

## Spot용접 접합면의 초음파 비파괴평가 기법 제 1보 C-scan 기법을 중심으로

박익근

천안공업전문대학 용접기술과

**요약** 초음파 C-scan 기법에 의해 스폿(spot)용접의 품질 평가를 위한 비파괴진단·평가에 관한 기초적인 실험적 검토를 하였다. 먼저, 스폿용접부 초음파탐상에 앞서 뉴우튼링의 모델링 실험을 통해 미소 간극을 갖는 접합계면에서의 초음파 반사 거동의 해석 결과를 근거로 스폿용접부의 너겟 형상과 크기, void 결합등의 정량적 평가와 corona bond의 정확한 식별에 최적한 초음파시험방법 및 조건의 설정을 시도하였다. 초음파시험 후 용접시험편을 절단하고, 그 절단면을 초음파현미경(SAM)과 광학현미경의 단면 관찰을 통해 스폿용접 품질 평가를 위한 초음파 비파괴평가법의 유용 가능성 유무, 적용 한계 등을 검토하였다. 그 결과 본 실험에 사용한 집속 초음파탐촉자(25MHz)에 의한 너겟 내부에 존재하는 void 크기의 검출한계는 10 $\mu$ m였으며 너겟 크기는 초음파시험의 경우가 최대 1mm정도 크게 측정되어 corona bond의 정확한 식별과 너겟 직경의 정량적 평가에 접근하기 위해서는 초음파 C-scan 데이터의 각종 화상 처리 기술의 적용에 의한 corona bond부의 명확한 식별 방법에 대한 연구 검토가 요망됨을 알 수 있었다.

### 1. 서 론

저항스폿(spot) 용접은 자동차, 항공기, 가정 전기용품 등의 공업 분야에 작업성이 높기 때문에 널리 이용되고 있다. 특히, 최근에는 생산성 향상을 위한 용접 작업의 급속한 로봇(robot)화·시스템화와 함께 이들 제품의 품질 평가를 위한 in-process 전수검사(全數檢査)가 가능한 비파괴검사 전문가 시스템(expert system)개발에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 그리고, 정밀부품이나 전자부품의 경우는 정밀화, 미세화와 함께 박판을 대상으로 하는 것이 많고 또, 그 접합부도 전극가압력과 용접열에 의한 변형·손상이나 품질·기능의 열화를 방지하기 위해 용접 조건이 더욱 제한되어 너겟(nugget : 용착부)

형상은 더욱 작아지는 경향에 있다.

이와 같은 스폿용접부의 접합 상태를 정량적으로 평가하는 것은 제품의 신뢰성 향상이나 품질관리적 측면에서 매우 중요한 과제가 되고 있다. 용접 품질 중에서 가장 중요한 인자인 용접강도를 파괴시험으로 실제의 강도를 측정하는 대신에 너겟 직경을 측정하는 방법이 유효하다는 것은 잘 알려진 사실이다.<sup>1)~3)</sup> 너겟 직경을 비파괴적으로 정확히 측정하게 되면 종래의 파괴시험(chisel or peel testing)에 소용되는 비용과 공정수를 대폭 줄일 수 있고 용접 품질을 한층 높일 수 있다. 이를 위해서는 너겟 접합계면 주위에 은밀히 존재하는 corona bond(너겟 주변에 ring형으로 생기는 고상 접합으로 접합 강도에 거의 기여하지 못하는 부분)부의 명확한 식별 방법

에 대한 연구 검토가 매우 중요한 과제가 된다.<sup>4)</sup>

지금까지 스폿용접의 품질에 결정적으로 영향을 미치는 너겟 직경을 비파괴적으로 평가할 수 있는 방법에 대한 연구 보고<sup>5),6)</sup>는 매우 적고, 대부분 단면관찰이나 박리시험등의 파괴검사에 의존하고 있다.

S. I. Rokhlin 등<sup>7)-9)</sup>은 스폿용접의 접합 상태를 Lamb파를 이용하여 평가하고 이 방법을 in-process 측정에 응용하여 너겟의 형성 과정도 조사하고 있다. 이 방법은 접합부를 통과하는 Lamb파를 스폿용접부로부터 떨어진 위치에서 송신, 수신용 2개의 탐촉자로 측정하는 간접적인 방법으로 voids나 corona bond등의 명확한 식별은 어려운 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 스폿용접의 품질 평가를 위한 In-process 전수검사가 가능한 초음파비파괴평가 전문가 시스템(expert system)개발에 필요한 품질보증 데이터를 확보하기 위해 집속초음파빔을 이용한 스폿용접부를 2차원 기계주사(mechanical scanning)와 전자주사(electronic scanning)하여 피검체 각 점에서의 초음파 반사와 투과 상황을 C-scan 화상으로 나타내어 스폿용접부의 너겟 형상과 크기, void 결합 등의 정량적 평가와 corona bond의 정확한 식별에 관한 기초적인 실험적 검토를 하였다.

스폿용접 접합계면에서 초음파의 반사 거동에 관한 모델링 실험에는 뉴우튼링을 사용하였으며, 이 해석 결과로부터 스폿용접의 품질감시장치의 역할을 수행할 수 있는 최적 초음파시험방법 및 조건의 설정을 시도하였다. 그리고 초음파시험 후 용접시험편을 절단하고, 그 절단면을 초음파현미경(SAM)과 광학현미경의 단면관찰을 통해 스폿용접 품질 평가를 위한 초음파 C-scan기법에 의한 비파괴평가 기법의 유용 가능성 유부, 적용 한계 등을 확인하였다.

2. 스폿용접 접합계면의 기초 검토

저항스폿(spot)용접의 원리는 용접할 금속판(피용접재)를 겹쳐 전극으로 가압하고 전류를 흐르게 하였을 때 용접부에 발생하는 줄(Joule)열과 전극부의 냉각 효과를 이용하여 단(短)시간에 피용접재

사이의 국소 부분만을 용융시켜 야금(冶金)적으로 너겟(nugget : 완전히 용착하여 강도가 확보되는 용착부)을 형성시켜 접합하는 매우 작업성이 높은 접합 방법이다.

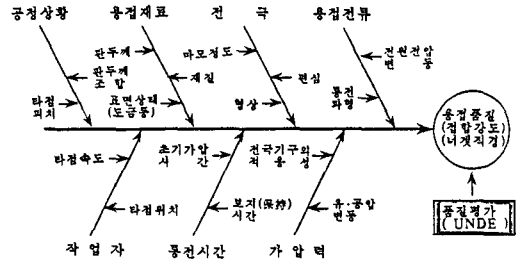


Fig. 1. Various factors concerned in spot weld quality

스폿용접 품질에 관여하는 요인과 기술요소는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 상당히 많으나 주로 용접전류, 통전시간, 가압력, 전극 등이 매우 중요한 인자임을 알 수 있다. 그 중에서 스폿용접 품질 평가에 결정적으로 영향을 미치는 용접 강도의 평가는 실제의 강도를 파괴시험으로 강도 측정을 하는 대신에 너겟 직경을 측정하는 방법이 유효하다. 결국, 스폿용접 제품의 품질보증(Quality Assurance : QA)의 향상과 최적 용접 조건의 신속한 결정등을 위해서는 너겟 직경을 정량적으로 측정할 수 있는 비파괴평가기법을 확립하는 일이다. 이것이 가능하면 지금까지의 파괴시험시에 소요되던 필요 이외의 비용과 공정수를 과감히 줄일 수 있다.

그러나 너겟 직경의 정량적 측정을 위해서 반드시

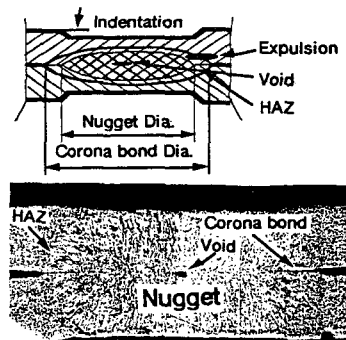


Fig. 2. Schematic illustration of spot weld cross section

시 해결되지 않으면 앞되는 첫째 과제가 Fig.2에서 쉽게 알 수 있듯이 너겟 접합 계면 주위에 은밀히 존재하는 링(ring)형의 고상 접합으로 접합 강도에 거의 기여를 하지 못하는 corona bond를 너겟부로부터 구별해 낼 수 있는 비파괴 계측기법을 확립하는 일이다.

3. 실험 장치 구성 및 실험 방법

3.1. 용접 실험

스폿용접시에 가장 먼저 고려되어야 하는 것은 판 두께에 따른 용접전류, 통전시간, 전극가압력, 그리고 전극팁(electrode tip) 선단(先端)형상 등의 최적 용접 조건을 설정하는 일이다. 대개 현장에서는 용접전류 이외의 조건은 AWS(American Welding Society)나 RWMA(Resistance Welder Manufacture Association)에서 제시하고 있는 용접 조건으로 설정한 후 용접전류의 변화만을 관찰해 가며 용접 제품의 품질관리(QC)를 하고 있다. 그 이유는 용접전류의 증감은 너겟 면적에 비례 관계가 있고, 너겟(용착부)면적은 스폿용접 품질에 결정적으로 영향을 미치는 인장전단강도에 거의 비례하는 상관관계를 갖기 때문에, 결국 용접전류의 변동은 용접 강도의 편차(deviation)에 가장 큰 영향을 미치게 된다는 것이다. 따라서, 재현성이 있는 용접, 즉 신뢰성이 있는 용접 제품을 확보하려면 용접시 용접전류의 변동에 의해 수반되는 너겟 면적의 변화를 real time으로 측정이 가능한 비파괴계측기법이 확립되면 현재, 생산성 향상과 용접 품질의 확보라는 측면에서 용접 타점(打點)수를 설계 기준의 2~3% 많이 하고 있고, 용접전류도 20% 정도 크게 하고 있는 문제를 해결할 수 있어 필요 이상의 증가여분타점을 없애고, 사용 전력·용접 공정수의 삭감 등을 유도할 수 있다.

이러한 문제점의 해결에 접근하기 위해 본 실험에 사용할 용접시험편의 제작은 제일 먼저 RWMA에서 제시하고 있는 용접 조건에 의해 용접전류, 전극가압력, 통전시간의 최적 조건(optimum condition) 상태에 가깝게 설정하고 2장 겹치기 이음 스폿용접하여 통전시 expulsion 발생의 유무와 용접부 외관 검사에 의해 최적 용접 조건의 적부를 판단하였다.

그 결과로부터 현재 현장에서 용접시 용접전류의 변동에 의해 수반되는 너겟 면적의 변화와 corona bond의 발생이 용이하도록 용접 조건을 설정하여 시험편을 채취하였다.

본 실험에 사용한 용접시험편은 현재 자동차 제조라인에서 판금부품으로 실제 많이 활용되고 있는 판 두께 1.6mm의 냉간압연강판(SPCC : 50×30mm)을 사용하였으며, 시험편 제작에 사용된 용접 조건은 Table 1과 같다.

용접 후 각 시험편에 대해 초음파탐상시험을 실시하고, 그 후 용접부 절단면을 초음파현미경(SAM)과 광학현미경의 단면 관찰에 의한 접합 상태를 조사하여 초음파시험 결과와 비교하였다.

Table 1. Welding condition

Specimen	Electrode force(kg)	Weld time (cycle)	Welding current(KA)
S11	360	16	11.5
S12			8.6
S13			8.0
S14			7.0
S21	400	16	13.0
S22	240		
S23	115		
S24	100		
S31	360	5	11.5
S32		10	
S33		30	
S34		52	

3.2. 접합계면에서 초음파의 반사 거동 해석

스폿용접 시험에 앞서 너겟 직경의 정량적 평가와 corona bond의 식별에 적합한 최적 시험 조건을 결정하기 위해 뉴우톤링(newton ring)에 의한 미소간극에서의 반사파의 발생 한계에 관한 실험을 시도하였다. 접합계면에서 초음파의 반사 거동 해석을 위한 접합계면 모델은 스폿용접부의 corona bond로 간주할 수 있는 뉴우톤링에 미소간극이 존재하는 간극계면 모델을 고려하였다.

실험에 사용한 뉴우톤링은 Fig. 3의 구조를 하며, 평행평판글라스(glass block : 50×50×5 mm)와 구

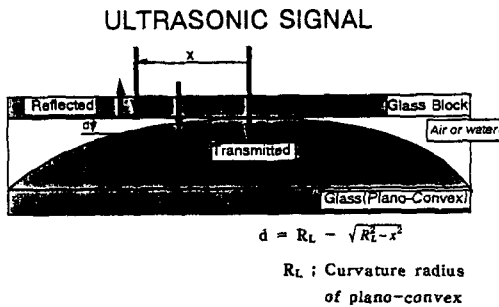


Fig. 3. Configuration of newton ring

면평(球面平)볼록렌즈(plano-convex : 곡률반경  $R_L = 460\text{mm}$ ) 모두 석영(石英)글라스(밀도  $\rho = 2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 음속  $c = 5420\text{m/s}$ , 음향임피던스  $Z = 14.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )이다.

Fig. 3에서 미소간극이 공기인 박리계면 모델의 경우는 공기 계면에서 완전 반사를 하며 반사파는 입사파에 대해 위상이  $180^\circ$  반전되고 진폭도 크기 때문에 위상의 판정이나 진폭 측정 등의 방법으로부터 접합과 박리 등의 계면해석이 가능하다. 이에 대해 미소간극에 물이 존재하는 간극계면 모델의 경우는 음파의 파장에 비해 미소간극이 작으면 반사파는 간섭파로 존재하고, 음압반사율(에코높이)는 미소간극의 크기와 초음파의 파장(주파수)에 따라 변화하게 된다.

본 실험에서 corona bond의 식별에 적합한 최적 시험 조건을 결정하기 위해 사용한 실험 장치는 기계주사(mechanical scanning)형 초음파탐사(探査)영상장치(AT 7000 : HITACHI)를 사용하였으며 Fig. 4은 그 개략도이다.

본 장치는 초음파탐상기, 점집속형탐촉자(frequency : 25 MHz, Dia. :  $D = 0.25"$ , focal length in water :  $F = 20\text{mm}$ ), 탐촉자를 주사하는 주사장치(scanner) 등으로 구성되어 있다.

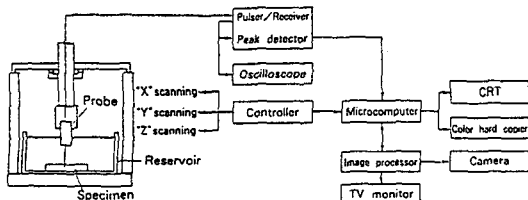


Fig. 4. Configuration of mechanical scan AT system

실험 방법으로는 오실로스코프상에 표면반사파와 분리되어 관측되는 다중반사파를 발생시키기 위해 X, Y, Z scanner controller에 의해 평행평판글라스의 저면에 초점을 설정하고 peak detector의 게이트를 걸어 게이트 내 신호의 peak값을 검출하고 이것을 A/D변환(12bit)하여 화상입출력장치의 메모리에 기억시키고 이 디지털값을 D/A변환기로 모니터 TV 상에 의사화상으로 나타낸다. 초점이 정확히 설정되면 scanner의 Z방향 위치를 일정하게 하고 X, Y방향으로 주사하면 접합계면 부분의 2차원 화상(C-scan image)을 얻을 수 있고 화상입출력장치(화상표시  $256 \times 240 \times 8\text{bit}$ )에 의한 휘도차를 이용하면 미소간극부분에서 반사파의 존재 유무를 알 수 있다. 그리고, 파형기억장치에 송신된 전기 신호는 GPIB를 거쳐 퍼스컴에 송신·기억되어 각종의 신호 해석을 하게 된다. 그리고, 미소간극부에서 반사파를 효율적으로 발생시키기 위한 수단으로 탐촉자 인가 펄스 변화와의 상관 관계를 조사하였다. 본 실험에서는 송신펄스전압을 350, 200, 50V로 변화시켜 가며 C-scan 화상에서 접촉부를 중심으로 나타나는 뉴우튼링의 동심원 크기를 관찰하였다.

### 3.4. 스폿용접부에서의 적용

뉴우튼링에 의해 최적 시험 조건이 결정되면 시험체만 스폿용접시험편으로 바꾸어 동일한 시험 방법에 의해 오실로스코프상에 표면반사파와 분리되어 관측되는 다중반사파를 발생시키고, X, Y, Z scan-

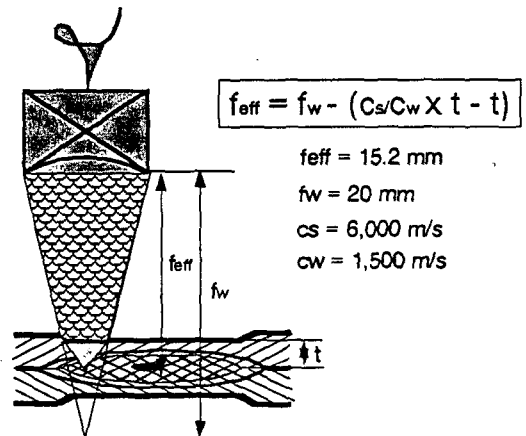


Fig. 5. Focus setting for  $B_1$  echo detection

ner controller에 의해 Fig. 5와 같이 피용접재의 경계면(상부시험편 저면반사파 : B<sub>1</sub> echo)에 초점을 설정하고, B<sub>1</sub> echo에 게이트를 걸어 뉴우튼링과 동일한 시험 방법으로 C-scan 화상을 얻고 스폿용접 접합계면의 비파괴평가·해석을 시도하였다.

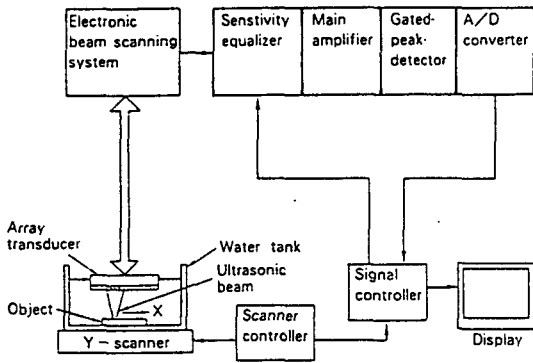


Fig. 6. Block diagram of electronic scan imaging system

Fig. 6은 스폿용접의 품질 평가를 위한 in-process 전자검사가 가능한 초음파 비파괴평가 전문가 시스템(expert system)개발에 필요한 품질보증 데이터 확보의 가능성 여부를 확인하기 위해 수행한 전자주사(電子走査 : electronic scanning)식 초음파 영상 장치의 개략도이다.

본 실험에서는 Fig. 6, Fig. 7에서와 같이 0.2mm pitch로 192 소자배열을 갖는 array탐촉자(frequency : 25MHz, focal length : 15mm)를 사용하고 이 내

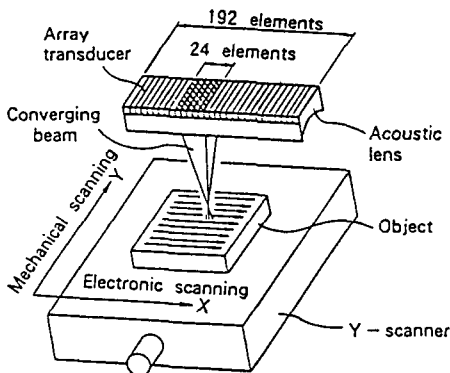


Fig. 7. C-scan mode with electronic beam scanning

부에 연속하는 24소자를 동시 여자소자수로 순차 선택하여 초음파빔의 송·수신 및 주사(scanning area 25×25mm)를 한다. Fig. 8은 array탐촉자의 외관을 나타내고 있다. 초음파빔의 집속은 array소자의 배열방향(X)은 전자적인 지연제어에 의해 집속을 하고, 이것과 직교하는 방향(Y)은 음향렌즈에 의한 집속을 각각 하여 집속빔을 형성시킨다. 전자주사시의 각 채널(channel)간에는 2-3dB의 감도차가 생기지만 equalizer회로에 의해 ±0.5dB이내로 평준화된다.

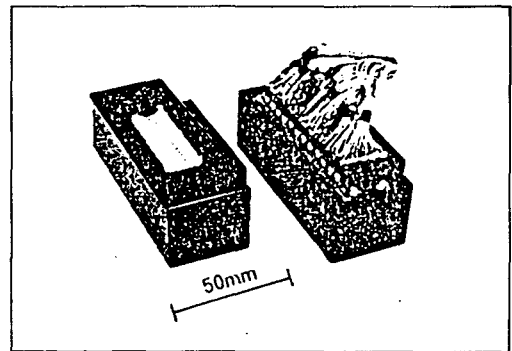


Fig. 8. Appearance of the array transducer

스폿용접 너겟 부분의 초음파 C-scan 화상을 얻기 위해서는 기계주사의 경우와 유사한 방법으로 X방향은 array탐촉자에 의한 전자주사, Y방향을 피검사체 이동에 의한 기계주사를 하고 Y방향의 일직선 이동과 함께 real time으로 C-scan 화상을 관찰해 가며 초점을 정확히 설정하고 C-scan 화상데이터를 채취한다. 전자주사탐상방법은 기계 주사의 경우에 비해 거리분해능이나 방위분해능 면에서는 탐상 결과가 다소 떨어지지만 주사속도가 기계적 주사(100 sec)보다 전자주사(0.8sec)가 월등히 빠른 장점을 가지고 있다.

Fig. 9는 초음파시험 후 시험 결과의 확인을 위해 시험편을 절단하고 그 절단면의 단면관찰을 위해 본 실험에 사용한 초음파현미경(Scanning Acoustic Microscope : SAM)의 개략도이다. SAM은 수십 MHz에서 GHz단위의, 고주파수의 음파를 시료에 조사하고 물질의 마이크로(micro)영역에서의 역학적 성질의 변화를 화상으로 표시하여 광이나 전자선의 도달이 불가능한 표면적하(subsurface)의 결함이나 조직 관찰이 가능하다.

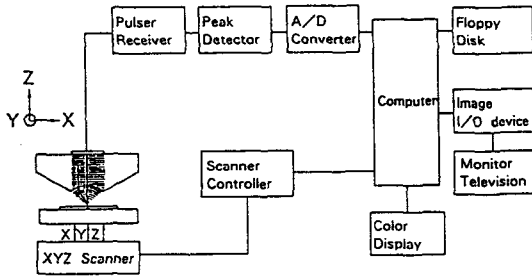


Fig. 9. Configuration of scanning acoustic microscopic system

본 실험에서는 음향렌즈의 재료로 사파이어를 사용한 초음파 탐촉자(frequency, 400MHz)를 사용하였으며, 광학현미경의 단면관찰 시험이 끝난 시험편을 먼저 시험체 표면에 초점을 설정한 후 주사시에는 시료 표면으로부터 20 $\mu$ m깊이에 최종 초점을 설정한후 X방향으로 1200 $\mu$ m pitch로 화상 데이터를 채취하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 10은 뉴우튼링의 미소간극부에 공기만 존재하는 경우의 초음파의 반사 거동 및 변위 해석을 위해 탐촉자 인가펄스전압의 변화에 의한 미소간극과 반사파 높이와의 상관 관계를 나타내고 있다. 탐촉자 인가펄스전압이 낮은 경우(50V)가 미소간극에서 초음파의 반사파 높이가 높게 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 탐촉자 인가펄스전압에 의해 생기는 초음파는 에너지를 가지며 매질내로 전파해 가면서 미소간극에 도달하면 매질의 입자는 변위를 하게 되고 그 변위의 정도는 탐촉자 인가펄스전압에 거의 비례관계를 갖기 때문이다. 따라서, 탐촉자 인가펄스전압이 높을수록 초음파 에너지에 의한 매질 입자의 변위가 커서 미소간극은 형성되지 않고 접촉해 버려서 초음파는 반사하지 못하고 쉽게 통과하기 때문이다.

이에 관한 결과는 Fig.11의 뉴우튼링의 C-scan 화상으로도 쉽게 관찰할 수 있다. 뉴우튼링의 평행평판글라스와 평볼록렌즈 계면에 간극이 0의 경우(접합부분)는 평행평판글라스와 평볼록렌즈의 재질이 같기 때문에 반사파는 존재하지 않고 통과파만 존

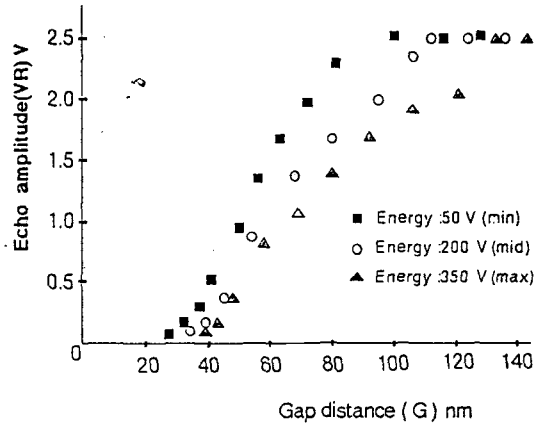


Fig. 10. Relationship between gap distance and echo amplitude

재하여 음압 반사율은 0이 된다. Fig. 11은 접촉점으로부터의 미소간극(gap)에 의한 반사파 높이를 C-scan 화상으로 나타낸 것이다. C-scan 화상에서 흰색 부분을 나타내는 면적이 접촉점으로부터 일정한 미소간극 크기까지 초음파 신호가 전부 통과하여 반사파가 존재하지 않는 부분이다. 이 부분이 스폿 용접의 경우에는 너겟으로 생각할 수 있고 이 부분의 면적과 실제 너겟의 면적이 정량적인 관계를 가질수 있는 최적 시험조건 및 방법의 설정이 중요하게 된다.

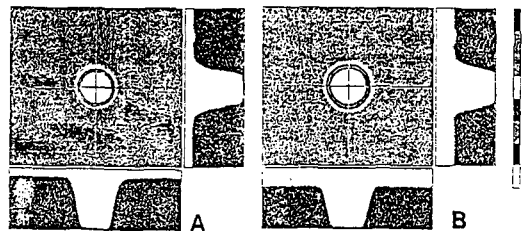


Fig. 11. Mechanical C-scan image of newton ring (a) 50V (b) 350V

그리고, 접촉점으로부터 멀어질수록 미소간극 크기가 증가하고 미소간극에 의한 반사파가 상쇄 또는 보강 간섭을 일으키는 일정 영역에서 진폭이 급격히 변화하며, 따라서 이에 상응하는 C-scan 화상은 동심원을 그리는 부분이 존재한다. 이 부분은 스폿 용접의 경우 corona bond로 생각할 수 있고 이 부분의 미소간극 크기부터는 반사파가 존재하기 때문

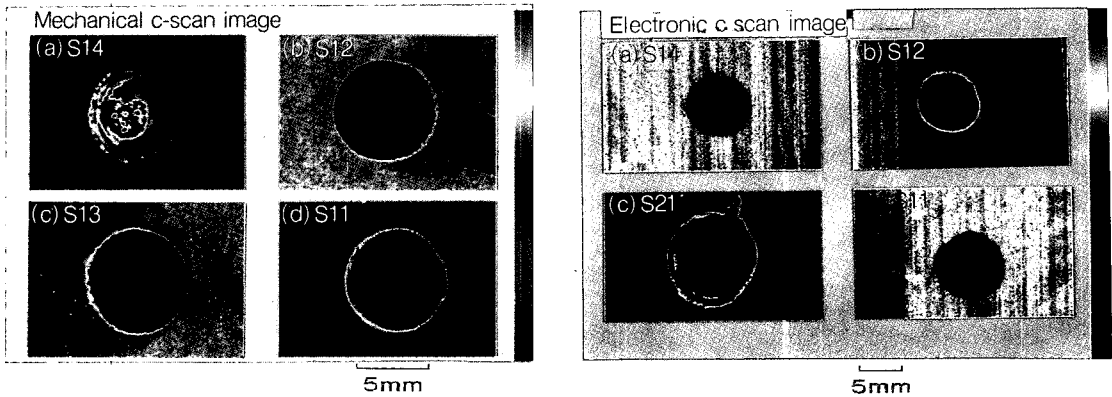


Fig. 12. Mechanical C-scan image of spot welds (a)S14 non-welded(7.0 KA), (b)S12, (c)S13 lack of bond at the edge of a weld made at insufficient welding current(8.0 KA), (c)S21 expulsion generated by oversupply of welding current(13 KA) (d)S11 well-bonded weld (10.3 KV)

에 초음파에 의한 정보를 활용할 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 탐촉자 인가펄스전압을 최대한 낮게 (50V)하고 C-scan 화상의 기준 echo level이 saturation되지 않는 범위내에서 수신부의 게인을 최대한 높게 하여 측정하는 것을 최적 시험조건으로 하였다.

Fig. 12는 뉴우튼링을 이용한 간극 모델 실험을 통해 결정된 최적 시험 조건과 방법으로 스폿용접부 시험편을 mechanical scanning로 얻은 C-scan 화상을 나타내고 있다. 이 C-scan 화상은 집속탐촉자로부터 송신된 초음파가 경계면이나 접합계면에서 반사하는 경우, 경계면의 접합저면에 초점이 정확히 설정되어 집속된 상태일 때 반사파는 가장 높은 echo level을 갖게된다. 즉, 반사파의 echo level(최대치 255에서 0까지)를 red→blue의 color contrast를 갖게 하고 이 중 너겟 부분은 반사파의 신호가 거의 존재하지 않기 때문에 echo level이 가장 낮은 blue color로 표시되고 비용착부와 void등은 echo level이 높은 red color로 표시된다. 또, 중간 정도의 echo level부분(green or yellow color)은 corona bond부로 추정할 수 있다.

(a)의 경우는 너겟은 거의 형성되지 않고 기계적 접합(mechanical contacts) 또는 미소한 접합이 점재(點在)하는 고상압접(固狀壓接 : solid state bond)상태인 부착층(corona bond)만 존재함을 알 수 있다. 이러한 경우는 용접조건이 전혀 맞지 않을 때, 즉,

전류를 일정하게 하고 전극가압력을 증대하든가, 아니면 전극가압력과 통전시간을 일정하게 하고 공급 전류가 매우 낮을 때 발생하는 패턴이다. (b)의 경우는 전류의 부족으로 인해 너겟 형성이 불충분하고 너겟 내부에 void가 존재하며 너겟 가장자리 부분 일부가 너겟이 형성되지 않아 corona bond로 추정되는 부분이 존재함을 알 수 있다. Mechanical scanning 화상에서 S13시험편의 경우는 corona bond 부가 상당히 넓게 형성된것을 알 수 있고, electronic scanning 화상에서 S21시험편의 경우는 용접전류의 과잉공급으로 expulsion이 발생한 예를 나타내고 있으며, (d)S11의 경우는 용접전류, 통전시간, 전극가압력등이 최적상태한 경우로 접합영역에 모재가 완전히 용융한 너겟이 형성된 것을 알 수 있다.

Fig. 12에서 electronic scanning에 의해 스폿용접부를 영상화한 C-scan 화상은 mechanical scanning의 경우와 거의 유사한 화상을 나타내고 있다. S14 시험편의 경우 기계식주사와 전자식주사화상의 형상이 상이한 이유는 주사시 시험편 위치의 방향이 일치하지 않았기 때문이며, S14, S11 시험편의 경우 용접부 주변의 색깔이 상이한 것은 시험조건 설정시 기계식 및 전자식 Array 탐촉자의 탐상감도가 다르기 때문이다. 이 electronic scanning에 의한 상(像)형성시간은 약 0.8sec로 real time으로 측정이 가능하여 앞으로 생산라인에서 용접로봇에 탐촉자

를 탑재하여 스폿용접 품질평가를 위한 초음파 비파괴평가 전문가시스템으로의 전환이 충분히 가능함을 알 수 있다.

초음파 C-scan 화상에 의해 스폿용접 품질평가에는 너겟의 형상판별, 너겟직경, void 및 expulsion의 존재 유무, corona bond부의 크기등의 관찰에 의한다. 그 중에서 용접 품질에 결정적으로 영향을 미치는 너겟 직경의 측정은 Fig. 13에서 echo level 분포와 C-scan 화상의 A-B 거리의 측정에 의하며, 스폿용접부의 접합 영역에는 모재가 완전히 용융하여 강도가 확보되는 너겟부와 너겟부 주변에 고상접합하여 접합 강도에 기여하지 못하는 기계적 접합인 corona bond부(cold bond, stick bond, kissing bond, solid state bond라고도 함)가 존재하여 건전한 스폿용접의 경우는 접합부는 너겟부와 극히 일부분의 corona bond부로 형성되지만 용접 입열이 적은 경우에는 너겟면적이 줄어들고 corona bond 또는 부착층의 영역이 넓어진다. Fig. 12에서 corona bond로 추정되는 접합 경계부는 너겟 부분에서부터 에코 높이가 증가 경향으로 변화하는 패턴을 가지고 이것은 접합 상태가 변하고 있음을 쉽게 알 수가 있다.

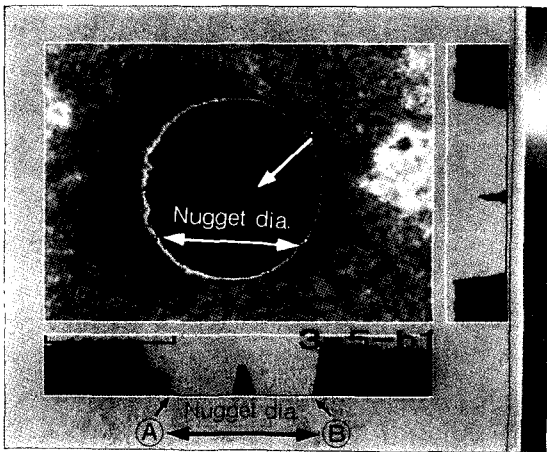


Fig. 13. Nugget diameter measurement and corona bond discrimination by C-scan image

Fig. 14와 Fig. 15는 mechanical scanning과 electronic scanning에 의한 초음파 측정을 한 후 용접시험편을 일정한 방향(Fig. 13의 A-A단면)으로 절단

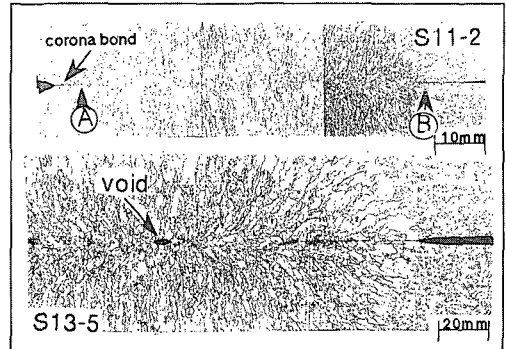


Fig. 14. Nugget diameter measurement and corona bond discrimination by optical photomicrographs of the weld cross section

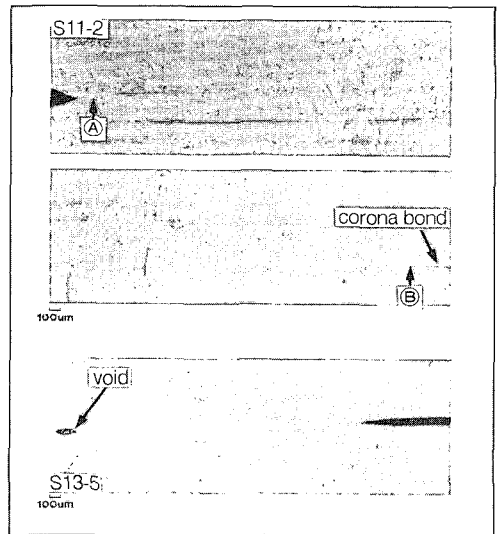


Fig. 15. Nugget diameter measurement and corona bond discrimination by SAM photomicrographs of the weld cross section

하고 절단면을 광학현미경(배율 50배, 400배)과 SAM에 의해 관찰한 조직 사진 결과이다. 그리고, 조직 사진에서 확인된 너겟 내부에 존재하는 void 부분은 Fig. 13의 echo level 분포에서 B<sub>1</sub> echo가 높게 나타나게 되고 C-scan 화상에서도 void의 존재를 쉽게 식별할 수 있으며 본 실험에 사용된 시험편에서 발생된 void 크기 측정의 검출한계는 마이크로메타가 부착된 광학현미경에 의한 확인 결과 10μm였다. 시험편에서 발생된 void의 존재를 쉽게 식별할 수



있으며 본 실험에 사용된 시험편에서 발생된 void 크기 측정의 검출한계는 마이크로메타가 부착된 광학현미경에 의한 확인 결과 10 $\mu$ m였다.

너겟크기의 측정은 corona bond부를 제외한 (A-B)의 거리측정에 의했으며, corona bond부의 일부에서 초음파가 통과하여 너겟 크기의 측정결과는 초음파시험의 결과가 크게 나타났다.

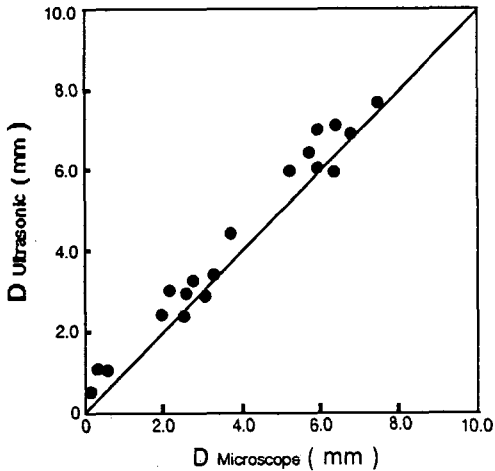


Fig. 16 Comparison of nugget size between ultrasonic testing and microscopic measurement of weld-cross section

Fig. 16은 각 시험편에 대해 너겟 크기와 corona bond부 식별을 위한 초음파시험결과와 절단면의 광학현미경과 SAM에 의한 조직 사진 결과의 비교를 나타내고 있다. 너겟 크기는 초음파 측정에 의한 경우가 조직 사진 관찰의 경우보다 최대 1mm정도 크게 측정되지만 양자는 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 이 비교측 정치가 정량적으로 정확히 일치하지 않는 이유는 너겟 경계부에 밀접히 존재하는 corona bond 부분의 일부에서 초음파가 통과함에 기인한다. 그리고 초음파 C-scan 화상에서 너겟주위의 가장자리 일부에 휘도의 차가 발생하는 부분은 거의 corona bond에 해당함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 스폿용접의 품질 평가를 위한 초

음파 비파괴평가기법의 유용 가능성 여부, 적용 한계 등에 관한 기초적인 실험적 검토를 하였다. 본 실험을 통해 얻어진 주된 결과는 다음과 같다.

- 1) 뉴우튼링을 이용한 간극 모델 실험 결과로부터 최적 시험 조건을 설정하였으며, mechanical scanning과 electronic scanning에 의한 C-scan 화상으로부터 너겟의 형성 상태, 크기, 너겟 내부에 존재하는 void, expulsion 등의 비파괴적 진단·평가가 가능하였다.
- 2) 초음파시험 후 용접시험편을 절단하여 그 절단면을 초음파현미경(SAM)과 광학현미경에 의한 단면 조직 관찰에 의한 측정 결과와 비교 확인하였으며, 그 결과 본 실험에 사용한 집속초음파 탐촉자(25MHz)에 의한 void 크기의 검출 한계는 10 $\mu$ m였으며, 너겟의 크기는 초음파시험의 경우가 최대 1mm정도 크게 측정이 되어 이 부분의 연구 검토가 계속 요망된다.
- 3) 초음파 C-scan 화상과 echo level 분포에서 너겟 주변의 가장자리 일부에 휘도의 차가 발생하는 부분은 corona bond부에 해당함을 알 수 있었으나 정량적 관계는 얻을 수 없었다. 그 이유는 너겟 경계부에 밀접히 존재하는 corona bond 부의 일부에서 초음파가 통과함에 기인하는 것으로 사료된다.

이상의 연구 결과로부터 제시된 앞으로의 연구 과제로는 corona bond의 정확한 식별과 너겟 직경의 정량적 평가에 접근하기 위한 초음파 C-scan 화상 데이터의 각종 화상 처리 기술(stretching, logarithmical scaling, threshold level에 의한 2차화상등)의 적용등에 관한 연구 검토가 요망된다. 이것이 실현되면 앞으로 개발 예정인 스폿용접 품질 평가를 위한 in-process 전수검사(全數檢査)가 가능한 비파괴검사 전문가 시스템(expert system)개발의 실용 데이터베이스(database)자료로 충분히 활용 가능할 것이다.

끝으로 이상의 연구 결과는 한국과학재단 지원 해외연구·연수 과제 내용의 일부로 본 연구에 협력하여주신 일본대학 생산공학부 화상·정보계연구실 山田 博章교수, 히타찌 기술연구소 첨단비파괴계측시스템 연구개발부의 佐佐木 壯二박사, 그리고 시험편의 제작에 적극 협력하여 주신 일본도요타자동차

차 계측연구부 연구원 여러분께 이 지면을 통해 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 小倉, 富田, “超音波によるスポット溶接部のナゲット寸法測定法”, 非破壊検査, 34-9A(1985), pp. 628~629
- 2) T. Adams, “Nondestructive Evaluation of Resistance Spot Welding Variables using Ultrasound,” *Welding Journal*, Vol. 64, No. 6 (1985) pp. 27~28
- 3) 里中 忍 他, “超音波によるスポット溶接部の品質評價”, 溶接學會論文集, 第 10 卷 第 4 號 (1992), pp. 39~46
- 4) Peter B. Nagy and Laszlo Adler, “Ultrasonic Evaluation of Solid-State Bonds” *Materials Evaluation*, Vol. 47, No. 7 (August 1989), pp. 935~943
- 5) 里中 忍 他, “畫像表示によるスポット溶接部の超音波測定”, 溶接學會論文集, 第 7 卷 第 3 號 (1989), pp. 112~116
- 6) F. Bendec, M. Peretz and S. I. Rokhlin, “Ultrasonic Lamb Wave Method for Sizing of Spot Welds”, *Ultrasonics* (March 1984), pp. 78~84
- 7) S. I. Rokhlin, R. S. Mayhan, and L. Adler, “On-Line Ultrasonic Lamb Wave Monitoring of Spot Welds,” *Materials Evaluation*, Vol. 43, No. 7 (June 1985), pp. 879~883
- 8) S. I. Rokhlin, S. Meng, and L. Adler, “In-process Ultrasonic Evaluation of Spot Welds,” *Materials Evaluation*, Vol. 47, No. 7 (August 1989), pp. 935~943
- 9) S. I. Rokhlin, and L. Adler, “Ultrasonic Evaluation of Spot Weld Quality,” *Welding Journal, Research Supplement*, Vol. 64, No. 7 (July 1985), pp. 191~200

## Ultrasonic C-scan Technique for Nondestructive Evaluation of Spot Weld Quality

Ik Gun Park

Cheon An National Technical College

**Abstract** This paper discusses the feasibility of ultrasonic C-scan technique for nondestructive evaluation of spot weld quality. Ultrasonic evaluation for spot weld quality was performed by immersion method with the mechanical and the electronic scanning of point-focussed ultrasonic beam(25 MHz). For the sake of the approach to the quantitative measurement of nugget diameter and the discrimination of the corona bond from nugget, preliminary infinitesimal gap experiment by newton ring is tried in order to set up the optimum ultrasonic test condition. Ultrasonic image data obtained were confirmed and compared by optical microscope and SAM(Scanning Acoustic Microscope) observation of the spot-weld cross section. The results show that the nugget diameter can be measured with the accuracy of 1.0mm, and voids included in nugget can be detected to 10 $\mu$ m extent with simplicity and accuracy. Finally, it was found that it is necessary to make a profound study of definite discrimination of corona bond from nugget and the approach of quantitative evaluation of nugget diameter by utilizing the various image processing techniques.

(Received : April 22, 1994)