

CANFLEX 핵연료다발의 재장전 모의 충격시험 Refueling Impact Test for CANFLEX Fuel Bundle

장석규, 홍성덕, 정장환, 김복득

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

캐나다 AECL과 공동개발한 CANFLEX 핵연료에 대하여 핵연료 재장전시 발생하는 충격하중의 내구성 검증실험을 수행하였다. 실험조건은 실제 노심 운전조건과 보수적 수력 하중을 유발하는 유량조건에서 실시하였다. 장전핵연료의 충돌시 동특성을 분석하기 위하여 고속 촬영 및 속도/변위 측정방법을 사용하였으며 실험후 시편핵연료의 변형도 정밀측정을 통하여 CANFLEX 핵연료의 변형 특성 파악 및 기계적 건전성을 입증하였다. 실험 결과 장전핵연료의 충돌 속도 및 가속거리의 거동특성과 임계값을 구하였다. 또한 실험후 시편핵연료 및 압력관의 변형도는 허용 설계 기준치를 모두 만족하였다.

Abstract

The experimental investigation for the CANFLEX fuel bundle which had been developed under KAERI/AECL joint design project was done for the verification of fuel bundle integrity during refueling. The test was performed under the actual reactor conditions and the coolant flow rate which was conservative one in terms of the hydraulic force. The photographic and the electronic method were used for the measurements of the dynamic characteristics of the moving bundle during refueling test. After the test, the impacted bundles were measured carefully and inspected. The terminal velocity and the acceleration distance of the moving bundle was evaluated from the test. All the deformations of the test bundles and the pressure tube were within the design acceptance criteria.

1. 서 론

CANDU형 원자력 발전소에 있어서 핵연료 교체는 노심의 정상 가동 중에 이루어진다. 즉, 압력관 내에 고온, 고압의 냉각수가 정상 순환하는 상태에서 압력관 한쪽 끝에서 사용후 핵연료가 인출되고 다른 쪽 끝에서 재장전기를 통하여 새로운 핵연료가 장전됨으로써 핵연료 재장전 작업시 노심의 정지 없이 연속적인 운전이 가능하다. 우리 연구소는 캐나다의 AECL과 CANFLEX 핵연료를 공동 개발하였으며 일련의 검증시험[1]을 거쳐 그 성능의 신뢰성과 건전성을 입증한 바 있

다. 본 논문은 새로 개발된 CANFLEX 핵연료에 대하여 핵연료 재장전시 발생하는 핵연료의 충격에 대한 모의실험 수행 및 CANFLEX 핵연료의 기계적 건전성 입증에 대하여 기술하였다. CANDU형 발전소의 기본 재장전 작업은 8개 핵연료 교체(eight bundle shift) 방식이다. 핵연료 정상 재장전 작업시, 재장전기의 새로운 핵연료는 냉각수의 수력 하중에 의하여 상류측 liner hole 영역을 지나 압력관 채널내에 이미 장전되어 있는 정체 핵연료와 충돌하면서 장전을 완료하게 된다. 이때의 충격 하중에 대한 CANFLEX 핵연료의 내구성을 검증하기 위하여 보수적 노심 운전 조건을 적용하여 재장전 충격시험(Refuelling Impact Test)을 수행하였으며 시험후 핵연료의 정밀 측정을 수행하였다.

2. 실험장치

가. CANDU-Hot Test Loop

CANFLEX 핵연료의 충격시험은 소내 CANDU-Hot Test Loop 시설을 이용하여 수행하였다. 이 시험시설은 실제 원자력 발전소의 온도, 압력 및 유량 조건을 모의할 수 있으며 기존의 국산 CANDU-37 핵연료와 새로 개발된 CANFLEX 핵연료의 성능 검증 시험들을 수행한 바 있다. Loop의 구조는 main loop system, feed & bleed system, make-up water system, chemical system, cooling water system 등으로 이루어져 있으며 주펌프의 성능은 $341 \text{ m}^3/\text{hr}$, loop의 설계압력은 176 kgf/cm^2 , 설계온도는 $348 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다. 주순환 loop는 test rig, inlet/outlet header, main heater, main coolant pump, pressurizing pump 등으로 구성되어 있으며 test rig에는 실험 조건의 측정/제어를 위한 온도, 압력 및 유량 측정 계측기들이 설치되어 있다. Loop의 운전[2]은 dual type의 DCS (Distributed Control System) 장비로 수행하였으며 실험 자료의 수집, 처리는 HP3054A data acquisition system을 사용하였다.

나. Test Rig

CANFLEX 핵연료 충격시험을 위한 test rig의 구조는 Figure 1에 나타난 바와 같이 압력관과 inlet/outlet closure 플랜지로 구성되어 있는데 inlet closure 플랜지에는 외부에서 ram shaft와 sensing wire가 packing gland를 통하여 압력관 내부로 관통하여 설치되어 있다. Ram shaft는 장전 핵연료를 재장전기 위치에서 냉각수 유동 구역으로 밀어 넣을 수 있도록 공압 실린더에 연결되어 작동될 수 있게 하였다. Sensing wire는 장전 핵연료의 장전중 속도와 위치를 측정하기 위한 것으로 압력관 내부에서 장전 핵연료의 end plate에 묶어져 inlet closure 플랜지에 가공된 packing gland 구멍을 통하여 외부의 속도/위치 측정기(velocity/displacement transducer)에 연결하였다. 또한 sensing wire에는 ball indicator를 달아 눈금이 새겨진 guide rail을 따라 움직일 때 고속 카메라로 촬영함으로써 장전 핵연료의 거동을 간접 측정할 수 있게 하였다. Gland packing은 고온, 고압의 압력관 내부조건하에서 ram shaft와 sensing wire를 기밀을 유지하면서 핵연료 거동에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 고온에 강하고 윤활성이 있는 graphite packing(Union Carbide)을 특수 제작하여 사용하였다. 압력관의 downstream shield plug는 재장전 상황을 모사하기 위하여 B ram과 shield plug의 질량x강성도(mass x stiffness) 값이 같도록 stainless steel 봉으로 제작하였다.

다. 실험조건

충격시험의 목적은 보수적 원자로 운전 조건하에서 재장전시 핵연료가 손상을 입지 않음을 보여 주는데 있다. 재장전시 핵연료의 충격은 냉각수의 유량과 가속 거리가 증가할수록 커진다. 원자로의 압력관은 장시간 가동함으로써 축방향 creep에 의하여 가속거리가 증가하며 또한 반경 방향 creep에 의하여 유량도 증가하게 된다[3]. 따라서 실제 원자력 발전소에서의 재장전시 핵연료의 충격 속도는 압력관의 creep 정도에 따라 1.4~2.0 m/s 정도이며 과거 CANDU 핵연료의 충격 시험시 다음의 요인을 고려하여 실험을 수행하였다[3].

- 실험자료 측정 오차
- 핵연료 정열 각도 오차
- 실험과 실제의 노심 재질의 성질의 차이

본 실험에서는 최소 1.3의 보수성 factor를 확보하기 위하여 압력관내 핵연료 다발열을 12개에서 10개로 줄여 가속거리와 냉각수 유량을 증가시켰다. 실험결과 1.42의 보수성 factor가 적용됨으로써 원자로 수명동안의 보수적 운전조건을 만족시켰다.

충격시험은 test rig 입구 온도 266 °C, 압력 10.2 MPa 조건으로 압력관 creep 효과를 고려하여 고유량을 유지한 상태에서 수행하도록 정하였으며 실제 실험은 온도 267 °C, 압력 10.24 MPa, 유량 31.44 kg/s 조건에서 수행하였다. 시험시 압력관내 핵연료 장전 각도는 정체 핵연료의 첫 번째와 마지막 핵연료가 75° 시계방향으로 돌아간 위치로 하고 중간의 8개 핵연료와 장전 핵연료는 0°로 장전함으로써 실험의 보수성을 기하였다.

라. 실험자료 측정

모든 loop system의 운전 변수(온도, 압력, 유량)들은 test rig의 계측기를 거쳐CANDU-HTL의 data acquisition system (HP3054A, Hewlett Packard)에서 수집, 처리되었다. 장전 핵연료의 속도 및 변위를 측정하기 위하여 cable extension linear position/velocity transducer (Celsco, PT9301)을 사용하였으며 sensing wire의 ball indicator 거동을 촬영하기 위하여 high speed motion analyser (Kodak, Ekta Pro-1000)를 사용하였다. 또한, 재장전시 충격량을 측정하기 위하여 charge type force sensor (PCB, M218B)를 outlet closure 플랜지 외벽에 장착하였다.

3. 실험 결과 및 토론

가. 장전 핵연료의 동특성

장전 핵연료의 동특성을 파악하기 위하여 가속거리와 속도 및 충격하중을 측정하였다. 이들 동특성 변수들을 측정하기 위하여 전술한 바와 같이 position/velocity transducer, high speed motion analyser 그리고 force sensor가 사용되었다. 실험 수행 초기에 신호 분석 장치의 오작동으로 인하여 핵연료 가속 후 0.1초 동안의 position/velocity transducer 초기자료가 손실되었으나 high speed motion analyser 자료로 보상이 가능하였다. 장전 핵연료의 속도 및 변위 자료는 position/velocity transducer를 사용한 측정자료가 신뢰할만하였으며 high speed motion analyser 측정자료는 시간 분해능은 뛰어나지만 영상의 분해능이 떨어져 ball indicator의 정확한 위치 계산에 제한이 있었다.

1) 가속거리

실험중 장전핵연료는 ram에 의하여 가속 시작지점(liner tube hole 영역)까지 이동한 다음 유체의 수력하중에 의하여 급속히 가속되면서 압력관을 따라 떠나려가 정체핵연료에 충돌하게 된다. 장전핵연료의 총 이동거리는 ram에 의한 등속이동과 수력하중에 의한 가속이동의 합으로 나타낼 수 있다. Figure 2는 high speed motion analyser로 촬영한 영상을 시간대 변위로 나타낸 것으로 ram에 의하여 천천히 이동하던 장전핵연료가 가속영역에서 수력하중을 받아 급격히 속도가 증가하여 정체핵연료와 충돌하면서 장전이 완료되는 것을 보여주고 있는데 충돌시 변위가 순간적으로 커지다 감소하는 것은 sensing wire와 ball indicator의 관성에 의한 것이다. Figure 2에서 장전핵연료의 이동거리는 1.43 m이며 변위의 기울기로부터 가속거리는 1.28 m, ram의 운동속도는 0.1 m/s 로 산출되었다. Figure 3은 장전핵연료의 변위대 속도를 나타낸 것으로 전술한 바와 같이 초기 측정 자료가 손실되었으나 0.1 m/s의 ram 속도를 고려한 선형외삽으로 가속거리가 1.25 m임을 알 수 있다. 또한 position/velocity transducer에 의한 장전핵연료의 총 이동거리는 1.43 m로 측정되어 공간 분해능이 떨어지는 high speed motion analyser 측정 자료보다 position/velocity transducer 측정 자료가 더 정확한 것으로 확인되었다. Figure 4는 압력관 내에서 장전핵연료의 측정된 이동거리와 가속거리를 도식적으로 나타낸 것이다.

2) 충격속도

Figure 3은 position/velocity transducer로 측정한 변위대 속도 측정을 나타낸 것으로 장전핵연료가 급격히 가속되어 가속거리 80 %정도에서 거의 등속도(terminal velocity)에 도달하였으며 충돌후 sensing wire의 관성운동과 장전핵연료의 탄성에 의한 미세한 전후 요동이 있음을 보여주고 있다. 또한 가속중 장전핵연료의 속도 요동을 관찰할 수 있는데 이는 sensing wire의 탄성 요동 및 장전핵연료와 압력관 바닥면과의 단속적 접촉(stick-slip motion)에 의한 영향으로 생각된다. 이러한 속도 요동 및 계기 오차를 고려한 장전핵연료의 충돌속도는 2.85 m/s로 산출되었다.

나. 시편핵연료의 변형도 측정

충격시험 후 정밀 측정을 수행한 시편핵연료는 장전핵연료(# 0, impacting bundle)와 정체핵연료 10개중 첫 번째 핵연료(# 1, impacted bundle)와 열 번째(# 10, last filler bundle) 핵연료이다. 이들 시편핵연료에 대하여 실험 전, 후에 걸쳐 핵연료봉 길이, 접합판 굴곡도, 연료봉 휨, 연료봉 원주길이 등을 정밀측정 하였다. 시편핵연료들의 실험전 및 실험후의 정밀측정 결과는 핵연료 제조 공차를 모두 만족하였으며 따라서 CANFLEX 핵연료의 기계적 건전성을 입증하였다. 본 논문에서는 실험 전, 후의 핵연료봉의 길이 및 접합판 굴곡도 변화에 대해서 기술하였다.

1) 연료봉 길이 변화

Figure 5는 장전핵연료(# 0) 및 정체핵연료(#1, #10)의 실험 전, 후의 43개 연료봉의 길이 변화를 나타낸 것으로 실험전에 비하여 연료봉의 길이가 대체적으로 늘어난 경향을 보이는데 이는 실험전 핵연료 제조 과정에서 용접시 구속되어 휘었던 핵연료봉들이 실험중 장시간 고온 환경에서 핵연료봉이 다소 퍼짐으로써 나타난 결과로 추정되며 이러한 연료봉 퍼짐 현상(annealing)은 다른 고온, 고압 실험 결과[1]에서도 보여지고 있다. # 10 핵연료의 연료봉 길이 증가가 뚜렷하지 않은 것은 상대적으로 큰 수력하중을 받았기 때문인 것으로 생각된다.

2) 접합판 굴곡도 변화

Figure 6은 시편핵연료(# 0, # 1, # 10)들에 대하여 실험 전, 후의 접합판 굴곡도 변화를 101개 지점에 대하여 나타낸 것으로 marked end 에서의 변형도와 plain end 에서의 변형도가 대체적으로 대칭을 이룸을 알 수 있다. 장전핵연료에 있어서는 실험후 충격면(plain end)의 중앙 부분(43번 연료봉 부위)에서 돌출되는 경향을 보였으며 반면, 첫 번째 정체핵연료(# 1)에 있어서 실험후 충격면(marked end)의 중앙 부분(43번 연료봉 부위)이 함몰되는 경향을 보임으로써 충돌 핵연료간에 접합판 중앙 부위에서 하중이 비교적 집중하였음을 보여주고 있다. 이러한 marked end의 중앙 부분(43번 연료봉 부위) 함몰 경향은 # 10 정체핵연료에서도 나타나고 있어 전반적으로 충돌시 충격 하중이 정체핵연료의 접합판 중앙부위에 집중되고 있음을 보여주고 있다. 또한 # 10 핵연료의 plain end측 66번에서 78번까지의 측정자료는 분산이 심하여 측정시 인위적 오차가 발생한 것으로 여겨진다.

3) 압력관 내부 검사

충격시험중 장전핵연료 및 정체핵연료에 의한 압력관 내부 표면의 손상 여부를 판정하기 위하여 videoscope system을 사용하여 실험 전, 후 압력관 내부 표면의 정밀 검사를 수행하였다. 실험 전과 후의 검사 결과를 비교하여 충격시험중 압력관 내부 표면의 손상은 발생하지 않은 것으로 판명되었다.

다. 실험 오차 분석

장전핵연료의 가속거리와 충돌속도는 영상분석방법 및 전기신호 측정방법이 사용되었다. 영상 분석방법으로 high speed motion analyser를 사용하였는데 230 pixel에 1500 mm를 취함으로써 공간 해상도가 ± 6.5 mm이고 시간 분해능은 1000 frame/sec이다. 그림 3으로부터 산출된 가속거리는 가속 기점의 애매함으로 인하여 ± 9.5 mm의 추가적 오차를 발생하였으며 충돌속도가 가지는 오차는 ± 13.0 mm이다. 따라서 high speed motion analyser를 이용한 측정방법은 비교적 오차가 커 보조적 측정수단으로 사용하였다. 전기신호 측정방법은 position/velocity transducer를 이용한 방법으로 측정 신호가 신호처리기(signal conditioner, SE2000)와 신호 분석기(signal analyser, HP35670A)에 의하여 처리된다. 실험전 교정된 신호처리기의 계기오차는 ± 0.01 %, 신호분석기의 계기오차는 ± 0.003 % (표 2)를 각각 가져 장전핵연료의 가속거리 및 충돌속도의 오차는 각각 ± 1.0 mm와 ± 1.0 mm/s로 나타났다. 또 다른 인위적 오차는 sensing wire에 작용하는 압력차 및 packing gland에 의한 마찰력이다. 이 힘이 과도하게 크면 장전핵연료의 충돌속도가 감소하게 되어 실험조건에 영향을 미치게 된다. 실제 실험에서 sensing wire에 미치는 gland packing에 의한 마찰력(2.1 N)은 압력차에 의한 힘과 평형을 이루도록 조정되었으며 실험중 sensing wire에 작용한 힘은 position/velocity transducer와 연결되어 발생한 11.76 N의 장력이었다. 이는 장전핵연료에 작용하는 수력하중의 1.09 %에 해당하는 값으로 무시할 만하였다. 또한 sensing wire의 요동에 의하여 발생한 충돌속도의 오차는 ± 0.032 m/s로 산출되었다. 시편핵연료의 변형도 측정에 사용된 linear gauge 및 height gauge의 측정 오차는 ± 0.005 mm였다.

4 결론

CANFLEX 핵연료의 장전시 충격하중에 대한 건전성 판정을 위하여 보수적 실험조건하에서 CANFLEX 핵연료 충격시험을 수행하였다. 장전핵연료의 동특성을 분석하였으며 시편핵연료(#0, #1, #10)들의 변형도 정밀측정을 통하여 기계적 건전성을 입증하였다. 실험수행 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 장전핵연료의 충돌시 최종속도와 가속거리를 측정하였으며 핵연료의 외관상 변형 및 손상은 발생하지 않았다.
- 장전핵연료가 수력적 하중에 의하여 가속되기 시작한 지점은 상류 liner tube hole로부터 0.13 m되는 지점으로 나타났다.
- 실험후 시편핵연료의 연료봉 길이는 고온 풀림(annealing)으로 인하여 실험전에 비하여 늘어나는 경향을 보였다.
- 장전핵연료와 정체핵연료의 충돌시 하중의 집중 부위는 단면의 중앙 부분으로 파악되었다.
- 실험후 시편핵연료 및 압력관 내벽의 변형도는 설계기준을 만족하였으며 그 기계적 건전성을 유지하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구개발과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

5. 참고문헌

- [1] 장석규 외, "CANFLEX-NU 핵연료다발의 기계적 마모 내구성 특성", 한국원자력학회 '98추계 학술발표회논문집, 1998, 10.
- [2] C. H. Chung, et al., "CANDU Hot Test Loop Operation Manual", FT/OM-HTL-RV1, Feb, 1995.
- [3] I. K. Kim et al., "Refuelling Impact Test Report for KAERI CANDU-Type Nuclear Fuel Assemblies", KAERI/WZ/TR-6013, July 1983.

Table 2 Specifications and Setting Conditions of the Instruments

(a) Dynamic Sensors

Parameter		Sensor	Conditioner	Recorder
Displacement & Velocity	Name	Disp./Vel. Transducer	Signal Conditioner	FFT
	Company	Celeco	Celeco	Hewlett Packard
	Model	PT9301-0100-221-1110	SE2000-4578-3200-2111-8131	35670A
	Serial No.	AB3986	AB3982	-
	Range	-	0 - 100" (0-2540mm) 0 - 4.00 m/s	Max. 102.4 kHz
	Output	-	0 - 10,000 V ± 10,000 V	-
	Sensitivity	9.37 mV/in	-	-
	Accuracy	-	± 1 mV ± 1 mV	± 0.003 %
Impact Force	Name	Impact Sensor	Charge Amp.	FFT
	Company	PCB	PCB	Hewlett Packard
	Model	218B	463A	35670A
	Serial No.	665	670	-
	Range	0 - 5000 lbs (0 - 22.24 kN)	0 - 5000 N	Max. 102.4kHz
	Output		0 - 4.00 V	-
	Sensitivity	18.19 μ C/lb (4.089 μ C/N)	-	-
	Accuracy	-	-	± 0.003 %

(b) High Speed Motion Analyser

Name	Imager		Controller		Processor		Monitor
Company	Kodak		Kodak		Kodak		Panasonic
Model	Ecta-Pro 1000 Intensified Imager		Ecta-Pro 1000 Intensified Imager Controller		Ecta-Pro 1000 Processor		WV-5410
Serial No.	8608		8121		3816		99100521
Specification & Setting Conditions	Lens	Nikon 35mm	Gain	50	Frame Rate	1000 fps	-
	Resolution	240 x 192 Pixel	Gate	200 μ S			
	Exposure	11					

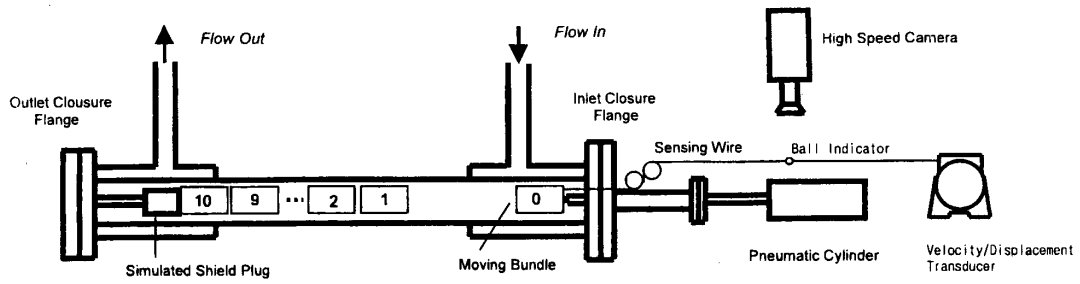


Figure 1. Schematic Diagram of the Impact Test Apparatus

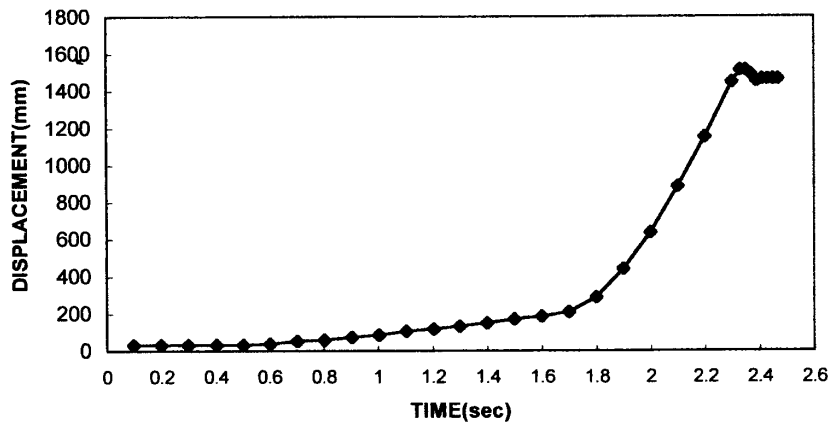


Figure 2. Displacement of the Moving Bundle
(measured by the High Speed Motion Analyser)

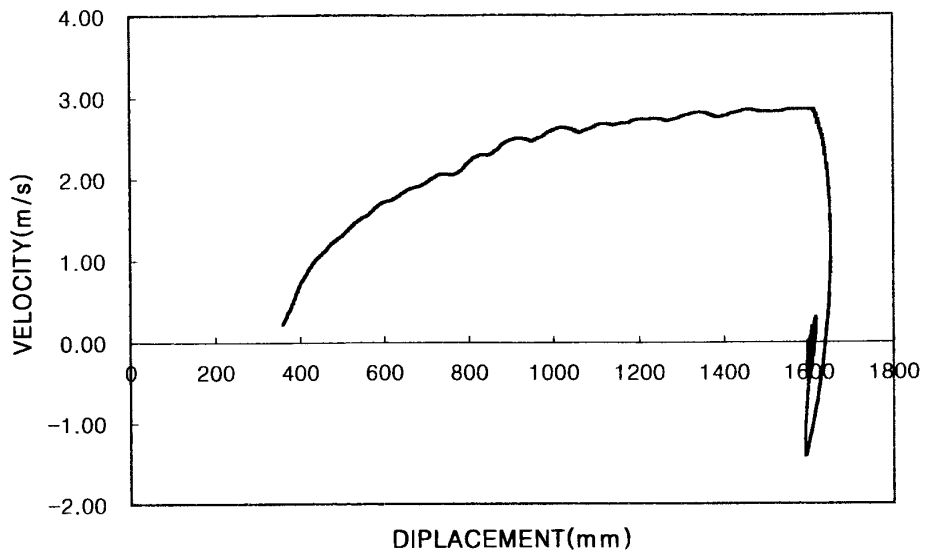


Figure 3. Velocity vs. Displacement of the Moving Bundle (measured by the Position/Velocity Transducer)

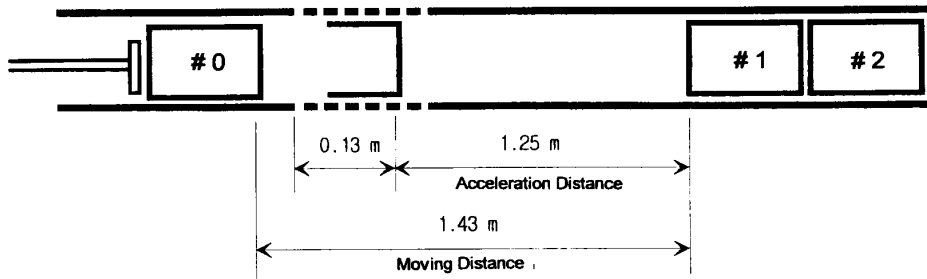
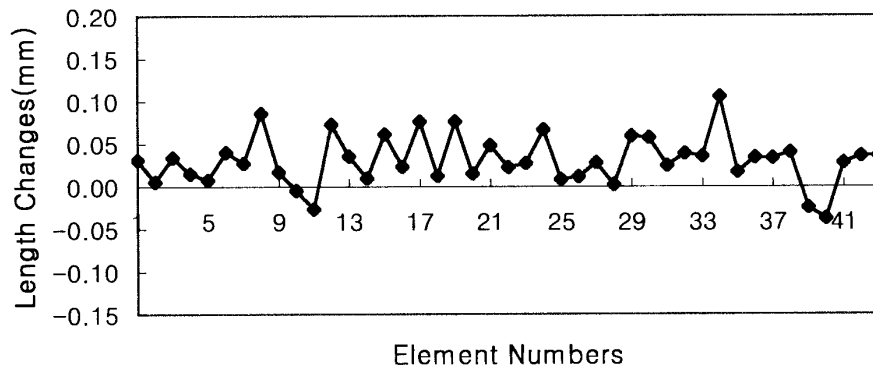
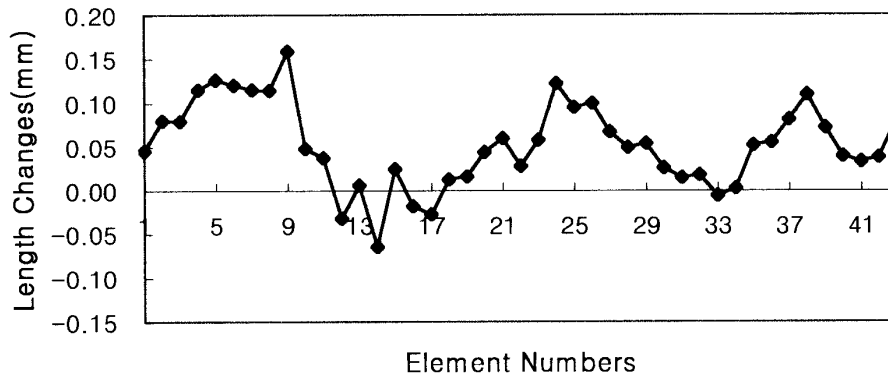


Figure 4. Acceleration Distance of the Moving Bundle

(a) Moving Bundle (# 0)



(b) First Filler Bundle (# 1)



(c) Last Filler Bundle (# 10)

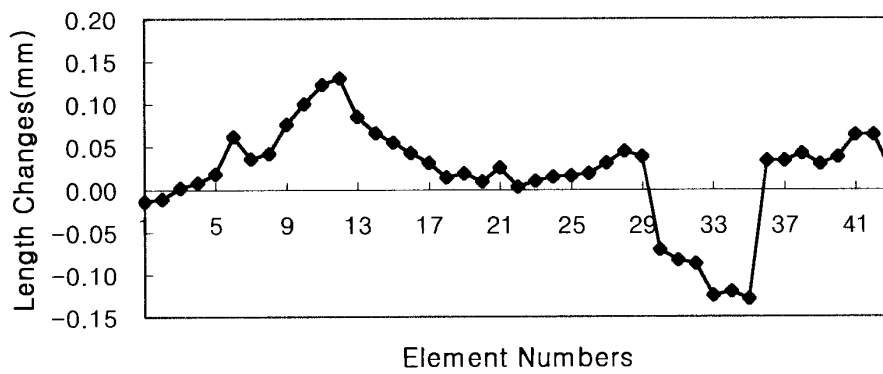
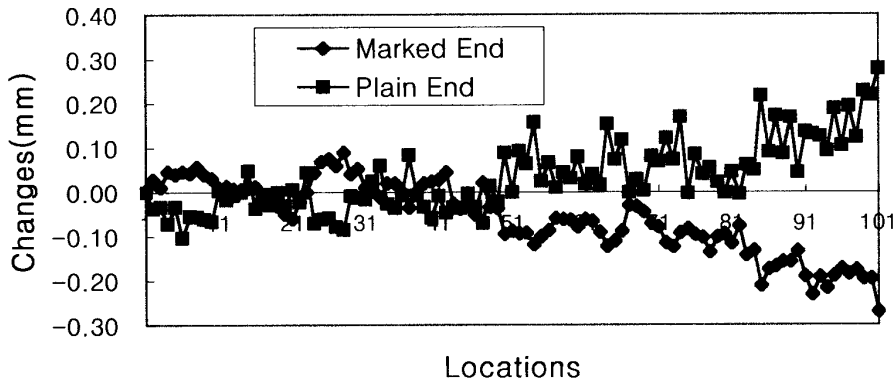
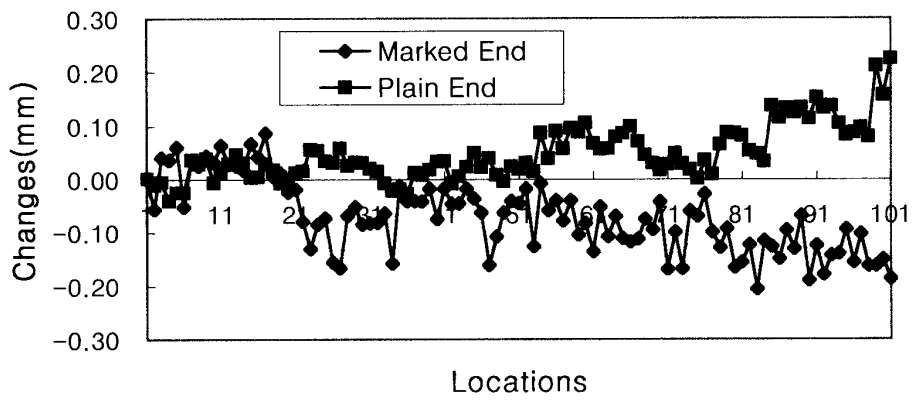


Figure 5. Changes of the Bundle Element Lengths

(a) Moving Bundle (# 0)



(b) First Filler Bundle (# 1)



(c) Last Filler Bundle (# 10)

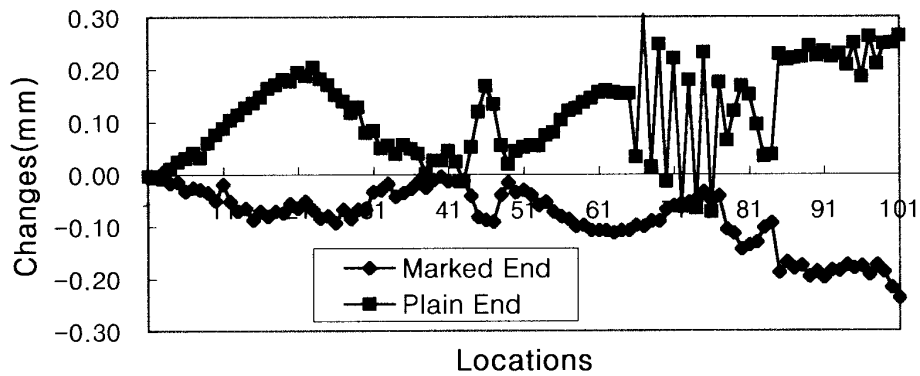


Figure 6. Changes of the End Plate Profiles