

論 文

大韓熔接學會誌
第3卷第1號 1985年5月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 3, No. 1, May, 1985

구멍 또는 내재물 가까이에서의 피로 Crack 전파거동에 관한 연구

趙在雄* · 韓文植** · 金相哲***

A Study on the Behavior of Fatigue Crack Propagation Near the Holes or Inclusions

by

J. U. Cho, M. S. Han, S. C. Kim

Abstract

fatigue lives of C. T. specimens containing the holes or the holes filled with other materials are investigated by experimental and analytical methods.

The results of the study are as follows;

- 1) The fatigue lives are in the order of $E'/E > 1$, $E'/E = 1$ and $E'/E < 1$. where E' is the Young's modulus of other materials filling holes and E is that of matrix.
- 2) The fatigue life of $E'/E = 0$ is shortest than those for $E'/E > 1$, $E'/E = 1$ and $E'/E < 1$.
- 3) The fatigue life of C. T. specimen containing the holes filled with other materials is shorter than that of matrix without holes.
- 4) Because of the stress concentration around the bonding boundary, crack initiates from the lower left on the boundary and propagates toward the upper right along the boundary.

1. 서 론

기계문명의 발달과 더불어 구조물이나 기계가 대형화되고 복잡해짐에 따라 이러한 것들의 돌연한 파괴는 막대한 인적, 경제적 손실을 초래하게 되므로 안전하게 설계되어야 한다.

종래의 연구 결과에 따르면 파괴현상은 crack의 발생과 전파의 과정을 거쳐 일어나는 경우가 대부분인 것이 밝혀져 있고¹⁾ crack은 재료내부에 존재하고 있는 이물질이나 결함을 기점으로 하여 발생하는 것으로

생각되어^{2),3)} 이들이 재료의 강도를 저하시키는 것으로 알려져 왔다.

그러나 근래에 와서는 오히려 재료의 강도를 높이기 위하여 물리적, 화학적 특성이 서로 다른 재료를 조합 시킴으로써 단일재료보다는 좀더 유용한 재료를 만드는 경우가 있으며 그 예로서 모재에 이보다 더 강한 이물질을 넣은 복합재질의 경우에는 그 파괴응력이 증가되는 현상을 들 수 있다.⁴⁾

이런 복합재질에 대한 연구는 그동안 많이 진행되어 왔으며,⁵⁾ 그 강도를 높이는 방법에 대하여 Tirosh 및 Tetelman⁶⁾ 등의 연구 결과도 발표되었다.

* 인하대학교 대학원

** 한국기계연구소

*** 인하대학교 공과대학

이들의 연구 결과에 의하면 crack 경로상에 위치한 이종재질이 모재에 대하여 강하게 접착된 경우에는 crack의 전진속도가 늦어지고 약한 접착일 때는 그 반대 현상이 나타났다.

본 연구에서는 Crack 전진방향의 좌우측에 구멍을 뚫은 다음 Brazing(은 납땜)으로 이종 혹은 동종의 금속을 접착하거나 그대로 구멍상태로 둘으로써 이 부분과 모재와의 탄성계수비를 변화시킨 여러 종류의 Compact 인장시편을 제작하여 피로실험⁷⁾을 실시하였고, 이 실험을 통하여 모재와 Brazing 부분의 되어진 탄성계수비의 변화가 피로수명에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 crack 전파시 Brazing 한 구멍 부위의 떨어져 나가는 상황도 해석적으로 고찰하였다.

2. 시편제작 및 실험

2.1 시편제작

본 실험의 재료로는 일반구조용 열간 압연강재인 SS 49와 KSD 5201(C 2720)인 황동판을 사용하였으며, 그 화학성분과 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다. 피로시편 제작시 재료의 방향성을 고려하여 일정한 방향으로 채취하였으며 황동판은 전단기로, 강판은 산소용접기에 의하여 절단하고, 밀링과 드릴링을 하여 가공하였다.

이상의 가공 작업후에 750°C의 전기로에서 BAG-7의 filler를 사용하여 brazing을 실시하였으며 brazing후 10mm의 시편두께를 밀링작업으로 9mm로 줄이고 버핑작업에 의하여 그 가공흔적을 제거하였다. 본 실험에 사용된 피로시편의 형상은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타

내었다. Fig. 1의 시편재질로는 강과 황동을 사용해서 각각 1개씩 제작하였으며, 이것들을 공히 brazing 작업조건인 750°C로 열을 가한 다음 상온상태에서 공냉하였다. 그리고 Fig. 1의 모양에 구멍을 가공한 Fig. 2의 시편도 위와 같은 재질과 방법으로 제작하였다. 구멍은 시험편재료인 강과 황동으로 brazing하였으며 결과적으로 시험편 종류로서는 강(모재)-강(구멍), 강(모재)-황동(구멍), 황동(모재)-황동(구멍) 및 황동(모재)-강(구멍)의 4종류도 제작하였다. (Fig. 2) 이렇게 하여 본 실험에서는 총 8종류의 시편을 사용하여 그 결과를 상호 비교하였다.

또한 재료의 기계적 성질을 알아보기 위하여 ASTM

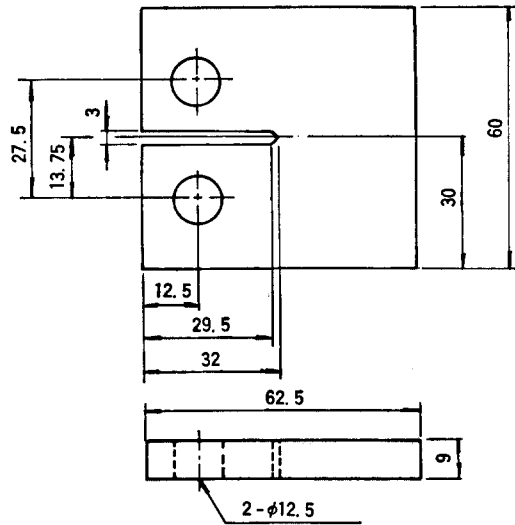


Fig. 1. Compact tension specimen

Table 1. Chemical Composition

Materials	Components (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Steel	0.15	0.22	0.63	0.015	0.009	0.01	0.05	0.01	0.03
Brass	Cu	Zn	Fe	Pb	Si	P	S	C	—
	63.9	rest	0.12	0.11	—	—	—	—	—

Table 2. Results of tensile test

Items	Specimens				
	Steel	Brass	Steel + Brass	Steel + Steel	Brass + Brass
Yield stress (N/mm ²)	493	225			
Ultimate stress (N/mm ²)	607	343	84	344	119
Modulus of elasticity (N/mm ²)	102,680	39,200			
Poisson's ratio	0.3577	0.2856			

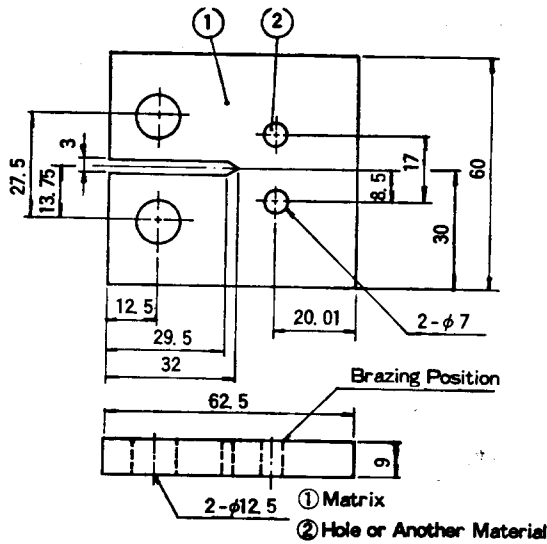


Fig. 2. Compact tension specimen with holes or holes filled by brazing

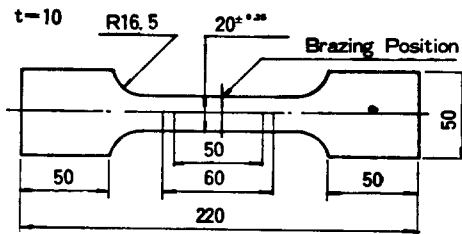


Fig. 3. Tensile specimen or brazed tensile specimen

8)에 준한 인장시편을 제작하였고 brazing을 하였을 때 그 접착력을 알아보기 위한 인장시편으로써 강+황동, 강+강, 황동+황동으로 접착한 3종류의 시편을 제작하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 실험방법

인장시험기 Tensilon(TOYO BALDWIN Co., Model #SS-207-EP)을 사용하여 각 인장시편의 기계적 성질을 구하고 황동은 정량분석법으로, 강은 분광기(Spectrum-Meter)에 의하여 그 화학성분을 구하였다. 그리고 피로 실험은 유압 Servo피로실험기(Saginomia Co., Model # FLC-10:10 Ton)를 사용하였으며 1/100mm까지 측정할 수 있는 이동식 현미경으로 Crack 선단을 따라가면서 그 길이를 측정하였고 그때마다 cycle 수를 기록하였다.

인공노치의 영향을 없애기 위하여 피로 crack 길이는 노치선단으로부터 2.7mm까지 진전시킨 다음 실험 자료를 측정하였다. 피로 실험조건을 Table 3에 보

Table 3. Conditions of Fatigue Test

Material	Steel	Brass
Intent		
Mean load (N)	3,920	2,940
Amplitude load (N)	2,940	1,960
Herz (sine wave)	10	10
Room temperature (°C)	20	20

였다.

3. 실험결과 및 고찰

2.2항의 실험방법에 의하여 얻어진 피로실험의 결과를 Cycle수 (N)을 x축으로 잡고, 그때의 Crack 길이 (A)를 y축에 표시하여 Fig. 4 및 5에 나타내었다. 또한 이 그림을 보면 모재만의 경우에 비하여 구멍이 존재하거나 또는 구멍을 brazing에 의하여 메꾼 경우에는 서로 다른 피로 crack 전파거동을 나타내고 있다.

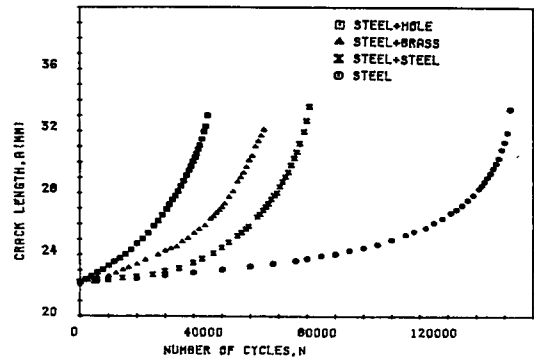


Fig. 4. Crack growth curve for steel compact tension specimen

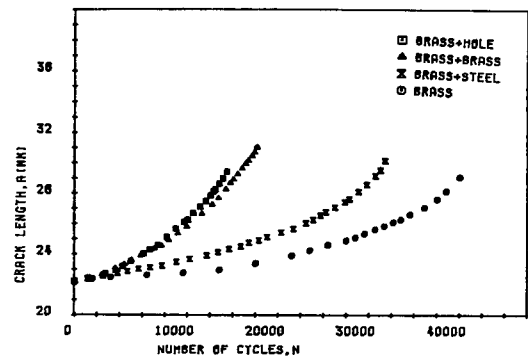


Fig. 5. Crack growth curve for brass compact tension specimen

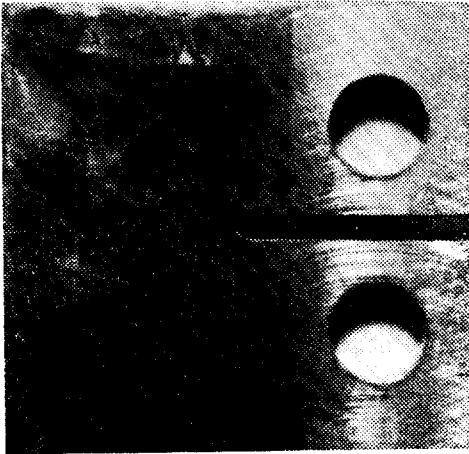


Photo 1. Specimen before fracture

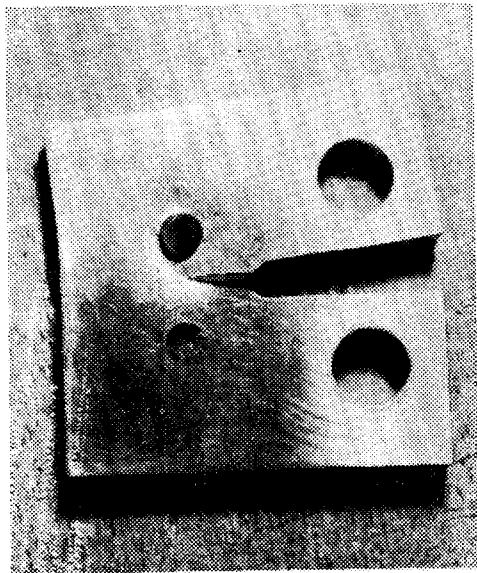


Photo 2. Specimen after fracture

본 실험에 사용한 시편중 모재의 재질이 황동으로써 구멍에 이물질인 강을 접착한 시편의 피로실험전과 파단후의 사진들을 각각 Photo 1과 Photo 2에 보였다.

Fig. 4에서 보던 강에 이물질이나 구멍이 있는 경우 그것이 오히려 강만 있는 경우보다 약화되어 Crack이 빨리 진전하며 황동의 경우의 Fig. 5도 역시 마찬가지이다.

이것은 모재내에 Brazing한 이물질이 있을 경우 피로 Crack 진전시 Brazing한 부위에 Crack이 생겨 구멍이 없는 Plate에 비하여 약화되어 피로 Crack이 빨리 진전되었기 때문으로 사료된다.

이러한 현상을 좀더 상세히 고찰하여 보겠다. 모재

인 강내부에 강을 brazing한 경우도 역시 피로 Crack 진전시 brazing한 부위에 crack이 생겨 강만으로 되어 있는 경우에 비하여 약화되어 더 빨리 진전하였고, 일례로 brazing한 구멍 근방, 즉 $a=25mm$ 까지 crack이 진전된 때의 cycle 수를 보면 구멍이 없는 모재만 있는 경우의 105,000 cycle에 비해 brazing한 경우는 50,000 cycle로써 그 비가 1/2로 줄어들었으나 Fig. 5에서 보던 구멍을 황동으로 brazing한 경우도 역시 마찬가지로 약화되어 구멍이 없는 황동만으로 되어 있는 경우에 비해 더 빨리 진전하여 30,000 cycle에서 10,000 cycle로써 1/3로 줄어들었다.

그런데, 강의 경우에 비해 황동이 그 비가 더 작아진 것은 황동때가 강보다 접착력이 훨씬 약하여 구멍내에 같은 재질을 brazing한 부위에서 crack이 더욱 쉽게 발생하여 그 피로수명이 더 짧아진 것으로 사료된다.

그리고, Fig. 4에서 강내부에 강을 접착한 경우를 강에 구멍을 뚫은 경우 및 강에 황동을 접착한 경우와 비교하여 보면 역시 강에 구멍(탄성계수 0)을 뚫은 경우가 가장 빨리 진전하였고 그 다음 순서로, 강에 황동 및 강에 강을 접착한 순으로 나타났다. 이러한 것은 모재인 강에 접착된 이물질의 모재에 대한 탄성계수비가 작을수록 crack 진전속도가 빨라질 수 있다.

여기서도 일례로써 Crack 길이 25mm까지 도달하는데 있어 강내부에 강을 접착한 경우 및 구멍을 뚫은 경우는 각각 52,000 cycle 및 20,000 cycle이었는데 그 비는 0.4가 되었다.

다음에 황동내부에 구멍을 뚫은 경우 및 황동에 강을 접착한 경우 그리고 황동에 황동을 접착한 경우를 비교하여 보겠다. (Fig. 5)

이것도 역시 황동에 구멍(탄성계수 0)을 뚫은 경우가 가장 빨리 진전하였고 그 다음 순서로 황동에 황동 및 황동에 강을 접착한 순으로 나타났다. 이러한 것도 모재인 황동에 접착된 이물질의 모재에 대한 탄성계수비가 작을수록 진전속도가 빨라질 수 있다.

여기서도 마찬가지로 crack 길이 25mm까지 도달하는데 있어서 황동내부에 황동을 접착한 경우 및 구멍을 뚫은 경우는 각각 10,000 cycle에서 9000 cycle로 그 비가 약 0.9 정도로 되어 있었다.

또한 Fig. 4의 강의 경우 그 비가 0.4이었는데, Fig. 5의 황동에 있어서는 0.9로 크게 된 것으로 보아, 강의 경우에 비해 황동내부에 황동을 접착한 경우의 crack 성장곡선이 황동내부에 구멍을 뚫은 쪽으로 더 접근한 것을 알 수 있다. 이것은 brazing한 것이 물론 접착력의 영향으로 인하여 모재보다 약화된 것도 있었

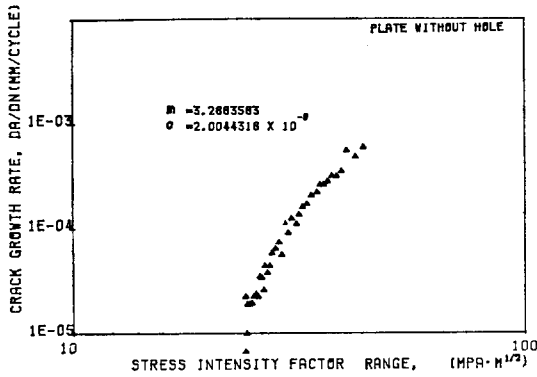


Fig. 6. Stress intensity factor range vs. crack growth rate for Steel C-T Specimen

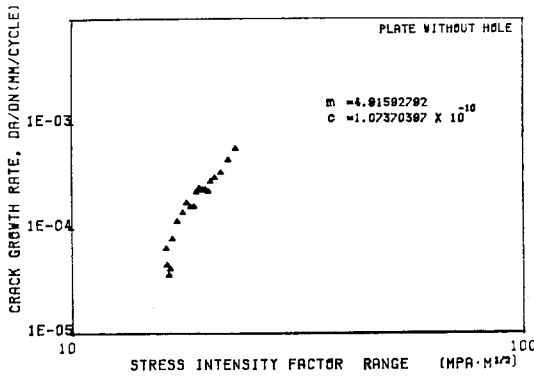


Fig. 7. Stress intensity factor range vs. crack growth rate for Brass C-T Specimen

겠지만 황동보다 강의 탄성계수가 구멍에 비하여 3배 정도나 크게 차이가 나기 때문에 강의 경우보다 황동에서 그 영향이 작은 것으로 사료된다.

다음으로 기본실험인 강만이 있는 경우와 황동만이 있는 경우에 대한 C.T. 시험편에 대한 Δk 와 da/dN 관계를 각각 Fig. 6 및 Fig. 7에 보였다. 그리고 이것을 1차적인 least square method로써 재료정수인 m 과 C 를 구하면 강의 경우는 $m=3.2883583$, $C=2.0044318 \times 10^{-9}$ 이고 황동의 경우는

$$m=4.91592792, C=1.07370397 \times 10^{-10}$$

이 된다.

다음에 brazing한 구멍 주위에 crack이 발생하면 피로 crack 전파에 어떠한 영향을 주는가 고찰하기 위하여 해석을 하였는데 이 해석을 위한 유한요소법 model로써 다음 그림 Fig. 8과 같이 요소 분할하였다.

그리고 Fig. 9에서 보는 바와 같이 이러한 model에서 강만의 경우 유한요소법으로 구한 Δk 값과 Isida의 Solution과는 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

Fig. 10에서는 강에 구멍이 뚫린 경우로서 유한요소법에서 구한 Δk 값과 실험치에서 crack 전진속도를 $da/dN=C(\Delta k)^m$ 에 대입하여 위에서 구한 C 와 m 을 이용하여 역산으로 구한 실험치 Δk 의 값을 비교한 것으로써 대략 일치되고 있음을 알 수 있다.

다음 Fig. 11은 강내부에 강을 접착한 경우와 강자체에 대한 것으로써, 강자체의 것은 즉 구멍내부에 brazing한 강이 완전히 이상화되어 접착되어 있는 경우다. 강내부에 강을 접착한 경우의 실험치는 홀어져

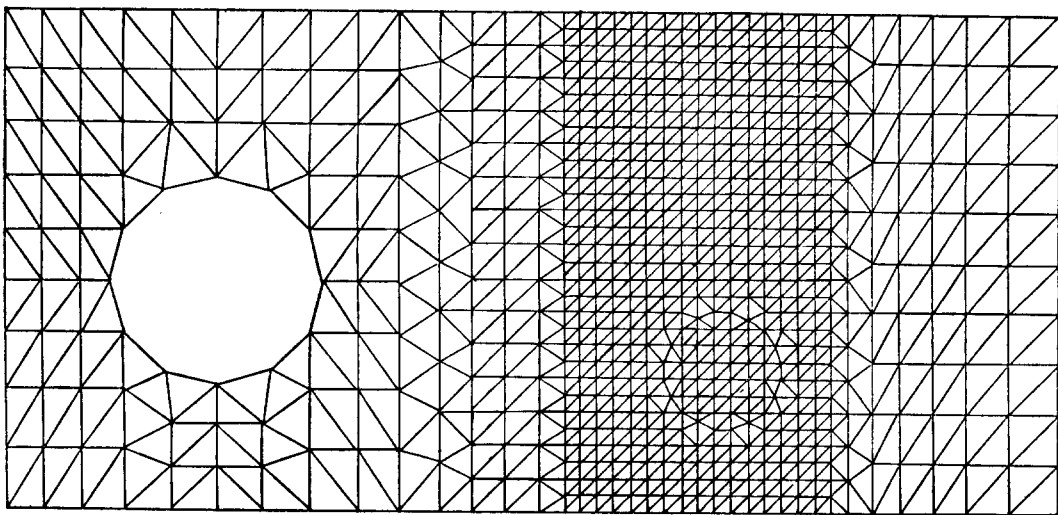


Fig. 8. Finite Element Model for Analysis

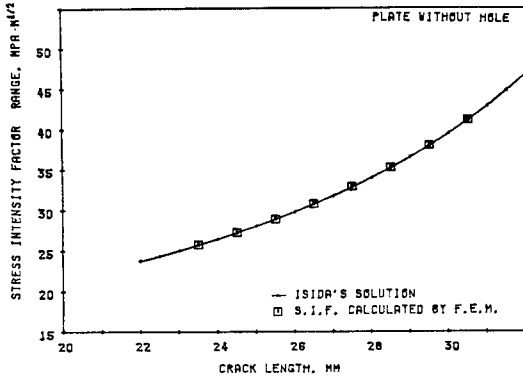


Fig. 9. Stress intensity factor range vs. crack length K-comparison of Steel (Fatigue. F. E. M.)

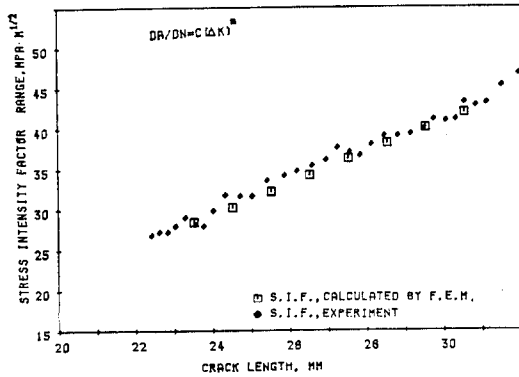


Fig. 10. Stress intensity factor range vs. crack length K-calculation of Steel + Hole (Fatigue)

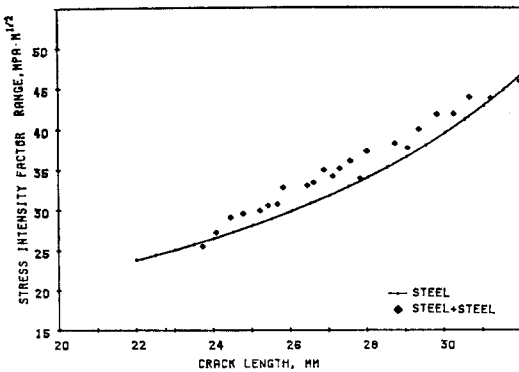


Fig. 11. Stress intensity factor range vs. crack length K-comparison of Steel. Steel + Steel

있지만 강 자체보다는 응력확대 계수가 커 역시 피로 crack 전진시 C.T. 시험편 구멍 주위의 강을 접착한 부위에서 crack이 생겨났음을 알 수 있고 이러한 사실은 실험도중 확인할 수 있었다.

다음 그림 Fig. 12는 강내부에 강을 접착한 경우, 구멍 주위에 crack이 발생하였다고 가상하여 유한요소법으로써 Δk 를 구하여 실험치와 대조하여 본 것이다.

이 그림에는 brazing한 부위중 응력이 가장 큰 부분에 crack이 발생하였을 경우에 대하여 주 Crack이 전진함에 따르는 응력확대계수폭(Δk)의 변화를 해석하여 놓았는데 brazing한 주위의 crack의 크기에 대해서는 2가지로 하였다. 이 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 실험에서 구한 Δk 가 대략 이 사이 부분에 들어 있어, 피로 실험시 crack이 그림에 표시한 바와 같이 초기에

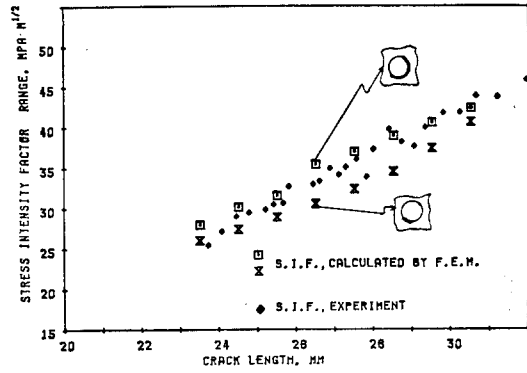


Fig. 12. Stress intensity factor range vs. crack length K-calculation of Steel + Steel (Fatigue)

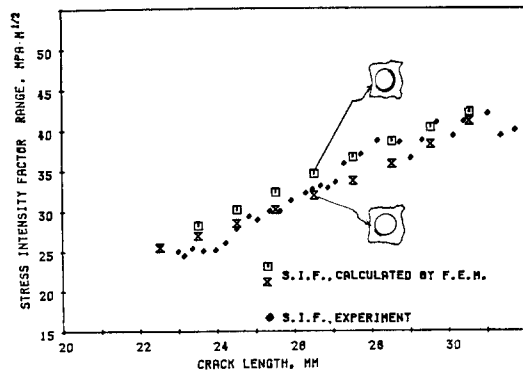


Fig. 13. Stress intensity factor range vs. crack length K-calculation of Steel + Brass (Fatigue)

발생하여 주 피로 Crack이 진전함에 따라 점차 brazing 한 왼쪽 아래 부위로부터 오른쪽 위 부위로 반원형 crack이 생겨서 성장됨을 알 수 있다.

마찬가지로 강내부에 황동을 접착한 경우의 Fig. 13 도 피로 crack 진전초기에는 그림과 같이 접착된 구멍 주위의 왼쪽 하단부에서 crack이 생겨 진전하다가 점차적으로 오른쪽 위 부위로 생겨나감을 알 수 있었다.

Fig. 14는 황동에 구멍을 뚫은 경우, 실험치와 computer에 의한 해석치와 비교한 것인데 실험치는 해석 결과와 잘 일치하고 있다.

다음 그림 Fig. 15는 황동 내부에 황동을 접착한 경우와 황동 자체에 대한 주 crack 진전에 따르는 응력 확대계수폭의 변화를 표시한 것인데 황동 내부에 황동을 접착시킨 경우의 응력확대계수폭이 큼을 알 수 있다.

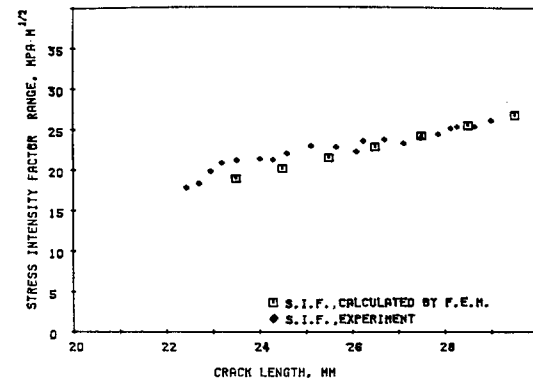


Fig. 14. Stress intensity factor range vs. crack length K-calculation of Brass + Hole (fatigue)

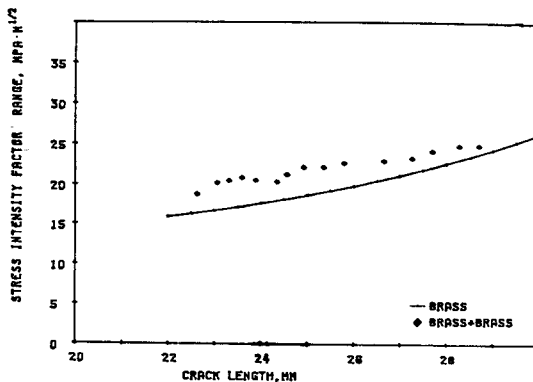


Fig. 15. Stress intensity factor range vs. crack length K-comparison of Brass, Brass + Brass

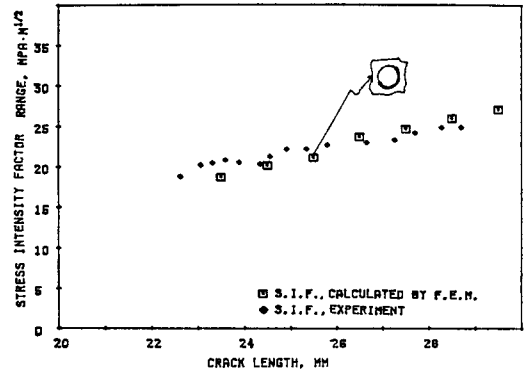


Fig. 16. Stress intensity factor range vs. crack length K-calculation of Brass + Brass (fatigue)

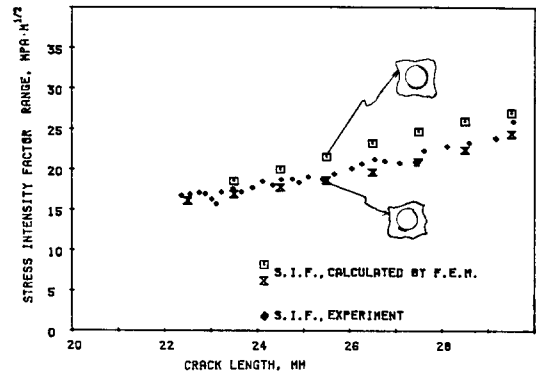


Fig. 17. Stress intensity factor range vs. crack length K-calculation of Brass + Steel (Fatigue)

Fig. 16은 황동 내부에 황동을 접착한 경우를 유한 요소법으로써 Δk 를 구하여 그 실험치와 대조하여 보았는데, 표시된 바와 같이 접착된 구멍 부위에 걸리는 응력에 비해 접착력이 상당히 약하여 강때보다 접착된 구멍 주위에서 그림과 같이 상당히 큰 crack이 초기단계부터 발생함을 알 수 있다.

Fig. 17은 황동에 강을 접착한 경우이며 이 때에는 주 Crack이 진전해나감에 따라 접착된 구멍 주위의 왼쪽 하단부로부터 오른쪽 상단부로 crack이 찢어져 나감을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

crack 선단진방에 구멍 또는 이물질이 존재하는 경우에 있어서 피로 crack 전파속도는 모재의 탄성계수 (E)와 이물질의 탄성계수(E')와의 비 E'/E 에 의존하며 E'/E 가 1보다 작을수록 전파속도는 커진다.

또한 해석 결과에 의하면 E'/E 가 1보다 큰 경우의 주 crack 선단에서의 응력확대계수는 이물질이 존재하지 않는 경우보다도 작아져서 이를 토대로 생각할 때 crack 전파속도도 작아져야 하나, 피로 crack 전파에서는 탄성계수비 E'/E 만이 전파속도에 관여하는 것이 아니고 모재와 이물질 사이의 접착력도 피로 crack 전파속도에 영향을 끼친다. 즉 피로 crack 전파시 모재와 이물질 사이의 brazing한 구멍 주위에 crack이 발생하여 주피로 crack 전파속도에 영향을 끼친다.

brazing한 부분에서 crack이 발생하여 피로실험중 이 crack이 진전하는 양상은 brazing한 부분의 접착력과 모재와 이물질과의 탄성계수비에 복합적으로 영향을 받음을 해석에 의하여 확인하였다.

참 고 문 헌

1. David Broek, *Elementary Enginccring Fract-*
2. R. W. Hertzbery, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, John Willey and Sons Inc., 1976, pp. 465—494.
3. Rolfe Barsom, *Fracture and Ealigne Control in Structures*, Prentice-Hall, New Jersey, 1977, pp. 253—259.
4. 藤井太一, 座古勝, 複合村科の破壊と力學, 實教出版(株) pp. 10—26.
5. J. Tirosh, *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, Vol. 40, 1973, pp. 785—790.
6. Jehuda Tirosh, *Fracture conditions of a crack approaching a disturbanc*, International Journal of Fracture, Vol. 12, No. 2, April, 1976, pp. 187—199.
7. T. L. Mackay, B. J. Alperin and D. D. Bhatt, *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 18, No. 2, 1983, pp. 403—416.
8. ASTM E 8—79, *Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials*.