

## 초음파 Retro-Reflection에 의한 대형 발전기용 C-Coil Brazed부의 비파괴적 평가

### Non-destructive Evaluation to Assess Leak of Bond in Brazed Large Generator " C" -Coil by Ultrasonic Retro-Reflection

성 운학, 양 병일, 김 정태

\* 두산중공업 기술연구원 소재개발연구팀

**ABSTRACT** One set of rotor coils is required per each large generator rotor assembly. Rotors consist of two directly opposing poles. Each pole requires from 5 to 9 coils. Each coil is made up of two halves identified on the connection end. These coil halves will be joined together by butt brazing process during subsequent rotor assembly. Each half coil is made up of typically 4 to 9 layers of copper conductors. Because of Generator rotor is rotated very high speed with 3,600RPM, the quality soundness of brazed joints is very important at each coil. But, it is very difficult to be optimized non-destructive evaluation, because c-coil has the long shape and evaluation is to be done assembled condition.

In this paper introduce newly developed inspection process and acceptance standards for the ultrasonic inspection of " C" coil butt braze. This inspection system is a semi-automatic ultrasonic flaw detector with data acquisition and retention capable of assessing the relative lack of bond of brazed butt joints

## 1. 서 론

화력 및 원자력 발전용으로 사용되고 있는 대형 발전기 로터는 두께 약 10mm의 Copper flat bar를 통전을 위한 전선으로 사용된다. 여기에 사용되는 Copper bar는 그 형상이 알파벳 "C"자 형상으로 되어 있어 현장에서는 통상 C-coil이라 불린다(이후 C-coil). 대칭형으로 1쌍의 C-coil은 고주파를 이용한 유도 브레이징으로 양쪽 끝단이 브레이징 되어 연결되며 이러한 C-coil의 브레이징 부위는 발전기 회전체가 약 3,600rpm 회전하면서 발생된 전기를 이송시키며, 515V의 전압이 흐르기 때문에 발전설비 특성상 높은 신뢰도를 요구한다. 미국 GE사의 Solomon<sup>[1,2]</sup>은 이미 초음파법으로 C-coil의 접합부를 평가한 결과에 대해 피로수명평가 시험과 통계적인 방법으로 비교 분석하여 적정 범위내의 비접합부 존재에 대한 설계수명의 기준을 설정한 바 있다. C-coil은 4~9층으로 조립되며 그 사이 사이에 절연체가 삽입되기 때문에 조립과정에서 접합된 브레이징부에 대한 신속하고 정확한

평가가 필수적이다. 최근 발전소 발전용량 증대로 기존의 C-coil 보다 두께와 폭이 증가하여 측정부위가 상대적으로 확대되는 추세이기 때문에 기존의 초음파에 의한 미접합부(Leak of bond)의 측정은 그 효율성 떨어진다. 본 연구에서는 초음파 Retro-Reflection 방법을 이용하여 C-coil의 브레이징부를 신속하고 정확하게 측정할 수 있는 방법을 제시한다.

## 2. Brazing

C-Coil의 브레이징 공정은 작업이 간편하고, 제품의 표면 손상을 최소화할 수 있도록 Induction을 이용하여 Butt 브레이징을 실시 하였다.

### 2.1 사용재료

Copper bar는 ASTM B48(Tough Pitch Copper with Silver, UNS C11300)로 주조시 Cu 중의 O<sub>2</sub>를 0.02~0.04% 정도를 잔류시키고, 8 oz/ton Ag이 함유된 동재료이며, H<sub>2</sub>의 함량을 저하시키고 As, Bi, Sb 등의 불순물을 산화시켜 전

기전도도와 전연성을 증가시킨 재료로 전기전도도 98% 이상으로 전기공업용으로 널리 사용되는 소재이다. 아닐링후의 표면 경도는 33~45(HRF) 범위이며, 열처리후의 표면 산화물은 완전히 제거된 상태로 사용하며 응력 집중을 피하기 위해 각 모서리는 굴곡 처리된 것을 사용하였다. 접합되는 Coil의 단면 사이즈는 가장 큰 것이  $W42.4 \times H10.46\text{mm}$ 이었으며, 전체 길이는 6,000mm이상의 것이 사용된다. 사용된 Filler metal은 AWS A5.8 Class BCuP-5(Cu-15%Ag-5%P)로 0.127mm 두께의 Foil 형상의 것을 접합부 단면적 크기에 맞게 절단하여 브레이징 직전 삽입하여 사용하였다.

### 2.2 브레이징 절차

C-coil의 접합을 위해 특별하게 제작된 60Kw용량의 Induction 가열장치를 이용하여 C-coil 상단 표면에서 수평 아래보기 위치로 Working coil을 아래로 누르면서 Butt 브레이징을 실시 하였다. 돌출된 2개의 Working coil 사이의 간격은 약 10mm로 그 가운데 Filler metal 이 삽입된 접합선을 위치시키고, 접촉되는 C-coil 상단 표면부는 산화와 손상을 최소화 하기 위해 운모판을 설치하였고, 접합부 하단에는 용융된 Filler metal이 아래층으로 흘러 내리지 못하도록 Stainless steel 판을 끼웠으며, Coil 양쪽은 Clamp로 조여 브레이징 동안 간극이 벌어지지 않고 브레이징 열에 의한 변형이 발생되지 않도록 하였다. 브레이징 온도는 약  $715^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  정도로 예상되나 브레이징 진행과정이 육안으로 관찰이 가능하기 때문에 Filler metal이 녹아서 접합부 밖으로 흘러 나오는 순간에 전원을 차단 시키는 방법으로 브레이징 시간과 시간과 온도를 결정 하였다. 브레이징 동안 모든 C-Coil과 Filler metal은 표면오염을 방지하기 위하여 면장갑으로 조심스럽게 다루었으며, 오일과 그리이스, 절삭유 등의 오염물은 Synasol 등의 용제로 제거하였고, 기타 산화물이나 표면오염물, 절단칩 등은 스테인레스강 와이어 브러쉬나 연마포를 이용하여 제거 하였다.

### 2.3 육안검사

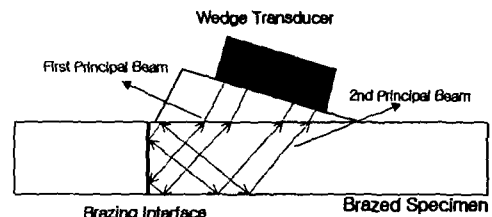
육안검사(Visual inspection)는 브레이징 후 접합선을 따라서 Filler metal 불연속부의 유무를 확인하는 것으로 필요 시 반사거울을 이용하였다.

## 3. 초음파를 이용한 평가

### 3.1 초음파 Retro-Reflection

초음파를 이용하여 브레이징 접합부의 건전성을 평가하기 위한 초음파 Wedge transducer의 배열을 Fig.1에 나타내었다.

Fig. 1. Schematic diagram of the double-beam wedge transducer used in contact



inspection of the brazed C-coil.

접합 경계면에 Transducer가 근접할 경우 초음파 Beam은 경계면 아래쪽에서만 초음파 신호가 반사되며 이 때를 기준으로 Transducer가 경계면에서 멀어져 위쪽의 초음파 신호 반사가 일어나는 1 Skip 거리( $s = d * \tan\theta$ )의 1/2지점에서 Fig.1과 같이 하나의 탐촉자를 사용하여 경계면의 위,아래에서 반사되는 두개의 신호를 얻을 수 있다.<sup>[3,4]</sup> Fig. 2는 이 때 얻어지는 초음파 A-scan 신호를 나타낸다. 이 위치에서 검사를 수행함으로써 한번의 검사로 경계면 위,아래면에 대한 평가가 가능하다.



Fig.2. A-scan screen with a well adjusted reference signal.

### 3.2 측정 시스템

Retro-reflection 초음파 검사 시스템의 개략도를 Fig.3에 나타내었다. 본 System은 초음파 발생용 Puler/Receiver와 8ch로 초음파 신호를 시분할(Time sharing)하기 위한 Multiplexer, 초음파 신호를 컴퓨터에서 처리하기 위한 A/D converter등으로 이루어져 있다.

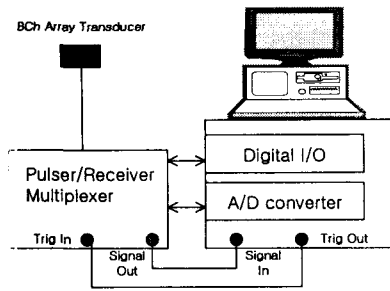
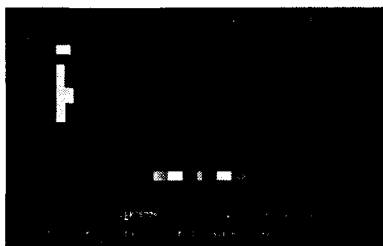


Fig.3. Schematic diagram of retro-reflection ultrasonic inspection system.

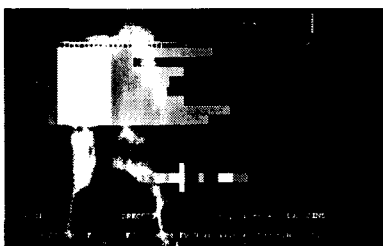
본 시스템은 C-coil의 위치별 건전성을 평가하기 위해 8ch Array 탐촉자를 사용하였고 경계 면의 위, 아래 면의 신호가 동일한 크기가 되는 위치에 신호의 최대 크기를 측정하기 위한 Gate를 설정하고 Flaw detector display 상에 8ch 각각에 대해 측정된 신호값을 막대형태로 나타나도록 하였다. 접합 전 경계면의 기준 초음파 감도를 100%로 하여 신호의 최대 높이를 막대의 길이로 나타나게 된다.

### 3.2 시험 결과

여러 시험편들에 대한 브레이징 용접 후 Retro-reflection 초음파 검사를 실시하고 이 시험편에 대해 굽힘시험 및 경계면 미세 조직을 관찰하였다. 경계면의 접합 상태에 따라 초음파 신호의 최대높이가 달라지며, 전면 또는 일부분에 위치한 결함의 종류에 따라 각 채널의 초음파 반사율이 다르게 나타나므로 결함의 정도를 쉽게 알 수 있다.



a) Uniformly good braze



b) Lack of bond

Fig.4. Flaw detector display for different degrees of LOB (Lack of bond)

완전 접합 시험편에 대한 초음파 반사 신호의 크기는 접합 전 경계면의 기준 초음파 감도 100% 대비 약 20% 미만의 신호높이를 나타내었다. Void 및 미 접합 부분에 대해서는 높은 초음파 신호 반사율을 나타내어 결함의 존재여부 및 접합정도를 정량적으로 판단할 수 있다. Fig.4는 접합이 잘 이루어진 시험편과 접합면에 결함이 존재하는 경우에 대한 초음파 검사 화면을 나타내고 있다.

여러 브레이징 용접 시험편에 대한 초음파 시험의 결과 20% 미만의 초음파 신호 반사율을 갖는 완전 접합의 시험편의 경우 굽힘 시험 시 파단이 일어나지 않았으며, 높은 신호반사율을 갖는 시험편의 경우 굽힘시험 후 파단이 일어났으며 경계면 조직 관찰에서도 결함이 검출되었다.

### 4. 결 론

화력 및 원자력 발전용으로 사용되고 있는 대형 발전기 로터의 C-coil 브레이징 용접부에 대해 초음파 Retro-reflection 방법을 이용하여 건전성 여부를 시험하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Retro-reflection방법에 의해 C-Coil 브레이징 용접부를 검사함으로써 기존 초음파 검사에 비해 간단한 측정으로 경계면 전면에 대한 평가가 가능하였다.
- 2) 8ch array transducer를 사용함으로써 한번의 검사로 위치별 결함의 존재 여부 및 접합정도의 판단이 가능하였다.
- 3) 완전 접합시험편의 초음파 신호 반사율은 약 20% 미만으로 나타나 접합의 건전성 여부를 판단하기 위한 기준값으로 사용 가능하였다.

### 참고문헌

1. H. D. Solomon : Statistical Analysis of the Fatigue Behavior of a Brazed Joint, GE R&D Center, Technical Information Series, 2000CRD097, Nov. 2000, Class 1,
2. H. D. Solomon, A Statistical Analysis of Brazed Joint Fatigue Behavior, Welding Research Supplement, June 2001. 148-157
3. Josef Krautkramer : Ultrasonic Testing of Materials, 4<sup>th</sup> Edition, Springer-Verlag, 1990
4. P. M. Morse : Theoretical Acoustics, McGraw Hill, 1968