

## 핵연료 집합체를 구성하는 Bulge Joint의 결합력 분석

박재규\* · 정혜경\* · 장택진\* · 이성욱\*\* · 김종봉\*\*\*†

\* 서울과학기술대학교 자동차공학과, \*\* 한국원자력연구원,  
\*\*\* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과, 전기정보기술연구소

### A Study on the Bulge Joint Joining Force in a Fuel Cell Assembly

Jae Kyu Park\*, Hye Kyung Jung\*, Taek Jin Jang\*, Sung Uk Lee\*\* and Jong-Bong Kim\*\*\*†

\* Dept. of Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology,

\*\* Nuclear Fuel Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute,

\*\*\* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Research Center for Electronic and Information Technology, Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology

(Received February 25, 2019 ; Revised July 31, 2019 ; Accepted August 13, 2019)

**Key Words:** Bulge Joint(벌지 조인트), Maximum Joining Force(최대 결합력), Design of Experiments(실험계획법), Nuclear Fuel Cell(핵연료 집합체)

**초록:** 벌지 조인트는 사용 후 핵연료의 안정적인 이송을 가능하게 하는 중요 연결부이다. 벌지 조인트는 외부의 삽입관(insert tube)과 내부의 안내관(guide tube)이 결합된 형태로서, 세 개의 그루브 형상을 가지는 체결부의 결합으로 체결된다. 상단 고정체는 벌지 조인트 상부에 결합되어 핵연료 집합체를 운송할 때 힘을 전달한다. 상단 고정체에 가해지는 모든 힘은 벌지 조인트를 통해서 전달되기 때문에 벌지 조인트는 충분한 결합력을 가져야 한다. 본 연구에서는 벌지 조인트의 형상 및 강도에 따른 벌지 조인트의 결합력을 분석하였다.

**Abstract:** A nuclear fuel cell is connected to the corresponding top nozzle by a bulge joint. Bulge joints are composed of an outer insert tube and inner guide tube, as well as two inner and outer tubes that are joined by three grooves. As the lifting force on the top nozzle is transferred to the fuel cell through the bulge joint, the bulge joint plays an important role in the transportation of spent fuel cells. Therefore, the bulge joint has to have a sufficient joining force. In this study, the effects of the shape and material properties of a bulge joint on the joining force are investigated.

### 1. 서론

석유, 천연가스, 수력, 원자력 등의 에너지원은 우리나라의 대표적인 에너지원으로써 지속적인 발전을 하고 있다. 특히, 최근에는 온실가스 감축 및 친환경 에너지의 활발한 연구를 통해 신재생 에너지의 비중도 증가하고 있다. 하지만 우리나라는 지리·경제적 특성상 많은 양의 에너지를 수입하고 있고, 신재생 에너지의 발전 인프라가 완벽하게 구축되어 있지 않다. 따라서 자체 발전이 가능하고 전체 에너지원 중 높은 비중을 차지

하고 있는 원자력 에너지의 역할이 중요하다.

원자력 에너지의 발전과 함께, 사용 후 핵연료에 대한 관심도 높아지고 있다. 핵연료 집합체의 임시 저장소 포화가 수년 이내로 알려져 있고, 실질적인 해결방안으로 건식저장을 통한 중간 저장이 논의되고 있다. 이에 따라 중간 저장을 위한 사용 후 핵연료의 수송 작업이 필요하다. 이때, 고온에서의 열화로 인해 사용 후 핵연료의 강성이 약해질 수 있다. 그래서 이동 중 외부 하중에 대한 안정성 분석이 요구된다.

이와 관련된 연구로는 Kim 등<sup>(1)</sup>은 국부적 좌굴에 영향을 미치는 셀 구조물의 기하학적인 불균일성에 대해 연구하였고, Kim 등<sup>(2)</sup>은 유한요소

† Corresponding Author, jbkim@seoultech.ac.kr

해석을 통해 핵연료 집합체에 사용되는 지지격자 스트랩의 진동 특성을 연구하였다. Kwon<sup>(3)</sup>은 운반 중 집합체가 자동차에서 낙하하여 지면과 충돌할 때 고준위 폐기물에 작용하는 충격력에 대하여 연구하였다. Hong 등<sup>(4)</sup>은 핵연료봉 중간검사를 위한 장·탈착 지그에 대해 연구하였다. Morales 등<sup>(5)</sup>은 SAVAN 프로그램을 이용하여 핵연료 집합체 골격에 대한 변형 등을 단순한 모델로 해석을 수행하였다.

집합체의 연료봉을 보호하기 위해 지지격자체의 강성에 대한 연구도 수행이 되었다. Song 등<sup>(6)</sup>은 지지격자체 스프링의 거동에 대해 연구하였고, Kim 등<sup>(2)</sup>은 실험과 유한요소 해석으로 5×5 지지격자의 진동 특성을 분석하였다. Lee 등<sup>(7)</sup>은 충격과 마모를 고려한 핵연료봉 지지격자의 설계에 대해 연구하였다. Jeon과 Lee<sup>(8)</sup>는 가압 경수로 지지격자체의 좌굴 특성에 관하여 연구를 진행하였다. Lee 등<sup>(9)</sup>은 지지격자체에서 덩플의 위치가 임계좌굴하중에 미치는 영향을 분석하였고, Song

등<sup>(10)</sup>과 Song과 Lee<sup>(11)</sup>는 지지격자의 충격강도에 대해 용접 특성을 고려하여 분석하였다. 또한, Kim 등<sup>(12)</sup>은 지지격자체의 해석 시간을 줄이기 위한 등가의 스프링 모델에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 사용 후 핵연료 집합체의 이동 시 bulge joint의 안정성에 대해 연구하였다. Fig. 1<sup>(13)</sup>은 가압 경수로의 형상을 보여준다. 상단 고정체, 그리드, 그리고 하단 고정체로 구성이 된다. 사용 후 핵연료를 이동 시 상단 고정체에 가해지는 힘은 Fig. 2에 보인 bulge joint를 통해서 집합체 전체에 전달된다. Bulge joint는 삽입관과 안내관이 결합된 Fig. 2와 같고 3개의 그루브로 구성된다. 핵연료 집합체를 이동시킬 때, bulge joint는 충분한 힘을 전달해야 한다. 따라서 본 연구에서는 사용 후 핵연료의 수송 시 핵연료 집합체의 안정성 분석을 위한 구조 해석적 방법을 정립하고, bulge joint의 기계적 거동 및 강도에 영향을 주는 주요 인자를 분석하였다. Bulge joint의 형상, 개수, 그리고 재료 물성이 결합력에 미치는 영향을 분석하였다.

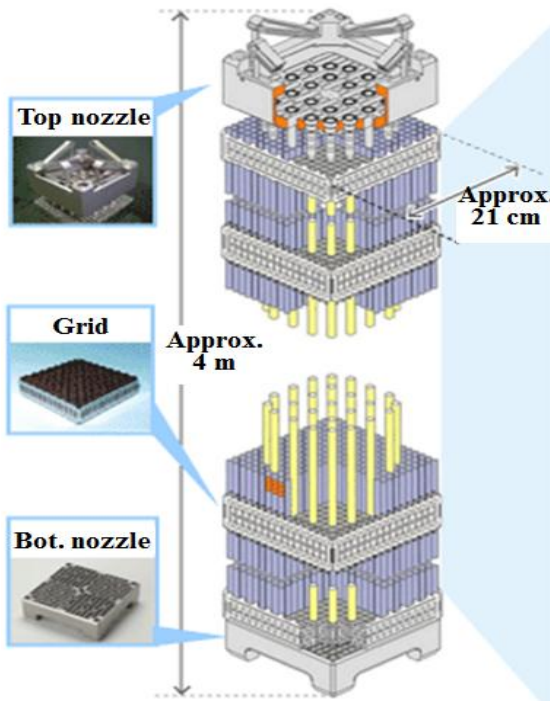


Fig. 1 Basic structure of PWR fuel assembly<sup>(13)</sup>



Fig. 2 Shape of bulge joint

## 2. 해석 방법 및 검증

### 2.1 유한요소 모델링

Bulge joint의 결합력을 해석하기 위해 Fig. 2와 같이 모델링하였다. 안내관 끝을 고정하고 삽입관

Table 1 Mechanical properties of SUS304L and Zircaloy-4

Material	SUS304L	Zircaloy-4
Young's modulus	179.2 GPa	113.7 GPa
Poisson's ratio	0.3	0.29
Yield stress	203.8 MPa	339.5 MPa
Density	7,930 kg/m <sup>3</sup>	6,650 kg/m <sup>3</sup>

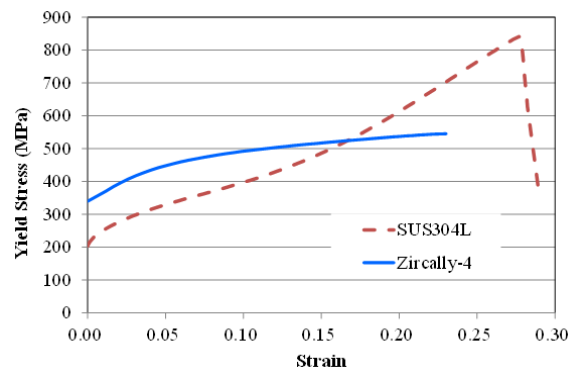


Fig. 3 Stress-strain curves of SUS304L and Zircaloy-4

끝에 변위를 주어 결합력을 해석하였다. 해석은 ABAQUS Implicit<sup>(14)</sup>으로 수행하였고, 사용된 재료의 물성은 Table 1과 Fig. 3에 도시하였다. 안내관과 삽입관의 재료는 각각 Zircaloy-4와 SUS304L이다.

삽입관과 안내관의 접촉면에 surface to surface로 접촉 처리를 하였으며, 최대 인장 변위는 10mm로 하였다. 외연적 해석에서 동적 효과를 최소화하기 위해 인장 속도는 10mm/s로 하였고, 사전 해석을 통해서 동적 효과는 없는 것을 확인하였다. 두께 방향으로 4개의 요소를 사용하였고, 길이 및 반경 방향의 요소 크기를 0.4, 0.5, 1.0, 1.5mm 총 4가지에 대해서 해석을 수행하여 요소의 크기 효과를 확인하였다. Fig. 4에 도시한 요소 크기별 하중-변위 곡선에서 4가지 모두 하중-변위 곡선이 차이가 없는 것을 확인하였고, 본 연구에서 진행된 해석에서는 그루브 부위에 최소한 10개의 요소가 생성되도록 요소의 크기를 0.5mm로 하였다. 해석은 대칭을 고려하여 1/4만 해석하였다.

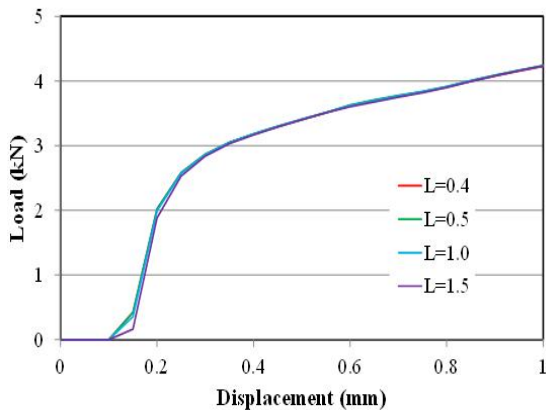


Fig. 4 Load-displacement curves for various element sizes

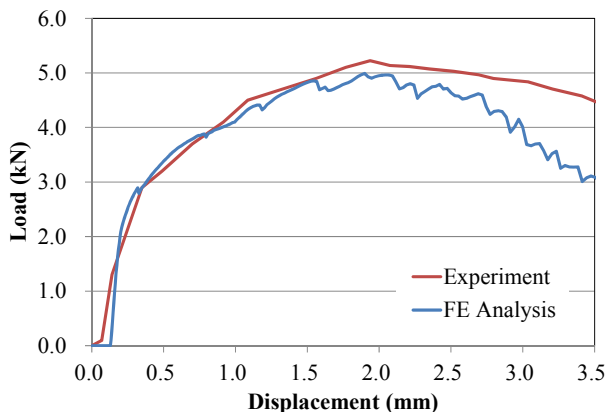


Fig. 5 Comparison of load-displacement curves for experiment and analysis

## 2.2 실험 결과 비교

유한요소 해석 모델을 검증하기 위해 인장 실험 결과와 해석에서 구한 하중-변위 곡선을 Fig. 5에 비교하였다. 해석에서 마찰계수는 금속 간의 마찰을 고려하여 0.2를 사용하였다. 해석의 경우 최대 결합 강도가 5.014kN이고, 실험에서는 5.223kN이 도출되어 약 4%의 오차를 보이고 있다. 결합 강도가 최대가 되는 변위도 거의 같음을 확인할 수 있다. 다만, 실험 결과는 비교적 연속적인 반면 해석 결과는 변동이 있는 것을 알 수 있다. 이것은 해석에서 요소가 이동하면서 요소 간의 접촉과 유한요소 해석 특성상 유한개의 요소로 해석이 진행되기 때문으로 사료된다. 결과적으로 해석으로 예측한 최대 결합력이 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

## 3. 결합력에 영향을 주는 인자 분석

마찰계수, 그루브 개수, 그루브 형상이 bulge joint의 결합력에 미치는 영향을 분석하였다. 유한요소 모델은 그루브만의 영향을 보기 위해 Fig. 6과 같이 단순화하였다. 대칭을 고려하여 1/4만 해석하였고, 안내관의 왼쪽 끝은 고정하고 삽입관의 오른쪽 끝에 변위 10.0mm를 주었다.

Fig. 7과 8은 최대 결합력이 발생한 변위 2.0mm와 하중이 감소하는 변위 3.0mm에서의 변형 형상과 Mises 응력분포를 보여준다. 왼쪽의 그루브가 먼저 이탈이 되는 것을 알 수 있다. 그리고 삽입관은 오른쪽 그루브에서 최대 응력이 걸리고, 안내관은 왼쪽 그루브에서 응력이 최대로 걸림을 알 수 있다. 변형 또한, 삽입관은 오른쪽 그루브가, 그리고 안내관은 왼쪽 그루브가 가장 많이 변형되었음을 알 수 있다.

### 3.1 마찰계수와 그루브 개수의 영향

마찰계수가 결합력에 미치는 영향을 분석하기 위해 임의의 마찰계수에 따른 해석을 수행하여 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 마찰계수가 증가할

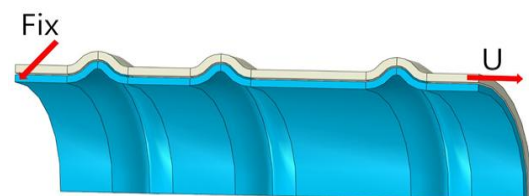


Fig. 6 Analysis model and boundary conditions

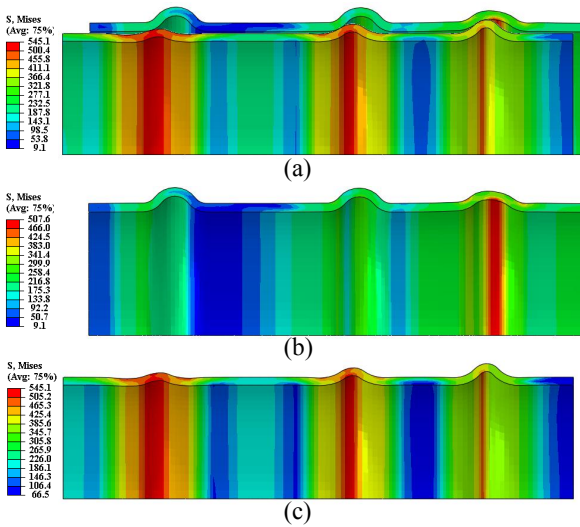


Fig. 7 Deformed shapes and von-Mises stress distribution at 2.0 mm displacement: (a) Assembled, (b) insert tube, (c) guide tube

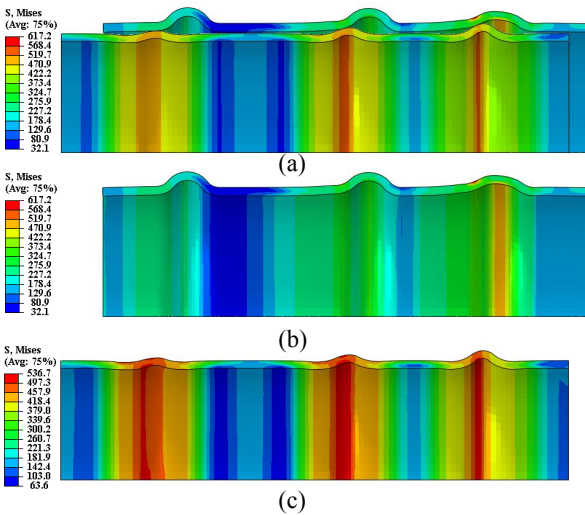


Fig. 8 Deformed shapes and von-Mises stress distribution at 3.0 mm displacement: (a) Assembled, (b) insert tube, (c) guide tube

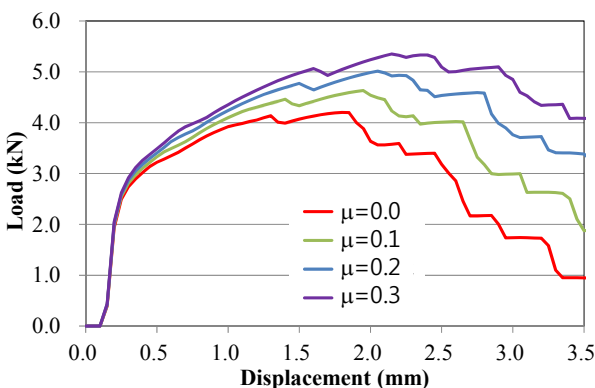


Fig. 9 Load-displacement curve for various friction coefficients

수록 하중이 증가하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 금속 간의 마찰을 고려하여 마찰계수 0.2를 이용하였다.

Bulge joint의 그루브 개수가 최대 결합력에 미치는 영향을 분석하였다. 동일한 형상의 그루브를 1개부터 10개까지 동일한 간격으로 모델링하여 해석을 진행하였다. Fig. 10은 그루브 개수에 따른 최대 결합력을 보여준다. 그루브 개수가 증가함에 따라 최대 결합력이 증가하지만, 증가폭이 개수가 증가함에 따라 감소하고 그루브가 9개 이상이 되면 증가가 거의 없음을 알 수 있다. 그루브 개수를 증가시켜도 최대 약 6.5kN의 결합력 이상은 얻을 수 없음을 알 수 있다. 이 결과는 그루브 개수를 결정할 때 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 항복강도와 형상의 영향

재료의 소성 물성이 bulge joint의 결합력에 미치는 영향을 분석하기 위해 Zircaloy-4와 SUS304L의 응력-변형률 관계에서 응력을 각각 1.0, 1.5, 2.0배하여 총 9가지 경우에 대한 해석을 수행했다. 즉, 항복강도 및 인장강도가 1.0, 1.5, 2.0배인

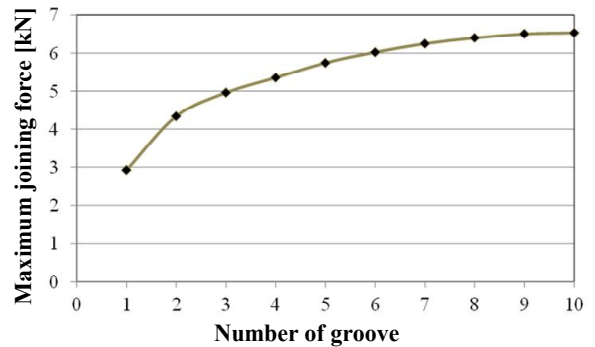


Fig. 10 Maximum joining force for number of groove

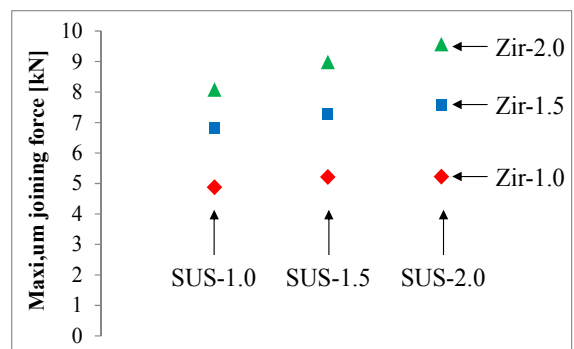


Fig. 11 Maximum joining force for yield strength

가상의 재료 물성으로 해석하였다.

Zircaloy-4와 SUS304L의 소성 물성에 따른 최대 결합력을 Fig. 11에 나타내었다. 그래프상의 Zir-1.0, Zir-1.5, Zir-2.0, SUS-1.0, SUS-1.5, SUS-2.0는 각각의 재료에서 Fig. 3에 보인 유동응력을 각각 1.0, 1.5, 2.0배한 경우를 의미한다. 예를 들면 SUS-2.0은 초기 항복응력이 200의 2.0배인 400MPa임을 의미한다. Fig. 11에서 SUS304L에 비해 Zircaloy-4의 소성 물성이 최대 결합력에 더 큰 영향을 줌을 알 수 있다. 이는 Zircaloy-4가 내부의 안내관으로 사용되었기 때문으로 사료된다. 최대 결합력은 재료의 파단보다는 안내관이 안쪽에서 이동할 때 퍼지면서 분리가 시작되기 때문이다. 이 때문에 안내관의 재료인 Zircaloy-4의 소성 물성이 최대 결합력에 더 큰 영향을 준 것으로 판단할 수 있다.

Bulge joint의 형상을 이루는 인자는 파단의 위험성이 있는 안내관을 기준으로 선정하였으며, 형상을 묘사하는 인자는 Fig. 12에 나타내었다. A는 bulge joint의 안쪽 곡면을 이루는 곡률 반경, C는 bulge joint 좌우의 라운드 형상을 이루는 곡률 반경이다. H는 bulge joint까지의 높이, 그리고 t는 안내관의 두께이다. Bulge joint 형상과 관련된 파라미터인 A, C, H, t, 4개의 인자가 최대 결합력에 미치는 영향을 분석하였다. 연결되는 두 개의 호가 2차 연속으로 만난다면, H는 C, A 그리고 t로 결정이 되지만, 본 연구에서는 2차 연속

Table 2 Analysis case for A, C, H, t

Case	A	B	C	D	H	t
1	0.5	1	1.5	2	1.5	0.5
2	0.3	0.8	1.3	1.8	1.5	0.5
3	0.5	0.8	1.5	1.8	1	0.3
4	0.3	0.6	1.3	1.6	1	0.3
5	0.5	1	1.3	1.8	1	0.5
6	0.3	0.8	1.5	2	1	0.5
7	0.3	0.6	1.5	1.8	1.5	0.3
8	0.5	0.8	1.3	1.6	1.5	0.3

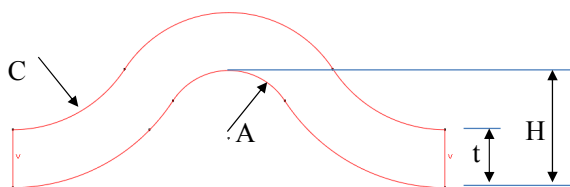


Fig. 12 Shape parameter definition of bulge joint

이 아닌 1차 연속으로 구성하여 H가 A, C, t로 결정이 되지 않아 독립 변수로 설정하였다.

해석은 1/2 요인 설계로 Table 2와 같은 경우에 대해 수행하였다. 두께 t는 기존 모델의 두께인 0.43mm를 고려하여 0.3, 0.5mm로 하였고, A와 C는 그루브의 라운드가 무리 없이 형성될 수 있는 범위에서 그루브 형상을 관찰하면서 직관적으로 설정하였다. A와 C가 Table 2에 기술된 값 범위 밖인 경우에는 그루브가 심하게 뾰족하게 생성되었다. 각 인자에 대한 주 효과 분석 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Bulge joint 형상의 곡률 반경 A와 C는 최대 결합력에 영향이 없는 것으로 분석된다. 반면, bulge joint의 높이와 안내관의 두께는 최대 결합력에 영향이 있는 것으로 판단된다. 이에 따라, H와 t에 대해서 2인자 3수준으로 상세 분석을 진행하였다. 총 9가지 경우에 대해 해석을 수행하여 주 효과 분석을 수행한 결과를 Fig. 14에 도시하였다. Bulge joint 형상에서는 높이 H의 영향이 있고, 안내관의 두께 t의 영향도 큰 것을 확인할 수 있다.

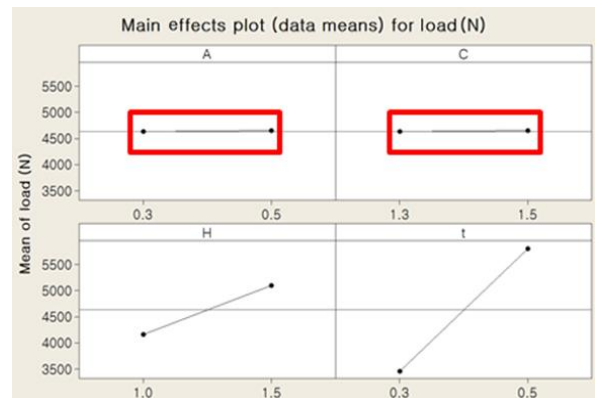


Fig. 13 Main effect plot for A, C, H, and t

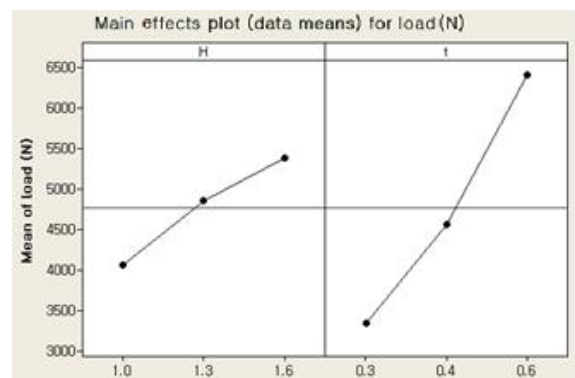


Fig. 14 Main effect plot for H and t



#### 4. 결 론

본 연구에서는 핵연료 집합체에서 집합체 하중을 상단고정체로 전달하는 bulge joint의 결합력에 대해 분석하였다. 해석 모델을 시험 결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 최대 결합력에 영향을 주는 여러 인자에 대해 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였고 향후 bulge joint를 설계하는데 유용하게 적용될 것으로 사료된다.

첫째, bulge joint의 결합력을 해석하는 모델을 구성하였고, 마찰계수의 영향을 분석하였다. 마찰계수가 0.2일 때 실험과 비교하여 잘 맞음을 확인하였다.

둘째, bulge joint의 그루브 개수가 증가할수록 최대 결합력이 증가하였고, 최대 결합력의 증가 기울기는 점점 감소하여 그루브가 10개 이상인 경우 최대 결합력 약 6.5kN으로 수렴하였고, 더 이상 증가하지 않는 것을 알 수 있었다.

셋째, 안내관의 재료인 Zircaloy-4의 항복강도가 삽입관의 재료인 SUS304L의 항복강도보다 최대 결합력에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있었다.

넷째, 그루브 형상에서 안쪽 및 바깥쪽 곡률 반경은 최대 결합력에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있었고, 그루브의 높이와 안내관의 두께가 최대 결합력에 큰 영향이 있음을 알 수 있었다. 조립체 외측에 위치한 삽입관의 그루브는 변형이 거의 없고, 내측에 위치한 안내관의 그루브가 심하게 변형되면서 분리된다. 그렇기 때문에 안내관의 재료 강도가 영향이 크음을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2014171020166A).

#### 참고문헌 (References)

- (1) Kim, J. Y., Yoon, K. H. and Song, K. N., 2006, "Effect Evaluation of Geometrical Non-uniformity of the Guide Tube Cell for Local Buckling," *Proceedings of KSME 2006 Spring Conference*, pp. 1322~1326.
- (2) Kim, K. H., Park, N. G., Kim, K. J. and Suh, J. M., 2012, "The Grid Strap Vibration Characteristics of the 5x5 Nuclear Fuel Mock-up," *Korean Soc. Noise and Vib. Eng.*, Vol. 22, No. 7, pp. 619~625.
- (3) Kwon, Y. J., 2016, "Impact Force Applied on the Spent Nuclear Fuel Disposal Canister that Accidentally Drops and Collides onto the Ground," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 40, No. 5, pp. 469~481.
- (4) Hong, J., Heo, S.-H., Kim, K.-H., Park, S.-J. and Joung, C.-Y., 2014, "Development of Disassembly Tool for Intermediate Examination of Nuclear Fuel Rods," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 4, pp. 443~449.
- (5) Morales, M., Cerracin, A., Aleshinm, Y. and Kim, J. H., 2012, "SAVAN 3D: Improving Simulation Capabilities of the SAVAN Technology," *Proc. 2012 Water Reactor Fuel Performance Meeting*, Manchester, UK, pp. 1~8.
- (6) Song, K. N., Heo, S. P., Yoon, K. H., Kang, H. S. and Jung, Y. H., 2002, "Elastic-plastic Characteristic Analysis and Test on the Spacer Grid Springs for PWR," *Proceedings of KSME 2002 Spring Conference of Materials and Fracture Division*, pp. 157~162.
- (7) Lee, H. A., Kim, C. K., Song, K. N. and Park, G. J., 2007, "Design of a Nuclear Fuel Spacer Grid Considering Impact and Wear," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 10, pp. 999~1008.
- (8) Jeon, S. Y. and Lee, Y. S., 2005, "A Study on the Buckling Characteristics of Spacer Grids in Pressurized Water Reactor Fuel Assembly," *Journal of Computational Structural Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 405~416.
- (9) Lee, S. B., Kim, Y. W. and Song, K. N., 2008, "Parameter Study for a Dimple Location in a Space Grid under the Critical Impact Load," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 2024~2029.
- (10) Song, K. N., Lee, S. H., Lee, S. B., Lee, J. J. and Park, G. J., 2010, "Study on the Lateral Dynamic Crush Strength of a Spacer Grid Assembly for a LWR Nuclear Fuel Assembly," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 9, pp. 1175~1183.
- (11) Song, K. N. and Lee, S. H., 2012, "Lateral Crush Strength of Nuclear Fuel Spacer Grid

- Considering Weld Properties,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 12, pp. 1663~1668.
- (12) Kim, H. C., Na, M. K., Jung, H. K., Kim, J. Y. and Kim, J.-B., 2018, “A Study on the Equivalent Spring Model of a Nuclear Fuel Cell Spacer Grid,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 42, No. 2, pp. 143~151.
- (13) Nuclear Fuel Industries, Ltd., 2013, *Light-water Reactor Fuel*, <http://www.nfi.co.jp/e/product/prod02.html>.
- (14) ABAQUS, 2012, *ABAQUS Manual*, Version 6.12, Dassault Systems, USA.