

다중판의 차음특성에 있어서 mass-spring-mass 공진효과

°강현주*, 김제승*, 김상렬*, 엄제광*, 김봉기*,

Effect of mass-spring-mass resonance in sound insulation characteristic of multi-layered panels

Hyun-Ju Kang, Jae-Seung Kim, Sang-Ryul Kim, Jae-Kwang Am, Bong-kee Kim,

ABSTRACT

This paper deals with the effect of mass-spring-mass resonance that is a characteristics of the multi-layered panels in order to enhance sound insulation performance. From theoretical and experimental investigation, it is evident that tuning mass-spring-mass resonance by controlling elastic modulus of the core materials is very important to improve the STC value without increasing the weight of panels, resulting in enhancing STC value more than 10 dB.

1. 서 론

패널의 차음과 관련된 품질은 소음차폐지수(예: STC, Sound Transmission Class)로 표현된다. 이러한 소음차폐지수 산정에 있어서 중요한 주파수 대역은 중저주파수 대역(100 - 500 Hz)이다. 따라서 제품의 품질을 고급화하기 위하여 소음차폐지수를 개선하려면 이 주파수대역에서 대상 패널에 대한 차음특성의 이해가 필수적이다.

현재, 건물 혹은 선박의 내장재로 사용되는 구획벽의 경우 대부분 다중판 구조를 갖고 있다. 이러한 다중판 구조 중 중간층이 다른층에 비해서 탄성계수의 차이가 일정수준 이상인 다중판에서는 중간층이 spring 역할을 하게 되므로 소위 mass spring mass 공진 현상⁽¹⁾이 필연적으로 발생하게 되며 이로 인하여 차음성능은 급격히 저하한다. 이

공진현상이 차음설계에 있어서 중요한 이유는 mass spring mass 공진은 대부분 저주파수 대역에서 주로 발생하므로 STC 등 소음차폐지수에는 상당한 악영향을 끼치게 된다. 따라서 다중판 차음재 설계에 있어서 mass spring mass 공진에 대한 명확한 이해와 고려가 필수적이다.

본 연구에서는 mass spring mass 공진에 대한 이론적 고찰을 수행하였으며 고밀도 압면을 사용하는 선박용 wall panel을 대상으로 mass spring mass 공진을 적절히 튜닝함으로써 차음성능 개선을 시도하고 있다. mass spring mass 공진을 튜닝하는데 있어서 가능한 설계변수는 표면재의 면밀도 m , 중심재의 두께 d 및 중심재의 탄성계수 E_c 이다. 차음성능을 개선하기 위한 가장 단순한 방법으로서 m 의 변화는 중량 및 비용이 증가됨 이에 따른 부작용이 반드시 수반되므로 실제 적용에는 한계가 있다. 따라서 중량이나 판의 두께등을 그대로 유지한 상태에서 차음설계를 하는 것이 가장 바람직한 방법이다. 전보⁽²⁾에서 중심재의 두께 $d=25$

* 한국기계연구원 음향연구그룹

+ 삼성중공업 거제조선소, 조선플랜트 연구소

및 50 mm인 샌드위치판에서 압면재 섬유방향을 수평에서 수직으로 배치함으로써 E_c 의 변화를 야기하여 mass spring mass 공진을 튜닝함으로써 STC 6 dB 증가하는 결과를 발표하였다. 본 연구에서는 d 가 증가한 경우 및 이중샌드위치판의 경우를 다루고 있다.

2. Mass spring mass 공진주파수에 관한 이론적 고찰

2.1 중공 이중판

구조적 연결이 없다고 가정한 중공이중판 모델이 Fig. 1에 보이고 있으며 이 모델은 상하표면재가 평판이며 중간층이 공기층으로 구성된 시스템이다. 중공 이중판에 대한 대표적인 예가 복층 유리창이다.

중간층이 공기층인 중공이중판에 대한 투과계수는 참고문헌⁽³⁾으로부터 다음과 같다.

$$\tau(\phi, \omega) = |1 + (X_1 + X_2) + X_1 X_2 (1 - e^{-j\sigma})|^{-2} \quad (1)$$

여기서 $X_i = Z_i \cos \phi / (2\rho_o c_o)$, $\sigma = 2kd \cos \phi$ 이며 d =중간층의 두께, $k = \omega/c_o$; 파수(wave number), ρ_o, c_o =공기의 밀도와 속도를 의미한다.

상하부판의 음향임피던스 Z_i 는 다음과 같다.

$$Z_i \cong j(\omega m_i - \frac{\omega^3 D_i \sin^4 \phi}{c_o^4}). \quad (2)$$

여기서 m =면밀도(kg/m²), $D' = D(1 + j\eta)$, $D = Eh^3/12$; 굽힘강성(Nm²/m), E =판의 탄성계수(N/m²), η =판의 손실계수, h =판의 두께(m)를 표시한다.

1) mass-spring-mass 공진 주파수, f_o

중공이중판은 물론 다중판에서는 공통적으로 나타나는 공진현상으로서 상하 표면재가 중립축에 대하여 강성이 전혀없는 질량처럼 거동을 하고, 중심재는 스프링과 댐퍼의 역할을 하게 될 때 이에 따른 공진이 발생하게 되며 이때의 주파수를 mass spring mass 공진주파수 f_o 라고 부른다.

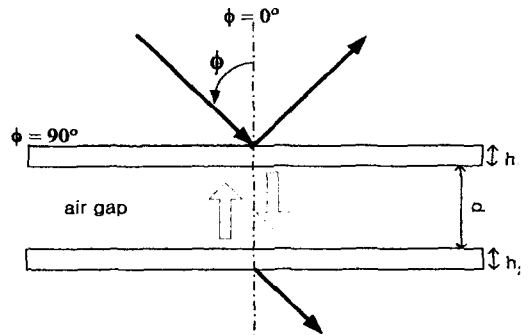


Fig. 1. 중공이중판 모델.

이때의 거동은 중간 공기층이 기계 시스템에서의 스프링-감쇠 시스템과 같은 역할을 하는 경우이며 이중판은 Fig. 2의 좌측 그림과 같은 M-K-C 시스템으로 표현이 가능하다.

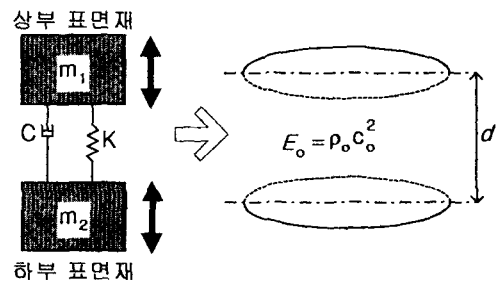


Fig. 2. Mass-spring-mass 공진 모델.

이때의 표면재는 Fig. 2의 우측 그림처럼 질량만 존재하는 막막(membrane)처럼 거동하며 상하 표면재는 중심축을 기준으로 서로대칭으로 수직거동한다. 한편 중간층 내부의 공기층은 공기스프링 역할을 수행하며 등가탄성계수 $E_o = \rho_o c_o^2$ 로 표현할 수 있다. 이때의 차유훈성으로서 표면재의 진폭

이 증대하므로 투과측에서 상당한 음파가 발생한 다. 공기층의 감쇠(즉 공기층 내부의 흡음)를 무시 한다면 이론적으로 투과계수는 1 즉 차음성능은 0 이 된다. (1)식으로부터 유도되는 mass spring mass 공진 주파수는

$$f_o = \frac{1}{2\pi \cos \phi} \left(\frac{E_o}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

이 되며, 수직 입사인 경우에 처음 발생하게 되며 다음 식으로 표현된다.

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{E_o}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

(4)식에서 보면 공기층의 두께 d 가 분모에 포함되므로 d 가 증가할 수록 f_o 는 저주파수에서 발생하는 것을 알 수 있다. 중공이중판의 일반적 차음특성이 Fig. 3에 도시되어 있다. 시편은 중공이중철판($h=4$ mm, 공기층= $5, 10$ mm)이다. 그림에서 보면 $d = 5$ mm인 경우 $f_o = 215$ Hz이며 $d = 10$ mm인 경우 $f_o = 150$ Hz가 되고 있다. 공진점 이후의 차음성능은 대략 12 dB/octave로 증가하고 있다. 따라서 f_o 는 차음성능을 결정하는 중요한 인자가 될 수 있다. 한편 3 kHz의 dip은 일치주파수 $f_{\alpha} (= \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{D}})$ 를 나타내고 있다.

2.2 샌드위치판

중공이중판과 샌드위치판의 차이는 중간층에 공기층 대신에 암면과 같은 중심재가 삽입된다. 샌드위치판의 음향학적 거동에 관한 물리적 현상은 Dym and Lang 등이 제안한 샌드위치 모델⁽⁴⁾을 사용하면 좀더 명확하게 표현할 수 있으므로 본 연구에서는 샌드위치 모델을 해석모델로 사용하고 있다. 샌드위치 모델에서는 해석의 편의를 위하여 판의 거동을 Fig. 4와 같이 두 개의 거동으로 구분

하고 있다.

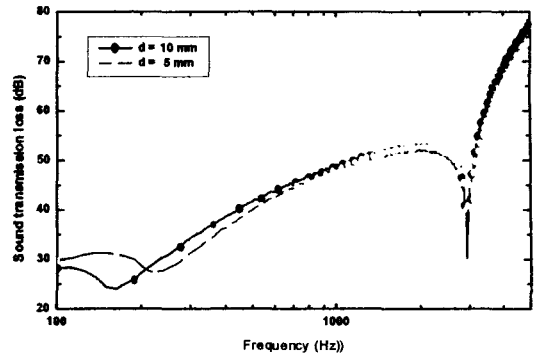
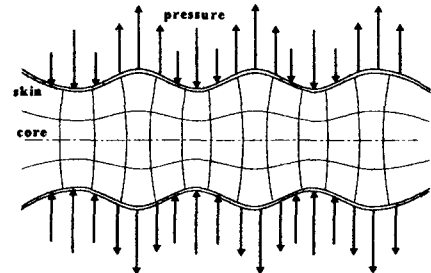
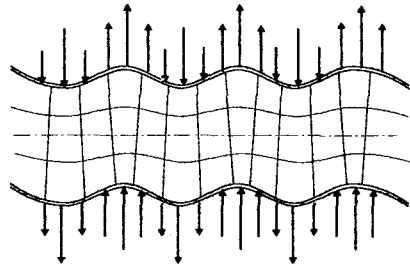


Fig. 3. 중공이중판의 차음특성: steel(4 mm) + airgap(d) + steel(4 mm).



(a) symmetric motion.



(b) antisymmetric motion.

Fig. 4. 샌드위치판의 대칭 및 비대칭 거동.

Fig. 4(a)의 대칭거동은 판의 팽창변위를 표현하기 위한 것이며 Fig. 4(b)의 비대칭거동은 굽힘 변위를 나타내기 위한 것이다. 참고문헌⁽⁵⁾로부터 투과음압과 입사음압의 비를 나타내는 투과계수를 유도하면 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\tau \cong \left| 2Z_0 \left(\frac{1}{Z_a} - \frac{1}{Z_s} \right) \right|^2. \quad (5)$$

여기서 $Z_0 = \rho_0 c_0 / \cos \phi$ 로서 공기의 임피던스, Z_s 는 대칭파동에 관한 임피던스, Z_a 는 비대칭파동에 관한 임피던스를 의미한다. 이 식에서 보는 것처럼 대칭 및 비대칭 임피던스는 서로 병렬 연결되어 있으므로 각 임피던스 사이의 상대적 위상과 크기에 따라서 차음성능은 변화한다.

대칭 및 비대칭 파동에 대한 임피던스는 주파수, 입사각 및 물성치의 함수가 되기 때문에 매우 복잡한 특성을 갖고 있다. 비교적 단순한 경우로서 기하학적으로 대칭인 샌드위치판의 임피던스 식에 대한 유도과정이 참고문헌⁽⁵⁾에 수록되어 있다. 판의 차음성능을 지배하는 인자로서 각 임피던스의 영향을 다음과 같이 고찰한다.

수직 입사인 경우, 대칭 및 비대칭 임피던스는 다음식처럼 간략화 된다.

$$Z_s = \frac{-j}{\omega} \left(\frac{2E_c}{d} - \bar{m} \omega^2 \right) \quad (6)$$

$$Z_a \cong j \left(\omega \bar{m} - \frac{\omega^3 D(\omega) \sin^4 \phi}{c_0^4} \right) \quad (7)$$

여기서, $\bar{m} = m_1 + m_2 + m_c$ 는 전체판의 면밀도, E_c 는 중심재의 탄성계수, $D(\omega)$ 는 동굽힘강성을 나타내며 아래첨자 1,2는 상부 및 하부표면재, c 는 중심재를 의미한다.

(6) 및 (7)식은 주파수에 따른 물리적 특성이 서로 반대임을 보여주고 있다. 즉 Z_s 는 저주파수에서는 판의 강성, 고주파수에서는 판의 질량에 의해서 지배되는 반면에 Z_a 는 저주파수에서는 판의 질량, 고주파수에서는 판의 강성이 지배하고 있음을 알 수 있다. $Z_s = 0$ 이 되는 경우를 mass spring mass 공진주파수라고 부르며 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$f_o \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2E_c}{d(m_1 + m_c/6)}} \quad (8)$$

즉 (8)식은 중공 이중판의 (4)식과 비슷하며 물리적으로 동일한 의미를 갖는다.

일치 주파수는 $Z_a=0$ 인 경우로서 다음과 같다.

$$f_{cr} = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \phi} \sqrt{\frac{\bar{m}}{D(\omega)}} \quad (9)$$

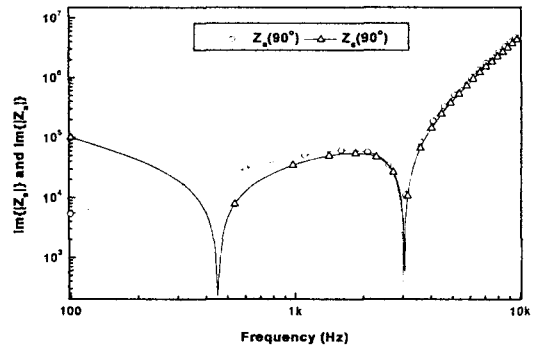


Fig. 5. 샌드위치판의 임피던스 특성 예.

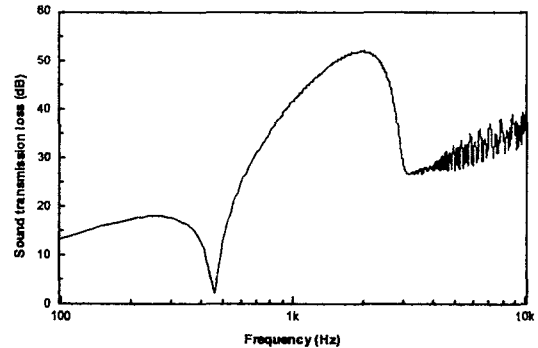


Fig. 6. 샌드위치판의 차음특성 예.

Fig. 5와 6은 합판과 스티로폴로 구성된 샌드위치판의 각 임피던스 특성과 이에 따른 차음특성에 대한 이론적 계산결과를 보이고 있다. Z_s 의 경우 두 개의 dip이 발생하고 있는데 약 450 Hz에서 발생한 dip은 mass spring mass 공진을 나타내며, 두 번째 dip은 Z_a 에 관련된 일치주파수와 동일함을 볼 수 있다. 즉 대칭 임피던스의 두 번째 모드가 비대칭 임피던스의 첫 번째 모드가 된다.

3. Mass spring mass 공진 특성을

이용한 차음재 설계

3.1 샌드위치판

본 연구에서는 중심재의 두께 $d=100$ mm인 샌드위치판과 $d=25$ mm인 샌드위치판 두장과 공기층이 결합된 이중샌드위치판에 대한 연구를 수행하였다. 또한 표면재는 보통 금속재로서 매우 얇은 박판으로 구성된다. 따라서 일직주파수는 관심주파수(100 - 5 kHz)이상의 매우 높은 고주파수에서 발생하므로 그 영향은 무시할 수 있다.

mass spring mass 공진주파수를 나타내는 (8) 식을 보면 $d=25$ mm에 비해서 $d=100$ mm인 경우 훨씬 저주파수 대역에서 f_0 발생을 예상할 수 있다. 또한 상대적으로 훨씬 두꺼운 압면층으로 인하여 중심재 내부의 저주파수 흡음효과도 상당한 증가가 예상되므로 mass spring mass 공진으로 인한 dip의 영향이 상당히 감소할 것으로 예측할 수 있다. 따라서 $d=100$ mm인 샌드위치판에서는 $d=25$ mm인 경우와는 반대로 저주파수 대역에서 mass spring mass 공진을 발생시키는 것이 유리할 수 있다. 왜냐하면 앞에서 언급했듯이 mass spring mass 공진 발생 이후의 차음성능은 대략 18 - 12 dB/octave로 증가하기 때문이다.

Fig. 7에서 100 mm 샌드위치판에 대한 실험과 예측치를 비교하고 있다. 수직압면인 경우 높은 탄성계수로 인하여 $f_{0,s} \approx 1$ kHz인 반면에 혼합(수직+수평)한 경우 탄성계수의 감소로 인하여 $f_{0,s} \approx 160$ Hz에서 발생하고 있다. 그러므로 160 Hz 이하의 저주파수 차음성능은 두 경우가 비슷한 레벨을 보이지만 160 Hz 이상에서는 상당한 차이를 보이고 있으며 결과적으로 압면을 수직 및 수평으로 혼합 배열하면 mass spring mass 공진의 변화로 STC 10 dB 이상 획기적인 개선 효과를 보이고 있다.

이중 샌드위치판의 차음특성은 중간에 공기층을 두기 때문에 두 종류의 mass spring mass 공

진주파수가 발생하게 된다. 즉, 각 샌드위치판의 $f_{0,s}$ 와 공기층에 의한 $f_{0,air}$ 가 발생한다.

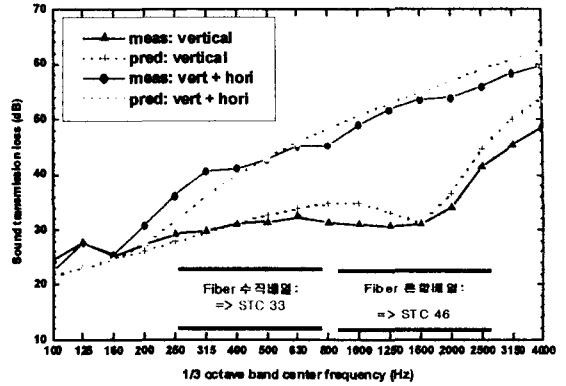


Fig. 7. 100t 샌드위치판의 차음성능 비교.

Fig. 8은 전형적인 이중 샌드위치판의 차음특성을 나타내는 것으로서 수평압면 배열인 경우에 대한 실험치를 비교하고 있다. 그림에서 보면 $f_{0,s} \approx 210$ Hz, $f_{0,air} \approx 120$ Hz를 보이고 있다. 이러한 공진 영향 때문에 이중 샌드위치판의 STC 값은 단일 샌드위치판과 차이가 없다.

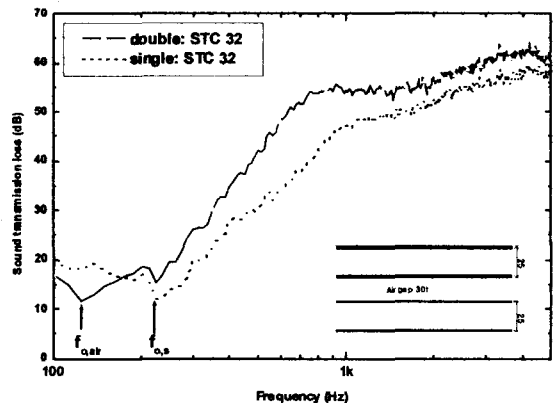


Fig. 8. 이중 및 단일 샌드위치판의 차음성능에 대한 실험치 비교: 수평압면배열.

이중 샌드위치판의 차음성능을 개선하기 위한 시도로서 Fig. 9에서 보인 것처럼 Type 1, 2, 3는 압면재의 배열방향의 차이이며, Type 4는 내부 공기층의 흡음효과를 최대화하기 위하여 내부 표면재로서 천공판을 사용한 경우이다.

Fig. 10에 각 타입에 대한 실험결과를 비교하고

있다. Type 1은 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 두 개의 mass spring mass 효과가 있으며, Type 2는 수직 배열인 관계로 저주파수 대역에서의 mass spring mass 효과는 없다. Type 3는 각 샌드위치판(즉, 수평판 및 수직판)에 해당하는 mass spring mass 효과가 저주파수 약 160 Hz 및 고주파수 약 1.6 kHz에서 나타나고 있다. 한편 내부천공판을 사용한 경우는 공기층 내부의 흡음력 증가로 인하여 저주파수 대역에서는 상당한 차음성능 개선효과를 볼 수 있으며 수직판에 기인한 mass spring mass 공진은 약 1,6 kHz에서 볼 수 있다. 결과적으로 압면의 배열 및 천공판의 영향은 mass spring mass 공진의 변화 때문에 STC 20 dB 이상 획기적인 개선 효과를 보이고 있다.

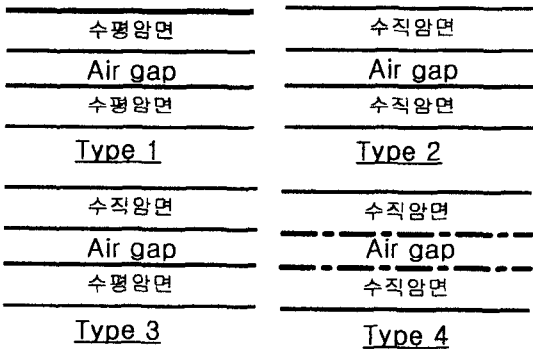


Fig. 9. 이중 샌드위치판의 시편 종류.

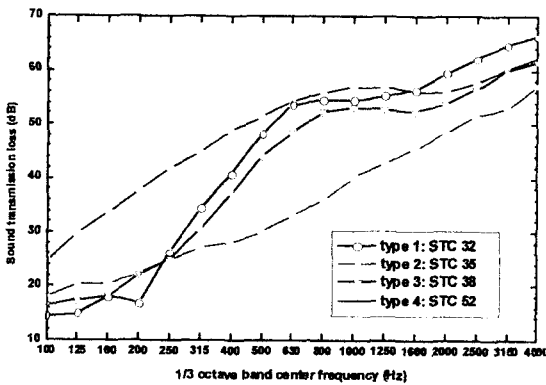


Fig. 10. 이중 샌드위치판의 차음성능 비교.

4. 결 론

다중판 차음특성과 관련하여 mass spring mass 공진의 영향에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 중공 이중판의 mass spring mass 공진현상과 샌드위치판의 대칭거동의 1차 모드는 물리적으로 동일한 현상이며 대칭거동의 2차 모드는 일치주파수에 해당된다.

2) 압면재의 fiber 방향의 결정은 mass spring mass 공진을 튜닝하는데 있어서 가장 중요한 설계 변수이며 또한 중심재의 두께를 고려하여 최적방향을 결정해야 한다.

소음차폐지수 개선 방안으로서 mass spring mass 공진을 튜닝을 통하여 차음성능을 10 dB 이상 향상시킬 수 있는 가능성 보였다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- [1] Albert London, "Transmission of Reverberant Sound through Double Walls", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 22(2), 1950
- [2] 강현주 등 "고밀도 압면 다중판의 차음성능," 한국소음진동공학회 200년 추계학술대회 논문집, 421 - 424.
- [3] Ben H. Sharp, "A study of Techniques to Increase the Sound Insulation of Building Elements", Report No. WR 73-5, WYLE Laboratory, June 1973.
- [4] C. L. Dym and D. C. Lang, "Transmission loss of damped asymmetric sandwich panels with orthotropic cores," JSV 88, 299-319 (1983).
- [5] 강현주, 입사에너지에 대한 방향성 가중합수를 이용한 다중격벽의 차음해석, 박사학위논문: DME945006, 한국과학기술원, 2000.