

자동차용 범퍼레일의 하이드로포밍 기술 연구

손성만* · 이문용* · 이상용**

(2000년 9월 7일 접수)

A Study on the Hydroforming Technology of an Automotive Bumper Rail

S. M. Sohn, M. Y. Lee and S. Y. Lee

Abstract

Recently, the hydroforming technology has been recognized as a general technique in manufacturing industry, especially in automotive industry. Hydroforming is applied to increase strength, and to decrease weight, cost and parts. Hydroforming is based on the inflation of, for instance, a tube, coupled with axial or radial compression and by subsequent expansion and sizing against the die wall. Expansion, axial feeding, calibration are important parameters in this process. In this paper, the effects of various parameters such as internal pressure, axial feeding and friction on hydroforming of automotive bumper rail have been considered.

Key Words : Hydroforming, Bumper Rail, Forming Parameters, Thickness Distribution, Forming Defects

1. 서 론

최근 자동차 산업분야의 세계적인 구도는 국제적인 경계가 거의 없어지면서 기업간의 인수, 합병 등으로 인해 매우 급변하고 있는 실정이다. 세계적인 각 업체들은 생산성 향상, 고강도, 경량화 및 모듈화 등을 추구하며 가격 경쟁력 및 기술력을 갖추기 위해 총력을 다하고 있다. 이러한 예로 테일러 웰드 블랭크, 레이저 용접 등과 더불어 하이드로포밍 기술이 활발히 적용되고 있다. 하이드로포밍 기술은 차량 구조물의 폐단면 형상을 관재를

이용해 액압 성형 하는 기술로 유럽과 미국의 경우 차체 및 샤시 부품에 이미 적용되고 있으나 국내의 경우에는 일부 적용이 시도되고 있지만 아직까지는 자체적인 기술을 확보하기 위해서는 많은 연구가 필요하다.

튜브 하이드로포밍 기술은 일반 스탬핑 공정에 의해 생산된 부품과 비교하여 볼 때 많은 장점을 가지고 있다. 튜브를 이용한 일체 성형이므로 기존의 여러 판재를 스탬핑 하는데 소요되는 금형 수의 감소, 공정의 단축, 공정간의 이동시 소요되는 인력과 시간의 단축 등이 있고 용접 플랜지의 삭제 및 하이드로포밍에서 발생하는

* (주)성우하이텍 기술연구소

** 한국기계연구원 재료공정연구부

가공경화 현상으로 인한 강도의 증가를 이용해 적용판재의 두께를 감소시키거나 보강재의 삭제를 고려하여 경량화를 꾀할 수도 있다⁽¹⁻⁴⁾. 또한 하이드로포밍 부품을 차량에 장착하였을 때 진동, 소음의 감소와 피로 특성을 향상시킬 수 있다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 고압 튜브 하이드로포밍 장비의 가격이 매우 고가이며 제조시간이 길기 때문에 제품 생산에 소요되는 원가를 산출하여 기존 스탬핑 제품과 비교분석 후 적용 여부 및 설비 투자 규모에 관한 결정을 해야 하기 때문에 많은 어려움이 있다.

이러한 이유 외에도 실제 하이드로포밍을 연구하는데 있어 여러 요소기술을 필요로 하는데 소재기술, 설계기술, 성형공정기술, 금형기술의 네가지 정도로 분류할 수 있고 이러한 기술이 충분히 축적이 되어 있어야 하지만 국내에는 아직 성형장비가 충분치 않아 기술개발에 많은 제약이 따르며, 현실적으로 아직까지는 연구단계에 머물고 있기 때문에 활발히 적용하기에는 다소 시간이 필요하리라 예상된다.

여러 요소기술 들을 개략적으로 고찰해 보면 첫째, 소재기술에 있어서는 튜브가 성형에 필요한 충분한 연신율과 강도를 가져야 하지만 상반된 두 가지 특성을 동시에 충족시켜야 하는 어려움이 있다. 특히 조관 후 용접을 실시하는데 이때 튜브의 용접결함이 없어야 한다. 둘째, 설계기술에 있어서는 적용부품의 설계시 성형해석, 구조해석 등을 통한 예비성형의 적용여부, 튜브의 직경, 재질, 두께, 길이, 최소반경 등을 고려해야만 한다. 셋째, 성형공정기술에 있어서는 내부압력(internal pressure), 축압축력 및 압축량(axial feeding), 금형체결력 등의 여러 인자를 고려해야 한다. 특히 실제 성형에 있어서 내부압력과 축압축량은 성형을 결정하는 주요인자로 이들의 조합이 맞지 않을 때는 파열(bursting), 주름(wrinkling), 좌굴(buckling) 등의 가공불량이 발생한다⁽⁴⁻⁵⁾. 마지막으로 금형기술에 있어서는 고압의 내부압력을 고려한 금형소재 및 가공방법의 설정, 부품의 성형성 향상 및 원활한 추출을 위한 금형 분할 라인의 설정, 축압축효과와 최대화 및 마모방지를 위한 곡면의 설계 및 도금 방법의 설정등을 고려해야만 한다.

본 연구에서는 하이드로포밍 공법을 이용하여 자동차용 범퍼레일을 개발함에 있어 개략적인 공정과 더불어 실제 성형에 미치는 여러 인자들의 영향을 고찰해 보고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 소재 및 성형해석

본 연구에서는 내압성형법으로 범퍼레일의 최적 성형조건을 도출하여 주름이나 미성형, 터짐 등의 가공불량 없이 성형할 수 있는 적정 성형압력을 도출하기 위하여 최대 압력을 각각 100bar, 200bar, 300bar의 3단계에 대하여 Pam-Stamp를 이용하여 해석하였다. 이때 사용된 소재는 STKM11A, 두께 1.4mm, 직경 104mm의 튜브로 해석에 사용된 소재의 물성치는 Table 1에 나타내었으며 Pam-Stamp를 이용하여 성형해석을 수행하였다.

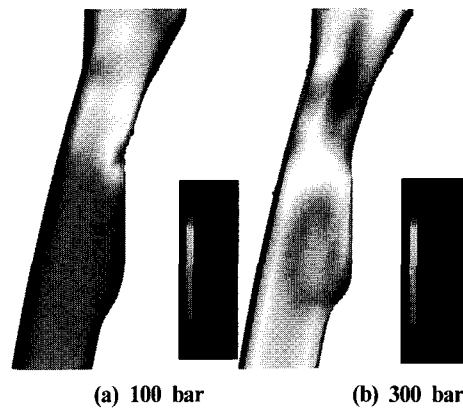


Fig. 1 Thickness distribution analysis : STKM11A, 1.4t

Fig. 1은 100bar, 300bar의 경우에 대하여 두께 분포와 모서리 부위 성형여부를 해석한 결과로 100bar의 경우 모서리부가 완전히 성형되지 않았지만 최종 성형내압이 300bar인 경우 모서리부가 완전히 성형되었고 주름이나 파열과 같은 가공불량 없이 성형되었다. 이때 소재의 최소 벽두께는 1.05mm로 내압의 상승으로 인해 소재가 확관이 되면서 벽두께가 얇아지는 현상으로 축압축(axial feeding) 장치를 이용하여 소재를 유입시킴으로 인해 국부적인 박관화를 일부 예방할 수 있다.

Table 1 Mechanical properties of the STKM11A tube

| | YS (kgf /mm ²) | TS (kgf /mm ²) | El. (%) | fitting curve | | |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|------------|---------------------------------------|--------------|--------|
| | | | | $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$ | | |
| | | | | K | ϵ_0 | n |
| STKM11A | 18.7 | 29.0 | 44.7 | 54.16 | 0.07957 | 0.2736 |

2.2 실험장치

Fig. 2는 범퍼레일 시제품 성형에 사용된 하이드로포밍 설비의 개략도로서 국내에서 자체 제작된 2500ton 장비를 사용하여 시험하였다. 하이드로포밍 프레스 장비는 크게 본체, 축압축 장치, 금형의 3가지로 구성되어 있으며 본체는 고압의 내압을 견디며 금형을 체결할 수 있도록 용량이 충분해야 하며 다이 밴딩(die bending)을 해야하는 경우 램을 조절할 수 있도록 설계되었다. 축압축 장치는 가장 중요한 장치로 소재를 밀봉(sealing)하고 소재를 축방향으로 압축하며 고압의 내압을 발생시키는 장치로 하이드로포밍 성형여부를 결정할 수 있는 장치이기도 하다. 따라서 가공매체인 비압축성 유체를 제어할 수 있게 서보 밸브를 장착하여 미세하게 압력조절을 할 수 있도록 설계되었다.

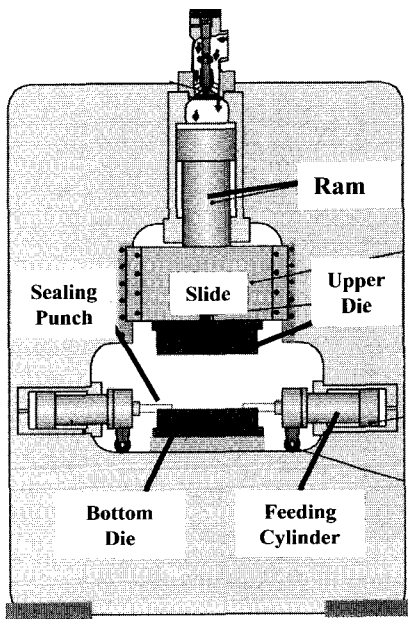


Fig. 2 Schematic diagram of hydroforming press system

Fig. 3은 하이드로포밍 금형으로 상, 하형 금형(B,C)이 프레스 본체에 장착되어 있고 금형에 축압축 장치가 장착되어 성형하였다. 금형은 고압의 내압을 견디기 위해 공구강을 기계가공하여 만들지만 본 실험에서는 시작금형인 관계로 주조하여 제작하였고, 마모방지 및 소재유입을 원활히 하기 위하여 도금처리를 하는 것이 일반적이지만 사상처리만 하였다.

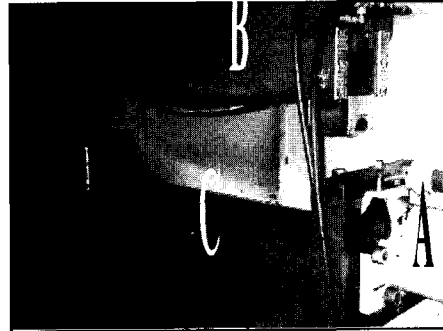


Fig. 3 Die system for bumper rail hydroforming

2.3 실험방법

하이드로포밍의 공정은 아래의 Fig. 4와 같이 실시하였다. 먼저 소재를 금형에 장착한 후 펀치로 튜브 양 끝단을 밀봉하여 펀치 내부의 중공관을 통해 튜브내부에 물을 채운다. ㉠ 단계에 들어가면 정적내압을 유지하며 램이 하강하여 다이밴딩을 실시하였고 이때 축방향으로 일정한 경로로 압축을 가하게 된다. 금형이 완전히 체결된 후 내압을 상승시켜 성형공정에 들어가며 최종 교정(calibration)후 금형이 열리면서 범퍼레일을 추출하였다.

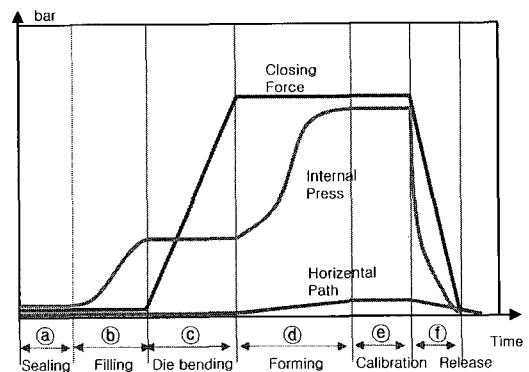


Fig. 4 Hydroforming process

3. 실험결과 및 고찰

3.1 장비의 신뢰성 및 응답성

Fig. 5는 하이드로포밍 장비의 신뢰성을 검토한 것으로 X축을 단계 혹은 시간으로 잡고 Y축에 램의 위치, 축방향 이송량, 그리고 내압을 각각 다른선으로 표현하

여 3가지의 성형인자가 하이드로포밍 공정에 있어 동시에 어떠한 관계를 갖는지 유추하고자 하였다. 또한 프로그램에 의한 입력 값을 파란색 선으로, 실제 응답된 값들은 붉은색 선으로 나타내어 프로그램 값과 실제 값의 오차 정도와 장비의 제어성능 및 응답성을 알고자하였다. 그림에서 축방향 이송량과 램의 이송량은 프로그램 값과 거의 유사하여 제어가 잘 되는 것으로 나타났지만 내압의 경우 실제로는 선형적인 값을 주었지만 진폭을 그리는 것으로 나타났다.

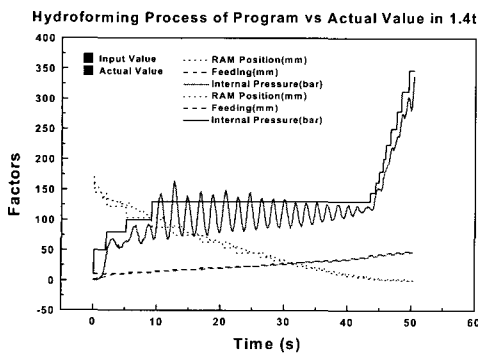


Fig. 5 Verification of hydroforming control system (by Kang Eng.)

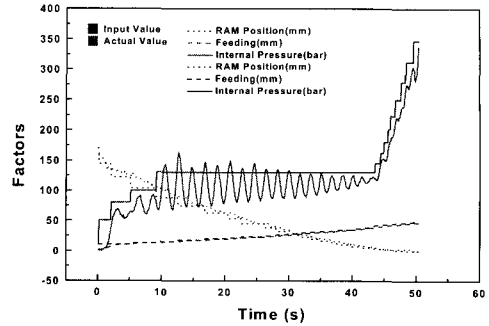
그러나 전체공정으로 볼 때 진폭을 그리는 저압 구간은 성형에 결정적인 영향을 미치는 구간은 아니고 후반부의 내압이 증가하는 성형 및 고정구간은 프로그램 값과 근접하려는 경향을 나타내고 있기 때문에 본 실험에 사용된 하이드로포밍 장비는 신뢰성이 있는 것으로 확인하였다.

3.2 하이드로포밍 성형 결과

하이드로포밍의 정상적인 성형에서 나타나는 인자들의 경로와 별칭에 의해 파열되었을 때의 경로를 Fig. 6에 나타내었다. (a)는 축압축량이 양 끝단 각각 46.55mm 정도이고 337 bar까지 내압이 상승하여 하이드로포밍을 실시하였으나, (b)는 성형내압이 95bar 정도까지만 상승하였다. 이때 압축량은 79.8mm로 두께 1.4mm에 비해 다소 증가했지만 소재자체의 결함, 즉 튜브 용접라인이 재료의 항복응력 이하에서 파열되어 결과적으로 Fig. 7(b)와 같이 파열에 의해 성형되지 못하였다.

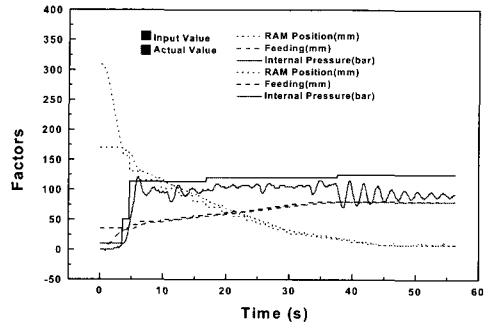
Fig. 6(b)와 같이 파열(bursting)이 일어나도 내압은 저압 상태로 그대로 유지가 되는데 이는 파열부위에 유체가 배출되어도 서보밸브에서는 입력된 압력만큼 계속적으로 유체를 공급하기에 배출된 유량과 공급된 유량

Hydroforming Process of Program vs Actual Value in 1.4t



(a) Regular hydroforming process

Hydroforming Process of Program vs Actual Value in 1.6t

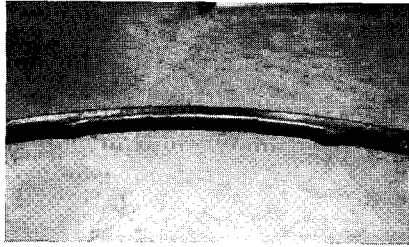


(b) Irregular hydroforming process

Fig. 6 Comparison of regular and irregular forming path

이 평형상태를 이루기 때문이다. 이는 파열뿐만 아니라 밀봉(sealing)에 문제가 있을 때에도 동일한 현상이 나타난다.

Fig. 7(a)는 정상적인 경로를 통해 성형된 하이드로포밍 범퍼레일의 형상으로 주름이나 파열없이 거의 완벽한 형상으로 성형되었으나 반경이 아주 작은 곡면부위는 충분히 성형되지 않았다. 성형해석의 경우 300bar로도 모든 최소 반경부가 성형되었지만 실제 실험에 있어서는 337bar인 경우에도 완전성형이 되질 않아 해석결과와 차이가 있음을 알 수 있었다. 이는 하이드로포밍 공정이 앞서 설명한 바와 같이 성형에 미치는 많은 변수들로 인해 정확한 해석이 어렵고 이러한 문제의 해결을 위해서는 해석과 실험에서 얻은 데이터를 지속적으로 비교 분석해야 할 것으로 판단된다. (b)는 가공불량의 일종으로 항복응력 이하에서 용접선이 파열된 양상을 나타내고 있다.



(a) Hydroformed bumper rail (STKM11A, 1.4t)



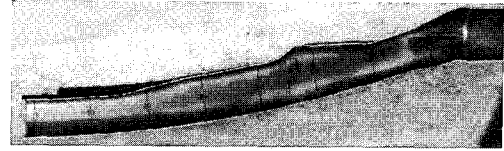
(b) Bursting of welding line (STKM11A, 1.6t)

Fig. 7 Appearances of hydroformed bumper rail

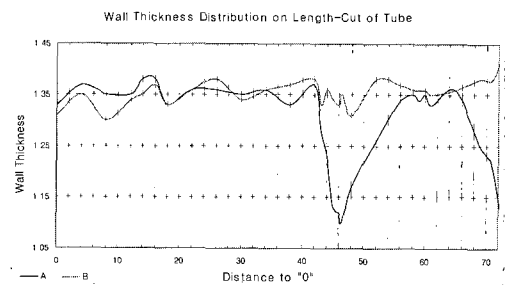
3.3 범퍼레일의 길이방향 두께분포

튜브 하이드로포밍은 원리상 확관에 의해 가공되기 때문에 두께분포는 중요한 의미를 갖는다. 성형품에서 두께 분포가 균일하지 않다면 두께가 작아지는 부위는 상대적으로 강성이 취약해진다. 이러한 두께 분포의 경향을 파악함으로써 제품설계나 성형에 미치는 영향도 유추할 수 있다.

Fig. 8은 범퍼레일 성형품의 길이방향 두께 분포를 분석한 결과를 나타내었다. (a)는 길이방향의 단면형상을 보여주고 있고 이 단면에서 두께분포의 변화양상을 (b)에 측정값으로 나타내었다. 원점에서 47mm 지점에서 두께가 급격히 얇아지는 것을 알 수 있는데 이는 A 라인의 두께분포로 프런트 사이드 멤버와 장착이 되는 부위이며 확관율도 가장 심한 부분이다. 그러나 프런트 사이드 멤버가 장착이 될 경우 국부적인 집중응력을 받기보다는 면으로 접촉하기 때문에 응력이 분산되며 가공경화로 인한 강도의 증가도 기대되기에 큰 문제는 없는 것으로 판단된다. 이에 반해 B 라인은 균일한 두께 분포를 나타내었다.



(a) Cross section

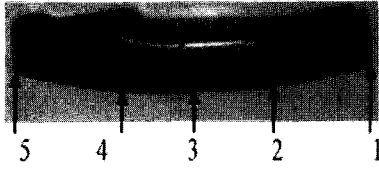


(b) Measurements of thickness distribution

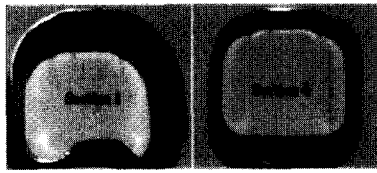
Fig. 8 Longitudinal cross section and thickness distribution in hydroformed bumper rail

3.4 범퍼레일의 원주방향 두께분포

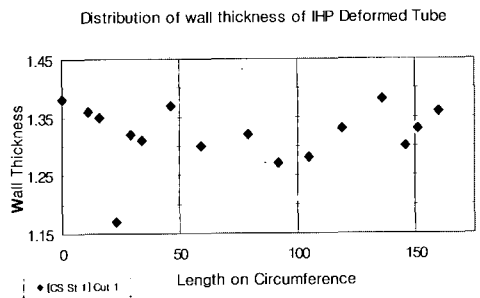
원주방향의 두께분포는 Fig. 9(a), (b)의 외관사진과 같이 범퍼 중앙부를 단면 1로 하여 다섯 부위의 단면에 대하여 두께분포를 측정하였다. Fig. 9(c)의 단면 1은 범퍼 충돌시 가장 먼저 접촉하는 부위로 사진의 12시 방향을 "0"점으로 시계방향으로 6시 방향까지 측정된 것으로 24mm 부근에서 약 1.17mm로 두께가 얇아졌다. 확관율이 그다지 높지 않음에도 불구하고 강성확보를 위해 엠보싱(embossing) 처리를 했는데 이 부위에서 국부적인 변형이 과다하게 발생하였고 실제 이 부위에서 파열이 많이 발생하였다. 이는 전체 확관율과는 전혀 다른 의미로 받아들여야 하며 설계시 충분히 고려해야 할 인자라고다. Fig. 9(d)의 단면 4는 최대 확관이 되는 부위로 길이방향의 두께 분포에서 가장 얇은 벽두께를 나타낸 곳과 동일한 위치이다. 12시 방향을 기점으로 하여 32mm 부위와 135mm 부위의 두께가 얇아진 것을 관찰할 수 있는데 전자의 경우는 확관에 의해 금형에 닿았던 소재가 큰 마찰력에 고착되면서 국부적인 박관화 현상이 발생한 것으로 사료되며 후자의 경우는 확관율이 가장 높은 부위이므로 벌징에 의해 박관화가 진행된 것으로 판단된다.



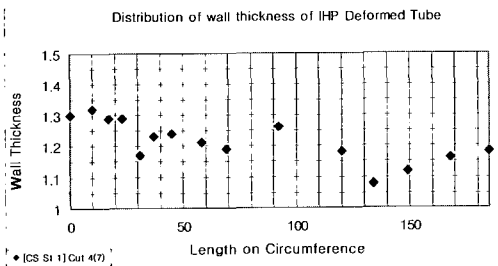
(a) Measured position



(b) Appearances of section 1 and 4



(c) Wall thickness in section 1



(d) Wall thickness in section 4

Fig. 9 Circumferential thickness distribution of hydroformed bumper rail

4. 결론

하이드로포밍 성형과정 중 많은 성형인자가 고려되어야 하지만 가장 중요한 인자는 내부압력과 축방향 압축으로 정량적인 값뿐 아니라 시간에 따른 상호간의 경로 또한 성형에 중요한 영향을 미치므로 많은 실험을 통해 안정적인 성형경로도(Forming Path Diagram)를 작성할 필요가 있다.

하이드로포밍 설계에 있어 제품의 각 단면별 확관율은 중요한 의미를 갖지만 단면형상에 따라 금형과 소재의 고착현상에 따른 국부적인 박관화 현상도 충분히 고려하여 설계하여야 한다.

하이드로포밍 공정은 성형해석 결과와 실제결과가 많은 편차를 나타냈는데 이는 많은 성형인자와 경험이 충분치 못한 것으로 사료되며 실험을 통해 얻은 데이터를 통해 보다 정확한 경계조건(boundary condition)을 확보할 필요가 있다.

5. 참고 문헌

- (1) 권재욱, 이경돈, 1997, "Hydroforming 공법의 소개", ADVANCE, Vol. 5, pp. 28~32.
- (2) Morphy, G., 1997, "Hydroforming High Strength Steel Tube for Automotive Structural Applications Using Expansion" QTOCSAE TRANSACTION, 106(5), pp. 341~343.
- (3) 김영석, 박재석, 1999, "관재의 하이드로포밍 기술에 대한 실험적 연구", KSAE 춘계 학술대회, Vol. II, pp. 759~761.
- (4) Leitloff, F. U., Geisweid, S., 1998, "自動車産業におけるチューブハイドロフォミング技術の適用", JSTP (Japan Society for Technology Plasticity), Vol. 39(453), pp. 1045~1047.
- (5) Ahmetoglu, M., Sutter, K., 1998, "管のハイドロフォミング技術", JSTP, Vol. 39(453), pp. 1039~1043.