

리니어 압축기의 동적거동예측 Simulation Tool 개발

전수홍[†] · 이효재^{*} · 정의봉^{**}

Development of Simulation Tool to predict dynamic motion of Linear Compressor

Soo-hong Jeon, Hyo-jae Lee and Weui-bong Jeong

Key Words: Linear Compressor(리니어 압축기), Vibration(진동), Rigid Body(강체), Flexible Pipe(탄성체 배관)

Abstract

A linear compressor used in a refrigerator has higher energy efficiency than a reciprocating compressor. But its vibration level is still severe than others. The vibration level of linear compressor at the frequency of 60Hz is dominant since it is the exciting frequency of a motor. Experimental approach to reduce the vibration needs much effort and long period. In this paper, simulation tool to predict the vibration of the shell of the linear compressor was developed. The piston, body and shell are assumed to be rigid, while the loop pipe is flexible. The results by the developed tool showed good agreements with those by experiments.

기호설명

m_p : piston의 질량(kg)
 M_b : body의 질량(kg)
 M_s : shell의 질량(kg)
 k_m : main spring의 강성(N/m)
 k_s : 지지 spring의 강성(N/m)
 k_g : ear spring의 강성(N/m)
 y_p : piston의 변위(m)
 x_b, y_b, z_b : body의 변위(m)
 $\theta_{bx}, \theta_{by}, \theta_{bz}$: body의 각변위(rad)
 x_s, y_s, z_s : shell의 변위(m)
 $\theta_{sx}, \theta_{sy}, \theta_{sz}$: shell의 각변위(rad)
 F : piston과 body에 작용하는 힘(N)

1. 서 론

냉장고의 성능을 결정짓는 장치는 바로 압축기이다. 따라서 냉장고의 성능향상을 위하여 압축기에 대한 연구가 꾸준히 계속되고 있다. 리니어 압축기는 한 방향으로의 반복 운동 시에 공진현상을 이용하여 적은 가동 에너지로부터 큰 움직임을 이끌어냄으로써 기존의 왕복 압축기보다 에너지효율 면에서 더욱 뛰어나게 제작된 장치이다. 리니어 압축기의 원리인 공진현상은 고효율을 이끌어낸다는 장점이 있지만 시스템의 진동레벨을 높게 함으로써 또 다른 문제점을 야기한다. 높은 효율은 유지하면서 진동레벨을 감소시키기 위해서는 리니어 압축기의 설계변경을 하여야 하고 실험을 통하여 개선여부를 판단하여야 한다. 하지만 실물을 통한 설계변경 작업은 자본과 노력을 많이 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 이러한 어려움을 해결하기 위하여 리니어 압축기의 simulation tool을 개발 및 검증하고 이를 통하여 외부 셀의 진동레벨을 예측하고자 한다.

[†] 부산대학교 대학원 기계공학부 소음진동실험실

^{*} LG전자

^{**} 부산대학교 기계공학부

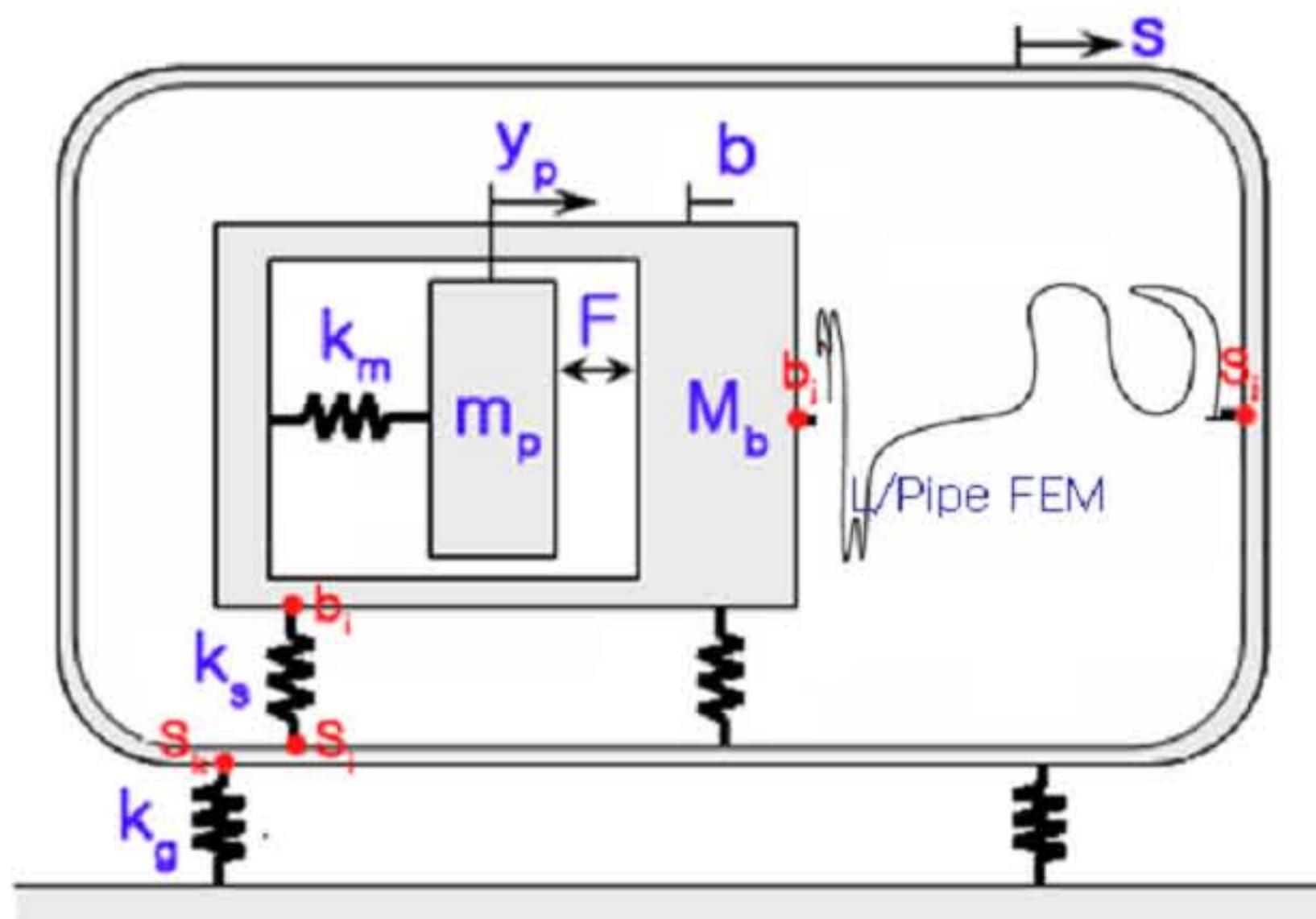


Fig. 1 DOF of Linear Compressor



Fig. 2 Simulation Tool Algorithm

2. 리니어 압축기의 모델링

2.1 리니어 압축기의 구조 및 자유물체도

리니어 압축기는 크게 moving part인 piston과 piston의 제어와 냉매의 압축을 수행하는 body와 전체시스템을 보호하고 지지해주는 Shell로 구성되어 있다. 또한 body와 shell을 연결하고 냉매가 통할 수 있게 하는 loop pipe와 그 주위를 감싸고 있는 coil로 구성된다. piston은 body 내부에서 60Hz로 왕복운동을 하여 냉매를 압축시킨다. 여기서 piston을 포함한 moving part의 고유진동수가 60Hz이기 때문에 공진현상이 발생하고 이를 이용하여 적은 에너지로도 높은 압축능력을 발휘하게 된다. 리니어 압축기의 자유물체도는 Fig.1과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 프로그램 알고리즘 및 입출력 변수

리니어 압축기의 동적거동예측 simulation tool의 알고리즘은 Fig.2와 같이 표현된다.

본 프로그램은 리니어 압축기의 강체와 탄성체의 질량, 강성 행렬을 계산하여 조합하고 내부 가진력에 관한 행렬을 이용하여 주파수 응답을 구하는 형식으로 구성되어 있다. 여기서

Table 1 Input and Output Data

Input	Rigid Part	<ul style="list-style-type: none"> - Piston(mass) - Body(mass,moment of Inertia) - Shell(mass,moment of Inertia) - 중심좌표(Body, Shell)
	Mount Part	<ul style="list-style-type: none"> - Main spring(Km의 y성분) - 지지 spring(Ks의 x, y, z성분) - Ear spring(Kg의 x, y, z성분)
	L/Pipe Part	<ul style="list-style-type: none"> - Pipe 형상 CAD 자료 - 물성치(영율, 밀도, 내경, 외경)
	결합 정보	<ul style="list-style-type: none"> - Ks 연결좌표(Body, Shell) - Kg 연결좌표(Shell) - L/Pipe 연결좌표(Body, Shell)
	외력 Part	<ul style="list-style-type: none"> - Piston Stroke - Piston 웅답(y성분) - Body 웅답 (병진 x, y, z성분, 회전 x, y, z성분) - Shell 의 웅답 (병진 x, y, z성분, 회전 x, y, z성분) - Shell 임의점의 웅답 (x, y ,z성분) - Ear Mount 의 웅답 (x, y ,z성분)
Output	출력정보	<ul style="list-style-type: none"> - 출력물리량 - 변위, 속도, 가속도

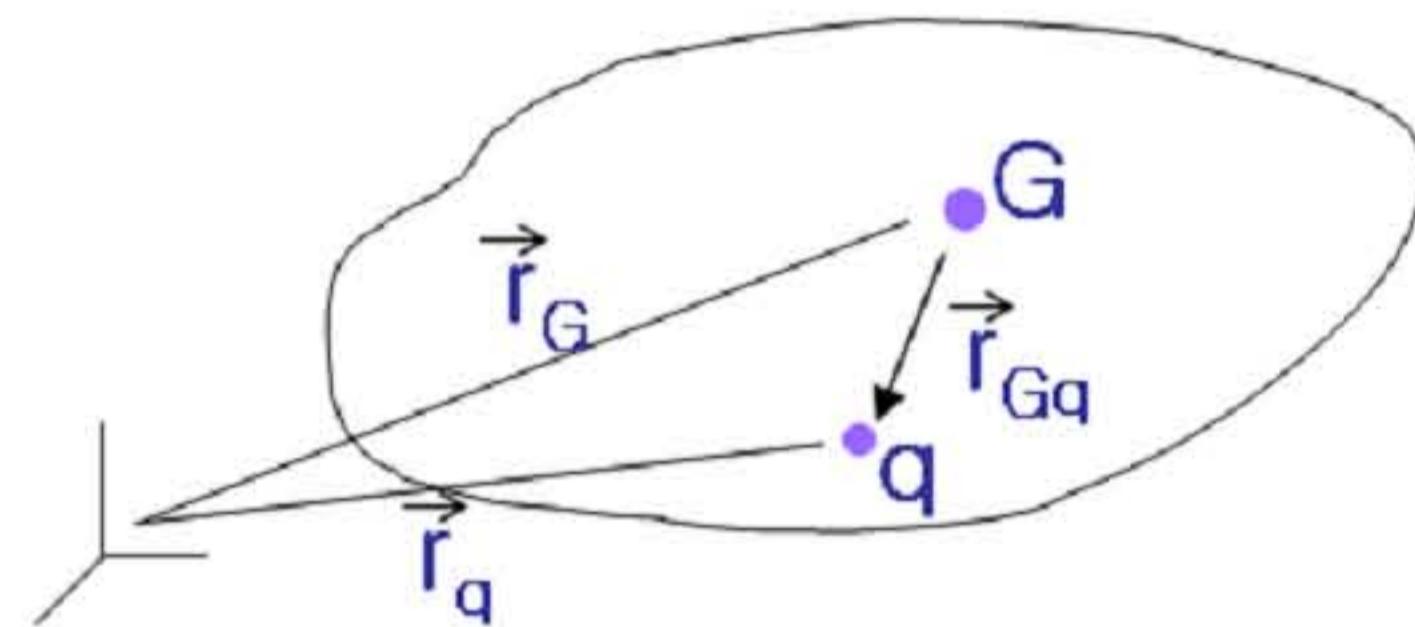


Fig. 3 Rigid body Transform

구해진 주파수 응답은 각 부분의 중심의 응답이기 때문에 임의점에 대한 응답은 좌표변환행렬을 통하여 예측할 수 있다. 프로그램에 사용되는 입출력변수는 Table 1과 같다.

2.3 리니어 압축기의 운동방정식 유도

2.3.1 변환행렬 유도

병진, 회전운동을 하는 강체가 Fig.3과 같이 존재할 때 강체의 중심에서 어느 정도 떨어진 부분의 변위와 속도는 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{r}_q = \vec{r}_G + \vec{r}_{Gq} \quad (1)$$

$$\vec{V}_q = \vec{V}_G + \omega \times \vec{r}_{Gq} \quad (2)$$

속도성분 벡터를 행렬로 바꾸어 나타내면 식(3)을 유도해낼 수 있다. 이 식을 이용하여 강체상의 임의의 한 점에서의 성분을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_q \\ v_q \\ w_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_G \\ v_G \\ w_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & z_{Gq} & -y_{Gq} \\ -z_{Gq} & 0 & x_{Gq} \\ y_{Gq} & -x_{Gq} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & z_{Gq} - y_{Gq} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{Gq} \\ 0 & 0 & 1 & y_{Gq} - x_{Gq} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_G \\ v_G \\ w_G \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3.2 관성성분행렬 유도

관성성분은 모델의 각 부분의 질량과 질량관성 모멘트로 구성된다. 리니어 압축기에는 piston, body, shell이 이에 해당한다. 이 성분은 kinetic 에너지에 관한 공식을 이용하여 식(4)와 같이 조합하여 행렬로 나타낼 수 있다.

$$KE = \frac{1}{2} m_p \dot{y}_p^2 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{z}_b \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_b & 0 & 0 \\ 0 & M_b & 0 \\ 0 & 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{z}_b \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{bx} \\ \dot{\theta}_{by} \\ \dot{\theta}_{bz} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_{bGx} & -I_{bGxy} & -I_{bGxz} \\ -I_{bGxy} & I_{bGy} & -I_{bGyz} \\ -I_{bGxz} & -I_{bGyz} & I_{bGz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{bx} \\ \dot{\theta}_{by} \\ \dot{\theta}_{bz} \end{bmatrix} \\ + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \\ \dot{z}_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 \\ 0 & M_s & 0 \\ 0 & 0 & M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \\ \dot{z}_s \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{sx} \\ \dot{\theta}_{sy} \\ \dot{\theta}_{sz} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_{sGx} & -I_{sGxy} & -I_{sGxz} \\ -I_{sGxy} & I_{sGy} & -I_{sGyz} \\ -I_{sGxz} & -I_{sGyz} & I_{sGz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{sx} \\ \dot{\theta}_{sy} \\ \dot{\theta}_{sz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3.3 강성성분행렬 유도

강성성분은 강체들 사이의 연결부에서 작용하는 성분이다. 리니어 압축기에는 piston, body, shell을 연결하는 스프링이 이에 해당한다. 이 성분은 strain 에너지에 관한 공식을 이용하여 식(5)와 같이 조합하여 행렬로 나타낼 수 있다. 여기서 강체와 연결되는 부분의 좌표는 각각의 강체에 관한 상대좌표이기 때문에 변환행렬을 통하여 변환 후에 계산을 하게 된다.

$$PE = \frac{1}{2} k_m (y_p - y_b)^2 + \frac{1}{2} \sum_i \begin{bmatrix} x_{bi} - x_{si} \\ y_{bi} - y_{si} \\ z_{bi} - z_{si} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{sxi} & 0 & 0 \\ 0 & k_{syi} & 0 \\ 0 & 0 & k_{szi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{bi} - x_{si} \\ y_{bi} - y_{si} \\ z_{bi} - z_{si} \end{bmatrix} \\ + \frac{1}{2} \sum_k \begin{bmatrix} x_{sk} \\ y_{sk} \\ z_{sk} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{gxx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{gyx} & 0 \\ 0 & 0 & k_{gzz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{sk} \\ y_{sk} \\ z_{sk} \end{bmatrix} \\ \text{단, } \begin{bmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ T_{si} \\ \theta_{bx} \\ \theta_{by} \\ \theta_{bz} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ T_{si} \\ \theta_{sx} \\ \theta_{sy} \\ \theta_{sz} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_{sk} \\ y_{sk} \\ z_{sk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ T_{sk} \\ \theta_{sx} \\ \theta_{sy} \\ \theta_{sz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3.4 리니어 압축기의 강체·탄성체 결합

리니어 압축기에서 loop pipe는 강체가 아닌 탄성체로 설정하였다. 따라서 강체와는 따로 계산한 후에 결합하는 작업을 해주어야 한다. 탄성체인 loop pipe는 mesh를 나누어 FEM 연산을 하게 된다. FEM 연산에서 계산된 loop pipe의 M, K 행렬은 식(6)에서처럼 강체와 연결되는 부분의 node를 그 강체중심의 좌표로 변환하기 위해서 변환행렬을 곱해준다.

$$\begin{aligned} KE &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\)_1 \\ (\)_{lp} \\ (\)_{Nlp} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\)_1 \\ (\)_{lp} \\ (\)_{Nlp} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\)_b \\ (\)_{lp} \\ (\)_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} T_b^T & I & T_s^T \\ I & T_s^T & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_b & I & T_s \\ T_s & I & T_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\)_b \\ (\)_{lp} \\ (\)_s \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\)_b \\ (\)_{lp} \\ (\)_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} T_b^T M_{11} T_b & T_b^T M_{12} & T_b^T M_{13} T_s \\ M_{21} T_b & M_{22} & M_{23} T_s \\ T_s^T M_{31} T_b & T_s^T M_{32} & T_s^T M_{33} T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\)_b \\ (\)_{lp} \\ (\)_s \end{bmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

변환된 M, K 성분 행렬은 식(7)과 같이 강체의 M, K 성분 행렬과 더해주면 전체 시스템의 행렬이 완성된다.

$$\begin{aligned} KE_{(SUM)} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} y_p \\ (\)_b \\ (\)_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_p & M_{pb} & 0 \\ M_{bp} & M_b & M_{bs} \\ 0 & M_s & M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ (\)_b \\ (\)_s \end{bmatrix} \\ &+ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\)_b \\ (\)_{lp} \\ (\)_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} T_b^T M_{11} T_b & T_b^T M_{12} & T_b^T M_{13} T_s \\ M_{21} T_b & M_{22} & M_{23} T_s \\ T_s^T M_{31} T_b & T_s^T M_{32} & T_s^T M_{33} T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\)_b \\ (\)_{lp} \\ (\)_s \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} y_p \\ (\)_b \\ (\)_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_p & M_{pb} & 0 & 0 \\ M_{bp} & M_b + T_b^T M T_b & M_b + T_b^T M T_b & T_b^T M_{12} \\ 0 & M_b + T_b^T M T_b & M_b + T_b^T M T_b & T_s^T M_{32} \\ 0 & M_{21} T_b & M_{23} T_s & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ (\)_b \\ (\)_s \end{bmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

2.4 리니어 압축기 셀의 임의점 응답 유도

해석을 통하여 구해진 shell 강체 중심의 변위값을 구하고자 하는 응답점에 대한 변환행렬과 곱하여 식(8)과 같이 응답점의 변위를 유도하였다.

$$\begin{bmatrix} x_{sr} \\ y_{sr} \\ z_{sr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ \theta_{sx} \\ \theta_{sy} \\ \theta_{sz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. Simulation Tool을 이용한 해석

3.1 해석조건

simulation tool의 검증을 위하여 여러 가지 경우에 대하여 해석을 실시하였다. 처음 실험은 loop pipe를 제외한 강체부분만의 해석을 해보았으며, 두 번째 실험은 loop pipe는 연결하고 그 주위를 둘러싸고 있는 coil은 제외하고 해석을 하였다. 세 번째 실험은 loop pipe와 coil 전부를 연결하여 실제 모델과 같은 조건을 만들어 해석

Table 2 Compare Analysis with Experiment

	Pipe없음	Coil제외	Coil포함	6g	12g
x	0.0001	-0.073	0.137	0.167	0.189
x(exp)	0.051	0.097	0.101	0.137	0.177
y	-0.436	-0.677	-0.218	-0.361	-0.448
y(exp)	0.52	0.774	0.361	0.427	0.47
z	0.003	-0.094	0.134	0.166	0.191
z(exp)	0.012	0.079	0.082	0.133	0.176
e1(z)	0.373	0.147	0.584	0.469	0.399
e1(z,exp)	0.266	0.152	0.446	0.373	0.336
e1(y)	-0.824	-0.931	-0.689	-0.677	-0.665
e1(y,exp)	0.78	0.862	0.739	0.707	0.645
e2(z)	-0.379	-0.342	-0.329	-0.144	-0.021
e2(z,exp)	0.259	0.037	0.273	0.083	0.026
e2(y)	-0.824	-0.931	-0.689	-0.677	-0.665
e2(y,exp)	0.794	0.886	0.735	0.658	0.637

하였다. 네 번째, 다섯 번째 실험은 loop pipe의 일부에 6g과 12g의 질량을 각각 추가하여 해석을 하였다.

3.2 해석결과

simulation tool을 이용하여 셀의 중심점에서의 가속도 성분(x, y, z)과 ear mount의 가속도 성분(e_{1z} , e_{2z} , e_{1y} , e_{2y})을 각 경우에 대하여 Table 2와 같이 구해 보았으며 이를 실제 실험값과 비교해 보았다. Fig 4~10을 살펴보면 같은 성분의 해석값과 실험값을 한눈에 비교할 수 있다. 결과 그림을 살펴보면 비교값 사이에 약간의 오차는 보이고 있지만 전체적으로 실제 거동과 거의 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

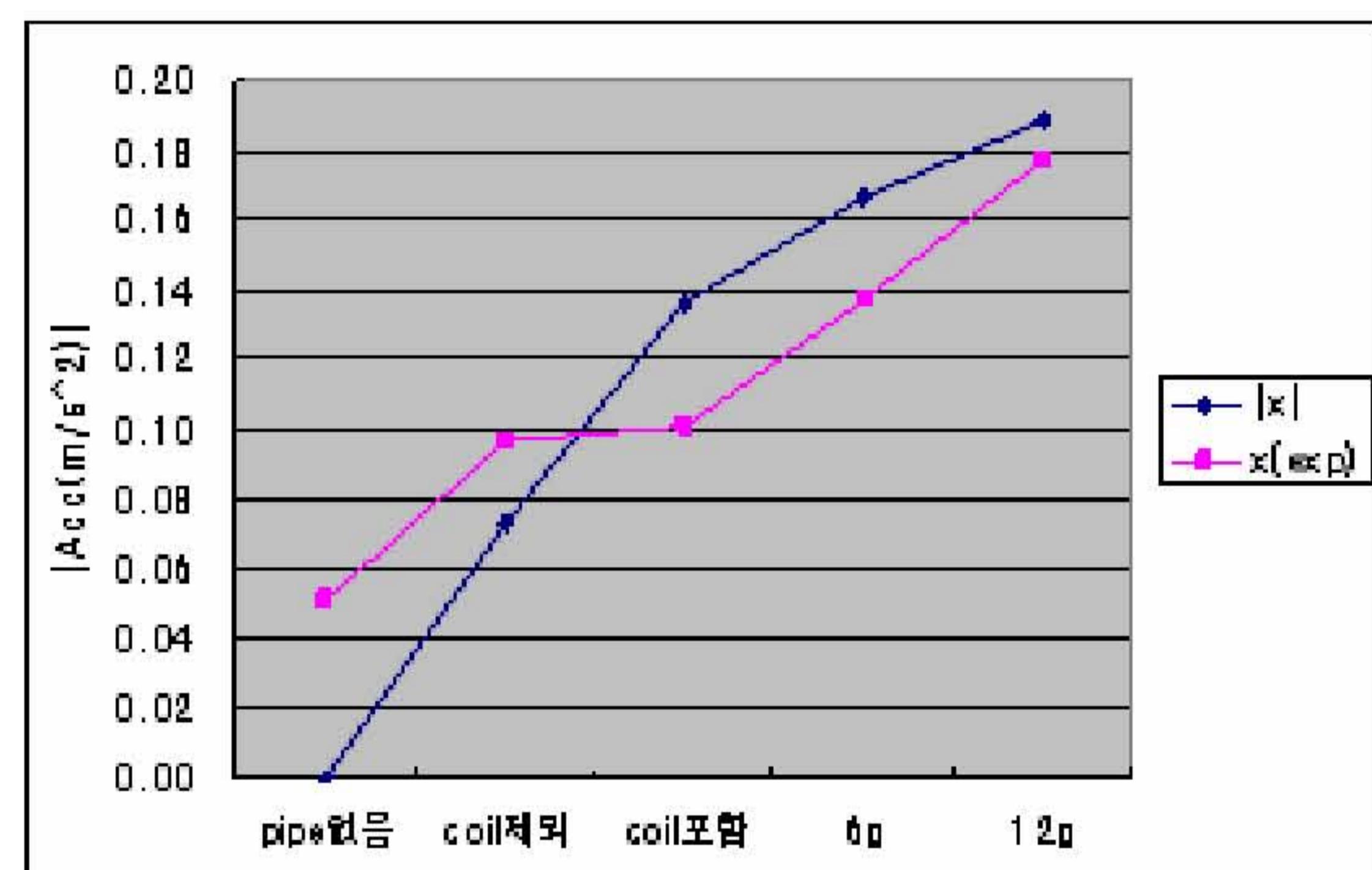


Fig. 4 Compare x(analyis) with x(experiment)

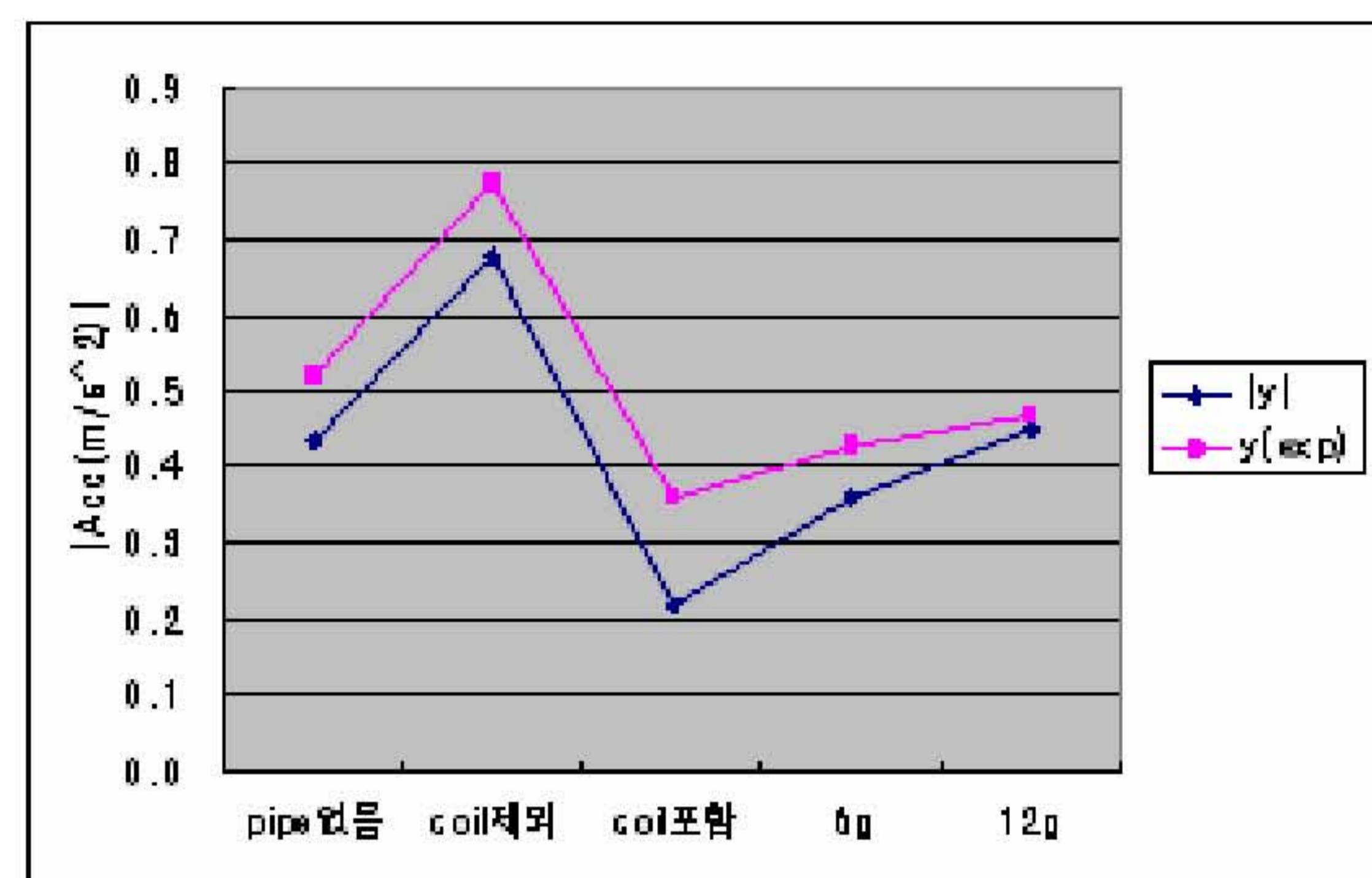


Fig. 5 Compare y(analyis) with y(experiment)

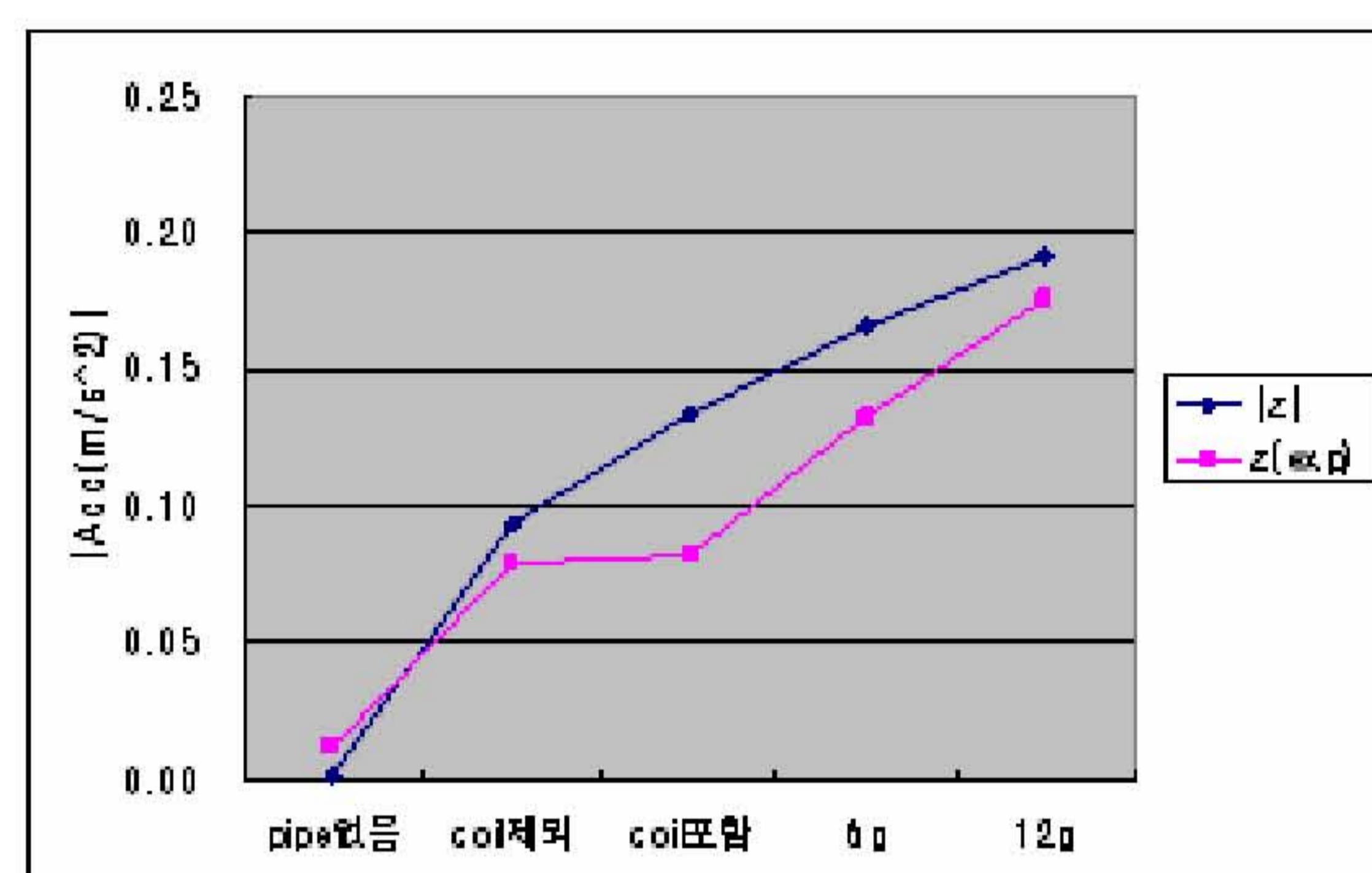


Fig. 6 Compare z(analyis) with z(experiment)

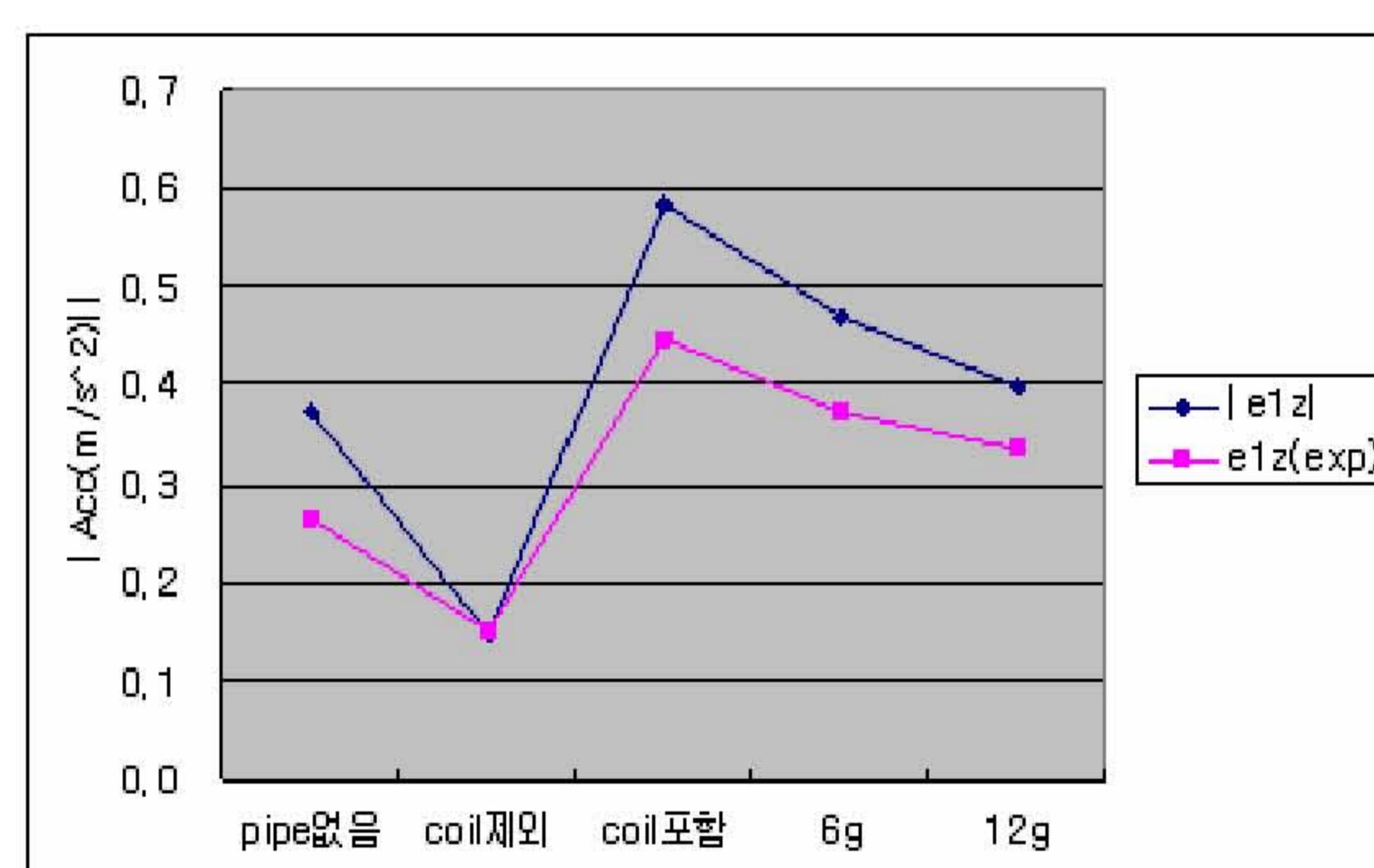


Fig. 7 Compare e_{1z} (analyis) with e_{1z} (experiment)

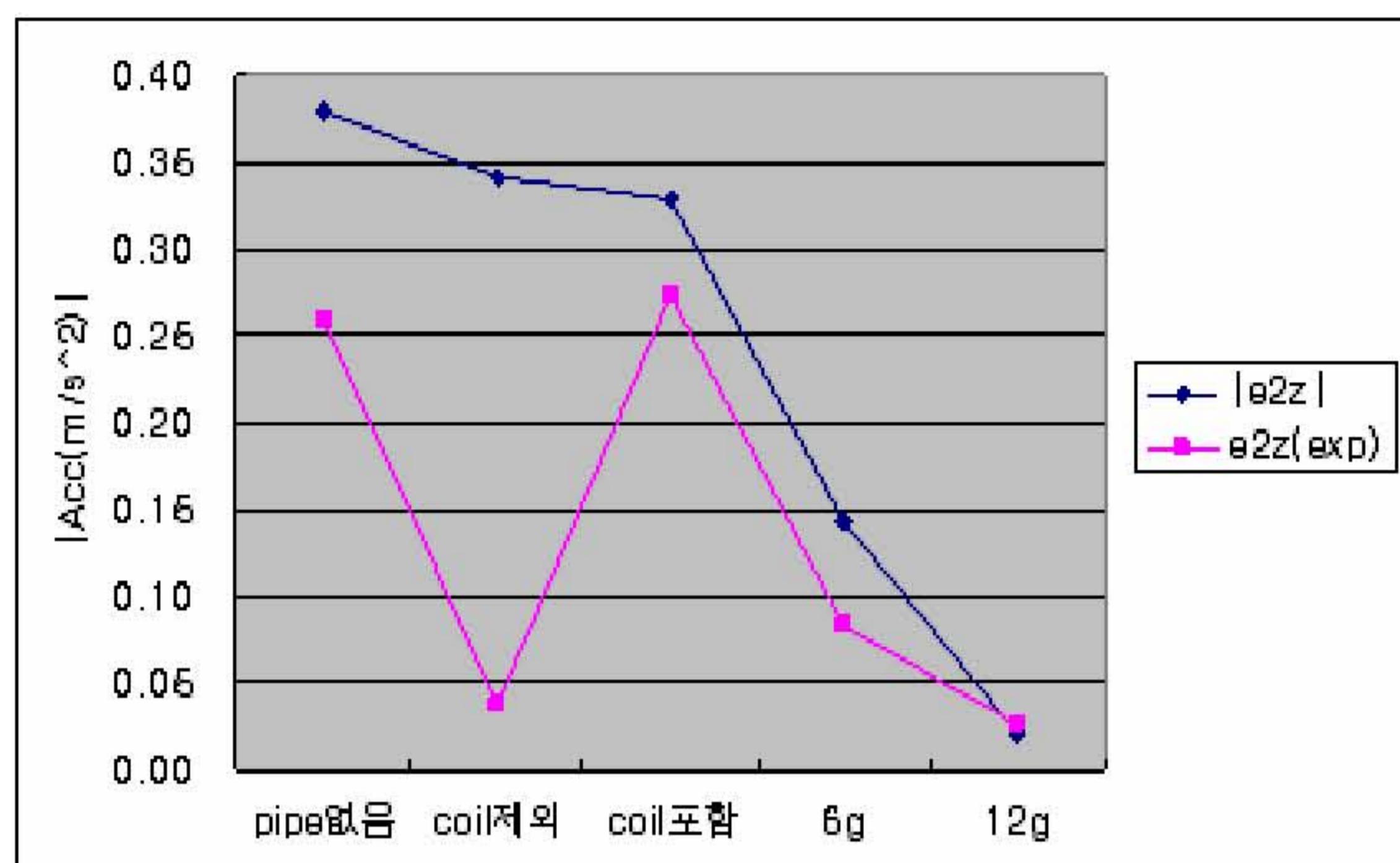


Fig. 8 Compare e_{2z} (analysis) with e_{2z} (experiment)

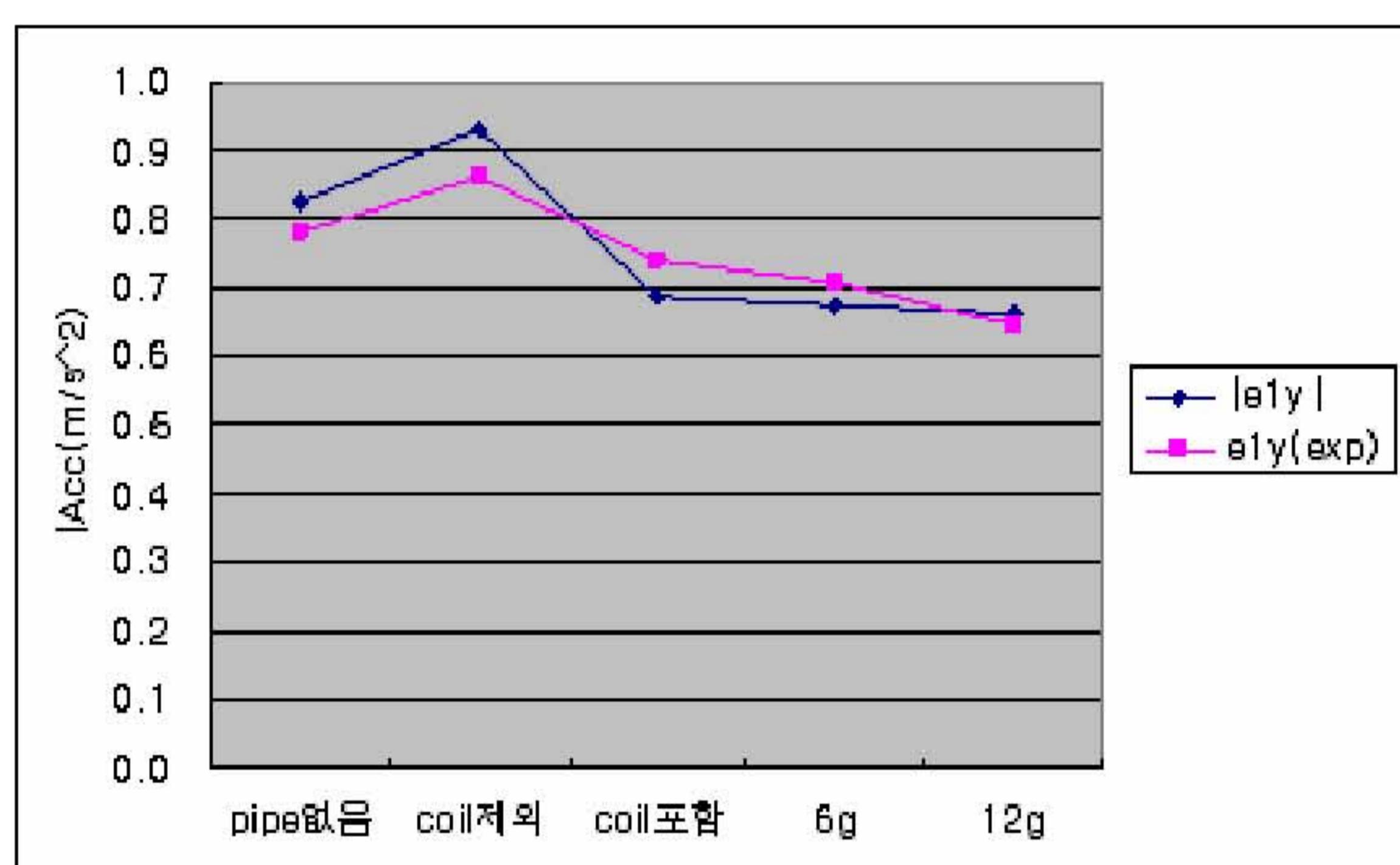


Fig. 9 Compare e_{1y} (analysis) with e_{1y} (experiment)

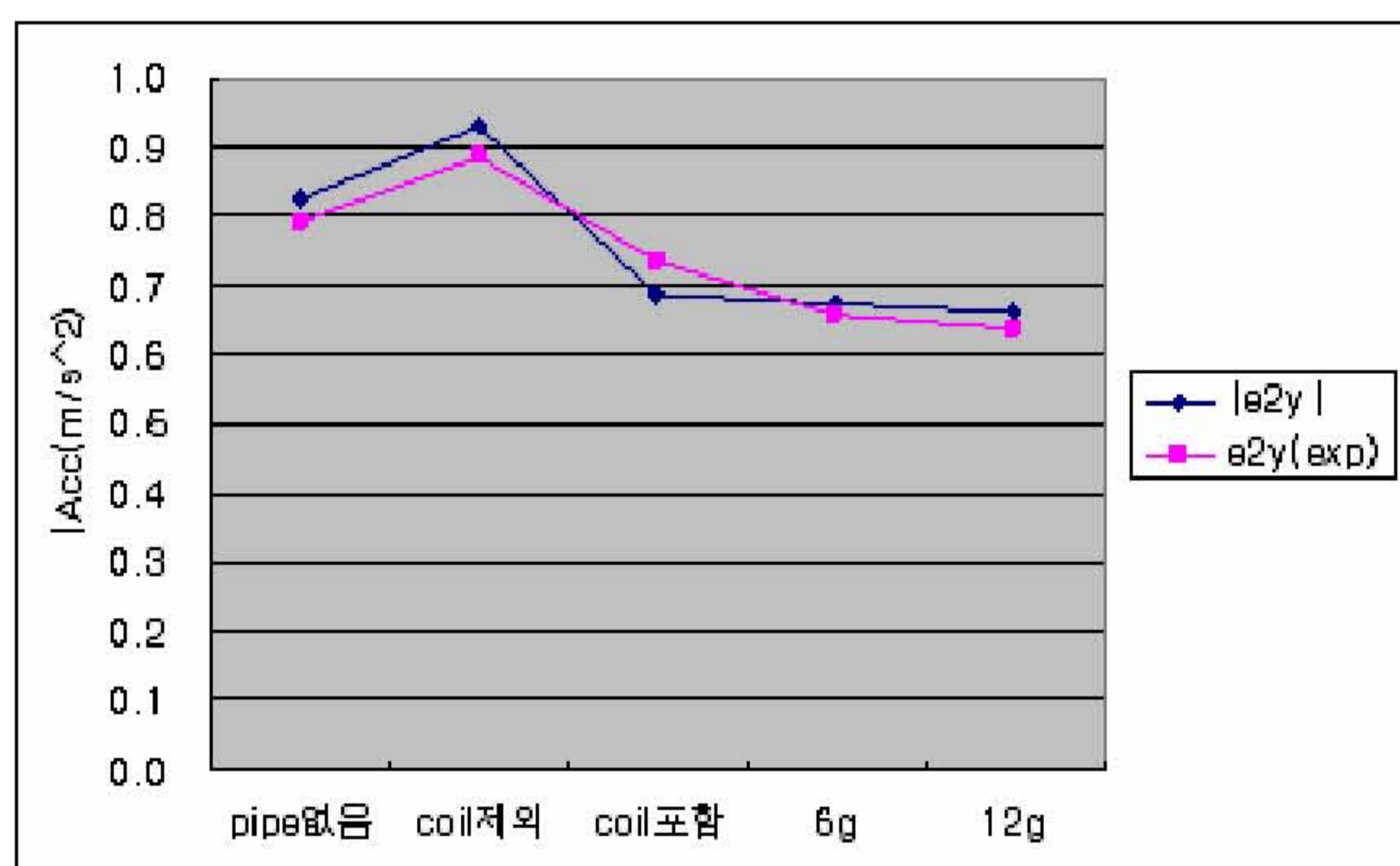


Fig. 10 Compare e_{2y} (analysis) with e_{2y} (experiment)

simulation tool에 실물에 가까운 물성치를 입력하여 각 조건에 따라 수행한 해석결과가 실험값과 비교적 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 이에 따라서 simulation tool의 해석결과가 실물의 거동과 잘 맞다는 사실이 검증되었다. 앞으로 이를 이용하여 모델의 입력을 손쉽게 바꾸어 결과를 해석해봄으로써 진동저감에 최적화된 모델을 구현하는데 큰 역할을 하게 될 것이다.

참고문헌

- (1) S. S. Rao, 1995, "Mechanical Vibrations," *third edition*, Addison-Wesley.
- (2) K. J. Waldron and G. L. Kinzel, 1999, "Kinetics, Dynamics, and Design of Machinery," Wiley.
- (3) Yoo, W. S., Lee, B. H., Lee, S. B., Park, N. K. and Jeong, W. B., 2000, "Dynamics," MoonWoonDang.
- (4) D. K. Kim, 2004 "Windows Fortran," Goomibook.
- (5) M. Petyt, 1990, "Introduction to finite element vibration analysis," Cambridge University.

4. 결 론

리니어 압축기의 문제점인 높은 진동레벨에 대한 저감을 위하여 프로그램 적으로 동적거동예측을 할 수 있는 simulation tool을 개발하고 해석을 수행해 보았다. 리니어 압축기를 강체와 탄성체로 구분하여 각각 모델링을 하였으며 이를 하나로 결합하여 simulation tool을 완성하였다. 완성된