



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

아세트산 용액에서 초고강도강(HV550)의 탄성과 특성



2021년 8월

부경대학교 대학원

마린융합디자인공학과

팽 재 은

공학석사 학위논문

아세트산 용액에서 초고강도강(HV550)의 탄성과 특성

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2021년 8월

부경대학교 대학원

마린융합디자인공학과

팽 재 은

팽재은의 공학석사 학위논문을 인준함

2021년 8월 27일



주 심 공학박사 김 권 후 (인)

위 원 공학박사 김 철 수 (인)

위 원 공학박사 남 기 우 (인)

목 차

Abstract

1. 서론	1
2. 재료 및 실험 방법	3
2.1 재료 및 시험편	3
2.2 실험 방법	6
3. 결과 및 고찰	8
3.1 인장시험에서 검출된 탄성과 신호	8
3.2 아세트산 용액에서 검출된 탄성과 신호	11
3.3 응력 $K_c = 7.1 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 5.56 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서 검출된 탄성과 신호	15
3.4 응력 $K_c = 4.76 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서 검출된 탄성과 신호	28
3.5 응력 $K_c = 2.54 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 2.07 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서 검출된 탄성과 신호	39
4. 결론	48
References	49
발표 논문 목록	54
감사의 글	59

Elastic Wave Properties of Ultra-High Strength Steel (HV550) in Acetic Acid Solution

Jae-Eun Paeng

Department of Marine Design Convergence Engineering

Directed by Professor Ki-Woo Nam

Abstract

In this study, when different bending stresses were applied to cracked specimens of high strength steel (SKD11: HV550) immersed in 0.057M solution of acetic acid (CH_3COOH), elastic waves were detected and frequency characteristics were analyzed using time-frequency analysis. The dominant frequency band by the tensile test was approximately 103 kHz, and in the acetic acid solution without stress were approximately 32 kHz and 101 kHz. The dominant frequency bands of the crack specimens in which cracks propagated were three groups of about 30-40 kHz(F1), about 60-85 kHz(F2), and about 100-110kHz(F3). The elastic wave was obtained by corrosion, pitting, crack initiation, and propagation, but no elastic wave was detected during the hydrogen aggregation time. The dominant frequency bands of the crack specimen without crack propagation were two groups of approximately 28-33 kHz(F1) and approximately 94-109 kHz(F3). This is the same as the dominant frequency band in the acetic

acid solution under non-stress. The fracture surface showed many traces of pitting and corrosion regardless of the applied stress, and microcracks were observed in Cr carbide.



1. 서론

고강도강 및 초 고강도강(Ultra high strength steel; UHSS)은 강도와 인성이 우수한 기계적특성 때문에 착륙 기어와 같은 항공기 구성요소, 자동차, 해상 시설과 선박 및 구조물 등 다양한 분야에서 사용되고 있다.[1,2] 그러나 템퍼링된 고강도강은 마르텐사이트 조직이 증가하여, 수소 취화에 민감하다.[3,4] 특히 인장강도가 1,000MPa 이상인 UHSS의 경우, 부하 상태에서 수소 농도가 국부적으로 허용한계를 초과하면, 외견상 소성 변화 없이 수소 침입에 의한 수소 유기 균열 (Hydrogen assisted cracking; HAC)이 발생하여 갑자기 파괴되는 지연파괴가 일어난다.[5-7] 그러므로 초 고강도강은 수소 취화 때문에 용도가 제한되므로, 이 문제를 해결하기 위한 연구는 많다.[8-24]

한편, 수소 취화 균열의 발생기구는 공공을 차지한 수소 분자의 압력으로 균열이 전파된다는 압력설[25], 균열의 선단에 흡착된 수소가 균열성장의 표면에너지를 감소시킨다는 표면흡착설[26], 수소로 인하여 국부적으로 소성변형이 억제되어 균열이 발생한다는 국부소성 증가설[27] 등이 있다. 그러나 수소 발생 분위기에서 균열의 발생과 진전에 따르는 탄성파의 검출에 관한 비파괴 평가 연구는 거의 없는 실정이다.[28]

본 연구는 아세트산(CH_3COOH) 0.057M 수용액에 침지한 고강도강 (SKD11: HV550) 균열재 시험편에 굽힘 응력을 다르게 작용시킨 경

우, 균열의 발생 및 진전에 따르는 탄성파를 검출하고, LabVIEW로 제작한 시간-주파수 해석법으로 주파수 특성을 분석하였다. 누적 탄성파, 주파수 특성 및 파단면 관찰에서 굽힘 응력에 따른 시험편의 균열 진전 상태를 관찰하고, 고강도강 구조물의 모니터링에 기초 자료를 제공하고자 한다.



2. 재료 및 실험 방법

2.1 재료 및 시험편

아세트산 용액에 침지한 시험편의 균열 발생 및 진전에서 얻어지는 탄성과 검출에 사용한 재료는 냉간합금공구강 SKD11이다. SKD11은 Fig. 1에 나타내는 것과 같이 크롬 탄화물이 존재한다.[29]

SKD11은 실험에 필요한 비커스경도(HV) 550을 얻기 위하여 열처리하였다. 열처리 조건은 Fig. 2와 같이 1,050℃에서 2시간 유지 후 쿨링, 520℃에서 3시간 유지 후 템퍼링하였다. SKD11의 화학성분은 Table 1에 나타내었다. 탄성과 검출은 Fig. 3과 같은 시험편을 사용하여, 아세트산 0.057M에서 실험하였다.

시험편의 초기 균열은 방전가공(Electric discharge machining; EDM)으로 판 폭 10mm의 중앙에 도입하였으며, 균열종횡비(a/c)는 1.0이다. Fig. 3에 나타낸 시험편 끝단의 정피로 하중은 Newman-Raju 식[30]을 적용하여, 균열 길이(c)와 깊이(a)의 응력확대 계수 K_c , K_a 를 결정하였다.

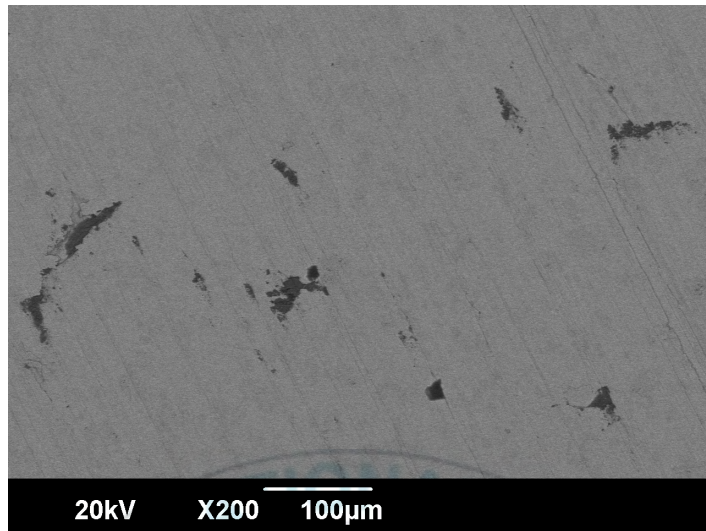


Fig. 1 Chromium carbides on cross section of as-received material SKD11.

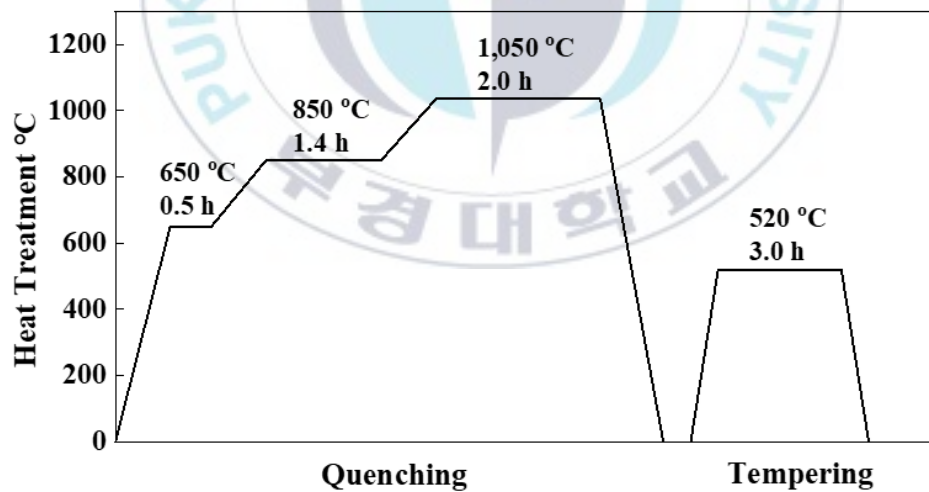


Fig. 2 Heat treatment conditions to obtain HV550.

Table 1 Compositions of SKD11 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
1.489	0.272	0.329	0.024	0.001	0.239	11.29	0.843	0.236

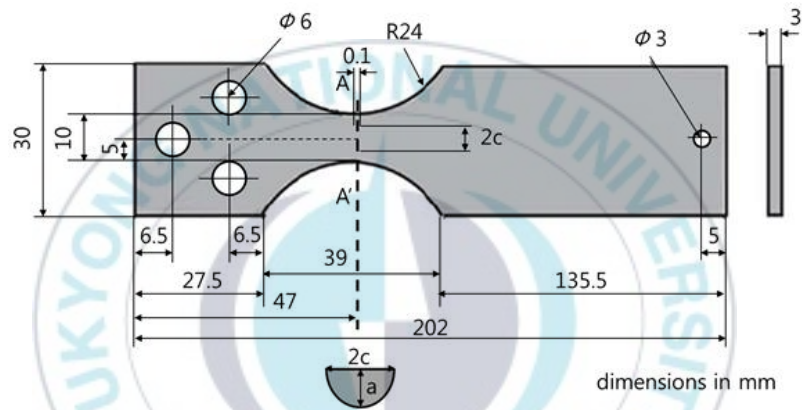


Fig. 3 Specimen shape and dimensions for elastic wave detection in corrosive solution.

2.2. 실험 방법

인장시험은 만능 인장시험기 (OTU-10C, 한국 Oriental) 사용하여, 0.2mm/min의 속도로 인장하였다. 수소 유기를 위한 아세트산 부식 환경은 시험편의 판폭 10mm 부분에 약 60mL 플라스틱 통으로 만들어 고정하였다. 수소 유기 균열의 발생 및 진전에 의한 탄성파는 시험편 끝단에서 약 50mm 위치에 1MHz의 광대역 센서를 부착하여, 28dB 전치증폭기를 거쳐 검출하였다. 탄성파 신호의 검출은 NI PXIe SYSTEM을 사용하였으며, 모든 탄성파는 디지털화시켜 저장한다. 탄성파 검출 샘플링 속도는 1.048M samples/s이고, 샘플링 크기는 4,096 개이다. 탄성파는 LabVIEW를 활용하여 제작한 프로그램으로 시간-주파수 분석하였다. Fig. 4는 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 시험편의 단면은 실험 종료 후에 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM, JEM-6490LV, 일본 JEOL)을 이용하여 관찰하였으며, Cr 탄화물의 성분은 전계방사형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope : FESEM, MIRA 3 LMH, TESCAN)에 부착되어 있는 에너지 분산형 X선 분광기(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)로 분석하였다.

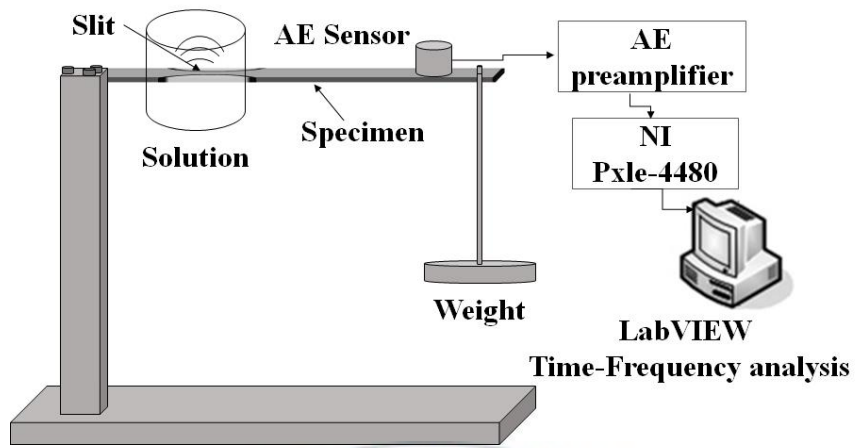


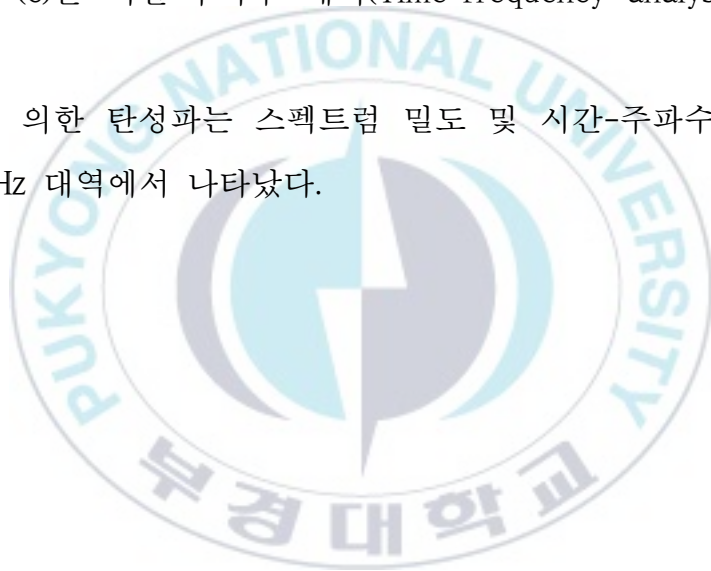
Fig. 4 Elastic wave detection system generated in immersion test.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험에서 검출된 탄성과 신호

Fig. 5는 인장시험에서 검출된 탄성과 신호이다. 그림에서 (a)는 탄성과 형(Elastic waveform), (b)는 스펙트럼 밀도(Spectrum density), (c)는 시간-주파수 해석(Time-frequency analysis)을 나타낸다.

인장에 의한 탄성파는 스펙트럼 밀도 및 시간-주파수 해석에서 약 103kHz 대역에서 나타났다.



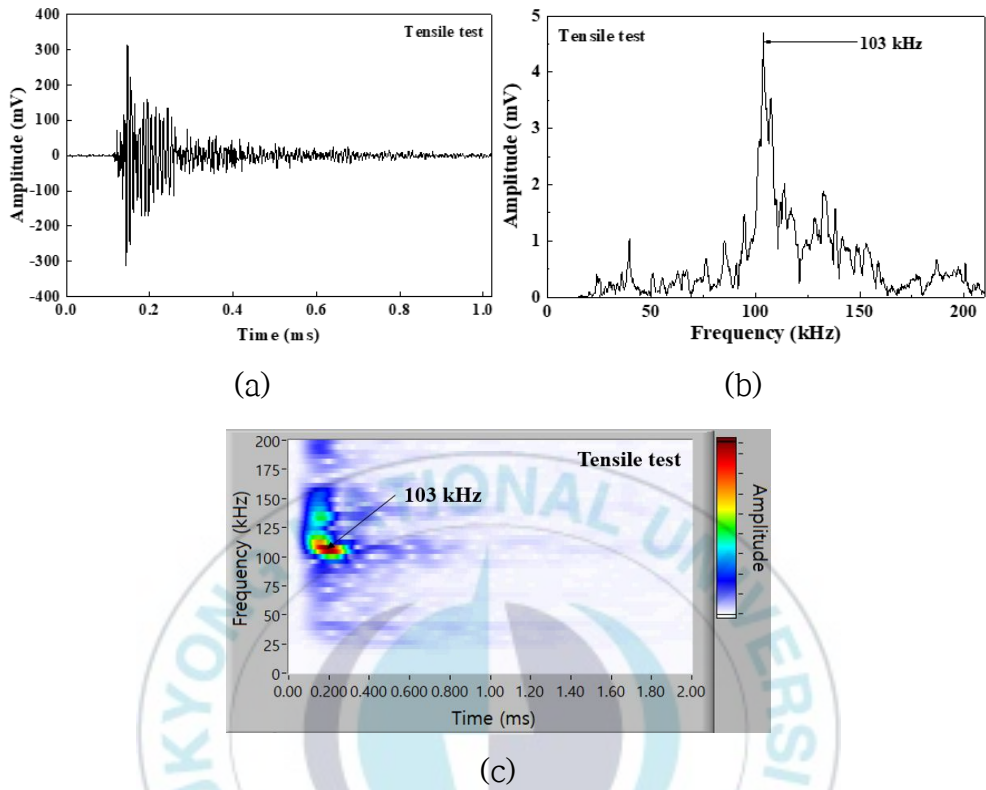


Fig. 5 Elastic wave signal detected from tensile test. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis

Fig. 6은 Fig. 5(c)와 같은 시간-주파수 해석에서 얻어진 탁월주파수를 인장시험 시간에 대하여 나타내었다. 인장시험에 의한 탁월주파수는 스펙트럼 밀도 및 시간-주파수 해석에서 약 103kHz 대역에서 나타났다.

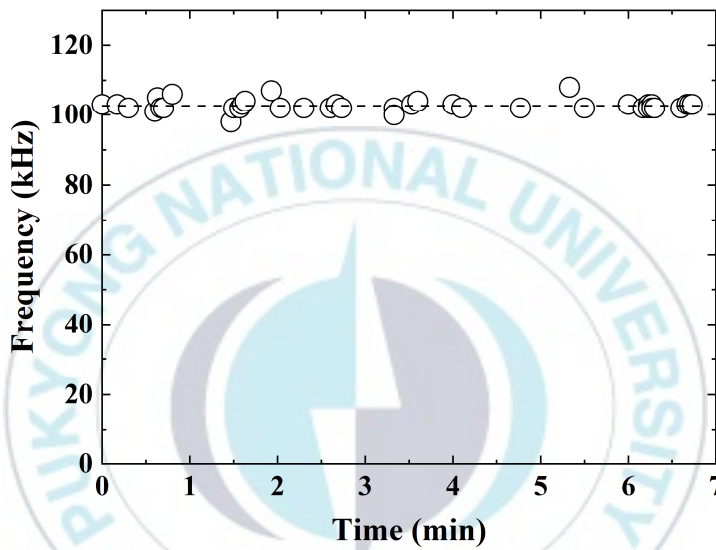


Fig. 6 Relationship between cumulative counts, dominant frequency and test time of tensile test.

3.2 아세트산 용액에서 검출된 탄성과 신호

Fig. 7은 부식 용액인 아세트산에 침지한 시험편에 응력을 부하하지 않은 상태에서 검출된 탄성과 신호이다. 그림에서 (a)는 파형(Waveform), (b)는 스펙트럼 밀도(Spectrum density), (c)는 시간-주파수 해석(Time-frequency analysis)을 나타낸다.

부식에 의한 탄성파는 스펙트럼 밀도 및 시간-주파수 해석에서 약 32kHz 및 101kHz 대역에서 나타났다.



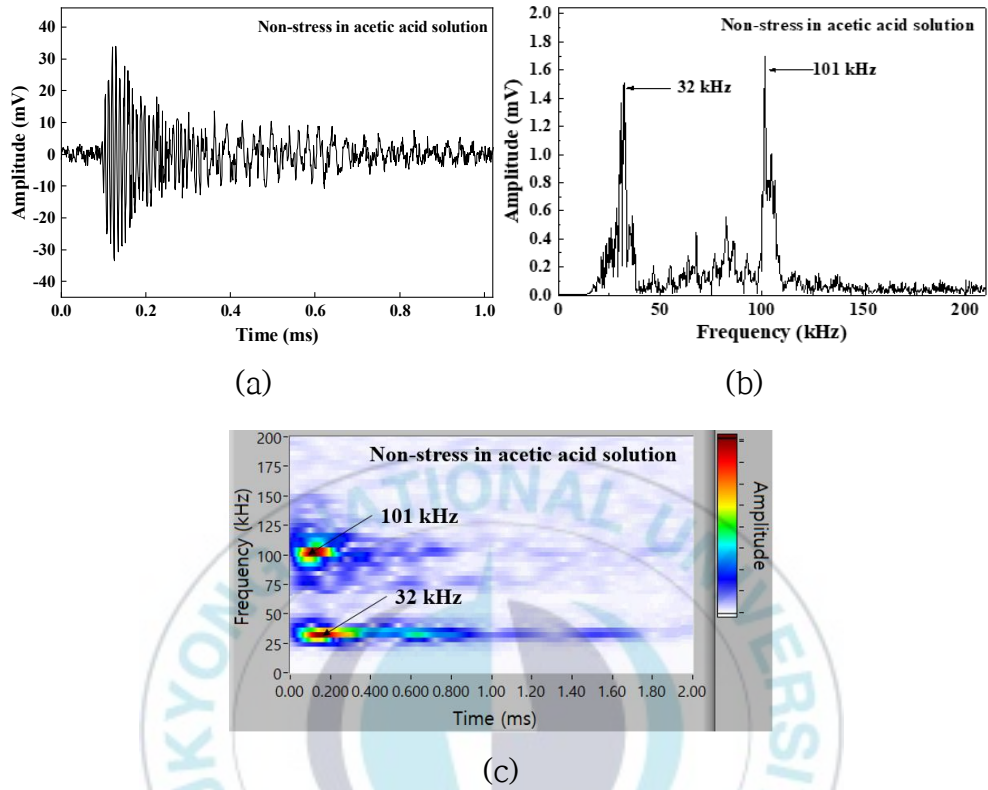


Fig. 7 Elastic wave signal detected under non-stress in acetic acid solution. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis

Fig. 8은 Fig. 7(c)와 같은 시간-주파수 해석에서 얻어진 탁월주파수 및 누적탄성파를 실험 시간에 대하여 나타내었다. 아세트산에 침지한 시험편의 탁월주파수는 스펙트럼 밀도 및 시간-주파수 해석에서 약 32kHz(F1) 및 100kHz(F3) 대역에서 나타났다. 여기서 탁월주파수대역 F1은 부식에 의한 탁월주파수대역이지만, 탁월주파수대역 F3는 인장시험에서 얻어진 Fig. 6의 탁월주파수대역과 비슷하게 얻어졌다. 이 원인을 파악하기 위하여 시험편 표면을 관찰하였다.

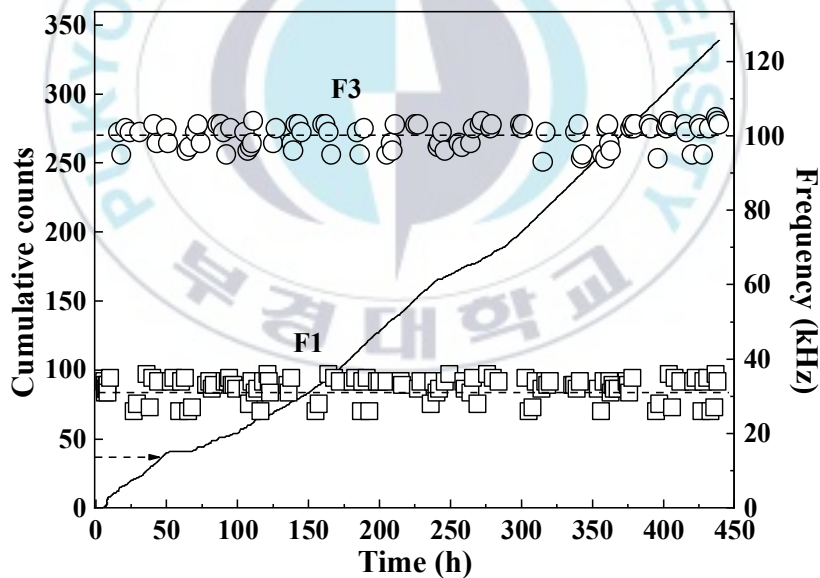


Fig. 8 Relationship between cumulative counts, dominant frequency and test time under non-stress in acetic acid solution.

Fig. 9는 아세트산 용액에서 응력을 부하하지 않은 시험편 표면을 나타낸다. 시험편 표면은 많은 피팅이 관찰되었다. Fig. 8의 F3는 피팅의 형성과정에서 나타난 탁월주파수대역인 것을 알 수 있다.

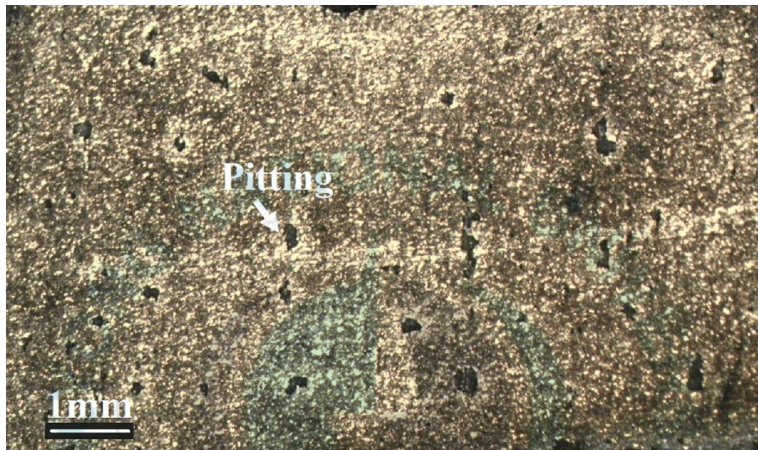
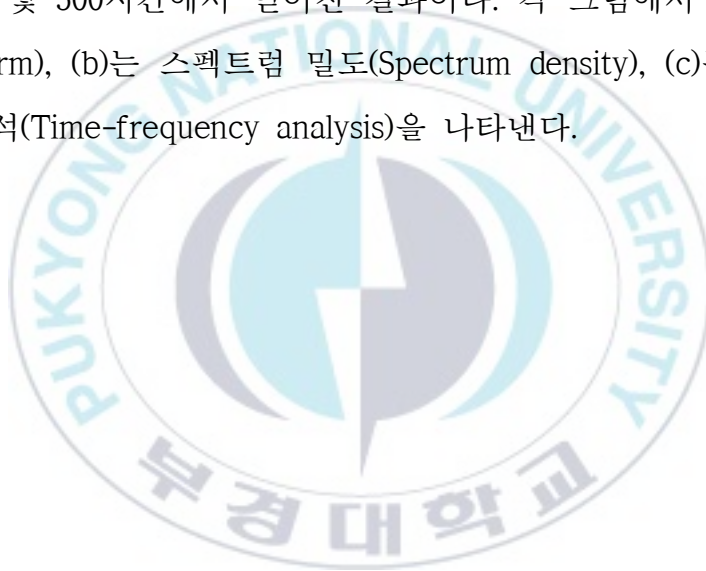


Fig. 9 Pitting obtained from specimen surface under non-stress in acetic acid solution.

3.3 응력 $K_c = 7.1 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 5.56 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 에서 검출된 탄성파 신호

Fig. 10, 11 및 12는 표면균열의 응력확대계수가 $K_c = 7.1 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 5.56 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 이 되는 응력이 작용한 경우에서 얻어진 결과를 나타낸다. Fig. 10, 11 및 12는 각각 10시간, 266시간 및 500시간에서 얻어진 결과이다. 각 그림에서 (a)는 파형(Waveform), (b)는 스펙트럼 밀도(Spectrum density), (c)는 시간-주파수 해석(Time-frequency analysis)을 나타낸다.



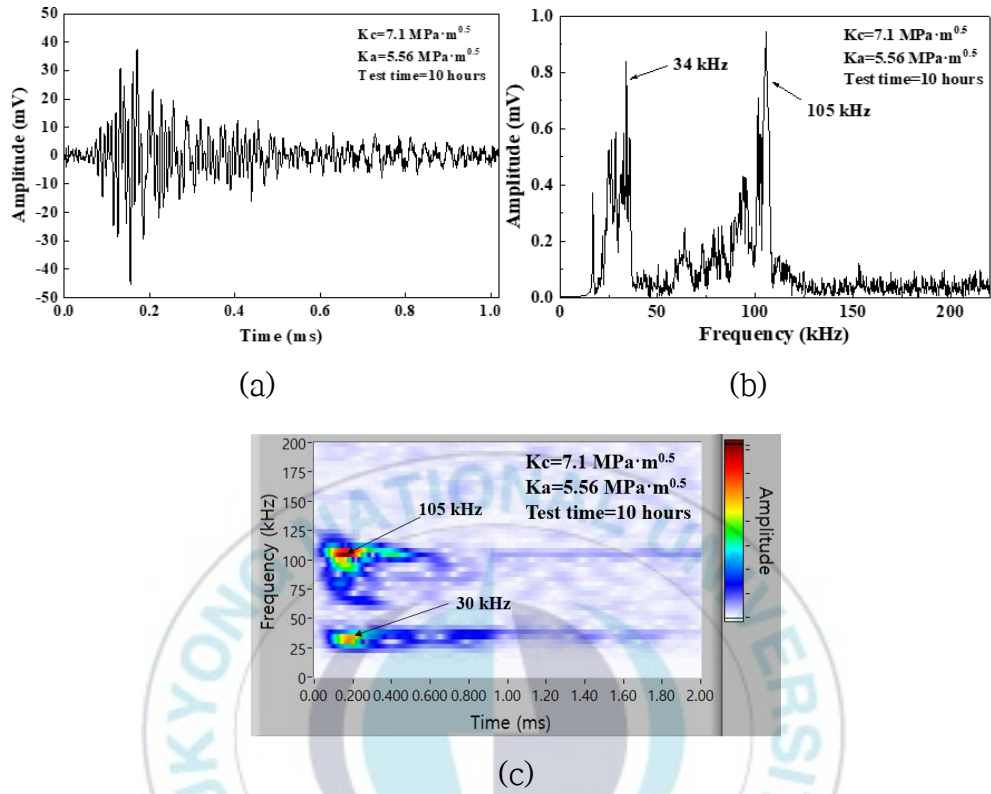


Fig. 10 Elastic wave signal detected from 10 hours under stress of $K_c = 7.1 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, $K_a = 5.56 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis

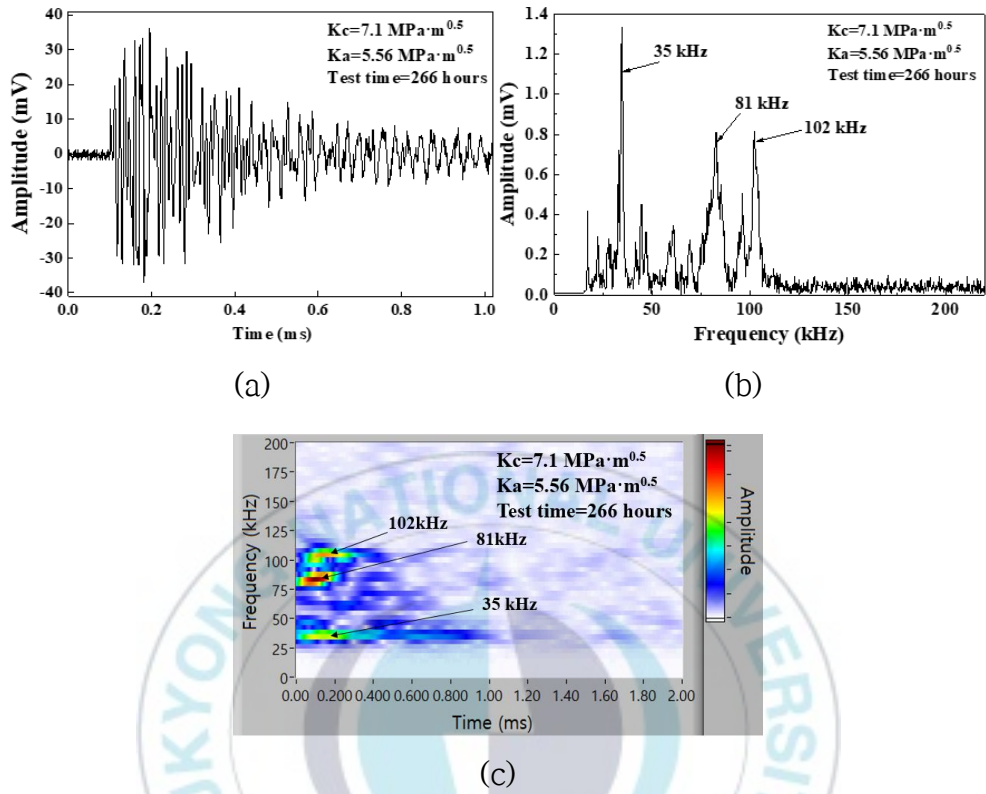


Fig. 11 Elastic wave signal detected from 266 hours under stress of $K_c = 7.1 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 5.56 \text{ MPa}\sqrt{m}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis

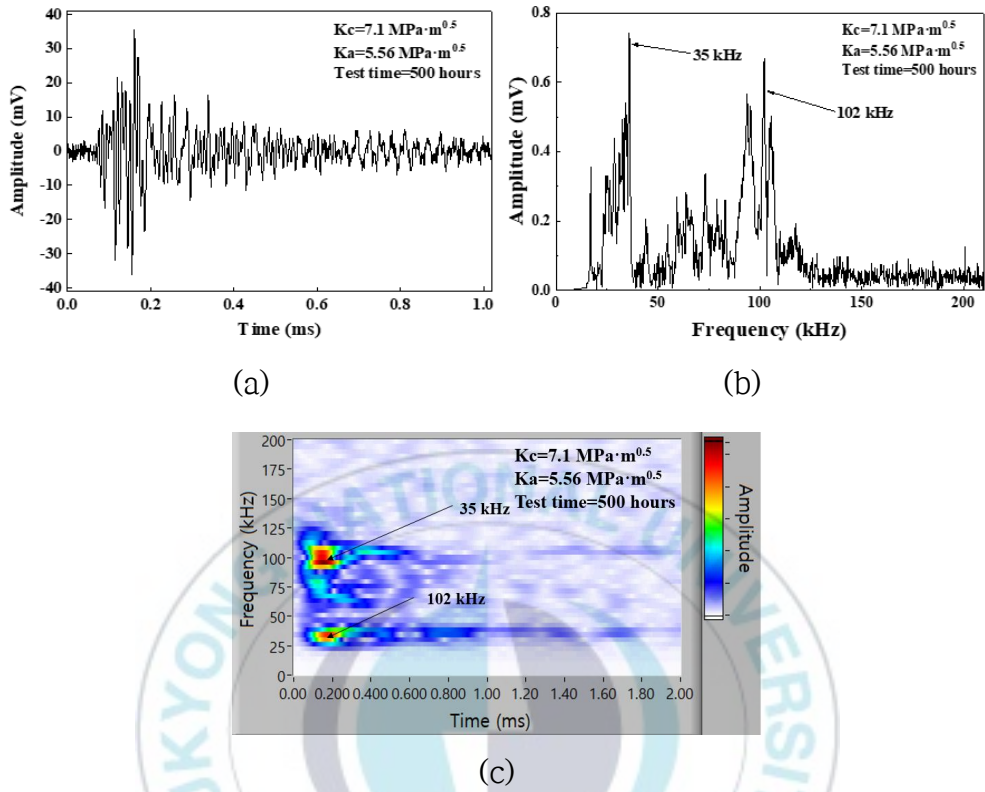


Fig. 12 Elastic wave signal detected from 500 hours under stress of $K_c = 7.1 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, $K_a = 5.56 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis

Fig. 13은 $K_c = 7.1 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 5.56 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 의 응력이 작용하는 시험편의 부식 용액 침지에서 얻어진 누적탄성파와 Fig. 10~12(c)와 같은 시간-주파수 해석에서 얻어진 탁월주파수를 실험 시간에 대하여 나타내었다. 탄성파는 약 30~35kHz(F1), 약 77~85kHz(F2) 및 약 100~106kHz(F3)의 3그룹으로 나타났다. 탁월주파수대역 F1은 Fig. 7에 나타내었듯이 부식에서 얻어진 것이다. 탁월주파수대역 F2 및 F3는 피팅, 균열 발생 및 진전에서 얻어진 것으로 판단된다. 또한 탄성파는 약 0~33시간, 40~64시간 및 235~258시간, 328~366시간 및 399~445시간에서 나타나지 않았다. 이 시간은 초기 균열 선단에 수소가 응집하는 시간으로 판단된다. 탄성파 신호는 32~40시간, 64~235시간, 258~328시간, 366~399시간 및 445~517시간(실험 종료 시간)에 나타났다. 이 시간은 수소 응집에서 수소 유기 균열이 발생하고, 진전하는 구간이라 판단된다. 탄성파는 64~235시간 및 445~517시간에서 피팅, 수소 유기 균열에 의한 탄성파 신호가 많이 발생하였다. 이것은 초기 균열에 큰 응력이 작용하여, 부식 용액에 의한 피팅의 발생과 수소 유기 균열 진전이 원인으로 Fig. 14에서 확인할 수 있다.

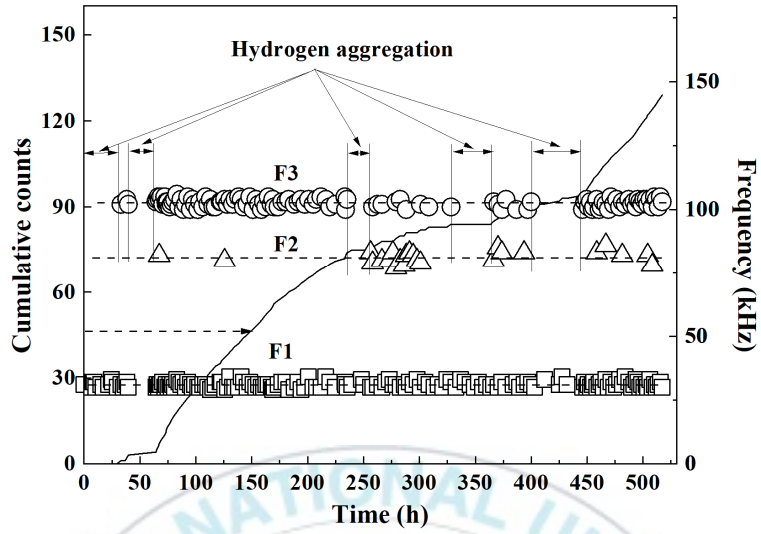


Fig. 13 Relationship of cumulative counts, dominant frequency for test time under stress of $K_c = 7.1 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 5.56 \text{ MPa} \sqrt{m}$.

Fig. 14는 실험 후 파단면의 SEM 사진이다. 초기 균열은 아세트 산으로 부식되고, 표면부는 피팅에 의하여 큰 공동이 발생하였다. 초기 균열 선단은 부식되었고, 1차 수소 유기 균열은 표면의 공동 부분을 포함하여 진전하였다. 2차 수소 유기 균열은 큰 응력의 작용으로 진전 속도가 증가하였으며, 파단면의 미소 균열은 Cr 탄화물에 발생하였다. 미소 균열은 최종 파단부의 Cr 탄화물에도 나타났다.

Fig. 15는 Fig. 14에서 1차 수소 유기 균열 부분의 A, B, C 및 D를 확대하여 나타낸다. A, B 및 C는 수소 유기에 의한 균열 진전으로 물결무늬 모양을 나타내고 있으나, D는 A, B, C와 다른 검은 모양의 Cr 탄화물이 관찰되었다.

Fig. 16은 Fig. 14에서 2차 수소 유기 균열 부분의 E와 F를 확대하여 나타낸다. 파단면은 고강도강의 취성 파면을 나타내고 있으며, 미소 균열은 Cr 탄화물에 관찰되었다.

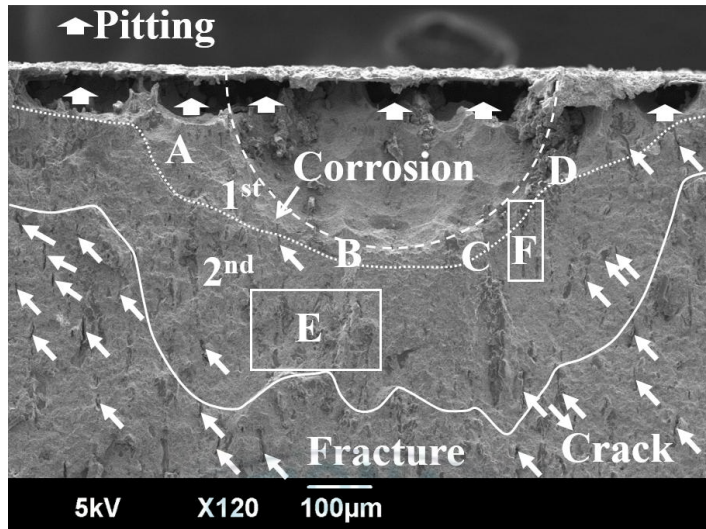


Fig. 14 Fracture surface obtained under stress of $K_c = 7.1 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 5.56 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

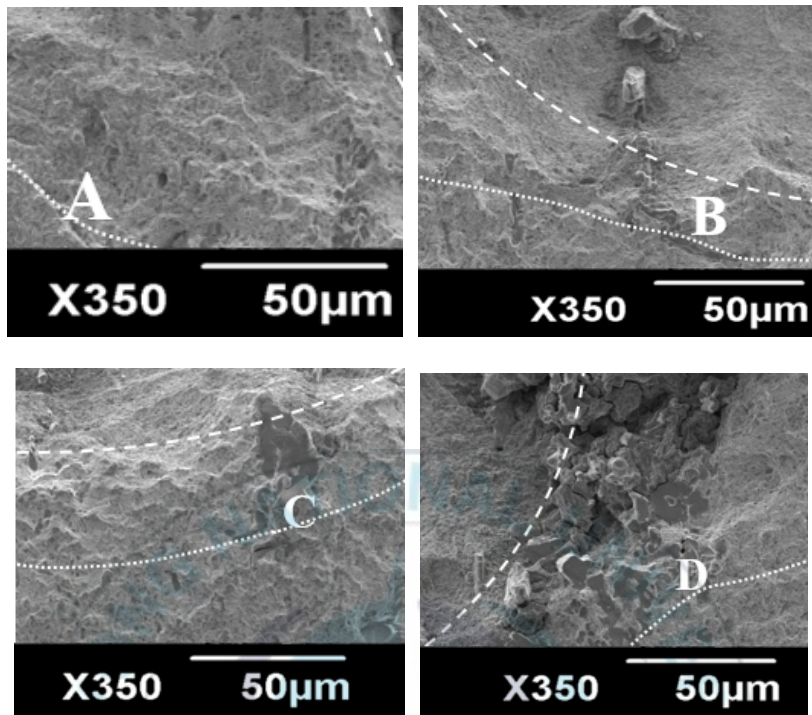


Fig. 15 Magnification image of A, B, C and D in Fig. 14.

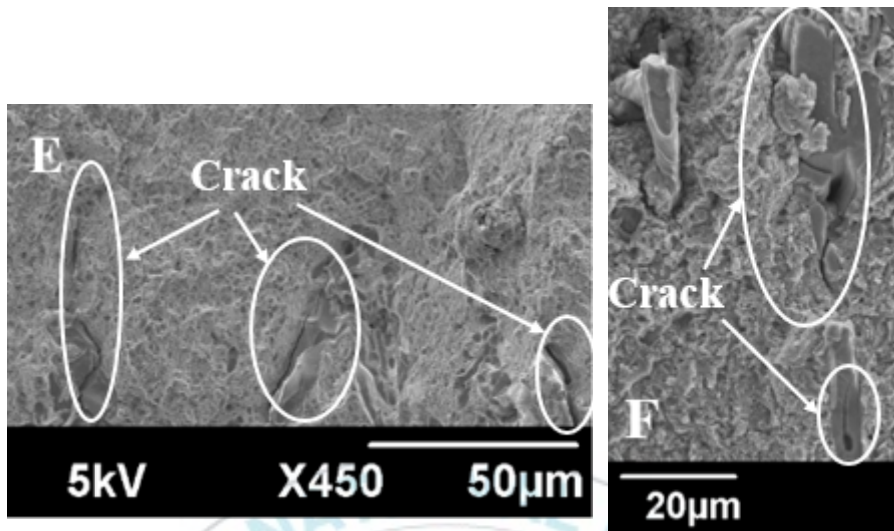


Fig. 16 Chromium carbides with micro cracks of E and F in Fig. 14.

Fig. 17은 파단면에서 관찰된 Cr 탄화물과 균열부의 성분을 조사한 위치를 나타낸다. 1과 2는 Cr 탄화물이고, 3은 초기 균열부이다.

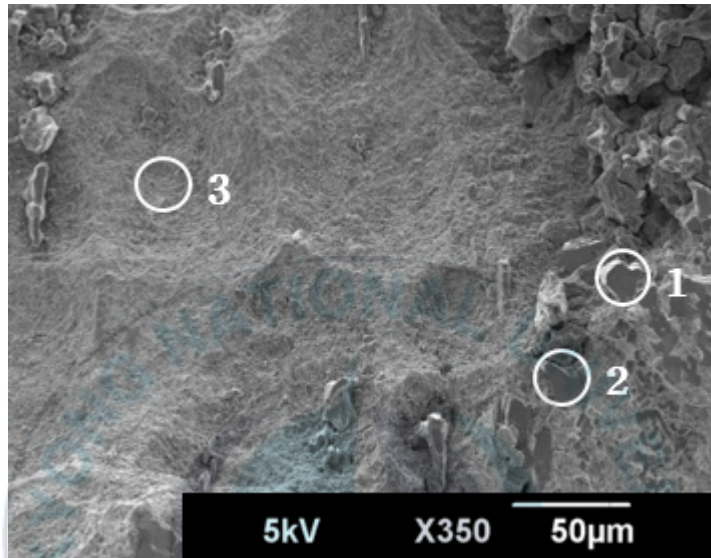
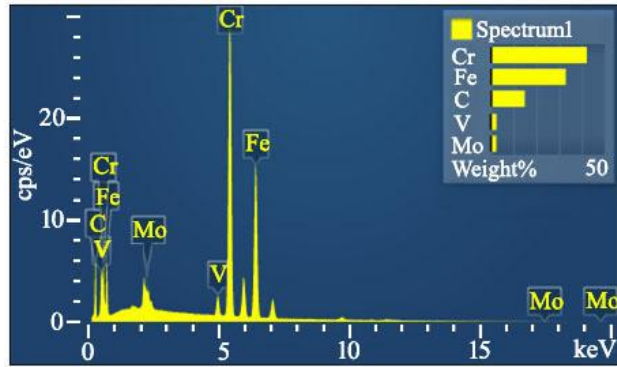


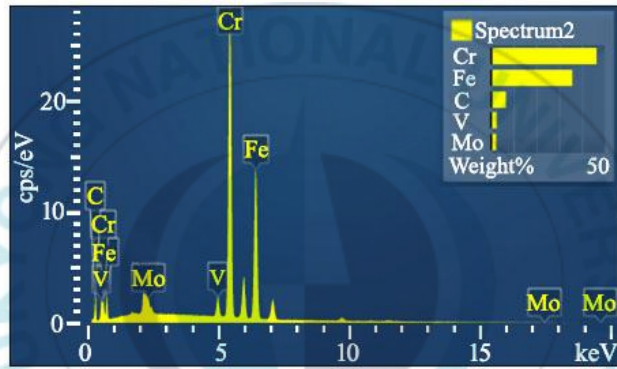
Fig. 17 Position of component analysis of chromium carbides and crack portion observed in the fracture surface.

Fig. 18(a), (b) 및 (c)는 각각 Fig. 17의 Cr 탄화물 1과 2 및 균열 부 3의 성분 스펙트럼을 나타낸다. (a)와 (b)의 Cr 탄화물은 각각 Cr 42.18 wt% 및 46.43 wt%를 나타내었다. (c)의 균열부는 Cr 11.65 wt%로 (a)와 (b)보다 적은 양이었다. 이 값은 Table 1에 나타난 화학조성에서 Cr 11.29 wt.%와 비슷하였다.

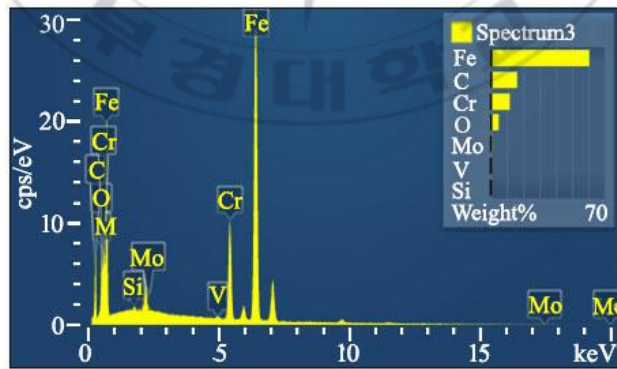




(a)



(b)



(c)

Fig. 18 Component analysis spectrum obtained from position 1, 2 and 3. (a) Position 1, (b) Position 2, (c) Position 3.

3.4 응력 $K_c = 4.76 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 에서 검출된 탄성과 신호

Fig. 19~22는 표면균열의 응력확대계수가 각각 $K_c = 4.76 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 가 되는 응력이 작용한 경우에서 얻어진 결과를 나타낸다. Fig. 19~22는 각각 29시간, 68시간, 258시간 및 548시간에서 얻어진 결과이다. 각 그림에서 (a)는 파형(Waveform), (b)는 스펙트럼 밀도(Spectrum density), (c)는 시간-주파수 해석(Time-frequency analysis)을 나타낸다.



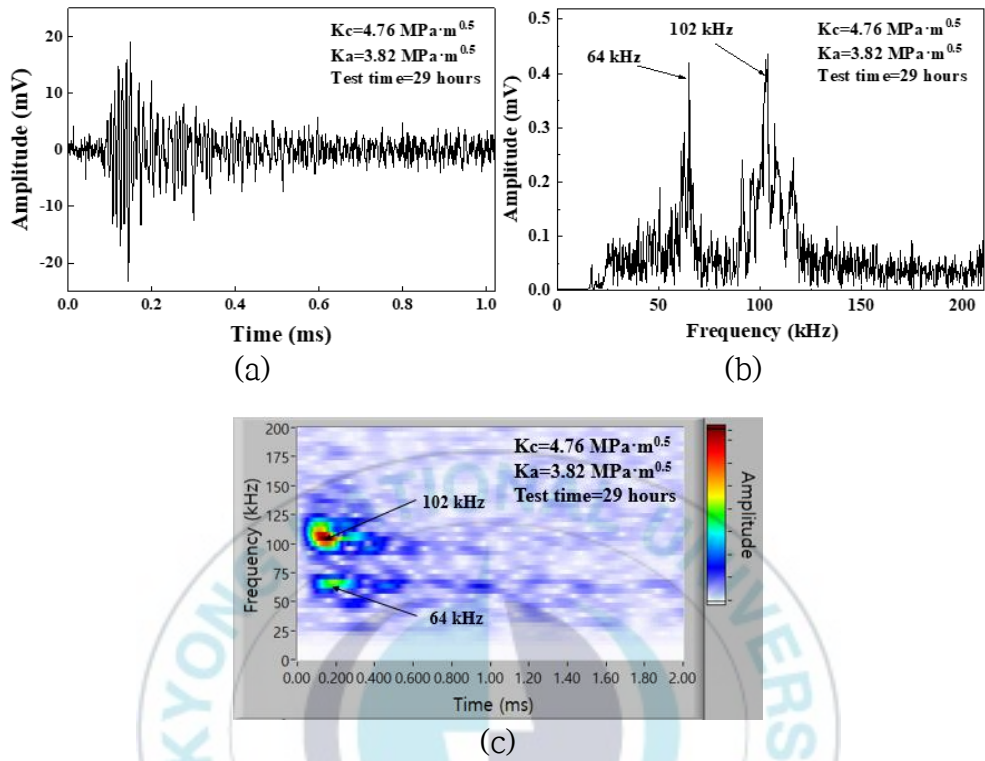


Fig. 19 Elastic wave signal detected from 29 hours under stress of $K_c = 4.76 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis.

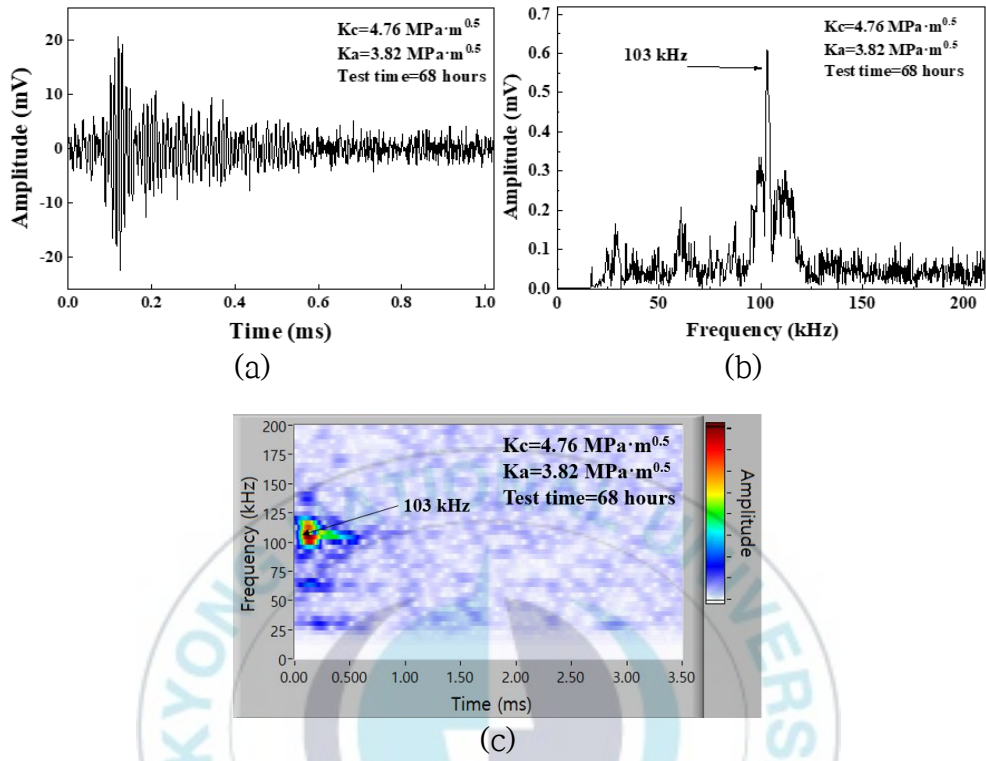


Fig. 20 Elastic wave signal detected from 68 hours under stress of $K_c = 4.76 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis.

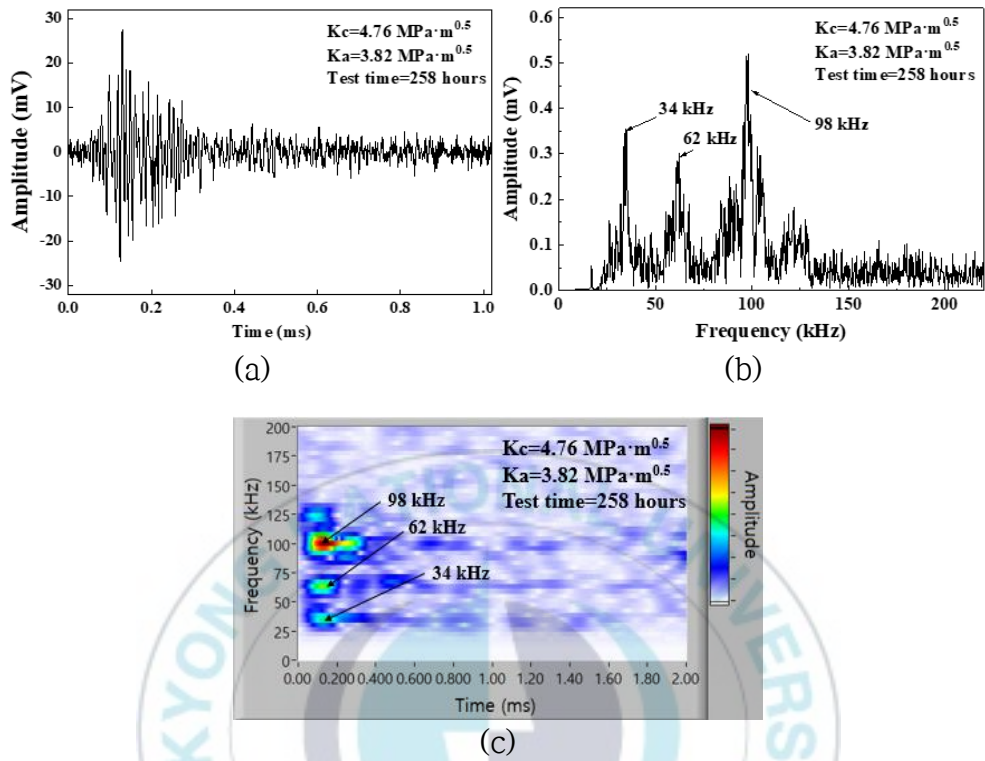


Fig. 21 Elastic wave signal detected from 258 hours under stress of $K_c = 4.76 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis.

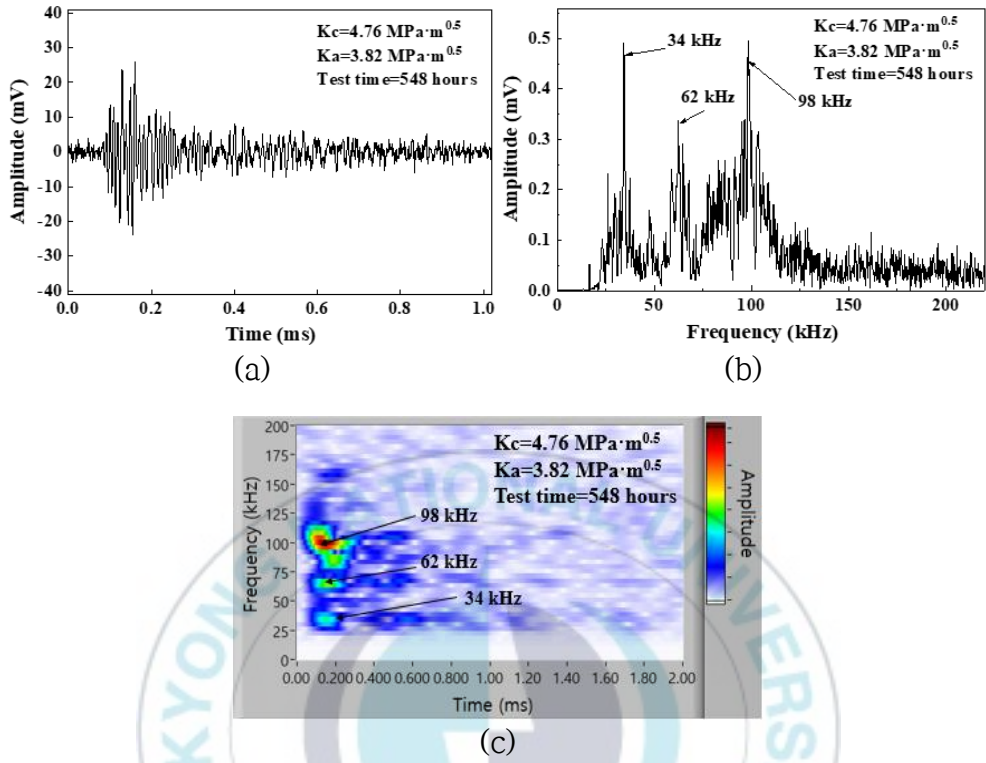


Fig. 22 Elastic wave signal detected from 548 hours under stress of $K_c = 4.76 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis.

Fig. 23(a), (b)는 $K_c = 4.76 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 의 응력이 작용하는 시험편의 부식 용액 침지에서 얻어진 누적탄성파와 Fig. 19~22(c)와 같은 시간-주파수 해석에서 얻어진 탁월주파수를 실험 시간에 대하여 나타내었다. (a)는 실험 시작부터 종료까지 나타낸 것이고, (b)는 160시간까지 확대하여 나타낸 것이다. 탄성파는 작용 응력이 큰 Fig. 13과 비슷한 탁월주파수대역으로 약 30~40kHz(F1), 약 60~70kHz(F2) 및 약 95~110kHz(F3)의 3그룹으로 나타났다. 탁월주파수대역 F1은 Fig. 7에 나타내었듯이 부식에서 얻어진 것이다. 탁월주파수대역 F2 및 F3는 피팅, 균열 발생 및 진전에서 발생한 것으로 판단된다. 탄성파는 약 17~23시간, 55~61시간, 132~153시간, 163~245시간, 263~436시간 및 462~535시간에서 탄성파가 나타나지 않았다. 이 시간은 균열 선단에 수소가 응집하는 시간으로 판단된다. 탄성파는 0~17시간, 23~55시간, 61~132시간, 153~163시간, 245~263시간, 436~462시간 및 535~638시간(실험 종료 시간)에 탄성파 신호가 나타났다. 이 시간은 피팅 및 수소 응집에서 수소 유기 균열이 발생하고, 진전하는 구간이라 판단된다. 탄성파는 약 110시간까지 피팅 및 수소 유기 균열에 의한 탄성파 신호가 많이 발생하였다. 그 이후는 탁월주파수대역 F1, F2 및 F3가 약간 나타났다.

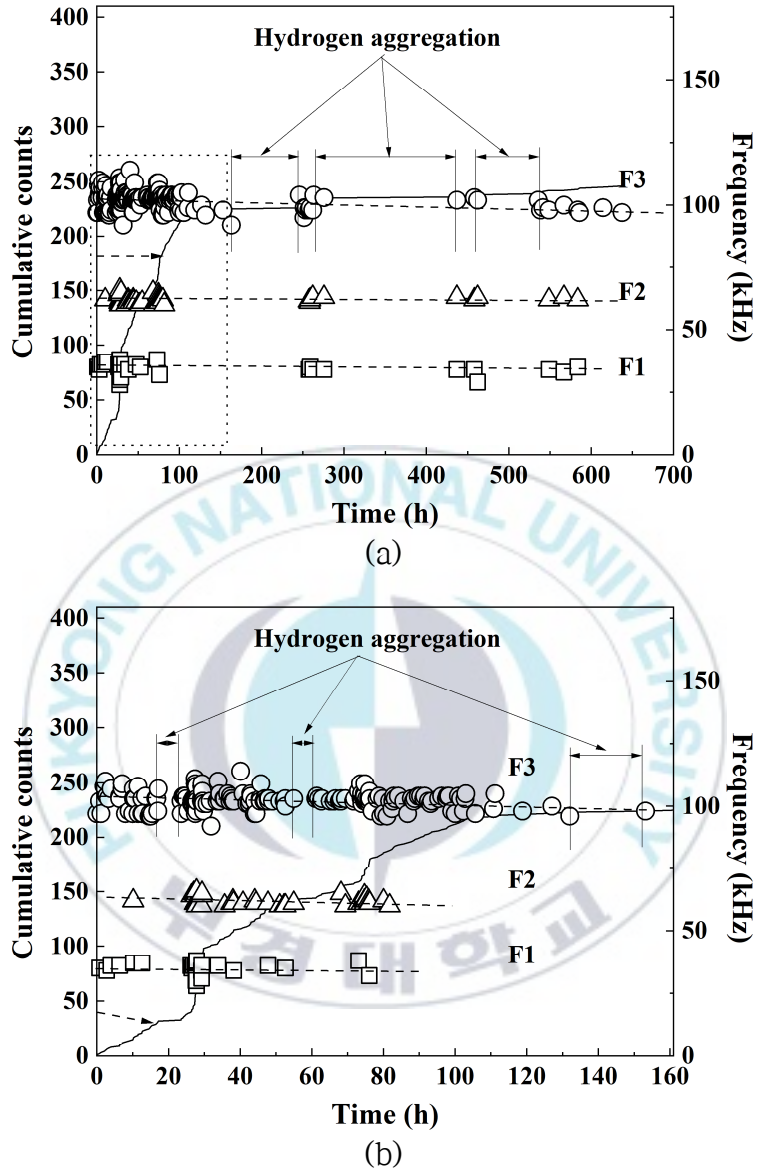


Fig. 23 (a) Relationship of cumulative counts, dominant frequency for test time under stress of $K_c = 4.76 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa}\sqrt{m}$. (b) Magnification of 0~160 hours.

Fig. 24는 실험 후 파단면의 SEM 사진이다. 시험편의 표면은 피팅이 발생하였고, 초기 균열 부분에도 원형 모양의 부식 형상과 작은 피팅 형상이 나타났다. 균열 진전은 초기 균열 선단에 부식이 생성되고, 표면 피팅부를 포함하여 동시에 진전하였다. 그리고 최종 파단부는 미소 균열이 발생하였다.

Fig. 25는 Fig. 24의 A, B, C를 확대하여 나타낸 것이다. A, B 및 C는 수소 유기에 의한 균열 진전, 부식 및 일부에 Cr 탄화물이 관찰되었다. 특히, B와 C 부분은 많은 Cr 탄화물이 관찰되었다.

Fig. 26은 Fig. 24에서 D, E 및 F를 확대하여 나타낸다. 파단면은 고강도강의 취성 파면을 나타내고 있으며, Cr 탄화물에 미소 균열이 관찰되었다.

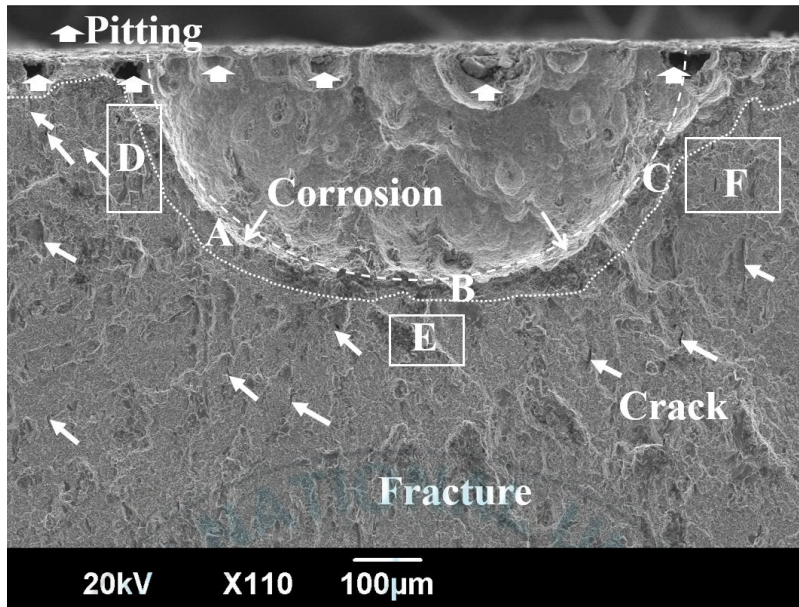


Fig. 24 Fracture surface obtained under stress of $K_c = 4.76 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 3.82 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

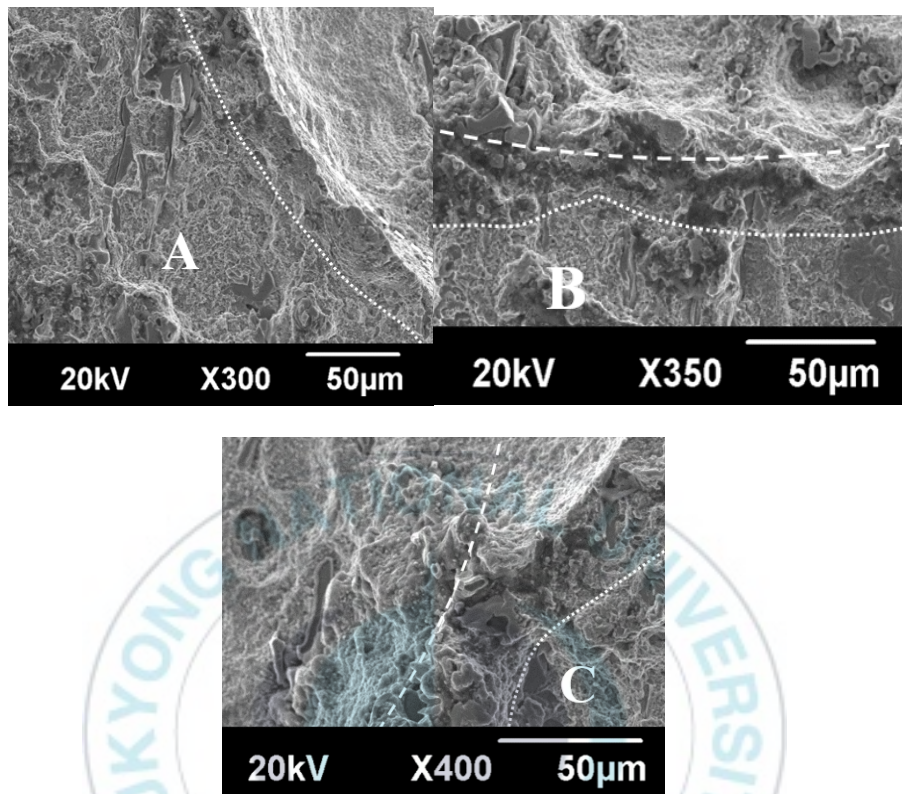


Fig. 25 Magnification image of A, B and C in Fig. 24.

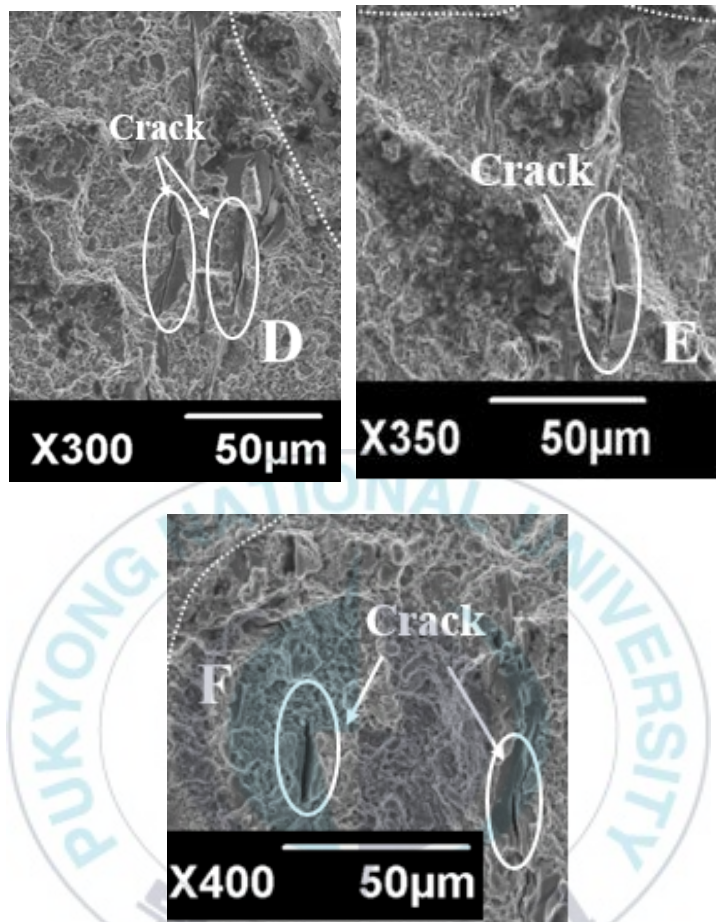
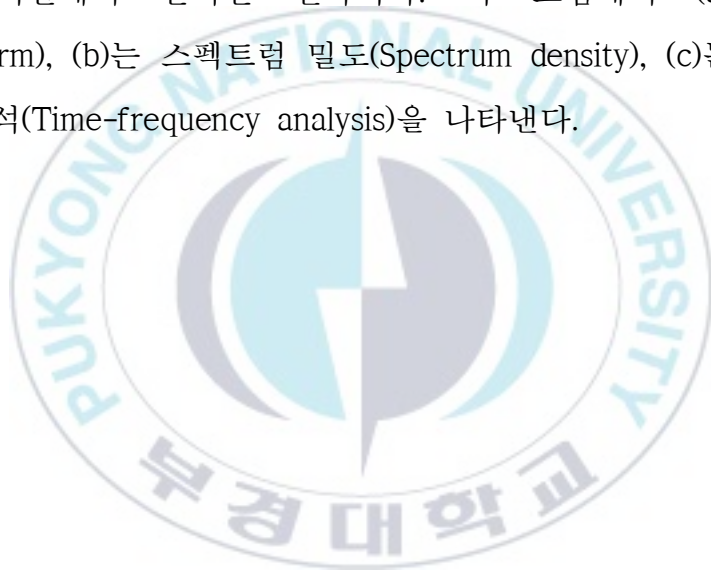


Fig. 26 Chromium carbides with micro cracks of D, E and F in Fig. 24.

3.5 응력 $K_c = 2.54 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 2.07 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 에서 검출된 탄성과 신호

Fig. 27~30은 표면균열의 응력확대계수가 각각 $K_c=2.54 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a=2.07 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 가 되는 응력이 작용한 경우에서 얻어진 결과를 나타낸다. Fig. 27~30은 각각 18시간, 175시간, 209시간 및 229시간에서 얻어진 결과이다. 각 그림에서 (a)는 파형(Waveform), (b)는 스펙트럼 밀도(Spectrum density), (c)는 시간-주파수 해석(Time-frequency analysis)을 나타낸다.



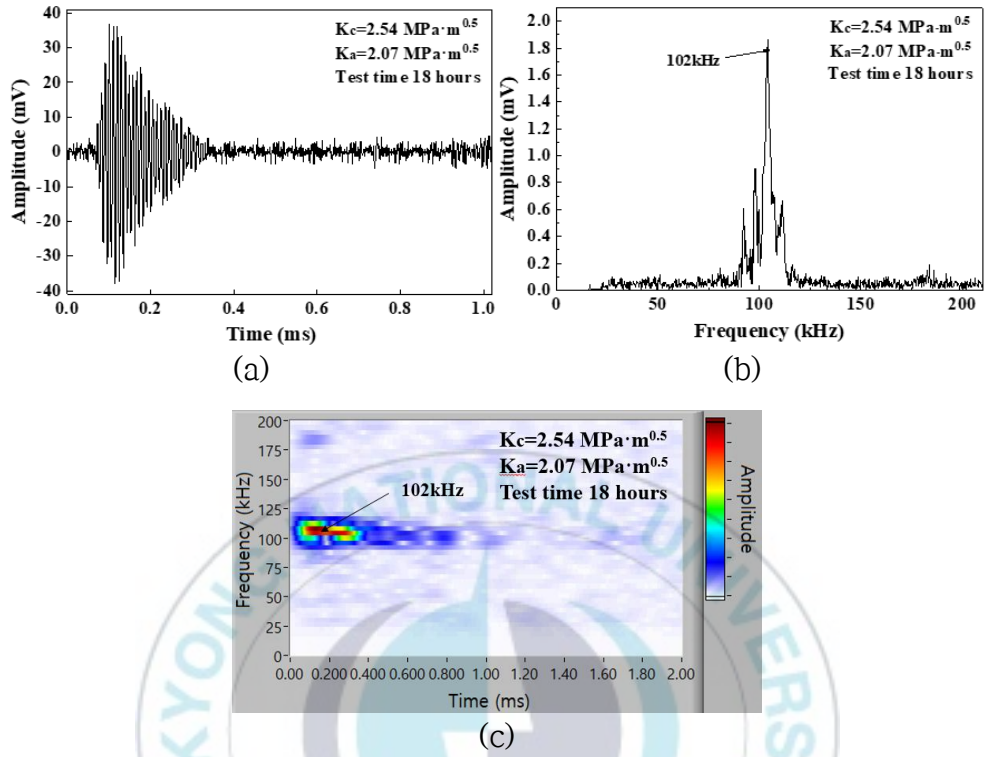


Fig. 27 Elastic wave signal detected from 18 hours under stress of $K_c = 2.54 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, $K_a = 2.07 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis.

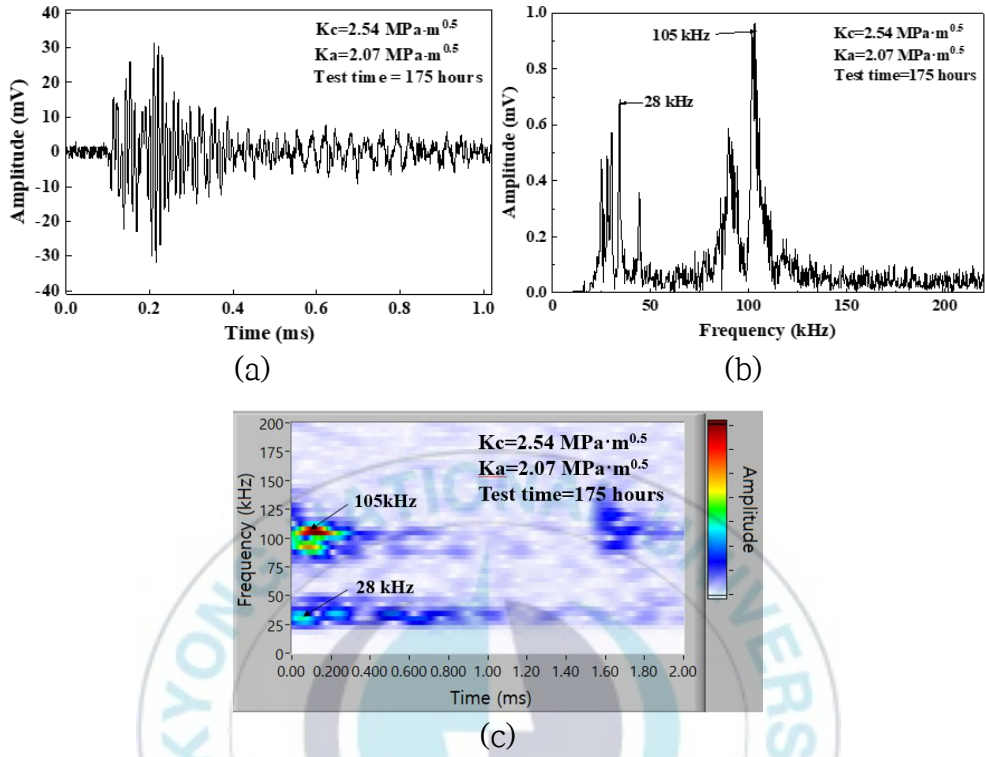


Fig. 28 Elastic wave signal detected from 175 hours under stress of $K_c = 2.54 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 2.07 \text{ MPa} \sqrt{m}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis.

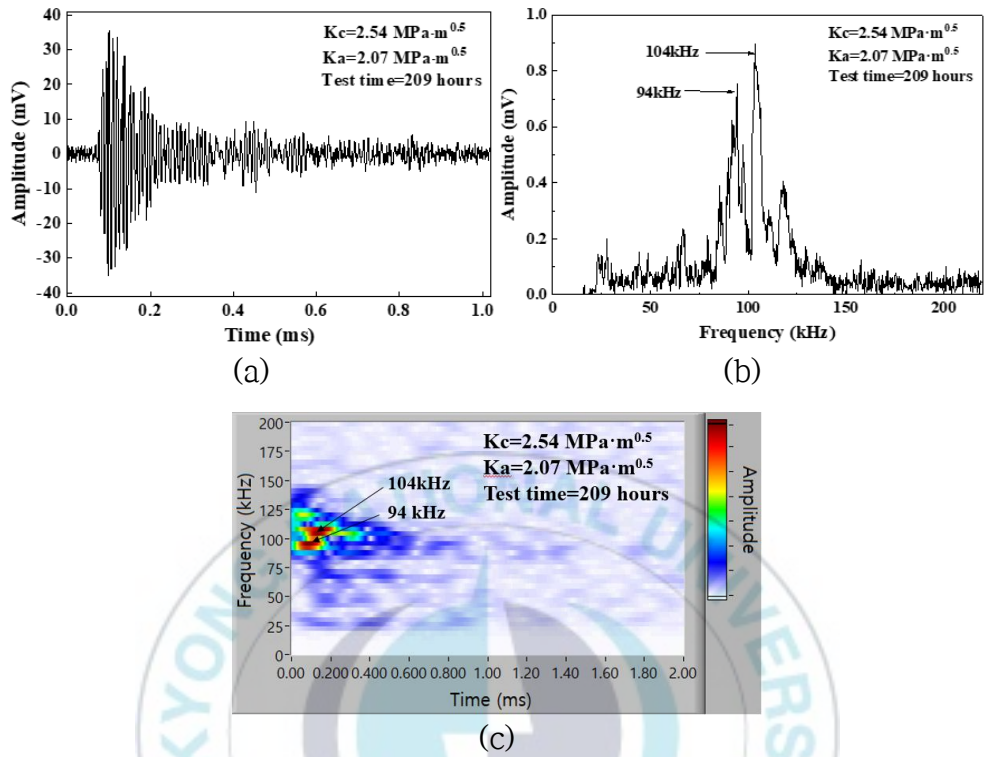


Fig. 29 Elastic wave signal detected from 209 hours under stress of $K_c = 2.54 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 2.07 \text{ MPa} \sqrt{m}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis.

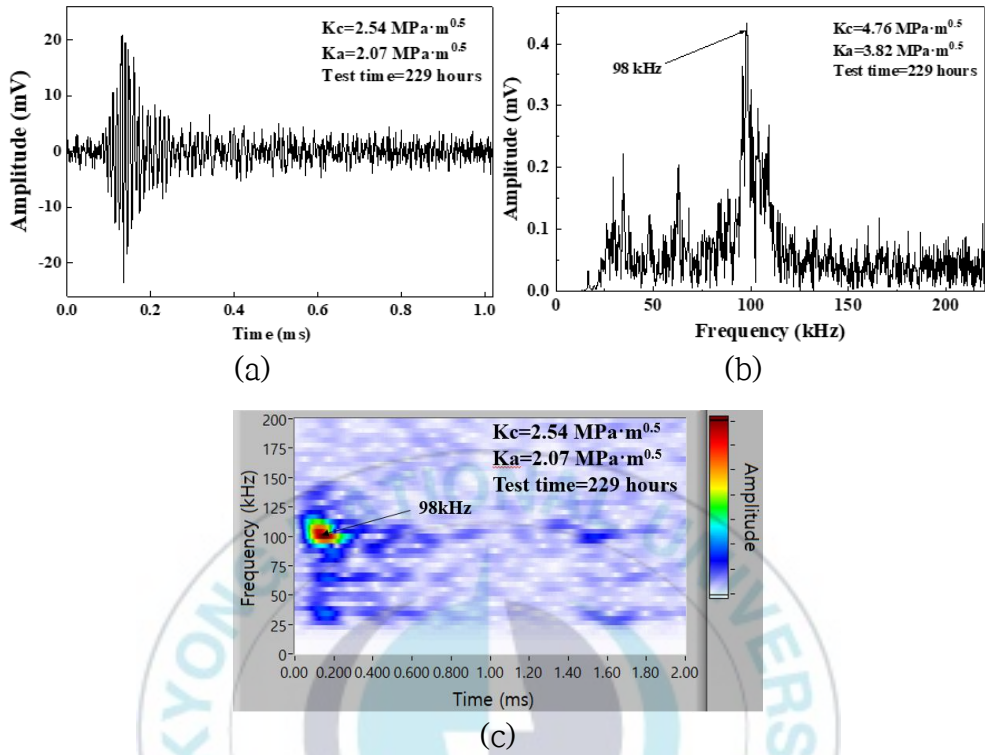


Fig. 30 Elastic wave signal detected from 229 hours under stress of $K_c = 2.54 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, $K_a = 2.07 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. (a) Waveform, (b) Spectrum density, (c) Time-frequency analysis.

Fig. 31은 $K_c = 2.54 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 2.07 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 의 응력이 작용하는 시험편의 부식 용액 침지에서 얻어진 누적탄성파와 Fig. 27~30(c)와 같은 시간-주파수 해석에서 얻어진 탁월주파수를 실험 시간에 대하여 나타내었다. 그림은 실험 시작부터 종료까지 나타낸 것이다. 탄성파의 탁월주파수대역은 약 28~33kHz(F1) 및 약 94~109kHz(F3)의 2그룹으로 나타났다. 탁월주파수대역 F1은 앞의 결과와 같이 부식에서 얻어진 것이다. 탁월주파수대역 F3는 앞의 2종류 부하 응력과 같지만, 탁월주파수대역 F2는 나타나지 않았다. Fig. 31의 탁월주파수대역 F1과 F3는 부하 응력이 작용하지 않은 Fig. 8과 같은 결과가 얻어졌다. 이것은 부식과 피팅에 의한 탄성파라 판단된다.

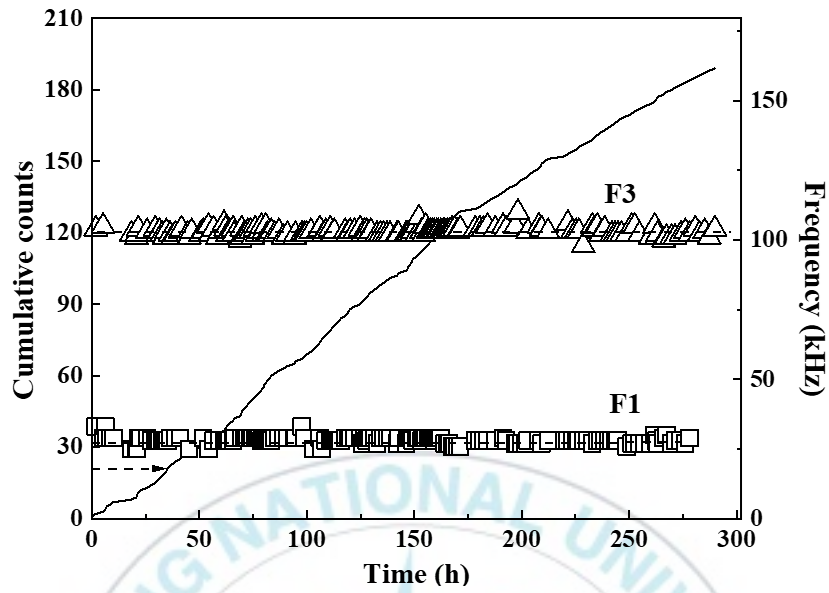
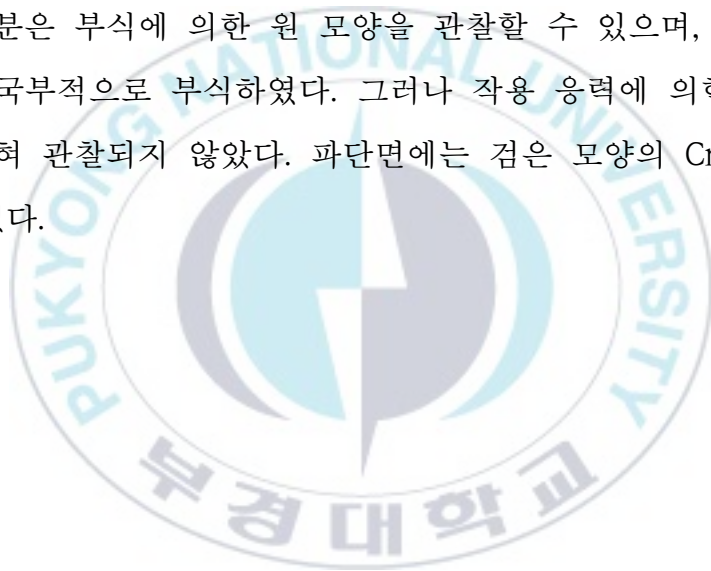


Fig. 31 Relationship of cumulative counts, dominant frequency for test time under stress of $K_c = 2.54 \text{ MPa} \sqrt{m}$, $K_a = 2.07 \text{ MPa} \sqrt{m}$.

Fig. 32는 실험 후 파단면의 SEM 사진이다. 시험편의 표면은 피팅이 발생하였고, 초기 균열 부분에도 원형 모양의 부식이 나타났다. 초기 균열 선단은 부식하였으나, 균열 진전은 없었다. 이와 같이 부식과 피팅으로 탄성파는 Fig. 8과 같은 탁월주파수대역 F1과 F3가 얻어졌다. 최종 파단부는 앞의 결과와 같이 Cr 탄화물에 미소 균열이 발생하였다.

Fig. 33은 Fig. 32의 사각 부분을 확대하여 나타낸 것이다. 초기 균열 부분은 부식에 의한 원 모양을 관찰할 수 있으며, 초기 균열 선단은 국부적으로 부식하였다. 그러나 작용 응력에 의한 균열 진전을 전혀 관찰되지 않았다. 파단면에는 검은 모양의 Cr 탄화물이 관찰되었다.



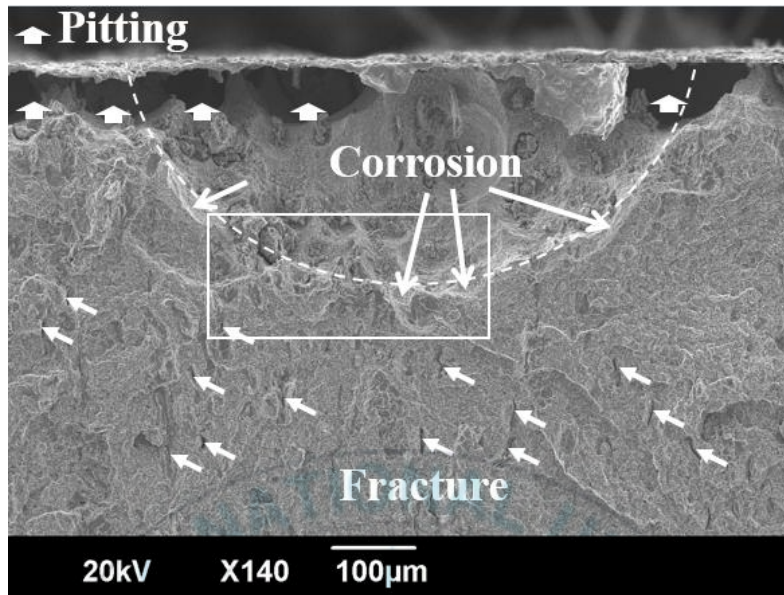


Fig. 32 Fracture surface obtained from stress of $K_c = 2.54 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $K_a = 2.07 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

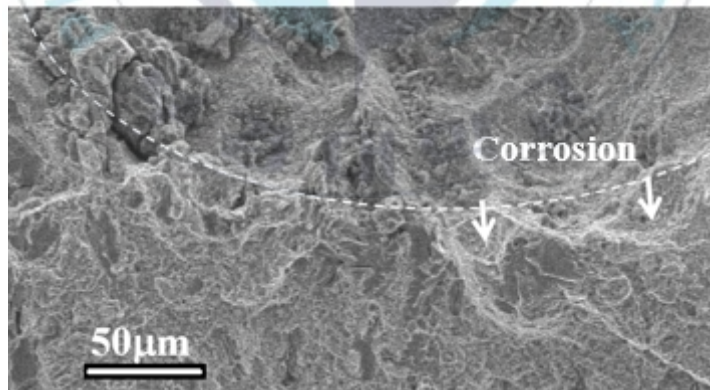


Fig. 33 Magnification image of the rectangular part in Fig. 32.

4. 결론

본 연구는 아세트산(CH_3COOH) 0.057M 수용액에 침지한 고강도강 (SKD11: HV550) 시험편에 굽힘응력을 다르게 작용시킨 경우, 균열에서 발생하는 탄성파를 검출하여, 시간-주파수 해석법으로 주파수 특성을 분석하였다.

- 1) 인장에 의한 탁월주파수대역은 약 103kHz이고, 응력이 작용하지 않은 아세트산 용액에서 탁월주파수대역은 약 32kHz 및 101kHz로 나타났다.
- 2) 균열이 진전한 부하 응력 $K_a = 5.56 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 과 $K_a = 3.82 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 이 작용하는 균열시험편의 탁월주파수대역은 약 30~40kHz(F1), 약 60~85kHz(F2) 및 약 95~110kHz(F3)의 3그룹으로 나타났다. 탄성파 신호는 부식, 피팅, 균열 발생 및 진전에서 나타났다. 수소 응집 시간에는 탄성파가 검출되지 않았다.
- 3) 균열이 진전하지 않은 부하 응력 $K_a = 2.07 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 의 균열시험편은 약 28~33kHz(F1) 및 약 94~109kHz(F3)의 2그룹으로 나타났다. 이것은 응력이 작용하지 않은 아세트산 용액의 탁월주파수대역과 비슷하다.
- 4) 파단면은 작용 응력의 크기에 관계없이 피팅과 부식의 흔적이 많이 관찰되었고, Cr 탄화물에는 미소 균열이 관찰되었다.

References

1. J. Ćwiek, J. Michalska-Ćwiek (2010), "Evaluation of hydrogen degradation of high-strength weldable steels", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 42, pp. 103-110
2. Beth A. Kehler (2008), "Modeling and experiments to explain the potential dependency of an UHSS to hydrogen environment assisted cracking", *Engineering and Applied Science University of Virginia*.
3. J. Ćwiek (1996), "High strength weldable steels", *Mechanical Review*, Vol. 9, pp. 9-15.
4. N. Eliaz, A. Shachar, B. Tal, D. Eliezer (2002), "Characteristic of hydrogen embrittlement, stress corrosion cracking and tempered martensite embrittlement in high-strength steels", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, pp. 176-184.
5. M. Nagumo, M. Nakamura & K. Takai (2001), "Hydrogen thermal desorption relevant to delayed-fracture susceptibility of high-strength steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 32, pp. 339-347.
6. J.S. Kim, Y.H. Lee, D.L. Lee, K.T. Park, C.S. Lee (2009), "Microstructural influences on hydrogen delayed fracture of high strength steels", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 505, pp. 105-110.
7. S. Takagi, Y. Toji, M. Yoshino, K. Hasegawa (2012), "Hydrogen Embrittlement Resistance Evaluation of Ultra High Strength Steel Sheets for Automobiles", *ISIJ International*, Vol. 52, pp. 316-322.

8. S. Bechtle, M. Kumar, B.P. Somerday, M.E. Launey, R.O. Ritchie (2009), "Grain-boundary engineering markedly reduces susceptibility to intergranular hydrogen embrittlement in metallic materials" , *Acta Materialia*, Vol. 57, pp. 4148-4157.
9. V. Venegas, F. Caleyo, T. Baudin, J.H. Espina-Hernandez, J. Hallen (2011), "On the role of crystallographic texture in mitigating hydrogen-induced cracking in pipeline steels" , *Corrosion Science*, Vol. 53, pp. 4204-4212.
10. T. Neeraj, R. Srinivasan, J. Li (2012), "Hydrogen embrittlement of ferritic steels: observations on deformation microstructure, nanoscale dimples and failure by nanovoiding" , *Acta Materialia*, Vol. 60, pp. 5160-5171.
11. S. Fujita, Y. Murakami (2013), "A new nonmetallic inclusion rating method by positive use of hydrogen embrittlement phenomenon" , *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 44, pp. 303-322.
12. M. Koyama, C.C. Tasan, E. Akiyama, K. Tsuzaki, D. Raabe (2014), "Hydrogen-assisted decohesion and localized plasticity in dual-phase steel" , *Acta Materialia*, Vol. 70, pp. 174-187.
13. M. Wang, C.C. Tasan, M. Koyama, D. Ponge, D. Raabe (2015), "Enhancing hydrogen embrittlement resistance of lath martensite by introducing nano-films of interlath austenite" , *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 46, pp. 3797-3802.
14. I.J. Park, S.M Lee, H.H Jeon, Y.K. Lee (2015), "The advantage of grain refinement in the hydrogen embrittlement of Fe-18Mn-0.6C twinning-induced plasticity steel " , *Corrosion Science*, Vol. 93, pp. 63-69.

15. M.B. Djukic, V.S. Zeravcic, G.M. Bakic, A. Sedmak, B. Rajcic (2015), "Hydrogen damage of steels: a case study and hydrogen embrittlement model", Engineering Failure Analysis, Vol. 58, pp. 485-498.
16. X. Li, J. Zhang, Y. Wang, B. Li, P. Zhang, X. Song (2015), "Effect of cathodic hydrogen-charging current density on mechanical properties of prestrained high strength steels", Mater Science Engineering A, Vol. 641, pp. 45-53.
17. X. Li, J. Zhang, Y. Wang, S. Shen, X. Song (2016), "Effect of hydrogen on tensile properties and fracture behavior of PH 13-8 Mo steel", Materials and Design, Vol. 108, pp. 608-617.
18. Y.H. Fan, B. Zhang, H.L. Yi, G.S. Hao, Y.Y. Sun, J.Q. Wang, E.H. Han, W. Ke (2017), "The role of reversed austenite in hydrogen embrittlement fracture of S41500 martensitic stainless steel", Acta Materialia, Vol. 139, pp. 188-195.
19. T. Hojo, Y. Ukai, E. Akiyama (2017), "Effects of hydrogen on tensile properties at slow strain rate of ultra high-strength TRIP-aided bainitic ferrite steels", Procedia Engineering, Vol. 207, pp. 1868-1873.
20. Y. Hu, C. Dong, H. Luo, K. Xiao, P. Zhong, X. Li (2017), "Study on the hydrogen embrittlement of Aermet100 using hydrogen permeation and SSRT techniques", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 48, pp. 4046-4057
21. W. Hui, Z. Xu, Y. Zhang, X. Zhao, C. Shao, Y. Weng (2017), "Hydrogen embrittlement behavior of high strength rail steels: a comparison between pearlitic and bainitic microstructures", Materials Science & Engineering A, Vol. 704, pp. 199-206.
22. M. Béréš, L. Wu, L.P.M. Santos, M. Masoumi, F.A.M. da Rocha

- Filho, C.C. da Silva, H.F.G. de Abreu, M.J. Gomes de Silva (2017), “Role of lattice strain and texture in hydrogen embrittlement of 18Ni (300) maraging steel” , International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, pp. 14786-14793.
23. X. Li, J. Zhang, S. Shen, Y. Wang, X. Song (2017), “Effect of tempering temperature and inclusions on hydrogen-assisted fracture behaviors of a low alloy steel” , Materials Science & Engineering A, Vol. 682, pp. 359-369.
24. L. Jemblie, V. Olden, O. Akselsen (2017), “A coupled diffusion and cohesive zone modelling approach for numerically assessing hydrogen embrittlement of steel structures” , International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, pp. 11980-11995.
25. C. A. Zapffe, C. E. Sims (1941), “Hydrogen Embrittlement, internal stress and defects in steel” , Transactions of Metallurgical Society of AIME, Vol. 145, pp. 225-226.
26. A.S. Tetelman, W.D. Robertson (1963), “Direct observation and analysis of crack propagation in iron-3% silicon single crystals” , Acta Metallurgica, Vol. 11, pp. 415-426.
27. K. Takai, S. Takagi, T. Omura (2014), “Recent Progress and Future Directions on Constructing Fundamentals for Hydrogen Embrittlement” , Bulletin of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 19, No. 12, pp. 911-919
28. K.S. Lee, J.E. Paeng, K.H. Gu, K.W. Nam (2021), “Threshold stress intensity factor of ultra-high strength steel (HV670) containing surface crack by hydrogen assisted cracking and cumulative elastic wave” , Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 35, pp. 2441-2447.

29. Y. Uematsu, T. Kakiuchi, K. Maruchi, T. Teratani, Y. Harada (2011), “Effect of DLC film on fatigue behavior in alloy steels with defferent hardness and inclusion size” , Journal of the Society of Materials Science of Japan, Vol. 60, pp. 1097-1103.
30. J.C. Newman, I.S. Raju (1981), “An empirical stress intensity factor equation for the surface crack” , Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 185-192.



발표 논문 목록

<Refereed Journal Publications>

1. 남기우, 팽재은, 김공영 (2020.06), “냉간압연률이 다른 STS316L의 침지 특성”, 동력시스템공학회지, 제24권 제3호, pp. 90-97.
(2019R111A3A0105912012)
Ki-Woo Nam, Jae-Eun Paeng and Kong-Young Kim (2019.06),
“Immersion Characteristics of STS316L with Degree of Different Cold Rolling”, Journal of Power System Engineering Vol. 24, No. 3, pp. 90-97.
2. Ki-Sik Lee, Jae-Eun Paeng, Kyoung-Hee Gu, Ki-Woo Nam, (2021.06), “Threshold stress intensity factor of ultra-high strength steel (HV670) containing surface crack by hydrogen assisted cracking and cumulative elastic wave”, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 35, No. 6, pp. 2441-2447
3. 남기우, 팽재은, 구경희, 손대진 (2021.06), “레이저 피닝한 STS304의 특이한 피로 특성 평가”, 동력시스템공학회지, 제25권 제3호, pp. 38-45.
Ki-Woo Nam, Jae-Eun Paeng, Kyoung-Hee Gu and Dai-Jin Son (2021.06), “A Peculiar Fatigue Characteristics Evaluation of Laser-Peened STS304”, Journal of Power System Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 38-45.

<Conference Presentations>

1. Jae-Eun Paeng, Byung-Cheol Choi, Sung-Min Jung, In-Duck Park, Ki-Woo Nam, (2019), “Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Welded by Laser and TIG”, 9th International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress & Exhibition, October 22-28, 2019, Liberty Hotels Lykia, Oludeniz, Turkey, pp. 1166.
2. 윤서현, 김민현, 김병수, 팽재은, 남기우, “SCM435 볼트의 파손 해석”, 대한기계학회 2019년 학술대회 논문집, pp. 1798-1801.
Seo-Hyun Yoon, Min-Heon Kim, Byeong-Su Kim, Jae-Eun Paeng, Ki-Woo Nam, “Failure analysis of SCM435 bolts”, Proceeding of The KSME 2019 Annual Meeting, pp. 1798-1801.
3. 김병수, 팽재은, 이기식, 남기우, “수소유기균열에 의한 SKD11(HV670)의 탄성과 특성”, 대한기계학회 2019년 학술대회 논문집, pp. 1813-1816.
Byeong-Su Kim, Jae-Eun Paeng, Ki-Sik Lee, Ki-Woo Nam, “Characteristics of Elastic Wave of SKD11(HV670) by Hydrogen Assisted Cracking”, Proceeding of The KSME 2019 Annual Meeting, pp. 1813-1816.
4. 남기우, 이예나, 김민현, 김병수, 팽재은, 이장원, “Bi₂O₃ 첨가량에 따르는 Al₂O₃의 압축강도”, 대한기계학회 2019년 학술대회 논문집, pp. 1817-1820.
Ki-Woo Nam, Ye-Na Lee, Min-Heon Kim, Byung-Soo Kim, Jae-Eun Paeng and Jang-Won Lee, “Compressive Strength of Al₂O₃ according to Bi₂O₃ Content”, Proceeding of The KSME 2019 Annual Meeting, pp. 1817-1820.
5. 팽재은, 남기우, 김병수, 정세은, 김소율, 박미향, “응력부식에 의한 스테인리스강의 탄성과특성”, 대한기계학회 2019년 학술

대회 논문집, pp. 1875-1877.

Jae-Eun Paeng, Ki-Woo Nam, Byung-Soo Kim, Se-Eun Jung, So-Yul Kim and Mi-Hyang Park, “Elastic Wave Characteristics of Stainless Steel by Stress Corrosion”, Proceeding of The KSME 2019 Annual Meeting, pp. 1875-1877.

6. 김공영, 김병수, 팽재은, 남기우, “두께 및 용접 방법이 다른 스테인리스강의 탄성과 특성”, 한국동력기계공학회 2019년도 추계학술대회논문집, pp. 102-103.

Kong-Young Kim, Byung-Soo Kim, Jae-Eun Paeng and Ki-Woo Nam, “Characteristics of Elastic Wave of Stainless with Different Thickness and Welding Method”, Proceeding of The Korean Society for Power System Engineering 2019 Fall Annual Meeting, pp. 102-103.

7. 윤서현, 김민현, 팽재은, 남기우, “자동차 에어브레이크 스프링 고정용 SCM435 볼트의 파손 해석”, 2019년도 한국산업융합학회 추계학술대회 논문집, pp. 204-205.

Seo-Hyun Yun, Min-Heon Kim, Jae-Eun Paeng, Ki-Woo Nam, “Failure Analysis of SCM435 Bolt for Fixing Automotive Air Brake Spring”, Proceeding of The Korean Society of Industry Convergence 2019 Fall Annual Meeting, pp. 204-205.

8. Min-Heon Kim, Dong-Gyu Kim, Jong-Hoi Woo, Young-Min Son, In-Duck Park, Jae-Eun Paeng and Ki-Woo Nam, 2020, “Effect of Hot-Stamping on the Properties Change of Compound Layer in Coated High Strength Steel Plate”, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2020 (APCFS2020), November 3-7, 2020, Jeju, Korea, Paper No. P00149, pp. 131.
9. 이기식, 탁영준, 팽재은, 김민현, 김철수, 남기우, 2020, “부식환경에서 SKD11의 정피로수명”, 한국동력기계공학회 2020년도

추계학술대회논문집 pp. 1-3.

Ki-Sik Lee, Young-Joon Tak, Jae-Eun Paeng, Min-Heon Kim, Cheol-Su Kim and Ki-Woo Nam, 2020, “Static Fatigue Life of SKD11 under Corrosion Environment”, Proceeding of The Korean Society for Power System Engineering 2020 Fall Annual Meeting, pp. 1-3.

10. 손대진, 팽재은, 김민현, 박인덕, 남기우, 2020, “레이저 피닝한 STS304 용접부의 피로한도 평가”, 한국동력기계공학회 2020년도 추계학술대회논문집 pp. 4-6.

Dai-Jin Son, Jae-Eun Paeng, Min-Heon Kim, In-Duck Park and Ki-Woo Nam, 2020, “Fatigue Limit Evaluation of Laser-Peened STS304 Weld Part”, Proceeding of The Korean Society for Power System Engineering 2020 Fall Annual Meeting, pp. 4-6.

11. 탁영준, 이기식, 팽재은, 김민현, 구경희, 남기우, 2020, “N2 버블한 SD500강의 비커스경도에 대한 와이블 확률 분포”, 한국동력기계공학회 2020년도 추계학술대회논문집 pp. 12-13.

Young-Joon Tak, Ki-Sik Lee, Jae-Eun Paeng, Min-Heon Kim, Kyoung-Hee Gu and Ki-Woo Nam, 2020, “Weibull Probability Distribution for Vickers Hardness of SD500 Steel with N2 Bubble”, Proceeding of The Korean Society for Power System Engineering 2020 Fall Annual Meeting, pp. 12-13.

12. 팽재은, 이성구, 남기우, 2021, “용체화처리와 시효에 의한 Incoloy 825의 기계적특성”, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2021년 춘계학술대회 논문집, pp. 213-214.

Jae-Eun Paeng, Seong-Gu Lee and Ki-Woo Nam, 2021, “Mechanical Properties of Incoloy 825 by Solution Treatment and Aging”, Proceeding of The KSME 2021 Annual Meeting,

pp. 213-214.

13. 팽재은, 최성원, 남기우, 2021, “STS202의 기계적특성에 대한 서브제로 영향”, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2021년 춘계 학술대회 논문집, pp. 211-212.

Jae-Eun Paeng, Seong-Won Choi and Ki-Woo Nam, 2021, “Effect of Sub-zero for Mechanical Properties of STS202”, Proceeding of The KSME 2021 Annual Meeting, pp. 211-212.



감사의 글

2016년도 11월에 처음 실험실 생활을 시작했는데, 벌써 5년이라는 시간이 흘러 석사로 졸업을 앞두고 되었습니다. 그동안 많은 도움을 받아 부경대학교에서의 마지막 생활을 잘 마무리 하게 되어 감사의 인사를 전하고자 합니다.

우선 저를 우물 밖으로 꺼내어 더 넓은 세상을 알려주신 남기우 교수님께 감사의 인사를 전합니다. 일본 교환학생부터 다양한 실험까지 경험으로 많은 것을 배울 수 있었습니다. 교수님의 가르침으로 사회에 나아가 더 큰 사람이 될 수 있도록 노력하겠습니다.

실험실에서 생활하는 동안 동거동락 하며 힘이 되어준 실험실 부원들에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 늘 친절하게 대해주고 고민을 들어준 김민현 선배님 고맙습니다. 다가올 일본 박사 생활도 건강하게 끝마치길 항상 응원하겠습니다. 그리고 처음 실험실에 들어왔을 때 장비 사용법을 알려주고, 실험실 생활에 적응할 수 있게 잘 가르쳐 주셨던 김병수 선배님에게도 감사의 인사를 전합니다. 또한 옆에서 늘 도움이 되어주고 즐거운 일이 있으면 함께 나누고자 했던 구경희, 강석희 후배에게 고마움을 전합니다. 서로 보탬이 되며 석사 생활을 잘 마무리하여 실험실의 자랑이 되어주었으면 좋겠습니다. 실험실의 분위기를 항상 밝게 만들어주었던 정세은, 김미영, 정운현, 이정인 후배에게도 고마움을 전합니다. 남은 학교 생활도 잘 마무리하여 각자의 꿈에 가까워지길 바라겠습니다. 이외에도 아낌없는 격려와 응원을 해주셨던 실험실 선배님들께 감사의 마음을 전합니다.

같은 석사생으로 지내는 동안 고민이 있을 때마다 다독여주고 들어주며 큰 힘이 되어주었던 박성수 군 에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 남은 학기도 잘 마무리 하여 원하는 곳에서 새로운 시작을 할 수 있기를 바라겠습니다.

마지막으로 부족한 저를 믿어주고 아껴주신 어머니와 듬직하게 뒤를 지켜주었던 동생 팽재성 군에게 감사와 애정의 마음을 전하고 싶습니다. 이제 학생이 아닌 사회인이 되어 가족들에게 든든한 버팀목이 되겠습니다.

실험실 생활의 시작부터 졸업까지 참 많은 도움과 격려를 받았기에 지금의 제가 있지 않을까 하는 생각이 듭니다. 교수님의 가르침과 선후배님들의 응원이 헛되지 않도록 노력하겠습니다. 감사합니다.

2021년 8월

팽재은

