

< 논문 >

## 브레이징 접합부의 강도평가 및 고장분석

강기원\* · 심희진\*\* · 이병재\*\* · 장경영\*\*\* · 김정규†

(2006년 4월 28일 접수, 2006년 7월 5일 심사완료)

### An Analysis for Failure Mechanisms and Strength Evaluation on Brazed Joint

Ki-Weon Kang, Hee-Jin Shim, Byung-Jei Lee, Kyung-Yung Jhang and Jung-Kyu Kim

**Key Words:** Brazed Joint(브레이징 접합부), Failure Mechanisms(고장기구), Finite Element Analysis(유한요소해석), Strength Evaluation(강도평가)

#### Abstract

The present paper is aiming at the evaluation for failure mechanisms and static strength of brazed joints used in household electronics. For these purposes, the failure analysis was performed on the various brazed joints, through the bursting, the micro-Vickers hardness tests and 3-dimensional X-ray technique. The failure modes of brazed joints were classified into two different types, based on the results of bursting pressure test by means of self-designed internal-pressure testing machine. Their failure mechanism was dependent on the relationship between heat effect occurred in manufacturing process and internal flaws such as incomplete penetration and pin hole. Also, a finite element analysis was performed to evaluate the stress distribution with respect to the heat and the internal flaws.

#### 1. 서 론

브레이징 공법은 열영향부의 감소 및 작업의 용이성 등의 장점으로 인하여 전자제품 및 냉동기기 등의 접합부에 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> 이의 적절한 적용을 위해서는 재질 특성, 강도 평가 및 해석 방법 등에 대한 지식이 요구되며 이들의 부족시 다양한 결함이 발생할 수 있고<sup>(2)</sup> 또한 이러한 결함은 외적 환경에 의하여 성장, 부품의 조기파손 또는 누설을 야기하여 전체 제품의 신뢰성을 크게 저하시킨다. 이의 방지를 위해서는 설계 초

기 단계에서부터 브레이징 공법에 대한 신뢰성 확보가 필수적이다.

그러나 브레이징 공법에 관한 기존의 연구<sup>(3-5)</sup> 들은 대부분 이의 성능 향상을 위한 공정 개선과 접합금속의 다양화 또는 이종재료간의 접합특성 등에 대한 연구에 치중하고 있다. 또한 이의 신뢰성 설계에 관한 연구<sup>(6,7)</sup>는 가속수명시험법 개발 및 비파괴검사기법을 활용한 내부 결함의 탐지 기법 개발에 집중되고 있으며 브레이징 접합부의 파손원인 분석 및 강도 평가 등에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 브레이징 공법을 적용한 전자부품의 신뢰성 설계기술 개발을 위한 연구의 일환으로 가정용 에어컨 열교환기의 주요 냉매 배관에 사용되는 브레이징 접합 동관을 대상으로 브레이징 접합 길이에 따른 강도평가 및 이의 최적 조건을 평가하였다. 또한, 브레이징 접합부의 파손기구는 유한요소해석을 수행하여 검토하였다.

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부  
E-mail : kimj@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2220-0442 FAX : (02)2291-6707

\* 회원, 체육과학연구원

\*\* 회원, 한양대학교 대학원

\*\*\* 회원, 한양대학교 기계공학부

2. 실험 및 해석 방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 브레이징 접합 동관은 에어컨 열교환기 및 냉매 배관에 적용하고 있는 제품으로, 이에 사용된 동관 및 삽입금속은 각각 C1220-OL과 BCuP-6으로서 각각의 특성은 Table 1 및 2와 같다. 또한 적용된 브레이징 공법은 실제 에어컨 제작업체에서 사용하고 있는 수동 화염 브레이징 공법(LPG+ Oxygen)으로써 브레이징 간극 및 작업온도는 각각 0.2mm 및 980~1050℃이다.

이러한 과정을 통하여 제작된 시험편은 AWS C3.2<sup>(8)</sup> 규정에 의한 싱글랩(single lap) 형태의 표준시험편 및 에어컨 냉매 배관에 적용된 것과 동일한 형태인 실물시험편의 2 종류로써, 이의 형상 및 제원은 각각 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 브레이징 접합부의 기계적 특성 평가에 사용되는 표준시험편의 경우 브레이징 접합길이는 각각 3, 5, 7, 10 및 16mm의 5종류로 제작하였으며 두께는 3mm이다. 실물 시험편은 에어컨 냉매 배관의 사용 조건을 고려하여 접합 길이에 따른 접합부의 접합강도 및 파열압력(burst pressure)을 평가하기 위한 것으로서 지름 15.88mm의 동관 2개를 이용한 확관 방식으로 제작되었으며 두께는 0.8mm, 브레이징 길이는 표준시험편과 동일하게 제작하였다.

2.2 인장, 전단 및 경도시험

표준 시험편에 대한 인장시험은 ASTM E8M<sup>(9)</sup> 규정에 따라 크로스헤드 속도 0.5mm/min의 변위 제어 하에서 각 접합길이 당 5개의 시험편에 대

하여 수행하였으며, 접합부에 우력이 발생하는 것을 방지하기 위하여 알루미늄 탭을 양 끝단에 부착하였다. 또한, 실물시험편에 대한 전단시험은 AWS C3.2<sup>(8)</sup> 규정에 동관 내부에 금속 보강재(metal plug)를 삽입하여 0.5mm/min의 변위 제어 조건하에서 각 접합길이 당 7개의 시험편에 대하여 수행하였다.

브레이징 접합 공정의 토치 화염에 의한 열 영향을 평가하기 위한 경도시험은 실물 시험편의 길이 방향에 따라 마이크로 비커스 경도계(HMV-2000)를 사용하였다.

2.3 내압 시험

내압을 받는 실물 시험편의 정적 거동을 평가하기 위하여 유압 서보식 동관 내압 시험기를 제작하였다.<sup>(10)</sup> 본 시험기는 크게 유압 발생동력부와 제어부 및 시험편 체결부로 구성되며 이의 최대 시험 압력은 30MPa이다. 이를 이용한 내압 정적 시험은 상온의 대기중에서 8MPa/min의 일정한 속도로 파열시까지 내압을 상승시키는 방법으로 수행하였다. 이 때 사용된 시험편의 수량은 각 접합길이 당 10개씩이다.

2.4 결함을 평가 및 유한요소해석

브레이징 접합부의 파손 기구 및 응력 분포에 대한 결함률(접합 영역에 대한 결함 영역의 비,

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	Tensile strength	Elastic Modulus	Elongation
C1220-OL	221MPa	117GPa	45%

Table 2 Material properties of filler metal

Material	Liquidus point	Working temperature
BCuP-6	785 ℃	978 ~ 1113 ℃

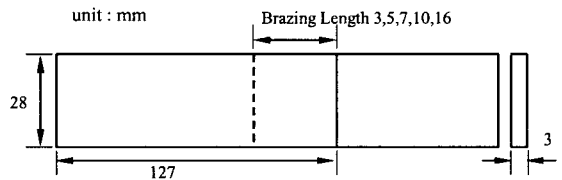


Fig. 1 Standard specimen

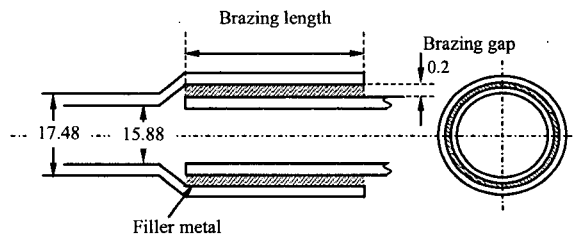


Fig. 2 Prototype specimen

$V_f$ )의 영향을 평가하기 위하여 실물 시험편에 대한 3차원 X-ray 촬영 및 분석을 수행하였다. Fig. 3은 이의 평가 절차를 나타낸 것으로써, 접합부를 0.03mm 간격으로 컴퓨터단층촬영(computed tomography, CT)을 한 후 각 단층에서 결함이 차지하는 면적을 계산하여 구하였다.

또한 브레이징 접합부의 정적특성에 대한 열 및 내부 결함의 영향을 평가하기 위하여 유한요소 해석은 상용 소프트웨어<sup>(11,12)</sup>를 사용하였다. 해석에 사용된 모델은 8절점 6면체 요소로서 사용된 요소의 수는 총 158,800개 이다. 이때 경계조건은 원통 좌표계상에서 원주 방향으로 변위를 구속하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 정적 강도 특성 평가

Fig. 4는 실물시험편에 대한 정적 인장시험을 통하여 평가된 파단하중을 브레이징 접합길이에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 파단하중은 길이에 따라 증가하다가 약 10mm 이상의 접합길이에서는 일정한 값에 수렴되고 있다. 이로부터 접합부의 정적강도 향상을 위하여 브레이징 접합길이를 증가시키는 것은 그 효과가 상당히 제한적임을 알 수 있다. 이러한 브레이징 접합길이에 따른 정적 강도 특성을 보다 면밀히 검토하기 위하여 인장 및 전단강도를 평가하였다. Fig. 5는 이의 결과를 나타낸 것으로서, Fig. 5(a)의 인장강도는 시험편의 파단하중을 접합부의 공칭 단면적으로 나누어 구한 것이며, Fig. 5(b)의

전단강도는 파단하중을 접합면적으로 나누어 구한 것이다. Fig. 6은 이의 인장 및 전단강도를 각각의 최대 및 최소값을 고려하여 0부터 1사이의 값으로 정규화(normalize)하여 나타낸 것이다. 그림에서 인장강도는 접합길이의 증가에 따라 향상되나 전단강도는 급격히 저하되는 경향을 나타내며, 이는 접합길이에 따른 파단하중 및 공칭 접

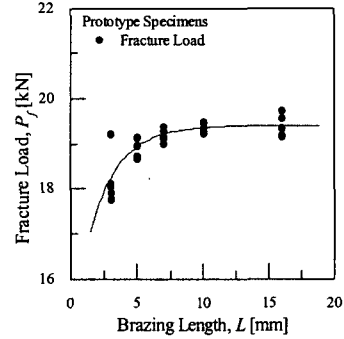
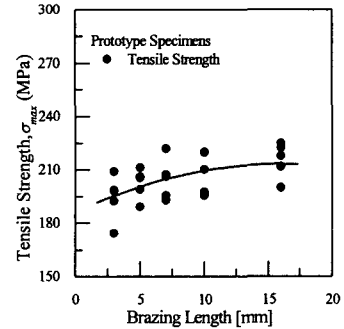
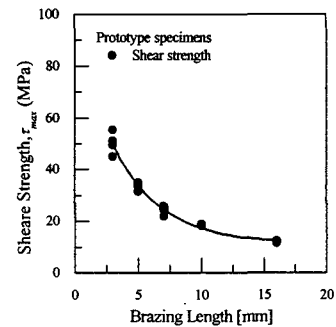


Fig. 4 Fracture load of joints



(a) Tensile strength by brazing length



(b) Shear strength by brazing length

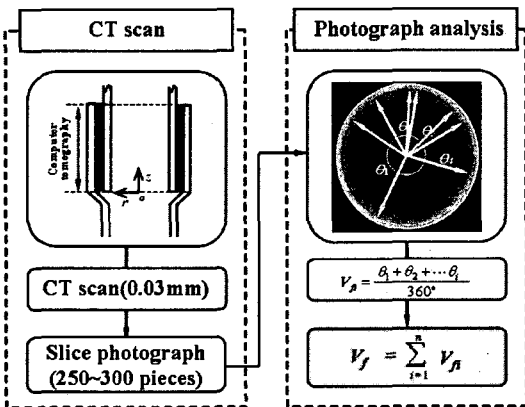


Fig. 3 Flow chart for flaw fraction measurement

Fig. 5 Strength by brazing length

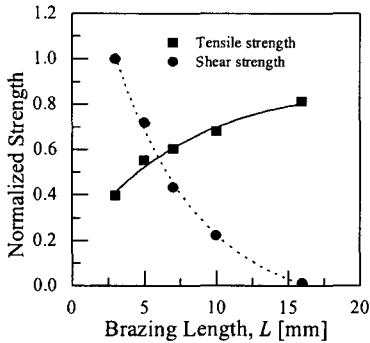


Fig. 6 Normalized tensile and shear strength of prototype specimen

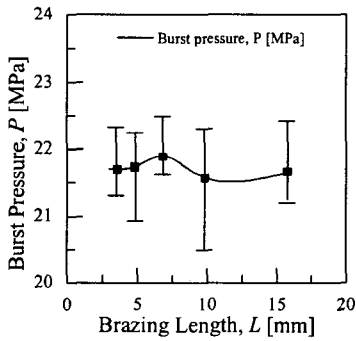
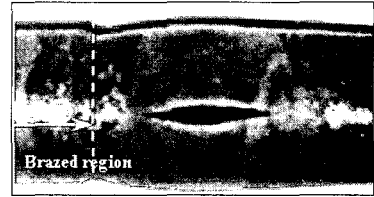


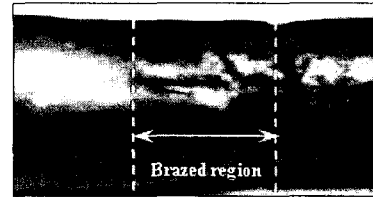
Fig. 7 Bursting pressure

합면적의 변화에 기인한다고 판단된다. 이로부터 브레이징 접합부의 정적 강도 특성을 대표하는 인장 및 전단강도는 서로 반대의 경향을 보이고 있으며 이러한 인장 및 전단강도가 최적의 상태가 되는 접합길이는 약 6~7mm임을 알 수 있다.

한편, 실물시험편에 대한 정적인장시험으로부터 구한 이상의 결과는 냉매에 의한 내압을 받는 브레이징 동관의 실제 사용조건과는 상이하다. 따라서 실제 사용조건하의 강도 특성을 평가하기 위하여, 실물시험편에 대한 내압시험을 통하여 구한 파열압력을 접합길이에 따라 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서와 같이 산포 현상이 나타나고 있지만 내압 조건하에서의 접합부의 파열압력은 접합길이가 7mm인 경우에 가장 높게 나타났으며, 이의 결과로부터 에어컨 냉매 배관에 적용된 동관 브레이징 접합부의 최적 접합길이는 약 7mm로 평가되었다.



(a) Failure type I : raw pipe region



(b) Failure type II : brazed joint region

Fig. 8 Failure types

### 3.2 정적 파손 기구 평가

에어컨에 적용되고 있는 브레이징 접합부는 내압에 의하여 냉매의 누설 혹은 파손이 야기되는 경우가 많으므로, 최적의 접합강도 특성을 갖는 브레이징 길이 7mm의 시험편에 대한 정적내압 및 경도시험 등을 통하여 파손기구에 대한 해석을 실시하였다.

Fig. 8은 정적 내압시험에서 발생한 브레이징 접합부의 전형적인 파손 양상을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)은 모재부에서의 파손 양상으로, 전체 시험편의 약 90%에 해당된다. 파손은 주응력 방향으로 시험편 길이 방향의 슬릿 형태로 발생하였으며, 특히 파손 부위는 접합 영역에서 20~30mm 떨어진 부위로서 브레이징 접합 공정 중 화염이 접촉하는 부분과 일치하고 있다.

반면 Fig. 8(b)의 경우에는 접합 공정 중에 토치화염에 의한 열이 모재부에 가해졌음에도 불구하고 브레이징 접합 영역에서 파손이 발생하고 있다. 이러한 파손 양상의 변화에 대한 영향인자로 브레이징 공정 중에 가해지는 열 및 내부결함에 의한 것으로 판단되며 이들의 영향을 정량적으로 검토하기 위하여 마이크로 비커스 경도 및 내부결합의 양상을 평가하였다.

Fig. 9는 실물시험편의 접합 영역을 중심으로 측정된 마이크로-비커스 경도의 변화를 나타낸 것이다. 이로부터 브레이징 접합시 약 1000℃의 가열온도를 받고 있는 모재부의 경도가 50% 이상 급격하게 저하됨을 알 수 있다. 따라서

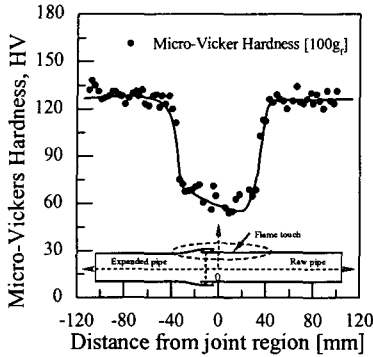


Fig. 9 Micro-Vickers hardness

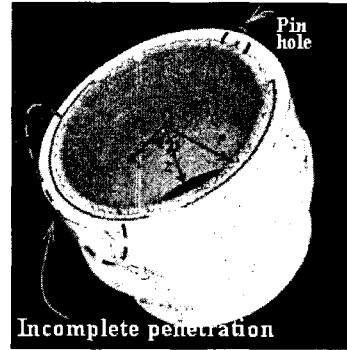


Fig. 11 Flaws by X-ray

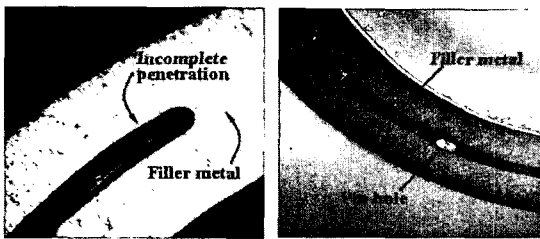
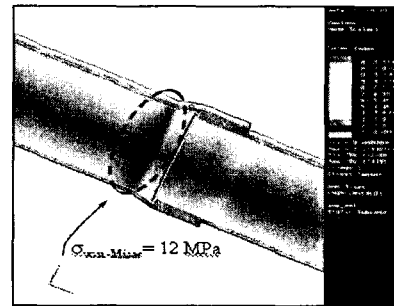


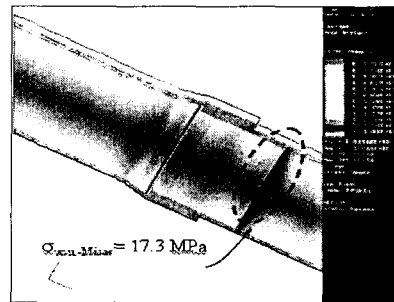
Fig. 10 Flaws in brazed joints

대부분의 시험편 파열은 브레이징 접합부의 두 개의 관이 겹쳐진 접합부보다 가열로 인하여 연화된 모재의 열 영향부에서 발생하게 된다고 판단된다.

또한, Fig. 10은 내부 결함의 영향을 평가하기 위하여 실물시험편의 단면을 금속현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 브레이징 접합부의 주된 결함은 접합부 내부에 불규칙하게 분포된 삽입금속의 용입불량(incomplete penetration)과 핀홀(pin hole)임을 알 수 있으며 이는 Fig. 11의 3차원 X-ray 사진에서도 동일하게 나타나고 있다. 이러한 내부 결함은 접합부 설계 또는 접합 공정의 오류 등으로 인하여 발생하며 또한 브레이징 접합부의 건전성에 나쁜 영향을 미침으로,<sup>(1,2)</sup> Fig. 8(b)과 같이 접합부에서 파손된 경우는 브레이징 접합부의 강도 특성에 대한 내부결함의 영향이 열로 인한 영향보다 크기 때문이라고 판단된다. 따라서 브레이징 동관 접합부의 파손 양상 및 이의 기구는 브레이징 접합 공정시 발생한 모재의 연화 및 내부 결함의 복합적인 요인에 의하여 지배된다고 할 수 있다.



(a) Without heat affected zone



(b) With heat affected zone

Fig. 12 FEA results for heat effect

3.3 파손인자의 영향 평가

브레이징 접합부의 파손 양상 및 기구는 모재의 연화 및 내부 결함의 복합적인 영향을 받다고 판단되므로 이에 대한 정량적인 평가가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 브레이징 공정 중에 발생하는 열의 영향 및 내부 결함을 고려한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 12는 초기 결함이 존재하지 않은 경우를 가정하여 열영향에 따른 응력분포 결과를 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 열

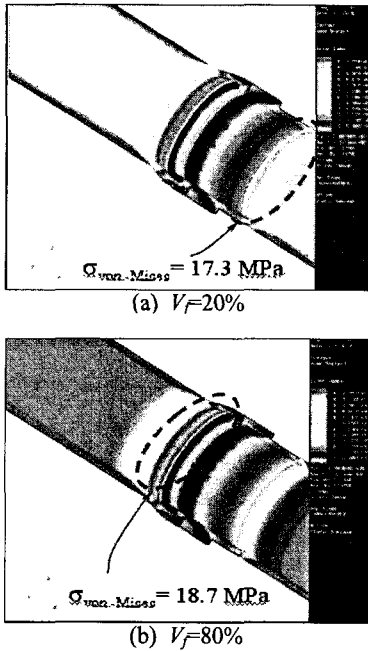


Fig. 13 FEA results for  $V_f$

영향을 고려하지 않은 경우의 응력분포를 나타낸 것으로 약 12MPa의 최대응력이 환관 끝부분에서 발생하였다. 열영향을 고려한 경우의 Fig. 12(b)는 실물 시험편의 파손위치와 동일한 부분에서 약 17.3MPa의 최대 응력이 발생함을 알 수 있다. 따라서 브레이징 공정중에 가해지는 열로 인한 모재부의 연화로 이 부분의 응력은 상승하고 또한, 최대응력의 발생 위치도 변화함을 알 수 있다.

Fig. 13은 열영향 및 결함률을 동시에 고려하여 평가된 응력해석의 결과의 일례로서, 결함률이 실물시험편과 동일한 20%인 경우와 가상의 80%인 경우의 응력분포를 각각 나타낸 것이다. 그림에서 결함률이 20%인 경우에는 약 17.3MPa의 최대응력이 열영향 영역에서 발생하였다. 이러한 경향은 약 20%의 평균 결함률을 갖는 실물시험편 대부분이 실제 열영향 영역에서 파손되는 실험결과와 일치하고 있다. 그러나 결함률이 80%로 증가하게 되면 최대응력의 발생지점은 열영향 영역에서 접합영역으로 이동하며, 최대응력은 약 18.7MPa로 평가 되었다. 이로부터 실물시험편 일부가 접합영역에서 파손되는 양상은 브레이징 동관의 제조 공정시 내부 결함이 크게 발생하기 때문이라 사료된다. 이러한 경향을 보다 명확히 검

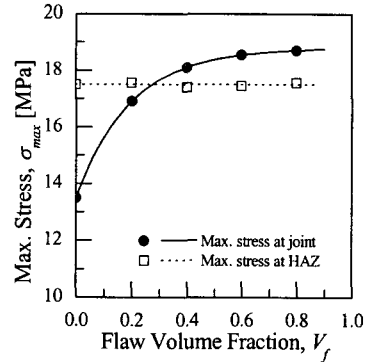


Fig. 14 Variation of maximum stress with  $V_f$

토하기 위하여 다양한 결함률에 대한 유한요소해석을 수행한 후 접합 및 열영향 영역의 최대 응력을 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 초기 결함률이 약 30% 이하에서는 최대 응력이 열영향 영역에서 발생하고 있지만, 그 이상에서는 접합영역에서 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 브레이징 접합부의 파손양상 및 기구는 열 및 내부 결함의 복합적인 영향에 의한 것으로, 결함이 높을수록 내부 결함의 영향이 클 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 에어컨의 배관에 사용되는 브레이징 접합 동관을 대상으로 이의 정적강도 특성 평가 및 고장원인분석을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정적 인장 및 내압시험을 통하여 브레이징 접합부의 접합강도를 검토한 결과 최적의 강도를 갖는 브레이징 접합길이는 약 7mm로 평가되었다.

(2) 마이크로 비커스 경도 및 내부 결함 관찰을 통하여 평가된 브레이징 접합부의 정적파손 양상은 접합 공정시 발생하는 열로 인한 동관의 연화 및 용입불량 등과 같은 내부 결함의 복합적인 영향을 받음이 밝혀졌다.

(3) 브레이징 접합부에 대한 유한요소해석 결과, 최대응력 발생 위치는 결함률이 30% 이하인 경우 화염 접촉부위로 평가 되었으며, 이상인 경우에는 접합부로 평가되었다.

## 후 기

본 연구과제는 과학기술부의 특정연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다. (과제번호 : 2005-02896)

## 참고문헌

- (1) Schwartz M., 1995, *Brazing : For the Engineering Technologist*, Chapman & Hall, London, pp. 1~51.
- (2) Chung-Yun Kang, 2000, "Brazing Defect," *Journal of Korean Welding Society*, Vol. 18, No. 6, pp. 672~674.
- (3) Mandal S., Ray A. K. and Ray A. K., 2004, "Correlation between the Mechanical Properties and Microstructural Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(Ag-Cu-Ti) Brazed Joints," *Mechanical Science and Engineering, A*, Vol. 383, No. 2, pp. 235~244.
- (4) He P., Feng J. C. and Zhou H., 2004, "Microstructure and Strength of Brazed Joints of Ti<sub>3</sub>Al-Base Alloy with NiCrSiB," *Materials Characterization*, Vol. 52, No. 4~5, pp. 309~318.
- (5) Shaohong Wang, Heping Zhou and Yuping Kang, 2003, "The Influence of Rare Earth Elements on Microstructures and Properties of 6061 Aluminum Alloy Vacuum-Brazed Joints," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 352, No. 1~2, pp. 79~83.
- (6) Jong-Bum Lee and Jei-lip Cho, 2000, "The Study on the High Acceleration Life Method for the Automotive Electric and Electronic Parts," *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol. 28, No. 4, pp. 16~28.
- (7) Hendrik Schabe and Beinard Vietrl, 1995, "An Axiomatic Approach to Modes of Accelerated Life Testing," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 50, No. 2, pp. 203~217.
- (8) AWS C 3.2, 2001, Standard Method for Evaluating The Strength of Brazed Joints.
- (9) ASTM E 8M, 2004, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- (10) Bum-Seok Shon, Byung-Jei Lee, Hee-Jin Shim, Ki-Weon Kang, Kyung-Young Jhang and Jung-Kyu Kim, 2006, "Evaluation for Failure Mechanism and Fatigue Strength of Brazed Joints," Korean Society of Mechanical Engineers-Reliability Session, Proceeding of Spring Annual Meeting, pp. 7~12 .
- (11) MSC.PATRAN, 2003, User's Guide, MacNeal - Schwendler Corporation.
- (12) MSC.NASTRAN, 2003, User's Guide, MacNeal - Schwendler Corporation.