

## 레이저/아크 하이브리드용접기술의 최신 동향

김영식<sup>\*†</sup> · 길상철<sup>\*\*</sup><sup>\*</sup>한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램<sup>\*\*</sup>한국과학기술정보연구원

## Recent Technological Tendency of Laser/Arc Hybrid Welding

Youngsik Kim<sup>\*</sup> and Sangcheol Kil<sup>\*\*</sup><sup>\*</sup>KISTI ReSEAT Program,<sup>\*\*</sup>KISTI<sup>†</sup>Corresponding author : yskim@hhu.ac.kr

## Abstract

The laser/arc hybrid welding process is a new process combining the laser beam and the arc as welding heat source. The laser beam and arc influence and assist one another. By application of hybrid welding, synergistic effects are achievable, and disadvantage of the respective processes can be compensated. The laser-arc hybrid welding process has good potential to extend the field of applications of laser technology, and provide significant improvements in weld quality and process efficiency in manufacturing applications.

This review analyses the recent advances in the fundamental understanding of hybrid welding processes using the works of the data base of Web of Science (SCI-Expanded) since the 2000 year. The research activity on the hybrid welding has been become more actively since 2006, especially in China, presenting the most research papers in the world.

Since the hybrid welding process was adopted in manufacturing of the automobile in Europe in the early of 2000's, its adopting is widely expanded in the field of manufacturing of automobile, ship building, steel construction and the other various industry. The hybrid welding process is expected to advance toward higher productivity, higher precision, higher reliability through the mixing of high power and flexible fiber laser or disk laser and digitalized pulsed arc source.

Key Words : Technological tendency, Laser/arc hybrid welding, Weld quality, Process efficiency,

## 1. 서론

레이저/아크 하이브리드 용접은 CO<sub>2</sub> 레이저, YAG 레이저, 반도체 레이저, 파이버 레이저 등의 레이저와 TIG, MIG, MAG, 플라즈마 등의 아크열원을 복합함으로써 각기 단독의 열원에 의한 용접의 결점을 보완하여 고효율, 고품질의 용접법으로 발전시킨 용접법이다. 따라서 레이저/아크 하이브리드 용접은 레이저 단독 용접이나 아크 단독용접에 비해 고능력, 고신뢰성, 저비용의 용접으로 밝혀져 자동차, 조선, 항공, 철도차량, 가전 산업 등 제조업에서의 응용이 세계적으로 활발히 전개되고 있다.

본 해설논문에서는 이상과 같은 레이저/아크 하이브리드용접 기술에 대하여 그 특징, 응용특성에 미치는 각종 영향요인, 철강재료와 Al 합금 등 비철재료에 대한 용접기술 연구의 진척상황, 자동차, 조선 등 산업별로 하이브리드 용접기술의 실용화 현황 등에 관한 세계적인 연구 개발 동향을 분석하여 국내의 하이브리드 용접기술 정착과 실용화 연구개발에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 레이저/아크하이브리드 용접의 특징

Fig. 1은 재래의 GMA용접과 레이저 단독용접, 레이

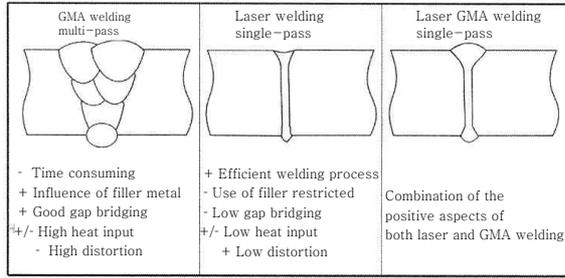


Fig. 1 GMA, 레이저, 레이저/GMA 하이브리드 용접의 용입 비교

저-GMA 하이브리드용접의 용입현상을 비교한 것으로 용접 갭(gap)의 여유도, 생산성, 용접변형의 면에서 앞의 두 가지 용접에 비해 하이브리드 용접은 탁월한 장점을 갖는다<sup>1)</sup>.

이러한 레이저/아크 하이브리드용접은 대형의 전용설비를 필요로 하지 않고 재래의 조선공작의 연장선상에서 적용이 가능하여 현재 조선현장에서 적용되기 시작하고 있다 실제로 조선용 패널제작에 하이브리드 용접 (Hybrid Laser/Arc Welding : HLAW)과 서브머지드 아크 용접(Submerged Arc Welding : SAW)용접을 적용한 결과 두 용접공정의 생산성, 입열량, 변형량 및 용접재료의 사용량을 비교한 결과가 발표되어 있다<sup>2)</sup> 이 결과에 의하면 하이브리드용접은 서브머지드 아크 용접과 비교하여 생산성은 4배가 높고, 입열량은 1/4, 용접변형량은 1/3.9, 용접재료 사용량은 1/6.2 로 줄어드는 것으로 나타난다. 하이브리드 용접은 서브머지드 아크용접에 비하여 동일 두께의 강판에 대하여 단위길이 용접하는데 드는 비용을 산출하면 용접시간 단축과 소모성재료 (용접봉, 플럭스)의 절감효과로 전체적으로 1/2.5의 절감 효과를 가져 오는 것으로 보고되어 있다<sup>2)</sup>.

레이저/TIG 하이브리드용접은 박판의 알루미늄합금에서 레이저용접의 2배 이상의 고속화 및 스테인리스강의 용입깊이 증대화가 가능하며 두께가 다른 강판의 테일러드 블랭크 용접에 유효함이 보고되어 있다.

용접부의 기계적 특성으로써, 알루미늄합금에 레이저/MIG 하이브리드 용접을 적용하였을 때 용접부에서의 열영향부의 폭은 MIG 단독용접에 비해 더 좁게 되고, 인장강도는 더 향상된다.

레이저/MIG 또는 MAG 하이브리드용접은 후판의 고효율 접합에 유망한 것으로 기대되고 있으며 하이브리드용접으로서는 파이버 전송형의 레이저와 MIG 또는 MAG와의 조합이 가장 주목되고 있다.

### 3. 레이저/아크 하이브리드 용접성에 미치는 각종 요인

#### 3.1 레이저/아크 열원배치의 영향

Y. Naito 등은 YAG 레이저/TIG 아크하이브리드 용접 장치를 이용하여 오스테나이트계 스테인리스 강 STS 304에 대해서 실험한 결과 그 단면형상이 Fig. 2 와 같이 나타나는 결과를 얻었다<sup>3)</sup>.

이 결과에 의하면, TIG-YAG(TIG 선행)의 경우 용입은 레이저 단독 용접보다 언제나 깊고 열원간 거리 d=5mm 정도 떨어진 위치에서 가장 깊게 나타나 있다.

이처럼 아크 열원이 선행인 경우에 용입깊이가 더 깊은 이유는 아크열에 의해 용융되어 있는 지점에 레이저를 조사하기 때문에 레이저의 에너지가 더 유효하게(알루미늄합금의 경우에는 더 현저히) 투입되어 키홀형성이 보다 쉽게 되기 때문인 것으로 해석 된다. 또한 최대 용입깊이를 얻기 위해서는 열원의 배치 순서에 따라 적절한 열원간 거리가 존재함을 보이고 있다.

레이저/아크 하이브리드용접 시 아크 선행의 경우와 레이저 선행의 경우에 각각의 특징을 정리하면 Fig. 3 과 같이 나타 낼 수 있다<sup>4)</sup>. 즉 아크 선행에서 아크 예열효과로 인해 깊은 용입과 고속용접이 가능하고, 레이저 선행에서는 용입부의 아크에 의한 후열 효과로 기포가 탈출할 수 있는 시간이 길어짐에 따라 기포가 작은 용입부를 얻을 수 있다.

Type304(5mm); P <sub>1</sub> =1.7kW, I <sub>a</sub> =100A, v=10mm/s, f <sub>a</sub> =0mm, h=2mm, α=55°, Ar(5.0×10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> /s)			
Distance d(mm)	TIG-YAG	YAG-TIG	YAG
1			
3			
5			
7			
12			

Fig. 2 STS 304스테인리스강의 YAG/TIG 하이브리드 용접 시 두열원간의 거리에 따른 용입 단면형상<sup>3)</sup>

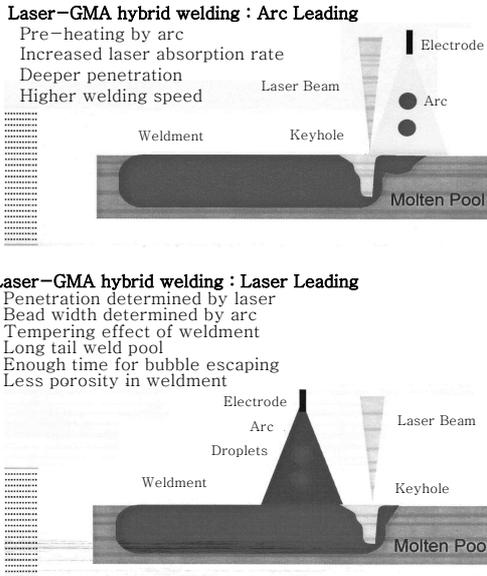


Fig. 3 아크 선행과 레이저 선행의 경우에 특징의 차이

3.2 보호가스의 영향

레이저/아크 하이브리드용접에서는 보호가스의 공급 방법이나 보호가스 성분에 따라 용입깊이나 용융부의 형상이 변화한다. Fig. 4는 YAG 레이저와 TIG 아크를 하이브리드 하여 용접할 경우, 레이저와 동축으로 공급하는 보호가스의 성분을 변화시켰을 때 용입부 단면의 형상을 나타 낸 것이다<sup>5)</sup>.

이 결과에 의하면 아크전류와 보호가스 성분의 산소

Type304(5mm<sup>1</sup>); P<sub>1</sub>=3.3kW, v=10mm/s, f<sub>a</sub>=0mm, h=2mm, d=5mm α=55°deg

Atmosphere	100% Ar	5% O <sub>2</sub> +95% Ar	10% O <sub>2</sub> +90% Ar	in air
0				
100				
200				

Fig. 4 레이저빔과 동축으로 공급되는 보호가스 성분이 용입 단면에 미치는 영향<sup>5)</sup>

함량이 용입단면의 형상에 크게 영향을 미쳐 아크전류 100A의 하이브리드용접에서는 분위기중의 산소의 비율이 증가함에 따라 상부의 용융폭이 점차 감소하고 용입깊이가 증가하는 데 비해 아크전류가 200A의 하이브리드 용접에서는 산소의 비율을 증가해도 용입깊이는 증가하지 않고 용융부 상부의 폭이 크게 증가한 결과를 보이고 있다.

이처럼 분위기 중의 산소가스 량의 증가와 더불어 용융 깊이와 폭이 변화하는 현상은 용융부의 산소증대와 더불어 레이저 에너지의 흡수율이 증가하고 용해 산소가 용융금속의 표면장력, 대류에 영향을 미치기 때문인 것으로 해석된다.

3.3 레이저출력 및 아크전류의 영향

Fig. 5는 STS 304 스테인리스강에 대해 YAG 레이저 단독 용접, TIG/YAG 레이저 하이브리드 용접, TIG 단독 용접 시에 용입 특성에 미치는 레이저 출력 및 아크전류의 영향을 조사하여 그 결과를 보인 것이다<sup>6)</sup>.

Fig. 5의 결과에 의하면 YAG 단독용접, TIG/YAG 용접, 양쪽 다 레이저 출력의 증가에 따라 용입은 깊게 된다. 한편, 아크전류의 증가에 따른 용입깊이의 변화에 의하면 아크전류가 증가해도 용입깊이는 증가하지 않고 용융단면만 증가하여 아크전류의 증가는 용입깊이에 기여하지 않음이 확인되었다.

알루미늄 합금의 하이브리드 용접에서 아크전류는 기공(Porosity) 형성에 크게 영향을 미친다<sup>7)</sup>. 하이브리드 용접에서는 MIG전류가 낮은 경우 포로시티가 많이 발생하고 전류가 충분히 높은 경우에 포로시티가 방지될 수 있다<sup>8)</sup>.

Type304(10mm<sup>1</sup>); (TIG-YAG I<sub>a</sub>=100A), v=10mm/s, f<sub>a</sub>=0mm, h=2mm, d=5mm, α=55°, Ar(5.0×10<sup>-4</sup>m<sup>3</sup>/s)

Laser power P <sub>1</sub> [kW]	YAG	TIG-YAG
1.7		
2.6		
3.3		

Type304(10mm<sup>1</sup>); P<sub>1</sub>=3.3kW, v=10mm/s, f<sub>a</sub>=0mm, h=2mm, d=5mm, (TIG: α=30°, TIG-YAG: α=55°), Ar(5.0×10<sup>-4</sup>m<sup>3</sup>/s)

Arc current I <sub>a</sub> [A]	TIG	TIG-YAG
0		
100		
200		

Fig. 5 용입형상에 미치는 레이저 출력과 아크전류의 영향 비교

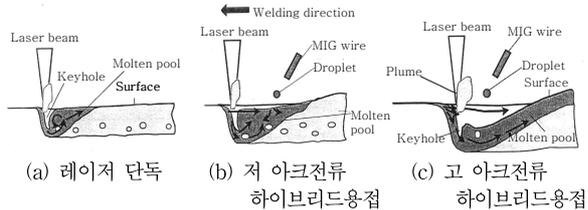


Fig. 6 레이저 용접시와 YAG/MIG 하이브리드 용접시의 기공 생성과 탈출저압 기구

기공의 생성 기구는 Fig. 6 같이 주로 레이저에 의한 키홀(Key hole) 저부 선단부에서 기포가 발생하여 그것이 메탈 플로우(Metal flow)를 따라 이동하는 동안 저부나 주변부부터 응고하고 있는 고액계면에 갇히게 되어 기공으로 된다. 그러나 200A 의 고 전류역에서는 표면이 넓게 용융되어 키홀 입구가 약간 크게 되고 키홀의 형상이 안정화하여 기포가 쉽게 빠져나갈 수 있게 되어 기포발생이 억제된다.

### 3.4 플라즈마, 플룸

레이저/아크 하이브리드 용접 시 입사되는 레이저 광과 아크 용융금속과의 상호작용에 의해 레이저 유기 플라즈마가 생성된다. 이 플라즈마를 플룸(Plume)이라고도 하며 이 플라즈마, 플룸은 레이저 광을 흡수하거나 산란시켜 에너지 효율을 떨어뜨리는 결과를 가져 온다. 레이저/아크 하이브리드 용접시 레이저와 공작물사이의 결합계수를 높여 에너지 흡수율을 높이기 위해서는 실드가스의 유량 속도를 변화시켜 이러한 레이저 유기 플라즈마 플룸을 조정할 필요가 있다.

## 4. 레이저/아크하이브리드 용접에 관한 최근의 연구동향

### 4.1 학술정보분석 결과

학술정보 분석은 Web of Science (SCI-EXPANDED)를 이용하여 검색식 Topic=(Laser\* and arc\*) 과 Topic=(hybrid\*) AND Topic=(weld\* or join\*)으로 2001년 이후 발표된 레이저/아크 하이브리드 용접 관련 학술정보를 분석한 결과 160건의 논문이 추출되었다. 그 중에서 관련이 먼 논문을 제외하고 레이저/아크하이브리드 용접관련 논문으로 145건을 추출하였다. Fig. 7은 이들 논문의 연도별 발표건수를 나타낸 것이다.

이 결과에 의하면 레이저/아크 하이브리드 용접에 관한 논문은 2002년에 최초로 발표가 시작되어 2006년부터 관심이 증대하고 2009년에 이르러 급증하고 있는 경향을 보이고 있어 최근에 이 용접에 관한 관심이 고

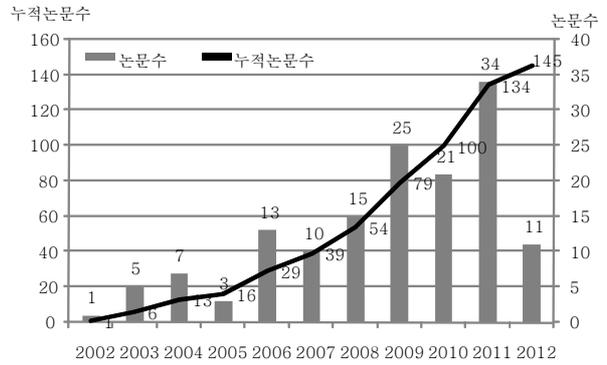


Fig. 7 연도별 발표건수와 누적 논문수

조되고 있음을 알 수 있다.

이를 국가별로 분석하면 Fig. 8과 같이 나타난다. 중국이 62건으로 전체의 43%를 차지하고, 다음으로 미국이 16건으로 11%, 우리나라 논문이 14건, 10%, 핀란드, 일본 순으로 발표건수가 이어지고 있어, 신흥공업국가로 발전하고 있는 중국의 최신 용접기술에 관한 관심을 엿볼 수 있다. 여기서 일본의 논문 발표건수가 5위로 나타나 있으나 이 결과는 Web of Science의 SCI-Expanded를 인용한 것으로 일본 국내에서의 용접학회지, 경금속 용접학회지 기타 재료관련 학회에서 발표된 논문을 감안하면 중국 다음으로 많은 논문이 일본에서 발표되고 있을 것으로 추정된다.

발표된 논문들을 분야별로 정리하면 Fig. 9와 같이 나타난다. 이에 의하면, 철강소재의 레이저/아크 하이브리드 용접에 관한 논문이 전체의 40%를 차지하고 있고, 그 다음이 용융금속의 유동해석을 포함한 용접현상의 모델링과 시뮬레이션 해석이 23%, 마그네슘합금의 용접에 관한 내용이 16%, 알루미늄합금에 관한 내용이 7%, 용접 현상의 모니터링에 관한 내용이 4%, 이종재료 접합이 3%, 티탄합금에 관한 내용이 2%를 차지하고 있다.

이 결과에서 소재별 연구건수에서 철강소재 다음으로

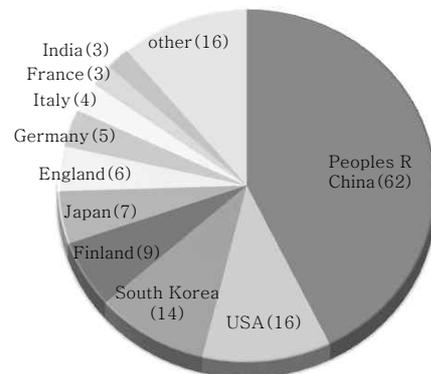


Fig. 8 각 국가별 논문 발표건수

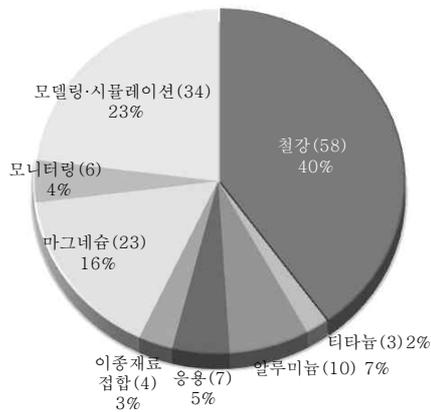


Fig. 9 분야별 논문 발표건수

마그네슘합금에 관한 내용이 많은 비중을 차지하고 있는 것은 경량 신소재로서 마그네슘 합금에 관한 관심이 크다는 것을 엿 볼 수 있다. 또한 레이저/아크 하이브리드용접에 의한 철강소재와 알루미늄, 또는 마그네슘과 같은 경량소재와 이종재료 접합연구도 시도되고 있는 것을 알 수 있다.

## 4.2 분야별 연구동향

### 4.2.1 철강소재분야

철강소재의 레이저/아크 하이브리드 용접 연구는 Web of Science의 SCI-E 데이터 베이스에 의하면 과거 10년간 58건의 논문이 발표되어 레이저/아크 하이브리드 용접에 관한 전체 연구건 수의 40%를 차지하고 있다. 국가별로는 중국 국적의 발표건수가 19건이 검색되어 전체의 32%를 차지하고 있다.

2008년 이후의 최근 5년간 발표된 연구 논문 중 강재의 종류별 연구건 수를 분석하면 고장력강을 포함한 조선 구조용 강재의 CO<sub>2</sub>레이저/GMA 하이브리드 용접연구가 18건으로 가장 많고, 그 다음이 스테인리스 강 용접에 관한 내용으로 CO<sub>2</sub>레이저/ Pulsed GMA 하이브리드 용접 연구가 3건, 파이버 레이저/GMA용접 연구 3건, CO<sub>2</sub>/TIG, YAG/MAG, YAG/TIG 하이브리드 용접연구가 각각 1건 씩으로 검색되어 스테인리스강에 대한 다양한 하이브리드 용접 연구가 발표되어 있다. 그리고 도금강판에 대해서는 CO<sub>2</sub>레이저/TIG 용접과 CO<sub>2</sub>/ micro Plasma 하이브리드 용접에 관한 연구가 각각 1건 씩 검색되었다.

최근 2011년에 들어서부터 스테인리스강의 레이저/아크하이브리드 용접에 Pulsed-GMAW용접의 채용이나 파이버레이저의 채용이 각각 3건으로 나타나는 것이 특징으로 GMAW 용접기의 고도화와 파이버레이저의 고출력화 및 고효율화가 반영된 것으로 차후 이러한 열

원의 채용이 증대해 갈 것으로 예측된다.

이들 연구는 양호한 접합부 특성을 얻기 위한 용접공정 변수 즉 레이저 조사위치와 아크 간의 거리, 레이저 출력과 아크 출력, 실드가스, 용접속도 등의 영향에 관한 연구가 주류를 이루고 있다. 각 강종별로 그 대표적이고 특징적인 연구내용의 요약은 다음에 서술한다.

고장력강에 대해 CO<sub>2</sub>레이저/ MAG 하이브리드 용접을 적용하였을 때 레이저 조사지점과 아크간의 거리, 아크전류 등 적정한 공정 파라미터를 도출하기 위한 연구가 수행되었다<sup>9,10</sup>.

스테인리스강에 대한 레이저/아크하이브리드 용접성 검토가 다수 발표되어 있다<sup>13,14</sup>. Sathiya, P 등은 AISI 904L Super Austenitic Stainless 강에 대하여 MAG용접의 실드가스로서 50% He+50% Ar, 50%He+45%Ar+O<sub>2</sub>의 두 종류로 그 성분비를 변화시키며 CO<sub>2</sub>-MAG 하이브리드 용접을 실시하여 용입깊이는 성분비에 따라 변화하는 플라즈마 형태에 의해 결정된다는 결과를 얻었다<sup>14</sup>.

이상 스테인리스 강(Duplex stainless steel)에 대하여 14KW 파이버 레이저와 GMA의 하이브리드 용접으로 싱글 패스 용접으로 완전 용입의 결합이 없고 내식성에도 문제가 없는 조직의 용접부를 얻을 수 있음이 보고되어 있다<sup>15</sup>.

도금강판의 겹치기용접에 CO<sub>2</sub> 레이저/마이크로 플라즈마 하이브리드 용접을 적용하여 용접성에 미치는 레이저-아크의 배치와 그 거리, 아크전류가 용접성에 미치는 영향에 관한 연구 결과가 발표되어 있다<sup>16</sup>. TIG 선행으로 아연도금강판에 대한 겹치기용접을 실시하여 겹침부의 도금아연이 증발하여 양호한 용접부를 얻었다<sup>17</sup>.

### 4.2.2 모델링,시뮬레이션 분야

레이저/아크 하이브리드 용접 현상에 관한 모델링, 시뮬레이션 해석 연구는 많은 시간과 실험장비를 동원하지 않고 효율적으로 용접부의 여러 가지 특성을 이해하고, 용접결함을 제어하는 각종 용접 조건을 설정하는데 매우 중요한 분야이다. 따라서 이에 관한 다수의 연구가 발표되어, 전술한 데이터 베이스에서 과거 10년간 연구건수가 34건이 검색되어 전체의 23%를 차지하여 철강소재 다음으로 많은 비중을 차지하고 있다. 또한 국가별로는 중국 국적의 논문이 10건으로 가장 많은 수를 차지하고 있다.

2008년 이후 최근 5년간 발표된 논문의 내용은 레이저/아크 하이브리드 용접시의 온도와 용력장의 수치해석, 용융금속의 유동 해석, 레이저와 아크의 상호작용 해석 등을 통해 용접부의 조직, 잔류응력과 변형, 용입

부 형상과 용입 깊이를 예측하는 내용이 주류를 이루고 있다. 또한 이러한 결과를 바탕으로 최적의 공정변수를 제시한 내용들이다. 그 특징적인 내용의 요약은 다음에 서술한다.

Na 등은 CO<sub>2</sub> 레이저 및 디스크 레이저/GMA 하이브리드 용접시의 열전달과 용융금속 유동 현상에 관한 해석을 통해 용접부의 합금 분포, 키홀의 형성거동, 용입부와 비드형상에 관한 해석모델을 제시하였다<sup>18)</sup>.

용융 풀의 온도 장과 용융금속의 속도 장을 계산하기 위한 수학적, 수치적 3차원해석 모델이 Piekarska W 등에 의해 제시되었다<sup>19)</sup>. Wang J 등은 고속 비디오 이미지 상을 이용하여 플라즈마 유기현상을 해석하고 이 플라즈마는 용접와이어와 키 홀 사이에서 굽은 채널(Curved channel) 형태로 형성되며 이 채널은 다시 2개의 영역으로 구성되어 있다는 것을 밝혔다<sup>20)</sup>.

조선용 DH 36 강의 4mm 판 두께에 대한 수치해석을 통해 용접의 여러 가지 공정에 대한 변형량을 비교 분석한 결과가 발표되어있다. SAW, DC GMAW, 펄스 GMAW, Fronius CMT공정, 레이저 용접, 레이저 아크하이브리드 용접 공정을 비교 분석하여 레이저와 레이저/아크 하이브리드 용접공정에서 가장 작은 변형이 나타나고, 펄스 GMAW, CMT 공정에서 용접변형량의 개선효과가 나타난다<sup>21)</sup>.

#### 4.2.3 마그네슘합금 분야

레이저/GTAW 하이브리드용접은 우수한 품질, 높은 효율, 빠른 용접속도가 장점으로 마그네슘합금의 용접에 가장 많이 시도되고 있는 접합법이다. 2008년 이후 최근 5년간 발표된 마그네슘합금에 대한 레이저/아크하이브리드 용접연구는 13건으로 10건의 논문이 YAG 레이저/GTAW에 관한 내용이고 파이버레이저/MIG 하이브리드용접이 2건, YAG레이저/MIG 용접에 관한 연구가 1건으로 검색되었다. 이들 연구는 레이저와 아크간의 상호작용, 레이저의 펄스파가 용접성에 미치는 영향 등에 관한 내용이 주류를 이루고 있다. 그 요약은 다음에 서술한다.

파이버 레이저/MIG 하이브리드 용접법으로 AZ31Mg 합금에 대해 용접을 실시하고 용접부에 대한 미시조직, 파면형상 및 인장특성을 조사하여 적정한 용접 공정하에서 모재의 84-98%의 인장특성을 얻었다. 용접 시 아크는 레이저 빔에 의해 압축되고 안정되며, 레이저 출력의 증가와 더불어 아크의 압축범위가 증가하고 안정성이 더욱 개선된다<sup>25)</sup>.

레이저/GTAW 하이브리드 용접에서 아크 토치가 경사되었을 때 아크전류변화에 따라 경사각이나 아크길이

가 변화한다. 이러한 아크의 변화에 따라 레이저 키홀과 아크 플라즈마 사이에 상호작용이 다르게 발생하여 용접부에 여러 가지 영향을 끼친다<sup>26)</sup>.

마그네슘합금에 대한 펄스 레이저와 교류 TIG 하이브리드 용접 시 레이저 펄스와 아크 사이의 위상 정합(Phase matching)이 용접부의 품질에 미치는 영향에 관한 논문이 발표되어 있다. 이 결과에 의하면 레이저 펄스가 TIG 아크의 음극파에 작용하게 할 때에 용입 깊이나 비드형상이 더 개선된다는 결과를 제시하고 있다<sup>27)</sup>.

#### 4.2.4 알루미늄합금분야

최근 5년간 발표된 알루미늄합금의 레이저 용접에 관한 연구는 주로 YAG 레이저/GMAW 하이브리드 용접 방법에 의한 용접부의 조직, 기공과 같은 용접결함, 기계적 특성, 피팅 저항성 등에 관한 연구와 용접갭 여유도와 용접속도를 증대하기 위해 필터 와이어 병행의 하이브리드 용접법 개발 등에 관한 내용이 주류를 이루고 있다.

AA6082합금에 대해 레이저/GMAW 하이브리드 용접 시 기공(Porosity) 형성에 미치는 아크전류, 용적이행 모드, 양 열원간의 거리 등의 공정변수의 영향에 관해 조사하여 아크전류는 기공 형성에 크게 영향을 미치나 두 열원간의 거리는 별 영향이 없다는 결론을 제시하였다<sup>28)</sup>.

5A90 Al합금에 대해 YAG/MIG 하이브리드 용접부를 레이저 빔 단독 용접부와 비교 고찰하였다. 하이브리드 용접부의 미세경도는 레이저 빔 용접부보다 낮고 균일성이 더 개선된다. 최대 인장강도와 파면 연신율은 레이저 단독용접보다 더 낮다. 에이징처리와 열처리를 통해 하이브리드용접부의 특성이 개선될 수 있으며, 더 나은 용가제의 개발이 요구된다<sup>29)</sup>.

#### 4.2.5 이중재접합 분야

레이저/MIG 하이브리드 용접방법으로 AA6016 알루미늄합금과 아연도금 강판과의 맞대기용접에 관한 연구가 이루어졌다. 레이저출력, 와이어 공급속도, MIG 아크출력과 같은 공정변수가 용입 형상, 금속간 화합물의 형성, 인장강도에 미치는 영향을 분석하여 인장강도 180MPa와 충분한 용입형상을 얻을 수 있는 공정조건을 확립하였다. 이 접합부에 대한 부식거동은 별 문제 되지 않았다<sup>31)</sup>.

레이저/GTAW 하이브리드용접으로 AZ31B 마그네슘합금과 6061-T6 알루미늄합금과를 겹치기용접 시 Fe 중간층을 이용하여 중간층의 두께가 0.13mm 일때

전단인장강도는 100MPa 를 달성할 수 있었다. 이 중간층을 이용함으로써 Mg-Al 간의 화합물을 억제할 수 있으나 Fe와 Al의 취성적인 화합물이 생성되기 때문에 이의 제어를 위한 공정조건이 중요하다<sup>32)</sup>.

Al합금과 Mg 합금의 레이저/GTAW 하이브리드 용접 시 접착제의 효과에 관한 연구가 발표되어 있다. 접착제의 효과로 레이저 키홀내의 압력이 증가하고 열 편차효과가 증가하여 아크가 더욱 긴축되는 효과를 가져와 용접효율이 증가하고 더 깊은 용입을 일으킨다<sup>33)</sup>.

하이브리드 레이저-GTAW용접시 중간층으로서 니켈을 이용하여 마그네슘과 연강을 접치기 접합하였다<sup>34)</sup>. 겹침면 사이의 Ni중간층은 접합 변태지역에서 키홀의 역할을 하게 되고 Mg2Ni 상의 금속간화합물 층을 형성하게 되어 양호한 접합강도를 얻을 수 있었다. 레이저-GTAW 하이브리드 용접에 의해서 마그네슘합금(AZ31B)과 Al합금(6061)의 접합시 중간층으로 Ce foil을 삽입하여 접합하는데 성공하였다<sup>35)</sup>. 이때 Ce은 계면에 미세한 파면조직을 형성하여 균열이 발생되지 않는데 효과가 있는 것으로 밝혀졌다.

#### 4.2.6 티타늄 합금 접합 분야

CP-Ti에 대하여 파이버레이저/GMA 하이브리드 용접시 그 용접성을 레이저 용접과 비교하였다. 1.5mm 두께의 판재를 9m/min.의 빠른 용접속도로 용접이 가능하고 레이저 단독용접에 비해 강도와 인성의 조화가 더 양호하게 나타났다<sup>36)</sup>.

TA15Ti합금에 대해 레이저/TIG 하이브리드용접 시 용접부의 조직과 기계적 특성을 조사하였다<sup>37)</sup>. 용접 비드의 상층에서 주상정 조직이, 하층부에는 등축정 조직이 형성된다. TIG 단독용접보다 용접부의 용입이 더 증가하고 Ti, Al, V 의 분포가 균일하며 인장강도는 모재의 98%까지 달한다.

### 4.3 레이저/아크 하이브리드 용접기술의 산업에의 적용 현황

#### 4.3.1 조선 산업 분야

레이저 용접의 조선 산업에의 적용은 1990년대에 유럽에서 조선소와 선급협회를 중심으로 개발되어 현재도 유럽의 조선소에서 적용되고 있다. 그러나 레이저 용접은 용접 갭의 여유도가 작기 때문에 이를 완화하는 방법으로 레이저/아크 하이브리드 용접을 기계절삭장치나 클램프장치 등의 전용설비와 조합시켜 레이저 용접에 대체하여 이용하는 것이 최근의 추세이다.

Fig. 10은 조선용으로 개발된 CO2 레이저/MAG 하

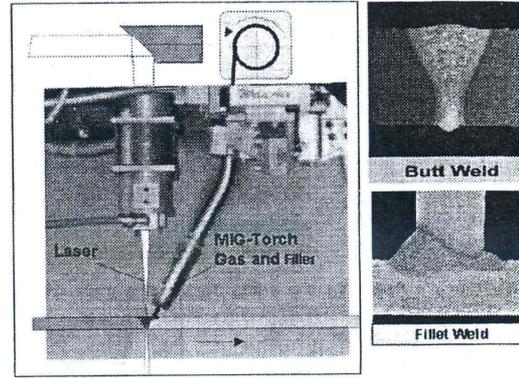


Fig. 10 조선용으로 개발된 하이브리드용접 헤드와 용접부 형상

이브리드 용접 토치와 그 용접부를 보인 것이다. 최근에는 대형, 고유연성의 면에서 파이버레이저/ MAG하이브리드 용접법이 많이 검토되고 있다<sup>8)</sup>.

많은 조선소에서 레이저/아크하이브리드 용접법의 도입 시 발생하는 고액의 초기 설비 투자가 장애가 되어 충분히 보급되고 있지 못하고 있으며, 일본의 미쓰비시 중공업에서 종래의 조선공작의 연장선상의 공작법으로서 적용가능한 하이브리드 용접법을 개발하여 실선 적용을 개시하였다<sup>38)</sup>.

#### 4.3.2 자동차 및 철도차량 산업 분야

종래 유럽에서의 레이저/아크하이브리드 용접은 자동차의 차체용접에 실용화되었다. 최근 파이버 레이저의 등장에 의해 보다 레이저의 적용이 쉽게 되어 박판뿐만 아니라 후판용접에서도 적용되기 시작하였다. 이 하이브리드 용접에서 용접결합의 저감화가 시도되고 있고, 그루브 간격의 여유도가 확대되고 있으며 자동차뿐만 아니라 조선, 원자력분야에도 적용되게 되었다

알루미늄합금의 레이저/아크 하이브리드용접에 관해서는 1990년대 중반 이후에 활발하게 검토되어 2000년대 초에는 YAG/MIG 하이브리드 용접이 AUDI사의 A8의 루프 프레임이나 폭스 바겐사의 페이톤 차의 도어의 알루미늄합금 용접에 채용되었고, 2000년대 중반에는 알루미늄 합금 철도차량의 용접에 하이브리드 용접법이 적용되기 시작하였다.

Honda 자동차에서는 전 알루미늄 차체(All aluminum body)제작을 목표로 고효율 MIG/레이저 아크 하이브리드 용접기술을 개발하여 용접공정의 자동화와 고속용접, 저입열 저변형 용접의 실현을 통해 자동화에 의해 안정된 품질보증, 양산 시의 정밀도변화 및 수정공수의 삭감, 용접 조립을 위한 사전공작의 공수 삭감 등의 효과를 얻었다<sup>39)</sup>.

Kinki Sharyo Co.에서 철도차량의 알루미늄합금의

차량 제작에 레이저/MIG 하이브리드 용접이 적용되어 있다. 이러한 하이브리드 용접의 채용으로 품질향상과 생산성 향상 효과를 거둘 수 있었다<sup>40)</sup>.

4.3.3 기타 산업 분야

일본의 IHI 사에서는 교량용 패널제작에 레이저/아크 하이브리드용접을 적용함으로써 용접변형을 저감하고 용접 패스 수를 감소시키며 용접속도의 향상으로 제작비용의 절감효과를 얻었다<sup>41)</sup>. 에너지 수송용 파이프라인 구축에 YAG/GMA 하이브리드 용접 헤드를 로봇에 장착한 모델이 실용화를 위해 제작되었다<sup>42)</sup>.

4.4 국내의 레이저/아크 하이브리드 용접기술 동향

4.4.1 최근의 연구 동향

국내에서의 레이저/아크 하이브리드 용접에 관한 연구 동향 분석을 위해 NDSL 데이터 베이스와 Web of Science의 SCI-E의 데이터 베이스를 이용하여 중복되는 논문을 제외하고 취합하였다. 이 결과에 의하면 국내에서 레이저/아크하이브리드 용접 기술에 관한 소개는 2002년 대한용접학회 국제 컨퍼런스에서 처음으로 이루어졌다<sup>43)</sup>. 그 이후 총 27건의 연구논문이 발표 되었다.

Fig. 11은 국내에서 이루어진 연도별 발표건수를 정리한 것이다. 이 결과에 의하면 국내에서 레이저/아크 하이브리드 용접에 관한 연구는 2000년대 중반 이후부터 관심이 높아지기 시작하였음을 알 수 있다.

발표내용을 분야별로 분석하면 Fig. 12와 같다. 이 결과에 의하면 조선용강, 아연도금 강, 스테인리스 강을 포함한 철강소재의 레이저/아크 하이브리드 용접 적용에 관한 연구가 11건이며, 열 유동, 잔류응력, 성분 금속 분포 등에 관한 해석적 연구가 각각 7건, 펄스 YAG 레이저와 GMA 공정의 하이브리드 공정, 레이저/회전 아크 하이브리드공정, 모니터링 시스템개발로 차체 적용 공정개발 등 새로운 공정개발에 관한 연구가 4

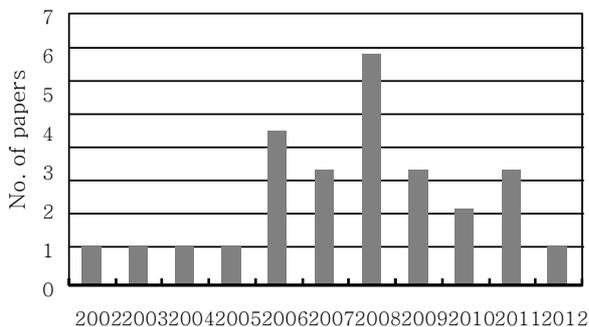


Fig. 11 국내의 연도별 연구논문 발표건 수

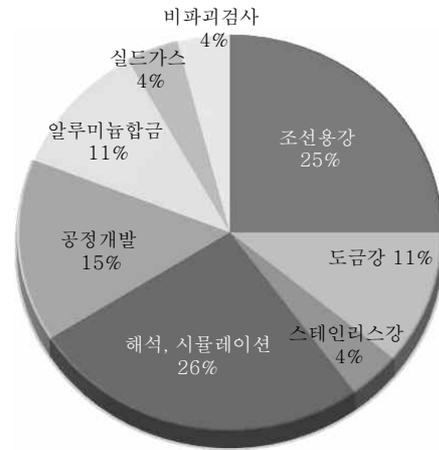


Fig. 12 분야별 연구논문 비율

건으로 그 다음을 차지하고 있다. 그리고 알루미늄합금의 하이브리드 용접 적용연구가 3건, 용접부의 비파괴 검사에 관한 연구와 실드가스 성분의 영향에 관한 연구가 각각 1건씩으로 나타났다.

4.4.2 철강소재분야 연구 동향

레이저/아크 하이브리드 용접을 조선공작에 적용하기 위한 기초연구로서 조선용 강재에 대한 하이브리드 용접 적용성 연구<sup>44)</sup>, 조선용 강재에 대한 하이브리드용접부의 기계적, 금속학적, 충격특성에 관한 연구<sup>45, 46)</sup>, 용접 전류, 펄스레이저, 레이저와 아크 간의 거리 등 영향 요소가 용융특성에 미치는 영향에 관한 연구<sup>48,49)</sup>, 조선용 A-grade 강재에 대한 하이브리드 용접부의 특성 고찰에 관한 연구<sup>50)</sup>가 이루어져 조선용 강재에 대한 하이브리드 용접의 적합성을 밝힌 내용이 발표되어 있다. 또한 API-X70 강에 대한 하이브리드용접 적용성 검토가 수행되었다<sup>51)</sup>.

아연도금 강에 대한 하이브리드용접 적용 연구는 KITECH의 김철희 등에 의해 3건의 논문이 발표되어 있다<sup>52,16,17)</sup>. 이들 연구는 아연도금강의 겹치기 용접에 적용한 레이저/TIG 아크 하이브리드 용접에서 TIG아크의 선행으로 가장 중요한 용접 결함인 기공을 억제할 수 있음을 밝히고 용접전류, 레이저-아크 간의 거리, 용접속도가 용접성에 미치는 영향을 분석하여 레이저-아크 간의 거리와 용접전류가 증가하면 용접부가 개선되고, 용접 속도가 증가하면 용접부의 품질이 저하한다는 결론을 제시하였다.

304L 스테인리스강에 대한 CO<sub>2</sub> 레이저/GMAW 하이브리드 용접부의 기계적, 조직적 특성을 SAW용접부와 비교한 연구결과가 Bang 등에 의해 발표되어 있다<sup>53)</sup>. 이 결과에 의하면, 하이브리드 용접의 경우에 길이 방향 잔류응력은 SAW 단독용접에 비해 13~15% 가

량 줄어들고, 열영향부의 크기는 1/2로 작아지며 용접 금속의 조직은 SAW와 같이 미세한 주상정 조직으로 나타났다.

#### 4.4.3 해석, 시뮬레이션 연구 동향

조선용 강재의 레이저/아크하이브리드 용접 적용 시 용접 잔류응력과 열탄소성 해석을 통해 용접부의 기계적 특성을 고찰한 연구 결과가 김 등과 Bang 등에 의해 발표되어 있다<sup>54,55</sup>. 이 연구에서는 CO<sub>2</sub>레이저/GMA 하이브리드 용접에서 기존의 아크용접보다 더욱 양호한 용접부가 얻어진다는 결과들을 보고하고 있다.

Na 등은 레이저/아크하이브리드 용접에서 레이저 빔의 흡수와 산란 현상에 대한 레이저-물질 상호작용의 시뮬레이션 기술을 이용하여 경사 레이저 빔 에너지의 재 분포현상을 해석하였다<sup>56</sup>.

또한 Na 등에 의해 YAG레이저/GTAW 하이브리드 용접에서 복합 플라즈마의 수치해석<sup>57</sup>, CO<sub>2</sub>레이저/GMA 하이브리드용접에서 합금원소 분포해석<sup>58</sup>, 레이저/GMA 하이브리드용접에서 용융 풀의 3차원 해석<sup>59</sup>, 스테인리스강 솔리드와이어를 사용한 레이저/GMA 하이브리드용접에서 Cr 분포의 해석적 연구<sup>60</sup> 등 주로 해석, 시뮬레이션 연구가 수행되었다.

#### 4.4.4 레이저/아크하이브리드 용접의 신공정 개발

박판에 대한 레이저/아크하이브리드 용접 적용을 위해 펄스 레이저와 저입열 단락이행 직류 GMA 용접을 복합한 신공정 하이브리드 용접에 대한 검토가 Na 등에 의해 이루어졌다<sup>61</sup>.

레이저/GMA 하이브리드 용접에서 회전하는 아크 열원을 채용함으로써 용접 겹의 여유도를 개선하는 연구 결과가 발표되어 있다<sup>62</sup>. 디스크레이저/GMA 하이브리드 용접공정에서 고속 이미지 분석에 의해 적정 용접 조건을 결정하고 이 용접을 수평자세 용접에서 위보기 자세 용접으로까지 적용하는 용접 공정에 대한 검토가 수행되었다<sup>63</sup>.

레이저/아크하이브리드 용접공정에서 용융지(Weld pool)의 거동을 모니터링하는 시스템을 개발하여 용접 전류, 용접 속도, 레이저-아크 간의 거리와 같은 공정변수에 따른 용융지의 거동 변화를 관찰한 논문이 발표되어 있다<sup>64</sup>.

#### 4.4.5 비철소재분야 연구동향

알루미늄합금에 대한 레이저/아크하이브리드 용접에 관한 연구는 차체 적용을 위한 연구로 CAE를 이용한 하이브리드 용접 후 차체부품예측 및 검증에 관한 연구<sup>65</sup>가 수행되었고, Lee 등에 의한 알루미늄합금의 하이

브리드 용접 적용을 위한 최적 공정조건의 설정에 관한 연구 결과가 발표되어 있다<sup>66,67</sup>.

알루미늄합금 외에 마그네슘, 티탄합금 등 외국에서 활발하게 연구되고 있는 비철소재분야의 레이저/아크하이브리드 용접 적용성 연구는 이제까지 국내에서 1건도 보고되어 있지 않다. 따라서 이 분야에 관한 관심이 요구되고 있다.

#### 4.4.6 보호가스, 비파괴 검사 등에 관한 연구

Chae 등은 CO<sub>2</sub>/GMA 하이브리드 용접에서 실드 가스 성분으로서 He, Ar, CO<sub>2</sub>의 혼합비율이 레이저유기 플라즈마 생성, 용융금속유동, 용적이행 등에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 He이 레이저유기 플라즈마를 억제하는 주도적인 역할을 하며, 레이저 출력 8KW의 경우 He의 최소함량을 제시하였다. 그리고 Ar과 CO<sub>2</sub>는 용적이행과 아크안정성을 지배하며, 1~2%의 CO<sub>2</sub>첨가는 용적이행을 안정시키고, 언더 컷 결함을 제거하는 데 매우 유효함을 밝혔다<sup>68</sup>.

자동차용 차체 모듈 생산 공정에서의 레이저-아크하이브리드 용접부에 대한 박판(Thin Plate) 용접부의 비파괴 검사 기술을 확립할 목적으로 초음파 비파괴 검사를 수행한 연구 결과가 발표되어 있다<sup>69</sup>.

#### 4.4.7 국내의 레이저/아크하이브리드 용접기술 실용화 현황

국내에서의 레이저/아크 하이브리드 용접 기술은 외국에서 실용화가 진척되고 있는 조선산업이나 자동차산업 분야에서 현재 실용화를 위한 검토 단계로 실제 적용례는 한건도 없는 것으로 파악되고 있다.

이처럼 국내에서의 실용화가 더딘 이유는 고가의 레이저 장비도입에 따른 초기투자 비용이 높고, 국내의 조선 산업이나 자동차산업의 특성상 기존의 아크용접 중심의 생산라인을 하이브리드 용접라인으로 교체하는 것이 기술적 측면뿐만 아니라 생산노동자 측면에서도 어려움이 따르기 때문인 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

1) 레이저/아크하이브리드 용접은 2000년대에 확립된 새로운 용접법으로 레이저용접과 아크용접을 복합함으로써 두 용접법의 장점을 살리고 단점을 보완하여 저입열, 심용입, 고속성의 특징을 유지하면서 간격 여유도나 시공오차 여유도 등 시공성이 우수하여 가장 경제적인 용접법으로 정착되어 가고 있다.

2) 레이저/아크하이브리드 용접 기술개발연구 활동은 2006년 이후부터 세계적으로 활발하게 이루어지고 있

으며, 국가별로는 중국에서 전체의 43%의 연구논문 발표가 이루어지고 있고 그 다음으로 미국, 한국 순으로 나타났다. 한편 특허출원 동향은 2001년에 가장 많은 특허 출원이 이루어졌고 특허 출원 건수는 유럽, 미국, 일본, 한국 순으로 나타났다.

3) 레이저/아크하이브리드 용접기술은 유럽, 미국, 일본에서 조선분야, 자동차산업 분야에서 이미 실용화가 이루어지고 있으며 그 적용분야가 빠르게 확산되고 있다. 그러나 국내에서는 아직 실용화를 위한 검토단계에 있을 뿐 이의 실용화에는 이르지 못하고 있다.

4) 고장력강, 스테인리스강, 도금강판과 같은 철강소재와 알루미늄합금, 마그네슘합금, 순 티탄과 같은 비철소재에 대한 레이저/아크하이브리드 용접 시 레이저 조사점과 아크간의 거리, 레이저 출력과 아크출력, 실드가스, 용접속도와 같은 공정파라메타가 용접부의 변형, 잔류응력, 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 충분히 해명되어 있다. 또한 철강소재와 알루미늄합금이나 마그네슘합금과 이종소재의 하이브리드 용접에 관한 다수의 연구가 발표되어 그 기술이 확립단계에 있다.

5) 레이저/아크하이브리드 용접 시 레이저 유기 플룸과 아크플라즈마와의 상호작용, 용융금속의 유동현상에 관한 해석적 연구가 다수 이루어져 그 현상이 밝혀져 있고, 용융부에서의 포로시티 형성기구가 해명되어 있다.

6) 국내에서의 하이브리드 용접 연구는 세계적인 동향과 같이 2006년부터 비교적 활발하게 연구발표가 이루어지고 있으며, 연구분야와 분야별 연구 건수의 비율은 조선용강, 도금강, 스테인리스강을 포함한 철강소재가 35%, 해석, 시뮬레이션 연구가 26%, 신공정 개발 연구가 15%, 알루미늄합금에 관한 연구가 11% 순으로 나타났다. 그러나 알루미늄 합금외의 마그네슘이나 티탄 등 경량소재의 용접이나 이종소재 간의 레이저/아크 하이브리드 용접연구는 전무한 현상에 있다.

7) 국내의 레이저/아크하이브리드용접 기술의 정착화를 위해서는 미래지향적인 과감한 초기투자 마인드와 산학 협력 연구체제를 강화하여 이 기술의 국내정착화를 위한 적극적인 노력이 요구되고 있다.

## 후 기

본 기술해설은 한국과학기술정보연구원이 교육과학기술부의 과학기술진흥기금으로 수행하는 ReSEAT프로그램의 성과물입니다.

## 참 고 문 헌

1. Surendar Marys, et al : Overview of Recent Advances

- in Welding, 溶接學會誌, 79(4),(2010), 292-298
2. S.M Kelly, S.W. Brown, J.F. Tressler, R.P. Martukanitz, & M.J.Ludwing : Using Hybrid Laser-Arc Welding to Reduce Distortion in Ship Panels, Welding Jnl. March, (2009), 32-36
  3. Y. NAITO, et, al : Penetration Characteristics in YAG Laser and TIG Arc Hybrid Welding and Arc and Plasma/Plume Behavior during Welding, Quarterly Jnl. of JWS, 24-1 (2006) 32-38 (in Japanese)
  4. Suck-ju Na : Laser and Laser-arc Hybrid Welding (Fundamental Phenomena on CFD-Simulations) IWJC\_ Korea 2012 Plenary talk III
  5. Y. Naito, M. Mizutani, S. Katayama: Effect of Ambient Atmosphere on Penetration Geometry in Single Laser and Laser-Arc Hybrid Welding (report 2), Q. Jnl. of JWS, 24-1(2006) 39-44 (in Japanese)
  6. Y. Naito, M. Mizutani, S. Katayama: Penetration Characteristics in YAG Laser and TIG Arc Hybrid Welding, and Arc and Plasma/Plume Behaviour during Welding, Quarterly Jnl. of J.W.S, 24-1 (2006) 32-38 (in Japanese)
  7. Ascari, A, Fortunato, A, Orazi, L, Compana, G, : The Influence of Process on Porosity Formation in Hybrid Laser-GMA Welding of AA6062 Aluminum Alloy, Optic and Laser Technology. 44-5 (2012) 1465-1490
  8. 片山 聖二 :レーザー・アークハイブリット溶接はどう進んでいるか, 溶接技術 2008年 2月, 51-58 (in Japanese)
  9. Liu, SY, Liu, FD, Zhang, H, Shi, Y : Analysis of droplet transfer mode and forming process of weld bead in CO<sub>2</sub> laser-MAG hybrid welding process, OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, 44-4 (2012) 1019-1025
  10. Liu, S-Y, Zhang, H, Shi, Y, Liu, F-D : Arc Characteristic and Behaviour of Droplet Transfer in CO<sub>2</sub> Laser-MAG Hybrid Welding of High Strength Steel, LASERS IN ENGINEERING, 23-1(2012) 29-42
  11. KIM You-Chul, HIROHATA Mikihito, YAMAMOTO Kohsuke and INOSE Koutarou : Welding Distortion and Residual Stress Generated by Laser-Arc Welding for High Strength Steel, Quarterly Journal of J.W.S, 29-3(2011) 234-240
  12. SUGA Tetsuo, MURAI Yasuo, KOBASHI Taizo, UEYAMA Tomoyuki, ERA Tetsuo, UEDA Yuji, SATO Munenobu and HARA Noriyuki, : Research on Laser-arc Hybrid Welding of HT780 Steel, Quarterly Jnl. JWS, 29-4,(2011) 248-257
  13. Wu,CS et.al : Thermal Field Model for Laser Pulse GMAW-P Hybrid Welding of TCS Stainless Steel Based on the Predicted Keyhole Shape, Acta Metallurgica Sinica, V 47-11(2011) 1450-1458
  14. Sathaiya, P, et.al : Effect of Shielding Gases on Microstructure and Mechanical Properties of Super Austenitic Steel by Hybrid Welding, Materials and Design, V 33(2012) 203-212
  15. Westin, E. M., Stelling, K., Gumenyuk, A.: Single-

- Pass LASER-GMA Hybrid Welding of 13.5 mm thick duplex stainless steel, WELDING IN THE WORLD, 55(2011)39-49
16. Kim C.H, Ahn Y.N, Kim J.H ; CO<sub>2</sub> Laser-Micro Plasma Arc Hybrid Welding for Galvanized Steel Sheets, Transactions of Nonferrous Metals Soc. of China, 21(2011) S47-s53
  17. Kim, C, Choi, W, Kim, J, Rhee, S: Relationship between the weldability and the process parameters for laser-TIG hybrid welding of galvanized steel sheets, MATERIALS TRANSACTIONS, 49-1(2008) 179-186
  18. Cho, YT, Cho, WI, Na, SJ : Numerical analysis of hybrid plasma generated by Nd YAG laser and gas tungsten arc, OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, 43-3(2011)711-720
  19. Piekarska W, Kubiak M : Three-dimensional model for numerical analysis of thermal phenomena in Laser-arc Hybrid Welding Process, International Jnl. of Heat and Mass Transfer 54, (2011)23-24
  20. Wang, J, Wang, CM, Meng, XX, Hu, XY, Yu, YC, Yu, SF : Interaction between laser-induced plasma/vapor and arc plasma during fiber laser-MIG hybrid welding, JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 25-6(2011), 1529-1533
  21. Colegrove, P, Ikeagu, C, Thistlethwaite, A, Williams, S, Nagy, T, Suder, W, Steuwer, A, Pirling, T : Welding process impact on residual stress and distortion, SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND JOINING, 14-8 (2009) 717-725
  23. Bang, HS, Bang, HS, Kim, YC, Joo, SM :Analysis of residual stress on AH32 butt joint by hybrid CO<sub>2</sub> laser-GMA welding COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE, 49-2(2010) 217-221
  24. Cho, WI, Na, SJ, Cho, MH, Lee, JS: Numerical study of alloying element distribution in CO<sub>2</sub> laser-GMA hybrid welding, COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE, 49-4 (2010) 792-800
  25. Gao, M, Mei, SW, Wang, ZM, Li, XY, Zeng, XY : Process and joint characterizations of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy, Process and joint characterizations of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy, 212-5 (2012) 1338-1346
  26. Liu, LM, Chen, MH : Interactions between laser and arc plasma during laser-arc hybrid welding of magnesium alloy, OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING, 49-9(2011) 1224-1231
  27. Liu, LM, Hao, XF : Phase Matching Mode Between Laser Pulse and TIG Arc in Hybrid Welding Process, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, 38-12(2010) 3375-3379
  28. Ascari, A, Fortunato, A, Orazi, L, Campana, G : The influence of process parameters on porosity formation in hybrid LASER-GMA welding of AA6082 aluminum alloy OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, 44-5(2012)1485-1490
  29. Xu, F, Gong, SL, Chen, L, Yang, J: Characteristics of 5A90 Aluminum-lithium Alloy by YAG-MIG Hybrid Welding , RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING, 40 (2011)95-98
  30. Y. Naito, M. Mizutani, S. Katayama,: Penetration Characteristics in YAG Laser and TIG Arc Hybrid Welding, and Arc and Plasma/Plume Behaviour during Welding, Quarterly Jnl. of J.W.S, 24-1, (2006) 32-38)
  31. Thomy, C, Vollertsen, F: Laser-MIG Hybrid Welding of Aluminum to Steel - Effect of Process Parameters on Joint Properties, WELDING IN THE WORLD, 56-5(2012) 124-132
  32. Qi, XD, Liu, LM : Fusion welding of Fe-added lap joints between AZ31B magnesium alloy and 6061 aluminum alloy by hybrid laser-tungsten inert gas welding technique, MATERIALS & DESIGN, 33 (2012) 436-443
  33. Liu, LM, Jiang, JB : The Effect of Adhesive on Arc Behaviors of Laser-TIG Hybrid Weld Bonding Process of Mg to Al Alloy, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, 39-1(2011)581-586
  34. Xiaodong Qi, Gang Song: Interfacial structure of the joints between magnesium alloy and mild steel with nickel as inter-layer by hybrid laser-TIG welding, Materials and Design 31 (2010) 605-609
  35. L. Liu et al: Microstructure of laser-TIG hybrid welds of dissimilar Mg alloy and Al alloy with Ce as interlayer, Scripta Materialia 55 (2006) 383-386
  36. Li, C, Muneharua, K, Takao, S, Kouji, H: Fiber laser-GMA hybrid welding of commercially pure titanium, MATERIALS & DESIGN, 30-1(2009) 109-114
  37. Liu, LM, Hao, XF, Du, X: Microstructure characteristics and mechanical properties of laser - TIG hybrid welding joint of TA15 titanium alloy, MATERIALS RESEARCH INNOVATIONS, 12-3(2008) 114-118
  38. Tsubota S, Koga H: Application of Laser Arc Hybrid Welding to Shipbulding, Jnl. of J.W.S, 79-7(2010) 7- 10 (in Japanese)
  39. Fukami K, Setoda K : Development of High-Efficiency MIG-Laser Hybrid Welding Technology, Light metal welding, 48-11(2010) 413-418 (in Japanese)
  40. Yonetani H : Laser-MIG Hybrid Welding to Aluminum Alloy Carbody Shell for Railway Vehicles, Light Metal Welding, 46-2(2008)43-47 (in Japanese)
  41. IHI技報, レーザ・アークハイブリッド溶接の橋梁への適用, IHI技報, 49-1(2009-3) (in Japanese)
  42. Booth G-S, Howse D-S, Woloszyn A-C: Applying Laser-arc hybrid welding technology for land pipelines 대한용접접합학회 2002년도 Proceedings of the International Welding/Joining Conference-Korea 2002 Oct. 01, 169-175, 2002
  44. 김영식: 레이저 하이브리드 용접 기술의 조선 적용성 연구, Journal of the Korean Welding Society, 22-2(2004) 19-22 (in Korean)
  45. 진형국, 김용, 이보영 : CO<sub>2</sub> 레이저 아크 하이브리드 용접

- 조건에 따른 용접부 기계적 금속학적 특성 평가 대한용접접합학회 2005년도 춘계학술발표대회 개요집 2005 June 23 (2005) 85-87 (in Korean)
46. 홍승갑, 이종봉: 조선용강재의 레이저-아크 하이브리드 용접 금속부 충격인성에 미치는 용접변수의 영향, Journal of the Korean Welding Society, 24-6 (2006), 33-38 (in Korean)
  47. 방한서, 주성민, 김영표 : 선급강재의 레이저 용접특성에 관한 기초실험 - HYBRID 용접시 LASER-ARC거리 변화에 따른 용융특성 변화에 관한 실험 한국해양공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집 2003 May 23, (2003) 279-283 (in Korean)
  48. Joo, SM, Kim, YP, Ro, CS, Bang, HS, Park, JU : Basic experiments by hybrid welding to steels for shipbuilding, ADVANCES IN NONDESTRUCTIVE EVALUATION, PT 1-3, (2004)
  49. 오종인, 박호경, 정은영 : 조선용 강재 A-Grade의 Fillet 용접에 대한 FCAW 및 하이브리드 용접부의 열적 특성 비교 대한용접접합학회 2006년 추계학술발표대회 개요집 2006 Oct. 19 (2006), 48-50 (in Korean)
  50. 임태훈, 이복영, 김기철 : API-X70 강의 레이저-아크 하이브리드 용접 및 SAW 용접부의 미세조직에 관한 연구 대한용접접합학회 2003년도 추계학술발표대회 개요집 2003 Nov. 01, (2003)278 - 280 (in Korean)
  51. 김철희, 최용용, 채현병 : 아연도금 강판의 레이저-TIG 하이브리드 용접에 관한 연구 Part 2 : 공정변수와 용접성과의 관계, Journal of the Korean Welding Society, 24-4 (2006), 2731(in Korean)
  52. Bang, HS, Bang, HS, Kim, YC, Oh, IH : A study on mechanical and microstructure characteristics of the STS304L butt joints using hybrid CO<sub>2</sub> laser-gas metal arc welding, MATERIALS & DESIGN, 32-4 (2011) 2328-2333
  53. 오종인, 김영표, 박호경 : 선체구조용 A급 강재의 하이브리드 용접에 대한 열 및 역학적 특성에 관한 연구, Journal of ocean engineering and technology, 21-1(2007) 64-68 (in Korean)
  54. Bang, HS, Bang, HS, Kim, YC, Joo, SM : Analysis of residual stress on AH32 butt joint by hybrid CO<sub>2</sub> laser-GMA welding, COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE, 49-2 (2010) 217-221
  55. Na, SJ, Ahn, J : Preliminary Study on Laser-Matter Interaction in LASER-ARC HYBRID Welding, WELDING IN THE WORLD, 53(2009)R264-R270
  56. Cho, YT, Cho, WI, Na, SJ: Numerical analysis of hybrid plasma generated by Nd YAG laser and gas tungsten arc, OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, 43-3(2011), 711-720
  57. Cho, WI, Na, SJ, Cho, MH, Lee, JS : Numerical study of alloying element distribution in CO<sub>2</sub> laser-GMA hybrid welding COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE, 49-4(2010), 792-800
  58. Cho, JH, Na, SJ : Three-Dimensional Analysis of Molten Pool in GMA-Laser Hybrid Welding, WELDING JOURNAL, 88-2(2009) 35S-43S
  59. 조원익, 나석주, 조민현: 스테인리스강 솔리드와이어를 이용한 구조용 강재의 레이저-GMA 하이브리드 용접에서 크롬 분포의 해석적 분석, 대한용접접합학회 2009년 추계학술발표대회 2009 Nov. 26 (2009) 110-110 (in Korean)
  60. 조원익, 나석주 : 펄스형 Nd:YAG 레이저와 단락이행모드의 직류 GMA 열원을 이용한 하이브리드 용접 공정에 대한 연구, Journal of the Korean Welding and Joining Society, 25-6 (2007) 71-77 (in Korean)
  61. 김철희, 채현병, 이창우: 레이저-회전 아크 하이브리드 용접 공정의 개발, Journal of the Korean Welding Society 24-1(2006) 88-92 (in Korean)
  62. 임현식, 김정학, 김철희: 디스크 레이저-아크 하이브리드 용접을 이용한 포지션 용접 대한기계학회 2007년도 춘계학술대회A, 2007 May 30 [2007] 1299-1306(in Korean)
  64. 박영환, 이세현, 김철희, : 자동차 차체 적용을 위한 레이저-아크 하이브리드 용접의 동축 모니터링 시스템 개발, Journal of the Korean Welding and Joining Society 27-6 (2009), 9-16 (in Korean)
  65. 이덕영, 최보성, 최원호: CAE 를 통한 하이브리드 용접 후 차체부품 변형예측 및 검증, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 29-1(2012), 87-95 (in Korean)
  66. Kim, HR, Lee, KY: Using the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the laser hybrid welding of a 6061-T6 Al alloy sheet, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 222-8(2008) 981-987
  67. Kim, HR, Park, YW, Lee, KY : Application of grey relational analysis to determine welding parameters for Nd : YAG laser GMA hybrid welding of aluminium alloy, SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND JOINING, 13-4(2008), 312-317
  68. Chae, HB, Kim, CH, Kim, JH, Rhee, S, : The effect of shielding gas composition in CO<sub>2</sub> laser-gas metal arc hybrid welding, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 222-11(2008), 1315-1324
  69. 허정현 : 레이저-아크 하이브리드 용접부의 초음파 비파괴 검사 연구, 대한전기학회 2008년도 정기총회 및 학술대회 2008 Nov. 14, 72-73, 2008 (in Korean)



- 김영식
- 1944년생
- 한국과학기술정보연구원
- 용접부 파괴와 강도, 용접공정, 재료공학
- e-mail : yskim@hhu.ac.kr