

# 고장력 강판에서의 크랙 전파 및 성장특성에 대한 시뮬레이션 해석

강 병 목<sup>1)</sup> · 김 정 오<sup>2)</sup> · 이 제 훈<sup>2)</sup> · 조 재 웅<sup>3)</sup> · 한 문 식<sup>\*4)</sup>

계명대학교 대학원 기계공학과<sup>1)</sup> · 한국기계연구원 광응용기계연구실<sup>2)</sup> ·  
공주대학교 기계자동차공학부<sup>3)</sup> · 계명대학교 기계자동차공학과<sup>4)</sup>

## Simulation Analysis on the Property of Crack Propagation and Growth at High Tension Steel Plate

Byungmok Kang<sup>1)</sup> · Jengo Kim<sup>2)</sup> · Jaehoon Lee<sup>2)</sup> · Jaeung Cho<sup>3)</sup> · Moonsik Han<sup>\*4)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

<sup>2)</sup>Department of High Density Energy Beam Processing, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Chungnam 32588, Korea

<sup>4)</sup>Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

(Received 25 August 2014 / Revised 21 February 2015 / Accepted 1 June 2015)

**Abstract** : In this study, the property of crack propagation and growth at high tension steel plate existed with center crack is investigated. The behaviors of fracture mechanics due to existence or not of hole near the center crack in specimen and the length of crack length are investigated when the load is applied at the one side end of specimen. Stress, deformation and deformation of this specimen are evaluated through simulation analysis. By the analysis results at this study, stress intensity factors are obtained. The damage happened at machine or structure with crack or defect can be estimated on the basis of study results.

**Key words** : Crack growth(크랙 성장), Deformation(변형량), Equivalent stress(등가응력), High tension steel plate specimen(고장력 강판 시험편), Strain energy(변형률 에너지), Stress intensity factor(응력확대계수)

### 1. 서론

기계 혹은 기계구조물의 파손은 대부분 재료 내부에 존재하고 있는 결함으로부터 발생하는 크랙 진전에 의한 것이다. 이러한 크랙들은 밀집하여 존재하는 경우가 허다하기 때문에 크랙의 성장 특성과 함께 근접해있는 분포 크랙의 간섭과 결함에 의한 성장에 대해서도 고려해야만 한다.<sup>1-3)</sup> 특히, 고장력강 등의 경우 의외로 항복응력보다 더 낮은 응력에서도 파괴가 일어나는 경우들이 있는데 이러한 파손들은 대부분이 해당 재료 내부에 존재하고 있

는 결함으로부터 발생하는 크랙에 의한 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 재료 내부에 크랙이 존재할 때와 크랙의 주변에 구멍(결함) 등이 함께 존재할 때 크랙의 전파 및 성장특성에 대하여 알아보기 위해 총 24가지 종류의 시험편들을 구상한 뒤 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 시뮬레이션 구조 해석을 수행, 크랙의 진전을 연구하였고 시뮬레이션 해석을 통해 Strain energy와 변형량, 응력을 예측하였으며 이를 바탕으로 얻어진 각각의 응력확대계수를 상호 비교해 보았다. 본 연구에서 얻어진 시뮬레이션 해석 결과값들을 통하여 재료 내에서 파괴를 일으킬 수 있는 크랙의 역학적 거동을 분석

\*Corresponding author, E-mail: sheffhan@kmu.ac.kr

할 수 있고, 재료 내에 존재하는 크랙에 의해 재료의 변형과 Strain energy의 변화, 응력의 발생 및 증가로 재료의 파괴 가능성이 있음을 예측해 볼 수 있었다. 이에 따라 본 연구결과를 이용하면 기계 혹은 기계 구조물 내에 크랙이나, 구멍 등의 결함이 존재할 때 그 피로 및 파괴 가능성을 검증하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.<sup>4,5)</sup>

## 2. 모델의 설계 및 연구 방법

### 2.1 설계 방법

시뮬레이션 해석을 수행하기에 앞서 시험편 해석 모델들을 2D 모델로서 ANSYS 유한요소해석 프로그램의 디자인 모델러를 사용하여 설계하였다. 설계된 모델들의 형태는 다음에 도시된 Fig. 1, Fig. 2와 같으며, 각 모델들은 중앙크랙 길이 1mm단위로 Fig. 1 형태의 모델들은 3mm ~ 12mm까지 10개, Fig. 2 형태의 모델들은 3mm ~ 16mm까지 14개로 총 24개의 모델들을 설계하여 해석을 수행하였다.<sup>6)</sup>

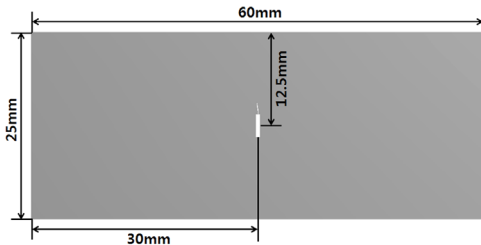


Fig. 1 Dimensions of high tension steel plate specimen (Center crack only)

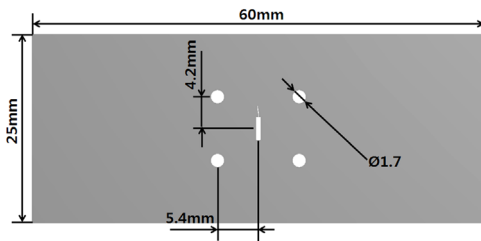


Fig. 2 Dimensions of high tension steel plate specimen (Center crack with 4 holes)

### 2.2 실험 방법

본 연구에서는 해석 결과와의 비교 검토를 위하여 중앙크랙이 존재하는 고장력 강판 시험편과 중

앙크랙뿐만 아니라 크랙의 주변에 대칭으로 4개의 구멍들이 존재하는 고장력 강판 시험편을 가지고 피로 실험하였으며 이들 시험편들을 피로 시험기에 장착된 모양은 Fig. 3과 같다. 실험 수행에 앞서 시험편의 한끝을 인장시험기의 Load cell에 고정시키고 시험편의 다른 한쪽 끝을 인장시험기의 Ram을 이용하여 3747N의 힘으로 잡아당긴다. 이를 모든 시험편에 동일하게 적용하여 실험을 수행하였다. 또한, 다음에 도시된 Fig. 4와 Fig. 5는 한 시험편을 예로 들어 각각 시험편의 실험 수행 초기 단계와 실험 수행 마지막 단계를 나타낸 것이다.

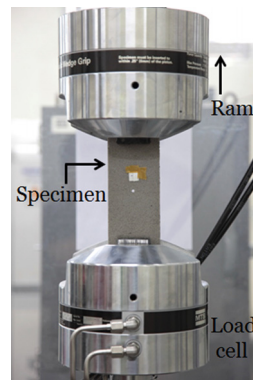


Fig. 3 Set up of specimen at impact tester

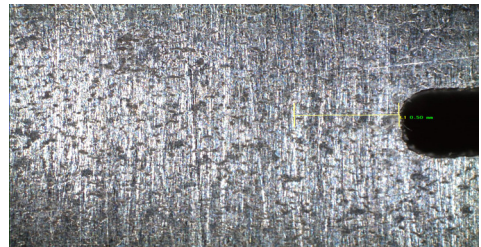


Fig. 4 Configuration of the specimen at the initial stage of the experiment

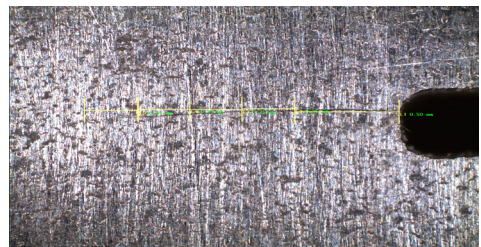


Fig. 5 Configuration of the specimen at the final stage of the experiment

### 2.3 해석 방법

본 연구에서의 중앙크랙이 존재하는 고장력 강판 시험편 모델들과 중앙크랙뿐만 아니라 크랙의 주변에 대칭으로 4개의 구멍들이 존재하는 고장력 강판 시험편 모델들에 대한 시뮬레이션 해석 방법은 다음과 같다. 시험편을 인장시험기에 장착한 것으로 가정하였을 때 시험편의 한쪽 끝을 Load cell에 고정 한 것처럼 모델의 한쪽 끝을 Fixed support 조건을 부여하여 고정시키고 다른 한쪽 끝은 인장시험기의 Ram으로 잡아당기는 것처럼 3747N의 힘을 주어 잡아당겨 해석을 수행하였다.

### 3. 경계 조건 및 모델의 물성치

시뮬레이션 해석을 수행하기에 앞서 크랙이 존재하는 고장력 강판 시험편 모델들의 경계 조건을 다음의 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. 위에서 언급한 바와 같이 각 시험편 모델들의 한쪽끝을 Fixed support 조건으로 고정하였고, 다른 한쪽 끝에 3747N의 힘을 주어 잡아당겨 변형과 응력의 발생을 해석을 통해 알아보하고자 하였다. 또한 Table 1은 시뮬레이션 해석에 적용한 시험편 모델들의 물성치이다.

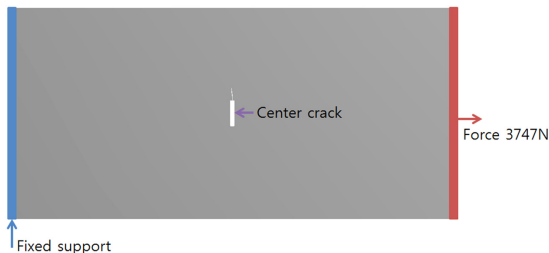


Fig. 6 Constraint condition of analysis model (Center crack only)

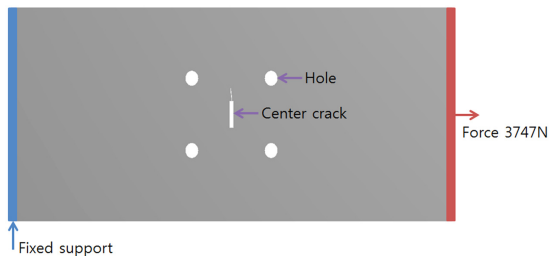


Fig. 7 Constraint condition of analysis model (Center crack with 4 holes)

Table 1 Material property

Young's modulus (GPa)	200
Poisson's ratio	0.3
Density (kg/m)	7850
Yield strength (MPa)	474.8
Ultimate strength (MPa)	626.3

### 4. 응력확대계수 이론식

본 연구에서 사용된 응력확대계수의 식은 다음과 같이 나타내었다. 다음의 식에서 표기된  $K_I$ 은 시뮬레이션 구조 해석으로 얻은 결과값들을 이용한 응력확대계수이고 아래의 식 (1), (2)에서  $\sigma$ 는 작용응력,  $a$ 는 중앙크랙 길이의 2분의 1 길이,  $W$ 는 시편의 세로 길이,  $Y$ 는  $f(a/W)$ 로 표시되는 형상계수를 나타낸다.

본 연구에서의 중앙크랙만이 존재하는 시험편들과 중앙크랙과 함께 그 주변에 4개의 구멍들이 존재하는 시험편들의 응력확대계수들을 각각 해석과 실험값들로 비교하여 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 2는 중앙크랙만이 존재하는 시험편 모델들의 응력확대계수를 나타낸 것이고, Table 3은 중앙크랙과 함께 그 주변에 4개의 구멍들이 존재하는 시험편 모델들의 응력확대계수를 나타낸 것이다.<sup>7,8)</sup>

$$K_I = \sigma \sqrt{a} Y \tag{1}$$

$$Y = 1.77 \left[ 1 - 0.1 \left( \frac{2a}{W} \right) + \left( \frac{2a}{W} \right)^2 \right] \tag{2}$$

$\sigma$ : 작용응력
$a$ : 중앙크랙 길이의 2분의 1 길이
$W$ : 시험편의 세로 길이
$Y$ : $f(a/W)$ 로 표시되는 형상계수

위에서 언급했듯이 Table 2는 중앙크랙만 존재하는 시험편 모델들의 응력확대계수를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 해석 결과 고장력 강판 시험편 모델들의 내부에 있는 중앙크랙의 길이가 커질수록 응력확대계수 역시 커지는 경향을 나타냈으며, 이에 따라 변형량과 응력, Strain energy 역시 커지는 결과가 나타났다. Table 3은 중앙크랙과 함께 그 주변에 4개의 구멍(결함)들이 존재하는 시험편 모델들의 응력확대계수를 나타낸 것으로 해당 모델들 역시

Table 2 Stress intensity factor due to crack length (Center crack only)

The length of crack ( $2a$ )	Stress intensity factor $K_I$
3 mm	17.26487953
4 mm	19.89152642
5 mm	24.01526548
6 mm	26.85213564
7 mm	27.36587519
8 mm	31.89452232
9 mm	33.42159325
10 mm	34.16532984
11 mm	39.21325123
12 mm	41.61532127

Table 3 Stress intensity factor due to crack length (Center crack with 4 holes)

The length of crack ( $2a$ )	Stress intensity factor $K_I$
3 mm	95.82754231
4 mm	67.36541289
5 mm	68.64253127
6 mm	51.62786513
7 mm	50.87453242
8 mm	39.32541876
9 mm	32.26357869
10 mm	46.68775423
11 mm	35.56487951
12 mm	26.12257563
13 mm	22.35432125
14 mm	20.23654862
15 mm	19.04213587
16 mm	14.8987513

중앙크랙의 길이가 커질수록 응력확대계수가 커지는 경향을 나타냈다. 위와 동일하게 변형량과 응력, Strain energy도 대체로 커지는 경향을 나타냈다.

### 5. 해석 결과

다음에 도시된 Fig. 8 ~ Fig. 15는 시뮬레이션 해석 결과의 한 예로서 나타낸 것으로 비교 시험편 모델들은 각각 중앙크랙의 길이 7mm와 12mm의 모델들이다. 해석 결과 변형량의 경우 Fig. 8의 시험편 모델의 경우 즉, 중앙크랙의 길이가 7mm이고 주변에 구멍(결함)이 존재하지 않는 시험편 모델이 약 0.0412mm로 가장 작게 나타났으며, 중앙크랙의 길이가 12mm

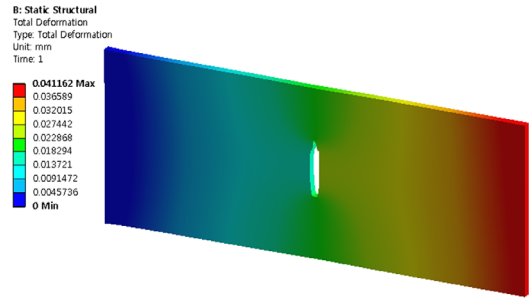


Fig. 8 Deformation of specimen with only a center crack whose length is 7mm

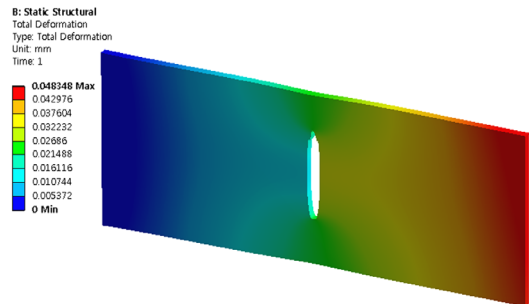


Fig. 9 Deformation of specimen with only a center crack whose length is 12mm

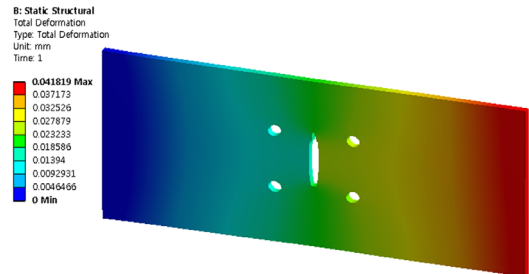


Fig. 10 Deformation of specimen with only a center crack whose length is 7mm and included with 4 holes

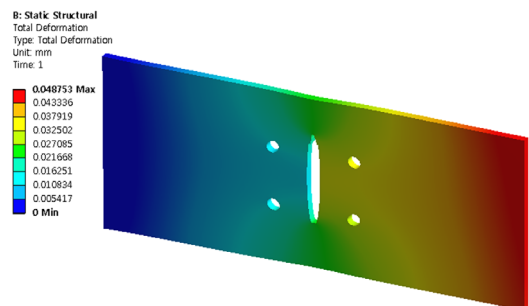


Fig. 11 Deformation of specimen with only a center crack whose length is 12mm and included with 4 holes

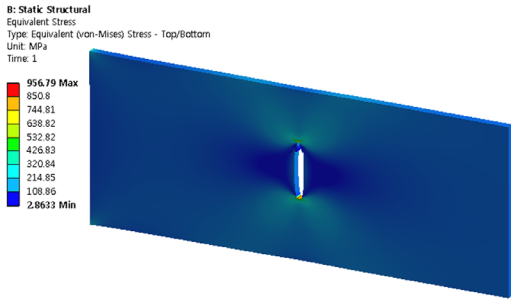


Fig. 12 Equivalent stress of specimen with only a center crack whose length is 7mm

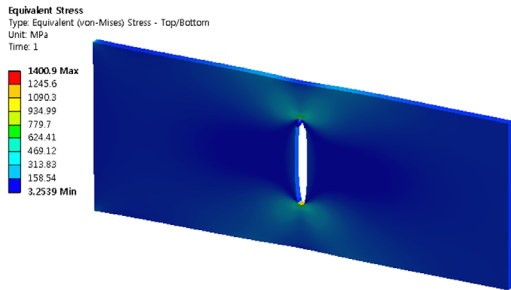


Fig. 13 Equivalent stress of specimen with only a center crack whose length is 12mm

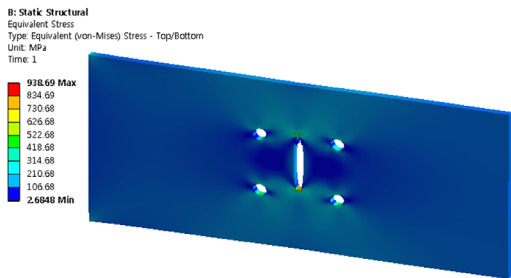


Fig. 14 Equivalent stress of specimen with only a center crack whose length is 7mm and included with 4 holes

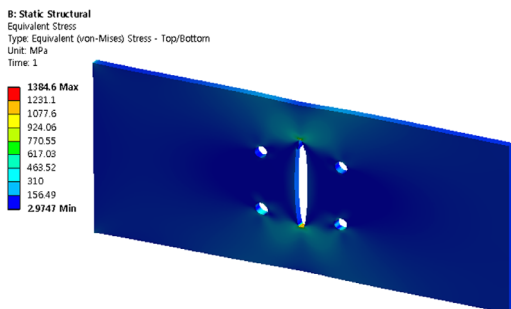


Fig. 15 Equivalent stress of specimen with only a center crack whose length is 12mm and included with 4 holes

이고 크랙의 주변에 구멍이 존재하는 시험편 모델이 약 0.0488mm로 가장 크게 나타났다. 최대 응력의 경우 중앙크랙의 길이가 7mm이고 주변에 구멍이 존재하는 시험편 모델이 약 938.69MPa로 가장 작게 나타났으며, 중앙크랙의 길이가 12mm인 시험편 모델이 약 1400.9MPa로 가장 크게 나타났다. 예외인 경우도 있었지만, 이처럼 시험편 모델들은 중앙크랙의 길이가 커질수록, 크랙의 주변에 구멍이 존재할 때 변형량과 응력이 커지는 경향을 나타냈다.

### 6. 해석과 실험에서의 응력확대계수 비교

Table 4와 Table 5는 해석과 실험에 의해 각각 얻어진 응력확대계수  $K_I$  과 응력확대계수  $K$  를 나타낸 것이며, 시뮬레이션 해석으로 얻은 응력확대계수  $K_I$  을 기준으로 하여 상호 비교해보았다. 비교 결과 Table 4의 경우 오차는 최대 4.47%, 최소 1.46%였으며, Table 5의 경우 오차는 최대 5.2%, 최소 0.9%였다. 또한, 시뮬레이션 해석과 실험 간의 결과값들의 차이가 크지 않은 것으로 나타났기 때문에 시뮬레이션 해석만으로도 신뢰할 수 있는 결과값들의 도출이 가능할 것으로 사료된다.

Table 4 Comparison stress intensity factor (Center crack only)

The length of crack (2a)	Stress intensity factor $K_I$	Stress intensity factor $K$	Error (%)
3 mm	17.26487953	18.03567896	-4.46%
4 mm	19.89152642	20.7807873	-4.47%
5 mm	24.01526548	23.32094067	2.89%
6 mm	26.85213564	25.74920985	4.11%
7 mm	27.36587519	28.1290934	2.79%
8 mm	31.89452232	30.50989748	4.34%
9 mm	33.42159325	32.93436782	1.46%
10 mm	34.16532984	35.44329643	-3.74%
11 mm	39.21325123	38.0789579	2.89%
12 mm	41.61532127	40.88831122	1.75%

### 7. 응용사례

다음에 도시된 Fig. 16은 본 연구와 유사하면서 조금 더 응용된 사례로서 초기 크랙이 존재하는 C-T 시험편(Compact tension specimen)을 이용한 크랙 전파 및 성장 특성을 연구한 것이다. 고장력 강판 시험

Table 5 Comparison stress intensity factor (Center crack with 4 holes)

The length of crack (2a)	Stress intensity factor $K_I$	Stress intensity factor $K$	Error (%)
3 mm	95.82754231	100.1934476	-4.56%
4 mm	67.36541289	69.29820134	-2.87%
5 mm	68.64253127	69.91309848	-1.85%
6 mm	51.62786513	49.26310832	4.58%
7 mm	50.87453242	51.30821686	-0.9%
8 mm	39.32541876	40.65450489	-4.12%
9 mm	32.26357869	33.94046892	-5.2%
10 mm	46.68775423	48.34705508	-3.55%
11 mm	35.56487951	34.74869251	2.29%
12 mm	26.12257563	25.28802875	3.19%
13 mm	22.35432125	23.037346	3.06%
14 mm	20.23654862	20.96653589	-3.61%
15 mm	19.04213587	18.44090726	3.16%
16 mm	14.8987513	14.20073872	4.69%

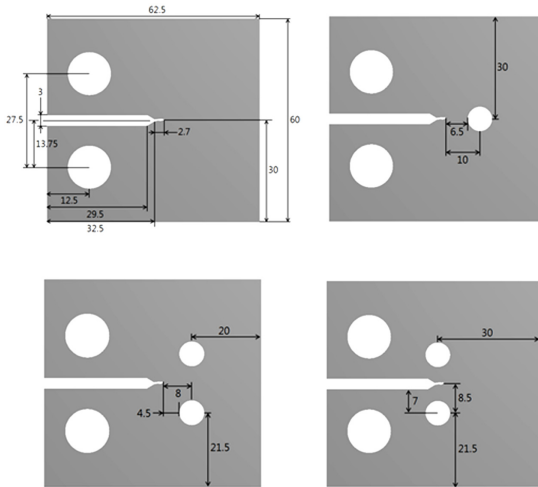


Fig. 16 Figures of compact tension specimens

편과 마찬가지로 크랙의 주변에 구멍이 존재할 경우 응력이 증가하는 경향을 나타냈으며, 이러한 구멍이 초기 크랙과 가까울수록 응력과 변형량이 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, 이는 구멍의 개수와는 무관한 것으로 나타났는데 오히려 초기 크랙의 주변에 구멍이 없는 첫 번째 줄 왼쪽의 시험편보다 초기 크랙 주변에 구멍이 존재하는 첫 번째 줄 오른쪽의 시험편과 두 번째 줄 오른쪽의 시험편의 경우 발생하는 응력이 더 작게 나타났다. 이를 바

탕으로 기계나 혹은 기계구조물 내 적절한 위치를 찾아내어 구멍을 만든다면 발생하는 응력을 감소시키는 효과를 내어 파손이 일어나는 경우를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

## 8. 결론

본 연구에서는 내부에 크랙과 구멍(결함)이 존재하는 고장력 강판 시험편 모델들에 대하여 크랙의 전과 및 성장특성을 주제로 시뮬레이션 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 기계나 기계구조물에 쓰이는 고장력 강판에 크랙이나 구멍(결함) 등이 발생하거나 혹은 존재할 때를 가정하여 시뮬레이션 해석을 수행하여 이에 발생하는 응력과 변형, Strain energy를 예측할 수 있었다.
- 2) 시뮬레이션 해석 결과 중앙크랙의 길이가 커지면 커질수록 시험편의 변형량과 Strain energy, 응력이 대체로 크게 나타났으며, 시험편 모델의 중앙크랙 주변에 구멍(결함)이 존재할 시 중앙크랙의 길이가 길어지는 변수보다 응력이 더 크게 발생하는 경향을 보였다.
- 3) 시뮬레이션 해석 결과 각 시험편 모델들에서의 최대 응력은 주로 크랙의 위 혹은 아랫단에서 나타났다. 크랙의 주변에 구멍이 존재할 경우 크랙의 위나 아래 부분 뿐만 아니라 결함에서도 응력이 크게 나타나는 경향을 보였다.
- 4) 본 연구결과를 이용하면 기계나 혹은 기계구조물 내에 크랙이나 구멍 등의 결함이 존재할 때 그 파괴 및 파괴 가능성을 검증하고 뒷받침 있는 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- 1) Z. Wu, X. Cheng and J. Yuan, "Applying Axiomatic Design Theory to the Multi-objective Optimization of Disk Brake," International Federation for Information Processing, Vol.370, pp.62-73, 2012.
- 2) D. A. Hancq, A. J. Walters and J. L. Beuth, "Development of an Object Oriented Fatigue Tool," Engineering with Computers, Vol.16,

- Issue 2, pp.131-144, 2000.
- 3) T. I. Yeo, "A Study on Wear Life Prediction of Disk Brake Pads," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.199-205, 2002.
  - 4) Y. C. Park and D. W. Lee, "Shape Optimization of the Lower Control Arm Using the Characteristic Function and the Fatigue Analysis," Transactions of KSAE, Vol.13, No.1, pp.119-125, 2005.
  - 5) J. H. Kim, D. U. Park, J. H. Lee, M. K. Kim and W. S. Yoo, "Evaluation of Ride Comfort considering Seat Vibration," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.933-938, 2002.
  - 6) H. Y. Kim, K. T. Lee, H. I. Choi, S. T. Kim, C. S. Park and D. J. Lee, "Structural Analysis for the Development of Round Recliner," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1361-1366, 2003.
  - 7) M. S. Kim, K. J. Ko, H. W. Song, C. G. Yang and K. M. Kim, "The Finite Element Analysis on 2-piece Forged Wheel for Fatigue Life Prediction," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.691-696, 2004.
  - 8) M. S. Kim, K. J. Ko, J. H. Kim, C. G. Yang and K. M. Kim, "The Study on the Fatigue Life Prediction on Wheels through CAE," Transactions of KSAE, Vol.12, No.2, pp.117-122, 2004.