

Optimization of head mass for tonpiz transducer using finite element method

Jin-Won Seo, Kyoon Choi[†] and Ho-Yong Lee^{*}

Icheon Branch, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Icheon 467-843, Korea
^{*}R & D Center, Ceracom Co., Ltd., Cheonan 331-979, Korea

(Received July 14, 2015)

(Revised July 29, 2015)

(Accepted August 7, 2015)

Abstract Effects of the shape, the size and the material of head mass on performances of tonpiz transducer were studied with a finite element method. The shape of head mass was changed with an angle between symmetric axis and side of head mass of transducer from 0 to 60 degree. As a result of the simulations, the bandwidth leached to 86.4 % at 35.5 degree in case of Al head mass. The size of head mass showed a decrease in the power of transducer with little change of bandwidth. For the Ti head mass, the transmitted power showed 100 % increase with a bandwidth of 88.1 % even though the weight of the head mass increased to 167 % of Al. This can be attributed to the mechanical properties like elastic modulus of Ti relative to Al.

Key words Tonpiz transducer, Finite element method (FEM), Ultrasonic, Head mass

유한요소법을 이용한 tonpiz 트랜스듀서의 head mass 최적화

서진원, 최균[†], 이호용^{*}

한국세라믹기술원 이천분원, 이천, 467-843

^{*}세라콤, 천안, 331-979

(2015년 7월 14일 접수)

(2015년 7월 29일 심사완료)

(2015년 8월 7일 게재확정)

요약 Tonpiz 트랜스듀서에서 head mass에 영향을 미치는 요소로서 그 형상과 무게 및 소재의 영향을 연구하였다. 형상 요소로는 head mass의 옆면이 대칭 축과 이루는 각도를 그 인자로 하여 0도, 35.5도, 60도로 변화시키면서 대역폭과 출력의 변화를 모사하였다. 그 결과 Al의 경우에는 35.5도에서 대역폭이 최대 값이 되었으며 그 때의 대역폭은 86.4 %로 계산되었다. Head mass의 중량은 대역폭에는 큰 영향이 없이 출력에만 영향을 미치는데 중량이 25 % 감소하였을 때 20 % 정도 출력이 증가하였다. 끝으로 head mass의 소재를 Ti로 변경하였을 때에는 밀도의 차이에 의한 무게의 증가에도 불구하고 출력이 100 % 향상되었는데 이는 Ti의 탄성률 같은 기계적 특성의 영향으로 판단되며 최대의 대역폭을 얻기 위한 형상은 45도에서 얻어졌고 대역폭은 88.1 %이었다.

1. 서론

Tonpiz 트랜스듀서는 상업적으로 가장 많이 활용되는 트랜스듀서 형태로써 큰 head mass와 이를 구동하는 작은 디스크 형의 압전체, 또한 이를 고정시키는 tail mass와 볼트로 구성되며 저주파 고출력의 특징을 갖고 있다.

1958년 처음 발명된 이래 [1], 수중 초음파 발생기, 초음파 세척기, 초음파 웰더나 커터 등 여러 용도에 널리 활용되고 있으며 일방향 지향성을 갖고 있어서 2차원 정렬을 통하여 수중 SONAR 시스템에도 적용되고 있다 [1-3]. SONAR 시스템에 적용되기 위해서는 고감도 즉, transmitting voltage response(TVR) 특성에서의 높은 대역폭(bandwidth)과 고출력을 필요로 하며 [4, 5] 이를 위한 압전 소재의 선택뿐만 아니라 head mass와 tail mass의 소재 선택 및 형상 최적화라는 과정을 필요로 한다.

Tonpiz 트랜스듀서를 설계하기 위해서는 실험적인 방

[†]Corresponding author
Tel: +82-31-645-1456
Fax: +82-31-645-1493
E-mail: knchoi@kicet.re.kr

법이나 대수 계산을 통하여 기본적인 구조설계가 가능하지만 소재나 형상에 따른 구조의 최적화에는 도달할 수 없는 한계가 있다. 최근에는 FEM(finite element method, 유한요소법)에 기반한 상업적인 S/W를 활용함으로써 더 손쉽게 그 초음파 특성을 예측할 수 있다. YaO 등[2]은 FEM을 통한 시뮬레이션을 통하여 이상적인 head mass의 직경을 예측하였고 flapping mode와 piston mode를 중첩(mode coupling)시킴으로써 TVR에서의 대역폭을 확대시킬 수 있다고 제안하였다. 이를 위해서는 tonpilz 트랜스듀서의 선단(front surface)의 크기가 중요한데 제안한 tonpilz 구조에서 선단의 직경이 64 mm 이하에서 가장 대역폭이 큰 트랜스듀서가 가능하였다.

최근까지 head mass의 구조와 크기를 최적화하기 위한 시도[2-4]들이 계속되었으나 각 요소들이 어떤 상관관계를 갖고 있는가에 대한 구체적인 모델링이 제시되지 못하였다. 본 연구에서는 head mass의 형상 변화에 따른 영향과 크기 및 재질에 대한 영향을 독립적으로 수행함으로써 설계에 있어서 가장 중요한 요소를 확인하고자 하였다.

2. 계산방법

시뮬레이션에 사용된 소재로는 압전체는 PZT-4 소결체를 이용하였고 head mass로는 알루미늄 소재를 tail mass와 고정 볼트는 강철 소재(steel)를 이용하였다. 이 용된 소재의 물성치를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 구조를 단순화하기 위하여 물과의 임피던스 매칭을 위한 층은 도입하지 않았고 전극의 두께도 고려하지 않았다. 시뮬레이션에 사용된 tonpilz 트랜스듀서의 외형을 Fig. 1(a)에 나타내었다. Head mass의 형상의 영향을 알아보기 위하여 θ 를 바꾸어가면서 트랜스듀서의 초음파 응답 특성을 상용 FEM인 COMSOL software를 이용하여 예측하였다.

FEM 시뮬레이션에서는 PZT 소재의 기계적 파괴를 막기 위한 압축 응력(prestress)은 인가하지 않는 것으로 가정하였다. 여기서는 단순하게 head mass의 형상과 관련된 최적 조건을 찾기 위하여 head mass의 크기와 형상, 그리고 재질과 관련된 변수들의 TVR과 출력에 미치

Table 1
Materials used and their physical constants for the simulation

Materials	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	d ₃₃ (pC/N)
Steel	7850	205	0.28	-
Al	2700	70	0.33	-
Ti	4506	115.7	0.321	-
PZT-4	7500	65	0.34	289

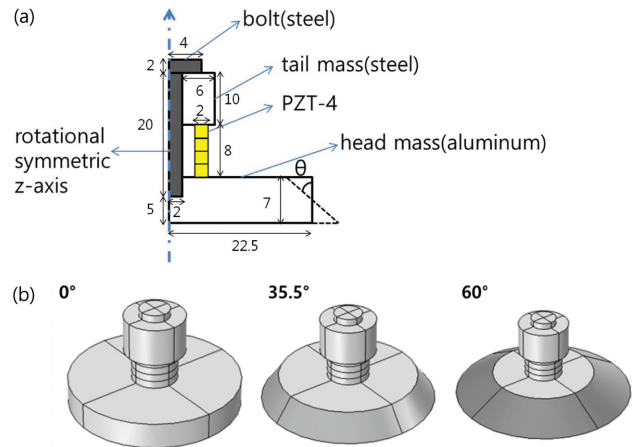


Fig. 1. (a) Geometrical dimensions of tonpilz transducer and (b) its 3-D shape with $\theta = 0, 35.5, \text{ and } 60$.

는 영향을 알아보았다. 또한 PZT-4 진동체는 d₃₃ 모드로서로 반대 방향으로 폴링된 4개의 디스크로 구성되며 구동 전압은 1 V RMS의 교류전압으로 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

Head mass의 형상은 Fig. 1의 ‘ θ ’에 의하여 결정되는데 이 경우에 크기(중량)는 변하지 않고 모양만 Fig. 1(b)와 같이 변화한다. 3종의 head mass 구조의 트랜스듀서에서 선단(front surface)의 반경은 28.6 mm(60°)에서 25 mm(35.5°), 22 mm(0°)까지 변화하는데 각각의 경우에 대하여 초음파 발생시 나타나는 주파수 특성을 비교하였다. TVR(transmitting voltage response)은 1 볼트의 교류 전압(1 V_{RMS})을 인가하였을 때 1미터 떨어진 곳에서의 음압 강도로 정의되며 다음과 같이 주파수의 함수로 표기된다.

$$TVR = 20 \log \frac{p_{RMS}/V_{RMS}}{1 \mu Pa V^{-1}} \quad (1)$$

여기서 p_{RMS}는 head mass 앞 1 m 위치에서의 음압이다. TVR의 주파수 의존성은 특히 수중 초음파 발생기의 대역폭(band-width)를 결정하는 중요한 인자로서 음압 강도가 ±3 dB 내의 폭 만큼 변화하는 주파수 대역을 보통 대역폭(bandwidth)으로 정의한다.

Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 선단면과 head mass 후면의 반경 차이에 의한 piston mode와 flapping mode의 중첩으로 인하여 상당히 넓은 대역폭을 얻을 수 있음을 확인할 수 있으며 대역폭의 크기로부터 가장 이상적인 head mass의 형태는 θ 가 35.5도임을 알 수 있다. 한편, 출력 음압의 경우에는 Fig. 2(a)와 같이 θ 가 0도 일 때 최대값이 얻어진다. Head mass의 크기의 영향은 Fig. 3

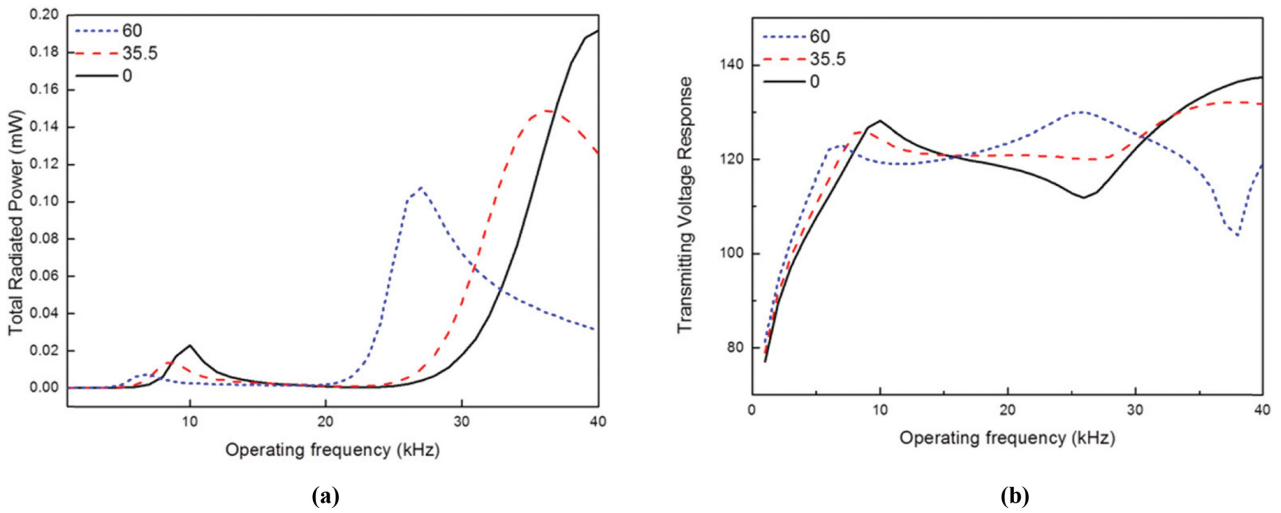


Fig. 2. Change of radiated power and transmitting voltage response of tonpilz transducers with various shapes of head masses shown in Fig. 1(b) as a function of frequency.

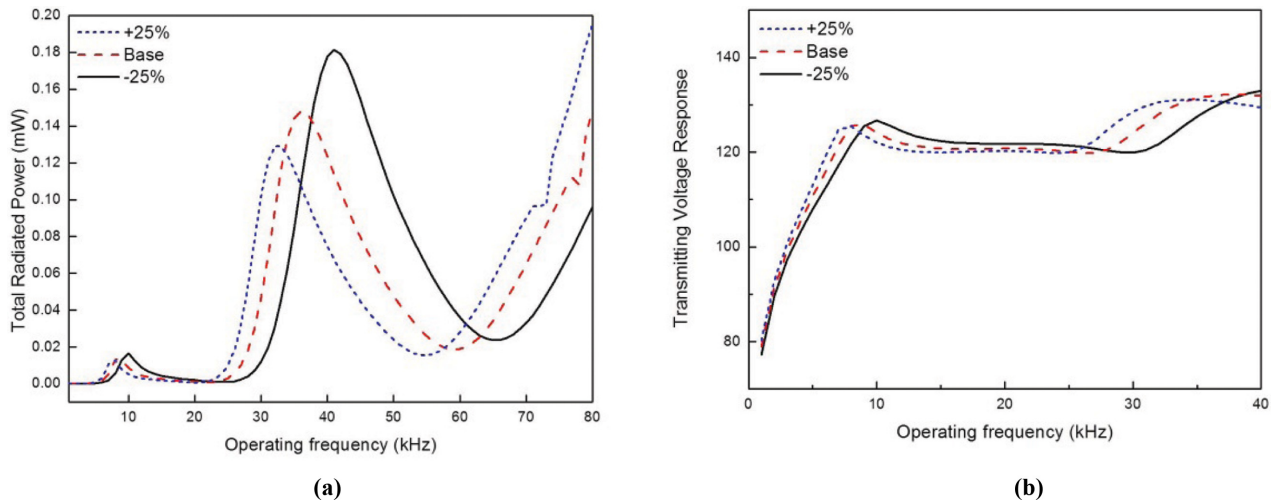


Fig. 3. Change of radiated power and transmitting voltage response of tonpilz transducers with various sizes of head masses as a function of frequency.

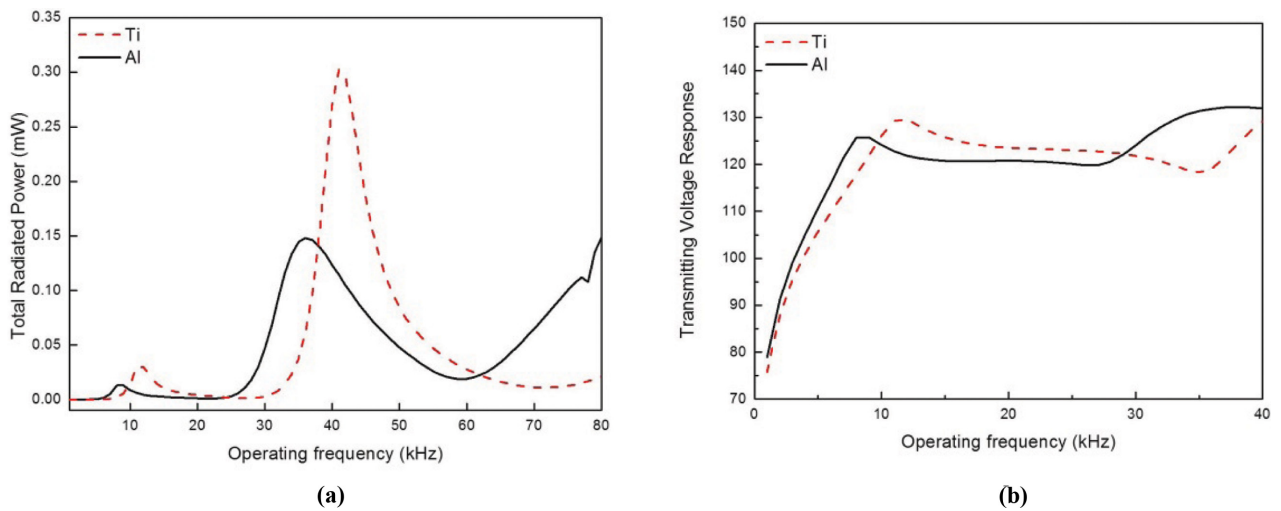


Fig. 4. Radiation power, (a) and transmitting voltage response, (b) of tonpilz transducers with Al and Ti head masses.

과 같다. Head mass의 크기는 모양과는 다르게 TVR에 의 영향은 크지 않으나 출력 음압에는 영향을 미치며 그 최대값의 경우에는 중량이 감소하면(-25%) 약 20%의 출력 증가를 나타내며 반대로 head mass의 중량을 25% 늘리면 15% 출력 음압이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Head mass의 소재의 영향은 두 가지 면에서 영향을 미치는데 하나는 탄성률(elastic modulus, E)의 차이와 무게의 차이에 의한 효과가 중첩되어 나타날 것으로 예상된다. Al head mass의 경우에는 θ 가 35.5도일 때, 출력 음압과 TVR을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 그 대역폭은 $11 \sim 30$ kHz ($\Delta = (f_h - f_l)/f_c * 100 = 86.4\%$)가 되며 최대 음압은 0.15 mW가 됨을 알 수

있다. 같은 크기(dimension)의 Ti head mass의 경우에는 밀도의 차이(Al: 2.7 g/cm^3 & Ti: 4.5 g/cm^3)로 인하여 67%의 중량이 증가하는데 이와 함께 탄성률의 변화로 인하여 이상적인 형태도 달라진다. θ 가 45도 일 때의 음압과 TVR을 Fig. 4(a)와 4(b)에 각각 나타내었다. 최대 출력 음압은 0.3 mW로 Al에 비하여 100% 증가함을 알 수 있고 그 대역폭도 $12.8 \sim 35.7$ kHz ($\Delta = 88.1\%$)로 나타나게 된다.

Al과 Ti, 두 소재의 head mass를 이용하여 tonpilz 트랜스듀서를 구성하였을 때 나타나는 음압의 지향성을 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. 공진과 반공진 주파수에서 트랜스듀서의 진행 방향($\phi = 0^\circ$)으로의 각각 최대와 최소 지향성을 나타냄을 알 수 있다. 또한 반공진 주

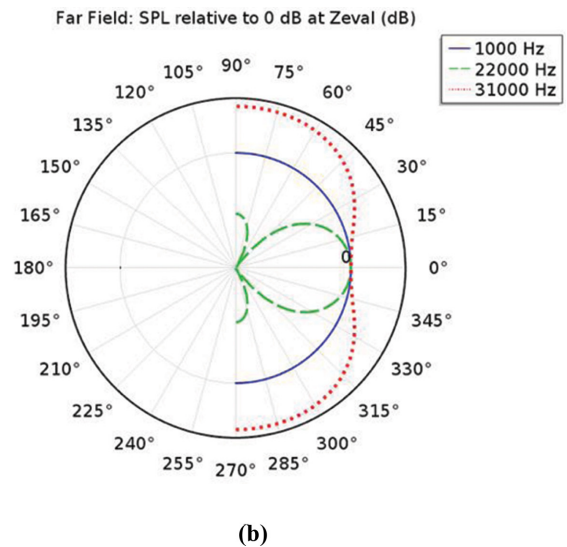
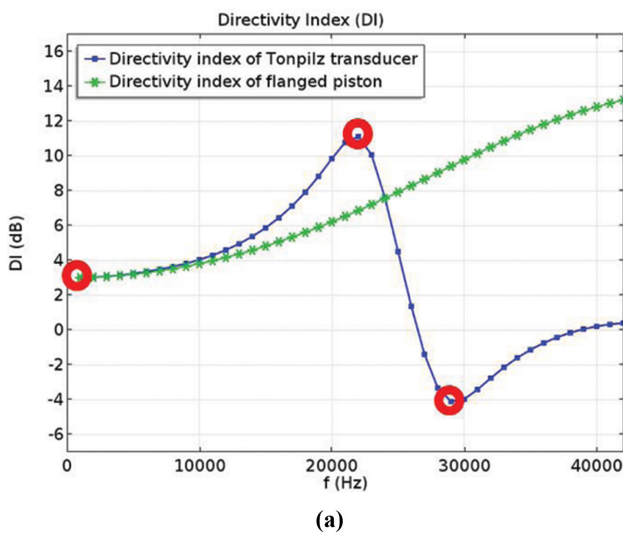


Fig. 5. (a) directivity index and (b) sound pressure level as a function of frequency in tonpilz transducer with Al head mass.

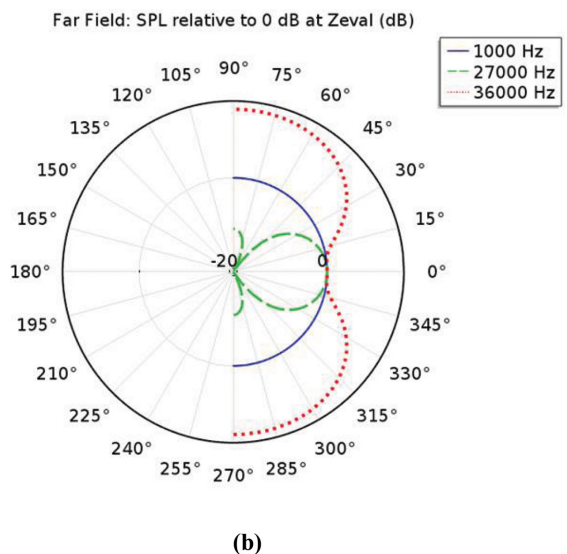
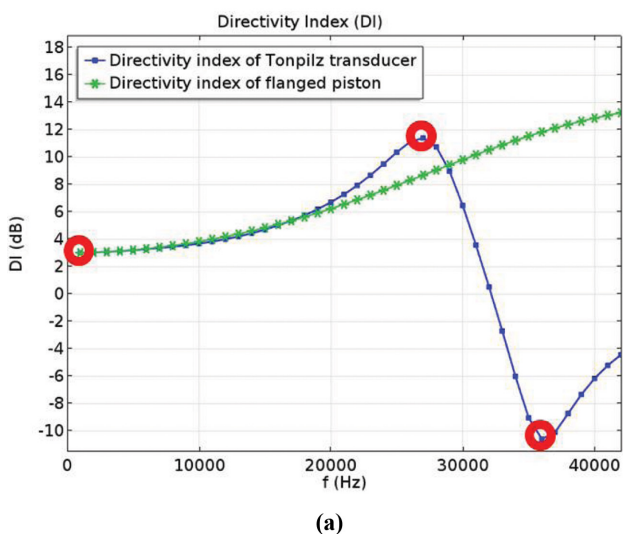


Fig. 6. (a) directivity index and (b) sound pressure level as a function of frequency in tonpilz transducer with Ti head mass.

과수에서의 음압의 지향성에서 확인할 수 있는 바와 같이 Ti 소재를 head mass로 사용할 때, 그 방향 의존성이 더 강화되면서 지향성(directivity index)이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 head mass의 구조와 재질에 따른 tonpilz 트랜스듀서의 성능에의 효과를 살펴보았다. Head mass의 형상 설계가 트랜스듀서의 bandwidth에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였고 그 형상인자는 재질에 따라 달라짐을 알 수 있었다. Al head mass에서는 그 형상인자인 ‘ θ ’가 35.5도에서 가장 이상적인 주파수 특성이 얻어지는데 반하여 Ti head mass의 경우에는 ‘ θ ’가 45도일 때 가장 넓은 TVR을 얻을 수 있었다. 이와 함께 head mass를 Al에서 Ti로 치환함으로써 트랜스듀서의 출력을 100 % 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 환경기술선도사업의 지원(Grant #: E315-00012-0501)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] K. Cepni, “A Methodology for Designing Tonpilz-type Transducers”, M. Sc. Thesis (Middle East Technical University, Turkey, 2011) p.13.
- [2] Q. Yao and L. Bjorno, “Broadband tonpilz underwater acoustic transducers based on multimode optimization”, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr. 44 (1997) 1060.
- [3] S. Chhith and Y. Roh, “Wideband tonpilz transducer with a void head mass”, Proc. Sym. Ultrason. Electro. 30 (2009) 361.
- [4] J.L. Butler, J.R. Cipolla and W.D. Brown, “Radiating head flexure and its effect on transducer performance”, J. Acoust. Soc. Am. 70 (1981) 500.
- [5] J. Kim, I. Kim and Y. Roh, “Design and fabrication of multi-mode wideband tonpilz transducers”, J. Acous. Soc. Kor. 32 (2013) 191.