

Nd:YAG 레이저를 이용한 폴리머의 투과접합에서 열 유동 및 열 변형 해석

차 상 우* · 김 진 범** · 나 석 주**

*현대자동차 선형연구팀

**한국과학기술원 기계공학과

Numerical Analysis of Heat Flow and Thermal Deformation in Transmission Joining of Polymers Using Nd:YAG Laser

Sang-Woo Cha*, Jin-Beom Kim** and Suck-Joo Na**

*Advanced Technology & Analysis Team, Hyundai-Kia Motors, Gyeonggi, Korea

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

Abstract

Laser Transmission Joining (LTJ), which is a joining process of polymers by using different transmission rates of materials, was studied numerically. Unlike previous studies, energy loss by reflection at the surface was included. Besides, energy absorbed in the transparent substrate is also considered to increase the accuracy of the analytical results. Furthermore, thermal deformations of the substrates were also calculated.

Temperature distribution of the substrates on the joining process could be effectively predicted by using the thermal analysis model developed, which could also analyze the rising phenomenon of the absorbing substrate by bulge effect. Calculated results show that temperature of the absorbing substrate is higher than that of transparent substrate when the laser is being radiated, and this temperature difference causes more thermal deformation in absorbing substrate, which results in the surface rise of the absorbing substrate. Comparison of calculated results with corresponding experimental results could confirm the validity of the numerical analysis model proposed.

*Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received October 17, 2006)

Key Words : Laser joining, Transmission joining, Plastic joining, Acrylic, Numerical analysis

1. 서 론

지난 몇 년 동안 레이저를 이용한 접합은 플라스틱의 가공에 있어서 새로운 접합 방식으로 많은 연구가 진행되어 왔다. Nd:YAG 레이저와 파장이 800-1100nm 인 다이오드 레이저는 천연상태인 폴리머를 투과하는 성질을 가지고 있는데, 이러한 천연상태의 폴리머에 흡수제를 첨가하면 레이저 빔을 흡수할 수가 있고, 열을 발생시킬 수 있게 된다¹⁾. 근적외선 영역(800nm-1100nm)의 빛을 투과시키는 폴리머(투과성 재료)를 이 영역의 빛을 흡수하는 폴리머(흡수성 재료) 위에 겹쳐 놓은 후

에 투과성 재료에 레이저를 조사하면 투과성 재료에서는 대부분의 레이저는 흡수되지 못하고 투과하여 흡수성 재료의 상단부에서 레이저의 흡수가 이루어진다. 흡수된 레이저의 에너지는 열 에너지로 변환하여 이 에너지에 의해 흡수성 재료의 표면부터 용융이 일어난다. 이렇게 용융된 흡수성 재료는 열 팽창에 의해 상단부의 투과성 재료에 접촉하고 전도에 의해 에너지를 전달하여 흡수성 재료와 투과성 재료의 접합을 일으킨다^{1, 2)}. 레이저 투과접합은 레이저를 열원으로 사용하기 때문에 국부적인 가열(local heating)이 가능하며 투과 특성을 이용하므로 접합하고자 하는 두 재료의 경계면에만 열을 가할 수 있는 장점이 있다.

지금까지 투과 접합에서의 열 해석에서는 투과성 재료에는 아무런 열도 발생되지 않는 것으로 여기고 흡수성 재료인 하단부에만 열원을 부여하고 이 열원으로부터 투과성 재료인 상단부로 열이 전달되는 방식을 취하였다. 최근의 연구에서는³⁾ 두 재료의 경계면에서 반사되는 에너지를 고려하여 흡수성 재료에 흡수되는 레이저 에너지를 열원으로 하여 흡수성 재료의 온도를 계산하였으나, 투과성 재료의 온도 변화는 고려되지 않은 흡수성 재료만을 포함한 모델이었으며 계산이 1차원으로 수행되어 실제결과와 비교하는 데는 한계가 있었다.

이러한 열 해석에서 간과된 부분을 보완하기 위하여 투과성 재료에서도 일부 흡수되는 레이저 파워를 고려하여 투과성 재료의 두께에 걸쳐 균일한 흡수가 이루어진다는 가정을 둔 체적 가열 형태의 해석방식을 제시하였다. 또한, 각 표면에서 반사의 영향을 해석에 포함시켜 빔이 입사할 때에 반사에 의해 손실되는 부분을 고려하였다. 또한, 열 해석에서의 온도 변화를 이용해 열 변형해석을 수행하여, 그 결과를 실험 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다.

2. 열 해석

2.1 열원 모델링

빔의 진행거리에 따라 달라지는 빔의 반경을 고려하였다. 렌즈를 통해 초점을 이루는 초점평면 근처에서는 빔의 반경은 거의 일정하고 위상면은 거의 평행하다. 하지만 실제로 레이저 투과접합에 적용될 때에는 과도한 열의 집중을 막고 좀더 넓은 영역까지 접합을 이루기 위해 초점을 이룬 후 발산하는 영역에서의 빔의 강도분포가 필요하며, 해석에서 역시 이때의 반경식을 필요로 한다. 먼저 실험을 통해 초점 반경($r_{f0} \approx 0.5mm$)를 측정하고, 식 (1)을 통해 평행광이 유지되는 길이인 레이일리 길이(Rayleigh length: Z_r)를 구하여 식(2)를 통해 빔의 진행 거리에 대한 반경식($r_f(z)$)을 얻을 수 있으며⁴⁾, Fig. 1은 이에 대한 모식도이다.

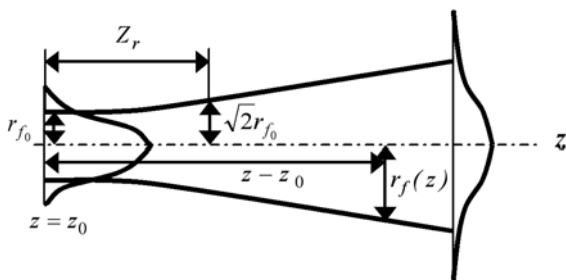


Fig. 1 Schematic of change of the radius

$$Z_r = 2r_{f0}F \quad (F: \text{F-number}) \quad (1)$$

$$r_f(z) = r_{f0} \left[1 + \left(\frac{z - z_0}{Z_r} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

다음으로 Fig. 2와 같이 두 재료의 표면에서의 반사 손실을 고려하였다. 재료의 표면은 이상적인 경면이라 가정하였으며, 경면인 경우 굴절지수 차이에 의한 경면 반사만이 존재한다. 투과성재료와 흡수성재료의 경계면에서 반사되는 빔(Fig. 2의 R_2)은 입사각에 대한 반사각을 계산하여 투과성 재료의 두께에 걸쳐 균일하게 작용하도록 체적가열 형식으로 열원에 부여하였다. 투과성 재료에 대하여 열원은 이전의 광학적 기초실험⁵⁾에서 측정되어 계산된 흡수율(A)을 투과성 재료의 두께(d)에 걸쳐 균일하게 체적가열 형태로 작용하도록 부여하였다 (Fig. 3). 또한 앞에서 설명한 바와 같이 열의 집중을 막고 넓은 면적에서 접합이 이루어지도록 초점평면에서 벗어난 평면에서 접합을 수행하기 때문에 이를 해석에서 고려하였다. 재료의 깊이에 대한 반경식 ($r_f(z)$)을 고려한 열원은 식 (3) 과 같다.

$$I(r,z) = \frac{2P_0A}{\pi r_{f0}^2 d} \left(\frac{r_{f0}}{r_f(z)} \right)^2 \exp\left(-\frac{2r^2}{r_f^2(z)}\right) \quad P_0: \text{레이저 출력 (W)} \quad (3)$$

흡수성 재료에서는 기존 논문⁶⁾의 해석방식과 같이 표면에 흡수계수를 고려한 표면가열 방법을 해석에 적용하였다. 이에 대한 열원은 식(4)와 같다. 식 (4)에서

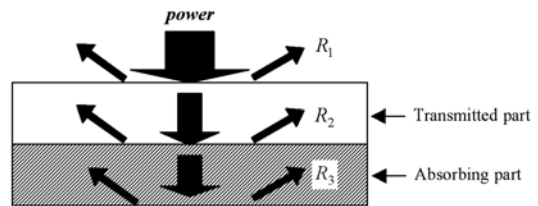


Fig. 2 Schematic of reflection loss on the surface

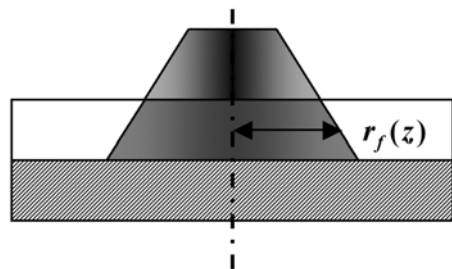


Fig. 3 Schematic of volume heating method

P_1 은 투과성 재료의 표면에서의 반사되는 부분과 투과성 재료에 의해 흡수된 부분을 제외한 레이저 출력이며, r_0 은 표면에서의 반경, α 는 흡수성 재료의 흡수계수, R 은 투과성재료와 흡수성재료의 경계면에서의 반사율이다.

$$I(r, z) = (1 - R) \frac{2P_1}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right) \exp(-\alpha z) \quad (4)$$

2.2 기하학적 모델링

점 용접에 대한 해석을 범용 해석 프로그램인 ABAQUS⁷⁾를 사용하여 투과성 재료에는 체적가열 방법의 열원을 부여하고, 흡수성 재료에는 표면가열 방법의 열원을 부여하여 해석을 수행하였다. 해석의 기하학적인 모델링은 추후에 이동열원으로의 확장을 고려하여 1/2을 모델링을 하였으며, 투과성, 흡수성 재료 모두 폭 10mm, 높이 2mm의 크기로 각각 모델링하고 적층 하였으며 두 재료 사이의 간격은 0으로 가정하였다. 그 밖의 조건은 실험조건과 같이 레이저 파워는 40, 50, 60, 70W로, 해석 시간은 1.0sec의 가열시간과 5.0sec의 냉각 시간을 설정하였다. 격자(mesh)는 각 재료마다 0.2mm의 높이로 균일하게 부여하였으며 폭 방향으로는 빔이 조사되는 부분의 정확한 해석을 위하여 중심부에서 세밀하게 나누었다. 격자의 형태는 ABAQUS의 C3D8H의 요소형태를 사용하였으며 사용된 총 요소는 69120개 이다. 해석에서 사용된 재료 역시 실험결과와 비교를 위해 실험과 동일한 재료로 설정하였으며, 이는 투과성 재료로서 광섬유의 성분비가 0%이며 흡수제를 첨가하지 않은 아크릴과 흡수성 재료로서 30%의 광섬유의 성분비를 가지는 오렌지 색의 아크릴이다. 해석을 위한 재료의 특성은 Table 1의 값을 사용하였다. Table 1의 값 중 열전도성, 비열 등은 온도에 따라 변

하는 비선형적인 값이다. 이때 사용한 흡수계수는 투과성 재료에서는 $\alpha_1 = 0.117mm^{-1}$, 흡수성 재료에서 $\alpha_2 = 0.782mm^{-1}$ 의 값으로서 이전의 투과율 측정실험⁵⁾을 통해 얻은 값을 사용하였다. 경계조건으로는 레이저 빔의 조사를 경계면 표면에 유입되는 열 유속으로 모델링하였고, 대기에 노출된 면과 상온의 대기 사이에 대류 열 전달 현상이 일어나는 것으로 하였다. 이에 대한 대류계수는 $h = 7.2W/m^2K$ 와 같다⁸⁾.

3. 열 해석 결과

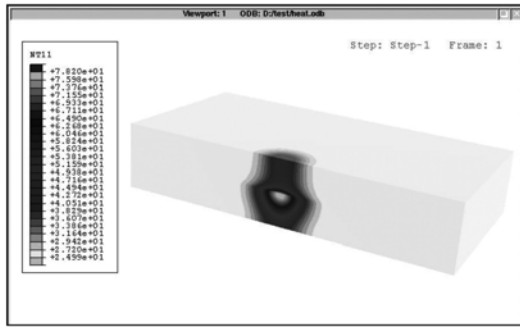
레이저 파워가 40W일 때에 대해서 해석한 시간에 따른 시편의 온도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 투과성 재료에 흡수율을 적용하여 열원을 부여하였기 때문에 재료의 상단부에도 가열초기부터 온도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이때 재료의 두께가 얇아 재료 내에서 빔 폭의 변화가 거의 없기 때문에 일정한 폭을 가지며 온도가 증가하였다. 가열단계에서는 열 영향부가 레이저 빔의 조사부분에 한정되어 좁은 영역에서 온도가 상승한다. 또한 레이저를 조사한지 1초가 지난 후에는 흡수성 재료뿐 아니라 투과성 재료의 아랫면, 즉 흡수성 재료와 접촉하고 있는 부분 역시 전도에 의해 온도가 용융점인 250℃ 이상으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 용융과 접합이 이루어지는 부분을 예상할 수 있다. 가열단계에서는 흡수성 재료인 하단부의 온도가 투과성 재료에 비해서 높은 것을 볼 수 있다. 즉, 하단부에서 용융점 이상으로 올라가는 부분이 상단부에 비해서 더 넓으며 이는 흡수성 재료가 레이저로부터 대부분의 에너지를 직접적으로 흡수하기 때문이다. 반면에 6초 후인 Fig. 4-(4)에서는 투과성 재료의 온도가 흡수성 재료의 온도보다 높은 것을 볼 수 있는데 이는 투과성 재료인 천연색의 아크릴이 광섬유가 첨가된 오렌지색의 아크릴에 비해서 열전도 계수와 비열이 낮기 때문인 것으로 사료된다.

4. 열 변형 해석

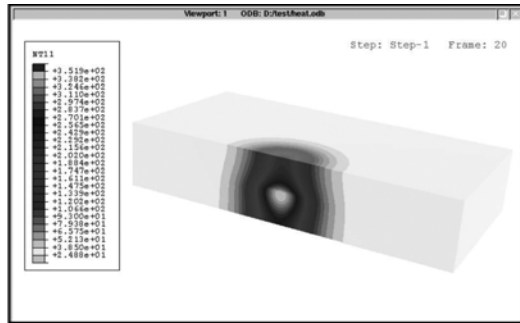
앞에서 수행한 열 해석을 바탕으로 열변형 해석을 수행하였다. 먼저 열 해석을 통해 각 시간에 따른 온도 분포의 데이터 값을 구한 다음에, 열 해석 때와 같은 기하학적인 모델링과 같은 형태의 격자를 통해 식 (5)와 같은 열팽창 율을 이용하여 각 요소의 변형율을 구한다. 식 (5)에서 온도의 변화량을 이용하면 변형율을 구할 수 있다. 이렇게 구한 변형 율을 통해 각 요소의 시간에 대한 열 변형 값을 구하는 sequentially coupled mechanical analysis를 사용하여 열 변형 해석을 수

Table 1 Material properties of acrylic

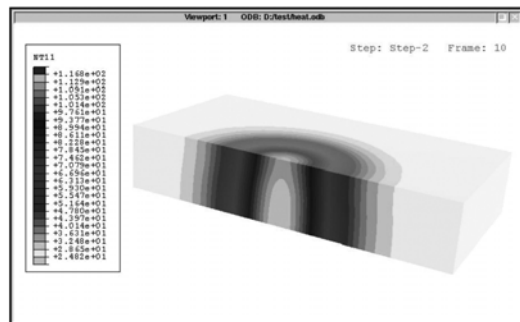
	Natural acrylic (G.F:0%)		Orange acrylic (G.F:30%)	
	열전도 계수 (W/mK)	20 ℃	0.14	20 ℃
	100 ℃	0.18	100 ℃	0.22
	200 ℃	0.20	200 ℃	0.21
비열 (J/kgK)	20 ℃	1450	20 ℃	1900
	100 ℃	1490	100 ℃	2000
	200 ℃	1475	200 ℃	1915
밀도 (kg/m3)	1090		1200	
용융점 (℃)	256		260	
굴절지수	1.23		1.45	
흡수계수(mm ⁻¹)	0.117		0.782	



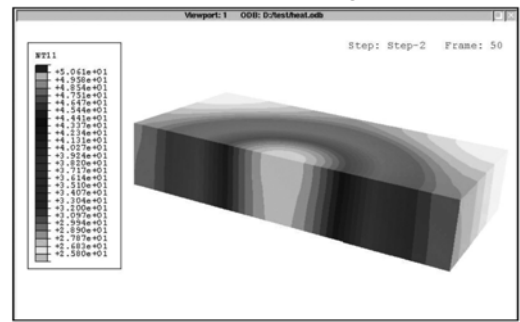
(1) 0.05 sec (heating)



(2) 1.0 sec (heating)



(3) 2.0 sec (cooling)



(4) 6.0 sec (cooling)

Fig. 4 Temperature distributions at various joining times

행하였다. 열 변형 해석에도 열 해석과 같은 범용 해석 프로그램인 ABAQUS가 사용되었다.

$$\epsilon_x^T = \epsilon_y^T = \epsilon_z^T = \alpha \Delta T \quad \alpha : \text{열팽창 계수 } (^\circ\text{C}^{-1}) \quad (5)$$

열 변형 해석을 위하여 사용한 재료의 특성은 Table 2와 같으며, 격자를 나눌 때 이용한 요소는 C3D8H 이다⁷⁾.

Table 2 Mechanical properties of acrylic

	Acrylic (두 종류의 Acrylic에 같은 물성치 적용)
Yield strength (MPa)	53.8
Tensile strength (MPa)	48.3
Modulus of Elasticity (GPa)	3.1
열팽창 계수($^\circ\text{C}^{-1}$)	90 162 ($\times 10^{-6}$)

5. 열 변형 해석 결과

레이저 출력이 40W이고 조사시간이 1초인 조건에 대한 열 변형 해석결과를 같은 조건의 실험결과와⁵⁾ 함께 Fig. 5에 제시하였다. 해석 결과에서 점선은 두 재료의 경계면을 의미하며 실선은 격자(mesh)를, 동일한 색으로 나타낸 분포도는 변형율을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 하단부의 열로 인한 팽창, 즉 일종의 불룩하게 오르는 효과(bulging effect)에 의해 하단부의 융기 현상이 발생하는 것을 해석결과를 통해 확인 할 수가 있으며, 이의 결과는 실험에서도 동일하게 관찰되었다. 이는 열 해석 결과에서 나타났던 것처럼 하단부의 온도가 상단부에 비해서 더 높을 뿐 아니라, 용융점 이상의 높은 온도까지 상승하는 부분 또한 상단부에 비해서 넓게 형성되어 변형이 크게 발생하였기 때문에 판단된다. 경계면에서 하단부가 불룩하게 오르는 동시에 아래쪽으로도 팽창한 것을 보여주는 해석결과가 이러한 판단을 뒷받침 한다. 실험결과에서 보여지는 기공(cavity)은 재료 내에서 발생된 일종의 수증기로 여겨진다⁹⁾.

레이저 파워 증가에 따른 레이저 빔이 조사된 중심에서의 경계면의 높이 변화를 측정된 결과는 Fig. 6과 같다. 조사되는 레이저 파워가 증가할수록 경계면이 상승하는 높이 역시 증가하는 것을 해석과 실험을 통해서 볼 수 있다. 이는 시편에 조사되는 레이저 파워가 증가할수록 경계면에서 상단부와 하단부 사이의 압력차이가 커진다는 것을 의미한다. 이것은 접합부 변형의 형성에 있어서, 흡수성 재료에 흡수된 레이저 빔 에너지가 전도에 의해서 투과성 재료에 흡수된 에너지보다 지배적인 영향을 미친다는 것을 나타낸다. 해석결과와 실험결

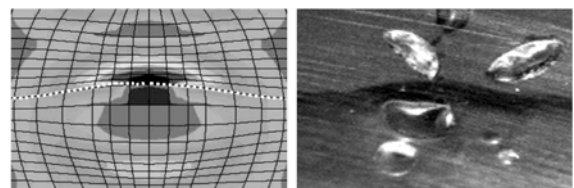


Fig. 5 Analytical and experimental result (laser power = 40W)

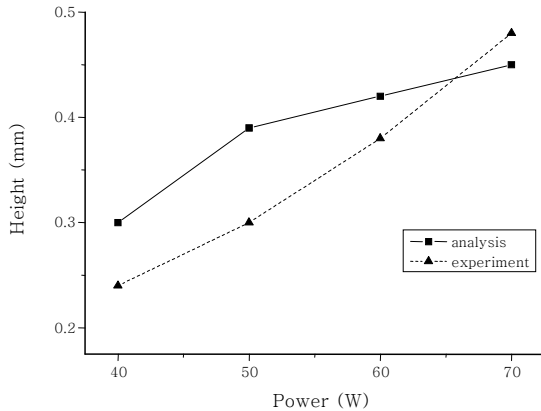


Fig. 6 Comparison of experimental and analytical result of thermal deformation

과가 비슷한 경향을 보이거나 그 값에 있어서 차이를 보이고 있는데 이는 재료 온도에 따른 기계적 성질을 고려하지 못한 것이 주된 원인으로 판단된다. 레이저 파워가 높은 영역에서 얻은 실험결과의 기울기가 해석결과의 기울기보다 더 큰 값을 갖는 것을 Fig. 6에서 볼 수 있다. 이는 수분이 증발해서 생기는 기공의 발생과 관련이 있는 것으로 사료된다. 레이저 파워가 높을수록 재료내의 수분 증발도 활발하게 일어나며, 이로 인해 하단부가 상승하는 정도도 역시 커지게 되나, 해석에서는 수분의 증발에 의한 기공의 발생을 고려하지 못했기 때문에 해석과 실험의 결과가 다른 경향을 나타내는 것으로 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서는 기초적인 광학적 실험 통해 얻은 재료의 광학적 특성을 이용하여 열 해석과 열 변형해석을 수행하였으며, 이를 통해 아크릴 재료에 대한 투과 접합 방식의 실제적 구현 가능성을 확인하였다. 또한, 기존의 열 해석에서 간과하였던 반사에 의한 영향을 고려하기 위하여 각 표면에서의 경면반사를 고려하였으며, 투과성 재료에서도 일부 흡수되는 레이저 파워를 고려하여 투과성 재료의 두께에 걸쳐 균일한 흡수가 이루어진다는 가정을 둔 체적가열 해석방식을 제시하였다. 이

러한 열 해석을 통하여 얻어진 온도 변화를 통해서 가열 초기부터 투과성 재료 내에서 일부의 열 흡수가 이루어짐을 확인할 수 있었다. 또한, 열 해석을 통해 얻은 온도변화를 이용해 열 변형해석을 수행하였다. 해석결과의 분석을 통해서 실험에서 발생하는 레이저 빔이 조사된 중심에서 시편이 불룩하게 오르는 효과(bulging effect)의 원인을 파악할 수 있었다. 이는 하단부와 상단부의 온도차이로 인해 열변형의 차이가 발생하고, 이로 인해 생긴 상단부와 하단부 사이의 압력 차가 일으킨 결과로 판단된다.

참 고 문 헌

1. B. Bryan: High Power Laser Transmission Welding of Plastics, *Assembly Automation*, **20-2**(2000), 136-139
2. O. Karger and G. Fiegler: Laser and Microwave Welding-The Applicability of New Process Principles, *Macromolecular Materials and Engineering*, **7-8** (2002), 734-744
3. J.-H. Kim and K.-H. Shin: Analysis of Transmission Infrared Laser Bonding for Polymer Micro Device, *Journal of the Korean Welding Society*, **23-5**(2005), 463-468
4. W. -S. Chang: A Study on the 3D Analysis of Micro-scale Deformation and the Laser Speckle Measurement in the Laser Precision Joining of Small Structure, Ph.D Thesis, KAIST (2000)
5. S.-W. Cha, J.-B. Kim, S.-H. Yoon, S.-J. Na: A Study on the Mechanical Properties of Joints in Laser Transmission Joining for Polymers, *Journal of the Korean Welding Society* (in preparation)
6. C. Luo and L. Lin: The application of nanosecond-pulsed laser welding technology in MEMS packaging with a shadow mask, *Sensors and Actuators A* **97/98** (2002), 398-404
7. ABAQUS Theory Manual, Version 6.2 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. Providence, RI (2001)
8. K. Sato, Y. Kurosaki, T. Saito: Laser Welding of Plastics Transparent to Near-infrared Radiation, *Proceedings of SPIE*, **4637**(2003), 528-536
9. H. Potente, F. Becker, G. Fiegler, J. Korte: Investigations towards Application of a New Technique on Laser Transmission Welding, *Welding in the World*, **45** (2001), 15-20