



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](#)

페라이트강의 동적변형시효 거동에
미치는 기하학적 불연속부의 영향
평가

Evaluation of Geometrical Discontinuity Effects on
the Behavior of Dynamic Strain Aging in Ferritic
Steels

2013년 8월 23일

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 사 용

페라이트강의 동적변형시효 거동에
미치는 기하학적 불연속부의 영향
평가

지도교수 김진원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 사 용

이사용의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

2013년 5월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

ABSTRACT	viii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 인장시험	5
제 1 절 재료 및 시편	5
제 2 절 시험조건	5
제 3 절 시험장치 및 절차	6
제 3 장 인장시험 결과	10
제 1 절 표준 인장시험 결과	10
1. 하중-변위 곡선	10
2. 항복강도와 인장강도의 온도 및 변위속도 의존성	10
3. 연신율의 온도 및 변위속도 의존성	11
4. A106 Gr.B 탄소강 배관재의 DSA특성	12
제 2 절 노치 인장시험 결과	12
1. 하중-변위 곡선	13
2. 최대하중의 온도 및 변위속도 의존성	14
3. 연신율의 온도 및 변위속도 의존성	15
4. 노치시편에서 DSA 거동 분석	16
제 3 절 인장 파면 특성	18
제 4 장 노치시편에 대한 응력 및 변형률 상태 분석	36
제 1 절 유한요소모델	36
제 2 절 유한요소시뮬레이션 검증	37
제 3 절 시편형상에 따른 변형 거동	37
1. 응력상태	37
2. 변형률 분포	38
3. 등가 소성변형률 속도 분포	39

제 4 절 DSA거동에 미치는 노치부의 응력 및 변형률 상태	41
제 5 장 결 론	51
참고문헌	53

표 목 차

표 2.2.1 표준 인장시편과 노치시편에 대한 인장시험 조건 및 시편 수	7
--	---

그 립 목 차

그림 1.0.1 변형시효 현상의 발생원리	3
그림 1.0.2 정적변형시효(SSA)의 개념	3
그림 1.0.3 동적변형시효(DSA)의 개념	4
그림 1.0.4 동적변형시효(DSA)의 변위속도 의존성	4
그림 2.1.1 표준 인장시편 및 노치시편의 형상	8
그림 2.3.1 인장시험 장면	9
그림 3.1.1 표준 인장시편에 대한 하중-변위 곡선	19
그림 3.1.2 A106 Gr.B 탄소강 배관재의 변위속도별 온도에 따른 항복강도와 인장강도 변화	21
그림 3.1.3 A106 Gr.B 탄소강 배관재의 변위속도별 온도에 따른 균일 연신율과 총 연신율 변화	21
그림 3.2.1 노치반경이 9mm인 노치시편에 대한 하중-변위 곡선	22
그림 3.2.2 노치반경이 1.5mm인 노치시편에 대한 하중-변위 곡선	24
그림 3.2.3 노치반경이 0.5mm인 V-노치시편에 대한 하중-변위 곡선	26
그림 3.2.4 변위속도별 온도에 따른 노치시편의 정규화 최대하중의 변화	28
그림 3.2.5 변위속도별 온도에 따른 노치시편의 파단변위 변화	30
그림 3.2.6 노치반경에 따른 serration 발생 온도 영역 비교	32
그림 3.2.7 노치반경별 온도에 따른 최대하중의 변화 비교	33
그림 3.2.8 노치반경별 온도에 따른 파단변위의 변화 비교	34
그림 3.3.1 노치반경에 따른 인장파면	35
그림 4.1.1 표준 인장시편과 노치시편의 유한요소해석 모델	43
그림 4.1.2 유한요소시뮬레이션에 사용된 A106 Gr.B 배관재의 진응력-진변형률 곡선	44
그림 4.2.1 유한요소해석과 인장시험에서 주어진 하중-변위 곡선 비교	45
그림 4.3.1 노치반경에 따른 3축 응력 분포	47
그림 4.3.2 표준 인장시편의 등가 소성변형률 분포	49
그림 4.3.3 노치반경이 9mm인 노치시편의 등가 소성변형률 분포	49
그림 4.3.4 노치반경이 1.5mm인 노치시편의 등가 소성변형률 분포	50
그림 4.3.5 노치반경이 0.5mm인 V-노치시편의 등가 소성변형률 분포	50
그림 4.3.6 변형에 따른 최소 단면부에서 평균된 등가 소성변형률 속도 변화	51
그림 4.3.7 시편의 소성변형 영역에서 평균된 등가 소성변형률 속도	51

ABSTRACT

Evaluation of Geometrical Discontinuity Effects on the Behavior of Dynamic Strain Aging in Ferritic Steels

Lee Sa Yong

Advisor : Prof. Kim Jin Weon, Ph.D

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Ferritic steels are commonly used as a piping material of nuclear power plant (NPP). It is known that dynamic strain aging (DSA) for ferritic steels occurs in the range 150~350°C, which includes operating temperature of NPPs. DSA causes an abnormal behavior of material properties; increasing tensile strength and decreasing ductility and toughness of materials at a certain range of temperature. Also, the temperature region of DSA strongly depends on strain rate applied to material, and the mechanical properties are sensitively changed by strain rate at a given temperature. It is important to understand the characteristics of DSA because DSA is a cause of uncertainty in the integrity evaluation of ferritic steel piping components. In particular, it is necessary to clarify the effect of geometrical discontinuity on the DSA behavior of material, since the geometrical discontinuity changes stress and strain states and strain rate in the local region of structure. Therefore, the objective of this study is to investigate the effect of different stress state induced by geometrical discontinuity on DSA behavior of ferritic steels. For this purpose, the present study performed a series of tensile tests using notched-bar specimens including standard tensile specimen under three different displacement rates and various temperatures and evaluated the DSA characteristics of material as a function of notch radius of specimen. ASTM A106 Gr.B carbon steel, which is commonly used as a piping material of nuclear power plant, was used in the experiment. The results of tensile test on the standard specimen showed that DSA phenomena of A106 Gr.B piping material appear in the

temperature range 125~230°C under quasi-static loading rate. The DSA region of A106 Gr.B was moved to higher temperature, about 50~90°C, when the loading rate increased about 100 times compared to quasi-static loading rate. Also, it was indicated that the notch of specimen moves DSA region of material toward higher temperature under the same displacement rate. Finite element analysis showed that the primary notch effect on the DSA behavior of material is an increase in the strain rate by notch.

제 1 장 서 론

페라이트강은 기계적 성질과 가공성 및 경제성이 우수하여 압력용기와 배관 등의 원자력발전소(이하 원전) 압력경계 재료로 많이 사용되고 있다. 페라이트강은 소성변형 시 변형시효(Strain Aging) 현상이 발생하는 것으로 알려져 있으며, 변형시효 현상은 크게 정적변형시효(Static Strain Aging, SSA)와 동적변형시효(Dynamic Strain Aging, DSA)로 구분된다[1-4]. 페라이트강에서 변형시효 현상은 그림 1.0.1에 나타낸 것과 같이 C이나 N와 같은 침입형 불순물 원자와 전위 사이의 상호작용으로 발생한다[1-4]. 그림 1.0.2는 SSA 현상이 발생하는 것을 나타낸 것으로 x지점까지 소성변형을 가한 후 하중을 완전히 제거했다가 곧 바로 변형을 가할 경우 하중을 제거한 지점인 x지점에서 항복이 발생하지만, 다시 y지점에서 하중을 제거하고 상온에서 수일에서 수십 일 정도 방치한 후 다시 변형을 가하면 변형시효 현상에 의해 z위치에서 항복이 발생한다. 즉, 상온에서는 불순물 원자가 충분히 확산되는데 필요한 시간동안 방치되어야 변형시효 현상이 발생된다. 반면, 그림 1.0.3을 보면 고온 분위기에서 불순물 원자의 확산이 활발해짐에 따라 불순물 원자에 의한 이동전위의 고착과 해방이 반복되면서 변형이 진행되는 중에 변형시효 현상이 발생하는데 이것을 DSA라고 한다. 페라이트강은 원전의 운전온도를 포함하는 150~350°C 범위에서 DSA 현상이 나타나는 것으로 알려져 있다[1-4]. 페라이트강에서 DSA 현상은 재료의 강도를 증가시키고 연성 및 파괴인성을 감소시키는 것으로 알려져 있다[1-4]. 또한, 주어진 재료에서 DSA 현상이 나타나는 온도 영역은 재료에 가해지는 변형률 속도에 의존하는 것으로 알려져 있다(그림 1.0.4)[1-4]. 이와 같이, DSA 현상이 발생하는 페라이트강으로 제작된 원전 기기의 설계와 건전성 평가에서 재료물성치에 기인한 불확실성이 크게 증가 할 수 있다. 따라서, 원전 기기의 설계와 건전성 평가에 적합한 기계적물성치를 얻기 위해서는 DSA 현상에 대한 파악과 시험 조건에 대한 적절한 고려가 필요하다. 특히, 감육이나 균열과 같은 결함이나 구조적 형상(피팅, 곡관 등)에 의한 기하학적 불연속부에 대한 건전성 평가시 기하학적 불연속부의 변형률과 응력 상태가 기하학적으로 연속한 부분과 다르기 때문에 DSA 현상이 나타나는 경우에 기하학적 불연속부에서 재료의 거동은 균일한 응력 및 변형률 상태에서 예측된 것과 차이를 보일 수 있다. 따라서, 기하학적 불연속부에 대한 신뢰성 있는 건전성 평가를 위해서는 기하학적 형상에 의해 지배되는 응력과 변형률 상태의 차이가 DSA 거동에 미치는 영향을 우선적으로 파악하고 이를 적절

히 반영한 시험 조건에서 기계적물성치를 확보하여야 할 것이다.

본 연구에서는 기하학적 불연속부에서 국부적인 응력과 변형률 상태의 차이가 페라이트강의 DSA 거동에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이를 위해서, 원전의 2차 계통의 배관에 주로 사용되는 A106 Gr.B 배관재를 선정하여 다양한 온도와 변형률 속도로 표준 인장시험을 수행하였다. 기하학적 불연속부의 국부적인 응력과 변형률 상태에 따른 DSA 거동을 평가하기 위해서 노치반경이 다른 노치시편을 이용하여 인장시험을 수행하고, 노치시편 시험 결과에서 나타나는 DSA 특성과 DSA 현상이 나타나는 온도 영역을 분석하였다. 또한, 유한요소시뮬레이션을 수행하여 노치시편의 노치부에서 응력과 변형률 상태를 정량화하였다. 유한요소시뮬레이션을 통해 정량적으로 평가된 노치부의 응력, 변형률, 변형률 속도와 노치시편에서 파악된 DSA 거동을 비교함으로써 페라이트강의 DSA 거동에 미치는 기하학적 불연속부의 응력과 변형률 상태의 영향을 파악하고, 재료의 DSA 거동과 기하학적 불연속부의 응력과 변형률 상태의 연관성을 살펴보았다.

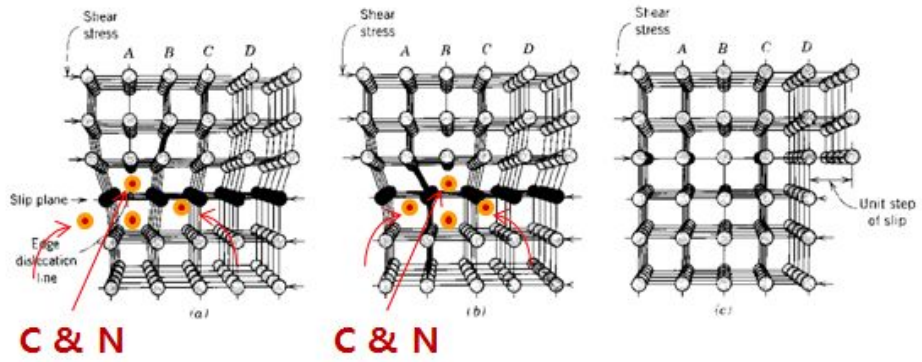


그림 1.0.1 변형시효 현상의 발생 원리

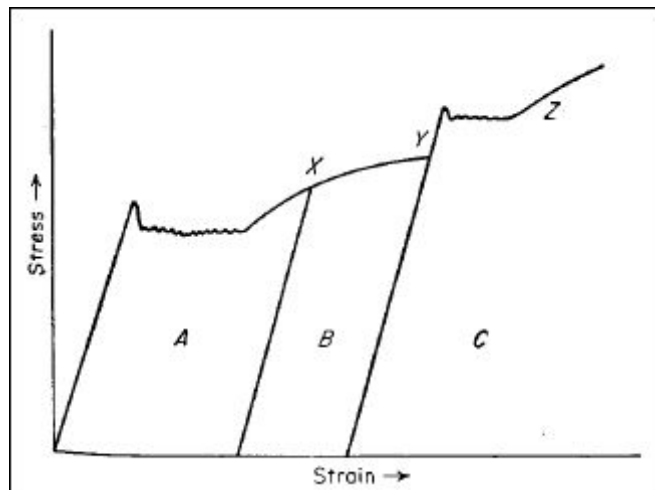


그림 1.0.2 정적변형시효(SSA)의 개념

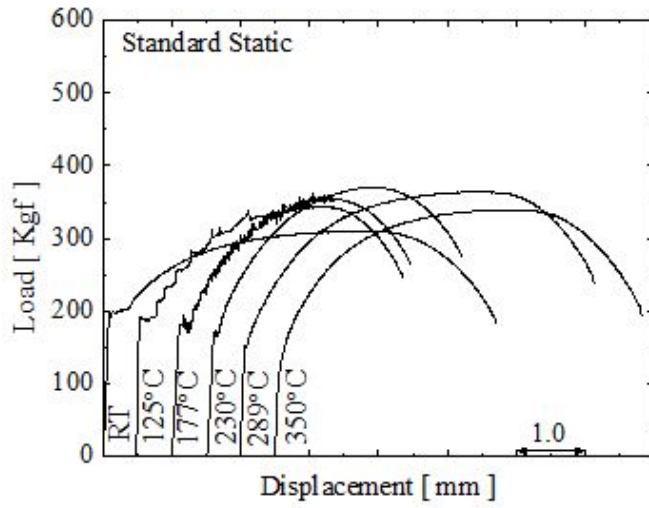


그림 1.0.3 동적변형시효(DSA)의 개념

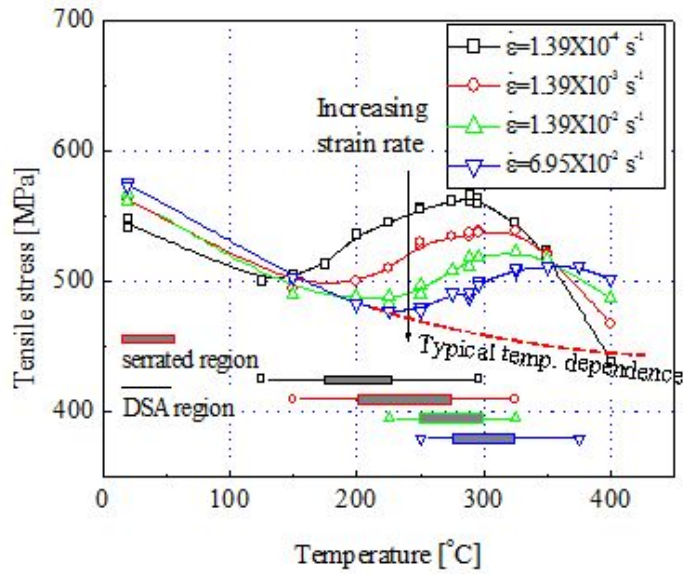


그림 1.0.4 동적변형시효(DSA)의 변위속도 의존성

제 2 장 인장시험

본 연구에서는 재료의 DSA 거동에 미치는 기하학적 형상의 영향을 살펴보기 위해서, 표준 인장시편과 노치시편을 이용한 인장시험을 수행하였다. 표준 인장시편의 인장시험 결과로부터 주어진 재료에 대한 DSA 거동을 파악하고, 그 결과를 노치시편에 대한 인장시험 결과와 비교함으로써 기하학적 형상에 의해 결정되는 응력과 변형률 상태의 차이가 DSA 거동에 미치는 영향을 파악하였다.

제 1 절 재료 및 시편

표준 인장시편과 노치시편을 사용한 인장시험에는 원전 2차 배관계통에 가장 흔하게 사용되고 있는 페라이트강인 ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관재가 사용되었다. 시험에 사용된 ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관재의 규격은 100A Sch.80으로 공칭직경과 두께가 각각 114.3mm와 8.56mm이다.

시험에 사용된 표준 인장시편은 그림 2.1.1(a)에 나타낸 것과 같이 직경이 3mm이고 게이지 길이가 25mm (균일 길이는 30mm)로 ASTM E8-09의 기준[11]에 따라 설계되었다. 노치시편으로는 노치반경이 다른 3 종류가 고려되었다. 노치시편의 노치부 최소 직경은 3mm이고 균일부 직경은 6mm이며, 노치반경이 9mm, 1.5mm인 라운드 노치와 노치반경이 0.5mm인 V-노치로 설계되었다. 그림 2.1.1(b)는 가공이 완료된 시편의 사진을 보여주고 있다. 노치시편에서 노치반경은 Bridgman식을 이용한 간단한 계산 결과를 바탕으로 노치부에서 다양한 응력상태를 보일 수 있는 조건으로부터 결정되었다.

제 2 절 시험조건

표준 인장시편과 노치시편을 이용한 인장시험은 다양한 온도와 변위속도에서 수행되었다. 표준 인장시편에 대한 인장시험은 변위속도에 따라 상온~350°C 또는 상온~400°C 범위의 7~8개 온도 조건에서 시험되었으며, 3 종류의 변위속도 (V_{LL} =0.5mm/min, 5mm/min, 50mm/min)가 고려되었다. 각각의 변위속도는 2.78×10^{-4} /s, 2.78×10^{-3} /s, 2.78×10^{-2} /s의 변형률 속도($\dot{\epsilon}$)에 해당한다. 노치시편에 대한 인장시험 역시 변위속도에 따라 상온~230°C, 상온~350°C, 또는 상온~400°C 범위의 6~7개 온도 조

건에서 시험되었으며, 3 종류의 변위속도($V_{LL}=0.05\text{mm/min}$, 0.5m/min , 50mm/min)가 각각 고려되었다. 모든 시험은 각 조건 별로 1~3회의 시험이 수행되었다. 표 2.2.1은 시험 조건과 각 조건별 시편의 수를 정리한 것이다.

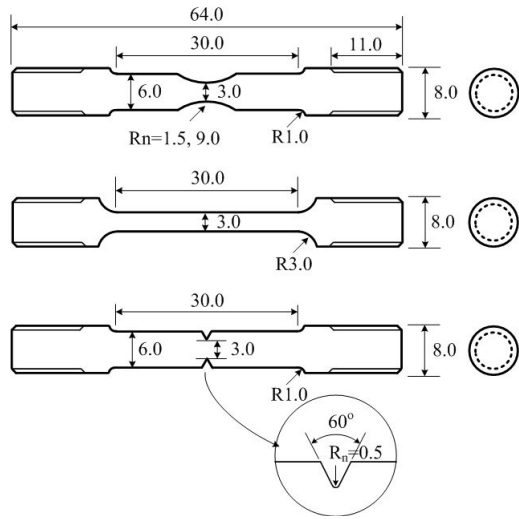
제 3 절 시험장치 및 절차

모든 시험에는 3 영역 제어가 가능한 분리형 고온로가 부착된 모터구동형 기계식 만능시험기가 사용되었다. 시험에는 1톤 용량의 로드셀과 게이지 길이가 25mm인 고온용 신울계를 사용하여 하중과 변형률을 측정하였다. 고온 시험시 시편의 온도는 K-type 열전대를 시편에 용접하여 측정하였다.

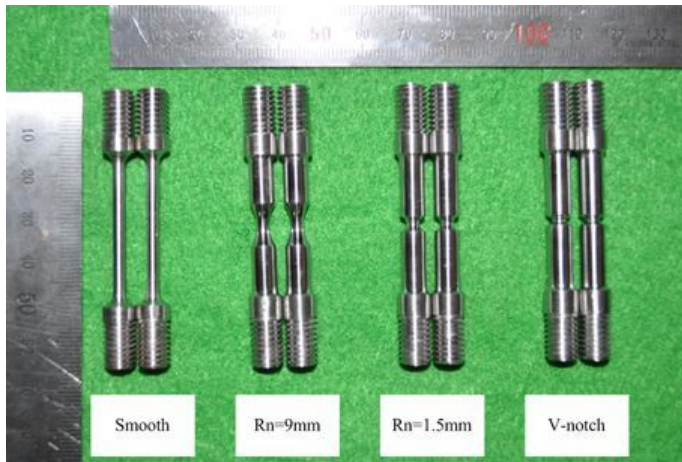
시험에 앞서 가공이 완료된 시편의 직경을 측정하여 가공 상태를 확인하고, 최소 직경을 기록하였다. 또한, 노치시편의 경우에는 노치부의 최소 직경을 측정하였다. 고온 시험은 양단에서 측정된 시편의 온도가 설정 온도의 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 범위에서 30분 이상 유지된 후 시험을 시작하였다. 시험 결과로부터 하중과 변위 데이터를 취득하였으며, 각 시험 조건에서 주어진 하중과 변위 데이터로부터 최대하중과 과단변위 등을 추출하였다. 그림 2.3.1는 인장시험 장면을 보여주는 사진이다.

표 2.2.1 표준 인장시편과 노치시편에 대한 인장시험 조건 및 시편 수

노치반경 [mm]	시험온도[°C]	시편 수			
		0.05mm/min	0.5mm/min	5.0mm/min	50mm/min
∞ (표준인장시편)	20	-	2	1	2
	75	-	1	-	-
	100	-	-	1	-
	125	-	2	1	3
	177	-	2	1	2
	200	-	2	-	-
	230	-	2	1	2
	289	-	2	1	2
	350	-	2	1	2
	400	-	-	-	1
9.0 (라운드 노치)	20	1	2	-	1
	75	1	1	-	1
	100	-	1	-	-
	125	2	2	-	2
	177	2	2	-	2
	230	2	2	-	2
	289	1	2	-	1
	350	-	2	-	-
1.5 (라운드 노치)	20	1	2	-	2
	75	1	1	-	-
	100	1	1	-	-
	125	2	2	-	2
	177	2	2	-	2
	230	2	2	-	2
	289	-	2	-	3
	350	-	2	-	2
0.5 (V-노치)	20	1	2	-	2
	75	1	1	-	-
	90	1	-	-	-
	100	-	1	-	-
	125	1	2	-	2
	177	1	2	-	2
	230	1	2	-	2
	250	-	2	-	-
	289	1	3	-	3
	350	-	2	-	2
	400	-	-	-	2



(a) 도면



(b) 사진

그림 2.1.1 표준 인장시편 및 노치시편의 형상

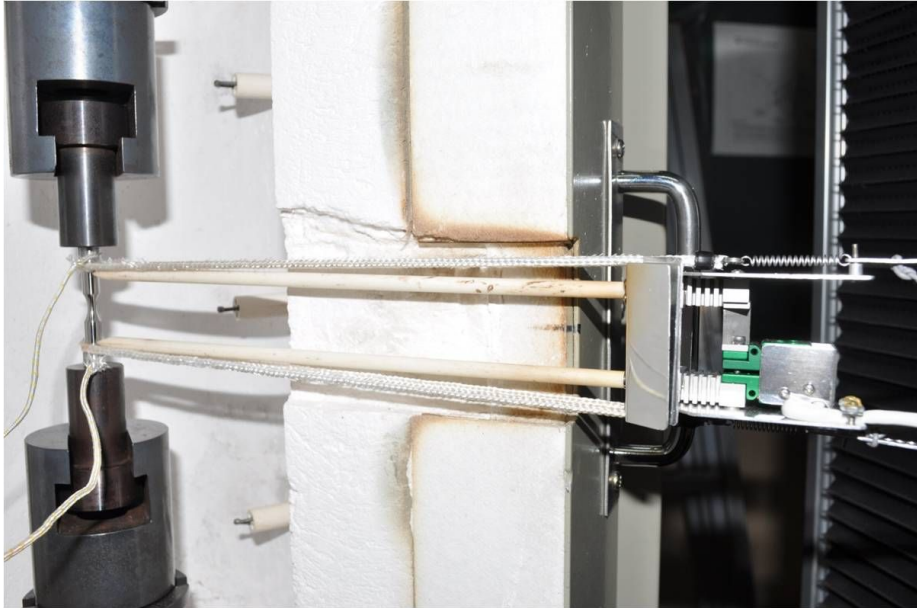


그림 2.3.1 인장시험 장면

제 3 장 인장시험 결과

제 1 절 표준 인장시험 결과

노치시편에 대한 인장시험 결과를 살펴보기에 앞서 본 실험에 사용된 A106 Gr.B 탄소강 배관재의 DSA 특성과 거동을 파악하기 위해서, 표준 인장시편에 대한 인장시험 결과를 먼저 살펴보았다.

1. 하중-변위 곡선

A106 Gr.B 탄소강 배관재의 DSA 특성을 파악하기 위해서, 인장시험에서 구한 하중-변위 곡선을 온도에 따라 비교하여 살펴보았다. 노치시편의 경우에는 시험결과로부터 응력과 변형률을 정의하기 어렵기 때문에 노치시편에 대한 인장시험 결과와 비교를 위해 여기서는 표준 인장시편에 대한 인장시험 결과를 응력-변형률 곡선 대신 하중-변위 곡선으로 나타내었다. 그림 3.1.1은 각 변위속도에서 주어진 하중-변위 곡선을 시험 온도에 따라 나타낸 것이다. 변위속도가 준정적 하중속도에 해당하는 0.5mm/min인 경우 (그림 3.1.1(a)), 정도의 차이는 있으나 상온에서 289°C까지의 온도 조건에서는 항복점현상이 관찰되었다. 또한, 125~200°C의 시험 온도에서는 하중-변위 곡선에서 하중이 천이하는 serration이 관찰되었다. 변위속도가 5mm/min인 경우에는 그림 3.1.1(b)에서 알 수 있는 것과 같이 350°C까지 모든 온도 조건에서 항복점현상이 관찰되었으며, 125~230°C의 온도 영역에서 serration이 관찰되었다. 일반적인 인장시험에서 고려하는 준정적 하중속도보다 100배 빠른 50mm/min의 변위속도에서는 그림 3.1.1(c)에 나타낸 것과 같이 상온에서 350°C까지 모든 온도 조건에서 항복점현상이 관찰되었으며, 177°C와 230°C에서 serration이 관찰되었다.

따라서, A106 Gr.B 탄소강 배관재는 모든 변위속도에서 serration을 보였으며, serration이 나타나는 온도 영역은 변위속도에 따라 차이를 보이는데 변위속도가 증가됨에 따라 고온으로 이동하는 경향을 보였다.

2. 항복강도와 인장강도의 온도 및 변위속도 의존성

그림 3.1.2는 표준 인장시편에 대한 인장시험 결과로부터 구한 항복강도(YS)와 인장

강도(UTS)를 변위속도와 시험 온도에 따라 나타낸 것이다. 변위속도에 관계없이 전체적으로 항복강도는 온도 증가에 따라 감소하였으며, 변위속도가 0.5mm/min와 5mm/min의 경우에는 125~230°C 영역에서 온도 증가에 따른 항복강도의 감소가 완화된 경향을 보였다. 각 변위속도에서 온도에 따른 인장강도의 변화를 살펴보면, 전체적으로 온도 증가에 따라 인장강도가 감소하다 증가하여 최대값을 보이고, 그 이상의 온도에서는 다시 감소하는 경향을 보였다. 준정적 하중속도인 0.5mm/min에서는 75°C에서 인장강도의 최소값을 보였고 그 이후부터 증가하여 230°C 부근에서 최대값을 보였다. 이 경우에 인장강도의 최대값은 최소값에 비해 20.5% 정도 증가하였다. 변위속도가 5mm/min인 경우에는 온도 증가에 따라 인장강도가 감소하여 125°C에서 최소값을 보였으며, 230~289°C 사이에서 최대값을 보였다. 이 경우에 인장강도의 최대값은 최소값에 비해 19.2%정도 증가하였다. 50mm/min의 변위속도에서는 125°C에서 최소 인장강도를 보였으며, 289°C에서 최대 값을 보였다. 50mm/min의 변위속도에서는 인장강도의 최대값은 최소값에 비해 14.6% 정도 증가된 값이다.

여기서 A106 Gr.B 탄소강 배관재의 경우에 항복강도는 온도 증가에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 보였지만, 인장강도는 변위속도에 관계없이 온도가 증가함에 따라 감소하다 증가하여 최대값을 보이고 다시 감소하는 변화 경향을 보였다. 이러한 인장강도에 대한 온도 의존성은 변위속도가 증가함에 따라 전체적으로 고온으로 이동하였다. 인장강도의 최소값과 최대값이 나타나는 온도는 변위속도가 10배 증가됨에 따라 약 25~50°C 정도 고온으로 이동하고 변위속도가 100배 증가됨에 따라 약 50~90°C 정도 고온으로 이동하는 것으로 파악된다. 또한, 온도에 따른 인장강도의 최대값과 최소값의 상대적인 차이는 변위속도가 증가함에 따라 점차 낮아지는 것을 알 수 있다.

3. 연신율의 온도 및 변위속도 의존성

각 시편의 균일 연신율(E_U)과 총 연신율(E_T)을 온도와 변위속도에 따라 살펴보면, 그림 3.1.3와 같다. 균일 연신율과 총 연신율 모두 온도가 증가함에 따라 감소하여 최소값에 도달한 이후 다시 증가하는 경향을 보였으며, 온도 증가에 따른 연신율의 감소 정도는 균일 연신율에 비해 총 연신율에서 뚜렷하게 큰 것으로 관찰되었다. 또한, 인장강도와 같이 연신율의 최소값이 나타나는 온도 영역이 변위속도에 따라 고온으로 이동하는 경향을 보였다. 변위속도가 0.5mm/min인 경우에는 177~200°C 사이에서 최소 연신율을 보였으며, 5mm/min에서는 230°C, 50mm/min에서는 230~289°C 사이에서 최소 연신율을 보였다.

이들 결과를 정리하면 인장강도의 변위속도 의존성과 유사하게 변위속도가 10배 증가함에 따라 최소 연신율이 나타나는 온도 영역도 약 30~40°C 정도 고온으로 이동하며, 변위속도가 100배 증가됨에 따라 약 70°C 정도 고온으로 이동하였다. 그러나, 변위속도에 관계없이 최소 연신율이 나타나는 온도 영역은 최대 인장강도가 나타나는 온도보다 약 20~30°C 정도 낮은 것을 알 수 있다. 또한, 각 변위속도에서 최소 연신율을 비교해보면, 변위속도에 관계없이 거의 비슷한 값을 보였다.

4. A106 Gr.B 탄소강 배관재의 DSA 특성

표준 인장시험에 대한 인장시험 결과를 종합적으로 살펴보면, 일부 온도 영역에서 serration이 관찰되었으며 온도가 증가함에 따라 인장강도가 증가하였다. 또한, 온도가 증가함에 따라 일부 온도 영역에서 연신율이 감소하였다. serration이 나타나는 온도 영역, 인장강도가 증가하는 온도 영역, 연신율이 감소하는 온도 영역이 변위속도 증가에 따라 고온으로 이동하는 경향을 보였다. 하중-변위 곡선에서 serration은 재료 내에서 확산하는 용질 원자와 전위와의 상호작용에 의해 나타나는 것으로 알려져 있으며, DSA 현상의 중요한 증거로 인식되고 있다. 온도 증가에 따른 인장강도 증가와 연신율의 감소 역시 DSA 현상에 의한 가공경화 증가 때문으로 DSA 발생에 대한 증거로 알려져 있다. 또한, 변위속도에 따른 이와 같은 현상이 나타나는 온도 영역이 고온으로 이동하는 것 역시 DSA 현상의 중요한 거동이다. 따라서, 본 연구에서 사용된 A106 Gr.B 탄소강 배관 재료는 일정한 온도 영역에서 DSA 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

A106 Gr.B 탄소강 배관재의 DSA 거동을 파악하기 위해서, 일반적인 인장시험에서 적용되고 있는 준정적 하중속도(0.5mm/min)에서 DSA의 증거들이 나타나는 온도영역을 살펴보았다. 먼저 하중-변위 곡선에서 serration은 125~200°C 영역에서 관찰되었으며, 인장강도의 증가는 125~230°C 온도 영역에서 발생하였다. 또한, 177~200°C 사이에서 최소 연신율을 보였다. 따라서, 준정적 하중속도에서 A106 Gr.B 탄소강 배관재에서 DSA 현상은 125~230°C 범위에서 발생하며, 177~200°C 부근에서 가장 활발한 것을 알 수 있다. 또한, DSA 현상의 변위속도 의존성을 살펴보면, A106 Gr.B 탄소강 배관재의 DSA 영역은 변위속도가 10배 증가됨에 따라 약 25~50°C 정도 고온으로 상승하며, 변위속도가 100배 증가되면 약 50~90°C 정도 상승하는 것으로 파악되었다.

제 2 절 노치 인장시험 결과

DSA 거동에 미치는 기하학적 형상의 영향을 파악하기 위해서, 서로 다른 노치반경을 갖는 3 종류의 노치시편을 이용하여 다양한 온도와 변위속도에서 인장시험을 수행하였다. 그 결과로부터 DSA 거동을 살펴보고 표준 인장시편에서 확인된 DSA 거동과 비교하였다.

1. 하중-변위 곡선

그림 3.2.1은 노치반경(R_n)이 9mm인 노치시편에 대한 인장시험 결과에서 얻은 하중-변위 곡선을 온도에 따라 나타낸 것이다. 그림 3.2.1(a)에 나타낸 것과 같이 변위속도가 0.05mm/min인 경우, 75°C를 제외한 온도 조건에서 항복점현상은 관찰되지 않았으며, 125°C와 177°C에서 DSA의 특징인 serration이 관찰되었다. 변위속도가 0.5mm/min인 조건에서는 상온과 75°C, 125°C에서 항복점현상이 관찰되었으며, 125~230°C에서 serration이 관찰되었다(그림 3.2.1(b)). 그림 3.2.1(c)에서 알 수 있는 것과 같이 50mm/min 변위속도에서는 상온에서 230°C까지 항복점현상이 관찰되었고, 230°C와 289°C에서 serration이 관찰되었다. 따라서, 노치반경이 9mm인 노치시편에서는 시험에서 고려된 모든 변위속도(0.05mm/min~50mm/min)에서 표준 인장시편에서 관찰된 것과 유사한 형태의 항복점현상과 serration이 관찰되었다. 또한, 변위속도가 증가함에 따라 serration이 고온에서 관찰되었다.

노치반경이 1.5mm인 노치시편에 대한 하중-변위 곡선을 살펴보면, 그림 3.2.2(a)에 나타낸 것과 같이 0.05mm/min의 변위속도에서는 상온~100°C까지 항복점현상이 관찰되었으며, 100°C, 125°C, 그리고 177°C에서 serration이 관찰되었다. 변위속도가 0.5mm/min인 조건(그림 3.2.2(b))에서도 상온~100°C 까지 항복점현상이 관찰되었으며, 125°C와 177°C에서 serration이 관찰되었다. 그러나, 그림 3.2.2(c)에 나타낸 것과 같이 변위속도가 50mm/min인 경우에는 상온을 제외하면 항복점현상이 관찰되지 않았으며, 모든 시험온도에서 serration이 관찰되지 않았다.

V-노치시편 ($R_n=0.5mm$)의 경우에는 그림 3.2.3에 나타낸 것과 같이 모든 시험조건에서 뚜렷한 형태의 항복점현상은 관찰되지 않았으며, serration은 변위속도에 따라 일부 온도 영역에서 관찰되었다. 변위속도가 0.05mm/min와 0.5mm/min인 경우(그림 3.2.3(a),(b))에는 125°C와 177°C에서 serration이 관찰되었으며, 변위속도가 50mm/min인 경우(그림 3.2.3(c))에는 모든 온도 조건에서 serration이 관찰되지 않았다. 따라서, 노치반경이 1.5mm인 시편과 V-노치시편에서도 변위속도가 0.05mm/min와 0.5mm/min인 조건에서 DSA의 증거인 serration이 관찰되었다. 다만, 일부 온도에서는 serration

의 형태가 표준 인장시편이나 노치반경이 9mm인 노치시편과 다르고, 하중-변위 곡선의 최대 하중 이후에도 serration이 나타나는 특징을 보였다.

2. 최대하중의 온도 및 변위속도 의존성

앞서 표준 인장시편에 대한 인장시험 결과에서 인장강도의 온도와 변위속도 의존성으로부터 A106 Gr.B 탄소강 재료의 DSA 거동을 살펴보았다. 그러나, 노치시편의 경우에는 하중-변위 곡선에서 인장강도를 정의할 수 없다. 따라서, 여기서는 표준 인장시편의 인장강도에 해당하는 하중-변위 곡선의 최대하중을 시편의 최소단면적으로 나누어 정규화 최대하중을 정의하고, 정규화 최대하중의 온도 의존성이 변위속도에 따라 어떻게 달라지는지 살펴보았다. 이를 통해, 노치반경에 따른 DSA 거동의 차이를 파악하고자 한다.

그림 3.2.4는 각 노치시편의 정규화 최대하중을 변위속도와 시험온도에 따라 나타낸 것이다. 노치시편의 종류와 변위속도에 관계없이 온도가 증가함에 따라 정규화 최대하중은 감소하여 최소값을 보이다 다시 증가하여 최대값에 도달하고, 그 이상의 온도에서는 다시 감소하는 경향을 보였다. 온도에 따른 정규화 최대하중의 변화 경향은 변위속도가 증가함에 따라 전체적으로 고온으로 이동하는 경향을 보였다. 이와 같은 정규화 최대하중의 온도 및 변위속도 의존성은 앞서 살펴본 표준 인장시편의 인장강도에 대한 온도 및 변위속도 의존성과 경향이 일치하였다.

그림 3.2.4(a)는 노치반경이 9mm인 노치시편의 정규화 최대하중을 변위속도와 온도에 따라 나타낸 것이다. 변위속도가 0.05mm/min인 조건에서 정규화 최대하중은 60°C 근처에서 최소값을 나타냈으며 온도 증가에 따라 증가하여 230°C에서 최대값을 보였다. 이 경우에 정규화 최대하중의 최대값은 최소에 비해 약 21% 증가된 값이다. 변위속도가 0.5mm/min인 경우에는 정규화 최대하중의 최소값이 100°C, 최대값이 230°C에서 나타났으며, 최대값은 최소값에 비해 약 21% 정도 증가하였다. 50mm/min에서는 정규화 최대하중의 최소값이 160°C 근처에서 나타났으며 최대값은 289~350°C 사이에서 나타났다. 정규화 최대하중의 최대값은 최소값에 비해 약 16.5% 정도 증가하였다. 따라서, 정규화 최대하중의 최대값과 최소값이 나타나는 온도로 판단할 때, 노치반경이 9mm인 노치시편에서 변위속도가 100배 증가함에 따라 정규화 최대하중이 증가하는 온도 영역이 약 50~100°C 상승하는 것을 알 수 있다.

그림 3.2.4(b), (c)를 보면 노치반경이 1.5mm인 노치시편과 노치반경이 0.5mm인 V-노치시편에서는 모든 변위속도에서 거의 유사한 온도 의존성을 보였다. 즉, 변위속도가

0.05mm/min인 경우에 정규화 최대하중의 최소값이 75°C에서 나타났으며 177°C에서 최대값이 나타났다. 정규화 최대하중의 최대값은 최소값에 비해 각각 25.0%와 24.7%씩 증가하였다. 0.5mm/min에서는 정규화 최대하중의 최소값과 최대값이 각각 100°C와 230°C에서 나타났으며, 최대값은 최소값에 비해 각각 19.9%와 21.4%씩 증가하였다. 변위속도가 50mm/min인 경우에는 정규화 최대하중의 최소값이 177°C에서 나타났으며, 최대값은 350°C에서 나타났다. 이 경우에 정규화 최대하중의 최대값은 최소값에 비해 각각 14.7%와 14.3% 증가하였다. 따라서, 노치반경이 1.5mm인 노치시편과 노치반경이 0.5mm인 V-노치시편에서도 변위속도가 100배 증가됨에 따라 정규화 최대하중의 증가가 나타나는 온도 영역이 약 75~120°C 상승하는 것을 알 수 있다.

따라서, 노치시편에서도 정규화 최대하중의 온도 및 변위속도 의존성이 표준 인장시편의 인장강도의 온도 및 변위속도 의존성과 같은 경향을 보였다. 즉, 일정한 온도 영역에서는 온도가 증가함에 따라 정규화 최대하중이 증가하는 경향을 보이며, 정규화 최대하중의 최소값과 최대값이 나타나는 온도 영역이 변위속도의 증가에 따라 고온으로 이동하는 경향을 보였다. 또한, 온도 증가에 따른 정규화 최대하중의 증가율이 변위속도 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 특성 역시 표준 인장시편의 인장시험 결과에서 관찰된 것과 일치하는 것이다.

3. 연신율의 온도 및 변위속도 의존성

노치시편에서 연신율의 온도 및 변위속도 의존성을 파악하기 위해, 각 노치시편에 대한 파단변위를 측정하여 시험온도와 변위속도에 따라 살펴보았다. 노치시편의 경우에는 표준 인장시편에서 정의되는 연신율을 정의하기 어렵기 때문에 최종 파단이 발생할 때까지의 변위로 각 시편의 연신율을 대신 나타내었다.

그림 3.2.5은 각 시편의 파단변위를 시험온도와 변위속도에 따라 나타낸 것이다. 각 시편에서 온도와 변위속도에 따른 파단변위의 변화 경향은 표준 인장시편에서 총 연신율의 온도와 변위속도 의존성과 일치한다. 즉, 온도가 증가함에 따라 파단변위가 감소하여 최소값을 보이고 일정한 온도 이상에서 다시 증가하는 경향을 보였다. 각 노치시편에서 파단변위의 최소값이 나타나는 온도 영역은 변위속도가 증가함에 따라 고온으로 이동하였다. 그림 3.2.5(a)는 노치반경이 9mm인 노치시편의 파단변위를 온도에 따라 나타낸 것으로, 0.05mm/min의 변위속도에서는 125~177°C 사이, 0.5mm/min에서는 177~230°C 사이, 50mm/min에서는 230~289°C 사이에서 파단변위의 최소값을 보였다. 이들 결과를 보면 노치반경이 9mm인 노치시편에서 변위속도가 100배 증가함에 따라

파단변위의 최소값이 나타나는 온도 영역이 60~70°C 정도 고온으로 이동하였다.

노치반경이 1.5mm인 노치시편의 경우(그림 3.2.5(b))에는 0.05mm/min의 변위속도에 서 파단변위의 최소값이 125°C에서 나타났으며, 0.5mm/min에서는 177~230°C 사이, 그리고 50mm/min에서는 289°C에서 파단변위의 최소값이 나타났다. 따라서, 노치반경 이 1.5mm인 노치시편의 경우에는 변위속도가 100배 증가함에 따라 파단변위의 최소값 이 나타나는 온도가 70~90°C 정도 고온으로 상승하였다. 노치반경이 0.5mm인 V-노 치시편에서는 파단변위의 최소값이 변위속도에 따라 0.05mm/min에서는 125°C, 0.5mm/min에서는 177°C, 그리고 50mm/min에서는 230~289°C 사이에서 나타났다(그 림 3.2.5(c)). 따라서, 노치반경이 0.5mm인 V-노치시편의 경우에도 노치반경이 1.5mm 인 시편과 유사하게 변위속도가 100배 증가함에 따라 파단변위가 최소인 온도 영역이 70~90°C 정도 상승하는 것으로 확인되었다.

노치시편에서 파단변위의 최소값이 나타나는 온도 영역을 정규화 최대하중의 최대값 이 나타나는 온도 영역과 비교하여 살펴보면, 시편의 노치반경과 변위속도에 따라 차 이는 있으나 전체적으로 파단변위의 최소값이 나타나는 온도 영역이 최대하중이 나타 나는 온도 영역에 비해 30~90°C 정도 낮은 것을 알 수 있다. 이와 같은 거동은 표준 인장시편에서 관찰된 연신율의 거동과 일치한다.

4. 노치시편에서 DSA 거동 분석

앞서 살펴본 것과 같이 노치시편에서도 재료의 DSA 현상의 증거로 알려진 serration이 관찰되었다. 또한, 하중-변위 곡선에서 얻어진 정규화 최대하중이 일부 온 도 영역에서 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 파단변위가 온도 증가 에 따라 감소하다 증가하는 경향을 보였다. serration이 관찰되는 온도 영역과 최대하 중이 증가하는 온도 영역, 그리고 파단변위가 감소하는 온도 영역이 변위속도가 증가 함에 따라 고온으로 이동하는 특징을 보였다. 또한, 온도에 따른 정규화 최대하중의 변 화에서 최대값과 최소값의 차이가 변위속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 노치시편에서 관찰된 이러한 거동은 앞서 표준 인장시편에서 관찰된 serration, 인장강 도의 증가, 연신율의 감소, 그리고 변위속도 의존성 등과 일치하는 것으로 DSA의 일 반적인 특성이다. 따라서, 노치부에서 응력과 변형률이 집중되어 불균일한 응력과 변형 률 분포를 갖는 노치시편의 경우에도 표준 인장시편과 마찬가지로 DSA 현상이 발생 하는 것을 확인할 수 있다.

노치반경에 따라 DSA 현상이 나타나는 온도 영역과 변위속도 의존성 등에서 약간

씩 차이를 보였다. 노치반경에 따른 이러한 차이를 보다 명확히 살펴보기 위해서, DSA 현상의 증거인 serration과 온도에 따른 정규화 최대하중의 증가영역, 그리고 온도에 따른 파단변위의 감소 영역 등을 노치반경에 따라 비교하였다. 그림 3.2.6은 노치반경별로 serration이 관찰되는 온도 영역을 비교하여 나타낸 것이다. 모든 시편에서 serration이 관찰된 변위속도인 0.5mm/min에서는 표준 인장시편을 제외하면 노치반경에 관계없이 125~177°C에서 serration이 관찰되었다. 변위속도가 50mm/min인 조건에서는 표준 인장시편에 비해 노치반경이 9mm인 시편에서는 약 50°C 정도 고온에서 serration이 관찰되었으며, 노치반경이 1.5mm와 V-노치시편에서는 serration이 관찰되지 않았다. 노치반경별로 온도에 따른 최대하중의 변화를 살펴보면, 그림 3.2.7와 같이 0.5mm/min와 50mm/min인 변위속도에서 모든 노치시편은 노치반경에 관계없이 거의 유사한 온도 의존성을 보였다. 즉, 온도 증가에 따라 정규화 최대하중이 증가하는 온도 영역이 거의 일치하였다. 표준 인장시편과 비교하면 노치시편이 약간 높은 온도 영역에서 정규화 최대하중의 증가가 나타났다. 정규화 최대하중의 최소값과 최대값이 나타나는 온도를 기준으로 판단하면, 표준 인장시편에 비해 노치시편이 0.5mm/min에서는 25°C, 50mm/min에서는 50°C 정도 높은 온도에서 정규화 최대하중의 최소값과 최대값이 나타났다. 파단변위를 시편 형상별로 비교하여 살펴보면 그림 3.2.8과 같다. 시편의 형상이 다른 경우에는 파단변위를 직접 비교하기 어렵기 때문에 그림 3.2.8은 각 조건별로 상온의 파단변위를 이용하여 나머지 온도의 파단변위를 정규화하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 전체적으로 정규화 파단변위가 감소하는 온도 영역이 0.5mm/min와 50mm/min 변위속도에서 모두 노치반경에 관계없이 거의 유사한 것을 알 수 있다. 표준 인장시편의 결과와 비교하면 노치시편에서 파단변위의 감소 영역이 약간 고온에서 형성되었으며, 온도상승 정도는 0.5mm/min에서 25°C, 50mm/min에서 50°C 정도인 것을 알 수 있다.

따라서, 이들 결과를 종합하면 노치시편에서도 표준 인장시편에서 관찰된 DSA의 특성과 거동이 모두 관찰되었다. 또한, 노치시편에서는 노치반경에 관계없이 거의 유사한 온도 영역에서 DSA 현상이 발생하는 것으로 평가되었다. 다만, 표준 인장시편과 비교하면 노치시편에서는 DSA 현상이 약간 높은 온도에서 나타나는 것을 알 수 있다. 표준 인장시편에 비해 노치시편에서 DSA 현상이 나타나는 온도 영역의 증가는 변위속도에 따라 0.5mm/min에서는 약 25°C, 50mm/min에서는 50°C 정도였다. 이것은 동일한 변위속도에서 노치시편의 DSA거동이 표준인장시편에서 변위속도가 10배 이하로 증가되었을 때의 DSA 거동과 유사한 것으로 파악된다. 이러한 DSA 거동의 차이가 나타

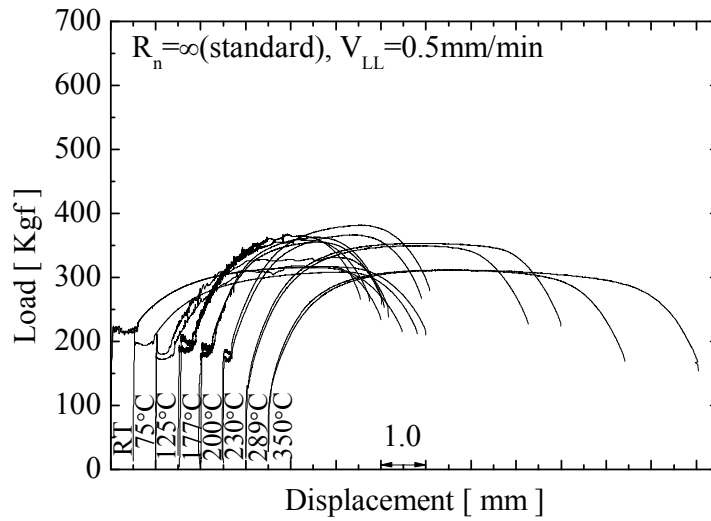
나는 원인을 분석하기 위해 이어지는 장에서 유한요소시뮬레이션을 통해 분석하였다.

제 3 절 인장 파면 특성

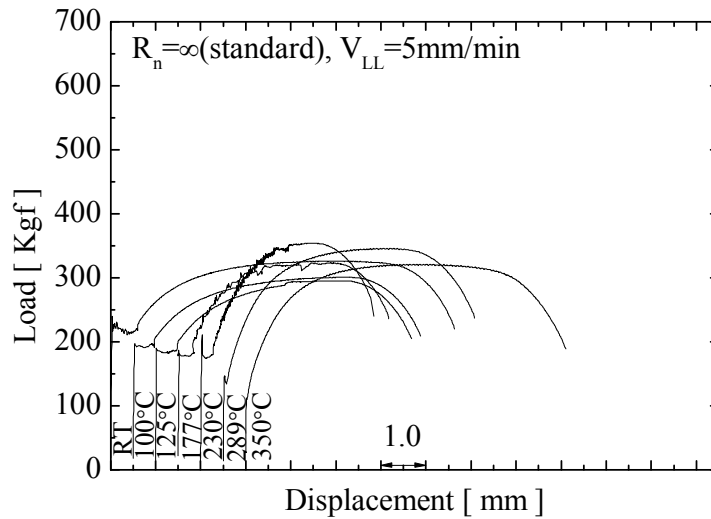
표준 인장시편과 노치시편에 대한 인장시험 결과로부터 A106 Gr.B 배관재의 DSA 거동과 DSA 거동에 미치는 기하학적 형상의 영향을 파악하였다. 파악된 바에 의하면 DSA 현상이 발생하면 표준 인장시편과 노치시편 모두 강도가 증가하고 연신율이 감소하였다. 이로부터, DSA 현상이 발생한 경우 인장시편의 파면이 상온과 다를 것으로 예상 할 수 있다. 그 차이를 확인하기 위해 인장파면에 대한 주사 전자현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM) 분석을 수행하였다. SEM 분석 결과로 얻은 그림 3.3.1을 보면 시편의 형상이나 시험 온도에 관계없이 전형적인 연성 파면의 특징인 딴플(dimple) 파면을 나타내고 있다. 그림 3.3.1(a)와 (b)를 보면 표준 인장시편에서는 상온에 비해 DSA 현상이 발생하는 영역인 177°C의 파면에 나타난 딴플의 깊이가 알아진 것을 알 수 있다. 이것은 DSA 영역에서 연신율이 감소하여 딴플의 인장방향 성장이 감소한 것으로 파악된다.

그림 3.3.1(c)~(h)에 나타낸 노치 인장시편의 파면도 마찬가지로 상온에 비해 177°C의 경우가 딴플의 깊이가 알아졌다. 또한, 노치 반경이 작아질수록 딴플의 직경이 커지는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 노치반경이 감소함에 따라 3축 응력(Stress tri-axiality)가 증가하여 딴플이 3축 방향으로 고르게 성장한 것으로 판단된다.

따라서, 인장시편의 파면에 대한 SEM 분석을 통해 관찰된 딴플의 형상은 인장시험에서 확인된 DSA 거동과 잘 일치하는 것으로 판단된다. 또한, 노치 반경에 따른 딴플의 직경 변화로부터 노치 형상에 따른 3축 응력의 차이가 예상되나, 노치 인장시편에 대한 인장시험 결과에서는 DSA 거동의 차이가 뚜렷하지 않았다. 따라서, 3축 응력 정도를 정량적으로 확인하고 자세히 분석하기 위해 다음 장에서는 인장시편에 대한 유한요소시뮬레이션을 수행하여 노치부의 응력 및 변형률 상태를 정량적으로 확인하고자 한다.

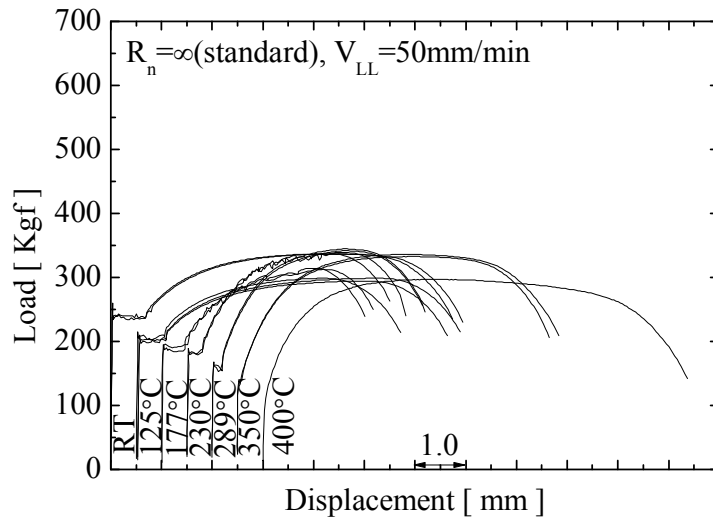


(a) 0.5mm/min 변위속도



(b) 5mm/min 변위속도

그림 3.1.1 표준 인장시편에 대한 하중-변위 곡선



(c) 50mm/min 변위속도

그림 3.1.1 표준 인장시편에 대한 하중-변위 곡선 (계속)

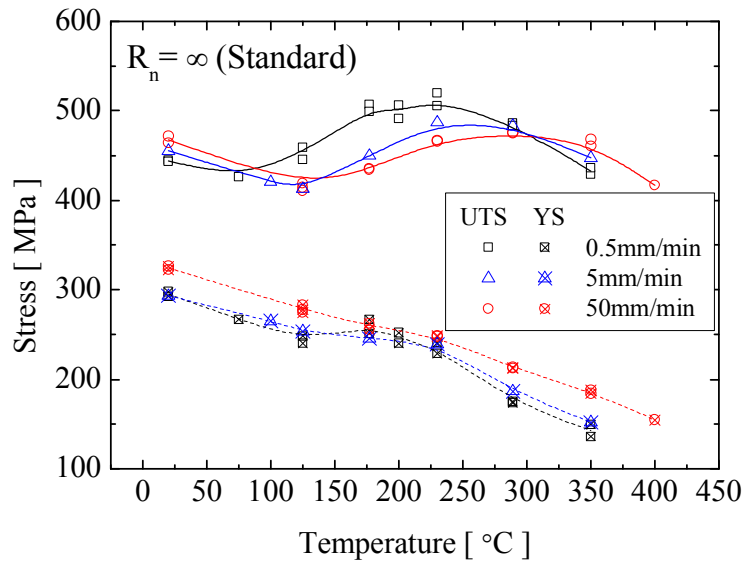


그림 3.1.2 A106 Gr.B 탄소강 배관재의 변위속도별 온도에 따른 항복강도와 인장강도 변화

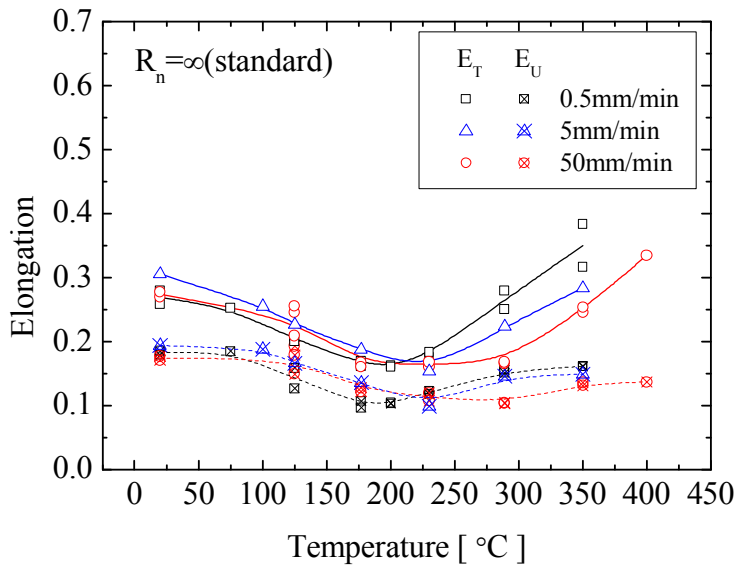
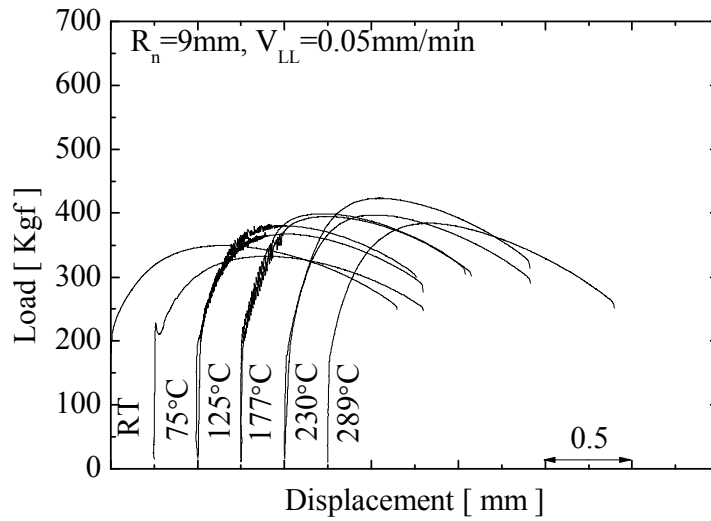
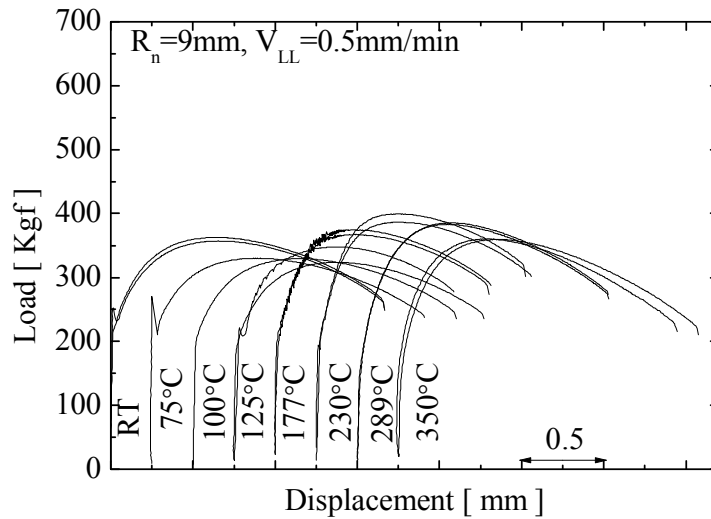


그림 3.1.3 A106 Gr.B 탄소강 배관재의 변위속도별 온도에 따른 균일연신율과 총 연신율 변화

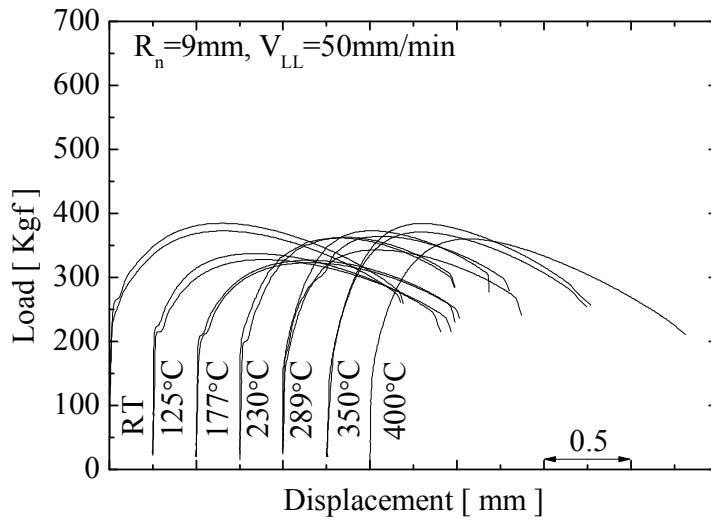


(a) 0.05mm/min 변위속도



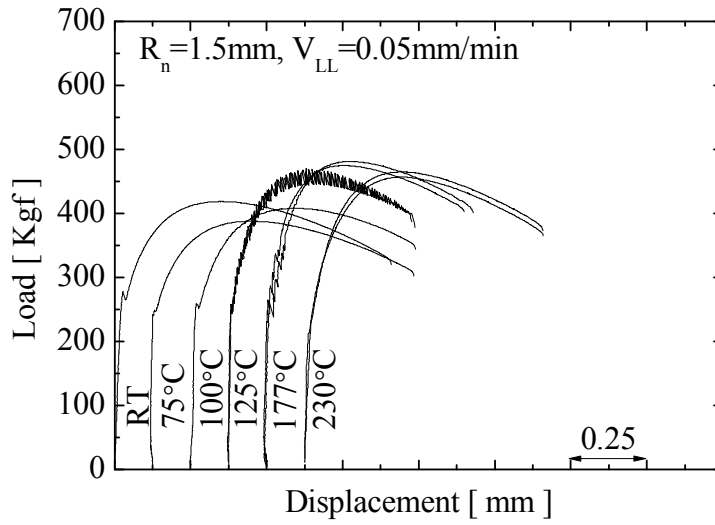
(b) 0.5mm/min 변위속도

그림 3.2.1 노치반경이 9mm인 노치시편에 대한 하중-변위 곡선

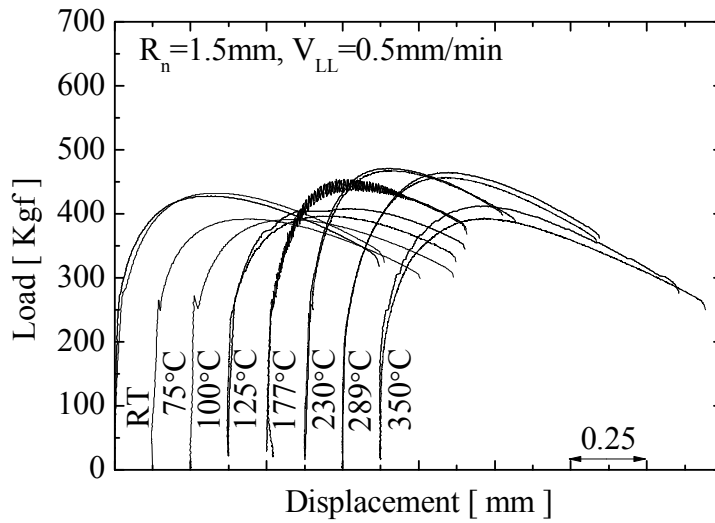


(c) 50mm/min 변위속도

그림 3.2.1 노치반경이 9mm인 노치시편에 대한 하중-변위 곡선 (계속)

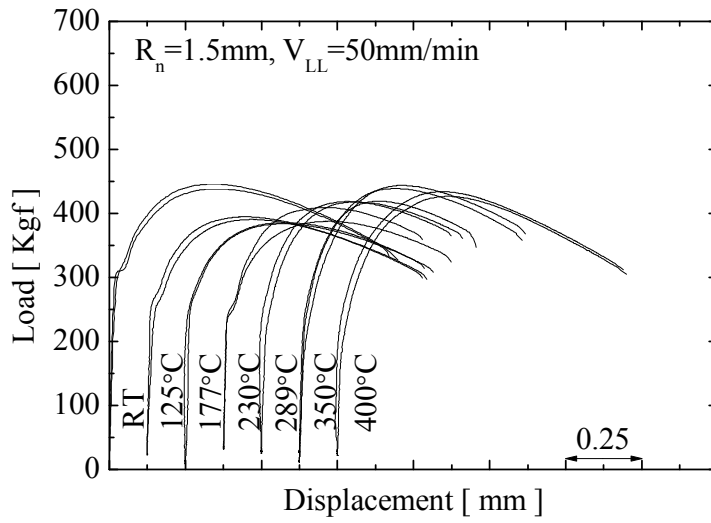


(a) 0.05mm/min 변위속도



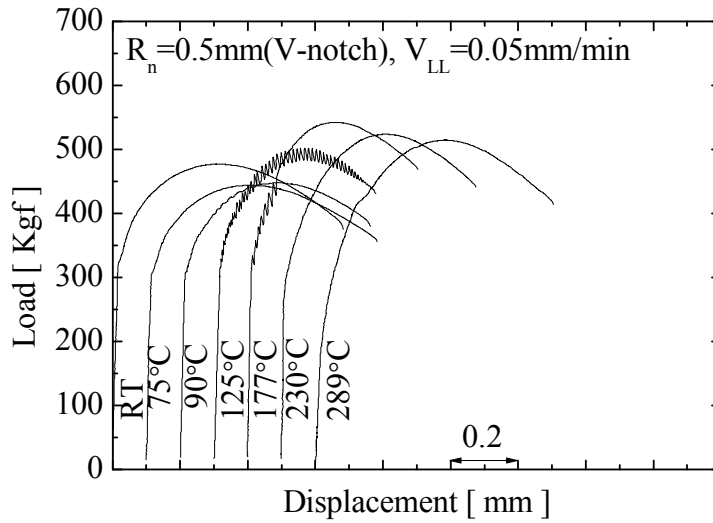
(b) 0.5mm/min 변위속도

그림 3.2.2 노치반경이 1.5mm인 노치시편에 대한 하중-변위 곡선

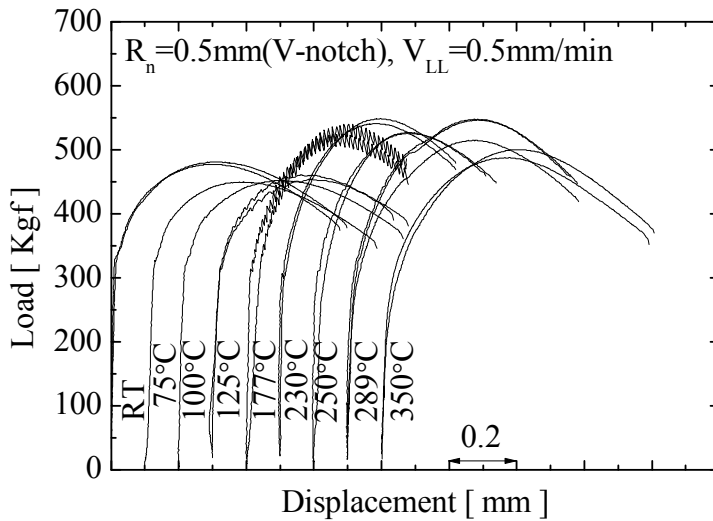


(c) 50mm/min 변위속도

그림 3.2.2 노치반경이 1.5mm인 노치시편에 대한 하중-변위 곡선 (계속)

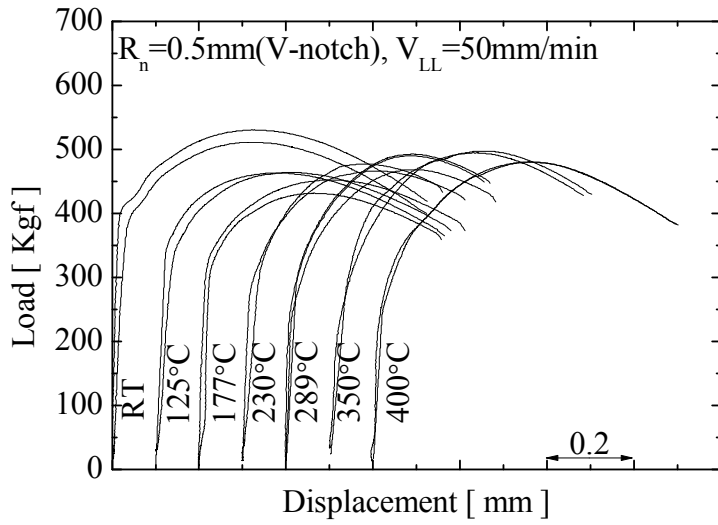


(a) 0.05mm/min 변위속도



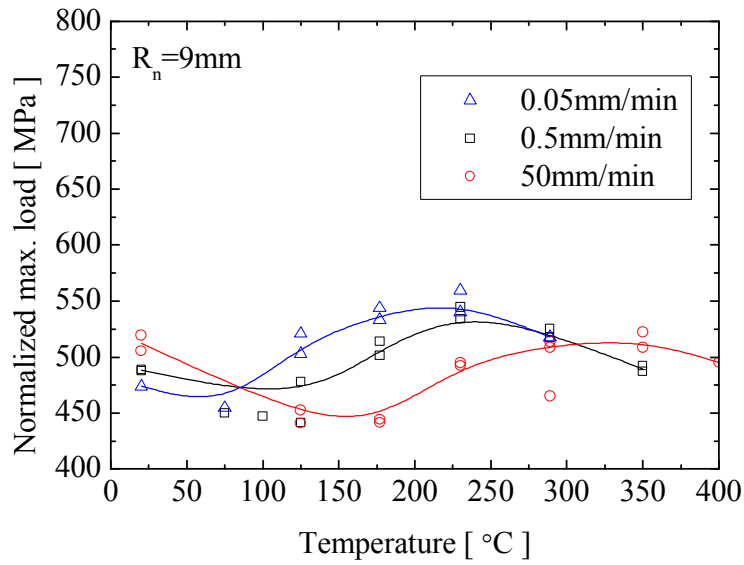
(b) 0.5mm/min 변위속도

그림 3.2.3 노치반경이 0.5mm인 V-노치시편에 대한 하중-변위 곡선

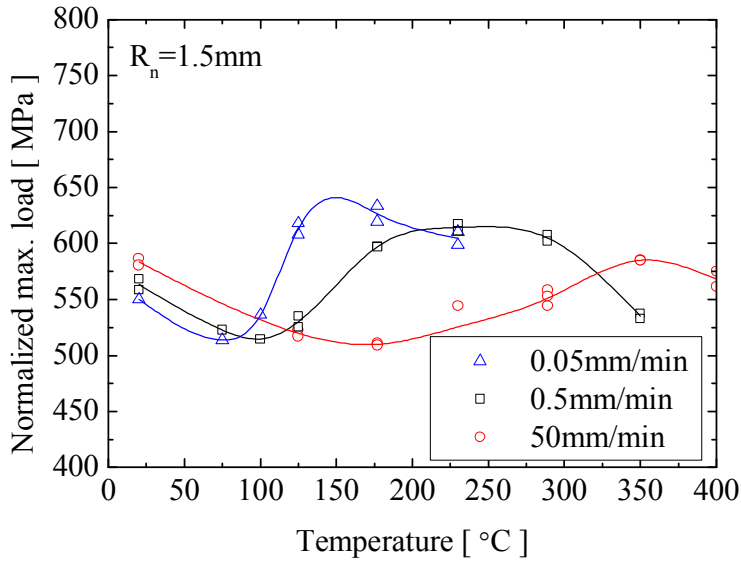


(c) 50mm/min 변위속도

그림 3.2.3 노치반경이 0.5mm인 V-노치시편에 대한 하중-변위 곡선 (계속)

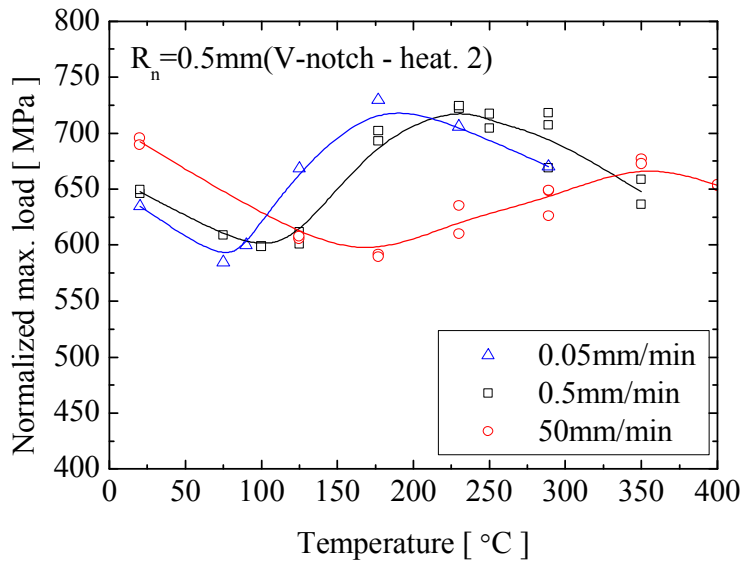


(a) 노치반경 9mm



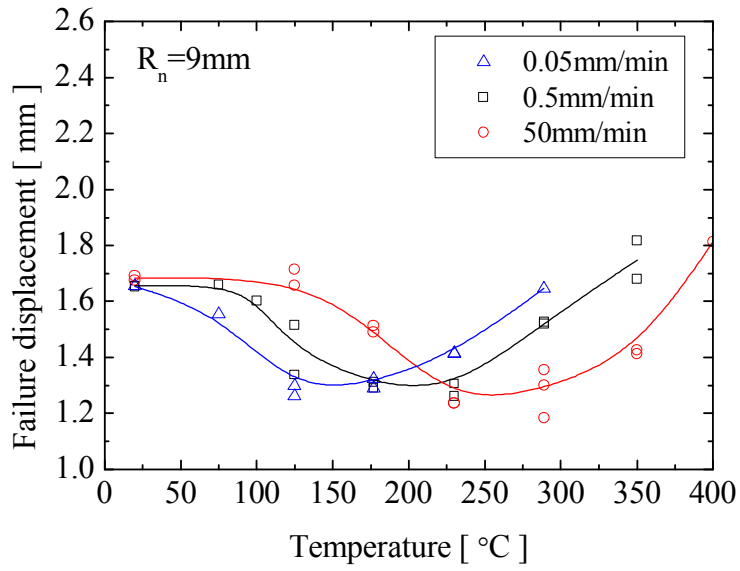
(b) 노치반경 1.5mm

그림 3.2.4 변위속도별 온도에 따른 노치시편의 정규화 최대하중의 변화

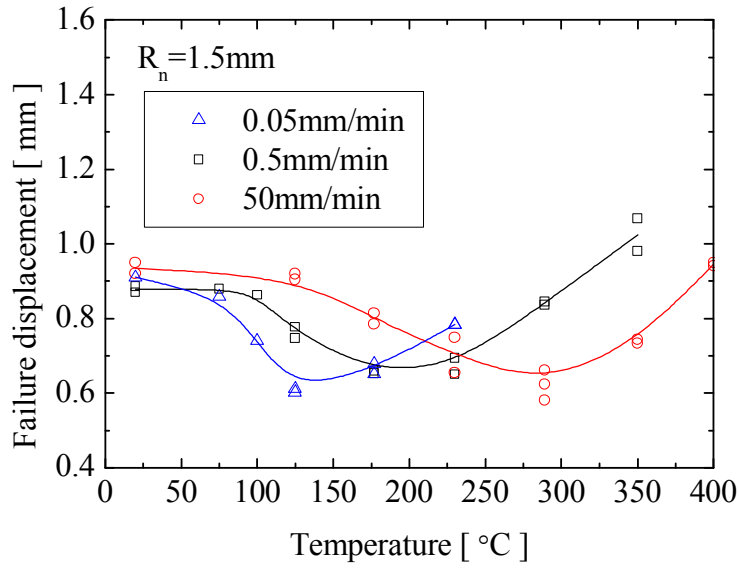


(c) 노치반경 0.5mm (V-notch)

그림 3.2.4 변위속도별 온도에 따른 노치시편의 정규화 최대하중의 변화 (계속)

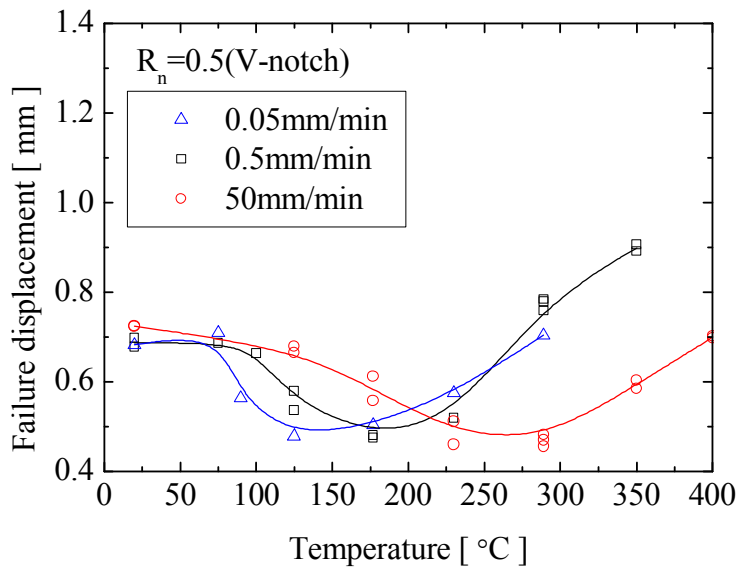


(a) 노치반경 9mm



(b) 노치반경 1.5mm

그림 3.2.5 변위속도별 온도에 따른 노치시편의 파단변위 변화



(c) 노치반경 0.5 mm(V-노치)

그림 3.2.5 변위속도별 온도에 따른 노치시편의 파단변위 변화
(계속)

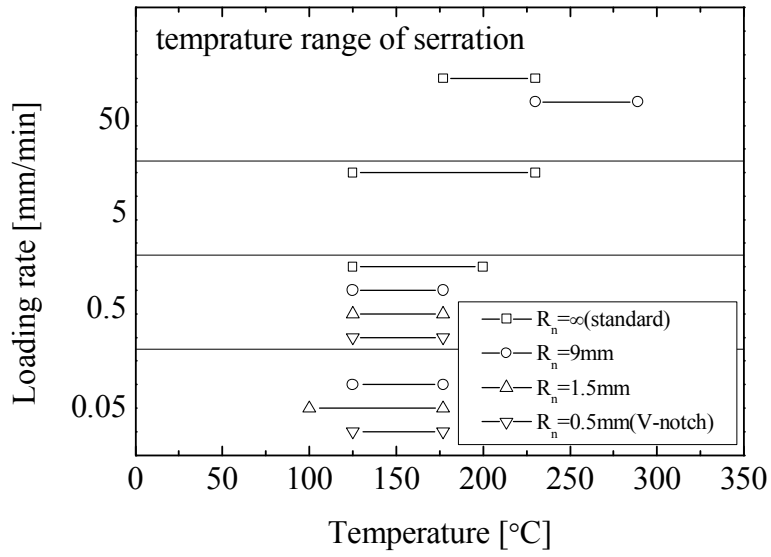
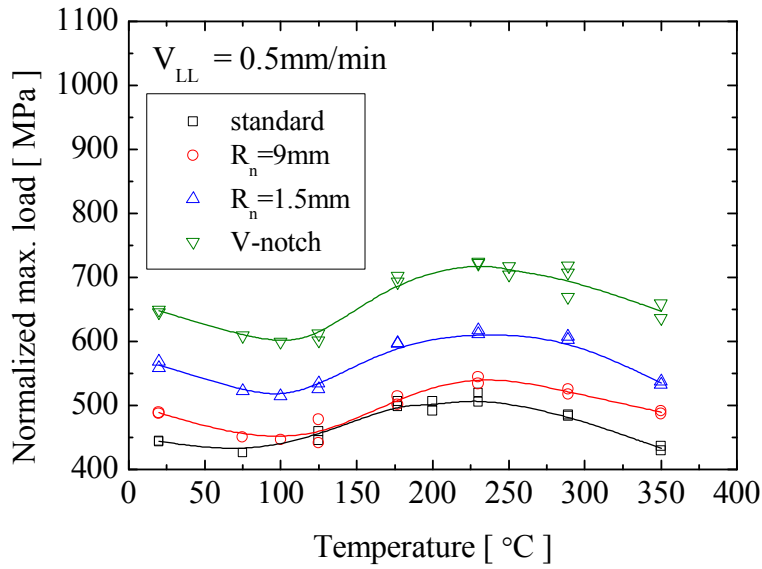
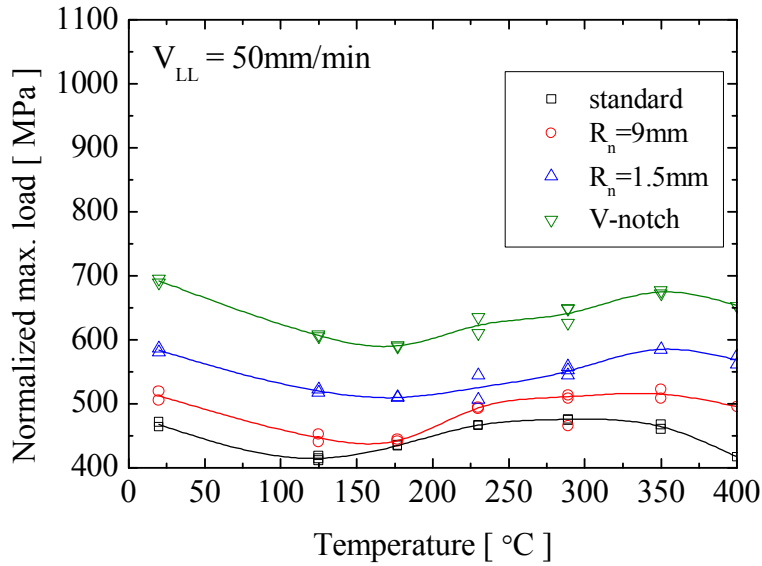


그림 3.2.6 노치반경에 따른 serration 발생 온도 영역 비교

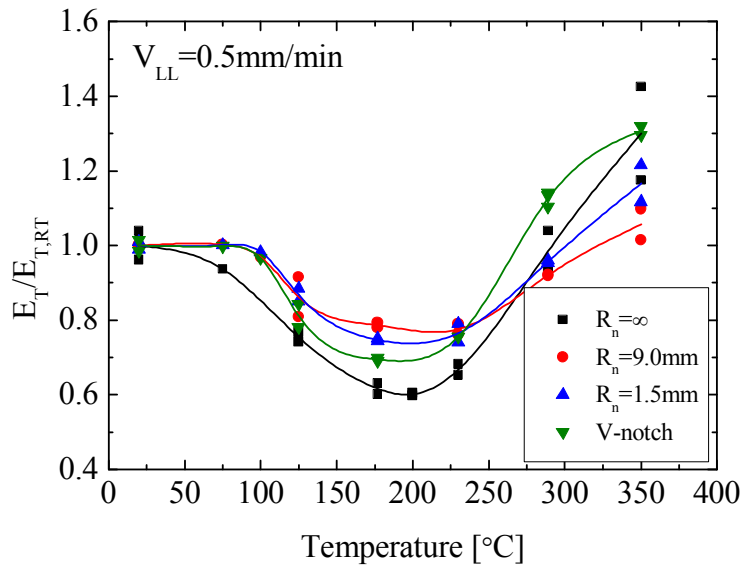


(a) 변위속도 0.5mm/min

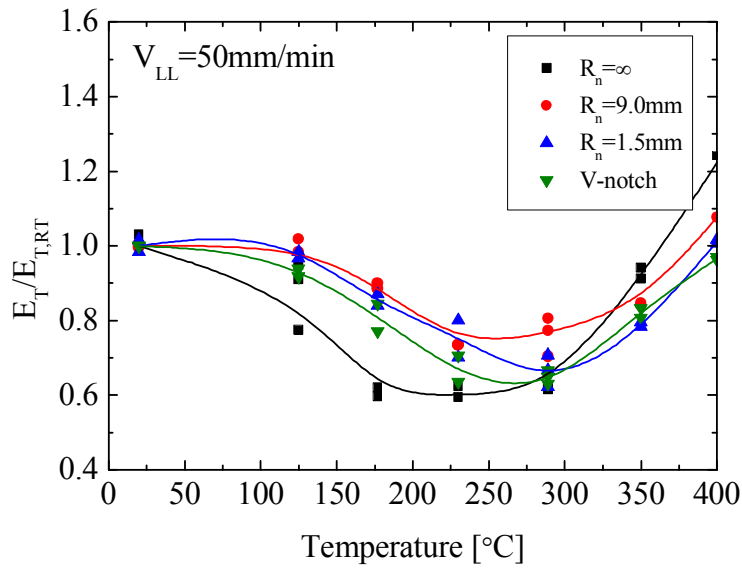


(b) 변위속도 50mm/min

그림 3.2.7 노치반경별 온도에 따른 최대하중의 변화 비교

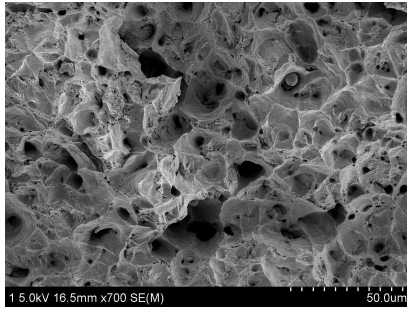


(a) 변위속도 0.5mm/min

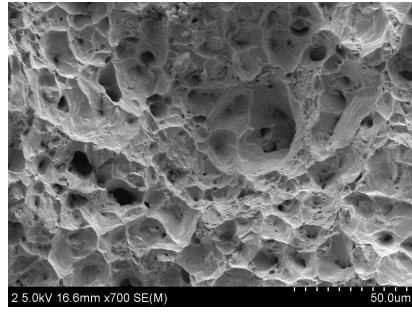


(b) 변위속도 50mm/min

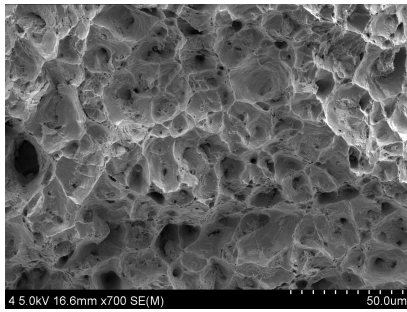
그림 3.2.8 노치반경별 온도에 따른 과단변위의 변화 비교



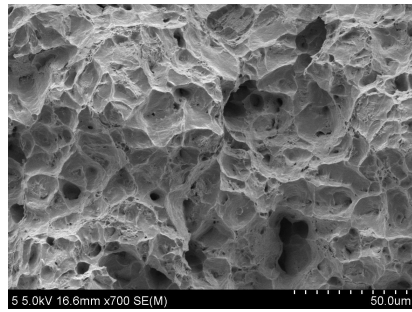
(a) 표준인장시편 (상온)



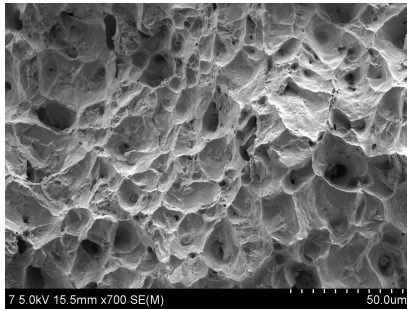
(b) 표준 인장시편 (177°C)



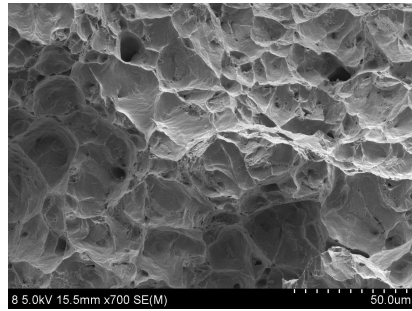
(c) $R_n=9\text{mm}$ (상온)



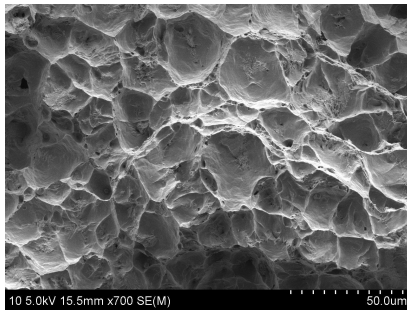
(d) $R_n=9\text{mm}$ (177°C)



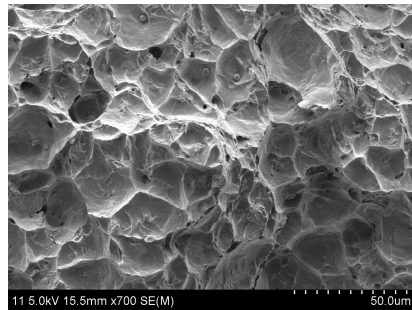
(e) $R_n=1.5\text{mm}$ (상온)



(f) $R_n=1.5\text{mm}$ (177°C)



(g) $R_n=1.5\text{mm}$ (상온)



(h) $R_n=1.5\text{mm}$ (177°C)

그림 3.3.1 노치반경에 따른 인장파면

제 4 장 노치시편에 대한 응력 및 변형률 상태 분석

노치시편에 대한 인장시험 결과에서 응력과 변형률이 국부적으로 집중되는 노치시편의 변형거동에서도 표준 인장시편에서 관찰된 DSA 거동이 모두 관찰되는 것을 확인하였다. 또한, 노치시편에서 노치반경이 다를지라도 DSA 현상이 나타나는 온도 영역은 거의 유사하였다. 다만, 표준 인장시편에 비해 노치시편에서는 DSA 현상이 나타나는 온도영역이 고온쪽으로 이동하였다. 즉, 노치시편의 DSA거동을 표준 인장시편과 비교했을때, 표준 인장시편에서 변위속도가 증가하는 경우와 유사한 거동을 보이는 것을 확인하였다. 이러한 거동의 원인을 분석하기위해 유한요소시물레이션을 통해 노치시편의 노치부에서 응력과 변형률 분포를 정량적으로 분석하였다. 여기서는 노치반경에 따른 노치부의 변형률과 변형률 속도 등의 차이를 살펴보는 것이 목적이므로 상온의 진응력(σ_T)-진변형률(ϵ_T) 곡선만을 유한요소시물레이션을의 입력으로 사용하였다.

제 1 절 유한요소모델

표준 인장시편과 노치시편에 대한 인장시험을 시물레이션하기 위해서, 그림 4.1.1의 유한요소모델이 적용되었다. 시편 종류에 관계없이 축대칭 2차원 모델이 적용되었으며, 대칭성을 고려하여 시편의 1/4만을 모델링 하였다. 요소로는 감소적분이 고려된 축대칭 8절점 요소(CAX8R in ABAQUS)가 사용되었으며, 인장하중이 작용되는 동안 노치부에서의 대변형을 고려하기 위해서 기하학적 비선형성(NLGEOM in ABAQUS)이 고려되었다. 그림 4.1.1에 나타낸 것과 같이 축대칭 경계 조건이 적용되었으며, 인장 하중은 시편 상단부의 절점에 변위제어형태의 축방향 변위를 가함으로써 실제 시편에 가해진 것과 동일한 크기의 변위가 가해지도록 하였다. 해석 주기는 시험이 진행된 시간과 동일하게 하였다. 유한요소시물레이션에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS code가 사용되었다.

각 시편에 대한 유한요소시물레이션에는 상온의 표준 인장시험에서 주어진 진응력(σ_T)-진변형률(ϵ_T) 곡선이 입력으로 사용되었다. 그림 4.1.2는 해석에 적용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸 것으로 네킹 이전까지는 식(4.1.1)과 (4.1.2)를 적용하여 인장강도까지의 공칭 응력(σ_E)-공칭 변형률(ϵ_E) 데이터로부터 계산하였으며,

$$\sigma_T = \sigma_E(1 + \epsilon_E) \quad (4.1.1)$$

$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon_E) \quad (4.1.2)$$

네킹 이후의 진응력-진변형률 곡선은 반복 유한요소해석을 통해 구했다. 즉, 그림 4.2.1(a)와 같이 유한요소해석을 통해 구한 하중-변위 곡선이 인장시험에서 주어진 하중-변위 곡선과 잘 일치하도록 네킹 이후의 진응력-진변형률 곡선을 수정하며 해석을 반복적으로 수행하여 최적의 진응력-진변형률 곡선을 구했다.

제 2 절 유한요소시물레이션 검증

그림 4.1.2의 진응력-진변형률 곡선을 입력으로 각 노치시편에 대한 유한요소시물레이션을 수행하고, 유한요소시물레이션이 노치시편의 변형 거동을 적절히 모사하는지를 확인하기 위해 해석 결과에서 주어지는 하중-변위 곡선을 인장시험에서 주어진 하중-변위 곡선과 비교하였다.

그림 4.2.1(a)~(d)에 나타난 것과 같이 V-노치시편을 제외하면 표준 인장시편을 포함한 모든 노치시편에서 유한요소시물레이션과 인장시험에서 주어진 하중-변위 곡선이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. V-노치시편의 경우에도 변위에서 일정한 차이를 보였으나 하중 크기는 유한요소시물레이션 결과와 시험결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서, 각 시편에 대한 유한요소시물레이션 결과로부터 각 변형 시점에 해당하는 노치부의 응력과 변형률 상태를 정량적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

제 3 절 시편형상에 따른 변형 거동

1. 응력상태

전 장에서 살펴본 표준 인장시편과 노치시편의 파면에 나타난 딥플의 형상으로부터 3축 응력의 차이를 예측 할 수 있었다. 그럼에도 불구하고 DSA 거동에 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았다. 따라서, 실제로 3축 응력의 차이가 어느 정도 인지 정량적으로 확인해보았다. 그림 4.3.1은 유한요소시물레이션 결과로부터 계산된 3축 응력 분포를 최대하중과 항복하중의 평균 $((F_{max}+F_{ys})/2)$ 과 최대하중 (F_{max}) 그리고 최종파단 시점에서 노치반경 별로 나타낸 것이다. $(F_{max}+F_{ys})/2$ 과 F_{max} 시점에서 3축 응력의 절대값은 다소 차이가 있지만 그 분포 경향에는 차이가 없었다. 노치 반경에 따라 살펴보면, 표준 인장시편에서 가장 낮은 3축 응력을 보였으며, 노치반경이 작을수록 3축 응력이 증가하

였다. 3축 응력의 분포는 표준 인장시편과 노치반경이 9mm인 경우는 비교적 균일한 분포를 보이며, 노치반경이 1.5mm인 경우와 0.5mm(V-notch)인 경우는 시편의 중심부(그래프 상 원점이 시편의 중심)의 3축 응력이 크게 집중되는 것을 알 수 있다. 반면, 노치반경에 따라 3축 응력의 차이를 보면 노치반경이 감소함에 따라 크게 증가되는 것을 알 수 있다. 최종파단 시점에서는 3축 응력의 분포 경향이 노치반경에 무관하게 시편의 중심에 집중되는 것을 알 수 있었다. 특히, 표준 인장시편과 노치반경이 9mm인 노치시편에서 3축 응력의 절대값이 크게 증가하고, 그 분포 경향이 노치반경이 작은 시편과 거의 일치한다. 이것은 네킹에 의한 노치의 영향으로 판단된다. 이와 같은 3축 응력의 뚜렷한 차이에도 불구하고 노치반경에 따른 DSA 거동의 차이는 관찰되지 않았으므로, 3축 응력은 DSA 거동의 지배 인자가 아닌 것으로 판단된다.

2. 변형률 분포

재료의 DSA 현상은 소성변형이 진행되는 동안 이동하는 전위와 용질원자 사이의 상호작용에 의해 발생된다. 즉 DSA 현상은 재료의 소성변형에 수반되는 현상이므로 기하학적 형상과 DSA 거동의 상관관계를 파악하기 위해 소성변형의 분포와 정도를 파악하는 것이 필요하다. 그림 4.3.2~4.3.5은 표준 인장시편을 포함한 노치시편에서 항복하중과 최대하중의 평균($(F_{max}+F_{ys})/2$)과 최대하중(F_{max}) 그리고 최종파단 시점에서 등가 소성변형률(ϵ_{pc})의 분포를 나타낸 것으로 각각 살펴보았다.

그림 4.3.2에서 알 수 있는 것과 같이 표준 인장시편의 경우에는 변형 정도에 관계없이 게이지부 내에서는 소성변형이 균일하게 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 표준 인장시편의 경우 최대하중까지는 변형이 균일하게 발생한다는 기존의 이론과 잘 일치하는 것이다. 최종파단 시점은 최대하중 이후에 소성영역의 전파를 살펴보기 위해 등고선 그래프의 스케일을 최대하중 시점의 최대값으로 제한하였다. 표준 인장시편의 경우는 최대하중 이후에는 소성영역이 추가로 전파되지 않았다. 노치반경 9mm인 노치시편의 경우에는 그림 4.3.3에서 알 수 있는 것과 같이 노치 내에서 위치에 따라 불균일한 소성변형률을 보이며, $(F_{max}+F_{ys})/2$ 와 F_{max} 에서 모두 최소 단면부의 중심에서 소성변형률이 가장 높고 최소 단면부에서 양끝 쪽으로 소성변형이 진행되었다. 최대하중 이후 최종파단까지 소성영역의 전파는 미미하거나 없는 것으로 파악되었다. 또한, 최종파단까지 변형이 진행되는 동안 소성변형은 노치부 내에서만 발생하는 것을 알 수 있다. 노치반경 1.5mm인 시편에서는 변형이 진행됨에 따라 노치부 내에서 큰 변형률 구배를 보였으며, $(F_{max}+F_{ys})/2$ 시점에는 최소 단면부의 중심과 노치 선단에서 거의 유사

한 정도의 소성변형률을 보였다. 그러나, 변형이 진행되어 최대하중에 도달할 시점에서는 노치 선단(시편의 표면)에서 소성변형률이 크게 증가하였다(그림 4.3.4). 즉, 노치 선단에서 소성변형이 집중되는 거동을 보였다. 노치반경이 1.5mm인 시편에서는 최대하중 이후에도 축 방향으로 소성영역이 전파되는 것이 확인되었으나 최종과단까지 소성 변형은 노치부에 제한되었다. 한편, V-노치시편의 경우에는 그림 4.3.5에서 알 수 있는 것과 같이 변형 초기부터 소성 변형이 노치 선단(시편의 표면)에 집중되어 최대 소성 변형률이 노치 선단에서 나타났으며, 노치 선단에서 변형률의 집중 현상은 변형이 진행될지라도 계속 유지되었다. 또한, V-노치시편의 경우에도 최대하중 이후 최종 과단 까지 축 방향으로 소성영역이 전파되었으며, 그 정도가 노치반경이 1.5mm인 노치시편의 경우보다 심하여 최대하중 이후 시편 중심부의 소성영역이 노치부 바깥으로 전파되었다.

시편 형상에 따른 변형률 분포를 종합적으로 살펴보면, 표준 인장시편의 경우에는 게이지부에서 거의 균일한 변형률을 보이지만 노치시편에서는 노치반경에 관계없이 시편의 최소 단면부에서 소성변형이 집중되어 최대 소성변형률을 보였으며, 노치반경이 1.5mm 이하인 경우 노치선단의 소성변형률 집중이 뚜렷하였으며, 최대하중 이후에도 축 방향으로 소성변형이 전파되는 것을 확인하였다. 또한, V-노치시편의 경우에는 최대하중 이후에는 노치부 바깥으로도 소성변형이 전파되었다. 노치반경이 1.5mm 미만인 노치시편의 소성변형률 분포와 전파과정을 살펴보면 전 장에서 살펴본 하중-변위 곡선에서 최대하중 이후에도 serration이 관찰되는 원인이 최대하중 이후에도 소성변형이 전파되기 때문인 것으로 파악된다.

3. 변형률 증가에 따른 등가 소성변형률 속도 변화

각 노치시편에서 변형률 분포를 살펴본 결과, 노치반경에 관계없이 노치시편의 최소 단면부에서 소성변형이 집중되는 것을 알 수 있다. 따라서, 시편의 최소 단면에서 소성 변형률이 노치시편의 변형 거동을 지배하며, 노치시편의 DSA 거동에도 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 따라서, 여기서는 유한요소시물레이션 결과로부터 각 시편의 최소 단면부에서 등가 소성변형률 속도($\dot{\epsilon}_{pe}$)를 살펴보았다.

시편의 형상에 따른 시편의 최소 단면부에서 등가 소성변형률 속도의 차이를 정량적으로 비교하기 위해서, 시편의 최소 단면에서 평균된 등가 소성변형률 속도를 전체 변형 구간에서 노치반경별로 비교하였다. 그림 4.3.6에 나타낸 것과 같이 시편의 최소 단면에서 평균된 등가 소성변형률 속도는 노치반경에 관계없이 초기 변형 구간에서 급격

히 증가된 후 감소하여 다시 변형이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보였다. 표준 인장시편의 경우에는 초기에 감소 후 최대하중 시점까지 거의 일정한 값을 보인 반면, 노치시편의 경우에는 등가 소성변형률 속도가 감소 후 최대하중 이전부터 연속적으로 증가하는 거동을 보였다. 노치반경별로 등가 소성변형률 속도를 비교하면 전체적으로 표준 인장시편에서 가장 낮은 소성변형률 속도를 보였으며, 노치반경이 감소됨에 따라 등가 소성변형률 속도가 증가하였다. 이들 차이를 정량적으로 비교하기 위해서 각 시편에서 최대하중까지 등가 소성변형률 속도를 구간 평균하였다. 계산 결과 표준 인장시편의 평균 등가 소성변형률 속도는 $2.61 \times 10^{-4}/s$, 노치반경이 9mm인 시편은 $2.83 \times 10^{-3}/s$, 노치반경이 1.5mm인 시편은 $3.97 \times 10^{-3}/s$, V-노치시편은 $3.93 \times 10^{-3}/s$ 로 주어졌다. 이들 값을 표준 인장시편의 소성변형률 속도와 상대적으로 비교하면, 노치반경이 9mm인 시편의 변형률 속도는 표준 인장시편의 10.83배, 노치반경이 1.5mm인 시편은 15.18배, V-노치시편은 15.06배 큰 것을 알 수 있다.

DSA 발생 온도 영역은 변형률속도의 지수함수적으로 비례하는 것으로 알려져 있다. 앞서 시편 형상에 따른 DSA 거동을 비교 분석하기 위해서, 유한요소해석 결과로부터 시편의 최소 단면에서 평균 등가 소성변형률 속도를 계산하였다. 이 경우, 노치 인장시편을 통해 파악된 노치시편의 DSA 거동이 표준 인장시편에서 변위속도가 10배 이하로 증가된 경우와 유사한 것으로 파악된 것과는 일치하지 않는 결과이다. 다른 한편, 재료의 DSA 거동이 재료의 소성변형 거동에 의해 지배되므로 각 시편의 DSA 거동이 소성변형률이 가장 높은 시편의 최소 단면 뿐 아니라 소성변형이 발생하는 전체 영역의 소성변형률 속도에 의존하는 것으로 가정할 수 있다.

따라서, 유한요소해석 결과로부터 주어진 변형시점에 각 시편의 소성변형 영역에서 등가 소성변형률 속도를 계산하였다. 그림 4.3.8는 각 시편의 소성변형 영역 전체에서 평균한 등가 소성변형률 속도를 평균 변형률의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 시편의 최소 단면에서 평균된 등가 소성변형률 속도와 달리 소성 영역 전체에서 평균된 등가 소성변형률 속도는 소성변형률이 증가됨에 따라 초기에 급증한 후 지수 함수적으로 감소하여 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 표준 인장시편의 경우에는 초기 변형 단계 이후에 거의 유사한 변형률 속도를 보였다. 시편의 형상에 따라 소성변형률 속도를 비교하여 살펴보면, 표준 인장시편이 가장 낮고, 노치반경이 9mm인 노치시편이 가장 큰 변형률 속도를 보였으며, 노치반경이 1.5mm인 시편과 V-노치시편이 중간 정도의 소성변형률 속도를 보였다. 이들 값을 정량적으로 비교하기 위해서 각 시편에서 최대하중까지 체적 평균된 등가 소성변형률 속도를 구간 평균하였

다. 계산 결과 표준 인장시편에서의 평균 등가 소성변형률 속도는 $2.30 \times 10^{-4}/s$, 노치반경이 9mm인 시편은 $1.20 \times 10^{-3}/s$, 노치반경이 1.5mm인 시편은 $1.15 \times 10^{-3}/s$, V-노치시편은 $8.78 \times 10^{-4}/s$ 로 주어졌다. 이들 값을 표준 인장시편의 소성변형률 속도와 비교하면, 노치반경이 9mm인 시편의 소성변형률 속도는 표준 인장시편의 5.19배, 노치반경이 1.5mm인 시편은 4.97배, V-노치시편은 3.81배인 것으로 평가되었다.

제 4 절 DSA 거동에 미치는 노치부의 응력 및 변형률 상태

앞서 수행된 표준 인장시험 결과에 의하면, A106 Gr.B 탄소강 배관재의 경우에는 DSA 영역이 변위속도가 10배 증가됨에 따라 약 25~50°C 정도 고온으로 상승하였다. 또한, 노치시편에 대한 인장시험 결과에 의하면, 결함부에서 응력과 변형이 집중되는 노치시편의 경우에도 표준 인장시편에서 관찰된 DSA 특성과 거동이 모두 관찰되었다. 노치시편에서 노치반경에 관계없이 거의 유사한 온도 영역에서 DSA 현상이 발생되었으며, 표준 인장시편과 비교하면 DSA 현상이 약간 높은 온도(0.5mm/min에서는 약 25°C, 50mm/min에서 50°C 정도)에서 나타났다. 따라서, 표준 인장시편과 노치시편에 대한 인장시험 결과를 비교하면 노치시편에서 소성변형률 속도는 표준 인장시편의 소성변형률 속도보다 증가되는 것으로 판단된다. 또한, DSA 온도영역은 변형률 속도에 지수함수적으로 비례하므로 변형률 속도의 증가 정도는 10배 이하인 것으로 판단할 수 있다. 또한, 노치시편에서 노치반경에 따른 소성변형률 속도의 차이는 미미한 것으로 판단할 수 있다.

한편, 유한요소해석 결과에서 파악된 바에 의하면, 시편의 최소 단면에서 평균된 소성변형률 속도는 노치반경이 9mm인 노치시편은 표준 인장시편의 10.83배, 노치반경이 1.5mm인 시편은 15.18배, V-노치시편은 15.06배였다. 반면, 소성변형 영역에서 체적 평균된 소성변형률 속도는 노치반경이 9mm인 시편은 표준 인장시편의 5.19배, 노치반경이 1.5mm인 시편은 4.97배, V-노치시편은 3.81배로 노치반경에 관계없이 유사한 소성변형률 속도를 보였으며 표준 인장시편에 비해 10배 이내의 변형률 속도 차이를 보였다. 인장시험에서 관찰된 DSA 거동에 미치는 노치의 영향은 변형률 속도가 증가되는 것에 의한 것으로 파악되며 그 정도는 10배 이하이며, 노치반경에 따른 차이는 없었다. 소성변형 영역에서 체적 평균된 소성변형률 속도는 이러한 결과를 잘 뒷받침한다. 따라서, DSA 거동은 소성변형 영역에서 체적 평균된 소성변형률 속도에 지배되는 것으로 판단된다.

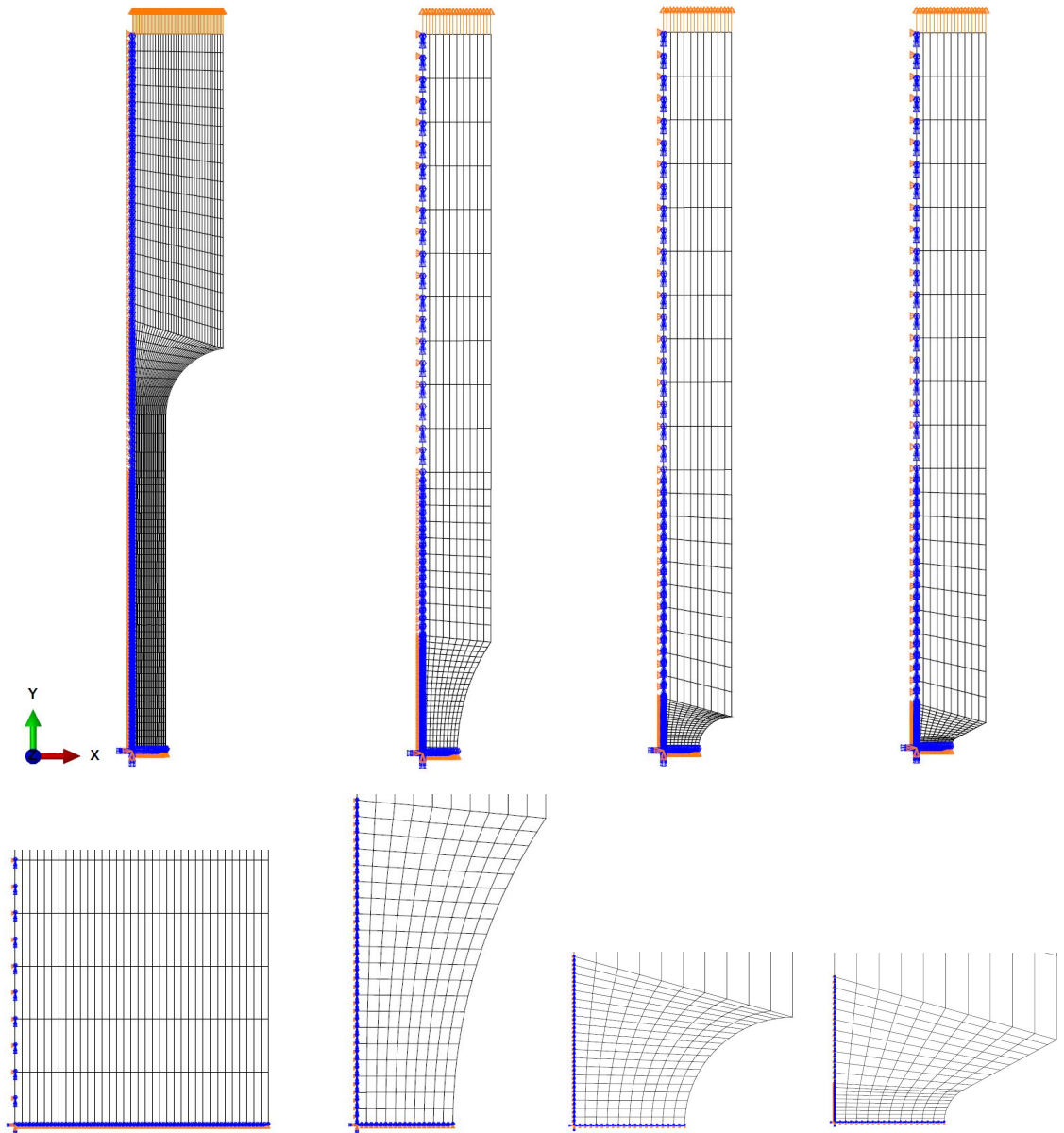


그림 4.1.1 표준 인장시편과 노치시편의 유한요소해석 모델
 (좌측부터 차례로 (a) 표준 인장시편, (b) $R_n=9\text{mm}$
 (c) $R_n=1.5\text{mm}$, (d) $R_n=0.5\text{mm}$ (V-노치))

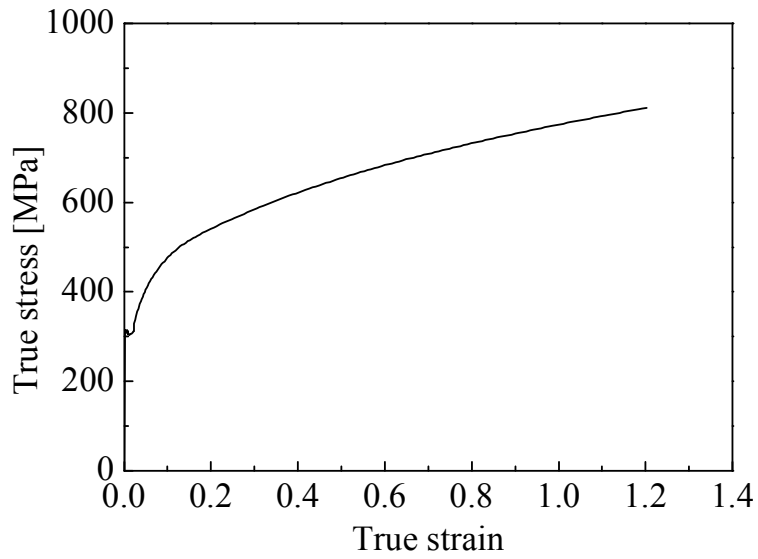
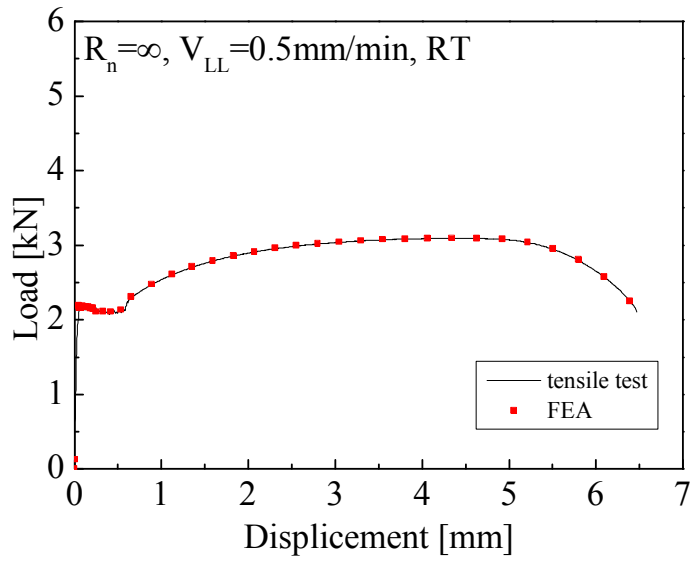
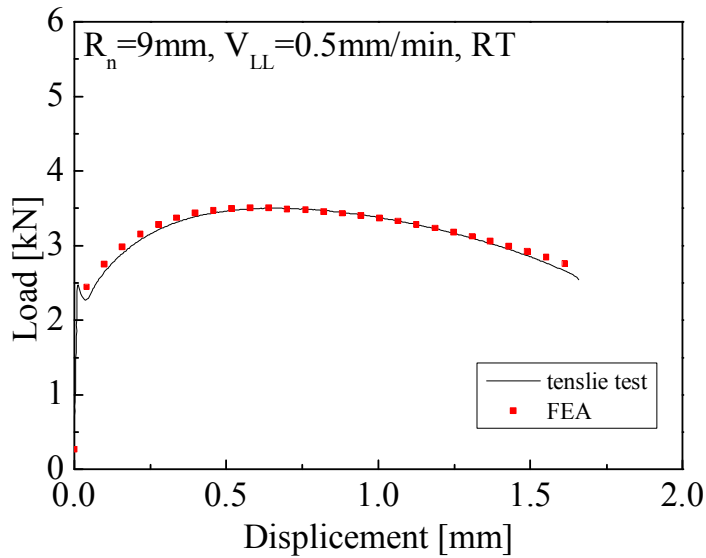


그림 4.1.2 유한요소 시뮬레이션에 사용된 A106 Gr.B 배관재의 진응력-진변형률 곡선

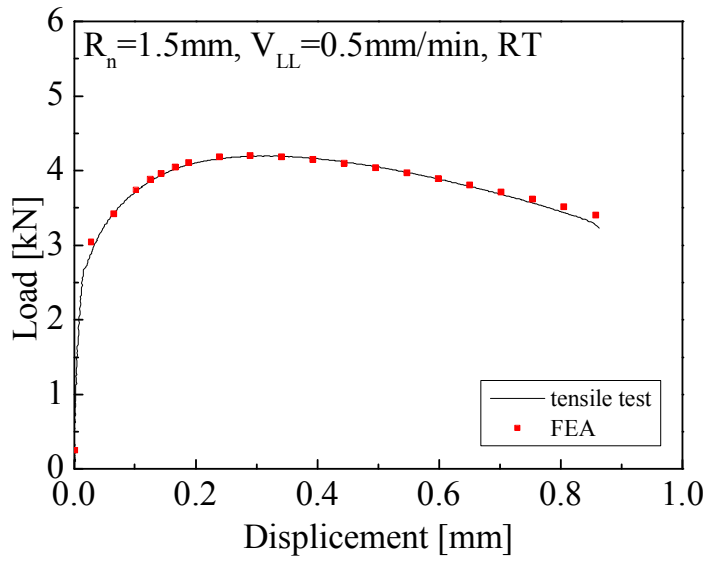


(a) 표준 인장시험

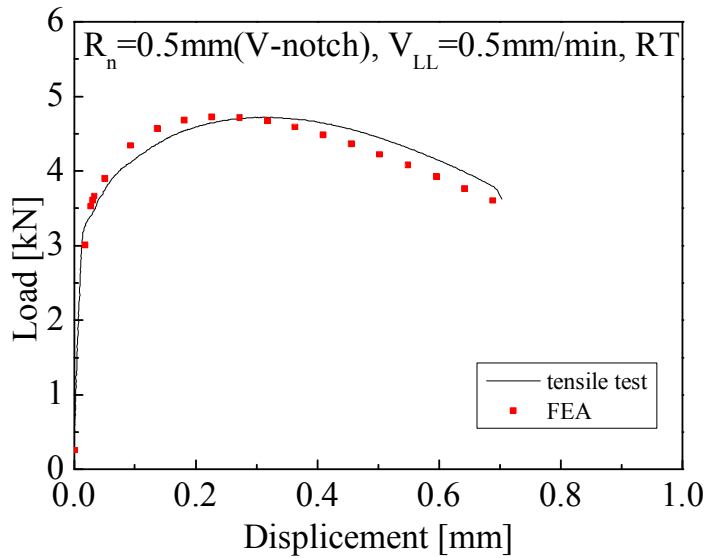


(b) 노치반경 9mm

그림 4.2.1 유한요소해석과 인장시험에서 주어진 하중-변위 곡선 비교

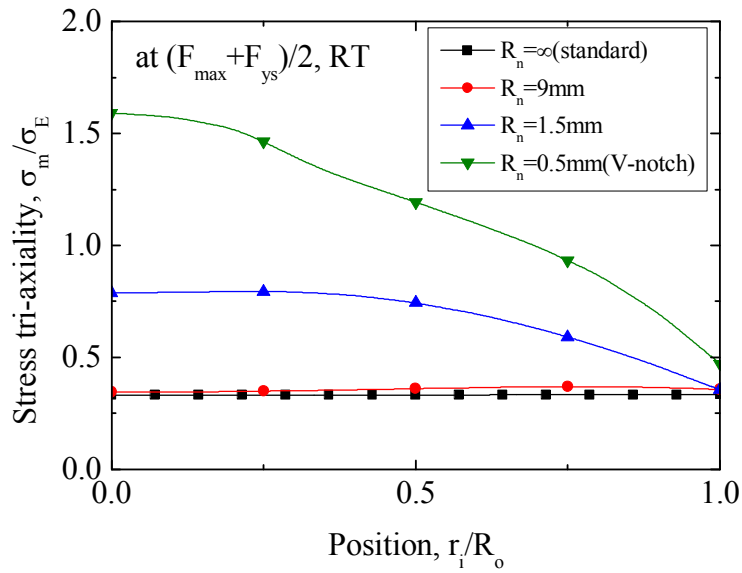


(c) 노치반경 1.5mm

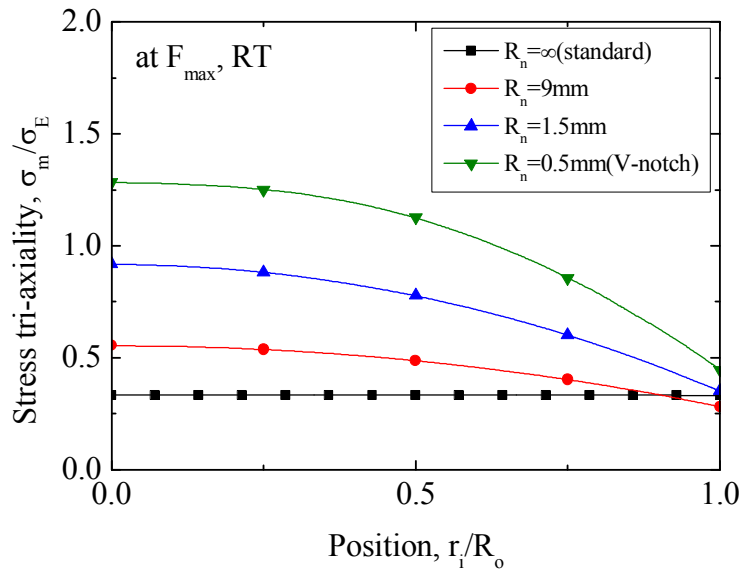


(d) 노치반경 0.5mm (V-노치)

그림 4.2.1 유한요소해석과 인장시험에서 주어진 하중-변위 곡선 비교 (계속)

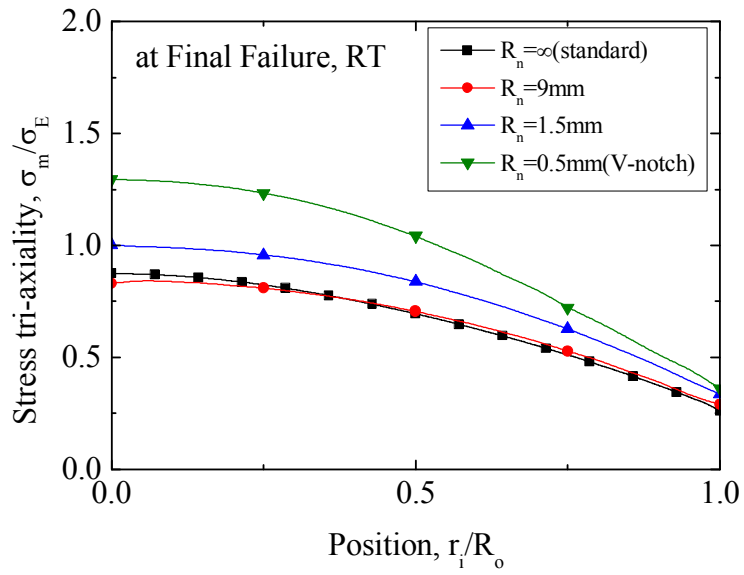


(a) at $(F_{max} + F_{ys})/2$



(b) at F_{max}

그림 4.3.1 노치반경 따른 3축 응력 분포



(c) 최종파단

그림 4.3.1 노치반경 따른 3축 응력 분포(계속)

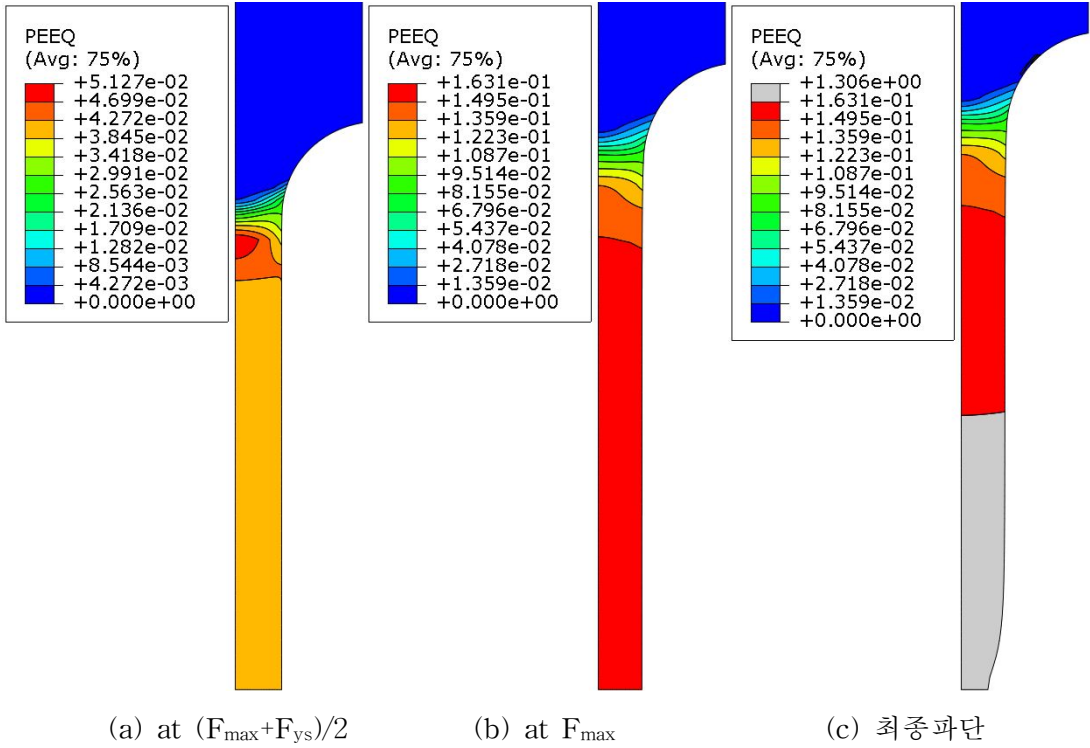


그림 4.3.2 표준 인장시편의 등가 소성변형률 분포

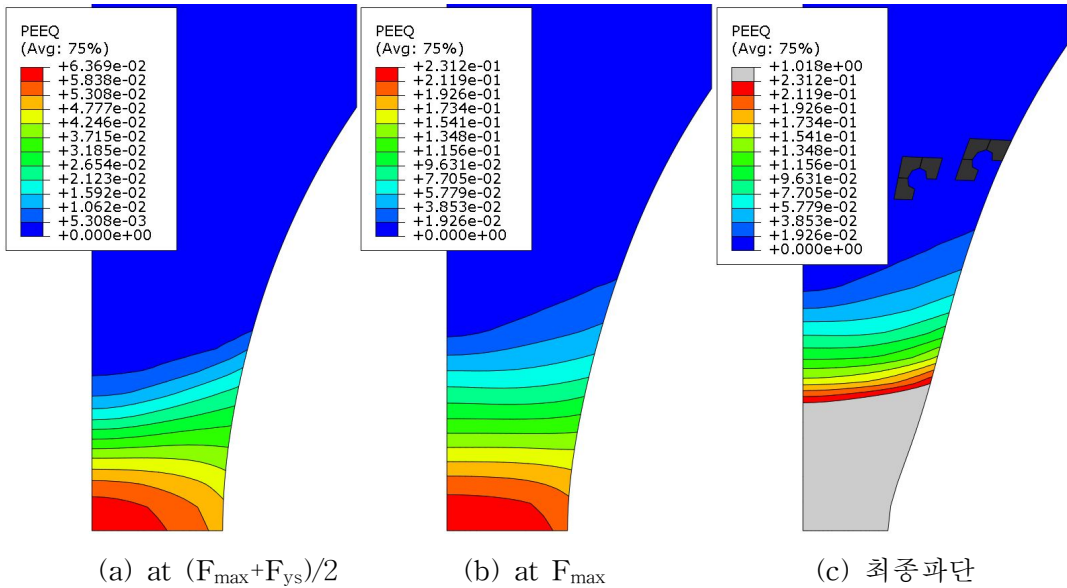
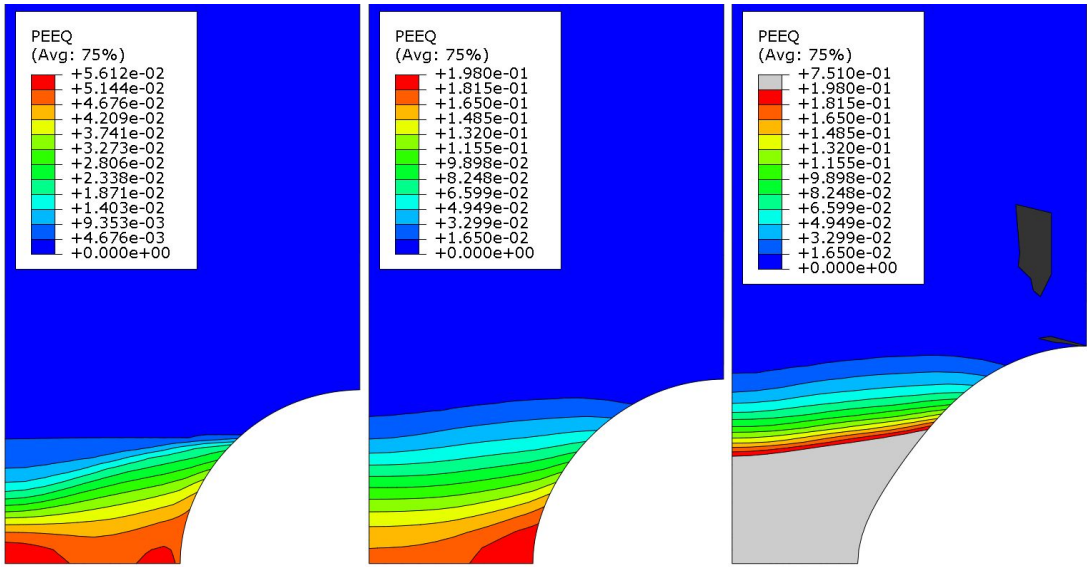
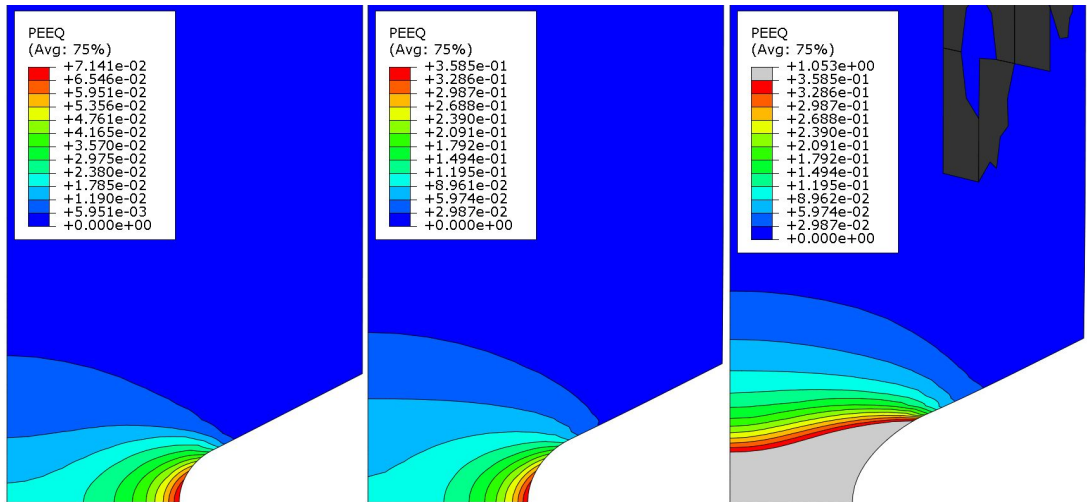


그림 4.3.3 노치반경이 9mm인 노치시편의 등가 소성변형률 분포



(a) at $(F_{\max} + F_{ys})/2$ (b) at F_{\max} (c) 최종과단

그림 4.3.4 노치반경이 1.5mm인 노치시편의 등가 소성변형률 분포



(a) at $(F_{\max} + F_{ys})/2$ (b) at F_{\max} (c) 최종과단

그림 4.3.5 노치반경이 0.5mm인 V-노치시편의 등가 소성변형률 분포

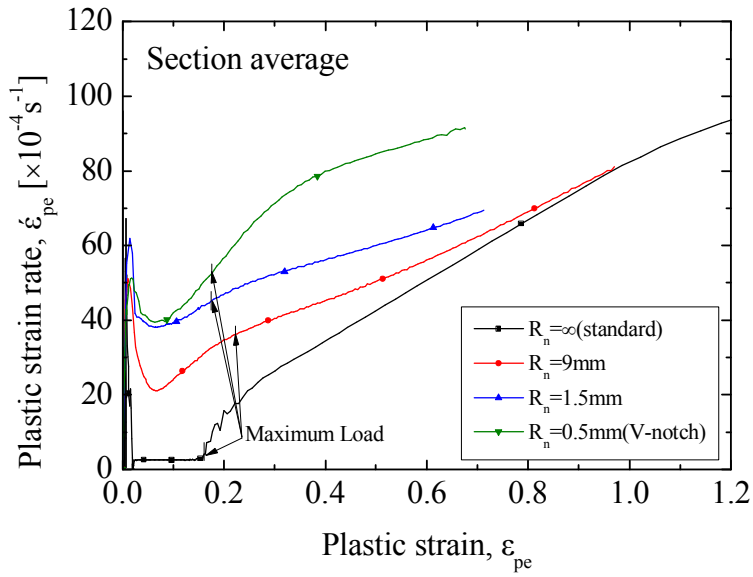


그림 4.3.6 변형에 따른 최소 단면부에서 평균된 등가 소성변형률 속도 변화

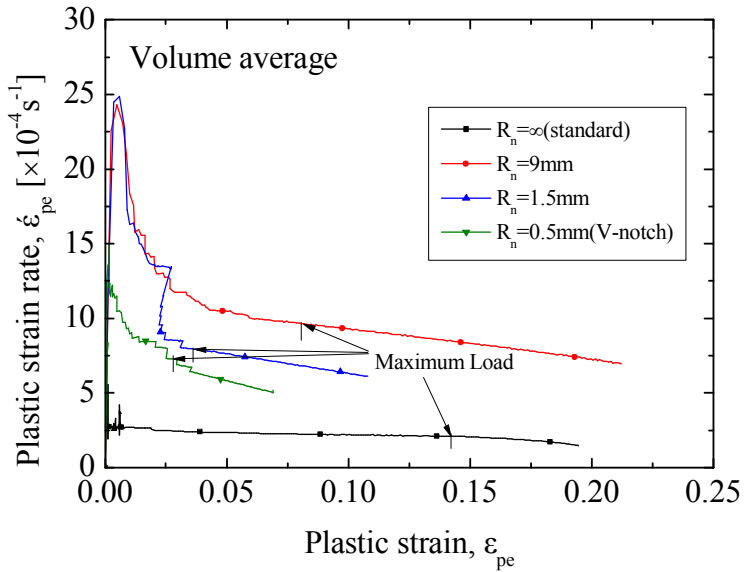


그림 4.3.7 시편의 소성변형 영역에서 평균된 등가 소성변형률 속도

제 5 장 결 론

본 연구에서는 페라이트강의 DSA 거동에 미치는 기하학적 불연속부의 영향을 파악하기 위해서, 원자력발전소에 사용되고 있는 대표적인 페라이트강인 ASTM A106 Gr.B 탄소강을 선정하여 표준 인장시편과 노치시편을 이용한 인장시험을 수행하였다. 인장시험 결과로부터 주어진 페라이트강에 대한 DSA 거동을 분석하고, 노치시편에 대한 시험결과로부터 DSA 거동에 미치는 기하학적 불연속부의 영향을 살펴보았다. 또한, 각 노치시편에 대한 유한요소해석을 수행하여 시편 형상에 따른 응력 및 변형률 상태의 차이를 정량적으로 비교함으로써 노치시편에서 관찰된 DSA 거동과 기하학적 형상에 따른 소성 변형률의 연관성을 파악하였다.

- 인장시험에 사용된 ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관재의 경우에 온도에 따른 serration 관찰, 인장강도 증가, 그리고 연성 감소 등으로 판단할 때, 준정적 하중속도에서는 DSA 현상이 125~230°C 범위에서 발생하고 177~200°C 부근에서 가장 활발하였다. DSA 현상은 변위속도가 증가함에 따라 고온에서 관찰되었으며, 변위속도가 10배 증가됨에 따라 약 25~50°C 정도 고온으로 상승하며, 변위속도가 100배 증가되면 약 50~90°C 정도 상승하였다.

- 노치반경이 9mm, 1.5mm, 그리고 0.5mm (V-노치)인 노치시편을 이용한 인장시험 결과, 표준 인장시편에서 관찰된 DSA의 증거들이 모두 관찰되었다. 노치시편에서는 노치반경에 관계없이 거의 유사한 온도 영역에서 DSA 현상이 나타나는 것으로 평가되었으며, 표준 인장시편과 비교하면 노치시편에서 DSA 현상은 0.5mm/min에서는 약 25°C, 50mm/min에서 50°C 정도 높은 온도에서 나타났다.

- 노치반경이 1.5mm 이하인 경우 serration이 최대하중 이후에도 나타나는 것은 최대하중 이후에도 소성변형이 새로운 영역으로 전파되는 것이 기인하는 것으로 파악되었다.

- 유한요소 시뮬레이션을 통해 노치반경에 따라 응력상태(3축응력도)의 큰 차이가 확인되었으나 DSA거동에서는 노치반경에 따른 차이가 관찰되지 않았다. 따라서, 응력상태는 기하학적 불연속부의 DSA거동에 영향인자가 아닌 것으로 판단된다.

- 유한요소 시뮬레이션을 통해 노치시편의 노치부에서 변형률과 변형률 속도를 평가한 결과, 노치시편의 DSA 거동은 노치 주위의 소성변형 영역에서 체적 평균된 등가 소성변형률 속도에 의해 지배되는 것을 확인하였다.

- 노치시편에서 노치부의 소성변형 영역에서 체적 평균된 등가 소성변형률 속도가 표준 인장시편에 비해 증가하고, 노치반경에 따른 차이는 크지 않은 것은 인장시험 결과에서 관찰된 노치반경에 따른 DSA 거동의 변화와 잘 일치한다. 따라서, DSA 거동에 미치는 기하학적 불연속부의 영향은 기하학적 불연속부의 응력 및 변형률 집중에 의해 변형률 속도가 증가하는 것이 기인하는 것으로 파악되었다.

참고문헌

- [1] Baird, J.D, "The effects of strain aging due to interstitial solutes on the mechanical properties of metals," Metall.Reviews, Vol.16, p.1(1971)
- [2] W. Marschall, R. Mohan, P. Krishnaswamy, G.M. Wilkowski, "Effect of dynamic strain aging on the strength and toughness of nuclear ferritic piping at LWR temperatures," NUREG/CR-6226, BMI-2176(1994)
- [3] Jin Weon Kim, In Sup Kim, "Investigation of dynamic strain aging in SA106 Gr.C piping steel," Nuclear Engineering and Design, 172, p.49(1997)
- [4] Jin-Weon Kim, In-Sup Kim, "Effect of dynamic strain aging on the leak-before-break analysis in SA106 Gr.C piping steel," Nuclear Engineering and Design, 174, p.59(1997)
- [5] R.R.U.Queiroz, F.G.G.Cunha, B.M.Gonzalez, "Study of dynamic strain aging in dual phase steel," Materials Science and Engineering A, (2011)
- [6] D.Wagner, J.C.Moreno, C.Prioul, J.M.Frund, B.Houssin, "Influence of dynamic strain aging on the ductile tearing of C-Mn steels: modelling by a local approach method," Journal of Nuclear Materials, 300, p.178(2002)
- [7] K.L.Murty, I.Charit, "Static strain aging and dislocation-impurity interactions in irradiated mild steel," Journal of Nuclear Materials, 382, p.217(2008)
- [8] S.Graff, S.Forest, J.-L.Strudel, C.Prioul, P.Pilvin, J.-L.Bechade, "Finite element simulations of dynamic strain ageing effects at V-notches and crack tips," Scripta Materialia, 52, p.1181(2005)
- [9] S.Graff, S.Forest, J.-L.Strudel, C.Prioul, P.Pilvin, J.-L.Bechade, "Strain localization phenomena associated with static and dynamic strain ageing in notched specimens: experiments and finite element simulations," Materials Science and Engineering A, 387-389, p.181(2004)
- [10] J.Belotteau, C.Berdin, S.Forest, A.Parrot, C.Prioul, "Mechanical behavior and crack tip plasticity of a strain aging sensitive steel," Materials Science and Engineering A, 526, p.156(2009)
- [11] ASTM E-8/8M, "Standard Test Methods For Tension Testing of Metallic Materials", 2009

- [12] T.L.Anderson, "Fracture Mechanics", 3rd edition, Taylor & Francis, 2005
- [13] S.ZHANG, P.G.MCCORMICK, Y.ESTRIN, "The morphology of portevin-le chatelier bands: finite element simulation for Al-Mg-Si," Acta mater, 49, p.1087(2001)
- [14] S M Humayun Kabir, Sangho Kim, taerin Yeo, "An investigation on existence of dynamic strain ageing in a ferritic stainless steel," University of Ulsan, (2011)
- [15] J.H.Yoon, B.S.Lee, Y.J.Oh, J.H.Hong, "Effects of loading rate and temperature on J-R fracture resistance of an SA516-Gr.70 steel for nuclear piping," International Journal of Pressure Vessels and Piping, 76, p.663(1999)
- [16] C.S. Seok, K.L. Murty, "Effect of dynamic strain aging on mechanical and fracture properties of A516Gr70 steel," International Journal of Pressure Vessels and Piping, 76, p.945(1999)
- [17] I.S. Kim, S.S. Kang, "Dynamic strain aging in SA508-class 3 pressure vessel steel," International Journal of Pressure Vessels and Piping, 62, p.123(1995)
- [18] K.C. Kim, J.T. Kim, J.I. Suk, U.H. Sung, H.K. Kwon, "Influences of the dynamic strain aging on the J-R fracture characteristics of the ferritic steels for reactor coolant piping system," Nuclear Engineering and Design, 228, p.151(2004)
- [19] B.S. Lee, Y.J. Oh, J.H. Yoon, I.H. Kuk, J.H. Hong, "J-R fracture properties of SA508-1a ferritic steels and SA312-TP347 austenitic steels for pressurized water reactor's(PWR) primary coolant piping," Nuclear Engineering and Design, 199, p.113(2000)
- [20] X.Q. Wu, I.S. Kim, "Effects of strain rate and temperature on tensile behavior of hydrogen-charged SA508 Cl.3 pressure vessel steel," Nuclear Engineering and Design, A348, p.309(2003)
- [21] X.Q. Wu, Y. Katada, "Influence of cyclic strain rate on environmentally assisted cracking behavior of pressure vessel steel in high-temperature water," Nuclear Engineering and Design, A379, p.58(2004)
- [22] S.G. Lee, I.S. Kim, "Effect of pre-charged hydrogen on fatigue crack growth of low alloy steel at 288°C," Nuclear Engineering and Design, A420, p.279(2006)
- [23] Seong-Gu Hong, Soon-Bok Lee, "Mechanism of dynamic strain aging and

characterization of its effect on the low-cycle fatigue behavior in type 316L stainless steel," Journal of Nuclear Materials, 340, p.307(2005)

[24] S.V.Kamat, M.Srinivas, P.Rama Rao, "Effect of temperature on the mode I and mixed mode I/III fracture toughness of SA333 steel," Materials Science and Engineering A, 528, p.4141(2011)

[25] ABAQUS/Standard User's manual, v6.10, 2010

감사의 글

좋지 않은 저의 기억력으로 제가 감사드려야 할 모든 분들의 이름을 언급하기 어려울 것 같습니다. 그래서 저의 감사하는 마음을 다 표현 할 수 있을지 모르겠지만 짧은 한마디로 감사의 글을 마치려 합니다.

지금까지 격려와 조언을 아끼지 않았던 모든 분들께 감사합니다.

부족하기만한 아들이고, 제자이고, 후배이고, 선배인
이사용 배상