

## 해양분야에 응용되는 고무재료

강성락·나창운

### 초 록

지금까지 고무소재는 고무만이 갖는 독특한 점탄성과 동적 평형상태에서도 연구가 가능하다는 사실 때문에 일반 산업 현장에서 뿐만 아니라 군수산업에서도 매우 폭넓게 적용되고 있다. 본 리뷰에서는 해양분야, 특히 해군에서 응용되고 있는 고무 소재들에 대해서 살펴보고, 각 응용분야에 대한 기본적인 적용기술에 대해 논의하였다.

### 1. 음향장비(Acoustics)

고무소재는 음향 장비 분야에 널리 이용되고 있는데, 그 예로써 소리의 통과를 방지하는 디커플러(decoupler)나 반향을 감소시키는 울림방지코팅 그리고 음파를 전달시켜주는 음향창(acoustic window)등을 들 수 있다. 또한 고무소재의 음향 임피던스 거동이 바닷물의 그것과 유사하기 때문에 계면에서 음파의 반사현상이 없기 때문에 수중 음향 장비 분야에 다양하게 적용될 수 있다.<sup>1</sup> 음향 임피던스 (다른 용어로는 광굴절율)는 매질의 밀도와 음속의 곱으로 정의된다. 일반적으로 저손실 재료의 경우는 밀도와 모듈러스의 비의 제곱근에 비례한다.

고무소재의 적절한 선택에 따라 음향 임피던스 값과 음향 임피던스의 주파수 의존성은 큰 폭으로 달라질 수 있다. 대부분의 상업용 고무재료는 특허로 보호되고 있지만, 음향 특성들은 알려져 있다.<sup>2</sup> 충전고무소재의 기계적 거동은 매우 비선형적이라 할 수 있다.<sup>3,4</sup> 그러나 약  $10^{-3}$ 이하의 미세변형 조건에서 동적모듈러스는 더 이상 변형에 의존하지 않는다. 음향이 고무소재를 통과할 때 야기

되는 변형은  $10^{-6}$ 이하로 매우 작기 때문에 음향특성은 통상적인 소변형 동적기계적 측정결과로부터 예측될 수 있다.<sup>5</sup>

고무소재에 의해 나타나는 또 다른 음향특성은 종방향 음파(longitudinal wave)의 감쇠계수(attenuation coefficient)가 낮다는 점이다. 고무소재를 통과하는 진폭은 지수함수적으로 감쇠하고, 이는 물질의 고유특성이다. 소리의 전파방향으로 진동하는 종방향 음파의 경우 손실모듈러스와 저장모듈러스의 비에 비례한다. 탄성고분자의 경우 손실 탄젠트의 범위는  $10^{-3}$  범위이다.<sup>6</sup> 이와 같이 손실이 작기 때문에 고무소재를 통하여 전파되는 음파



강성락

2006 전북대학교  
고분자·나노공학과 학사  
2007~ 전북대학교  
현재 고분자·나노공학과 석사



나창운

1984 아주대학교 화학공학과 학사  
1986 아주대학교 화학공학과 석사  
1995 Akron 대학교,  
고분자공학과 박사  
1985~ 금호타이어연구소 전임연구원  
1997 남도대학 환경·화학공학부  
1999 전임강사  
1999~ 전북대학교  
현재 고분자·나노공학과  
2005~ Virginia Tech 방문연구원  
2006

는 매우 멀리 전달될 수 있다.

수중에서 임수를 수행하는 잠수함들은 적에게 노출되지 않기 위해 음파를 가능한 작게 유지할 필요가 있다. 고무소재를 이용하면 종파를 전단파(shear wave)로 변환시킬 수 있다.<sup>7</sup> 전단파의 감쇠계수는 전단변형에 대한 손실탄젠트에 비례한다. 종파를 전단파로 전환하는 방법은 다양하다. 고무시트를 단단한 두 표면으로 눌러 고무를 얇은 필름형태로 구속하거나, 작은 유리구슬이나 기포를 도입하는 방법 등이 있다. 이와 같이 두 구속체 사이에 존재하는 고무는 전단변형을 일으키고 이는 곧바로 음향감쇠 효과로 이어진다.<sup>8,9</sup>

고무소재가 음향분야에서 각광받는 또 다른 이유는, 배합비 조절을 통해 요구되는 특정 주파수에서 음향손실이 크게 나타나도록 조정할 수 있다는 점이다.<sup>2</sup> 또한 앞서 살펴본 것처럼, 일반적인 음압에서는 변형의 크기가  $10^{-6}$  이하이기 때문에 Payne 효과에 의한 음향 손실이 거의 일어나지 않는다. 고무재료의 점탄성 거동은 고무-유리 전이가 일어나는 온도 및 주파수 범위에서 최대 에너지 손실을 나타내는데, 이러한 전이는 통상적인 유리전이온도보다 훨씬 높은 온도에서 관찰되게 된다. 따라서 음향용 고무소재는 유리전이온도( $T_g$ )가 실온부근인 것이 적절하다.

일반적으로 음향 주파수 영역에서 재료의 응답 거동은 고전적인 동적기계적 실험을 통해 얻어진 소위 마스터곡선(master curve)을 이용하여 예측될 수 있다. 이를 위해서는 환산인자(shift factor)가 필요하다. 환산인자는 저주파수 영역에서보다는 고주파수 영역에서 결정된다. 따라서 고온, 저주파수 조건에서 얻어진 동적기계적 실험데이터를 음향특성 예측에 적용할 경우 오류가 발생할 수도 있다.<sup>10-13</sup>

지금까지 언급된 고무소재의 음향관련 기술들은 현재 해군의 군함 및 잠수함 등의 소음기술에 사용되고 있다. 예를 들면, 잠수함의 고무 코팅은 적의 추적을 피할 수 있게 해주며 잠수함 내부에서 발생하는 소음을 감소시키는 역할도 하고 있다. 또한 고무소재의 음향 임피던스를 조절함으로

써 임핀지 음향(impinging sonar)의 주요 반향음을 증가시키거나 음원으로 부터 멀어지게 할 수도 있다.

소리는 수중에서 다른 사람에게 자신을 노출시키는 원인이기도 하지만, 다른 물체를 식별할 수 있는 수단이기도 하다. 군함을 비롯한 다양한 선박에 설치되어 있는 음파변환기(sonic transducer)는 스틸로 보강된 고무 돛에 둘러싸여 있는데(그림 1), 이 고무 돛의 주요 목적은 음파 변환기를 주변으로부터 안전하게 보호하는 것이다. 이 장치의 성능은 유도미사일 폭파전함인 USS Cole의 폭탄테러가 발생했을 때 분명히 드러났다. 폭탄테러 후 X-ray 등 일련의 조사를 통해 밝혀진 바와 같이 선체에서는 심각한 피해가 발생한 반면, 고무 돛 내부의 음파 변환기는 거의 피해를 입지 않았다(그림 2). 이러한 역할 외에도 고무 돛은 효율적인

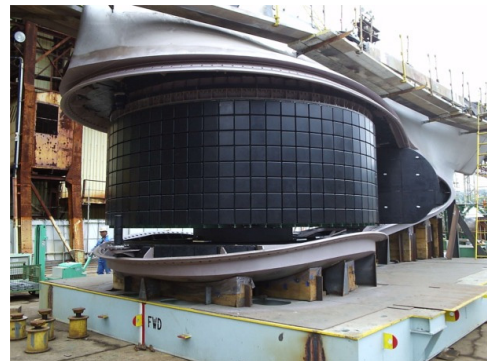


그림 1. 선박에 장착될 음향트랜스듀서 표면에 코팅된 고무소재.



그림 2. 예멘에서 미사일 공격을 받은 후 복구하고 있는 미해군의 USS Cole (선체외부의 철관의 교체 및 수리를 거친 후 18개월 후 재배치되었음).



그림 3. 선체 하부에 설치된 돔 형태의 고무 음향 장치.

음향 에너지의 전달이 가능하도록 해야 하며, 항해 시 선체 주변의 바닷물 흐름에도 방해가 되지 않도록 설계되어야 한다. 이 돔은 초기에 스틸로 제작되었지만 소리 전달 면에서의 효율성이 낮고 부식 등의 문제점도 발견되었다. 또한 스틸 돔을 지지하는 내부 지지체들이 소리의 진행에 방해가 되는 등 여러 가지 문제점을 내포하고 있었다. 이에 따라 고무 돔이 대체 개발되었고, 1965년 처음 프로토타입이 설치되었고, 1972년부터 양산 적용되기 시작되었다.

고무 돔(그림 3)은 세계에서 가장 큰 단일 몰딩 고무제품으로 최초에는 두 개로 나뉘어 제작되었지만, 현재는 대형 오토클레이브 내에서 하나의 제품으로 몰딩이 이루어지고 있다. 제작된 돔은 그 무게가 8,600 kg, 길이가 11 m, 폭이 6.4 m, 높이 2.5 m 에 이르며 두께는 최대 20 cm 에 달하고 있다. 이 돔은 스틸이 보강된 폴리클로로프렌(polychloroprene)의 레이-업 공정을 거치게 되고, 이 때 보강되는 스틸코드는 음향의 진행에 방해가 되지 않도록 소리의 파장보다 작은 간격(1.5 m at 1 kHz)으로 배열되어 있다. 또한 음파탐지기로부터 발생하는 대부분의 주파수들을 거의 흡수하지 않는 특징을 갖고 있다. 이렇게 제작된 고무 돔은 유체역학적 저항을 최소화하기 위해 선체의 베이스 라인 아래에 설치되고 있다.



그림 4. 플라스틱 보강재가 사용된 고무 복합체.

최초의 고무 돔 음향장치 개발 이후 약 30년 동안 다양한 디자인 설계를 통해 돔의 수명이 연장되어 왔다. 그러나 1970년대 말, 이 고무 돔은 당시의 자동차 레디얼 타이어의 초기 제품에서 주로 발견되었던 결함들과 유사한 문제점들을 가지고 있었다. 그것은 물의 침투로 인한 결함으로서, 고무 돔으로 침투된 물이 내부에 있는 스틸코드를 부식시키고 결과적으로 파괴를 일으키는 문제를 야기하게 되었다. 다행히 이러한 문제는 물의 확산 경로를 차단함으로써 해결할 수 있었다.

1992년에는 이음새가 없는 고무 돔이 제작되었고, 최근에는 기존의 스틸코드를 대체하기 위해 고무/플라스틱 라미네이트 복합체에 대한 연구가 진행되고 있다(그림 4). 이 복합체의 프로토타입은 1997년에 실제로 군함에 설치되었고 현재까지 사용되어오고 있다. 또한 유리섬유/폴리클로로프렌 복합체도 20년 가까이 해군 잠수함의 음파 변환기 돔으로 사용되어 오고 있다.

음향탐지기 고무 돔과 관련된 또 다른 응용 예는 잠수함과 군함 탐색에 사용되고 있는 능동형 음향탐지기를 들 수 있다. 능동형 음향탐지기 이전에는 수동형 음향탐지기가 주를 이루었는데, 구 소련의 진보된 소음 기술과 제3세계에서의 디젤 구동 전기 잠수함의 도입은 기존 음향탐지기의 효율성을 떨어뜨리게 되었다. 그 결과 능동형 음향탐지기가 수동형 음향탐지기를 대체하게 되었는데, 이것은 소리를 ‘듣는’ 것에 의존하지 않기 때문에 잠수함이나 군함으로 하여금 소리를 제거하

는 노력을 덜 수 있게 해주었다. 그 중 저주파 능동형 음향탐지기는(100~1000 Hz) 넓은 범위에서 위치 추적이 가능하며, 이것은 음파의 감쇠계수가 파장에 반비례하기 때문이다. 그러나 파장이 길어지게 되면 물체의 식별 능력이 떨어지는 되는 문제점이 발생한다.

일반적인 저주파 능동형 음향탐지기는, 바다 위의 군함이나 선박의 후미에 달려있으며 약 200 데시벨 가량의 음파를 발생시키고 있다.<sup>14-16</sup> 이로 인해 저주파 음향탐지기가 수중 생물의 청각에 심각한 문제를 일으킬 수 있다는 우려의 목소리가 높아지고 있으며 이에 대한 광범위한 생물학적 조사가 요구되고 있다.<sup>17</sup>

능동형 음향탐지기를 사용하게 되면 위치가 노출되는 단점이 있기는 하지만 얇은 바다에서의 뛰어난 탐지능력 때문에 한 세대에서 가장 중요한 대잠수함전 기술로 평가받고 있다. 그리고 여기서도 보호용 돔 소재로 고무가 사용되었으며, 그 역할은 잠수함의 고무 돔 때와 마찬가지로 음향탐지기, 여기서는 트랜스듀서의 보호에 있다. 고무 재료로는 폴리우레탄과 같은 주형가능 고무소재가 사용되었다.<sup>13</sup>

상기 음향탐지기를 통해 얻을 수 있는 음향 정보의 양은 엄청나게 방대한데, 얇은 바다 속의 복잡한 수중 환경으로부터 수집한 데이터를 이용하여 상대 잠수함을 탐지하고 식별하기 위해서는 매우 복잡한 수학적 알고리즘이 필요하다. 아울러 고무 돔의 음향에 대한 영향을 예측하기 위해서는 해당 고무의 특성을 정확하게 파악하는 일이 무엇보다도 중요하다. 특히 저주파에 대한 영향을 알아보는 것이 필수적이다.

또한 자동차의 충격완화 장치나 진동완화 장치 등과 유사하게 잠수함에서도 전체의 진동을 감쇠할 목적으로 진동감쇠장치(thrust reducer)가 장치되어 있다(그림 5). 이 장치는 프로펠러의 구동으로 인해 발생하는 진동을 감소시켜주는 역할을 하고 있는데, 동적특성 등을 고려해 천연고무를 사용하고 있다. 천연고무는 진동감쇠 장치의 스틸링과 폴리우레탄 링 사이에 삽입되어 접착성을 향상



그림 5. 잠수함 프로펠러로부터의 진동을 감소시키는 감쇠장치.

시킬 뿐만 아니라 우수한 내유성으로 오일의 누출을 방지한다. 또한 항공기의 프로펠러 샤프트에도 이와 동일한 목적의 고무베어링이 사용되고 있는데, 이는 항공학적으로 매우 혁신적인 디자인으로 섬유보강 복합체 무게의 43% 가량을 차지하고 있다. 또한 레이더 흡수와 관련해서 군사용 항공기에 매우 적합한 특성을 제공할 수 있다.

## 2. 항공기 타이어

항공기 타이어와 승용차용 타이어는 두 가지 측면에서 서로 구별되는 특징이 몇 가지 있다. 첫째, 항공기 타이어는 대부분 재생하여 사용하기 때문에 약 85% 가량이 레디얼(radial) 구조보다는 바이어스(bias) 구조로 되어있다.<sup>18</sup> 이는 대부분이 레디얼 구조인 승용차용 타이어와는 대조적이다. 그리고 항공기 타이어는 이착륙시 발생하는 높은 열 때문에 트레드 부분을 포함한 타이어의 대부분이 천연고무로 구성되어 있다.

상기 두 종류의 타이어는 역할 측면에서 서로 동일하지만, 항공기 타이어의 경우가 훨씬 더 가혹한 조건에서 구동된다. 도로를 주행하는 타이어 트레드 마모의 주요원인은 급제동에 의한 마찰이다.<sup>19</sup> 그리고 지상 활주로를 이용하는 항공기의 경우도 마찬가지로 제동에 의한 마찰이 마모의 가장 큰 원인이고, 통상적으로 항공기 타이어의 수명은



그림 6. 항공모함 갑판 위의 전투기.

보통 100회 정도의 이착륙이다.

한편 항공모함의 활주로를 이용하는 항공기의 경우는 상황이 매우 다른데, 지상 활주로를 이용하는 항공기보다 약 2~3배 수명이 짧은 것으로 조사되었다. 아이러니컬하게도 이러한 수명 단축은 이륙을 위한 극단적인 가속이나 착륙시의 감속과는 거의 관련이 없다. 왜냐 하면 이륙 시에는 스팀 추진체의 도움을 받고, 착륙 시에는 착륙후크를 이용하기 때문이다(그림 6). 이와 같이 이착륙 시에 거의 마찰에 의존하지 않기 때문에 마찰로 인한 트레드의 마모는 그렇게 크지 않다. 또한 이착륙 시 항공모함은 바람을 향하기 때문에 이륙할 때는 바람의 도움을 받고, 반대로 착륙할 때는 바람의 저항을 활용해 타이어의 부담을 줄여주고 있다.

실제 항공모함 항공기 타이어의 대부분의 마모는 활주로 갑판 위에 있는 동안에 발생하고 있다. 항공기가 이륙 준비를 위해 또는 착륙 후 제자리로 돌아가기 위해 미끄럼방지(non-skid) 갑판 위를 활주하는 동안 마모가 가장 크게 발생하는 것으로 조사되었는데, 미끄럼방지 갑판은 항공기의 미끄러짐을 최소화하기 위해 마찰이 크게 발생하도록 설계되어있기 때문이다. 따라서 활주하는 동안 마모가 극심하게 발생하게 되며, 가장 극단적인 사례로는 1991년 걸프전 당시 메이크쉬프트판(make-shift plate)을 갑판 활주로로 사용했을 때 항공기 타이어의 수명이 4~5회의 이착륙으로 나타났다.

### 3. 새로운 기술들

고무소재가 갖는 에너지의 축적과 빠른 복원특



그림 7. 디스크 형태의 고무 사출 시스템 프로토타입.

성 때문에 다양한 형태의 해양관련 기술에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 현재 해군은 고무를 기계적인 축전지로 이용하여 어뢰를 발사시키는 시스템을 연구 중에 있다. 어뢰는 어뢰 내부의 추진 시스템이 작동하기 전에 잠수함으로부터 발사되어야 하며, 무게가 1600 kg에 달하는 Mark 48 어뢰 같은 경우, 50 km/hr의 속도로 1초 만에 잠수함을 빠져나간다. 기존 발사 시스템에서는 어뢰발사를 에어터빈이나 램 펌프를 이용하였지만, 현재는 무게 1400 kg, 직경이 2 m인 고무 디스크를 이용하고 있다(그림 7). 이 고무 디스크는 내구성과 낮은 히스테리시스 특성을 위해 천연고무를 사용하고 있으며 고무의 단백질화를 최소화하기 위해<sup>20</sup> 준유효가교(semi-EV)<sup>21,22</sup> 시스템을 채택하고 있다. 구동 원리는 작은 충전펌프를 통해 고무 디스크를 바닷물로 팽창시키고 이를 통해 2,400 마력(1800 k 와트)의 힘을 저장하게 된다. 그리고 슬라이드 밸브가 열리면서 고무 디스크의 물이 어뢰 튜브로 밀려들어가며 어뢰를 발사시키게 된다.

고무 디스크를 적용한 어뢰 발사 시스템은 음향적 특성 뿐만 아니라 비용 그리고 복잡성 측면에서도 장점을 나타내고 있다. 이 고무 디스크는 잠수함의 선체 외각과 기밀실 사이에 있으며 바닷물에 노출되어있다. 실제 크기의 프로토타입은 이미 성공적으로 시험을 마쳤으며 향후 실제 잠수함에 적용할 예정이다.<sup>23</sup>

해군장비 분야에서 또 다른 고무소재 응용 가능성은 이동식 해상 선착장(MOB)에서 찾아볼 수 있



그림 8. 이동식 해상 선착장(MOB)의 조감도.

다.<sup>24,25</sup> MOB는 ‘인공 해변’으로도 불려지고 있으며, 자체 동력을 사용하는 1마일에 이르는 세상에서 가장 큰 인공 부유 구조물이다. MOB는 군사작전이 수행되는 지역 가까이에 있는 국제 해상에 배치될 것을 목적으로 제작되고 있다. 이 구조물은 70에이커의 밀폐형 저장 공간을 보유하고 있으며, 고정익 항공기를 위한 활주로 역할도 하고 있다. MOB의 크기와 역할은 다른 부유 구조물과는 달리 매우 독창적이다(그림 8).

최종적인 MOB의 디자인은 아직 결정되지 않은 상태인데, 단일 플랫폼의 연속된 탄성 선체가 될 수도 있고, 또는 5개의 개별 모듈이 힌지(hinge)나 탄성 커넥터(elastic connector)로 연결되어 있는 형태가 될 수도 있다. 구조 디자인 선택에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 파도가 일으키는 동적 에너지에 대한 선체의 반응이다. 긴 선체는 활주로의 역할도 수행하는데, 이때 활주로는 15 피트의 파고와 35 마일의 풍속의 바다 상태에서도 고정익 항공기의 작전 수행을 지원할 수 있어야 하고, 허리케인이나 50 피트 이상의 파고와 100마일 이상의 풍속(태풍) 속에서도 파괴되지 않아야 한다.

MOB의 선체를 몇 개로 모듈화시키는 방법은 불필요한 부분들을 줄일 수 있다는 점에서 장점이 많은 방식이고, 모듈사이의 커넥터와 포지셔닝은 이 모듈화의 실현 가능성을 높이는 결정적인 요소들이다. MOB의 선체는 이착륙이 가능한 활주로

가 되도록 모듈간의 상대적인 움직임을 최소화하며 견고히 조립되어야 하고, 동시에 파도에 의한 긴 선체에 유발되는 스트레스를 감당하기 위해 충분한 유연성이 확보되어야 한다. 현재 모듈과 모듈을 연결할 다양한 형태의 커넥터가 제시되고 있는데 그 중 가장 가능성 있는 것은 5 m 길이의 원추형 고무 커넥터이다.<sup>26</sup> 커넥터 재료로 고무를 사용하면 반응 주파수와 댐핑 특성을 조절할 수 있고, 형태가 원추형이라는 것과 고무를 갖는 고유의 댐핑 특성으로 인해 쓸림모션을 방지할 수 있다.

#### 4. 결론 및 제언

지금까지 살펴본 고무소재의 해양분야 응용기술은 주로 해군과 같이 군사적인 목적으로 활용되고 있는 기술들을 중심으로 요약하였다. 또한 이러한 기술들은 미국을 중심으로 철저히 보호되고 있기 때문에 기술이전은 거의 불가능하다고 여겨진다. 따라서 우리나라의 국방산업의 국산화를 위한다면 지금부터라도 자체기술의 개발이 절실하다고 여겨진다. 본 고가 그러한 기초연구에 참고자료가 되었으면 한다.

#### 참 고 문 헌

1. M. P. Hagelberg and R. D. Corsaro, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **77**, 1222 (1985).
2. R. N. Capps, “Elastomeric Materials for Acoustical Applications”, Naval Research Laboratory, Washington DC, 1989.
3. A. R. Payne and R. F. Whittaker, *Rubber Chem. Technol.*, **44**, 440 (1971).
4. C. M. Roland, *J. Rheology*, **34**, 25 (1990).
5. C. M. Roland and G. F. Lee, *Rubber Chem. Technol.*, **63**, 554 (1990).
6. J. D. Ferry, “Viscoelastic Properties of Polymers,” 3<sup>rd</sup> edition, Wiley, New York, 1980.
7. J. Jarzynski in “Sound and Vibration Damping with Polymers,” R. D. Corsaro and L.H. Sperling, Eds., ACS Symposium Series 424, American Chemical Society, Washington DC, 1990.
8. R. E. Wetton, *Appl. Acoust.*, **11**, 77 (1978).

9. A. K. Sircar and M. I. Drake in "Sound and Vibration Damping with Polymers," R. D. Corsaro and L. H. Sperling, Eds., ACS Symposium Series 424, American Chemical Society, Washington DC, 1990.
10. D. J. Plazek, I.-C. Chay, K. L. Ngai, and C. M. Roland, *Macromolecules*, **28**, 6432 (1995).
11. P. G. Santangelo and C. M. Roland, *Macromolecules*, **31**, 3715 (1998).
12. C. M. Roland, K. L. Ngai, P. G. Santangelo, X. H. Qiu, M. D. Ediger, and D. J. Plazek, *Macromolecules*, **34**, 6159 (2001).
13. P. H. Mott, C. M. Roland, and R. D. Corsaro, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **111**, 1782 (2002).
14. M. C. Hastings, A. N. Popper, J. J. Finneran, and P. J. Lanford, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **99**, 1759 (1996).
15. W. Williams, *Scientific American*, October (2001).
16. M. Kaufman, *The Washington Post*, November 2, 2002, page A2.
17. G. D. Tyler, Johns Hopkins, *APL Tech. Digest*, **13**, 145 (1992).
18. P. Raleigh, *Rubber Plast. News*, Sept. 9 (2003), page 13.
19. A. G. Veith, *Rubber Chem. Technol.*, **65**, 601 (1992).
20. A. V. Chapman and M. Porter in "Natural Rubber Science and Technology," A. D. Roberts, Ed., Oxford Univ. Press, Oxford, 1988, p. 589; K. N. G. Fuller, M. J. Gregory, J. A. Harris, A. H. Muhr, A. D. Roberts, and A. Stevenson, *ibid.*, p. 929.
21. C. M. Roland and I. S. Choi in "*Rubber Technol. Inter.*," L. Gale, Ed., UK & International Press, 1996, p. 12.
22. I. S. Choi, C. M. Roland, and L. C. Bissonnette, *Rubber Chem. Technol.*, **67**, 892 (1994).
23. J. Little, *Undersea Warfare*, **1**, 12 (1999).
24. *Popular Science*, October 1998, page 32.
25. R. Zueck, R. Taylor, and P. Palo, *Int. J. Offshore and Polar Eng. Conf.*, May 29 (2000); June 17 (2001).
26. T. R. J. Mills and L. Chen, *Logistics Spectrum SOLE*, **35**(1) (2001).