

## 펄스 Nd:YAG 레이저를 이용한 모터용 스테이터 적층코어의 용접특성 [Ⅱ] - 용접결함의 형성 메커니즘 규명 -

김종도† · 길병래\* · 이창제\*\*

(원고접수일 : 2006년 6월 30일, 심사완료일 : 2006년 7월 18일)

### The Weldability of Laminated Stator Core for Motor by Pulsed Nd:YAG Laser [Ⅱ] - Investigation of Mechanism on Formation of Weld Defect -

Jong-Do Kim† · Byung-Lea Kil\* and Chang-Je Lee\*\*

**Abstract** : Recently, there were some successful examples that the laser welding was introduced into production line. However, the spread of laser welding is not sufficient in many industries. There are several reasons why it is difficult to penetrate the laser welding into production lines. Because it is different from reflection, absorption and permeation of laser beam according to material and surface condition. Moreover, there are significant problems in processing such as absorption and scattering of beam by the induced plasma or plume. Therefore, understanding of mechanism on formation of weld defect in laser welding of the laminated core for motor is very important. In this paper, it was analyzed in terms of materials which was source of defect in laser welding and conventional arc welding. As a results of analysis, insulation coating film of the laminated core was judged to main factor of weld defect. it could be well aware as tracing carbon volume, and it was deduced that weld defect by insulation coating film was caused by difference of mechanism between the two heat sources.

**Key words** : Pulsed Nd:YAG laser(펄스 Nd:YAG 레이저), Arc welding(아크용접), Silicon steel sheet(규소강판), Insulation coating(절연피막), Porosity(기공)

#### 1. 서 론

최근 선박이나 자동차와 같은 수송기기의 고속화 및 에너지의 고효율화에 따른 경량화가 크게 부각됨에 따라 기존의 골재와 판에 의한 용접구조에서 레이저를 이용한 박판 집합체 용접구조로의 전환을

고려하고 있는 추세이다<sup>[1]</sup>.

그러나, 재료의 종류와 그 표면상태에 따라 레이저 빔의 반사, 흡수 및 투과 정도가 크게 다르고, 깊은 용입용접의 경우 기공(porosity)이 발생하기 쉽다<sup>[2],[3]</sup>. 뿐만 아니라 레이저 유기 플라즈마(laser induced plasma) 또는 플룸(plume)에 의한 빔

† 책임저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail:jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253

\* 길병래(한국해양대학교 기관시스템공학부)

\*\* 이창제(한국해양대학교 대학원)

의 흡수나 산란 등의 영향을 받는 등<sup>(4)-(6)</sup> 가공상의 어려움이 있다. 그러나, 레이저 용접시의 이러한 문제점들은 적절한 용접변수로 제어할 수 있으며, 타 열원에 비해 많은 장점을 가지고 있기 때문에 현재 산업분야에서는 그 적용이 더욱더 넓어지고 있는 추세이다.

특히, 현대산업에 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나인 모터의 사용환경은 극한의 환경에 처해지는 경우가 빈번해지고 있기 때문에 제품의 고품질화가 요구되고 있다. 따라서 그 제조에 레이저의 적용이 기대되고 있으며, 이미 일부 선진국에서는 생산의 전공정에 도입·적용되고 있다<sup>(7),(8)</sup>.

따라서 본 연구에서는 모터 적층코어의 핵심재료인 무방향성 규소강판의 적층용접시 펄스 Nd:YAG

레이저와 기존의 아크용접 열원에 따른 결합형성 메커니즘을 재료학적으로 규명하기 위해, SEM과 EDS를 사용하여 비교·검토하였으며, 용접결합의 발생과 방지에 대한 고찰 및 근본적인 가공인자의 도출을 목적으로 하고 있다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

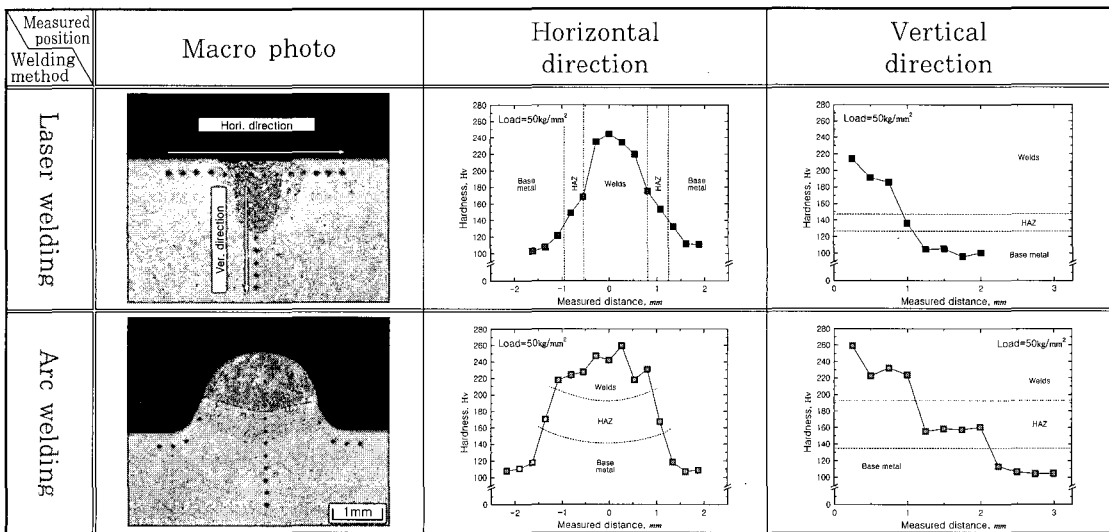
### 2.1 사용재료

선행 연구에서와 같이 실험에 사용된 PN60 (JIS: 50A1300) 무방향성 규소강판은 규소(Si)가 약 0.3%, 탄소(C)가 약 0.005% 함유된 두께 약 0.5mm<sup>t</sup>의 모터용 전기강판이다.

특히 적층코어의 규소강판에 코팅된 절연피막은 페놀수지(phenolic resin)와 산화크롬(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 혼합하여 도포한 것으로, 비점(boiling point)이 276℃로 매우 낮은 페놀은 급속 증발하여 험핑(humping)이나 기공 등을 발생시키는 주요인자로 작용할 것으로 판단된다. Table 1에 규소강판에 코팅된 절연피막의 주요성분인 페놀수지와 규소강판의 주요성분인 철(Fe)과 규소(Si)의 물리적 성질을 나타낸다.

**Table 1 Physical constant of insulation coating layer**

Element	Physical constant	Density (g/m <sup>3</sup> )	Boiling point (°C)	Melting point (°C)
Phenolic resin		0.825 (200°C)	276	83.5~84
Fe		7.86	1,530	2,754
Si		2.42	1,410	2,355



**Fig. 1 Hardness distribution of weldment by laser and arc heat source**

## 2.2 실험방법

본 연구에서는 레이저 및 아크로 적층 용접된 구조강판의 용접부를 분석하기 위해, 우선 각 용접부의 경도 및 인장강도 시험을 통하여 기계적 성질을 파악하였다. 그 후 결함의 주요인자로 추정되는 절연피막층 및 용접부와 결함부의 SEM관찰 및 EDX분석을 통해 결함형성 메커니즘을 규명하고자 하였다.

적층코어의 레이저용접부에서는 결함이 거의 발견되지 않았으나, 아크용접의 결함부와 비교·평가하기 위해 결함이 있는 용접부를 선정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 용접부의 기계적특성

#### 3.1.1 경도분포 특성

레이저와 아크의 적층코어 용접부의 경도분포를 알기 위해 마이크로 비커스 경도를 측정하여 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타낸다.

각 용접부의 열영향부 경도차를 비교하면, 횡방향(horizontal direction)에서는 약 Hv20 정도, 수직방향(vertical direction)에서는 약 Hv25로 아크용접이 레이저용접에 비해 높은 경도값을 보였다. 이때 횡방향의 경도가 수직방향보다 낮은 것은 아크용접개소의 프로젝션(projection)에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 형상인자의 차이를 고려하더라도 레이저용접이 아크용접에 비해서 열영향이 작고, 취성에 더 강할 것으로 생각된다.

최고경도 값은 아크용접이 레이저용접에 비해 약 Hv15 정도 높은 값을 보였는데, 급속 응고하는 레이저용접부의 특징을 고려할 때, 아크용접부의 경도상승도 용접개소의 프로젝션의 영향으로 보인다. 따라서, 레이저용접부의 경도분포는 아크용접에 비해 낮은 값을 보였으며, 가장 취약한 열영향부의 경도가 아크용접부보다 낮았다. 특히 아크용접부의 경우 입열이 수직방향으로만 전달되기 때문에, 수직방향의 열영향부 경도가 모재쪽으로 서서히 감소하지 않고 약 1mm정도 평행한 값을 보였다. 이와 같이 열영향부의 경도가 모재경도로 서서히 수렴하지 못함에 따라서 용융경계부는 매우 취약할 것으

로 판단된다.

#### 3.1.2 인장강도 특성

본 실험에서는 아크용접부와 레이저용접부의 형상차로 인하여, 인장시험시 용접부에 가해지는 힘의 정도가 다르기 때문에 정성적인 평가만을 행하였다. 그리고 인장시험을 위해 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 적층코어의 용접부에서 두장이 접합된 상태로 시편을 채취한 후, 용접부에서 10mm 정도의 간격을 두고 양쪽 좌우의 적층판을 직각으로 구부렸다.

Fig. 3에 레이저와 아크용접부의 인장시험 결과를 나타낸다. 레이저와 아크용접부의 비례한도(proportional limit)인 ㉑점은 레이저용접이 5배 정도의 값을 보였다. 그리고 ㉒~㉓의 영역은 시험편의 인장시험을 위해 굽혀진 다리부분에서 소성변형이 일어나는 구간으로 실제 강도와는 큰 연관성이 없으나, 실제 레이저용접개소와 아크용접개소의 형상차이로 인하여 아크용접의 경우 다리부분의 소성변형과 함께 용접부와 모재간의 변형도 눈에 띄었다. 따라서 용접부의 항복점(yield point)은 ㉓ 지점으로 보는 것이 타당하며, 레이저용접부가 아크용접부에 비해 항복점이 더 크다는 것을 알 수 있다.

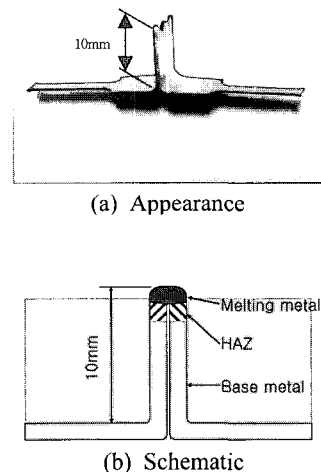


Fig. 2 Schematic and appearance of specimen for tensile test

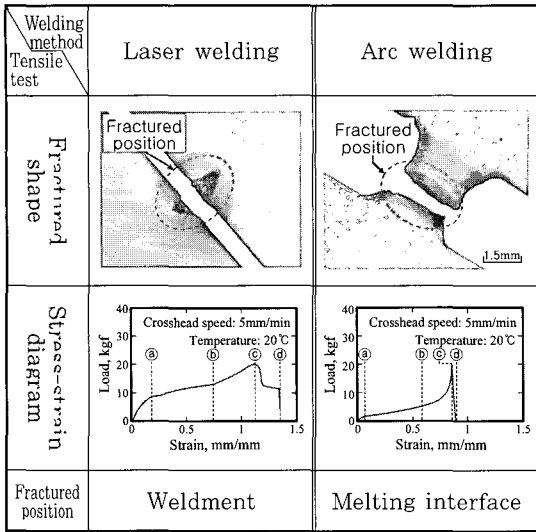


Fig. 3 Tensile test results of specimen made by pulse laser and arc heat source

용접부의 완전소성(perfectly)변형이 일어나는 ①~③구간은 아크용접이 레이저용접에 비해 변형 정도가 작고 큰 응력을 나타냈다. 그 후 아크용접은 ③~④구간에서 용융경계부를 따라 바로 파단된 반면, 레이저용접의 경우에는 용접금속부에서 네킹(necking)현상이 수반된 이후 파단되는 거동을 보였다. 이는 아크열에 의해 열영향부의 조직이 조대화 및 취화한데 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 외력을 받을 경우 가장 취약한 열영향부와 용융경계면은 노치(notch)로 작용하여 파단되는 것으로 사료된다. 반면, 레이저용접부는 아크용접부에 비해 취약한 열영향부가 작고 용접부는 어느정도의 연성을 지닌 것으로 사료된다. Fig. 1에 나타난 경도분포 측정결과로부터도 레이저용접부가 아크용접부에 비해 용접부와 열영향부의 경도가 더 낮다는 것을 알 수 있다.

3.2 용접부에 대한 재료학적 분석

3.2.1 절연피막부의 분석

적층코어의 용접시 생성되는 기공은 규소강판에 코팅되어 있는 절연피막의 증발이 그 원인으로 추정된다. 절연피막은 페놀수지(phenolic resin)와 크롬산화물(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이 주성분으로, 특히 페놀수지의

비점은 Table 1에 나타난 것과 같이 276℃로 매우 낮기 때문에 적은 열영향에도 쉽게 증발할 것으로 사료된다. 전기제품의 절연에 사용되는 페놀수지는 페놀과 포름알데히드(HCHO)를 1:0.8 정도의 비율로 황산과 같은 산성 촉매하에서 반응시켜서 만든 노보락(novolac)계열의 고기능성 수지이다. Fig. 4에 노보락의 화학적 구조를 나타낸다. 그 화학적 구조에서도 알 수 있듯이 탄소(C), 수소(H) 및 산소(O)가 주성분인 유기물질로서 용접열에 의한 증발시, 수소와 산소는 대부분이 기화하고 탄소가 잔류할 것으로 판단된다. 따라서, 용접결합부의 탄소성분을 분석함으로써 절연피막층과 용접결합과의 관계를 규명하고자 하였다.

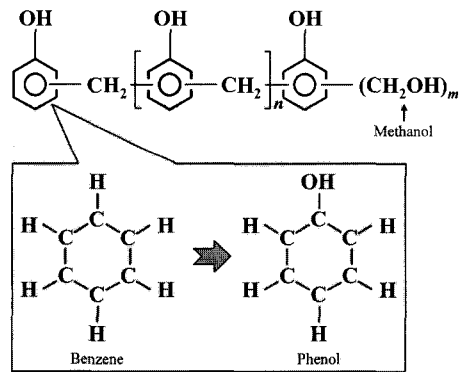


Fig. 4 Chemical structure of novolac

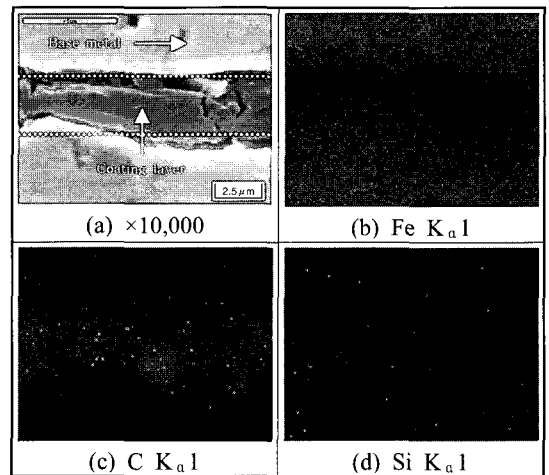


Fig. 5 Results of mapping analysis by EDX in coating layer of the laminated core

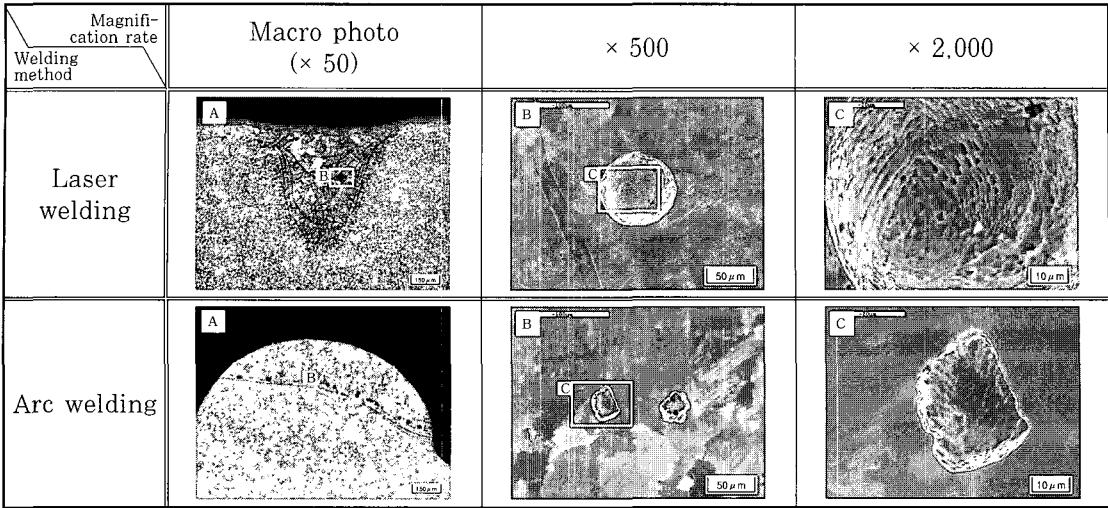


Fig. 6 SEM photographs of porosity formed by laser and arc welding

우선, 적층한 규소강판의 종단면을 취하여 용접 전 모재와 절연피막층의 상태 및 주요성분인 철(Fe), 규소(Si) 및 탄소(C)의 성분분포를 측정하였다. 관찰결과 절연피막층은 약 2 $\mu$ m 정도의 두께를 보였으며, 판과 판 사이는 잘 밀착되어 있었다. 적층된 규소강판의 종단면을 EDX분석한 결과, 모재 내의 탄소와 규소는 균일하게 산포되어 있었으며, 그 밀도는 낮았다. 그러나 절연피막층은 페놀수지의 영향으로 탄소함유량이 매우 높게 나타났다. 적층코어 종단면의 SEM 및 EDX 맵핑(mapping) 분석결과를 Fig. 5에 나타낸다.

### 3.2.2 용접결함부의 분석

Fig. 6은 적층코어의 레이저와 아크용접시 생성된 기공의 SEM관찰사진을 각각 나타낸다. 레이저 용접부에 형성된 기공은 거의 원형에 가까운 형상을 나타냈다. 또한 2,000배로 확대한 기공내벽의 하단에서는 덴드라이트 응고조직이 발견되었으며, 중심부에서는 매우 특이한 요부(凹部)가 관찰되었다. 더욱이 와류의 영향을 받은 흔적도 함께 나타났으며, 기공내부의 증발은 매우 격렬했을 것으로 보인다. 그러나 아크용접의 경우 용융경계부를 따라 기공이 형성되어 있었으며, 기공의 형상은 불규칙

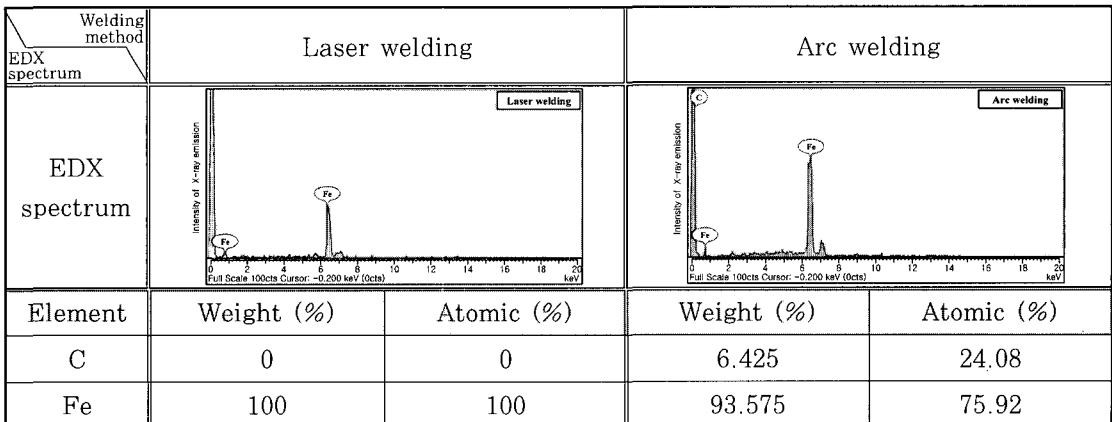


Fig. 7 Result of EDX analyses in inner surface of porosity

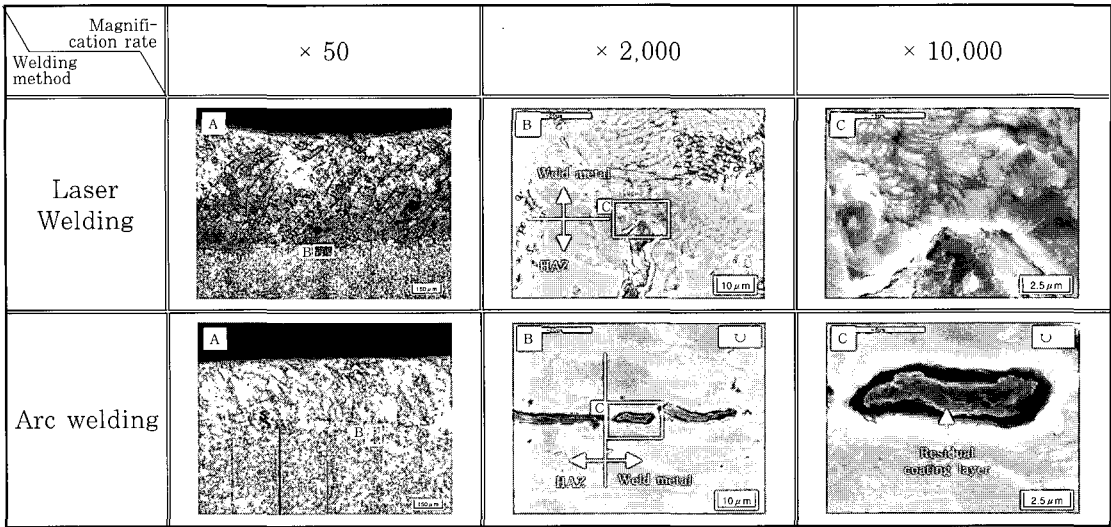


Fig. 8 SEM photographs of melting interface in arc and laser welding

할 뿐만 아니라, 그 내부에서도 조직의 특별한 형상이나 구조를 발견할 수 없었다. 따라서 아크용접부의 기공형성에 관여한 것으로 추정되는 증발원은 용융금속의 응고시까지 지속적인 기공의 형상을 유지할 압력에 미치지 못한 것으로 사료된다.

Fig. 7은 레이저와 아크용접부에 형성된 기공의 EDX분석결과를 각각 나타낸다. 레이저용접부의 기공에서는 철 이외에는 별다른 성분은 검출되지 않았다. 그러나 이와는 대조적으로 아크용접부에 형성된 기공의 경우, 그 내벽에서 검출된 탄소의 원소비율은 약 24%정도의 값을 보였는데, 자성의 영향을 고려한 규소강판의 탄소함유량이 0.005%이 내리는 사실을 감안하면 매우 높은 값이다. 이는 절연피막층의 증발시 아크용접부의 기공에 탄소가 잔류한 반면, 레이저용접부의 기공에서는 절연피막층의 증발이 미치지 못한 것으로 추정된다.

이러한 절연피막층의 영향을 보다 가시화하기 위하여 용융경계부를 따라 종방향으로 절취한 시편을 관찰하였다. Fig. 8은 아크와 레이저용접부의 종방향 SEM관찰사진을 나타낸다. 레이저와 아크용접부에서는 열류방향을 따라 성장한 응고조직을 관찰할 수 있으며, 레이저용접의 경우 충적된 레이저 펄스의 영향도 보인다. 그러나 아크용접부에서는 미처 증발하지 못하고 잔류한 개재물이 용융경계부를

따라 발견되었다. 이 개재물의 EDX분석결과, 매우 높은 밀도로 탄소가 검출되었으며, 이것은 절연피막층의 일부로 판단된다. 이 잔류 개재물의 EDX분석결과를 Fig. 9에 나타낸다.

지금까지의 EDX분석결과 아크용접 중 증발한 절연피막이 결합형성에 관여하는 것으로 추정된다. 즉, 용융부에서는 절연피막이 증발하더라도 충분한 시간을 갖고 방출되지만, 용융경계부에서는 용융부

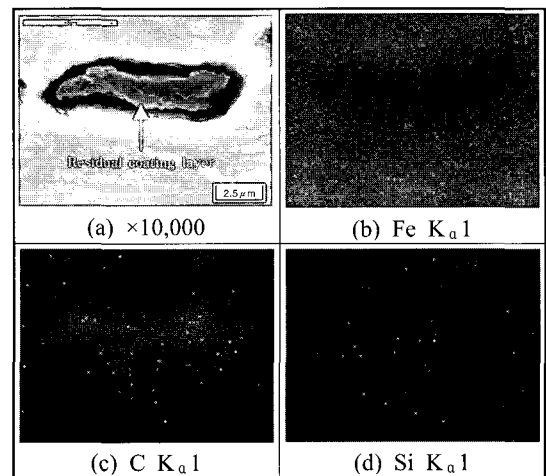


Fig. 9 Results of mapping analysis by EDX in melting interface of longi. section in arc welding

와 모재사이의 열전달에 의한 열적·시간적 한계 때문에 용접시 절연피막이 증발하여 방출되지 못하고 잔류하여 결함을 유발시키는 것으로 판단된다. 그러나 레이저용접의 경우, 절연피막은 고파워밀도의 레이저빔에 의해 급격히 증발하는 것으로 추정되며, 용접부의 결함은 키홀용접의 전형적인 결함으로 판단된다. 따라서 적층코어에서의 레이저용접과 아크용접의 결함발생원인은 그 메커니즘이 전혀 다른 것으로 판단되며, 결함의 제어방식도 별개여야 할 것이다.

### 3.3 적층코어의 용접시 결함형성 메커니즘

지금까지의 실험결과에 근거한 적층코어의 결함 발생 메커니즘을 Fig. 10의 모식도로서 나타낸다.

아크용접의 결함발생 메커니즘은 Fig. 10(a)에 나타난 것과 같이, 코어의 절연피막층이 용융지의 아크열에 의해 증발·제거된다. 그러나 넓은 열영향부를 형성하는 아크열에 의해 용접진행방향의 후미에 후열(後熱)이 잔류하게 된다. 이 때 후열에 의해 저부(低部)의 절연피막층이 용융금속쪽으로 증발되지만, 그 증발압력이 약하고 시간이 지남에 따라 응고벽에 트랩(trap)되어 배출되지 못하고 용융경계부를 따라 기공으로 남게 되는 것이다.

그러나 레이저용접시에는 Fig. 10(b)에서 나타난 것과 같이, 높은 파워밀도를 가지고 있는 레이저빔에 의해 절연피막층이 키홀내부의 선단에서 급격하게 증발하여 제거될 뿐만 아니라, 집속되는 레이저빔 에너지에 의해 형성되는 열영향부는 아크용접부에 비해 매우 작기 때문에, 아크용접과는 달리 후열에 의한 적층코어 저부에서 증발되는 절연피막층의 증발량이 매우 적어 아크와 같은 결함을 억제하는 것으로 추정된다. 그리고 레이저용접시 형성된 기공은 키홀 내벽의 용융금속이 키홀내부로 함몰되면서 내부의 금속증기가 미처 빠져나가지 못해 형성된 전형적인 키홀용접의 결함으로서, 절연피막의 영향이 아닌 가공인자에 지배를 받은 것이다.

따라서 적층코어의 아크용접에서는 용접전 절연피막층의 제거가 선행되지 않으면 안된다. 그러나 레이저용접의 경우 높은 파워밀도에 의해 키홀내부 선단에서 급격히 증발하여 배출되기 때문에 절연피막층의 제거공정이 불필요하다. 더욱이 레이저에 의한 용접은 절연피막과 마찬가지로 적층성형중 코어 내·외부에 유착되는 윤활유나 기계유와 같은 잔류유도 별다른 공정없이 제거할 수 있다. 하지만 적절한 가공인자를 도출하지 않으면 결함을 유발시킬 수 있다.

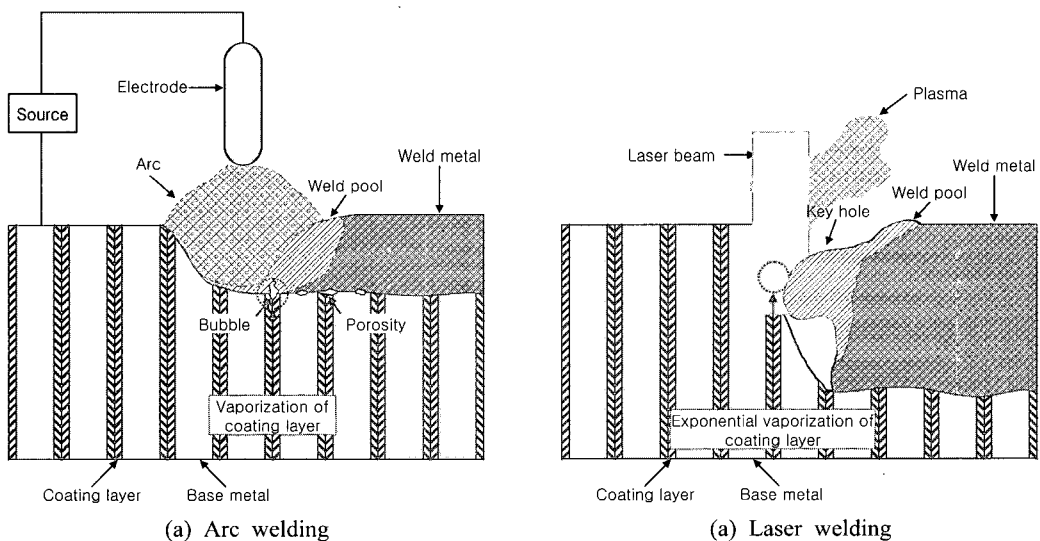


Fig. 10 Formation mechanism of weld defects by arc welding and laser welding of laminated core

#### 4. 결 론

스테이터 적층코어용 무방향성 PN60규소강판의 적층용접시 펄스 Nd:YAG 레이저와 아크용접에 따른 기계적특성과 절연피막층에 기인하여 생성된 결함의 발생 메카니즘에 관한 비교 및 연구결과를 다음에 정리한다.

- 1) 레이저와 아크용접부의 경도측정결과 그 열원의 특성상 상이한 결과를 보여주었다. 특히, 아크용접의 경우 용접부의 프로섹션 영향으로 수직방향으로만 입열이 전달되기 때문에, 모재와 열영향부간의 경도변화가 큰 반면, 레이저용접의 경우 모재와 열영향부간의 경도차이가 상대적으로 작았다.
- 2) 인장시험결과 레이저용접은 아크용접에 비해 항복점은 더 컸으나, 완전소성구간에서는 아크용접이 더 큰 값을 나타내었다. 그러나 파단결과 아크용접은 최고응력값을 보인 이후 용융경계면에서 바로 파단된 반면, 레이저용접부는 네킹현상을 보이며 일정시간 경과 후 파괴되었다. 따라서 레이저용접의 경우 모재와 용접부간의 강도 차이가 크지 않은 것으로 판단되며, 충격과 진동을 수반하는 환경에서는 아크용접보다 내구력이 있을 것으로 사료된다.
- 3) EDX분석결과 아크용접의 결함부에서는 C가 검출된 반면, 레이저용접의 결함부에서는 C가 검출되지 않았다. 이는 열영향부의 절연피막층이 후열에 의해 뒤늦게 증발되어 결함을 유발시킨 것으로 사료된다. 따라서 아크와 레이저용접의 경우 에너지의 집속정도에 따라 상대적으로 매우 작은 열영향부를 갖는 레이저가 결함제어에 더 유리한 것으로 판단된다.
- 4) 지금까지의 결과로부터 적층코어의 용접시의 생성된 결함은 절연피막에 의한 영향을 크게 받는 것으로 사료된다. 그러나 레이저용접의 경우 높은 파워밀도를 갖는 조사빔에 의해 용접중 절연피막층이 제거되기 때문에, 절연피막 제거공정을 생략할 수 있을 뿐만 아니라, 모재와의 강도 차이도 작아 충격 및 진동이 수반되는 극한 환경

에서도 충분한 내구성을 발휘할 것으로 사료된다. 또한 자동화공정에서 레이저의 초점거리 변화만으로도 다양한 크기의 코어용접이 가능할 뿐만 아니라, 광화이버를 이용한 빔의 다중전송을 통해 코어의 모든 용접부를 원패스(one pass)로 용접할 수 있어 공정의 유연성 및 생산성에 미치는 파급효과는 상당할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] 김종도, 마쯔나와 아키라 "레이저 용접현상과 산업계로의 응용", 박용기관학회지, 第22卷 第6號, pp.744-753, 1998.
- [2] J. Xie and A. Kar. "Laser welding of Thin Sheet Steel with Surface Oxidation", Journal of America Welding Society, pp.343-348, 1999.
- [3] Hiroshi Maruo, Isamu Miyamoto, Yoshiaki Arata "The Role of Assist Gas in CO<sub>2</sub> Laser Welding. -Laser Welding of Metal (Rept. 3)-", Quarterly Journal of Japan Welding Society, 3-2, pp.276-283, 1985.
- [4] Takuomi Maiwa, Isamu Miyamoto and Kiyokazu Mori "Properties of keyhole plasma in CO<sub>2</sub> Laser Welding", ICALEO'95, Laser Institute of America, pp.708-717, 1995.
- [5] Susumu Tsukamoto, kazuo Hiraoka, Yoshikazu Asai, Hirosada Irie "Characteristics of Stable Induced Laser Plasma", ICALEO'96, Laser Institute of America, Section B, 81, pp.76-85, 1996.
- [6] R. Fabbro "Beam-plasma Coupling in Laser Material Processing", LAMP, pp.305-310, 1992.
- [7] 高木勝美, 後藤 徹 "レーザー溶接によるモータ鋼板ブレード生産ライン", 溶接技術, 11月號,



pp.62-68, 1994.

- [8] 後藤 徹, 高木睦美, 池田洋一 : レーザー溶接による電動機用ブレード製作技術の開発と實用化. 第30回レーザー熱加工研究會論文集, 7月, pp.213-219, 1993.

## 저 자 소 개



### 김종도 (金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 사업이사겸 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집위원, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 해석



### 길병래 (吉炳來)

1957년 11월생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 2000년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 부경대학교 대학원 기계공학과(공학박사수료), 1996년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 정회원. 관심분야 : 프로세스 제어



### 이창제 (李昶濟)

1977년 7월생, 2000년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2006년 한국해양대학교 기관시스템공학과 재료전공(공학석사), 2006년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학과 박사과정; 관심분야 : 레이저용접, 레이저가공시의 실시간 모니터링