

## 지진하중을 받는 사장교를 위한 강인 복합제어 시스템

### Robust Hybrid Control System for a Seismically-Excited Cable-Stayed

박규식\* · 정형조\*\* · 김운학\*\*\* · 이인원\*\*\*\*

Park, Kyu-Sik · Jung, Hyung-Jo · Kim, Woon-Hak · Lee, In-Won

#### 1. 서 론

복합제어 시스템은 일반적으로 수동과 능동제어 장치가 결합된 시스템이다. 이러한 제어시스템은 복합의 제어장치를 사용하기 때문에 수동이나 능동제어 장치만을 사용할 경우에 발생할 수 있는 문제점을 완화시킬 수 있다. 따라서 제어성능의 향상이 가능하고, 능동제어 시스템에 비해 신뢰성과 강인성(Robustness)이 뛰어나다. 하지만 복합제어 시스템에 사용되는 능동제어 장치로 인해 전체적인 강인성이 저하될 수 있다. 따라서 복합제어 시스템의 강인성을 향상시키기 위해 능동 제어기의 강인성을 확보할 수 있는 제어 알고리즘을 사용해야 한다.

본 연구에서는 납고무받침(Lead Rubber Bearing)과 유압식 가력기(Hydraulic Actuator)가 결합된 복합제어 시스템을 지진하중을 받는 사장교의 진동제어를 위해 사용하였다. 납고무받침은 교량에 전달되는 지진하중을 감소시키고 유압식 가력기는 상판변위(납고무받침의 변형)와 같은 구조물의 응답을 추가적으로 감소시키기 위해 사용하였다. 유압식 가력기의 강인성을 향상시키기 위해 세가지 제어 알고리즘, 즉 on-off 형태의 제어기를 결합한 LQG 제어 알고리즘, 주파수 가중 필터를 사용한  $H_2$ ,  $H_\infty$  제어 알고리즘을 사용하였다. 제안된 복합제어 시스템의 제어성능과 강인성을 검증하기 위해 LQG 제어 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템의 결과와 비교하였다.

#### 2. 복합제어 시스템

##### 2.1 제어장치 및 센서

본 연구에서 사용된 납고무받침의 물성치는 Ali 와 Abdel-Ghaffar (1995)가 추천한 방법으로 설계한 박규식 등 (2002)의 논문의 값을 사용하였다. 능동제어 장치로는 지진하중을 받는 사장교를 위한 벤치마크 문제(Dyke 등 2003)에서 사용한 용량 1000 kN 인 총 24개의 유압식 가력기를 사용하였다. 유압식 가력기는 동적 거동을 무시하여 이상적인 거동을 한다고 가정하였다.

센서로는 5개의 가속도계와 4개의 변위계를 사용하였으며 모든 센서는 교축방향의 응답을 측정하고 동적 거동은 무시하여 이상적인 센서로 가정하였다.

##### 2.2 제어 알고리즘

복합제어 시스템은 수동제어 장치의 강인성으로 인해 능동제어 시스템에 비해 뛰어난 강인성을 가지고 있다. 하지만 능동제어 장치로 인해 전체 시스템의 강인성이 저하된다. 따라서 유압식 가력기의 강인성을 증가시키기 위해 세가지 제어 알고리즘을 적용하였다. 첫 번째 제어 알고리즘은 LQG 제어 알고리즘으로 계산된 제어력을 납고무받침의 응답에 따라 구조물에 가해주는 on-off 형태이다(복합제어 시스템 A). 이러한

\*한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail:kyusik@kaist.ac.kr - 발표자

\*\*정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail:hjung@sejong.ac.kr

\*\*\*정희원 · 환경대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · E-mail:whkim@hnu.hankyong.ac.kr

\*\*\*\*정희원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail:iwlee@kaist.ac.kr

복합제어 시스템의 개념도는 그림 1과 같다.

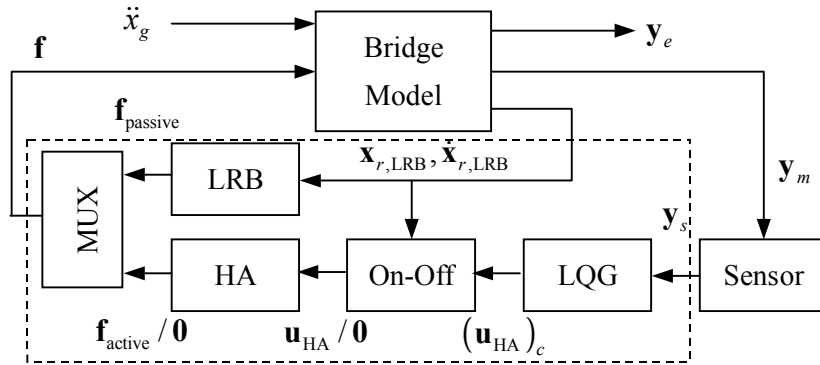


그림 1. On-off 형태의 LQG 제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템의 개념도

여기서  $\mathbf{x}_{r,LRB}$  과  $\dot{\mathbf{x}}_{r,LRB}$  은 납고무반침이 설치된 곳의 상대변위와 상대속도이다. 그리고  $\mathbf{y}_e$ ,  $\mathbf{y}_m$ ,  $\mathbf{y}_s$  는 각각 평가출력, 측정출력, 센서 잡음을 포함함 측정출력이다. 이때 유압식 가력기의 작동조건은 식 (1)과 같다.

$$u_{HA,i} = \begin{cases} (u_{HA,i})_c, & (x_{r,LRB})_i \geq 0.005m \text{ or } (\dot{x}_{r,LRB})_i \geq 0.03m/s^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

두 번째 복합제어 시스템은 다양한 주파수 가중 필터를 가지는  $H_2$  제어 알고리즘을 사용하였다. 그림 2는  $H_2$  제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템(복합제어 시스템 B)의 개념도이다. LQG 제어 알고리즘에서 외부하중은 stationary white noise 로 가정하였다. 하지만 그림 3(a)와 같이 일반적으로 지진하중은 저주파수에 에너지가 집중되어 있다. 따라서 이러한 지진하중의 특성을 묘사하기 위해 Kanai-Tajimi 스펙트럼 필터 형태의 주파수 가중 필터를 고려하였다. 일반적으로 제어기는 축소차수 모델(설계모델)을 통해 설계된다. 본 연구에서는 상대적으로 중요도가 작은 controllability grammian 과 observability grammian 을 응축하여 설계모델을 구성하였기 때문에 고주파 영역에서 축소전의 모델과 많은 차이를 보인다. 따라서 제어기의 넘침효과(spillover effect)를 방지하기 위해 high-pass 필터를 사용하였다. 또한 제어력을 효과적으로 사용하기 위해 low-pass 필터를 제어출력에 사용하였다. 그림 3(b)는 이러한 제어력과 제어출력에 관한 필터이다. 세 번째 복합제어 시스템은 두 번째 복합제어 시스템에서  $H_2$  제어 알고리즘 대신  $H_\infty$  제어 알고리즘을 사용하였다(복합제어 시스템 C). 모든 제어 알고리즘에서 제어성능과 관련된 응답가중행렬은 최대응답 접근방법(박규식 등, 2002)을 사용해 결정하였다.

### 3. 수치예제

#### 3.1 교량 모델

본 연구에서 고려된 교량 모델은 사장교의 제어기법을 개발하기 위해 제시된 벤치마크 문제(Dyke 등, 2003)에서 고려한 Bill Emerson 교를 사용하였다. 이 교량은 그림 5(a)와 같이 2개의 주탑, 128개의 케이블 그리고 추가적인 2개의 교각으로 구성되었다. 벤치마크 문제에서는 평가모델 뿐만 아니라 각 제어방법의 성능을 평가하기 위한 18개의 평가기준이 제시되었다. 처음 6개의 평가기준은 제어기법의 성능을 고려하기 위한 교량의 최대응답에 관한 것이며, 두 번째 5개의 평가기준은 전체 해석시간에 대한 평균응답에 관한 것이다. 마지막 7개의 평가기준은 제어기 자체에 대한 제약조건에 관한 것이다. 교량모델, 평가기준, 입력지진 등

에 관한 좀더 자세한 내용은 Dyke 등(2003)의 논문에 제시되어 있다.

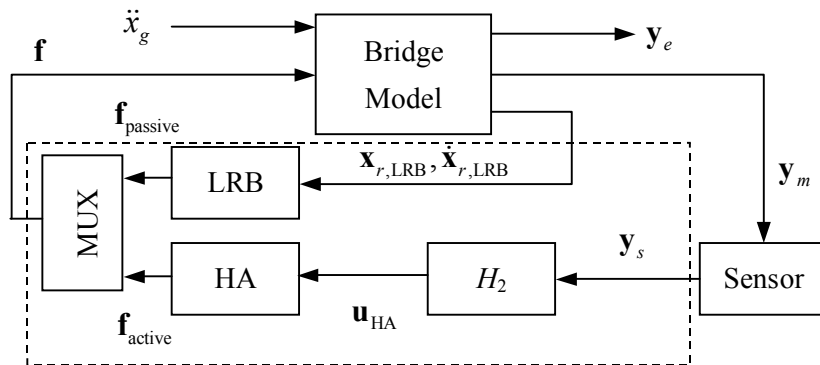
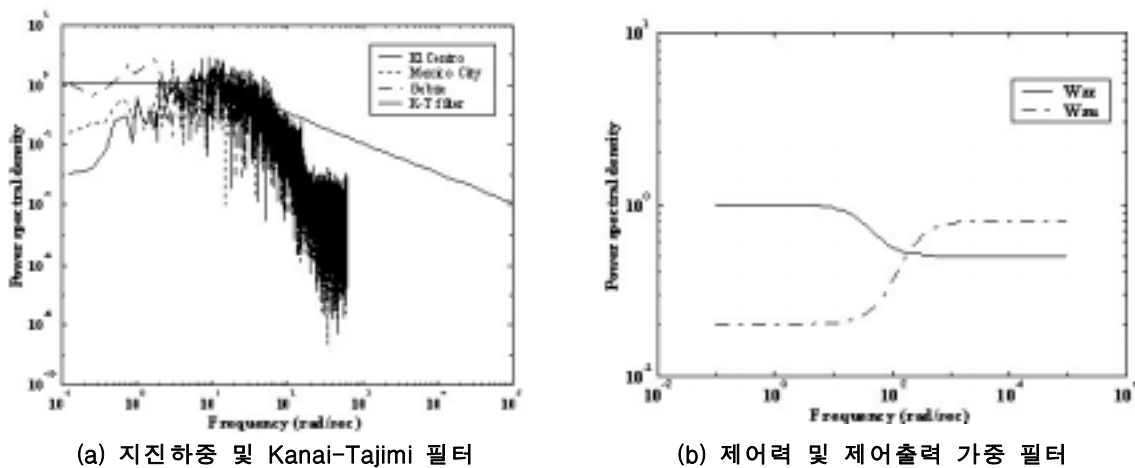


그림 2.  $H_2$  제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템의 개념도



(a) 지진하중 및 Kanai-Tajimi 필터

(b) 제어력 및 제어출력 가중 필터

그림 3. Kanai-Tajimi, 제어력 및 제어출력 필터

### 3.2 수치해석 결과

#### 3.2.1 제어성능

표 1은 3개의 지진(El Centro, Mexico City, Gebze)에 대한 평가기준의 최대값을 나타낸 것이다. 박규식 등(2002)의 복합제어 시스템은 LQG 제어 알고리즘만을 사용하였으며 비교를 위해 나타내었다. 유압식 가력기에 강인한 제어알고리즘(on-off 형태,  $H_2$ ,  $H_\infty$ )을 사용한 복합제어 시스템의 경우 박규식 등(2002)의 복합제어 시스템과 유사한 제어성능을 보였다. 특히  $H_2$  와  $H_\infty$  제어 알고리즘을 사용한 경우 LQG 제어 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템에 비해 상판변위( $J_6$ )가 각각 36%, 29% 감소하였고 제어장치의 stroke( $J_{13}$ )는 각각 38%, 27% 가 감소하였다. 이는 제어출력에 사용된 low-pass 필터로 인해 저주파수 응답인 변위를 효과적으로 제어했기 때문이다. 하지만 필터로 인해 제어기설계모델의 차수( $J_{18}$ )가 48로 증가하였다.

표 2는 각 제어방법이 유압식 가력기의 제약조건을 만족하는지를 알아보기 위해 각 지진에 대한 제어장치의 최대 제어력, 최대 stroke, 최대속도를 나타낸 것이다. Dyke 등(2003)에 의해 제공된 최대제어력, 최대 stroke, 최대속도는 각각 1000 kN, 0.2 m, 1 m/sec 이다. 표 2에서 보듯이 모든 복합제어 시스템에서 제어장치의 제약조건을 만족한다.

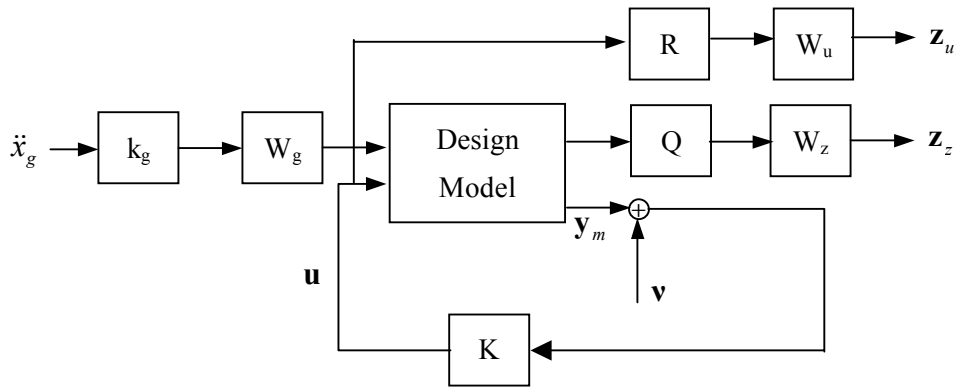
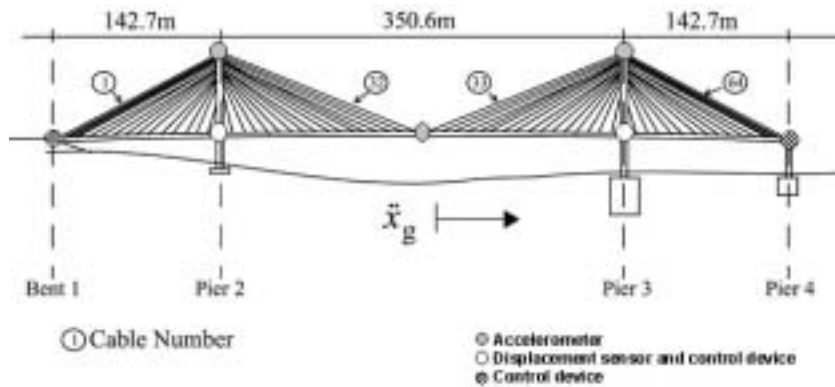
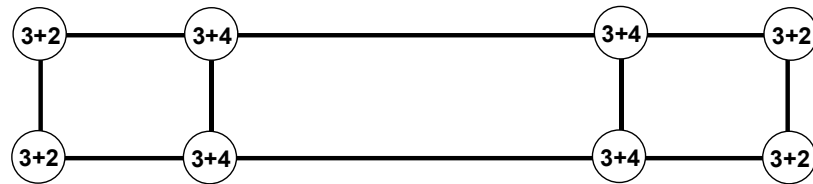


그림 4. 다양한 필터를 포함한  $H_2$  제어기 설계모델



(a) 제어장치와 센서 위치



(b) 제어장치의 배치(납고무받침+유압식 가력기)

그림 5. Bill Emerson 교의 개략도 및 제어장치와 센서 위치

### 3.2.2 제어기의 강인성

실제교량이 건설되었을 경우 Dyke 등(2003)에 의해 제시된 평가모델과 다른 동적특성을 갖게 된다. 따라서 수치해석에서 좋은 제어성능을 보였을지라도 실제 교량에 적용되었을 때 제어성능이 보장되지 않을 수도 있다. 따라서 제어시스템의 실제 적용 가능성을 조사하기 위해 각 제어시스템의 강인성을 반드시 조사해야 한다. 본 연구에서는 구조물의 강성행렬에 일정한 불확실성을 준 상태에서 수치해석을 수행해 각 제어시스템의 강인성을 조사하였다.

표 3은 강성행렬에 5%의 불확실성이 있을 때 3개의 지진에 대한 평가기준의 최대변화율을 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 LQG 제어 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템의 경우 최대응답( $J_1 \sim J_6$ )은 다른 복합제어 시스템과 유사한 변화율을 보인 반면 평균응답( $J_7 \sim J_{11}$ )은 변화율이 상당히 크다. 이런 경향은 불확실성이 증가할수록 뚜렷하게 나타난다. 따라서 LQG 제어 알고리즘만을 사용할 경우 실제 교량에 적용했을 때 문제가 발생할 수 있다. 하지만 강인한 제어알고리즘을 사용한 경우 변화율이 크지 않아 실제 적용 가능성이 높다. 5%의 강성행렬 불확실성에 대해서는  $H_2$  제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템이 가장 좋은 강인성을

나타내었다. 표 4는 20% 의 불확실성에 대한 변화율을 나타낸 것이다. 여기서 LQG 제어 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템과 on-off 형태의 제어를 결합한 LQG 제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템은 20% 에서 강인성을 확보하는데 실패했기 때문에 제외 시켰다. 표 3과 4에서 보듯이  $H_\infty$  제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템은 강성행렬의 불확실성이 작을때 (5%)는 강인성이  $H_2$  제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템보다 떨어지지만 불확실성이 클때(20%)는 강인성이 더 뛰어난 것을 알 수 있다.

표 1. 3개의 지진에 대한 평가기준 최대값

평가기준	복합제어 시스템 (박규식 등, 2002)	복합제어 시스템 A	복합제어 시스템 B	복합제어 시스템 C
J <sub>1</sub> : 최대 밀면 전단력	0.4841	0.4810	0.5319	0.4808
J <sub>2</sub> : 최대 상판 높이의 전단력	0.9476	0.9508	0.9607	0.9579
J <sub>3</sub> : 최대 전도모멘트	0.4444	0.4426	0.5057	0.4380
J <sub>4</sub> : 최대 상판 높이의 모멘트	0.6750	0.6739	0.6441	0.5750
J <sub>5</sub> : 최대 케이블 인장력	0.1468	0.1469	0.1252	0.1473
J <sub>6</sub> : 최대 교대에서의 상판변위	1.6702	1.6787	1.0652	1.1923
J <sub>7</sub> : 평균 밀면 전단력	0.3744	0.3749	0.3929	0.3514
J <sub>8</sub> : 평균 상판 높이의 전단력	0.9261	0.9352	0.7868	0.9301
J <sub>9</sub> : 평균 전도모멘트	0.3345	0.3389	0.3590	0.3132
J <sub>10</sub> : 평균 상판 높이의 모멘트	0.7806	0.8055	0.5404	0.7458
J <sub>11</sub> : 평균 케이블 인장력	1.819e-2	1.769e-2	1.275e-2	1.782e-2
J <sub>12</sub> : 최대 제어력	2.643e-3	2.642e-3	2.924e-3	2.901e-3
J <sub>13</sub> : 최대 제어장치의 stroke	0.9157	0.9204	0.5695	0.6537
J <sub>14</sub> : 최대 전력(power)	9.099e-3	6.692e-3	9.477e-3	9.479e-3
J <sub>15</sub> : 총전력	1.158e-3	8.519e-4	8.937e-4	8.939e-4
J <sub>16</sub> : 제어장치 개수	48	48	48	48
J <sub>17</sub> : 센서 개수	9	9	9	9
J <sub>18</sub> : dim( $x^c_k$ )	30	30	48	48

표 2. 제어방법에 따른 유압식 가력기의 제약조건

지진	최대값	복합제어 시스템 (박규식 등, 2002)	복합제어 시스템 A	복합제어 시스템 B	복합제어 시스템 C
El Centro	제어력(kN)	1000	1000	1000	1000
	Stroke(m)	0.0735	0.0734	0.0771	0.0576
	속도(m/s)	0.5332	0.5327	0.5568	0.4455
Mexico City	제어력(kN)	398	362	370	639
	Stroke(m)	0.0262	0.0273	0.0259	0.0204
	속도(m/s)	0.2096	0.2000	0.1707	0.1687
Gebze	제어력(kN)	920	926	1000	1000
	Stroke(m)	0.1201	0.1207	0.0747	0.0857
	속도(m/s)	0.4219	0.4224	0.4157	0.4426

#### 4. 결 론

본 연구에서는 구조물에 전달되는 지진하중을 줄이기 위한 수동제어 장치와 상판변위와 같은 교량의 응답을 추가적으로 감소시키기 위한 능동제어 장치로 구성된 복합제어 시스템을 사장교의 벤치마크 문제에 적용하여 그 효용성을 알아 보았다. 또한 복합제어 시스템의 강인성을 향상시키기 위해 on-off 형태의 제어를 결합한 LQG 제어 알고리즘, 주파수 가중 필터를 사용한  $H_2$ ,  $H_\infty$  제어 알고리즘을 사용하였다. 수치해석 결과 강인한 제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템은 LQG 제어 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템과 전체적으로 유사한 제어성능을 나타내었다. 특히  $H_2$ ,  $H_\infty$  제어 알고리즘을 사용한 경우 최대 상판변위와 최

대 stroke 가 각각 36%, 29% 와 38%, 27% 가 감소하였다. 강성행렬에 5% 와 20% 의 불확실성을 고려한 강인성 해석결과 LQG 제어 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템의 경우 강인성을 확보하지 못했지만 강인한 제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템의 경우 뛰어난 강인성을 확보하였다. 따라서 제안된 강인 복합 제어 시스템은 지진하중을 받는 사장교의 진동제어에 매우 효과적으로 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 한국과학기술부의 국가지정연구실 지원(과제번호: 2000-N-NL-01-C-251)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ali, H. M., and Abdel-Ghaffar, A. M. (1995) Seismic passive control of cable-stayed bridges, *Shock and Vibration*, Vol. 2, No. 4, pp. 259-272.
2. Dyke, S. J., Caicedo, J. M., Turan, G., Bergman, L. A., and Hague, S. (2003) Phase I benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 7, pp. 857-872.
3. 박규식, 정형조, 이인원 (2002) 남고무받침의 비선형성을 고려한 벤치마크 사장교의 복합제어, *한국지진공학회 논문집*, 제6권, 제4호, pp. 51-63.

표 3. 3개의 지진에 대한 평가기준 최대변화율 (%), 5% 강성행렬 불확실성

평가기준	복합제어 시스템 (박규식 등, 2002)	복합제어 시스템 A	복합제어 시스템 B	복합제어 시스템 C
J <sub>1</sub> : 최대 밑면 전단력	9.75	10.34	9.20	7.69
J <sub>2</sub> : 최대 상판 높이의 전단력	16.62	16.26	4.42	14.34
J <sub>3</sub> : 최대 전도모멘트	16.38	15.97	4.93	5.01
J <sub>4</sub> : 최대 상판 높이의 모멘트	4.46	5.37	6.21	8.91
J <sub>5</sub> : 최대 케이블 인장력	13.08	14.22	13.96	15.68
J <sub>6</sub> : 최대 교대에서의 상판변위	7.51	4.06	1.48	3.52
J <sub>7</sub> : 평균 밑면 전단력	50.00	6.54	6.12	7.02
J <sub>8</sub> : 평균 상판 높이의 전단력	139.17	7.94	4.93	10.68
J <sub>9</sub> : 평균 전도모멘트	39.94	5.98	5.54	10.36
J <sub>10</sub> : 평균 상판 높이의 모멘트	42.15	10.37	7.56	21.82
J <sub>11</sub> : 평균 케이블 인장력	41.32	18.65	13.78	30.31

표 4. 3개의 지진에 대한 평가기준 최대변화율 (%), 20% 강성행렬 불확실성

평가기준	복합제어 시스템 B	복합제어 시스템 C
J <sub>1</sub> : 최대 밑면 전단력	36.51	27.23
J <sub>2</sub> : 최대 상판 높이의 전단력	22.93	38.66
J <sub>3</sub> : 최대 전도모멘트	33.08	30.86
J <sub>4</sub> : 최대 상판 높이의 모멘트	34.48	40.75
J <sub>5</sub> : 최대 케이블 인장력	50.07	31.97
J <sub>6</sub> : 최대 교대에서의 상판변위	5.02	18.86
J <sub>7</sub> : 평균 밑면 전단력	31.78	29.98
J <sub>8</sub> : 평균 상판 높이의 전단력	39.33	35.21
J <sub>9</sub> : 평균 전도모멘트	29.70	32.17
J <sub>10</sub> : 평균 상판 높이의 모멘트	45.34	33.66
J <sub>11</sub> : 평균 케이블 인장력	72.35	47.83