

Manufacturing Process of Self-Luminous Glass Tube (SLGT) Utilizing Tritium Gas (I)

삼중수소 활용을 위한 자발광유리관 (SLGT) 제조기술

KwangSin Kim, Kyeongsook Kim, Eun-Su Chung,

Soon Hwan Son and Gi-Jung Nam*

Korea Electric Power Research Institute (KEPRI), 103-16 Munji-Dong, Yusung-Gu, Daejeon

*Institute for Advanced Engineering (IAE), Yongin P.O. Box 25, Kyonggi-do

김광신, 김경숙, 정은수, 손순환, 남기중*

한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 106-16번지

*고등기술연구원, 경기도 용인시 사서함 25

kimk@kepri.re.kr

Abstract

Laser sealing/cutting technique, one of the 4 core technologies to manufacture self-luminous glass tubes (SLGTs) has been developed. Through the analysis of commercial products, it is found that pyrex is used for SLGTs. A CO₂ laser, which is commonly used for glass work was used for the study. The factors affecting the sealing/cutting were laser intensity, duration, irradiation method, and pressure inside the tube. The whole process is composed of 2 stages. In the first stage, both ends of the tubes are sealed while tritium is injected in the tubes. And the tritium sealed tubes are cut in the desired size in the second stage. Defocused beam was used for sealing and focused beam was used for cutting. After the sealing/cutting, the tubes were heat treated to prevent fracture due to the residual heat stress.

Key word : tritium, self-luminous glass tube, laser, sealing/cutting

요약

삼중수소를 사용하는 자발광유리관의 제조에 필요한 4가지 핵심 기술 중 레이저를 이용한 밀봉/절단기술을 개발하였다. 상용 제품을 분석한 결과 유리관의 재질은 pyrex 이었고 레이저는 유리가공에 적절한 펄스형 이산화탄소 레이저를 사용하였다. 유리관의 밀봉/절단에 영향을 미치는 인자들로 레이저 빔의 강도, 지속시간, 조사 방법, 유리관 내부의 압력 등이었다. 전 공정은 2단계로 이루어져 1단계에서는 삼중수소를 주입하고 유리관의 양단을 밀봉하였으며 2단계에서는 삼중수소가 봉입된 유리관을 원하는 길이로 밀봉/절단하였다. 각 공정에서 유리관의 밀봉은 defocusing된 레이저 빔을 사용하였으며 절단은 focusing된 빔을 사용하였다. 밀봉/절단 후에는 잔여 열응력에 의한 파열을 방지하기 위하여 열처리를 하였다.

중심단어 : 삼중수소, 자발광유리관, 레이저, 밀봉/절단

1. 서론

월성의 WTRF (Wolsung Tritium Removal Facility)에서 내년부터 매년 2.6×10^{16} Bq (7 MCi) 이상의 삼중수소가 생산될 예정이므로 이제 우리나라에서도 삼중수소를 활용하는 연구를 본격적으로 할 수 있게 되었다 [1]. 현재 우리나라는 삼중수소를 진량, 수입하여 37 MBq (1 mCi) 혹은 3.7×10^{10} Bq (1 Ci) 미만의 매우 적은 양으로 생물, 생화학, 농학 및 의약품 합성연구 등의 연구에 이용하고 있는 정도이고, 삼중수소의 활용에 관한 국내의 연구는 거의 전무한 상태이다[2-3]. 한편, 국외에서는 삼중수소를 생산하는 캐나다에서 이 분야에 대한 연구가 가장 활발히 진행 중이다. 캐나다의 Shield Source, SRB Technology, 미국의 Safety Light 그리고 유럽의 MTB Technologies, rc Tritec 및 남아프리카 공화국의 AEC 등에서 민수용과 군사용으로 삼중수소를 이용한 여러 가지 제품을 생산하는 등 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-7]. 한편 전력연구원에서는 2003년 9월부터 산자부 기반기금과제로 전원공급 및 유지보수가 필요없이 10년 이상 사용할 수 있는 삼중수소를 이용한 자체발광유리관 (Self-luminous Glass Tube, SLGT)을 개발하는 과제를 진행 중에 있다. 삼중수소를 이용한 SLGT는 크게 민수용과 군사용으로 그 활용방안을 나눌 수가 있으며, 소총 조준경, 독도경 등 군수분야에서 활용되고 있는 장비 및 화기는 총 40여종에 이르고 있으며 민수분야 또한 비상구 표시관 등의 여러 분야에 활용될 수 있다.

방사성물질인 삼중수소[8-9]는 붕괴하면서 베타입자를 방출하게 되는데 이러한 베타입자는 에너지 분포를 가진 전자군이어서 이 전자들이 코팅된 형광체와 충돌할 때 형광체에서 빛을 발하게 되므로 별도의 전원의 공급이 필요없는 SLGT를 제조할 수 있다. 이러한 SLGT 제조를 위해 유리관 내부에 코팅물질을 선정 및 코팅, 소성하는 조건을 찾는 유리관 코팅기술, 유리관에 삼중수소를 주입하는 제반사항에 대한 연구를 주로 하는 주입기술, 삼중수소를 주입한 후 밀봉 및 원하는 크기로 유리관을 절단하는 분야에 대한 연구를 하는 유리관 밀봉/절단 기술 및 이러한 삼중수소 주입 및 유리관의 절단시 삼중수소의 감시 및 회수에 관한 연구를 하는 삼중수소 취급기술의 4가지 핵심기술로 나뉘서 연구를 진행했다. 이미 본 학회에 유리관 코팅기술[10], 삼중수소 주입기술 및 취급기술[11-12]에 대해서는 이미 발표한 바 있고 이번에는 나머지 한 분야인 유리관 밀봉/절단 기술에 대해서 논의하고자 한다. 유리재료의 밀봉은 용융 및 용고과정에서 열응력에 의해서 파괴되거나 밀봉부위가 취약해지는 문제점이 발생할 수 있기 때문에 세심한 공정이 요구되는 기술로 현재 이 분야에서 신기술로 부각되고 있는 레이저를 이용하는 기술을 개발 중에 있다.

2. 본론

유리관의 밀봉/절단 기술을 개발하기 앞서 유리관의 재질, 구입방법 및 향후 품질관리 등을 고려해야 한다고 판단하여, 우선 목표로 하는 제품을 구입하여 전처리를 실시한 다음 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy)로 유리관의 성분분석을 통해 사용되고 있는 유리 종류를 파악하였다. 또한 성분분석을 통해 확인된 유리관을 구입한 다음, 여러 가지 물질실험을 실시하여 향후 구입할 유리관의 품질을 관리하고자 시도하였으며, 레이저를 이용한 밀봉 조건을 찾는데 있어 유리관 내부압력이 큰 영향을 미칠 것으로 예상되어 제조하고자 하는 제품에 대한 내부압력을 측정하였다. 이런 일련의 작업으로 결정된 유리관 사양을 바탕으로 적절한 레이저를 선택하였으며, 현재 거의 레이저 출력, 조사시간, 회전수 및 Defocusing Point 등을 변화시키면서 최적의 공정조건을 찾고자 시도하였다.

가. 유리관 성분분석

외국에서 시판 중인 자발광유리관을 사용한 제품을 구입하여 유리관 성분을 분석하였다. 이때 사용한 분석방법은 우선 boron 성분을 제외한 무기성분과 boron 성분을 각각 분석하였다. 우선 전처리 방법은 다음과 같으며, 각각 전처리 후의 시료 농도를 ICP-AES로 측정하였고, 결과를 표 1에 나타내었다.

- 1) 시료를 (1:1) 염산용액으로 유리관 내부 형광체 코팅물질을 용해한다.
- 2) 빈 유리관을 세척 후 건조한다.
- 3) 유리관 일부를 깨어서 막자사발에 넣고 분쇄한 다음, 105 °C로 조절된 오븐에서 40분간 건조한다 ⇒ 시료의 일부분을 혼산으로 녹인 다음, ICP로 boron 성분을 분석하였다.
- 4) 시료를 충분히 식힌 후, 미리 건조한 도가니에 약 0.3 g의 무게를 가한다.
- 5) 용제인 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 을 시료 무게의 약 3배를 가한 다음, 잘 섞는다.
- 6) 전기로의 온도를 1,050 °C로 조절한 다음, 약 40분간 용해한다.
- 7) 증류수 175 mL와 질산 10 mL을 가한 다음, 실온까지 식힌 도가니를 넣고 교반한다.
- 8) 모든 성분을 용해할 수 있도록 1~2시간 교반한 후 도가니는 꺼낸다.
- 9) 용액을 여과한다 ⇒ 여과한 용액으로 boron 성분을 제외한 무기성분을 ICP로 분석하였다.

실험결과, 향후 본 과제에서 만들고자 하는 SLGT의 유리성분은 borosilicate 유리인 pyrex 유리인 것으로 판단되었다. 레이저를 이용한 유리관 밀봉 및 절단 작업에는 가공이 쉽고 softening point가 높은 quartz 유리가 보다 유리하나 가격면에서 비싸고, 현재 시판 중인 제품이 모두 borosilicate 유리를 사용하였으므로 우리도 우선 borosilicate 유리를 사용하는 것으로 결정하였다.

나. 유리관 물성실험

소성공정에서 이상이 없다고 하는 것은 실제 소성공정에 투입하여 실험 (열적변형 등의 확인)을 해야 알 수 있다. 유리의 조성에 의해 광학적 특성, 열적특성이 다르게 되는데 만일 조성이 SLGT와 유사한 개념인 CCFL (냉음극용 형광램프)용 유리로 가장 널리 사용되고 있는 일본 NEG 유리와 유사한 것으로 보중한다면 특별히 문제가 없을 것이나 실제 소성공정에서 실험을 하지 않고 입증하기가 어렵다. 소성설비가 없는 상태에서는 실험실 전기로에서 온도를 약 600~650 °C까지 승온시켜 30분 정도 유지한 상태에서 냉각 후 변형유무를 체크하여 원형을 유지하고 있거나 혹은 변형이 되지 않았다면 실제 소성공정에서도 문제가 없을 것으로 생각된다.

유리관에 대해서는 우선 외경과 내경, 두께, 길이 등의 치수를 측정하여야 한다. 유리관을 부위별로 절단하여 측정해야 알 수 있으며, 절단시 다이아몬드 cutter 또는 줄을 사용하면 된다. 한편 일정한 길이로 절단하여 오는 경우 절단면의 단면상태가 중요하다. 절단면에 요철이나 크랙이 없으면 된다. 유리관은 직진성을 갖고 있어야 하는데 만곡도를 측정하기가 어려운데, 그 이유는 CCFL의 유리관은 가늘고 두께가 얇기 때문에 수평면에 놓았을 때 형상을 유지하지 못하고 직진성이 변하기 때문에 수평면에 그대로 놓았을 때 수평면에서 유리관까지의 거리를 측정하기 어렵기 때문이다. 따라서 확인하는 방법으로는 경사진 평면에 유리관을 위에서부터 아래로 굴러보면 많이 구부러져 있는 유리관의 경우는 회전하면서 굴러가기가 어렵거나 미끌리게 되나, 직진성이 좋은 유리관은 경사진 면을 내려갈 때 또르르 회전하면서 굴러가게 되는데 이 실험방법에 의해 직진성의 양품, 불량품을 판정하게 된다. 열적 변형실험 조건은 다음과 같다.

- 1) 전기로 : 박스형 전기로
- 2) 열처리 방법 : 4가지 유리관을 한 조로 하여 가로와 세로 방향으로 각 3개씩 열처리한다.
- 3) 육안 관찰 후 경사진 면에서 유리관을 굴러본다.

실험결과, 첫째 전반적으로 세로로 세워서 열처리한 유리관이 가로로 열처리한 유리관에 비해 변형이 더 심하게 나타났으며, 둘째 변형된 모양은 유리관경의 모양은 변형이 거의 일어나지 않

고, 중력 방향으로 변형이 일어났다. 따라서 소성시간이 길수록 가로로 공정을 진행하는 것이 바람직한 것으로 판단되었으며, 셋째 열처리 온도가 가능한 것은 630 °C이지만 안정적인 공정을 위해서는 630 °C 이하에서 가로로 공정을 진행하는 것이 바람직한 것으로 결론을 지었다.

다. 유리관 내부압력의 고려

목표로 하고 있는 2종류의 유리관의 내부압력은 0.24 atm과 0.53 atm으로 측정되었다. 유리관의 내부압력이 대기압보다 훨씬 낮은 압력을 고려한 실험을 실시하고 있다. 내부압력이 0.3 기압인 경우는 1.0 기압에 비하여 용융면이 안쪽으로 많이 들어가는 등의 문제가 발생할 수 있어 유리관 내부와 외부 사이의 압력 차이에 의한 유리 가공상태에 대해서 연구하였다.

라. 레이저 선택

유리관 재질을 borosilicate glass로 결정된 후, 가공 유리관의 물리적 특성을 조사하였다 (표 2 참조). 표 2의 유리관의 물리적 특성을 고려하면, 본 절단 및 밀봉공정에 적합한 레이저 파워는 표 3에 나타난 바와 같이 CO₂ 레이저, 100~300 W로 fracturing과 evaporation 파워의 중간 크기로 예상된다.

CO₂ 레이저 사양 검토 시 우선 가장 중요한 것은 레이저 출력 및 안정성이고, 다음이 가공 시 필요한 재료의 예열, 용융/절단, 밀봉, 후처리 공정에 적절한 레이저 출력의 프로그램 기능성이며, 그 외 지속적 A/S 및 레이저 장치기술 지원능력을 중점적으로 검토하였다. 그 결과 펄스형 레이저인 200 W의 출력을 낼 수 있는 Coherent사의 model K-200을 선택하였다.

펄스형 레이저를 이용한 본 기술개발은 광에너지가 물질 구성분자에 내부에너지 형태로 흡수되므로 경제적인 뿐만 아니라 주위로 열방사가 극히 미약하므로 공정이 단순해질 수 있고 원하는 작업부위를 선택적으로 처리할 수 있다. 또한 매우 짧은 시간의 펄스폭을 가지는 레이저를 사용하므로 주위의 열전달이 제한적이며 원하는 부분만을 순간적으로 용융하여 접합이 형성되므로 열에 영향을 받는 부분(heat affected zone, HAZ)이 줄어들고 공정속도도 빨라서 작업효율을 극대화할 수 있다. 또한 충전된 기체가 수소와 같이 폭발의 위험이 있거나 열에 의해서 후속반응이 우려되는 경우 세심한 공정이 요구되는 데 펄스형 레이저를 사용하면 내부 가스로의 열전달을 무시할 수 있기 때문에 그러한 문제점을 극복할 수 있다. 그 밖에도 레이저광을 이용한 공정의 장점은 렌즈나 거울 등 각종 광학기구를 이용해서 작업의 공간에 대한 유연성이 높으며, 요구되는 작업조건에 따라서 원격조정이 가능하므로 작업의 안전성을 기할 수 있다.

마. 밀봉/절단 공정

깨끗한 밀봉/절단면을 얻기 위해서는 유리관을 회전시켜야 한다. 하지만 유리관에 삼중수소를 주입하고 있는 상태에서는 유리관을 회전시키면 회전하는 부분과 고정된 부분의 경계에서 삼중수소의 누출이 일어날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2단계의 밀봉/절단공정을 개발하였다. 1단계에서는 삼중수소 공급시스템의 manifold에 한쪽 끝은 삽입되어 있고 다른 쪽 끝은 밀봉된 유리관을 설치하고 유리관의 회전 없이 삼중수소를 유리관 내에 주입하면서 밀봉/절단하여 양쪽 끝이 막힌 삼중수소가 봉입된 자발광유리관을 제작하게 된다. 2단계에서는 이 유리관을 2단계장치에 넣어 유리관을 회전시키면서 원하는 길이로 절단하게 된다. 2단계 장치에는 sensor 및 programmable motor가 있어 지정한 길이만큼 유리관을 이동시킬 수 있게 되어 있다. 또한 동기화된 회전 척(chuck)으로 유리관을 잡아 밀봉/절단되는 유리관의 양쪽이 완전히 분리될 때까지 동일한 속도로 회전하게 하여 밀봉/절단 시 용융된 유리관이 비틀리는 일이 없도록 되어 있다. 초점이 맞추어진 레이저를 사용하여 유리관을 조사하게 되면 용융된 유리가 바로 기화하여 날아가 버리게 되므로 용융된 유리를 사용하여 절단면을 밀봉하는 것이 불가능하다. 따라서 밀봉/절단 작업을 위해서는 적당히 레이저의

초점을 벗어나게 하여(defocusing) 유리관에 조사되는 레이저 빔의 크기를 키워 가열부위를 넓히고 가열속도를 늦추어야 한다.

1단계에서는 유리관을 회전시키지 않기 때문에 균일한 가열 및 용융이 되지 않아 조건을 찾기가 쉽지 않았다. 특히 관 내부와 외부의 압력차가 크면 용융된 유리관이 안쪽으로 빨려 들어가 밀봉이 되지 않고 구멍이 나는 현상이 발생하였다. 그림 1은 defocusing position을 45mm와 50mm로 하여 실험한 결과이다. 45mm인 경우 10초 이내에 밀봉되었으나 빔크기가 작아 가공 품질이 좋지 않았고 20초가 지나면 절단되었다. 50mm일 때는 15초에서 밀봉이 되는 것을 알 수 있었으나 가공단면은 안정적으로 밀봉되지 않았다. 그림 2는 레이저 출력에 따른 변화를 본 것으로 큰 차이는 나지 않았으나 가공 정도에서 출력이 높은 쪽이 좀 더 가공되어 있음을 알 수 있다. 또한 조사시간이 길수록 녹은 부분이 비대칭적으로 나타나는데 이는 유리관이 녹으면서 유리관 무게로 인하여 유리관이 아래로 처지게 되어 녹은 부분이 불규칙하게 되기 때문이다. 압력과 defocusing position(DP)을 변화시킬 때의 가공특성을 그림 3에 나타내었다. DP가 증가함에 따라 hole의 크기와 hole이 생성되는 시간이 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 압력이 낮을 수록 가공 시 유리관 내에 hole이 생기면서 충격파가 발생하는데 이로 인해 유리관내에 균열이 발생하여 가공 시 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

그림 4에 2단계 공정에서의 가공 특성을 표시했다. 그림에서 보듯이 내부 압력이 낮을수록 유리관의 밀봉은 빠르게 일어났다. 그리고 DP가 클수록 용융범위는 넓어지는 대신 용융깊이는 얕아지는 것으로 나타났다. 모든 실험조건에서 조사회수가 많을수록 용융면이 안으로 들어가는 깊이는 다소 얇게 나타났다. 이러한 현상은 계속적으로 조사하는 것보다 중간에 냉각기를 두는 것이 압력차에 의해 용융된 유리관이 내부로 밀려 들어가는 현상을 방지할 수 있는 것을 보여준다.

그런데 비정질체인 pyrex는 결정체인 수정(quartz)와는 달리 일정한 용융점이 없다. 따라서 수정에 비해 비교적 낮은 온도에서 녹기 시작하나 유리관이 용융되어 절단부위가 밀봉이 된 후에도 완전히 절단하기 위해서는 상당히 높은 온도와 시간이 걸리게 되는 것을 발견하였다. 이에 따라 밀봉조건과는 다른 조건으로 유리관을 절단해야만 하였다. 즉, 유리가 용착되어 밀봉된 후 용착부위를 초점을 맞춘 레이저 빔으로 강하게 scan을 하게 되면 열충격에 의한 fracturing으로 유리관을 절단하게 된다.

절단이 끝난 유리관을 후처리할 필요가 있는데 이는 밀봉/절단 시 HAZ의 열응력을 제거하고 날카로운 절단면을 매끄럽게 다듬는 역할을 하게 된다. 후처리가 되지 않은 유리관의 밀봉/절단 부위는 약한 충격에도 쉽게 깨어져 나갔으나 후처리가 된 유리관은 1m 이상의 높이에서 떨어뜨려도 깨어지지 않았다.

3. 결론

삼중수소를 사용하는 자발광유리관을 제조하는데 필요한 4가지 핵심기술 중 하나인 유리관 밀봉/절단 기술을 개발하였다. 기존의 torch를 사용하는 밀봉/절단 방법에 비하여 레이저를 사용하는 방법은 보다 깨끗하고 정밀한 절단면을 얻을 수 있고 대량생산을 위한 자동화가 가능하나 정확한 공정조건을 찾아내야 하는 어려움이 있다. 유리가공에 적절한 이산화탄소 레이저를 사용하여 자발광유리관의 밀봉/절단에 필요한 공정을 개발하였고 각 공정에 필요한 장치를 개발하였으며 각 공정에서의 운전절차(밀봉, 절단, 후처리 등)에 따른 적절한 운전 조건(레이저 조사 방법, 레이저 조사 강도, 조사 시간 등)을 찾아내었다.

참 고 문 헌

1. 손순환, 송규민 외, "삼중수소 제거기술 개발 (I) 제 1단계", TR96NJ18.J1998.45, KEPRI(1998).
2. 김위수, 손순환 외, "삼중수소 제거기술 개발 (I) 제 2단계 (최종보고서)", 96NJ18, KHNP(2002).

3. Caffarella, Thomas E., Radda, George J. and Dooly, Harry H, Jr., "Miniature Radioactive Light Source and Method of its Manufacture", US Patent, 4,213,052(1980).
4. 정홍석, 안도희 외, "삼중수소 자발광체 제조기술, KAERI/AR-411/94(1994).
5. Lasser, R., "Tritium and Helium-3 in Metals", Springer-Verlag, New York(1989).
6. McNair, Rhett C, "Self-luminous Light Source", US Patent, 4,990,804(1991).
7. Kim, W. S., Jung, Y. G., Kim, K., Lee, S. K. and Song, K. M., KEPRI Report, TM.00NP34, T2001.175(2001).
8. Sinclair, K. Warren, "Tritium in the Environment", NCRP Report, 62(1979).
9. W.T. Shmayda, A.G. Hejes and N.P. Kherani, "Comparison of uranium and zirconium cobalt for tritium storage", Journal of the Less-Common Metals, 162, 117-127(1990).
10. 김경숙, 김광신, 정은수, 손순환, "삼중수소 활용: 자발광유리관(SLGT) 제조기술", 한국방사성폐기물학회, 춘계학술발표회, 6. 23, 2004.
11. 김광신, 김경숙, 정은수, 손순환, 김위수, "삼중수소취급계통의 설계(II): 주입계통, 재생계통", 한국방사성폐기물학회, 추계학술발표회, 11. 27, 2003.
12. 김광신, 김경숙, 김위수, 손순환, 정은수, "삼중수소 취급계통의 설계", 한국방사성폐기물학회, 춘계학술발표회, 6. 20, 2003.

표 1. 유리 성분분석 결과

Sample	항목	단위	EXIT 제품	조준경 제품
1	Si as SiO ₂	Wt%	90.47	78.41
2	Al as Al ₂ O ₃	"	4.23	6.67
3	Na as Na ₂ O	"	3.11	1.33
4	Ca as CaO	"	0.00	0.19
5	B as B ₂ O ₃		2.06	2.73
6	K as K ₂ O	"	0.02	10.33
7	Mg as MgO	"	0.00	0.34
8	Zn as ZnO	"	0.00	0.00
9	Pb as PbO	"	0.10	0.00
10	Ti as TiO ₂	"	0.00	0.00
합 계			99.99	100

표 2. 가공 유리관의 물리적 특성

Glass Type	Density (25℃)	Young's Modulus	Specific Heat (25℃)	Coefficient of Linear Expansion	Softening Point	Melting Point
borosilicate glass	2.23 g/cm ³	5.98×10 ⁹ dynes/mm ²	0.17 cal/g℃	3.25×10 ⁻⁶ /℃ (0~300℃)	820℃	1,250℃

표 3. 레이저 유리절단 가공공정 특징

Process	Laser	Laser Power	장점/단점	비고
Cutting by Evaporation	CO ₂	10 ³ ~10 ⁴ W (1.86×10 ⁵ J/cm ³)	-roundness and softness of edges -higher laser power	
Cutting by Melting	"	100~300 W (3×10 ³ J/cm ³)	-roundness and softness of edges -lower laser power	본 연구 공정 예상
Cutting by Fracturing	"	100 CW	-lower power -need subsequent technological operation	

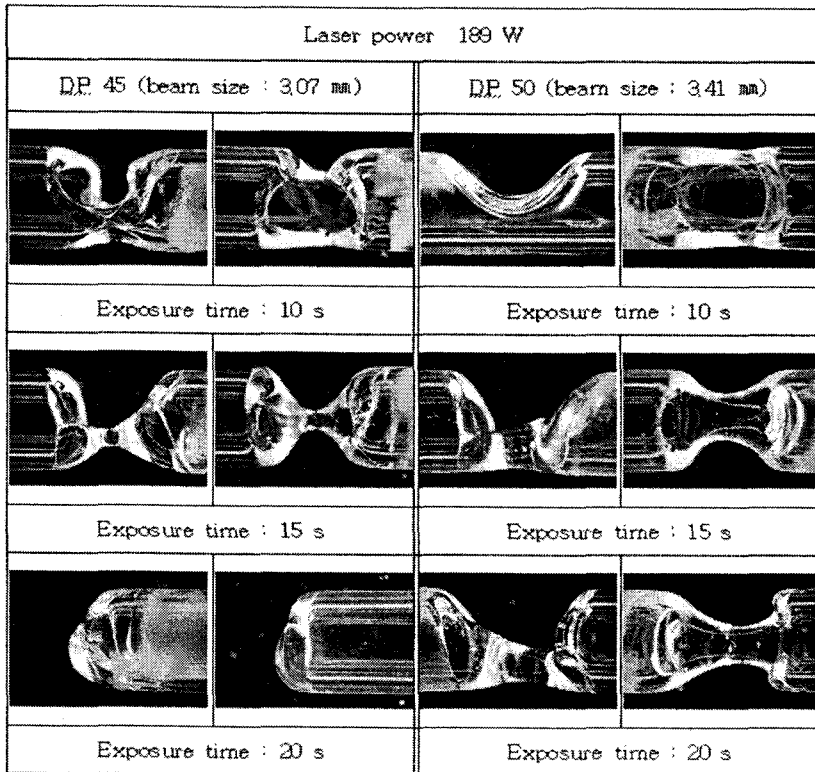


그림 1. Defocusing position에 대한 가공특성(1단계)

D.E : 50 mm (beam size : 3.41 mm)			
189 W		218 W	
Exposure time : 10 s		Exposure time : 10 s	
Exposure time : 15 s		Exposure time : 15 s	
Exposure time : 20 s		Exposure time : 20 s	

그림 2. Laser 출력에 대한 가공 특성(1단계)

Laser power : 161 W			
0.3기압 조사시간 : 1.63 s	0.5기압 조사시간 : 1.71 s	0.7기압 조사시간 : 1.79 s	0.9기압 조사시간 : 2.03 s
D.E : 80 mm			
0.3기압 조사시간 : 2.21 s	0.5기압 조사시간 : 2.3 s	0.7기압 조사시간 : 2.46 s	0.9기압 조사시간 : 2.77 s
D.E : 100 mm			
0.3기압 조사시간 : 8.94 s	0.5기압 조사시간 : 13.01 s	0.7기압 조사시간 : 17.93 s	0.9기압 조사시간 : 20 s
D.E : 110 mm			

그림 3. 외부와 내부 기압차에 대한 가공 특성(1단계)

조사수	DR(mm)	0.3기압	0.5기압	0.7기압	0.9기압
1회	39				
	40				
	41				
4회	39				
	40				
	41				
7회	39				
	40				
	41				

그림 4 2단계 공정에서의 가공특성