에 작용하는 전자기력은 모제의 두께에 대한 평균값으로 계산하여 다음과 같은 체적력으로 모델링하였다.

$$F_x = -\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2 r_A^2 r} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_A^2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2r_A^2}\right)\right] \left(1 - \frac{z}{c}\right)^2 \frac{x}{r} \quad (7)$$

$$F_y = -\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2 r_A^2 r} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_A^2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2r_A^2}\right)\right] \left(1 - \frac{z}{c}\right)^2 \frac{y}{r} \quad (8)$$

$$F_z = \frac{\mu_m I^2}{4\pi^2 r^2 c} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2r_A^2}\right)\right]^2 \left(1 - \frac{z}{c}\right) \quad (9)$$

매우 높은 에너지 밀도를 가지는 레이저 열원 역시 가우시안 함수 형태의 표면 열원으로 가정했지만 레이저 빔의 발산각을 고려하여 다음과 같이 유효 반경이 위치에 따라 바뀌도록 하였다.

$$q_L(x, y, z) = \frac{3Q}{\pi r_L^2} \exp\left(-3\frac{x^2 + y^2}{r_L^2}\right) \quad (10)$$

$$r_L = r_0 + a|z_0 - z|$$

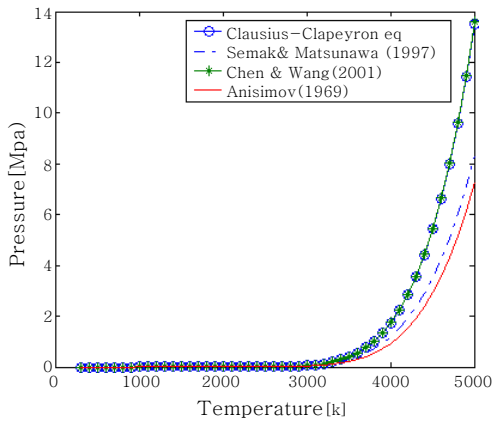


Fig. 1 Comparison of calculated recoil pressure values based on various suggested models

레이저 용접에서 좁고 깊은 단면 비드를 일컫는 키홀을 형성하는데 가장 큰 역할을 하는 것은 바로 반발 압력으로 알려진 모재의 증발 압력이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 증발 모델 중 실험 결과와 비교적 잘 일치하면서도 수식 형태가 비교적 간단한 다음과 같은 모델 (Anisimov(1969))을 이용하여 증발 압력을 표면 경계 조건으로 설정해 주었다⁵⁾.

$$P_r \cong 0.54P_{sat}(T) = 0.54P_0 \exp\left(L_v \frac{T - T_b}{RTT_b}\right) \quad (11)$$

다른 모델과의 비교를 위해 Fig. 1에 상온에서 5000K까지의 계산결과를 함께 나타냈다. 그 결과 실제 증발압력이 Clausius-Clapeyron 식으로부터 계산된 포화압력의 절반 정도라는 사실로부터 Anisimov에 의해 제안된 위식이 적합함을 판단할 수 있다.

마지막으로, 레이저 빔의 키홀에서의 다중 반사를 고려해 주기 위해 다중 반사 모델을 해석에 적용하였고 자유 표면에서의 레이저 빔의 흡수는 다음과 같은 Fresnel 반사 모델을 적용하여 모든 자유 표면이 존재하는 셀에서 빔의 입사각에 따라 변화하는 흡수율을 계산하였다^{6,7)}.

$$C_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + (1 - \epsilon \cos \theta)^2}{1 + (1 + \epsilon \cos \theta)^2} + \frac{\epsilon^2 - 2\epsilon \cos \theta + 2\cos^2 \theta}{\epsilon^2 + 2\epsilon \cos \theta + 2\cos^2 \theta} \right) \quad (12)$$

$$\epsilon^2 = \frac{2\epsilon_2}{\epsilon_1 + [\epsilon_1^2 + (\sigma_{st}/\omega\epsilon_0)^2]^{1/2}}$$

식 (12)에서 $\epsilon=0.2$ 로 가정했을 때 입사각에 대한 흡수율은 Fig. 2와 같이 계산되고 다중 반사를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우 6kW 레이저에 대한 키홀

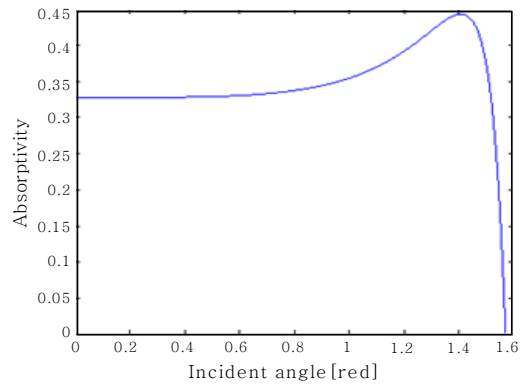


Fig. 2 Absorptivity calculated by Fresnel reflection model as a function of the incident angle ($\epsilon=0.2$)

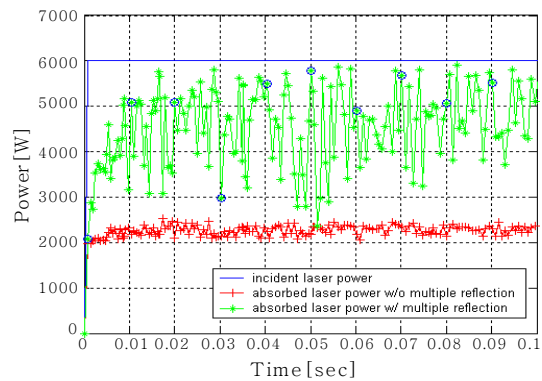


Fig. 3 Comparison of absorbed laser powers with multiple reflection model and without multiple reflection model (laser power= 6kW)

에 흡수된 레이저 파워는 Fig. 3과 같았다. 여기서, 0.00, 0.03, 0.06, 0.09 초에서의 키홀의 형상(Fig. 4)을 비교해 본 결과 키홀이 깊어질수록 다중 반사가 더 많이 일어나 더 많은 레이저 에너지가 흡수됨을 유추할 수 있었다.

다음으로 기존에 사용했던 모델의 경우 기포가 일정 압력을 유지하고 있어 기포가 발생했다더라도 곧바로 사라지는 비 물리적 현상이 발생하였다. 이에 대한 해결책으로써 본 연구에서는 단일 기포 모델을 제안하였다. 이 모델은 기포 내부를 이상기체로 가정하였고 기포와 유체간의 열전달을 무시하였다. 그리고 마지막으로 매 계산 시간마다 기포 내부의 압력과 온도는 일정하게 유지된다고 가정하였다. 이러한 가정에 의해 아래의 에너지 보존의 법칙과 이상기체의 상태 방정식을 이용하여 부피감소에 따라 압력이 증가하여 기포가 유지될 수 있는 식 (15)와 같은 모델을 계산하였다.

$$\delta q = du + Pd\nu = 0 \quad (13)$$

$$P\nu = RT \quad (14)$$

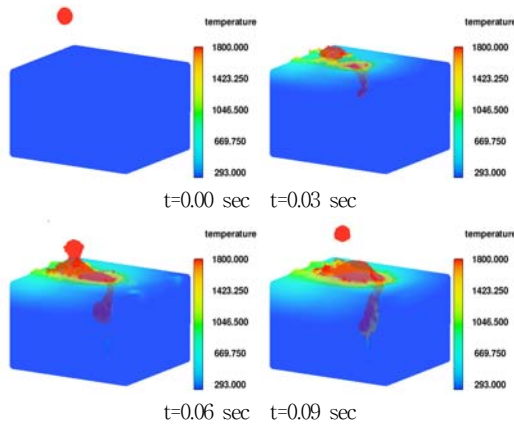


Fig. 4 Keyhole shape at t=0.00, 0.03, 0.06 and 0.09 sec (laser power=6kW)

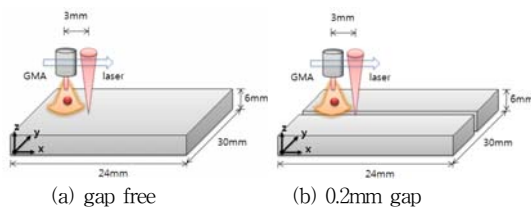


Fig. 5 Schematic diagram of laser-GMA hybrid butt joint welding simulation

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2} \right)^k \tag{15}$$

해석 모델은 Fig. 5와 같이 길이 24mm에 너비는 30mm 높이는 6mm로 설정했으며 BOP(Bead-On-Plate) 용접부와 중앙에 0.2mm의 갭이 존재하는 맞대기 용접부를 고려하였다. 그리고 레이저와 아크의 상대 거리는 3mm로 주었고 재료의 물성치는 일반적인 연강으로 가정하였다. 사용된 레이저의 파워는 6kW이고 아크의 전압과 전류는 각각 20V와 240A이며 용접속도는 1m/min인 레이저 선형 용접 공정을 시뮬레이션 하였다.

3. 결과 고찰

기존 하이브리드 용접의 용융풀 해석 알고리즘에 기공 모델을 추가했을 때 생기는 가장 큰 문제점은 키홀 뿐만 아니라 기포에도 레이저의 광이 흡수되는 비물리적 현상이 발생한 것이다. 이와 같은 문제는 기존 알고리즘에서는 단순히 레이저의 벡터와 레이저가 도달하는 자유표면의 법선벡터의 관계로부터 레이저 흡수 여부를 결정했기 때문에 발생하였다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 Fig. 6에서와 같이 실시간으로 키홀 형상을 추출하여 기포에 레이저가 도달하지 못하도록 수정하였다.

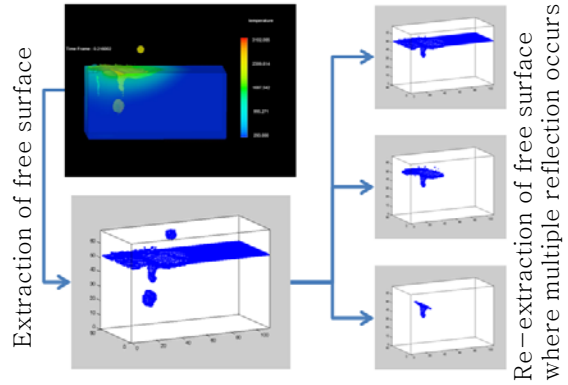


Fig. 6 Procedure of extraction of free surface on which multiple reflection occurs

이를 통해 물리적으로 합당한 해석을 수행할 수 있었으며 그 결과를 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 10에 나열하였다. 먼저 Fig. 7의 갭이 존재하지 않은 경우의 결과를 살펴보면 부분 용입이 일어나는 동안에는 불안정한 키홀의 끝에서 기포가 생성되고 부력과 유동에 의해서 상부 비드 쪽으로 이동하다 서로 결합해 비교적 큰 기포를 생성한 후 상부 비드쪽으로 빠져나갔다. 반면에 완전 용입이 일어난 후에는 기포가 상부 비드 보다는 가까운 하부 비드 쪽으로 빠져나갔고 이는 부력에 비해 키홀에 의해 발생된 유동이 큰 역할을 한 것으로 판단된다. 다음으로 Fig. 7의 0.2mm 갭이 존재하는 경우의 결과를 살펴보면 부분 용입이 일어나는 동안에서의 기포 생성과 유동은 앞의 갭이 없는 경우와 유사했다. 하지만 완전 용입이 일어난 후에도 기포가 하부 비드 쪽으로 빠져 나가지 못하고 부력에 의해 용융풀 상부로 이동해 기공을 형성하는 점에서는 갭이 없는 경우와 분명한 차이를 보였다. 이와 같은 현상은 Fig.8의 길이방향 단면 결과에서 자세히 살펴볼 수 있으며 한가지 이유로 갭이 존재하는 경우에 키홀로부터 발생한 기포의 크기가 갭이 없는 경우보다 크기 때문에 유동에 비해 부력의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 그리고 갭을 통한 비주기적인 레이저 파워의 손실과 급격한 유동으로 인한 안정적인 키홀 형성의 방해 또한 기포와 기공 형성의 원인으로 생각된다. 이러한 기공의 발생의 조건은 다음과 같이 정리할 수 있겠다.

1. 불안정한 키홀 또는 부분용입으로 인한 과도한 기포 형성
2. 용융풀 내부에 기포가 갇힐 수 있는 고상경계면의 존재

따라서, 위의 조건을 만족하는 갭이 있는 용접부에서 상대적으로 많은 기공이 발생하는 것으로 판단되며 이

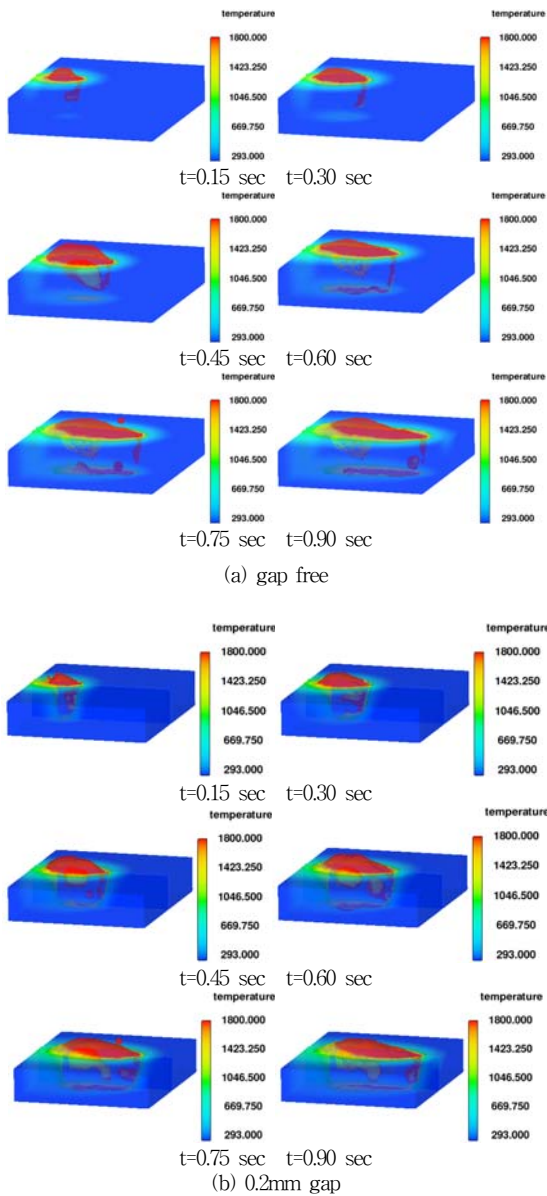


Fig. 7 Sequential snapshots of transparent scenes of hybrid welding

를 증명하기 위해 Table 1과 같이 해석과 동일한 조건에서 하이브리드 용접 시험을 수행하였으며 시험에는 CW CO₂ 레이저와 DCEP 전원특성의 MIG 용접기를 사용하였다. 시험의 재현성을 위해 동일한 조건에서 2회 반복 시험을 수행했으며 시험 후 방사선 투과 시험(Fig. 9)을 통해 갭이 존재하는 경우인 A1과 A1-1(반복시험)이 B1과 B1-1(반복시험)에 비해 기공현상이 두드러짐을 확인할 수 있었으며 이는 위 해석결과와 같은 맥락으로 설명할 수 있겠다. 마지막으로 Fig. 10에 용접부 중심에서의 단면의 형상을 도시했으며 갭이 존재하는 경우 고상경계면상의 기공을 관찰할 수 있다.

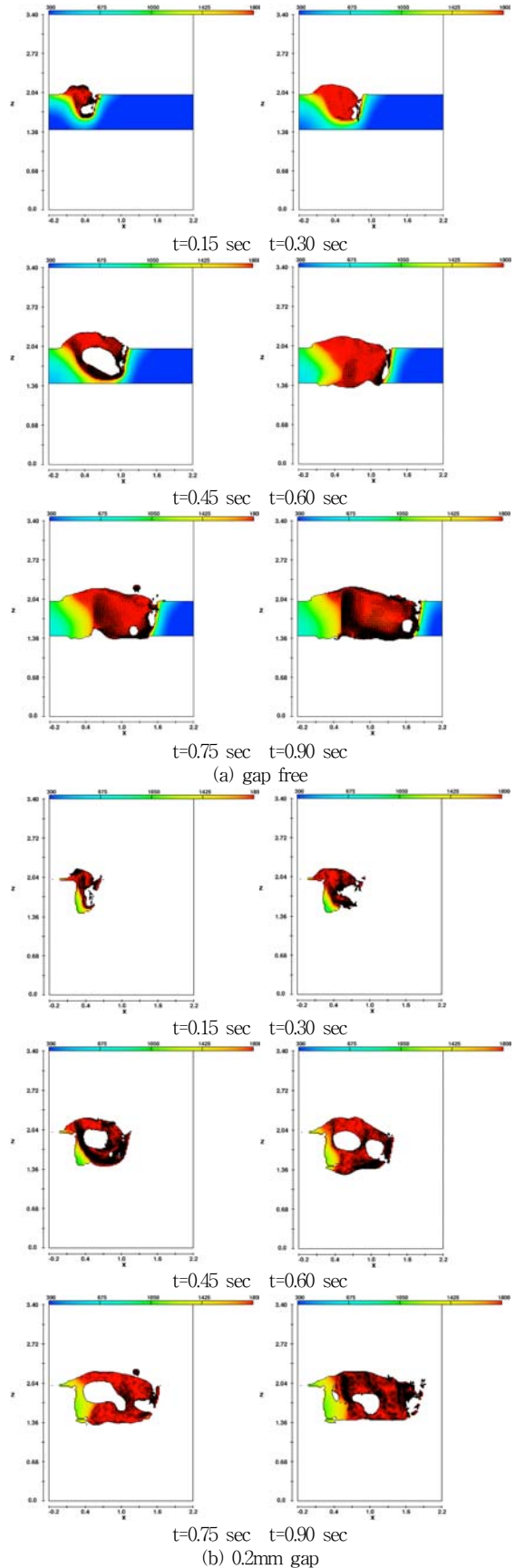


Fig. 8 Sequential snapshots of cross-sectional side view of hybrid welding



Fig. 9 RT test results

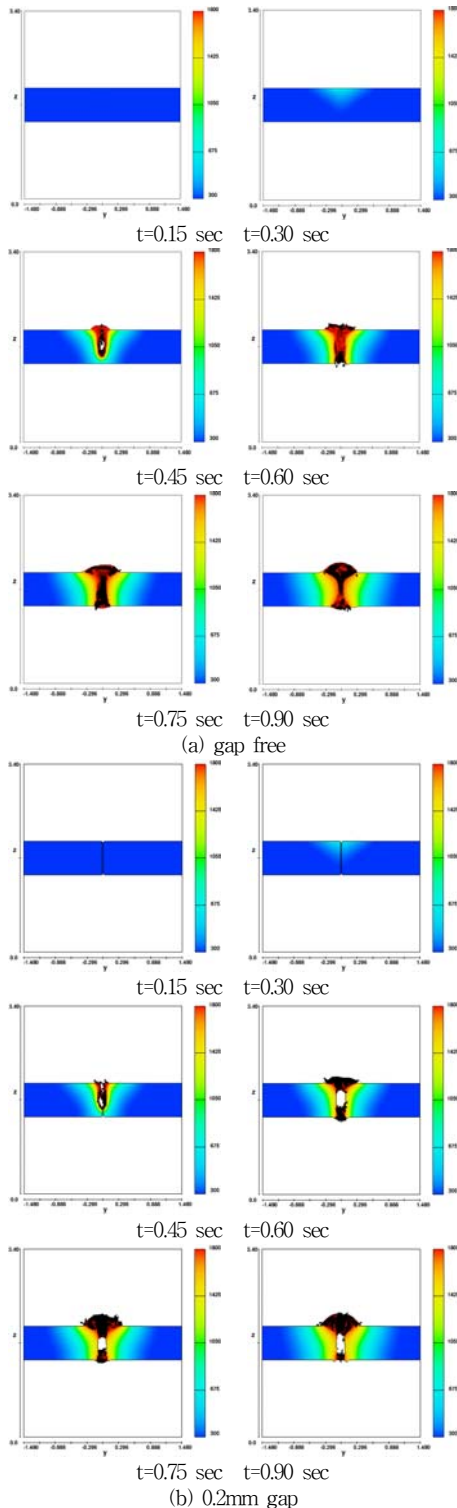


Fig. 10 Sequential snapshots of cross-sectional front view of hybrid welding

Table 1 Hybrid welding conditions

No	Leading Process	Laser Power (kW)	Arc			Welding Speed (m/min)	Gap (mm)
			Feed rate (m/min)	A	V		
A1	Laser	6	7.5	240	20	1	0.2
A1-1	Laser	6	7.5	240	20	1	0.2
B1	Laser	6	7.5	240	20	1	0
B1-1	Laser	6	7.5	240	20	1	0

위에서 열거한 해석 결과는 실험을 통해서도 실시간으로 관찰하기에 난해한 과제를 해석으로 가시화하는 의미 있는 시도로 생각된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 하이브리드 용접의 용융풀 해석 모델 제시하여 다 물리 현상을 가지는 용접 공정을 전산유체역학을 통해 이해할 수 있는 기반을 마련하였고 본 연구에서는 고체의 모재가 액체로 용융되는 상변화 및 이에 따른 용융 금속의 자유 표면까지 해석 가능한 모델을 제시하였다. 이를 위해 용접 공정에서 고려해야 할 물리적 특성 즉, 반발 압력, 아크 압력, 전자기력, 표면 장력 및 다중 반사화 Fresnel 흡수 모델 등을 해석에서 고려하였다.

2) 기공 현상 등 관찰이 어려운 용융풀의 거동 이해할 수 있는 계기가 마련되었다. 실제로 엑스레이를 이용한 용접 공정의 실시간 관찰이 가능하지만, 이는 지극히 2차원적인 문제로 키홀에 국한되는 용융풀의 빈 공간만을 볼 수 있어 제한적인 정보만을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 비용적으로나 시간적으로 불리한 점이 많다. 본 연구에서는 이런 문제를 넘어서서, 용융풀의 거동을 유동 벡터와 함께 자유 표면의 변형을 보여줌으로써 용융풀 거동과 기공 등 용접결함이 발생하는 기구를 실시간으로 관찰 가능하여 앞으로 공정변수별 영향을 분석할 수 있고 이를 통해 기공 형성을 피할 수 있는 최적 조건을 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 BK21 및 POSCO 기술연구소의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. N. Seto, S. Katayama, and A. Matsunawa : High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behavior

- during high power CO₂ laser welding: Effect of shielding gas on porosity formation, J. Laser Appl., 12-6 (2000), 245-250
2. M. H. Cho and D. F. Farson : Simulation Study of a Hybrid Process for the Prevention of Weld Bead Hump Formation, Welding Journal, 86-9 (2007), 253-262
 3. A. F. H. Kaplan, M. Mizutani, Seiji Katayama and A. Matsunawa : Unbounded kehole collapse and bubble formation during pulsed laser interaction with liquid zinc, J. Phys. D: Appl. Phys., 35 (2002), 1218-1228
 4. C. W. Hirt and B. D. Nichols : Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys. 39 (1981), 201-25
 5. M. Allmen and A. Blatter : Laser-Beam Interactions with Materials(2nd Edition), Springer, 1995
 6. J. H. Cho : An analysis of three-dimensional molten pool in laser-GMA hybrid welding, KAIST Doctoral Thesis (2007) (in Korean)
 7. J. H. Cho and S. J. Na : Implementation of real-time multiple reflection and Fesnel absorption of laser beam in keyhole, J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006), 5372-5378

부 록

Nomenclature

c	모재 두께	T_b	기화점
C_p	비열	T_i	액상점
f_b	체적력	T_s	고상점
I	아크 전류	u	내부 에너지
k	비열비	V	아크 전압
K	열전도도	\vec{V}	속도 벡터
L_v	증발잠열	x, y, z	좌표
P	압력	ϵ_0	진공 유전율
P_0	대기압	ϵ_1	금속 유전체 상수 실수부
P_r	반발 압력	ϵ_2	플라즈마 유전체 상수 실수부
P_{sat}	포화 압력	η_A	아크 효율
R	특정기체상수	μ	점도
\bar{R}	일반기체상수	μ_0	진공 투자율
r	반경	μ_m	금속 투자율
r_0	레이저초점반경	ρ	밀도
r_A	아크유효반경		금속의 단위 길이당 전
r_L	레이저 유효 반경	σ_{st}	기전도도
T	온도	v	비체적
		ω	레이저 각 주파수