

## 초음파용접에 의한 열가소성 수지의 접합

박 준 부\*, 이 철 구\*\*, 서 성 원\*\*

### Joining of Thermoplastics by the Ultrasonic Welding

Joon-Boo Park\*, Chul-Ku Lee\*\*, Seong-Won Seo\*\*

#### Abstract

Joining of thermoplastics is an area of growing importance in the automotive, aerospace, electronics medical and other domestic appliance industries. While adhesive Bonding or mechanical fastening could be used to join thermoplastics, welding is very effective because of its speed and low cost.

This study investigated the ultrasonic joining of thermoplastics. Four kinds of thermoplastics such as Acrylonitrile Butadiene Styrene, Polystyrene, Polyethylene and Polypropylene were used, utilizing all possible joining combinations. In each combination of thermoplastics, the weldability of the joint was evaluated as a function of weld time, amplitude of vibration and pressure.

It was generally found that joining of amorphous thermoplastics with semicrystalline thermoplastics resulted in poor joints due to its different crystalline structure.

Joining of the amorphous thermoplastics together and joining of the semicrystalline thermoplastics together produced the best joints owing to its same crystalline structure.

#### 1. 서 론

열가소성 수지는 저렴한 가격으로 다량생산에 적합하고 성형이 용이하며 고도의 품질을 갖기 때문에 자동차 산업이나 항공, 조선 등 내식성이나 고강도등을 요구하는 부품산업에 많이 이용되고 있다. 지금까지의 열가소성 수지의 접합은 고온가스나 접착제를 이용하는 방법이 있겠으나 일반적으로 초음파 접합은 가장 신뢰성이 있는 접합법의 하나이다.

초음파 접합은 소진폭(0.0025-0.25), 고주파(20-40kHz) 진동을 이용하여 재료의 표면에 마찰열을 발생시켜 분자간의 접합을 이루게 한다.

그러므로 표면형상을 인공적으로 가공하는데 이를 에

너지 디렉터(energy director) 또는 에너지 컨센트레이터(energy concentrator)라 부른다.<sup>(1)</sup>

이 디렉터가 초음파에 의해 용융되어 두재료가 접합이 이루어지는 것이다.

이 에너지 디렉터는 삼각형이나 사각형으로 만드는데 용접물의 형상이나 구조에 따라 여러가지로 할 수 있다.<sup>(2)</sup> 이 에너지 디렉터는 초음파의 진동에 의해 용융되고 두모체를 서로 접합하게 된다. 또한 초음파를 이용한 접합은 니어필드(near field)와 파필드(far field) 접합으로 나누는데 니어필드(near field) 접합은 접합부와 혼(horn)사이의 거리가 6mm 이내를 말하며 파필드(far field) 접합이라 함은 6mm 이상을 말한다.<sup>(3)</sup>

최근 배관재료나 완구등에 많이 이용되는 열가소성

\* Dept. of welding engineering, The Ohio State University.

\*\* 서울산업대학, 기계공학과, 종신회원.

수지의 접합을 초음파를 이용해 접합하는데 목적을 두어 접합시간, 접합압력, 진폭, 에너지 등에 대해 조건별 실험을 실시하여 적정조건을 찾고, 이를 실제 응용하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 열에너지 계산

열가소성 수지의 접합은 분자간에 초음파의 진동을 통하여 열을 얻게 되고 이 열은 소재의 변형을 가져와 접합이 이루어지는데 접합성에 가장 큰 변수는 유동(flow)과 젖음(wetting)이다.

여기에 변형을 해석하는 모듈러스(modulus)는 재료에 부가되는 스토리지 모듈러스(storage modulus)와 흡수되어 감쇠되는 로스 모듈러스(loss modulus)가 있다.

$$\sigma^* = \sigma_0 \exp(i\omega t) = \sigma_0 [\cos(\omega t) + i\sigma_0 \sin(\omega t)] \quad (1)$$

$$\epsilon^* = \epsilon_0 \exp(i\omega t) = \epsilon_0 [\cos(\omega t) + i\epsilon_0 \sin(\omega t)] \quad (2)$$

여기서  $\sigma$ 는 응력,  $\epsilon$ 은 변형률,  $\omega$ 는 진동수이다.

$$E^* = \sigma^* / \epsilon^* = E' + iE'' \quad (3)$$

$E'$ 는 스토리지 모듈러스(storage modulus),  $E''$ 는 로스 모듈러스(loss modulus)이다. Fig. 2에서 삼각형의 에너지디렉터는 용융과정에서 (a)와 같이 변형되고 그 단면적은 대략  $\ell = 2h/3$ ,  $Y = 3X/4$ 로 구해진다. 그러므로 삼각형의 에너지디렉터(energy director)를 사각단면으로 고려해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma^* &= A\epsilon^*\ell + i\omega b\epsilon^*\ell \\ E' &= k\ell/A, \quad E'' = b\omega\ell/A \end{aligned} \quad (4)$$

$k$ 는 스프링 상수,  $b$ 는 감쇠계수,  $A$ 는 단면적이다.

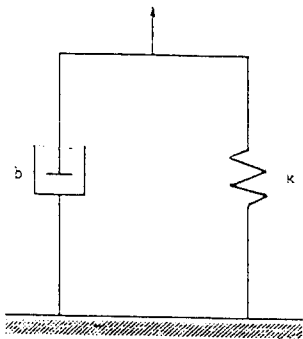


Fig. 1 Sketch of a Voigt-Kelven model

사이클당의 전일량을  $W$ 라 하고 변형율을  $\epsilon = \epsilon_0 \sin \omega t$ 로 나타내면

$$W = \int \sigma d\epsilon = \int \sigma \dot{\epsilon} dt \quad (5)$$

응력은 로스 모듈러스(loss modulus)와 탄성을 통한 변형을 관계에서

$$\sigma = E' \epsilon_0 \sin \omega t + E'' \epsilon_0 \cos \omega t \quad (6)$$

그러므로

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{2\pi/\omega} E' \epsilon_0 \sin \omega t (\epsilon_0 \omega \cos \omega t) dt \\ &+ \int_0^{2\pi/\omega} E'' \epsilon_0 \cos \omega t (\epsilon_0 \omega \cos \omega t) dt \end{aligned} \quad (7)$$

간단히 해서

$$W = 0 + \pi E'' \epsilon_0^2$$

여기서 스토리지 모듈러스(storage modulus)는 감쇠되지 않고 재료의 용융에 직접 영향을 주므로 단위 시간당 평균에너지 손실은

$$W_{avg} = W/2\pi/\omega = \omega \epsilon_0^2 E''/2 \quad (8)$$

$Q_{avg}$ : 평균에너지 손실  $W$ : 사이클당의 일량

$\epsilon_0$ : 스트레인 앰플리 튜드(strain amplitude)

$E''$ : 로스 모듈러스(loss modulus)

여기서 식(8)은 초음파를 발생시켜 모재에 전파되는 시간에 따른 에너지를 계산하는데 이용된다.

### 2.2 접합변수

초음파접합의 중요한 인자는 용융온도, 탄성계수, 결정구조 등 여러가지가 있지만 재질에 따른 접합시간, 압력, 진폭을 변수로 하여 적정 접합조건을 선정해야 한다.

본 연구에서는 접합시간과 접합압력, 진폭을 변화시켜 모재에 전달되는 에너지를 다르게 하므로 에너지 디렉터(energy director)가 용융되어 접합이 이루어지게 하였다.

Benatar<sup>1</sup>는 접합압력이 69-138kpa 범위에서는 압력이 증가 할수록 접합 강도가 향상되고 138-276kpa에서는 접합압력이 증가 할수록 접합강도가 떨어진다고 보고 하였으며 Cheng<sup>4</sup>은 접합시간 0.8초이상에서 접합강도가 향상된다고 보고하고 있다.

진폭은 에너지 전파에 관계되며 진폭이 클수록 열에너지가 발생하여 두 접합물간의 유동성을 향상시키므로 접합이 쉽게 이루어 진다.<sup>4</sup>

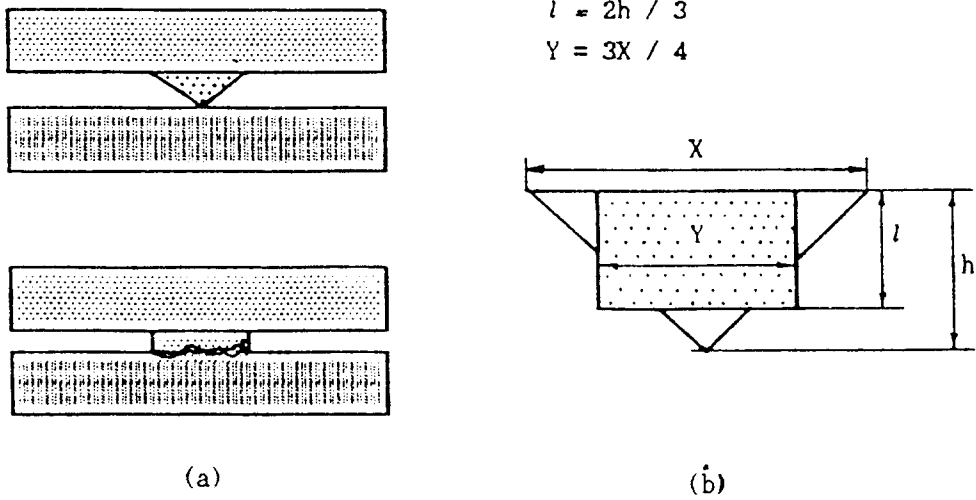


Fig. 2 A simplified geometry for the energy director

그러나 진폭을 너무 크게하면 용융부가 커져 벌지 (bulge)가 생기고 유동방향의 분자 연결이 약화되어 접합강도가 낮아진다.<sup>51</sup>

또한 점성재료의 에너지디렉터 (energy director)에 불충분한 진동은 모재가 용융온도에 도달하지 못해 유동 (flow)과 젖음 (wetting)이 부족하고 접합성이 저하된다고 알려졌다.<sup>41</sup>

### 2.3 다이내믹 모듈리의 측정

열가소성 수지의 에너지특성을 추정하기 위하여 다이내믹 모듈리 (dynamic moduli)의 측정이 필요하다.

한가지 방법으로 음파의 진폭과 전파속도를 측정하는 것인데 등방성재료에서 종파와 횡파의 속도로부터 가로방향의 스토리지 모듈리 (storage moduli)를 결정할 수가 있다.

$$G' = \rho V_1^2, \quad L' = \rho V_2^2 \quad (9)$$

$G'$ : 세로방향의 스토리지 모듈리 (storage modulus),  $\rho$ : 밀도

$L'$ : 가로방향의 스토리지 모듈리 (storage modulus),  $V_1$ : 종파속도

$V_2$ : 횡파속도

속도와 스토리지 모듈리 (storage moduli)의 관계에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E' = G'(3L' - 4G') / (L' - G') \quad (10)$$

인장 로스 모듈러스 (tensile loss modulus)와 스토리지 모듈러스 (storage modulus)는 인장 로스탄젠트 (tensile loss tangent)에 의한 관계로부터

$$\tan \delta_e = E'' / E' \quad (11)$$

$\tan \delta_e$ : 인장 로스탄젠트 (tensile loss tangent)

인장 로스탄젠트 (tensile loss tangent)는 종횡 스토리지 모듈리 (storage moduli)와 로스탄젠트 (loss tangent)로부터

$$\tan \delta_e = \tan \delta_e - G'L'(\tan \delta_e - \tan \delta_1) / (L' - G')(3L' - 4G') \quad (12)$$

$\delta_e$ : 세로 로스탄젠트 (loss tangent),  $\tan \delta_1$ : 가로 로스탄젠트 (loss tangent)

세로와 가로방향 로스탄젠트 (loss tangent)는 흡수계수와 속도로 부터 구한다.

예로서 두께가 다른 두개의 시편에서 가로 로스탄젠트 (loss tangent)는 다음과 같이 된다.

$$a_1 = 1/2(h_2 - h_1) \log e, A(h_1) / A(h_2) \quad (13)$$

$a_1$ : 가로방향 흡수계수,  $h$ : 두께,

$A(h_1)$ : 감소된 크기

또한 로스탄젠트 (loss tangent)는 다음과 같이 된다.

$$\tan \delta_1 = 2V_1 a_1 / \omega \quad (14)$$

그러므로 인장 스토리지 (tensile storage)와 로스 모듈러스 (loss modulus)는 식 (9)-(14)에서 종횡파의 속도와 감쇠를 사용해서 결정할 수가 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치와 재료

실험에 사용된 기자재는 음파의 속도를 측정하기 위해 Oscilloscope (Hewlett Packard 1743A)와 Pulse reciver (model #5052PR), Transducers (0.5, 1.0, 2.25, 5.0 MHz)를 사용하였다.

또한 진폭을 변동시키기 위해 Boosters (1 : 0.6, 1 : 1, 1 : 1.5, 1 : 2)를 사용하고, 실제 진폭을 알아보기 위해 Fotonic sensor (MTI 1000)를 이용하였다.

준비된 시편을 Ultrasonic welding machine (Branson 910M, 20KHz)으로 접합하여 접합강도를 Tensile tester (Instron 4204)를 사용하여 측정하였다.

실험에 사용된 열가소성 수지는 비결정조직 (amorphous)인 Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), Polypropylene (PS) 과 반결정조직 (Semicrystalline)인 Polyethylene (PE), Polypropylene (PP)를 조합하여 접합실험을 실시하였다.

Table 1. Mechanical properties of thermoplastics

Materials	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Density (kg / m <sup>3</sup> )
ABS	35	39	1035
PS	33	15	1030
PE	8.4	350	962
PP	28	17	894

#### 3.2 실험순서

재료의 용융온도에 영향을 주는 스토리지 모듈러스 (storage modulus, E')와 로스 모듈러스 (loss modulus, E'')을 알아보기 위하여 오실로스코프 (oscilloscope)와 탐촉자 (transducer)를 이용하여 모재에 대한 종파와 횡파의 음속과 감쇠를 측정하여 계산하였다.

마이크로메타를 이용해 실제 시험편의 두께를 측정하고 오실로스코프에 나타난 종파는  $V_l = 2d/t$ 이다. (Fig. 3 d : 거리, t : 두께)

감쇠계수는 오실로스코프의 처음 신호 (signal)를 A<sub>1</sub>, 두번째 신호 (signal)를 A<sub>2</sub>라 하면  $a = 20 \log (A_1 / A_2)$ 이며 이것은 로스탄젠트 (loss tangent),  $\tan \delta$ ,를 계산하는데 이용된다.

용접기에 사용된 혼 (horn)은 여러가지가 있으나 지수

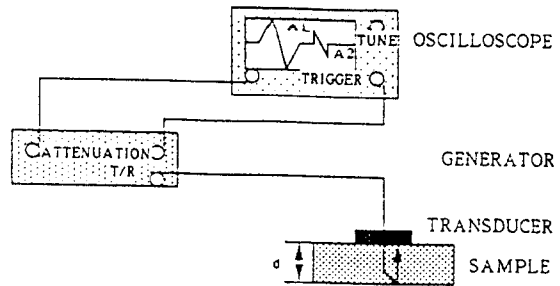


Fig. 3 Measure of sound velocity and attenuation

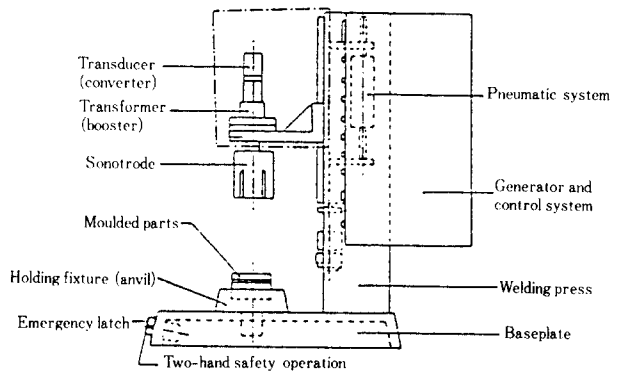


Fig. 4 Ultrasonic welder for plastics joining

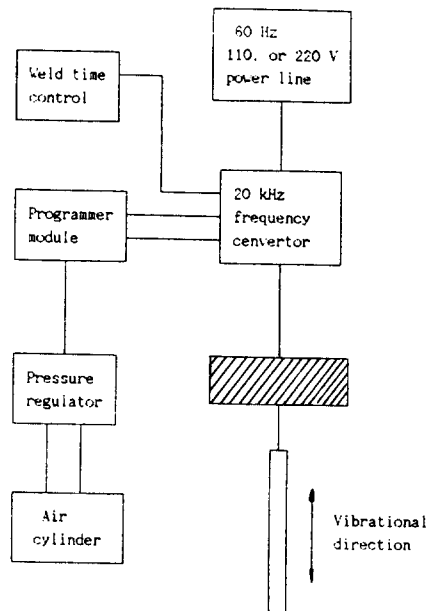


Fig. 5 Block diagram of ultrasonic welding system

함수형으로 알루미늄 혼(horn)을 제작하였다.

접합시간이나 접합압력, 정지시간 등은 컨트롤러에 내장된 타이머와 유압센서에 의해 정확히 조정되고 진폭은 부스터(booster)를 바꿈으로서 가능하였다. 실제진폭은 포토닉센서(fotonic sensor)를 이용해 측정 할 수 있었다. Fig. 4에 초음파 접합기와 Fig. 5에 이의 구성도를 보인다.

Fig. 6에 실험지그와 시험편의 형상을 보이는데 삼각형 에너지디렉터(energy director)는 각도를 60°로 하였다. 접합시간은 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0초로 하였으며 접합압력은 170, 240, 350, 420 kPa로 하였다. 진폭은 부스터에 따라 달라지는데 준비된 부스터의 단면비가 1:0.6, 1:1, 1:1.5, 1:2로 되어있어 진폭은 0.013, 0.026, 0.036, 0.048mm로 하였다.

지금까지의 연구자<sup>13)14)</sup>들에 의해 정지시간(hold time)은 3.0초, 트리거힘(trigger force)는 110N, 속도는 20cm/sec로 하였을 때 접합이 잘 이루어 졌음에 비추어 본 실험에서도 이를 택하였다.

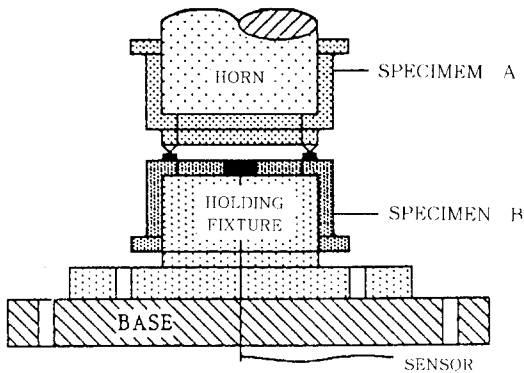


Fig. 6 Schematic of holding fixture and specimen

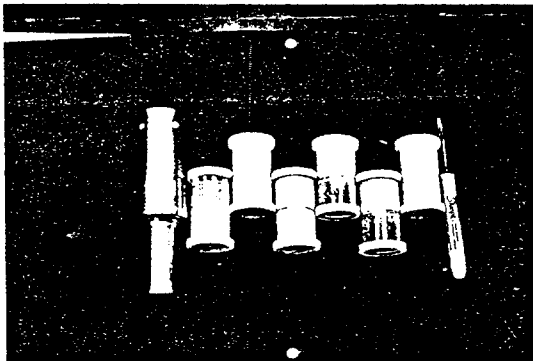


Photo.1 Shape of horn and specimen after joining

변형(collapse)된 크기는 접합후 마이크로미터로 측정하여 시험편의 접합전 길이에서 접합후 길이를 뺀 차이로 평균하여 얻었다.

Photo. 1은 접합된 시험편과 혼(horn)을 보인다.

각각의 시험편을 시험지그(testing fixture)를 사용하여 0.5cm/min로 만능시험기(instron 4204)를 사용해 인장시험을 하여 접합강도를 알아보았다.

#### 4. 실험결과와 고찰

##### 4.1 접합압력

압력은 두모재의 유동(flow)에 관계되는데 에너지디렉터(energy director)를 용융시켜 접합부의 접촉부를 넓게 하여 준다. 혼(horn)과 모재 사이의 접촉을 양호하게 하며 이것이 용융을 쉽게 한다. 용접기의 모델은 Fig.1에서 보는바와 같이 스프링과 댐퍼(damper)로 설명할 수 있으며 에너지디렉터(energy director)에 이 압력이 전달된다.

Fig. 7에서 변형(collapse)은 압력이 증가함에 따라 커짐을 볼 수 있으며 ABS, PS인 것은 큰 변형(collapse)을 가지며 PE, PP는 낮은 값을 보인다.

이 두조직에서 로스 모듈러스(loss modulus)가 큰 것은 큰 변형(collapse)을 가진다고 말할 수 있다. 변형이 너무 크면 재료의 손실과 접합강도가 저하되고 너무 작으면 접합이 이루어지지 않음으로 여기서 양호한 접합물을 얻기 위한 최적의 변형(collapse)을 실험적으로 고찰하였다.

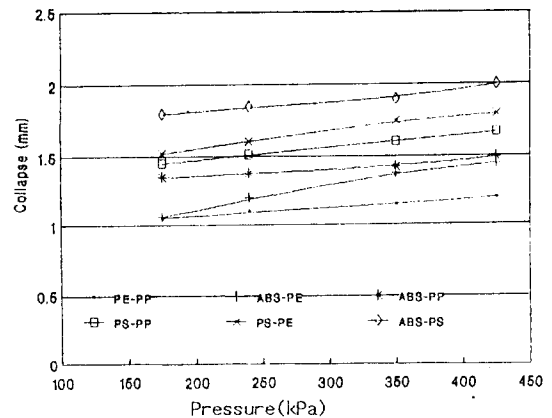


Fig. 7 Effect of weld pressure on collapse. (weld time : 2 sec, amplitude of vibration : 0.013mm)

압력은 강도에 복합으로 나타나는데 낮은 압력은 혼(horn)과 접합물간의 접촉과 에너지의 전파를 적게하여 불안정한 에너지디렉터(energy director)의 용융을 가져온다. 그러므로 Fig. 8에서 보는바와 같이 170kPa에서 350kPa까지는 강도가 약간 증가하나 너무 높은 압력은 초음파 진동으로 용융된 용융부가 접합부를 벗어나기 때문에 분자의 연결이 약화되어 강도가 떨어지는 것으로 나타난다. 그래서 일반적으로 열가소성 수지의 접합에서 접합압력은 350kPa 정도가 적당하다고 할 수 있다.

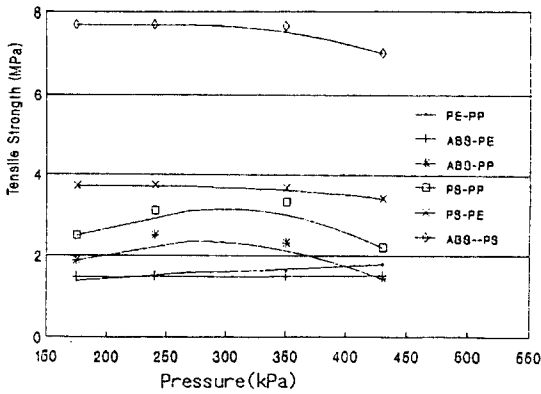


Fig. 8 Effect of weld pressure on strength. (weld time : 2 sec, amplitude of vibration : 0.013)

#### 4.2 접합시간

접합시간은 초음파 진동을 발생시키는 시간이다. 이동안은 거의 열로 플라스틱에 전파되는데 이 에너지 전파는 식(8)을 이용해 단위시간당 발생되는 열량을 계산하였다.

실제적으로 Fig. 9에서 보는바와 같이 열가소성 수지의 접합시간에 대한 에너지 발생은 시간의 증가함에 따라 증가하였고, Fig. 10에서는 접합시간에 따라 강도도 증가함을 보인다.

또한 Fig. 11에서 이중 열가소성 수지 ABS나 PS에서도 접합시간이 증가하면 변형(collapse)이 커지고 이는 에너지도 증가된다는 것을 보인다.

Fig. 12에서는 비결정조직인 ABS-PS, ABS-PE는 이론값과 일치하나 반결정조직에서는 상이함을 보였고 반결정조직이 이론치보다 더 많은 접합시간이 필요한 것으로 보인다.

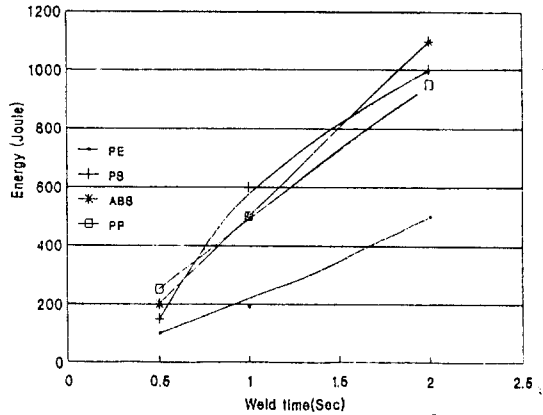


Fig. 9 Effect of weld time on energy. (weld pressure : 350kPa, amplitude of vibration : 0.026)

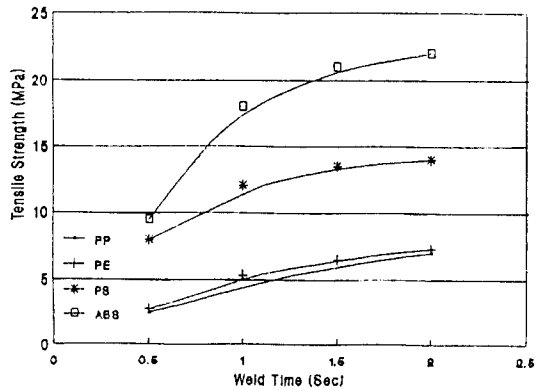


Fig. 10 Effect of weld time on strength. (weld pressure : 350kPa, amplitude of vibration : 0.026)

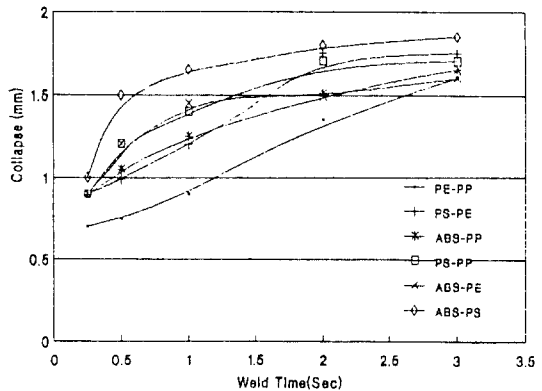


Fig. 11 Effect of weld time on collapse. (weld pressure : 350kPa, amplitude of vibration : 0.013)

Fig. 13과 Fig. 14에서 에너지 변화는 예상치와 비교적 잘 맞으며 에너지의 전파가 접합시간이 증가함에 따라 증가하였다. 이것은 로스 모듈러스(loss modulus)가 용융온도에 크게 관여하게 되고 에너지디렉터(energy director)의 용융이나 유동에 영향을 미친다고 볼 수 있다.

Fig. 15에서 보논바와 같이 2초 전에 급격한 강도변화가 있으며 2초 이상에서는 완만한 변화를 보인다. 이것은 Benatar<sup>[1]</sup>등이 보인 1.5초가 변곡점이라고 보인 것에 약간 상반된다. 그러나 접합시간은 접합강도에 영향을 주며 2초 전후가 적당한 것으로 사료된다.

#### 4.3 진 폭

서로 다른 진폭을 가지는 부스터(booster)를 이용해 ABS, PS, PE를 조합하여 접합해 보았다. 식(8)을 이용해 에너지 전파를 예상했고 이때의 진폭은 단면형상비가 1:1 부스터(booster)에서 진폭은 0.1로 했다.

Fig. 16에서 변형(collapse)은 대체로 진폭이 증가함에 따라 증가하고 Fig. 17에서 보논바와 같이 강도의 증가를 위해서는 에너지나 진폭을 증가해야 할 것으로 사료된다. 반결정조직인 PE나 PP는 비결정조직인 ABS나 PS보다 진폭의 영향이 커서 급격한 변화를 보인다. PE나 PP에서는 더 많은 에너지가 접합에 필요하다고 할 수 있다.

#### 4.4 조직관찰

Photo. 2는 비결정조직인 ABS와 PS를 접합시간 2초, 접합압력 350kPa, 진폭 0.013mm로 접합한 것이다. 여기서 보논바와 같이 같은 조직은 유동이 좋아 접합이 잘 이루어짐을 보인다. 이는 앞에서 고찰한 접합압력,

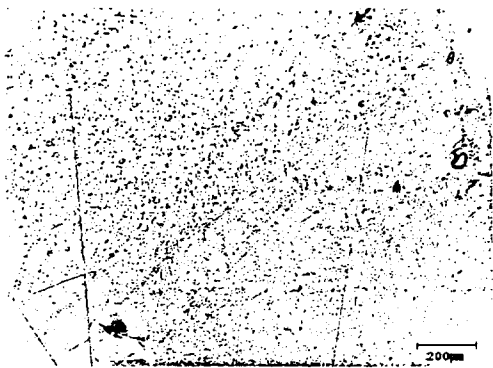


Photo. 2 Micrographs of weld interface (ABS-PS)

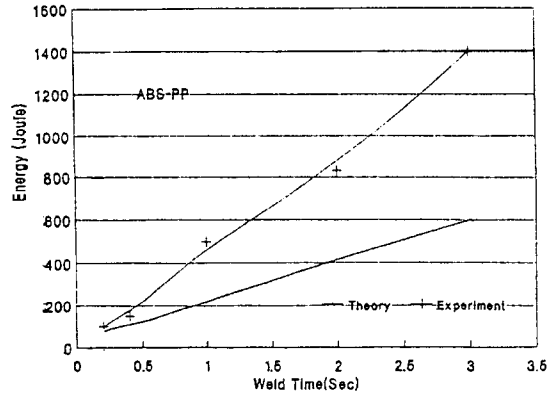


Fig. 12 Effect of weld time on energy. (weld pressure : 350kPa, amplitude of vibration : 0.013)

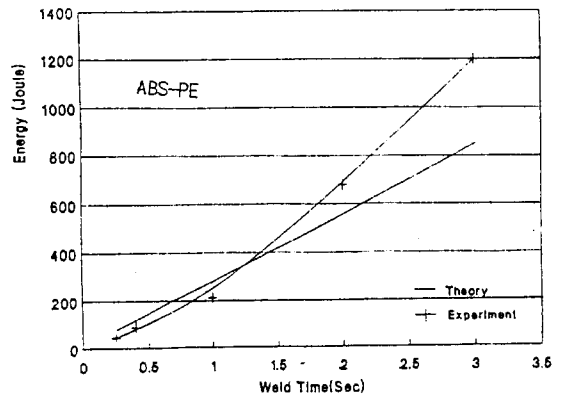


Fig. 13 Effect of weld time on energy. (weld pressure : 350kPa, amplitude of vibration : 0.013)

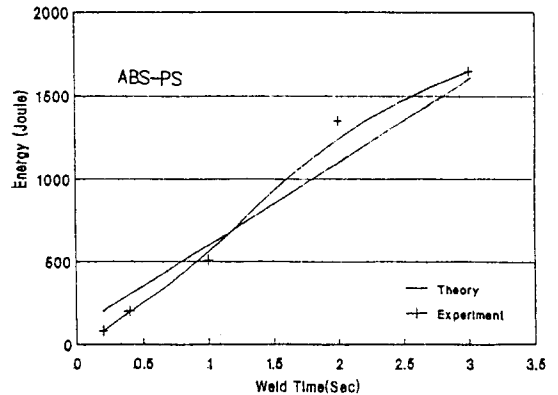


Fig. 14 Effect of weld time on energy. (weld pressure : 350kPa, amplitude of vibration : 0.013)

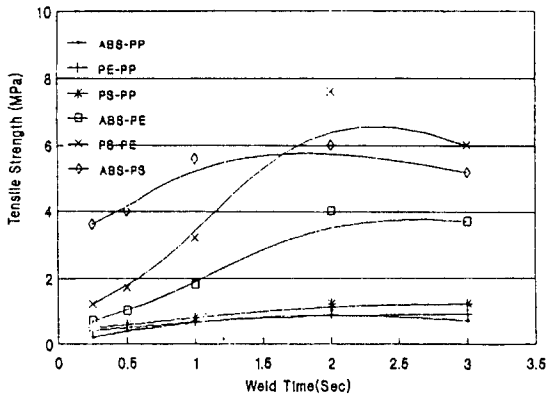


Fig. 15 Effect of weld time on strength. (weld pressure : 350kPa, amplitude of vibration : 0.013)

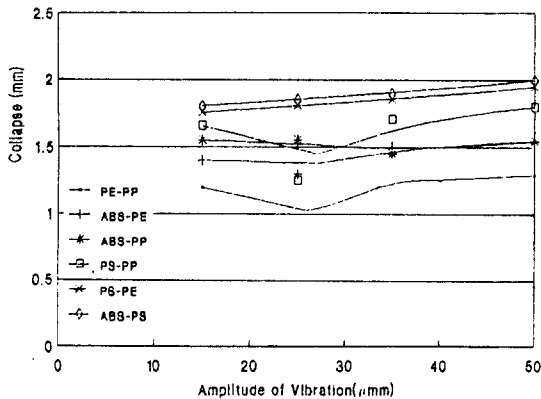


Fig. 16 Effect of amplitude of vibration on collapse. (weld time : sec, weld pressure : 350kPa)

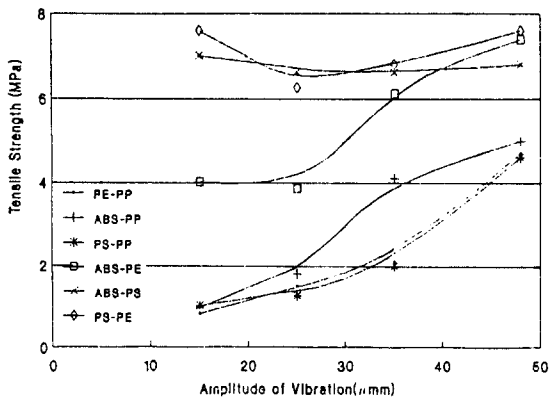


Fig. 17 Effect of amplitude of vibration on strength. (weld time : 2sec, weld pressure : 350kPa)

접합시간, 진폭등의 적정조건과 잘 일치한다고 할 수 있다.

## 5. 결론

초음파를 이용해 열가소성 수지를 접합하여 접합성을 향상시킬 수 있는 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재질이 같은 구조를 가진 열가소성 수지는 접합성이 우수하며 서로다른 구조를 가진 수지의 접합은 접합성이 좋지 않았다.
- 2) 접합압력의 증가는 접합강도를 증가시키나 너무크면 분자간의 결합력이 약화되므로 350kPa 정도가 적당한 것으로 사료된다.
- 3) 접합시간의 증가는 에너지 전파와 강도를 증가시키나 최적 접합시간은 2초 전후가 적당한 것으로 보인다.

## 참고문헌

- 1) A. Benatar, "Weldability of Thermoplastics", Proceeding of E. W. I., Edison Welding Institute, Columbus, OH., (1987) pp. 113
- 2) A. Benatar, "Ultrasonic Welding of Advanced Thermoplastics", Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA., (1987) pp. 81-165
- 3) A. Benatar, R. V. Eswaran, "Ultrasonic Welding of Thermoplastics in the Near-Field", Polymer Engineering and Science, Vol. 29, No. 23 (1989) pp. 1689-1698
- 4) Z. Cheng, "Far Field Ultrasonic Welding of Thermoplastics", Master Thesis, Dept. of Welding Engineering, The Ohio State University, Columbus, OH., (1988) pp. 14-137
- 5) M. N. Tolunay, P. R. Dawson, "Heating and Bonding Mechanisms in Ultrasonic Welding of Thermoplastics", Polymer Engineering and Science, Vol. 23, No. 13, (1983) pp. 726-733