

어린이 상해에 영향을 주는 조수석 에어백 설계 인자에 대한 연구

최 원 정¹⁾ · 김 권 희^{*1)} · 고 훈 건¹⁾ · 김 동 석²⁾ · 손 창 규²⁾

고려대학교 기계공학과¹⁾ · 지엠 대우 오토엔테크놀로지 주식회사²⁾

A Study on the Passenger Airbag Design Parameters Influencing Child Injury

Wonjung Choi¹⁾ · Kwonhee Kim^{*1)} · Hunkeon Ko¹⁾ · Dongseok Kim²⁾ · Changkyu Son²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾Technical Center, GM Daewoo Auto & Technology Co., 199-1 Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 3 July 2008 / Accepted 18 August 2008)

Abstract : The passenger airbag(PAB) designed for standard sized adults may induce unexpected results to children in out-of-position(OOP) postures. In this work, using MADYMO software, simulations of the OOP injury of children have been performed with respect to PAB design parameters and child dummy positions. The attention is focused on some details with respect to the injury of 3 and 6 year old children in two OOP postures. Among the various design parameters of the passenger airbag systems, four parameters are selected for the sensitivity analysis of the injury with the Taguchi method: bag folding pattern, vent hole size, position of the cover tear seam and the type of door tear seam. An optimal combination of the parameters is suggested.

Key words : FMVSS 208(미연방 자동차 안전기준 208), Low Risk Deployment(LRD, 저 위험 에어백 전개), Passenger AirBag(PAB, 조수석 에어백), Folding pattern(폴딩 패턴), Taguchi method(다구찌 법), Orthogonal array (직교 배열표)

Nomenclature

- HIC₁₅ : head injury criterion
- N_{ij} : neck injury criterion
- N_{te} : neck tension-extension criterion
- N_{tf} : neck tension-flexion criterion
- N_{ce} : neck compression-extension criterion
- N_{cf} : neck compression-flexion criterion

1. 서 론

승객이 에어백에서 충분히 떨어진 정상적인 위치(In-position)에 있을 때는 에어백이 전개된 후 승객

과 에어백이 접촉을 시작하므로 문제가 없다. 그러나 어린이가 조수석에 앉아 있을 때는 상황이 다르다. 미 도로교통안전국(NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration)은 조수석 에어백(PAB, Passenger airbag)으로 인한 어린이의 상해나 사망을 막기 위해 미연방 자동차 안전 기준(FMVSS, Federal Motor-Vehicle Safety Standard) 208에 관련 규정을 포함시키고 있다. 미국에서 판매되는 모든 차량은 2004년부터 이 규정을 만족시켜야만 한다. 이 규정을 만족시키는 방법으로는 체중이 일정 수준 미달인 승객에 대하여 에어백 작동을 중지시키거나 비정상 자세(OOP, Out Of Position)의 승객에 대하여 저 위험 에어백 전개(LRD, Low Risk Deployment)성

*Corresponding author, E-mail: kwonhkim@korea.ac.kr

능을 확보하는 것이다.^{1,2)} 본 연구는 조수석 에어백에 의한 어린이 상해 구조를 알아보고 규정을 만족시키기 위한 최소 상해 조합을 도출하는데 목적을 두고 있다.

2. 정적 저 위험 에어백 전개 시험

FMVSS208 법규는 어린이에 대한 보호, 중저속과 고속에서 승객 보호, 다양한 승객과 비정상 좌자에서의 승객 보호를 목적으로 하고 있다. 승객의 무게를 감지하여 에어백 시스템이 정지되거나 저 위험 전개모드로 전환되어야 한다.³⁻⁵⁾ 어린이 6세와 3세 저 위험 전개 시험에서 규정된 비정상 자세는 Fig. 1과 같이 각각 두 가지이다. 가슴을 IP (Instrument Panel)에 대고 좌석 앞에서 있는 OOP 1과 좌석에 앉아 머리를 IP에 대고 있는 OOP 2이다. 이 중 6세 OOP 1의 시험용 더미(dummy)는 다리를 제외한 상반신으로만 구성된다.^{2,6)}

2.1 상해 규정

어린이의 상해는 머리, 가슴, 목 상해로 규정한다. 머리 상해는 식 (1)로 정의되는 HIC 값으로 정의하며 이 값이 규정치 이하가 되어야 한다.^{2,6,7)}

$$HIC = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Where, $t_2 - t_1$ is not more than 15ms
 $a(t)$ = head acceleration (G's)

목 상해는 어린이에게 가장 두드러지게 나타난다. 이는 목 상부에 장착된 로드셀로 측정되며 식 (2)의 인장, 압축, 모멘트의 복합 상해치(N_{ij})로 정의된다.^{2,6,7)}

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{int}} + \frac{M_y}{M_{int}} \quad (2)$$

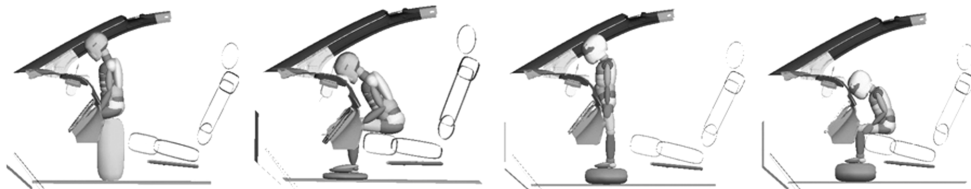


Fig. 1 OOP postures of children for the LRD test

Where, F_z = axial force, M_y = bending moment
 F_{int}, M_{int} = critical intercept values

가슴 상해는 가슴 무게 중심의 가속도와 4번과 8번 흉추 사이에 감싸진 체스트 밴드(chest band)의 변형량으로 정의된다. Table 1은 법규 상해치를 나타낸다.^{2,6,7)}

Table 1 Injury assessment reference values (IARV)

Injury		6 year old	3 year old
Head	HIC ₁₅	700	570
Neck	N_{ij}	1.0	1.0
	Peak tension (N)	1490	1130
	Peak compression (N)	1820	1380
Chest	Acceleration (g)	60	55
	Deflection (mm)	40	34

2.2 조수석 에어백 모델링

승객 거동 해석을 위한 조수석 에어백은 형상이 3차원 입체로 되어 있다. 정확한 폴딩 라인 설정과 전개 시 거동 분석의 효율성을 위하여 Initial Metric Method(IMM)를 사용한다. 하드웨어 분석을 통해 얻은 조수석 에어백을 마디모 폴더(MADYMO Folder)를 이용하여 실제와 같은 방법으로 접는다. 3차원 CAD 정보로부터 얻어진 원형 메시(mould mesh) 안에서 터뜨려 참조 메시(reference mesh)를 얻는다. 참조 메시는 에어백이 실제와 같은 형태로 전개되도록 방향성을 설정하기 위해 필요하다. 접혀진 에어백을 여러 차례 예비 시뮬레이션을 통해 모듈에 장착하여 초기 메시(initial mesh)를 얻고 에어백 모델을 완료한다.⁸⁻¹²⁾ 초기 메시는 24,274개의 삼각형 막 요소로 구성되며 12,139개 노드를 포함한다. 에어백은 이중 인플레이터(dual stage inflator)로 작동된다. 단계별 60리터 탱크 시험 압력은 362 kPa 및 547 kPa이다.

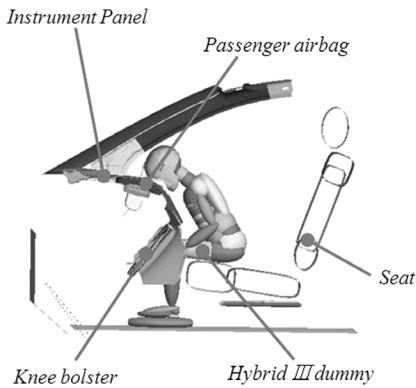


Fig. 2 PAB LRD simulation model

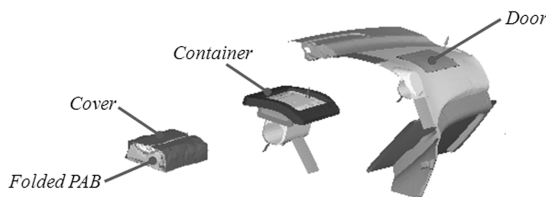


Fig. 3 Model components of the PAB module

Fig. 2에서처럼 IP와 에어백은 유한 요소(finite element)로, 좌석과 무릎 받침대(knee bolster)는 강제 멀티바디(multi-body)로 구성하였다. FMVSS 208에서 규정하고 있는 Hybrid III 어린이 더미의 모델은 마디모의 타원체(ellipsoid) 모델을 선택하였다. Fig. 3은 조수석 에어백 모듈의 주요 부분을 나타낸다.

2.3 설계 인자 선정

에어백의 여러 가지 인자 중 어린이 상해에 영향을 끼치는 4가지 인자를 선택하고 각각 2개의 변수 수준을 선정하였다.

Table 2 PAB design parameters

Level	Folding pattern (A)	Vent hole size(B), mm	Cover tear seam line(C)	Door tear seam type(D)
1	Zigzag	∅55	Near dummy	U-type
2	Sigma	∅60	Near windshield	H-type



(a) Zigzag folding pattern
Fig. 4 PAB folding patterns

Fig. 4의 지그재그는 기존 방식이고 시그마는 전개 초기에 마찰 구속에 의한 전개 지연을 줄이기 위하여 고안된 새로운 방식이다. 폴딩 패턴을 바꾸는 것은 백 및 하우스링 형상과 같은 다른 설계 인자들의 간섭을 받지 않아 비용 부담이 적으며 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.¹³⁾ 에어백 후면에 마련되는 2개의 벤트 홀 크기는 ∅55와 ∅60으로 구성하였다. 벤트 홀은 팽창된 백과 승객 간의 접촉력을 일정 수준으로 유지하는 역할을 하며 충분한 시간이 지난 후 백을 수축시켜 시야를 확보하는데 필요하다.¹⁴⁾ 폴딩된 에어백을 감싸는 커버의 절개선 위치는 더미 쪽과 윈드 실드(windshield) 쪽으로 설정하였다. 도어 절개선은 U-type과 H-type으로 설정하였다.¹⁵⁾ Table 3의 L8(2⁴) 직교 배열표를 사용하여 6세 및 3세 어린이 더미의 두 가지 착좌 상태(OOP1, OOP2)에 따라 각 8번의 시뮬레이션을 실행하였다.¹⁶⁾

Table 3 L8(2⁴) orthogonal array

Run	1 A	2 B	3 A×B C×D	4 C	5 A×B C×D	6 A×B C×D	7 D
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

3. 정적 저 위험 에어백 전개 결과

어린이 더미의 연령과 자세에 따라 상해 구조가 다르나 전개 개시 시점으로부터 13ms~35ms 동안 상해가 좌우된다(Appendix 참조). 교호작용을 고려한 6세, 3세 목 상해 최소 조합은 직교 배열표의 7번째 조합이다(Table 4 참조). Fig. 5, Fig. 6은 기존 설계와 가장 가까운 L8 직교 배열표의 제1 설계조건과 최소 상해치를 나타내는 제7 설계조건에 대한 초기 전개 양상을 나타내고 있다.

6세 OOP 1, 6세 OOP 2 그리고 3세 OOP 1은 백 폴딩 패턴에 따라 목 상해치가 크게 좌우된다. 지그재그 패턴은 백 전개 초기에 마찰구속에 의하여 국부

Table 4 PAB design parameters for minimal child injury

Folding pattern (A2)	Vent hole size (B2)	Cover tear seam line (C1)	Door tear seam type (D1)
Sigma	∅60	Near dummy	U-type

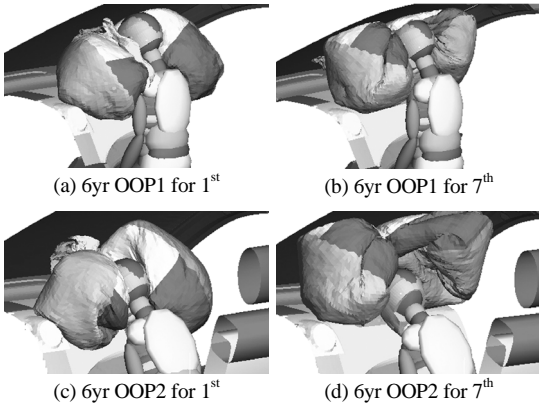


Fig. 5 Deployment for 6yr OOP at 17ms

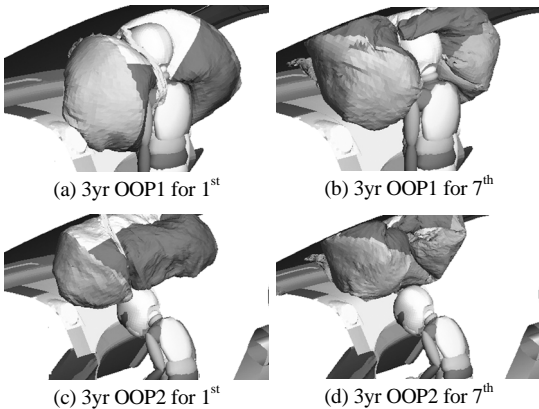


Fig. 6 Deployment for 3yr OOP at 19ms

적인 전개가 지연되므로 완만하고 균일한 형상으로 전개된다. 이 결과 턱 아랫부분에 압력이 가해져 목이 심하게 뒤로 꺾이게 된다. 반면 시그마 패턴은 에어백이 좌, 우로 나뉘어 전개되어 머리를 감싸게 되므로 목 상해가 현저하게 감소된다.

Fig. 6의 3세 OOP2는 더미의 머리가 도어(Fig. 3 참조)보다 아래에 위치하기 때문에 폴딩 패턴의 영향이 적으며 백이 만개된 후 더미의 머리를 눌러 압축 상해가 발생한다. Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10의 4가지 에어백 설계인자 중 폴딩 패턴(A) 이외의 다른

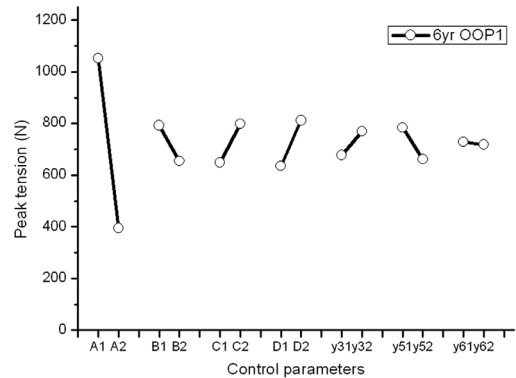


Fig. 7 Analysis results for 6yr OOP1

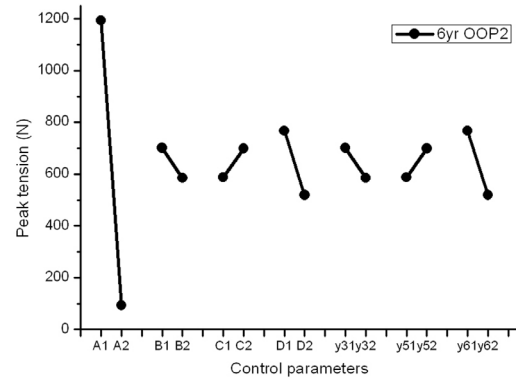


Fig. 8 Analysis results for 6yr OOP2

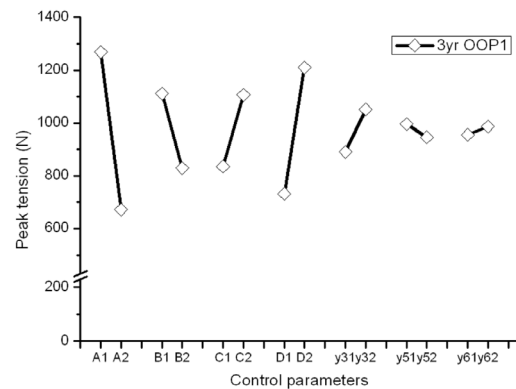


Fig. 9 Analysis results for 3yr OOP1

인자들은 목 상해에 대한 기여도가 낮은 것을 보이고 있다.

4. 동적 에어백 전개 시험

어린이에 대한 정적 에어백 전개시험의 최소 상

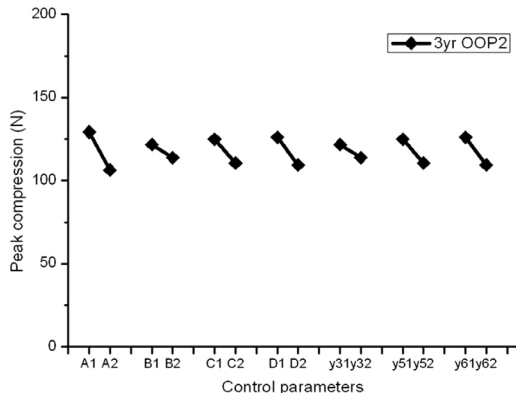


Fig. 10 Analysis results for 3yr OOP2

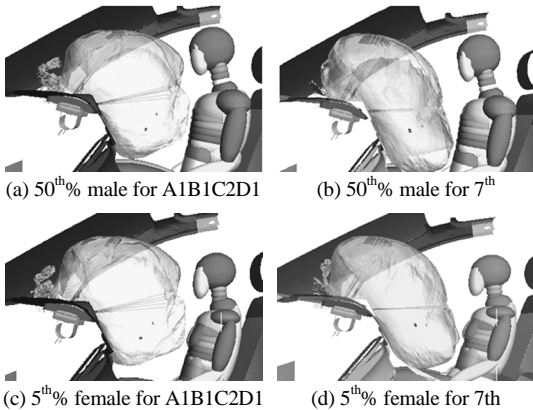


Fig. 11 Deployment for adults

해를 보이는 설계 인자 조합이 성인에게 미치는 영향을 알아보기 위해 동적 시뮬레이션을 실행하였다. 벨트 미착용 상태의 Hybrid III 50th% 남성과 5th% 여성 더미에 대한 25mph 슬레드 시험(sled test) 해석을 수행하였다. 기존 설계조건(A1B1C2D1)과 제 7 설계조건(A2B2C1D1)에 대하여 이중 인플레이터를 단계별로 작동시켰다.^{2,6)} Fig. 11에서처럼 성인은 어린이와 달리 만개 후 에어백과 접촉하기 때문에 에어백 초기 전개 양상의 영향이 적다. 기존 설계 조건과 제 7 설계 조건 모두 FMVSS 208 규정을 만족한다.

5. 결론

8개의 PAB 설계 인자 조합에 대한 저 위험 전개 시뮬레이션을 실행하였다. 어린이의 연령과 자세에 따라 상해 구조가 다르게 나타났다. 백의 초기 전개

형태와 속도가 어린이 상해에 큰 영향을 미치며 특히 폴딩 패턴의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있었다. 기존 지그재그 패턴은 목 인장(tension)과 신전(extension)을 크게 발생 시키지만 시그마 패턴은 좌, 우로 전개되어 머리를 감싸고 목 상해를 감소시켰다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단(R11-2007-028-03001-0)과 GM DAT 산학과제(R0802711) 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- 1) National Highway Traffic Safety Administration, Fifth/Sixth Report to Congress, Effectiveness of Occupant Protection Systems and Their Use, Washington DC, US Department of Transportation, 2001.
- 2) National Highway Traffic Safety Administration, Federal Motor Vehicle Safety Standards, Occupant Crash Protection, 49 CFR Part 571 [Docket 74-14, notice 103, Final Rule] Rin 2127-AG14. Washington DC, US Department of Transportation, 1997.
- 3) G. C. Rains, A. Prasad, L. Summers and M. Terrell, "Assessment of Advanced Air Bag Technology and Less Aggressive Air Bag Design Through Performance Testing," US NHTSA, pp.1003-1018, 1998.
- 4) S. Jeon, H. Lee and G. Park, "Evaluation and Testing of out of Position for Airbag Design," Transactions of KSAE, Vol.11, No.6, pp.108-117, 2003.
- 5) H. H. Choi, C. H. Lee, Y. S. Kim and Y. N. Jo, "A Study Of Lower Risk Airbag Deployment for Passenger Occupant," Spring Conference Proceedings, Vol.II, pp.1206-1211, 2006.
- 6) Federal Safety Standards MVSS 208, Injury Criteria for the 49 CFR Part 572, NHTSA, 2007.
- 7) R. Eppinger, E. Sun, S. Kupper, T. Nguyen and R. Saul, "Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint System-II," NHTSA, 1999.

- 8) Tno, Madymo Folder Folding Airbag Models Version 4.0, pp.6.12-6.56, 2006.
- 9) W. S. Park, S. G. Hong and S. J. Park, "A Study of the Out-Of-Position Simulation Regarding Airbag Folding Method," Fall Conference Proceedings, Vol.II, KSAE, pp.942-949, 2004.
- 10) TNO, MADYMO Applications Manual Release 6.3.2, pp.1-20, 2006.
- 11) J. Zhang, C. Ma, Y. Bai and S. Huang, "Airbag Mapped Mesh Auto-Flattening Method," Tsinghua Science and Technology, Vol.10, No.3, pp.387-390, 2005.
- 12) H. Y. Kim, K. B. Kang, Y. J. Shin and J. H. Cheon, "Finite Element Modeling and Analysis of Deployment Process of Folded Airbag," Spring Conference Proceedings, Vol.II, KSAE, pp.159-167, 1995.
- 13) G. W. Kim, M. S. Koh and B. R. Cho, "A Study of PAB Deployment Performance on PAB Folding Patterns," Fall Conference Proceedings, Vol.II, KSAE, pp.1198-1204, 2003.
- 14) J. S. Kwak, W. S. Yoo, S. J. Park and J. W. Park, "Effect of Vent Hole Size in Airbag on the Occupant Behavior," Asian Conference on Multibody Dynamics, A00657, 2006.
- 15) C. S. Hong, C. Y. Oh, H. D. Kim, D. C. Lee and J. H. Song, "Development of a Finite Element Model for Studying the Occupant Behavior of a Truck," Fall Conference Proceedings, Vol.II, KSAE, pp.1284-1289, 2001.
- 16) Glen Stuart Peace, Taguchi Methods, Addison Wesley, pp.114-128.

Appendix

Table A1 Analysis results for 6yr OOP1

R	Combination	HIC ₁₅	N _{te}	N _{tf}	N _{te}	N _{tf}	Peak tens.	Peak comp.	Chest accel.	Chest defl.
	Limit	700	1.0		1490	1820	60	40		
1	A1B1C1D1	58.53	0.73	0.10	0.0	0.56	977.43	284.96	10.80	21.26
2	A1B1C2D2	64.15	0.88	0.13	0.0	0.56	1171.80	284.96	15.32	23.32
3	A1B2C1D2	58.54	0.84	0.11	0.0	0.56	1097.30	284.96	13.50	21.93
4	A1B2C2A1	56.07	0.73	0.12	0.0	0.56	961.18	284.96	11.57	21.36
5	A2B1C1D2	110.73	0.46	0.03	0.26	0.56	467.12	991.27	13.30	7.10
6	A2B1C2D1	111.74	0.53	0.04	0.33	0.56	550.81	1048.60	12.97	5.14
7	A2B2C1D1	16.63	0.0	0.06	0.0	0.56	49.78	1067.50	11.66	0.71
8	A2B2C2D2	102.09	0.45	0.04	0.17	0.56	510.08	1017.50	13.56	6.62

Table A2 Analysis results for 6yr OOP2

Run	Combination	HIC ₁₅	N _{te}	N _{tf}	N _{te}	N _{tf}	Peak tens.	Peak comp.	Chest accel.	Chest defl.
	Limit	700	1.0		1490	1820	60	40		
1	A1B1C1D1	324.55	0.80	0.06	0.56	0.34	1446.50	705.27	12.87	14.46
2	A1B1C2D2	374.73	0.64	0.06	0.86	0.34	1172.70	1157.60	11.32	8.57
3	A1B2C1D2	316.29	0.50	0.06	0.83	0.34	718.23	984.34	8.63	3.89
4	A1B2C2A1	426.60	0.77	0.06	0.76	0.34	1435.70	891.72	11.75	11.63
5	A2B1C1D2	26.24	0.0	0.06	0.36	0.34	92.66	793.30	7.10	0.67
6	A2B1C2D1	14.04	0.02	0.06	0.37	0.34	92.66	664.98	7.99	0.66
7	A2B2C1D1	17.97	0.0	0.06	0.26	0.34	92.66	610.58	7.65	0.67
8	A2B2C2D2	8.42	0.01	0.06	0.33	0.34	92.66	660.74	8.57	0.67

Table A3 Analysis results for 3yr OOP1

Run	Combination	HIC ₁₅	N _{te}	N _{tf}	N _{te}	N _{tf}	Peak tens.	Peak comp.	Chest accel.	Chest defl.
	Limit	570	1.0		1130	1380	55	34		
1	A1B1C1D1	94.14	1.15	0.45	0.05	0.03	964.46	10.13	23.55	27.95
2	A1B1C2D2	141.13	1.93	0.55	0.05	0.03	1694.30	10.13	21.61	33.53
3	A1B2C1D2	127.57	1.53	0.49	0.05	0.03	1352.10	10.13	20.95	28.99
4	A1B2C2A1	118.79	1.24	0.54	0.05	0.03	1063.90	10.13	21.97	27.84
5	A2B1C1D2	312.76	0.71	0.17	0.05	0.56	956.95	742.90	20.36	5.80
6	A2B1C2D1	276.88	0.82	0.22	0.05	0.55	831.66	805.18	16.50	2.98
7	A2B2C1D1	32.69	0.16	0.22	0.05	0.55	67.65	862.33	13.32	2.51
8	A2B2C2D2	270.03	0.69	0.05	0.05	0.51	834.67	600.26	16.72	5.41

Table A4 Analysis results for 3yr OOP2

Run	Combination	HIC ₁₅	N _{te}	N _{tf}	N _{te}	N _{tf}	Peak tens.	Peak comp.	Chest accel.	Chest defl.
	Limit	570	1.0		1130	1380	55	34		
1	A1B1C1D1	2.44	0.02	0.03	0.18	0.31	19.11	168.07	3.44	0.19
2	A1B1C2D2	1.57	0.02	0.02	0.07	0.31	19.11	106.35	3.12	0.18
3	A1B2C1D2	1.43	0.02	0.02	0.11	0.31	19.11	118.93	2.07	0.17
4	A1B2C2A1	1.81	0.02	0.02	0.18	0.31	19.11	123.57	2.66	0.19
5	A2B1C1D2	1.14	0.02	0.02	0.09	0.31	19.11	106.35	4.17	0.28
6	A2B1C2D1	1.78	0.02	0.02	0.08	0.31	19.11	106.35	3.93	0.25
7	A2B2C1D1	2.13	0.02	0.02	0.05	0.31	19.11	106.35	4.31	0.28
8	A2B2C2D2	0.93	0.02	0.02	0.08	0.31	19.11	106.35	3.92	0.27