

연료전지차용 수소배출 배관 및 배관이음매 안전성 평가를 위한 기초 연구

The Basic Study on the Leak Test Method of the Hydrogen Exhaust Pipe for a Fuel Cell Vehicle

서호철^{1,3}, 박경석^{2,✉}, 서경두⁴, 용기중⁵
Ho Cheol Suh^{1,3}, Kyoung Suk Park^{2,✉}, Kyung Doo Seo⁴ and Gee Joong Yong⁵

1 경희대학교 대학원 기계공학과 (Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kyunghee Univ.)

2 경희대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyunghee Univ.)

3 세종공업(주) (Sejong Industrial Co., LTD.)

4 TOMS (Technologies of Material Sciences)

5 교통안전공단 자동차성능연구소 (Korea Transportation Safety Authority, KATRI.)

✉ Corresponding author: ks2507@khu.ac.kr, Tel: 031-201-2507

Manuscript received: 2010.9.13 / Revised: 2010.12.9 / Accepted: 2010.12.31

This study deals with a basic proposal to prove the safety for the exhausted fittings of the hydrogen fuel cell vehicle. First, this study was approached to numerical analysis solving to close the exact boundary condition (Axial, Bending, Lateral) and the second, this study produced the Lateral movement equipment for the vibration. For the numerical analysis, This study was considered with the exact solution of Lateral movement and the resonance effect for durability sample according to fitting positions. The second, This study was made for special equipment for displacement/gas leak and the frequency because the domestic samples were comparing with foreign fitting and foreign fitting for the hydrogen fuel cell vehicle. The result of this study was satisfied with domestic fittings for the basic reference but it need more test because of other situation for hydrogen fuel cell vehicle.

Key Words: Leak Test (기밀시험), Hydrogen Exhaust Pipe (수소배관), Pipe Fitting (파이프 이음매)

1. 서론

지구온난화 및 화석연료 사용의 제한적임에 따른 대표적인 수송기관인 자동차에서의 친환경 대체연료 사용은 필수불가결한 사항이다. 이에 따라 완성차 업체 및 국가정부 기관에서는 에너지 패러다임의 변화에 대응할 수 있는 연료 전지차 개발을 적극적으로 추진하여 어느 정도의 기술적인 성과 및 완성도를 이룰 수 있었다. 따라서 수소 연료전지자동차의 개발이 현실화되면서 자동차에 탑

재되는 수소연료 저장시스템과 수소연료 공급시스템은 실용화를 좌우하는 중요인자가 되고 있다. 그리고 무엇보다 수소를 연료로 사용하는 자동차는 수소 배관계에 사용되는 각종 구조물과 부속류에 대한 안전성 확보가 가장 중요한 기술적 요구 사항이며, 이는 사용자들로 하여금 명확한 판정방법과 기준을 제시해야 할 필요가 지속적으로 요구되어져왔다.^{1,2}

일반적 배관계의 이음매는 그 평가방법이나 기준 등이 제시되어 있어 사용에 대한 판정이 용이

하나, 하지만, 본 연구에 사용된 배관 이음매의 경우에는 연료 전지차의 수소 배관계의 연결용으로 차량 진동에 의한 수소 배관계 및 이음매에 대한 평가방법이나 기준 등이 없어서 사용상의 적합성이나 판단이 명확하게 제시되어 있지 않다.

이에 본 연구에서는 연료전지 자동차의 스택에서 수소연료 이송 중에 사용되는 수소 배관과 이음매에 대한 안전성 평가기준마련을 위한 내구성을 시험 평가 하였다.

현재 수소 배관계 및 이음매의 구조는 Fig. 1 과 같으며 고압용기 350 bar 의 압력은 Regulator 를 통하여 7~10 Bar 로 감압되어 배출된다.³

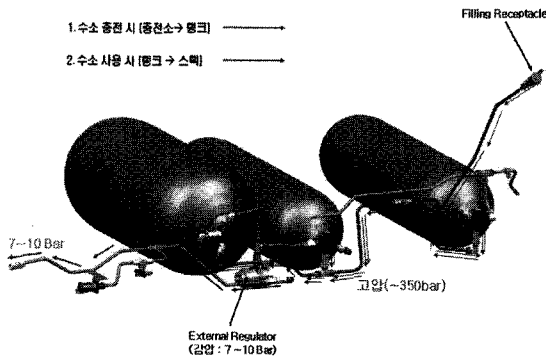


Fig. 1 Structure of Hydrogen Pipe and Fitting

연료 전지차의 수소 배관계의 이음은 일반적으로 용접접합, 플랜지접합, 그리고 배관 이음매접합을 혼용하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 연료전지차용 수소배출 배관 및 배관 이음매 안전성 평가기준을 확보하기 위하여, 기초적 연구로 수소 배관계에 가장 널리 사용되고 있는 배관 이음매 부위의 하중/변위 측면에서의 수치 해석적 평가 및 실험적 평가를 실시하였다.

2. 이론적 배경

일반적인 배관계 이음매의 구조강도를 평가하기 위해서는 Axial, Bending, Lateral 등의 하중 및 변위로 평가할 수 있다.

Axial 강도의 경우 하중 또는 변위에 의하여 동일한 응력을 가지나, 본 연구와 같이 이음매의 내구강성을 비교평가 하기 위해서는 One Side Fixed End (Bending 현상)과 Both Side Fixed End (Lateral 현상)에 대한 정확한 이해가 있어야 한다.

일반적인 이음매평가의 경우 Bending 과 Lateral 현상을 혼동하여 사용하고 있으나, 본 연구에서 사용되어진 내구 실험장비의 경우 양 끝단에서의 응력반복 현상이 이음매의 내구성과 매우 밀접한 관계를 가지고 있으므로 이에 대한 정확한 이론적 고찰이 필요하다. 또한, 이음매 위치에 따른 응력 분포를 확인 하였으며, 실험 시 공진 영향을 최소화 하기 위한 이음매의 위치에 따른 고유진동수를 확인하여 시험 주파수 영역대에 공진현상이 발생 하지 않도록 하였다.

2.1 One Side Fixed End (Bending)

Beam 에서의 Bending 에 대한 운동이 Fig. 2 에 나타나 있다. 여기서 Lateral 방향의 변위 처짐량 (δ')이 Bending 에 의한 변위 (δ) 와 동일하게 되기 위해서는 다음의 $\delta = \delta' \cos \theta$ 관계가 성립하여야 하며, 이는 각도(θ)가 매우 작을 경우에 성립한다.⁴

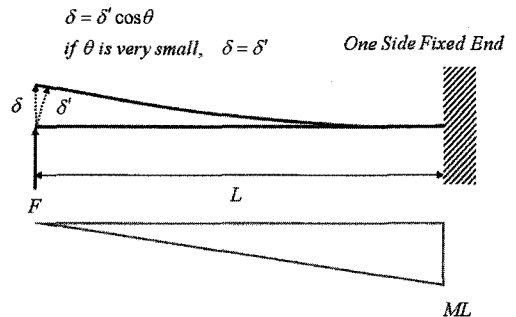


Fig. 2 One Side Fixed End

Bending 운동에 대한 모멘트 및 응력에 대하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{F(L)^3}{3EI}, F = \frac{3EI \delta}{L^3}$$

$$M = FL = \frac{3EI \delta}{L^2} \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{3E \delta}{L^2} \left(\frac{D}{2} \right) = \frac{3}{2} (ED) \left(\frac{\delta}{L^2} \right)$$

여기서, E : Young's Modulus

δ : Deflection, $c = D/2$

I : 2nd moment of inertia

이다.

2.2 Both Side Fixed End (Lateral)

Beam 양단고정에서의 Lateral 운동은 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 Bending 운동을 이용하여 해석적으로 설명할 수 있다. Bending 과 Lateral 운동은 서로 다른 경계조건으로 양단고정 Lateral 운동의 경우 양단에서 동일한 Moment 를 가지게 되며, 서로 동일한 Beam 형상의 경우 서로 동일한 응력을 가진다.

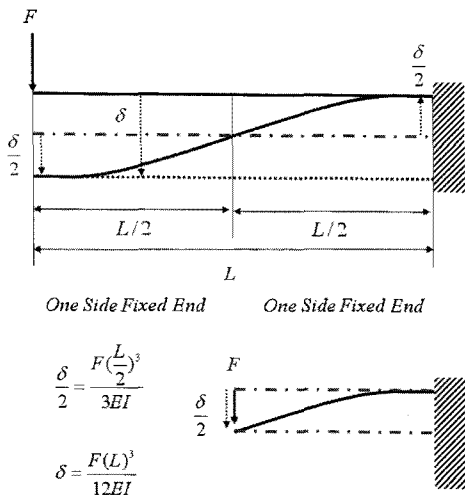


Fig. 3 Both Side Fixed End

이는 위에서 언급한 Bending 운동의 형태를 반으로 나누어 해석적으로 접근할 수 있으며, Lateral 변위에 대한 항이 서로 나누어 기술되어야 한다.³

지금까지 Bending(One Side Fixed End)과 Lateral (Both Side Fixed End) 운동으로 인한 변위 및 Moment 관계를 살펴보았으며, Max. Lateral 변위 측면에서 요약하면 식(2)와 같으며, 동일 처짐량 및 응력의 경우 중앙에서 Both Side Fixed End 에서 4 배 가량의 Stress 가 증가한다.

$$\delta = \frac{F(L)^3}{12EI}, F = \frac{12EI\delta}{L^3}$$

$$M = FL = \frac{12EI\delta}{L^2} \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{12E\delta}{L^2} \left(\frac{D}{2}\right) = 6(ED) \left(\frac{\delta}{L^2}\right)$$

Fig. 4 와 Fig. 5 는 동일 하중에 대한 처짐량과 응력(Stress)에 대한 비교 그래프이다.

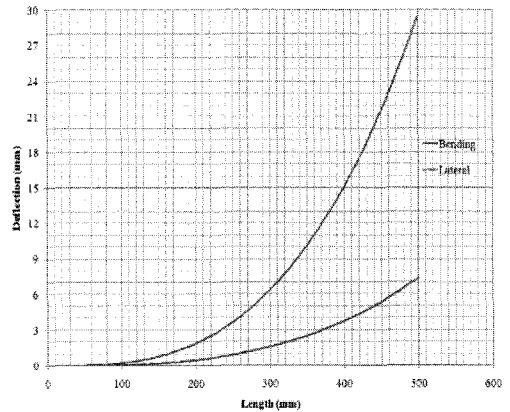


Fig. 4 Deflection Characteristics for Length

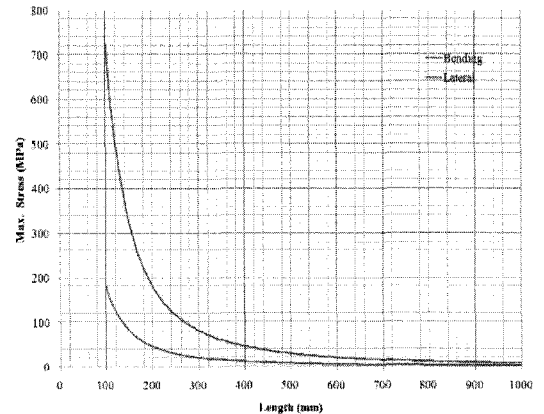


Fig. 5 Stress Characteristics for Length

2.3 이음매 위치에 따른 응력 해석 결과

FE 모델의 경우 이론과의 비교를 위하여 서로 다른 이음매를 가진 두 가지 형태의 Beam 요소로 Fig. 6 과 같이 각각 모델링 하였다. 배관 이음매 경우 등가화된 Stiffness 에 따라 이론적 해석값과는 약간의 오차를 가지고 있으므로, 이를 Beam 으로 모델링 하여 양단 고정에 의한 변위 + 1 mm 에 대한 해석을 수행하였다. Sample 의 경우 양단 고정 단은 용접 이음매에 대한 결과 역시 도출할 수 있다.

- Beam 으로 모델링 및 Boundary Condition
- FEM: 탄성 정적 해석 (Linear Static)
- 전체 길이: 350 mm
- Mesh Type: Beam
- (1/2 inch Pipe-Thickness 1.24mm)
- 직선 이음매: Equivalent Beam

Material: Stainless Steel 316L
 E (Young's Modulus): 190 GPa
 V (Poisson ratio): 0.265
 B.C: 변위 및 회전 고정 (123456)
 변위(하중): Lateral(Only y 방향 free) + 1 mm

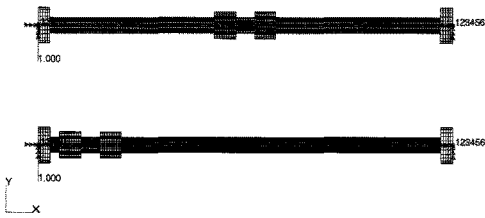


Fig. 6 FE Beam Model for Fitting

Distance of the fixed End

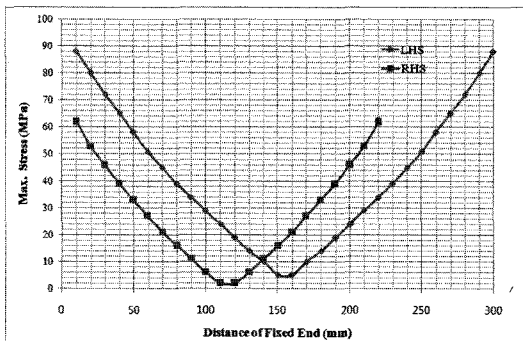
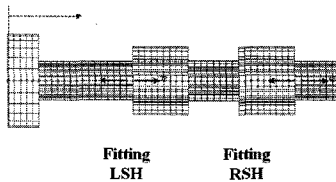


Fig. 7 Stress Characteristics for Distance Fixed End

다음으로 이음매 위치에 따른 탄성해석을 그래프로 나타내면 Fig. 7 과 같으며, 이음매의 최종 위치는 시험의 작업공간 및 가진 내구 비교평가를 위하여 Stress 를 가장 많이 받는 부분에 설치하여 비교 평가를 실시하였다.⁵

2.4 이음매 위치에 따른 고유진동수

본 연구에서는 이론과 FE Model 간의 고유진동수를 확인하였으며, 이론적 해의 경우 fitting 에 의한 무게는 무시되었다. FE Model 의 경우 등가화 강성을 이용하여 이음매가 있을 때의 고유진동수를 이론값과 비교하였다.

Beam with Uniformly Distributed Mass⁶

$$\omega_n^2 = \beta_n^4 \frac{EI}{(m / L)}$$

E : Young's Modulus
L : Length , *m* = total mass
I = 2nd moment of inertia

여기서 끝단이 Free 상태 일 경우 (One Side Fix)

$$\beta_1 L = 1.8751$$

$$\beta_2 L = 4.6941 \text{ 이며,}$$

구속상태일 경우 (Both Side Fix)

$$\beta_1 L = 4.73$$

$$\beta_2 L = 7.8532 \text{ 를 가진다.}$$

따라서, 이론적 1 차 고유진동수는 다음과 같다.

One Side Fix $\omega_1 = 572 .9$, $f = 91 .2$ Hz

Both Side Fix $\omega_1 = 3645 .6$, $f = 508 .2$ Hz

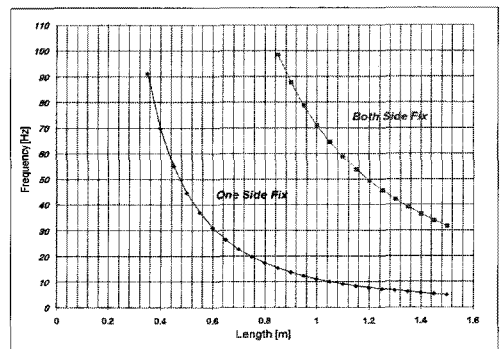


Fig. 8 Natural Frequency

이음매를 포함한 배관계 공진 주파수를 확인한 결과 중간 지점에서는 Fig. 9 와 같이 492Hz 의 1 차 고유진동수가 계산되었다. 이는 이론적 해와 유사한 형태를 가지며, 끝단과 연결된 지그의 영향으로 FE 결과와 유사한 형태의 공진 모드를 가지게 된다. 끝단에서는 Fig. 10 과 같이 696 Hz 의 1 차 고유진동수가 계산되었으며, 이 경우는 끝단의 강성증가로 인하여 고유진동수가 증가한 것으로 판단되며, 가진 내구실험 시 공진의 영향을 확인하기 위한 기초데이터로 활용되었다.

- FEM: Modal 해석
- 전체 길이: 350 mm
- Mesh Type: Beam
- (1/2 inch Pipe-Thickness 1.24mm)
- 직선 이음매: Equivalent Beam
- Material: Stainless Steel 316L
- E (Young's Modulus): 190 GPa
- Density: 7290 Kg/m³
- V (Poisson ratio): 0.265
- B.C: 변위 및 회전 고정 (123456)
- 변위(하중): Lateral(Only y 방향 free) + 1 mm

MSC Patran 2006 07-Oct-10 02:42:49
 Fringe: MODE_SCI, A1 Mode 1 : Freq. = 491.58, Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)
 Deform: MODE_SCI, A1 Mode 1 : Freq. = 491.58, Eigenvectors, Translational.

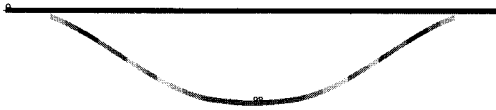


Fig. 9 1st Natural Frequency for Center Position (492Hz)

MSC Patran 2006 07-Oct-10 02:48:40
 Fringe: MODE_2SCI, A1 Mode 1 : Freq. = 695.96, Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)
 Deform: MODE_2SCI, A1 Mode 1 : Freq. = 695.96, Eigenvectors, Translational.

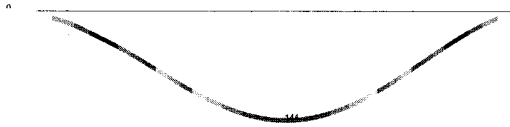


Fig. 10 1st Natural Frequency for End Position (692Hz)

3. 실험 및 평가

본 연구에서는 이론적 평가기준뿐만 아니라 수소 배관계 이음매의 내구 평가 장치를 구성하여 현재 사용되고 있는 국내산 이음매와 수입산 이음매의 내구성능을 비교 평가하였다.

본 연구에 사용된 내구 평가장치는 주파수와 변위를 모터로 제어하였으며, 미세 Crack 에 대한 확인을 할 수 있도록 가스 공급 및 차단 장치를 구성하였다. 장비에 대한 상세 구성도는 Fig. 11 에 나타나 있다.⁷⁻¹⁰

앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서 사용된 장비는 크게 구동부인 변위조절 부와 압력 공급제어 부로 나누어 질 수 있으며, 압력공급 및 제어 Gas 의 경우 위험성을 감안하여 헬륨(He)으로 대체하여 시험장비를 구성하였다.

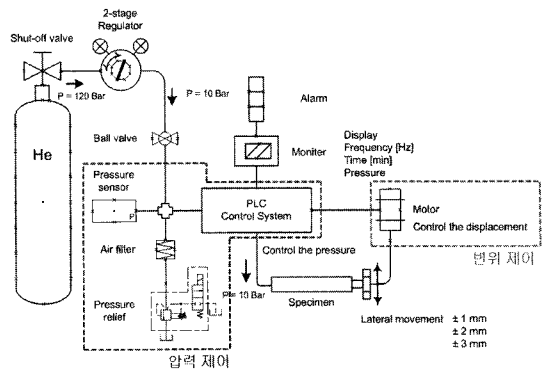


Fig.11 Experimental Set Up for Fitting Characteristics

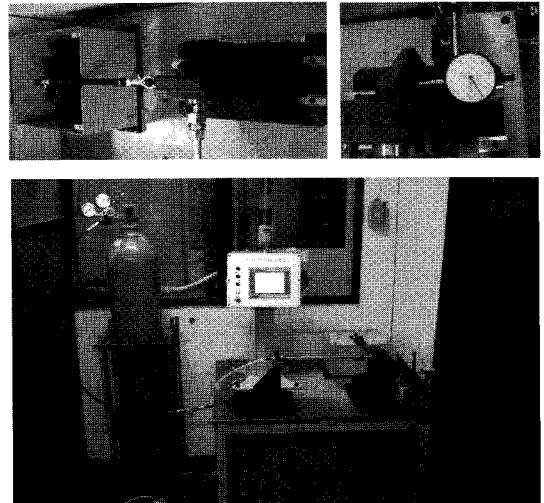


Fig. 12 Photo of Fitting Characteristics Test

1) 변위 제어 부

본 연구에서는 모터에 캠축을 장착하여 모터 1 회전에 대한 회전 변위를 캠축과 연결되어 있는 나사를 이용하여 조절하도록 만들어 졌으며, 이때 미세 변위의 정확성을 위하여 다이얼 게이지를 사용하여 초기 변위를 정확하게 조절하였다.

2) 압력공급 및 제어부

본 연구에서는 수소 대신에 안전성을 고려하여 수소와 유사한 헬륨(He) 가스를 사용하였으며, 초기 헬륨은 120 Bar 로 충전하였으며, 연료전지 자동차 수소 공급 배관계와 유사하게 Regulator 에서 8 ±1 Bar 로 공급하도록 하였으며, 시험체 압력의 공급 및 차단은 압력센서와 PLC System 을 이용하여 제어되도록 설계되었다.

3.1 이음매(국내산/수입산) 구조

일반적인 직선 이음매의 구조는 Fig. 13 에서 보는 바와 같이 수소 공급 연결 배관은 이음매의 나사구조를 이용하여 연결하고 있으며, 내부 구조 및 원리는 나사 구조를 이용하여 앞뒤 덮개(Front & Back Ferrule)를 배관계에 밀착시키는 구조가 가장 일반적인 형태이다.

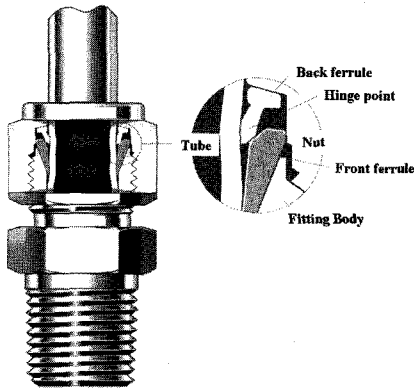


Fig. 13 Structure of the Fitting

본 연구에서 사용된 수입산과 국내산 이음매의 경우는 동일 구조를 가지고 있으며, 치수는 Table 1 과 같다.

Table 1 Dimension of the Test Fitting

	Domestic Product	Imports
Pipe Diameter	1/2	1/2
Total length	2.02	2.02
Length	0.86	0.96
Thread Diameter	0.75	0.5

Unit [inch]

3.2 실험조건 설정

앞서 언급한 바와 같이 이음매의 경우는 재료의 특성치와는 달리 여러 가지 조건(산포)에 의한 영향을 Factor(2.5)로 추가한 변위를 산출하여 초기 가진 내구 변위에 적용하였다. 또한, 시험 시간의 증가로 인하여 백만회 초기 가진 내구 실시 후 변위를 1 mm 씩 늘여가며 각종 상용 이음매의 내구 강성을 비교 평가할 예정이며, 이는 적절한 안전 Factor 재선정을 통하여 배관 및 배관 이음매 안전성 평가가준 마련에 중요한 자료가 될 것이라 사료된다.

Table 2 1st Experimental Conditions

Target Cycles	Stress [MPa]	Factor	Frequency [Hz]	Displacement [mm]	Pressure [Bar]
1 M	94.8	2.5	6	±1	8±1

Table 3 2nd Experimental Conditions

Target Cycles	Stress [MPa]	Factor	Frequency [Hz]	Displacement [mm]	Pressure [Bar]
1 M	189.6	-	4	±2	8±1
Until Crack	284.4	-	3	±2	8±1

3.3 배관 이음매(국내산/수입산) 시편

시험시편은 장비의 크기 및 용량을 감안하여 총 길이(L)를 350 mm 로 하였으며, 이음매의 위치는 Fig. 13 에서 보는 바와 같이 장착성을 용이하게 하기 위하여 20 mm 공간을 두어 제작하였다. (1/2 & 1 inch 이음매)

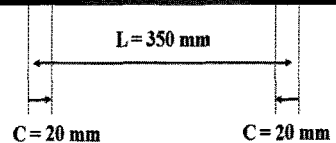
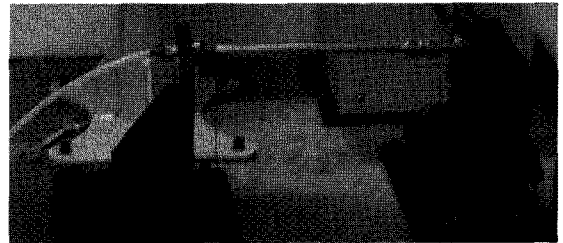


Fig. 14 Specimens of Pipe Fitting

4. 실험결과

배관계 이음매의 경우 체결방법 및 조건에 따라 많은 시험이 요구되고 있다. 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 수입산 이음매를 기준으로 국산 이음매와 동일조건 하에서 가진 내구비교 평가하였으며, 비교 평가는 주기적으로 200,000 Cycles 에서 육안 및 비눗방울로 기밀성능을 확인하였다. 초기 100 만 Cycles 후 최종적으로 이음매 누기 현상을 평가한 결과는 Fig. 15 ~ 17 과 같다. 평가 결과 시편으로 사용한 상용 이음매에서는 누기 현상이 발생하지 않았으며, 향후 지속적인 연구를 위

하여 2 차 시험에서는 변위를 증가하여 보다 가혹한 경계조건 상태에서 가진 내구 평가 비교가 이루어질 예정이다.

- 1st Target: No Leak after the 1 M Cycles (± 1 mm)
- 2nd Target: No Leak after the 1 M Cycles (± 2 mm)
- 3rd Target: Until Crack or Leak (± 3 mm)

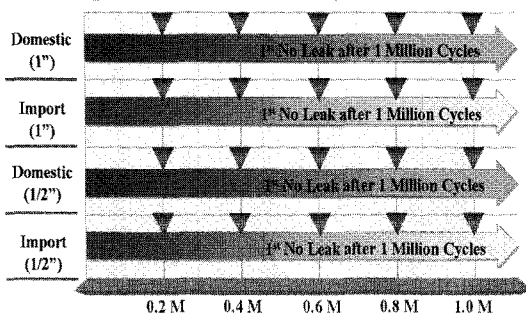


Fig. 15 Result of the Test

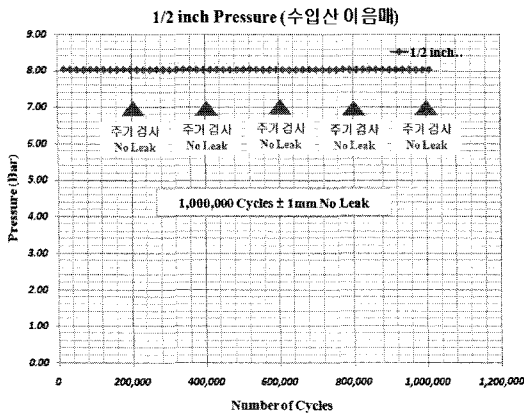


Fig. 16 Leak Result of the Domestic Specimen

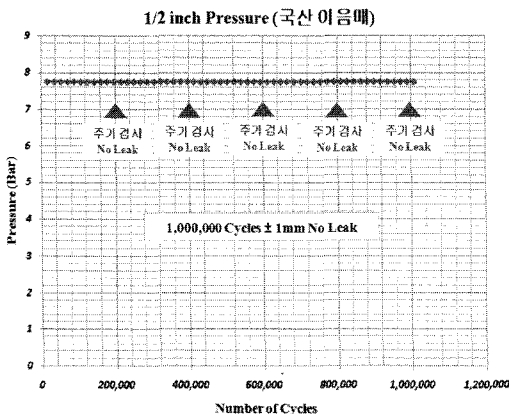


Fig. 17 Leak Result of the Imports

5. 결론

본 연구에서는 연료전지차용 수소배관 및 배관계 이음매에 대한 안전성 평가 기준마련을 위하여 이음매별 사용현황을 분석하였고, 또한 수치해석을 통한 하중제어 및 변위제어에 대한 이론적 고찰로부터, 내구성 평가를 위하여 시험장치를 구성하고 가장 널리 사용되고 있는 각종 상용 배관 이음매를 사용하여 시편을 제작하고 이들에 대한 내구성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가진방향 및 가진레계의 안정성을 확보하기 위하여 Lateral 운동 가진을 이용한 고압가스 누설 시험 장비를 구성하였으며, 이음매 시험장비 및 조건에 따른 적합한 이론적 배경을 본 연구에서 확인하였다. (Axial, Bending, Lateral)

2) 본 연구에서는 수소 연료탱크에서 연료파이프로 이송되는 압력을 7~10Bar 로 가정하여 8 \pm 1 Bar 의 시험조건으로 수소가스 사용의 안전성 문제가 우려되어 헬륨(He)을 사용하여 시험하였고, 이음매 위치에 따른 응력해석 및 고유진동수 결과를 확인하여 가진 내구시험조건 설정을 하였으며, 이음매(국내산/수입산)의 Lateral 단축 가진 내구 비교 시험을 ± 1 mm 에서 100 만회 수행하여 Gas 누출이 없음을 확인하였다.

3) 향후 가혹한 조건에 대한 이음매 부분의 안전성에 대한 평가기준을 마련하기 위해서는 각 방향(Axial, Bending, Lateral)에 대한 시스템을 추가하여 이론과 시험에 대한 연관성을 정확하게 파악하는 것이 필요할 것으로 판단되고, 이음매에 관한 품질관련 변수를 고려한 안전성 평가가 이루어지도록 하기 위해서는 많은 수량에 대한 시험 평가가 이루어져 평균 내구성 값을 산출하여야 한다.

후 기

본 연구는 2009 년도 연구년 기간에 참여되었으며 국토해양부 교통체계효율화사업의 지원(07 교통체계-미래 02)에 의해 수행되었으며, 실험과 자료 정리에 도움을 준 경희대학교 열공학실에 장재진, 김선진 군에게 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Kwak, S. L., Lee, J. S., Kim, Y. J. and Park, Y. W., "Development of CANDU Pressure Tube Integrity

- Evaluation System : Its Application to Delayed Hydride Cracking and Blister," J. of KSPE, Vol. 19, No. 11, pp. 174-182, 2002.
2. Rybin, H., Krainz, G., Bartlok, G. and Kratzer, E., "Safety demands for Automotive Hydrogen Storage Systems," MAGNA STEYR Presentation, 2005.
 3. Lee, J. W., Lee, K. B. and Yong, G. J., "Review of Rule-making Activities on Hydrogen Fuel Cell Vehicle," Proc. of KSAE Annual Conference, pp. 877-883, 2008.
 4. Raz, S. A., "Analytical Methods in Structural Engineering, 2nd Edition," New Age International, pp. 131-135, 2001.
 5. Ralph, I. S., Ali, F., Robert, R. S. and Henry, O. F., "Metal Fatigue in Engineering, 2nd Edition," John Wiley & Sons, pp. 210-218, 2001.
 6. Wang, D., Friswell, M. I. and Lei, Y., "Maximizing the natural frequency of a beam with an intermediate elastic support," J. of Sound and Vibration, Vol. 291, No. 3-5, pp. 1229-1238, 2006.
 7. Suh, H. C., "Hydrogen Supply System of fuel Cell Vehicle," KSAE Workshop, pp. 189-199, 2009.
 8. Ho, K. G., "A Theoretical Analysis for the Fuel Rod with Nonlinear Thermal Stress," Energy Eng. J., Vol. 12, No. 3, pp. 177-183, 2003.
 9. Shackelford, J. F., "Introduction to Materials Science for Engineers, 7th Edition," Pearson Prentice Hall, 2009.
 10. ASME B31.3, "Process Piping Guide Rev. 2," LANL Engineering Standards Manual PD342, 2009.