
소형 인장 시험편 내의 크랙 전파에 대한 구조 안전해석

조재웅¹

¹공주대학교 기계자동차공학부

Structural Safety Analysis on Crack Propagation in Compact Tension Specimen

Jae-Ung Cho¹

¹Division of Mechanical &Automotive Engineering, Kongju National University

요약 본 연구에서는 소형 인장 시험편에 편심된 집중하중을 가하였을 때, 크랙 주변에서의 구멍의 존재유무, 개수 및 위치에 따른 전파 거동에 대하여 규명하였다. 시뮬레이션 해석을 통하여 시험편에서 발생하는 Strain energy와 변형량, 응력에 대해 알 수 있었다. 그리고 이들 Strain energy와 변형량을 바탕으로 응력확대계수를 구하였으며, 본 연구결과를 이용하면 구조물 내에 결함이나 구멍 등이 있을 때 그 파괴 가능성을 검증할 수 있다고 사료된다.

주제어 : 소형 인장 시험편, 크랙 전파, 응력확대계수, 변형률 에너지, 변형량, 등가 응력

Abstract In case eccentric load is applied at compact tension specimen, the propagation behavior due to existence or nonexistence of hole, numbers and positions of holes near crack is investigated in this study. Strain energy, displacement and stress happened in specimen are examined through simulation analysis. And stress intensity factor is obtained by the basis of strain energy and deformation. When defect or hole exists in structure, the possibility of fracture can be thought to be verified by using the study result.

• **Key Words** : Compact tension specimen, Crack propagation Stress intensity factor, Strain energy, Deformation, Equivalent stress

1. 서론

기계 및 구조물의 파손과 변형은 대부분의 경우 재료 내부에서 발생한 결함, 즉 크랙 등의 성장과 진전에 의한 것이다. 실제로 이러한 결함은 밀집하여 존재하는 경우가 대부분이며, 결함의 성장과 함께 근접한 곳에서 발생한 또 다른 결함의 간섭과 결함에 의한 성장 역시도 고려하지 않으면 안 된다.[1] 본 연구에서는 Compact Tension 시험편에 대하여 실험 및 시뮬레이션 해석을 수행하였으며, 비교를 위해 5가지의 모델들을 추가적으로

모델링하여 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 시뮬레이션 해석에는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 구조 해석을 수행, 결함의 진전을 연구하고 실험과 시뮬레이션 해석을 통해 구해진 Strain energy와 변형량, 응력을 바탕으로 구한 각각의 응력확대계수를 상호 비교해 보았다. 이를 통하여 얻어진 결과값들을 바탕으로 재료 내에서 파괴를 일으킬 수 있는 크랙의 역학적 거동을 분석할 수 있고, 재료 내에 존재하는 결함에 의한 재료의 변형과 Strain energy의 변화, 응력의 발생 및 증가로 재

*교신저자 : 조재웅(jucho@kongju.ac.kr)

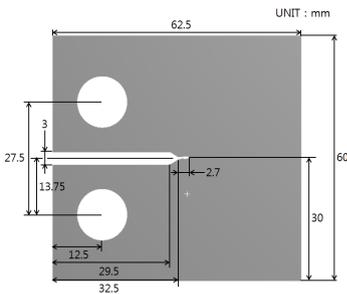
접수일 : 2014년 1월 17일, 수정일 2014년 2월 20일, 게재확정일 : 2014년 2월 26일

료의 파괴 가능성이 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구결과를 토대로 하여 기계 및 구조물 내부에 결함이 존재할 때 그 피로파괴 가능성을 검증할 수 있는 자료로 사용될 수 있다고 사료된다.[2]

2. 본론

2.1 해석 모델

본 연구에서는 시험편 내 크랙 주변의 구멍의 존재유무, 개수와 위치에 따른 총 6가지의 모델들을 CATIA V5R18 프로그램으로 3D 모델링하였으며, 이를 ANSYS 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 시험편의 가장 기본적인 형태는 다음에 도시된 Fig. 1과 같다.[3]



[Fig. 1] Dimensions of structural steel specimen

[Table 1] Material property

Young's modulus(GPa)	103
Poisson's ratio	0.36
Density(kg/m)	7850
Yield strength(MPa)	493
Ultimate strength(MPa)	607

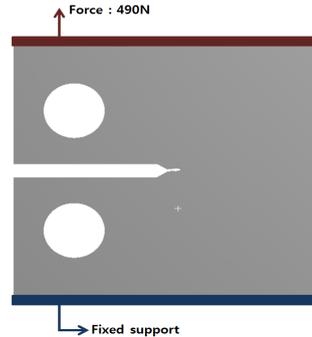
위의 표 Table 1은 각각의 시험편 모델들을 해석할 때 적용한 구조용강의 물성치이다.

2.2 경계 조건

본 연구에서 적용한 해석 모델들의 경계 조건을 Fig. 2에 도시하였다.

해석을 수행하기에 앞서 시험편의 한쪽 끝을 Fixed support 조건을 주어 고정하였고, 시험편의 다른 한쪽 끝을 490N의 Force 조건을 주어 잡아당겼다. 이러한 경계 조건으로 각 시험편들의 Strain energy, 변형량 및 응력을

구하였으며, 이와 동시에 각각의 응력확대계수를 구하였다.



[Fig. 2] Constraint condition of analysis model

2.2 응력확대계수

본 연구에서 사용되는 응력확대계수의 식(1)을 다음과 같이 나타내었다. K 는 실험에 의해 얻어진 결과값을 이용하여 구한 응력확대계수이고 $K1$ 은 실험에 의한 응력확대계수 K 를 검증하기 위한 것으로 시뮬레이션 구조해석으로 얻은 결과값을 이용한 응력확대계수이다. 본 연구에서는 초기 크랙의 주변에 결함(구멍)이 없는 기본적인 시험편들의 응력확대계수를 각각 구하였으며, 이렇게 구해진 응력확대계수 K 와 $K1$ 을 비교하여 Table 2와 Fig. 3으로 나타내었다.[4~5]

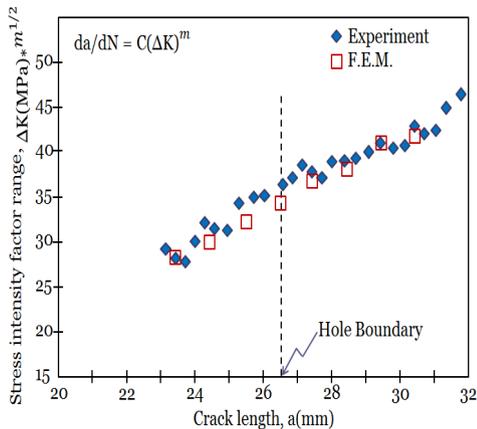
$$K = \frac{P\sqrt{a}}{TW} [29.6 - 185.5(\frac{a}{w}) + 655.7(\frac{a}{w})^2 - 1017(\frac{a}{w})^3 + 638.9(\frac{a}{w})^4] \quad (1)$$

P : C-T 시험편에 가하는 하중(490N)
a : 중앙크랙 길이의 2분의 1 길이
W : 시험편의 세로 길이
T : 시험편의 두께

[Table 2] Comparison between stress intensity factors of formula 1 and F. E. M.

Crack propagation rate(a)	Stress intensity factor(For formula 1) K	Stress intensity factor(Experiment) $K1$	Error (%)
23.5mm	1.92881	1.93068	-0.097
24.5mm	2.04465	2.04398	0.033
25.5mm	2.17235	2.16958	0.128
26.5mm	2.31489	2.31003	0.210
27.5mm	2.47436	2.46843	0.240
28.5mm	2.65274	2.64840	0.164

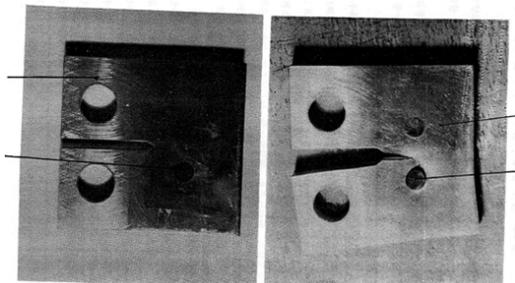
Table 2는 초기 크랙의 주변에 구멍이 없는 시험편들의 응력확대계수를 비교한 것이다. 실험으로 얻어진 응력확대계수를 기준으로 시뮬레이션 해석으로 얻은 응력확대계수를 서로 비교하였으며 비교 결과 오차가 크지 않으므로 이에 따라 별도의 실험을 수행하지 않고도 시뮬레이션 해석만으로도 응력확대계수를 예측할 수 있다고 사료된다.[6] 또한, 다음에 도시된 Fig. 3은 위에서 언급한 초기 크랙의 주변에 결함(구멍)이 없는 시험편들의 응력확대계수를 그래프로 나타내어 비교한 것으로 Table 2와 마찬가지로 오차가 크지 않았다.



[Fig. 3] Comparison between stress intensity factors of experiment and F. E. M.

2.3 모델의 실험 검증 및 해석 결과

본 연구에서는 모델의 실험에 대한 검증으로서 구조 용강으로 된 소형 시험편을 실험하였다. 먼저 실험수행을 위해 시험편의 한쪽 끝을 인장시험기의 Load cell에 고정시키고 시험편의 다른 한쪽 끝을 인장시험기의 Ram을 이용하여 490N의 힘으로 잡아당긴다. Fig. 4는 실험에 사용된 시험편들의 모습으로 왼쪽이 실험을 수행하기 전, 오른쪽이 실험을 수행한 후의 모습이다.

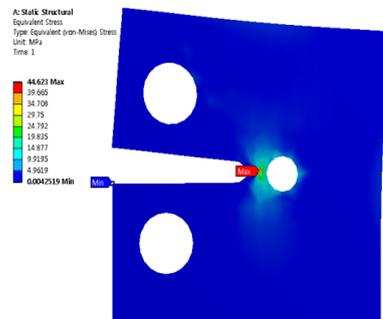


[Fig. 4] Figure of specimens

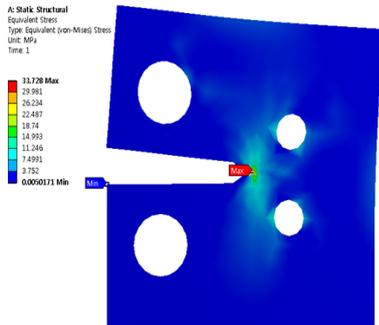
Table 3은 각 시험편들의 시뮬레이션 해석 결과값을 비교한 것으로 결함(구멍)이 1개이고 이 결함이 초기 크랙과의 거리가 가장 가까운 시험편이 최대 변형량, 최대 Strain energy, 최대 응력이 모두 가장 크게 나타났으며, 해석 결과 시험편 내부의 초기 크랙과 결함(구멍)의 위치가 가까울수록 최대 변형량, 최대 Strain energy, 그리고 최대 응력이 커지는 경향을 나타냈다. 또한, 다음에 도시된 Fig. 5, Fig. 6과 Fig. 7은 크랙 선단으로부터 구멍이 각각 1.5 mm, 4.5 mm, 5 mm로 떨어져 있는 경우에 발생하는 등가 응력에 대한 등고선들을 나타낸 것이다. Fig. 5가 결함(구멍)이 1개이고 이 결함이 크랙 선단에서 그 거리가 가장 가까운 시험편으로서 3가지 경우들 중에서 44.62MPa로 최대 응력이 가장 크게 나타났다.

[Table 3] Comparison result values by simulation analysis

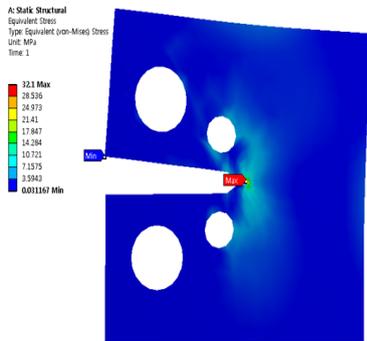
Type of specimens (Distance of hole to initial crack)	Maximum deformation (mm)	Maximum strain energy(mJ)	Maximum equivalent stress (MPa)
No hole	0.0097	0.0047	32.69
One hole (6.5mm)	0.0105	0.0068	23.8
One hole (1.5mm)	0.0166	0.0164	44.62
Two holes (4.5mm)	0.0116	0.0097	33.73
Two holes (5mm)	0.0108	0.0075	32.1
Two holes (7.2mm)	0.0101	0.0054	22.86



[Fig. 5] Equivalent stress of specimen in case of the hole situated at the distance of 1,5 mm from crack tip



[Fig. 6] Equivalent stress of specimen in case of the hole situated at the distance of 4.5 mm from crack tip



[Fig. 7] Equivalent stress of specimen in case of the hole situated at the distance of 5 mm from crack tip

3. 결론

본 연구에서는 구멍들을 가진 소형 인장 시험편 내의 크랙 전과거동에 대한 구조해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 시뮬레이션 해석 응력확대계수 K_I 와 실험을 통한 응력확대계수 K 값들의 오차는 서로 간에 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.(초기 크랙의 주변에 결함이 없는 경우의 시험편) 이로써 시뮬레이션 해석만으로도 시험편의 최대 변형량, Strain energy, 최대 응력, 응력확대계수를 예측할 수 있다고 사료된다.
2. 각 시험편들의 해석 결과값들을 비교해보았을 때 결함(구멍)이 1개이고 이 결함이 초기 크랙과의 거리가 가장 가까운 시험편의 경우가 최대 응력, 최대

Strain energy, 변형량의 값이 가장 크게 나타났고, 이에 따라 응력확대계수 역시 가장 크게 나타났다. 또한, 해석 결과 시험편 내의 구멍의 개수와는 상관 없이 구멍이 초기 크랙과 가까울수록 발생하는 변형, Strain energy와 응력이 커지는 경향을 나타냈다.

3. 각 시험편에서의 최대 응력은 주로 크랙 부분이나 그 주변부위에서 나타났으며, 최대 Strain energy 역시 마찬가지로 시험편 내의 크랙부분이나 그 주변부위에서 발생하는 것으로 나타났다.
4. 크랙이 발생하기 쉽거나 혹은 변형이 일어나기 쉬운 부분에 그 가까이가 아닌 적당한 거리에 구멍을 만든다면 오히려 최대 응력과 최대 Strain energy, 그리고 변형량을 최소화하여 기계구조물의 변형이나 파손을 방지할 수 있을 것으로 사료된다.
5. 본 연구결과를 이용하면 기계구조물 내에 결함이나 구멍 등이 있을 때 그 피로파괴 가능성을 검증할 수 있는 자료로 사용될 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0006548).

REFERENCES

- [1] L. Yongming and M. Sankaran in: Fatigue Limit Prediction of notched Components using Short Crack Growth Theory and an Asymptotic Interpolation Method, Engineering Fracture Mechanics,(2008), in press.
- [2] Kwak, D. S., Kim, S. H., Oh, T, Y. Effect of a Single Applied Overload on Fatigue Crack Growth Behavior in Laser-welded Sheet Metal. Int. J. Precis. Eng. Manuf., (7)(3), pp. 30-34, 2006.
- [3] Liu, J., Wang, Y., Li, W. Simplified Fatigue Durability Assessment for Rear Suspension Structure. Int. J. Autom. Technol., 11(5), pp. 659-664, 2010.
- [4] J. U. Cho. Durability Analysis of Automotive Grill

- Frame. Jou. of Korean Soc. of Mechanical Technology, Vol. 14(3), pp. 51 -57, 2012.
- [5] H. K. Choi, J. U. Cho. Experimental Study on Fracture Behaviour of Double Cantilever Beam Specimen with Aluminum Foam. Jou. of Korean Soc. of Mechanical Technology, Vol. 14(5), pp. 37 - 41, 2012.
- [6] H. K. Choi, J. U. Cho. Study on the Fatigue Analysis of DCB Model with Aluminum Foam. Jou. of Korean Soc. of Mechanical Technology, Vol. 14(6), pp. 39-43, 2012.

저자소개

조 재 응(Jae-Ung Cho)



- Feb. 1980: Inha University, B. S. in Mechanical Engineering
- Feb. 1982 : Inha University, M. S. in Mechanical Engineering
- Aug. 1986: Inha University, , Ph. D in Mechanical Engineering

· 1988 ~ Present : Professor, Div. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

<Field of Specialization> :

- Fracture Mechanics(Dynamic Impact)
- Impact Fracture of Composite Material)
- Fatigue and Strength Evaluation
- Durability and Optimum Design
- Design & Analysis of Machine & Automobile