

공 학 석 사 학 위 논 문

다물체 동역학 해석 기법을 이용한
가스회로차단기의 성능개선에 관한
연구



2013 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

메카트로닉스공학과

최 규 석

공 학 석 사 학 위 논 문

다물체 동역학 해석 기법을 이용한
가스회로차단기의 성능개선에 관한
연구

지도교수 손 정 현

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2013 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

메카트로닉스공학과

최 규 석

최규석의 공학석사 학위논문을 인준함

2013년 6월

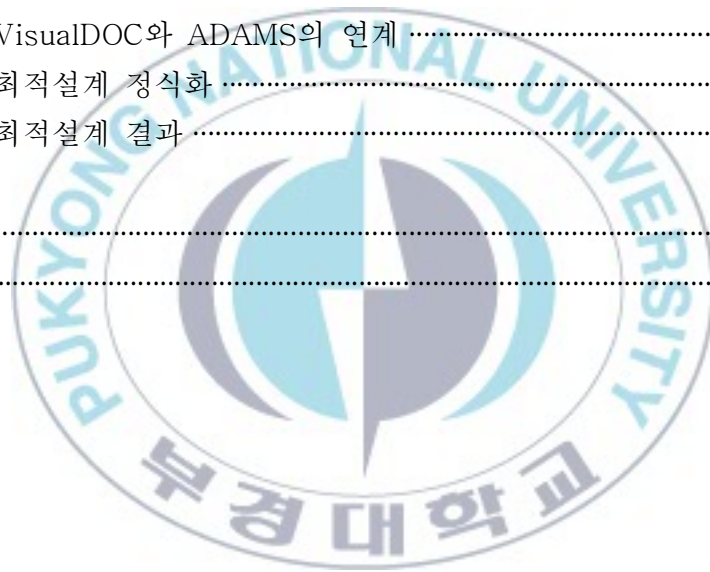


주	심	공학박사	백 윤 경	(인)
위	원	공학박사	정 영 석	(인)
위	원	공학박사	손 정 현	(인)

목 차

Abstract	vi
1. 서 론	1
1.1. 연구 배경	1
1.2. 연구 동향	3
1.3. 연구목적 및 내용	4
2. 가스회로차단기의 동역학 모델링	5
2.1. 가스회로차단기의 구성	5
2.2. 강체모델링	6
2.2.1. 주요 링크요소	6
2.2.2. Joint 및 스프링	9
2.2.3. 연결 메커니즘	11
2.3. 거동분석	13
2.3.1. Opening 거동분석	13
2.3.2. Closing 거동분석	18
3. 가스회로차단기의 구동시험	20
3.1. 구동 시험조건	20
3.2. 구동 시험결과	27
4. 시험과 시뮬레이션의 비교검증	31
4.1. 시뮬레이션 결과	31
4.2. 시험과의 Opening 거동시점 비교	34

5. 가스회로 차단기의 최적설계	35
5.1. 민감도 해석	35
5.1.1. Output lever angle 민감도	35
5.1.2. Latch 무게 변경 민감도	39
5.1.3. Spring 길이 변경 민감도	41
5.1.4. Latch parameter 민감도	45
5.1.5. 민감도 결과와 시험결과 비교	49
5.2. Latch parameter의 최적설계	50
5.2.1. VisualDOC의 유전 알고리즘	50
5.2.2. VisualDOC와 ADAMS의 연계	53
5.2.3. 최적설계 정식화	56
5.2.4. 최적설계 결과	59
6. 결론	63
참고문헌	64



List of table and figure

표. 1	CAD File	5
표. 2	링크의 강체요소	7
표. 3	Joint 요소	9
표. 4	스프링 요소	10
표. 5	Contact 요소	10
표. 6	회로차단기의 자유도	12
표. 7	고속카메라의 제원	20
표. 8	시험장비 및 개수	21
표. 9	시험을 통한 각 Latch의 거동시점	30
표. 10	각 Latch의 거동시점(시뮬레이션)	33
표. 11	시뮬레이션과 시험비교	34
표. 12	무게변경에 따른 민감도	39
표. 13	3rd latch spring 길이 변경에 따른 민감도	41
표. 14	2nd latch spring 길이 변경에 따른 민감도	43
표. 15	민감도 해석과 시험결과 비교	49
표. 16	최적설계의 설계변수 Boundary	57
표. 17	VisualDOC의 종료조건	59
표. 18	교배율에 따른 단축시간	60
표. 19	설계변수의 최적설계 값	61
그림. 1	115kV 유입회로차단기	1
그림. 2	가스회로차단기	2
그림. 3	145kV GCB의 메커니즘 모델과 Latch 형상	5
그림. 4	145kV GCB의 주요 부품	6
그림. 5	145kV GCB의 주요 스프링요소	10
그림. 6	145kV GCB의 기구학적 연결도	11
그림. 7	각 부품에 대한 자유도	12
그림. 8	Closing 상태인 회로차단기	13
그림. 9	각 Latch의 Contact force 방향	14

그림. 10	Solenoid force 데이터	14
그림. 11	Solenoid와 3rd latch의 거동방향	15
그림. 12	각 Latch의 운동방향	15
그림. 13	Open lever의 운동방향	16
그림. 14	Friction force 방향	17
그림. 15	Link의 Friction force①	17
그림. 16	Opening 상태인 회로차단기	18
그림. 17	Cam과 Open lever roller	19
그림. 18	Latch spring과 Stopper	19
그림. 19	High speed camera	20
그림. 20	High speed camera setting	22
그림. 21	Motion Studio와 TEMA 프로그램	23
그림. 22	고속카메라 촬영위치	24
그림. 23	고속카메라 촬영영상	26
그림. 24	Solenoid 변위 그래프	27
그림. 25	2nd latch의 거동시점	28
그림. 26	1st latch의 거동시점	28
그림. 27	Open lever의 거동시점	29
그림. 28	Open lever의 각도변화	29
그림. 29	2nd latch의 거동시점(시뮬레이션)	31
그림. 30	1st latch의 거동시점(시뮬레이션)	32
그림. 31	Open lever의 거동시점(시뮬레이션)	32
그림. 32	각 Latch의 거동시점(시뮬레이션)	33
그림. 33	실제 제품과 모델링 비교	34
그림. 34	Open lever의 각도 변경	36
그림. 35	Open lever에 걸리는 Force	36
그림. 36	Open lever의 각도변경에 따른 차단시간	37
그림. 37	Open lever 모델링	37
그림. 38	Slider-crank Mechanism 시뮬레이션	38
그림. 39	2nd latch의 거동에 작용하는 Force	40
그림. 40	3rd latch spring의 민감도	42
그림. 41	3rd latch spring의 Force 방향	42
그림. 42	2nd latch spring의 민감도	44
그림. 43	2nd latch spring의 force 방향	44

그림. 44	3rd latch와 2nd latch roller의 Curve모델링	45
그림. 45	기존 모델링과 변경된 모델링 비교	46
그림. 46	Latch parameter의 변수	47
그림. 47	Angle에 따른 민감도	48
그림. 48	Displacement에 따른 민감도	48
그림. 49	유전자 알고리즘의 Flow chart	51
그림. 50	VisualScript를 통한 설계변수와 목적함수 값 선정	54
그림. 51	ADAMS와 VisualDOC의 Flow chart	55
그림. 52	최적설계의 목적함수 정의	56
그림. 53	최적설계의 설계변수 정의	57
그림. 54	최적설계의 조건함수	58
그림. 55	교배율에 따른 목적함수 변화과정	60
그림. 56	최적설계를 통한 변경된 위치	61
그림. 57	변경된 3rd latch	62
그림. 58	변경된 2nd latch	62



Study on the performance improvement of gas circuit breaker using multibody dynamics analysis

Gyu-Seok Choi

*Department of Mechanical Engineering,
The Graduate School,
Pukyong National University*



Abstract

In this study, the operating performance, spring characteristics, and material properties of a gas-insulated circuit breaker were optimized using multibody dynamics. The circuit breaker consisted of several latches and a cam. The dynamics behavior of the latches was affected by the spring characteristics, as well as by the materials and length of each latch. Our results indicated that the motion of the latches was a key factor in determining the opening time of the circuit breaker. A multibody model for the circuit breaker was developed and verified by comparing simulated results with experimental data. The opening time for the breaker was reduced by 1.7ms in the simulations.

1. 서 론

1.1. 연구 배경

차단기란 평상시에도 전류를 통하고, 회로에 이상이 발생했을 때에 순간적으로 동작하여, 전로나 주요기기를 보호하는 일을 한다. 이상시 사고전류를 그대로 흐르게 하며, 전류의 허용전류를 훨씬 초과하기 때문에 전로에 존재하는 변압기 권선, 단로기 등이 타고 녹고 파열되는 사고로 이어지는데 이것을 방지하기 위한 장치이다⁽¹⁾.

회로차단기는 크게 용량, 구동동력원과 전류 차단시에 발생하는 아크(Arc)의 소호(Arc extinguishing)방법에 따라 분류할 수 있다. 먼저 용량에 따라 100kV 이상 1000kV 이하는 고압 회로차단기, 1000kV 이상은 초고압 회로차단기로 분류되며, 구동동력원에 따라 유압, 공압 및 스프링력 회로차단기로 분류된다. 마지막으로 아크 소호방법에 따라 유입차단기(Oil circuit breaker, OCB), 자기차단기(Magnet blast circuit breaker, MCB), 진공차단기(Vacuum circuit breaker, VCB) 및 가스차단기(Gas circuit breaker, GCB) 등이 있다.



그림. 2 115kV 유입회로차단기

가스회로차단기는 공기 대신에 절연능력과 소호력이 우수한 SF6가스를 아크에 불어 넣어 소호하는 방식으로 주로 고전압(3.6KV~550KV) 차단장치에 사용된다. 소전류 차단시에 발생하는 이상전압이 작고, 차단점수가 적어서 고전압 대용량의 것을 제작할 수 있는 특징이 있다.



그림. 1 가스회로차단기

이러한 가스회로차단기는 모델은 정격 및 용량에 따라 다양한 사양의 제품이 제작되고 있으며, 기술 개발을 통해 동일 용량에서 그 사이즈를 축소하고, 원가 절감을 위해 부품의 수를 줄이는 추세에 있다. 이에 대한 생산기술 측면은 상당부분 경쟁력이 확보되어 있으나, 기구 동작부에 대한 메커니즘 기술력이 떨어지는 실정이다. 국제 경쟁력을 갖추기 위해서는 고유의 메커니즘을 개발할 필요성이 절실하다⁽²⁾.

고유메커니즘을 개발을 위해서는 먼저 Spring 에너지를 이용한 링크(Link) 전달 메커니즘의 원리를 분석하여 최적의 성능이 나오도록 부품의 최적 설계의 능력이 우선되어야 한다. 또한 다물체 동역학 모델링 및 해석을 통해 실험을 통해 실험시 찾기 어려운 여러 가지 작동상의 문제점을 개발 단계에서 찾아내는 노력도 필요하다. 이러한 필요성으로 차단기에 대한 동역학적 모델링 방법을 개발하고 실험과의 Correlation을 통해 해석의 정확도를 높이게 되면 앞으로 개발할 제품에 대한 동역학 해석의 신뢰를 높여 설계에 필요한 많은 기술을 확보할 수 있을 것이다.

1.2. 연구 동향

최근 스프링 Type GCB는 정격과 용량에 따라 다양한 사양의 제품이 제작되고 있으며, 기술 개발을 통해 동일 용량에서 그 사이즈를 축소하고, 원가 절감을 위해 부품의 수를 줄이는 추세에 있다.

회로차단기의 구동 메커니즘부의 성능을 향상시키기 위해서 연구가 활발히 이루어지고 있으며, N. Tsujiuchi⁽³⁾는 진공차단기의 동적 특성에 대한 최적화에 대한 연구를 수행하였으며, 안길영 등^{(4)~(5)}은 스프링구동 링크와 캠 기구를 가진 진공회로 차단기의 동적 거동 및 설계에 관한 연구를 수행하였고, A.P. Pisano 등⁽⁶⁾은 실험을 통해 고속 Cam-follower 시스템의 동적 응답에 대한 실험적인 평가에 대해 연구하였으며, 장진석 등⁽⁷⁾은 캠 윤곽 최적설계를 통하여 동적 특성을 향상시키기 위한 연구를 하였다.

국내에서는 이에 대한 생산기술 측면은 상당부분 경쟁력이 확보되어 있으나, GCB의 동작을 제어하는 메커니즘(Mechanism)이 해외의 선진업체에 비하여 떨어지는 실정이다. 국내 기업들은 메커니즘부의 성능을 개선하기 위해서 국내대학들과 산학협력을 통하여 조작기 부분에 대해서 연구를 지속적으로 하고 있으며, 연구결과를 적용하고 있다. 해외 선진 업체에서는 GCB의 차단부 내의 유동해석을 위해 Fluent, PHOENICS, CFX, Star-CD 등 기존의 상용 CFD 코드 적용하고, 동작부의 동작해석을 위해 ADAMS, RecurDyn 등의 상용 S/W를 적용하여 제품개발에 활용하고 있다.

현재 선진업체에서는 스프링 Type GCB 메커니즘을 동일한 용량에서 사이즈를 줄이고 원가를 절감한 제품을 개발하여 시장 경쟁력을 높이고 있다.

1.3. 연구목적 및 내용

본 연구에서는 새로운 GCB 메커니즘을 개발하기 위해 개발할 시스템에 대한 동역학적 모델링 방법을 개발하고 시험과의 매칭을 통해 신뢰성을 확보를 통해 해석의 정확도를 향상시켜 제품에 대한 개발 비용을 줄이며 Latch 길이 및 스프링 강성의 최적화를 통해 차단시간을 개선함으로써 동작 특성이 우수하고 성능이 보장 될 수 있는 설계 기준을 확보하고자 한다.

- 조작기의 Latch Mechanism 동역학 모델링
- 거동 분석을 위한 실험방법 개발
- Latch 길이 및 스프링 강성에 따른 영향도 분석
- Latch Mechanism 최적 설계 수행을 위한 Parametric 모델링 및 최적화기법 연구
- 차단시간 단축을 위한 최적화 해석 수행

2. 가스회로차단기의 동역학 모델링

2.1. 가스회로차단기의 구성

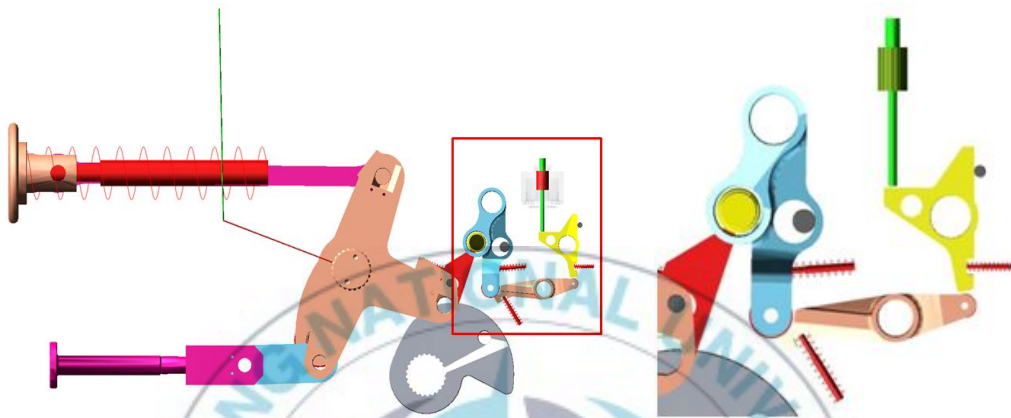


그림. 3 145kV GCB의 메커니즘 모델과 Latch 형상

표. 1 CAD File

모델	정보
GCB CAD File	총 20개의 Part 로 구성
해석 적용 모델 File	총 21개의 Part 로 구성

그림. 3, 표 1 과 같이 가스회로차단기가 모델링 되었으며, Fixed Joint로 Part의 개수를 줄였으며, 불필요한 Frame은 Ground로 지정함으로써 단순화하여 모델링 하였다. 정확한 모델링을 하기 위해서 3개의 Part를 추가적으로 모델링하여 슬라이더-크랭크기구(Slider-crank Mechanism)를 추가하였다. 차단(Opening)과 투입(Closing)과정을 한 모델링에서 하기 위해 Cam을 추가로 모델링하였다.

2.2. 강체모델링

2.2.1. 주요 링크요소

그림. 4 와 그림. 5 에 가스회로차단기의 구조, 주요 링크 및 Spring 요소와 그 명칭을 표시하였다. Spring은 모두 6개가 사용되었지만 Solenoid에 연결된 스프링은 Latch의 거동에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 표시하지 않았으며, 주요 Latch 요소 및 설명은 표 2 에 나타내었다.

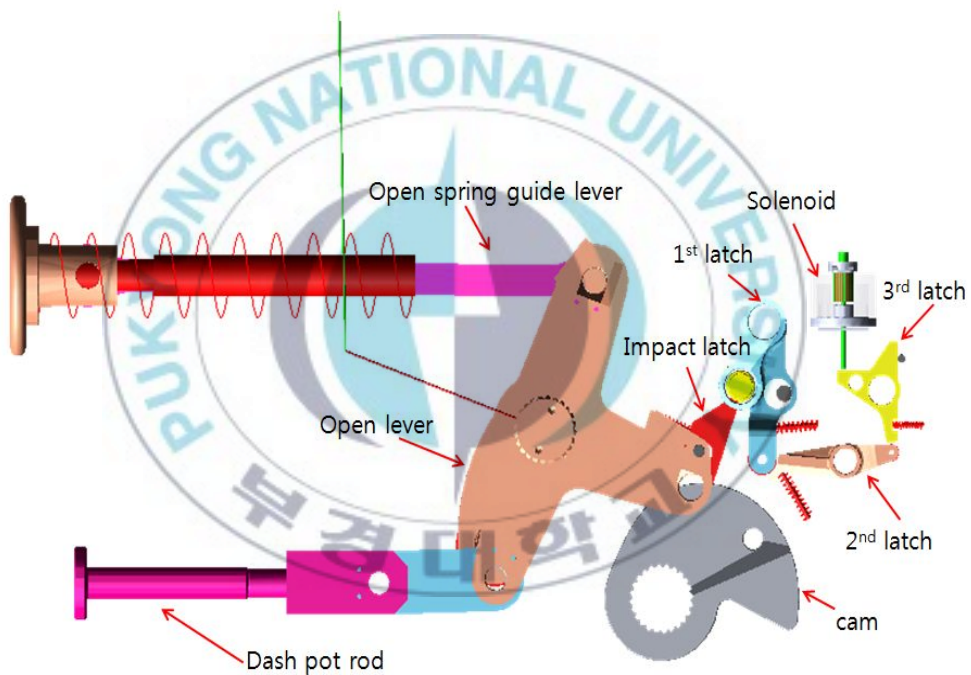
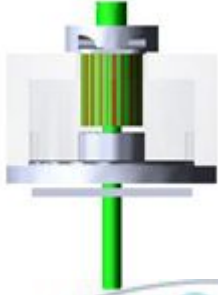
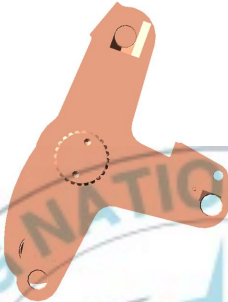


그림. 4 145kV GCB의 주요 부품

표. 2 링크의 강체요소

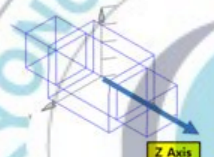
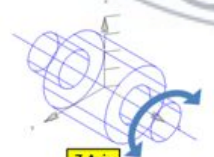
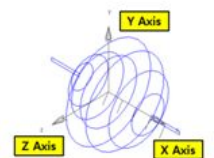
이름	형상	설명
Solenoid		차단(opening) 동작시 3rd latch를 눌러 줌으로 동작이 시작하도록 만듦.
3rd latch		솔레노이드와 접촉이 이루어진 후 회전운동이 발생하면 2nd latch가 움직이게 함.
2nd latch		중간에 위치한 Latch로써 차단 (Opening)시 1st latch의 거동에 영향을 미침.
1st latch		Opening spring에 저장된 탄성에너지에 의해 회전하려고 하는 Oper lever의 거동을 막아주고 있으며, 2nd latch의 거동이 발생한 후 Impact latch의 Contact force에 의해 회전이 발생함.

Impact latch		투입(Closing)상태에서 Impact roller와 접촉을 하고 있으며, 차단 운동 시 1st latch를 밀어줌으로써 1st latch가 회전운동을 발생시킴.
Open lever		투입(Closing)동작과 차단(Opening)동작에서 4절 기구운동의 종동 및 구동축의 역할을 하는 중심축으로 고속차단기에서 중요한 역할을 함.
Open spring guide		Open spring을 가이드 함.
Dashpot rod		투입 및 차단 동작에서 Open lever의 회전을 속도를 감소시킴으로써 충격량을 감소시킴.
Cam		Open lever roller와 contact을 하면 투입동작이 이루어지도록 함.

2.2.2. Joint 및 스프링

ADAMS에 사용된 Joint 요소를 아래 표 3 에 나타내었으며 Spring 요소를 표 4에 , Contact 요소는 표 5 에 각각 나타내었다. 스프링은 차단과정 시 구동에 영향을 미치는 Opening 스프링 1개와 각 Latch에 연결되어져 Latch의 위치와 거동에 영향을 미치는 Latch 스프링 4개가 사용되었다.

표. 3 Joint 요소

Joint	그림	설명	주요 모델링 적용 부분
 Revolute		1 자유도 회전축이 z축	1st latch - Ground 2nd latch - Ground 3rd latch - Ground Open lever - Ground Cam - Ground
 Traslational		1 자유도 z축 병진 방향	Dashpot rod- Ground Open Guide hinge- Ground
 Fixed		0 자유도 고정 조인트	1st latch Stoper - Ground 2nd latch Stoper - Ground 3rd latch Stoper - Ground
 Cylindrical		2자유도 Z축 대한 병진 및 회전	Solenoid - Ground DP Hinge - Open lever Open spring Guide -Open lever
 Spherical		3자유도 3축 회전 병진운동 구속	DP Rod - DP Hinge Open spring guide - Open guide hinge

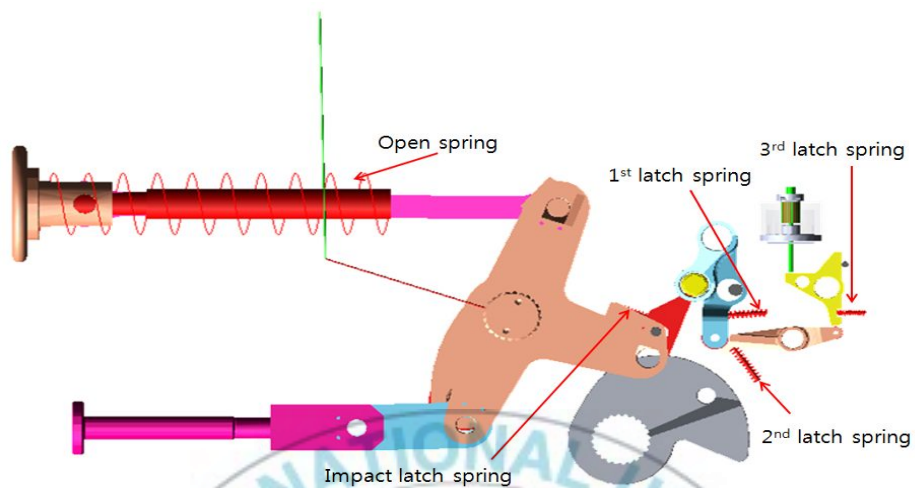
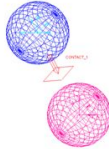


그림. 5 145kV GCB의 주요 스프링요소

표. 4 스프링 요소

스프링	그림	설명	주요 모델링 적용부분
		병진 스프링, 댐퍼	1st latch - Ground 2nd latch - Ground 3rd latch - Ground Impact latch - Open lever Opening spring guide - Open lever

표. 5 Contact 요소

Contact	그림	설명	주요 모델링 적용부분
		1차원 원과 곡선의 접촉	Solenoid - 3rd latch 3rd latch - 2nd latch roller 2nd latch - 1st latch roller Impact latch - impact roller Cam - Open lever roller

2.2.3. 연결 메커니즘

그림. 6은 기구학적 연결도를 나타내었다. 총 21개의 Body로 구성되어 있으며, 조인트는 Cylindrical joint 4개, Revolute joint 10개, Spherical joint 3개, Translational joint 3개, Fixed joint 4개를 사용하였다. 회전운동을 병진운동으로 바꾸어주는 Slider-crank Mechanism이 3개 포함되어있으며, 그림 6에 나타내었다. 표 6은 고속차단기의 자유도 계산식을 나타내었으며, 그림. 7는 고속차단기의 Body가 가지는 자유도(D.O.F)에 대해서 나타내었다. 총 자유도는 12이며 각 Latch는 Revolute joint에 의해서 회전운동을 하기 때문에 1 자유도를 가지며, 4개의 Latch의 자유도 합은 총 4자유도이다. 각 Latch와 contact이 되는 roller는 각 Latch와 Revolute joint로 연결되어져 있다. 총 3개의 roller가 있으며, 각각 1자유도를 가지며, Roller의 자유도 합은 3자유도이다. Solenoid는 수직방향에 대한 운동과 회전운동이 있기 때문에 2 자유도를 가지며 Slider-crank Mechanism는 1 자유도를 가지며 총 3개가 사용되었다.

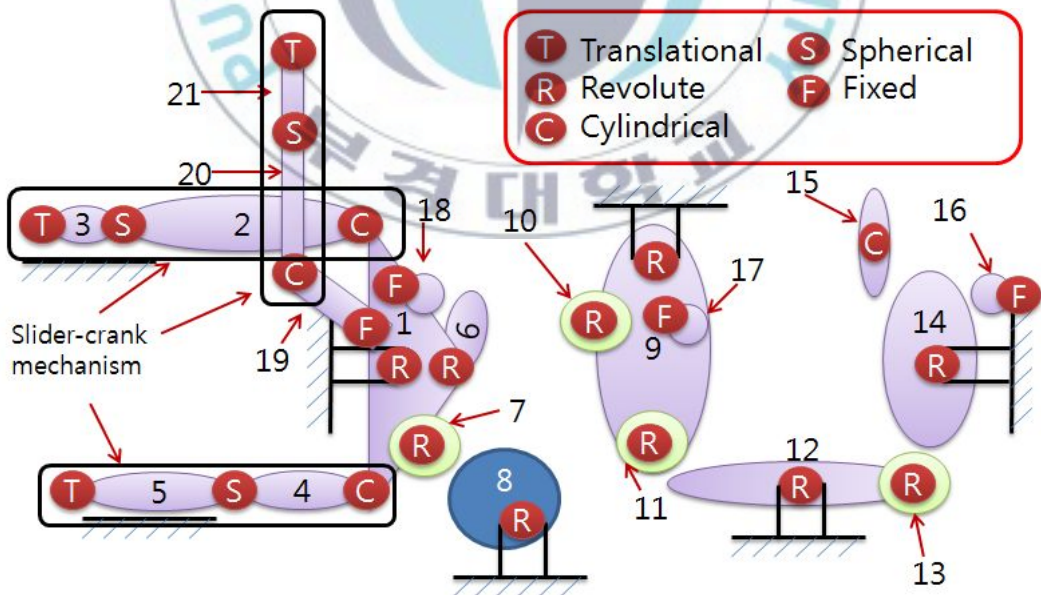


그림. 6 145kV GCB의 기구학적 연결도

표. 6 회로차단기의 자유도

요소	수	자유도	
Ground	1	-6	-6
Body	22	6	132
Revolute Joint	10	-5	-50
Cylindrical Joint	4	-4	-16
Spherical Joint	3	-3	-9
Translational Joint	3	-5	-15
Fixed Joint	4	-6	-24
총			12자유도

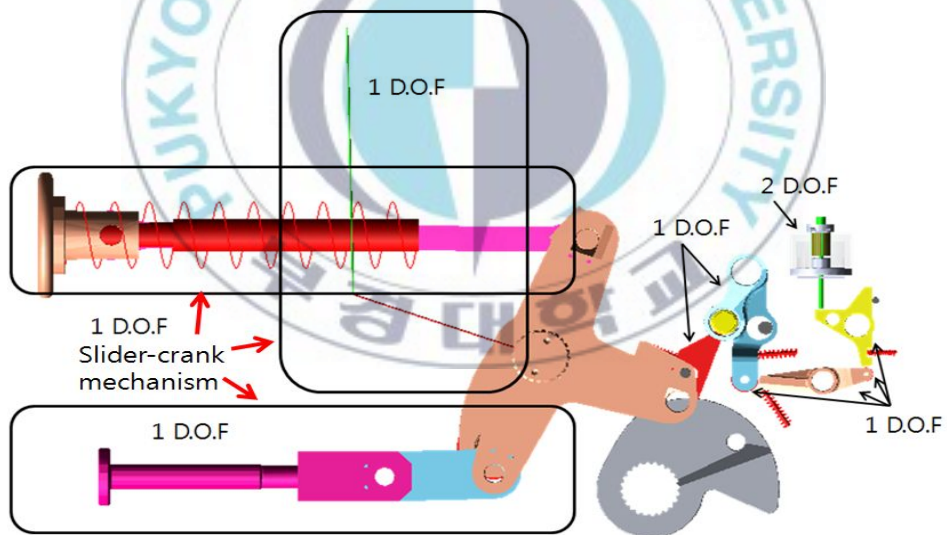


그림. 7 각 부품에 대한 자유도

2.3. 거동분석

2.3.1. Opening 거동분석

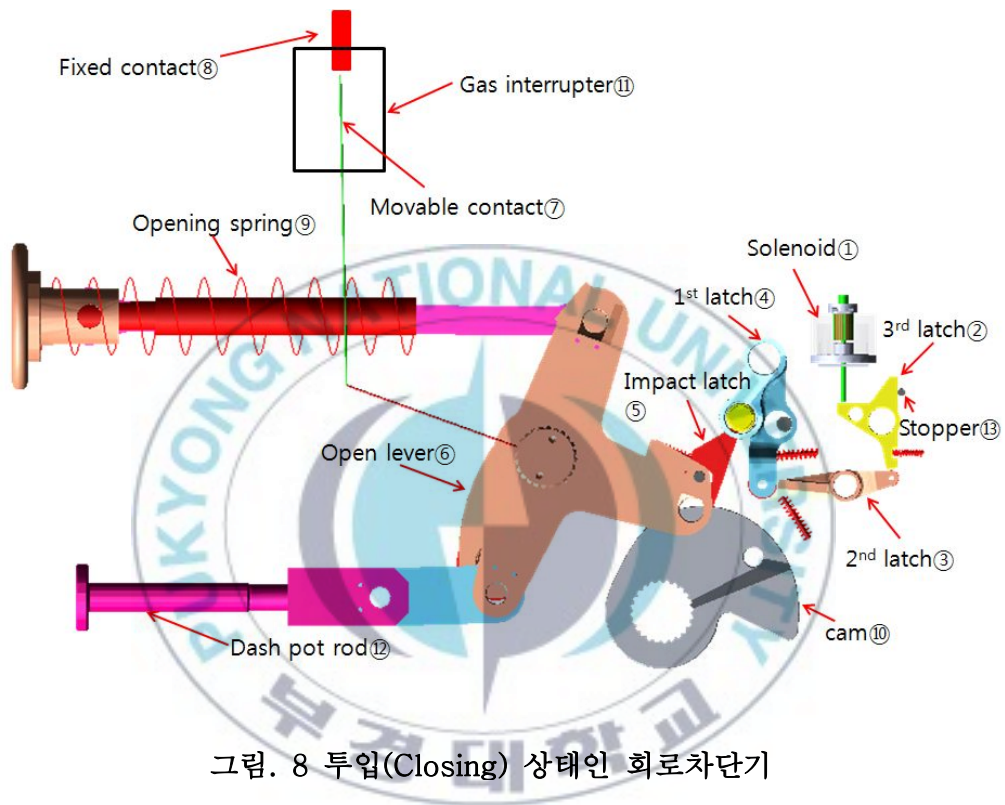


그림. 8은 Closing되어있는 상태를 나타냈고 있다. Closing상태를 유지하는 힘은 opening spring⑨에 저장된 탄성에너지이다. Impact latch → 1st latch → 2nd latch → 3rd latch 순으로 각 Latch는 서로를 밀어주고 있으며, stopper⑬에 의해서 3rd latch②의 위치가 고정되어 Closing상태를 유지하고 있다. 그림. 9는 각 Latch가 밀어주고 있는 Contact force 방향을 나타내고 있다. Contact force에 의해 Opening 운동시 Latch의 거동이 발생된다. Opening 거동은 Movable contact⑦와 Fixed contact⑧의 접촉이 떨어지면서 전기를 차단하는 운동을 나타낸다. 과전류, 단락 등에 의한 사고가 발생하

면 Solenoid①는 force에 의해 수직방향으로 병진운동을 하며, Solenoid force는 그림. 10에 나타내었다. Solenoid①거동은 전체 Opening 운동을 시작하게 만들기 때문에 각 Latch의 거동에 많은 영향을 미친다. 정확한 모델링이 필수적이다. Solenoid force는 AMESim Simulation을 통하여 얻은 데이터를 입력하였으며, 최대 430N로 힘이 작용한다는 것을 알 수 있다.

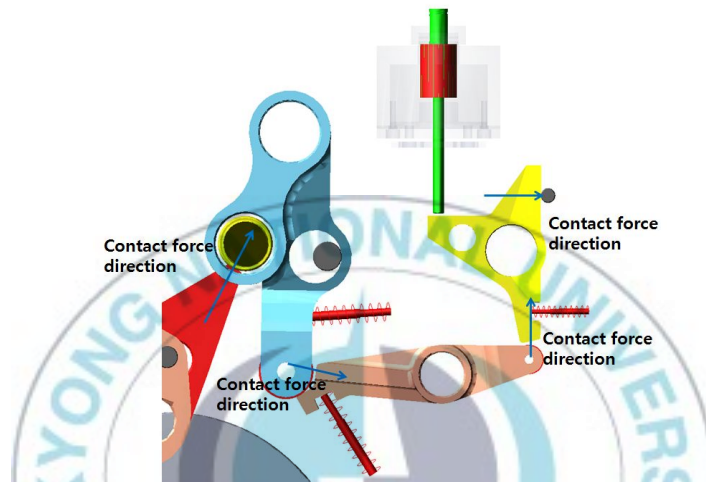


그림. 9 각 Latch의 contact force 방향

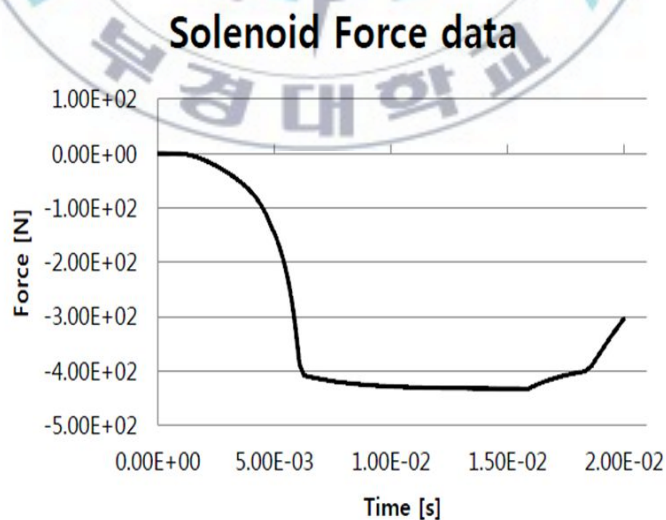


그림. 10 Solenoid force 데이터

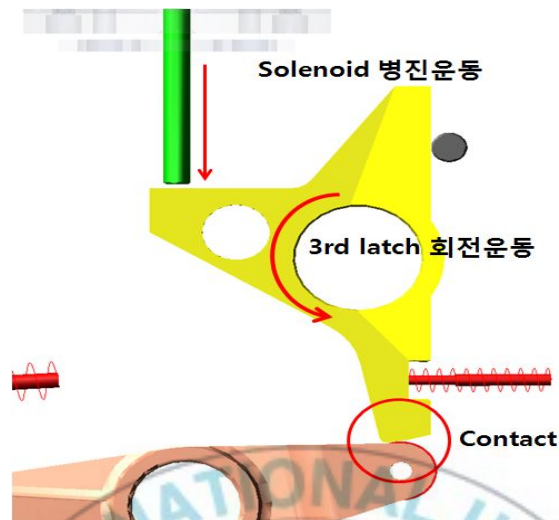


그림. 11 Solenoid 와 3rd latch의 거동방향



그림. 12 각 Latch의 운동방향

Solenoid①가 병진운동을 하면서 3rd latch②와 Contact이 발생한다. 그때 발생한 Contact force는 3rd latch②를 반시계 방향으로 회전을 발생시킴으로써 Opening 운동이 시작된다. 그림. 11은 Solenoid①와 3rd latch②의 거동방향에 대해 나타내었다. 2nd latch③는 2nd latch③의 회전을 방해하는

3rd latch②와 Contact이 떨어지고 나면 1st latch④의 Contact force에 의해 반 시계방향으로 회전이 이루어진다. 그림. 12는 각 Latch의 운동방향에 대해서 나타내었다. Impact latch⑤는 Opening spring⑨의 압축력에 의해 1st latch④를 밀어주고 있으며, 1st latch④는 2nd latch③와 Contact이 떨어지고 나면 Impact latch⑤의 밀어주는 힘에 의해 회전이 발생하게 된다. Open lever⑥는 Opening spring⑨에 저장되어있는 탄성에너지에 의해 회전이 이루어진다. Open lever⑥의 회전운동은 Slider-crank Mechanism에 의해 병진운동으로 변하게 되며, 그림. 13에 나타내었다.

그림. 14는 병진운동을 하는 Dash-pot⑫과 Movable contact⑦에 모델링된 Friction force에 대해서 나타내었다. Friction force는 Open lever⑥의 회전속도를 감소시킴으로써 Open lever⑥와 Frame의 충격이 발생할 때 충격량을 감소시키는 영향을 한다. Friction을 Single force를 이용하여 모델링 하였으며, Movable contact의 Friction force①은 그림. 15와 같이 최대정지마찰력이 약 1,000N와 운동마찰력 약 700N로 하여 모델링에 적용하였다. 그리고 Dash-pot의 Friction force②는 마찰력 약 350N로 하여 모델링 하였다.

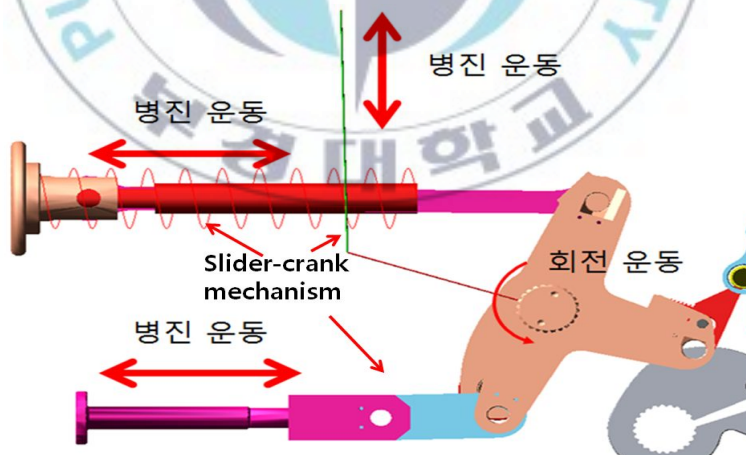


그림. 13 Open lever의 운동방향

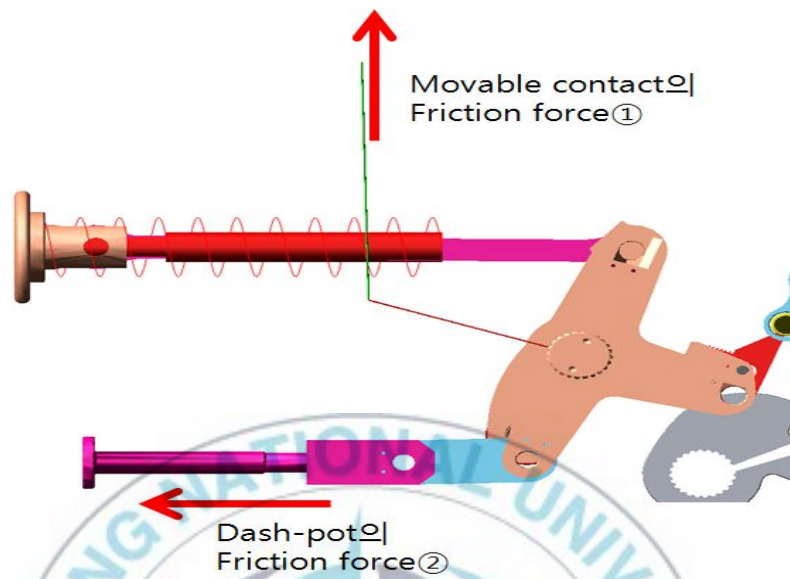


그림. 14 Friction force 방향



그림. 15 Movable contact의 Friction force ①

2.3.2. Closing 거동분석

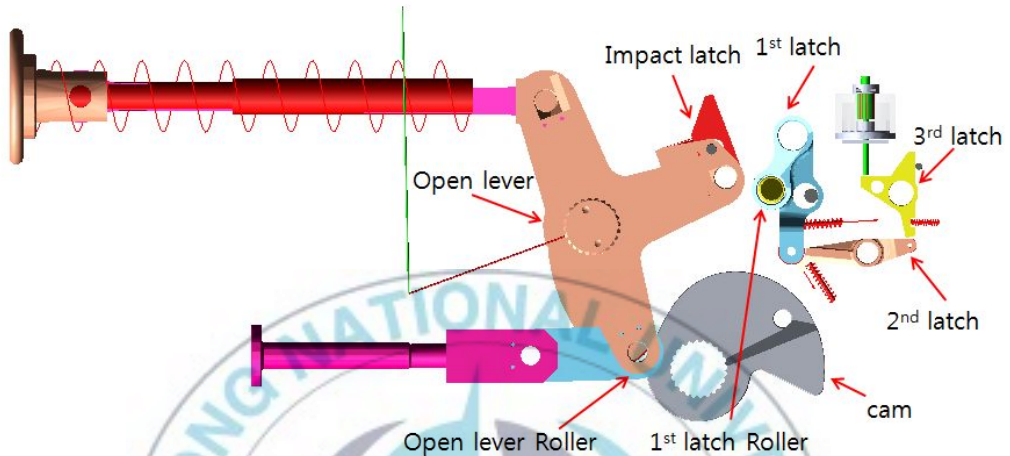


그림. 16 차단(Opening) 상태인 회로차단기

그림. 16은 고속차단기가 차단(Opening) 된 상태를 나타내었다. Opening 상태에서 Closing 거동은 Cam에 의해서 동작이 이루어진다. 그림. 17은 Closing시 중요한 역할을 하는 Cam과 Open lever roller를 나타내었다. Cam의 거동은 0.1초 만에 회전이 이루어지며 Open lever roller와 Contact에 의해 Open lever를 회전시킨다. Open lever가 원하는 위치까지 오면 Cam의 Contact이 끝나고 Impact latch와 1st latch에 연결되어 있는 Impact roller와 contact이 이루어진다. 각 Latch는 Impact latch에서 밀어주는 force에 의해 서로를 밀어주며 Closing 거동이 끝나게 된다.

그림. 18은 각 Spring과 Stopper를 나타내었다. 각 Latch에 연결되어 있는 Spring은 Latch의 위치를 잡아주는 역할을 한다. 그 중에서 3rd latch에 연결되어 있는 스프링은 Latch를 밀어주고 Latch가 Stopper에 의해 일정한 위치에 고정된다. 다른 Latch도 Spring과 3rd latch에 의해 안정적으로 Closing상태를 유지한다.



그림. 17 Cam 과 Open lever roller

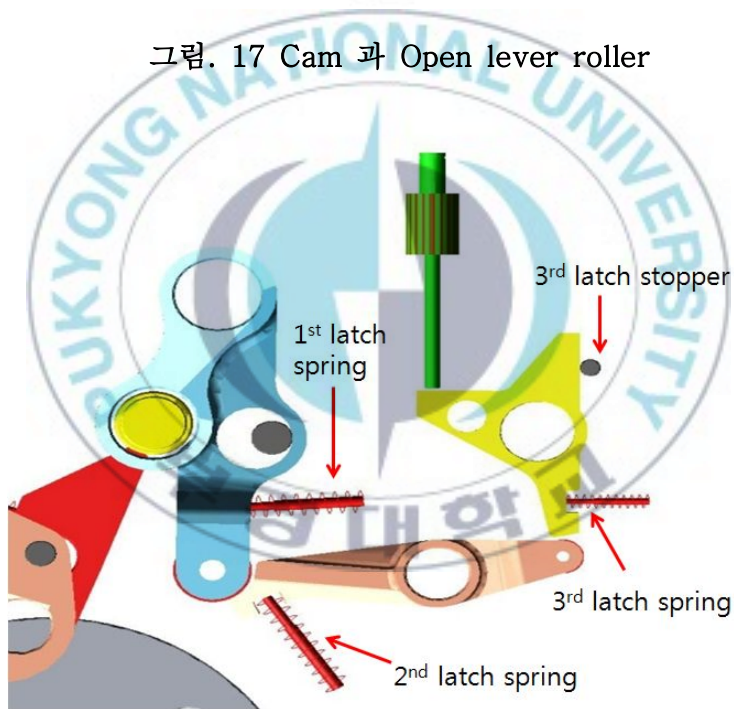


그림. 18 Latch spring 과 Stopper

3. 가스회로차단기의 구동시험

3.1. 구동 시험기조건

각 Latch의 거동 특성은 차단시간에 많은 영향을 미친다. 각 Latch의 거동 특성에 대해서 분석함으로써 거동에 영향을 미치는 요인을 찾아내고, Latch의 움직이는 시점을 파악하여 시뮬레이션과 시험 매칭을 하기 위해서 고속카메라를 이용하여 거동시점 계측을 수행하였다.

그림. 19는 본 시험에 사용된 고속카메라이며 프레임 비율은 1,000Frame이며 최대 프레임 비율은 68,000Frame이다. 저장용량은 8GB이다. 표 7는 고속카메라의 제원을 나타내었다.



그림. 19 High speed camera

표. 7 고속카메라의 제원

Model	MotionPro Y
해상도(Resolution)	1280*1024
프레임 비율(Frame rate)	1,000fps
최대 프레임 비율(Max Frame rate)	62,000fps
용량(Memory)	8GB
사이즈(Size)	90.5*90.5*220mm
무게(Weight)	3.4kg

고속카메라에서 촬영된 영상을 저장 및 분석하기 위해서는 노트북이 필요하며, 촬영이 이루어지는 부분을 정확하게 촬영하기 위해서 라이트를 이용하여 촬영되는 부분을 밝게 하였다. 라이트를 2개 설치하였다. 표 8은 실험에 사용된 장비와 개수를 나타내었으며, 그림. 20은 고속카메라를 설치한 모습을 나타내었다.

표. 8 시험장비 및 개수

장 비	개 수
노트북	1
마우스	1
연결케이블	1
라이트	2



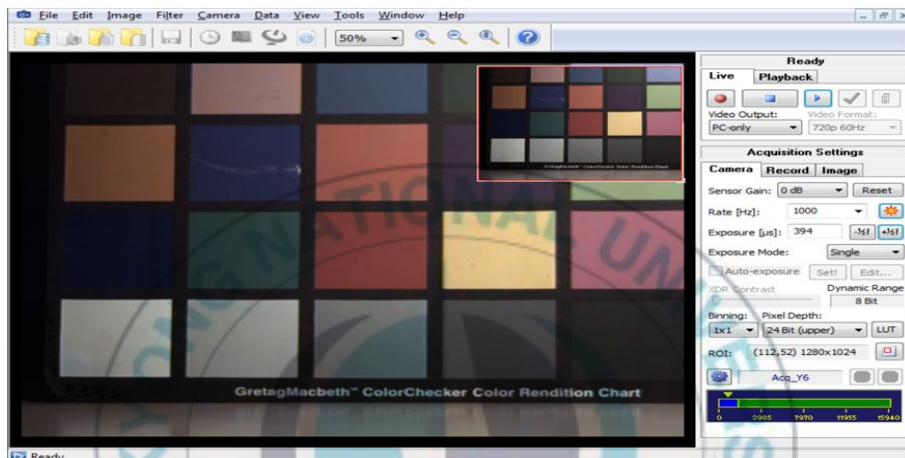
(a) ISO VIEW



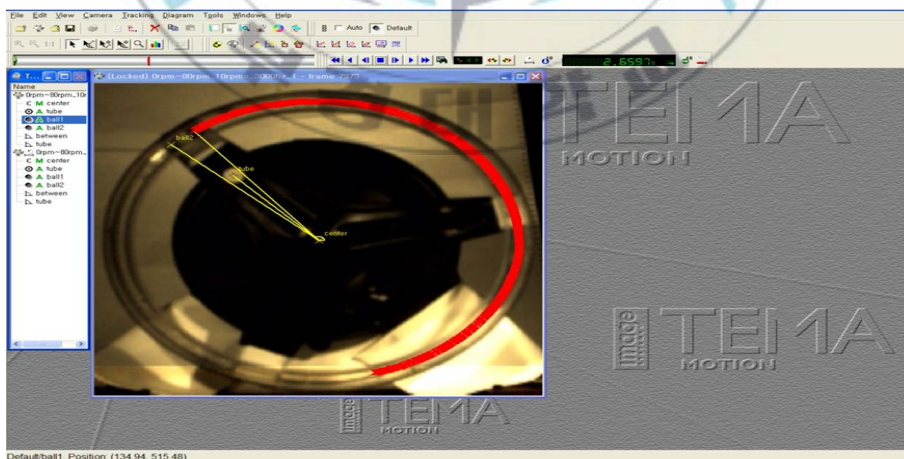
(b) FRONT VIEW

그림. 20 High speed camera setting

고속카메라를 이용한 데이터를 편집 및 동영상으로 만들어주는 프로그램이 필요하다. 동영상으로 만들어주는 프로그램은 Motion Studio를 이용하였다. 그리고 만들어진 동영상을 분석하여 변위, 속도, 가속도 등 원하는 데이터를 얻기 위해서는 TEMA라는 프로그램을 이용하여 분석하였다. 그림. 21은 본 연구에 사용된 Motion Studio⁽⁸⁾와 TEMA⁽⁹⁾ 프로그램을 나타내었다.



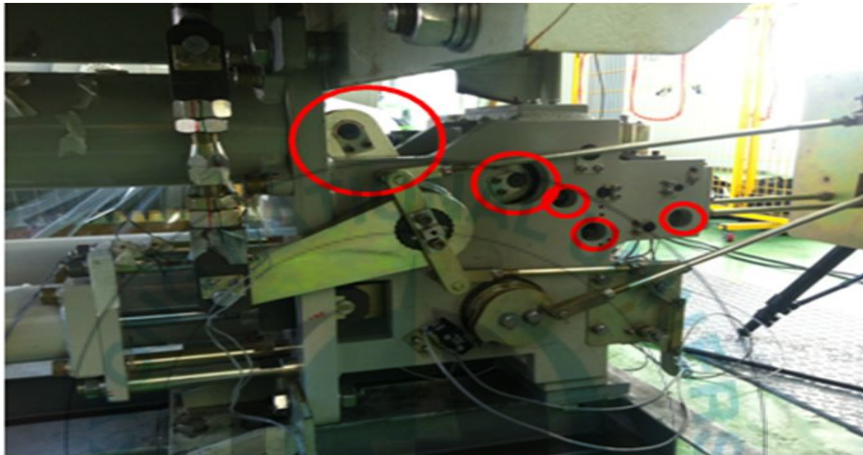
(a) Motion Studio



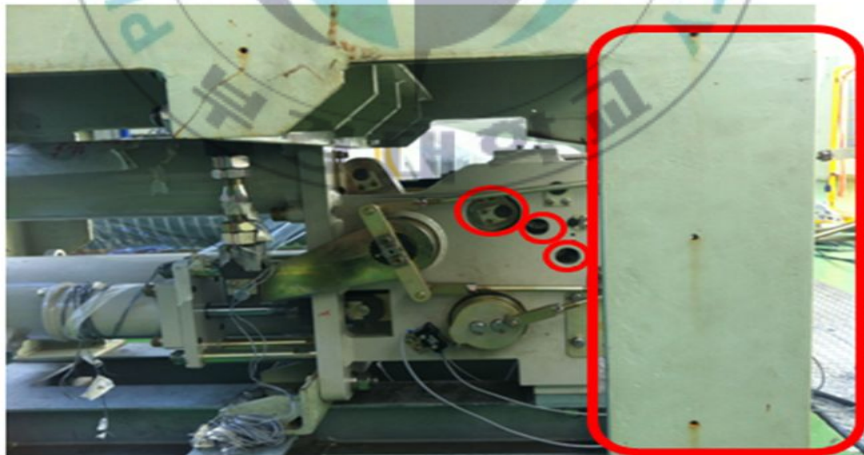
(b) TEMA

그림. 21 Motion Studio와 TEMA 프로그램

차단기의 조작기 부분은 Frame에 의해 내부 전체를 촬영하기에는 불가능하였다. 하지만 각 Latch의 위치를 확인할 수 있는 Hole이 있었으며, Hole을 촬영 포인트로 하여 측정하였다. 그림. 22은 촬영한 위치를 나타내었다. 그림. 22와 같이 고속차단기의 Frame에 의해 정면에서 촬영하기 어려운 경우는 고속카메라의 촬영에 영향이 없는 범위에서 회로차단기의 Frame 안에서 촬영하였다.



(a) 촬영 포인트



(b) 회로차단기의 Frame
그림. 22 고속카메라 촬영 위치

- 시험 일정 : 2012. 02. 16(1회 촬영), 2012. 03. 20(3회 촬영)
- 촬영 속도 : 1,000 Frames/s
- 시험 환경 : 회로차단기 Case에 의해 촬영할 수 있는 범위에 촬영

총 2차에 걸쳐 시험을 하였으며, 1차 시험에서는 각 Latch가 측정할 수 있는 위치와 시험환경에 대해서 확인하기 위해서 시험을 실시하였으며, 측정 가능한 부분과 불가능 부분에 대해서 판단하였다. 3rd latch는 Frame에 의해 측정이 불가능하였으며, 나머지 Latch는 측정이 가능하였다. 측정이 가능한 부분은 한 번씩 촬영을 실시하였다. 2차 시험은 1차 시험에서 생긴 문제점을 보완하고 측정이 가능한 부분에 대해서 3번씩 시험을 수행함으로써 동일한 결과가 나오는지 확인하였다. 그림. 23는 2차 실험에서 측정한 영상을 나타내었다. 각 Latch의 거동 특성 및 움직이는 시점을 파악하기 위해서 Tracking 포인트를 각 Latch에 검은색과 흰색을 사용하여 나타내었다. Tracking 포인트는 거동을 분석하기 위해 표시하는 포인트이며, 고정포인트와 거동포인트로 나눌 수 있다. 고정포인트는 기준이 되는 포인트로써 위치 변화가 발생하지 않는다. 거동포인트는 측정하는 물체에 표시하며 위치변화가 발생한다. 고정포인트를 기준으로 거동포인트의 상태적인 위치에 의해서 측정되어진다. 촬영속도는 측정거리 및 해상도를 고려하여 1,000Frames/s로 측정하였고 각 Latch의 거동시점을 파악하기 위해서 Solenoid를 포함하여 고속카메라 촬영을 실시하였다.



그림. 23 고속카메라 촬영 영상

3.2. 구동 시험결과

그림. 24은 Solenoid의 거동을 나타낸 그래프로써, 회사에서 측정한 Solenoid 변위데이터이다. 3rd latch는 Frame에 의해 고속카메라로 거동시점을 파악하는 것이 불가능하였기 때문에 3rd latch는 변위센서로 측정한 Solenoid 변위데이터로 3rd latch의 거동시점을 파악하였다. 그래프에서는 Solenoid 거동이 발생한 시점에서 2.4ms 후에 그래프 곡선의 기울기에 변화가 생기는 것을 확인할 수 있으며, 3rd latch와 Contact이 발생한 시점이다. Solenoid가 움직이기 시작하면서 3rd latch가 움직이는 시점은 2.4ms라는 것을 확인할 수 있다.

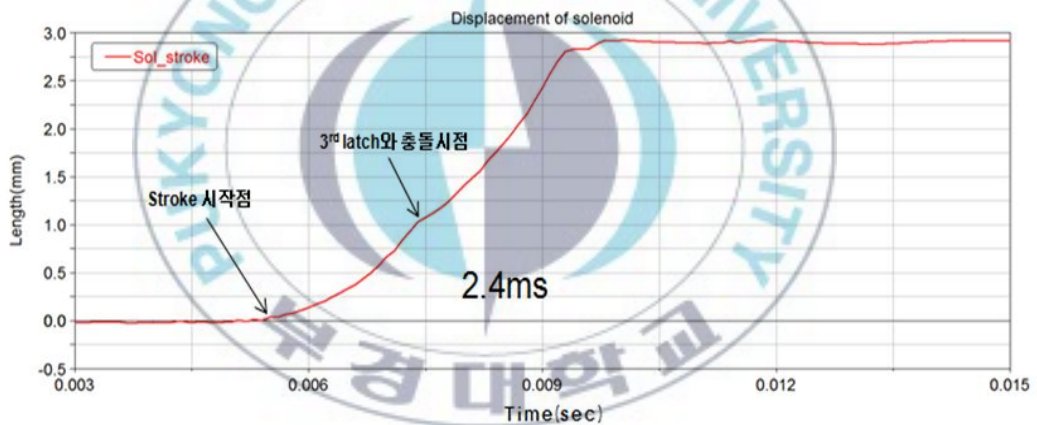


그림. 24 Solenoid 변위 그래프

그림. 25는 2nd latch의 거동시점을 나타내었고 2nd latch의 거동시점은 Solenoid의 거동시점으로부터 약 5ms 이후에 거동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 1st latch의 거동시점은 Solenoid의 거동시점으로부터 약 8ms 이후에 거동이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 그림. 26는 1st latch의 거동시점을 나타내었다.

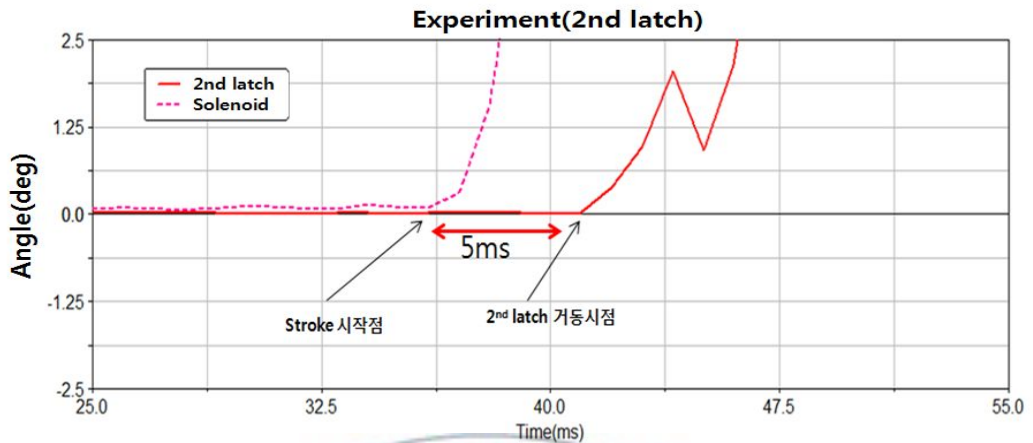


그림. 25 2nd latch의 거동시점

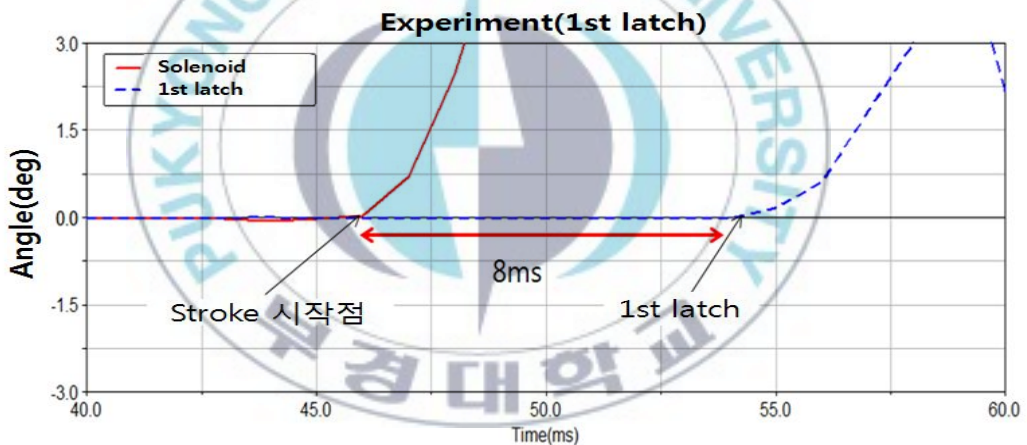


그림. 26 1st latch의 거동시점

그림. 27은 Open lever와 1st latch의 거동시점과 비교하였다. 거동시점이 거의 비슷하다는 것을 확인 할 수 있으며, 1st latch의 거동시점은 Solenoid의 거동시점으로부터 약 8ms 이후에 거동이 발생하기 때문에 Open lever의 거동시점도 8ms이다. 거동시점이 동일한 이유는 Open lever에 연결되어 있는 Impact latch는 1st latch roller를 밀어주고 있으며 1st latch의 거동이 발생하는 순간 1st latch roller의 회전에 의해서 Impact latch와의 Contact

이 떨어지도록 되어있기 때문에 거동시점이 동일하다. 그림. 28은 Open lever의 각도 변화를 나타내었다. 시험의 재연성을 확인하기 위해서 Open lever의 각도 변화를 3회 측정한 데이터를 비교하였으며, 재연성이 이루어짐으로써 측정이 정확하게 이루어졌다는 것을 확인할 수 있다.

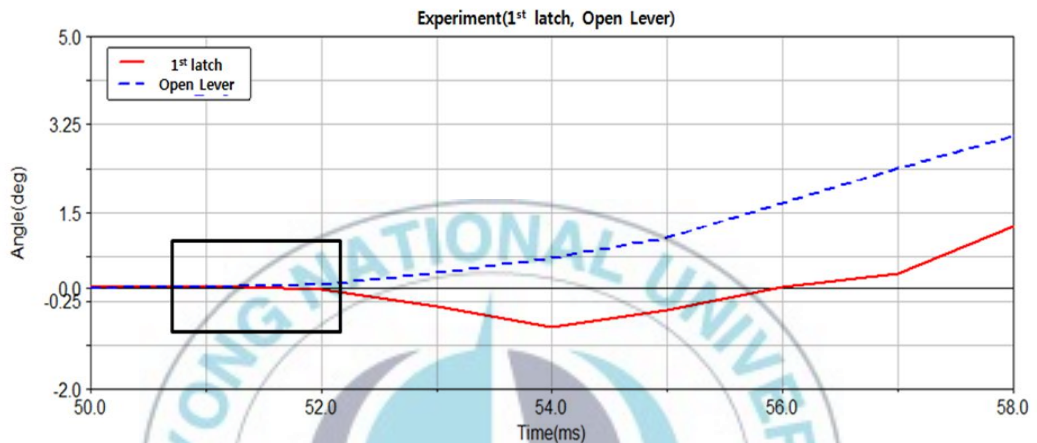


그림. 27 Open lever의 거동시점

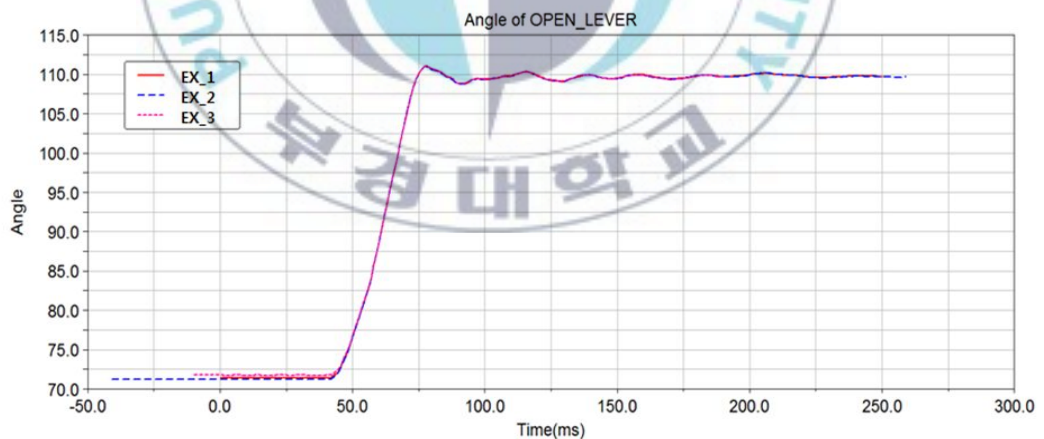


그림. 28 Open lever의 각도변화

표. 9 시험을 통한 각 Latch의 거동시점

	시험 거동시점(ms)	
	Solenoid	3rd latch
3rd latch	2.4	•
2nd latch	5.0	2.6
1st latch	8.0	5.6
Open lever	8.0	5.6

표 9는 각 Latch의 거동시점을 Solenoid와 3rd latch의 기준으로 나타내었다. 2nd latch는 3rd latch거동 이후 2.6ms 후에 거동이 발생하고, 1st latch는 5.6ms 이후에 거동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 1st latch와 Open lever는 거동시점이 동일하다.



4. 시험과 시뮬레이션의 비교검증

4.1. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 step size는 0.001(초당 1,000Frame)와 0.0001(초당 10,000 Frame)로 하였다. 시험을 초당 1,000Frame으로 측정을 하였기 때문에 시험과 동일한 조건인 초당 1,000Frame로 시뮬레이션 하였으며, 정확한 거동을 분석을 위해서 추가적으로 초당 10,000Frame도 분석하였다. 각 Latch의 거동시점을 분석하였으며, 3rd latch의 거동시점을 기준으로 거동시점을 측정하였다.

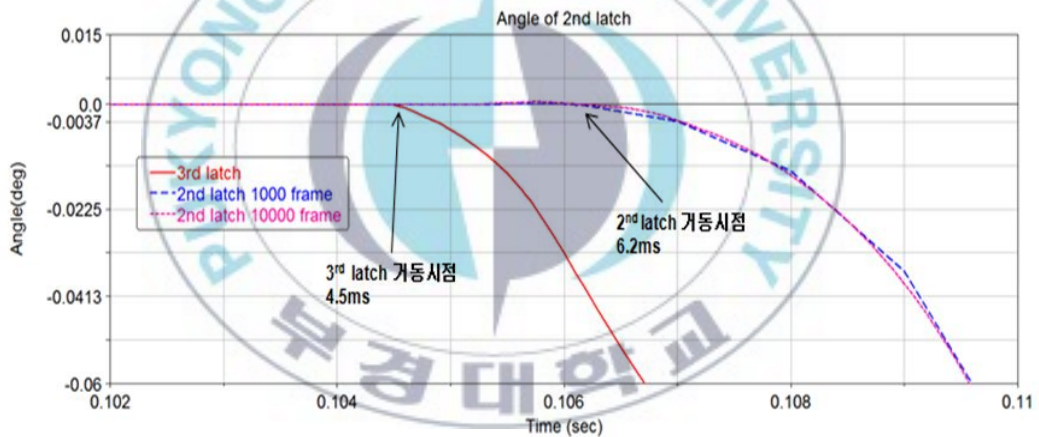


그림. 29 2nd latch의 거동시점(시뮬레이션)

그림. 29는 3rd latch거동시점으로부터 2nd latch의 거동시점을 나타내었다. 3rd latch는 Solenoid 거동 이후 4.5ms 후에 거동이 발생하며, 2nd latch는 6.2ms에 발생한다. 3rd latch의 거동을 기준으로 계산하면 1.7ms 후에 거동이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

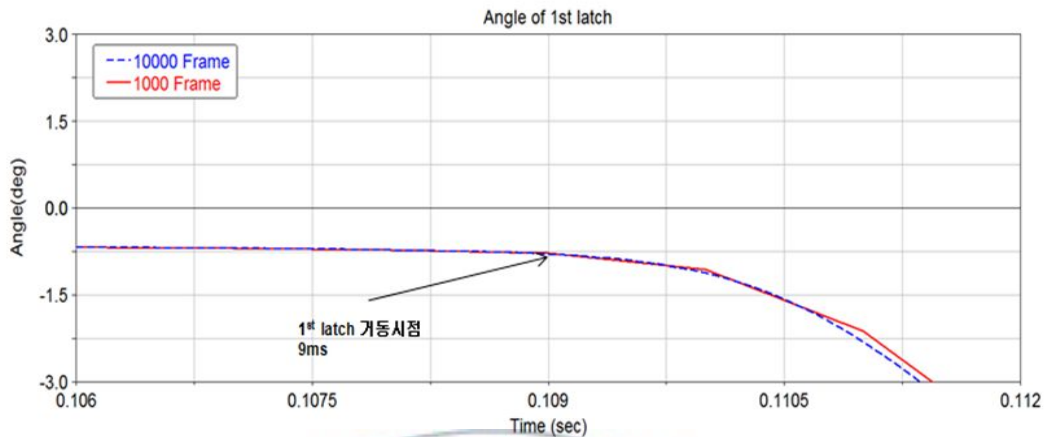


그림. 30 1st latch의 거동시점(시뮬레이션)

그림. 30은 1st latch의 거동시점을 나타내었다. 각도의 변화가 작으며, 9ms이후 각도의 변화가 크게 발생하고 있다는 것을 확인 할 수 있다. 1st latch의 거동시점은 Solenoid 거동이후 각도변화가 발생하는 9ms 시점이라는 것을 확인 할 수 있다. 그림. 29에서 3rd latch의 거동시점이 4.5ms 이기 때문에 3rd latch의 거동시점을 기준으로 계산하면 1st latch의 거동이 시작하는 시점은 4.5ms이다.

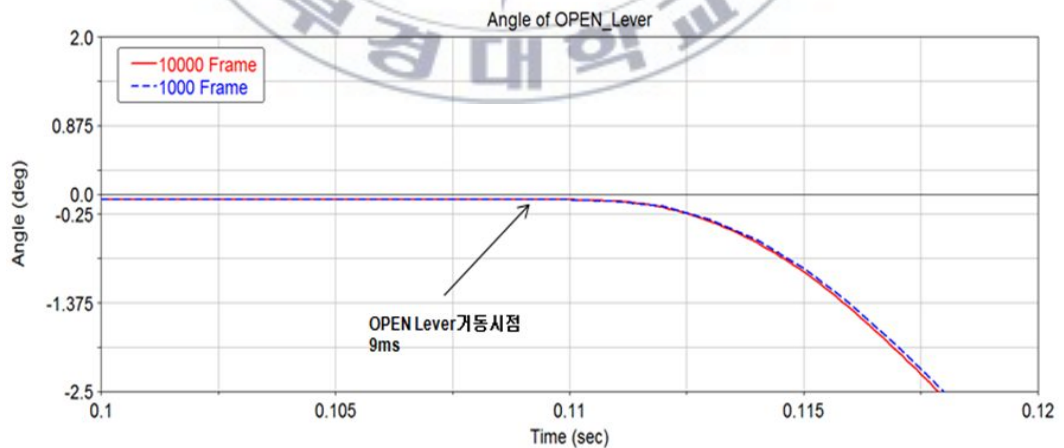


그림. 31 Open lever의 거동시점(시뮬레이션)

Open lever는 Solenoid 거동이후 9ms에 거동이 발생하였다. 이 시점은 1st latch 와 동일한 거동시점이다. 시험과 같이 Open lever가 밀어주는 힘에 의해 1st latch가 움직이기 때문에 거동시점이 동일하다. 그림. 32는 각 Latch의 거동시점에 대해서 나타내었다.

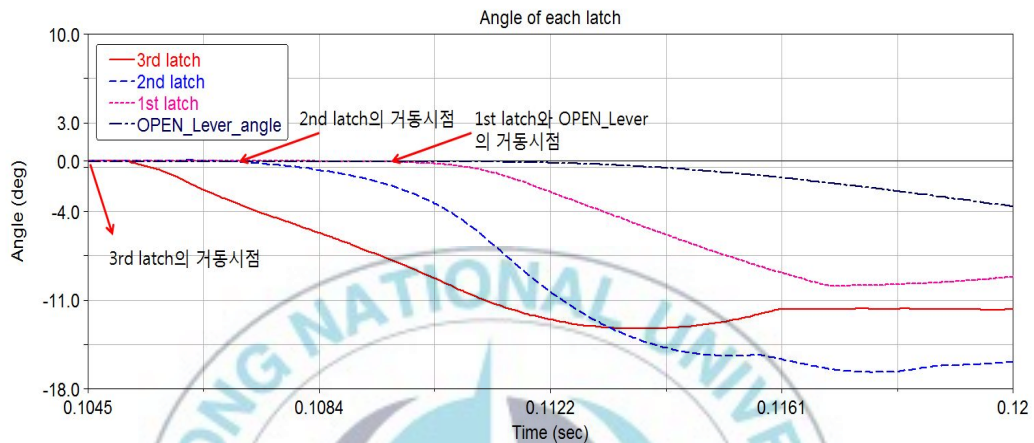


그림. 32 각 Latch의 거동시점(시뮬레이션)

표. 10 각 Latch의 거동시점(시뮬레이션)

장 비	시험 거동시점(ms)
3rd latch	•
2nd latch	1.7
1st latch	4.5
Open lever	4.5

표 10은 각 Latch가 거동시점을 3rd latch를 기준으로 나타내었다. 3rd latch의 거동시점으로 2nd latch는 1.7ms 이후 거동이 발생하며 1st latch와 Open lever는 4.5ms 이후에 거동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 2nd latch와 1st latch 사이의 거동 간격은 약 2.8ms이다.

4.2. Opening 거동시점 비교

표. 11 시뮬레이션과 시험비교

	시뮬레이션(ms)	시험(ms)
3rd latch	•	•
2nd latch	1.7	2.6
1st latch	4.5	5.6
Open lever	4.5	5.6

표 11은 거동시점에 대해 시험과 시뮬레이션을 비교하여 나타낸 것이다. 시험과 시뮬레이션은 약 1ms정도가 차이가 발생하고 있으며, 2nd latch와 1st latch사이의 거동시점은 3ms로써 시험과 시뮬레이션이 비슷하였다.

그림. 33은 실제 고속차단기의 모습과 프로그램에서 모델링 형상을 나타내었다. 실제 모델링에는 여러 가지 Link가 연결되어 있지만 시뮬레이션 상에서는 조작기 부분만을 모델링하였기 때문에 Link에 의해 작용하는 영향에 대해서는 고려하지 않았기 때문에 차이가 발생하였다. 시험과 시뮬레이션에서 1ms정도 차이가 발생하지만 각 Latch 사이의 거동간격은 시험과 시뮬레이션에서 차이가 없기 때문에 모델링된 차단기를 이용하여 분석을 시작하였다.

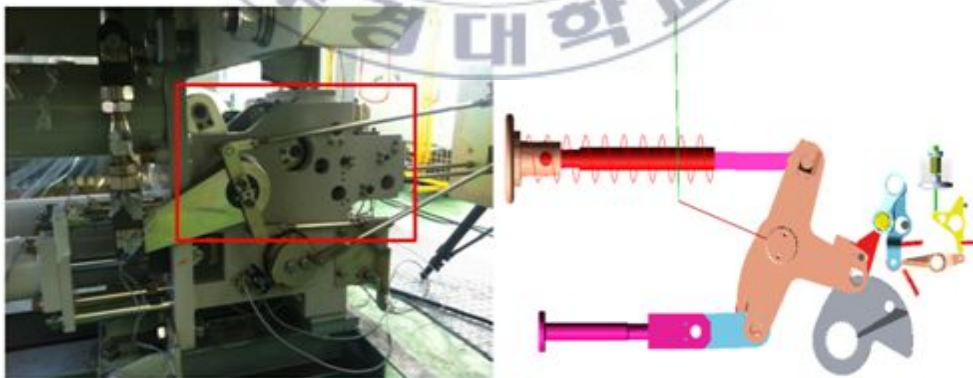


그림. 33 실제 제품과 모델링 비교

5. 가스회로차단기의 최적설계

회로차단기의 차단시간을 단축시키기 위한 최적설계를 수행하기 전에 차단 시간에 영향을 미치는 것으로 예상되는 인자들에 대해서 민감도해석을 수행하였다. 민감도해석을 통하여 차단시간에 영향을 적게 미치는 인자들을 제거함으로써 최적설계 수행시 소비되는 시간을 단축시킬 수 있다. 민감도 해석은 Output lever의 각도변경, Latch의 무게, Spring의 길이, Latch의 parameter에 대해서 실시하였으며, 실험을 통하여 민감도해석 결과와 비교하여 실제 제품에 미치는 영향성에 대해서 분석하였다. 민감도해석을 통하여 나온 결과를 바탕으로 설계변수로 선정하였다. 최적설계는 ADAMS와 VisualDOC를 연계하여 실시하였으며, 5.2.2절에 연계방법에 대해서 나타내었다. 최적설계 알고리즘은 유전알고리즘을 사용하였으며, 유전알고리즘은 다점 탐색방법이기 때문에 해를 구하는데 시간이 많이 걸리지만 초기 치에 영향을 거의 받지 않고 전역 최적해를 구할 가능성이 높아 최적설계 알고리즘으로 선택하였다. 유전 알고리즘은 설정값에 따라 최적설계 값이 다르게 나오기 때문에 교배율을 0.8~1.0까지 0.1씩 변경하여 실시하였다.

5.1. 민감도해석

5.1.1. Output lever angle 민감도

그림. 34는 output lever의 각도변경에 대한 두개의 Case를 나타내었다. Case 1은 기존에 있는 제품의 output lever각도에 대해서 나타내었으며, Close position일 때 각도는 $+20^{\circ}$ 이고, Open position은 -20° 이다. Case 2는 output lever의 각도를 15° 변경하였을 때 각도이며 Close position은 $+5^{\circ}$ 이고 Open position은 -35° 이다.

Output lever의 끝에 걸리는 힘을 확인하였을 때 두 Case모두 거동시점에서 걸리는 힘이 동일하다는 것을 그림. 35에서 확인할 수 있다. 이것은 output lever의 위치를 변경하였을 때 output lever의 CM(Center of Mass)

포인트 위치에 따라 거의 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림. 36는 Case에 따른 차단시간을 나타내었다. 기존 모델링 Case1이 Case2보다 차단 시간이 더 짧았으며, 1.6ms 정도 빨리 단축되었다. 이것은 차단부 Link 모델은 Slider-crank Mechanism으로 되어있기 때문에 차이가 발생한다.

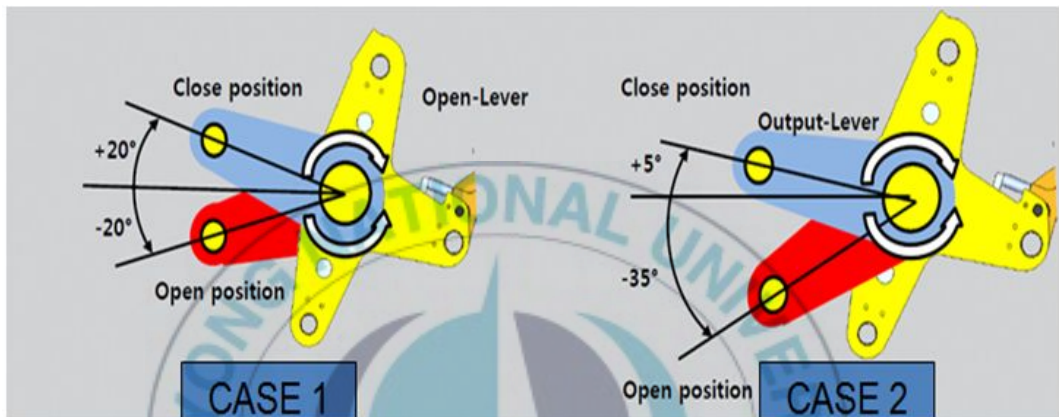


그림. 34 Output lever의 각도 변경

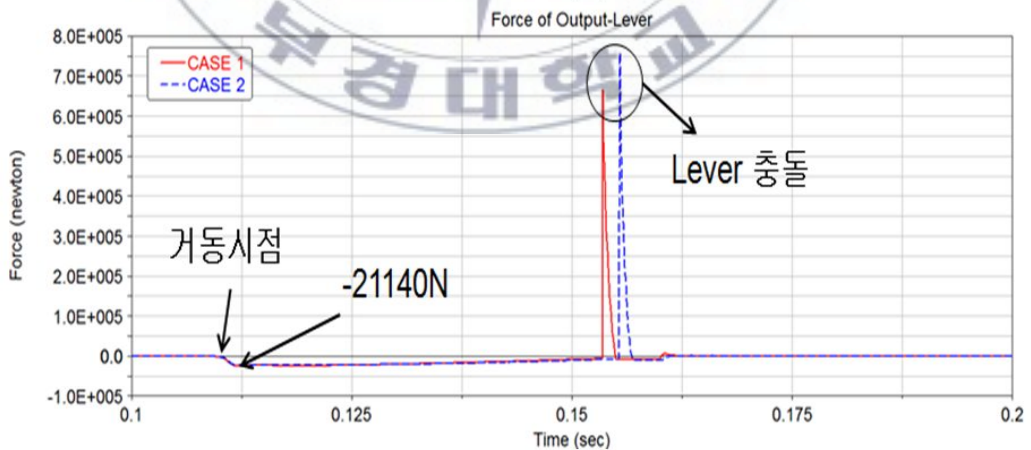


그림. 35 Output lever에 걸리는 force

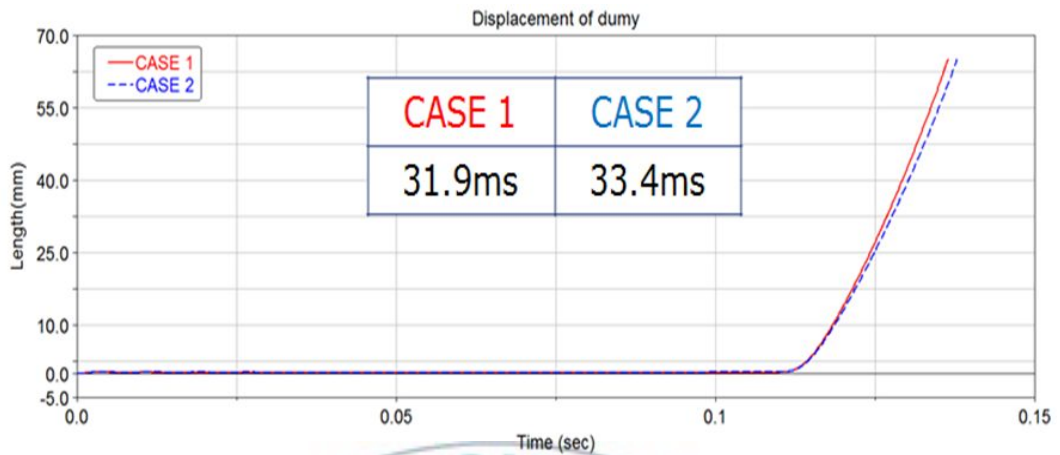


그림. 36 Output lever의 각도변경에 따른 차단시간

그림. 37은 Output lever를 모델링하였을 때 모습을 나타내었으며 Output lever의 각도를 변경 시 B포인트를 동일한 위치에 고정시킨 상태에서 기존의 위치에서 Case2로 변경하면 Body1의 길이가 길어지며, B포인트의 거동에 영향을 미친다.

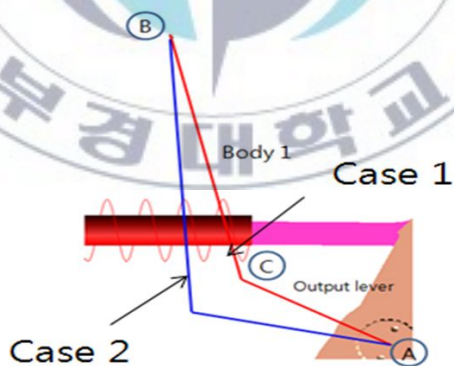


그림. 37 Output lever 모델링

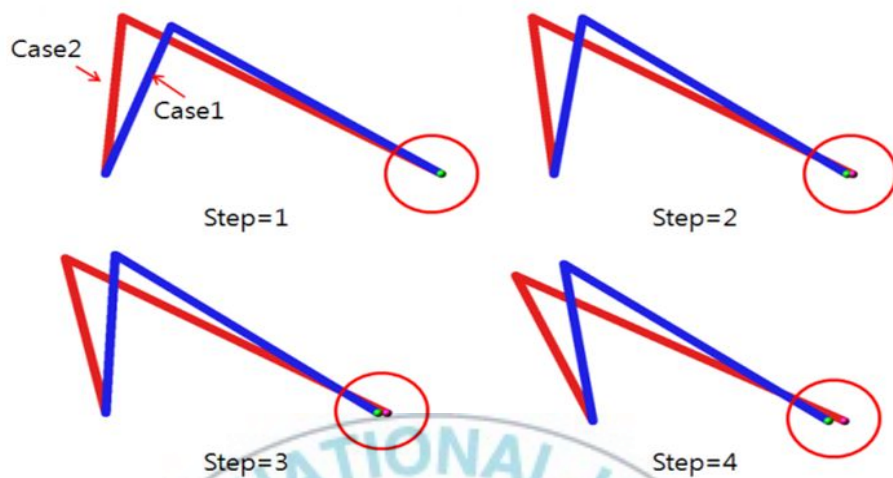


그림. 38 Slider-crank Mechanism 시뮬레이션

슬라이더 크랭크기구 Link의 길이에 의해서 많은 영향을 받으며 이것을 확인하기 위해서 그림. 38과 같이 ADAMS에서 간단하게 Slider-crank Mechanism모델링하여 link 길이에 따른 차이를 나타내었다. 회전속도는 동일하게 하였으며, 초기 각도는 모델링과 동일하게 Case1은 20° , Case2는 5° 로 하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 Case1을 이동이 Case2보다 더 빨리 이동한다는 것을 확인할 수 있다. Body1의 길이가 짧아지면 차단시간이 더 빨라질 것이다.

5.1.2. Latch 무게 변경 민감도

표 12는 3rd latch와 2nd latch의 무게에 따른 차단시간에 대해 나타내었다. 3rd latch는 무게가 증가할수록 차단시간이 증가하였지만 무게를 감소하였을 때 거의 변화가 발생하지 않았다. 2nd latch는 무게를 감소하였을 때 차단시간이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 1/3배일 때 약 0.5ms 정도 단축되었다.

표. 12 무게변경에 따른 민감도

	증감률	무게(kg)	시간(ms)	Opening/Closing
3rd latch	3배	0.367	32.37	정 상
	2배	0.244	32.02	
	기준	0.122	31.75	
	1/2배	0.061	31.77	
	1/3배	0.040	31.74	
2nd latch	3배	0.798	32.98	정 상
	2배	0.532	32.41	
	기준	0.266	31.75	
	1/2배	0.133	31.38	
	1/3배	0.088	31.27	

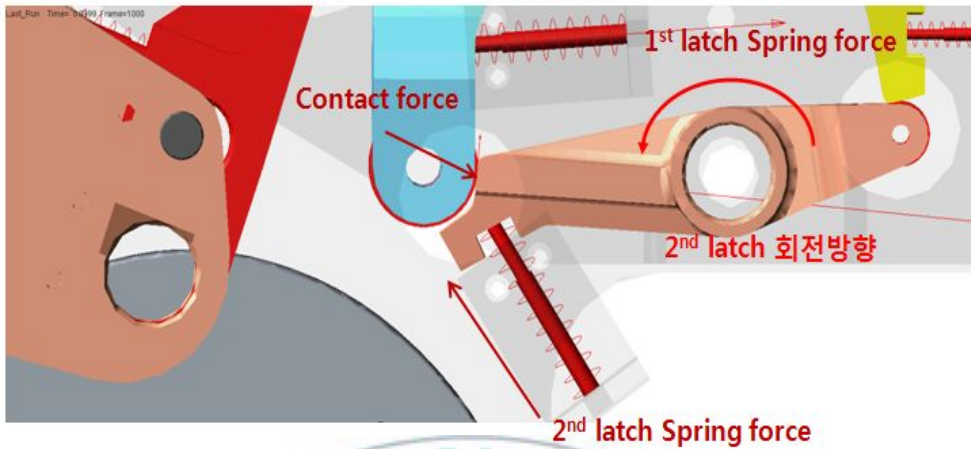


그림. 39 2nd latch의 거동에 작용하는 힘

그림. 39는 2nd latch의 거동에 미치는 힘에 대해서 나타내었다. 2nd latch는 opening 시 1st latch가 밀므로 밀어주는 힘에 의해서 회전이 발생한다. 1st latch에 의해서 밀어주는 힘은 2nd latch의 무게를 변경해도 일정하게 작용하며 2nd latch의 무게는 1st latch가 밀어주는 힘에 저항하는 힘으로 작용하게 되어 무게가 증가할수록 차단시간이 증가하고 무게가 감소할수록 차단시간이 단축된다.

5.1.3. Spring 길이 변경 민감도

① 3rd latch spring 민감도

표. 13 3rd latch spring 길이 변경에 따른 민감도

	자유 길이	차단시간(ms)	Opening/Closing
3rd latch	40	31.42	정 상
	42	31.45	
	44	31.55	
	46	31.64	
	48	31.67	
	50(기준)	31.75	
	52	31.87	
	54	31.93	
	56	32.05	
	58	32.18	
	60	32.21	

표 13은 3rd latch의 스프링 길이 변경에 따른 민감도를 나타내었다. 3rd latch의 스프링은 압축되어 있으며, 압축된 길이는 $L_0=31.631\text{mm}$ 로 초기상태 길이를 제일 짧은 40mm로 변경하여도 압축되어 있는 상태이며, 압축력은 식 (1)으로 계산된다.

$$F = K(L - L_0) \quad (1)$$

3rd latch의 스프링 길이를 짧게 할수록 차단시간이 단축된다. 3rd latch의 스프링은 3rd latch의 거동에 방해하는 힘으로 작용하며 스프링 길이가 길어질수록 압축력이 증가하기 때문에 3rd latch의 거동에 방해를 주고 길이가 짧아질수록 압축력이 작아지면서 거동에 방해를 적게 주기 때문에 차단시간이 단축되며 약 0.3ms정도 단축되었다.

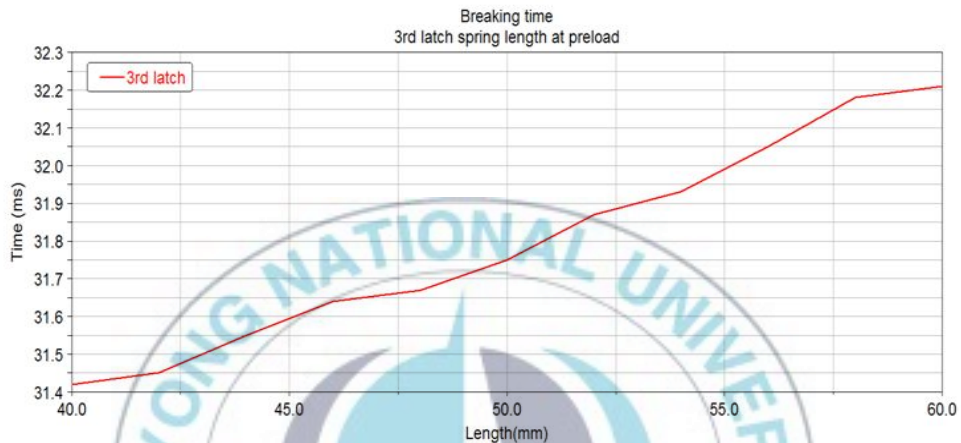


그림. 40 3rd latch spring length의 민감도

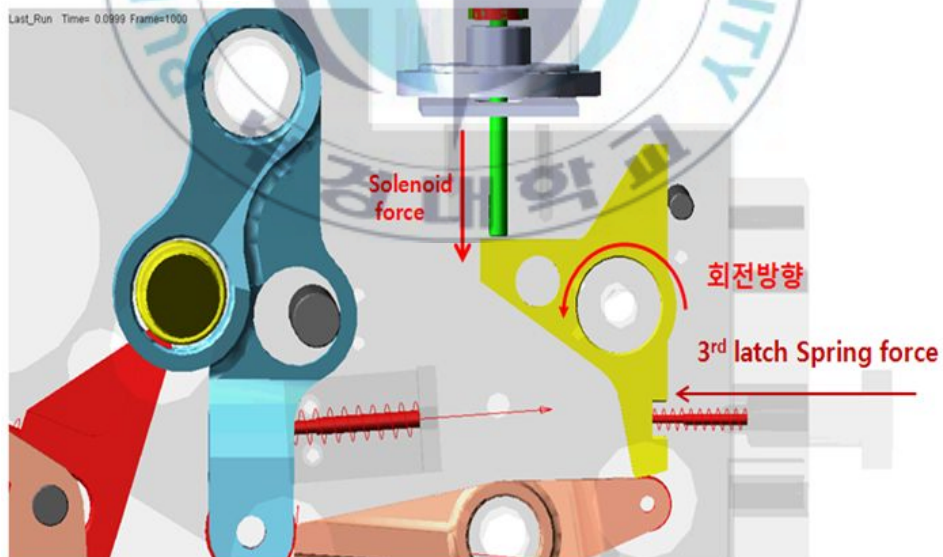


그림. 41 3rd latch spring의 force 방향

② 2nd latch spring 민감도

표. 14 2nd latch spring 길이 변경에 따른 민감도

	자유 길이	차단시간(ms)	Opening/Closing
2nd latch	52	31.54	정상
	54	31.57	
	56	31.64	
	58	31.71	
	60(기존)	31.75	
	62	31.87	
	64	31.95	
	66	32.02	
	68	32.09	

표 14는 2nd latch의 스프링 길이 변경에 따른 민감도를 나타내었다. 2nd latch의 스프링은 압축되어 있으며, 압축된 길이는 $L_0=50.910\text{mm}$ 로 초기상태 길이를 52mm로 변경하여도 압축된 상태이다. 그림. 42에서 길이가 짧아질수록 선형적으로 차단시간이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림. 43은 2nd latch spring의 force 방향에 나타내었으며, 3rd latch spring과 같이 Latch의 회전방향에 반대쪽으로 힘이 작용하여 스프링 길이가 짧아질수록 압축력이 작아지기 때문에 차단시간이 단축되며 자유길이가 52mm일 때 약 0.2ms가 단축되었다.

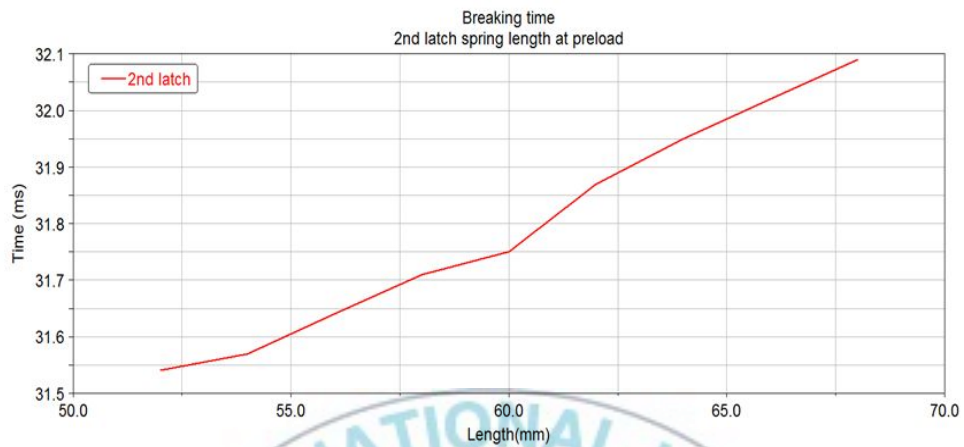


그림. 42 2nd latch spring length의 민감도



그림. 43 2nd latch의 거동에 작용하는 힘

5.1.4. Latch parameter 민감도

2nd latch와 3rd latch의 Contact이 발생하는 지점을 Curve로 모델링하여 변수(Angle, Displacement)에 따라 이동이 가능하도록 하였다. 3rd latch는 Spline 곡선과 Circle curve를 이용하여 모델링 하였으며, 2nd latch roller는 Circle curve로 모델링 하였다. 그림. 44은 Curve로 모델링한 2nd latch roller와 3rd latch를 나타내었다.

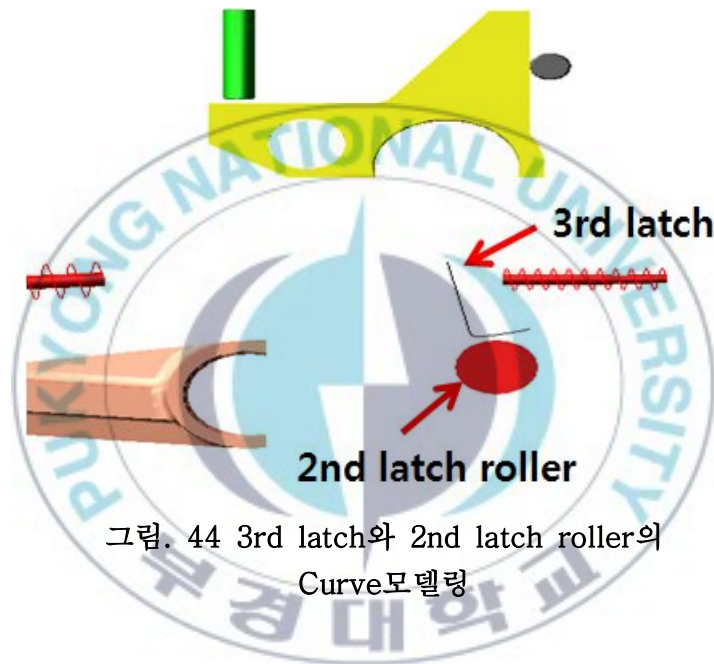
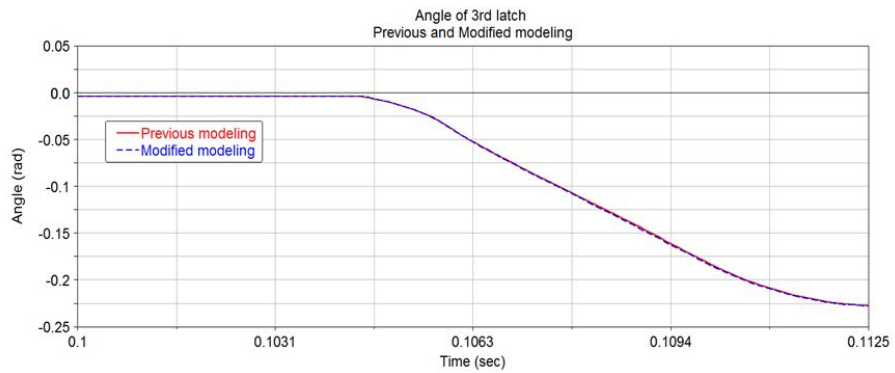
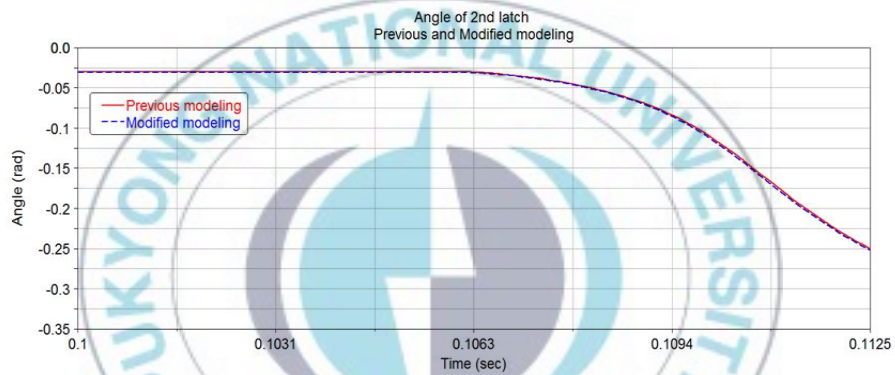


그림. 44 3rd latch와 2nd latch roller의
Curve모델링

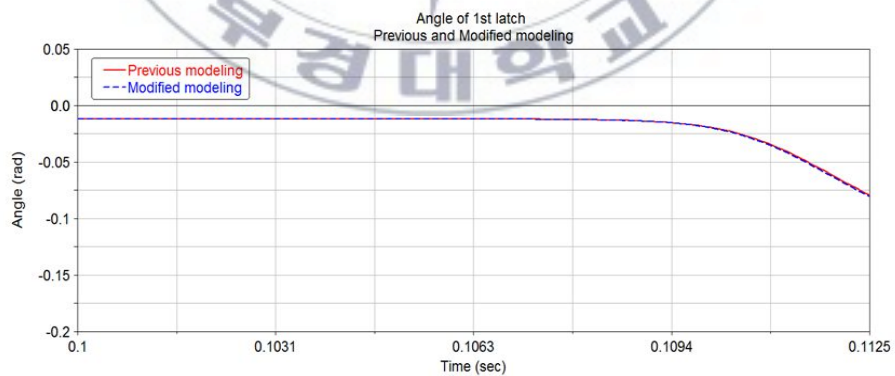
Latch의 질량과 관성은 기존의 모델링과 동일하게 하였다. 기존 모델링과 Curve 모델링의 각 Latch의 거동에 대해서 비교하였으며, 기존과 동일한 거동이 이루어지는 것을 그림. 45에서 확인할 수 있다. 차단시간도 31.75ms로 기존과 동일하였다.



(a)Angle of 3rd latch



(b)Angle of 2nd latch



(c)Angle of 1st latch

그림. 45 기존 모델링과 변경된 모델링 비교

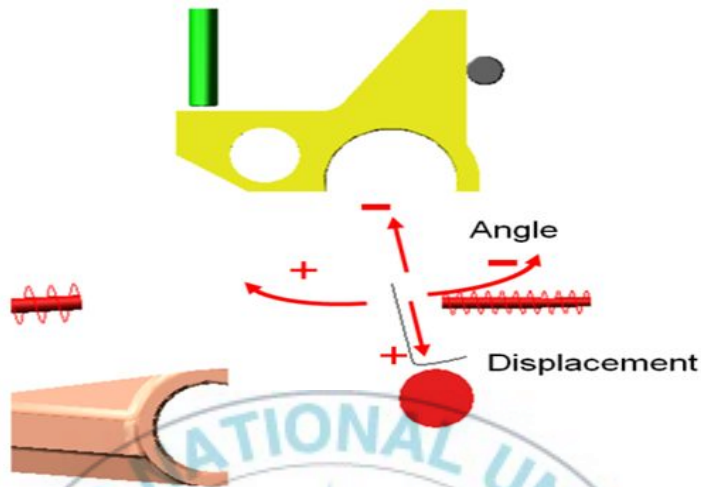


그림. 46 Latch parameter의 변수

Latch의 형상의 변경하기 위해서 Angle과 Displacement를 이용하여 Latch의 형상변경이 가능하도록 모델링 하였으며, 그림. 47, 48은 Angle과 Displacement를 이용하여 민감도 해석을 한 그래프를 나타내었다. Angle은 (+)방향으로 갈수록 차단시간이 단축 되었으며, Displacement는 (+)방향으로 갈수록 차단시간이 감소하나 10mm이후 차단시간이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 단축된 시간의 변화는 크지 않았다.

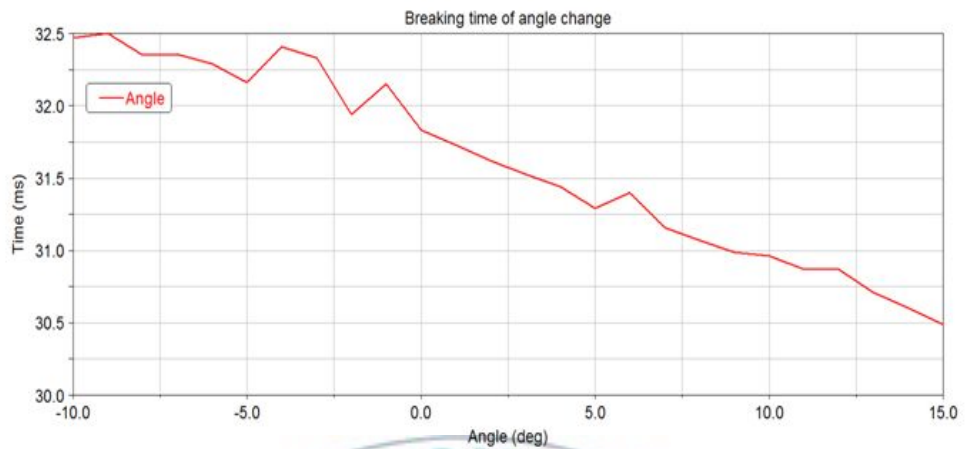


그림. 47 Angle에 따른 민감도

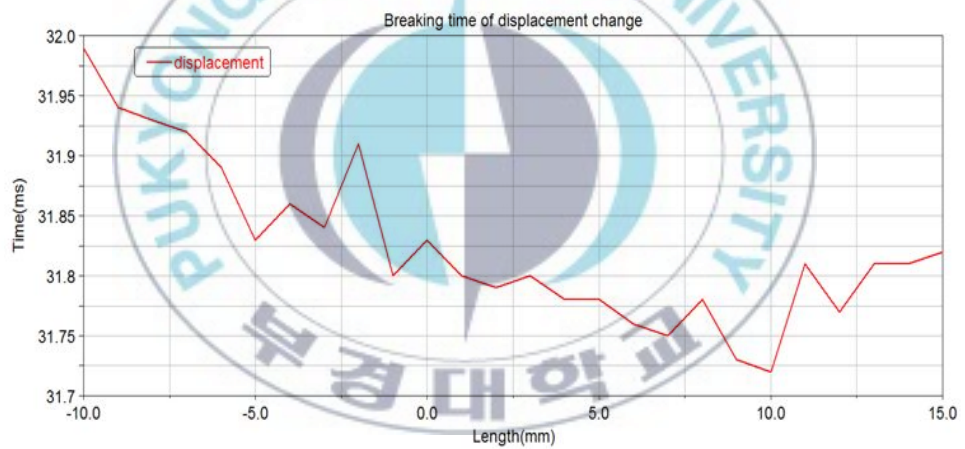


그림. 48 Displacement에 따른 민감도

5.1.5. 민감도와 시험 결과 비교

민감도 해석결과를 반영하여 스프링의 길이와 2nd latch의 무게를 변경하여 시험을 하였다. 민감도 해석에서 각 스프링은 자유길이를 줄였을 때 차단시간이 감소하였다. 3rd latch spring은 10mm 줄였을 때 시뮬레이션은 0.3ms가 감소하였으며, 시험은 0.5ms가 감소하였다. 0.2ms정도의 차이가 발생하였다. 2nd latch spring은 8mm 줄였을 때 시뮬레이션은 0.2ms가 감소하였으며, 시험은 0.2 ~ 0.3ms가 감소하였다. 무게는 가장 많은 변화가 발생한 2nd latch의 재질을 알루미늄으로 변경하였으며, 시뮬레이션은 0.5ms가 감소하였고 시험에서는 0.2~0.3ms정도 감소하였다. 시험결과와 시뮬레이션 결과가 약간의 차이가 있지만 경향성은 동일하다는 것을 알 수 있다. 표. 15는 시뮬레이션과 시험결과를 정리하여 나타내었다. 스프링의 길이와 무게를 같이 적용시켰을 때도 결과가 거의 동일하였다.

표. 15 민감도 해석과 실험결과 비교

	시뮬레이션(ms)	실험(ms)
3rd latch spring 이완 (10mm)	0.3	0.5
2nd latch spring 이완 (8mm)	0.2	0.2~0.3
2nd latch mass (AI)	0.5	0.2~0.3
2nd latch spring 이완 (8mm)+ 3rd latch spring 이완 (10mm)	0.5	0.5
2nd latch mass (AI)	0.9	1.0

5.2. Latch parameter의 최적설계

5.2.1. VisualDOC의 유전알고리즘

본 연구에서는 VisualDOC(최적화 프로그램)의 유전 알고리즘⁽¹⁰⁾을 사용함으로써 Latch의 모델 파라미터들을 규명하였다. 최적설계 시 원하는 최적의 성능을 내는 해를 구하기 위해 알고리즘의 선정이 중요하다. 어떤 알고리즘을 선택하느냐에 따라 정확한 해를 구할 수도 있고 잘못된 해를 구할 수도, 때론 해를 구할 수 없을 수도 있기 때문이다. 본 연구의 모델 파라미터들은 상호 간섭에 의해 초기 치에 많은 영향을 받아 신뢰할 수 없는 결과를 초래할 가능성이 많았다. 이를 지양하기 위하여 어느 점에서 시작하여도 수렴성이 탁월한 유전알고리즘을 선택하였다. 유전알고리즘은 다점 탐색방법이기 때문에 해를 구하는데 시간이 많이 걸리지만 초기 치에 영향을 거의 받지 않고 전역 최적해를 구할 가능성이 높아서, Latch parameter의 최적 설계 문제를 해결하는데 적당하다고 판단하였다.

유전 알고리즘을 사용한 최적화 방법은 1975년에 Holland에 의해 사용되기 시작하여 최근 활발하게 연구되고 있는 최적화 방법 중의 하나이다^{(11)~(12)}. 유전 알고리즘은 우수한 적응도를 가진 개체가 주위환경(최적설계문제의 경우에는 주어진 구속 조건) 속에서 더 큰 생존확률을 가지고 더 많은 교차조작에 참가하여 다음 세대에 우수한 개체를 생성하는 자연계의 적자생존의 원리와 번식, 교배, 돌연변이를 통해서 다음 세대를 형성하는 유전과정의 원리를 응용한 확률, 통계적 다점 최적화 방법이다. 유전 알고리즘의 특징은 코딩한 파라미터를 직접 이용하고, 다점(multi points)탐색 방법이므로 전역 최적의 해를 구할 가능성이 높으며, 탐색에 적합도 함수를 이용하여 확률적인 검색을 하기 때문에 미분 값이나 다른 부가적인 정보를 요구하지 않는다. 또한 결정론적인 규칙이 없고, 확률적 연산자를 사용함으로 적용하기가 쉽다. 따라서 유전 알고리즘은 최적설계 시스템이 비선형이거나, 설계변수가 불연속일 경우, 목적함수가 미분 불가능한 문제를 다룰 때 대단히 유용한 방법이 된다⁽¹¹⁾.

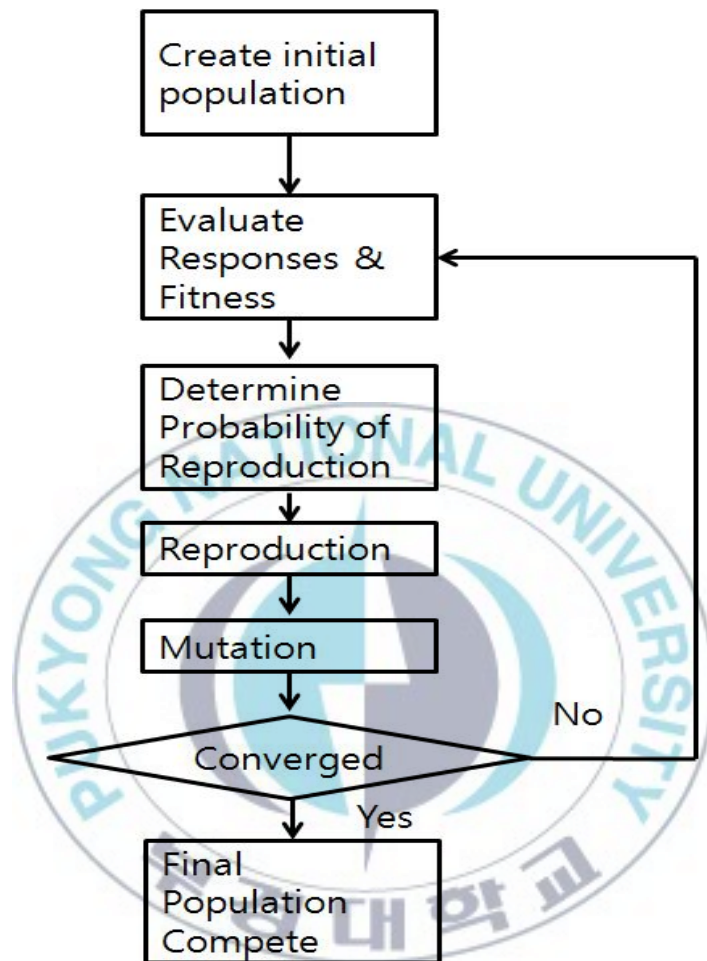


그림. 49 유전자 알고리즘의 flow chart

그림. 49는 가장 기본적인 구조를 가지는 유전 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 여기에서 유전자는 설계변수, 평가는 목적함수이다. 유전 알고리즘은 처음에 개체의 해가 될 수 있는 설계변수(유전자, 염색체)를 만든 다음 목적함수에 대입하여 그 목적함수에 대해서 현재의 유전자의 유전성을 평가한다. 예를 들어서 목적함수를 최소화하는 최적화 문제의 경우에는 어떤 유전자를 목적함수에 대입했을 때 목적함수의 값이 작을수록 그 유전자의 유전성은 우수하다고 판단하고 그 유전자의 유전 인자들은 우성이 되어 다음 세대로 전달된다.

개체의 유전자들을 모두 목적함수에 대입하여 유전성을 파악한 다음에 그 유전자들이 최적화의 종료 조건을 만족하는지를 검색한다. 목적함수의 값이 반복되는 경우가 5회 이상이거나 목적함수 값의 절대 오차 값이 0.0001을 만족할 때 최적설계는 종료가 된다. 종료 조건을 만족시키지 못했을 경우에는 n 개의 유전자들 중에서 유전성이 좋은 $m(n > m)$ 개의 유전자를 선택하고, 그 선택된 유전자들에 대해서 먼저 교배(crossover, 두 개의 유전자에서 유전 인자를 추출하여 하나의 새로운 유전인자를 만드는 것) 연산을 수행하여 새로운 유전자를 만든다. 교배율을 너무 작게 설정하면 전역해를 찾지 못할 수도 있고 반대로 너무 크게 설정하면 해의 정확성은 높아지지만 시간이 너무 많이 소요될 수도 있다. 그런 다음 교배 연산이 수행된 유전자에 돌연변이(mutation, 한 유전자의 유전 인자 중 하나 또는 그 일부를 바꿔서 새로운 유전자를 만든다.) 연산을 수행하여 새로운 유전자를 만들어낸다. 돌연변이 확률은 일반적으로 0.05에서 0.1의 값이 많이 사용된다⁽¹¹⁾. 여기까지 하면 초기에 n 개의 유전자가 모두 새로운 n 개의 유전자로 바뀌게 되고, 1세대가 진화한 것이 된다. 이러한 과정을 최적 조건을 만족할 때 까지 계속 반복시키면 세대가 증가할수록 유전자(설계 변수)는 우수한 유전성을 가지게 되고 그 중에서 가장 우수한 유전성을 가지는 유전자가 주어진 목적함수를 최소로 하는 설계변수가 된다⁽¹²⁾.

5.2.2. VisualDOC와 ADAMS의 연계

ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System)의 다물체 동역학 해석은 대 변위를 갖는 운동에서 조인트에 의해 연결된 부품의 거동, 즉 시간변화에 따른 각 부품의 위치, 속도, 가속도, 조인트의 반력뿐만 아니라 시스템의 고유 진동수, 모드 형상, 상태 공간 행렬 등의 정보도 얻을 수 있다. 여기에는 기계 시스템의 기구학(Kinematic), 정적(static), 준정적(quasi-static)해석 뿐 아니라 선형, 비선형 동역학 해석이 포함된다. 사용자는 기계 부품의 기하학적 형상, 질량, 구속조건, 제어로직, 초기조건 등 해석을 위한 입력 데이터만 입력하면 된다⁽¹⁶⁾.

VisualDOC는 ADAMS와 같은 사용자의 해석프로그램을 VisualDOC와 연결하여 최적설계를 가능하게 하는 소프트웨어이다. VisualDOC는 최적설계의 주 알고리즘을 포함하고 있는 DOT와 사용자의 해석프로그램을 편리하게 연결시킬 수 있으며 DOT에서 필요한 입력 자료를 프로그램화하지 않고 GUI환경에서 입력과 수정이 가능한 프로그램이다. VisualDOC에서 제공하는 최적설계 알고리즘으로 미분 기반의 최적설계 알고리즘, 실험계획법, 전역 최적설계 알고리즘 등이 내포되어있다. 이와 같이 VisualDOC의 다양한 최적설계 알고리즘을 사용하여 ADAMS에서 모델링 한 기계시스템을 최적설계가 가능하도록 연계하면 아주 유용한 설계 도구가 될 것이다.

VisualDOC는 외부프로그램 및 데이터와 상호작용 할 수 있도록 응용프로그램 인터페이스(Application program interface)를 제공한다. VisualDOC는 내부에 VisualScript라는 인터페이스 프로그램을 삽입함으로써 해석프로그램의 개수에 전혀 구애받지 않고 사용가능할 뿐 아니라 응답(Response)으로 설정할 수 있는 결과파일의 개수도 구속 받지 않는다. VisualDOC와 상호연결이 가능한 프로그램은 다음과 같다⁽¹⁷⁾.

- Excel 프로그램과 연동하여 최적설계를 할 수 있다.
- MATLAB의 m-file과 연동하여 최적설계가 가능하다.
- 해석프로그램의 입력파일이 ASCII 코드로 작성되어있으면 어떤 프로그램과도 연결이 가능하다.

VisualDOC를 ADAMS와 연계시켜 VisualDOC에서 설계 정보를 변경하여 반복적으로 해석이 가능하도록 하기 위해서 ADAMS는 운영체제의 명령입력 창(Command window)에서 실행되어야 한다⁽¹⁶⁾.

VisualDOC에서는 ADAMS의 입력데이터를 이용하여 설계변수를 정의할 수 있다. 이 때 사용되는 ADAMS의 입력데이터는 *.cmd 파일이나 *.sub 파일과 같은 ASCII 코드로 작성된 파일을 예로 들 수 있다. 목적함수나 제약조건은 ADAMS의 결과 파일에서 지정 가능하다. 본 연구에서 사용한 ADAMS의 결과 파일은 *.out, *.txt 파일을 이용하였다. 이 외에도 다른 결과 파일도 VisualDOC에서는 사용 가능하다. VisualDOC의 VisualScript에서 ADAMS 입력 출력 데이터를 이용하여 설계변수와 목적함수를 그림. 50과 같이 선택한다⁽²⁰⁾.

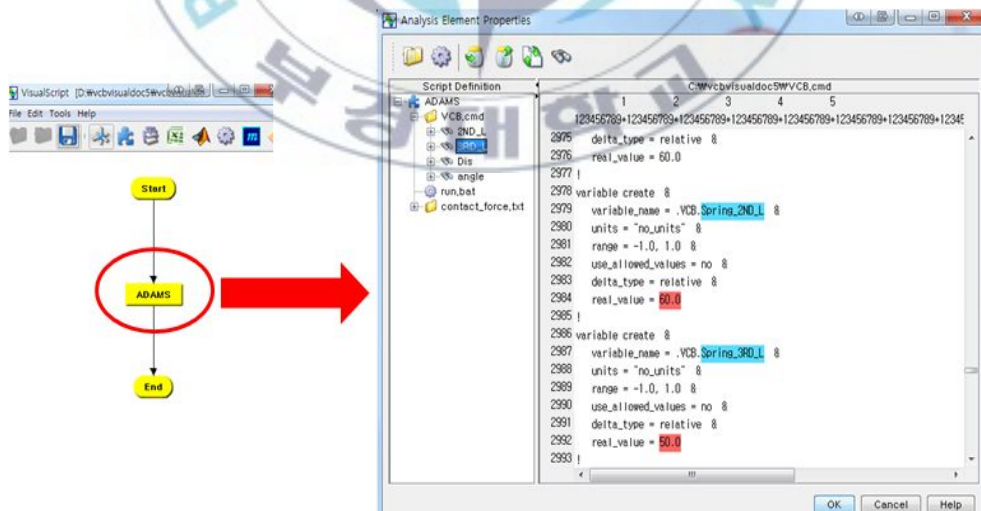


그림. 50 VisualScript를 통한 설계변수와 목적함수 값 선정

VisualDOC에서 설계변수, 목적함수, 제약조건이 설정되었으면 설계 목적에 적합한 알고리즘을 선택하여 최적설계를 수행한다. 최적설계 결과를 평가하여 최적의 파라미터 값을 선택한다. 이와 같은 일련의 과정을 그림. 51에 도시하였다⁽¹⁹⁾.

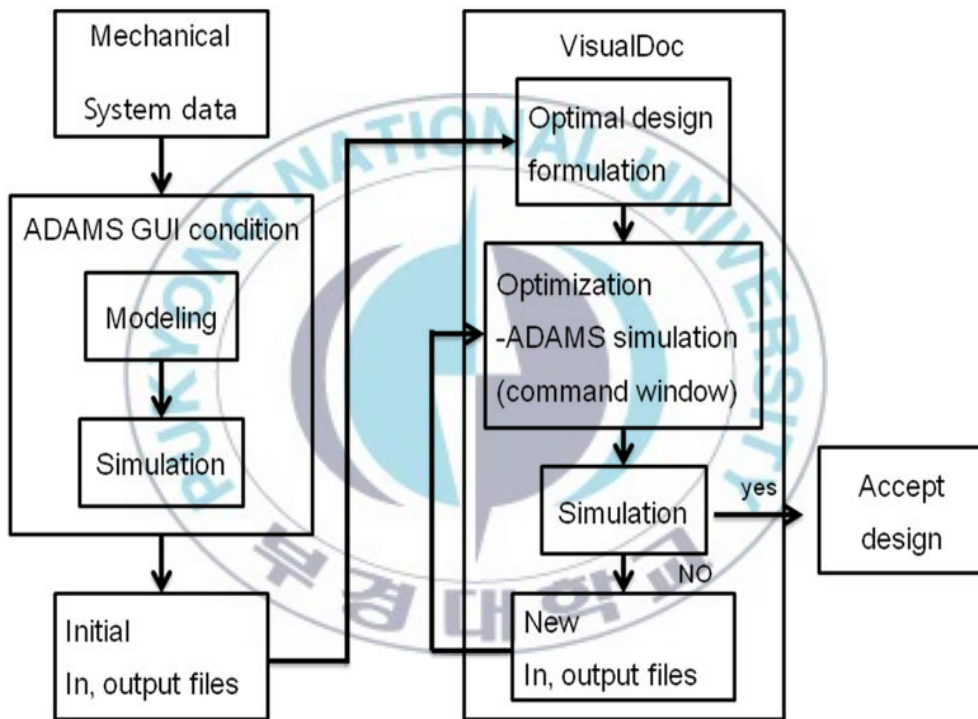


그림. 51 ADAMS와 VisualDOC의 flow chart

5.2.3. 최적설계 정식화

① 목적함수

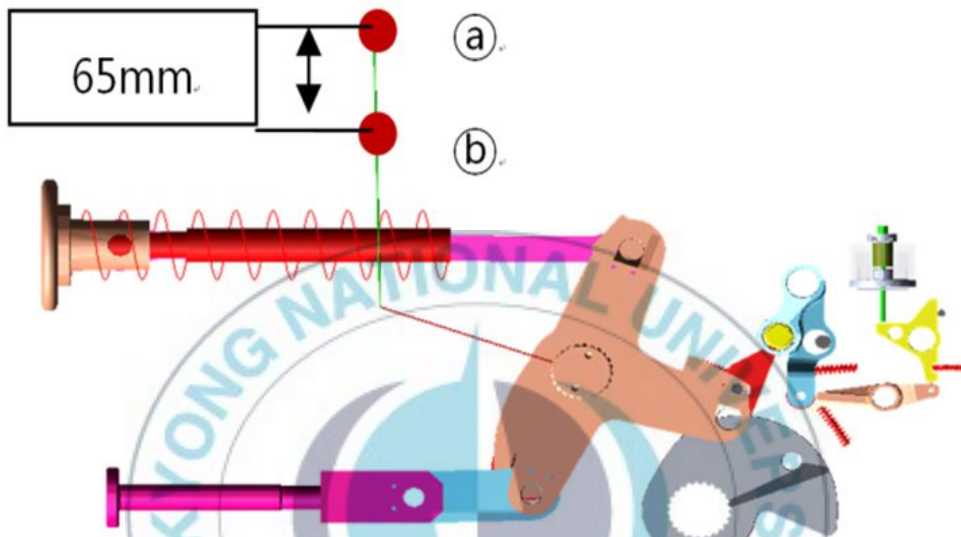


그림. 52 최적설계의 목적함수 정의

차단시간이 최소시간이 되기 위한 목적으로 최적설계를 하였다. Solenoid의 거동시점부터 Link가 a 지점에서 65mm 밑에 있는 b지점까지 도달하는 시간의 최소값을 목적함수로 하였다. 시뮬레이션은 Sensor를 이용하여 Link가 b 지점에 도달하면 시뮬레이션이 멈추도록 설정하였으며, Solenoid의 거동시점은 0.1sec이다. 목적함수는 식(2)와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Objective func} \\
 &= \text{Min}[(\text{시뮬레이션 시간}(T) - \text{Solenoid의 거동시점}(0.1\text{sec})) \times 1000] \\
 &= \text{Min}[(T - 0.1) \times 1000] \quad (2)
 \end{aligned}$$

② 설계변수

5.1절에서 분석한 민감도 해석 결과를 바탕으로 설계변수를 지정하였으며, 3rd latch, 2nd latch의 spring 길이와 Angle, Displacement를 설계변수를 지정하였다. 표 16은 각 설계변수의 Boundary를 나타내었다.

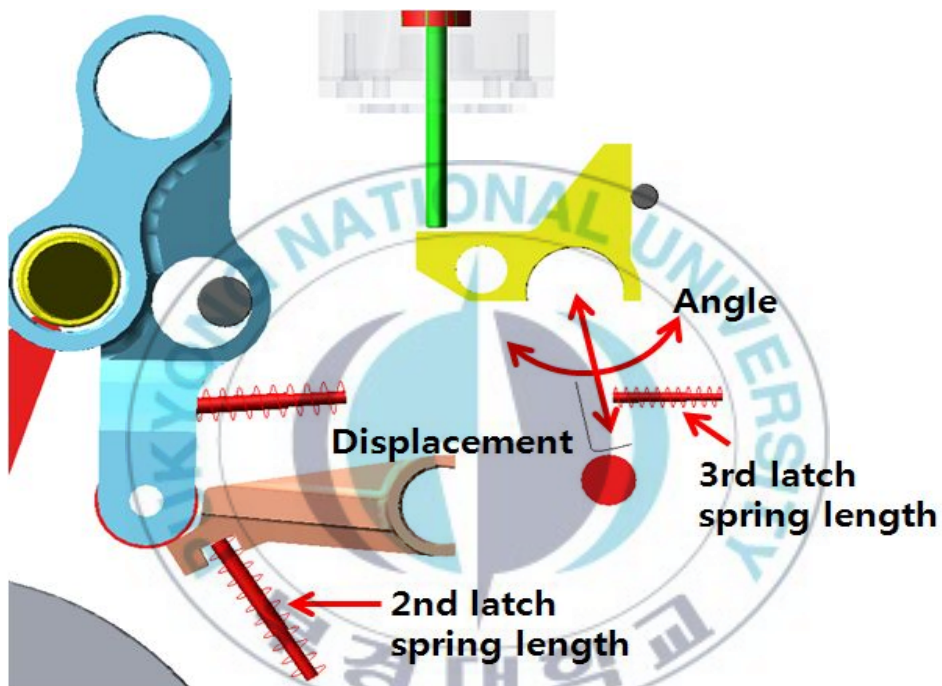


그림. 53 최적설계의 설계변수 정의

표. 16 최적설계의 설계변수 Boundary

Design variable	Low bound	Initial value	Upper Bound
Angle	-10	0	15
Displacement	-10	0	15
3rd latch spring length	40	50	60
2nd latch spring length	52	60	68

③ 조건함수

Opening시 Solenoid와 3rd latch가 Contact이 이루어지지 않으면 Opening이 이루어지면 안 된다. 하지만 여러 가지 조건에 의해서 Contact없이 Opening이 이루어지는 pumping현상이 발생하기 때문에 pumping을 막기 위해서 Solenoid와 3rd latch 사이에 Contact force가 발생할 때만 이루어지도록 조건함수를 선정하였다.

$$-2,100 < \text{Contact force} < -400 \quad (3)$$

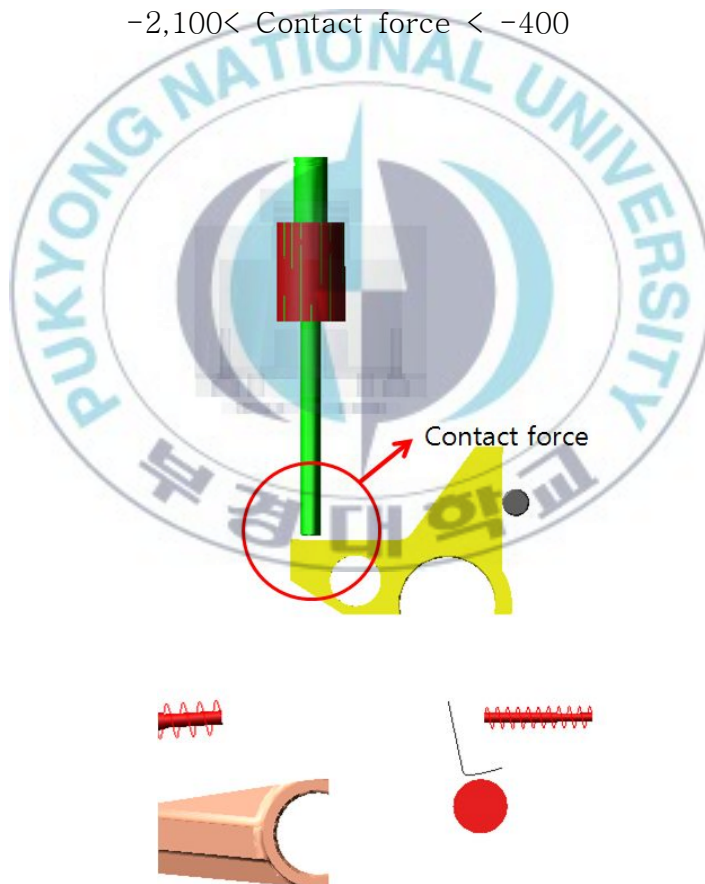


그림. 54 최적설계의 조건함수

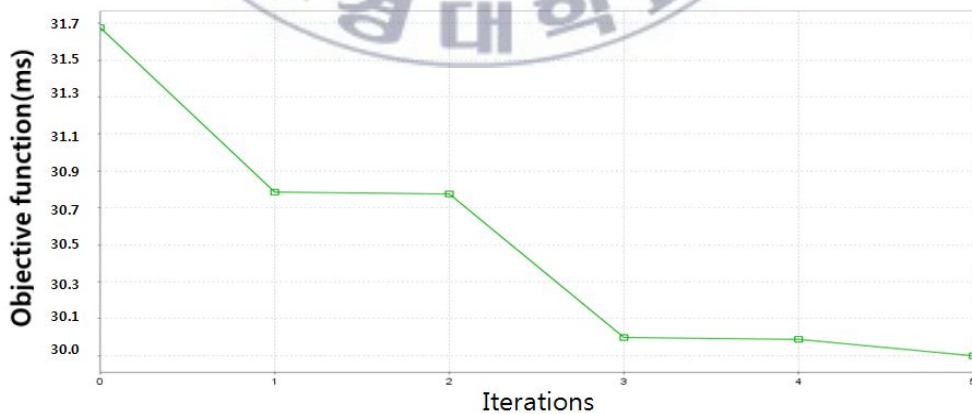
5.2.4. 최적설계 결과

5.2.3절에서 다루었던 목적함수, 설계변수, 제한조건을 가지고 최적설계를 하였다. 최적화 해석을 하기 위한 시뮬레이션은 Opening 과정을 시뮬레이션 하였다. VisualDOC의 GA를 이용하여 최적설계를 수행할 때 종료조건을 표 17에 정리하였다⁽¹⁸⁾.

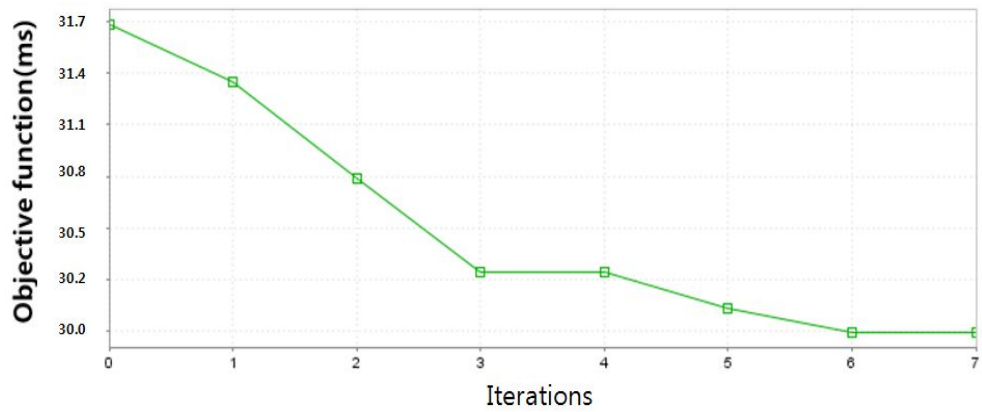
표. 17 VisualDOC의 종료조건

VisualDOC GA	• 목적함수 수렴에 대한 절대치 : $1e-4$ • 목적함수 수렴에 대한 상대치 : $1e-4$ • 설계변수 수렴에 대한 절대치 : $1e-4$ • 설계변수 수렴에 대한 상대치 : $1e-4$ • 목적함수의 값이 5번 반복되는 경우
-----------------	---

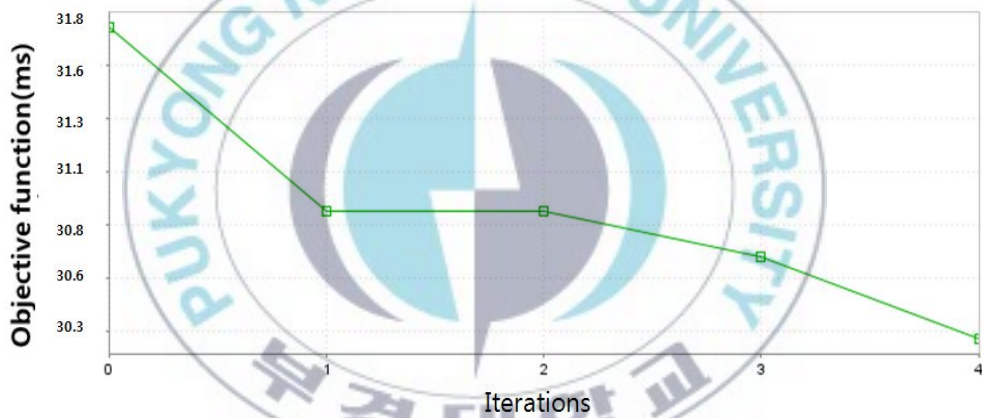
그림. 55에 VisualDOC의 GA를 적용하여 최적설계 과정에서 파라미터 집단 의 크기는 100, 돌연변이율은 0.1, 교배율이 0.8, 0.9, 1.0일 때 목적함수의 변화과정(History)를 도시하였다.



(a) crossover : 0.8



(b) crossover : 0.9



(c) crossover : 1.0

그림. 55 교배율에 따른 목적함수 변화과정

표. 18 교배율에 따른 단축시간

Crossover	단축시간(ms)
1	1.5
0.9	1.7
0.8	1.6

표 18은 각 교배율에 따른 단축된 시간을 나타내었으며, 최적설계를 수행한 결과 교배율이 0.8일 때는 1.6ms가 단축되었고 0.9일 때는 1.7ms, 1.0일 때는 1.5ms가 단축되었다. 교배율이 0.8일 때 가장 많이 단축되었으며, 기존 차단시간에 비해서 약 4.9%가 감소하였다. 표 19는 각 설계변수에 대한 최적값을 나타내었으며, 3rd latch spring 길이는 42mm, 2nd latch spring 길이는 52.4mm로 자유길이가 짧아졌으며, Angle은 (+)방향으로 14.7°변경되었으며, Displacement는 (-)방향으로 9.4mm이동하였다. 그림. 56은 최적설계를 적용하였을 때 2nd latch roller와 3rd latch의 contact 위치를 나타내었다.

표. 19 설계변수의 최적설계 값

Design variable	Optimum value
Angle	14.7°
Displacement	-9.4mm
3rd latch spring length	42mm
2nd latch spring length	52.4mm

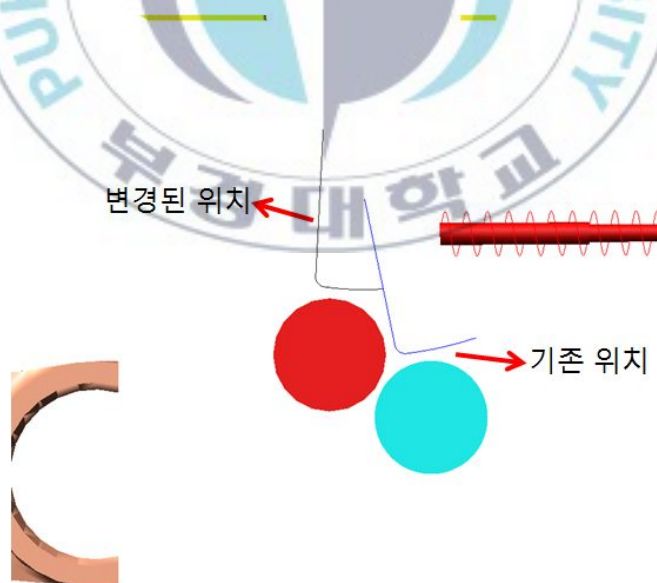


그림. 56 최적설계를 통한 변경된 위치

최적설계를 통하여 나온 값을 적용하여 2nd latch와 3rd latch를 CAD 프로그램을 이용하여 모델링하였을 때 기존에 비해 각 Latch는 무게가 0.01kg 이 감소하였으며, 그림. 57 ~ 58은 최적설계를 적용한 각 latch의 형상을 나타내었다.



그림. 58 변경된 2nd latch

6. 결론

본 연구에서는 가스회로차단기의 차단시간의 단축하기 위해서 다물체동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 동역학 모델링 검증을 위해서 고속카메라 시험을 수행하였으며, 다물체 동역학 해석 결과와 시험의 결과를 비교분석하여 다물체 동역학 모델의 타당성을 검증하였으며 각 Latch의 거동은 실험과 약 1ms 정도 차이를 나타내었지만 Latch 사이의 거동 시간은 동일하였다.

Latch parameter를 최적설계하기 위해서 2nd latch roller와 3rd latch의 Contact이 이루어지는 부분을 Curve로 모델링하여 Angle과 Displacement 변수로 형상변화가 가능하도록 모델링하였다. 차단시간에 영향을 미치는 Latch의 무게, 스프링의 길이, Output lever의 각도변경, Latch parameter의 변수를 민감도 해석을 통하여 차단시간에 미치는 영향을 확인하였으며, 시험을 통하여 민감도 해석결과를 비교하였다. 민감도 해석결과는 실험과 시뮬레이션이 거의 동일 결과를 보여주었다.

최적설계는 동역학 프로그램인 ADAMS와 최적설계 프로그램인 VisualDOC를 연동하여 수행하였다. 가스회로차단기의 차단시간을 최소로 하기 위해서 최적설계를 수행하였으며, Spring의 길이와 Latch parameter의 형상을 결정하는 Angle과 Displacement를 설계변수로 지정하여 수행하였다. 최적설계 결과 차단시간은 약 1.7ms정도 단축되었으며, 약 4.9% 향상되었다.

본 연구를 통해 획득한 동역학적 기술은 향후 새로운 메커니즘의 설계나 기존 제품의 성능 향상을 위한 배경지식으로 사용 할 수 있다.

참고문헌

- 1) 김희진, 신재화, “차단기와 단로기의 보수유지 입문”, 성안당, 1993.
- 2) 장진석, “다물체 동역학 해석 기법을 이용한 스프링타입 진공회로차단기의 최적설계에 관한 연구” 부경대학교 석사학위 논문.
- 3) N. Tsujiuchi, 1995 “Optimum Design for dynamic characteristic of VCB”, Asua-Pacific vib, Conf., pp.810~815
- 4) 안길영, 김수현, “규정된 동적 특성을 위한 회로차단기의 스프링 설계변수의 최적화”, 한국정밀공학회지, 제 21권, 제3호, 2004
- 5) 안길영, 김수현, “스프링 구동 캠에서 마찰과 스프링 운동이 동적 응답에 미치는 영향”, 대한기계학회논문집, A권 27권, 제 2호, pp.247~254, 2003
- 6) A.P. pisano and F. Freudenstein, “An Experimental Analytical investigation of the dynamic response of High-speed Cam-follower system part:2 A combined, Lumped/Distributed parameter dynamic model”, Transaction, ASME-journal of mechanisms, transmission, and automation in design, Vol. 105, pp. 699-704, 1983
- 7) 장진석, 손정현, 유완석, “다물체동역학기법을 이용한 진공회로차단기의 캠윤곽 최적설계”, 대한기계학회논문집 A권, 제 35권, 제7호, pp. 723~728, 2011
- 8) Motion studio User Manual, 2012.
- 9) TEMA User Manual, 2012.
- 10) 진강규, “유전 알고리즘과 그 응용”, 교우사, 2000.
- 11) 공성곤, “유전자 알고리즘 입문”, 진영사, 1997.
- 12) 류연선, 임오강, 박경진, “최적설계입문”, 반도, 1994.
- 13) 김여근, 윤복식, 이상복, “메타 휴리스틱”, 영진문화사, 1997.
- 14) Korea Electrotechnology research institute, development of low surge vacuum contact with Te, research report, 1955
- 15) M.A. Chace, “Analysis of the time dependence of multi-freedom mechanical system in relative coordinates”, Transaction ASME-journal of

Engineering for industry, Vol.89, No.1, pp. 119-125, 1967

- 16) ADAMS user's manual, 2010
- 17) VisualDOC User Manual, VR&D Cop, 2010.
- 18) 옥진규, “유전 알고리즘을 이용한 토션빔 현가장치의 기구학적 최적설계”, 한국자동차공학회, 한국자동차공학회논문집, Vol. 14, No.1, 2006.
- 19) 노경훈, “세탁기용 윤활 마찰 댐퍼의 특성 분석 및 동역학적 모델링” 부산대학교 석사학위 논문.
- 20) Ok, J. K., “Optimum Design of A Torsion Beam suspension Mechanism Using ADAMS and VisualDOC” Pukyong National University, Master, Thesis
- 21) Yoo, Y. M. and Kim, D. K., “Optimal Design of a permanent Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breaker using FEM” Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.1, No.1, pp. 92-97, 2006.
- 22) Yoo, Y. M. and Kim, S. O., “Dynamic Analysis and Design of a High Voltage Circuit breaker with Spring Operating Mechanism” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.21, No.12, pp. 2101-2107, 2007.