

시험평가법을 이용한 IRB 면진장치 롤러 설계 : Part 1. 기하학적 형상 및 크라우닝

Roller Design of IRB Seismic Isolation Device Using Testing Evaluation : Part I. Geometry Dimension and Crowning

박 영 기* · 하 성 훈* · 성 민 상* · 전 준 철* · 최 승 북†

Young-Gee Park, Sung Hoon Ha, Min-Sang Seong, Junchul Jeon and Seung-Bok Choi

(Received December 27, 2012 ; Revised December 27, 2012 ; Accepted January 15, 2013)

Key Words : Seismic Isolation Device(면진장치), IRB(isolation roller bearing), Roller(롤러), Geometry Dimension (기하학적 형상), Crowning(크라우닝)

ABSTRACT

This paper presents a new method for roller design of IRB(isolation roller bearing) seismic isolation device using experimental evaluation. Three layered plate is adopted for the IRB in which the upper plate is placed on x direction and the lower plate is placed on y direction. The rollers placed in each plate make a plate movement. The roller is then optimally designed using variable geometric conditions. Stress distribution depends on the diameter and length of the roller and hence this is used for the determination of optimal geometry of the roller. In the experimental evaluation, it is observed that stress concentration at the end sides of roller is decreased and geometric coefficients depend on crowning dimension. In addition, in order to determine optimal design parameters of the roller the plastic deformation and friction are experimentally identified.

1. 서 론

지진에 대한 안전성을 확보하기 위한 방법에는 크게 내진, 제진, 면진의 3종류가 있다. 내진은 구조물의 강도를 증가 시켜 구조물이 무너지지 않도록 하는 것이며, 특수한 기계 장치를 이용하여 구조물의 진동을 적극적으로 제어하는 방식을 제진이라고 한다^(1,2). 또한 면진은 특수한 기초분리 장치를 이용, 구조물을 지지하여 구조물의 지반진동에 의한 반응력을 줄이는 방식이다. 건축물의 면진기술 중 특히

IRB(isolation roller bearing)는 다른 방법보다 설치 공법이 단순하고 진동제어 효과가 탁월한 장점을 가져 현재 활발히 연구되고 있다⁽³⁾.

건축 면진용 IRB는 Fig. 1과 같이 중간 플레이트를 중심으로 상부 플레이트와 하부 플레이트가 서로 직교되게 3단 적층 구조로 형성되어지며, 이러한 적층 결합단면에 롤러를 수납시켜 지진의 진동 발생 방향에 따라, x, y축으로 슬라이드되는 방식으로 면진을 수행한다⁽⁴⁾. IRB와 같은 직동 시스템이 정지 혹은 운동하고 있는 상태에서 과도한 하중을 받거나 큰 충격 하중을 받는 경우에 구름면과 전동체

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : +82-32-860-7319, Fax : +82-32-868-1716

* Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

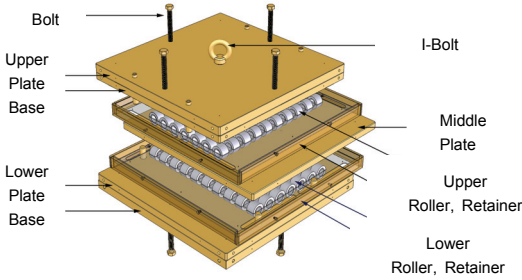


Fig. 1 Configuration of IRB

사이에 국부적인 영구변형이 발생한다. 특히 면진시스템에 사용되는 IRB는 평상시 건축물과 같은 큰 하중을 지지하여야 하므로 주요 부품인 롤러와 플레이트 사이에 변형이 발생하기 쉬우며, 이는 지진 하중에 노출되었을 때 운동방향에 큰 저항이 생겨 면진장치가 작동하지 않을 수 있다. 즉, 특정 값 이하의 영구 변형량을 가질 때 시스템의 원활한 작동이 보장 된다고 할 수 있다. 따라서 시험 전 후에 IRB 시스템의 롤러에 대하여 진원도 측정기를 이용한 영구 변형량 및 마찰계수 측정을 시행하고 이 값을 비교하여 적절한 롤러를 사용하여야 하며 롤러 표면 가공인 크라우닝 가공을 하여 양 끝단의 응력 집중을 제거해야 한다⁽⁵⁾.

따라서 이 연구에서는 IRB 핵심 부품인 롤러를 설계하기 위하여 롤러의 기하학적 형상과 크라우닝을 바탕으로 재료의 변형량, 마찰계수 등을 실험적으로 측정하여 건축 면진용 롤러의 적합한 롤러를 설계 및 제작하였다. 최종적으로 IRB 장치에 적합한 최적의 롤러의 기하학적 형상을 도출하였다.

2. 접촉응력

2.1 접촉응력 이론

롤러와 플레이트가 구름 접촉 같은 하중 조건을 가질 때, 구면을 가진 물체의 접촉응력에 관해 Hertzian stress 이론을 적용하면 최대응력과 변형량은 다음의 식으로 표현할 수 있다⁽⁶⁾.

$$\text{접촉면 너비 } b = 1.60 \sqrt{pK_D C_E} \quad (1)$$

$$\text{최대압축응력 } \sigma_{c,max} = 0.798 \sqrt{\frac{p}{K_D C_E}} \quad (2)$$

롤러의 직경방향 변형률

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{4p(1-\nu^2)}{\pi DE} \left(\frac{1}{3} + \ln \frac{2D}{b} \right) \quad (3)$$

$$p = F/L$$

$$C_E = \frac{2(1-\nu^2)}{E}$$

$$K_D = D$$

식 (2)와 식 (3)의 p , K_D , C_E 를 치환하면 다음과 같다.

$$\sigma_{c,max} = 2.69 \times 10^5 \sqrt{\frac{F}{DL}} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta D}{D} = 5.60 \times 10^{-12} \left(\frac{F}{DL} \right) \cdot \left(\frac{1}{3} + \ln(4.22 \times 10^5 \sqrt{\frac{DL}{F}}) \right) \quad (5)$$

식 (5)에서 $\ln(4.22 \times 10^5 \sqrt{\frac{DL}{F}})$ 항은 영향이 미미하므로 무시할 수 있으며, 식 (4)와 식 (5)의 최대응력과 변형률은 F/DL 만의 함수가 되므로 최대응력과 변형률을 줄이기 위해서는 F/DL 값을 작게 하면 된다. 즉, 같은 구조에서 롤러의 개수를 늘려 롤러 1개당 받는 하중인 F 를 줄이고, 롤러의 크기를 크게 하여 직경 D 와 길이 L 을 증가시키는 것이 롤러와 플레이트면이 받는 최대응력과 변형량을 줄이는 방법이 될 것이다. 그러나 일반적으로 IRB는 크기가 정해져 있으므로 동시에 롤러의 개수를 늘리면서 롤러의 크기를 크게 할 수는 없다. 또한 IRB가 받는 하중과 롤러가 들어갈 공간의 전체 크기가 정해져 있다면 롤러 1개당의 단면적 DL 과 F 는 비례하므로 F/DL 은 항상 일정한 값을 가진다. 즉 최대응력값과 롤러의 변형률 또한 일정한 값으로 정해진다.

2.2 접촉응력 해석

Hertzian stress의 기본적인 가정이 롤러의 길이 L 이 직경 D 에 비해 충분히 크고, 접촉폭 b 가 직경 D 에 비해 충분히 작다는 것이므로, 이를 참고로 하여 좀 더 실제와 유사한 결과를 도출하기 위해 유효요소 해석을 수행하였다.

해석 모델은 수직하중을 롤러 당 600 ton으로 하

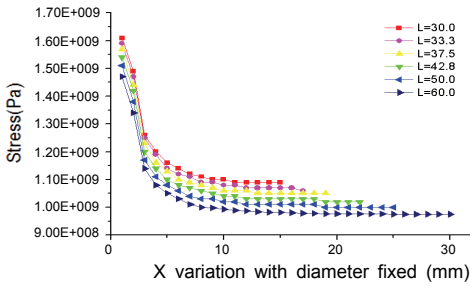


Fig. 2 X direction stress with diameter fixed

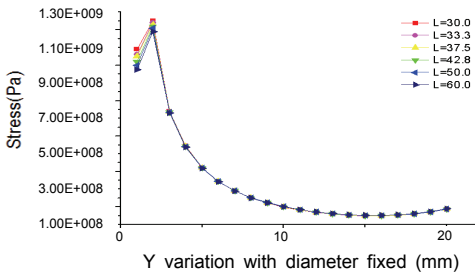


Fig. 3 Y direction stress with diameter fixed

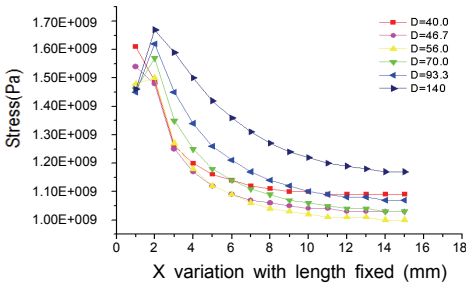


Fig. 4 X direction stress with length fixed

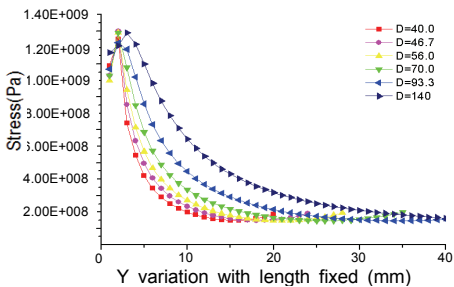


Fig. 5 Y direction stress with length fixed

고 직경 및 길이는 100 mm부터 각각 500 mm, 1000 mm까지로 고정하였다. 롤러가 중심에 대하여

x, y, z 축 대칭이므로 대칭 경계조건을 적용하여 1/8 모델을 사용하였고, 롤러 상단면에 압력으로 하중을 가하였다.

직경과 길이 변수들의 변화에 따른 영향을 보기 위해 직경을 고정하고 길이를 변수로 주었을 경우와, 반대로 길이를 고정하고 직경을 변수로 주었을 경우의 응력의 변화 경향을 보았다. 전체 하중이 600 ton으로 같고 하중을 받는 단면적의 합이 같으므로 단위 면적당 하중은 항상 일정하다.

Fig. 2~Fig. 5에서와 같이 롤러의 접촉면 방향의 응력분포를 보면, 단위 면적당 동일한 하중이 가해진 상태에서 롤러의 길이가 길어짐에 따라 접촉부의 응력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면 직경이 커지면 접촉부 응력이 커지는 경향이 확인된다.

3. 기하학적 변형에 따른 변형량 해석

3.1 기본 정적 부하용량

기본 정적 부하용량 C_0 는 롤러의 영구 변형량이 롤러직경의 1/10,000이 되는 하중을 말한다⁽⁷⁾. 이 한도 이상이 되면 시스템이 원활하게 작동하는데 장애가 되는 하중을 정의한 것이며, 이는 정적 허용하중의 한도가 된다. 기본 정적 부하용량을 측정하기 위하여 Fig. 6과 같은 압축 시험기를 통해 성능을 평가하였다. 사용된 시편의 재료는 STB2이고 각 형상은 직경 20~80 mm, 길이 20~80 mm로 결정하였고 크라운링 값은 R5,000으로 설정하였다. 그리고 같은 플레이트 재질에 대하여 롤러의 직경과 길이 조합을 변화시키며 각각의 조합에 대하여 가장 작은 하중을 보이는 직경 대 길이 관계를 구하고자 기본 정적 부하용량 시험을 수행하였다.

시험 평가된 결과에 따라 직경이 40 mm인 롤러의 직경의 1/10,000 변형량인 4 μ m에 해당하는 점이 없을 경우는 5개의 점을 내접하는 선이 4 μ m와 만나는 하중으로 C_0 를 구하였다. C_0 에 해당하는 하중과 압력을 롤러의 직경과 길이에 따라 그래프로 나타내면 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. C_0 를 하중값으로 나타낸 Fig. 7의 그래프에서, 길이와 직경이 커짐에 따라 C_0 는 증가하지만 길이가 증가할 때의 증가폭이 더 크다. 즉, 길이를 크게 하는 것이 큰 C_0 를 가지는데 유리하다. 한편, 하중을 롤러의 단위면적으로 나누어 압력에 대한 그래프로 나타내면, Fig. 8에서

와 같이 C_0 를 기준으로 단위면적당 부하능력은 길이에 관계없이 일정하지만, 직경이 증가할 때는 오히려 감소하는 것을 알 수 있다.

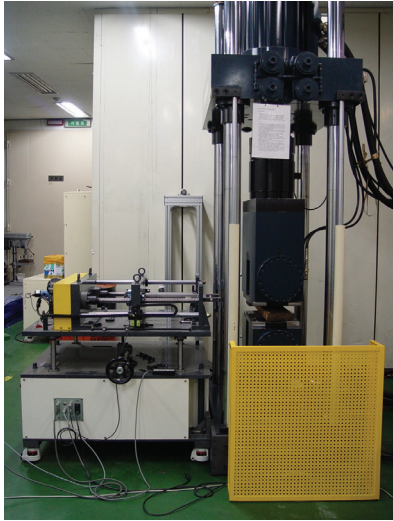


Fig. 6 Compress test device

3.2 마찰계수 시험

기본 정적 부하용량시험에서와 같은 종류의 롤러/플레이트 조합을 사용하여 하나의 조합에 대하여 C_0 를 기준으로 4가지의 다른 수직 하중 하에서 수평마찰력을 측정하여 마찰계수를 구하였다. 도출된 결과를 롤러의 직경과 길이에 따른 그래프로 나타내면 Fig. 9~Fig. 10과 같다.

하중이 C_0 에 가까워질수록 마찰계수가 증가하는데, 이는 플레이트와 롤러에 어느 정도의 영구변형이 일어나 시스템의 작동에 저항을 주기 때문이다. 마찰계수와 롤러 직경의 관계 그래프인 Fig. 9 및 롤러 길이의 관계 그래프인 Fig. 10을 보면, 롤러의 단위면적당 하중이 같을 경우 롤러의 길이와 직경 변화가 마찰계수의 변화가 그다지 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

최종적으로 기하학적 형상에 따른 롤러 선정은 직경 40 mm, 길이 60 mm로 결정하였다. 직경이 20 mm 나 그 이하의 경우 단위면적당 하중에는 우수하나 플레이트의 평면도의 영향을 받아 마찰계수가 높아

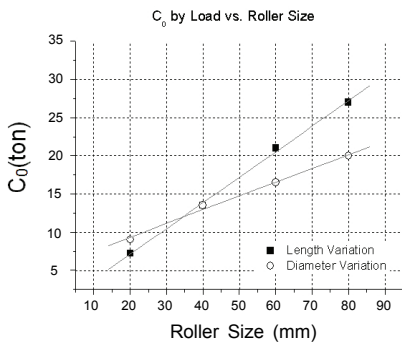


Fig. 7 Basic static load rating with load

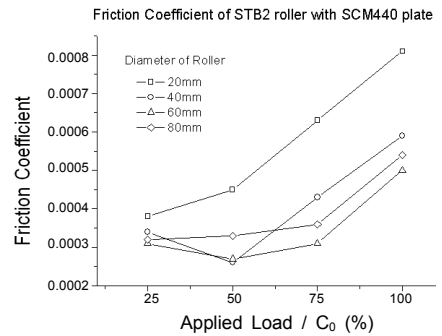


Fig. 9 Friction coefficient vs. diameter

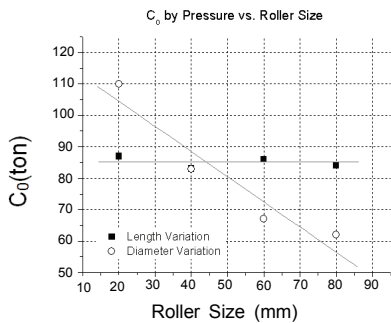


Fig. 8 Basic static load rating with pressure

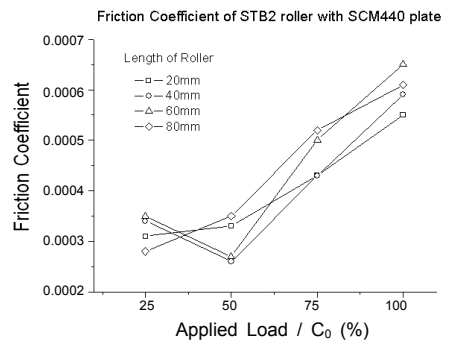


Fig. 10 Friction coefficient vs. length

지며 실 제품 구성 시 다수의 롤러가 들어가게 되어 리테이너 가공비가 과다해 진다. 또한 크기가 작아 장착시간, 가공시간의 증가를 가져온다. 이에 따라 직경은 40 mm의 롤러가 가공성 및 경제성, 단위면 적당 하중, 마찰계수 측면을 볼 때 가장 우수하다고 할 수 있다. 그리고 길이가 40 mm이나 그 이하일 경우 실 제품 구성 시 다수의 롤러가 들어가게 되어 리테이너 가공비가 과다하며, 크라운링 가공도 힘들고, 가공시간의 증가를 가져온다. 또한, 길이 40 mm의 경우 직경크기 40 mm와 같아져 연삭기에 자동 연마시 지름과 직경에 구별이 어려워져 가공 불량 및 시간을 증가 시킨다. 그리고 길이가 직경의 2배인 80 mm이상의 경우 크라운링양의 관리가 어려워지고 같은 크라운링양에서 중앙에서 집중하중을 받아 C_0 값이 감소한다. 따라서 이 연구에서는 직경 40 mm, 길이 60 mm의 롤러를 채택하였다.

4. 크라운링에 따른 성능 해석

롤러는 평면과 접촉 시 롤러의 양 끝단 부분에서 응력집중이 발생한다. 이런 응력집중은 소재가 부분적으로 심한 변형을 일으켜 항복에 이르게 하거나, 미세 크랙 발생의 원인이 되기도 한다. 이런 현상을 방지하기 위해 롤러접촉면 전체에 대하여 크라운링 가공을 하여 양 끝단의 응력집중을 제거할 수 있다. 따라서 이 장에서는 실험을 통하여 크라운링의 크기에 따른 롤러 변형량 변화를 분석하였다.

4.1 크라운링에 따른 변형량 분포 시험

이 시험에서는 크라운링 반지름 R 에 따라 3개씩의 시편을 30 ton, 60 ton, 90 ton에서 압축시험하고, 롤러의 길이방향으로 9개의 영역을 나누어 롤러와 플레이트의 변형량을 각각 측정, 중심부와 양 끝단이 받는 하중의 비율변화를 평가하였다. R2,500과 R5,000, R10,000의 롤러를 30 ton, 60 ton, 90 ton의 하중으로 압축시험을 수행한 후 롤러의 변형량을 왼쪽 끝단에서 오른쪽 끝단 지점까지 위치별로 표시하였다. 일정 하중에서 R 이 커질수록 하중이 중심에서 끝단방향으로 분산되는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에 따르면 30 ton 하중에서 R5,000이 가장 고르게 하중을 분포시키고 있으며, R2,500은 중심부분에, R10,000은 반대로 끝단 부분에 하중이 집중

되어 있다. 적절한 크라운링은 부분적으로 집중되는 하중을 전체에 분산시키는 역할을 한다는 결과를 얻을 수 있다.

또한 크라운링 값에 따라 변경되는 기본 정적 부하

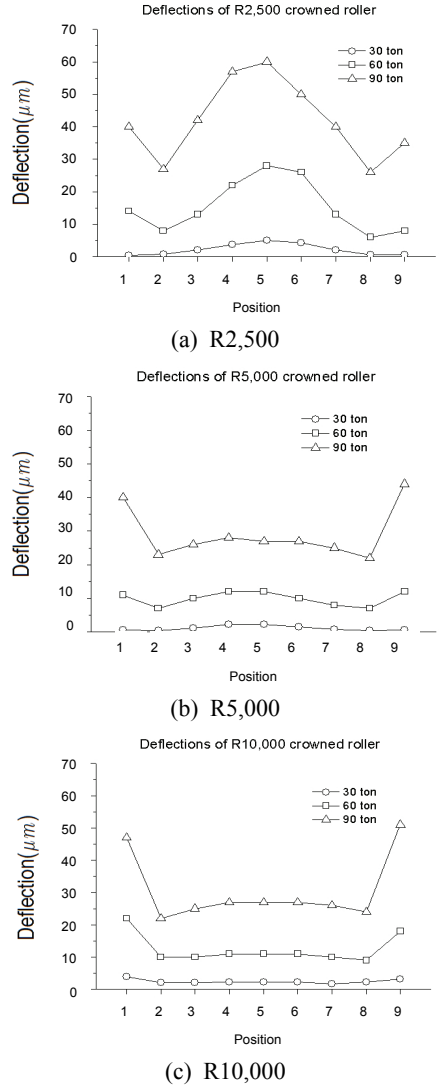


Fig. 11 Deflection of roller with crowning

Table 1 Results of friction test with crowning

Radius of crowning	Vertical load per roller	
	54 ton	81 ton
R2,500	0.00179	0.00424
R5,000	0.00163	0.00366
R10,000	0.00123	0.00258

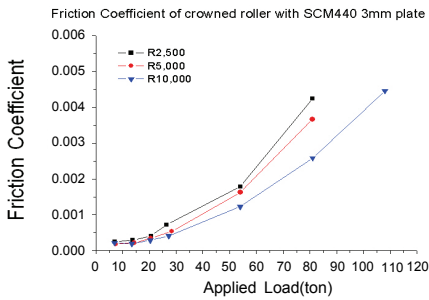


Fig. 12 Results of friction test

용량을 측정된 결과 C_0 는 R2,500이 21.4 ton, R10,000이 20.5 ton으로 R5,000의 29.0 ton에 비해 낮게 나타났다.

4.2 크라운닝에 따른 마찰계수 실험

이 절에서는 크라운닝에 따른 마찰계수를 평가하기 위하여 R5,000 크라운닝 롤러의 C_0 값인 29.0 ton을 기준으로 마찰시험을 수행하였다. 시편은 앞장의 기본 정적 부하용량을 구하기 위한 압축시험에 사용된 동일한 형상의 시편을 사용하였다. 마찰시험 결과에 따르면 Table 1과 같이 하중이 커질수록 마찰계수는 커지며, 크라운닝 값이 증가할수록 마찰계수는 작아지는 것으로 측정되었다. 또한 이를 그래프로 도시하면 Fig. 12와 같다. 이에 따르면 크라운닝에 따른 마찰계수는 하중에 따라 대체로 선형적으로 증가하며, 크라운닝 반지름 R이 작아짐에 따라 전체적으로 위로 이동하는 경향을 보였다.

이 절에서는 앞 장 기하학적 형상에 따른 직경 40 mm, 길이 60 mm의 롤러에 크라운닝 반지름 R을 다르게 적용하여 시험을 수행하였다. 이에 따라 기본 정적 부하용량이 가장 좋은 R5,000의 값을 크라운닝 값으로 설정하였다. 이는 변형량 분포에 대한 결과에서 30ton의 하중에서 R5,000이 가장 효과적으로 응력을 분포시키는 것으로 나타났고, R2,500은 중심부에, R10,000은 양 끝단에 응력이 집중되어 롤러의 양 끝단에서 플레이트 표면에 날카로운 변형면을 만들어 파괴에 상대적으로 취약할 수 있어 R5,000으로 선택하였다.

5. 결 론

이 연구에서는 IRB 먼진장치의 핵심 부품인 롤러

를 설계 및 제작하기 위하여 롤러의 기하학적인 조건을 달리하여 IRB 먼진장치에 적합한 최적의 롤러를 설계하였다. 첫 번째로 롤러의 직경 및 길이에 따른 응력 분포를 통해 C_0 및 마찰계수를 측정하여 최적의 기하학적인 조건을 직경 40 mm, 길이 60 mm로 시험평가로 산출하였다. 또한 롤러의 양 끝단의 응력 집중을 저감하기 위한 가공인 크라운닝 치수에 따른 롤러의 기하학적 변수도 결정하였다. 크라운닝에 따른 반지름 2,500부터 10,000까지 측정되었으며, 최종적으로 반지름 5,000일 때 롤러의 소성 변형이나 마찰계수 및 C_0 의 값이 최적화되는 것을 시험평가를 통해 확인하였다. 향후 연구에서는 소재의 열처리 방식과 파괴 시험을 통한 롤러의 성능 변화를 분석한 후 최적의 롤러를 선택할 것이다. 또한 롤러, 플레이트, 리테이너를 포함하는 IRB의 제작 후 그의 성능을 분석할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Woo, S. S. and Lee, S. H., 2008, Seismic Performance Engancement of Building Structures with Beam-end Rotation Type Dampers, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 589~597.
- (2) Lee, G. S., An, C. H., Han, H. H., Koo, H. W. and Park, R. H., 2011, Performance Evaluation of Seismic Response of a Building Structure using MR-Damper, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 600~601.
- (3) Jeong, M. K., Park, J. I., Kweon, H. H. and Kim, D. H., 1998, Experimental Study on Viscous Fluid Damper for Seismic Base Isolation System, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 590~595.
- (4) Son, I. C., 2008, IRB System Used for Rollers to Protect Building from Earthquake, Computational Structural Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 61~66.
- (5) Lee, S., Kim, J. and Cho, Y., 2009, Optimization of the Gear Tooth Crowning Amount Considering Contact Subsurface Stress, Journal of the KSTLE, Vol. 25, No. 1, pp. 38~42.
- (6) Kogut, L. and Etsion, I., 2002, Elastic-plastic Contact Analysis of a Sphere and a Rigid Flat, Journal of Applied Mechanics, Vol. 69, No. 5, pp. 657~662.

(7) Ansel C. Ugural, 2005, Mechanical Design, McGraw-Hill Korea.



Seung-Bok Choi is currently a fellow professor with the department of mechanical engineering at Inha University, Korea. He has published more than 250 refereed international journal papers in the area of smart material applications, such as

rheological fluids, piezoelectric materials and shape memory alloys.



Young-Gee Park is currently a CEO of SKM corporation at Bucheon, Korea. He received his PhD in mechanical engineering from Inha University in 2013. His research interests seismic isolation system and factory automation using servo motor.