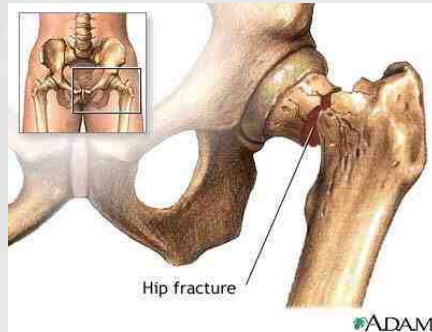


고관절 골절 예방 제품의 정도에 따른 충격 흡수 성능 평가



이한수¹, 이승훈¹, 전은진¹, 유희천¹

¹포항공과대학교 산업경영공학과

AGENDA

▪ Introduction

- 연구 배경
- 연구 목적
- 기존 연구 Limitation

▪ Literature Review

- Hip protector pad 물성 별 충격 평가 성능 조사
- 낙상 시 방향 및 fracture threshold 조사
- 충격 성능 평가 방법 조사
- Hip protector pad 충격 성능 평가 protocol 수립

▪ 충격 성능 평가

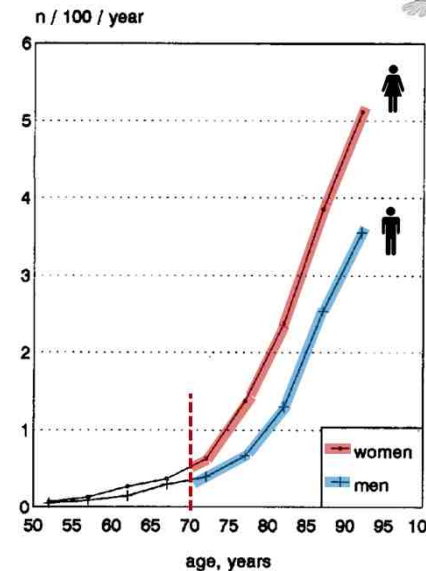
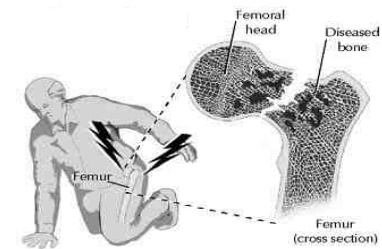
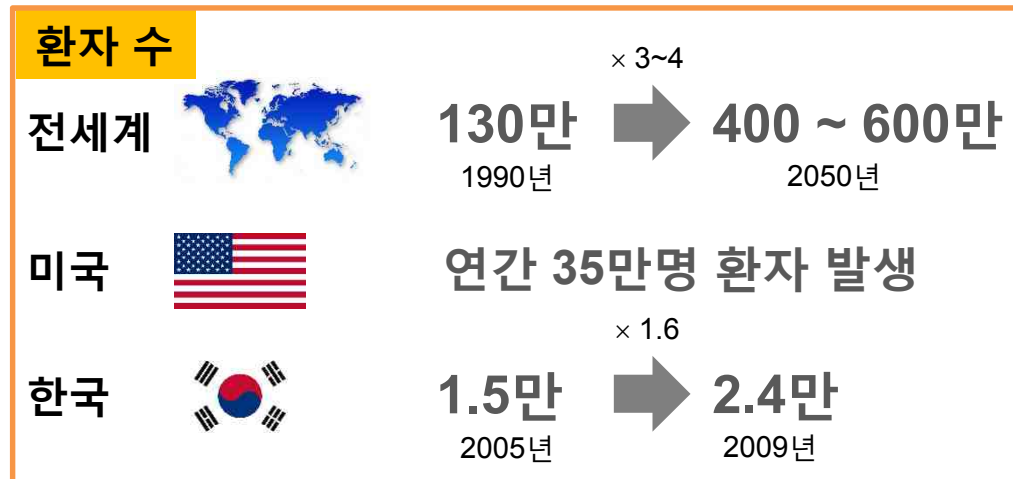
- 평가 장비 설계 및 개발 (Testing simulator)
- 충격 성능 적정 물성 평가

▪ Discussion

▪ 추후 연구

고관절 골절(Hip Fracture) 실태

- 65세 이상 노인 인구: 2030년에는 **2.4배**, 2050년 현재의 **3.8배 증가 예측**
- 고관절 골절 **환자 수 ↑** (Compston, 2008; Empana et al., 2004; 정피현 외, 2007; 통계청, 2009)
- 고관절 골절에 따른 **사회적 비용 ↑** (Burge et al., 2007; 정필현 외, 2007)



약 **5%** hip fractures 발생

약 **3.5%** hip fractures 발생

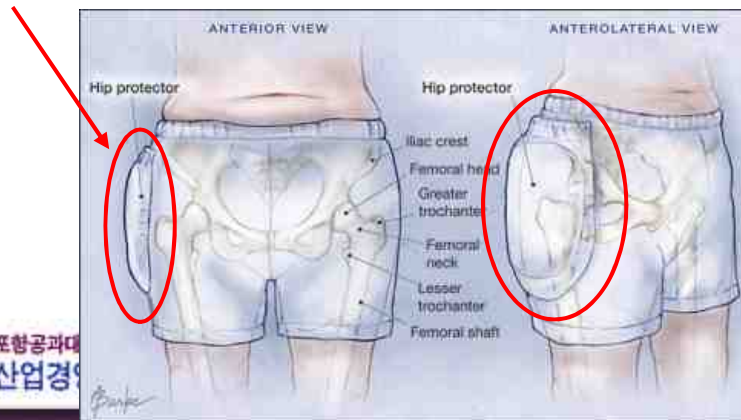
Age ↑ ⇒ incidence of hip fracture ↑
 Life expectancy ↑ ⇒ risk of hip fracture ↑

고관절 골절 예방 제품: Hip Protector

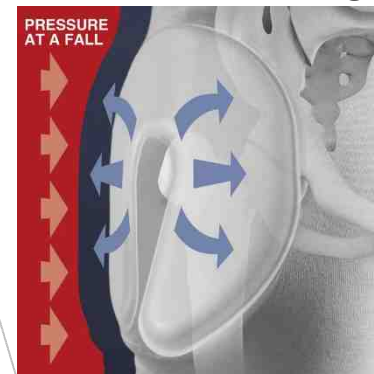
- 착용 효과: 고관절 골절의 위험을 50% 이상 감소(Kannus et al., 2000)
- 비용 절감 효과: 개인별 \$10,000 (Singh, 2004)



soft shell type &
hard shell type



충격 흡수(absorbing)



충격 반사(shunting)



기존 연구 Limitation: Hip Protector 성능 평가 표준화

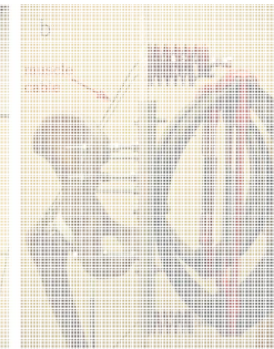
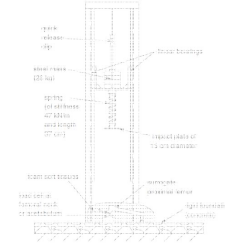
□ Hip protector의 충격흡수 평가를 위한 **표준화된 실험 연구 부족**

- ← 평가 system간의 차이(Mills NJ, 1996; Robinovitch et al., 1995)
- ← 인체 soft tissue 강성(stiffness) 정의(Laing and Robinovitch, 2008)
- ← 인체 soft tissue 두께(van Schoor et al., 2006)
- ← 인체 형상(Mills NJ, 1996; Laing and Robinovitch, 2008)
- ← 충격 속도(impact velocity) 차이(Laing and Robinovitch, 2008)

성능 평가 결과 차이 발생

	Impact force		
	Low	Moderate	High
Pendulum 무게 (kg)	1.4	2.8	4.5
Velocity (m/s)	1.4	1.8	2.3
Height (m)	0.16	0.18	0.26
Impact energy (J)	41	74	110
Peak impact force (N) by calibration	4,330	7,230	10,840
Peak impact force (N) entered into surrogate	3,740	5,600	9,190

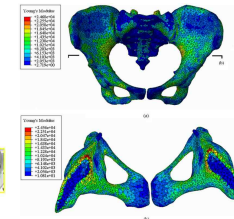
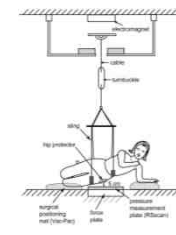
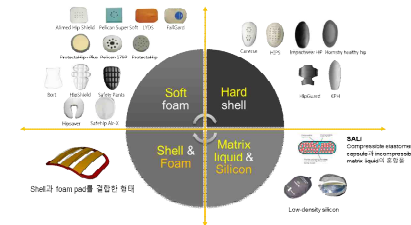
**표준화된 생체역학적
성능 평가 방법 수립 필요**



연구 목표

고관절 골절 예방 제품의 경도에 따른 충격 흡수 성능 평가

- ❑ Hip protector 물성에 따른 pad 조사
- ❑ Hip Protector 충격 성능 평가 protocol 수립
 - ✓ 충격 성능 평가 pad의 물성 선정
 - ✓ 충격 힘의 낙상 방향 및 fracture threshold 선정
 - ✓ 충격 성능 평가 measure 선정
- ❑ Hip Protector 경도별 충격 성능 평가



Literature Review: 방법

❑ 문헌 조사 site: www.hub.sciverse.com

❑ 검색 조건

✓ Title, abstract, keyword search

✓ Conference proceeding 제외

❑ Keywords

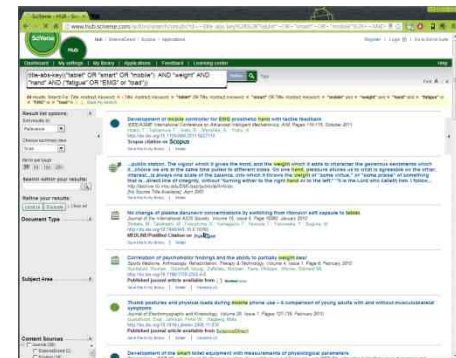
✓ Hip fracture 관련: hip fracture, fall

✓ Hip protector 관련: hip protector, pads

✓ Mechanics 관련: biomechanics, mechanics, shock, impact, attenuate, FEM, FEA, finite element



문헌 검색 site SciVerse



문헌 검색 결과 예

Literature Review: 선별 절차

S1. **Keywords 조합**을 통한 journal paper 검색

Title(("hip fractur*" or "fall*" or "protec*" and ("hip protect*" OR "pads") and ("biomechanic*" or "mechanic*" or "shock" or "impact" or "water*" or "FEM" or "FEA" or "finite element"))

158 건

S2. **Title screening**을 통한 1차 선별



73 건

S3. **Abstract screening**을 통한 2차 선별



21 건

S4. 입수된 full paper에 대한 **관련도 평가**

상: 13건, 중: 12건, 하: 0건
추가 입수: 1건

26 건

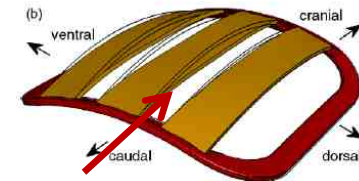
S5. 관련도에 따라 **최종 review 대상 논문 선별**

상: 13건, 중: 7건

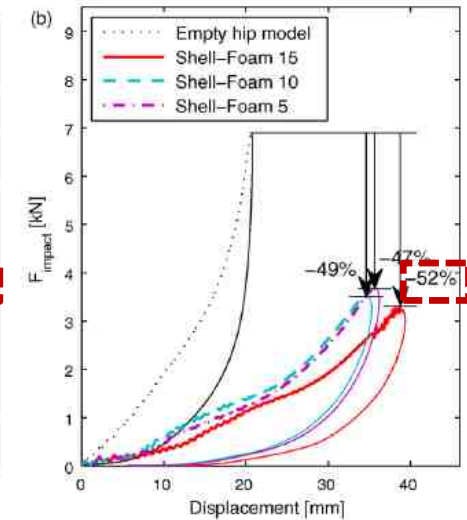
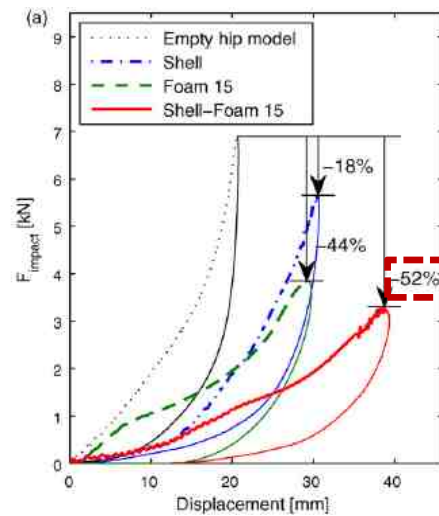
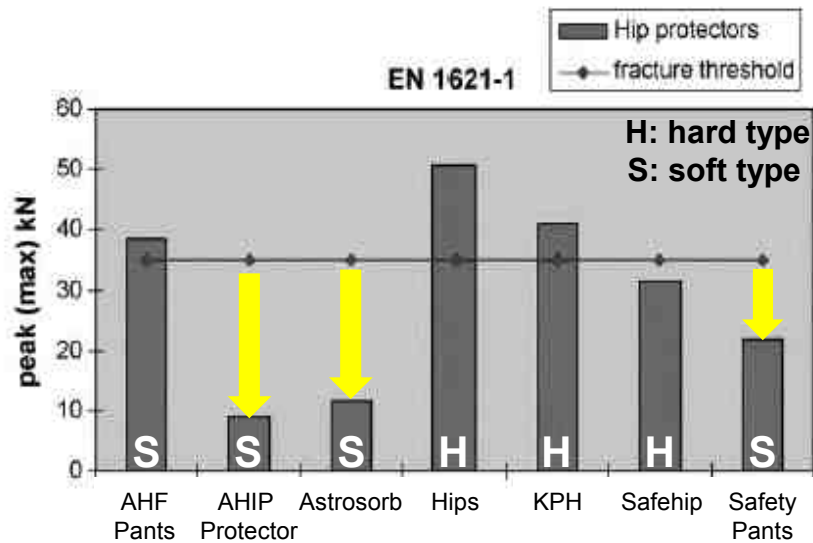
20 건

Hip Protector 물성별 특징

- ❑ **Soft type hip protectors** 충격 흡수 성능이 **약 2배 ~ 5배 우수**(Holzer et al., 2009)
- ❑ **Shell과 foam을 결합한 경우** 충격 흡수 성능 높아짐(Daners et al., 2008)
- ❑ **Foam pad의 두께가 두꺼울 수록** 충격 흡수 성능 높아짐(Daners et al., 2008)



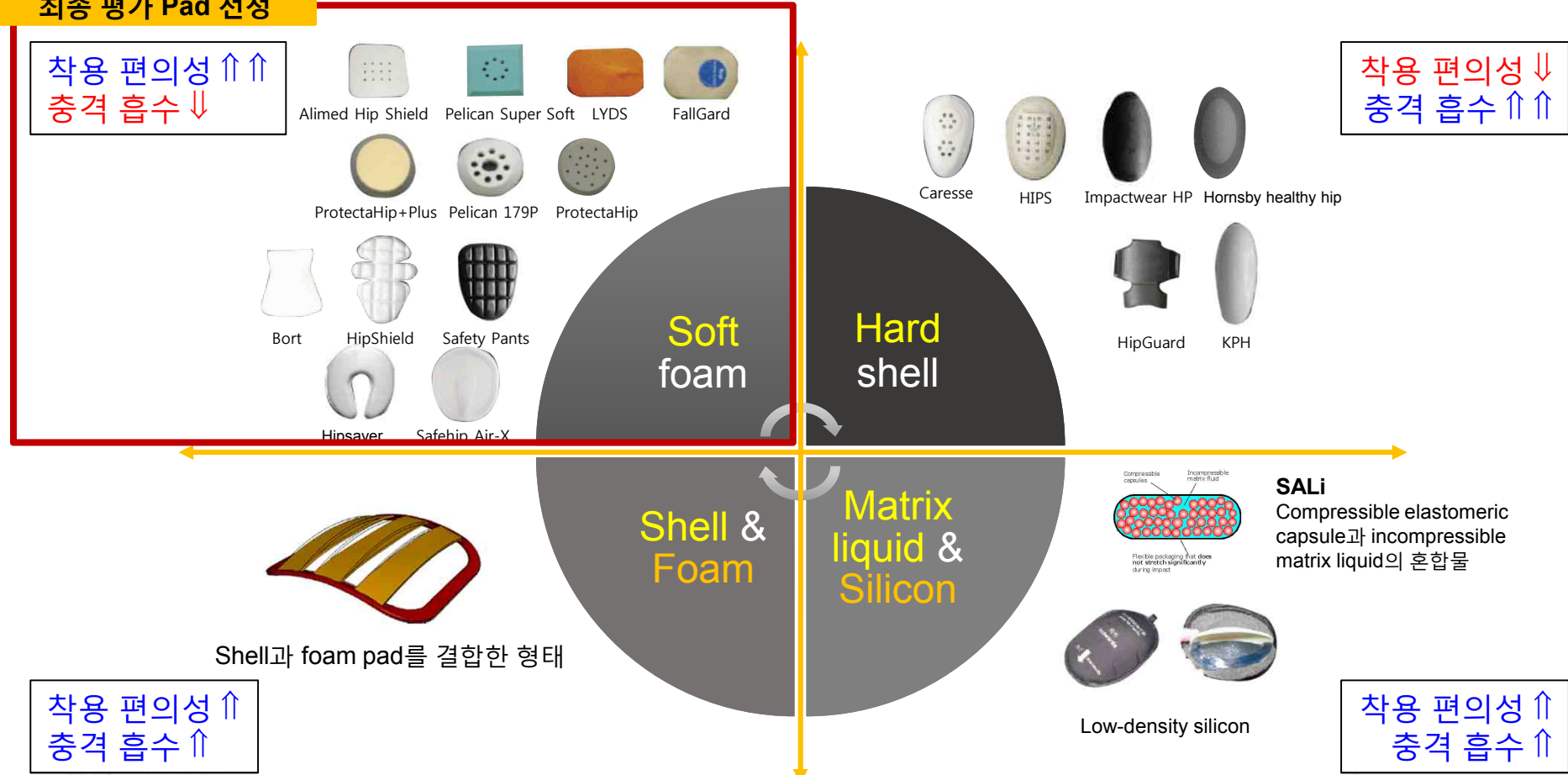
Partially flattened



Hip Protector 물성별 분류

- Hip protector 내부의 Pad 종류에 따라 (1) **Soft shell**, (2) **Hard shell**, (3) **Shell & Foam**, (4) **Matrix liquid & Silicon** 4종으로 분류 가능

최종 평가 Pad 선정



Fracture Threshold & Fall Direction

- 문헌 조사 결과 hip fracture threshold가 최소 2 kN, 최대 10 kN이며 threshold가 3.1 kN인 문헌이 가장 많음; Elderly person일수록 threshold 수치가 낮음
- 낙상 방향의 경우 Choi et al. (2010), Sze et al. (2008)을 제외하고 주로 lateral 방향으로 실험함 → 최종적으로 lateral 방향의 낙상으로 실험 설계

저자 (년도)	Participants	Threshold	낙상방향
Choi et al.(2010)	✓ 14 young females (18~35 age) ✓ 2BMI groups, 큰 골격계 환자 제외	-	- lateral - 측면에서 20도 앞(anterolateral) - 측면에서 20도 뒤(posterolateral)
Sze et al. (2008)	68 females (mean: 75.4, SD: 6.2)	Low impact: height 0.15 m(7kN) High impact: height 0.25 m(10kN)	waist & hip circumference
Robinovitch et al. (2009)	-	Elderly person: 3.77kN (female: 2.966kN; male: 4.22kN) Young person: 7.55kN	Lateral
Derler et al. (2005)	10 human subject	2.5kN	Lateral
Holzer et al. (2009)	-	3.6kN	Lateral
Laing et al. (2008)	10 old female	Stiffness 90~100N	Lateral
Kannus et al. (1999)	-	3.1kN	Lateral
Lie et al. (2013)	-	3.472kN	Lateral
Nabhani and Bamford et al (2002)	-	2.5kN	-
van Schoor et al. (2006)	-	3.1kN	Lateral
Nankaku et al. (2005)	-	2kN~4kN	lateral
Kanus et al. (2006)	-	2.83kN in older women 4.38kN in older man	-
Bulat et al. (2008)	-	3.1kN	lateral

낙상 시 고관절 골절 발생 힘

- 고관절 강도 → Hip protector의 고관절 골절 예방 여부 파악에 활용 가능
 - ✓ 연령: 60 ~ 80 대의 경우 10 ~ 40 대 보다 약 50% 낮음(old: 3, 770 N, young: 7,550 N)
 - ✓ 성별: 여성의 경우 남성보다 약 30% 낮음(Female: 2,966, male: 4,220 N)
- ⇒ 여성 고령층의 고관절 강도를 hip protector 평가 기준으로 활용 가능

Table. Comparison of strength of the cadaveric proximal femur among studies

Author	Subject age (Mean ± SD, years)			Femur strength (Mean ± SD, N)		
	Female	Male	Mixed	Female	Male	Mixed
Lotz and Hayes, 1990			69 ± 9			2,110 ± 1,060
Courtney et al. 1994			74 ± 7			4,100 ± 1,600
Bouxsein et al. 1995			76			3,680 ± 1,540
Pinilla et al. 1996			79 ± 11			4,050 ± 900
Cheng et al. 1998	71 ± 15	67 ± 15	69 ± 15	3,140 ± 1,240	4,630 ± 1,550	3,980 ± 1,600
Bouxsein et al. 1999	82 ± 13	78 ± 10	81 ± 12	1,997 ± 1,127	3,593 ± 1,614	2,636 ± 1,534
Keyak et al. 2000			70			2,400
Lochmuller et al. 2002	82 ± 9	76 ± 11		3,070 ± 1,060	4,230 ± 1,530	
Eckstein et al. 2004			79 ± 11			3,925 ± 1,650
Heini et al. 2004			76 ± 7			2,499 ± 695
Manske et al. 2006			69 ± 16			4,354 ± 1,886
Pulkkinen et al. 2006	82	79	81	2,821	4,209	3,472
Bouxsein et al. 2007			81 ± 11			3,353
Pulkkinen et al. 2008	82 ± 11	78 ± 11		3053 ± 976	5506 ± 1374	
Average	80	76	76	2,827	4,375	3,392

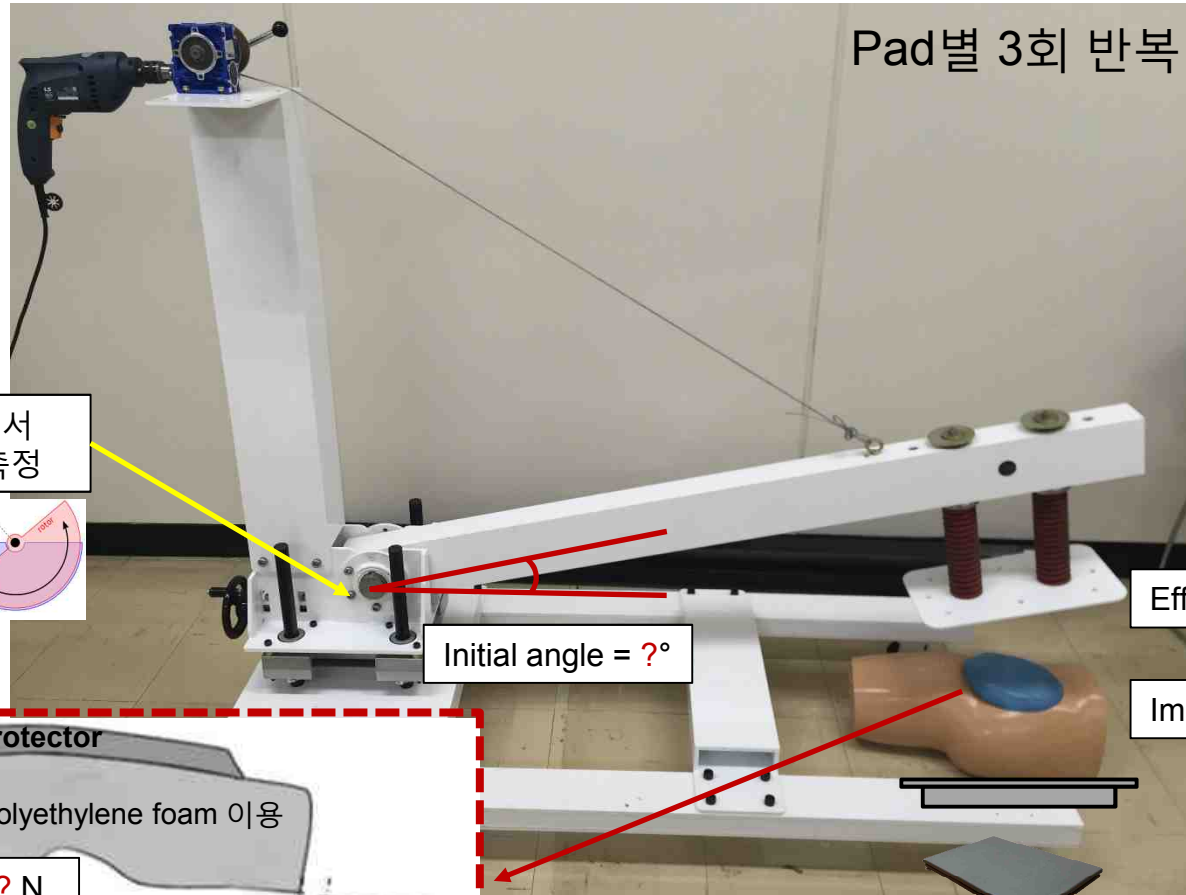
Hip Protector 충격 성능 평가 방법

	피험자 대상 평가	FEM 기반 평가	Simulator 평가
그림			
방법	<ul style="list-style-type: none"> 피실험자를 직접 바닥에 낙상시켜 성능 평가 수행 	<ul style="list-style-type: none"> 유한요소해석을 통해 hip model에 작용하는 force 측정 	<ul style="list-style-type: none"> 해부학적 특성을 고려한 시편 사용하여 worse case fall 재현
특징	<ul style="list-style-type: none"> 인체특성(e.g., 인체크기, BMI)을 고려한 평가(Choi et al., 2010) 사용자 의견을 수집할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 다양한 조건(mass, impact velocity, soft tissue stiffness, impact force)에서 simulation 가능(Laing et al., 2008) 	
한계점	<ul style="list-style-type: none"> Worse case fall 재현 불가 정확성 및 반복성 ↓ 위험성이 따르므로 고령자 대상으로 평가 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> 인체의 복잡한 해부학적 특성 고려 어려움 다양한 낙상 자세, 낙상 방향 고려 어려움 	

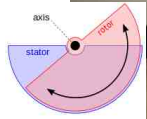
두 가지 방안 선정

⇒ 실제 낙상이 발생하는 상황을 고려한 실험 조건을 정의함

충격 성능 평가: 평가 장비 설계



회전 각도 측정 센서
→ 각도, 각속도 측정

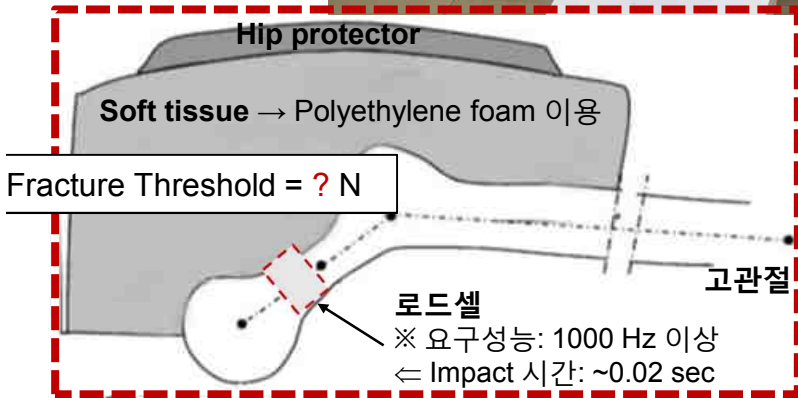


Pad별 3회 반복

Initial angle = ?°

Effective mass = 191.3 N

Impact Velocity = ? m/s

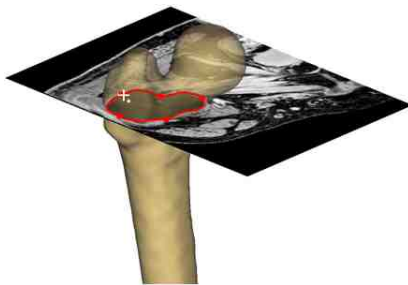


Total force 측정

생체역학적 성능 평가를 위한
적정 조건을 수립함

충격 성능 평가: 시편 제작 (1/2)

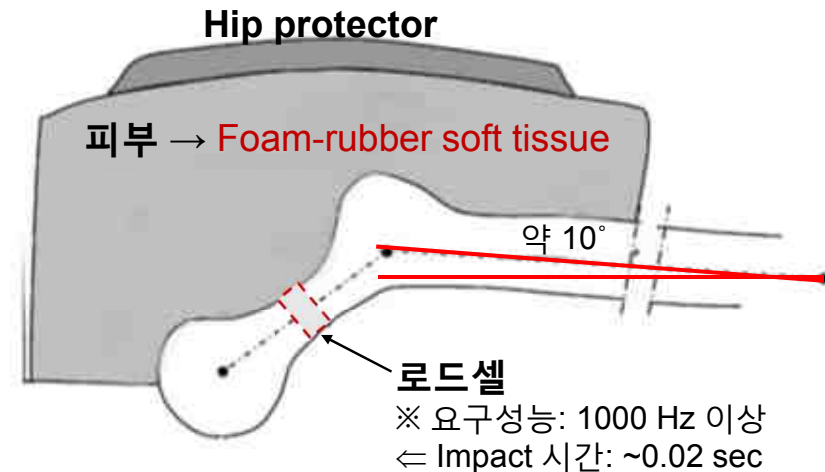
- 로드셀이 삽입된 고관절과 피부층으로 이루어진 시편 제작
 - ✓ 고관절 형상: (1) 3D reconstruction vs. (2) 상용제품 구매 (van Schoor et al., 2006)
 - ✓ **Durable material** (e.g., aluminum, steel) 사용 ← 뼈의 **미세한 deformation**은 고려 ×
 - ✓ Supporting femur: **proximal point**에서만 지지 OR distal & proximal point에서 지지
← 충격 실험에서 femur의 distal point에는 peak force가 많이 전해지지 않음
 - ✓ Femur의 각도: **약 12°도 내회전**, 지면과 **약 10°** (Pinilla et al., 1996; Robinovitch et al., 1995)



1. 3D reconstruction



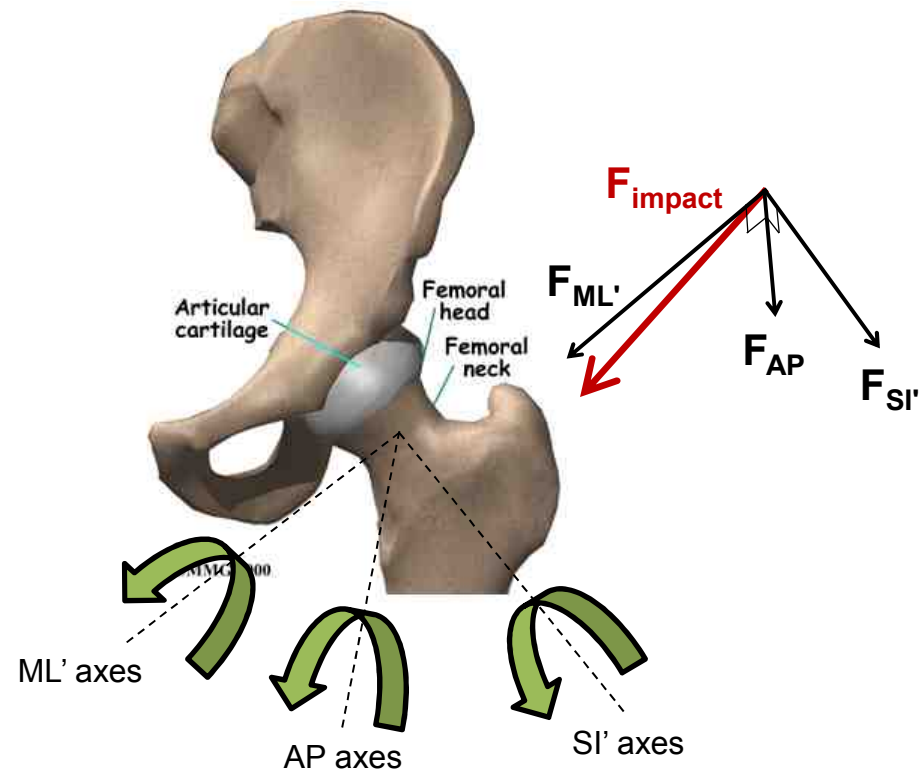
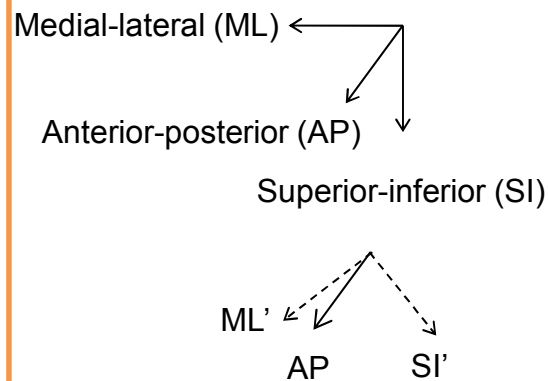
2. 상용 제품 구매



충격 성능 평가: 시편 제작 (2/2)

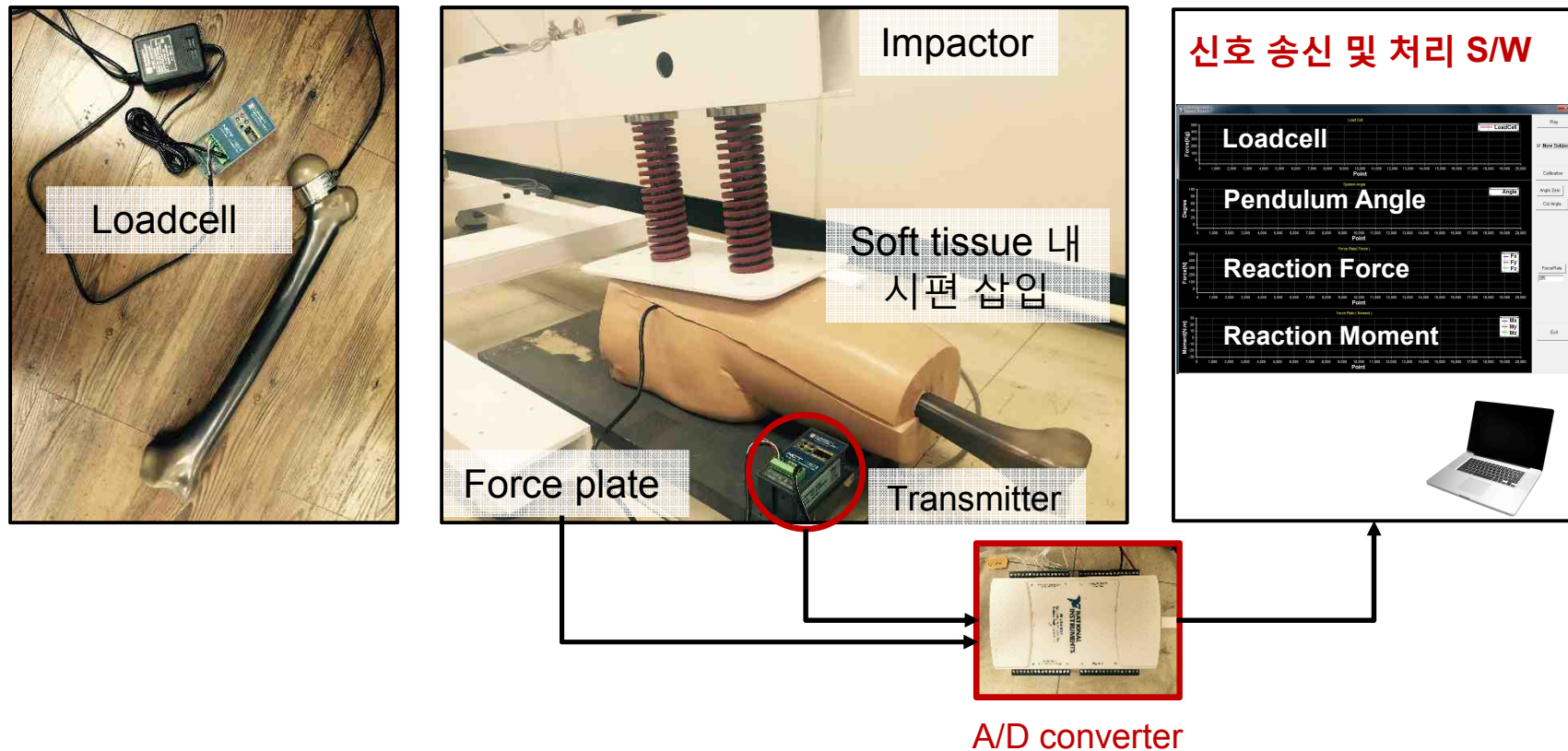
- Femoral neck에 작용하는 stress의 방향성 고려에 따라 로드셀 선택 가능함
 1. Major stress만 고려 → Uni-axial load sensor
 2. Major & minor stress 모두 고려 → Tri-axial load sensor

Axis def.



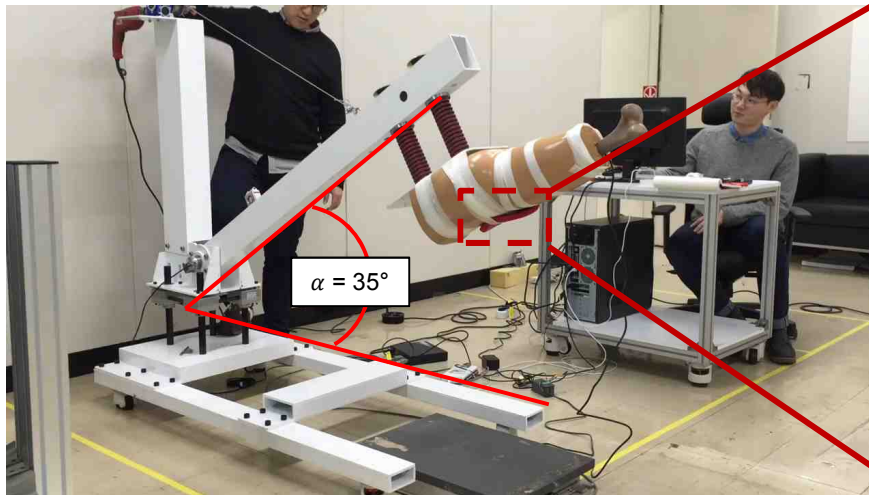
충격 성능 평가: 평가 장비 개발

- ❑ Impactor를 사용하여 시편에 낙상 시 발생할 수 있는 충격 모사
- ❑ Femoral neck force, total force, pendulum angle 실시간 동시 측정

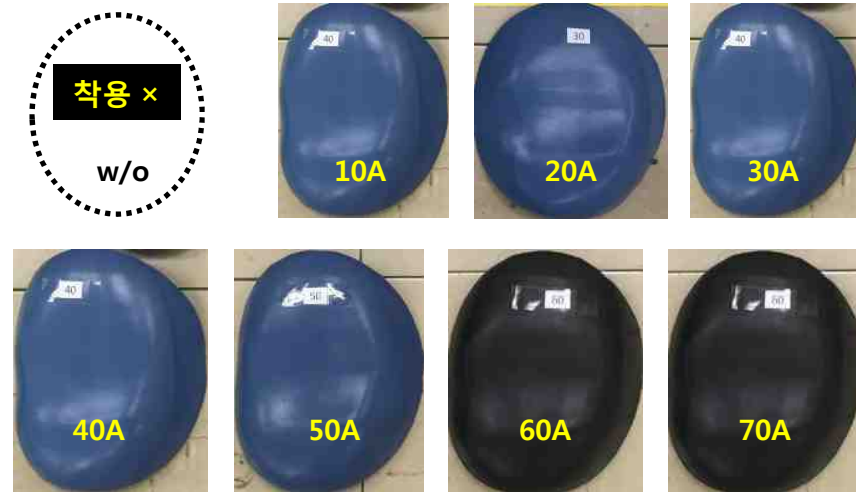


충격 성능 평가: 적정 물성 파악

- 목적: Hip protector pad **경도별 충격 흡수 성능 파악**
- 평가 대상: **7종** - 무착용, Shore A 경도 (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70)
- 평가 방법
 - ✓ Impact simulator의 **pendulum** 각도 **35°** 에서 낙하(3회 반복)
 - ✓ Measure: (1) femoral impact force, (2) % force attenuation, (3) fracture risk



Pendulum-based impact simulator



경도별 hip protector 7종

충격 성능 평가: Measures

1. Femoral impact force: femoral neck에 발생하는 최대 힘 (fracture threshold 이상에서 골절)

Author	Subject age (Mean ± SD, years)			Femur strength (Mean ± SD, N)		
	Female	Male	Mixed	Female	Male	Mixed
Lotz and Hayes, 1990			69 ± 9			2,110 ± 1,060
Courtney et al. 1994			74 ± 7			4,100 ± 1,600
Bouxsein et al. 1995			76			3,680 ± 1,540
Pinilla et al. 1996			79 ± 11			4,050 ± 900
Cheng et al. 1998	71 ± 15	67 ± 15	69 ± 15	3,140 ± 1,240	4,630 ± 1,550	3,980 ± 1,600
Bouxsein et al. 1999	82 ± 13	78 ± 10	81 ± 12	1,997 ± 1,127	3,593 ± 1,614	2,636 ± 1,534
Keyak et al. 2000			70			2,400
Lochmuller et al. 2002	82 ± 9	76 ± 11		3,070 ± 1,060	4,230 ± 1,530	
Eckstein et al. 2004			79 ± 11			3,925 ± 1,650
Heini et al. 2004			76 ± 7			2,499 ± 695
Manske et al. 2006			69 ± 16			4,354 ± 1,886
Pulkkinen et al. 2006	82	79	81	2,821	4,209	3,472
Bouxsein et al. 2007			81 ± 11			3,353
Pulkkinen et al. 2008	82 ± 11	78 ± 11		3053 ± 976	5506 ± 1374	
Average	80	76	76	2,827 N	4,375	3,392

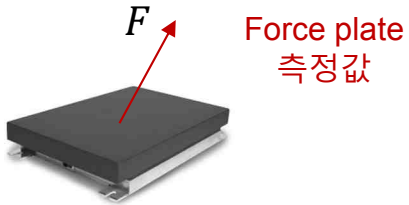
2. % Force attenuation: pad에 의한 femoral impact force 흡수율 $\Rightarrow \left(\frac{F_{unpadded} - F_{padded}}{F_{unpadded}} \right) \times 100$

3. Fracture risk (Φ): femoral impact force 대비 fracture threshold 비 $\Rightarrow \frac{\text{Femoral impact force}}{\text{Fracture threshold}}$

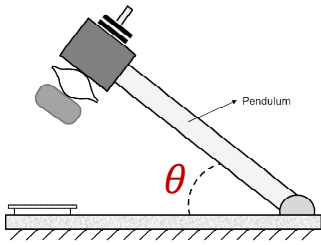
Where, $\Phi \geq 1$ Fracture ○
 < 1 Fracture ×

충격 성능 평가: 분석 방법

Total impact force



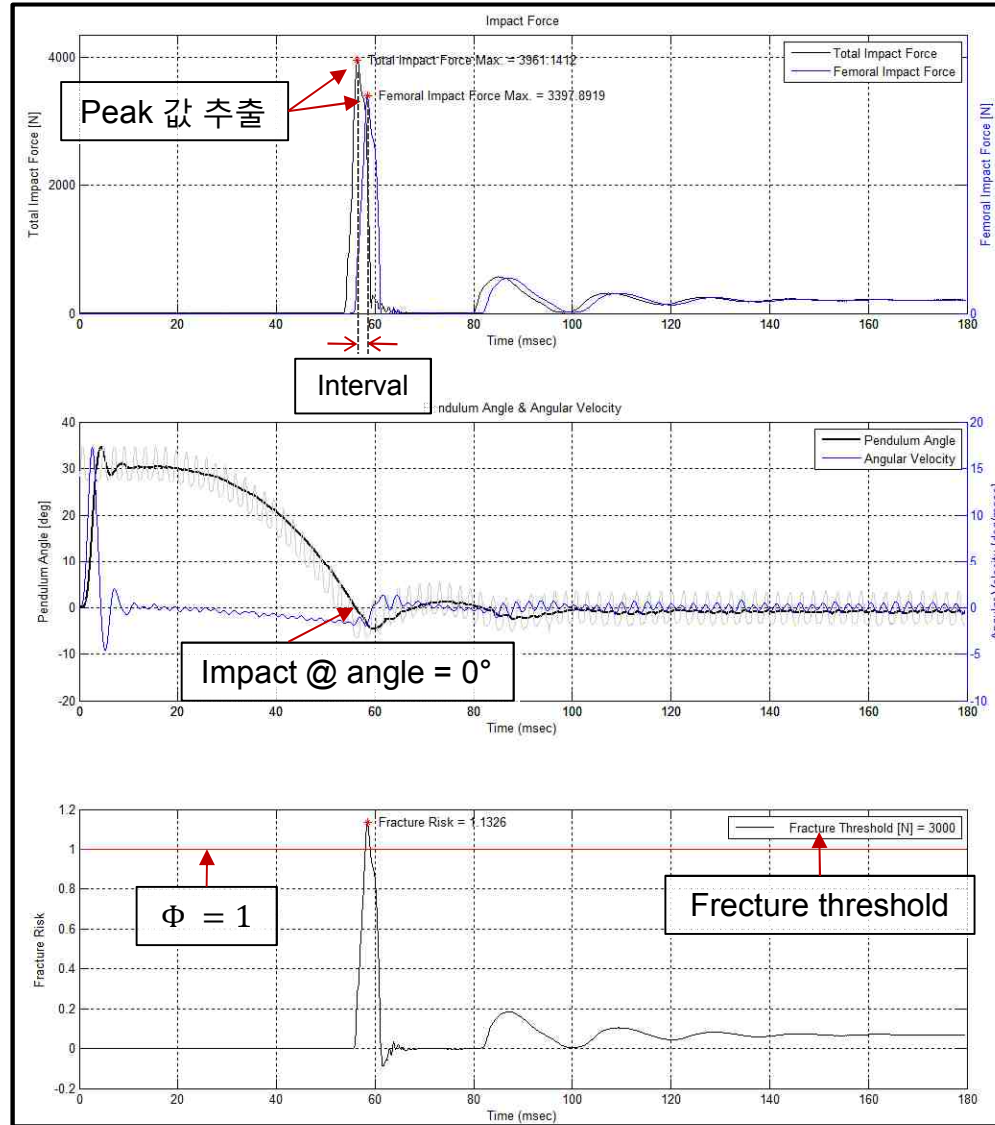
Pendulum 각도



Fracture risk (Φ)

$$\Phi = \frac{\text{Femoral impact force}}{\text{Fracture threshold}}$$

Where, $\Phi \geq 1$ Fracture O
 < 1 Fracture x

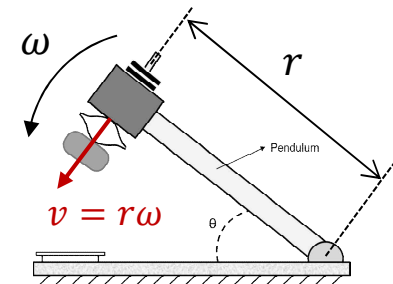


Femoral impact force



로드셀 측정값

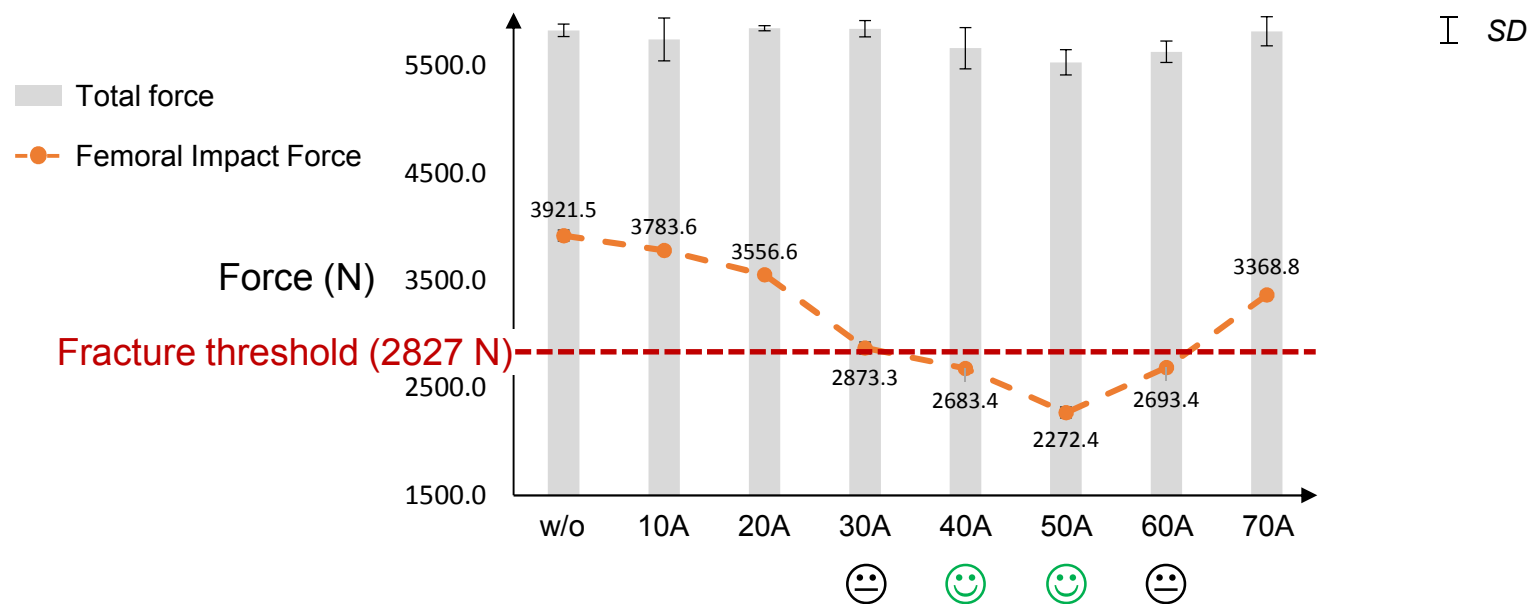
Impact velocity



- $v = 2 \text{ m/s}$ weak fall
- $v = 3 \text{ m/s}$ moderate fall
- $v = 4 \text{ m/s}$ severe fall

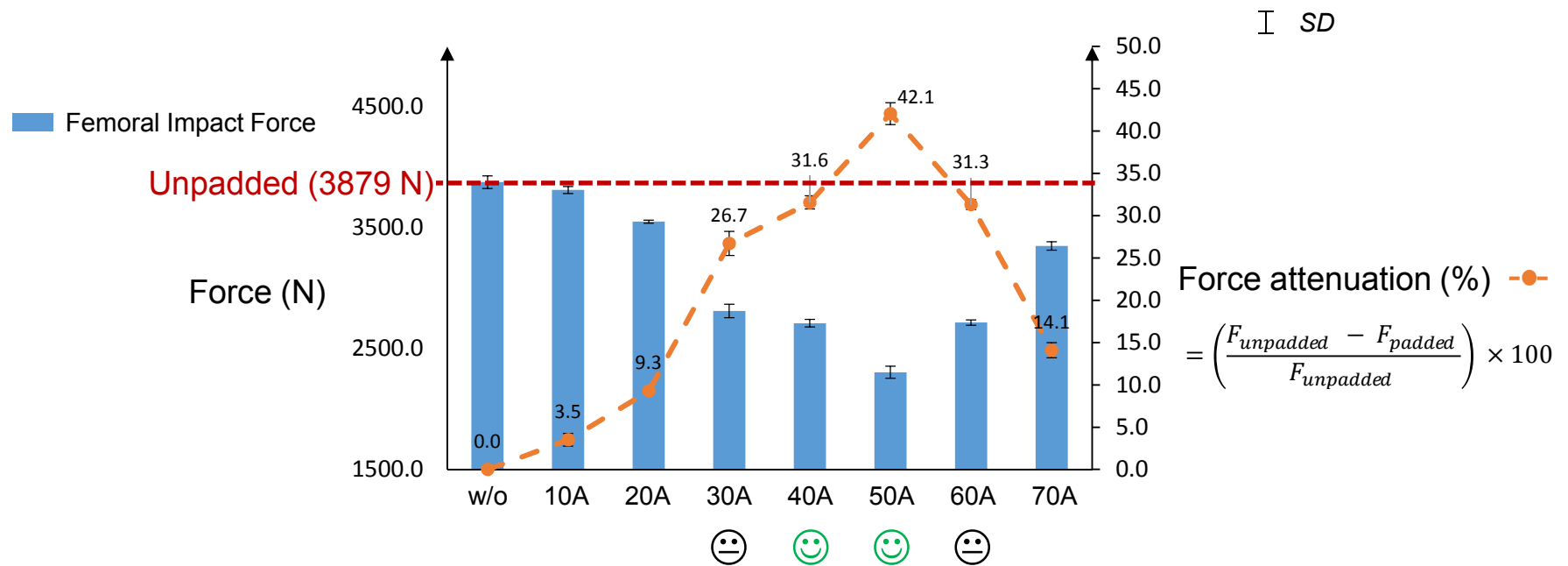
충격 성능 평가 결과: Femoral Impact Force

- W/O pad: femoral impact force (3921.5 N)는 total force (5834 N)의 약 67%
- 여성 고령층의 fracture threshold 보다 낮은 경우: 50A < 40A < 60A
- Femoral impact force는 50A 경도의 pad에서 2272.4 N으로 가장 낮은 femoral impact force를 보임



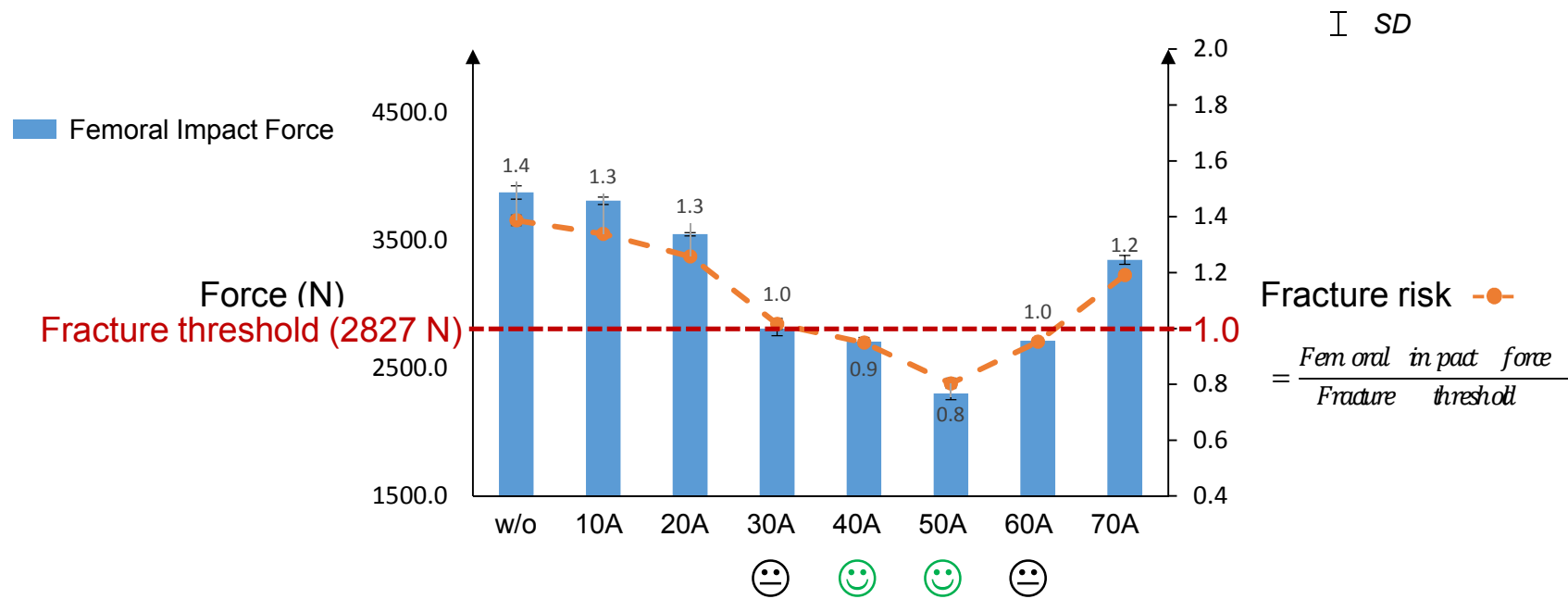
충격 성능 평가 결과: % Force Attenuation

- 충격 흡수율은 50A 정도의 pad에서 42.1%, 40A 정도의 pad에서 31.6%임 → 50A 정도의 pad에서 가장 큰 충격 흡수율을 보임



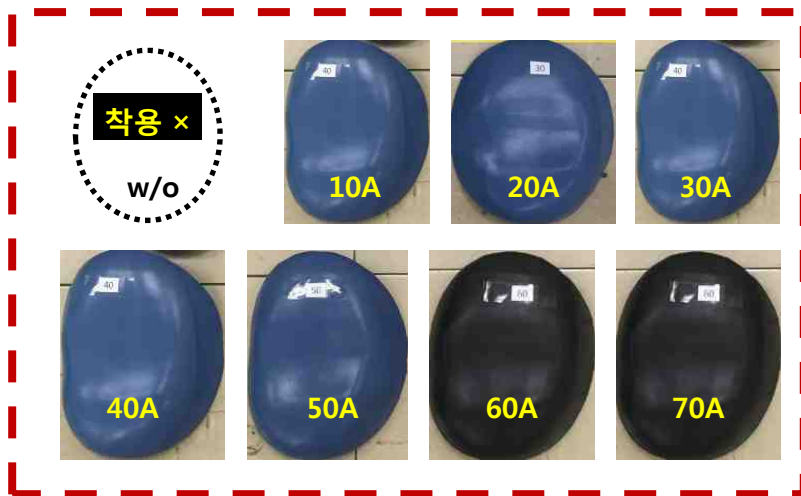
충격 성능 평가 결과: Fracture Risk

- Fracture risk는 50A 경도의 pad에서 0.8, 40A 경도의 pad에서 0.9임 → 50A 경도의 pad에서 가장 낮은 fracture risk를 보임

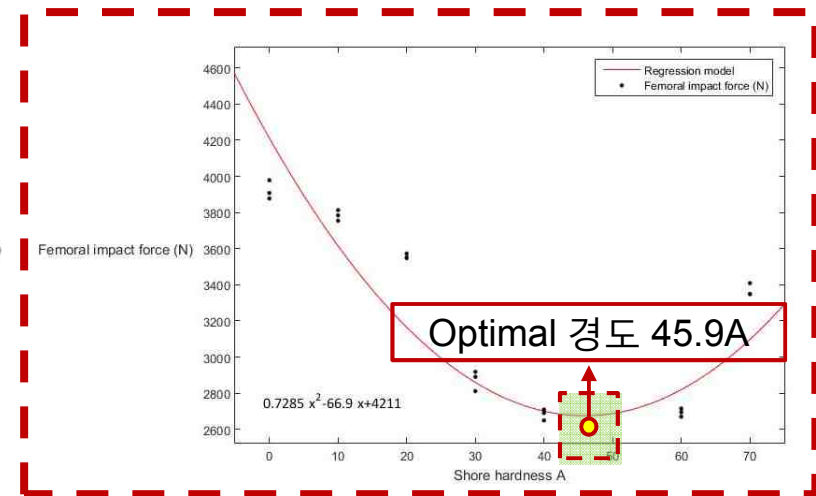


충격 성능 평가 결과: Screening 평가 기반 최적 경도

- 경도와 femoral impact force (N)에 대한 상관성 분석을 위해 quadratic equation을 활용하여 분석함
- Regression model 수립 → femoral impact force = $0.7285 x^2 - 66.9 x + 4211$, $R^2 = 78.5\%$
 - ⇒ 최소 femoral impact force (N)를 가지는 optimal 경도는 **45.9 A**로 나타남



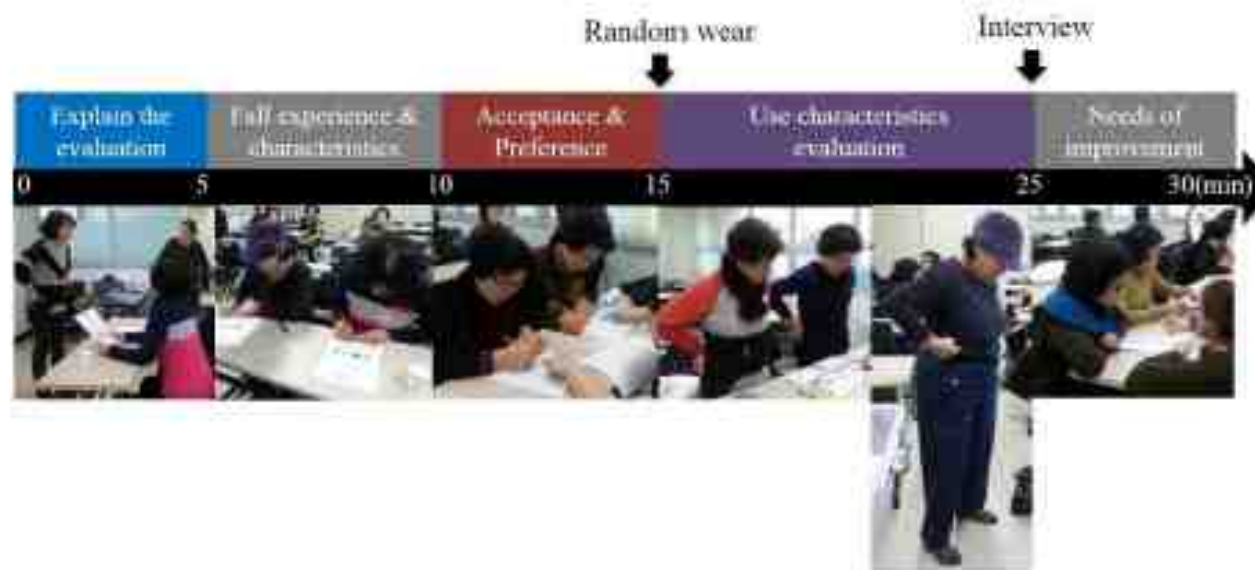
경도 별 hip protector 7종



Regression model 수립

Discussion (1/2)

- 본 연구는 hip protector pad의 물성에 따른 **충격흡수 성능 평가**에 대한 연구를 위한 **protocol**을 수립하고 그 효과를 파악함
- 한계점 1: 기존 다수의 문헌 실험 조건에 따라 **측방**에 대한 **낙상**만을 고려하였음
 - ✓ 낙상 시 **인체**의 **측면**보다 **후측방**의 경우가 가장 많고 **위험**함 (Choi et al. (2010))
 - ✓ 본 연구를 기반으로 설계된 hip protector pad의 여성 고령층 101명에 대한 착용 편의성 평가 결과 **전방(40%), 후방(34%), 측방(26%)**의 순으로 낙상 빈도가 높음 (Jeon et al. (2014))



Discussion (2/2)

□ 한계점 2: 기존 충격 성능 평가 시 pad설계에 많은 시간 및 비용이 소모됨

✓ hip protector pad의 (1) **형상 설계 인자** 및 (2) **경도** 별 충격 흡수 성능 파악을 위한 **대체 방안 필요**

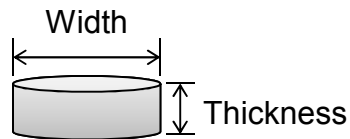
✓ 평가 대상 예시: **두께, 너비, 경도**가 다른 64종 pad

➢ 두께: **4종**(5, 15, 25, 35 mm)

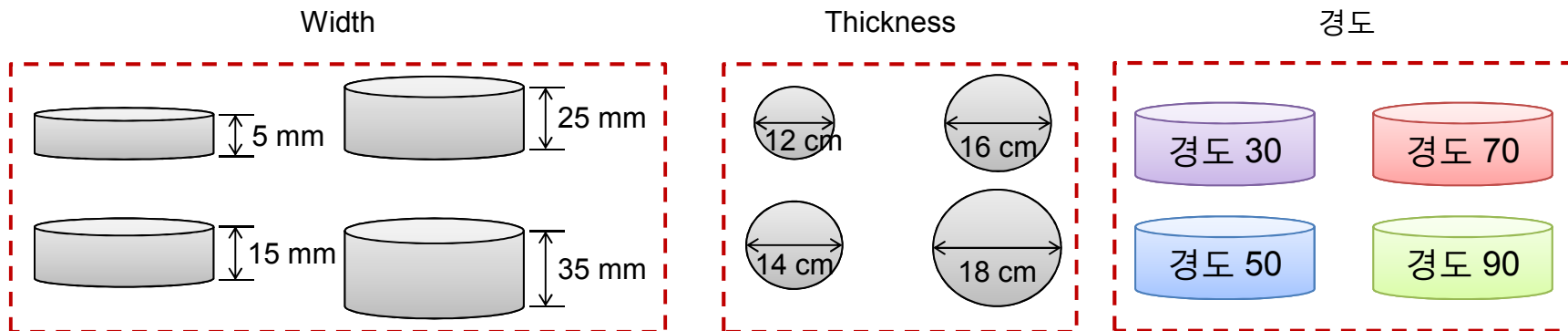
➢ 너비: **4종**(12, 14, 16, 18 cm)

➢ 경도: **4종**(30, 50, 70, 90 shore durometer)

} 두께 4종 × 너비 4종 × 경도 4종
⇒ **총 64종**

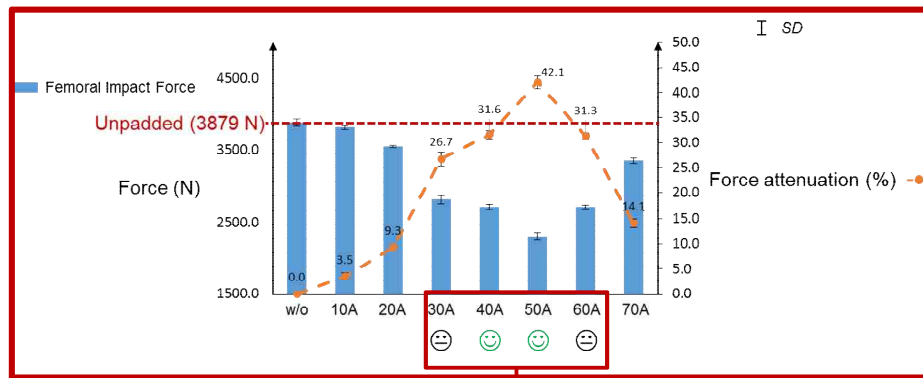


Example of hip protector to be evaluated



추후 연구: 충격 성능 최적화 평가

- Pad 물성 최적화 평가를 위해 optimal shore A range 선정 → optimal shore A 기준 (30~60 A: 45.9 A ± 15)
- 30~60까지 5 shore A 간격의 경도 차이 총 5종의 pad평가

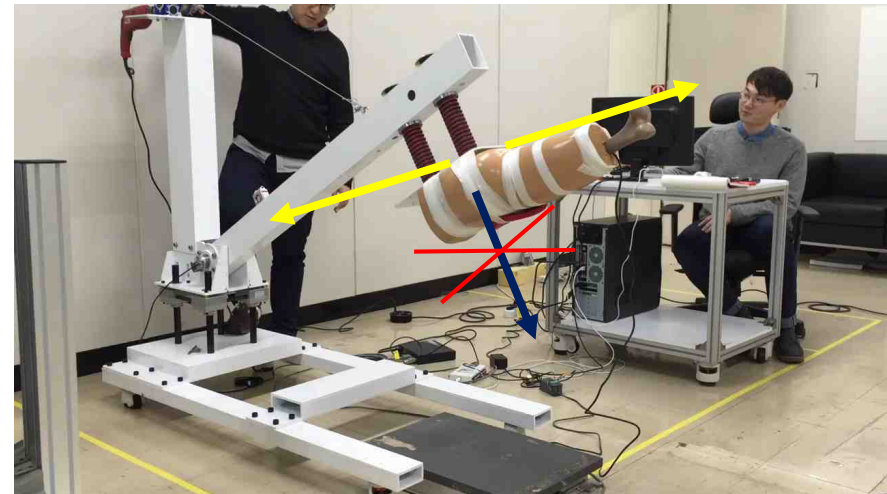
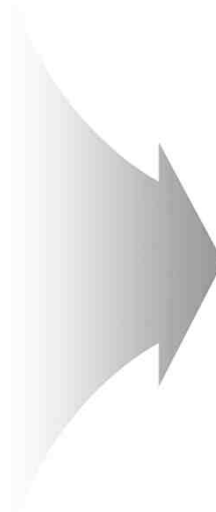


Optimal shore A range (30~ 60)



추후 연구: 전 후방 낙상 실험

- 측방이 아닌 **전, 후방의 낙상 방향**으로 충격 실험 설계를 통해 모든 낙상 방향 조건에서 hip protector pad 에 대한 **충격 흡수 성능을 평가**예정



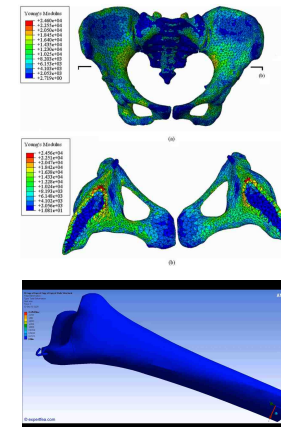
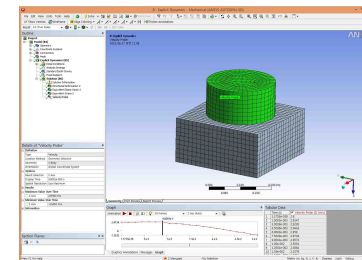
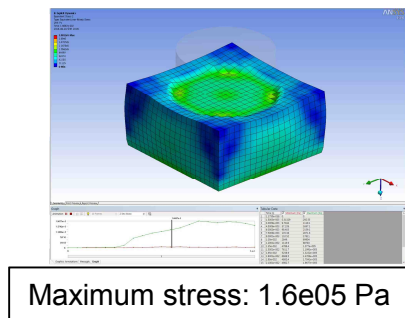
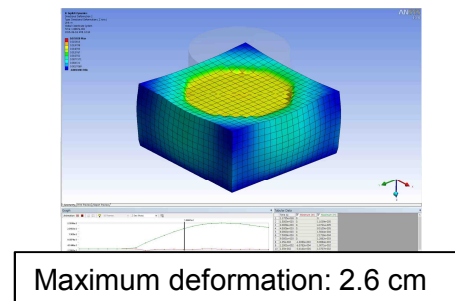
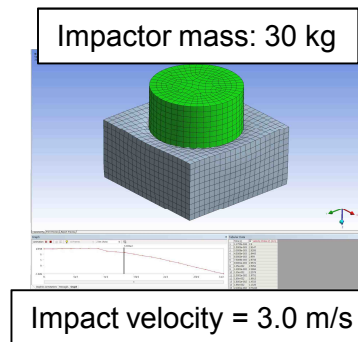
추후 연구: 설계 인자별 효과 파악 – FEM 평가

- **형상을 단순화한 impactor와 hip protector pad**를 사용하여 **충격 test 수행**
 - 해석 module: ANSYS workbench v13.0 Explicit dynamics
 - Impactor: steel (Nodes: 2,277, Elements: 1,856)
 - Hip protector pad: Polyurethane (Nodes: 4,851, Elements: 4,000)
 - 해석 시간: 0.03 sec간의 거동 분석
 - 해석 소요 시간: 9.5 min

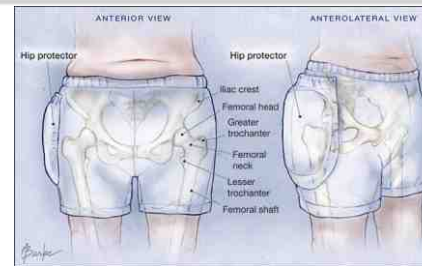
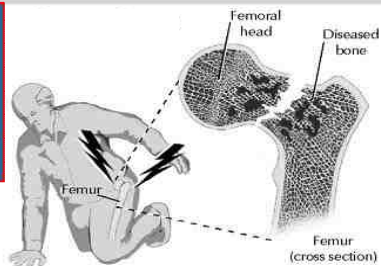
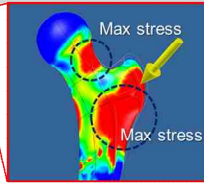
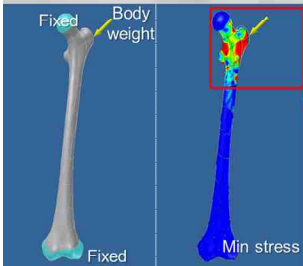
평가 조건



Impact test & stress and deformation analysis based on FEM



Q & A



Thank you for your attention!

Hansoo Lee, MS. Candidate
 Ergonomic Design Technology(EDT) Laboratory
 Department of Industrial & Management Engineering(IME)
 Pohang University of Science and Technology(POSTECH)
 Pohang, Kyungbuk 790-784, South Korea
 EDT webpage: <http://www.postech.ac.kr/ie/edt/>
 Office. +82-54-279-8246 / Cell. +82-10-5020-8434

